

УДК 621.318.3.01

А.В. Мачулянский, канд. техн. наук, В.А. Мачулянский, В.В. Пилинский, канд. техн. наук, О.В. Теличкина

## Моделирование структур для электромагнитной защиты информационных и телекоммуникационных систем

Предложена модель многослойной структуры для экранирования электромагнитного поля. Показано, что с помощью многослойных нанокompозитных структур, обладающих высокой магнитной проницаемостью и низким удельным сопротивлением, можно достичь увеличения значений эффективности экранирования электромагнитного поля.

**A model of a multilayer structure for shielding electromagnetic field. It is shown that by using multilayer nanocomposite structures with high magnetic permeability and low resistivity can be achieved increasing the values of efficiency of shielding electromagnetic field.**

**Ключевые слова:** эффективность экранирования, многослойная структура, нанокompозит.

### Введение

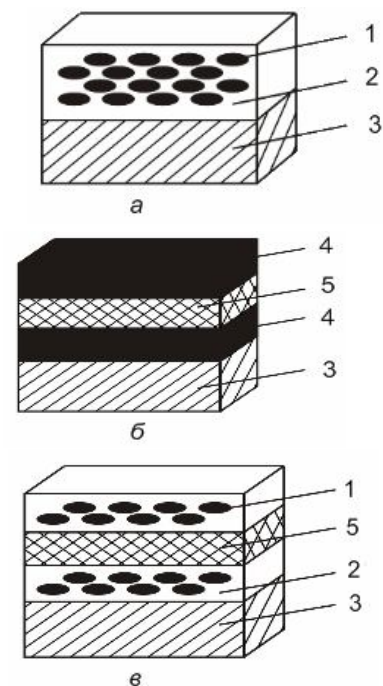
Интенсивное развитие современных электронных информационных и телекоммуникационных систем, которое сопровождается расширением их диапазона рабочих частот и чувствительности, обостряет проблему обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Одно из эффективных технических средств обеспечения ЭМС – экранирование. Использование электромагнитных экранов в значительной степени влияет как на надежность и качественное функционирование самой электронной аппаратуры, так и на обеспечение защиты информации, обрабатываемой в системе [1].

Для высокого уровня интеграции электронных систем выдвигаются требования, как к технологичности, так и к свойствам материалов, которые используются в качестве защитных покрытий.

Анализ эффективности экранирования электромагнитного поля (ЭМП) однослойными экранами на основе традиционных материалов позволил определить их основные особенности [2, 3]. Электромагнитные экраны на основе металлов с высокой проводимостью неэффективны для защиты от магнитных полей в области низких частот. В результате значительного отражения ЭМП металлами происходит его перераспределение внутри экранируемого объекта, что может привести к резонансным явлениям, и, как следствие, к нарушению функционирования электронных устройств. Недостатком ферромагнитных материалов для применения в качестве электромагнитных экранов является их высокая стоимость,

значительные массогабаритные показатели. Кроме этого необходимо учитывать такие особенности ферромагнитных материалов: уменьшение магнитной проницаемости с ростом частоты ЭМП; возможное изменение магнитных свойств в результате технологической обработки; зависимость магнитной проницаемости от значения напряженности поля, что приводит к эффекту насыщения.

Поэтому перспективным направлением повышения эффективности экранирования ЭМП является разработка экранов без указанных недостатков на основе многослойных нанокompозитных материалов. Структура экрана представляет собой систему последовательно чередующихся слоев, выполненных из нанокompозитных, магнитных и немагнитных материалов. Свойства таких структур значительно отличаются от свойств однородных массивных материалов [4, 5]. Некоторые типы многослойных нанокompозитных структур представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Многослойные нанокompозитные структуры: (а) – нанокompозит с магнитными наногранулами, внедренными в немагнитную матрицу; (б) – многослойная система, состоящая из наноразмерных чередующихся магнитных слоев и немагнитных прослоек; (в) – многослойная система, состоящая из нанокompозитных магнитных слоев и немагнитных прослоек; 1 – магнитные наногранулы; 2 – немагнитная матрица; 3 – подложка; 4 – магнитный слой; 5 – немагнитная прослойка**

При разработке экранирующих многослойных нанокompозитных структур необходимо решать многопараметрические задачи их формирования.

В данной работе представлены результаты моделирования многослойных структур для экранирования магнитного поля в диапазоне частот от 10 кГц до 10 ГГц с учетом электрофизических параметров компонентов экрана.

