

**На правах рукописи**

*Доронин Михаил Владимирович*

**Разработка и исследование действия подвижных экранов  
для локального снижения магнитного поля кабельных  
линий**

Специальность: 05.09.05 «Теоретическая электротехника»

Научный доклад

Санкт-Петербург – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель:** **Коровкин Николай Владимирович**, д.т.н, профессор, действительный член АЭН РФ, ФГАОУ ВО «Санкт Петербургский Политехнический Университет Петра Великого» (НИУ), Высшая школа высоковольтной энергетики

**Научный консультант:** Грешняков Георгий Викторович, д.т.н., доцент, ФГАОУ ВО «Санкт Петербургский Политехнический Университет Петра Великого» (НИУ), Институт энергетики и транспортных систем, Высшая школа высоковольтной энергетики.

### **Общая характеристика работы.**

Рассматриваются вопросы, связанные с локальным снижением силовых характеристик магнитного поля в пространстве около трехфазных кабельных линий, проложенных группой однофазных кабелей. Обсуждается и предлагается подход для минимизации силовых характеристик магнитного поля, источником которого является кабельная линия, проложенная группой однофазных кабелей в различных вариантах прокладки. Подход заключается в использовании подвижных магнитных экранов специальной конструкции, изготовленный из листов аморфного магнитомягкого сплава. Отличительной особенностью экрана является тот факт, что он является пассивным элементом, надвигается поверх каждой фазы кабельной линии, не является элементом конструкции кабеля. За счет имеющегося у подвижного экрана зазора получается достичь перераспределения поля, где у этого зазора концентрация поля будет максимальная, а в другой области будет наблюдаться снижения характеристик магнитного поля. Применения разработанных экранов позволит решить проблемы электромагнитной совместимости, обеспечить защиту технических и биологических объектов от влияния магнитных полей промышленной частоты, источником которых являются кабельные линии.

Для создания конструкций магнитных экранов был разработан комплекс на базе генетического алгоритма (ГА). Данный комплекс позволяет проводить оптимизацию положения экрана на каждой из фаз, а также угол раскрытия зазора в зависимости от области минимальных значений.

Также по причине наличия на фазах подвижного магнитного концентратора возникает задача определения возможного перегрева кабельного изделия в месте наложения магнитного экрана. Данный перегрев возникает вследствие возникновения вихревых токов в магнитном экране, изменения перераспределения плотности токов, тепловых потерь на перемагничивание и гистерезис, а также плотный контакт материала экрана и нагретой оболочки кабеля. Был проведен тепловой расчет в трехмерной постановке для определения степени данного перегрева.

**Актуальность проблемы.** Потребности современного общества в потреблении электрической энергии требуют все большего применения таких объектов транспортировки электроэнергии, как кабельные линии (КЛ) или воздушные линии электропередач. КЛ активно используются в больших городах, мегаполисах. По причине уже проложенных КЛ, а также большого количества других инженерных систем под землей, возникает проблема слишком близкого расположения технических средств. Далеко не всегда есть возможность в реальных условиях разнести инженерные объекты на достаточные расстояния. Таким образом, происходит влияние технических объектов друг на друга, а также на биологические объекты. В данной работе рассматривается применение современных оптимизационных методов к задаче снижения магнитной характеристики электромагнитного поля кабельных линий.

Проблематика относится к такому классу оптимизационных задач в электротехнике, как обратные задачи. Структурный анализ проектируемого электротехнического устройства должен позволить получить оптимальную конструкцию модели, где изначально задается минимум оптимизируемого функционала. Во время решения оптимизационных задач возникает ряд проблем, которые могут усложнить и тем самым повысить показатель затраченного времени (и в итоге конечную стоимость) разрабатываемого изделия. Функционал, который требуется минимизировать, может иметь большое количество локальных экстремумов, низкую сходимость, большое количество переменных оптимизации. Известные классические методы оптимизации задач в таких условиях теряют свою актуальность. В таком случае уместно использование более современных и проверенных за последние годы эволюционных методов. Одним из таких методов является генетический алгоритм (ГА).

Стоит отметить, что в настоящее время электротехнические устройства, как правило, являются технически сложными изделиями, требующими современного подхода к проектированию. Математическое моделирование создаваемого устройством электромагнитного поля (ЭМП) является важнейшим аспектом при проектировании. Для такого рода исследований используются численные методы расчета ЭМП посредством применения ЭВМ. На сегодняшний день самым распространенным методом для решения подобных задач является метод конечных элементов (МКЭ). Реализованный численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными позволяет получить достаточно точное и верифицируемое решение. Комбинация численного моделирования с эволюционными оптимизационными методами делает задел на создание методики, которую впоследствии можно использовать для проектирования различных сложных электротехнических устройств.

С целью высвобождения территорий мегаполисов воздушные линии электропередач (ЛЭП) все чаще заменяются подземными кабельными линиями. Распространенное сегодня решение позволяет освободить дорогую территорию больших городов, а также поспособствовать улучшению электромагнитной экологии. Одновременно подземные КЛ существенно лучше защищены от природных явлений, вандализма, низких/высоких температур. Однако такой подход порождает другую существенную сложность: под землей образуется большая скученность различных инженерных систем. Одновременно с этим может отсутствовать возможность передвинуть технические устройства. И возникает проблема электромагнитной совместимости между устройствами: взаимное влияние устройств друг на друга может приводить к нежелательному снижению эксплуатационных характеристик пролегающей близко друг к другу техники. Такое может произойти, к примеру, в местах сужения кабельных каналов, близком расположении к КЛ кабелей связи, коммуникаций метрополитана.

Как правило, влияние ЭМП достаточно заметно в близкой локализации от КЛ. Поэтому имеет смысл рассматривать задачу с точки зрения локализации конкретных участков пространства вблизи КЛ. Это безусловно осуществимо путем реализации разработанной методики численного моделирования электрофизических процессов, протекающих в КЛ, а также оптимизации конструкции подвижных магнитных экранов (концентраторов), позволяющих снижать силовые характеристики магнитного поля в заданном участке пространства.

Проблематикой пропускной способности кабельных линий, прогнозированию надежности и наработки кабелей занимались такие ученые, как Пешков И.Б., Шувалов М.Ю., Мещанов Г.И., Ю.И. Ларин, Н.В. Коровкин, Г.В. Грешняков, Э.Т. Ларина В.В. Титков, Г.Г. Середя, С.М. Аполлонский.

Вопросами исследования экранирования магнитных полей промышленной частоты, электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии занимались такие ученые, как: С.М. Аполлонский, П.А. Кузнецов, В.В. Миллера, Г.Г. Ляшко, А.В. Ключев, Ю.Я. Реутов, А.А. Преображенский, А.Ю. Аскинази, Б.В. Фармаковский.

Проблемам численных методов вычислительной математики посвятили свои работы: С.Д. Дубицкий, А.А. Потенко, А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич, Р.В. Хемминг.

Вопросы методологии анализа электромагнитных полей изложены в публикациях В.Л. Чечурина, К.С. Демирчяна, Л.Р. Неймана, А.Г. Калимова, Ю.В. Варламова, Р.П. Кияткина.

Среди публикаций иностранных ученых можно выделить работы F. Freschi, A. Canova, L. Giaccone, M. Repetto, D. Meeker.

**Целью** диссертационной работы является: усовершенствование и модернизация численного метода оптимизации, посредством которого открывается возможность создания конструкций магнитных экранов (концентраторов) специальной конструкции при помощи оптимизационного метода (ГА).

Разработка нового подхода к уменьшению внешних в заданных областях магнитных полей вблизи протяженных токоведущих частей путем создания конструкций магнитных экранов (концентраторов) и оптимизации их конфигурации на основе ГА, а также апробация данного подхода для задач защиты технических и биологических объектов от влияния ЭМП

Цель достигается через решение следующих задач:

- создание магнитных экранов специальной конструкции, которые позволяют перераспределить магнитное поле вокруг КЛ, создаваемого трехфазной кабельной системой (проложенной группой однофазных кабелей);
- анализ и выбор экранирующего материала;
- численное моделирование одно- и трехфазной КЛ;
- доработка эволюционного генетического алгоритма для оптимизации конструкций надвижных магнитных экранов (с зазором);
- проведение эксперимента, сравнение с полученными расчетными данными;
- разработка методики для расчета теплового поля в трехмерной постановке (3д-моделирование связано с неоднородностями в виде надвижных экранов на части длины КЛ);
- оценка влияния ЭМП промышленной частоты на биологические объекты;
- подготовка рекомендаций по дальнейшему применению и развитию описанных методик.

**Методы исследования.** Применялись численные методы решения систем дифференциальных уравнений, основополагающие положения теоретической электротехники, теории электромагнитного экранирования, основные принципы электромагнитной совместимости, основные положения техники высоких напряжений и кабельной техники.

**Объектом исследования** являются надвижные магнитные концентраторы поля для КЛ среднего и высокого напряжения, их математические модели, методы оптимизации, испытания, обработка данных расчетов и эксперимента.

