***Г.В. Грешняков**, канд. техн. наук, зав. лабораторией НИИ «Севкабель»;*
***М.В. Доронин**, студент СПбПУ;*
***Н.В. Коровкин**, д-р техн. наук, зав. кафедрой СПбПУ*

Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий

Аннотация. Рассмотрены вопросы магнитного экранирования силовых кабельных линий с помощью надвижных экранов с зазором. Исследован эффект перераспределения магнитного поля при разных размерах зазора и магнитных свойствах материалов. Построены численные модели однослойного и двухслойного экранов. Проведены расчеты магнитного поля вблизи однофазной и трехфазной кабельных линий 110 кВ при отсутствии и наличии магнитного экрана.

Ключевые слова: магнитное экранирование, перераспределение магнитного поля, кабельные линии, коэффициент экранирования, затухание экрана, пермаллой, магнитомягкие сплавы, зазор, угол раскрытия зазора, сплошной экран.

Abstract. Magnetic screening of power cable lines with the help of slip screens with gaps is described. The effect of magnetic field redistribution for different gap sizes and different material magnetic properties is studied. Numerical models of single-layer and double-layer screens are developed. Calculations are performed for the magnetic field close to 110 kV single-phase and three-phase cable lines with a magnetic screen and without it.

Key words: magnetic screening; magnetic field redistribution; cable lines; screening coefficient; screening attenuation; permalloy; magnetically soft alloys; gap; gap opening angle; solid screen.

Материал поступил в редакцию 08.09.2015
Грешняков Г.В. E-mail: g.greshnyakov@sevkab.ru

Введение

Как правило, для магнитного экранирование кабельных линий используют два способа защиты: экранирование источника поля материалами с ферромагнитными свойствами и защита расстоянием. Но не всегда имеется возможность разместить техническое оборудование на расстоянии, на котором уровень магнитного поля ниже предельно допустимого. Также не всегда оправдано проведение дорогостоящего экранирования больших и малых замкнутых объемов пространства (помещений, цехов, корпусов электронной аппаратуры, разработка защитной одежды и т.д.). В таких случаях следует ослаблять действие источников поля экранирующими материалами. Возможно использование магнитных экранов как элементов конструкции силового кабеля, однако стоимость изделий при этом существенно возрастет.

На практике часто возникает необходимость экранирования локальных областей окружающего кабельную линию пространства, например при прохождении трехфазной группой кабелей через участки сужения кабельных каналов. При этом рядом могут проходить однофазные кабели различного назначения, а конструкция кабельного сооружения не позволяет раздвинуть соседние линии на более значительные расстояния и т.п. В таком случае к экрану целесообразно предъявлять требования по перераспределению поля таким образом, чтобы в заданной зоне его характеристики не превышали определенных значений. При этом в других зонах эти значения могут превышаться.

Наиболее часто для экранирования используют кристаллические магнитомягкие материалы, например пермаллой [1]. Однако у данных материалов есть существенный недо-

Таблица 1

Магнитные свойства магнитомягких сплавов

Марка сплава	Начальная магнитная проницаемость ($\mu_{нач}$)	Максимальная магнитная проницаемость ($\mu_{макс}$)	Индукция магнитного поля (Bs, Тл)	Напряженность магнитного поля (Hc, А/м)
71КНСР*	20 000	800 000	0,50	0,8
АМАГ-172*	80 000	1 500 000	0,48	0,4
79НМ**	25 000	100 000	0,7	2

*Сплавы 71КНСР и АМАГ-172 являются сплавами на основе кобальта с аморфной структурой.
**Сплав 79НМ является сплавом на основе железа.

Number_5-2015-final.indd 8 24.12.2015 14:23:31

статок: их магнитные свойства могут уменьшаться на порядки даже при незначительных деформациях, которые неизбежно появляются при наложении экрана и монтаже кабеля. В связи с этим в последнее время все чаще стали применять магнитные экраны из магнитомягких сплавов с аморфной структурой (табл. 1), поскольку деформирование этих сплавов не приводит к существенному изменению их магнитных свойств.

