12 *ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ* 

УДК 004.056(075.8)

# А. А. Шелупанов, А. П. Зайцев

## Оценка ПЭМИ электронных устройств

Рассмотрена физическая природа побочных электромагнитных излучений электронных устройств, приведены соотношения для расчета электрической и магнитной составляющих излучаемого электромагнитного поля. Указано на целесообразность применения для исследований автоматизированных программно-аппаратных комплексов.

Основные уравнения электромагнитного поля. Электромагнитное поле определяется во всех точках двумя векторными величинами – электрическим и магнитным полем.

Для расчета электромагнитного поля наиболее пригодны уравнения электродинамики в интегральной и дифференциальной формах [1].

Электромагнитное поле характеризуют четыре векторные величины:

 $\vec{E}$  – напряженность электрического поля (В/м);

 $\vec{D}$  – электрическая индукция (вектор электрического смещения) ( (К л/ м<sup>2</sup>);

 $\vec{H}$  – напряженность магнитного поля (A/м);

 $\vec{B}$  – магнитная индукция (Тл).

Основными уравнениями электромагнитного поля являются уравнения Максвелла. Первое уравнение Максвелла соответствует вихрям магнитного поля:

$$rot \vec{H} = \vec{\delta} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}.$$
 (1)

Физический смысл этого уравнения можно толковать следующим образом: магнитное поле возбуждается совместным действием тока проводимости с плотностью  $\vec{\delta}$  и изменением во времени электрического поля (вектора электрического смещения). Вектор  $\vec{\delta}$  указывает направление движения зарядов и по абсолютному значению равен пределу

$$\vec{\delta} = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta I}{\Delta S},\tag{2}$$

где  $\Delta I$  — ток через площадку  $\Delta S$  , перпендикулярную  $\vec{\delta}$  . Плотность тока проводимости  $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$ , где  $\gamma$  — удельная проводимость.

Второе уравнение Максвелла выражает скорость изменения магнитной индукции  $\vec{B}$  через пространственную производную (rot) напряженности электрического поля  $\vec{E}$ :

$$rot \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}.$$
 (3)

Физический смысл второго уравнения Максвелла состоит в том, что электрическое поле может возбуждаться не только электрическими зарядами, но и изменениями во времени магнитного поля (вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ ).

Второе уравнение Максвелла можно рассматривать как обобщенный закон электромагнитной индукции.

К основным уравнениям Максвелла относят также следующие два уравнения в дифферен-циальной форме:

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{D} &= \rho; \\ \text{div } \vec{B} &= 0. \end{aligned} \tag{4}$$

Согласно первому уравнению расходимость электрической индукции равна объемной плотности заряда р величине, определяемой предельным соотношением

$$\rho = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta V},\tag{5}$$

где  $\Delta q$  – заряд, содержащийся в элементарном объеме  $\Delta V$ .

Исходные уравнения путем преобразований приводятся к дифференциальной форме записи:

rot 
$$\vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{\delta}$$
,  
rot  $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ ,  
div  $\vec{D} = \rho$ ,  
div  $\vec{B} = 0$ , (6)  
 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ,  
 $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ ,  
 $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$ .

Дальнейшим преобразованием исходную систему уравнений (6) можно привести к форме, в которой переменными будут только напряженности электрического и магнитного полей:

rot 
$$\vec{H} = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{\delta}$$
,  
rot  $\vec{E} = -\mu_r \mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ ,  
div  $\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$  ( $\varepsilon_r = \text{const}$ ), (7)  
div  $\vec{H} = 0$  ( $\mu_r = \text{const}$ ),  
 $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$  ( $\Pi \rho \mu = \vec{E}_{CTOp} = 0$ ).

Система уравнений (7) может являться исходной при изучении и расчетах электромагнитного поля.

Элементарный электрический излучатель. Диполь, момент которого изменяется во времени, называют элементарным излучателем. Различают электрический и магнитный излучатели: электрический и магнитный диполи. Диполь, момент которого изменяется по синусоидальному закону, называют гармоническим.

Рассмотрим элементарный электрический излучатель. Для этого представим отрезок проводника l, ориентированный вдоль координатной оси z, по которому течет ток  $I = I_m \cos \omega t$  (рис. 1).

