

М.М. РЕЗИНКИНА, д-р техн. наук, с.н.с., НТЦ МТО НАН України, Харьков

В.С. ГРИНЧЕНКО, аспирант, НТЦ МТО НАН України, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКРАНИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ ЭКРАНОВ

Проведено розрахунковий аналіз залежності екрануючих властивостей двошарових стрічкових екранів від ступеня їх суцільності. Знайдена залежність коефіцієнтів екранування багат шарових стрічкових екранів від кількості їх шарів.

Проведен расчетный анализ зависимости экранирующих свойств двухслойных ленточных экранов от степени их плотности. Найдена залежність коефіцієнтів екранирування многослойных ленточных экранов от количества их слоев.

Введение. Повышение требований к экранирующим свойствам защитных проводящих экранов приводит к необходимости поиска более эффективных способов уменьшения электромагнитного поля. Поэтому наряду с рассмотренными ранее проводящими ленточными экранами [1], представляет интерес рассмотрение многослойных ленточных экранов. Оказывается, что при фиксированном расходе материала применение многослойных ленточных экранов может быть эффективнее, чем увеличение толщины однослойных ленточных экранов. Основными характеристиками многослойных ленточных экранов, влияющими на коэффициент эффективности экранирования, являются число слоев и степень их сплошности. В данной работе рассмотрены вопросы расчетного выбора оптимальной степени сплошности двухслойных экранов, а также исследованы зависимости коэффициентов эффективности экранирования многослойных экранов от числа слоев.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу экранирования магнитного поля (МП) трехфазного шинпровода, по которому течет синусоидальный ток, незамкнутыми проводящими многослойными ленточными экранами. Пренебрегая токами смещения, и выполнив интегрирование по поверхностям S элементарных ячеек, на которые разбита расчетная область, воспользовавшись теоремой Стокса, запишем для комплексных величин уравнение Максвелла [2]:

$$\oint_l \dot{H} d\vec{l} = \int_S \gamma \dot{E} d\vec{s} + \int_S \dot{J}^{ext} d\vec{s} , \quad (1)$$

где $\dot{\vec{H}}$ – комплексная амплитуда вектора напряженности магнитного поля; γ – удельная электропроводность; $\dot{\vec{E}}$ – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля; $\dot{\vec{J}}^{ext}$ – комплексная амплитуда вектора плотности тока сторонних источников; l – контур, охватывающий поверхность S .

В терминах модифицированного векторного магнитного потенциала $\dot{\vec{A}}^*$ (см. [3,4]) уравнение (1) принимает следующий вид:

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

где μ – относительная магнитная проницаемость; ω – круговая частота тока, текущего по шинопроводу; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; j – комплексная единица.

Многослойный ленточный экран представляет собой набор ленточных экранов. Следовательно, удобно использовать декартову систему координат. Рассматриваемая область разбивается на ячейки-параллелепипеды таким образом, чтобы узлы расчетной сетки лежали на границах раздела сред. Для каждой ячейки записывается уравнение (2) в разностном виде (подробнее см. [5]). Полученная система разностных уравнений решается с помощью прогонки итерационным методом переменных направлений [6]. Для ограничения расчетной области вводятся анизотропные хорошо поглощающие слои [7]. Для выбора параметров односно хорошо согласованных слоев были проведены тестовые счета для имеющих аналитическое решение случаев расположения прямого и обратного токопроводов в воздухе [8].

Исследование зависимостей коэффициентов эффективности экранирования двухслойного ленточного экрана от степени его сплошности. Для оценки снижения МП из-за наличия экрана введем усредненные коэффициенты эффективности экранирования в зоне за экраном и в зоне над экраном соответственно (см. рис. 1):

$$k_{av1} = \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^N \frac{|\dot{\vec{B}}_0|}{|\dot{\vec{B}}|} \quad \text{в зоне: } 0 < y < 0.3L_{sc}, 5b < |x| < 7.5b;$$

$$k_{av2} = \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^N \frac{|\dot{\vec{B}}_0|}{|\dot{\vec{B}}|} \quad \text{в зоне: } L_{sc} < y < 1.3L_{sc}, 0 < |x| < 0.3b,$$

