

УДК 621.316.97

Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОМЕХ КРУГЛЫМ ОТВЕРСТИЕМ, ПОДВЕРЖЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

Рассматривается метод моделирования и оценки электромагнитного излучения из круглого отверстия в корпусе электронной техники, возникающего под воздействием электростатического разряда. Предлагается осуществлять расчеты путем применения к спектру разряда известных решений для электромагнитного поля простых излучателей. Осуществлен вывод расчетных соотношений для составляющих электромагнитного помехового поля и плотности потока энергии помех. Эти соотношения позволяют оценить опасность излучения для элементной базы узлов технических средств, и выявить уязвимые для ЭСР круглые отверстия корпуса электронного технического средства.

Согласно существующей нормативной документации по электромагнитной совместимости аппаратура систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) подлежит испытанию на устойчивость к электростатическим разрядам (ЭСР). Испытания на устойчивость к прямому контактному разряду производятся путем воздействия испытательным генератором на различные неоднородности в корпусах этих технических средств (ТС). Под воздействием импульса ЭСР неоднородности корпуса порождают электромагнитные, в общем случае, поля в области пространства внутри корпуса и наводят помехи в узлах изделия [1]. Оценка параметров сгенерированных таким образом помех расчетным путем позволяет выявить наиболее уязвимые точки на корпусе аппаратуры СЖАТ и провести их испытания в первую очередь. Тем самым процедура испытаний упорядочивается на основании конструктивных особенностей тестируемого оборудования, связанных с расположением и свойствами источников и рецепторов электромагнитных помех. В свою очередь, такой метод проведения испытаний СЖАТ повышает адекватность испытаний, что особенно необходимо для систем обеспечения безопасности движения поездов.

На практике очень часто встречается неоднородность корпуса в форме круглого отверстия. В [1] отмечается, что отверстия, не производящие эмиссии помех внутрь корпуса электронного технического средства должны иметь очень малые размеры: не более единиц миллиметров. Но по условиям эксплуатации изготовление корпусов микронного оборудования, имеющих отверстия только малых размеров, затруднительно. Следовательно, почти каждое отверстие в корпусе является каналом проникновения электромагнитных помех. Тем не менее, анализу помеховых электромагнитных полей, излучаемых при возбуждении круглого отверстия внешним источником помех, посвящено небольшое количество работ. В [2] описан метод Мандельштама-Кадена для расчета поля, проникающего через отверстие внутрь корпуса ТС. Метод сводится к введению в отверстие электрического или магнитного диполя, поле которого эквивалентно полю отверстия. Но параметры указанных диполей определены, главным образом, для ближней зоны монохроматического излучения при возбуждении отверстия внешним полем, а не импульсом напряжения, как это происходит при испытаниях на устойчивость к ЭСР. В [3] рассмотрено проникновение через круглое отверстие статического

электрического поля. Такой же характер поля принят в [4]. А в [5] задача о возбуждении помехового поля ЭСР внутри корпуса технического средства рассмотрена методом интегральных уравнений во временной области только для прямоугольного отверстия. Интегральные уравнения решались численным методом последовательных приближений. На первом этапе расчета вычислялось распределение плотности электрического тока по корпусу методом моментов, на втором – по полученным значениям плотности тока вычислялись характеристики электромагнитного поля внутри корпуса. Такая процедура расчета требует значительных затрат времени на реализацию.

Проведенный анализ имеющихся публикаций показывает, что полученные в них результаты недостаточны для анализа эмиссии помех круглым отверстием при воздействии ЭСР. В этом случае необходим расчет электромагнитного излучения с широкой полосой частот до 5 ГГц [1]. Разработка простой модели для анализа помех в этом случае позволит выполнить необходимые оценки на этапах проектирования и испытания микронных ТС ЖАТ, принимать решения по оптимизации процедуры испытаний и повышению стойкости этих средств к ЭСР. Решению этой задачи посвящена настоящая статья.

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, с^{-1} ; t – время, с.

Спектр импульса (1) по [6]

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

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 вначале определить гра-

ницу 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 возбуждаемых ЭСР неоднородностей следует проводить в дальней зоне излучения. В этой зоне электрические и магнитные составляющие излучения связаны волновым сопротивлением среды [6].

Поскольку спектр импульса можно представить как совокупность бесконечного числа гармоник, то к каждой гармонике, а следовательно, ко всему спектру, можно применить известные решения для электромагнитного поля простых излучателей в спектральной области [7]. В силу малых размеров отверстия по сравнению с размерами корпуса электронного технического средства и хорошей проводимости материала корпуса предполагается, что затухание напряжения вдоль краев отверстия пренебрежимо мало.

Система координат, принятая для дальнейших расчетов показана на рисунке 1.