В [1] показано, что при условии постоянства амплитуды тока вдоль всего участка можно условно полагать сосредоточение равных по абсолютной величине и противоположных по знаку колеблющихся зарядов (рис. 2) с комплексными амплитудами

$$\dot{q}_m = \pm \frac{jI_m}{\omega}.$$
 (8)

Это значит, что рассматриваемый отрезок с током можно представить как диполь, момент которого  $\dot{\vec{p}}_m = \vec{z}_0 / q$  совершает гармонические колебания с частотой  $\omega$  и имеет комплексную амплитуду

$$\frac{\dot{\bar{p}}_{m} = -j \frac{I_{m}I}{\omega} \bar{z}_{0}. \qquad (9)}{-q + q}$$
Puc. 1

Puc. 2

Изображенный на рис. 1 элемент тока (колеблющийся диполь) рассматривается в качестве элементарного излучателя.

Компоненты поля, создаваемого диполем Герца в произвольной точке пространства  $M(r, 9, \alpha)$  (рис. 3), определяются по приведенным выше формулам и при переходе от комплексов к векторам поля принимают вид:

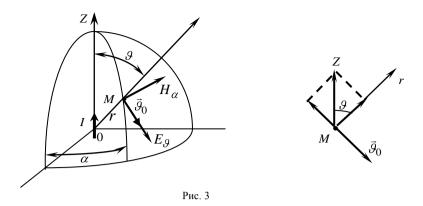
$$H_{\alpha} = \frac{kII_{m}}{4\pi r} \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \sin \vartheta;$$

$$E_{r} = \frac{kII_{m}}{2\pi\omega\varepsilon r^{2}} \left[ \frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \cos \vartheta;$$

$$E_{\vartheta} = \frac{k^{2}II_{m}}{4\pi\omega\varepsilon r} \left[ \left( \frac{1}{k^{2}r^{2}} - 1 \right) \sin(\omega t - kr) + \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) \right] \sin \vartheta;$$

$$H_{r} = H_{\vartheta} = E_{\alpha} = 0.$$
(10)

14 TEXHUYECKUE HAYKU



**Ближняя зона** (зона квазистационарности). Границы этой зоны определяются условиями r>>l (l-длина элемента тока или плечо вибратора) и kr<<1, или r<<l/k. В силу равенства  $k=2\pi/\hbar$  второе условие принимает вид  $r<<\hbar/2\pi$  (условие квазистационарности). Для ближней зоны (на расстояниях от вибратора существенно меньших длины волны) формулы (10) можно упростить, отбрасывая малые члены в квадратных скобках и пренебрегая фазовым сдвигом kr:

$$H_{\alpha} = \frac{II_{m}}{4\pi r^{2}} \sin \theta \cos \omega t; \quad E_{r} = \frac{p_{m}}{2\pi \epsilon r^{3}} \cos \theta \sin \omega t;$$

$$E_{\theta} = \frac{p_{m}}{4\pi \epsilon r^{3}} \sin \theta \sin \omega t; \quad p_{m} = \frac{II_{m}}{\omega}.$$
(11)

Поле согласно (11) не имеет волнового характера, так как выражения (11) получены в пренебрежении излучением в ближней зоне вследствие его незначительности. Пространственное распределение в этом случае свойственно статическому диполю. Выражения (11) содержат одну составляющую вектора напряженности магнитного поля элемента тока и две составляющие вектора напряженности электрического поля вибратора, характеризующиеся в каждый момент времени как «стационарные» величины. Из (11) следует, что величины E и H сдвинуты по фазе на угол  $90^{\circ}$ .

