

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.318.132

НАДВИЖНЫЕ МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ, СОБРАННЫЕ ИЗ ЛИСТОВ АМОРФНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ СПЛАВОВ

М. В. ДОРНИН¹, Г. В. ГРЕШНЯКОВ^{1,2}, канд. техн. наук

¹ ООО НИИ «Севкабель», 199106, Санкт-Петербург, Кожевенная линия, д. 40
E-mail: mviduka@yandex.ru

² ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»,
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Статья поступила 8.09.2016

Представлены результаты исследований в области создания принципиально нового кабельного аксессуара, не являющегося элементом конструкции кабеля, – подвижного магнитного экрана специальной конструкции. Для его изготовления использовали магнитный экран МАР-1К, состоящий из лент аморфного магнитомягкого сплава АМАГ-172. С целью выбора конструкции подвижного магнитного экрана была выполнена оптимизация конструктивных параметров с применением математических эволюционных методик. Проводился поиск оптимальных параметров: угол раскрытия зазора и поворот концентратора на оси кабеля. Приведены: обзор существующих материалов для экранирования, обоснование выбранного материала, а также результаты оптимизации, расчетов и эксперимента. Полученные результаты могут быть использованы в таких областях науки и техники, как материаловедение, электротехника, электроэнергетика, медицинские технологии и др.

Ключевые слова: аморфные магнитомягкие сплавы, экранирование магнитного поля, коэффициент экранирования, затухание экрана, генетический алгоритм, экран МАР-1К, ферромагнитные материалы, кабельные линии.

Введение

В условиях все возрастающего энергопотребления и ограниченного пространства для прокладки кабельных линий в современном мире актуальна проблема экранирования пространства, окружающего источники электромагнитного поля (в нашем случае кабельных линий), с целью обеспечения бесперебойной работы аппаратуры, находящейся вблизи кабельных трасс, а также защиты биологических объектов. Научно-технический и инженерный персонал, занимающийся разработкой, проектированием и прокладкой кабельных линий в городах и мегаполисах, уже несколько десятилетий сталкивается с трудностями во время выполнения своей работы, так как тенденция к замене воздушных линий электропередачи на кабели, проложенные в подземных колодцах, приводит, с одной стороны, к высвобождению больших площадей городских территорий; а с другой, – к перенасыщению подземных пространств всевозможным оборудованием. Высоковольтные кабельные линии являются источником сильных магнитных полей. Как правило, под землей вблизи этих линий располагаются кабели связи, сооружения метрополитена, магазины и места массового скопления людей. В связи с этим актуальна проблема экранирования локальных участков кабельных линий в тех местах, где необходимо уменьшение влияния магнитного поля. В данном случае применять магнитный экран как элемент конструкции кабеля (по всей длине) нерационально, логично использовать подвижные магнитные экраны специальной конструкции в

формате кабельного аксессуара, которые не являются элементами конструкции самого кабеля. На сегодняшний день имеется ряд работ, посвященных влиянию магнитных полей на биологические [1] и технические [2] объекты.

В настоящей работе предлагаются различные варианты кольцевых подвижных магнитных экранов с зазором для перераспределения магнитных полей вокруг кабельных линий. Проводился подбор оптимальных конструкций кабельных аксессуаров с помощью существующих и используемых оптимизационных методов (генетический алгоритм) для различных вариантов прокладки кабельных сетей. Были проведены анализ информации, численное моделирование и эксперимент, где учитывались нюансы в комбинированных способах и условиях прокладки.

Материал и методика исследования

Кольцевой подвижной экран (концентратор) конструировали из магнитного экрана МАР-1К (изготовлен в ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей»), состоящего из лент аморфного сплава АМАГ-172 толщиной 0,020 мм, скрепленных между собой с двух сторон полиэтилентерефталатной пленкой толщиной 0,03 мм [3]. Электропроводность лент сплава составляет $1,5 \cdot 10^7$ См/м. В расчетной модели и экспериментальном макете источниками поля выступали однофазная и трехфазная кабельные системы, собранные на базе кабеля марки ПвПу2г-1×630/95-110кВ.

Для подбора оптимальной конструкции магнитных концентраторов (угол раскрытия зазора, толщина экрана, положение концентратора на каждой из фаз) применялась многоступенчатая оптимизация путем использования генетического алгоритма [4].

