

УДК 621.316.97

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого

УПРОЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОМЕХ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ КОРПУСА ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ, ВЫЗВАННОГО ИМПУЛЬСОМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Рассматривается метод моделирования и оценки электромагнитного излучения неоднородностей корпусов электронной техники, подверженных электростатическому разряду. Предлагается осуществлять расчеты путем применения к спектру разряда известных решений для электромагнитного поля простых излучателей. Приведены расчетные соотношения для основных форм неоднородностей корпусов, встречающихся на практике. Эти соотношения позволяют оценить опасность излучения для элементной базы узлов технических средств и выявить уязвимые для ЭСР неоднородности корпуса электронного технического средства.

Существующая в настоящее время нормативная документация по электромагнитной совместимости требует проведения испытаний электронной и микропроцессорной техники на устойчивость к электростатическим разрядам (ЭСР). При этом импульсы испытательного генератора производятся на различных неоднородности в корпусах этих технических средств (ТС): отверстия, скрепления, органы управления и т. д. В нормативной документации по проведению испытаний на устойчивость к ЭСР рекомендуется осуществлять испытательные разряды на все неоднородности, на которые возможен ЭСР при эксплуатации. Последствия разряда в конкретную точку остаются неизвестными и, таким образом, все точки оказываются одинаково значимыми, чего в реальных электронных устройствах не существует. Поэтому испытания на устойчивость к ЭСР требуют больших затрат труда и времени, при этом остается вероятность пропуска какой-либо точки, разряд в которую вызовет отказ или сбой технического средства. Следовательно, рассматриваемая процедура испытаний содержит неопределенность, что снижает достоверность полученных результатов.

Повысить достоверность испытаний на устойчивость к ЭСР возможно, привлекая методы математического моделирования. Под воздействием импульса ЭСР неоднородности корпуса порождают электромагнитные, в общем случае, поля в области пространства внутри корпуса и наводят помехи в узлах изделия [1]. Зная свойства паразитных излучателей, можно выявить наиболее уязвимые для ЭСР места и проводить их испытания в первую очередь. Процедура испытаний упорядочивается и производится на основе некоторой априорной информации, что делает более достоверными полученные результаты.

Математическому моделированию помеховых электромагнитных полей при ЭСР посвящено достаточное количество публикаций. Так, в работах [2, 3] рассмотрено электромагнитное излучение от системы заземления электронного ТС, на которую произошел электростатический разряд. В работе [4] рассмотрено проникновение в корпус ТС излучения от прямоугольного отверстия, находящегося под воздействием импульса ЭСР и на первом этапе определено распределение тока по корпусу путем численного решения методом моментов соответствующих интегральных уравнений. Затем по найденному распределению тока вычислялось электромагнитное поле внутри корпуса. Тем не менее, численный анализ электромагнитных процессов при

воздействии ЭСР на неоднородность корпуса электронной аппаратуры достаточно сложен. В этом случае корпус ТС образует резонатор паразитной щелевой антенны, расчет электромагнитного поля в котором требует численного решения интегральных уравнений с ядром сложной математической формы [5]. Реализация этого метода в программе для компьютерного анализа также непростая. С другой стороны, наличие простых моделей и методов для расчета помех позволяет выполнить необходимые оценки на этапах проектирования и испытания электронных технических средств и принимать решения по оптимизации процедуры испытаний и повышению стойкости этих средств к ЭСР [6]. Настоящая статья посвящена рассмотрению таких моделей для основных типов неоднородностей корпусов ТС.

В статье предполагается, что импульс напряжения генератора-имитатора ЭСР моделируется двойной экспонентой вида

$$u(t) = U(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \quad (1)$$

где U – напряжение импульса, В; α_1, α_2 – параметры импульса, c^{-1} ; t – время, с.

Спектр импульса (1) по [7]

$$S(j\omega) = \frac{U(\alpha_1 - \alpha_2)}{(j\omega + \alpha_1)(j\omega + \alpha_2)}, \quad (2)$$

где ω – круговая частота, рад/с.

Электростатический разряд характеризуется чрезвычайно широкой полосой частот в спектре (по данным [1] максимальная частота в спектре ЭСР равна 5 ГГц или $3,14 \cdot 10^{10}$ рад/с), чем во многом и обуславливается его высокая опасность для электронной техники. Для повышения адекватности моделирования необходимо учитывать это обстоятельство. Чтобы осуществить выбор средств анализа, требуется, в начале, определить границу ближней и дальней зон излучения по известному соотношению

$$r_r \ll \frac{c}{f_r},$$

где r_r – граница зон излучения, м; c – скорость света, м/с; f_r – граничная частота в спектре.

