

01

Выбор параметров тонких электромагнитных экранов для снижения уровней магнитной индукции

© М.М. Резинкина

Научно-технический центр магнетизма технических объектов НАН Украины,
61106 Харьков, Украина
e-mail: marinar2@mail.ru

(Поступило в Редакцию 27 февраля 2013 г.)

С помощью математического моделирования электромагнитных полей проанализировано влияние параметров тонких проводящих экранов на эффективность снижения ими уровней магнитной индукции. Исследовано влияние геометрии однослойных и двухслойных экранов на величину наводимого в них тока и степень экранирования ими исходного магнитного поля промышленной частоты. Показано, почему двухслойные экраны в ряде случаев эффективнее однослойных.

Введение

Наличие ограничений по уровням напряженностей магнитных полей (МП), в которых может стабильно работать современная электронная аппаратура [1], а также возможное отрицательное их влияние на здоровье человека [2] вызывает необходимость снижения магнитной индукции до допустимых значений. Поскольку наиболее распространенными являются источники МП промышленной частоты, задача выбора параметров проводящих экранов [3,4], снижающих магнитную индукцию низкочастотных электромагнитных полей, остается актуальной. В последнее время все более широкое распространение для электропередачи получают подземные трехфазные кабельные линии (КЛ) промышленной частоты. Поскольку КЛ часто располагаются в зоне нахождения людей и электронной аппаратуры, в ряде случаев требуется снижать уровни МП в их окрестности.

При выборе параметров эффективных экранов, предназначенных для снижения уровней напряженности низкочастотных МП, возникает ряд проблем. Как правило, используют либо так называемые замкнутые экраны, охватывающие источник МП, либо открытые или разомкнутые экраны, представляющие собой пластину, размещенную над источником МП [5]. Применение замкнутых экранов затрудняет доступ к источникам тока, может требовать специальных мер по обеспечению допустимых тепловых режимов их эксплуатации, а в ряде случаев невозможно по соображениям техники безопасности. В настоящей работе рассматриваются незамкнутые электропроводные экраны толщиной существенно меньше толщины скин-слоя Δ , экранирующий эффект которых определяется наличием встречного по отношению к исходному МП, которое создается наводимыми в них вихревыми токами. Слишком тонкие экраны, имеющие большое сопротивление, оказываются неэффективными из-за того, что наводимый в них ток невелик. Сравнительно толстые незамкнутые протяженные экраны, толщина которых соизмерима с Δ , требуют весьма большого расхода материала и оказываются слишком дорогими и тяжелыми. В этой связи могут

быть определены оптимальные параметры экрана: его толщина, ширина и расстояние до токопроводов, обеспечивающие требуемую эффективность экранирования при минимальном расходе материала пластин.

Для выбора конструкций и режимов эксплуатации эффективных экранов необходима информация о распределении в них электромагнитного поля (ЭМП). Доступным и экономичным способом получения такой информации 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 применение универсальных пакетов либо связано с чрезвычайно высокими требованиями к используемым вычислительным средствам, либо невозможно вообще. К таким приложениям относится, в частности, расчет ЭМП в так называемых разноразмерных объектах, у которых один из размеров существенно (на порядок и более) отличается от других. Такими объектами являются тонкие проводящие экраны, габаритные размеры которых существенно (в десятки и сотни раз) превышают их толщину.

Одним из передовых методов расчета ЭМП является метод конечного интегрирования (МКИ) [6,7]. Суть данного метода заключается в интегрировании уравнений Максвелла по поверхностям элементарных объемов, на которые разбивается расчетная область. Получающиеся в результате уравнения представляют собой закон сохранения тока. Такой подход оказывается особенно удобным при расчете ЭМП в неоднородных средах, 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 связано с тем, что данный метод сочетает в себе простоту метода конечных разностей с увеличенными возможностями более громоздкого метода конечных элементов.

В большинстве случаев рассматриваемые экраны располагаются в незамкнутом пространстве, т.е. представляют собой так называемые открытые системы. Для того чтобы использовать конечно-разностные методы применительно к расчету ЭМП в открытых системах, в последние десятилетия разработаны методы поглощающих граничных условий, наиболее эффективным из которых является метод односно хорошо согласованных слоев [8]. Суть этих методов заключается во введении вспомогательных анизотропных слоев на границах 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 позволил расширить область использования конечно-разностных методов применительно к открытым системам.

Таким образом, при математическом моделировании ЭМП для выбора параметров тонких проводящих экранов использована методика расчета, основанная на методе конечного интегрирования и хорошо согласованных слоев.

1. Постановка задачи

Для случая экранирования низкочастотного магнитного поля синусоидальных токов, пренебрегая током смещения, представим напряженности ЭМП в виде комплексных величин и запишем уравнение Максвелла в виде [9]

$$\operatorname{rot} \dot{\mathbf{H}} = \gamma \dot{\mathbf{E}} + \mathbf{J}^{\text{ext}}, \quad (1)$$

где $\dot{\mathbf{H}}$, $\dot{\mathbf{E}}$ — комплексные амплитуды векторов напряженности магнитного и электрического поля соответственно, \mathbf{J}^{ext} — комплексная амплитуда вектора плотности тока сторонних источников, γ — удельная электропроводность.