**Предметом исследования** является распределение магнитной составляющей электромагнитного поля вблизи кабельной линии, тепловые поля.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

представлен пример эффективного использования ГА для решения оптимизационной задачи подбора конструкции из условий минимума внешнего магнитного поля вблизи КЛ, источником которого является КЛ;

Теоретически и экспериментально обоснована целесообразность использования магнитных экранов для перераспределения магнитного поля вблизи КЛ с целью его снижения в заданной области пространства;

выполнен тепловой расчет стационарного режима работы КЛ с надвижным магнитным экраном в трехмерной постановке.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в:

- разработке и усовершенствовании на базе ГА оптимизационных методик, целью которых является нахождения оптимальной конструкции магнитных экранов для трехфазных КЛ, удовлетворяющим требованиям по ЭМС и электромагнитной экологии;
- расширение применения численных методов анализа магнитного поля переменных токов в двумерной и трехмерной постановке;
- подтверждение соответствия проведенных расчетов экспериментальным результатам;
- возможность доработки существующей методики под вновь возникающие задачи.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях, в том числе на 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), MATEC Web of Conferences 245 в 2018 году (Санкт-Петербург), «Вклад молодых ученых Санкт-Петербурга в развитие промышленности» (2017, Санкт-Петербург, Секция электромеханики и автоматики имени профессора В.И. Полонского – Дом ученых им. М. Горького Российской академии наук), XV международная конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» (2016, Санкт -Петербург), Международная конференция, посвященная 150-летию со дня рождения Михаила Андреевича Шателена в 2016 году в Санкт – Петербурге.

**Личный вклад автора.**

Разработка оптимизационной методики на базе ГА.

Расчет оптимальных конструкций магнитных концентраторов поля; изготовление макетов по результатам расчета.

Обоснование разработанных моделей посредством участия в экспериментальных исследованиях.

Обобщение научных положений, выводы, рекомендации.

**Публикации.** Главные тезисы и результаты диссертационной работы опубликованы в печатных работах:

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

Доронин М.В., Грешняков Г.В. Надвижные магнитные экраны специальной конструкции, собранные из листов аморфных магнитомягких сплавов. // Вопросы материаловедения. -2017.-№1. С. 108-114.

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

Doronin M., Greshnyakov G., Korovkin N. Modes of operation and design features of pulse cables for the ITER project. MATEC Web of Conferences 245, 13001 (2018).

Mikhail V. Doronin, George V. Greshnyakov. Magnetic Concentrators for Reducing the Magnetic Field around Power Cable Line. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2019. pp. 848-851.

Доронин М.В. Применение метода генетических алгоритмов для практических расчетов магнитных экранов специальной конструкции. // Развитие технических наук в современном мире, / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Г. Воронеж, 2015. - №2. С.183-186.

М.В. Доронин. Магнитные экраны специальной конструкции для однофазных групп силовых кабелей. // Международная конференция, посвященная 150-летию Михаила Андреевича Шателена: материалы конференции: сб.тр. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. – 2016 – С.14-17.

Грешняков Г.В., Доронин М.В. Магнитные концентраторы специальной конструкции. Оптимизация конструктивных особенностей концентратора поля с помощью применения генетического алгоритма/ Г.В. Грешняков, М.В. Доронин // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы VII международной научно-практической конференции. – North Charleston, USA, 2015. – Том 2. –С. 80-84.

Грешняков Г.В., Доронин М.В., Селезнев Д.А. К вопросу о расчете теплового режима силового импульсного кабеля// Fundamental and applied sciences today II.-2013.-Vol1.-С. 118-120.

Доронин М.В., Селезнев Д.А. Численный расчет электромагнитного и теплового поля силового импульсного кабеля// Научно-исследовательский и инновационный потенциал молодежи. -2013.-Часть I.- С. 178-182

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа представлена в двух томах: первый том – основная часть изложена на 125 страницах текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 112 наименований, содержит 60 рисунков, 22 таблицы; второй том – Приложения изложены на 15 страницах текста – содержит два приложения, включая материалы о проведенных испытаниях.

**Основное содержание работы.**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели работы, обозначены объект и предмет исследований, новизна защищаемых научных положений, определена практическая значимость и представлены сведения об апробации результатов.

**В первой главе** Анализируются проблемы по направлению работы. Показана актуальность:

- разработки экранов специальных конструкций для перераспределения магнитного поля вблизи трёхфазных КЛ, проложенных однофазным кабелем;
- перспективности разработки и последующей доработки методики оптимизации, основанной на базе эволюционных методик и в частности генетического алгоритма;
- совместного расчета задачи магнитного поля переменных токов и стационарной теплопередачи, выполненной в трехмерной постановке ввиду наличие разработанного кабельного аксессуара на каждой из фаз.

Раскрыты задачи, отражающие цели работы, представленные в сжатом виде в разделе «Цели работы» автореферата.

**Во второй главе** обсуждается задача постановки настроек модели на базе генетического алгоритма, а также автоматизированное построение простой предиктивной модели путем аппроксимации результатов сложных расчетов температурного состояния низкоиндуктивного импульсного кабеля.

Был разработан программный комплекс для решения задачи по поиску оптимальной конструкции магнитных концентраторов. С точки зрения своего функционала он разбит на ряд компонентов, которые взаимодействуют между собой, и в итоге находят оптимальное решение. Составляющие разработанного комплекса: прикладная среда технических расчетов Matlab [95], программный комплекс Elcut Professional (включая встроенную надстройку Label Mover), MS Excel.

В модели должна быть сформирована начальная модель, подготовленная к процессу оптимизации (табл.1).

Табл. 1 Настройки генетического алгоритма

Число итераций	25
Число особей в популяции	500
Процент особей, которые станут родителями	25
Процент особей, которые будут скрещиваться	70
Степень мутации для мутантов	5
Процент мутирующих генов для мутантов	45
Степень мутации для скрещенных особей	1
Процент мутирующих генов для скрещенных особей	10
Число, показывающее, при какой степени сходства особей (%) лишние нужно устранить	5

Данные настройки являются рекомендательными в общем случае использования данного метода оптимизации, однако могут свободно варьироваться в зависимости от конкретной задачи.

Далее рассматривается задача по использованию машинного обучения в вопросе предиктивного анализа нагрева кабеля. На базе низкоиндуктивного импульсного кабеля марки ИПВПнг(С)-НФ-1х120/120-12 кВ, служащего для отвода энергии из термоядерного реактора ITER в энергопоглощающие резисторы, была построена предиктивная модель.

Через кабель протекает импульсный ток с амплитудой 3.8 кА (рис. 1) по закону  $I_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ ,  $\tau = 12\text{с}$ . Суммарное время протекания импульса считается как  $T = (3 \div 4) \cdot \tau \approx 40\text{с}$

Во избежание деструктуризации изоляции из сшитого полиэтилена, имеет место временная пауза длиной 20 минут (1200 с), затем производится повторный импульс тока. Согласно ТЗ, кабель не должен потерять своей работоспособности в течение 30000 таких итераций на протяжении срока эксплуатации.

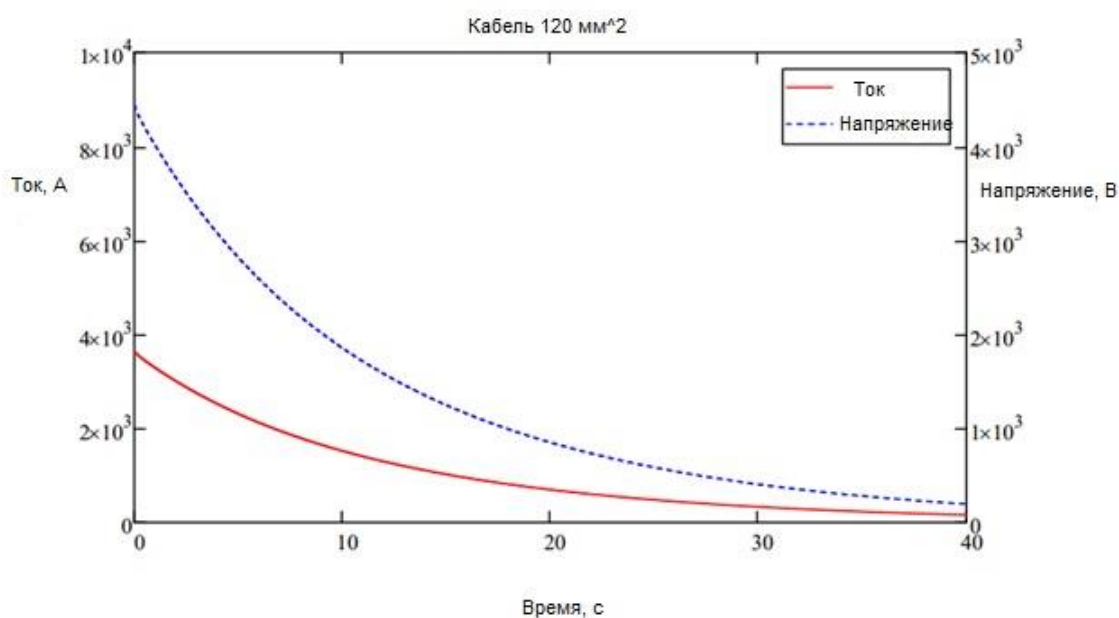


Рис. 1. Зависимость тока и напряжения от времени протекания импульсной итерации для кабеля с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup>.

