

Рубрика 2. НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ
Направление – Электротехнология и электрофизика

УДК [UDC] 519.876.5
DOI 10.17816/transsyst20228389-104

© **А.В. Шандыбин**

Ростовский государственный университет путей сообщения
(Ростов-на-Дону, Россия)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ТРАНСПОРТНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Обоснование: Транспортный электротехнический комплекс включает множество взаимосвязанных компонентов инфраструктуры обеспечивающих безопасность функционирования всей системы. Вопросы защиты от электромагнитных влияний становятся все актуальнее с ростом интенсивности перевозок.

Цель: Оценка степени электромагнитного воздействия тяговых сетей на кабельную линию.

Материалы и методы: Производится математическое моделирование с применением метода конечных элементов и программного пакета COMSOL Multiphysics.

Результаты: Получены распределения токов в двух типовых сетях тягового питания с учетом наличия в зоне влияния кабельной линии. Определены порождаемые электрические и магнитные поля и параметры наводимого на оболочку кабельной линии тока.

Заключение: Применение математического моделирования позволяет разложить влияния на составляющие факторы и раскрыть внутреннюю структуру механизма взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса. Результаты моделирования позволяют уверенно фиксировать на оболочке кабеля наведенные токи от силовых электромагнитных полей. Данные исследования могут быть использованы при разработке современных средств защиты.

Ключевые слова: метод конечных элементов, численные методы, электромагнитные влияния, математическое моделирование.

Rubric 2. SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS
Field – Electrotechnology and Electrophysics

© **A.V. Shandybin**

Rostov State Transport University
(Rostov-on-Don, Russia)

THE SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION OF THE COMPONENTS OF TRANSPORT ELECTROTECHNICAL COMPLEX

Background: The transport electrical complex includes many interconnected infrastructure components that ensure the safety of the operation of the entire system. The issues of protection against electromagnetic influences are becoming more relevant with the growth of traffic intensity.

Aim: Evaluation of the degree of electromagnetic impact of traction networks on the cable line.

Materials and Methods: Mathematical modeling is carried out using the finite element method and the COMSOL Multiphysics software package.

Results: Current distributions in two typical traction power networks are obtained, taking into account the presence of a cable line in the zone of influence. The generated electric and magnetic fields and the parameters of the current induced on the sheath of the cable line are determined.

Conclusion: The use of mathematical modeling makes it possible to decompose the influences into constituent factors and reveal the internal structure of the mechanism of interaction between the components of the transport electrical complex. The simulation results allow us to confidently fix the induced currents from the force electromagnetic fields on the cable sheath. These studies can be used in the development of modern means of protection.

Key words: finite element method, numerical methods, electromagnetic influences, math modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Среди компонентов электротехнических комплексов железнодорожного транспорта тяговая сеть является основным источником электромагнитных влияний на все смежные системы и линии коммуникаций [1]. Значительная протяженность железных дорог и возрастающая со временем интенсивность грузоперевозок постепенно осложняют электромагнитную обстановку и делают актуальными вопросы исследования степени влияний электромагнитных полей и разработки современных мер защиты от них [2].

В свою очередь линии коммуникаций, в том числе кабельные, являются важными элементами железнодорожной инфраструктуры, отвечающими как за возможность осуществления перевозок, так и за обеспечение их безопасности.

Исследованию электромагнитных процессов в системах железнодорожного транспорта посвящено множество работ [3–5], что также подтверждает актуальность изучения данных вопросов.

МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

В основе теоретических построений основных параметров влияния электромагнитного излучения на оболочку кабеля положены следующие уравнения Максвелла [6]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial \mathbf{D} / \partial t; \quad \operatorname{rot} \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t, \quad (1)$$

где \mathbf{H} – напряжённость магнитного поля;
 \mathbf{j} – плотность электрического тока (тока проводимости);
 \mathbf{D} – электрическая индукция;
 \mathbf{E} – напряжённость электрического поля;
 \mathbf{B} – магнитная индукция.

Уравнения Максвелла (1) необходимо дополнить материальными уравнениями, связывающими напряженности электромагнитного поля с векторами электрического и магнитного смещения (индукции):

$$\mathbf{D} = \varepsilon\varepsilon_0\mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu\mu_0\mathbf{H}, \quad (2)$$

где ε_0 и μ_0 электрическая и магнитная постоянные.

В зависимости от среды действия электромагнитных полей относительные диэлектрические ε и магнитные μ проницаемости принимают различные значения. Так для воздуха они близки к единице. Относительная диэлектрическая проницаемость сред обычно лежит в пределах от единицы до сотни, а магнитная проницаемость, в зависимости от способности вещества к намагничиванию, может быть, как больше, так и меньше единицы.

Первое уравнение Максвелла представляет собой закон полного тока и при его использовании необходимо иметь граничные и начальные условия, в общем случае определяющиеся сложными некоординатными поверхностями.