где L_{sc} – длина экрана в направлении оси Y ; b – x -ая координата экрана

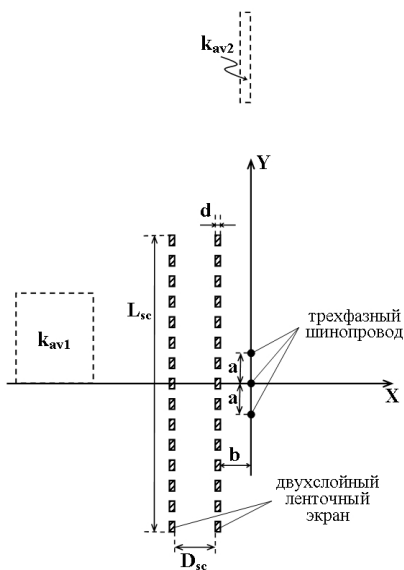


Рис. 1.

ближайшего к источнику тока; $|\dot{B}_0|$ – модуль индукции МП в точке в отсутствии экрана; $|\dot{B}|$ – модуль индукции МП в точке при наличии экрана; N_1, N_2 – количество точек усреднения соответственно в зоне за экраном и над ним.

Характеристики трехфазного источника положим следующими: сила тока – 500 А, нижний провод имеет фазу -120° , средний – 0° , верхний – $+120^\circ$, расстояние между фазами $a = 0,2$ м. Будем полагать, что базовый экран имеет такие параметры (рис. 1):

расстояние до экрана $b=0.2$ м, длина экрана $L_{sc}=2.9$ м, толщина экрана $d=2$ мм, отношение ширины ленты экрана w_1 к зазору между лентами w_2 : $w_1/w_2=1$, материал – Al. Объем базового экрана обозначим через V_0 .

Расстояние между слоями экрана положим $D_{sc}=0.3$ м. Распределение линий равной индукции магнитного поля при варьировании степени сплошности двухслойных экранов показано на рис. 2 (использованы следующие обозначения: 1 – шинный провод, 2 – двухслойный экран): а – система двух ленточных экранов; б – один экран ленточный, второй имеет разрывы сплошности (его центральная часть – сплошная, а края – ленточные); в – один экран ленточный, второй сплошной; г – система двух сплошных экранов. Модуль индукции МП варьировался в диапазоне 0.2–2 мкТл (рис. 2).

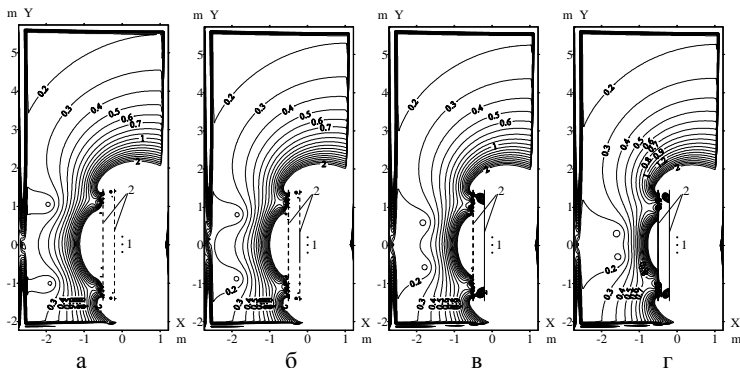


Рис. 2.

Соответствующие значения коэффициентов эффективности экранирования приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты расчета коэффициентов эффективности экранирования многослойных ленточных экранов

	рис. 2,а	рис. 2,б	рис. 2,в	рис. 2,г	рис. 3,а	рис. 3,б	рис. 3,в	рис. 3,г
k_{av1}	16,3	22,1	28,9	56	17,6	34,9	64,0	98,6
k_{av2}	6,3	6,7	6,9	6,9	6,3	6,2	6,2	6,2
V/V_0	1,0	1,17	1,52	2	1	1,55	2,1	2,6

Таким образом, при экранировании зоны за шинопроводом более целесообразно использование системы сплошных экранов. В то же время, при необходимости снижения напряженности МП в зоне над шинопроводом выгоднее применять системы ленточных экранов (в результате чего снижается расход материала экранов – табл. 1), так как зависимость k_{av2} от степени сплошности незначительна.