Представляется перспективной методика прогнозирования состояния изоляции кабельного изделия. Были проделаны решения до 45 итерации прохождения импульса тока (когда температурные изменения стали изменяться на десятые доли градусов). А дальше предлагается сделать следующее:

- 1) аппроксимация полученных данных и вывод формулы для основных конструктивных элементов кабеля;
- 2) расчёт и моделирование магнитной и тепловой картины поля ради проверки выполнения условий технического задания.

В целях выполнения первого пункта нашей методики, было решено использовать программу Eugene (рис.2), использующей эволюционный подход к решению задач оптимизации.



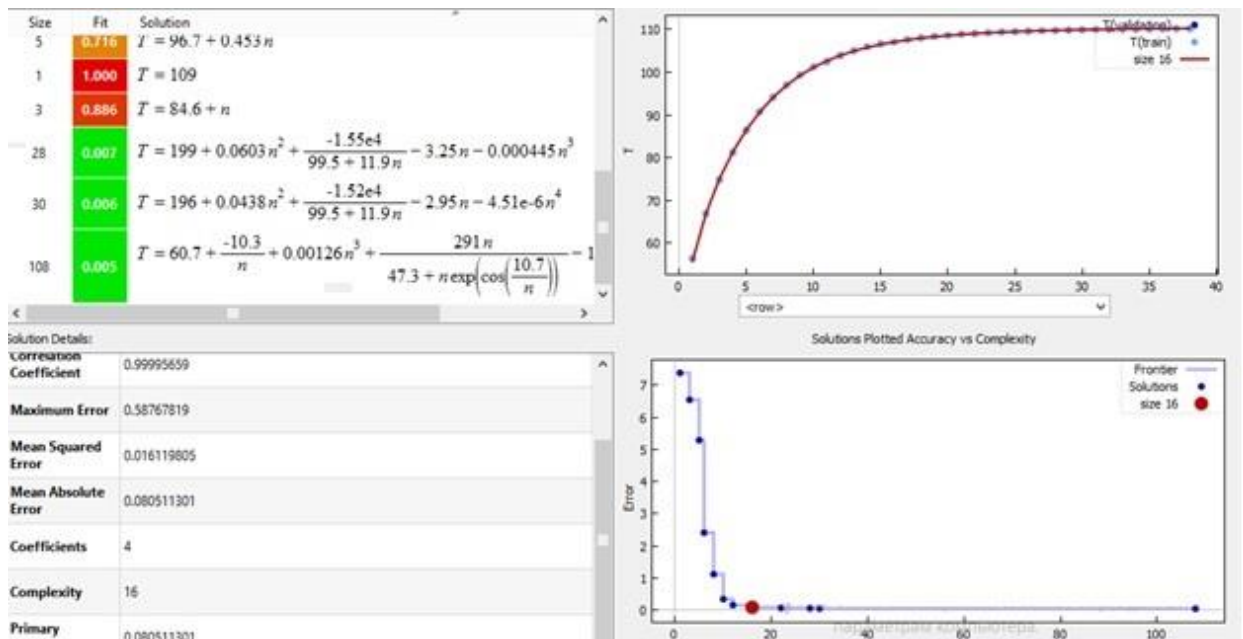


Рис. 2 Аппроксимация данных

В программный комплекс Eugene вводятся значения температуры на поверхности проводящих элементов кабеля и наружной оболочки для просчитанных 45 итераций. В ответ программа выдает решение в виде формулы расчета температуры (табл.2).

Табл. 2 Формулы, полученные для проводящих элементов кабеля путём аппроксимации

Элемент кабеля	Формула
Жила	$T = 107 + 0.84 \cdot \ln(n) + \left( \frac{-61.8}{e^{0.206 \cdot n}} \right)$
Внешний проводник	$T = 77.29 + 0.6508 \cdot \ln(n) + \left( \frac{-56.53}{0.2034 \cdot n} \right)$ $T = 58.6 - 46.97 \cdot e^{(-0.1963 \cdot n)}$
Экран из медных лент	$T = 58.3 + 0.584 \cdot \ln(n) + \left( \frac{-47.6}{e^{0.204 \cdot n}} \right)$
Наружная оболочка	$T = 58.6 - 46.97 \cdot e^{(-0.1963 \cdot n)}$

Подставим в известные уже формулы  $n = 30000$  и получим следующий результат: тпж – 116 °С, внешний проводник – 84 °С, медный экран – 64.4 °С, наружная оболочка – 58.7 °С. Таким образом, при помощи описанной методики был подтвержден факт выполнения кабельным изделием условий технического задания по неперевышению температуры в заданном режиме работы.

**Третья глава** посвящена разработке конструкции, исследованиям эффективности использования подвижных магнитных экранов специальной конструкции (которые не являются элементом конструкции самого кабельного изделия) с зазором.

Закон полного тока гласит: линейный интеграл по замкнутому контуру L от напряженности магнитного поля равен полному току, который протекает через сечение, ограниченное этим контуром.

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

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

Соотношение (3) принимает в расчет связь между магнитной индукцией  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$ . Выведенные из выражений (2 - 3) формулы для цилиндрического проводника с током:

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

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

Однако данные уравнения подходят при осевой симметрии (концентратор (магнитный экран) кабеля – круговой цилиндр; на его оси – экранируемый ток. Такой экран не имеет способности снижать силовые характеристики магнитного поля в окружающем КЛ пространстве. Эффект экранирования поля тока, протекающего внутри экрана не происходит при любых значениях магнитной проницаемости экрана. Вихревые токи разнонаправлены, и не дают вклада в правую часть (1). Однако сплошной цилиндрический экран защищает (экранирует) от внешнего магнитного поля (происходит экранирование внешнего поперечного или продольного магнитных полей).

Если рассматриваемый цилиндрический экран разорвать в каком-то месте и сделать зазор, то выражения (3) и (4) не способны описывать поле в пространстве вокруг кабеля. А значения вектора магнитной индукции  $B(r)$  и напряженности магнитного поля  $H(r)$  примут различные значения в разных точках окружности радиуса  $r$  при  $r$  больших радиуса экрана. Интеграл (1) не изменит своего исходного значения. Минимальные значения можно отследить с противоположной стороны от зазора, максимальные – вблизи. Данный зазор создает условия перераспределения магнитного поля в пространстве вокруг кабеля. Участок данной защищаемой (экранируемой) области есть возможность изменять путем изменения двух параметров: положения зазора на внешней границе кабеля и угла раскрытия зазора  $\alpha$ . Стоит отметить тот факт, что эффективность экранирования будет существенно зависеть от электрических свойств материала экрана (концентратора).

Материалом для рассматриваемых концентраторов был выбран магнитомягкий сплав на основе кобальта и железа марки АМАГ – 172 (рис.3). Электропроводность сплава составляет  $1.5 \cdot 10^7$  См/м. В готовом виде сплав представляет собой слой ленты суммарной толщиной 0.1 мм. Сам сплав был подвержен термообработке в течение двадцати минут при температуре  $400^\circ\text{C}$  и составляет 0.025 мм от одного слоя ленты. Поверх сплава с двух сторон наложена лента из полиэтилентерефталата.

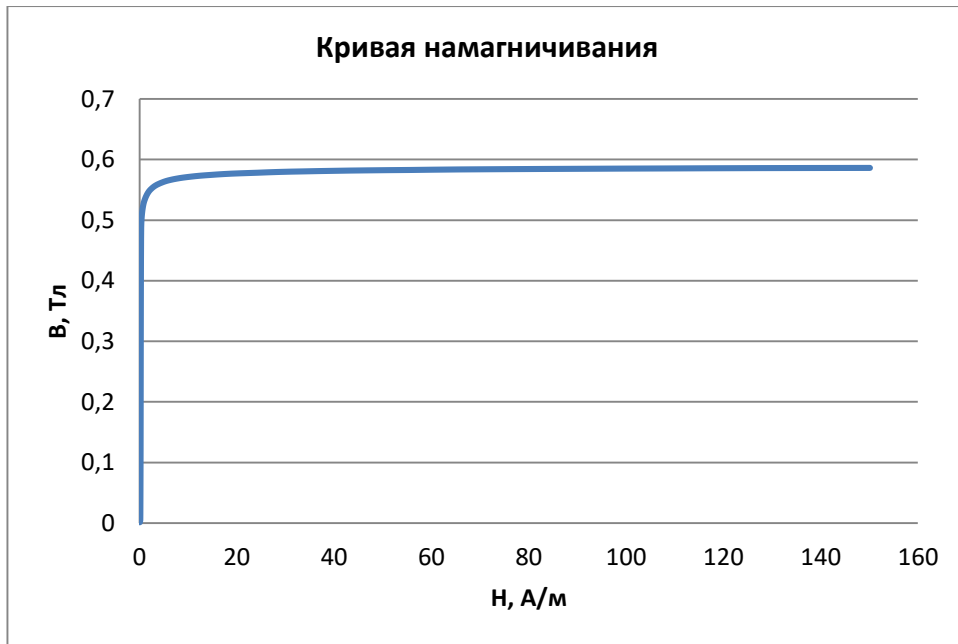


Рис.3 Кривая намагничивания B(H) для сплава марки АМАГ-172

Источниками поля выступали однофазная и трехфазная кабельные системы, собранные из однофазных кабелей марки ПвПу2г - 1х630/95 – 110 кВ (рис.4); значение силы тока в каждой фазе варьировались в следующих действующих значениях: 0,5, 1, 1.5, 2 кА .