**Дальняя зона.** Рассмотрим поле на расстояниях, значительно превышающих длину волны, когда  $r >> \lambda$  и kr >> 1. В этом случае можно пренебречь членами порядка  $1/k^2r^2$  и 1/kr. Тогда уравнения (10) принимают вид [1]:

$$H_{\alpha} = -\frac{kII_{m}}{4\pi r} \sin \theta \sin(\omega t - kr);$$

$$E_{r} = 0; \quad E_{\theta} = -\frac{kIW^{0}I_{m}}{4\pi r} \sin \theta \sin(\omega t - kr).$$
(12)

В (12) введено отношение амплитуд  $E_m$  и  $H_m$ , которое равно  $W^0 = \frac{E_m}{H_m} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$  и называется волновым

сопротивлением неограниченной среды. Для вакуума  $W^0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \ \ [\text{Ом}].$ 

Уравнения (12) соответствуют полю излучения. Оно представляет собой сферическую волну. Векторы  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  расположены перпендикулярно к направлению распространения волны, взаимно перпендикулярны и синфазны. Излучение максимально в экваториальной плоскости (9 = 900) и отсутствует в осевом направлении (9 = 0).

Элементарный магнитный излучатель. В теории электромагнитного поля доказывается [35], что замкнутый виток (рис. 4, a) с постоянным током на превышающих его размеры расстояниях создает такое же магнитное поле как если бы на его месте находился магнитный диполь (рис. 4,  $\delta$ ) с моментом  $\vec{m} = \vec{z}_0 I \mu S$ .

При гармоническом токе витка  $I = I_m \cos \omega t$  переменный магнитный диполь характеризуется комплексной амплитудой момента  $\dot{\vec{m}} = \vec{z}_0 \dot{I}_m \mu S$ . Такой виток называют элементарным магнитным излучателем или магнитным диполем Герца.

Решение уравнений Максвелла для магнитного диполя Герца в комплексной форме имеет вид [1]

$$\dot{\vec{E}} = -\vec{\alpha}_0 \frac{j\omega\mu I_m S}{4\pi r} (\frac{1}{r} + jk) e^{j(\omega t - kr)} \sin \vartheta;$$

$$\dot{\vec{H}} = \frac{I_m S}{4\pi} [\vec{r}_0 \frac{2}{r^2} (\frac{1}{r} + jk) \cos \vartheta + \vec{\vartheta}_0 \frac{1}{r} (\frac{1}{r^2} + j\frac{k}{r} - k^2) \sin \vartheta] e^{j(\omega t - kr)}.$$
(13)

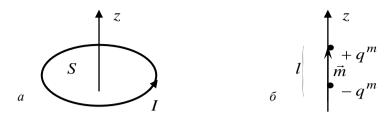


Рис. 4

Из (13) определяется запись компонент электромагнитного поля:

$$E_{\alpha} = \frac{I_{m}k^{2}SW^{0}}{4\pi r} \left[ \frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) + \cos(\omega t - kr) \right] \sin \vartheta;$$

$$H_{r} = \frac{I_{m}kS}{2\pi r^{2}} \left[ \frac{1}{kr} \cos(\omega t - kr) - \sin(\omega t - kr) \right] \cos \vartheta;$$

$$H_{\vartheta} = \frac{I_{m}k^{2}S}{4\pi r} \left[ \left( \frac{1}{k^{2}r^{2}} - 1 \right) \cos(\omega t - kr) - \frac{1}{kr} \sin(\omega t - kr) \right] \sin \vartheta;$$

$$E_{r} = E_{\vartheta} = H_{\alpha} = 0.$$
(14)

Из (14) получаем компоненты ближнего поля:

$$E_{\alpha} = \frac{I_{m}\mu S_{\omega}}{4\pi r^{2}} \sin \vartheta \sin \omega t; \qquad H_{r} = \frac{m_{m}}{2\pi\mu r^{3}} \cos \vartheta \cos \omega t;$$

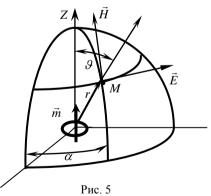
$$H_{\vartheta} = \frac{m_{m}}{4\pi u r^{3}} \cos \vartheta \cos \omega t; \qquad m_{m} = I_{m}\mu S$$
(15)

и поля излучения:

$$E_{\alpha} = \frac{I_m k^2 SW^0}{4\pi r} \cos(\omega t - kr) \sin \vartheta; \quad H_r = 0;$$

$$H_{\vartheta} = -\frac{I_m k^2 S}{4\pi r} \cos(\omega t - kr) \sin \vartheta. \tag{16}$$

В дальней зоне элементарный магнитный излучатель создает волновое поле, которое отличается от поля элементарного электрического излучателя только ориентацией (рис. 5). Диаграмма направленности магнитного излучателя не отличается от диаграммы направленности элементарного электрического излучателя.



