

DOI: 10.18721/JEST.230112

УДК 621.315.2.016.2

*М.В. Доронин, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин*

## МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Рассмотрены оптимизация и эксплуатация магнитных подвижных экранов с целью перераспределения поля в пространстве вблизи кабельной линии — источника электромагнитного поля. Оптимизация проводилась при помощи генетического алгоритма. Найдены оптимальные конструкции экранов для различных вариантов прокладки кабельных линий (однофазная прокладка, прокладка трехфазной линии группой однофазных кабелей треугольником встык и «в ряд» в горизонтальной плоскости) изготовлены и испытаны опытные образцы экранов. Представлены результаты как численного моделирования (расчет методом конечных элементов), так и реального эксперимента. В итоге установлена хорошая согласованность полученных результатов. Показана возможность использования подвижных магнитных экранов для снижения амплитуды магнитного поля в заданных зонах вблизи кабеля.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ; КОЭФФИЦИЕНТ ЭКРАНИРОВАНИЯ; ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ; МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ; МАГНИТНЫЙ ЭКРАН; ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ; ОПТИМИЗАЦИЯ.

*Ссылка при цитировании:*

М.В. Доронин, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин. Магнитные экраны специальной конструкции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 124–133. DOI: 10.18721/JEST.230112

*M.V. Doronin, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin*

## MAGNETIC SHIELDS SPECIAL DESIGN

The article is dedicated to the optimization and operation of magnetic slip-shields with the purpose of redistributing the field in the space near the cable line (the electromagnetic field source). The optimization was made by means of a genetic algorithm (GA). As a result, the authors found optimal designs of shields for various cable line layouts. Moreover, the study shows manufactured prototypes of the shields and the testing results. This investigation demonstrates the possibility of applying slip-shields to mitigate the amplitude of the electromagnetic field in the specified areas around the cable.

ELECTROMAGNETIC SHIELDING; SHIELDING RATIO; REDISTRIBUTION OF FIELD; SHIELD ATTENUATION RATIO; SOFT MAGNETIC ALLOYS; MAGNETIC SHIELD; GENETIC ALGORITHM; OPTIMIZATION.

*Citation:*

M.V. Doronin, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin, Magnetic shields special design, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23 (1) (2017) 124–133, DOI: 10.18721/JEST.230112

### Введение

В больших городах стоит важная задача — высвобождение территорий за счет замены воздушных ЛЭП подземными кабельными линиями (КЛ). Подобные меры частично решают проблемы электромагнитной экологии [1–3]. Однако остаются открытыми вопросы по обеспечению электромагнитной совмести-

мости. Это относится как к взаимному влиянию находящихся под землей различных технических объектов (энергетические кабельные линии, канализация, водопровод, кабели связи, коммуникации метростроя), так и к нежелательному воздействию магнитного поля на биологические объекты с точки зрения электромагнитной безопасности и электромагнитной экологии.

Использование кабельных линий электропередачи в условиях мегаполиса — решение, позволяющее освободить для застройки или рекреаций дорогостоящие городские земли и улучшить электромагнитную экологию. К тому же, кабельные линии существенно лучше воздушных защищены от грозových разрядов, ветра, низких температур, вандализма, не изменяют исторический облик города и т. п. Прокладка кабельных линий в мегаполисах сталкивается с проблемой перенасыщенности поверхностных подземных пространств различным техническим оборудованием. Электромагнитное поле кабельных линий может негативно влиять на расположенные рядом коммуникации. Это негативное влияние, как правило, проявляется в относительно коротких областях пересечения кабельными линиями иных коммуникаций. Поэтому задача подавления электромагнитного поля на локальных участках вблизи кабельных линий — весьма актуальна для развития энергосистем мегаполисов.

С учетом сказанного проблема экранирования подземных кабельных линий видится весьма актуальной. В этом смысле важным вопросом является разработка новых методик и технологий экранирования магнитных полей (в частности, промышленной частоты) [4].

