

## **О ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВАХ КОРПУСОВ-ЭКРАНОВ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ**

д.т.н. В.Д. Сахацкий

*Изучены особенности экранирования несинусоидальных излучений экранами с отверстиями. Даны рекомендации о размещении в корпусе радиоэлектронных средств чувствительных к воздействию электромагнитных излучений полупроводниковых элементов.*

**Постановка проблемы и анализ проведенных исследований.** В последнее время особое внимание уделяется разработке радиолокационных средств и средств связи, использующих несинусоидальные волны. Последние представляют собой серию коротких импульсов с длительностью 0,1... 10 нс [1]. Одной из проблем, возникающих при разработке и эксплуатации радиоэлектронных средств (РЭС), является проблема обеспечения их электромагнитной совместимости, а также защита технического состояния РЭС в условиях воздействия внешних электромагнитных излучений (ЭМИ).

Проникая внутрь РЭС, мощные ЭМИ наводят в монтажной схеме электрические напряжения, которые вызывают пробой эмиттерных переходов транзисторов и выводят из строя другие полупроводниковые элементы. В [2] отмечается, что резкое увеличение напряжения (со скоростью 0,1...10 В/нс) в цепях интегральных микросхем (ИМС) нарушает их нормальное функционирование, даже если максимальное напряжение воздействия не превышает допустимое по паспорту. Несинусоидальные ЭМИ способны создать такую скорость изменения напряжения и с этой точки зрения являются более опасными для ИМС по сравнению с гармоническими излучениями.

Повышение стойкости электронной аппаратуры к внешним воздействиям ЭМИ осуществляется различными методами, среди которых по своей эффективности выделяются методы экранирования и зонирования [3]. Корпус-экран РЭС обычно имеет неоднородности (щели и отверстия), которые выполняются, например, для целей вентиляции, ввода кабеля от сети

питания, для установки различного рода индикаторов. В этом случае эффективность экрана понижается. Влияние неоднородностей экрана на его коэффициент экранирования и способы защиты РЭС достаточно подробно изучены для гармонических излучений [3 – 5], а также для видеоимпульсных полей [6].

**Нерешенные проблемы и цель работы.** Для несинусоидальных излучений проблема ЭМС РЭС и защита их технического состояния при воздействии этих излучений остается открытой. Так как полупроводниковые элементы располагаются вблизи корпуса-экрана РЭС, то важно знать уровень проникшего ЭМИ в непосредственной близости от неоднородности экрана. Для сверхширокополосных (несинусоидальных) излучений этот вопрос остается открытым.

Целью работы является исследование коэффициента экранирования несинусоидальных излучений, когда точка наблюдения находится вблизи экрана с отверстием произвольного радиуса.

**Метод решения задачи.** Решение поставленной задачи осуществляется методами спектрального анализа.

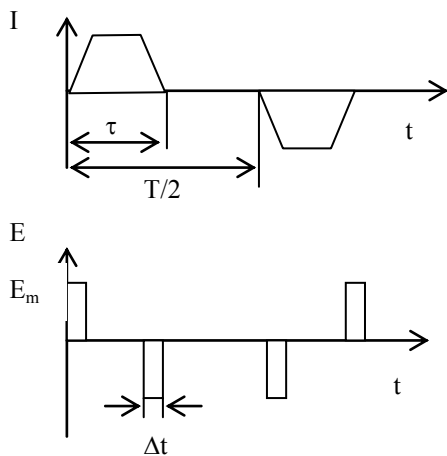


Рис. 1. Вид возбуждающего тока и создаваемой напряженности поля

В системах радиолокации и связи запитку антенных устройств часто осуществляют трапецидальным импульсным током  $I$ , создающим напряженность поля  $E$  несинусоидального излучения в виде периодической серии разнополярных прямоугольных импульсов с амплитудой  $E_m$  [1, 7] (рис. 1).

Предположим, что на плоский бесконечно тонкий и идеально проводящий экран с отверстием нормально падает несинусоидальная волна, параметры которой приведены на рис. 1. Радиус отверстия в

экране –  $r_0$ . Начало координат расположено в центре отверстия. Найдем коэффициент экранирования несинусоидального излучения в произвольно заданной точке, расположенной на оси отверстия на расстоянии  $r$  от его плоскости.

Согласно [7], напряженность поля данной серии импульсов с периодом следования  $T$  можно представить в следующем виде:

$$E_1 = \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos(k\Omega t + \Psi_k), \quad (1)$$

где  $\Omega = 2\pi / T$  – циклическая частота следования серии импульсов;

$$A_k = \frac{8E_m}{\Delta t} \frac{\sin d_k x}{d_k x} \sin d_k(y-x) - \text{амплитуда } k\text{-й гармоники падающего}$$

излучения,  $d_k = \pi(2k-1)$ ,  $x = \Delta t / T$ ,  $y = \tau / T$ .

