

РАСЧЕТНЫЙ ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ СЛОЖНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

М.М.Резинкина¹, докт.техн.наук, А.А.Щерба², чл.-корр. НАН Украины, В.С.Гринченко³,
К.О. Резинкина⁴,

^{1,3} – Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,
ул. Индустриальная, 19, а/я 72, Харьков, 61106, Украина

² – Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

⁴ – Université Paris-Sud 11, d'Orsay, France

Рассмотрены системы, содержащие электромагнитные экраны сложной пространственной конфигурации. Получены численные зависимости, позволяющие выбирать параметры электромагнитных экранов в зависимости от требуемой величины эффективности экранирования. Показано, как за счет изменения конфигурации и числа слоев экрана можно добиться эффективного экранирования различных зон в зависимости от их расположения относительно токовых источников. Библ. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключевые слова: эффективность экранирования, электромагнитный экран, низкочастотное магнитное поле, метод конечных объемов, одноосно хорошо согласованный слой.

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. Одним из наиболее распространенных средств снижения электромагнитных помех являются электромагнитные экраны [7]. Для выбора оптимальных конструкций таких экранов необходима информация о происходящих в них электромагнитных процессах. Аналитическое описание систем, содержащих электромагнитные экраны сложной пространственной конфигурации, представляется затруднительным. Поэтому наиболее доступным, дешевым и простым способом изучения экранирующих свойств таких систем является математическое моделирование. В настоящее время существует большое количество коммерческих программ, предназначенных для расчета ЭМП. К их числу относятся такие пакеты, как ANSYS, FemLab, Microwave Studio, OPERA и др. Преимуществом подобных программ является их универсальность. Однако в ряде важных практических приложений в области электротехники применение подобных универсальных пакетов либо связано с чрезвычайно высокими требованиями к используемым вычислительным средствам, либо невозможно вообще. К таким приложениям относятся, в частности, расчет ЭМП в системах, содержащих объекты, один или два размера которых существенно (на порядок и более) отличаются от его остальных размеров. Примером подобных объектов могут служить тонкие проводящие пластины или ленты, используемые для экранирования МП, например, токовых источников. Габаритные размеры рассматриваемых экранов могут составлять единицы-десятки метров, а их толщина – порядка единиц-десятков миллиметров. Причем в большинстве случаев рассматриваемые объекты располагаются в незамкнутом пространстве, т.е. представляют собой так называемые открытые системы. Признанный способ расчета ЭМП в таких системах – это метод интегральных уравнений [6]. Однако его использование применительно к описанию тонкостенных электромагнитных экранов, как правило, неэффективно, поскольку разбиение объекта должно производиться исходя из его минимального размера, а значит, количество неизвестных решаемой системы уравнений может стать настолько большим, что практическая реализация задачи на вычислительных средствах оказывается весьма сложной. Чтобы использовать конечно-разностные методы применительно к расчету ЭМП в открытых системах, в последнее десятилетие разработаны методы поглощающих граничных условий, наиболее эффективным из которых является метод одноосно хорошо согласованных слоев (ОХСС) [10]. Суть этих методов заключается во введении вспомогательных слоев на границе расчетной области, чтобы обеспечить быстрое и безотражательное затухание в них ЭМП. В результате зона расчета существенно уменьшается и определяется только небольшим объемом, в котором распределение

ЭМП представляет интерес. Такой подход позволяет расширить область использования конечно-разностных методов применительно к открытым системам.

Одним из передовых разностных методов расчета ЭМП является метод конечного интегрирования (МКИ), который еще называют методом конечных объемов [8]. Суть его заключается в интегрировании уравнений Максвелла по поверхностям элементарных объемов или самим элементарным объемам, на которые разбивается расчетная область. Получающиеся в результате уравнения представляют собой закон сохранения – тока или заряда соответственно. Такой подход оказывается особенно удобным при расчете ЭМП в неоднородных системах, поскольку при использовании МКИ условия на границах раздела сред выполняются автоматически и их не нужно вводить в виде отдельных уравнений. Широкое применение в последние годы МКИ, в том числе в коммерческих пакетах расчета ЭМП, связано с тем, что данный метод сочетает в себе простоту метода конечных разностей с увеличенными возможностями (для описания объектов сложных пространственных форм) более сложного метода конечных элементов.