Об экранировании магнитного поля

Магнитный экран снижает уровень магнитного поля вне кабельной линии за счет частичного отражения электромагнитных волн от границ экрана, поглощения электромагнитной энергии его материалом и изменения конфигурации поля. Первый из механизмов снижения внешнего поля эффективен в области сверхвысоких частот, второй малопригоден для кабелей, предназначенных для передачи электромагнитной энергии в силу необходимости экранирования с целью уменьшения существенных потерь в экране. В окружающем экран пространстве различают ближнюю зону, определяемую расстоянием r от источника помех до экранируемой аппаратуры ($r \ll \lambda/2\pi$, где λ – длина волны), и дальнюю ($r \gg \lambda/2\pi$) зоны. В ближней зоне преобладающей составляющей электромагнитного поля является магнитная либо электрическая составляющие, в дальней зоне одинаково проявляют себя обе компоненты поля [2]. Эффективность экрана характеризуется коэффициентом экранирования $K_э$, который равен отношению напряженности H_i поля при наличии экрана к напряженности H_0 поля в отсутствии экрана: $K_э = \frac{H_i}{H_0}$.

Эффект экранирования удобно характеризовать коэффициентом затухания экрана, или просто – затуханием экрана:

$$b_э = \mathrm{In}\left(\frac{1}{|K_э|}\right), \qquad (1)$$

где $b_э$ – затухание экранирования;
$K_э$ – коэффициент экранирования.

Затухание экрана зависит не только от параметров материала (удельной проводимости σ и магнитной проницаемости μ), частоты и толщины стенок, но также от конструкции экрана и ориентации экрана по отношению к силовым линиям магнитного поля. Так, для бесконечно длинного цилиндрического экрана в поперечном однородном магнитное поле [2]:

$$b_э = \mathrm{In}\left|ch(k_1 d) + \frac{1}{2}\left(K + \frac{1}{K}\right) sh(k_1 d)\right|, \; k_1 = \sqrt{k^2 + \frac{1}{R^{2'}}}, \qquad (2)$$

$$K = Rk_1 \cdot \frac{\mu_0}{\mu_{экрана}}, \; k = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$$

где d – толщина стенки экрана;
R – наружный радиус экрана;
k_1 – коэффициент учитывающий поверхностный эффект;
K – вспомогательный коэффициент.

Для этого же экрана в продольном поле приближенное выражение для затухания имеет вид:

$$b_э \approx \mathrm{In}\left|ch(k\,d) + \frac{1}{2} Rk \cdot \frac{\mu_0}{\mu_{экрана}} sh(k\,d)\right|. \qquad (3)$$

Примеры конструкций силовых кабелей с двойным экраном, внутренняя часть которого медная проволочная, а внешняя – ленточная ферромагнитная, имеются в целом ряде работ [2–5].

Расчеты и экспериментальные исследования показали, что экранирующие свойства различных аморфных сплавов проявляются наилучшим образом в многослойных экранах из материалов с различными электротехническими характеристиками. Ближайшие к жиле слои экрана целесообразно изготавливать из материалов с высокой индукцией насыщения, а наружные слои из материалов с высокой магнитной проницаемостью. Для создания экрана из двух материалов можно взять сплав на основе железа для внутреннего и сплав на основе кобальта для внешнего слоев экрана. Между слоями необходимо обеспечить изоляцию, например, путем наложения лавсановой (полиэтилентерефталатной) ленты. Полезные магнитные свойства (высокая магнитная проницаемость, малая коэрцитивная сила, близкая к нулю магнитострикция) лучше проявляются в сплавах с соотношением никеля – 80 % и железа – 20 %, хотя процент содержания никеля в сплаве может варьироваться в пределах 45–82 % [6].

Магнитные экраны специальной конструкции для силовых кабелей

При выборе конструкции экрана распространены два подхода: экранирование участков при помощи наружных выносных экранов и магнитный экран в виде элемента конструкции кабельного изделия. Рассмотрим здесь третий подход, заключающийся в использовании кольцевых надвижных экранов.