Таковыми условиями описываются влияния сред на границах соприкасающихся элементов в расчетной области, а также взаимодействие с бесконечным пространством вокруг.

Из уравнений для электромагнитных полей (1), для частот близких к промышленной, с гармонической зависимостью от времени [7, 8] легко получить уравнение Гельмгольца, в общем виде представляющее следующее векторное уравнение:

$$\nabla^2\boldsymbol{\Psi} + k^2\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{f}, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\Psi}$ – искомая функция, в общем случае 4х мерный потенциал поля [9], три компоненты этого вектора характеризуют магнитное поле и одна – электрическое;

\mathbf{f} – выражение, описывающее наличие свободных зарядов в расчетной области;

k^2 – квадрат модуля волнового вектора:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2}. \quad (4)$$

При расчете электромагнитных полей электротехнических систем уравнение (3) часто дополняют однородным условием Неймана, определяющим значение нормальной производной на границе равным нулю, и граничным условием Дирихле. Последнее описывает априори известные значения искомой функции на границе области.

Учитывая, что k^2 для электротехнических комплексов, использующих промышленные частоты, принимает величину ничтожно малую ($\sim 10^{-12}$), то уравнение Гельмгольца вырождается в уравнение Пуассона:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = f(x, y, z), \quad (5)$$

а в случае отсутствия в расчетной области источников, т.е. $f(x, y, z) = 0$, в уравнение Лапласа:

$$\nabla^2 \psi(x, y, z) = 0. \quad (6)$$

Для решения задачи распределения электромагнитного поля в электротехническом комплексе может быть применено множество различных методов [10]. Их можно подразделить на аналитические – дающие решение в явном виде, численные – вычисляющие значения искомых функций с привязкой к конечному набору координатных точек и численно-аналитические. В последнем случае результат ищется в виде некоторых аналитических функций для которых численно производится расчет удовлетворения граничным условиям.

Применение аналитических методов является возможным лишь для электротехнических комплексов простейшей конфигурации, представляющих академический интерес и преимущественно хорошо известных. Однако получаемые при их использовании решения в явном виде имеют наивысшую точность и могут быть использованы с целью верификации остальных методов.

Численные методы, в свою очередь, получили широкое распространение в настоящее время ввиду высокой адаптивности к условиям и ограничениям практических и научных задач, а также из-за существенной синергии от развития цифровых технологий. Данные методы моделирования электромагнитных полей подразделяются на интегральные и дифференциальные [11]. К интегральным относятся методы пространственных интегральных уравнений и различные формулировки метода граничных элементов.

В свою очередь методы конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ) относятся к дифференциальным методам. При этом в реализации МКЭ сложнее МКР, что компенсируется предоставляемыми преимуществами. Так МКЭ позволяет:

- производить вычисления для стационарных и нестационарных задач с расчетной областью произвольной формы, что часто необходимо при моделировании сложных реальных объектов [6];
- исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- для расчетов взаимосвязанных систем и решения физических задач из разных областей использовать построенную сетку без ее изменения.

Помимо этого, существует возможность варьирования размеров конечных элементов в зависимости от требуемой точности вычислений

[12]. Эти и другие преимущества позволяют МКЭ быть одним из ведущих методов численного решения физических задач.

В настоящее время разработано множество программных комплексов (Ansys, MSC Nastran, Marc, Comsol Multiphysics и др.), использующих численные методы для широкого спектра моделируемых задач [8]. Применение метода конечных элементов в подобных программах стало особенно популярным после разработки алгоритмов автоматической генерации сетки, таких как триангуляция Делоне, позволяющих раскрыть и использовать значительный потенциал совместного использования МКЭ и современных вычислительных средств.

Таким образом, с целью научных исследований сложных электротехнических комплексов целесообразнее использовать современные программные вычислительные пакеты, которые позволят не только рассчитать моделируемый объект близко к реальному, но и произвести изучение его возможных модификаций с целью улучшения интересующих технических характеристик.

МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЙ

С целью оценки степени электромагнитного влияния железнодорожной тяговой сети на смежную кабельную линию произведено математическое моделирование участка железной дороги, профиль которой показан на Рис. 1.

