

Список литературы

- 1 Филонович, В. Л. Организация сетей технологической связи / В. Л. Филонович, В. С. Андриенко, А. В. Колобов // Автоматика, связь, информатика. – 2016. – № 9. – С. 22.
- 2 Телекоммуникационное оборудование Zelax. Редакция 25. – Минск : Донарит, 2020. – 68 с.
- 3 Цифровая система передачи MC04-DSL. Руководство по эксплуатации KB3.090.011 РЭ (ред. 24 / январь 2016). – Пермь : АДС, 2016. – 174 с.

УДК 656.25(078.5)

МЕТОД КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ И МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ СИСТЕМ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

Проблема обеспечения устойчивости микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики (МСЖАТ) к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия (ЭИПВ) становится крайне актуальной в связи с ухудшением положения в мире. Об этом свидетельствует анализ публикаций в научно-технической периодике и ограниченно опубликованные результаты проекта SECRET, выполняемого в Евросоюзе. Для ускорения испытаний и для сокращения потребности в испытательном оборудовании может быть предложена методика косвенной оценки устойчивости МСЖАТ к указанному виду помех.

В предложенном методе используются результаты предварительного расчета и натурных испытаний на устойчивость исследуемой аппаратуры к электростатическому разряду с амплитудой напряжения, соответствующей нормативной жесткости испытаний, а также с дополнительными значениями амплитуды.

Метод основан на сопоставлении импульса напряжения электростатического разряда и импульса напряжения от ЭИПВ.

Испытания на устойчивость к электростатическим разрядам (ЭСР) занимают, как показывает анализ, особое место. По ГОСТ Р 33436.4-1–2015 импульсы испытательного генератора производятся в места неоднородностей на корпусе. Электростатический разряд характеризуется амплитудой, длительностью и формой импульса напряжения, который воздействует на неоднородность корпуса ТС ЖАТ. Эти неоднородности являются паразитными излучающими антеннами, в раскрытие которых под воздействием ЭСР формируется импульс напряженности электрического поля, создающий внутри корпуса помеховые электромагнитные поля. Эти поля имеют и очень широкий спектр, обеспечивающий высокую проникающую способность, и достаточную мощность. Мощность помех определяется импульсом напряжения испытательного генератора, который имеет по ГОСТу сравнительно высокую амплитуду, до 15 киловольт по ГОСТ Р 33436.4-1–2015.

С учетом свойств ЭСР допустимо полагать, что импульс напряжения от электромагнитного импульса преднамеренного воздействия, эквивалентный импульсу ЭСР соответствующей степени жесткости испытания, создаст в раскрытии паразитной антенне и в корпусе рецептора помеховое электромагнитное поле, вызывающее отказы и сбои рецептора.

Представляется, что эквивалентные импульсы должны обладать одинаковой энергией и иметь одинаковую активную полосу частот. От уровня энергии зависят последствия воздействия помех на элементную базу. Следовательно, в паразитную антенну от разных импульсов должна поступать одинаковая энергия, которая затем передается в рецепторы при пренебрежимо малых потерях. Активная полоса частот определяет проникающую способность импульсов. Поэтому целесообразно использовать спектрально-энергетический способ вывода условий эквивалентности импульсов

$$\begin{cases} W_1 = W_2 \\ \Delta f_1 = \Delta f_2 \end{cases}, \quad (1)$$

где W_1 и W_2 – энергии импульсов, Дж; Δf_1 и Δf_2 – активные полосы частот, Гц.

Апертура вырезает часть фронта импульсной электромагнитной волны и образует в плоскости раскрыва импульс той же формы и длительности, которую имеет импульс, излученный источником помех. Если амплитуду напряжения U_m излучаемого внутрь корпуса импульса выразить через амплитуду импульса принимаемого, то окончательное выражение для амплитуды напряжения излучаемого импульса примет вид

$$U_m = x E_{m\text{прин}} \sqrt{K_n}, \quad (2)$$

где x – размерный коэффициент, м; $E_{m\text{прин}}$ – напряженность электрической составляющей принимаемого ЭИПВ, В/м; K_n – коэффициент использования, для прямоугольного отверстия $K_n = 1$, а для круглого $K_n = 1/2\pi$.

Для прямоугольного отверстия размерный коэффициент численно равен длине вертикальной стороны отверстия, а для круглого – радиусу отверстия.

Восприимчивость паразитных щелевых и штыревых антенн характеризует эффективная длина $l_{\text{эфф}}$. При этом в антенне возникает импульс напряжения $U(j\omega)$, с амплитудой U_m , которые вычисляются по формулам

$$\begin{aligned} U(j\omega) &= l_{\text{эфф}} E_{\text{прин}}(j\omega). \\ U_m &= l_{\text{эфф}} E_{m\text{прин}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для целей анализа проникновения импульсных помех через рассматриваемые паразитные антенны допустимо считать эффективную длину равной геометрической длине.

Таким образом, по соотношениям (1) можно найти амплитуду напряжения излучаемого импульса, эквивалентного импульсу ЭСР, а формулы (2) и (3) позволяют найти амплитуду напряженности электрической составляющей электромагнитного поля принимаемого импульса преднамеренного воздействия.