Согласно закону полного тока [7–11] линейный интеграл по замкнутому контуру L от напряженности магнитного поля равен полному току, протекающему сквозь сечение, ограниченное этим контуром.

$$\phi_L \vec{H}\vec{dl} = \Sigma_k i_k \qquad (4)$$

$$B = \mu_0 \mu H \qquad (5)$$

Соотношение (5) учитывает связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H, μ_0 – магнитная постоянная, μ – относительная магнитная проницаемость. Из соотношений (4) и (5) выражения для цилиндрического проводника с током имеют вид:

$$H = \frac{i}{2\pi r} \qquad (6)$$

$$B = \mu_0 \mu \frac{i}{2\pi r} \qquad (7)$$

Соотношения (6) и (7) справедливы в случае осевой симметрии, когда экран кабеля представляет собой круговой цилиндр, на оси которого находится экранируемый ток. Наличие такого экрана никак не повлияет на распределение магнитного поля в окружающем кабель пространстве. Иными словами, эффект экранирования магнитного поля тока, протекающего внутри экрана, не достигается и это справедливо для любой магнитной проницаемости экрана. Вихревые токи в экране в силу их разнонаправленности не дают вклада в правую часть (4). Отметим, что при этом сплошной цилиндрический экран хорошо экранирует внешнее поперечное или продольное магнитное поле (см. соотношения (6) и (7)). Принцип взаимности здесь не нарушается, так как структура (в нашем случае это

Number_5-2015-final.indd 9 24.12.2015 14:23:37

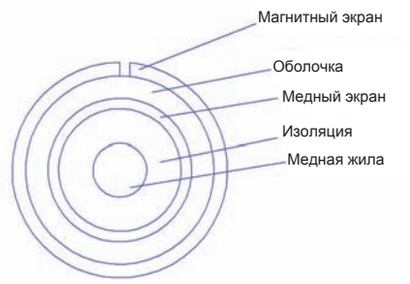

Рис. 1. *Модель кабеля с однослойным экраном*

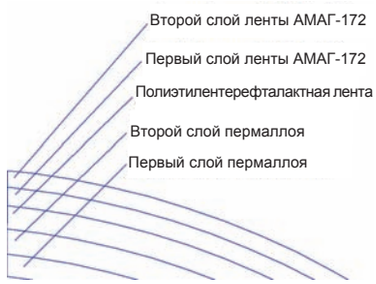

Рис. 2. *Модель с двухслойным экраном*

конфигурация силовых линий поля и их расположение по отношению к экрану) и поперечного, и продольного поля и поля, создаваемого током на оси экрана, различны.

При наличии щели (зазора) вдоль оси экрана, выражения (6), (7) уже не описывают поле в пространстве, окружающем экран. При этом значения вектора магнитной индукции $B(r)$ и напряженности магнитного поля $H(r)$ будут иметь разные значения в разных точках окружности радиуса r (радиус окружности больше радиуса экрана) при том, что интеграл (4) сохранит свое значение. Минимальные значения будут наблюдаться с противоположной от щели стороны, а максимальные – вблизи щели. Зазор в магнитном экране обеспечивает перераспределение магнитного поля в окружающем кабель пространстве. При этом положение и размер области, где поле минимально, можно изменять, меняя положение зазора на внешней границе кабеля, а также угол раскрытия зазора α. Эффективность экранирования тех областей пространства вне экрана, где поле уменьшается, будет зависеть от электрических свойств материала экрана [11], [12].

В экспериментальной модели, разработанной авторами статьи, магнитный экран исполняется в двух различных вариантах (рис. 1, 2): однослойный из магнитомягкого материала – пермаллоя 79НМ толщиной $h = 0{,}4$ мм и двухслойный – из пермаллоя 79НМ и сплава из кобальта АМАГ-172, между которыми проложена полиэтилентерефталактная лента. Конструкция двухслойного экрана выглядит следующим образом (рис. 2): первый слой экрана состоит из двух слоев ленты пермаллоя 79НМ толщиной $h = 0{,}108$ мм каждый, следом идет слой полиэтилентерефталактной ленты толщиной $h = 0{,}1$ мм, и два слоя ленты АМАГ-172 толщиной $h = 0{,}108$ мм каждый.