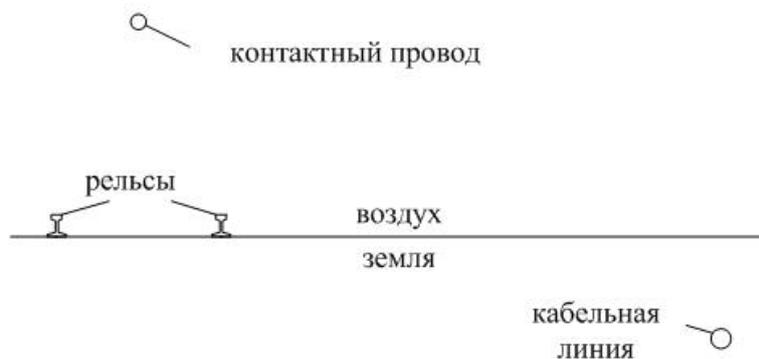


Рис. 1. Модель участка железной дороги

В качестве системы питания на участке выбрана наиболее распространенная – система переменного тока 27,5 кВ. Данная система с точки зрения влияния создает несбалансированное электромагнитное поле, т.к. в качестве прямого проводника используется контактный провод, подвешенный на опорах на высоте 6 м над землей, а обратными являются рельсы. В зону действия порождаемого электромагнитного поля попадает кабельная линия, расположенная на глубине 1 м под землей и отнесенная от крайнего рельса на 5 м. Модель может иметь любые внешние

геометрические границы, так как расчет производится с применением МКЭ.

В качестве источников электромагнитного влияния, как было сказано выше, выступают контактный провод и рельсы. Контактный провод для модели выполнен медным проводником круглого сечения с радиусом 5,6 мм, что эквивалентно по сечению медному фасованному контактному проводу МФ-100, с удельным электрическим сопротивлением 0,0177 мкОм×м.

Каждый рельс в модели выполнен из стали с соблюдением основных геометрических размеров для марки Р-50. Расстояние между ними 1520 мм. Удельное электрическое сопротивление стали принято равным 0,12 мкОм×м.

Воздух по параметрам соответствует идеальному диэлектрику.

Рельсы имеют непосредственный гальванический контакт с землей, которая представлена однородной глиной. Удельное электрическое сопротивление глины 20 Ом×м. Так как в действительности рельсы размещаются на специально уложенной балластной призме, то для имитации ее наличия между подошвой рельс и землей размещен тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 0,2 м балластной призмы с удельным электрическим сопротивлением 1 кОм×м.

В качестве объекта, по которому оценивался результат воздействия генерируемого электромагнитного поля, была выбрана стальная броня кабельной линии. Данный слой является первым металлическим слоем и выполняет функции защиты как от механических повреждений, так и от влияний внешних полей. Следовательно, оказываемое на него воздействие наиболее, а их результатом является наведенный на оболочку ток. Для моделирования в качестве оболочки выбрана стальная труба с внутренним радиусом 20 мм и толщиной 1 мм. Удельное электрическое сопротивление 0,12 мкОм×м. Так как кабель находится в земле и имеет внешнюю изоляцию, то для ее имитации также использован тонкий слой с повышенным сопротивлением по параметрам соответствующий 5 мм изоляционного материала с удельным электрическим сопротивлением 73,83 Ом×м.

Включение кабельной линии в расчетную модель позволяет снизить погрешности при расчете распределения токов в тяговой сети и создаваемых электромагнитных полей, а также определить величину наведенного влияния.

Помимо указанных геометрических размеров объектов для модели также важную роль играет протяженность. Реальные железнодорожные участки, расположенные между соседними станциями, занимают десятки километров. Однако, такие размеры для математической модели с высокой степенью детализации элементов на текущем этапе развития

вычислительной техники нереализуема. В связи с чем было выполнено моделирование небольшого участка железнодорожного пути позволяющее последующую экстраполяцию результатов.

Моделирование произведено с помощью программного комплекса COMSOL Multiphysics. В данном комплексе помимо задания геометрических размеров модели и указания параметров материалов также необходимо выбрать режим вычисления и настроить соответствующие физическим процессам модули, которые в свою очередь определяют решаемые уравнения. Для вычисления исследуемой модели выбран стационарный гармонический режим с расчетами на частоте основной гармоники питающего тока, т.е. 50 Гц.

Для задания начальных условий проводники модели объединены в соответствии со схемами, приведенными на Рис. 2.

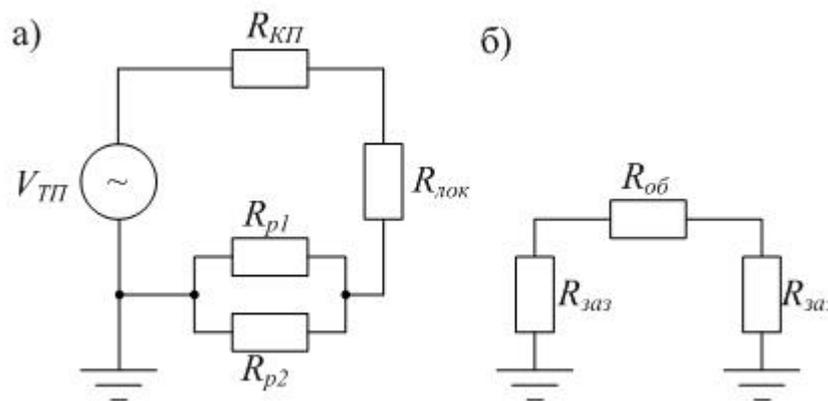


Рис. 2. Моделируемые структурные схемы:

а) цепь тягового питания (влияющая); б) подверженная влияниям цепь

В качестве параметров источника выбран переменный ток со стандартным значением напряжения для тяговой подстанции $V_{ТП} = 27,5$ кВ. Элементы $R_{КП}$, $R_{р1}$ и $R_{р2}$ представляют собой связующие терминальные элементы в которых протекающий ток управляется напряжением. Порты входов и выходов этих терминалов связаны с аналогичными портами, указанными для соответствующих элементов геометрической схемы. Для контактного провода принято обозначение $R_{КП}$, а $R_{р1}$ и $R_{р2}$ для левого и правого рельса. В качестве нагрузки цепи выступает сопротивление $R_{лок}$ эквивалентное тому, что вызывает электрические потери при прохождении тока по цепям тягового питания локомотива.

Для моделирования случая нахождения на участке только одного локомотива сопротивление $R_{лок}$ выбрано исходя из соображения, что амплитуда тока, потребляемого одним электроподвижным составом из

тяговой сети, равна 140 А. Соответственно для рассматриваемой модели $R_{\text{лок}} = 194,456 \text{ Ом}$.

Аналогичным терминальным элементом $R_{\text{об}}$ указана оболочка кабеля, которая с обоих концов участка заземлена, через эквивалентные сопротивления $R_{\text{заз}}$. Данное подключение имитирует подключение оболочки кабеля к контуру заземления при вводе его в объекты железнодорожной инфраструктуры. По требованиям к заземляющим контурам оборудования напряжением до 1000 В переменного тока сети с глухозаземленной нейтралью в однофазных сетях напряжением 220 В их сопротивление в любое время года не должно превышать 4 Ом [13]. Соответственно для рассчитываемой модели $R_{\text{заз}}$ принято равным 4 Ом. Однако при улучшении контура заземления и соответственно уменьшении значения сопротивления ток, наведенный и стекающий с оболочки кабеля, будет увеличиваться, что с одной стороны повысит эффект экранирования, а с другой, при значительных токах, может привести к возникновению аварийной ситуации от перегрева и воспламенения кабеля.

В качестве граничных условий указаны граничные условия магнитного потенциала и электрической изоляции, устанавливающие тангенциальные компоненты магнитного потенциала $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$ и нормальные компоненты электрического тока $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ равными нулю, на внешних границах надземной части модели, дополненные граничным условием магнитного потенциала и условием заземления $V = 0$ на внешних границах подземной части модели.

Для компенсации проблемы ограниченности расчетной области по ее краям, добавлены небольшие зоны, к которым применена настройка условно бесконечных областей. При расчете эти области масштабируются с коэффициентом 10^3 , что позволяет уменьшить количество симплексов и снизить искажения в пределах интересующей области с выполнением граничных условий.

Помимо рассмотренных выше параметров следует описать глубину модели. В связи с ограниченностью вычислительных ресурсов отсутствует возможность построить полноценную модель участка железной дороги между двумя станциями. Однако, в первом приближении достаточно выполнить вычисления для небольшой его части с последующим обобщением результатов. Соответственно, для рассматриваемой задачи геометрическая протяженность участка принята равной 2 м. Помимо этого, для всех элементов модели по оси z, отвечающей за протяженность, использованы дополнительные настройки масштабирования с кратностью $\times 5$. Таким образом геометрически модель прорисована для 2 м, а в математическом представлении и графическом отображении она эквивалентна участку 10 м. Это позволило существенно сократить сложность вычислений, увеличив при этом моделируемый участок. Данную процедуру возможно использовать так как в модели в пределах

рассматриваемого участка все элементы сохраняют свои относительные геометрические положения неизменными.

Следующим шагом моделирования с применением МКЭ является построение сети конечных элементов, выполняемое автоматически по задаваемым параметрам. Результат построения сетки представлен на Рис. 3. Следует отметить, что сетка строится для всего объема, однако, визуально отображаются лишь ребра конечных элементов, располагаемые на внешних границах объектов. Также на Рис. 3 видно, что размер сетки вблизи и в самих проводящих элементах существенно меньше, чем в свободном пространстве. Таким образом в МКЭ обеспечивается дополнительная экономия вычислительных ресурсов при сохранении требуемой точности вычислений [12].