Целью данной работы является применение МКИ и ОХСС для математического моделирования МП при выборе параметров электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации, защищающих от действия низкочастотного МП токовых источников.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о распределении низкочастотного МП в системе, содержащей трехфазный шинопровод и электромагнитный экран. Так как по фазам шинопровода течет синусоидальный ток, удобно представить напряженности ЭМП в виде комплексных величин и записать уравнение Максвелла в виде [1]

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = (\gamma + j\omega\varepsilon_0\varepsilon) \cdot \dot{\vec{E}} + \dot{\vec{J}}^{\text{ext}}, \quad (1)$$

где $\dot{\vec{H}}$ – комплексная амплитуда вектора напряженности МП; $\dot{\vec{E}}$ – комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля; $\dot{\vec{J}}^{\text{ext}}$ – комплексная амплитуда вектора плотности тока сторонних источников; γ – удельная электропроводность; ε – относительная диэлектрическая проницаемость; ω – круговая частота тока внешнего источника; $\varepsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11}$ Ф/м – электрическая постоянная; j – комплексная единица.

Перепишем уравнение (1) в интегральной форме, пренебрегая током смещения,

$$\oint_l \dot{\vec{H}} d\vec{l} = \int_S \gamma \dot{\vec{E}}_n ds + \int_S \dot{\vec{J}}^{\text{ext}} d\vec{s}, \quad (2)$$

где l – контур, обхватывающий площадку S , $\dot{\vec{E}}_n$ – нормальная к поверхности S компонента напряженности электрического поля.

Сформулируем задачу через так называемый модифицированный векторный магнитный потенциал $\dot{\vec{A}}^*$, исключив из решаемых уравнений скалярный электрический потенциал [1,9]. Напряженность электрического поля $\dot{\vec{E}}$ и индукцию магнитного поля $\dot{\vec{B}}$ запишем в виде

$$\dot{\vec{E}} = -j\omega\dot{\vec{A}}^*, \quad (3)$$

$$\dot{\vec{B}} = \mu\mu_0\dot{\vec{H}} = \operatorname{rot}\dot{\vec{A}}^*, \quad (4)$$

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

Подставляя (3), (4) в (2), получим

$$\oint_l \frac{1}{\mu} \operatorname{rot}\dot{\vec{A}}^* d\vec{l} = -j\mu_0\omega \cdot \int_S \gamma \dot{\vec{A}}_n^* ds + \mu_0 \cdot \int_S \dot{\vec{J}}^{\text{ext}} d\vec{s}, \quad (5)$$

где $\dot{\vec{A}}_n^*$ – нормальная к поверхности S компонента модифицированного векторного магнитного потенциала.

Для численного решения уравнения (5) воспользуемся методом конечного интегрирования [8]. Особенностью этого метода, как и метода конечных разностей, является то, что общая пространственная сетка наносится на всю расчетную область. Это приводит к существенному упрощению получения решения по сравнению, например, с использованием метода конечных элементов. Однако в ряде случаев, в частности, для тонкостенных электромагнитных экранов, целесообразно разбить расчетную область на ряд подобластей с отличающимися по пространству шагами и осуществлять их сшивку через значения искомым функций на разграничивающих поверхностях [3].

В силу геометрии рассматриваемых конфигураций экранов будем использовать декартову систему координат. Разобьем рассматриваемую область на ячейки-параллелепипеды, причем разбиение произведем таким образом, чтобы узлы расчетной сетки (i,j,k) лежали на границах раздела сред. Тогда электрические свойства каждой ячейки можно полагать однородными. Запишем выражения вида (5) для (i,j,k) -го узла, проинтегрировав по сечениям $x = \text{const}$, $y = \text{const}$, $z = \text{const}$. При обходе узла (i,j,k) использовались следующие контуры: l_x – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k-1/2)$, $(i+1/2, j+1/2, k-1/2)$, l_y – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k-1/2)$, $(i+1/2, j+1/2, k-1/2)$, l_z – квадрат с вершинами в $(i+1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j+1/2, k+1/2)$, $(i-1/2, j-1/2, k+1/2)$, $(i+1/2, j-1/2, k+1/2)$. Выбор таких контуров позволил избежать попадания соответствующих им площадок S_x, S_y, S_z в грани, разделяющие ячейки-параллелепипеды с различными электрическими параметрами, и вызванную этим неопределенность при задании μ и γ . Используя контуры обхода l_x, l_y, l_z и охватываемые ими площадки S_x, S_y, S_z , выражения вида (5) могут быть переписаны в разностном виде для каждого узла расчетной сетки. Полученная система разностных уравнений решается с помощью прогонки итерационным методом переменных направлений [4]. Алгоритм получения численного решения системы уравнений относительно \dot{A}_x^*, \dot{A}_y^* и \dot{A}_z^* подробно описан в [3].