Рассмотренные соотношения могут служить основой для разработки программ расчета компонентов электромагнитного поля, создаваемого побочными электромагнитными излучениями электронных устройств в любой точке пространства.

В компьютерных системах исследованию на ПЭМИ подлежат следующие устройства [2]:

- видеоподсистема;
- накопители на жестких и гибких дисках;
- устройства CD, CD-R, CD-RW, DVD, DVD-RW;

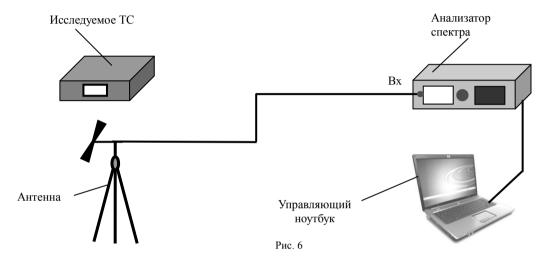
16 TEXHUYECKUE HAYKU

- клавиатура;
- последовательные порты;
- принтеры.

Применяемые средства исследования могут быть различными – ручными или автоматизированными. Укажем на целесообразность применения автоматизированных программно-аппаратных комплексов, таких как «Легенда» и «Сигурд», выполненных на базе анализаторов спектра «R&S» и «IFR».

Эти комплексы имеют управляющую и расчетную программы, способны автоматически опознавать опасные сигналы по форме их огибающих, заданных тест-программами. Оба комплекса в результате специальных исследований определяют опасные зоны  $R_2$ ,  $r_1$  и  $r_1'$  и формируют отчетный протокол. Эти исследования могут быть дополнены исследованиями по методу реальных зон.

Упрощенная схема измерения ПЭМИ программно-аппаратным комплексом «Легенда» показана на рис. 6.



Внешний вид основного рабочего экрана управляющей программы «Легенда» представлен на рис. 7.

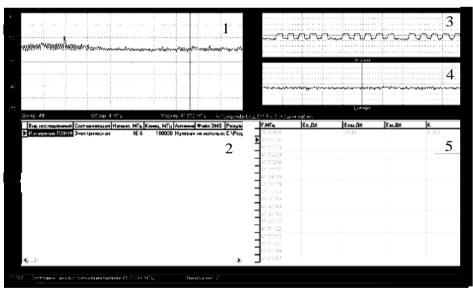


Рис. 7

На рис. 7 цифрами обозначены следующие элементы основного рабочего экрана (главного окна):

- 1 окно спектра (отображается спектр сигнала для выбранного диапазона частот);
- 2 таблица исследований (отображаются все программы исследований, которые будут выполнены в автоматическом режиме);
  - 3 окно эталона (осциллограмма найденного в полуавтоматическом режиме эталона тестового сигнала);
  - 4 окно сигнала (осциллограмма сигнала, который будет сравниваться с эталоном);
  - 5 рабочая таблица промежуточных результатов.

#### Литература

- 1. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля. Учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1964. 384 с.
- 2. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам: Учеб. пособие. М.: Горячая линия Телеком, 2005.-416 с.

\_\_\_\_\_

### Шелупанов Александр Александрович

ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», зав. кафедрой комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем, д.т.н., профессор. Эл. адрес: saa@keva.tusur.ru.

### Зайцев Александр Петрович

ГОУ ВПО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», к.т.н., профессор кафедры комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем.
Эл. адрес: zap@keva.tusur.ru.

Aleksandr A. Shelupanov, Aleksandr P. Zajtsev

### Evaluation of side electromagnetic radiation of electronic devices

The physical nature of the side electromagnetic radiation of electronic devices are considered. Results for the calculation of the ratio of the electric and magnetic components of an electromagnetic field emitted. It is indicated on the appropriateness of the use of automated software and hardware systems for research.