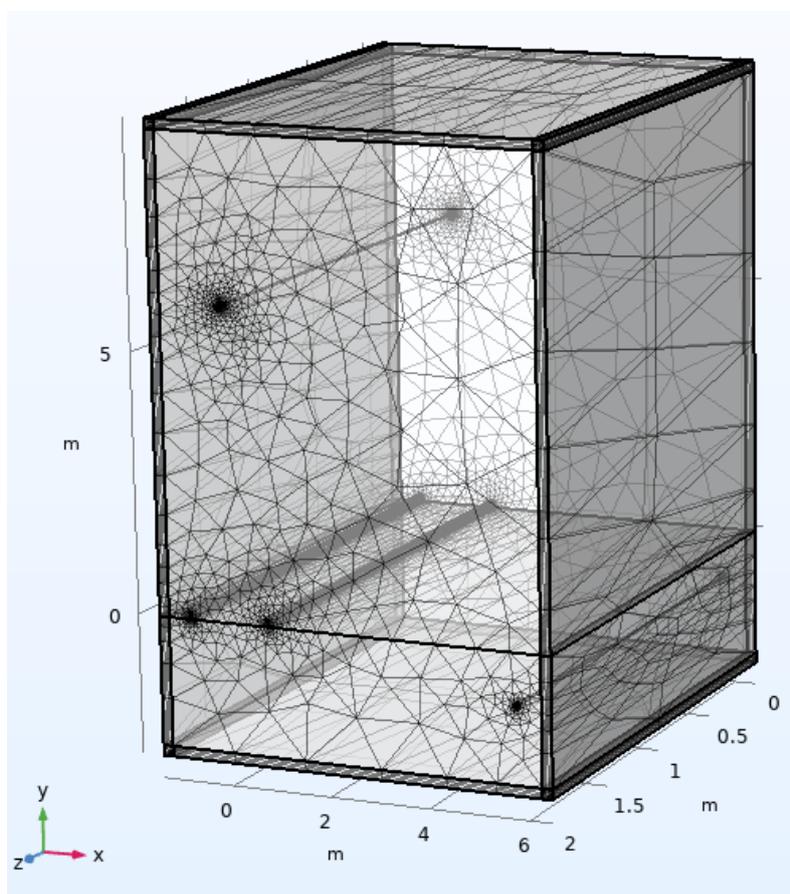


Рис. 3. Визуализация сетки конечных элементов

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результатом моделирования являются изображения нормализованной плотности магнитного потока (Рис. 4), и электрического поля (Рис. 5), а также численное распределение токов в проводниках модели.

