

*М.М. РЕЗИНКИНА*, докт. техн. наук, НТЦ МТО НАН Украины,  
Харьков

*В.С. ГРИНЧЕНКО*, аспирант, НТЦ МТО НАН Украины, Харьков

## РАСЧЕТНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ

Проведено розрахунковий вибір параметрів багатошарових провідних екранів. Показано, що багатошарові екрани дозволяють суттєво збільшити коефіцієнт екранування при зменшеному расході метала.

Проведен расчетный выбор параметров многослойных проводящих экранов. Показано, что многослойные экраны позволяют существенно повысить коэффициент экранирования при меньшем расходе металла.

**Введение.** Наличие ограничений по уровням электромагнитных полей (ЭМП), в которых может стабильно работать современная электронная аппаратура, а также возможное отрицательное их влияние на здоровье человека вызывает необходимость снижения напряженностей ЭМП до допустимых значений. К числу распространенных средств снижения электромагнитных помех являются проводящие экраны [1, 2]. Одним из передовых разностных методов расчета ЭМП является метод конечного интегрирования (МКИ), который еще называют методом конечных объемов [3]. Целью данной работы является применение МКИ для расчетного выбора параметров многослойных экранов, предназначенных для защиты от действия низкочастотного магнитного поля токовых источников.

**Постановка задачи.** Для случая экранирования магнитного поля синусоидальных токов, представим напряженности ЭМП в виде комплексных величин и запишем решаемое уравнение Максвелла в виде [4]:

$$\operatorname{rot} \vec{H} = (\gamma + j\omega\epsilon_0\epsilon) \cdot \vec{E} + \vec{J}^{\text{ext}}, \quad (1)$$

где  $\vec{H}$ ,  $\vec{E}$  - комплексные амплитуды векторов напряженности магнитного и электрического поля соответственно;  $\vec{J}^{\text{ext}}$  - комплексная амплитуда вектора плотности тока сторонних источников;  $\gamma$  - удельная электропроводность;  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая прони-

цаемость;  $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$  Ф/м;  $\omega$  - круговая частота;  $j$  – комплексная единица.

Для рассматриваемого случая низкой частоты тока источника, а также постоянного удельного сопротивления проводящих сред, сформулируем задачу через так называемый модифицированный векторный магнитный потенциал  $\vec{A}^*$ , исключив из решаемых уравнений скалярный электрический потенциал [5, 6]. Тогда напряженность электрического поля  $\vec{E}$  и индукцию магнитного поля  $\vec{B}$  запишем в виде:

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A}^* ; \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = \text{rot } \vec{A}^* , \quad (3)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость.

Рассмотрим задачу о распределении магнитного поля в системе, содержащей трехфазный шинопровод, а также незамкнутый экран. Разобьем расчетную область прямоугольной сеткой. Учитывая, что рассматриваемый экран представляет собой лист, толщина которого существенно меньше, чем шаг пространственной сетки, общая расчетная сетка (назовем ее глобальной) наносится на него так, что узлы, принадлежащие экрану, имеют разные значения искомой функции на его наружной и внутренней поверхностях. Для нахождения этих значений, экран разбивался по толщине дополнительной (назовем ее локальной) сеткой на  $N$  частей. Проинтегрировав (1) по сечениям ячеек  $S_p$ , ограниченных контурами  $l_p$ , запишем выражение для закона полного тока в виде:

$$\oint_{l_p} \vec{H} dl = \int_{S_p} \gamma \dot{E}_n ds + \dot{I}_p^{\text{ext}} , \quad (4)$$

где  $\dot{E}_n$  – нормальная к поверхности  $S_p$  компонента напряженности электрического поля;  $\dot{I}_p^{\text{ext}}$  - сторонний ток через сечение  $S_p$ ,  $p=x,y,z$ .

Используя (2), (3) и пренебрегая током смещения, запишем (4) в виде:

$$\oint_{l_p} \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{A}^* dl = \mu_0 \int_{S_p} -j\omega\gamma \dot{A}_n^* ds + \mu_0 \dot{I}_p^{\text{ext}} , \quad (5)$$

где  $\dot{A}_n^*$  - нормальная к поверхности  $S_p$  компонента векторного магнитного потенциала.

Известно, что сеточные методы реализуются, как правило, при помощи метода исключения, чаще всего записанного в виде прогонки [7]. Сравнение величин индукции магнитного поля, полученных в результате численного расчета при использовании описанного подхода (подробнее см. [8]), с известными аналитическими решениями [9, 10], а также результатами измерений [11, 12] показало их совпадение в пределах заданной при расчете относительной погрешности – 3 %.

**Расчетный выбор параметров многослойных экранов.** В ряде практически важных случаев необходимо снижать уровни индукции магнитного поля (МП), возникающего из-за токов промышленной частоты. Рассмотрим случай, когда габаритные размеры защищаемой зоны имеют порядок 0,5 – 5 м, тогда толщина экрана  $d$  не должна превышать 0,5-5 мм, иначе его вес и стоимость будут чересчур велики. При этом  $d$  оказывается существенно (в 5-10 раз) больше, чем толщина скин-слоя  $\Delta$ . Для того, чтобы обеспечить в этом случае эффективное экранирование, необходимо применение особых приемов. К ним можно отнести использование многослойных экранов.