Для экранирования окружающего кабельную линию пространства часто применяют экраны, состоящие из нескольких слоев. Например, в конструкции силовых кабелей [5, 6] применен комбинированный экран, внутренняя сторона которого представляет собой медный проволочный экран, а внешняя сторона — ленточный ферромагнитный экран. Реализация таких конструкций для кабеля на 20 кВ рассмотрена в [7]. В то же время проблемы, связанные со снижением внешнего магнитного поля КЛ, далеки от своего полного решения. Так при однофазной прокладке силовых кабелей экранирование магнитного поля тока жилы любой из фаз цилиндрическими экранами крайне неэффективно. Действительно, в силу закона полного тока внешнее магнитное поле отдельно прокладываемой фазы трехфазной системы может быть уменьшено только током, протекающим по экрану в противоположном по отношению к фазному току направлении, что фактически эквивалентно уменьшению передаваемой по кабелю мощности. Для уменьшения внешнего

магнитного поля всей трехфазной системы может использоваться метод оптимального расположения каждой фазы кабельной линии. Однако возможности этого метода для снижения поля ограничены, и в большом числе прикладных задач добиться требуемого снижения уровня внешнего магнитного поля путем изменения расположения фаз не удастся. Применение расщепления фаз на 2–3 компоненты решает проблему, но чрезвычайно затратно.

В большинстве прикладных задач важно снизить магнитное поле до требуемого уровня лишь в некоторой заданной области пространства. Например, в области расположения сигнальных кабелей или области, где возможно присутствие защищаемых биологических объектов. При этом в остальной части пространства уровень поля, достигнутый в описанной области, может значительно превышать. В этом случае можно применить конструкцию экрана, перераспределяющего поле. Такой подход позволяет экранировать пространство вблизи некоторой части кабельной линии — там, где необходимо минимизировать значения силовых характеристик поля. Очевидно, что такой экран не будет обладать осевой симметрией. Целесообразно формулировать задачу создания таких экранов как задачу оптимизации формы экрана с целью уменьшения поля в заданной области до требуемых значений.

**Цель** настоящей работы — теоретическое и экспериментальное исследование, оптимизация и обоснование применения магнитных экранов специальной конструкции (концентраторы) для снижения уровня магнитного поля, создаваемого КЛ в локальных областях окружающего пространства. Отличительной особенностью таких экранов является аксиальный воздушный зазор (рис. 1) [10].

#### **Методика исследования.**

#### **Применяемые материалы**

Предлагаемый подход к экранированию заданных частей пространства состоит в перераспределении поля [10] за счет неоднородностей экрана так, чтобы в заданной области оно было наименьшим. Будем рассматривать цилиндрические системы, в которых вектор напряженности магнитного поля не имеет компоненты, направленной вдоль оси. Введем по аналогии с общепринятой терминологией магнитного

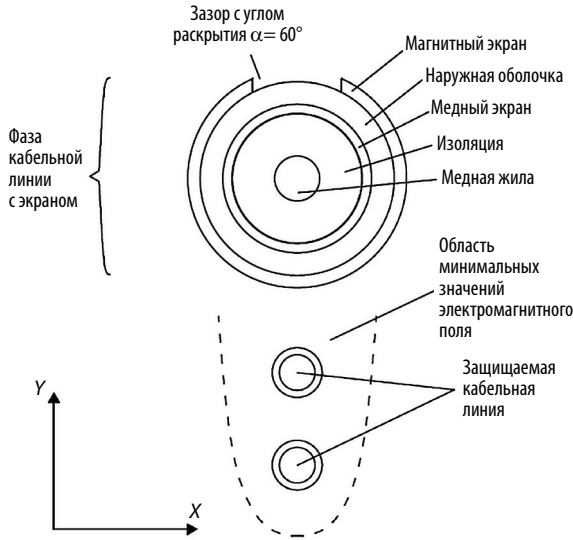


Рис.1. Кабель с магнитным экраном и защищаемый провод, располагающийся в области минимальных значений электромагнитного поля

экранирования [11] количественные характеристики. Пусть  $H_0$  — напряженность магнитного поля (действующее значение) в отсутствие экрана,  $H_i$  — напряженность магнитного поля при наличии экрана. Тогда, как обычно, коэффициент экранирования вводится в виде отношения  $K_1 = H_i/H_0$ . Часто вводят логарифмический коэффициент, определяемый по следующей формуле:  $b_3 = \ln\left(\frac{1}{|K_1|}\right)$ . Это соотношение не слишком удобно, так как оценивает эффективность экранирования не в области пространства, а в некоторой априорно выбранной точке.