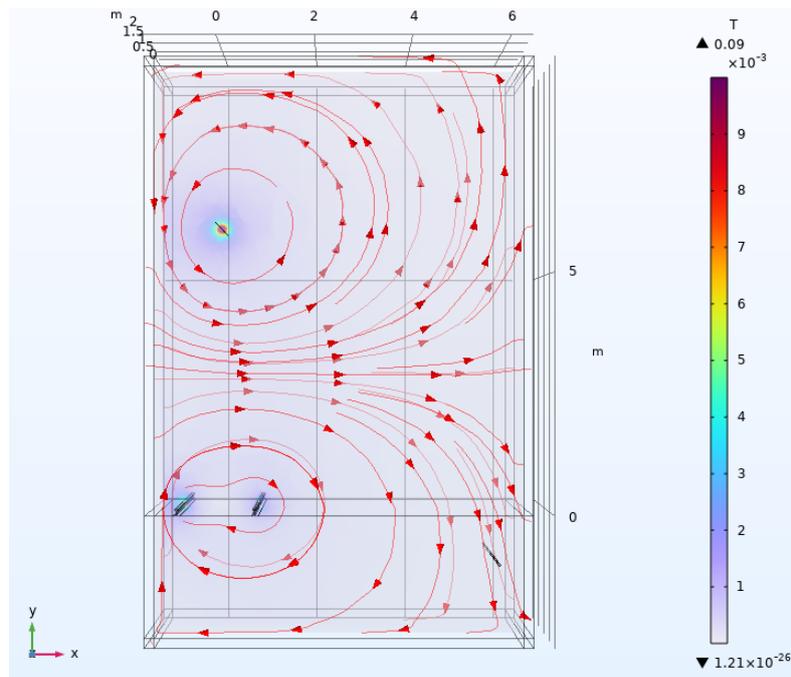


Рис. 4. Нормализованная плотность магнитного потока с линиями напряженности

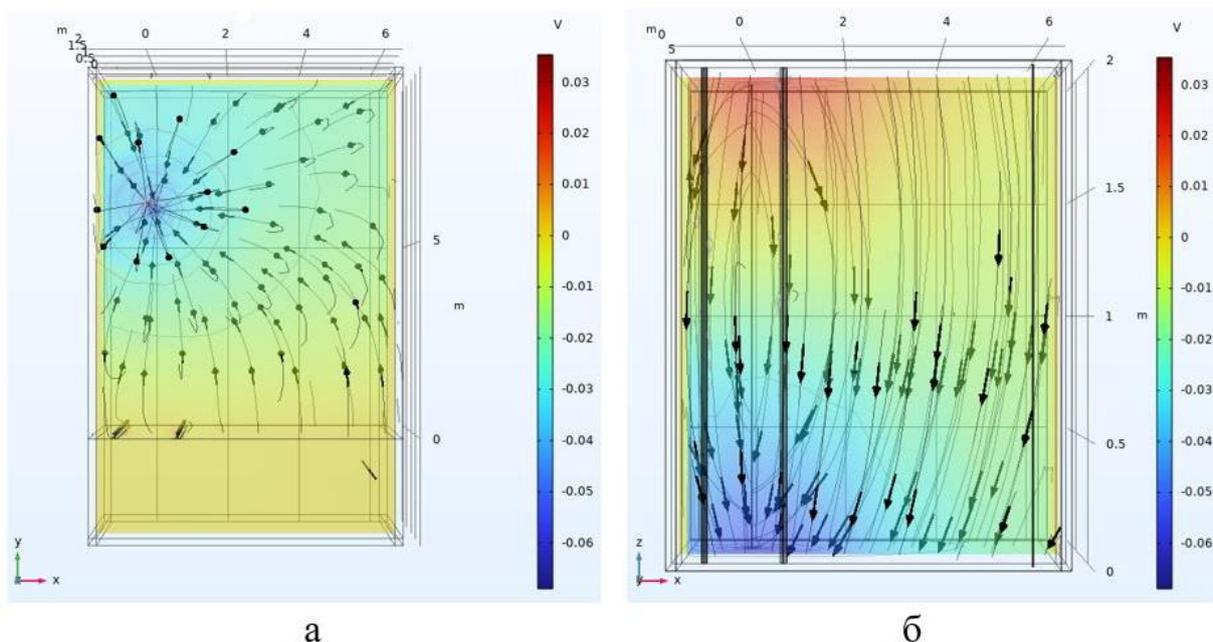


Рис. 5. Электрическое поле с линиями напряженности: а – прямой вид; б – вид сверху

По Рис. 4 видно, что токи в рельсах направлены в противоположную сторону току в контактном проводе. Их магнитные поля также направлены встречно, что иллюстрируется направлениями линий напряженности, и частично компенсируют друг друга, снижая наводимое на кабельную линию влияние. При этом основное влияние оказывает магнитное поле, создаваемое рельсами, а не поле от контактного провода. Наличие

кабельной линии в свою очередь влияет на распределение токов между рельсами. Также отметим, что земля не является помехой для магнитной составляющей воздействия.

Линии напряженности электрического поля, представленного на Рис. 5, замыкаются между началом и концом моделируемого контактного провода, а также на землю. Это обусловлено разностью потенциалов между точкой подключения источника питания с одной стороны и нагрузки с другой, вызываемое электрическими потерями в самом проводе. Земля в свою очередь является проводником с нулевым потенциалом. Таким образом влияние электрической составляющей на кабельную линию отсутствует.

Численное распределение токов в проводниках модели представлено в Табл. 1 в графе эксперимент № 1.

Таблица 1. Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы при частоте 50 Гц для двух величин питающего тока

Моделируемый проводник	Эксперимент № 1		Эксперимент № 2	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	141,36	-0,94	599,61	-3,97
Рельс первый	81,13	179,13	344,13	176,09
Рельс второй	60,23	178,98	255,48	175,95
Оболочка кабельной линии	0,725	73,99	3,07	70,96

Полученное значение тока в контактном проводе эквивалентно потреблению одиночной «электрички». При этом рассмотрено влияние лишь от одного из всех возможных источников электромагнитных излучений с расчетом лишь для одной влияющей гармоники. Реальный ток при прохождении электроподвижного состава имеет множество гармонических составляющих в широком диапазоне частот [14], образуемых в результате не идеальности преобразовательной аппаратуры локомотива, искрообразования при движении пантографа по контактному проводу, а также проблем с верхним строением железнодорожного пути. Результат воздействия такого полигармонического спектра складывается по закону суперпозиции и принимает стохастический характер.

Результат моделирования может быть экстраполирован на более протяженный участок, в пределах расстояния между двумя заземлениями смежной линии, исходя из следующих соображений: при увеличении протяженности возрастет наводимое падение напряжения между концами исследуемой линии, но также пропорционально увеличится и сопротивление материала, что в итоге даст ту же величину наведенного тока. При наличии дополнительных заземлений наводимый ток будет

секционироваться, что снизит его максимальную величину на отдельных участках между двумя соседними заземлителями.

Для сравнения в работе [15] производится моделирование движения пачки поездов по участку и приводится профиль тока поезда массой 6300 т, для которого указываются пиковые значения потребляемого тока порядка 600 А. Также в [15] выполняется расчет при одновременном движении пачек поездов в обоих направлениях.

В связи с этим произведен пересчет токов по рассматриваемой модели при нагрузке эквивалентной грузовому поезду. Результат представлен в Табл. 1 в графе эксперимент № 2. Как видно, наводимые на оболочку кабеля токи также существенно возросли.