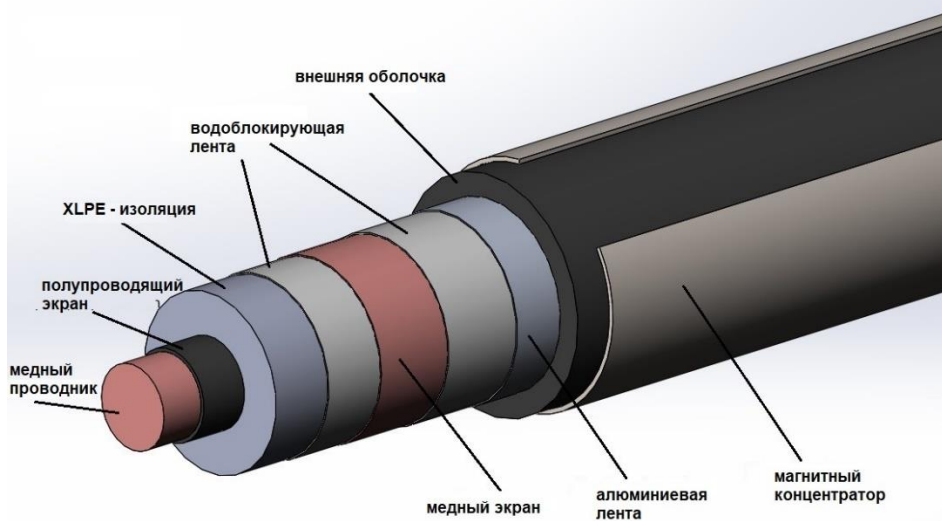


Рис. 4 Модель кабеля с применением подвижного магнитного экрана (угол раскрытия  $\alpha=600$ ). Защищаемый провод располагается в области минимальных значений электромагнитного поля.

При постановке задачи применяется метод конечно-элементного анализа. В процессе построения двумерной модели наряду с геометрической моделью, строится схема электрических соединений медных экранов с учетом выбранного метода заземления (заземление с одной стороны). Расчетная программа строит сетку конечных элементов, на которой происходит решение уравнения электромагнитного поля:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j_{\text{extern}} + j\omega\sigma \cdot A \quad (5)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость, Гн/м;  $\sigma$  - удельная электропроводность, См/м;  $\omega$  - циклическая частота, рад/с;  $j_{\text{extern}}$  - плотность стороннего тока, А/м<sup>2</sup>.

Защищаемая область располагается в области минимальных значений электромагнитного поля. Оптимизировав конструкцию магнитного экрана путем подбора оптимальной толщины на одной фазе для разных действующих значений токов, удалось снизить значения поля в исследуемой точке пространства в 2 раза.

Далее посредством моделирования с использованием разработанного комплекса на базе генетического алгоритма получили оптимальные конструкции и положения подвижных экранов для однофазного кабеля, прокладки треугольником встык (рис.5) и при прокладке КЛ в ряд с просветом в диаметр кабеля (рис.6).

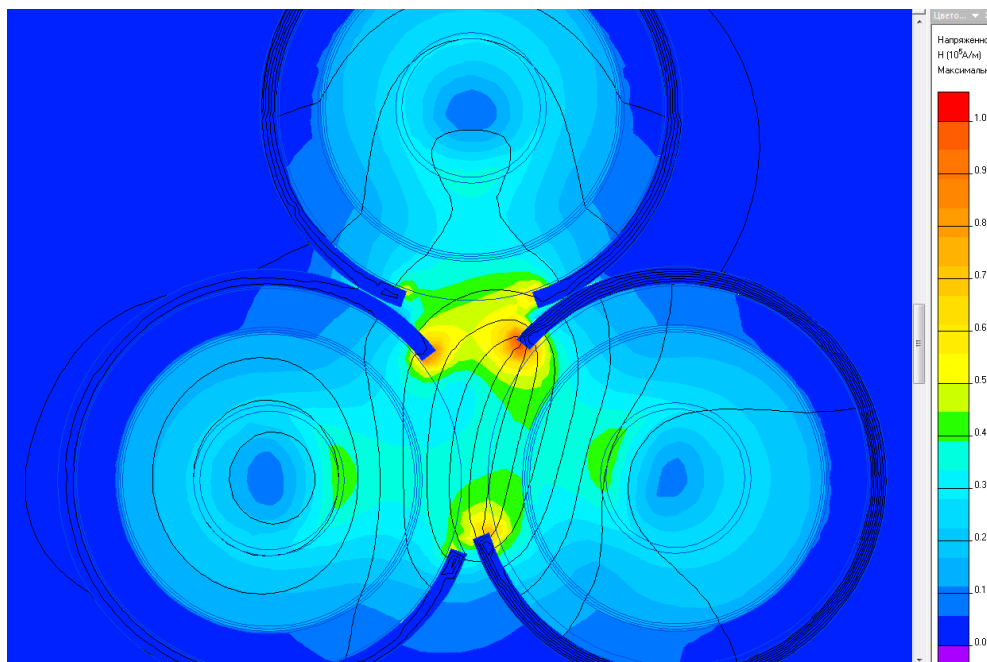


Рис.5 Картина магнитного поля при наличии оптимизированных подвижных магнитных экранов ( $I=2 \text{ кА}$ )

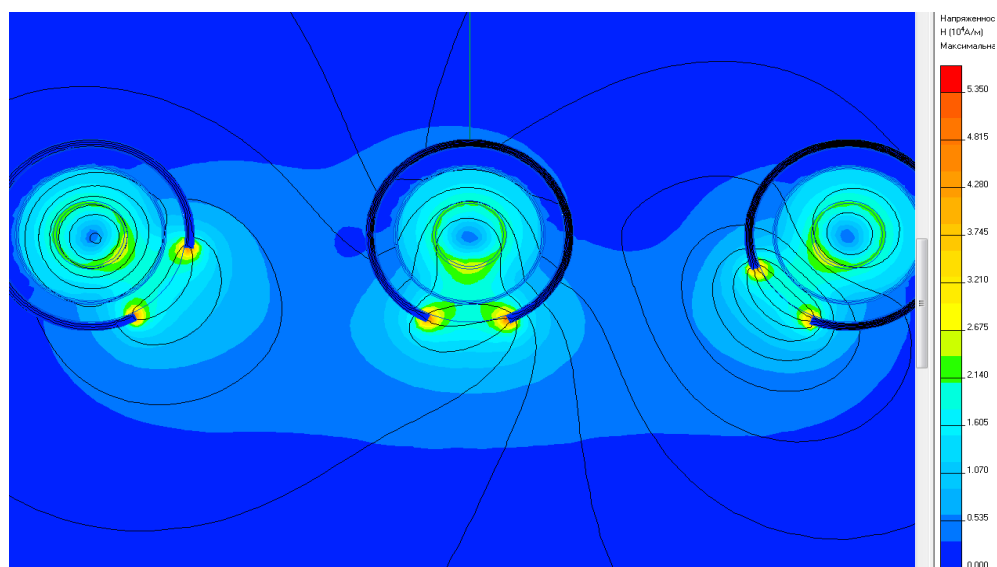


Рис.6 Картина магнитного поля при наличии магнитного экрана на каждой из фаз кабельной системы, проложенной «вряд»

На графике (рис.7) приведены кривые, отражающие значения коэффициента экранирования при оптимальной прокладке для примененных токовых нагрузок при прокладке в ряд; на рис.8 показаны аналогичные зависимости при способе прокладки треугольником встык.  $L$  – расстояние, на котором измерялись значения магнитного поля в области минимизируемых значений.

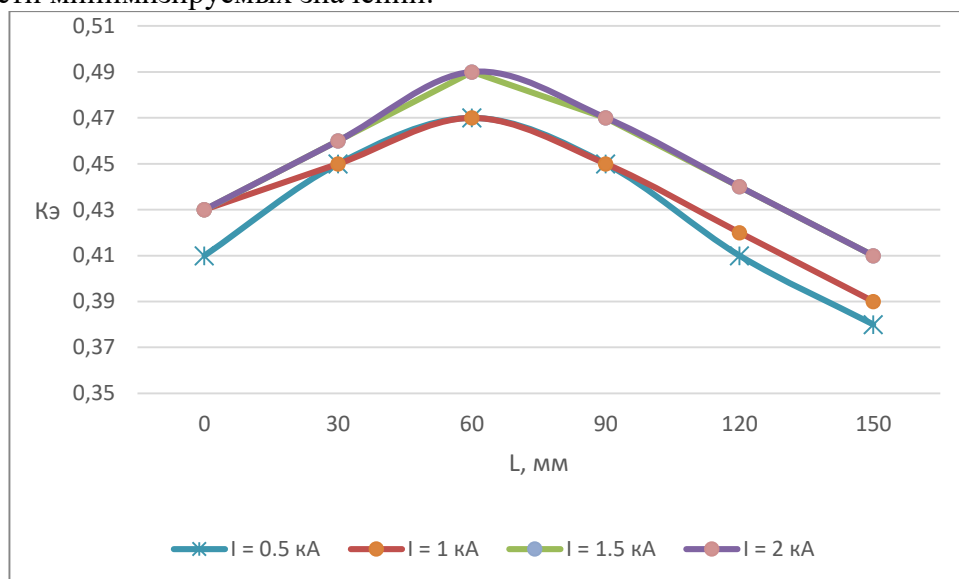


Рис. 7 График зависимости  $K_{\text{э}} = f(L)$  для рассматриваемых токовых значений.