Подстановка численных значений показывает, что граница зон излучения $r_r \ll 6 \cdot 10^{-2}$ м. Поскольку корпуса электронной аппаратуры имеют зачастую размеры больше указанного значения, то анализ излучения воз-

буждаемых ЭСР неоднородностей следует проводить в дальней зоне излучения. В этой зоне электрические и магнитные составляющие излучения связаны волновым сопротивлением среды [7].

Поскольку спектр импульса можно представить как совокупность бесконечного числа гармоник, и то к каждой гармонике, а следовательно, ко всему спектру можно применить известные решения для электромагнитного поля простых излучателей в спектральной области [8]. При этом рассматривается возбуждение неоднородности прямым контактным электростатическим разрядом. В силу малых размеров неоднородности по сравнению с размерами корпуса электронного технического средства и хорошей проводимости материала корпуса предполагается, что затухание напряжения вдоль краев неоднородностей в виде отверстия либо щели пренебрежимо мало.

Излучение прямоугольного отверстия с соизмеримыми размерами сторон может быть представлено как излучение элемента Гюйгенса [7, 9]. Тогда напряженность электрического поля в плоскости элемента с учетом сделанных ранее предположений

$$E(t) = \frac{u(t)}{b}, \quad (3)$$

где b – сторона, перпендикулярная той, к которой приложен импульс.

Спектр напряженности поля по (1–3)

$$E(j\omega) = \frac{U(\alpha_1 - \alpha_2)}{b(j\omega + \alpha_1)(j\omega + \alpha_2)}, \quad (4)$$

а электрические составляющие поля

$$E_{\Theta} = \frac{jabE(j\omega)e^{-\lambda kr_0}}{2\lambda r_0}(1 + \cos\varphi) \times \frac{\sin(0,5ka \sin\Theta \sin\varphi) \sin(0,5kb \sin\Theta \cos\varphi)}{0,5ka \sin\Theta \sin\varphi \quad 0,5kb \sin\Theta \cos\varphi},$$

$$E_{\varphi} = \frac{-jabE(j\omega)e^{-\lambda kr_0}}{2\lambda r_0}(1 + \cos\varphi) \times \frac{\sin(0,5ka \sin\Theta \sin\varphi) \sin(0,5kb \sin\Theta \cos\varphi)}{0,5ka \sin\Theta \sin\varphi \quad 0,5kb \sin\Theta \cos\varphi},$$

где a – сторона отверстия, м; λ – длина волны, м; k – волновое число, рад/м; r_0 – расстояние, м; Θ , φ – сферические координаты, рад.

При рассмотрении излучения круглого отверстия предполагается по [7] и [10], что напряжение в раскрытом отверстии изменяется по закону

$$u(r, t) = \frac{u(t)r_0}{R},$$

а напряженность поля $E(t) = \frac{\partial u(r, t)}{\partial r_0} = \frac{u(t)}{R}$.

Спектр этого поля по (1)

$$E(j\omega) = \frac{U(\alpha_1 - \alpha_2)}{R(j\omega + \alpha_1)(j\omega + \alpha_2)},$$

где R – радиус отверстия, м.

Тогда, пользуясь результатами из [7] и [9], можно показать, что электрические составляющие излучения отверстия описываются выражениями

$$E_{\Theta} = \pi R^2 \frac{E(j\omega)}{2\lambda r_0} e^{-jkr_0} (1 + \cos\Theta) \cos\varphi;$$

$$E_{\varphi} = \pi R^2 \frac{jE(j\omega)}{2\lambda r_0} e^{-jkr_0} (1 + \cos\Theta) \sin\varphi.$$

Задача об излучении тонкой щели решена в [11]. Формулы для электромагнитного поля щели, возбуждаемой импульсом со спектром (3), могут быть получены из указанного решения и имеют вид

$$E_{\varphi} = j \frac{S(j\omega)l}{\lambda r_0} \sin\Theta e^{-jkr_0}; \quad (5)$$

$$H_{\Theta} = -j \frac{S(j\omega)l}{Z_0 \lambda r_0} \sin\Theta e^{-jkr_0},$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ – импеданс свободного пространства.

При рассмотрении излучения части болтового крепления, находящегося внутри корпуса, следует учесть, что при высокой культуре производства эти детали имеют малую длину, не более 10^{-2} м. Тогда допустимо считать, что ток в каждой точке такой паразитной антенны имеет одинаковую амплитуду и фазу. Поэтому излучение болтового скрепления может быть вычислено по формуле [6]

$$E_{\Theta} = j\omega l \times 10^{-6} \underline{I} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \sin\Theta, \quad (6)$$

где l – длина соединения, м; \underline{I} – комплекс тока в паразитной антенне, А.

