

DOI: 10.18721/JEST.230308

УДК 621.315.23

С.Д. Дубицкий¹, Г.В. Грешняков², Н.В. Коровкин³

¹ — ООО «Тор», Санкт-Петербург, Российская Федерация

² — ООО «Севкабель», Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ — Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ПОДЗЕМНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Представлены результаты конечно-элементного моделирования магнитного поля подземной кабельной линии (КЛ) среднего и высокого напряжения. Мультифизический подход к моделированию позволяет оценить эффективность мероприятий по снижению поля и их влияние на температурные режимы работы кабелей. Установлено, что экранирование магнитного поля приводит к нарушению нормального теплового режима работы КЛ и, как следствие, снижению пропускной способности. Исследована эффективность П-образного экрана двухцепной трехфазной кабельной линии. Произведено сравнение различных конструкций экранов двухцепной линии из тонких высококоэрцитивных пленок (однослойных, двуслойных и комбинированных). Особое внимание уделено новым типам экранов — подвижным кольцевым экранам с воздушным зазором из магнитомягких лент для локального снижения уровня магнитного поля. Подробно исследован электромагнитный и температурный эффект таких экранов.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ; КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ; ЭКРАНИРОВАНИЕ; ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭКОЛОГИЯ; МУЛЬТИФИЗИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ; ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ; МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ; МАГНИТОМЯГКИЕ ЛЕНТЫ.

Ссылка при цитировании:

С.Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин. Управление магнитным полем подземной кабельной линии электропередач // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2017. Т. 23. № 3. С. 88–100. DOI: 10.18721/JEST.230308

S.D. Dubitsky¹, G.V. Greshnyakov², N.V. Korovkin³

¹ — Top Ltd, Saint-Peterburg, Russian Federation

² — Research institute «Sevkabel», Saint-Peterburg, Russian Federation

³ — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

MANAGEMENT OF THE MAGNETIC FIELD OF A BURIED CABLE POWER LINE

This paper presents the finite element analysis of the magnetic field of underground power cable lines from medium to high voltage. The main goal is the comparison of various methods of magnetic field management with special attention to its thermal effect and to multiple feeder power lines. The combined electromagnetic and thermal FEA simulation clearly shows that magnetic field minimization is contrary to the cable temperature. The effectiveness of the classical U-shaped magnetic screen made from thin highly permeable alloy is investigated. In addition, the newly proposed tube-formed magnetic screen is thoroughly simulated taking into account both magnetic and thermal effects.

MAGNETIC FIELD MANAGEMENT; CABLE POWER LINE; EMC; MULTIPHYSICS ANALYSIS; FINITE ELEMENT ANALYSIS; SHIELDING; SOFT MAGNETIC FILM.

Citation:

S.D. Dubitsky, G.V. Greshnyakov, N.V. Korovkin, Management of the magnetic field of a buried cable power line, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) 88–100, DOI: 10.18721/JEST.230308

В работе рассматривается задача ограничения внешнего магнитного поля (МП), создаваемого токами подземных кабельных линий среднего и высокого напряжения. Согласно [1] при прокладке высоковольтных кабельных линий экологические проблемы в основном возникают в двух случаях:

1. При прокладке по дну водоемов. В этом случае необходимо избежать влияния МП промышленной частоты на ихтиофауну. Известно [2], что магнитные поля с индукцией, сопоставимой с естественным геомагнитным полем (30–70 мкТл), влияют на поведение рыб, использующих геомагнитное поле, в особенности его вертикальную компоненту, для навигации. Более изучено (и выработаны ограничивающие нормативы) влияние электрического поля и его градиента на состояние ихтиопопуляции. Достоверных сведений о пороговых значениях МП при прокладке подводных линий электропередач найти не удалось.

2. В случае, когда кабельная линия в составе коллективного кабельного сооружения (блок, коллектор) пересекает обитаемые зоны или нуждается в обслуживании. Согласно гигиеническому нормативу «Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях» для населения вне жилых помещений уровень индукции МП не должен превышать 10 мкТл при номинальном токе. Для персонала кабельных, сетевых и иных сооружений учитывается не только величина поля, но и длительность экспозиции.

Механизмы влияния МП промышленной частоты на здоровье людей активно изучаются в основном методами статистического анализа. Специалисты по электромагнитной гигиене отмечают, что нормирование предельно допустимых значений электрического и магнитного полей в различных частотных диапазонах имеет отстающий характер [3], означающий, что приближение уровня поля к предельному значению должно рассматриваться как сигнал опасности, а в проектной практике необходимо стремиться к значительно более низким уровням поля. Некоторые исследователи считают существующие нормативы предельного уровня индукции МП промышленной частоты завышенными [4] и настаивают на постепенном снижении допустимой амплитуды МП до уровня 0,2 мкТл.

Зачастую при совместной прокладке нескольких высоковольтных кабельных линий уложиться в нормативный уровень индукции можно только с использованием специальных конструктивных мероприятий (выбор расстояния между кабелями, глубины прокладки, фазировки соседних линий и др.) [5–7]. Когда этого инструментария оказывается недостаточно, используются локальные или протяженные магнитные экраны, особенности конструкции и расчета которых рассмотрены ниже.

Важное значение имеет анализ температурного эффекта от мер по снижению МП. На этапе предпроектного исследования и проектирования кабельных линий основным методом предсказания внешнего МП и температурного состояния кабелей служит мультифизическое моделирование электромагнитного и температурного полей [8–10]. Современное программное обеспечение позволяет проводить моделирование не только в исследовательском, но и в практическом проектом контексте.

Целью работы является анализ возможностей, пределов и побочных эффектов при экранировании МП силовых кабелей, включая применение П-образных экранов разной конструкции из новейших материалов (аморфные и кристаллические высококоэрцитивные магнитные ленты, подвижные кольцевые экраны (НКЭ) с зазором). Наряду с анализом степени снижения МП, которое и составляет цель управления внешним МП, отдельно рассмотрено влияние экранирования на температуру кабелей.

Метод исследования предполагает сочетание численного моделирования электромагнитного поля системы переменных токов в поперечном сечении кабельной линии и теплового поля в том же сечении [8–10]. Электромагнитный и тепловой расчеты выполняются методом конечных элементов на одной и той же сетке. Данные между моделями передаются из электромагнитной задачи (плотность мощности потерь) в тепловую для расчета температурного поля и из тепловой (температура) для коррекции удельной электропроводности.