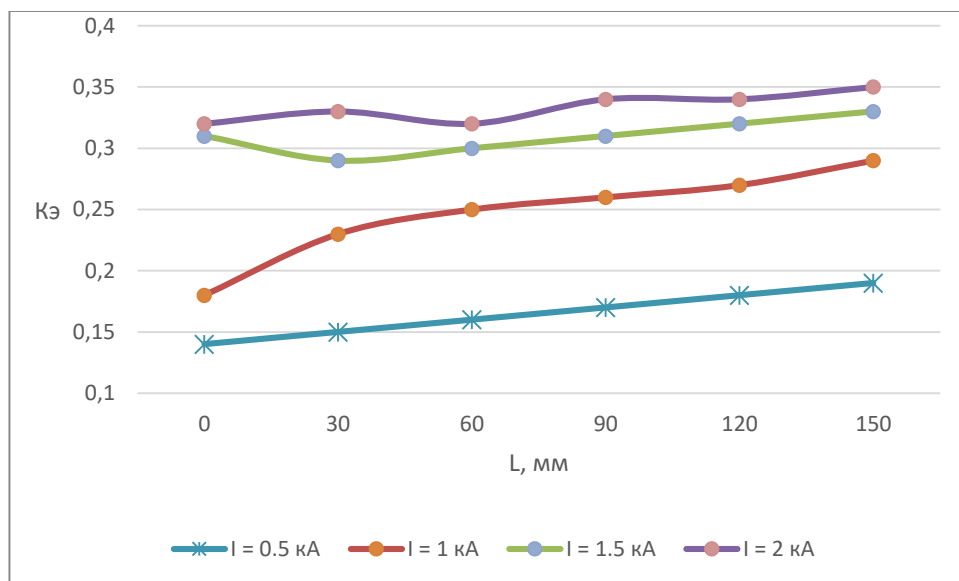


Рис. 8 График зависимости  $K_{\text{э}} = f(L)$  для рассматриваемых токовых значений.

На графике (рис.9) показано снижения напряженности магнитного поля в локальном участке пространства в процентном соотношении при прокладке треугольником.

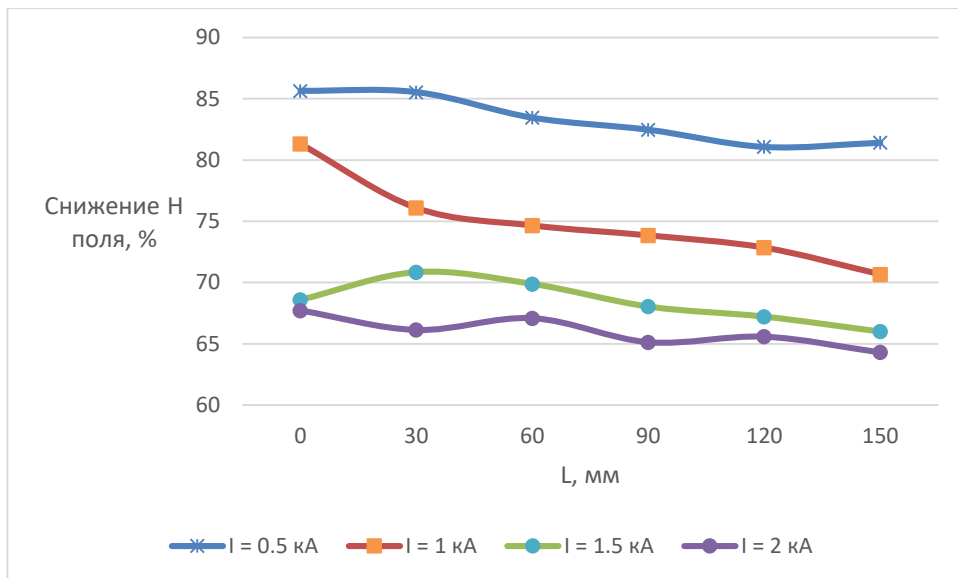


Рис.9 Снижения силовых характеристик магнитного поля

Эксперимент по оценке эффективности использования подвижных экранов на силовых КЛ

Изготовленные опытные образцы экранов были испытаны на кабеле марки ПвПу2г - 1х630/95 – 110 кВ в однофазном варианте исполнения, в варианте трехфазной кабельной системы, проложенной группой однофазных кабелей треугольником встык и при прокладке в горизонтальной плоскости «в ряд» (рис.10, рис.11). Протокол испытаний приведен в приложении 2.



Рис.10 Кабельная линия, проложенная в горизонтальной плоскости



Рис. 11 Кабельная линия, проложенная треугольником встык

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 В (мкТл) снимались портативным анализатором ЭМП промышленной частоты марки Narda EFA-300 на расстоянии 0, 10, 17 см для каждой из токовых нагрузок

от поверхности однофазного кабеля, и на расстоянии 5, 10, 15 см от поверхности фазы В для трехфазной системы в случае каждого варианта прокладки. Снимались показания характеристик магнитного поля в пространстве, как в случае использования подвижного магнитного экрана, так и без него.

Результаты экспериментов приведены в табл. 3.11, табл.4, табл.5, рис. 12, рис13.

Табл.3 Результаты измерений индукции магнитного поля при различных значениях токовой нагрузки при прокладке кабелей треугольником встык

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля
$I_{исп.}, А$	Расстояние от поверхности кабеля, см	В, мкТл	В без экрана, 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	

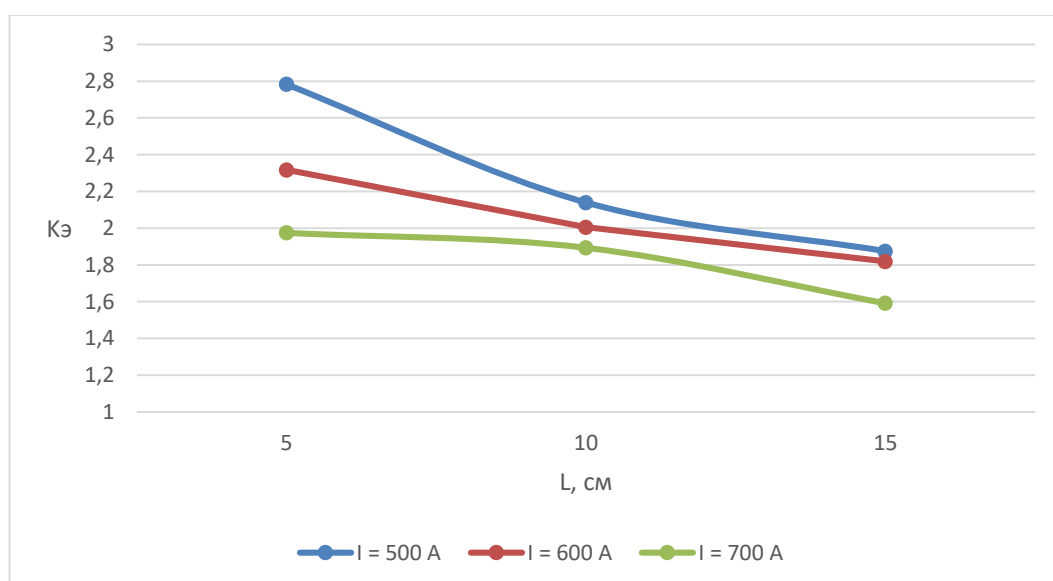


Рис.12 Зависимость  $Kэ = f(L)$  при прокладке кабелей встык с просветом в диаметр кабеля

Табл. 4 Результаты измерений индукции магнитного поля при различных значениях токовой нагрузки при прокладке кабелей в ряд с просветом в диаметр кабеля

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля
$I_{исп.}, А$	Расстояние от поверхности кабеля, см	В, мкТл	В без экрана, 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	

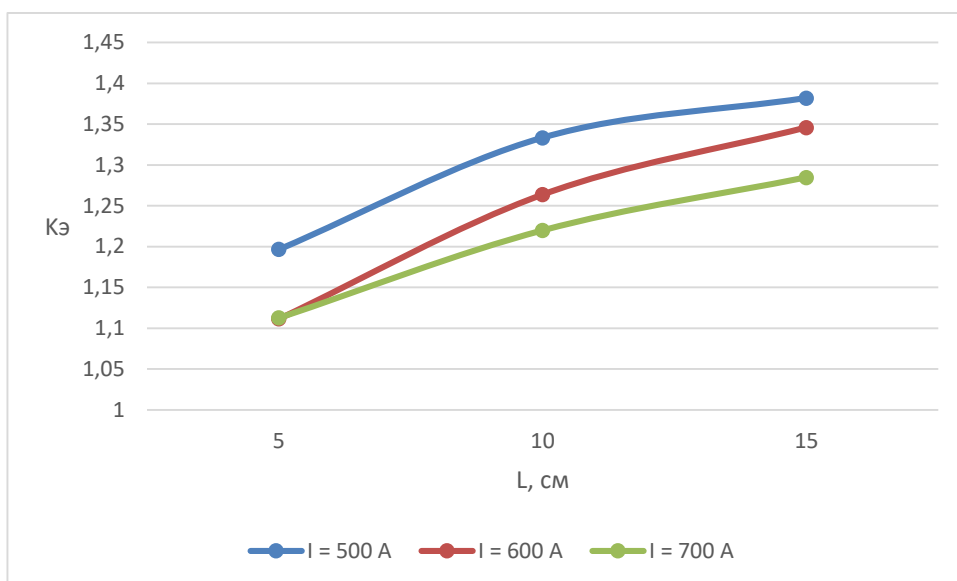


Рис.13 Зависимость  $Kэ = f(L)$  при прикладке кабелей треугольником

Табл. 5. Результаты измерений индукции магнитного поля при оптимальном значении токовой нагрузки для однофазного кабеля.

