

М.М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, с.н.с., Научно-технический центр магнетизма технических объектов, Харьков

В.С. ГРИНЧЕНКО, аспирант, Научно-технический центр магнетизма технических объектов, Харьков

К.О. РЕЗИНКИНА, студент, Харьковский национальный университет им. Каразина, Харьков

РАСЧЕТНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЛЕНТОЧНЫХ ЭКРАНОВ

Проведено розрахунковий аналіз залежності екрануючих властивостей стрічкових екранів в залежності від їх основних параметрів: товщини й ширини стрічки екрана, ступені його сплошності. Знайдені параметри стрічкових екранів, що забезпечують оптимальний коефіцієнт екранування при зменшеному об'ємі металу.

Проведен расчетный анализ зависимости экранирующих свойств ленточных экранов в зависимости от их основных параметров: толщины и ширины ленты экрана, степени его сплошности. Получены параметры ленточных экранов, которые обеспечивают оптимальный коэффициент экранирования при уменьшенном объеме металла.

Введение. Одним из средств снижения напряженностей магнитного поля (МП) до допустимых значений являются проводящие экраны. В ряде случаев более предпочтительным оказывается использование ленточных экранов. Основными геометрическими параметрами таких экранов являются толщина и ширина ленты экрана, а также степень его сплошность. Оказывается, что увеличение, к примеру, толщины экранов свыше некоторого уровня уже не приводит к существенному росту коэффициента экранирования.

Целью данной работы является расчетный выбор оптимальных параметров ленточных экранов на основе математического моделирования электромагнитных процессов численными методами.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о распределении магнитного поля в системе, содержащей трехфазный шинопровод и незамкнутый ленточный экран. Токи в шинопроводе будем считать синусоидальными. Запишем уравнение Максвелла в комплексной форме [1]:

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

где \vec{H} , \vec{E} – комплексные амплитуды векторов напряженности магнитного и электрического поля соответственно; \vec{J}_{ext} – комплексная амплитуда вектора плотности тока сторонних источников; γ – удельная электропроводность; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость; $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м; ω – круговая частота; $j = \sqrt{-1}$.

Выразим напряженность электрического поля и индукцию магнитного поля через модифицированный векторный магнитный потенциал, позволяющий исключить из решаемых уравнений скалярный электрический потенциал [2, 3]:

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A}^* ; \quad \vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} = rot\vec{A}^* .$$

Запишем уравнение (1) в интегральной форме, пренебрегая током смещения, в терминах модифицированного векторного магнитного потенциала:

$$\oint_l \frac{1}{\mu} rot\vec{A}^* dl = -j\mu_0\omega \cdot \int_S \gamma\vec{A}^* d\vec{s} + \mu_0 \cdot \int_S \vec{J}_{ext} d\vec{s} , \quad (2)$$

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

Перепишем уравнение (2) в разностном виде. Будем использовать декартовую систему координат. Разобьем рассматриваемую область на ячейки-параллелепипеды таким образом, чтобы узлы расчетной сетки лежали на границах раздела сред. Электрические свойства каждой ячейки полагаются однородными.

Рассмотрим ячейку (i,j,k) . Поставим в соответствие этой ячейке три контура, охватывающих элементарные площадки: S_x – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k-1/2)$, $(i+1/2, j+1/2, k-1/2)$, S_y – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k-1/2)$, $(i+1/2, j+1/2, k-1/2)$, S_z – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j-1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k+1/2)$. В результате интегрирования (2) по контурам, охватывающим площадки S_x , S_y и S_z , получим решаемые разностные уравнения. При записи разностных уравнений учитывалось, что на границе раздела двух соседних ячеек (т.е. на их общей грани) тангенциальная составляющая модифицированного векторного магнитного потенциала непрерывна.

Полученная система уравнений решалась с помощью прогонки итерационным методом переменных направлений [4]. Для ограничения расчетной области до размеров интересующей нас зоны, на ее границах вводились анизотропные хорошо поглощающие слои [5]. Для выбора

параметров односно хорошо согласованных слоев [6] были проведены тестовые расчеты для имеющих аналитическое решение случаев расположения прямого и обратного токопроводов в воздухе [7].