Из полученных результатов моделирования, с учетом [15], можно сделать вывод, что наводимый на смежную линию ток имеет стохастический характер и может быть существенно выше прогнозируемых результатов в случае, например, прохождения по участку грузового электроподвижного состава, при движении пачки поездов, при одновременном прохождении поездов по участку в обоих направлениях, при наложении влияний от множества различных факторов и т.д.

Также значительный интерес представляет исследование методов снижения наводимых влияний. Одним из эффективных методов является изменение схемы питания, например, применение системы питания с экранирующим и усиливающим проводами (ЭУП).

Используемый программный комплекс позволяет гибко подстраивать модель под исследуемую задачу. Так для перевода модели на систему с ЭУП геометрическая часть была дополнена двумя медными проводниками, расположенными с внешней стороны опоры контактной сети. Усиливающий провод разместили на расстоянии 4,5 м от контактного провода и на высоте 8 м от головки рельса. Экранирующий подвесили соответственно на расстоянии 3,8 м от контактного провода и на 8,4 м над рельсами.

Схема подключения при этом была изменена следующим образом: усиливающий провод подключен параллельно к контактному, а экранирующий – к рельсам. Полученные распределения полей приведены на Рис. 6.

Численное распределение токов в проводниках модели с ЭУП для двух вариантов потребляемых токов представлено в Табл. 2.

Как видно по результатам моделирования перевод тягового питания на систему с ЭУП позволяет получить снижение наводимых на смежную линию токов в 1,92 раза, что согласуется с теоретическими положениями и в свою очередь подтверждает возможность применения МКЭ и предлагаемой модели для исследований в сфере определения наводимых влияний и разработки методов защиты от них.

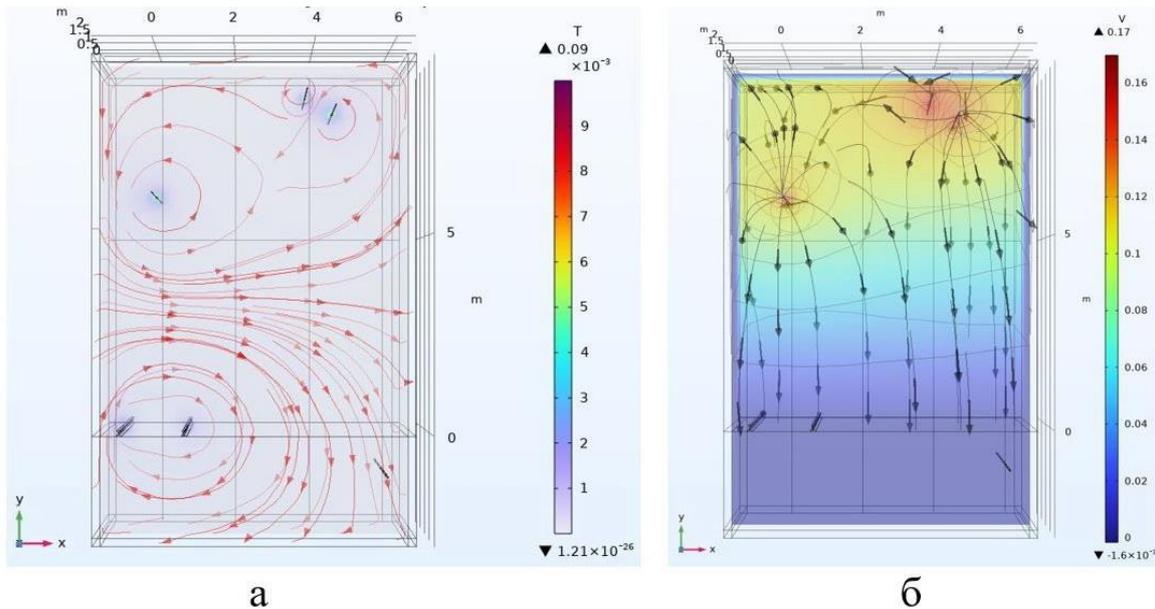


Рис. 6. Распределение полей для модели с системой тягового электропитания с экранирующим и усиливающим проводниками: а – магнитное поле; б – электрическое поле

Таблица 2. Параметры рассчитанного распределения токов в проводниках системы с ЭУП при частоте 50 Гц для двух величин питающего тока

Моделируемый проводник	Эксперимент № 3		Эксперимент № 4	
	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град	Амплитуда тока, А	Фаза тока, град
Контактный провод	66,77	-0,603	283,77	-2,174
Рельс первый	52,25	179,21	222,06	177,64
Рельс второй	39,1	179,06	166,19	177,49
Оболочка кабельной линии	0,376	73,59	1,6	72,02
Усиливающий провод	74,62	-0,377	317,17	-1,948
Экранирующий провод	50,05	-179,81	212,71	178,62

Однако следует отметить, что математическое моделирование позволяет получить значения, лишь для конкретного модельного примера, имеющего ряд ограничений и допущений. Так данная модель в качестве источника влияний рассматривает лишь систему тягового питания. Реальные наведенные токи, в свою очередь, являются результатом одновременных случайных воздействий от множества источников [1, 14] и естественно будут отличаться от результатов моделирования.