С другой стороны, коэффициент экранирования может быть введен следующим образом:

$$K_2 = \sqrt{\int_S H_i^2(s) ds / \int_S H_0^2(s) ds}; \quad (1)$$

$$K_3 = \int_S \vec{H}_i(s) \vec{ds} / \int_S \vec{H}_0(s) \vec{ds}. \quad (2)$$

В (1) и (2) единичный вектор  $\vec{ds}$  нормален к поверхности  $S$ , ограничивающей заданную область пространства в нормальном к оси всей цилиндрической системы направлении. Соотношения (1) и (2) повышают репрезентативность результатов, не требуют принятия волюнтаристских решений о выборе точки области для

оценки экранирующих свойств. Обычно вычисление по (1), (2) может быть выполнено стандартными средствами пакетов программ расчета электромагнитных полей.

Следует отметить, что особенность обсуждаемых экранов в том, что они не являются элементом конструкции кабеля, а представляют собой отдельный концентратор, который надвигается поверх наружной оболочки кабеля каждой фазы (надвижной экран).

В соответствии с законом полного тока линейный интеграл по замкнутому контуру  $L$  от напряженности магнитного поля равен полному току, протекающему сквозь сечение, ограниченное этим контуром:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_k i_k; \quad (3)$$

$$B = \mu\mu_0 H. \quad (4)$$

Используя (3) и (4), получим следующие соотношения для цилиндрического проводника с током:

$$H = \frac{i}{2\pi r}; \quad (5)$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{i}{2\pi r}. \quad (6)$$

Соотношения (5) и (6) актуальны при осевой симметрии, когда экран кабеля является круговым цилиндром, по оси которого распространяется экранируемый ток. Наличие такого экрана 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 при любой магнитной проницаемости экрана. Отметим, что при этом сплошной цилиндрический экран хорошо экранирует внешнее поперечное или продольное магнитное поле (см. выражения (5) и (6)). Принцип взаимности не нарушается, потому что структура (в нашем случае это конфигурация силовых линий поля и их расположение по отношению к экрану) поперечного и продольного поля и поля, создаваемого током на оси экрана, различны.

В том случае, когда имеет место зазор в экране вдоль его оси, выражения (5) и (6) не могут быть использованы для описания поля

в пространстве вокруг кабеля. Значения вектора магнитной индукции  $B(r)$  и напряженности магнитного поля  $H(r)$  будут различаться в разных точках окружности радиусом  $r$ , в то время как интеграл (3) сохранит свое значение. Зазор в магнитном экране делает возможным перераспределение амплитуды магнитного поля в пространстве, которое окружает кабельное изделие. При этом с противоположной от щели стороны значения амплитуды магнитного поля будут минимальными, а вблизи щели поле будет максимальным. Изменяя положение зазора на внешней границе кабеля и угол раскрытия зазора, можно выбирать положение и размер области, где необходимо минимизировать амплитуду индукции магнитного поля. Эффективность экранирования тех областей пространства вне экрана, где поле уменьшается, будет зависеть от электрических свойств материала экрана [12].

Авторы разработали модель, при которой подвижные экраны (концентраторы) имеют следующую конструкцию: магнитный экран из магнитомягкого сплава на основе кобальта и железа марки АМАГ-172 с нелинейными магнитными свойствами и электропроводностью  $1,5 \cdot 10^7$  См/м, набранный различным количеством слоев ленты, с толщиной каждого слоя 0,1 мм (из них 0,025 мм занимает непосредственно сплав, подвергшийся термообработке, который с двух сторон ламинирован полиэтилентерефталатом). Источниками поля выступали однофазная и трехфазная кабельные си-