Численный расчет поля проводился методом конечных элементов (МКЭ) [13–15] с использованием интегрированной диалоговой системы ELCUT [16–18], в том числе с применением метода генетических алгоритмов [8]. Были произведены расчеты при $\alpha = 0^o, 5^o, 10^o, 30^o, 50^o, 70^o, 90^o, 110^o, 130^o, 150^o, 180^o, 360^o$. Результаты численного анализа магнитного поля, создаваемого однофазным кабелем, представлены на рис. 3, а значения коэффициента экранирования и затухания экранирования, в зависимости от угла раскрытия зазора и удаленности от поверхности зазора – в табл. 2.

На рис. 5 представлена схема заземления экранов (присоединенной цепи).

Анализ результатов численного моделирования показал, что оптимальной является конструкция магнитного экрана с углом раскрытия зазора $\alpha = 70^o$. Результаты для $\alpha = 0^o$ (сплошной экран) и $\alpha = 360^o$ (отсутствие экрана), естественно, совпадают и приведены в одном столбце табл. 2. Это еще раз показывает полную неэффективность сплошного экрана.

Результаты анализа магнитного поля, создаваемого трехфазной группой однофазных кабелей, в которой каждая фаза, выполненная кабелем марки ПвП2г – 1×400/120 – 110 кВ производства ООО «ГК Севкабель» (Россия), снабжена

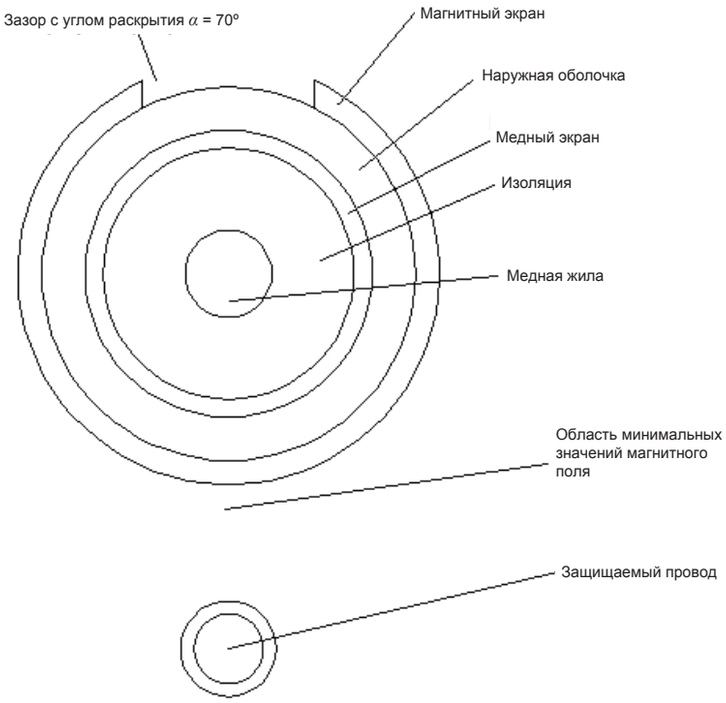

Рис. 3. *Модель кабеля с применением магнитного экрана специальной конструкции (угол раскрытия $\alpha = 70^o$). Защищаемый провод располагается в области минимальных значений магнитного поля*

Таблица 2

Значения коэффициента экранирования и затухания экранирования для углов раскрытия зазора α = 0°, 5°, 70°, 180°, 360° для однофазной модели кабельной линии

α, °	x, см	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп
0 и 360	5	1	0	5	0,26	1,34	70	0,2	1,57	180	0,24	1,42
	10	1	0		0,53	0,63		0,51	0,67		0,61	0,49
	15	1	0		0,66	0,49		0,65	0,43		0,75	0,25
	50	1	0		0,89	0,11		0,93	0,07		0,98	0,02