**Модель многослойной нанокompозитной структуры**

Эффективность экранирования электромагнитного экрана в децибелах определяется выражением [3]:

$$K = 20 \lg \frac{1}{k_э}, \tag{1}$$

где  $k_э$  – коэффициент экранирования.

Для анализа экранирования ЭМП экраном, состоящим из нескольких слоев, рассмотрим модель, в которой каждый слой представлен в виде эквивалентной схемы, состоящей из параллельно включенных индуктивности слоя  $L$  и активного сопротивления  $R$ , которое характеризует сопротивление слоя протекающими в нём вихревыми токами.

Общий вид схемы замещения экрана, состоящего из  $n$  слоев, источника поля и измерительного устройства, представлен на рис. 2.

ЭМП генерирует в катушке  $L_0$  переменный ток  $I_0$  круговой частоты  $\omega$ . В отсутствие экрана в приёмной катушке  $L'$  наводится электродвижущая сила (ЭДС)  $U_0$ :

$$U_0 = j\omega I_0 \alpha \sqrt{L_0 L'}. \tag{2}$$

где  $\alpha$  – коэффициент взаимной индукции катушек;  $j$  – мнимая единица.

Полагая, что источник экранирован замкнутым экраном, считаем связь источника с экраном, а также связь между слоями экрана – полной, т. е.  $\alpha = 1$ .

Математическую модель многослойной структуры ЭМП замкнутого экрана представим в виде системы, состоящей из  $n$  уравнений:

$$\begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_1 & j\omega L_{12} & \dots & j\omega L_{1n} \\ j\omega L_{21} & j\omega L_2 + R_2 & \dots & j\omega L_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ j\omega L_{n1} & j\omega L_{n2} & \dots & j\omega L_n + R_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} j\omega \sqrt{L_{01} I_0} \\ j\omega \sqrt{L_{02} I_0} \\ \dots \\ j\omega \sqrt{L_{0n} I_0} \end{pmatrix}, \tag{3}$$

где  $L_{i\xi}$  – взаимные индуктивности  $i$ -й и  $\xi$ -й катушек ( $i = \overline{1, n}$ ;  $\xi = \overline{1, n}$ );  $I_i$  – токи в слоях экрана.

Коэффициент экранирования определяется, как отношение ЭДС, наводимой в приемной катушке без экрана и с экраном:

$$k_э = \frac{U_0 - U_э}{U_0}, \tag{4}$$

где  $U_э$  – ЭДС, создаваемая вихревыми токами, протекающими в экране –

$$U_э = \alpha \sum_{i=1}^n j\omega \sqrt{L_i L'} I_i. \tag{5}$$

Из системы уравнений (3) с учетом формулы (5) находим

$$U_э = \alpha \sqrt{L_i L'} I_0 \left( 1 - \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{j\omega L_i}{R_i}} \right). \tag{6}$$

Подставляя соотношения (2) и (6) в выражение (4), получим значение коэффициента экранирования:

$$k_э = \left( 1 + \sum_{i=1}^n \frac{j\omega L_i}{R_i} \right)^{-1}. \tag{7}$$

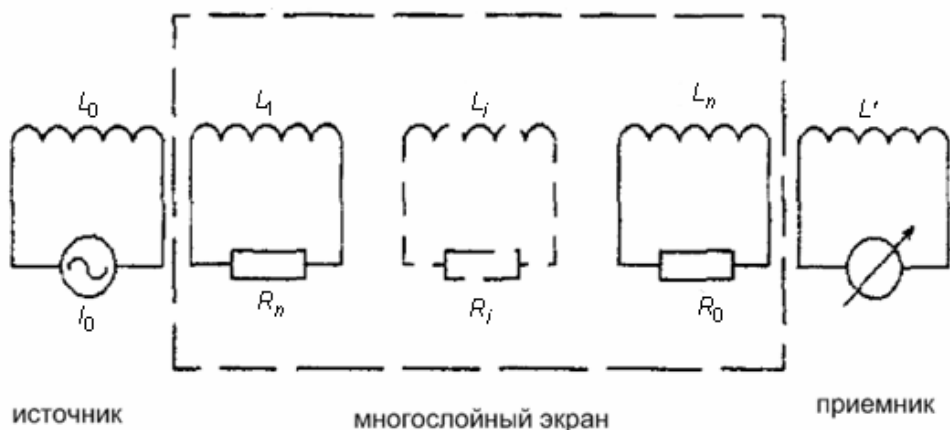


Рис. 2. Эквивалентная схема многослойной структуры для экранирования магнитного поля