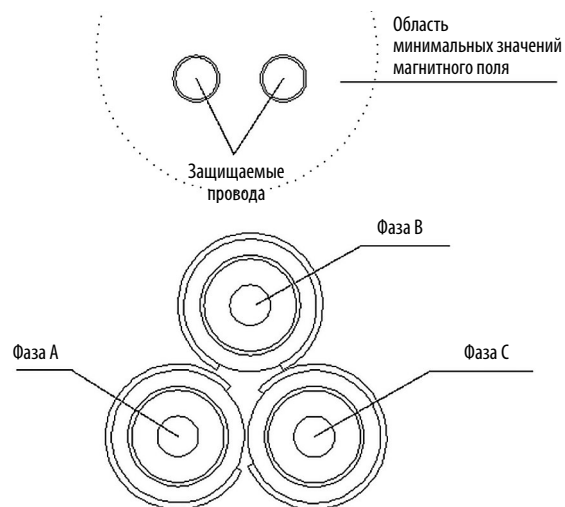


Рис. 2. Модель трехфазной кабельной системы, проложенной однофазным кабелем треугольником встык

стемы, собранные из однофазных кабелей марки ПвПу2г — 1×630/95–110 кВ (рис. 1, 2, 3).

#### Результаты численного моделирования экранирования магнитного поля и их обсуждение

Расчеты проводились на базе программного комплекса Elcut 6.0 [13], оптимизация конструкций подвижных магнитных экранов осуществлялась генетическим алгоритмом (ГА). Достоинство ГА состоит в возможности находить решение задач с большим числом локальных экстремумов; недостаток — медленная сходимость вблизи экстремума [14, 15].

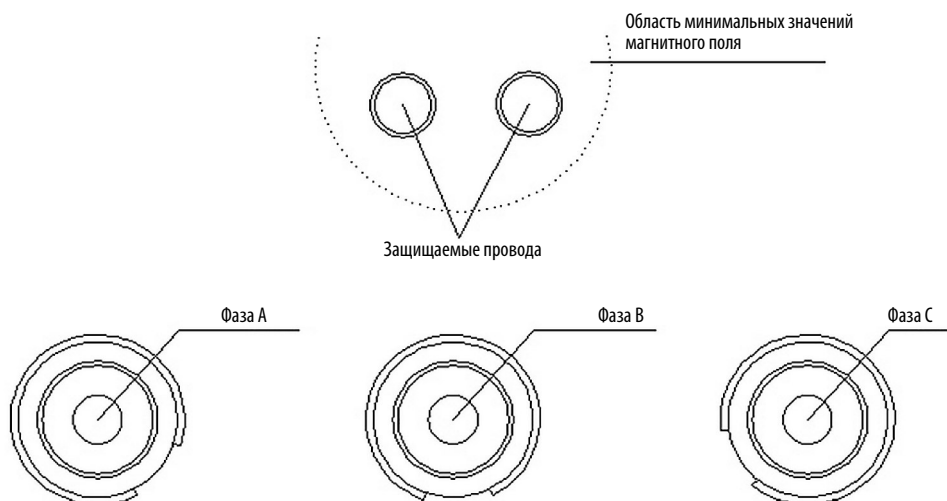


Рис. 3. Модель трехфазной кабельной линии, проложенной однофазным кабелем в ряд с просветом в диаметр кабеля

По результатам оптимизации определялись наилучшие положения зазоров на каждой фазе и углы раскрытия зазоров, зависящие, очевидно, от типа прокладки трехфазной кабельной линии: прокладка треугольником встык; прокладка в ряд с просветом в диаметр кабеля. Оптимальные параметры экранов приведены в табл. 1, 2, 3.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперимент проводился на базе лаборатории ОАО НИИПТ. Изготовленные опытные образцы экранов были испытаны на кабеле марки ПвПу2г — 1×630/95—110 кВ в однофазном вари-

анте исполнения, а также в вариантах трехфазной кабельной системы, проложенной группой однофазных кабелей «треугольником встык», и при прокладке в горизонтальной плоскости «в ряд» (рис. 4, 5).