Number_5-2015-final.indd 10
24.12.2015 14:23:37

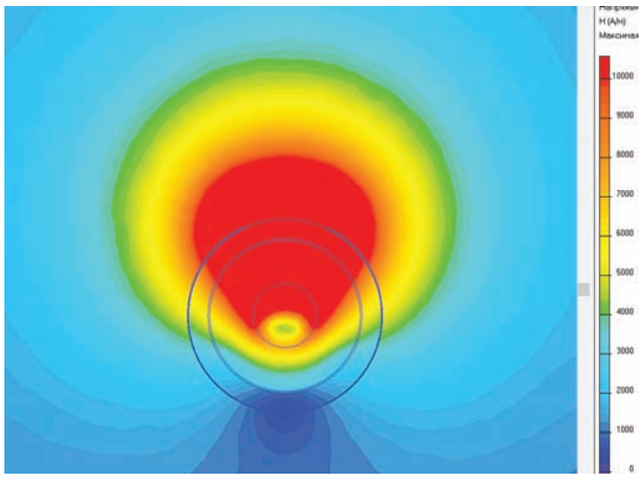

Рис. 4. *Картина поля однофазной системы с двухслойным магнитным экраном, угол раскрытия зазора $\alpha = 70^{\circ}$. Электрический экран заземлен с одной стороны*

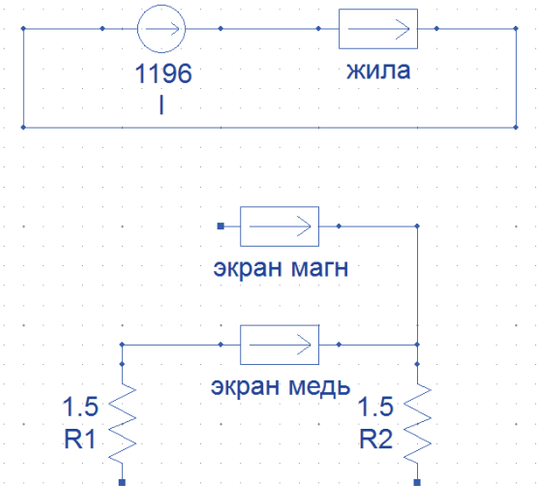

Рис. 5. *Схема заземления экранов (присоединенной цепи)*

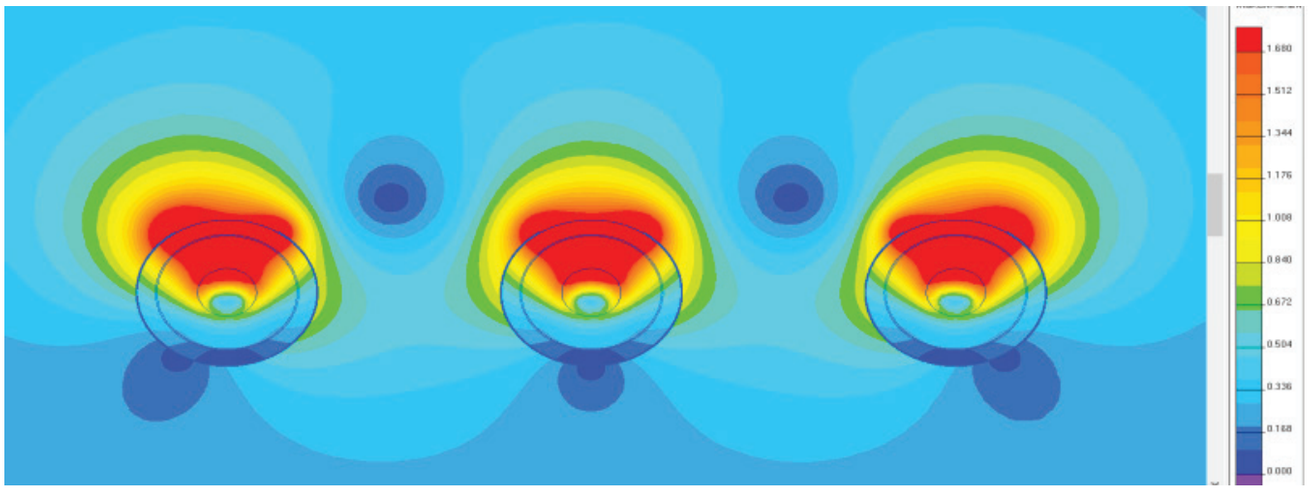

Рис. 6. *Картина поля трехфазной системы с двухслойным магнитным экраном, угол раскрытия зазора $\alpha = 30^{\circ}$. Электрические экраны заземлены с одной стороны*

