

13. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. М.: Энергия, 1965. 892 с. ISBN 978-5-458-49059-7.

14. Mahmoud M. A. W., Ghazal M. G. M. Estimations from the exponentiated Rayleigh distribution based on generalized Type-II hybrid censored data // Journal of the Egyptian Mathematical Society. 2017. Vol. 25, Issue 1. P. 71–78. DOI: 10.1016/j.joems.2016.06.008.

15. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. 7-е изд. стер. М.: Высш. шк., 2001. 575 с.

16. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф., Специальные функции: формулы, графики, таблицы: пер. с 6-го перераб. нем. изд. / под ред. Л. И. Седова. 3-е изд. М.: Наука, 1977. 342 с.

17. ГОСТ 31946–2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2013. 24 с.

18. ГОСТ 22483–2012 (IEC 30228:2004). Межгосударственный стандарт. Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров (с поправкой). Введ. 2014–01–01. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

**ГИРШИН Станислав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**МОНГУШ Чайна Павловна**, аспирантка кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

**БИРЮКОВ Сергей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры «Физика».

Адрес для переписки: 99mongush99@mail.ru

#### Для цитирования

Гиршин С. С., Монгуш Ч. П., Бирюков С. В. Расчет потерь мощности в электрических сетях при вероятностном задании нагрузок // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 31–35. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-31-35.

Статья поступила в редакцию 26.12.2017 г.

С. С. Гиршин, Ч. П. Монгуш, С. В. Бирюков

УДК 621.318.4

DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-35-39

**А. Д. ЭРНСТ  
К. А. ПЕТРОВ  
Е. Н. ЕРЕМИН**

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ВЛИЯНИЕ РАССЕИВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ДУГОГАСЯЩЕГО РЕАКТОРА

Целью данного научного исследования являются расчет и сравнение индуктивности экспериментального образца, управляемого дугогасительного реактора с учетом рассеивания и без. Сравнивается полученная индуктивность в результате эксперимента, моделирования в программе ELCUT и расчета на основе метода магнитных цепей. В ходе исследования установлено, что выбранная конструкция не обеспечивает необходимый диапазон регулирования. Доказано, что расчет по теории магнитных цепей неприемлем без учета рассеивания.

**Ключевые слова:** индуктивность, магнитные цепи, моделирование, ELCUT, компенсация емкостных токов.

В распределительных электрических сетях распространённой причиной снижения надёжности работы являются однофазные замыкания на землю, приводящие к перенапряжению. В последнее время для уменьшения последствий замыканий на землю, в сетях высокого и среднего напряжения самым лучшим образом зарекомендовали себя сети с компенсированной нейтралью (компенсация емкостных токов замыкания на землю) [1]. Данные сети предполагают заземление нейтрали через высокое реактивное сопротивление, через заземляющий дугогасящий реактор, настраиваемый в соответствии с ёмкостью сети относительно земли. Диапазон регулирования индуктивности и тока зависит от длины линии и типа сети (с воздушными лини-

ями, с кабельными линиями или смешанная сеть). В соответствии с РД 34.20179 «Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электросетях 6–35 кВ» Министерства энергетики [2]. Применение плавного регулируемых заземляющих дугогасящих реакторов (ДГР) позволяет существенно компенсировать ток замыкания на землю и таким образом оптимально использовать преимущества системы компенсации сети.

Распределительная электрическая сеть подвержена постоянным изменениям, поэтому существует необходимость регулировать индуктивность заземляющего ДГР, используемого для заземления нейтрали. Регулировка индуктивности может происходить по двум основным принципам:

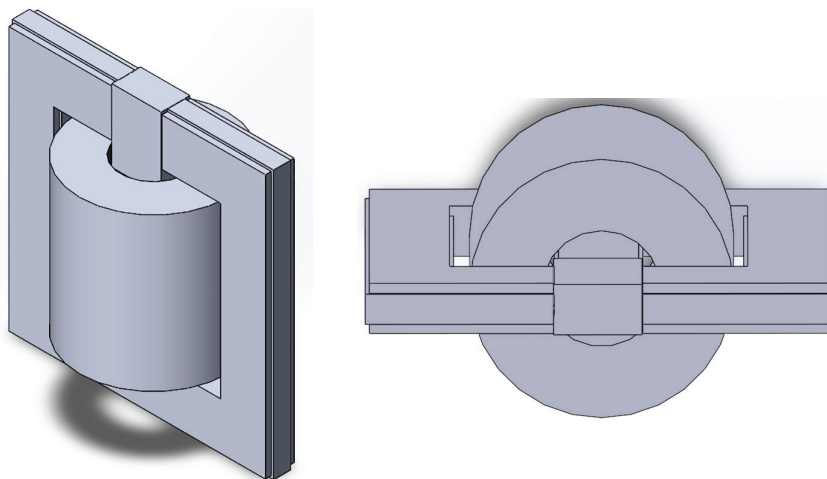


Рис. 1. Трехмерная модель магнитной системы реактора

— посредством коммутационных операций на реакторе, позволяющих подключать и отключать секции витков обмотки или секции реактора;

— посредством непрерывной регулировки воздушного зазора магнитной цепи реактора с помощью регулировочной механики (реактор с магнитным шунтом).

На основе Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» [3] был разработан и изготовлен экспериментальный образец управляемого дугогасительного реактора с магнитным шунтом. Основными требованиями при разработке был диапазон непрерывного изменения значений тока 2–20 А, а также кратность изменения индуктивности, равная 10.

Экспериментальная стендовая установка предназначена для эксплуатации на подстанциях «Шербакульская» ПАО «МРСК Сибири», филиал «Омскэнерго» в открытом распределительном устройстве трансформаторной подстанции на уровне напряжения 35 кВ совместно с оборудованием 110/35/10 кВ.

Реактор является электромагнитным аппаратом, обеспечивающим плавное изменение индуктивности в заданных пределах.

Трехмерная модель представлена на рис. 1 и состоит из пространственного бронестержневого магнитопровода и расположенных на нем обмоток: рабочей и сигнальной. Магнитопровод имеет магнитный стержень, состоящий из двух частей, разделенных воздушным зазором. Верхняя часть стержня размещена на ходовом валу и совершает возвратно-поступательные движения. При этом зазор изменяется от минимального до максимального значения, и, соответственно, плавно изменяется индуктивное сопротивление реактора от максимального до минимального значения.

Магнитная система реактора — конструкция, собранная из ферромагнитного материала и служащая для локализации основного магнитного поля реактора. Была выбрана электротехническая сталь марки 3407. В магнитной системе реактора выделяют две основные части: сердечник и шунт.

Для создания магнитной части реактора должны быть совмещены такие параметры, как:

— механическая прочность и устойчивость ДГР при токах КЗ;

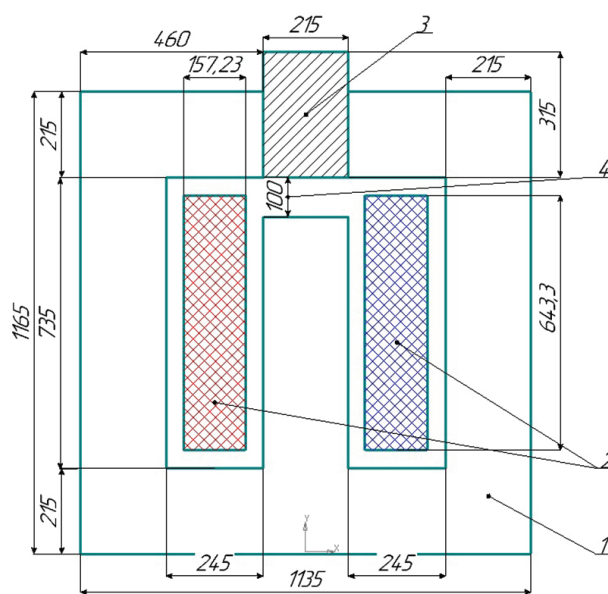


Рис. 2. Конструкция плоскопараллельной магнитной системы:

1 — сердечник; 2 — катушка;  
3 — магнитный шунт; 4 — зазор  $\delta$ , мм

— максимальный уровень заполнения пространства внутри обмоток;

— минимальный ток холостого хода;

— минимальный расход электротехнической стали [4].