Для ограничения расчетной области до размеров интересующей нас зоны на ее границах вводились анизотропные хорошо поглощающие слои [10]. Для выбора параметров односно хорошо согласованных слоев, габаритов и шагов расчетной сетки применительно к задаче расчета низкочастотного МП проводились тестовые счета для имеющих аналитическое решение случаев расположения прямого и обратного токопроводов в воздухе, а также токопроводов, расположенных в воздухе над магнитным полупространством [5]. Максимальное отличие рассчитанных значений модуля напряженности МП по сравнению с аналитическими решениями оказалось меньшим заданной при расчете относительной погрешности 3 %.

Математическое моделирование электромагнитных процессов в экранах сложной пространственной конфигурации. Для описания качества экранирования МП воспользуемся понятием эффективности экранирования [7], которое определяется как отношение модуля напряженности магнитного поля в точке наблюдения в отсутствие экрана

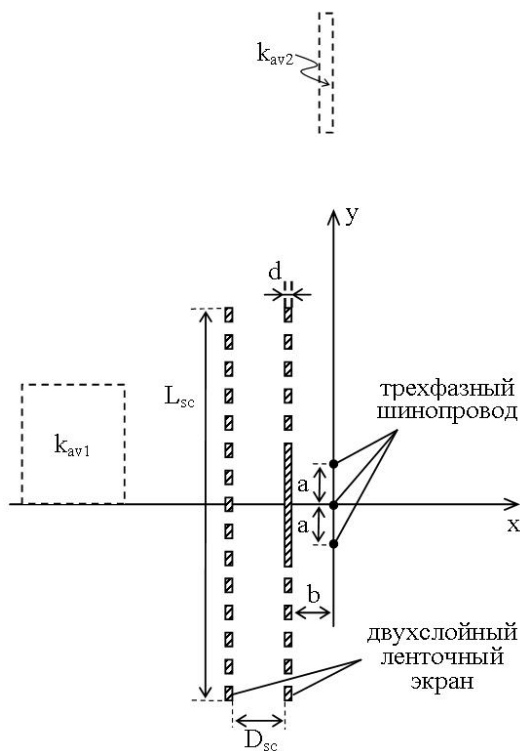


Рис. 1

к модулю напряженности магнитного поля при наличии экрана $|\dot{B}|$. Чтобы не учитывать малые флуктуации величины эффективности экранирования, связанные с разрывами сплошности экрана введем усредненную эффективность экранирования в зоне за экраном (на рис. 1 представлено сечение системы “экран–шинопроводы”

$$\text{плоскостью } z = 0): k_{av1} = \frac{1}{N_1} \sum_{n=1}^N \frac{|\dot{B}_0|}{|\dot{B}|} \text{ в зоне: } 0 < y < 0,3L_{sc},$$

$5b < |x| < 7,5b$, где b – координата x ближайшего к источнику тока экрана, L_{sc} – длина экрана в направлении оси Y , N_1 – количество точек усреднения; а также в зоне над экраном:

$$k_{av2} = \frac{1}{N_2} \sum_{n=1}^N \frac{|\dot{B}_0|}{|\dot{B}|} \text{ в зоне: } L_{sc} < y < 1,3L_{sc}, 0 < |x| < 0,3b, \text{ где } N_2$$

– количество точек усреднения.

Будем также сравнивать для различных экранов значения эффективности экранирования в точке, расположенной над экраном и источниками тока ($x = 0$, $y = 1,3L_{sc}$): k_2 , а также в точке, расположенной за экраном ($x = -5b$, $y = 0$): k_1 (см. рис. 1).

В ряде практически важных случаев необходимо снижать уровни индукции МП, создаваемых токами промышленной частоты $f = 50$ Гц. Рассмотрим экранирование МП трехфазного источника (амплитуда силы тока – 500 А, нижний провод имеет фазу -120° , средний – 0° , верхний – $+120^\circ$, расстояние между фазами $a = 0,2$ м, расстояние до экрана $b = 0,2$ м (рис. 1). Если габаритные размеры зоны экранирования

МП 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) меньше толщины скин-слоя Δ . В этом случае, чтобы обеспечить эффективное экранирование, необходимо применение особых приемов. К ним можно отнести использование многослойных и уголковых экранов.