Принцип работы перераспределителя магнитного поля можно объяснить, используя закон полного тока, по которому линейный интеграл по замкнутому контуру l от напряженности магнитного поля равен полному току, протекающему сквозь сечение, ограниченное этим контуром

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \sum_k i_k; \quad (1)$$

$$B = \mu\mu_0 H. \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) выводятся формулы для напряженности и индукции магнитного поля в случае цилиндрического проводника

$$H = \frac{i}{2\pi r}; \quad (3)$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{i}{2\pi r}. \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) справедливы в случае осевой симметрии. Присутствие экрана в виде кругового цилиндра не влияет на распределение магнитного поля в пространстве, которое окружает кабель, экранирующий эффект не достигается при любых значениях магнитной проницаемости экрана. При наличии зазора в магнитном экране (рис. 1) выражения (3) и (4) не описывают поле в пространстве, окружающем кабель. Значения модуля вектора магнитной индукции $B(r)$ и напряженности магнитного поля $H(r)$ будут различными в разных точках окружности радиуса r ($r > R$, где R – радиус кабеля), в то время как интеграл (1) сохраняет свое значение. Таким образом, зазор в экране позволяет перераспределять поле в пространстве вокруг кабеля, при этом максимальные значения поля будут вблизи зазора, а минимальные – с противоположной от зазора стороны. Варьируя угол рас-

крытия зазора и его положение на внешней границе кабеля, можно выбрать ту зону, в которой требуется снизить значения силовых характеристик поля [4].

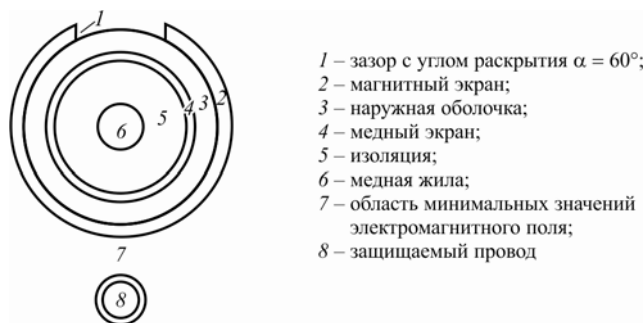


Рис. 1. Модель однофазного кабеля с зазором

Для определения эффективности экранирования введем коэффициент экранирования $K_э$ [5], численно равный отношению напряженности магнитного поля H_i в присутствии магнитного экрана с зазором к напряженности поля при отсутствии магнитного перераспределителя поля H_0

$$K_э = \frac{H_i}{H_0}. \quad (5)$$

В ряде случаев удобно сравнивать значения путем использования логарифмического коэффициента, который будем называть коэффициентом затухания экрана

$$b_э = \ln \left(\frac{1}{K_э} \right). \quad (6)$$

При подборе наиболее приемлемых конструктивных параметров подвижных магнитных экранов использовали оптимизационный подход, основанный на генетическом алгоритме, представляющем собой один из самых известных и применяемых эволюционных оптимизационных методов [6–8].

Расчетная часть

Оптимизационная методика на основе генетического алгоритма позволяет определить конструктивные параметры магнитных концентраторов для снижения воздействия магнитного поля в той области пространства кабельной линии, где это требуется (на рис. 2 эта область находится в месте расположения защищаемого провода). При проведении расчета численным моделированием методом конечных элементов были установлены оптимальные конструктивные значения (табл. 1 и 2). Расчет проводили при симметричной токовой нагрузке в пределах 500–2000 А.

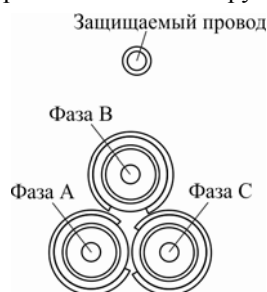


Рис. 2. Трехфазная кабельная линия с применением подвижных магнитных экранов

Таблица 1

**ЗНАЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯ В ТОЧКЕ, ОТНОСИТЕЛЬНО КОТОРОЙ
ПРОВОДИЛАСЬ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОКА
И ОПТИМАЛЬНОЙ ТОЛЩИНЫ ЭКРАНА**

Ток, кА	Оптимальная толщина экрана $h_{\text{опт}}$, мм	H_s , А/м	H_0 , А/м	K_s	b_s , Нп
0,5	1,6	503	1200	0,419	0,869
1	3	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

Таблица 2

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ КАБЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ, ПРОЛОЖЕННОЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ ВСТЫК**

Фаза п/п	Угол раскрытия зазора, град.	Поворот концентратора вокруг центра фазы (по часовой стрелке) относительно первоначального положения зазора, град.
Фаза А	58,56	80,1
Фаза В	37,82	181,93
Фаза С	58,02	282,3

Картина распределения магнитного поля трехфазной кабельной системы, проложенной треугольником встык при начальном угле раскрытия зазора 30° , представлена на рис. 3.