Для рассматриваемого случая низкой частоты тока источника, а также постоянного удельного сопротивления проводящих сред сформулируем задачу в терминах так называемого модифицированного векторного магнитного потенциала $\dot{\mathbf{A}}^*$, исключив из решаемых уравнений скалярный электрический потенциал [10,11]. Тогда $\dot{\mathbf{E}}$ и индукцию магнитного поля $\dot{\mathbf{B}}$ запишем в виде

$$\dot{\mathbf{E}} = -j\omega \dot{\mathbf{A}}^*, \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{B}} = \mu\mu_0 \dot{\mathbf{H}} = \operatorname{rot} \dot{\mathbf{A}}^*, \quad (3)$$

где j — мнимая единица, ω — круговая частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/м, μ — относительная магнитная проницаемость.

Рассмотрим задачу о распределении магнитного поля в системе, содержащей трехфазный токопровод, а также незамкнутый экран (рис. 1). Разобьем расчетную область прямоугольной сеткой (см. выноску I рис. 1) и, проинтегрировав (1) по сечениям ячейки S_p , ограниченным

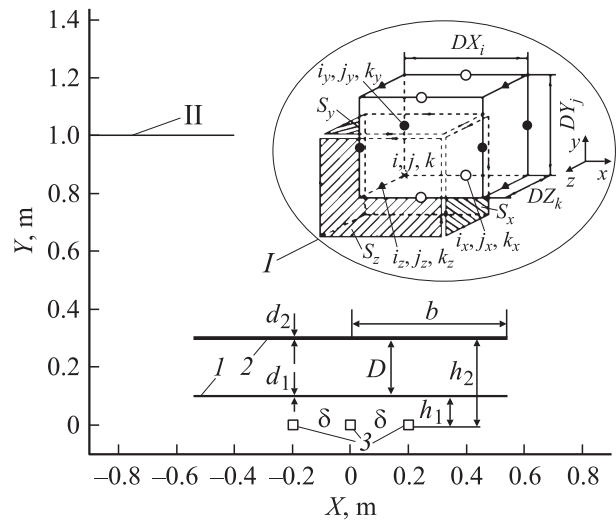


Рис. 1. Расчетная система и ячейка разностной схемы (выноска I). 1, 2 — нижняя и верхняя пластины двухслойного экрана, 3 — трехфазный источник, II — уровень, на котором определялось значение B_m .

контурами l_p , запишем выражение для закона полного тока в виде

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

где $\dot{\mathbf{E}}_n$ — нормальная к поверхности S_p компонента напряженности электрического поля, i_p^{ext} — сторонний ток через сечение S_p , $p = x, y, z$.

Используя (2), (3), запишем (4) в виде

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

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

Будем использовать в дальнейшем декартову систему координат. Разобьем рассматриваемую область на ячейки-параллелепипеда, которые характеризуют распределение в ней электрических параметров. Данное разбиение произведено специальным образом так, что узлы расчетной сетки (i, j, k) лежат на границах раздела сред. Электрические параметры каждой ячейки полагаются одинаковыми. Запишем выражения вида (5) для (i, j, k) -го узла, проинтегрировав (1) по сечениям $X = \text{const} = S_x$, $Y = \text{const} = S_y$, $Z = \text{const} = S_z$ (см. заштрихованные площадки на выноске I рис. 1). Чтобы избежать попадания площадок S_x , S_y , S_z в грани, разделяющие ячейки с различными электрическими параметрами, и вызванную этим неопределенность при задании μ и γ , был использован обход различных наборов узлов, показанных на выноске I рис. 1. Так, интегрирование (4) по элементарным площадкам $X = \text{const}$ производилось при обходе узлов, показанных на выноске I рис. 1

окружностями, по площадкам $Y = \text{const}$ — кругами, по площадкам $Z = \text{const}$ — треугольниками. Причем, площадки S_x , S_y , S_z проходят так, что их границы делят пополам расстояния между соседними узлами. Представление решаемых уравнений в разностном виде и метод решения описаны в [12].

Для проверки правильности выбора параметров одноосно хорошо согласованных слоев, а также габаритов и шагов расчетной сетки применительно к расчету низкочастотного магнитного поля были проведены тестовые расчеты для имеющих аналитическое решение случаев расположения прямого и обратного токопроводов в воздухе [13], а также токопроводов, расположенных в воздухе над магнитным полупространством [14]. Максимальное отличие рассчитанных действующих значений модуля напряженности магнитного поля по сравнению с аналитическими решениями [13,14] составило менее 3% (см. также [12]). Сравнение расчетных данных с результатами измерений [15,16] показало их совпадение в пределах точности эксперимента.