Будем рассматривать протяженные экраны, когда экран полностью покрывает подводящие края шинпровода, так что они не влияют на распределение МП в рассматриваемых областях. В этом случае задачу можно решать в двумерной постановке, полагая, что во всех сечениях, перпендикулярных направлению шинпроводов, распределения поля одинаковы.

В [2] проведен численный анализ степени влияния габаритов экрана и расстояния до шинпроводов на его экранирующие свойства, поэтому в данном исследовании мы ограничимся варьированием толщины экрана, соотношения “ширина ленты – зазор” для ленточных экранов, а также числа слоев экранов, расстояния между ними и степени их сплошности.

Перед тем, как приступить к изучению экранирующих свойств электромагнитных экранов сложной пространственной конфигурации, найдем эффективность экранирования однослойного и двухслойного экранов. В табл. 1 приведены результаты расчета эффективности экранирования однослойного сплошного и однослойного ленточного экранов (для ленточного экрана отношение ширины ленты экрана w_l к зазору между лентами w_g : $w_l/w_g = 1$). Также в табл. 1 представлены отношения объемов экранов к объему базового экрана V_0 (однослойный сплошной экран, материал – Al, длина экрана $L_{sc} = 2,9$ м, толщина экрана $d = 0,2$ мм).

Таблица 1

	Однослойный сплошной экран					Однослойный ленточный экран				
k_{av1}	10,0	20,7	35,0	47,0	75	2,87	5,2	9,6	20,7	68,9
k_{av2}	7,2	7,2	7,3	7,3	7,1	4,26	6,7	6,9	7,1	6,9
k_1	7,7	15	26,6	31,1	171,0	2,44	4,2	7,47	15,7	127,7
k_2	6,5	6,5	6,6	6,7	6,5	3,96	5,8	6,15	6,4	6,3
$\frac{d}{\Delta}$	$\frac{2}{11,6}$	$\frac{4}{11,6}$	$\frac{6}{11,6}$	$\frac{8}{11,6}$	$\frac{50}{11,6}$	$\frac{1}{11,6}$	$\frac{2}{11,6}$	$\frac{4}{11,6}$	$\frac{10}{11,6}$	$\frac{100}{11,6}$
V/V_0	1,0	2,0	3,0	4	25,0	0,25	0,5	1,0	2,5	25

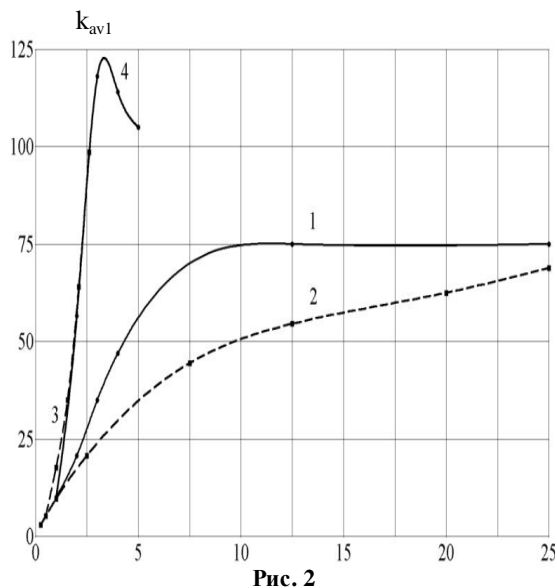


Рис. 2

На рис. 2 (кривая 1 – для однослойных сплошных экранов, 2 – для ленточных) показаны рассчитанные зависимости усредненной эффективности экранирования в области за экраном от его толщины. Как видно, увеличение толщины экранов свыше некоторого уровня уже не приводит к существенному росту эффективности экранирования в зоне за экраном k_{av1} . Максимальное значение эффективности экранирования в зоне над экраном $k_{av2} \approx 7$ достигается при $d/\Delta = 2/11,6$ и существенно не меняется при дальнейшем увеличении толщины экрана.

Перейдем к рассмотрению двухслойных экранов. В табл. 2 приведены результаты расчета эффективности экранирования при варьировании расстояния между слоями двухслойного сплошного экрана D_{sc} .