Опытные образцы экранов были изготовлены по оптимальным конструкциям только для действующих значений симметричной токовой нагрузки 500–700 А, что соответствует рабочим значениям тока для данной марки кабеля. Показания значений индукции магнитного поля  $B$ , мкТл, снимались портативным анализатором ЭМП промышленной частоты марки Narda EFA-300 на расстоянии 0, 10 и 17 см

Таблица 1

Значения оптимальной толщины экрана для разных токов и характеристик поля в точке, относительно которой проводилась оптимизация толщины

Ток, кА	$h_{\text{опт}}^*$ , мм	$H_i$ , А/м	$H_0$ , А/м	$K_1$	$b_3$ , Нп
0,5	1,6	503	1200	0,419	0,869
1	3,0	1160	2400	0,483	0,727
1,5	3,5	1950	3600	0,541	0,613
2	3,5	2750	4800	0,572	0,557

$h_{\text{опт}}^*$  — оптимальная толщина экрана.

Таблица 2

Оптимальные геометрические параметры после применения ГА в варианте прокладки кабельной линии «в ряд»

Фаза	Угол раскрытия зазора $\alpha$ , град	Поворот концентратора вокруг центра фазы относительно первоначального положения зазора*
A	54,92	125,3
B	47,55	181,93
C	46,5	139,25

\* В направлении поворота по часовой стрелке

Таблица 3

Оптимальные геометрические параметры после применения ГА в варианте прокладки кабельной системы «треугольником встык»

Фаза	Угол раскрытия зазора $\alpha$ , град	Поворот концентратора вокруг центра фазы относительно первоначального положения зазора*
A	58,56	80,1
B	37,82	181,93
C	58	282,3

\* В направлении поворота по часовой стрелке

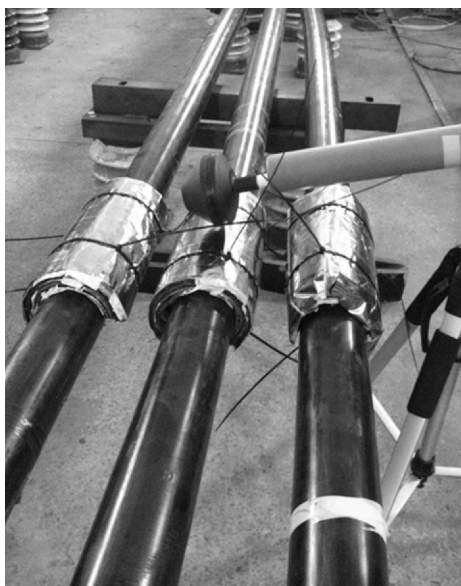


Рис. 4. Кабельная линия, проложенная в горизонтальной плоскости



Рис. 5. Кабельная линия, проложенная «треугольником встык»

для каждой из токовых нагрузок от поверхности однофазного кабеля, и на расстоянии 5, 10 и 15 см от поверхности фазы  $B$  для трехфазной системы в случае каждого варианта прокладки. Показания характеристик магнитного поля в пространстве снимались как в случае использования надвигного магнитного экрана, так и без него.

Результаты экспериментов приведены в табл. 4, 5, 6.

Как видно из результатов испытаний, во всех вариантах кабельных линий наблюдается суще-

ственное снижение силовых характеристик поля в тех участках пространства, где стояла задача их уменьшить. Однако симметричное расположение фаз (в случае прокладки «треугольником встык») является оптимальным.

Особое внимание стоит уделить комплексной многоступенчатой оптимизации конструкций концентраторов при помощи генетического алгоритма (ГА). Как отмечено выше, использование ГА существенно облегчает процессы решения и нахождения оптимальных значений в многопараметрических задачах.