Расчетный выбор параметров однослойных ленточных экранов. Рассмотрим экранирование МП трехфазного источника со следующими характеристиками: ток – 500 А, нижний провод имеет фазу – 120^0 , средний – 0^0 , верхний – $+120^0$, расстояние между фазами $a = 0,2$ м. Пусть базовый экран имеет такие параметры: расстояние до экрана $b = 0,2$ м, толщина экрана $d = 2$ мм, отношение ширины ленты экрана w_r к зазору между лентами w_g : $w_r/w_g = 1$, материал – Al. Задачу будем решать в двумерной постановке, полагая, что во всех сечениях, перпендикулярных направлению шинопроводов, распределения поля одинаковы.

Эффективность снижения МП будем оценивать путем сравнения усредненных коэффициентов экранирования в зоне за экраном:

$$k_{av} = \left(\sum_{n=1}^N k_S \right) / N \quad \text{в зоне } 0 < y < 0.3L_{sc}, \quad 5b < |x| < 7.5b,$$

где L_{sc} – длина экрана в направлении оси Y ; b – x -ая координата ближайшего к источнику тока экрана; $k_S = |\vec{B}| / |\vec{B}_0|$ – 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.

На рис. 1 приведены результаты расчета индукции МП в области за ленточным экраном и среднего коэффициентов экранирования при варьировании толщины ленточного экрана. Как видно на рис. 1, увеличение толщины экранов выше некоторого уровня не приводит к существенному росту коэффициента экранирования.

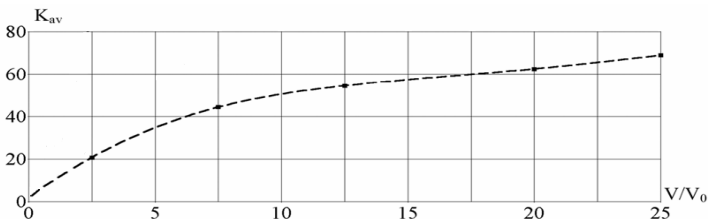


Рис. 1.

Результаты расчета, распределения линий равной индукции маг-

нитного поля представлены на рис. 2, а-в. Модуль индукции варьировался в диапазоне 0,1 – 2,0 мкТл. На рис. 2 использованы обозначения: 1 – шинпроводы, 2 – экран. Соответствующие значения коэффициентов экранирования приведены в табл. 1. Результаты расчета коэффициента экранирования магнитного поля в зоне за экраном показаны на рис. 3 при варьировании соотношения между шириной ленты экрана и величиной зазора между лентами (кривая 1), а также степени сплошности ленточного экрана (кривая 2).