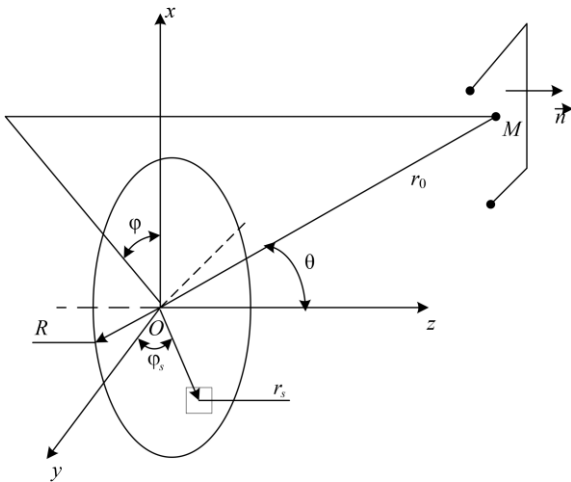


Рисунок 1 – Система координат для круглого отверстия и паразитной антенны рецептора

С отверстием связаны две системы координат, берущие начало в центре отверстия. Сферическая система описывает точки пространства вне отверстия. Точки, принадлежащие плоскости отверстия, описывает полярная система координат.

При рассмотрении излучения круглого отверстия предполагается по [8], что напряжение в раскрыве отверстия изменяется по закону

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

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

Спектр этого поля по (2)

$$E(j\omega) = \frac{U(\alpha_1 - \alpha_2)}{R(j\omega + \alpha_1)(j\omega + \alpha_2)}, \quad (3)$$

где R – радиус отверстия, м; r_s – радиальная полярная координата точки, лежащей в плоскости раскрыва, м.

В [9] приведены формулы для электрических составляющих электромагнитного поля, созданного круглым раскрывом. Они имеют вид

$$E_\theta(j\omega) = \frac{1}{2\lambda r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \cos \varphi \times \int_0^{2\pi} \int_0^R E(j\omega) e^{jk r_s \sin \theta \cos \varphi_s} r_s d\varphi_s dr_s; \quad (4)$$

$$E_\varphi(j\omega) = \frac{-j}{2\lambda r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \times \int_0^{2\pi} \int_0^R E(j\omega) e^{jk r_s \sin \theta \cos \varphi_s} r_s d\varphi_s dr_s,$$

где λ – длина волны, м; r_0 – расстояние от центра отверстия до точки наблюдения, м; θ , φ – сферические координаты точки наблюдения, рад; k – волновое число, рад/м; φ_s – полярная угловая координата точки, лежащей в плоскости раскрыва, рад.

Так как по (3) поле в раскрыве не зависит от полярных координат, то выражение $E(j\omega)$ можно вынести за знак интеграла. Оставшийся интеграл можно взять по формуле [10]

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R e^{jk r_s \sin \theta \cos \varphi_s} r_s d\varphi_s dr_s = 2\pi \int_0^R J_0(k r_s \sin \theta) r_s dr_s,$$

где J_0 – функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Интеграл по радиальной координате можно найти с учетом известной формулы [6]

$$\int z J_0(z) dz = z J_1(z),$$

где J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка, и замены переменных по выражению $z = k r_s \sin \theta$ [10].

Результат вычисления таков:

$$2\pi \int_0^R J_0(k r_s \sin \theta) r_s dr_s = \frac{2\pi R J_1(k R \sin \theta)}{k \sin \theta}. \quad (5)$$

Подстановка (5), (2) и (3) в (4) с учетом того, что $k = \frac{\omega}{c}$ и $k\lambda = 2\pi$, дает окончательные выражения для спектра составляющих электромагнитного поля излучения отверстия:

$$E_\theta(j\omega) = \frac{1}{2r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \cos \varphi \frac{J_1(k R \sin \theta)}{\sin \theta} S(j\omega);$$

$$E_\varphi(j\omega) = \frac{-j}{2r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \frac{J_1(k R \sin \theta)}{\sin \theta} S(j\omega).$$

Модули этих выражений имеют вид

$$E_\theta = \frac{1}{2r_0} e^{-jk r_0} (1 + \cos \theta) \cos \varphi \frac{J_1\left(\frac{\omega}{c} R \sin \theta\right)}{\sin \theta} S(\omega); \quad (6)$$

$$E_{\varphi} = \frac{1}{2r_0} e^{-jk_0 r_0} (1 + \cos \theta) \sin \varphi \frac{J_1\left(\frac{\omega}{c} R \sin \theta\right)}{\sin \theta} S(\omega),$$

где $S(\omega)$ – модуль спектра импульса (2).