Таблица 2

На рис. 3 эта зависимость показана графически. Как видно, увеличение расстояния между слоями экрана позволяет повысить эффективность экранирования в зоне за шинпроводами в 2,5 раза по сравнению с эффективнос-

	Двухслойный сплошной экран					Двухслойный ленточный экран		
	а	б	в	г	д	а	б	в
k_{av1}	32,2	44,0	50,9	56	56,5	16,3	22,1	28,9
k_{av2}	6,8	6,8	6,9	6,9	6,9	6,3	6,7	6,9
k_1	23,7	33,3	38	42,6	43	11,7	16,3	21
k_2	6,3	6,3	6,3	6,4	6,4	5,8	6,2	6,4
D_{sc}/b	0,5	1,0	1,5	2,5	3	1,5	1,5	1,5
V/V_0	2	2	2	2	2	1,0	1,17	1,52

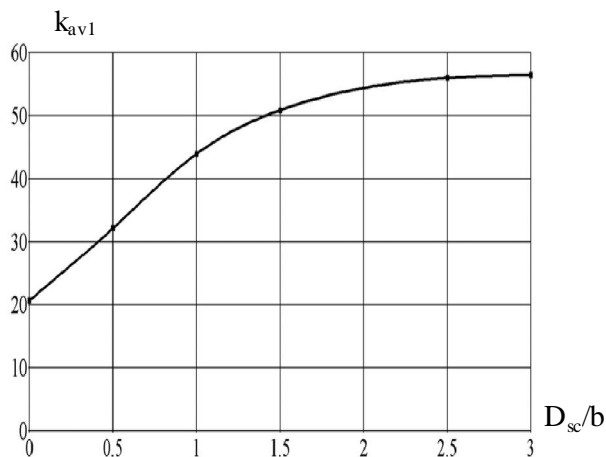


Рис. 3

тью экранирования однослойного экрана эквивалентной массы. Однако, рост D_{sc}/b свыше 1,5–2 уже не приводит к существенному улучшению экранирующих свойств.

Рассмотрим двухслойный экран (расстояние между слоями $D_{sc} = 1.5b$, $b = 0,2$ м), один слой которого – ленточный экран ($w_l/w_g = 1$), а степень сплошности второго слоя будем варьировать. В табл. 2 показаны результаты расчета эффективности экранирования для трех вариантов выполнения второго слоя: а) второй слой – ленточный экран; б) комбинированный (эта модификация двухслойного экрана показана на рис. 1); в) сплошной. Как видно из табл. 2, путем изменения степени сплошности двухслойных ленточных экранов можно получить неплохие значения эффективности экранирования в зоне за экраном ($k_{av1} = 16–30$) при сравнительно небольшом увеличении их объема ($V/V_0 = 1–1.5$).

Проведем исследование влияния дополнительных слоев экрана на его экранирующие свойства. Расстояние между крайними слоями положим $D_{sc} = 0,6$ м. В табл. 3 и на рис. 2 (кривая 3 – для многослойных сплошных экранов, кривая 4 – для многослойных ленточных экранов) показаны результаты расчета эффективности экранирования при варьировании числа слоев многослойных сплошных и ленточных экранов.

Как видно из рис. 2 (кривая 3 – для многослойных сплошных экранов, 4 – для многослойных ленточных экранов), использование многослойных экранов оказывается весьма эффективным. Причем, характер их выполнения (сплошными или ленточными) не оказывает существенного влияния на экранирующие свойства при сохранении объема экрана. При этом наращивание числа слоев эффективно лишь до определенного уровня.

Для всех рассмотренных вариантов выполнения экранов значения k_{av2} эффективности экранирования в зоне над источником тока не превышают 5–7 (табл. 1 и 2), т.е. остаются небольшими сравнительно со значениями k_{av1} . Для решения этой проблемы предлагается использовать уголкового электромагнитные экраны, имеющие кроме основного слоя перпендикулярный ему дополнительный слой. Рассчитанные зависимости усредненной эффективности экранирования в области над экраном от числа слоев и степени