Фактические параметры испытаний		Результат испытаний		Снижение индукции магнитного поля
$I_{исп.}, A$	Расстояние от поверхности кабеля, см	В, мкТл	В без экрана, мкТл	%
500	0	638.2	896	41.6
	10	515.9	649.1	
	17	415.1	426.8	

Как видно из результатов испытаний, во всех вариантах кабельных линий, наблюдается существенное снижение силовых характеристик поля в тех участках пространства, где стояла задача их уменьшить. Однако симметричное расположение фаз (в случае прокладки треугольником встык) является наиболее оптимальным.

**В четвертой главе** обсуждается задача теплового расчет КЛ с магнитными экранами. Следует учитывать, что экран покрывает не всю длину КЛ – а лишь незначительную ее часть. Это значит, что в целом на строительную длину магнитный концентратор не несет существенного вклада. Однако на тот участок КЛ, на котором располагается концентратор, будет происходить изменение температур по проводящим элементам кабеля. Таким образом, имеется, по сути, неоднородность в задаче нахождения температурной картины поля.

На поверхности грунта (рис.14) (граница грунт – воздух) поставим граничные условия конвективного теплообмена. Температура грунта равняется 20 градусам (что соответствует



температуре во время летнего сезона в средней полосе России). Температура воздуха над поверхностью грунта – 22 градуса. На прочих границах установим условие равенства теплового потока нулю. Последнее граничное условие моделирует ситуацию, когда среда (в данном случае грунт) распространяется на бесконечно далекое расстояние от границы.

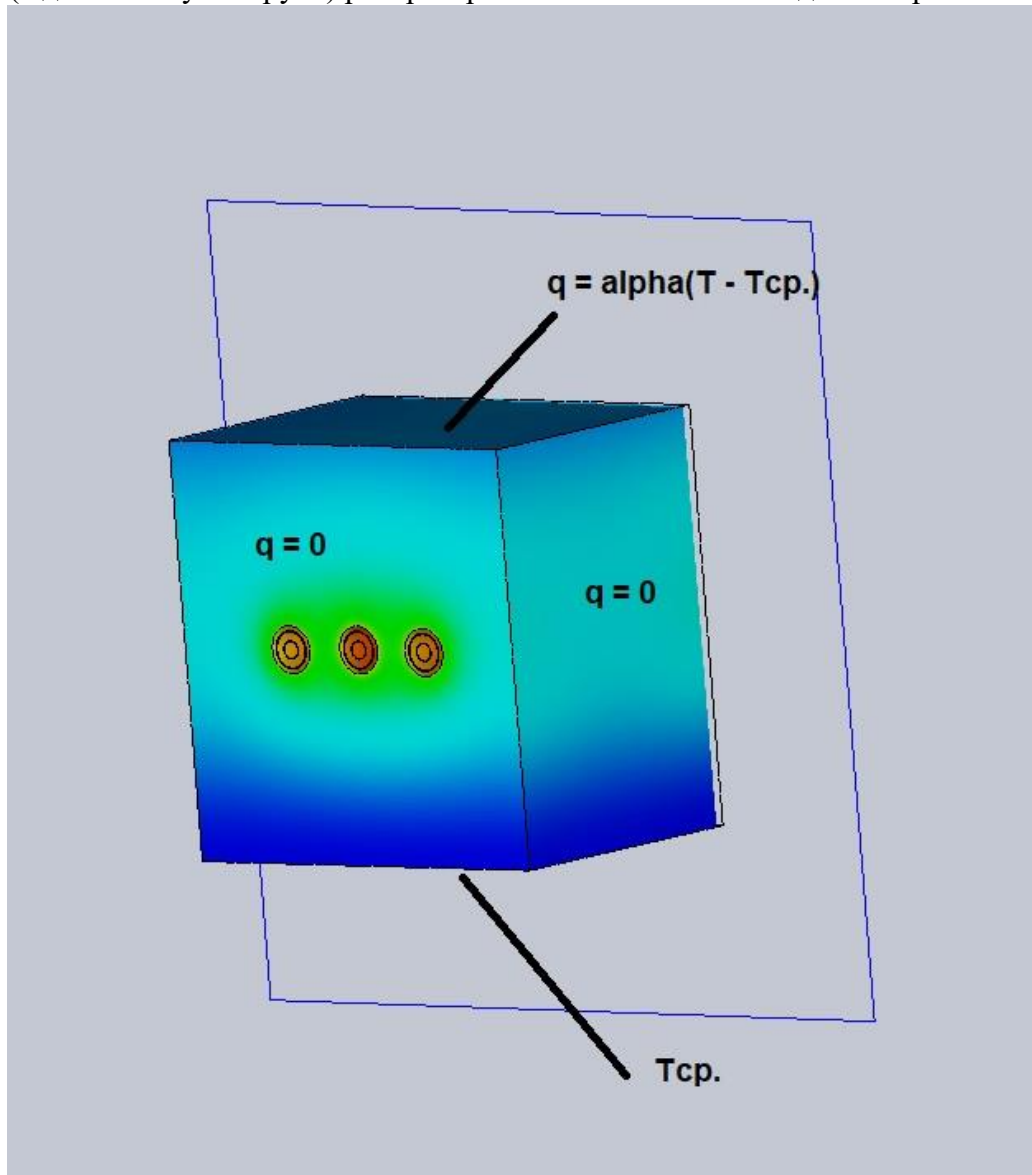


Рис.14 Расчетная область и граничные условия

Конвективный тепловой поток можно вычислить по закону Ньютона – Рихмана:

$$F_{conv} = \alpha_c (T_{cab} - T_a) \quad (6),$$

где  $\alpha_c$  - конвективный коэффициент,  $T_{cab} - T_a$  - разница температур.

Задача была решена при помощи программного продукта, проводящего конечно-элементные расчеты в трехмерной постановке – Solidworks Electromagnetic Simulation.

Модель была сделана таким образом, что неоднородность в виде подвижного магнитного концентратора занимала одну треть всей длины участка КЛ. Т.е. ширина участка КЛ с концентратором – 0.5 м, полная длина участка КЛ – 1.5 м. Таким образом, можно отметить что в одной расчетной модели реализуется решение сразу двух задач: задачи сечения кабеля без подвижного экрана и задача в присутствии такого.

В модели оперируем кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена. Для кабелей с данным видом изоляции характерны следующие критериальные значения температуры:

90 градусов - предельная длительно допустимая температура рабочего режима кабеля;  
130 градусов - время работы при температуре выше 130°C не должно превышать 1000 ч за весь срок службы кабеля;

В случае если кабель с XLPE – изоляцией находится под воздействием температур выше 90 или 130 градусов (в зависимости от длительности нахождения в таком состоянии), наступает необратимая деструктуризация изоляции. Этот эффект неминуемо ведет к таким недопустимым последствиям как к выходу кабельного изделия из строя. С целью проверки и вероятного предотвращения наступления подобных случаев, приведем тепловые расчёт КЛ в разных вариантах прокладки.

Следует отметить, что стандарт МЭК 60287 расписывает методику расчета пропускной способности КЛ. В качестве уточнений для расчета по общепринятому стандарту применим методику расчета КЛ посредством подхода в представлении КЛ как одиночной линии, проложенной группой однофазных кабелей, с применением метода конечных элементов (МКЭ).

Необходимо найти установившееся тепловое поле задав токовые нагрузки в каждом из фидеров. Использовалась следующая расчетная методика:

Моделирование условий, в которых будет рассчитываться электромагнитный и тепловой режим КЛ (конструкция кабеля, характеристики материалов, которые используются в изготовлении, среда прокладки КЛ, доп. элементы конструкции (надвижной магнитный концентратор)). Моделируется трехмерная задача с соответствующей геометрией. Она не может быть бесконечной, поэтому требуется задаться какой-то определенной длиной модели. Для кабельных задач можно условиться боковыми границами кабеля, верхней границей расчетной области (граница двух сред грунт-воздух), нижняя граница в грунте (там следует установить температуру грунта). Размеры области и их границы, в которой находится КЛ, следует принять достаточными для обеспечения однородности теплового и магнитного полей. Следует также учитывать возможности ЭВМ, на котором происходит решение.