Исследование зависимостей коэффициентов эффективности экранирования многослойного ленточного экрана от числа слоев. Проведено также исследование влияния дополнительных слоев экрана на его экранирующие свойства. Расстояние между крайними слоями экрана положим $D_{sc}=0.6$ м, отношение ширины ленты экрана к зазору между лентами – $w_l/w_g=1$. Результаты расчета линий равной индукции МП при увеличении числа слоев показаны на рис. 3 (1 – шинопровод, 2 – многослойный ленточный экран): а – система двух ленточных экранов; б – трех ленточных экранов; в – четырех экранов; г – пяти экра-

нов. Модуль индукции МП варьировался в диапазоне 0.2–2 мкТл (см. рис. 3). Соответствующие значения коэффициентов эффективности экранирования приведены в табл. 1.

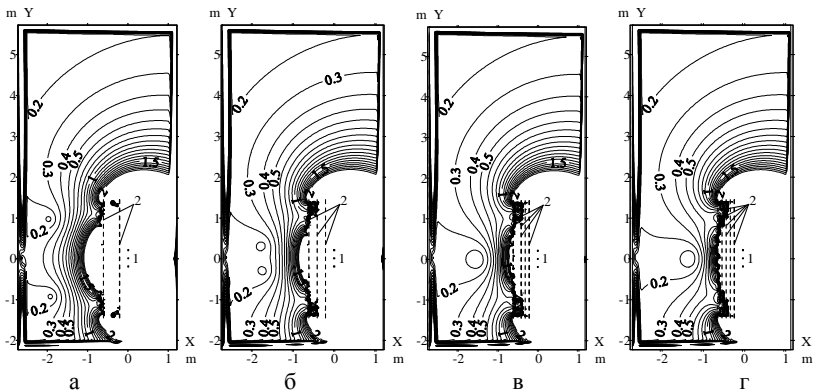


Рис. 3.

Как видно из табл. 1, использование многослойных экранов оказывается весьма эффективным при экранировании зоны за экраном. К примеру, два дополнительных экрана (рис. 3,в) увеличивают k_{av1} по сравнению с коэффициентом эффективности экранирования для двухслойного экрана (рис. 3,а) более чем в 3.5 раза. Также отметим, что зависимость коэффициента эффективности экранирования в зоне над экраном от числа слоев невелика.

Выводы. Использование многослойных ленточных экранов для экранирования МП представляется более эффективным, нежели однослойных ленточных экранов того же объема. Хотя коэффициент эффективности экранирования зоны над экраном существенно не изменяется, но при том же расходе металла использование многослойных экранов обеспечивает увеличение коэффициента эффективности экранирования зоны за экраном в 1.5–2 раза. Если же приоритетным является экранирование зоны над экраном, то оптимальным является использование двухслойных ленточных экранов.

Список литературы: 1. Резинкина М.М., Гринченко В.С., Резинкина К.О. Расчетный выбор параметров ленточных экранов // Вестник НТУ "ХПИ". Сер. "Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов". – 2009. – №44. – С. 133-138. 2. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. –

710 с. **3.** *Biro O., Preis K.* // IEEE Trans. on Magnetics. – 1989. – Vol. 25. – №. 4. – P. 3145-3159. **4.** *Clemens M., Weiland T.* // IEEE Trans. on Magnetics. – 2003. – Vol. 39. – №3. – P. 1175-1178. **5.** *Резинкина М.М.* Использование численных расчетов для выбора средств экранирования от действия магнитного поля // ЖТФ. – 2007. – Т. 77. – №11. – С. 17-24. **6.** *Самарский А.А.* Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с. **7.** *Taflove A., Hagness S.* Computational electrodynamics: the finite difference time domain method. – Boston-London: Artech House, 2000. – 852 p. **8.** *Круг К.А.* Физические основы электротехники. Т.1. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. – 472 с.

Поступила в редколлегию 01.04.2010