



Российская Академия Наук

ТРУДЫ

Кольского научного центра РАН

1/2011 (4)

ЭНЕРГЕТИКА
выпуск 2

Апатиты
2011

Российская Академия Наук

ТРУДЫ

1/2011(4)

издается с декабря 2010 г.

УДК 621.314

ISBN 978-5-91137-151-7

Кольского научного центра РАН

Главный редактор - академик В.Т.Калинников
Заместитель главного редактора
д.г.-м.н. В.П.Петров
.....д.т.н. Б.В.Ефимов

Редакционный совет:

академик Г.Г. Матишов, академик Н.Н.Мельников,
академик Ф.П.Митрофанов, чл.-корр. В.К.Жиров,
чл.-корр. А.И.Николаев, д.г.-м.н. Ю.Л.Войтеховский,
д.э.н. Ф.Д.Ларичкин, д.т.н. В.А.Маслобоев,
д.т.н. В.А.Путилов, д.ф.-м.н. Е.Д.Терещенко,
к.г.-м.н. А.Н.Виноградов (ответственный секретарь)

ЭНЕРГЕТИКА

выпуск 2

Редколлегия серии «Энергетика»

д.т.н. Б.В.Ефимов (отв. ред., энергетика),
д.т.н. А.А.Жамалетдинов (электрофизика),
д.т.н. Н.В.Коровкин (теоретическая электротехника),
д.т.н. Ф.Х.Халилов (электроэнергетика),
к.т.н. Б.Г.Баранник (энергетика),
к.т.н. Н.И.Гумерова (электроэнергетика)
к.т.н. А.Н.Данилин (электроэнергетика),
к.т.н. В.А.Минин (возобновляемые источники энергии),
к.т.н.Ю.М.Невретдинов (электроэнергетика),
к.т.н. В.Н.Селиванов (электроэнергетика),
к.т.н. А.Ф.Усов (электротехнологии)

184200, Мурманская область, г.Апатиты, ул.Ферсмана, д.14
Кольский научный центр РАН
Тел.(81555)79226.Факс(81555)76425
E-mail: admin@admksk.apatity.ru <http://www.kolasc.net.ru>

СОДЕРЖАНИЕ

	Вступление.....	Стр. 7
	ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ.....	9
Кадомская К.П., Кандаков С.А., Лавров Ю.А., Степанов И.М., Шевченко С.С.	Электромагнитная совместимость каналов передачи электроэнергии с биосферой.....	9
Карпов А.С., Невретдинов Ю.М., Фастий Г.П.	Разработка требований к устройствам защиты подземных проводных коммуникаций от опасных влияний аварийных токов в действующей сети.....	29
Залесова О.В., Якубович М.В.	Расчет наведенного напряжения на отключенной ЛЭП с помощью программы FEMM.....	37
	ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ.....	43
Ефимов Б.В., Гумерова Н.И., Стогова Я.А.	Анализ деформации грозовых волн при их распространении по ВЛ на расстояние более 100 км.....	43
Халилов Ф.Х., Гумерова Н.И., Хохлов Г.Г.	Оценка степени влияния допущений на результаты моделирования переходных процессов при ударах молнии в воздушные линии электропередачи.....	60
Гумерова Н.И., Ефимов Б.В.	Распространение грозовых волн в многопроводной коронирующей линии, подвешенной над идеально проводящей землей.....	66
Невретдинов Ю.М., Власко Д.И.	Исследование защиты подстанции 150 кВ от грозовых волн с учетом реальных заземлителей опор ЛЭП на подходах.....	79
Токарева Е.А., Фастий Г.П., Карпов А.С., Власко Д.И., Домонов А.П.	Обследование технического состояния воздушных ЛЭП, эксплуатируемых в Кольском регионе.....	89
Куклин Д.В.	Применение метода конечных разностей во временной области для расчета волновых процессов в протяженных подземных проводниках.....	100
Колычев А.В., Боровских А.Н.	Регистратор срабатываний нелинейных ограничителей перенапряжений на основе пояса Роговского.....	107