Электромагнитная модель сочетает двумерное уравнение электромагнитного поля в частотной области с учетом вихревых токов и насыщения магнитного материала с уравнением

Кирхгофа для присоединенной электрической цепи, описывающей схему заземления экранов и систему питания жил.

Уравнение поля записывается относительно комплексных величин векторного магнитного потенциала \dot{A} , напряжений и токов*:

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\dot{A}\right)=-\frac{\Delta\dot{u}}{I_z}-\gamma j\omega\dot{A}, \quad (1)$$

где μ — магнитная проницаемость; Δu — приложенное к концам участка напряжение; \dot{A} — векторный магнитный потенциал; γ — удельная электропроводность; j — мнимая единица; ω — циклическая частота.

Уравнение Кирхгофа для ветви цепи** , представленной в модели поля своим массивным поперечным сечением S , связывает ток I ветви с напряжением Δu на концах ветви:

$$\dot{I}=\frac{\Delta\dot{u}}{r}-j\omega\int_S\gamma\dot{A}ds. \quad (2)$$

Здесь r — активное сопротивление ветви на постоянном токе.

В результате электромагнитного расчета получают распределение мощности потерь в элементах каждого кабеля и распределение внешнего МП над поверхностью земли, а в результате теплового расчета — распределение температурного поля по сечению кабеля, из которого извлекаются нормируемые величины — температуры токопроводящей жилы и экрана.

Температурная модель представлена двумерным уравнением теплопроводности с граничными условиями конвективного теплообмена [12] на поверхности земли и условием теплоизоляции или изотермическим условием на условной нижней границе расчетной области:

$$\operatorname{div}(\lambda\operatorname{grad}T)=q, \quad (3)$$

где T — температура; q — объемная плотность мощности источника тепла.

Для расчетов используется программа ELCUT [13], разработанная и распространяемая компанией «Тор» (Санкт-Петербург).

* Демирчян К.Г., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. Т. 2. 437 с.

** Демирчян К.Г., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2008. Т. 1. 512 с.

Экранирование подземных кабельных линий

Имеется большое число публикаций по вопросам, связанным с экранированием подземных кабельных линий. Фундаментальный обзор взглядов на управление конфигурацией МП подземных кабельных линий, относящийся к концу 1990-х годов, дан в серии статей [7, 11 и др.], которые, в свою очередь, обобщают серию официальных отчетов EPRI (Electric Power Research Institute, Palo Alto, California) 1990–1993 гг. В качестве параметров для управления полем рассматриваются: режим кабельной линии (величина тока и степень асимметрии фазового баланса); конструкция кабелей и способ заземления; расположение отдельных фаз, особенно в случае многоцепной линии, а также наличие внешних экранирующих элементов — экранов, заземлителей [и др.]. Отмечается отрицательное влияние некоторых мер по снижению внешнего МП на нагрузочную способность линий.

В последние годы появилась возможность применять для экранирования тонкие ленты из магнитомягких аморфных сплавов на основе кобальта и железа [14–17]. Главное их преимущество состоит в том, что они не теряют высокой магнитной проницаемости при неизбежных деформациях. Ленты производятся толщиной 15–30 мкм и шириной до 50 мм [15]. Сложность математического моделирования задачи экранирования такими лентами обусловлена большой разницей характерных геометрических размеров расчетной области: от 15 мкм (толщина ленты) до нескольких метров (ширина кабельного коридора), т. е. отношение характерных размеров достигает 10^5 – 10^6 .

П-образные экраны из тонких магнитных лент

Объектом анализа является магнитное поле двухцепной кабельной линии (рис. 1).

В расчетной области расположены две одинаковые кабельные линии, экранированные одно- или двуслойным экраном из пермаллоевой ленты. В конструкции на рис. 1 использованы два вида пермаллоевой ленты: из сплава 50Н толщиной 0,2 мм и из сплава 79НМ толщиной 0,35 мм [19]. Максимальную индукцию МП на поверхности земли и на высоте человеческого роста необходимо оценить для следующих проектных решений: без экранов, с одним однослойным

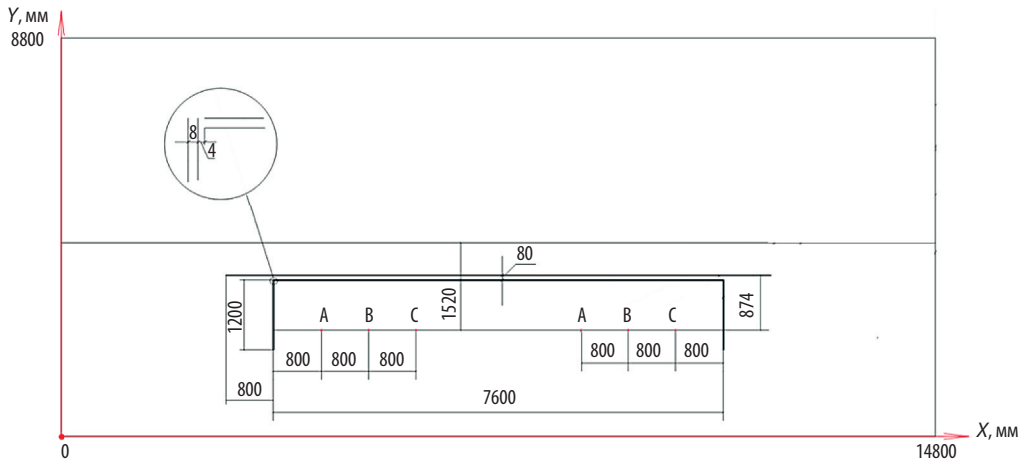


Рис. 1 Эскиз кабельной линии, оснащенной П-образным магнитным экраном из тонких лент

Fig. 1. Two-feeder underground power cable line with U-shaped magnetic shield of thin ferromagnetic strips

экраном (пермаллой 79Н, толщина 0,35 мм), с одним двуслойным экраном (пермаллой 50Н, толщина 0,20 мм каждый) и с двумя экранами (двухслойный и однослойный).