2. Математическое моделирование электромагнитных процессов в тонких протяженных экранах

Для выбора эффективных средств снижения магнитной индукции трехфазных КЛ при минимальном расходе металла рассмотрим влияние геометрии экранов на распределение МП. Для того чтобы обеспечить эффективное экранирование при помощи протяженных тонких металлических пластин, толщина которых d обычно не превышает 0.5–5 мм, иначе их вес и стоимость будут слишком велики, могут быть применены специальные приемы. К ним можно отнести использование многослойных экранов (см., например [17]). Как показали проведенные эксперименты, двухслойные проводящие экраны при определенных условиях оказываются эффективнее, чем однослойные того же объема и материала [16].

Типичные значения действующего значения тока КЛ составляют порядка $I_{\text{RMS}} = 500\text{--}600$ А, расстояние между фазами трехфазного токопровода — $\delta = 0.2\text{--}0.3$ м, глубина прокладки — 1–1.5 м [5,18]. С помощью математического моделирования сравним эффективность экранирования КЛ однослойными и двухслойными проводящими экранами. Рассмотрим практически важный случай протяженных экранов, которые полностью накрывают подводящие края токопровода, так что они не влияют на распределение МП в рассматриваемых областях. При этом задачу можно решать в двумерной постановке, полагая, что во всех сечениях, перпендикулярных направлению токопроводов, распределения ЭМП одинаковы.

Нормы, регламентирующие допустимое магнитное поле, предусматривают, что в контролируемом объеме уровни B_{RMS} — действующего значения магнитной

индукции, должны быть меньше B_{lim} — заданного допустимого значения. В качестве показателя эффективности экранов будем рассматривать максимальное значение B_{RMS} на поверхности земли при прокладке КЛ на глубине $y = 1$ м: $B_m = \max\{B_{\text{RMS}}|_{y=1\text{ м}}\}$ (см. П рис. 1). С помощью математического моделирования исследуем зависимость B_m от расположения и геометрии пластин, из которых состоит экран. Будем полагать, что материал пластин — Al с удельной электропроводностью $\gamma = 0.377 \cdot 10^8$ S/m, толщина нижней пластины (или однослойного экрана) — d_1 , верхней — d_2 . Чтобы разобраться в механизме влияния двухслойности экранов на степень снижения ими B_{RMS} , помимо величины B_m будем контролировать действующие значения уровней тока в экранах и плотности тока в их сечениях. Для этого введем следующие коэффициенты: $k_{J1}^{2sc} = J_{1s\text{ min}}^{2sc}/J_{1s\text{ max}}^{2sc}$, $k_{J2}^{2sc} = J_{2s\text{ min}}^{2sc}/J_{2s\text{ max}}^{2sc}$ — коэффициенты, характеризующие неоднородность распределения J_{RMS} — действующих значений плотности тока в нижней и верхней пластинах двухслойного экрана, а также в однослойном экране: $k_{J1}^{1sc} = J_{1s\text{ min}}^{1sc}/J_{1s\text{ max}}^{1sc}$ (где $J_{1s\text{ min}}^{1sc}$, $J_{1s\text{ max}}^{1sc}$, $J_{1s\text{ min}}^{2sc}$, $J_{1s\text{ max}}^{2sc}$, $J_{2s\text{ min}}^{2sc}$, $J_{2s\text{ max}}^{2sc}$ — соответственно минимальные и максимальные действующие значения плотности тока в однослойном экране, а также нижней и верхней пластинах двухслойного экрана). Будем оценивать также влияние геометрии экранов на степень электромагнитной связи между токопроводом и экранами с помощью отношений интегралов от J_{RMS} по сечению пластин 1 (S_{scr1}) и 2 (S_{scr2}) для однослойного (F_{C1}^{1sc}) и двухслойного (F_{C1}^{2sc} , F_{C2}^{2sc}) экранов

$$F_{C1}^{1sc} = \int_{S_{\text{scr1}}} J_{\text{RMS}} ds, \quad F_{C1}^{2sc} = \int_{S_{\text{scr1}}} J_{\text{RMS}} ds,$$

$$F_{C2}^{2sc} = \int_{S_{\text{scr2}}} J_{\text{RMS}} ds$$

к сумме действующих значений тока трех фаз токопровода

$$I_{\Sigma\text{sour}} = 3I_{\text{RMS}}.$$

В результате получим следующие коэффициенты: $k_C^{1sc} = F_{C1}^{1sc}/I_{\Sigma\text{sour}}$ и $k_C^{2sc} = (F_{C1}^{2sc} + F_{C2}^{2sc})/I_{\Sigma\text{sour}}$. Наконец, степень снижения максимального действующего значения магнитной индукции на расстоянии от токопровода по вертикали, равном $y = 1$ м, при использовании двухслойных экранов (B_m^{2sc}), имеющих то же сечение и материал, что однослойные (B_m^{1sc}), будем оценивать с помощью коэффициента: $k_{Bm} = (B_m^{1sc} - B_m^{2sc})/B_m^{1sc}$.