Таким образом, выражение для определения эффективности экранирования ЭМП в децибелах многослойной структурой имеет вид:

$$K = 20 \lg \frac{1}{k_3} = 10 \lg \left( 1 + \omega^2 \left( \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{R_i} \right)^2 \right). \quad (8)$$

Так как величина сопротивления слоя многослойной структуры прямо пропорциональна величине удельного объемного сопротивления материала, из которого он изготовлен ( $\rho_i$ ), и обратно пропорциональна значению толщины слоя ( $d_i$ ), а величина индуктивности пропорциональна относительной магнитной проницаемости материала ( $\mu_i$ ), следовательно, выражение (8) можно представить в виде:

$$K = 10 \lg \left( 1 + \beta \omega^2 \left( \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i d_i}{\rho_i} \right)^2 \right), \quad (9)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии экрана.

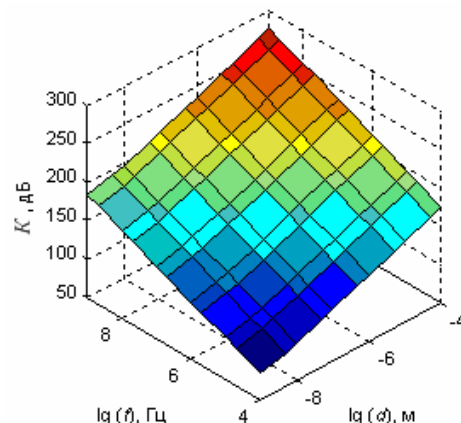
### Результаты анализа эффективности экранирования многослойной структурой

Известно [2], что при использовании для экранирования ЭМП магнитных материалов наблюдается зависимость магнитной проницаемости от значения напряженности поля, что приводит к эффекту насыщения и снижению эффективности экранирования. Чтобы исключить эффект насыщения поверхность экрана, обращенную к источнику поля, выполняют из материала с низкой магнитной проницаемостью, имеющего высокий уровень насыщения, а второй слой – из материала с высокой магнитной проницаемостью, имеющего низкий уровень насыщения. При этом первый слой экрана уменьшает напряженность магнитного поля до значения, не вызывающего насыщение второго слоя. Поэтому для анализа эффективности экранирования многослойным экраном выбрана двухслойная структура ( $n=2$ ), первый слой которой выполнен из немагнитного нанокompозитного материала ( $\mu = 1$ ), а второй – из магнитного нанокompозитного материала ( $\mu > 1$ ). Расчет эффективности экранирования на основе выражения (8) выполнен в диапазоне частот ЭМП от 10 кГц до 10 ГГц при изменении значений электрофизических параметров материала слоев экрана:  $\rho$  от  $10^{-1}$  до  $10^{-8}$  Ом·м<sup>-1</sup>, и  $\mu$  от 1 до  $10^6$ . Практически реализовать такие значения электрофизических параметров мате-

риалов позволяет использование нанокompозитных структур [5–7].

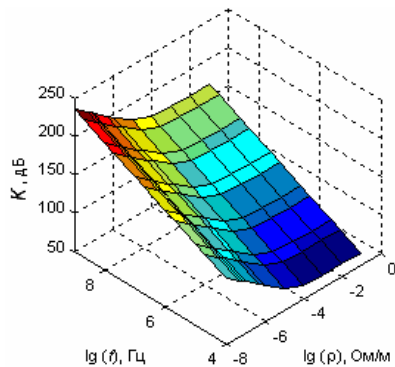
Результаты вычислений представлены на рис. 3–6. Для выбранного диапазона частот на рис. 3 показана зависимость эффективности экранирования двухслойного экрана при различных значениях толщины первого слоя экрана. На рис. 4 представлена аналогичная зависимость, но для различных значений удельного объемного сопротивления слоя немагнитного материала при фиксированном значении толщины этого слоя  $1 \cdot 10^{-6}$  м. Выбранный интервал изменения  $\rho$  соответствует значениям удельного объемного сопротивления нанокompозита на основе полимерной матрицы с различной объемной долей нанодисперсного металла с высокой проводимостью [7]. Как следует из результатов расчета, значение эффективности экранирования моделируемой структуры возрастает в исследуемом диапазоне частот при увеличении толщины слоя и уменьшении значений удельного объемного сопротивления немагнитного материала. При этом им можно варьировать, изменяя объемную долю наночастиц металла в матрице композита. Зависимость, представленная на рис. 5, показывает увеличение эффективности экранирования при росте значений магнитной проницаемости магнитного слоя в многослойном экране.