Сердечник — это часть магнитопровода, на нем располагаются обмотки реактора, которые служат для преобразования электрической энергии. Магнитным шунтом называется часть магнитной системы, не несущая на себе обмоток, предназначенная для замыкания магнитной цепи.

Конструкция магнитной цепи и ее размеры для плоскопараллельной задачи приведены на рис. 2.

При разработке магнитной системы был произведен расчет магнитной цепи [5]. Индуктивность обмотки  $L$ , при различных значениях зазора, определялась по формуле (1):

$$L = \frac{\Psi}{I} = \frac{\omega \Phi}{I} = \frac{\omega BS}{I} = \frac{\omega^2 \mu_0 JS}{\delta I} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta}, \quad (1)$$

Таблица 1

## Индуктивность без учета рассеивания

Зазор $\delta$ , мм	10	50	75	100	Кратность $k_L$
Индуктивность, Гн	52,2	10,4	6,9	5,2	10

$$L_{\max} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,1} = 5,4 \text{ Гн},$$

$$L_{\min} = \frac{\omega^2 \mu_0 S}{\delta} = \frac{4000^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,026}{0,01} = 54 \text{ Гн},$$

где  $\Psi$  — потокосцепление, Вб;  $I$  — сила тока в контуре, А;  $\omega = 4000$  — число витков в катушке;  $\Phi$  — магнитный поток, Вб;  $B$  — индукция, Тл;  $S = 0,026$  — сечение магнитопровода, м<sup>2</sup>;  $\delta$  — зазор, м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная проницаемость в обмотках и воздухе, Г/м.

Результаты расчета при разных значениях зазора приведены в табл. 1.

При ходе магнитного шунта от 0,01 до 0,1 м была получена кратность изменения индуктивности (2), равная 10, что удовлетворяло требованиям заказчика. Было решено собрать экспериментальный образец.

$$k_L = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} = \frac{54}{5,4} = 10. \quad (2)$$

На экспериментальной стендовой установке была измерена индуктивность при двух зазорах 0,01 и 0,1 м, промежуточные значения эксперимента получены методом линейной интерполяции. Однако экспериментальное исследование не подтвердило данные результаты расчета, и отношение индуктивности составило 4. Результаты представлены в табл. 2.

Для проверки расчета и выяснения влияния рассеивания было произведено моделирование стационарного магнитного поля в программе ELCUT методом конечных элементов [6] на основе векторного магнитного потенциала, при граничных условиях Дирихле на границах  $A=0$  [7]. На настоящем этапе была выбрана модель плоскопараллельного поля, описываемая уравнением Пуассона, представленным в формуле (3).

$$\mu \mu_0 \delta = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}, \quad (3)$$

где  $A$  — векторный магнитный потенциал;  $\mu = 7000$  — относительная магнитная проницаемость в магнитопроводе;  $x, y$  — координаты;  $\delta$  — зазор, м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная проницаемость в обмотках и воздухе, Г/м.

Метод конечных элементов — это эффективный численный метод решения инженерных задач. Цель метода заключается в том, что любую непрерывную величину можно приближенно представить в виде набора отдельных более простых функций, разбив область определения этой величины на конечное число участков [8].

Узлами называются искомые непрерывные величины, определяемые в отдельных точках области, ограничивающих эти элементы. Область может быть линейной, плоской или пространственной, соответственно, элементы области будут линейными, плоскими или объемными. Исходная непрерывная величина аппроксимируется с достаточной точностью при разбиении на элементы треугольной формы.

Совокупность всех элементов, имеющих общие узловые точки, и составляет всю область. В каждом элементе искомая функция аппроксимируется линейно [9].