Ток в паразитной антенне рассматриваемого вида можно определить по выражениям, справедливым для отрезка линии без потерь [12]:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2} \right); \quad \underline{I}_1 = \underline{U}_2 Y_L, \quad (7)$$

где \underline{U}_1 – комплекс напряжения в начале соединения, В; \underline{U}_2 – комплекс напряжения в конце соединения, В; $Z_L = j\omega L$ – комплекс индуктивного сопротивления неоднородности, Ом; $Y_L = j\omega C$ – комплекс емкостной проводимости линии, См.

Тогда комплекс тока в линии из (7)

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1(j\omega)}{\left(1 - \frac{\omega^2 LC}{2} \right)} j\omega C. \quad (8)$$

Подстановка (8) и (2) в (6) дает окончательную формулу для расчета поля, излучаемого болтовым соединением:

$$E_{\Theta} = -\omega^2 l C \cdot 10^{-6} \frac{S(j\omega)}{\left(1 - \frac{\omega^2 LC}{2} \right)} \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \sin\Theta. \quad (9)$$

Выражение для спектра неоднородности той или иной формы позволяет вычислить плотность потока энергии излучения этой неоднородности в месте расположения узла рецептора по соотношению, следующему из теоремы Рэлея

$$w = \frac{1}{2\pi Z_0} \int_0^{\infty} E^2(\omega) d\omega. \quad (10)$$

По величине плотности потока энергии можно судить о последствиях воздействия помехи на узел рецептора. Следовательно, можно сравнивать последствия разряда на различные паразитные излучатели и устанавливать процедуру испытания электронного ТС.

В качестве примера в статье выполнен расчет плотности потока энергии от узкой щели длиной $15 \cdot 10^{-2}$ м в точках с угловой координатой $\Theta = \pi/6$ рад, находящихся на различных расстояниях от щели. Предполагалось, что щель возбуждается импульсом генератора ЭСР с параметрами $U = 1,235 \cdot 10^4$ В, $\alpha_1 = 9,324 \cdot 10^7$ с $^{-1}$, $\alpha_2 = 3,871 \cdot 10^8$ с $^{-1}$.

Эти параметры соответствуют испытанию на устойчивость к ЭСР по третьей степени жесткости с амплитудой импульса 6000 В. Максимальная частота в спектре ЭСР равна 5 ГГц или $3,14 \cdot 10^{10}$ рад/с [1]. После подстановки (2) в (5), выделения модуля комплексного числа и возведения в квадрат получается выражение для спектральной плотности электрического поля щели

$$E^2(\omega) = \frac{U^2 l^2 (\alpha_2 - \alpha_1)^2}{4\pi^2 c^2 r_0^2} \sin^2 \Theta \times \frac{\omega^2}{(\alpha_1 \alpha_2 - \omega^2)^2 + \omega^2 (\alpha_2 + \alpha_1)^2} \quad (11)$$

Плотность потока энергии вычислялась путем подстановки (11) в (10) и численного интегрирования в пределах от 0 до $3,14 \cdot 10^{10}$ рад/с. Полученные значения плотности потока энергии на различных расстояниях от щели сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Плотность энергии излучения от щели

Расстояние от щели, м	Плотность потока энергии, Дж/м ²	Расстояние от щели, м	Плотность потока энергии, Дж/м ²
0,04	$1,798 \cdot 10^{-5}$	0,13	$1,705 \cdot 10^{-6}$
0,05	$1,151 \cdot 10^{-5}$	0,14	$1,47 \cdot 10^{-6}$
0,06	$8,002 \cdot 10^{-6}$	0,15	$1,28 \cdot 10^{-6}$
0,07	$5,879 \cdot 10^{-6}$	0,16	$1,125 \cdot 10^{-6}$
0,08	$4,501 \cdot 10^{-6}$	0,17	$9,968 \cdot 10^{-7}$
0,09	$3,556 \cdot 10^{-6}$	0,18	$8,891 \cdot 10^{-7}$
0,10	$2,881 \cdot 10^{-6}$	0,19	$7,98 \cdot 10^{-7}$
0,11	$2,381 \cdot 10^{-6}$	0,20	$7,202 \cdot 10^{-7}$
0,12	$2,0 \cdot 10^{-6}$	0,13	$1,705 \cdot 10^{-6}$

Анализ данных таблицы показывает, что при разряде генератора-имитатора ЭСР возникают достаточно высокие плотности потока энергии излучения. Это объясняется, главным образом, особенно широкой полосой частот электростатического разряда. Определить энергию, поглощаемую паразитными антеннами, которые образуют линии связи печатных плат [2] (рисунок 1), можно по известному соотношению

$$W = \frac{wS}{2}, \quad (12)$$

где W – энергия помех, Вт; S – площадь паразитной антенны, м².