Определим, при каких условиях и почему использование двухслойных экранов эффективнее, чем однослойных. Для этого проведем численные эксперименты, задавшись следующими параметрами системы „трехфазный источник–экран“: нижняя пластина экрана находится на расстоянии h_1 от плоскости расположения токопровода, верхняя — на расстоянии h_2 , расстояние между пластинами двухслойного экрана — D , полуширина пластин — b (рис. 1). На рис. 2 показаны

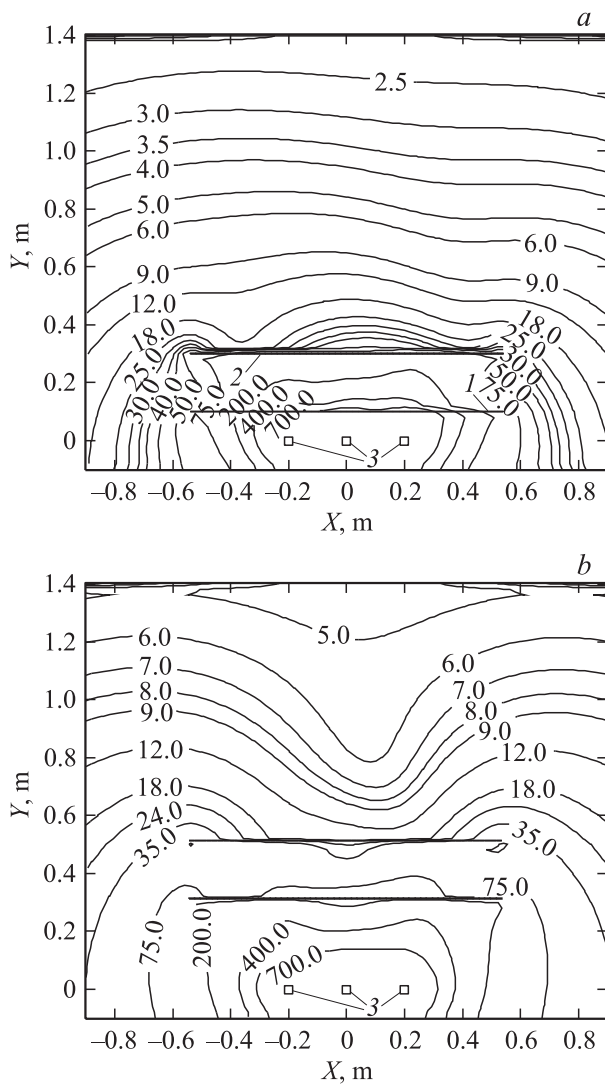


Рис. 2. Рассчитанные распределения линий равных уровней действующих значений магнитной индукции (в микротесла) в системе „экранирующие пластины 1, 2–трехфазный источник 3“: *a* — $h_1 = 0.1$ м, $h_2 = 0.3$ м; *b* — $h_1 = 0.3$ м, $h_2 = 0.5$ м.

рассчитанные линии равной индукции $B_{RMS} = \text{const}$ в сечении, перпендикулярном трехфазному токопроводу 3, при наличии двухслойного экрана, состоящего из пластин 1 и 2. Моделирование ЭМП проводилось при следующих параметрах системы: $I_{RMS} = 500$ А, $\delta = 0.2$ м, $b = 0.54$ м, $d_1 = d_2 = 1.5$ мм, $D = \delta = 0.2$ м (как будет показано ниже, для рассматриваемой ширины экрана это расстояние близко к оптимальному) при двух расстояниях от нижней пластины до токопровода: *a* — $h_1 = 0.1$ м, *b* — $h_1 = 0.3$ м. На рис. 3 представлены рассчитанные при тех же параметрах (за исключением величины h_1 , которая варьировалась) изменения описанных выше коэффициентов в зависимости от h_1 . Причем для однослойных экранов полагалось, что они находятся на расстоянии h_1 от токопровода, а их толщина равна суммарной толщине пластин аналогичного двухслойного экрана.

Как следует из расчетов, при приближении экрана к источнику происходит выравнивание действующих значений плотности тока по ширине пластин, особенно для верхней пластины (ср. рис. 2, *a, b*), в результате отношение их минимальных уровней к максимальным увеличивается (кривые 1–3 на рис. 3). Это приводит к некоторому увеличению суммарного тока, наводимого в пластинах двухслойного экрана, по сравнению с однослойным (кривые 4, 5 на рис. 3). В результате чего, а также приближения верхней пластины к экранируемой зоне, значения максимальных уровней действующих значений магнитной индукции на высоте над токопроводом $y = 1$ м снижаются по сравнению со случаями применения однослойных экранов (кривые 1, 2 на рис. 4). Однако использование двухслойных экранов эффективно лишь при их расположении сравнительно невысоко над источником: при $h_1 > 0.8\delta$ в верхней пластине распределения