Таблица 2

## Индуктивность экспериментальной установки

Зазор $\delta$ , мм	10	50	75	100	Кратность $k_L$
Индуктивность, Гн	35	23,3	16,0	8,7	4

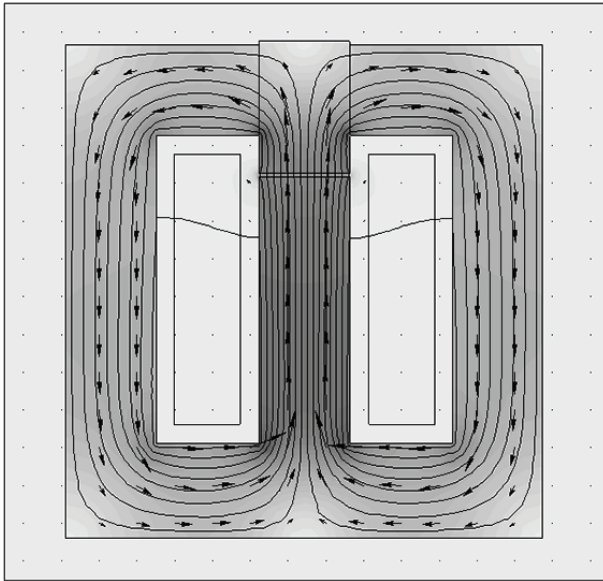


Рис. 3. Магнитное поле при зазоре 10 мм

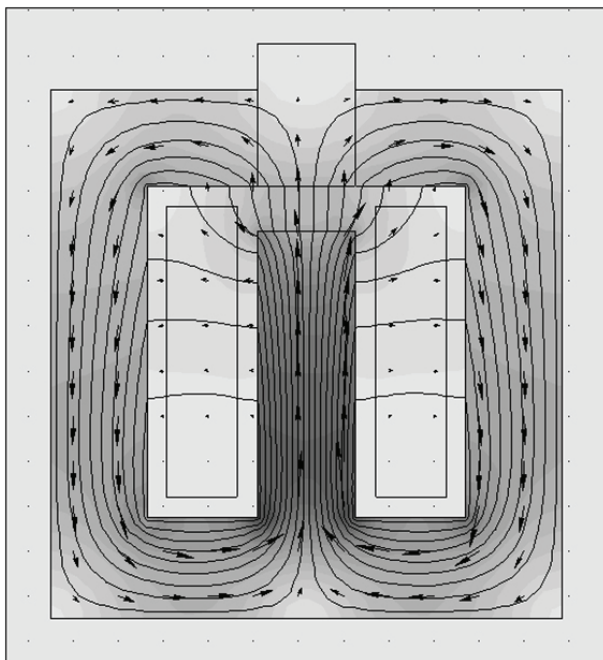


Рис. 4. Магнитное поле при зазоре 100 мм

Таблица 3

## Индуктивность с учетом рассеивания

Зазор $\delta$ , мм	10	50	75	100	Кратность $k_L$
Индуктивность, Гн	60	17,3	13,7	12	5

Таблица 4

## Нормированные результаты исследования

Зазор $\delta$ , мм	Индуктивность, Гн		
	Эксперимент	Расчет	Моделирование
10	35	35	35
50	23,3	7	10
75	16	4,6	7,9
100	8,7	3,5	6,8
Кратность $k_L$	4	10	5

Таблица 5

Зависимость диапазона регулирования индуктивности от  $S$  шунта

Зазор $\delta$ , мм	10	50	100	Кратность $k_L$
	Индуктивность, Гн			
Базисная $S=0,026$	60,61	17,32	11,98	5,05
Расширенная $S=0,031$	62,96	17,99	11,87	5,3
Суженая $S=0,021$	54,32	16,72	12,01	4,5

Картина магнитного поля при зазоре в 0,01 и 0,1 м представлена на рис. 3 и 4 соответственно. Потокосцепление и индуктивность определялись исходя из формулы (1).

Расчет индуктивности производился с помощью мастера индуктивности встроенной функции в программе ELCUT. Мастер индуктивности позволяет рассчитать собственную и взаимную индуктивность проводников и катушек в задачах магнитного поля переменных и постоянных токов [10]. Модели, содержащие несколько проводящих контуров, обтекаемых различными токами, потокосцепление с одним из них может быть вычислено по формуле (4)

$$\Psi_k = L_{kk} i_k + \sum_n M_{nk} i_n \quad (4)$$

где  $L_{kk}$  — собственная индуктивность контура  $k$ , Гн;  $M_{nk}$  — взаимная индуктивность между контурами  $n$  и  $k$ , Гн;  $i_n$  — полный ток в контуре  $k$ , А.