Халилов Ф.Х., Хохлов Г.Г.	Выбор модели опоры ВЛ 35-220 кВ при анализе грозových перенапряжений.....	112
Халилов Ф.Х., Попова Ю.С., Хохлов Г.Г.	Обоснование установки ОПН на ВЛ 35-110 кВ нефтяной и газовой промышленности.....	118
	ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	128
Кузнецов Н.М.	Рациональное электропотребление на горных предприятиях	128
Веселов А.Е., Ярошевич В.В., Токарева Е.А., Фастий Г.П.	Разработка комплекса энергосберегающих мероприятий в промышленных распределительных электрических сетях напряжением 6-10 кВ.....	135
	ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ.....	150
Рожкова А.А.	Перспективы участия ветровых энергетических установок в энергоснабжении г.Островной на побережье Баренцева моря.....	150

Russian Academy of Sciences

1/2011(4)

transactions

UDK 621.314

ISBN 978-5-91137-151-7

Kola Science Centre

Editor - Academician V.T Kalinnikov

Deputy editor in chief:
Doctor of Geology and Mineralogy V.P. Petrov,
Dr of Sciences B.V. Efimov

Editorial Council:
Academicians:"

G.G Matishov, NN . Melnikov, F.P Mitrofanov.
Corresponding Member of RAS:
V.S.Zhirov, A.I. Nikolaev.
Dr.of Sciences:

Yu.L. Voitekhovskiy, F.D. Larichkin, V.A. Masloboev,
V.A. Putilov, ED . Tereshchenko,
Ph.D. A.N Vinogradov (executive secretary)

**POWER
INDUSTRY**
series 2

Editorial board of Energy Technology Series:
Dr. of Sciences:

B.V. Efimov (executive editor, energy technology),
A.A. Zhamaletdinov (electrophysics),
N.V. Korovkin (theoretical electrotechnology),
F.Ch Chalilov (power engineering),

Ph.D.:

B.G. Barannik (energy technology),
N.I. Gumerova (power engineering),
A.N. Danilin (power engineering),
V.A. Minin (renewable energy),
Yu.M. Nevretdinov (power engineering),

V.N. Selivanov (power engineering),
A.F. Usov (electrotechnology)

CONTENTS

	Pages
Introduction.....	7
ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY.....	9
Kadomskaya K.P., Kandakov S.A., Lavrov Yu.A., Stepanov I.M., Shevchenko S.S.	9
Power transmission channels electromagnetic compatibility with biosphere.....	
Karpov A.S., Nevretdinov Yu.M., Fastiy G.P.	29
Analytical solution for the electric field components in the medium location of underground utilities.....	
Zalesova O.V., Yakubovich M.V.	37
Calculation of induced voltage in deenergized transmission line by FEMM program.....	
PHYSICOTECHNICAL PROBLEMS OF POWER ENGINEERING	43
Efimov B.V., Gumerova N.I., Stogova Ya.A.	43
Analysis of deformation of surge-wave propagated in transmission line over a distance greater than 100 km.....	
Khalilov F.Kh., Gumerova N.I., Hochlov G.G.	60
Estimation of influence of assumptions on results of modeling of transient responses when lightning strikes transmission line.....	
Gumerova N.I., Efimov B.V.	66
Propagation of lightning surge in the multiwire line with corona above an ideally conducting earth.....	
Nevretdinov Yu.M., Vlasko D.I.	79
Research of 150 kV substation protection from lightning waves with a glance real power line pole grounding electrode at approaches.....	
Tokareva E.A., Fastiy G.P., Karpov A.S., Vlasko D.I., Domonov A.P.	89
Survey of technical condition of overhead transmission lines, operated in the Kola region.....	
Kuklin D.V.	100
Electromagnetic modeling of long buried thin wires by using finite-difference time-domain method.....	
Kolychev A.V., Borovskykh A.N.	107
The surge arrester counter based on the Rogowski coil.....	
Khalilov F.Kh., Hochlov G.G.	112
Selection of transmission line 35-220 kV tower model for lightning surges analysis.....	

Khalilov F.Kh., Popova Yu.S., Hochlov G.G.	Substantiation of installation of arresters overhead 35-130 kV lines of oil and gas industry.....	118
	ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY CONSERVATION.....	128
Kuznetsov N.M.	Rational electroenergy consumption at mining enterprises.....	128
Veselov A.E., Yaroshevich V.V., Tokareva E.A., Fastiy G.P.	Development of energy-saving measures complex in industrial distributive 6-10 kV networks.....	135
	RENEWABLE ENERGY.....	150
Rozhkova A.A.	Prospects for participation of wind energy converters in energy supply of Ostrovnoy at the Barents Sea coast.....	150

ВСТУПЛЕНИЕ

Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН (до 2005 г. Институт физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН) начиная с 1990-х гг. выпускает сборники статей, освещающих проблемы техники и физики высоких напряжений применительно к актуальным задачам электроэнергетики и электротехники.