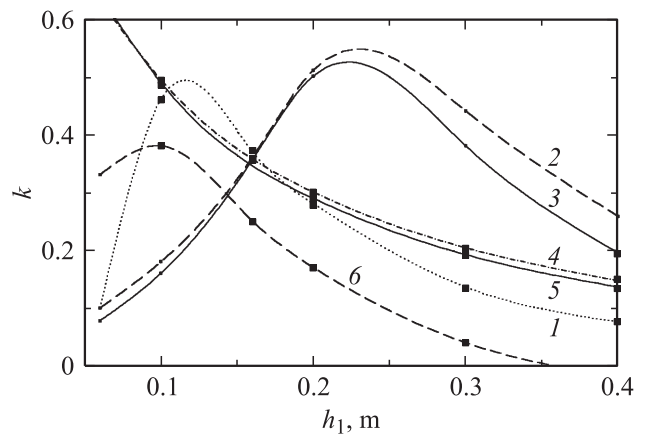


Рис. 3. Рассчитанные значения коэффициентов k от расстояния между нижней пластиной экрана и токопроводом: 1 — $k_{J_2}^{2sc} = J_{2s \text{ min}}^{2sc} / J_{2s \text{ max}}^{2sc}$, 2 — $k_{J_1}^{2sc} = J_{1s \text{ min}}^{2sc} / J_{1s \text{ max}}^{2sc}$, 3 — $k_{J_1}^{1sc} = J_{1s \text{ min}}^{1sc} / J_{1s \text{ max}}^{1sc}$, 4 — $k_C^{2sc} = (F_{C1}^{2sc} + F_{C2}^{2sc}) / I_{\Sigma \text{ sour}}$, 5 — $k_C^{1sc} = F_{C1}^{1sc} / I_{\Sigma \text{ sour}}$, 6 — $k_{B_m} = (B_m^{1sc} - B_m^{2sc}) / B_m^{1sc}$.

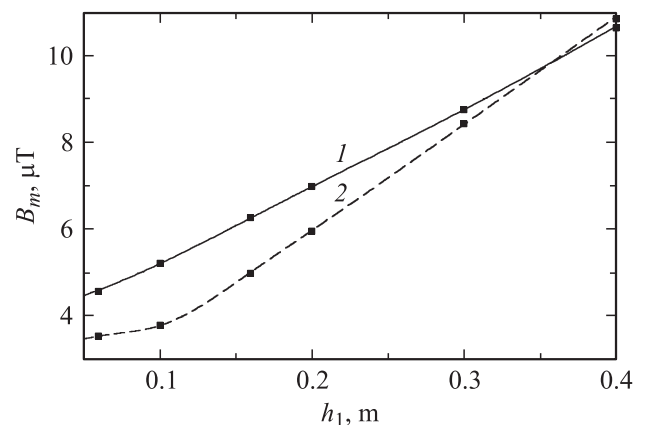


Рис. 4. Зависимость максимального действующего значения магнитной индукции на высоте $y = 1$ м над токопроводом от высоты расположения нижней пластины экрана h_1 : 1 — однослойный экран, 2 — двухслойный экран ($D = 0.2$ м).

действующих значений плотности тока по ширине становятся более неравномерными, чем в нижней (кривые 1, 2 на рис. 3). В то же время существенное приближение экрана к источнику ($h_1 < 0.5\delta$) также приводит к росту неравномерности плотности тока в верхней пластине (кривая 1 на рис. 3). Этим можно объяснить наличие максимума зависимости $(B_m^{1sc} - B_m^{2sc})/B_m^{1sc}$ (кривая 6 на рис. 3), наблюдаемого примерно при том же значении h_1 , что и максимум зависимости $J_{2s\ min}^{2sc}/J_{2s\ max}^{2sc}$ (кривая 1 на рис. 3). Таким образом, можно сделать вывод, что большая эффективность двухслойных экранов по сравнению с однослойными помимо приближения верхней пластины к экранируемой зоне обусловлена также выравниванием действующих значений плотности тока по ширине верхней пластины.

Исследуем, как влияет расстояние между пластинами двухслойного экрана на степень снижения B_m . Для этого при неизменном значении h_1 (рис. 1) рассмотрим влияние величины D при следующих параметрах системы: $h_1 = 0.1\text{ м}$, $\delta = 0.2\text{ м}$, $b = 0.54\text{ м}$, $d_1 = d_2 = 1.5\text{ мм}$, $I_{RMS} = 500\text{ А}$. На рис. 5 приведены рассчитанные зависимости коэффициентов, характеризующих электромагнитную связь между токопроводом и пластинами двухслойного экрана 1 (кривая 3), 2 (кривая 4), 1 + 2 — кривая 1, а также неоднородность распределения J_{RMS} в верхней пластине экрана (кривая 2) от величины D . Для данного случая показана также зависимость B_m от расстояния между пластинами (кривая 1 на рис. 6). При изменении D на уровень B_m оказывает влияние несколько разнонаправленных процессов. С одной стороны, с увеличением D происходит приближение пластины 2 к экранируемой зоне (а значит, усиление влияния ее тока, МП которого снижает МП токопроводов), а также выравнивание плотности тока по ширине верхней пластины (кривая 2 на рис. 5), которая смещается в зону более равномерного МП; эти факторы вызывают уменьшение B_m . С другой стороны, увеличение D , а значит и h_2 , приводит к снижению величины тока в