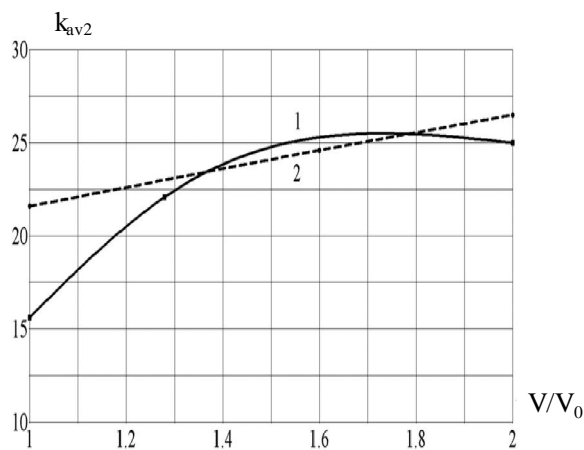


Рис. 4

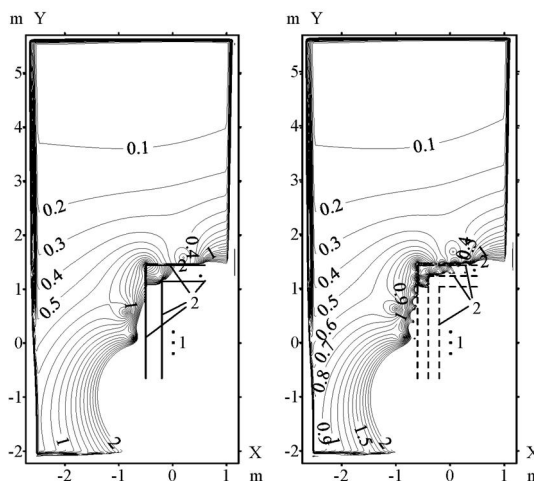


Рис. 5

Таблица 3

Число слоев	Многослойный сплошной экран				Многослойный ленточный экран			
	2	3	4	5	2	3	4	5
k_{av1}	56	117,9	113,8	105	17,6	34,9	64,0	98,6
k_{av2}	6,9	6,9	6,8	6,8	6,3	6,2	6,2	6,2
k_1	42,6	160,4	258	250,7	12,4	26,4	49,2	94,6
k_2	6,4	6,3	6,3	6,3	5,8	5,7	5,8	5,8
V/V_0	2	3	4	5	1	1,55	2,1	2,6

сплошности экранов показаны на рис. 4 (кривая 1 – сплошные экраны, кривая 2 – ленточные экраны).

В том случае, когда необходимо обеспечить экранирование зон как непосредственно за источниками тока, так и областей, расположенных выше их, наиболее эффективно применение экранов, имеющих несколько слоев по всей длине. Как следует из проведенных расчетов, наиболее целесообразно применение двухслойных сплошных и трехслойных ленточных уголкового экранов.

Для этих конфигураций на рис. 5 показаны результаты расчета линий равной индукции МП 0,1–2 мкТл. Значения эффективности экранирования за экраном k_{av1} и над ним k_{av2} приведенных систем электромагнитных экранов достигают двадцати пяти.

Выводы. 1. Двухслойные экраны позволяют в 2–2.5 раза увеличить эффективность экранирования в зоне за экраном k_{av1} по сравнению со значением k_{av1} для однослойных экранов эквивалентной массы.

2. Наиболее эффективным средством защиты от МП являются многослойные электромагнитные экраны. Они обеспечивают максимальные значения эффективности экранирования в зоне за экраном при фиксированной массе металла. Оптимальное число слоев равно 4–5. Эффективность экранирования в зоне над источником тока остается небольшой сравнительно со значением эффективности экранирования в зоне за экраном.

3. Для всестороннего экранирования целесообразно применять уголкового экраны. Наиболее эффективно использование двухслойных сплошных и трехслойных ленточных уголкового экранов. В этом случае, эффективность экранирования за экраном и над ним достигают значения двадцати пяти.

1. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970. – 710 с.

2. Резинкина М.М. Использование численных расчетов для выбора средств экранирования от действия магнитного поля // Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77. – № 11. – С. 17–24.

3. Резинкина М.М. Численный расчет низкочастотного магнитного поля в средствах экранирования // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 18–23.

4. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. – 616 с.

5. Стрэттон Дж.А. Теория электромагнетизма. – М.-Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1948. – 539 с.

6. Тозони О.В. Метод вторичных источников в электротехнике. – М.: Энергия, 1975. – 295 с.

7. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – Ленинград: Энергия, 1975. – 109 с.

8. Clemens M., Weiland T. Regularization of Eddy Current Formulations Using Discrete Grad-Div Operators // IEEE Trans. on Magnetics. – 2002. – Vol. 38. – № 2. – P. 569–572.