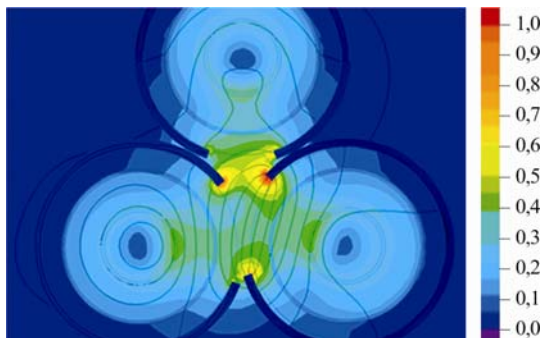


Рис. 3. Картина магнитного поля при наличии оптимизированных подвижных магнитных экранов ($I = 2$ кА)

Эксперимент и обсуждение результатов

По приведенным расчетам и численному моделированию были проведены испытания. Эксперимент проводился для двух случаев: однофазное исполнение (рис. 4) и вариант трехфазной кабельной системы, проложенной группой однофазных кабелей треугольником встык.



Рис. 4. Магнитный экран, надвинутый поверх кабеля

Макеты магнитных концентраторов, изготовленные по рассчитанным оптимальным конструкциям, предназначены для симметричной нагрузки в пределах 500–700 А (в соответствии с рабочими значениями тока для данного кабеля). Значения индукции магнитного поля фиксировались в ближней зоне пространства, окружающего кабельные линии, причем фиксация этих значений проводилась как при использовании магнитного перераспределителя, собранного из листов экрана МАР-1К, так и при его отсутствии.

Результаты испытаний приведены в табл. 3, из которой видно, что индукция магнитного поля при токах 500–700 А снижается на 44,6–54,6%. Испытания показали также снижение магнитного поля на 41% для однофазной кабельной линии.

Таблица 3

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКЕ КАБЕЛЕЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ ВСТЫК

Фактические параметры испытаний		B , ($B_{\text{фона}}$), мкТл, при прокладке треугольником встык	Снижение индукции магнитного поля при прокладке треугольни- ком встык, %
$I_{\text{исп}}$, А	расстояние от поверхно- сти кабеля, см		
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)	

В ходе эксперимента было установлено снижение поля для всех вариантов прокладки кабелей, однако наилучшие показатели наблюдаются в случае прокладки при скреплении фаз в треугольник.

На рис. 5 показан график зависимости коэффициента затухания экрана от расстояния, на котором производились измерения индукции магнитного поля. Видно, что наилучшие результаты показывает кривая, относящаяся к токовой нагрузке 500 А; данный результат вполне ожидаем, поскольку компьютерное моделирование и эксперимент были ориентированы именно под данное значение силы тока. В то же время можно наблюдать ухудшение экранирующих показателей при симметричных токовых нагрузках 600 и 700 А, что логично объясняется отклонением от значения тока 500 А (для которого проводилась оптимизация).

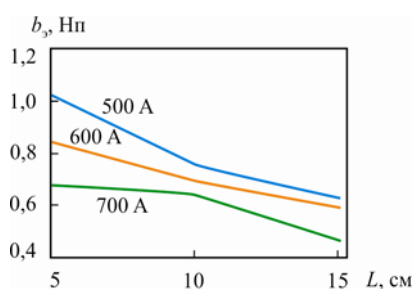


Рис. 5. Зависимость коэффициента затухания экрана b , от расстояния, на котором производили измерения индукции магнитного поля при прокладке кабельной линии треугольником встык

Итак, весьма значимым является факт изготовления макета (опытного образца) магнитного концентратора для реальной симметрично нагруженной кабельной линии с действующим значением тока 500 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы свидетельствуют об актуальности и перспективности применения магнитных экранов из лент аморфных сплавов для изготовления концентраторов магнитного поля. Важными моментами являются:

- технические параметры данных сплавов сохраняют свои магнитные свойства при деформациях;
- требуемые магнитные характеристики могут быть подобраны под конкретные цели путем применения определенного режима термической обработки исходного сырья.
- оптимизированная конструкция магнитных экранов (многослойность, подбор материала для каждого слоя, разделение слоев и геометрические размеры воздушного зазора в экране) позволяет снижать напряженность магнитного поля в определенной области пространства вблизи кабельной линии на 50% и более, что подтвердилось расчетом и экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barnes F., Greenenbaum B. Some effects of weak magnetic fields on biological systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates // IEEE Power Electronics Magazine. – 2016. – V. 3, Is. 1. – P. 60–68.
2. Canova A., Freschi F., Repetto M. Identification of power frequency industrial magnetic field sources for shielding purposes // Industry Applications Conference 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE, 2004.
3. Кузнецов П. А. Создание эффективных систем электромагнитной защиты на основе магнитомягких аморфных и нанокристаллических сплавов Co и Fe // Автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.01. – ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей». – Санкт-Петербург, 2005. – 165 с.
4. Грешняков Г. В., Доронин М. В., Коровкин Н. В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий // Кабели и провода. – 2015. – № 5. – С. 8–13
5. Реутов Ю. Я. Классические магнитные экраны. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 72 с.
6. Cheng A., Yang S., Cao J. Dynamic genetic algorithms for the dynamic load balanced clustering problem in mobile ad hoc networks // Expert Systems with Applications. – 2013. – V. 40, N 4. – P. 1381–1392.
7. Scully T., Brown K. N. Wireless LAN load balancing with genetic algorithms // Knowledge-Based Systems. – 2009. – V. 22, N. 7. – P. 529–534.
8. Коровкин Н. В., Потиненко А. А. Использование генетического алгоритма для решения электротехнических задач // Электричество. – 2002. – № 11.

SLIP-MAGNETIC SCREENS OF SPECIAL DESIGN ASSEMBLED OF AMORPHOUS ALLOYS SHEETS

M. V. DORONIN¹, G. V. GRESHNIAKOV^{1, 2}, PhD (Eng)

¹Peter the Great St Petersburg Polytechnic University, 29, Polytechnicheskaya St, 195251 St Petersburg, Russian Federation

²OOO Research Institute “SEVKABEL”, 40, Liniya Kozhevennaya, 199106, St Petersburg, Russian Federation

E-mail: mviduka@yandex.ru

Received September 8, 2016

Abstract—The paper describes a fundamentally new cable accessory, which is not structural element of the cable. It will be referred to as a slip magnetically shielded screen of special design. The results of the study of the magnetic shielding properties of MAR1-K screen, made from soft magnetic AMAG-172 alloy have been presented. Numerical simulation of shielding effectiveness, depending on the design parameters of the structure (thickness, slip screen position, opening angle) has been carried out. It is shown that unconfined screens can effectively redistribute the magnetic field and to shield the single conductors. Models of slip magnetic screens have been made and tested on the basis of calculations. The results showed a decrease in the magnetic field level more than twice at a current of 500 A. The paper overviews existing materials for shielding, providing foundation for the selected material, as well as optimization of the results of calculations and experiments.

The results of these studies can be useful for specialists in various fields of science and engineering: materials science, electrical engineering, power engineering, medical technologies and others.

Keywords: amorphous soft magnetic alloys, shielding of magnetic field, shielding ratio, shield attenuation ratio, genetic algorithm, magnetic screen MAR-1K, ferromagnetic materials, cable lines..

DOI: 10.22349/1994-6716-2017-89-1-108-114

REFERENCES

1. Barnes, F., Greenbaum, B., Some effects of weak magnetic fields on biological systems: RF fields can change radical concentrations and cancer cell growth rates, *IEEE Power Electronics Magazine*, 2016, V. 3, Issue 1, pp. 60–68.
2. Canova, A., Freschi, F., Repetto, M., Identification of power frequency industrial magnetic field sources for shielding purposes, Industry Applications Conference, 2004, 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE, 2004.
3. Kuznetsov, P. A., Sozdanie effektivnykh sistem elektromagnitnoi zashchity na osnove magnitomiagkih amorfnykh i nanokristallicheskikh splavov Co i Fe [Creating effective electromagnetic protection systems based on amorphous and nanocrystalline soft magnetic Co and Fe alloys]: *The dissertation on scientific degree competition*, FSUE CRISM “Prometey”, St Petersburg, 2005.
4. Greshniakov, G. V., Doronin, M. V., Korovkin, N. V., Kombinirovannye magnitnye ekrany dlia silovykh kabelnykh liniy [Combined magnetic shields for power cable lines], *Kabeli i provoda*, 2015, No 5, pp. 8–13.
5. Reutov, Yu. Ya., *Klassicheskie magnitnye ekrany* [Classic magnetic shields], Ekaterinburg: UrO RAN, 2006.
6. Cheng, A., Yang, S., Cao, J., Dynamic genetic algorithms for the dynamic load balanced clustering problem in mobile ad hoc networks, *Expert Systems with Applications*, 2013, V. 40, No. 4, pp. 1381–1392.
7. Scully, T., Brown, K.N., Wireless LAN load balancing with genetic algorithms, *Knowledge-Based Systems*, 2009, V. 22, No. 7, pp. 529–534.
8. Korovkin, N. V., Potienko, A. A. The use of a genetic algorithm for solving electric engineering problems, *Electrical Technology Russia*, 2002, No 11, pp. 2–15.