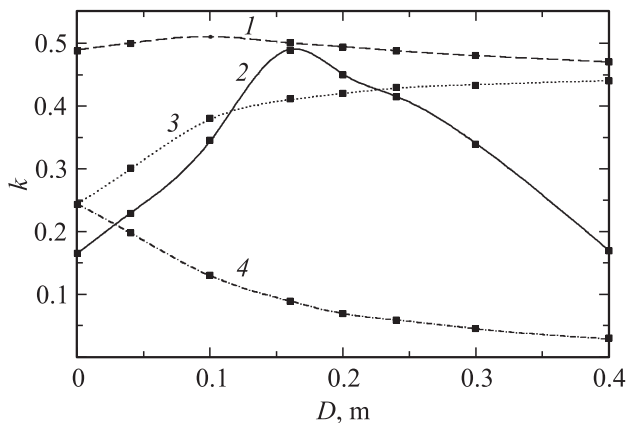


Рис. 5. Рассчитанные значения коэффициентов k от расстояния между пластинами двухслойного экрана D : 1 — $k_C^{2sc} = (F_{C1}^{2sc} + F_{C2}^{2sc})/I_{\Sigma\text{sour}}$, 2 — $k_{J2}^{2sc} = J_{2s\ min}^{2sc}/J_{2s\ max}^{2sc}$; 3 — $k_{C1}^{2sc} = F_{C1}^{2sc}/I_{\Sigma\text{sour}}$; 4 — $k_{C2}^{2sc} = F_{C2}^{2sc}/I_{\Sigma\text{sour}}$.

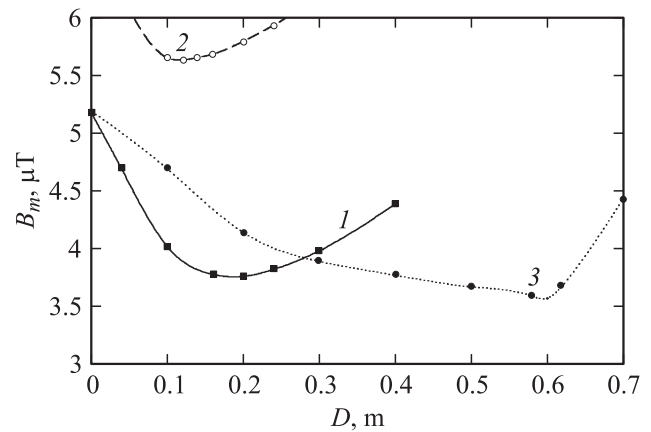


Рис. 6. Зависимость максимального действующего значения магнитной индукции на высоте $y = 1\text{ м}$ над токопроводом от расстояния между пластинами двухслойного экрана D (1 — $b = 0.54\text{ м}$, $d_1 = d_2 = 1.5\text{ мм}$; 2 — $b = 0.4\text{ м}$, $d_1 = d_2 = 2\text{ мм}$; 3 — $b = 0.8\text{ м}$, $d_1 = d_2 = 1\text{ мм}$).

верхней пластине и, вследствие этого, суммарного тока, наводимого в двух пластинах (кривые 4, 1 на рис. 5), из-за ухудшения электромагнитной связи с токопроводом; эти факторы вызывают рост B_m . Как показывает расчет, зависимость $(F_{C1}^{2sc} + F_{C2}^{2sc})/I_{\Sigma\text{sour}}$ имеет максимум при $D \approx 0.5\delta = 0.1\text{ м}$, а зависимость $J_{2s\ min}^{2sc}/J_{2s\ max}^{2sc}$ — при $D \approx 0.8\delta = 0.16\text{ м}$ (кривые 1, 2 на рис. 5). Причем начиная с $D \approx \delta = 0.2\text{ м}$ рост тока нижней пластины с увеличением D замедляется, в то время как снижение тока верхней пластины продолжается (кривые 3, 4 на рис. 5). В результате действия упомянутых разнонаправленных процессов минимум B_m при данной ширине экрана достигается при $D \approx \delta = 0.2\text{ м}$ (кривая 1 на рис. 6). Расчеты, выполненные при других значениях ширины экрана, но при сохранении площади его сечения: $S_{sc1} + S_{sc2} = \text{const}$ ($S_{sc1} = 2bd_1$, $S_{sc2} = 2bd_2$), что достигалось за счет изменения толщины пластин $d_1 = d_2 = \text{var}$, показали, что минимум B_m несколько смещается в область больших D для широких экранов (кривая 3 на рис. 6) и в область меньших D для узких (кривая 2 на рис. 6). Это можно объяснить тем, что чем шире экран, тем ближе к экранируемой зоне его можно поднять без проявления эффектов усиления B_{RMS} в окрестности краев экрана (рис. 2, б), а чем он уже, тем при меньших расстояниях между слоями такое увеличение B_{RMS} проявляется.