При моделировании КЛ принимаем следующие обязательные компоненты кабеля (рис. 15):

- тпж – сплошной цилиндр с площадью поперечного сечения действительно существующей многопроволочной жилы;
- изоляция между жилой и экраном (полупроводящий экран, водоблокирующие ленты и пр. промежуточные слои). В общем случае нет надобности в детальном моделировании каждого слоя, допускается объединение в один.

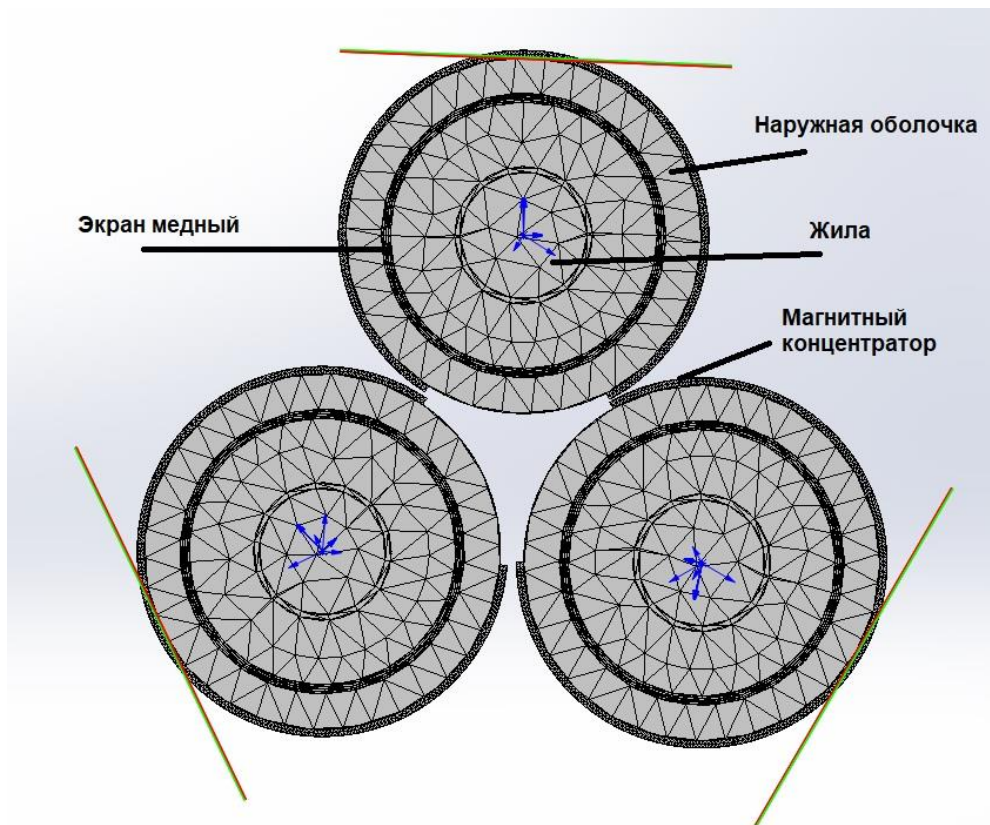


Рис.15 Дискретная модель КЛ

- Экран кабеля моделируется по аналогии с тпж. Следует отметить, что из-за допущения о применении сплошного цилиндра вместо экрана из скрученных проволок, возможно увеличение площади поперечного сечения медного экрана, так как в таком случае не учитываются промежутки между проволоками. В таком случае можно пропорционально уменьшить площадь поперечного сечения при моделировании, или снизить показатель удельной электропроводности в зависимости от пропорций.

Как было сказано выше, геометрическую модель следует заполнить свойствами материалов и среды. Для магнитной задачи переменных токов и теплопередачи стационарной следует указать магнитную проницаемость, электропроводность, теплопроводность.

При решении магнитной задачи переменных токов задаем граничные условия с нулевым условием Дирихле.

Далее применяемое программное обеспечение в автоматизированном режиме строит сетку конечных элементов. На данном этапе построения модели можно отрегулировать густоту сетки конечных элементов. Затем происходит решение уравнений электромагнитного поля (4.1):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial z} \right) = -j_{extern} + j\omega\sigma \cdot A \quad (7)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость,  $\sigma$  - удельная теплопроводность,  $\omega$  - циклическая частота,  $A$  - магнитный потенциал.

$A_z$  Один из основных факторов перегрева в присутствии концентраторов являются омические потери в металлических элементах кабельного изделия.

В виде финала расчета магнитной задачи переменных токов принимается распределение векторного магнитного потенциала  $A_z$  и плотности тока  $j = j_z$ . Отметим, что плотность тока не равная нулю имеет место только в проводящих элементах

конструкции. Сама же плотность тока распределяется неравномерно из-за скин-эффекта и эффекта близости.

Основываясь на данных магнитной задачи, можно посчитать распределение теплового поля в установившемся режиме. Боковые границы области (рис.14) имеют граничные условия тепловой изоляции ( $q = 0$ ,  $q$  – плотность теплового потока), на нижней границе устанавливается условие температуры среды (в данном случае грунта. На поверхности с земли, в месте соединения грунта с воздухом, задаются условия конвективного теплообмена.

Рассмотрим результаты расчетов при двух вариантах прокладки КЛ– «вряд» и треугольником встык. Для того, чтобы смоделировать нагревание токопроводящей жилы кабеля до 90 и 130 градусов в магнитной задаче пропустим соответствующий рабочий ток. В варианте горизонтальной прокладке в ряд первое значение тока составляет 1100 А, а второе 1300 А (рис.16).

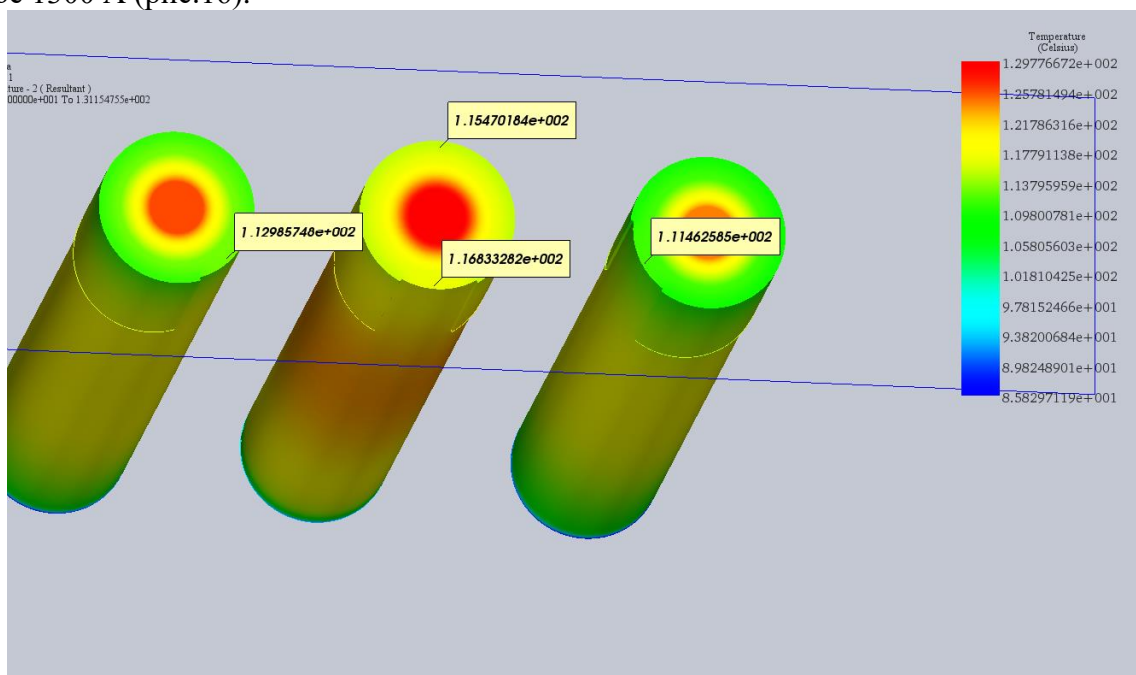


Рис. 16 Распределение температуры по сечению кабелей (со стороны подвижного магнитного концентратора) при температуре тпж 130 градусов.