Задачей анализа является оценка степени экранирования конкретной конструкции и выработка методических рекомендаций для будущих расчетов. Методические вопросы моделирования внешнего МП подземной кабельной линии состоят в выяснении следующего: насколько детально следует представлять в модели поперечное сечение кабеля; как без потери точности свести задачу с открытыми границами к пространственно-ограниченной модели; необходимо или нет учитывать электропроводность грунта и т. п. Ответы получены при помощи серии расчетов с варьированием расположения границ расчетной области, различными значениями электропроводности грунта (0 — непроводящий грунт; 0,01 См/м — лессовидный суглинок; 0,1 См/м — сильно увлажненный песок) и с разными геометрическими моделями кабелей. Установлено, что оптимальная ширина расчетной области сопоставима с двойной-тройной шириной кабельной линии, расчетное расстояние под кабелями целесообразно выбирать равным удвоенной глубине залегания. Учет электропроводности грунта в широком диапазоне значений не оказывает ощутимого влияния на профиль внешнего МП. И, наконец, для указанных целей в тех

режимах, когда ток в экране подразумевается малым по сравнению с рабочим током линии, вполне допустимо задавать кабель токонесущей нитью нулевого сечения.

Профиль МП без магнитных экранов на разных высотах над поверхностью земли приведен на рис. 2 слева. На правой стороне рис. 2 приведены профили поля на поверхности земли при использовании трех видов экранов из магнитных лент. Все графики даны для номинальной симметричной токовой нагрузки двухцепной кабельной линии.

Согласно гигиеническому нормативу вне зданий МП оценивается на высоте 0,5, 1,5 и 1,8 м над уровнем земли. Мы, однако, будем сравнивать значения поля на уровне земли, поскольку здесь они достигают максимальных значений и влияние мероприятий по экранированию на поверхности земли проявляется более выпукло.

Проблема разномасштабности состоит в том, что отношение минимального (толщина ленты) и максимального (ширина расчетной области) характерных размеров расчетной области может составлять 1:40000. Соотношение характерных размеров самого мелкого и самого крупного конечного элемента, разумеется, гораздо меньше, однако и оно достигает значительных величин. При этом необходимо принимать специальные меры для достижения необходимого градиента плотности конечных элементов,

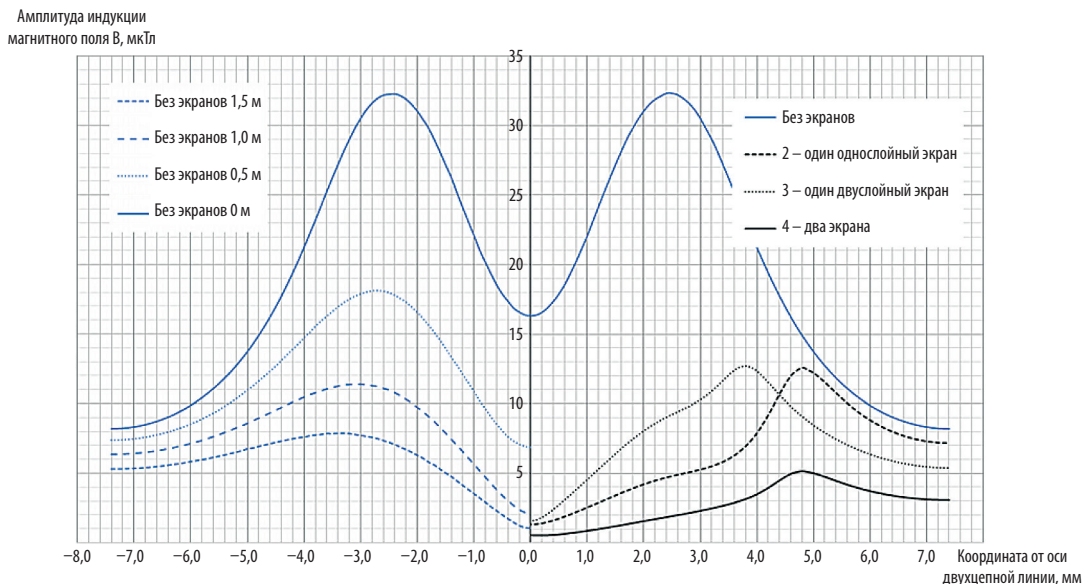


Рис. 2. Внешнее МП кабельной линии на разных высотах над землей без экранирования и с разными экранами

Fig. 2. Magnetic field of the cable line at different heights above the ground with and without shielding

чтобы, с одной стороны, обеспечить достаточную степень дискретизации тонких лент, а с другой, — ограничить общее количество элементов для приемлемой скорости счета.

Опыт показывает, что в слабых полях, где в тонких магнитных экранах практически отсутствуют индуцированные вихревые токи, для достижения приемлемой точности решения достаточно одного слоя треугольных конечных элементов в тонкой магнитной ленте. В этих условиях оказывается возможным построить в ELCUT сетку из 500 тысяч конечных элементов для расчетной области габаритом 9×15 метров с несколькими экранирующими лентами толщиной 0,2 мм. Это дает возможность преодолеть разномасштабность «методом грубой силы», решая задачу в пределах одной модели за приемлемое время.

Результаты расчетов МП при номинальной симметричной токовой нагрузке получены для четырех вариантов: без экранов; с одним однослойным экраном; с одним двухслойным экраном; с двумя экранами, из которых один двухслойный, а второй — однослойный. Цветные картины поля для перечисленных конструкций экрана можно найти на электронном ресурсе [18].

Из графика на рис. 2 видно:

поле двухцепной линии без экранирования превышает гигиенический норматив для открытой местности в населенном пункте;

одиночный экран каждой из конструкций снижает максимальный уровень поля примерно вдвое, а при совместной установке двух экранов уровень поля становится более равномерным, и снижается еще в 2,5 раза.

Отдельный интерес представляет вопрос о том, насколько ухудшают магнитное экранирование неизбежные монтажные зазоры между горизонтальной и вертикальной частями П-образного экрана. В обсуждаемой конструкции ширина зазора составляет 4 мм. Картина МП в зоне стыка представлена на ресурсе [18]. Ее рассмотрение показывает, что влияние воздушного зазора на распределение МП заметно вблизи зазора на расстояниях до 20 мм от него, но оно не сказывается существенно на снижении МП на поверхности земли, то есть на расстоянии около 500 мм от зоны зазора.

Итогом данной серии численных экспериментов стала оценка эффективности ленточных высококоэрцитивных экранов плоской и П-образной конструкции, а также эффективность одновременного использования двух экранов.