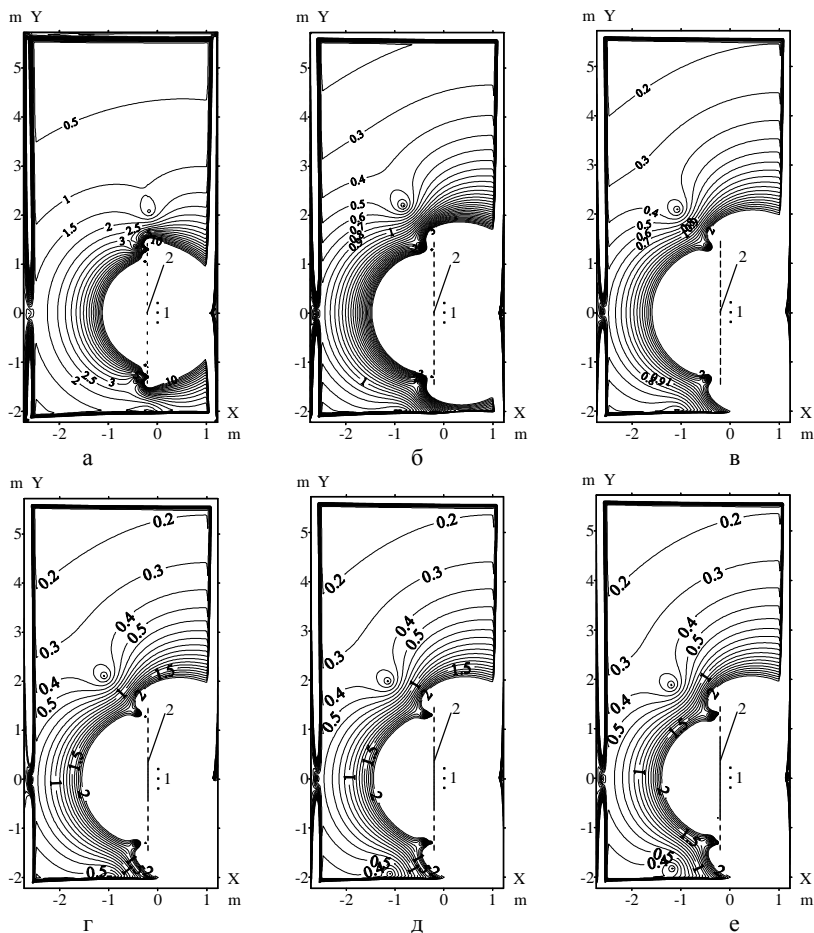


Рис. 2.

Таблица 1.

Результаты расчета коэффициентов экранирования однослойных ленточных экранов с различной шириной ленты

	рис. 2,а	рис. 2,б	рис. 2,в	рис. 2,г	рис. 2,д	рис. 2,е
k_{av}	2,90	5,20	6,40	6,90	8,20	9,10
w_r/w_g	0,50	1,00	1,50	~	~	~
V/V_0	0,25	0,50	0,75	0,66	0,72	0,79

Как следует из полученных данных, весьма узкие ленточные экраны не обеспечивают больших величин коэффициентов экранирования.

Расчет коэффициента экранирования при варьировании степени сплошности однослойных экранов показан на рис. 3 (кривая 2). Распределение линий равной индукции магнитного поля показаны на рис. 2 (г,д,е), а соответствующие им значения коэффициентов экранирования приведены в табл. 1. Отметим, часть экрана на рис. 2 (г,д,е), расположенная напротив шинпроводов, была сплошной, а его края – ленточными (имеющими разрывы сплошности).

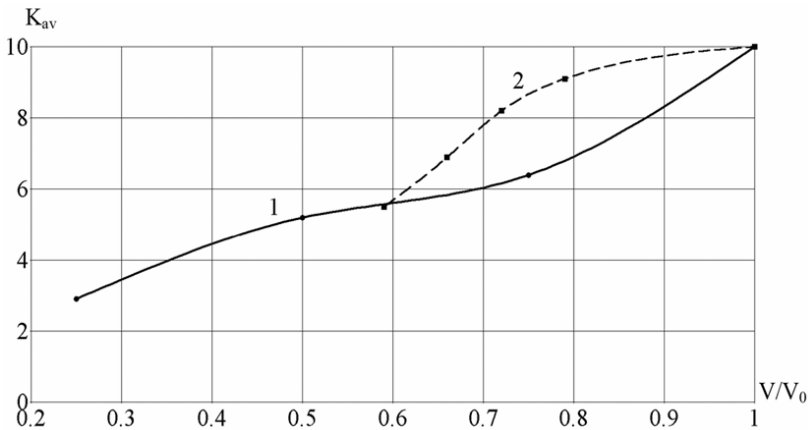


Рис. 3.

Как видно на рис. 3, использование подобных экранов позволяет существенно улучшить экранирующие свойства и оказывается более эффективным, чем уменьшение ширины ленты, из которой выполняется экран, что видно из сравнения кривых 1 и 2.

Выводы. Узкие ленточные экраны не обеспечивают больших величин коэффициентов экранирования ($k_{av} \sim 10$ при толщине экрана $d \sim 2$ мм). Увеличение толщины экранов эффективно до определенного уровня ($d \sim 30$ мм), свыше которого коэффициент экранирования существенно не увеличивается ($k_{av} \sim 60$). Более эффективным представляется варьирование степени сплошности однослойных ленточных экранов, позволяющее увеличить коэффициенты экранирования до полутора раз при том же расходе материала.

Список литературы: 1. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с. 2. Biro O., Preis K. // IEEE Trans. on Magnetics. – 1989. – Vol. 25, No. 4. – P. 3145-3159. 3. Clemens M., Weiland T. // IEEE Trans. on Magnetics. – 2003. – Vol. 39, № 3. – P. 1175-1178. 4. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с. 5. Резинкина М.М. // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – № 11. – С. 17-24. 6. Taflove A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite difference time domain method. – Boston-London: Artech House, 2000. – 852 p. 7. Круг К. А. Физические основы электротехники. – Т. 1. – М.-Л.: Государственное энергетическое изд-во, 1946. – 472 с.

Поступила в редколлегию 14.12.2009