Выражение для модуля спектра импульса (2) таково:

$$S(\omega) = \frac{U(\alpha_1 - \alpha_2)}{\sqrt{(\alpha_1 \alpha_2 - \omega^2)^2 + \omega^2(\alpha_1 + \alpha_2)^2}}. \quad (7)$$

Формулы для спектра излучения позволяют вычислить плотность потока энергии излучения отверстия w в месте расположения узла рецептора по соотношению, следующему из теоремы Рэлея,

$$w = \frac{1}{2\pi Z_0} \int_0^{\infty} E^2(\omega) d\omega. \quad (8)$$

В качестве примера в статье выполнен расчет составляющих плотности потока энергии от отверстия радиусом $3 \cdot 10^{-3}$ м в точках с угловыми координатами $\theta = \pi/6$ рад и $\varphi = \pi/4$ рад, находящихся на различных расстояниях от центра отверстия. Предполагалось, что отверстие 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]. Плотности потоков энергии вычислялись путем подстановки (6) и (7) в (8) и численного интегрирования в пределах от 0 до $3,14 \cdot 10^{10}$ рад/с. Полученные значения плотностей потоков энергии на различных расстояниях от отверстия сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Плотности энергии излучения от отверстия

Расстояние от щели, м	Плотность потока энергии, Дж/м ² , по координатам	
	θ	φ
0,01	$1,98 \cdot 10^{-6}$	$1,98 \cdot 10^{-6}$
0,02	$4,95 \cdot 10^{-7}$	$4,95 \cdot 10^{-7}$
0,03	$2,192 \cdot 10^{-7}$	$2,192 \cdot 10^{-7}$
0,04	$1,233 \cdot 10^{-7}$	$1,233 \cdot 10^{-7}$
0,05	$7,89 \cdot 10^{-8}$	$7,89 \cdot 10^{-8}$
0,06	$5,479 \cdot 10^{-8}$	$5,479 \cdot 10^{-8}$
0,07	$4,025 \cdot 10^{-8}$	$4,025 \cdot 10^{-8}$
0,08	$3,082 \cdot 10^{-8}$	$3,082 \cdot 10^{-8}$
0,09	$2,435 \cdot 10^{-8}$	$2,435 \cdot 10^{-8}$
0,10	$1,972 \cdot 10^{-8}$	$1,972 \cdot 10^{-8}$
0,11	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$
0,12	$1,37 \cdot 10^{-8}$	$1,37 \cdot 10^{-8}$
0,13	$1,167 \cdot 10^{-8}$	$1,167 \cdot 10^{-8}$
0,14	$1,006 \cdot 10^{-8}$	$1,006 \cdot 10^{-8}$
0,15	$8,767 \cdot 10^{-9}$	$8,767 \cdot 10^{-9}$
0,16	$7,705 \cdot 10^{-9}$	$7,705 \cdot 10^{-9}$

Анализ данных таблицы показывает, что при разряде генератора-имитатора ЭСР вблизи отверстия возникают достаточно высокие плотности потока энергии излучения. Это объясняется, главным образом, особенно широкой полосой частот электростатического разряда. При удалении точки наблюдения от отверстия малого радиуса плотности потока энергии заметно снижаются. Это соответствует рекомендации уменьшать размеры отверстий в корпусах микроэлектронных ТС для снижения эмиссии помех отверстием [1].

Причиной отказов и сбоев электронной техники является рассеяние во входных цепях узлов энергии помех, которая поглощена паразитными антеннами в узлах. Эти антенны образуют линии связи печатных плат. При определении энергии, поглощаемой паразитными антеннами, следует учесть, что поток воспринимаемой антенной энергии должен быть перпендикулярен плоскости антенны. В конструкциях реальных ТС узлы располагаются горизонтально или вертикально относительно стенок корпуса, в которых имеют место отверстия. Поэтому нормаль к паразитной антенне параллельна какой-либо оси декартовой системы координат, связанной со сферической (рисунок 1). Тогда энергия помех от круглого отверстия может быть вычислена по соотношению

$$W = \frac{(w_{\theta} \gamma_{i\theta} + w_{\varphi} \gamma_{i\varphi}) S}{2}, \quad (9)$$

где W – энергия помех, Вт; S – площадь паразитной антенны, м²; $\gamma_{i\theta}$ – направляющий косинус между осью декартовой системы координат и ортом θ сферической системы координат; $\gamma_{i\varphi}$ – направляющий косинус между осью декартовой системы координат и ортом φ сферической системы координат.