Уравнение (1) представим в виде:

$$E_1 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} S_{mk} \exp[j(k\Omega t + \Psi_k)], \quad k \neq 0,$$

где  $S_{mk} = A_k / 2$ .

Комплексную амплитуду  $X_{mk}$   $k$ -й гармоники прошедшего сквозь экран ЭМИ можно определить с помощью комплексной передаточной функции  $\Pi_k = |\Pi_k| \exp(j\varphi_k)$  следующим образом:  $X_{mk} = S_{mk} \Pi_k$ .

Функция  $\Pi_k$  представляет собой коэффициент экранирования  $k$ -й гармоники. Для гармонического излучения с длиной волны  $\lambda$ , соответствующей  $k$ -й гармонике, его значение на различных расстояниях от отверстия в экране рассчитывается по формуле [8]:

$$\Pi = 0,25 \left[ 4 \exp(jk_0 r) - \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2 \exp(jk_0 R) + j \left( \frac{1}{k_0 R} - \frac{r^2}{k_0 R^3} \right) \exp(jk_0 R) \right], \quad (2)$$

где

$$k_0 = 2\pi/\lambda, \quad R = \sqrt{r^2 + r_0^2}.$$

Тогда напряженность поля за экраном можно представить в виде:

$$E_2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_{mk} \exp[j(k\Omega t + \Psi_k)], \quad k \neq 0.$$

Для периодических сигналов  $S_{(t)}$  справедливо соотношение Ляпунова-Парсеваля

$$\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |S_{(t)}|^2 dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |S_{mk}|^2,$$

из которого следует, что мощность падающего излучения

$$P_{\text{пад}} \rightarrow \sum_{k=-\infty}^{\infty} |S_{mk}|^2. \quad (3)$$

Аналогично прошедшая мощность

$$P_{\text{пр}} \rightarrow \sum_{k=-\infty}^{\infty} |X_{mk}|^2. \quad (4)$$

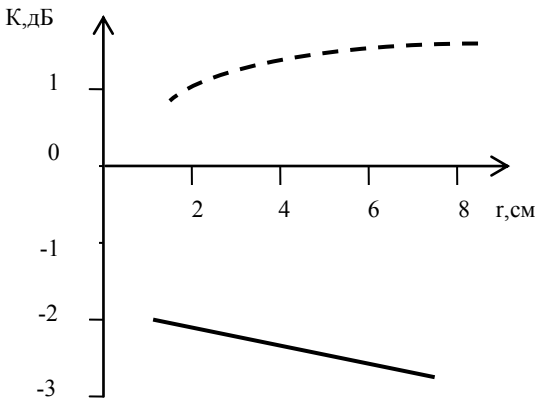
Используя выражения (3) и (4), можно определить коэффициент экранирования по мощности несинусоидального излучения

$$K = \frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{пад}}} = \frac{\sum_{k=-N}^{+N} |X_{mk}|^2}{\sum_{k=-N}^{+N} |S_{mk}|^2}, \quad k \neq 0, \quad N \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Численный анализ сходимости ряда (5) показал, что с точностью до 2 % можно ограничиться значением  $N = 50$ .

Рассмотрим поведение коэффициента экранирования при удалении от экрана точки наблюдения. В качестве объекта исследования выберем несинусоидальное излучение радиолокационных средств с теми же параметрами, что и в [7]:  $\tau = 0,25 T$ ,  $T = 8 \Delta t$ . Для сравнения по формуле (2) определим значение коэффициента экранирования гармонического излучения с частотой, равной высшей частоте спектра импульсного излучения  $f = 1/\Delta t$ . Длину волны, соответствующую данной частоте, обозначим как  $\lambda_{\text{min}}$ . Выше указывалось, что типичные значения  $\Delta t = (0,1 \dots 10)$  нс. Поэтому выберем промежуточное значение  $\Delta t = 1$  нс, тогда  $\lambda_{\text{min}} = 30$  см.

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициента экранирова-



ния, когда радиус отверстия в экране  $r_0 = 20$  см, на рис. 3 —  $r_0 = 3,5$  см, на рис. 4 —  $r_0 = 0,5$  см.

Сплошные кривые соответствуют несинусоидальному излучению, а штриховые — гармоническому. Видно, что в зависимости от расстояния до отверстия в экране и его радиуса мощность прошедшего несинусоидаль-

Рис. 2. Зависимость коэффициента экранирования от расстояния до отверстия

ного излучения может быть как меньше, так и больше мощности гармонического излучения. При этом в отдельных случаях уровень прошедшей мощности может превысить мощность внешнего излучения. Необходимо отметить, что данный эффект для полей других типов был описан в работе [5], в которой указано, что в непосредственной близости к отверстию экрана проникшие поля имеют тот же порядок, что и внешние.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** В целом анализ результатов расчета позволяет сделать следующие выводы.