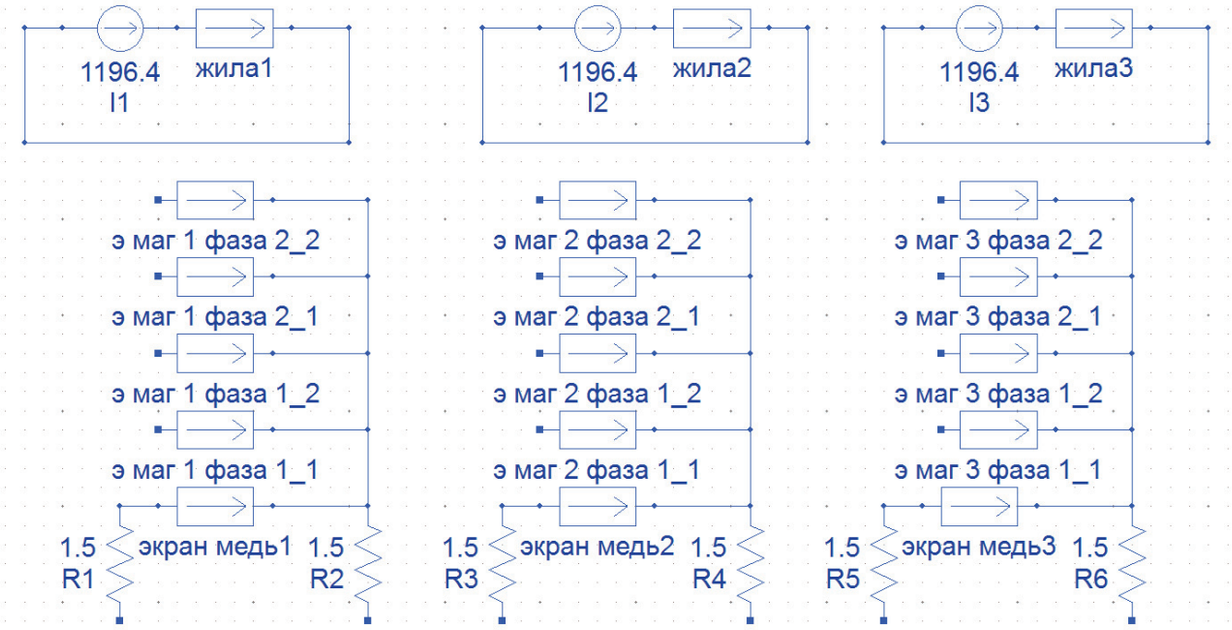

Рис. 7. *Схема заземления экранов (присоединенной цепи)*

Number_5-2015-final.indd 11
24.12.2015 14:23:39

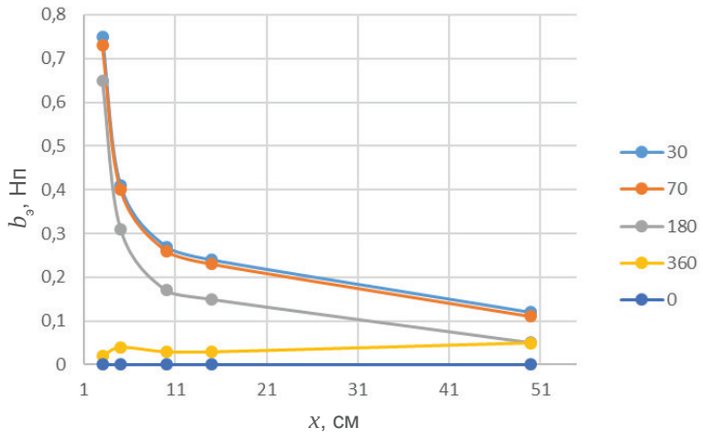

Рис. 8. *График зависимости $b_э = f(x)$*

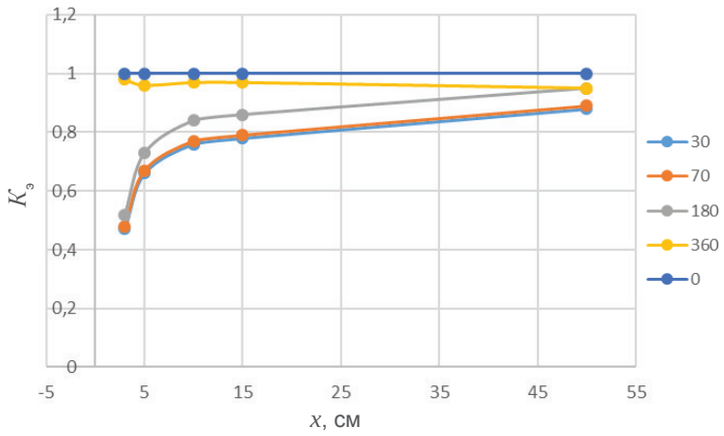

Рис. 9. *График зависимости $K_э = f(x)$*

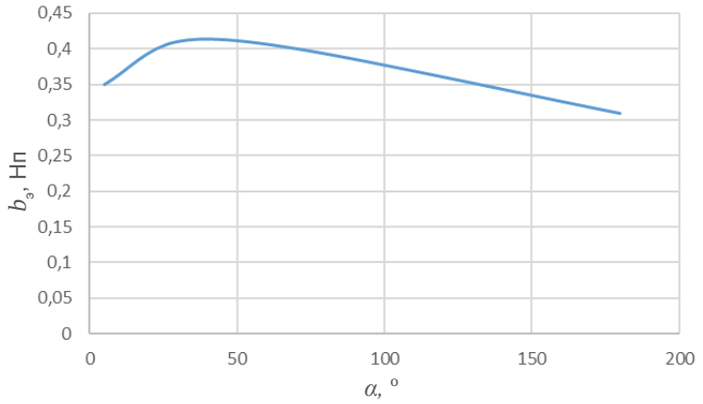

Рис. 10. *График зависимости $b_э(\alpha)$ при $x = 5$ см*

экраном с зазором, представлены на рис. 6–10, а также в табл. 3.

Расчеты проводились при $\alpha = 0^o$, 5°, 10°, 30°, 50°, 70°, 90°, 110°, 130°, 150°, 180°, 360°. По результатам вычислений стало ясно, что оптимальной является конструкция с углом раскрытия зазора $\alpha = 30^o$. Результаты для $\alpha = 0^o$ и $\alpha = 360^o$ весьма близки и показывают отсутствие эффекта экранирования для сплошного экрана. Незначительное изменение коэффициента экранирования для $\alpha = 360^o$ (соответствует отсутствию экрана) объясняется проявлением эффекта близости в этом случае. Этот эффект не проявляется для $\alpha = 0^o$, поскольку сплошной цилиндрический экран прекрасно экранирует внешнее (в данном случае поперечное) магнитное поле.

Заключение