Кольцевые подвижные экраны (КНЭ) с воздушным зазором

Кольцевым будем называть экран из тонкостенного магнитного листа или ленты, который расположен близко к кабелю, охватывая его полностью или частично. В том случае, когда подвижной экран (КНЭ), охватывающий одножильный кабель, замкнут, он не оказывает никакого влияния на МП, создаваемое током, протекающим по его оси. Полезность КНЭ с зазором состоит в том, что он перераспределяет (концентрирует) МП в окружающем пространстве [20, 21].

Рассмотрим КНЭ (рис. 3) с углом раскрытия зазора 60° из конструкционной стали толщиной 1 мм, расположенный вокруг внешней оболочки кабеля.

На данном этапе не рассматривается влияние соседних фазных кабелей. Насыщение ферромагнитного материала учитывается приближенно. Для каждого конечного элемента итеративно подбирается постоянное значение магнитной проницаемости таким образом, чтобы средняя за период энергия МП в этом элементе была рав-

на соответствующему значению энергии с учетом реальной кривой намагничивания при синусоидальном поле B и несинусоидальном поле H . Практическая реализация этого подхода состоит в том, что программа ELCUT заранее производит пересчет основной кривой намагничивания материала $B(H)$ с учетом вышеизложенного правила. Описанный подход удобен тем, что пересчитанная кривая намагничивания материала $B_{AC}(H)$ не зависит от частоты.

Расчетная модель задачи для исследования КНЭ содержит поперечное сечение кабеля, надвинутый на него экран и область окружающего пространства вокруг кабеля, достаточно большую для того, чтобы поле на ее границе можно было считать равным нулю.

На графике рис. 4 представлено распределение МП в радиальном направлении вне кабеля в сторону зазора (кривая 3, «вправо») и в сторону, противоположную зазору, (кривая 4, «влево»). Для сравнения представлены соответствующие кривые без магнитного экрана 1 и со сплошным КНЭ без зазора 2, которые в соответствии с теорией полностью совпадают.

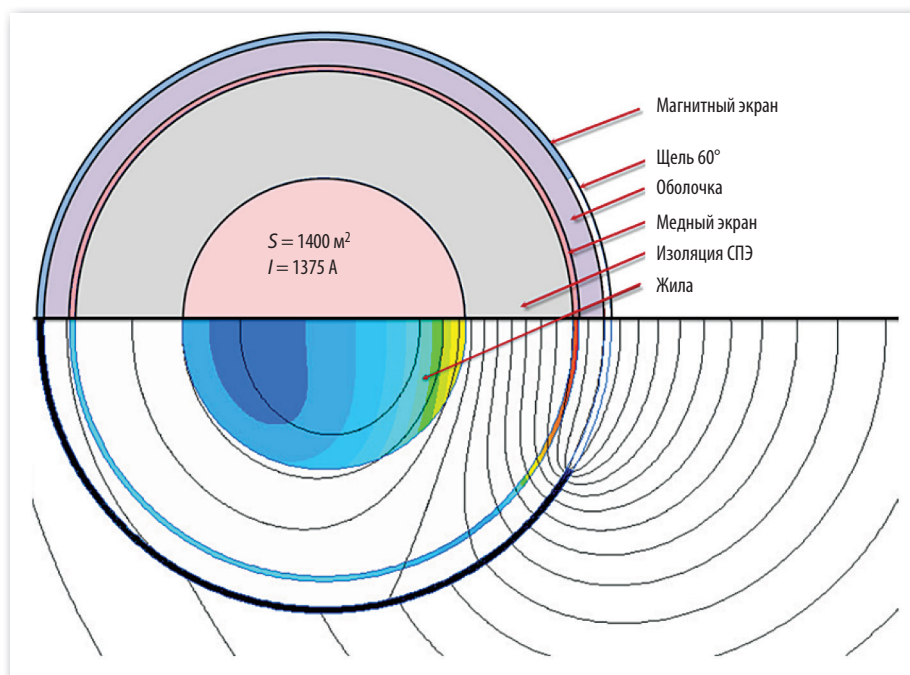


Рис. 3. Расположение КНЭ вокруг кабеля (вверху) и картина МП при номинальной нагрузке (внизу)

Fig. 3. Schematic layout of ring-shaped sliding shield (above), and the magnetic field pattern around the shielded cable (below) by rated current

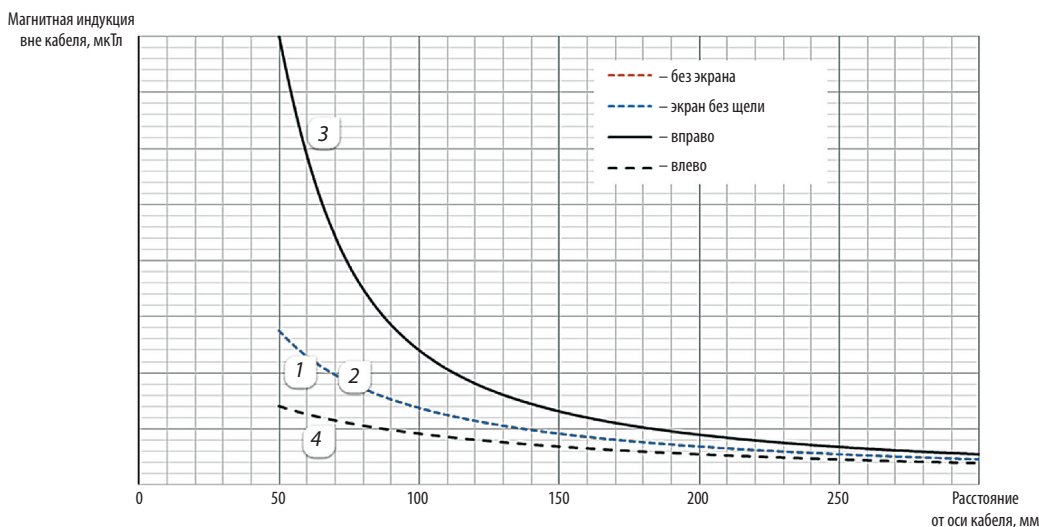


Рис. 4. Влияние стального экрана с зазором на внешнее МП одиночного кабеля

Fig. 4. Effect of steel ring-shaped shield on the external magnetic field of a single cable

Из графика видно, что экранирующее действие КНЭ с зазором состоит в перераспределении МП, которое графически представлено разницей между кривыми 4 (максимально ослабленное поле) и 3 (увеличенное поле). Этот простой численный эксперимент демонстрирует следующие закономерности:

1. Перераспределение поля заметно на близких расстояниях от кабеля ($d < (2-3)R_{\text{каб}}$) и практически полностью исчезает на расстоянии $5R_{\text{каб}}$;

2. Двукратное ослабление поля со стороны, противоположной зазору, достигается ценой 3–4 кратного увеличения поля со стороны зазора.