1. При малых (меньших  $\lambda_{\min}$ ) размерах отверстия в экране уровень прошедшего несинусоидального излучения с увеличением расстояния от экрана уменьшается быстрее, чем гармонического излучения. Для последнего на расстояниях, превышающих  $\lambda_{\min}/2\pi$ , коэффициент экранирования стремится к постоянному значению.

2. На расстояниях от отверстия менее 4 см уровень несинусоидального излучения может превышать уровень гармонического излучения, а на расстояниях менее 2 см его мощность превышает мощность внешнего излучения.

3. Если размеры отверстия в экране соизмеримы с  $\lambda_{\min}$ , то для всех расстояний от отверстия несинусоидальные излу-

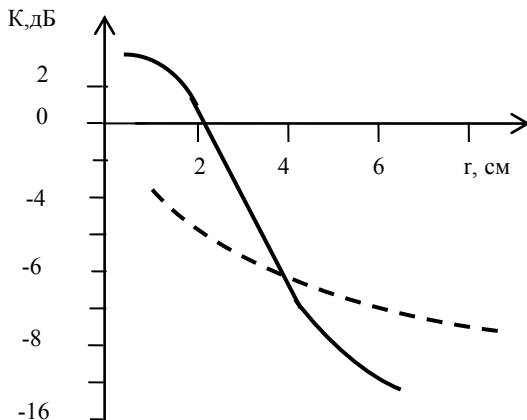


Рис. 3. Зависимость коэффициента экранирования от расстояния до отверстия

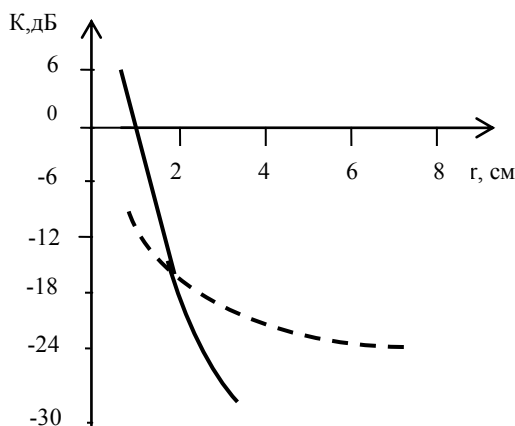


Рис. 4. Зависимость коэффициента экранирования от расстояния до отверстия

чения экранируются в лучшей степени, чем гармонические.

Учитывая изложенное, при проектировании РЭС (в целях защиты их технического состояния в условиях электромагнитного воздействия) полупроводниковые устройства не рекомендуется располагать на расстояниях менее 4 см от отверстия в корпусе РЭС, даже если уровень внешнего излучения не будет превышать установленные нормативы.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в изучении характера распространения проникшего в корпус РЭС несинусоидально-го излучения вследствие его дифракции на элементах монтажной схемы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хармут Х.Ф. Несинусоидальные волны в радиолокации и радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1985. – 376 с.
2. Антипин В.В., Годовицын В.А., Громов Д.В., Кожевников А.С., Раваев А.А. Влияние мощных импульсных микроволновых помех на полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1995. – № 1. – С. 37 – 53.
3. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / В.И. Кравченко, Е.А. Болотов, Н.И. Летунова; Под ред. В.И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с.
4. Каден Г. Электромагнитные экраны. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 327 с.
5. Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
6. Ари Н., Хансен Д., Шар Х. Анализ прохождения электромагнитного импульса через круговую апертуру в частотной области // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73. – № 2. – С. 226 – 227.
7. Полухин Г.А. Анализ характеристик излучения апертурной антенны, возбуждаемой периодическим импульсным сигналом // Радиотехника и электроника. – 1983. – Т. 28. – № 2. – С. 265 – 270.
8. Нефедов Л.И., Гордица Д.Д., Сахацкий В.Д. Системный анализ и оценка окружающей среды по электромагнитным излучениям при проектировании архитектурных объектов. – К.: УМК ВО, 1989. – 160 с.

Поступила 21.03.2003

**САХАЦКИЙ Виталий Дмитриевич**, доктор техн. наук, доцент, профессор кафедры автоматики и радиоэлектроники Украинской инженерно-педагогической академии. В 1970 году окончил факультет радиофизики ХГУ. Область научных интересов – методы и средства защиты технического состояния объектов.

---