Рассмотрим экранирование МП трехфазного источника (ток – 500 А, нижний провод имеет фазу  $(-120^\circ)$ , средний –  $0^\circ$ , нижний –  $(+120^\circ)$ , расстояние между фазами:  $a = 0,2$  м, расстояние до экрана:  $b = 0,2$  м, толщина экрана  $d = 2$  мм, материал – Al). Будем оценивать эффективность снижения МП путем сравнения усредненных коэффициентов экранирования в зоне за экраном:

$$k_{av1} = \left( \sum_{n=1}^N k_{G} \right) / N \text{ в зоне: } 0 < y < 0,3L_{sc}, 5b < |x| < 7,5b,$$

где  $L_{sc}$  – длина экрана в направлении оси  $Y$ ;  $k_G = |\vec{B}| / |\vec{B}_0|$  – коэффициент экранирования;  $|\vec{B}|$  – модуль индукции МП в рассматриваемой точке при наличии экрана;  $|\vec{B}_0|$  – модуль индукции МП в рассматриваемой точке при отсутствии экрана.

Рассмотрим случай протяженных экранов, когда экран полностью покрывает подводящие края шинпровода, так что они не влияют на распределение МП в исследуемых областях. При этом задачу можно решать в двумерной постановке, полагая, что во всех сечениях, перпендикулярных направлению шинпроводов, распределение поля одинаковы.

На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициента экранирования при варьировании расстояния между слоями двухслойных

экранов  $D_{sc}$  (вариант  $D_{sc}/b=0$  соответствует однослойному экрану удвоенной толщины). Как видно из рис. 1, увеличение расстояния между слоями экрана позволяет повысить коэффициент экранирования в зоне за шинпроводами. Однако, рост  $D_{sc}/b$  свыше 1,5 – 2 уже не приводит к существенному улучшению экранирующих свойств.

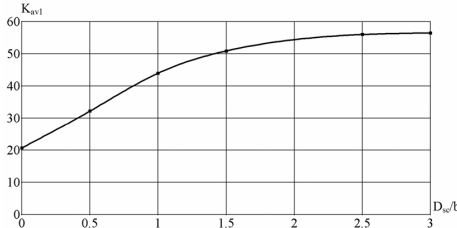


Рис. 1. Рассчитанная зависимость среднего коэффициента экранирования от расстояния между параллельными слоями двухслойных экранов.

Проведено также исследование влияния количества дополнительных слоев экрана на его экранирующие свойства. На рис. 2 представлены результаты расчета индукции магнитного поля и коэффициентов экранирования при варьировании числа слоев многослойных экранов и расстояния между ними. Как следует из проведенных расчетов, использование многослойных экранов оказывается весьма эффективным, однако наращивание числа слоев результативно лишь до определенного уровня.

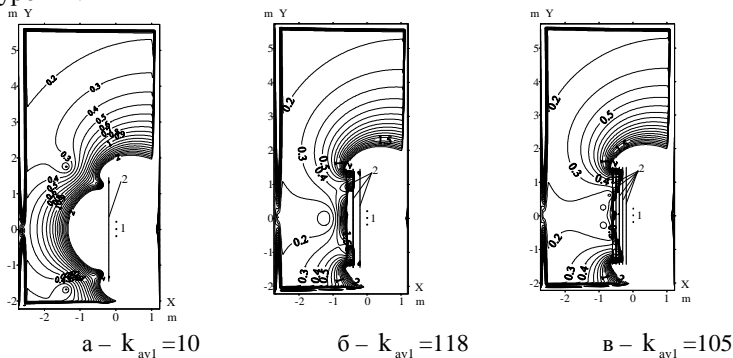


Рис. 2. Результаты расчета распределения индукции магнитного поля ( $|B| = \text{const} = 0.1 - 2 \mu\text{Т}$ ) в многослойных экранах (1 – шинпровода, 2 – экран).

**Выводы.** Для экранирования зоны, расположенной за шинопроводами, применение многослойных экранов гораздо эффективнее, чем увеличение толщины однослойных экранов. Так, коэффициент экранирования при использовании многослойных экранов оказывается в 2-10 раз выше, чем для однослойных экранов из того же материала, имеющих тот же объем.

**Список литературы:** 1. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957. – 327 с. 2. *Шапиро Д.Н.* Основы теории электромагнитного экранирования. – Ленинград: Энергия, 1975. – 109 с. 3. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с. 4. *Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М.* Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с. 5. *Biro O., Preis K.* // IEEE Trans. on Magnetics. – 1989. – Vol. 25, No. 4. – P. 3145-3159. 6. *Clemens M., Weiland T.* // IEEE Trans. on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 3. – P. 1175-1178. 7. *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с. 8. *Резинкина М.М.* // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – № 11. – С. 17-24. 9. *Круг К. А.* Физические основы электротехники. – Т. 1. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 472с. 10. *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1948. – 539 с. 11. *Salinas E., Rezinkina M.* // Proc. of 5th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields. – 2008. Palermo (Italy). 12. *Salinas E., Rezinkina M., Atalaya J.* // Environmentalist. – 2009. – № 2.



**Резинкина Марина Михайловна,**

Научно-технический центр магнетизма технических объектов Национальной академии наук Украины, доктор технических наук. Главный научный сотрудник.



**Гринченко Владимир Сергеевич,** выпускник физико-технического факультета ХНУ им. В.Н. Каразина 2009 г.

*Поступила в редколлегию 02.07.2009*