Результаты численного моделирования магнитного поля в ближней зоне экранированной высоковольтной кабельной линии показали его значительную неравномерность. Важно, что эффект экранирования имеет место не во всей области, окружающей источник электромагнитного поля, а лишь в некоторой ее части, что позволяет уменьшать поле в заданной локальной зоне. При этом поле в других частях области возрастает. В этом смысле и коэффициент $K_э$ экранирования, и коэффициент $b_э$ затухания могут существенно отличаться в разных точках области при одних и тех же экранах и источниках поля.

Предметом дальнейших исследований является многопараметрическая оптимизация конструкции экрана с зазором, в том числе с учетом выбора наиболее выигрышного положения зазора на внешней границе каждого кабеля, входящего в многофазную группу. Отметим также, что щель в экране уменьшает и потери электромагнитной энергии в нем. Количественная оценка этого эффекта для различных исполнений экранов и их взаимных расположений также планируется нами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Силовой кабель с защитным экраном из аморфных магнитомягких сплавов [Электронный ресурс] / Материал подготовлен при участии П.А. Кузнецов, А.Ю. Аскинази, Б.В. Фармаковский (ФГУП РФ ЦНИИ КМ «Прометей»), Г.Г. Середа, В.В. Миллер (ООО «НИИ Севкабель»), В.Н. Никитина, Г.Г. Ляшко // Испытательный исследовательский центр защиты от электромагнитных полей ООО «Альфа-Пол». URL: http://www.ruscable.ru/doc/analytic/print.html?p=/doc/analytic/statya-135.html (дата обращения: 12.09.2014).