9. Clemens M., Wilke M., Weiland T. Linear-Implicit Time Integration Schemes for Error-Controlled Transient Nonlinear Magnetic Field Simulations // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – Vol. 39. – № 3. – P. 1175–1178.

10. Taflov A., Hagness S. Computational electrodynamics: the finite difference time domain method. Boston – London: Artech House, 2000. – 852 p.

УДК 621.3.048

РОЗРАХУНКОВИЙ ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ СКЛАДНОЇ ПРОСТОРОВОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

М.М.Резинкіна¹, докт.техн.наук, А.А.Щерба², чл.-кор. НАН України, В.С.Грінченко³, К.О.Резинкіна⁴,
^{1,3} – Науково-технічний центр магнетизму технічних об'єктів НАН України,

вул. Індустріальна, 19, а/я 72, Харків, 61106, Україна,

² – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

⁴ – Université Paris-Sud 11, d'Orsay, France.

Розглянуто системи, які містять електромагнітні екрани складної просторової конфігурації. Отримано чисельні залежності, що дозволяють вибирати параметри електромагнітних екранів залежно від необхідного значення ефективності екранування. Показано, як за рахунок зміни конфігурації та числа шарів екрану можна досягти ефективного екранування різних зон у залежності від їхнього розташування відносно токових джерел. Бібл. 10, табл. 3, рис. 5.

Ключові слова: ефективність екранування, електромагнітний екран, низькочастотне магнітне поле, метод скінченних об'ємів, одночасно добре узгоджений шар.

CALCULATION CHOICE OF PARAMETERS OF ELECTROMAGNETIC SCREENS OF COMPLICATED THREE-DIMENSIONAL CONFIGURATION

M.M.Rezynkina¹, A.A.Shcherba², V.S.Grinchenko³, K.O.Rezynkina⁴,

^{1,3} – Scientific and Technical Center of Magnetism of Technical Objects of NAS of Ukraine,
Industrialna str., 19, Kharkiv, 61106, Ukraine,

² – Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine,
Peremogy av., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine,

⁴ – Université Paris-Sud 11, d'Orsay, France.

Systems, which contain electromagnetic shields with complex shape, have been considered. Numerical relations that allow choosing of electromagnetic shields parameters in dependence on the necessary screening characteristics, have been found. It is shown how to achieve efficient screening of different regions by changing shield's configuration or number of its layers. References 10, tables 3, figures 5.

Key words: reduction factor, electromagnetic shield, low-frequency magnetic field, finite volume method, uniaxial perfectly matched layer.

1. Koshliakov N.C., Gliner E.B., Smirnov M.M. *Equations in partial derivatives of mathematical physics.* – Moskva: Vysshaya shkola, 1970. – 710 p. (Rus)

2. Rezynkina M.M. Using of numerical calculations for choice of screening means against magnetic field action // *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki.* – 2007. – Vol. 77. – № 11. – Pp. 17–24. (Rus)

3. Rezynkina M.M. Numerical calculation low-frequency magnetic field in screening means // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2008. – № 6. – Pp. 18–23. (Rus)

4. Samarskii A.A. *Difference scheme theory.* – Moskva: Nauka, 1989. – 616 p. (Rus)

5. Stretton J. A. *Electromagnetic theory.* – Moskva-Leningrad: OGIZ Gostechizdat, 1948. – 539 p. (Rus)

6. Tozoni O.V. *Secondary power supply method in electrical engineering.* – Moskva: Energiya, 1975. – 295 p. (Rus)

7. Shapiro D.N. *Basis of electromagnetic screening.* – Leningrad: Energiya, 1975. – 109 p. (Rus)

8. Clemens M., Weiland T. Regularization of Eddy Current Formulations Using Discrete Grad-Div Operators // *IEEE Trans. on Magnetics.* – 2002. – Vol. 38. – № 2. – Pp. 569–572.

9. Clemens M., Wilke M., Weiland T. Linear-Implicit Time Integration Schemes for Error-Controlled Transient Nonlinear Magnetic Field Simulations // *IEEE Transactions on Magnetics.* – 2003. – Vol. 39. – № 3. – Pp. 1175–1178.

10. Taflov A., Hagness S. *Computational electrodynamics: the finite difference time domain method.* Boston – London: Artech House, 2000. – 852 p.

Надійшла 12.05.2011

Received 12.05.2011