Ряд статей по электроэнергетической тематике опубликован в сборниках "Проблемы развития энергетики Мурманской области" (1996), "Проблемы и методические основы управления развитием энергетики Баренц-региона" (1997).

Этой проблеме целиком посвящены сборники:

Переходные процессы и перенапряжения в элементах энергосистем Севера (1992);

Электрофизические проблемы надежности эксплуатации высоковольтных сетей и цепей управления (1999);

Теоретическая и экспериментальная оценка состояния высоковольтного оборудования (2002);

Физико-технические проблемы надежности эксплуатации электроэнергетических сетей (2004);

Электромагнитная совместимость и перенапряжения в высоковольтных сетях (2004);

Электрофизические проблемы надежности эксплуатации высоковольтных сетей (2005);

Технико-экономические и электрофизические проблемы развития энергетики Севера (2007);

Моделирование переходных процессов и установившихся режимов высоковольтной сети (2008);

Научно-технические проблемы развития энергетики Севера (2009).

Начиная с 2008 г. тематика расширилась. Помимо статей на определенную электроэнергетическую тематику, публикация которых стала традицией ЦФТПЭС КНЦ РАН, в сборники включались статьи, посвященные исследованию установившихся режимов в участках высоковольтных сетей. Кроме того, освещались проблемы создания аппаратуры для генерации мощных низкочастотных сигналов переменной частоты и разработки устройств диагностики высоковольтного оборудования. В 2009 г. в сборник были включены статьи, посвященные проблемам развития энергетики региона, а также вопросам энергоэффективности и энергосбережения.

Поскольку публикация сборников статей ЦФТПЭС КНЦ РАН стала регулярной, то в 2010 г. было принято решение о постоянном издании под названием «Труды Кольского научного центра РАН. Энергетика», в декабре того же года был осуществлен первый выпуск, настоящее издание является вторым выпуском.

Сведения об авторах

Карпов Алексей Сергеевич,

научный сотрудник лаборатории надежности и эффективности оборудования энергосистем Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д. 21А
эл. почта: dal_par07@ien.kolasc.net.ru

Невретдинов Юрий Масумович,

заведующий лабораторией надежности и эффективности оборудования энергосистем Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д. 21А
эл. почта: умневр@mail.ru

Фастий Галина Прохоровна,

научный сотрудник лаборатории надежности и эффективности оборудования энергосистем Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г.Апатиты, мкр.Академгородок, д. 21А
эл. почта: fastiy@ien.kolasc.net.ru

УДК 621.311

О.В.Залесова, М.В.Якубович

РАСЧЕТ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ОТКЛЮЧЕННОЙ ЛЭП С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ FEMM

Аннотация

Рассмотрено использование программы моделирования электромагнитных полей методом конечных элементов FEMM для расчёта наведённого напряжения на отключённой линии электропередачи, вызванного работой тяговой сети железной дороги.

Ключевые слова:

железная дорога, линия электропередачи, электромагнитное влияние, программа FEMM.

O.V.Zalesova, M.V.Yakubovich

CALCULATION OF INDUCED VOLTAGE IN DEENERGIZED TRANSMISSION LINE BY PROGRAM FEMM

Abstract

This paper presents an application of program for electromagnetic fields simulating by finite element method (FEMM) to calculate induced voltage in deenergized transmission line. Induced voltage caused by electric railway is considered for various ground-return current values.

Keywords:

railway, transmission line, electromagnetic influence, FEMM program.

Благодаря высокому уровню развития цифровой вычислительной техники в последнее время широкое применение получили численные методы

теории поля для расчета магнитных систем. К ним относятся метод конечных разностей (сеток), интегральный метод и метод конечных элементов. Последний используется во многих компьютерных программах, таких как FEMM, ANSYS, Comsol Multiphysics, ELCUT и др. В основе расчетов лежат дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных.

Конечно-элементные программы условно делят на две группы: программы, специально предназначенные для расчета магнитных полей, и программы общего назначения, в которых метод конечных элементов используется для компьютерного моделирования разнообразных физических процессов и явлений [1]. Программы первой группы предназначены только для счета двумерных полей. Программы второй группы обладают гораздо большими возможностями (решение трехмерных задач), но они сложны в освоении и, кроме того, отличаются высокой стоимостью, поскольку применяются промышленными предприятиями [2].