2. *Клюев А.В.* Анализ помех при измерении радиочастотных шумов / А.В. Клюев, А.В. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Лобачевского. Серия радиофизика. – 2007. – № 6. – С. 52–55.

3. *D'Amore M.* Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable lines / M. D'Amore, E. Menghi, M.S. Sarto. // Electromagnetic compatibility 2003

Таблица 3

Значения коэффициента экранирования и затухания экранирования для трехфазной модели группы кабелей

α, °	x, см	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп	α, °	$K_э$	$b_э$, Нп
0	3	1	0	30	0,47	0,75	70	0,48	0,73	180	0,52	0,65	360	0,98	0,02
	5	1	0		0,66	0,41		0,67	0,4		0,73	0,31		0,96	0,04
	10	1	0		0,76	0,27		0,77	0,26		0,84	0,17		0,97	0,03
	15	1	0		0,78	0,24		0,79	0,23		0,86	0,15		0,97	0,03
	50	1	0		0,88	0,12		0,89	0,11		0,95	0,05		0,95	0,05

Number_5-2015-final.indd 12 24.12.2015 14:23:39

IEEE international symposium, 18–22 August 2003. Conference publications. – 2003. Vol. 1. – P. 203–208.
4. *D'Amore M.* Design of new high-voltage 'green' cables generating low magnetic field levels / M. D'Amore , F.M. Gatta, D.Paladino, M.S. Sarto // IEEE Power engineering society general meeting. 8–10 June 2004. Conference publications. – 2004. Vol. 1. – P. 457–462.
5. *D'Amore.* New double-shielded power cables generating low magnetic field levels / M. *D'Amore, D. Paladino, M.S. Sarto* // International symposium of electromagnetic compatibility. 8–12 August 2005. Conference publications. – 2005. Vol. 1. – P. 179–184.
6. *Elmen G.W.; H.D. Arnold* (July 1923). Permalloy, A New Magnetic Material of Very High Permeability. Bell System Tech. J. (USA: American Tel. & Tel.) 2 (3): 101–111. Retrieved December 6, 2012.
7. *Коровкин Н.В.* Анализ электромагнитной обстановки на электрических подстанциях и станциях. / Коровкин Н.В., Сморгонский А.В. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 95. – С. 19–24.
8. *Коровкин Н.В., Потиенко А.А.* Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач // ЭЛЕКТРИЧЕСТВО. – 2002. – № 11. – С. 25–30.
9. *Dubitskiy Simon, Greshnyakov George and Korovkin Nikolay.* Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation // International Journal of Energy. – 2015. Vol. 9. – P. 12–19.
10. *Силин Н.В.* Об особенностях организации эксплуатационного обслуживания высоковольтного оборудования. / Силин Н.В., Коровкин Н.В., Шамкин И.С. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2010. – № 100-2. – С. 19–22.
11. *Korovkin N., Dybitsky S., Greshnyakov G.* Myltiphysics Approach to the Bondary Problems of Power Engineering and their Application to the Analysis of Current / Electric Power Quality and Supply Reliability, Rakvere, Estonia, June 2014.
12. *Коровкин Н.В.* Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения. / Коровкин Н.В., Приходченко Р.В., Тухас В.А. // Технологии электромагнитной совместимости. – 2011. – № 1. – С. 50–58.
13. *Грешняков Г.В., Ковалёв Г.Г., Дубицкий С.Д.* К вопросу о выборе предельно допустимых токов силовых кабелей // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 12–16.
14. *Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалёв Г.Г., Коровкин Н.В.* Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов // Кабели и провода. – 2013. – № 4. – С. 15–21.
15. *Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалёв Г.Г.* Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы // Кабель-news. – 2013. – № 3. – С. 32–37.
16. *Simon Dubitskiy, George Greshnyakov and Nikolay Korovkin.* Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multiphysics FEA Simulation // International Journal of Energy. – 2015. Vol. 9. – P. 12–19.
17. *Дубицкий С.Д.* ELCUT 5.1 – платформа разработки приложений анализа полей // Exponenta Pro Математика в приложениях. – 2004. – № 1. – С. 14–20.

Number_5-2015-final.indd 13 24.12.2015 14:24:31