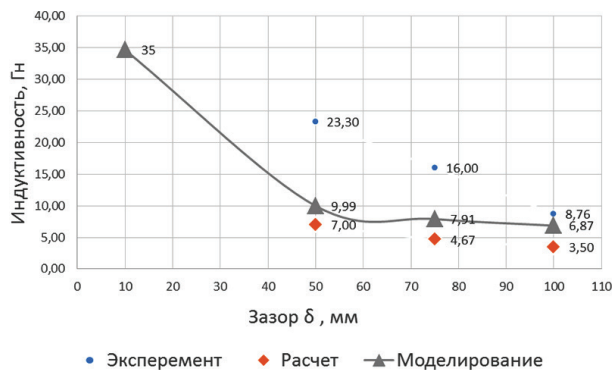


Рис. 5. Зависимость индуктивности от зазора

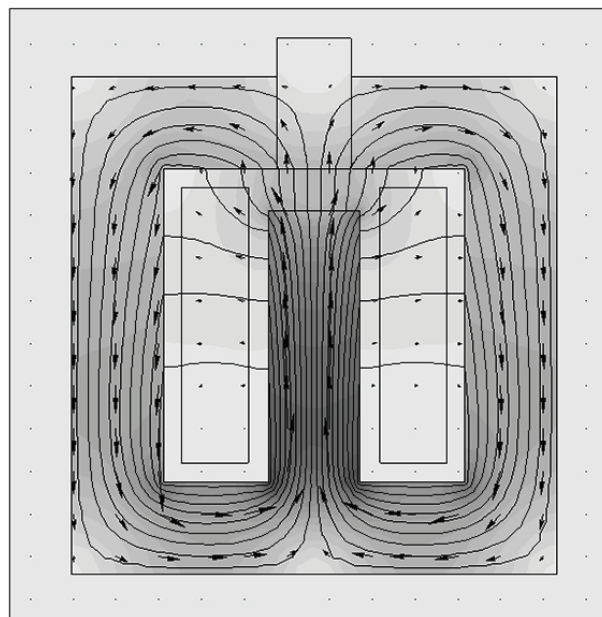


Рис. 6. Магнитное поле при уменьшении площади шунта

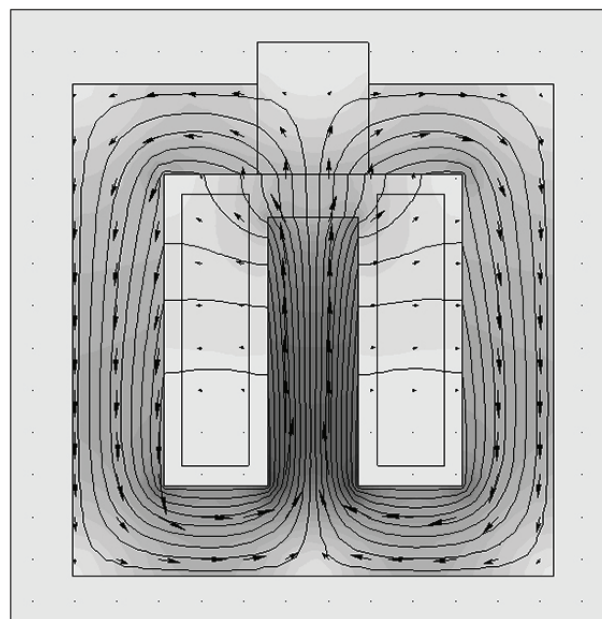


Рис. 7. Магнитное поле при увеличении площади шунта



Результаты расчета при моделировании приведены в табл. 3.

Кратность изменения индуктивности составила пять, что весьма близко к результату при эксперименте. Погрешность объясняется не учётом бокового рассеивания.

Для более наглядного сравнения полученные результаты были нормированы к экспериментным данным и приведены в табл. 4, а также на рис. 5.