Для указанной амплитуды принимаемого ЭИПВ справедлива формула

$$E_{m\text{прин}} = \frac{\sqrt{60PG}}{r} e^{-\gamma r}, \quad (4)$$

где P – мощность генератора, Вт; G – коэффициент направленности антенны; r – расстояние между генератором помех и рецептором, м; γ – коэффициент ослабления поля.

Формула (4) является аналогом известного уравнения силового подавления радиоэлектронных средств.

В формуле (4) может быть использован параметр генератора ЭИПВ $FOM = \sqrt{60PG}$, что в некоторых случаях упрощает анализ.

По уравнению силового подавления и его аналогу (4) можно решать различные задачи расчета воздействия электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия на микроэлектронную аппаратуру железнодорожной автоматики. В частности, найти мощность и коэффициент усиления антенны генератора, который расположен на данном расстоянии от микропроцессорной аппаратуры и создает в паразитной антенне импульс, способный вызвать отказ или сбой. Другой задачей является расчет расстояния от данного генератора импульсов преднамеренного воздействия до рассматриваемой системы автоматики, на котором возможно вызвать сбой или отказ. Для решения последней задачи из (4) может быть получена формула

$$\frac{e^{-\gamma r}}{r} = \frac{\sqrt{60PG}}{E_{m\text{прин}}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является трансцендентным по Эйлеру, поэтому решается графическим либо численными методами.

Следовательно, описанный метод позволяет оценить устойчивость микроэлектронной и микропроцессорной аппаратуры к электромагнитным импульсам преднамеренного воздействия и предложить методы защиты, в частности установить размеры защитных зон.

Достоинствами предлагаемого метода является сокращение объема испытаний, снижение потребности в дорогостоящем и малодоступном оборудовании. Испытательные генераторы ЭИПВ яв-

ляются, зачастую, уникальными установками, доступ к которым ограничен. Для замены таких генераторов используются радиолокационные установки, для работы с которыми требуются открытые площадки. При этом необходимо обеспечивать безопасность находящейся в окрестностях полигона микроэлектронной аппаратуры.

Немаловажным обстоятельством является и то, что исследование нового вида электромагнитных угроз – электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия – ведется на основе уже достаточно изученного электростатического разряда методами энергетического подхода к расчету распространения помехового излучения и на базе условий эквивалентности импульсов.

УДК 621.396:621.391.82

РАСЧЕТ ПОЛОСКОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

При разработке аппаратуры современных микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики возникают новые проблемы электромагнитной совместимости. Необходимо обеспечить помехозащищенность узлов этой аппаратуры, что достигается использованием полосковых печатных плат. В этих платах диэлектрический слой, содержащий линии связи, экранирован сверху и снизу металлическими экранами. Вместе с тем, требуется исключить возникновение помех в линиях связи таких плат. Для решения этой задачи требуется анализ распространения сигналов по линиям связи путем решения уравнений идеальной длинной линии. Расчет первичных параметров такой линии, от которых зависят коэффициенты уравнения линии, осуществляется путем определения погонной емкости проводников линий связи методами электростатики.

Так как конструкция платы является сложной электродинамической системой, расчет поля в ней выполняется численными методами. Среди численных методов в трудах Л. Н. Кечиева наиболее проработан метод граничных элементов. Он основан на численном решении интегрального уравнения для электростатического поля в печатной плате

$$u(x, y) = \int_S G(x_M, x_Q, y_M, y_Q) \sigma(x_Q, y_Q) dx dy, \quad (1)$$

где u – потенциал, В; x, y – координаты точки наблюдения M и точки влияния Q , м; G – функция Грина задачи; σ – плотность электрического заряда, Кл/м.

Для численного решения интегрального уравнения (1) границы проводников линии связи разделяются на граничные элементы. Предполагается, что плотность заряда элемента постоянная. Тогда интегральное уравнение (1) сводится к системе алгебраических линейных уравнений вида

$$u(x, y) = \sum_{i=i}^N \sum_{j=1}^N \sigma(x_Q, y_Q) \int_o^{d_j} G(x_M, x_Q, y_M, y_Q) dx dy, \quad (2)$$

где i, j – счетные переменные; N – число граничных элементов, d_j – длина граничного элемента j , м.

Геометрические параметры граничного элемента вычисляются по формулам:

$$x_Q = x_{ij} + t \cos \theta_j, \quad y_Q = y_{ij} + t \sin \theta_j, \quad d_j = \sqrt{(x_{ij} - x_{kj})^2 + (y_{ij} - y_{kj})^2},$$

$$\cos \theta_j = \frac{x_{kj} - x_{ij}}{d_j}, \quad \sin \theta_j = \frac{y_{kj} - y_{ij}}{d_j}, \quad (3)$$

где x_{ij}, y_{ij} – координаты начала граничного элемента, м; x_{kj}, y_{kj} – координаты конца граничного элемента, м; t – параметр; θ_j – угловой параметр граничного элемента, рад.

Функция Грина для рассматриваемой электродинамической системы известна и имеет вид

$$G(x_M, x_Q, y_M, y_Q) = \frac{1}{\pi \epsilon_a} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi y_Q}{2d}\right) \sin\left(\frac{n\pi y_M}{2d}\right) \exp\left(-\frac{n\pi}{2d}(x_M - x_Q)\right), \quad (4)$$