По аналогии получим картину поля при втором случае (рис.17)

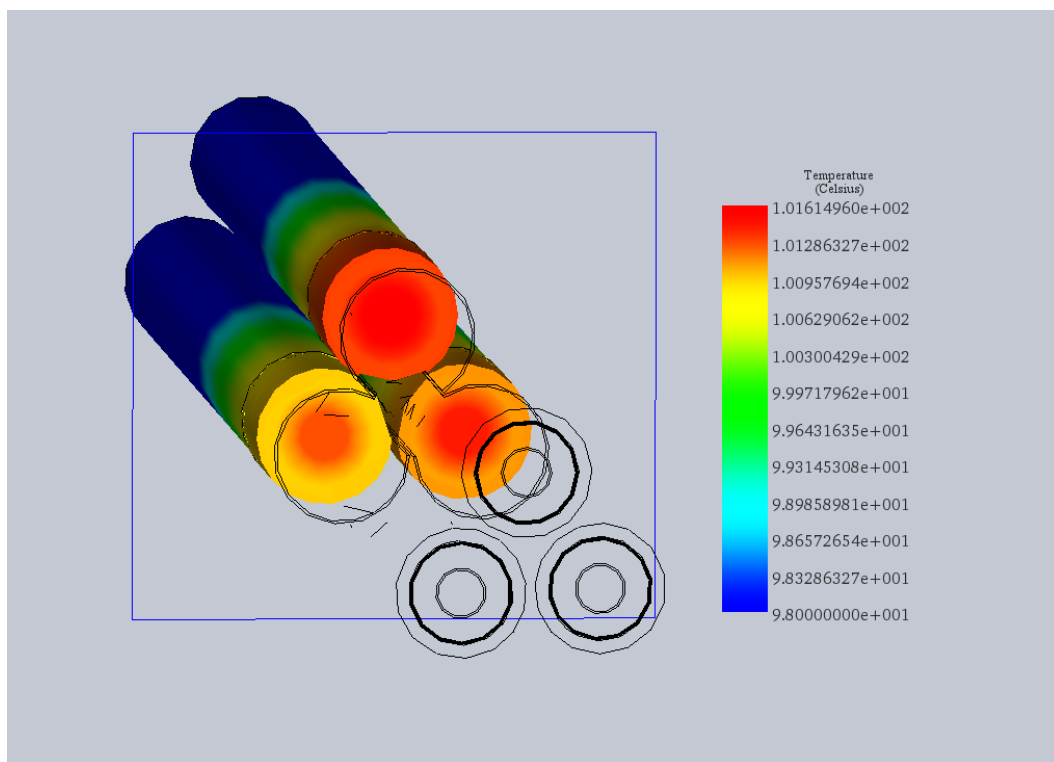


Рис. 4.11 Распределение температуры по сечению кабелей в разрезе (со стороны подвижных магнитных концентраторов) при температуре тпж 90 градусов.

Итак, проанализировав полученные результаты, можно отметить увеличение температуры наружной оболочки КЛ при воздействии подвижного магнитного концентратора, в среднем на 10 градусов при прогреве жилы до 90 градусов и на 15 градусов при прогреве тпж до 130 градусов. Почти все действия по снижению внешнего магнитного поля приводят к локальному повышению потерь в проводниках. Так что анализ должен представлять из себя не только расчет магнитного поля, но и измененное тепловое поле. Путем численного моделирования был установлен факт перегрева участков КЛ по причине перераспределения плотности токов из-за воздействия подвижного магнитного концентратора. Локальный перегрев при прокладке в ряд составил от 5 до 7 градусов, при прокладке треугольником встык – от 10 до 15. Увеличение температуры при прокладке трилистником объясняется тем, что кабели расположены встык и создают дополнительный нагрев друг друга. Эффект перегрева сохраняется на удалении от края концентратора до примерно 1 м от края подвижного магнитного экрана при длине концентратора 0.5 м. При увеличении длины концентратора его тепловое влияние по длине КЛ будет увеличиваться.

**В заключении** приведены основные выводы по работе.

Основные результаты выполненных теоретических и экспериментальных исследований заключаются в следующем:

1. В представленной работе рассматриваются вопросы снижения уровня магнитного поля от трехфазных кабельных линий при прокладке одножильными фазными кабелями. С целью локального снижения уровня магнитного поля предлагается применение нового типа тонкопленочных экранов – подвижных магнитных концентраторов, преимуществом которых является дешевизна, легкость монтажа, возможность локального снижения уровня магнитного до 50% для защиты чувствительных приборов и биологические объекты от магнитного поля промышленной частоты.

В работе обосновано применение и разработана методика использования генетического алгоритма для решения оптимизационной задачи, осложненной следующими особенностями: дискретность и сложная структура области допустимых значений переменных, большое количество переменных оптимизации, наличие нескольких локальных экстремумов целевой функции. Еще одной важной особенностью

оптимизационной задачи является высокая сложность вычисления целевой функции, каждое значение которой является результатом численного расчета магнитного поля методом конечных элементов в относительно сложной расчетной области. При таких особенностях целевой функции выбор генетических алгоритмов представляется обоснованным решением.

2. Самостоятельный интерес представляет собой отдельное исследование, выполненное автором, по использованию программы Eureka для автоматизированного построения простой предиктивной модели путем аппроксимации результатов сложных расчетов температурного состояния низкоиндуктивного импульсного кабеля. Необычный и многообещающий подход по человеко-машинному осмыслению больших объемов данных, полученным численным экспериментом, на основе метода машинного обучения, был использован, насколько известно, в кабельной технике впервые. Данный подход может найти свое применение в кабельной технике как одна из возможных уточняющих методик.
3. Разработана оптимизационная методика на базе генетического алгоритма. Методики оптимизации, численного моделирования на основе ГА, дают относительную простоту и свободу их применения для конечного пользователя. Сочетание правильно выстроенной методики, подготовленность специалиста – разработчика, современный функционал вычислительной техники, дает возможность снизить время решения поставленной задачи до вполне приемлемых величин. Например, на базе существующей модели за несколько десятков человеко - часов можно посчитать различные уточняющие варианты прокладки КЛ, а также выбрать другие области пространства, где требуется снизить силовые характеристики МП.  
Аналогичным образом, при большом количестве переменных и сложности задачи, можно подключать для решения таких задач различные суперкомпьютерные центры. Однако по опыту автора и ряда коллег, зачастую достаточно современного офисного персонального компьютера.  
Рассматриваемая методика является весьма гибким и настраиваемым инструментом. Это важное свойство крайне необходимо при внесении различных доработок в существующие (и, вероятно, уже решенные задачи).  
Методика дает право конечному пользователю самому вносить необходимые правки в оптимизируемую модель. Так например, если необходимо поменять область, в которой требуется минимизировать поле, или подобрать оптимальную конструкцию экрана для другого материала, то это вполне достижимо за короткий промежуток времени. То же касается вопросов настройки параметров ГА под конкретные изменения в задачах.
4. Отдельно стоит отметить, что разработанный магнитный концентратор можно применить не только для снижения силовых характеристик поля в одном участке пространства, но и для увеличения в другом. Расчет на однофазном кабеле показал, что ближней зоне при удалении от источника поля (до 60 мм) увеличение может достигать 100%.
5. За счет использования разработанного кабельного аксессуара возникает локальное повышение потерь в металлических элементах кабеля и, как следствие, локальный перегрев. Приведена методика расчета тепловой задачи в трехмерной постановке, по результатам этих расчетов был установлен факт локального перегрева. Разница в температурах не является существенной и составляет от 5 до 15 градусов, однако стоит иметь ввиду, что при последующем проектировании имеет смысл проводить уточняющие тепловые расчеты по приведенной методике.

Основные результаты работы отражены в следующих публикациях:

1. Грешняков Г. В., Доронин М. В., Коровкин Н. В. Комбинированные магнитные экраны для силовых кабельных линий // Кабели и провода. – 2015. – № 5. – С. 8–13
2. Доронин М.В., Грешняков Г.В. Надвижные магнитные экраны специальной конструкции, собранные из листов аморфных магнитомягких сплавов. // Вопросы материаловедения. -2017.-№1. С. 108-114.
3. 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
4. Doronin M., Greshnyakov G., Korovkin N. Modes of operation and design features of pulse cables for the ITER project. MATEC Web of Conferences 245, 13001 (2018).
5. Mikhail V. Doronin, George V. Greshnyakov. Magnetic Concentrators for Reducing the Magnetic Field around Power Cable Line. 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2019. pp. 848-851.
6. Доронин М.В. Применение метода генетических алгоритмов для практических расчетов магнитных экранов специальной конструкции. // Развитие технических наук в современном мире, / Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Г. Воронеж, 2015. - №2. С.183-186.
7. М.В. Доронин. Магнитные экраны специальной конструкции для однофазных групп силовых кабелей. // Международная конференция, посвященная 150-летию Михаила Андреевича Шателена: материалы конференции: сб.тр. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та. – 2016 – С.14-17.
8. Грешняков Г.В., Доронин М.В. Магнитные концентраторы специальной конструкции. Оптимизация конструктивных особенностей концентратора поля с помощью применения генетического алгоритма/ Г.В. Грешняков, М.В. Доронин // Фундаментальные и прикладные науки сегодня: материалы VII международной научно-практической конференции. – North Charleston, USA, 2015. – Том 2. –С. 80-84.
9. Грешняков Г.В., Доронин М.В., Селезнев Д.А. К вопросу о расчете тепловго режима силового импульсного кабеля// Fundamental and applied sciences today II.-2013.-Vol1.- С. 118-120.
10. Доронин М.В., Селезнев Д.А. Численный расчет электромагнитного и теплового поля силового импульсного кабеля// Научно-исследовательский и инновационный потенциал молодежи. -2013.-Часть I.- С. 178-182