Остановимся более подробно на программе FEMM (магнитные расчеты методом конечных элементов). Она относится к первой группе и является общедоступной.

Данная программа позволяет на персональном компьютере создать модель для расчета плоскопараллельного или плоскомеридианного стационарного и квазистационарного магнитного и стационарного электростатического полей, построить их картины и определить полевые и цепные параметры. С помощью FEMM несложно выполнять интерактивные расчеты, задавая числовые значения параметров модели, а при необходимости можно воспользоваться возможностями пакетного режима, применяя интерпретируемый язык программирования Lua [<http://www.lua.ru>]. В работе [1] автор отмечает, что неудобство, связанное с необходимостью знания данного языка программирования, можно обойти с помощью программы Mathematica с использованием интерфейса MathLink.

Задачи расчета полевыми методами могут быть прямыми и обратными. При прямой задаче расчета поля считаются известными размеры и характеристики всех материалов и сред. Считаются также заданными скалярные магнитные потенциалы или векторные потенциалы на границах поля или их производные по нормали к границам. В совокупности это – граничные условия (Неймана, Дирихле либо смешанные), необходимые для однозначности решения. В зависимости от типа электромагнитного поля по значению скалярного магнитного потенциала φ_m либо по значению векторного потенциала \mathbf{A} определяются напряженность магнитного поля \mathbf{H} и магнитная индукция \mathbf{B} . Затем по известным уравнениям теории поля определяются интегральные характеристики рассматриваемой системы. Обратная задача заключается в определении источников поля по заданному распределению параметров [1].

В рамках данной статьи мы рассмотрим возможность решения задачи электромагнитной совместимости электрифицированной железной дороги переменного тока и линий электропередачи (ЛЭП) высокого напряжения с помощью конечно-элементной программы FEMM.

В качестве примера была выбрана модель сближения ЛЭП с однопутным участком железной дороги, электрифицированной на переменном токе по

системе 1×25 (рис.1). Данный участок железной дороги имеет одностороннее питание. Длина сближения ЛЭП и контактной сети $l = 30$ км, ширина сближения $b = 1.5$ км. Расчёт ведётся для момента, когда электровоз расположен в 30 км от питающей его тяговой подстанции. Ток в контактном проводе составляет 200 А. Обратный ток равен ему по модулю и противоположен по фазе. Удельное сопротивление грунта $\rho_3 = 100$ Ом·м, рельса – $\rho_p = 0.1$ мкОм·м. Высота подвеса контактного провода составляет 5 м, провода ЛЭП – 20 м. Диаметр каждого провода 0.02 м. Размер сечения эквивалентного рельса 0.1×0.2 м².

Создание модели в программе FEMM начинается с диалога Problem Definition. Здесь выбирается тип задачи, в нашем случае – Planar (расчет и построение плоскопараллельного поля), единицы измерения – метры, частота – 50 Гц и глубина (протяжённость модели в направлении, перпендикулярном поперечному сечению, в котором рассматривается картина поля) – 30 км. Затем создаются элементы модели: воздух; провод контактной сети (два блока); рельсы; провод ЛЭП; земля, по которой проходит обратный ток контактной сети (полукруг b радиусом $r = 500$ м), и удаленная земля, в которую обратный ток не проникает (рис.2). Поскольку ток, питающий электровоз, возвращается на тяговую подстанцию как по рельсам, так и по земле, то для удобства задания контуров, по которым протекает тяговый и обратные токи, контактный провод разделен на два блока. По той же причине рельсы представлены как один блок.