Расчет по теории магнитной цепи предполагал компенсацию емкостных токов на напряжении 35 кВ от 18,38 до 1,85 А. Емкостный ток определялся по формуле (5):

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}, \quad (5)$$

где  $U_\phi = 20207$  — фазное напряжение, В;  $\omega = 314$  — угловая скорость, рад/с;  $L$  — индуктивность, Гн.

При эксперименте и расчете методом магнитного поля были получены токи от 7,34 до 1,85 А, что не удовлетворяло требования заказчика.

Поэтому следующим этапом должна быть оптимизация магнитной цепи по теории электромагнитного поля, а в дальнейшем — с учетом трехмерности реальной задачи [11].

В качестве критерия оптимизации было принято максимальное значение диапазона регулирования индуктивности при изменении площади сечения магнитного шунта (табл. 5). Были произведены варианты расчета при базисной площади шунта  $S=0,026$  м<sup>2</sup>, с расширением  $S=0,031$  м<sup>2</sup>, а также сужением  $S=0,021$  м<sup>2</sup>. В результате расширения магнитного шунта диапазон увеличился на 5 %, а при сужении уменьшился на 12 %, чего недостаточно для существенного изменения диапазона регулирования. Магнитный шунт был изменен на максимально доступную ширину, насколько позволял внутренний диаметр катушки. Модели при зазоре 0,1 м представлены на рис. 6, 7.

#### Выводы.

1. Расчет магнитной системы реактора при не учёте рассеивания неприемлем.

2. Учет рассеивания для плоскопараллельной задачи дает результат, близкий к экспериментальной установке с погрешностью в  $\epsilon = 20$  %.

3. Учет бокового рассеивания при расчете должен улучшить результат, что требует решения трехмерной задачи.

4. Оптимизация данной конструкции при изменении площади магнитного шунта не дает существенных результатов.

5. Увеличение регулируемого диапазона возможно только при изменении конструкции.

#### Библиографический список

1. Черников А. А. Компенсация емкостных токов в сетях с незаземленной нейтралью. М.: Энергия, 1974. 96 с.

2. РД 34.20.179-1987. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ. М.: СПО Союзтехэнерго, 1988. 26 с.

3. О федеральной целевой программе «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы»: постановление Правительства Российской Федерации № 426 от 21 мая 2013 г. URL: <http://docs.cntd.ru/document/499022223> (дата обращения: 20.11.2017).

4. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.

5. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: справоч. кн. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1986. 488 с.

6. Кислицин А. Л., Крицштейн А. М., Солнышкин Н. И., Эрнст А. Д. Расчет магнитных полей электрических машин методом конечных элементов. Л.: Изд-во Саратовского ун-та, 1980. 166 с.

7. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике: моногр. / пер. с англ. под ред. Б. Е. Победри. М.: Мир, 1975. 541 с.

8. Розин Л. А. Метод конечных элементов // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6, № 4. С. 120–127.

9. Черных И. В. Моделирование устройств индукционного нагрева с помощью пакета ELCUT // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 2. С. 4–8.

10. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8: рук. пользователя. СПб.: Изд-во ПК TOP, 2010. 345 с. URL: <http://old.exponenta.ru/soft/others/elcut/Manual.pdf> (дата обращения: 28.11.2017).

11. Чувиков Д. А., Казакова Н. А., Варламов О. О. [и др.]. Анализ технологий трехмерного моделирования и создания 3D объектов для различных интеллектуальных систем // Автоматизация и управление в технических системах. 2014. № 2 (10). С. 84–97. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-9.

**ЭРНСТ Александр Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».

Адрес для переписки: ua9mr@mail.ru

**ПЕТРОВ Константин Алексеевич**, магистрант гр. ЭЭМ-161 факультета «Элитное образование и магистратура».

Адрес для переписки: kostya33.07@mail.ru

**ЕРЕМИН Евгений Николаевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Машиностроение и материаловедение», декан машиностроительного института.

Адрес для переписки: weld\_techn@mail.ru

#### Для цитирования

Эрнст А. Д., Петров К. А., Еремин Е. Н. Влияние рассеивания магнитного поля на параметры регулируемого дугогасящего реактора // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 35–39. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-35-39.

Статья поступила в редакцию 18.12.2017 г.

А. Д. Эрнст, К. А. Петров, Е. Н. Еремин