Таблица 4

**Результаты измерений индукции магнитного поля для различных значений токовой нагрузки при прокладке кабелей «треугольником встык»**

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля, %
$I_{\text{исп}}, \text{A}$	Расстояние от поверхности кабеля, см	$B, \text{мкТл}$	$B_{\text{без экр}}, \text{мкТл}$	
500	5	157	437	54,6
	10	143	306	
	15	104	195	
600	5	230	533	50,6
	10	182	365	
	15	127	231	
700	5	313	618	44,6
	10	225	426	
	15	169	269	

Таблица 5

**Результаты измерений индукции магнитного поля для различных значений токовой нагрузки при прокладке кабелей в ряд с просветом в диаметр кабеля**

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля, %
$I_{\text{исп}}, \text{A}$	Расстояние от поверхности кабеля, см	$B, \text{мкТл}$	$B_{\text{без экр}}, \text{мкТл}$	
500	5	763	913	23
	10	456	608	
	15	275	380	
600	5	941	1046	18,9
	10	584	738	
	15	347	467	
700	5	1118	1244	16,7
	10	705	860	
	15	425	546	

Таблица 6

**Результаты измерений индукции магнитного поля для различных значений токовой нагрузки для однофазного кабеля**

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля, %
$I_{\text{исп}}, \text{A}$	Расстояние от поверхности кабеля, см	$B, \text{мкТл}$	$B_{\text{без экр}}, \text{мкТл}$	
500	0	638,2	896	41,6
	10	515,9	649,1	
	17	415,1	426,8	

Таблица 7

**Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) по эффекту экранирования с помощью подвижных магнитных экранов при прокладке кабелей «треугольником встык»**

Ток, А	$L, \text{см}$	$B, \text{мкТл}$	$B_{\text{фон}}, \text{мкТл}$	Снижение $B, \%$	Среднее снижение $B, \%$	$K_1$	$b_3$
500	5	157 (250)	437 (720)	64 (65,27)	54,6 (64,5)	0,35 (0,34)	1,02 (1,05)
	10	143 (145)	306 (371)	53,26 (60,91)		0,46 (0,39)	0,76 (0,93)
	15	104 (99)	195 (238)	46,6 (58,4)		0,53 (0,41)	0,62 (0,87)

\* В скобках указаны расчетные величины

Таблица 8

**Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) по эффекту экранирования с помощью подвижных магнитных экранов при прокладке кабелей в горизонтальной плоскости «в ряд» с просветом в диаметр кабеля**

Ток, А	$L$ , см	$B$ , мкТл	$B_{фон}$ , мкТл	Снижение $B$ , %	Среднее снижение $B$ , %	$K_1$	$b_3$
500	5	763 (550)	913 (1170)	16,42 (52,58)	23 (56,6)	0,83 (0,47)	0,17 (0,74)
	10	456 (287)	608 (650)	25 (55,57)		0,75 (0,44)	0,28 (0,81)
	15	275 (164)	380 (431)	27,63 (61,77)		0,72 (0,38)	0,32 (0,96)

\* В скобках указаны расчетные величины

**Сравнение результатов эксперимента и расчета (численного моделирования) для оптимального случая**

Как уже отмечалось, макеты экранов были изготовлены с толщиной активного слоя, соответствующей рабочему значению токовой нагрузки для применяемой марки кабеля. Рабочий режим обеспечивается токовой нагрузкой 500 А. Для сравнения результаты эксперимента и расчета именно для данного значения тока приведены в табл. 7, 8.

**Выводы**

Выполненные расчеты и подтвердившие их эксперименты показывают значительное снижение поля трехфазной кабельной линии в заданной области при оптимальной конструкции подвижных экранов. Результаты расчета и эксперимента хорошо согласуются. Эксперимент

и расчеты показали снижение поля более чем на 40 % при оптимальной конструкции экрана в испытаниях однофазного кабеля. Зафиксировано снижение значений магнитного поля более чем на 50 % в случае трехфазной кабельной линии как группы однофазных кабелей, прокладываемых «треугольником встык». Эксперимент, проводимый на кабельной линии, проложенной в горизонтальной плоскости с просветом в диаметр кабеля, показал снижение поля в среднем на 20 %.