Из результатов моделирования многослойного экрана следует, что при изменении количества слоев (рис. 6) эффективность экранирования незначительно изменяется при увеличении  $n$ .



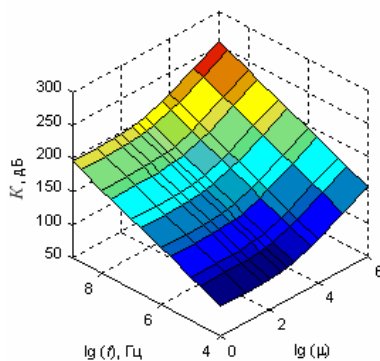
**Рис. 3. Зависимость эффективности экранирования  $K$  многослойной структуры от частоты  $f$  электромагнитного поля и толщины  $d$  слоя немагнитного материала при значениях параметров:**

$$n = 2, \rho_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \mu_1 = 1, \rho_2 = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \mu_2 = 100, d_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$



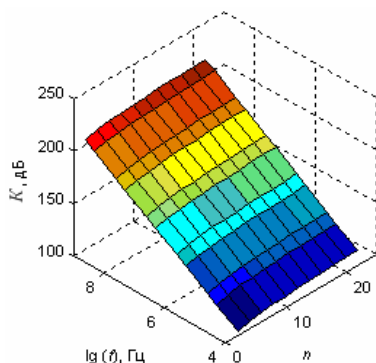
**Рис. 4.** Зависимость эффективности экранирования  $K$  многослойной структуры от частоты  $f$  электромагнитного поля и удельного объемного сопротивления  $\rho$  немагнитного материала при значениях параметров:

$$n = 2, \mu_1 = 1, d_1 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}, \rho_2 = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \\ \mu_2 = 100, d_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$



**Рис. 5.** Зависимость эффективности экранирования  $K$  многослойной структуры от частоты  $f$  электромагнитного поля и магнитной проницаемости  $\mu$  материала магнитного слоя при значениях параметров:

$$n = 2, \rho_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \mu_1 = 1, d_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \\ \rho_2 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, d_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$



**Рис. 6.** Зависимость эффективности экранирования  $K$  многослойной структуры от частоты  $f$  электромагнитного поля и количества слоев  $n$  при значениях параметров:

$$\rho_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \mu_1 = 1, d_1 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}, \\ \rho_2 = 6,8 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}^{-1}, \mu_2 = 100, d_2 = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

## Выводы

В работе предложена модель многослойной структуры для экранирования ЭМП, которая устанавливает зависимость эффективности экранирования от количества слоев в экране, их толщины, а также электрофизических параметров материала каждого слоя.

Анализ эффективности экранирования многослойным нанокompозитным экраном показал, что с помощью структур, обладающих высокой магнитной проницаемостью и низким удельным сопротивлением можно достичь увеличения эффективности экранирования ЭМП.

Установлено, что эффективность экранирования многослойным нанокompозитным экраном незначительно зависит от количества слоев в многослойной структуре, а в основном определяется электрофизическими свойствами нанокompозитного материала.

## Литература

1. Кечиев Л.Н., Степанов П.В. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникации. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.
2. Henry W. Ott. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems.- New York: I. Wiley & Sons, 1988. – 429 p.
3. Чернушенко А.М., Петров Б.В., Малорацкий Л.Г. и др. Конструирование экранов и СВЧ – устройств. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
4. Выгулин С.А., Горобицкий А.В., Лебедева Е.В. Ферромагнитный резонанс в многослойных и композитных наноструктурах // Радиолокация и радиосвязь: Труды 3-й Всероссийской конференции (26–30 октября 2009 г.). – М.: ИРЭ РАН, 2009. – С. 725–729.
5. Мачулянский А.В. Высокочастотная проводимость наноразмерных металлических частиц // Электроника и связь. – 2007. – № 1. – С. 41–45.
6. Telychkina O., Boehme B., Heimann, Morris J., Wolter K.-J. Study of Nanosilver Filled Conductive Adhesives and Pastes for Electronics Packaging // Materials of the 32<sup>nd</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE 2009), (May 13<sup>th</sup> – 17<sup>th</sup>). – Brno, Czech Republic, 2009. – p. 332–333.
7. Оуэнс Ф., Пул Ч. Нанотехнологии – М.: Техносфера, 2007. – 376 с.