3. Перераспределение поля происходит не только во внешней области, но и внутри кабеля, что влечет увеличение потерь в токопроводящей жиле и медном экране.

Магнитный экран оказывает воздействие на поле благодаря двум разным механизмам: концентрации магнитного потока из-за высокой магнитной проницаемости и наведенных в проводящем слое вихревых токов. Исследование влияния этих факторов по отдельности показывает, что снижение электрической проводимости стали в 100 раз (строка 4 таблицы) практически не влияет на распределение поля и потери,

в то время как отключение повышенной магнитной проницаемости магнитного экрана (строка 5 таблицы) дает картину поля, неотличимую от неэкранированного кабеля. Из этого сопоставления понятно, что причиной повышения потерь является тот же фактор, который вызывает эффект снижения МП — концентрация магнитного потока в разомкнутом экране.

Рассмотрим подробнее влияние незамкнутого КНЭ на потери в элементах кабеля. На рис. 3 (снизу) показана картина поля (плотность тока и магнитные силовые линии) вокруг кабеля с КНЭ при номинальном токе.

Расчет МП на переменном токе позволяет сравнить потери на вихревые токи при различных способах экранирования и без них. В таблице сравниваются погонные потери в проводящих элементах кабеля без магнитного экрана, с КНЭ без зазора и с КНЭ при угле раскрытия зазора 60° .

Данные таблицы поясняют, что причины повышения потерь следует искать в характере перераспределения поля, вызванного асимметричным экраном. Поскольку более чем двукратное повышение погонных потерь из-за применения экрана в большинстве случаев неприемлемо, необходимо оценить причины их повышения.

Влияние магнитного экрана на потери в кабеле
Effect of magnetic shield on the cable Ohmic loss

Номер варианта	Вариант	Погонные омические потери, Вт/км			
		в жиле	в медном экране	в стальном экране	Всего
1	Без магнитного экрана	31 519	3,1	0	31 522
2	Сплошной экран без зазора	33 595	3,2	24 902	58 500
3	Экран с зазором 60°	40 091	24 729	14 664	79 484
4	То же, непроводящий	40 179	24 937	147	65 263
5	То же, немагнитный	31 519	3,2	0,5	31 523

Влияние КНЭ на температуру кабеля

Дополнительные потери, вызванные КНЭ с зазором, оказывают влияние на температуру элементов кабеля. Оценим это влияние путем численного моделирования температурного поля, источником которого являются потери, чье распределение обсуждалось выше. КНЭ предназначены для локального уменьшения МП с одной стороны от кабеля при неизбежном увеличении внешнего МП с противоположной стороны. Протяженность зоны, где требуется снижение МП, невелика по сравнению с длиной кабеля. Учитывая высокую теплопроводность проводящих элементов в осевом направлении, можно ожидать, что локальный перегрев, вызванный КНЭ, быстро затухает при движении в осевом направлении от экрана. Задача расчета температурного поля кабеля, оснащенного КНЭ, имеет трехмерную геометрию. Тем не менее, адекватные выводы о влиянии КНЭ на температурный режим работы кабеля можно получить путем двумерного моделирования поля, рассматривая три сечения: 1 — поперечное сечение кабеля с экраном; 2 — поперечное сечение кабеля без экрана; 3 — продольное сечение кабеля, которое содержит зону с экраном и достаточно протяженную зону без экрана.

Первые два расчета дают предельные картины температурного поля: максимально нагретую дополнительными потерями; полностью свободную от дополнительных потерь. Третья задача, рассматривающая продольное сечение кабеля, позволит оценить, насколько температурное возмущение от экрана распространяется на неэкранированные участки кабеля.

КНЭ в большинстве случаев используются при воздушной прокладке кабелей, когда теплоотвод с их поверхности осуществляется радиационным и конвективным путем. Оценка граничных условий теплообмена с поверхности кабеля в условиях естественной конвекции на практике выполняется путем использования эмпирических критериальных уравнений, основанных на экспериментальных данных. Для оценки естественной конвекции с поверхности горизонтального цилиндра мы опирались на методику и табличные данные работы [12].

Конвективный тепловой поток описывается эмпирическим законом Ньютона—Рихмана:

$$F_{conv} = \alpha_c (T_{cab} - T_a),$$

где α_c — коэффициент конвекции; $(T_{cab} - T_a)$ — разность температур между оболочкой кабеля и прилегающим слоем воздуха.

Тепловой поток радиационного теплообмена описывается законом Стефана — Больцмана:

$$F_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{cab}^4 - T_a^4) = \frac{\varepsilon \sigma (T_{cab}^4 - T_a^4)}{T_{cab} - T_a} (T_{cab} - T_a) = \alpha_{rad} (T_{cab} - T_a),$$

где ε — безразмерный коэффициент черноты поверхности кабеля в диапазоне 0–1; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) — постоянная Стефана — Больцмана. Записав условие радиационного теплообмена в такой форме, мы избегаем решения нелинейной задачи, где в граничное условие входит четвертая степень температуры,

и получаем возможность простого сопоставления радиационного и конвективного тепловых потоков путем сравнения коэффициентов α_c и α_{rad} .

Характер конвективного течения газа вблизи нагретого кабеля определяется значением произведения безразмерных критериев Грассгофа и Прандтля: $Pr = 0,696$; $Gr = 15,22$; их произведение $Gr \cdot Pr = 10,6$. Это означает, что конвекция имеет ламинарный характер, и ее вклад в общий теплообмен относительно мал. Для этих условий средний коэффициент конвективного теплообмена вычисляется как $\alpha_c = Nu \cdot \lambda / D_{cab} = 0,32 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$.