Оценим теперь влияние ширины двухслойных экранов на их эффективность, в том числе по сравнению с однослойными. На рис. 7 показаны рассчитанные распределения B_m при различной ширине пластин. Расчет выполнен при следующих параметрах: $h_1 = 0.1\text{ м}$, $h_2 = 0.3\text{ м}$, $\delta = 0.2\text{ м}$, $I_{RMS} = 500\text{ А}$, штриховые кривые соответствуют наличию двух пластин с $d_1 = d_2 = d$, сплошные кривые — одной с $d_1 = 2d$. При задании геометрических параметров для расчета величина площади

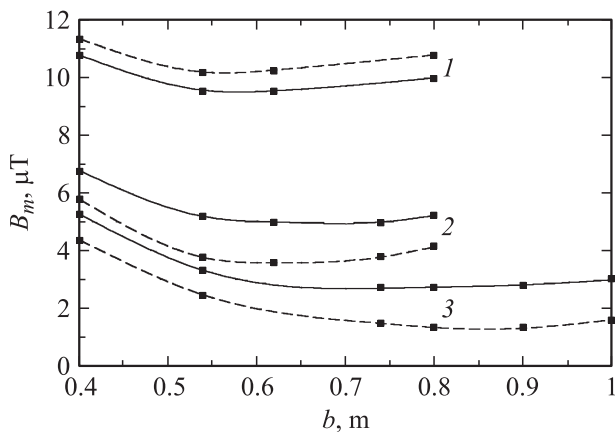


Рис. 7. Зависимость максимального действующего значения магнитной индукции на высоте $y = 1$ м над токопроводом от полуширины пластин экрана b (1 — $S_{sc} = 0.0016 \text{ м}^2$, 2 — $S_{sc} \approx 0.0032 \text{ м}^2$, 3 — $S_{sc} = 0.0064 \text{ м}^2$). Сплошные кривые — однослойные экраны, штриховые кривые — двухслойные экраны ($D = 0.2$ м).

поперечного сечения экранов S_{sc} оставалась постоянной ($S_{sc} = 2bd_1$ для однослойного экрана, $S_{sc} = 2b[d_1 + d_2]$ для двухслойного экрана). Для этого толщины более широких экранов задавались меньшими, чем узких. Расчеты, результаты которых показаны на рис. 7, выполнены при трех значениях площади поперечного сечения экранов: для кривых 1 S_{sc} в 2 раза меньше, чем для кривых 2, а для кривых 3 S_{sc} в 2 раза больше, чем для кривых 2. Как видно из приведенных распределений, все кривые имеют минимумы, значения которых зависят от ширины пластин. Наличие этих экстремумов объясняется тем, что даже достаточно широкий экран оказывается неэффективным, если он становится слишком тонким. Причем, как следует из расчетов, однослойные экраны оказываются более эффективными, чем двухслойные, лишь при использовании весьма тонких пластин, толщина которых $d_1 = d_2 \leq 1$ мм (кривые 1 на рис. 7). Однако использование столь тонких экранов нетехнологично, поскольку сложно обеспечить их правильную установку, и обеспечивает слишком малое снижение МП. Как видно из рис. 7, применение экранов с площадью сечения $S_{sc} = 0.032 \text{ м}^2$ (штриховая кривая 2) позволяет снизить значения B_m до 2.8 раза по сравнению с экранами, имеющими $S_{sc} = 0.0016 \text{ м}^2$ (штриховая кривая 1); примерно такое же снижение B_m наблюдается при увеличении S_{sc} с 0.0032 м^2 до 0.0064 м^2 (штриховые кривые 2, 3). Аналогичное снижение B_m при использовании однослойных экранов составляет примерно 1.9 раз (сплошные кривые на рис. 7). Максимальная эффективность экранирования (степень снижения B_{RMS} по отношению к исходному МП токопроводов B_{RMS0} : $K_e = B_{RMS0}/B_{RMS}$) для экранов с $S_{sc} = 0.0016 \text{ м}^2$ — $K_e \sim 3$, для экранов с $S_{sc} = 0.0032 \text{ м}^2$ — $K_e \sim 9$, для экранов с $S_{sc} = 0.0064 \text{ м}^2$ — $K_e \sim 25$.