Компактность изготовленных магнитных экранов и простота эксплуатации позволяют утверждать, что их использование может быть эффективным, например в местах сужения кабельных каналов, при прокладке кабелей в условиях ограниченного пространства и при прокладке силовых кабелей вблизи коммуникационных кабелей.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Machado V.M. Magnetic field mitigation shielding of underground power cables // IEEE Transactions on Magnetics. 2012. Vol. 48. № 2. P. 707–710.
2. Liyui L., Zhiyin S., Donghua P. An approach to analyzing magnetically shielded room comprising discontinuous layers considering permeability in low magnetic field // IEEE Transactions on Magnetics. 2014. Vol. 50. No 11. P. 2008104.
3. Кузнецов П.А. Создание эффективных систем электромагнитной защиты на основе магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов Co и Fe: дисс. ... канд. тех. наук: 05.02.01 / Кузнецов Павел Алексеевич; ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». Санкт-Петербург, 2005. 165 с.
4. Силовой кабель с защитным экраном из аморфных магнитомягких сплавов // Материал подготовлен при участии П.А. Кузнецова, А.Ю. Аскинази, Б.В. Фармаковского (ФГУП РФ ЦНИИ КМ «Прометей»), Г.Г. Середы, В.В. Миллера (ООО «НИИ Севкабель»), В.Н. Никитина, Г.Г. Ляшко («Исследовательский центр защиты от электромагнитных полей» ООО «Альфа-Пол»). [Электронный ресурс] Режим доступа: URL <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/print.html?p=/doc/analytic/statuya-135.html> (дата обращения: 12.08.2016)
5. D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S. Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable // Electromagnetic compatibility. 2003. IEEE



international symposium, 18–22 August 2003. Conference publications. 2003. Vol. 1. P. 203–208.

6. **D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S.** Design of new high-voltage 'green' cables generating low magnetic field levels // IEEE Power engineering society general meeting. 8–10 June 2004. Conference publications. 2004. Vol.1. P. 457–462.

7. **D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S.** New double-shielded power cables generating low magnetic field levels // International symposium of electromagnetic compatibility. 8–12 August 2005. Conference publications. 2005. Vol.1. P. 179–184.

8. **Korovkin N.V., Chechurin V.L., Hayakawa M.** Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. USA: Springer, 2006. 331 p.

9. **Salinas E., Liu Y.Q., Souza Jr.P.** Design and validation of power-frequency magnetic field conductive shielding for underground cables // IEEE Xplore Conference: Electricity Distribution, 18th International Conference and Exhibition. Turin. 2005. № 2. P. 1–4.

10. **Грешняков Г.В., Доронин М.В., Коровкин Н.В.** Комбинированные магнитные экраны для силовых

кабельных линий // Кабели и провода. 2015. № 5. С.8–13.

11. **Реутов Ю.Я.** Классические магнитные экраны / Екатеринбург. УрО РАН, 2006. 72 с.

12. **Коровкин Н.В., Приходченко Р.В., Тухас В.А.** Проблемы поиска источника помех в электросетях общего назначения // Технологии электромагнитной совместимости. 2011. №1. С. 50–58.

13. **Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N.** Comparison of Finite Element Analysis to IEC 60287 for Predicting Underground Cable Ampacity // EnergyCon 2016. IEEE Int. Conference. Leuven, Belgium. 4–8 Apr. 2016. P.1–6.

14. **Потиенко А.А.** Параметрический синтез и оптимизация формирующих линий и трехфазных кабелей с помощью генетического алгоритма: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. наук (05.09.05) / Поттиенко Антон Анатольевич; СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2004. 18 с.

15. **Коровкин Н.В., Поттиенко А.А.** Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач // Электричество. 2002. №11. С. 25–30.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ДОРОНИН Михаил Владимирович** — аспирант ООО НИИ «Севкабель». 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия д.40. E-mail: mvdoronin93@gmail.com

**ГРЕШНЯКОВ Георгий Викторович** — кандидат технических наук главный конструктор ООО НИИ «Севкабель». 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия,40. E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

**КОРОВКИН Николай Владимирович** — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

#### REFERENCES

1. **Machado V.M.** Magnetic field mitigation shielding of underground power cables. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2012. Vol. 48. № 2. P. 707–710.

2. **Liyui L., Zhiyin S., Donghua P.** An approach to analyzing magnetically shielded room comprising discontinuous layers considering permeability in low magnetic field. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50. № 11. P. 2008104.