Сопоставляя значения коэффициентов конвективного $\alpha_c = 0,32$ и радиационного $\alpha_{rad} = 9,21$ теплообмена, видим, что в соответствии с предварительной оценкой радиационный теплообмен оказывает значительно большее влияние, чем конвекция. Суммарный коэффициент теплообмена для расчетов теплоотдачи с поверхности нагретого кабеля в окружающий воздух составляет

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r = 9,53 \frac{\text{Вт}}{\text{К} \cdot \text{м}^2}.$$

Задавшись найденными выше условиями теплообмена, получим температурное поле, показанное на рис. 5 для кабеля без магнитного экрана (*a*, внизу) и с экраном (*a*, сверху).

Средняя температура жилы без экрана составляет 89°C ; в присутствии магнитного экрана с раскрытием зазора 60° она повышается на 23°C до 112°C .

Теперь обратимся к другому двумерному приближению трехмерной задачи теплообмена — для продольного сечения (рис. 5, *б*, вверху). В силу условий симметрии достаточно рассмотреть четверть задачи. Левая граница расчетной области проходит посередине экрана с граничным условием нулевого нормального теплового потока в силу симметрии. Правая граница расчетной области формально бесконечно удалена. Практически достаточно удалить границу на такое расстояние от края экрана, чтобы его тепловое влияние не ощущалось. Это расстояние определяется путем серии численных экспериментов при разном положении условной правой границы с естественным граничным условием.

В токопроводящих областях продольной модели и в магнитном экране задается средняя плотность мощности источника тепла, полученная в электромагнитном расчете. С учетом того, что в продольном сечении магнитный экран виден как цилиндрический (зазором пренебречь), плотность мощности тепловыделения следует уменьшить пропорционально увеличению объема экрана, чтобы суммарная мощность источника тепла была одинакова в продольном и поперечном сечении.

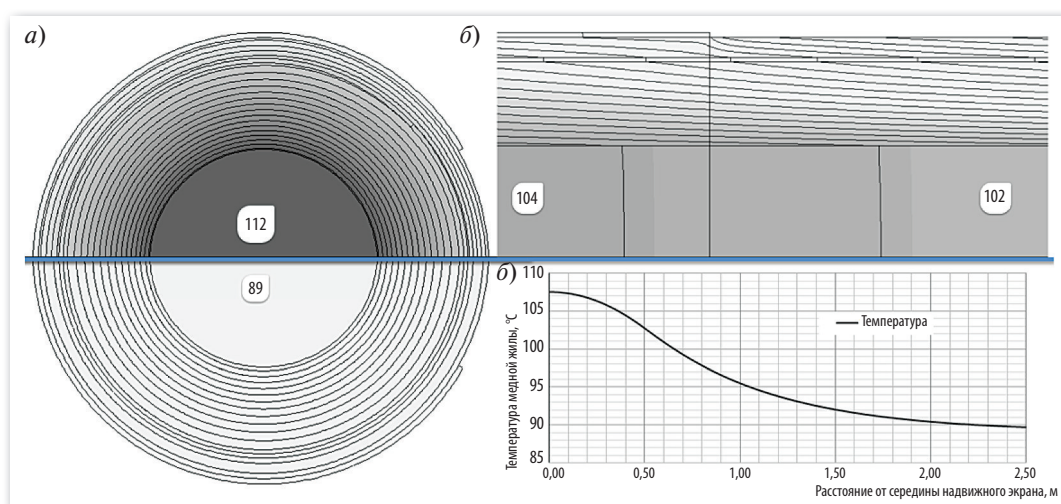


Рис. 5. Температурное поле кабеля без экрана (*a*, внизу) и с КНЭ с зазором (*a*, сверху) (изотермы проведены через 1°C) и температурный профиль в продольном сечении (*б*)

Рис. 5. Temperature distribution in the shielded (*a*, above) and unshielded (*a*, below) cable cross-section. On the right side — the temperature profile in the longitudinal cable cross-section (*б*)

Рассчитанная картина теплового поля в продольном сечении в зоне окончания КНЭ показана на рис. 5, б, вверху, а на рис. 5, б, внизу приведен график температуры поверхности токопроводящей жилы в зависимости от расстояния до условной удаленной границы от центра экрана. Длина половины экранированного участка кабеля составляет 500 мм от левой границы расчетной области. В центре экранированного участка температура жилы на 18 °С выше, чем вне магнитного экрана. Температурное возмущение жилы, вызванное экраном, спадает до 2 °С на расстоянии 1 м от края экрана и практически до нуля на расстоянии 2 м.

Таким образом, для успешного применения КНЭ с воздушным зазором токовая нагрузка кабеля должна быть снижена, чтобы температура жилы без экрана не превышала 70 °С. При планировании расстояния между соседними экранами, размещенными на одном и том же кабеле, следует учитывать, что температурное возмущение, вызванное экраном, распространяется на 1–3 м от его края в направлении оси кабеля.

Отметим, что максимальная температура кабеля при наличии экрана в модели поперечного сечения составляет 112 °С, а в модели продольного сечения — 108 °С. При этом в обеих моделях температура кабеля без экрана одинакова и равна 90 °С. Равенство температур невозмущенных участков в обеих моделях служит дополнительным подтверждением корректности постановки задачи. В то же время с достаточной уверенностью можно заключить, что более высокая температура экранированного участка в поперечной модели связана с тем, что эта модель предполагает бесконечную осевую длину экрана и тем самым является теоретически максимальным значением для экранов любой длины. Напротив, в модели продольного сечения выбрана конкретная длина экранированного

участка, равная 1 м. При более коротких экранах максимальная температура будет меньше, при более длинных — несколько больше, но никогда не превысит 112 °С.

Заключение

Предложена методика и проведено мультифизическое моделирование внешнего МП и температурного режима одноцепной и двухцепной подземных кабельных линий. Показано, что численное моделирование экранов из тонких ферромагнитных лент на одной конечно-элементной модели принципиально осуществимо и дает практически важные результаты, несмотря на проблему разномасштабности. В частности, оно позволяет сравнить разные конструктивные варианты экранов, оптимизировать конструкцию и расход дорогостоящих магнитомягких лент.