Так как плотность потока энергии величина скалярная, то вычисление по (12) проще, нежели интегрирование составляющих векторов электромагнитного поля, используемое в [2].

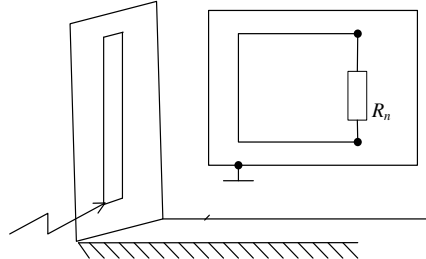


Рисунок 1 – Расположение паразитных антенн в рецепторе помех

Получено 11.03.2013

D. V. Komnaty. The simplified models of electronic equipment package discontinuity disturbance radiation during the electrostatic discharge exposure.

Modeling and estimation method of electromagnetic radiation from electronic technique packages discontinuities, exposed to electrostatic discharge, is considered in the article. It is proposed to fulfill the calculations by application of known solutions for simply radiators electromagnetic fields to discharge spectrum. The calculation expressions are added for basic packages discontinuities forms are found in practice. These expressions give the opportunity to estimate the danger of radiation for hardware units' components and reveal the vulnerable for electrostatic discharge electronic device package discontinuities.

Итак, в статье получены расчетные соотношения для оценки спектра электромагнитного поля, которое создается неоднородностями различной формы в корпусе электронного технического средства. Эти соотношения дают возможность вычислить плотность потока энергии излучения неоднородности в различных точках внутри корпуса. По плотности потока энергии производится оценка опасности излучения для элементной базы узлов технических средств и выявляются уязвимые для ЭСР неоднородности корпуса электронного технического средства. Эти неоднородности испытываются в первую очередь, что снижает вероятность ошибки испытателя. Приведенные соотношения охватывают наиболее распространенные на практике формы неоднородностей корпусов. Аналитическая форма выражений для спектра поля существенно упрощает анализ распространения помех в корпусе ТС. Поэтому предлагаемый метод расчета электромагнитных процессов при испытаниях на устойчивость к ЭСР с помощью генераторов-имитаторов может найти широкое практическое применение.

Список литературы

- 1 Кечиев, Л. Н. Защита электронных средств от воздействия статического электричества / Л. Н. Кечиев, Е. А. Пожидаев. – М. : Издательский дом «Технологии», 2005. – 352 с.
- 2 Keenan, R. K. Some fundamental aspects of ESD testing. Part II / R. K. Keenan, L. A. Rosi // 1992 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y., 1992. – P. 469–473.
- 3 Angeli, M. Modeling and experimental activity about the coupling of the ESD through the grounding system / M. Angeli, E. Cardeli, B. Tellini // International Symposium on Electromagnetic Compatibility / University of Roma “LA Sapienza”. – Milan, 1998. – P. 652 – 657.
- 4 Cerri, G. ESD Field Penetration Through Slots into Shielding Enclosures: A Time Domain Approach / G. Cerri [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1997. – Vol. 39. – No 4. – P. 377–386.
- 5 Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский [и др.]; под ред. Д. И. Воскресенского. – М. : Радио и связь, 1987. – 432 с.
- 6 Кечиев, Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л. Н. Кечиев. – М. : ООО Группа «ИДТ», 2007. – 616 с.
- 7 Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М. : Мир, 1964. – 713 с.
- 8 Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1978. – 544 с.
- 9 Лавров, А. С. Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Е. Резников. – М. : Советское радио, 1974. – 386 с.
- 10 Очан, Ю. С., Сборник задач по методам математической физики / Ю. С. Очан. – М. : Высшая школа, 1973. – 192 с.
- 11 Гольдштейн, Л. Д. Электромагнитные поля и волны / Л. Д. Гольдштейн, Р. В. Зернов. – М. : Советское радио, 1971. – 664 с.
- 12 Каллер, М. Я. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи / М. Я. Каллер, Ю. В. Соболев, А. Г. Богданов. – М. : Транспорт, 1987. – 335 с.