Следует отметить, что уменьшение B_{RMS} ниже нормируемых уровней приводит к увеличению веса и стоимо-

сти экрана. Таким образом, исходя из требуемого значения допустимой магнитной индукции, можно с помощью расчетов выбрать минимальное значение сечения экрана. Например, как следует из проведенного численного моделирования, для обеспечения $B_{RMS} \leq B_m = 5 \mu\text{T}$ на уровне 1 м от токопровода при ограничении ширины экрана до $b = 0.48$ м требуется наличие двух отстоящих друг от друга на расстояние 0.2 м Al пластин толщиной $d_1 = d_2 = 1.5$ мм или одной пластины толщиной $d_1 = 4$ мм (при расстоянии от нижней пластины до токопроводов $h_1 = 0.1$ м). Таким образом, для данного случая использование двухслойного экрана обеспечит экономию металла по сравнению с однослойным более чем на 30%.

Как показали проведенные расчеты, использование третьего слоя при неизменной величине площади сечения экрана не приводит к снижению величины B_m как при его расположении между пластинами 1 и 2, отстоящими друг от друга на расстояние $D = \delta = 0.2$ м, так и когда этот слой находится над пластинами 1, 2.

Заключение

1. При экранировании магнитного поля кабельных линий использование двухслойных экранов эффективнее, чем увеличение толщины однослойных экранов, если толщина проводящих пластин больше 1 мм. Так, двухслойный экран при том же его сечении обеспечивает снижение максимальных действующих значений магнитной индукции на высоте 1 м от токопровода до 38% по сравнению с однослойным (максимум кривой 6 на рис. 3).

2. С помощью проведенного математического моделирования показано, что для рассматриваемого случая экранирования магнитного поля кабельных линий двухслойными экранами, расстояние между слоями, обеспечивающее наибольшее снижение действующих значений магнитной индукции, зависит от ширины пластин и близко к расстоянию между фазами трехфазного токопровода (рис. 6).

3. Расчеты ЭМП показали, что увеличение $2b$ — ширины как двухслойных, так и однослойных экранов при неизменной площади их сечения S_{sc} приводит к улучшению экранирующих свойств лишь до определенных значений $2b$, уровни которых зависят от S_{sc} : чем больше S_{sc} , тем при больших $2b$ достигаются минимальные B_{RMS} (кривые 1–3 на рис. 7).

4. Как показали проведенные расчеты ЭМП, увеличение площади поперечного сечения двухслойных экранов в 2 раза приводит к снижению величины B_m до 2.8 раз, а однослойных — до 1.9 раза (кривые 1–3 на рис. 7). Рассмотрен пример, когда использование двухслойного экрана вместо однослойного для снижения магнитной индукции КЛ на высоте 1 м обеспечивает уменьшение его металлоемкости более чем на 30%.

Список литературы

- [1] ГОСТ Р 50648-94 (МЭК 1000-4-8-93). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. М.: Изд-во стандартов, 1994. 16 с.
- [2] World Health Organization International EMF Project „Electromagnetic Fields and Public Health: Extremely low frequency fields and cancer“. 2001. Fact sheet N 263. 4 p. (<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd52/fact263.pdf>).
- [3] *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной технике и технике электросвязи. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1957. 327 с.
- [4] *Шапиро Д.Н.* Основы теории электромагнитного экранирования. Л.: Энергия, 1975. 109 с.
- [5] *De Wulf M., Wouters P., Sergeant P.* etc. // J. Magn. Mater. 2007. Vol. 316. P. 908–911.
- [6] *Clemens M., Weiland T.* // IEEE T. Magn. 2002. Vol. 38. N 2. P. 569–572.
- [7] *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
- [8] *Taflove A., Hagness S.* Computational electrodynamics: the finite difference time domain method. Boston, London: Artech House, 2000. 852 p.
- [9] *Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М.* Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 710 с.
- [10] *Biro O., Preis K.* // IEEE T. Magn. 1989. Vol. 25. N 4. P. 3145–3159.
- [11] *Clemens M., Weiland T.* // IEEE T. Magn. 2003. Vol. 39. N 3. P. 1175–1178.
- [12] *Резинкина М.М.* // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 11. С. 17–24.
- [13] *Круг К.А.* Физические основы электротехники. Т. 1. М.–Л.: Государственное энергетическое издательство, 1946. 472 с.
- [14] *Стрэттон Дж.А.* Теория электромагнетизма. М.–Л.: ОГИЗ Гостехиздат, 1948. 539 с.
- [15] *Salinas E., Rezinkina M., Atalaya J.* // Environmentalist. 2009. Vol. 29. N 2. P. 141–146.
- [16] *Резинкина М.М., Гринченко В.С.* // Вестник НТУ „ХПИ“. 2012. № 61. С. 75–81.
- [17] *Losito O., Dimiccoli V., Barletta D.* // Proc. of 10th Int. Symp. on EMC. York, UK, 2009. P. 4.
- [18] *Mimos E.I., Tsanakas D.K., Tzinevrakis A.E.* // Electr. Eng. 2010. N 91. P. 327–335.