Для локального снижения МП путем его перераспределения могут применяться кольцевые надвижные экраны (КНЭ) из магнитомягких аморфных лент с воздушным зазором. Показано, что применение экрана повышает температуру токопроводящей жилы. Численные эксперименты выявили, что причиной повышения температуры является перераспределение МП и плотности вихревых токов по сечению жилы и экрана. Расчет температурного поля в продольном сечении кабеля показывает, что температура жилы достигает 108 °С при длине экрана 1 м и затухает на расстоянии 0,7–1,0 м от края экрана. При более коротких экранах максимальная температура будет меньше, при более длинных — несколько больше, но никогда не превысит 112 °С. Поэтому анализ эффективности экранирования МП должен включать в себя не только расчет МП, но и изменившегося теплового режима.

Приведенные в статье результаты получены впервые.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров Ю.А. Системный подход к проектированию воздушных и кабельных ЛЭП среднего и высокого напряжения // 3-я Росс. конф. ЛЭП 2008, [электронный ресурс] URL:<http://www.elsi.ru/upload/medialibrary/3e0/3e06891444b0e3f564a5dd46191fdaf9.pdf> (дата обращения 28.09.2016).
2. Крылов В.В., Изюмов Ю.Г., Извеков Е.И., Непомнящих В.А. Магнитное поле и поведение рыб // Журнал общей биологии. 2013. 74. № 5. С. 354–365.
3. Никитина В.Н. Современное состояние проблемы защиты от электромагнитных полей // Сб. докладов 9-й Российской научн-техн. конференции

по Электромагнитной совместимости, ЭМС-2006. СПб. С. 34–39.

4. **Семенов А.В.** Обоснование предельно допустимых норм на индукцию магнитных полей промышленной частоты для человека // Известия Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 1. С. 197–200.

5. **Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю.** Ограничение уровней напряженности МП, создаваемого кабельной линией электропередачи // Энергетик. 2008. № 8. С. 31–35.

6. **Рябченко В.Н., Рубцова Н.Б., Зимин К.А., Абдурахманов А.М., Токарский А.Ю.** Магнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи: нормирование, расчет, проектирование // Безопасность в техносфере. 2014. Т. 3. № 2. С. 52–63. DOI:10.12737/3672. /ООО «НИЦ Инфра-М».

7. **Dawoud M.M. [et al.]**. Magnetic field management techniques in transmission underground cables // Electric power systems research. 1999. Т. 48. № 3. С. 177–192.

8. **Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалев Г.Г., Коровкин Н.В.** Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов // Кабели и провода. 2013. № 3(340). С. 15–21.

9. **Korovkin N., Greshnyakov G., Dubitsky S.** Multi-physics approach to the boundary problems of power engineering and their application to the analysis of load-carrying capacity of power cable line // Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ), 2014. IEEE, 2014. P. 341–346.

10. **Dubitsky S., Greshnyakov G., Korovkin N.** Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multi-physics FEA Simulation // International Journal of Energy. 2015. Vol. 9. P. 12–19.

11. **Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O.** Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables // Electric power systems research. 1999. Т. 48., № 3. С. 193–209.

12. **Струпинский М.Л., Хренков Н.Н., Кувалдин А.Б.** Проектирование и эксплуатация систем электрического обогрева в нефтегазовой отрасли. М.: Инфра-Инженерия, 2015. 261 с.

13. ELCUT®. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных

элементов. Версия 6.2: Руководство пользователя / СПб., ООО «Тор», 2016. [Электронный ресурс] URL: http://elcut.ru/free_doc_r.htm (дата обращения 28.09.2016).

14. **Маннинен С.А., Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В.** Экранирование подземных кабельных линий для обеспечения электромагнитной экологии // Конференция ЭМС-2003. http://www.crisim-prometey.ru/Rus/Commercial/PDF/conf_EMS-2003.pdf

15. **Гудошников С.А., Гребенщиков Ю.Б., Волков В.Т., Прохорова Ю.В.** Магнитные и экранирующие свойства ленточных аморфных ферромагн. материалов // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 19. С. 42–50.

16. **Сурма С.В., Кузнецов П.А., Васильева О.В.** Использование аморфных магнитомягких материалов для защиты биологических объектов от воздействия слабых магнитных полей // Материаловедение. 2009. № 4(145). С. 52–59.

17. Экранирование магнитного поля 50 Гц кабельных линий и распределительных подстанций материалами на основе сплавов с аморфной и нанокристаллической структурой / Кузнецов П.А., Аскинази А.Ю., Фармаковский Б.В. [и др.]. // Ежегодник Рос. нац. комитета по защите от неионизирующих излучений 2004–2005: сб. тр. М.: АЛЛАНА, 2006. С. 142–150.

18. Магнитное поле подземных кабельных линий [Электронный ресурс.] URL: http://elcut.ru/publications/underground_cable_field.htm (дата обращения 01.09.2016).

19. **Грешняков Г.В., Ковалев Г.Г., Коровкин Н.В., Дубицкий С.Д.** Полевые методы в кабельных задачах // Сб.: Использование комп. мод. и численных расчетов для решения инженерных задач в различных областях проектирования и разработки на основе применения программы ELCUT. СПб.: Изд-во «Любавич», 2015. С. 5–74.

20. **Грешняков Г.В., Доронин М.В., Коровкин Н.В.** Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий // Кабели и провода. 2015. № 5. С. 8–13.

21. **Доронин М.В., Грешняков Г.В., Коровкин Н.В.** Магнитные экраны специальной конструкции // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 118–127. DOI: 10.18721/JEST.230112.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ДУБИЦКИЙ Семен Давидович — ООО «Тор». E-mail: sdubitsky@gmail.com

ГРЕШНЯКОВ Георгий Викторович — кандидат технических наук, ООО НИИ «Севкабель». E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

КОРОВКИН Николай Владимирович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