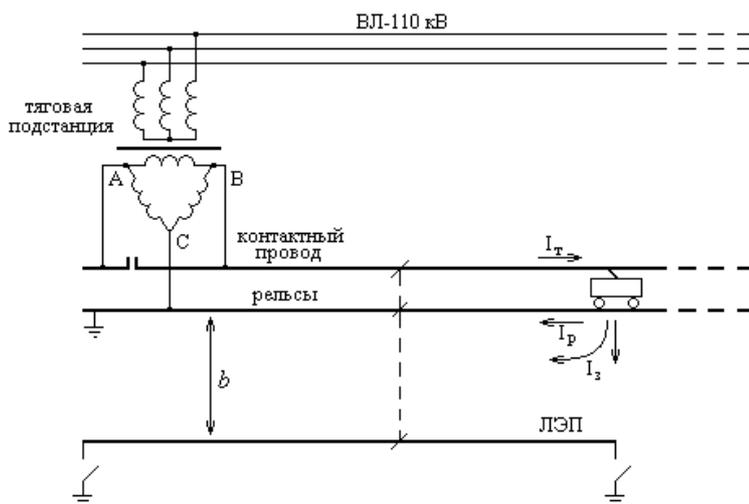


Рис.1. Схема сближения ЛЭП и влияющего участка железной дороги

Каждый блок построен с помощью опорных точек, соединенных прямыми линиями и дугами окружностей. Свойства материалов, из которых состоят блоки, задаются в пункте Properties главного меню в папке Materials.

Ввод свойств контуров осуществляется в диалоге Property Definition (пункт Properties главного меню папка Circuits). В данной модели заданы два контура с величиной тока, отличной от нуля: “контактный провод – рельс” и “контактный провод – земля”. Для блоков “провод линии электропередачи” и “удаленная земля” заданы контуры, в которых значение тока принято равным нулю.

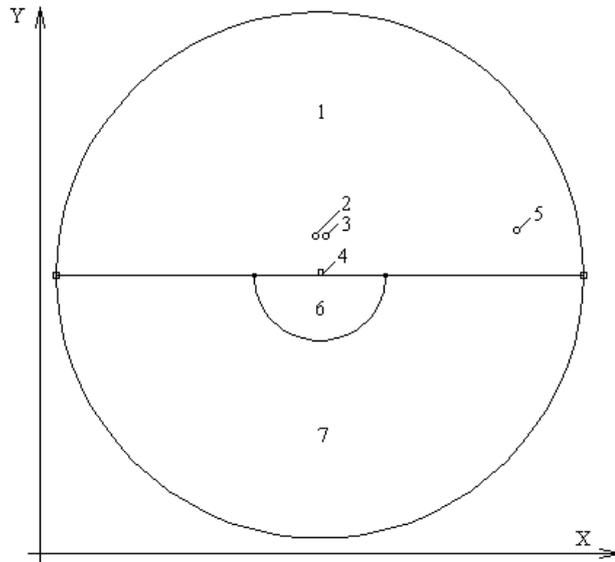


Рис.2. Модель сближения ЛЭП с влияющим участком железной дороги в программе FEMM:
 1 – воздух; 2 и 3 – контактный провод; 4 – рельсы; 5 – провод ЛЭП;
 6 – земля, в которой протекает обратный ток тяговой сети;
 7 – удаленная земля

Далее осуществляется ввод граничных условий. В программе FEMM предлагаются несколько способов задания открытых границ модели, поле которой занимает всё бесконечно протяжённое пространство. В нашем случае удобно использовать смешанные граничные условия вида:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial r} + C_0 \cdot A + C_1 = 0.$$

Бесконечно удалённые границы можно выполнить в виде круга с заданием следующих коэффициентов:

$$C_1 = 0 \text{ и } C_0 = 1/(\mu_0 \cdot r_0),$$

где μ_0 – магнитная постоянная, r_0 – радиус круга, м. В рассматриваемом примере ширина сближения линии с железной дорогой составляет 1.5 км, поэтому радиус круга r_0 примем равным 2000 м. Таким образом, для нашего случая получаем коэффициент $C_0 = 398$.

После создания геометрической модели строится сетка конечных элементов с помощью программы Triangle, далее запускается программа Fkern, выполняющая анализ модели. Расчётная область представляет собой круг диаметром 4000 м, в центре которого расположен блок "рельс".

При просмотре результатов расчета FEMM строит картину поля из трубок магнитного потока, число которых можно менять в диапазоне от 4 до 999. Для квазистационарного магнитного поля по умолчанию изображаются линии вещественной составляющей векторного магнитного потенциала (Real component of A) с возможностью переключения на линии мнимой составляющей магнитного потенциала (Imaginary component of A). На рис.3 представлена

картина магнитного поля (Real component of A) для рассматриваемой модели в случае распределения обратного тока поровну между рельсами и землей.

Программа FEMM позволяет также вычислять комплексные значения токов, напряжений, мощностей и др. интегральных характеристик для каждого контура модели.