Указанные направляющие косинусы могут быть вычислены по известным соотношениям [8]

$$\begin{aligned} \gamma_{\theta x} &= \frac{1}{h_{\theta}} \frac{\partial x}{\partial \theta}; \quad \gamma_{\theta y} = \frac{1}{h_{\theta}} \frac{\partial y}{\partial \theta}; \quad \gamma_{\theta z} = \frac{1}{h_{\theta}} \frac{\partial z}{\partial \theta}; \\ \gamma_{\varphi x} &= \frac{1}{h_{\varphi}} \frac{\partial x}{\partial \varphi}; \quad \gamma_{\varphi y} = \frac{1}{h_{\varphi}} \frac{\partial y}{\partial \varphi}; \quad \gamma_{\varphi z} = \frac{1}{h_{\varphi}} \frac{\partial z}{\partial \varphi}, \end{aligned} \quad (10)$$

где x, y, z – декартовы координаты точки наблюдения, м; $h_{\theta} = r_0, h_{\varphi} = r_0 \sin \theta$ – коэффициенты Ламэ сферической системы координат.

С учетом известной связи между декартовыми и сферическими координатами [8] выражения (9) принимают вид

$$\begin{aligned} \gamma_{\theta x} &= \cos \theta \cos \varphi; \quad \gamma_{\theta y} = \cos \theta \sin \varphi; \quad \gamma_{\theta z} = -\sin \theta; \\ \gamma_{\varphi x} &= -\sin \varphi; \quad \gamma_{\varphi y} = \cos \varphi; \quad \gamma_{\varphi z} = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

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

Итак, в статье получены расчетные соотношения для оценки спектра электромагнитного поля, которое создается круговыми отверстиями в корпусе электронного технического средства. Эти соотношения дают возможность вычислить энергию излучения неоднородности круглой формы в различных точках внутри корпуса. По энергии производится оценка опасности излучения для элементной базы узлов технических средств и выявляются уязвимые для ЭСР неоднородности корпуса электронного технического средства. При проведении испытаний эти отверстия испытываются в первую очередь, что снижает вероятность ошибки испытателя, повышая тем самым адекватность испытаний.

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.

Предлагаемый метод анализа помехоэмиссии круглыми отверстиями может использоваться и при разработке микроэлектронных технических средств ЖАТ. С помощью выражений (6)–(8) можно рассчитать уровень помех, излучаемых при различных вариантах расположения и отверстий разного размера. Если возникнет необходимость снижения уровня помех, то разработчик на основании результатов анализа может осуществить зонирование узлов устройства, выбрать места расположения дополнительных экранов внутри корпуса технического средства. Таким образом, предлагаемая в статье методика оказывается востребованной при предиктивном проектировании аппаратуры ЖАТ с учетом предъявляемых к ней повышенных требований по безопасности и электромагнитной совместимости.

На основании изложенного допустимо сделать вывод, что разработанный в статье способ определения характеристик помех, излучаемых неоднородностью корпуса в виде круглого отверстия, имеет широкую область практических приложений при разработке и сертификации современной микроэлектронной аппаратуры ЖАТ и в первую очередь для повышения помехоустойчивости технических средств ЖАТ к одному из самых опасных видов помех, каким является электростатический разряд.

Получено 01.10.2013

D. V. Komnatny. The simplified model of disturbance radiation from rounded opening exposed to the electrostatic discharge impulse exposure.

Modeling and estimation method of electromagnetic radiation from rounded opening in electronic technique packages, raised under electrostatic discharge exposure, 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 adduced for disturbance electromagnetic field components and for disturbance energy flux density. 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 rounded openings.

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 **Князев, А. Д.** Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости / А. Д. Князев, Л. Н. Кечиев, В. В. Петров. – М. : Радио и связь, 1989. – 222 с.
- 3 **Князев, В. В.** Предсказание и измерение электромагнитного поля в отверстии в проводящем экране / В. В. Князев // International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility / Wroclaw Symposium on EMC. – Wroclaw, 1990. – P. 734–739.
- 4 **Кленов, Г. З.** Расчет индуцированных электромагнитных помех во внутренних помещениях судов / Г. З. Кленов, В. П. Копченков, Е. А. Свядоць // 10 International Wroclaw Symposium on Electromagnetic Compatibility. P. 1 / Wroclaw Symposium on EMC. – Wroclaw, 1990. – P. 399–402.
- 5 ESD Field Penetration Through Slots into Shielding Enclosures: A Time Domain Approach / G. Cerri [et al.] // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1997. – Vol. 39, № 4. – P. 377–386.
- 6 **Шимони, К.** Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М. : Мир, 1964. – 713 с.
- 7 **Никольский, В. В.** Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М. : Наука, 1978. – 544 с.
- 8 **Аполлонский, С. М.** Дифференциальные уравнения математической физики в электротехнике / С. М. Аполлонский. – СПб. : Питер, 2012. – 352 с.
- 9 **Лавров, А. С.** Антенно-фидерные устройства / А. С. Лавров, Г. Е. Резников. – М. : Советское радио, 1974. – 386 с.
- 10 **Лепендин, А. Ф.** Акустика / А. Ф. Лепендин. – М. : Высш. шк., 1978. – 448 с.