REFERENCES

1. **Lavrov Yu.A.** Sistemnyy podkhod k proyektirovaniyu vozduzhnykh i kabelnykh LEP srednego i vysokogo napryazheniya. *3-ya Ross. konf. LEP 2008*. [Elektronnyy resurs]. URL: <http://www.elsi.ru/upload/medialibrary/3e0/3e06891444b0e3f564a5dd46191fdaf9.pdf> (data obrashcheniya 28.09.2016). (rus.)
2. **Krylov V.V., Izyumov Yu.G., Izvekov Ye.I., Nepomnyashchikh V.A.** Magnitniye palia i povedeniye ryb. *Zhurnal obshch. biologii*. 2013. 74. № 5. S. 354–365. (rus.)
3. **Nikitina V.N.** Sovremennoye sostoyaniye problemy zashchity ot elektromagnitnykh poley. *Sb. dokladov 9-y Rossiyской nauchn.-tekhn. konferentsii po EMS, EMS-2006*. SPb. S. 34–39. (rus.)
4. **Semenov A.V.** Obosnovaniye predelno dopustimyykh norm na induktsiyu magnitnykh poley promyshlennoy chastoty dlya cheloveka. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2012. T. 321. № 1. S. 197–200. (rus.)
5. **Misrikhanov M.Sh., Rubtsova N.B., Tokarskiy A.Yu.** Ogranicheniye urovney napryazhennosti MP, sozdavayemogo kabelnoy liniyey elektroperedachi. *Energetik*. 2008. № 8. S. 31–35. (rus.)
6. **Riabchenko V.N., Rubtsova N.B., Zimin K.A., Abdurakhmanov A.M., Tokarskiy A. Yu.** Magnitniye polya vozduzhnykh i kabelnykh liniy elektroperedachi: normirovaniye, raschet, proektirovaniye [Overhead and underground power lines magnetic fields: rationing, calculation, design]. *Bezopasnoat' v tekhnosferie*. 2014. T. 3. № 2. S. 52–63. DOI:10.12737/3672./OOO «NITS Infra-M».
7. **Dawoud M.M. [et al.]**. Magnetic field management techniques in transmission underground cables. *Electric power systems research*. 1999. T. 48. № 3. S. 177–192. (rus.)
8. **Greshnyakov G.V., Dubitskiy S.D., Kovalev G.G., Korovkin N.V.** Elektromagnitnyy i teplovoy raschet tokovoy nagruzki kabelnoy sistemy metodom konechnykh elementov. *Kabeli i provoda*. 2013. № 3(340). S. 15–21. (rus.)
9. **Korovkin N., Greshnyakov G., Dubitskiy S.** Multi-physics approach to the boundary problems of power engineering and their application to the analysis of load-carrying capacity of power cable line. *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ)*. 2014. IEEE. 2014. S. 341–346.
10. **Dubitskiy S., Greshnyakov G., Korovkin N.** Refinement of Underground Power Cable Ampacity by Multi-physics FEA Simulation. *International Journal of Energy*. 2015. Vol. 9. P. 12–19.
11. **Farag A.S., Dawoud M.M., Habiballah I.O.** Implementation of shielding principles for magnetic field management of power cables. *Electric power systems research*. 1999. T. 48. № 3. S. 193–209.
12. **Strupinskiy M.L., Khrenkov N.N., Kuvaldin A.B.** Proyektirovaniye i ekspluatatsiya sistem elektricheskogo obogreva v neftegazovoy otrasli. M.: Infra-Inzheneriya, 2015. 261 s. (rus.)
13. **ELCUT®**. Modelirovaniye electromagnitnykh, teplovykh i uprugih poley metodom konechnykh elementov [ELCUT. Finite Element simulation of electromagnetic, thermal and structured fields. Verion 6.2. User's Guide]. St. Petersburg: Tor, Ltd, 2016 [online resource]. URL: http://elcut.ru/free_doc_r.htm (checkind date 28.09.2016).
14. **Manninen S.A., Kuznetsov P.A., Farmakovskiy B.V.** Ekranirovaniye podzemnykh kabelnykh liniy dlya obespecheniya elektromagnitnoy ekologii. *Konferentsiya EMS-2003* [elektronnyy resurs]. URL: http://www.crim-prometey.ru/Rus/Commercial/PDF/conf_EMS-2003.pdf (data obrashcheniya 28.09.2016).
15. **Gudoshnikov S.A., Grebenshchikov Yu.B., Volkov V.T., Prokhorova Yu.V.** Magnitnyye i ekraniruyushchiye svoystva lentochnykh amorfnykh ferromagn. materialov. *Pisma v ZhTF*. 2014. T. 40, Vyp. 19. S. 42–50.
16. **Surma S.V., Kuznetsov P.A., Vasilyeva O.V.** Ispolzovaniye amorfnykh magnitomyagkikh materialov dlya zashchity biologicheskikh obyektov ot vozdeystviya slabykh magnitnykh poley. *Materialovedeniye*. 2009. № 4(145). S. 52–59.
17. **Kuznetsov P.A., Askinazi A.Yu., Farmakovskiy B.V. [i dr.]**. Ekranirovaniye magnitnogo polia 50 Gts kabelnykh liniy i raspredelitelnykh podstantsiy materialami na osnove splavov s amorfnoy i nanokristallicheskoй strukturoy. *Yezhegodnik Ros. nats. komiteta po zashchite ot neioniziruyushchikh izlucheniye 2004–2005: sb. tr.* M.: ALLANA, 2006. S. 142–150.
18. Magnitnoye pole podzemnykh kabelnykh liniy [elektronnyy resurs]. URL: http://elcut.ru/publications/underground_cable_field.htm (data obrashcheniya 01.09.2016). (rus.)
19. **Greshnyakov G.V., Kovalev G.G., Korovkin N.V., Dubitskiy S.D.** Polevye metody v kabelnykh zadachakh. Sb.: *Ispolzovaniye komp. mod. i chislennykh raschetov dlya resheniya inzhenernykh zadach v razlichnykh oblastyakh proyektirovaniya i razrabotki na osnove primeneniya programmy ELCUT*. SPb.: Izd-vo «Lyubavich». 2015. S. 5–74. (rus.)
20. **Greshnyakov G.V., Doronin M.V., Korovkin N.V.** Kombinirovannyye magnitnyye ekrany dlya silovykh kabelnykh liniy. *Kabeli i provoda*. № 5. 2015. S. 8–13. (rus.)
23. **Doronin M.V., Greshnyakov G.V., Korovkin N.V.** Magnitnyye ekrany special'noy konstrukcii [Magnetic shields special design]. *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (1) (2017) 124–133, DOI: 10.18721/JEST.230112. (rus.)

AUTHORS

DUBITSKY Semen D. — Tor, Ltd. E-mail: sdubitsky@gmail.com

GRESHNYAKOV Georgiy V. — Research institute «Sevkabel». E-mail: g.greshnyakov@gmail.com

KOROVKIN Nikolai V. — Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: nikolay.korovkin@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 29 мая 2017 г.