Нами были проведены расчёты наведённого напряжения на отключённой линии для различных вариантов распределения обратного тягового тока между рельсами и землей. В соответствии с распределением обратного тока контактной сети коэффициенты защитного действия рельсов $K_{зд}$ принимались равными: в первом случае – 0.4 (обратный ток в рельсе – 60%, в земле – 40%), во втором случае – 0.5 (обратный ток в рельсе и в земле составил по 50%) и в третьем случае – 0.6 (обратный ток в рельсе – 40%, в земле – 60%). Результаты расчетов приведены в таблице, они аналогичны результатам, полученным при расчётах методами теории цепей.

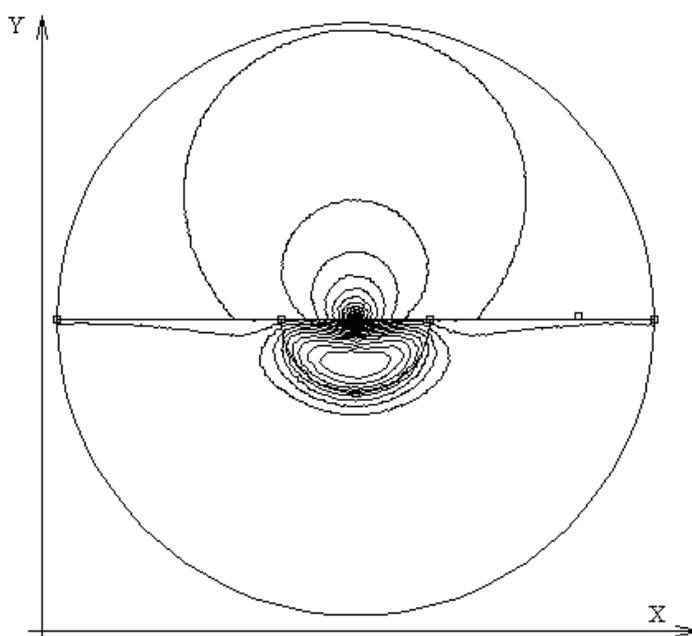


Рис.3. Картина магнитного поля (линии действующей составляющей векторного магнитного потенциала)

Наведенное напряжение на ЛЭП

№	$K_{зд}$	Ток в рельсе I_p, A	Ток в земле I_z, A	Модуль навед. напряжения $ U_{нав} , B$
1	0.4	120	80	22.0
2	0.5	100	100	27.5
3	0.6	80	120	32.9

Таким образом, программа FEMM позволяет оценить величину наведенного напряжения на полностью изолированной ЛЭП, имеющей участок сближения с железной дорогой, в момент, когда электровоз находится на противоположном конце участка сближения относительно тяговой подстанции. С её помощью можно увидеть картину распределения магнитного поля в “поперечном сечении” в произвольной точке, достаточно удалённой как от электровоза, так и от тяговой подстанции. Недостатком программы в нашем случае является невозможность рассмотрения различных вариантов заземления подверженной влиянию линии по концам на сопротивления подстанций и в месте ремонта. Соответственно в таких случаях нельзя определить величину наведенного напряжения на проводе ЛЭП в любой её точке и увидеть распределение этой величины на всем протяжении линии.

Поэтому для дальнейшего изучения проблемы электромагнитной совместимости железной дороги, электрифицированной на переменном токе и проходящей вблизи неё линии электропередачи, с помощью численных методов расчета полей следует обратиться к программам, позволяющим решать трехмерные задачи электромагнитного поля (например, ANSYS).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 09-08-00276 "Теоретическое и экспериментальное исследование наведённых напряжений и токов проводных воздушных и кабельных линий, находящихся в зоне влияния разветвлённой высоковольтной сети".

Литература

1. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM. М.: Академия, 2005. – 336 с.
2. Селиванов В.Н. Использование программы расчета электромагнитных переходных процессов АТР-ЕМТР в учебном процессе // Вестник МГТУ. 2009. Т.12, № 1. С. 107-112.

Сведения об авторах

Залесова Ольга Валерьевна,

младший научный сотрудник лаборатории высоковольтной электроэнергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А

Якубович Марина Викторовна,

научный сотрудник лаборатории высоковольтной электроэнергетики и технологии Центра физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, к.т.н.
Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкр. Академгородок, д. 21А
эл.почта: yakubovich@ien.kolasc.net.ru