3. **Kuznetsov P.A.** Sozdaniye effektivnykh sistem elektromagnitnoy zashchity na osnove magnitomyagkikh amorfnykh i nanokristallicheskiykh splavov So i Fe: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.02.01 / Kuznetsov Pavel Alekseyevich; FGUP TsNII KM «Prometey». Sankt-Peterburg, 2005. 165 s. (rus.)

4. Silovoy kabel s zashchitnym ekranom iz amorfnykh magnitomyagkikh splavov / Material podgotovlen pri uchastii P.A. Kuznetsova, A.Yu. Askinazi, B.V. Farmakovskogo (FGUP RF TsNII KM «Prometey»), G.G. Seredn, V.V. Miller (ООО «НИИ Севкабель»),

V.N. Nikitina, G.G. Lyashko («Ispytatelnyy issledovatel'skiy tsentr zashchity ot elektromagnitnykh poley» ООО «Alfa-Pol»). [Elektronnyy resurs] Rezhim dostupa: URL <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/print.html?p=/doc/analytic/statya-135.html> (data obrashcheniya: 12.08.2016). (rus.)

5. **D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S.** Shielding techniques of the low-frequency magnetic field from power cable. *Electromagnetic compatibility. 2003. IEEE international symposium, 18–22 August 2003. Conference publications*. 2003. Vol.1. P. 203–208.

6. **D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S.** Design of new high-voltage 'green' cables generating low magnetic field levels. *IEEE Power engineering society general meeting. 8–10 June 2004. Conference publications*. 2004. Vol. 1. P. 457–462.

7. **D'Amore M., Menghi E., Sarto M.S.** New double-shielded power cables generating low magnetic field levels. *International symposium of electromagnetic compatibil-*

ity. 8–12 August 2005. Conference publications. 2005. Vol. 1. P. 179–184.

8. **Korovkin N.V., Chechurin V.L., Hayakawa M.** Inverse problems in electric circuits and electromagnetics. USA: Springer, 2006. 331 p.

9. **Salinas E., Liu Y.Q., Souza Jr. P.** Design and validation of power-frequency magnetic field conductive shielding for underground cables. *IEEE Xplore Conference: Electricity Distribution, 18th International Conference and Exhibition*. Turin. 2005, № 2. P. 1–4.

10. **Greshnyakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V.** Kombinirovannyye magnitnyye ekrany dlya silovykh kabelnykh liniy. *Kabeli i provoda*. 2015. № 5. S. 8–13. (rus.)

11. **Reutov Yu.Ya.** Klassicheskiye magnitnyye ekrany / Yekaterinburg: UrO RAN, 2006. 72 s. (rus.)

12. **Korovkin N.V., Prihodchenko R.V., Tukhas V.A.**

Problemy poiska istochnika pomekh v elektrosetyakh obshchego naznacheniya. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti*. 2011. № 1. P. 50–58. (rus.)

13. **Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N.** Comparison of Finite Element Analysis to IEC 60287 for Predicting Underground Cable Ampacity. *EnergyCon 2016 IEEE Int. Conference*. Leuven, Belgium. 4–8 Apr. 2016. P. 1–6.

14. **Potiyenko A.A.** Parametricheskii sintez i optimizatsiya formiruyushchikh liniy i trekhfaznykh kabeley s pomoshchyu geneticheskogo algoritma: Dis. ... kand. tekhn. nauk (05.09.05) / Potiyenko Anton Anatolyevich; SPb-GPU. Sankt-Peterburg, 2004. 18 p. (rus.)

15. **Korovkin N.V., Potiyenko A.A.** Ispolzovaniye geneticheskogo algoritma dlya resheniya elektrotekhnicheskikh zadach. *Elektrichestvo*. 2002. № 11. P. 25–30. (rus.)

#### AUTHORS

**DORONIN Mikhail V.** — LLC RDTCI «Sevkabel». 49, Kozhevennaya line, St. Petersburg, 199106. E-mail: mvdoronin93@gmail.com

**GRESHNYAKOV Georgii V.** — Research institute «Sevkabel». 40, Kozhevennaia line, St. Petersburg, 199106. E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

**KOROVKIN Nikolai V.** — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

**Дата поступления статьи в редакцию: 05.10.2016.**