Для детального анализа процессов образования наводимых влияний необходимо осуществить сбор базы статистических данных и, используя стохастический математический аппарат, изучать параметры

распределений, выполняя декомпозицию и выявление характеристик и степени влияния отдельных источников. После определения статистических параметров влияющих источников необходимо применение математического моделирования, которое позволит детально изучить процессы воздействий и разработать соответствующие меры по защите от них.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результат моделирования позволяет уверенно фиксировать высокую степень влияния электромагнитных полей на кабельные линии железнодорожной инфраструктуры со стороны системы тягового электропитания.

Математическое моделирование обладает возможностью разложения степени влияния на составляющие факторы, что позволяет раскрыть внутреннюю структуру механизма взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса и открывает способы борьбы с вредными последствиями наводок.

Исследования показывают, что наводки с ростом трафика грузоперевозок будут расти, а, следовательно, необходимо разрабатывать современные меры защиты от электромагнитных влияний.

РЕКОМЕНДАЦИИ

Доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО РГУПС Владимир Николаевич Таран рекомендует данную статью к публикации.

Автор заявляет, что настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетической железнодорожной системе // Транспортные системы и технологии. – 2015. – Т. 1. – № 2. – С. 110–126. [Apollonskiy SM. Problems of electromagnetic compatibility in electricity of rail system. *Transportation Systems and Technology*. 2015;1(2):110-126 (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst201512110-126
2. Капкаев А.А. Интеграция экранирующего провода в системе тягового электроснабжения с волоконно-оптической линией связи: дис... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону; 2017. – 208 с. [Капкаев АА. Integratsiya ekraniruyushchego provoda v sisteme tyagovogo elektrosnabzheniya s volokonno-opticheskoi liniei svyazi. [dissertation]. Rostov-on-Don; 2017. 208 p. (In Russ.)]. Доступно по: URL: https://www.rgups.ru/site/assets/files/92935/dissertatciia_kapkaev_a.a._na_sait.pdf Ссылка активна на: 01.09.2022.

3. Buyakova N, Zakaryukin V, Kryukov A. Control of electromagnetic environment in smart traction power supply systems. *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2019;91:01009. doi: 10.1051/e3sconf/20199101009
4. Kryukov AV, Cherepanov AV, Kryukov AE. Electromagnetic Influences of Traction Networks Amplified by Coaxial Cable on Pipelines. *2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. 2020:1-5. doi: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271625
5. Serdiuk TM. Modeling of influence of traction power supply system on railway automatics devices. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*. 2017:1-6. doi: 10.1109/EMCEurope.2017.8094637
6. Сильвестер П., Феррари Р. Метод конечных элементов для радиоинженеров и инженеров-электриков. – 1986. – 229 с. [Sil'vester P, Ferrari R. *Metod konechnykh jelementov dlja radioinzhenerov i inzhenerov-jelektrikov*; 1986. 229 p. (In Russ.)] Доступно по: <https://bookscat.org/dl/445310/ca156e> Ссылка активна на: 01.09.2022.
7. Савченко А.О., Савченко О.Я. Проводящее тело в переменном магнитном поле // Журнал технической физики. – 2015. – Т. 85. – №. 7. – С. 8-12. [Savchenko AO., Savchenko OYa. *Provodyashchee telo v peremennom magnitnom pole. Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2015;85(7):8-12. (In Russ.)]. Доступно по: <http://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/41996>. Ссылка активна на: 01.09.2022.
8. Малых М.Д., Севастьянов А.Л., Севастьянов Л.А. и др. О сведении уравнений Максвелла в волноводах к системе связанных уравнений Гельмгольца // *Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science* – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 39-48. [Malykh MD, Sevast'yanov AL, Sevast'yanov LA et al. *O svedenii uravnenii Maksvellla v volnovodakh k sisteme svyazannykh uravnenii Gel'mgol'tsa. Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science*. 2018;26(1):39-48. (In Russ.)] Доступно по: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-svedenii-uravneniy-maksvella-v-volnovodah-k-sistemsvyazannyh-uravneniy-gelmgol'tsa> Ссылка активна на: 01.09.2022.
9. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10 т. Т. II. Теория поля. – 7-е изд., испр.– М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 512 с. [Landau LD, Lifshits EM. *Teoreticheskaya fizika: Ucheb. posobie. V 10 t. T. II. Teoriya polya*. 7 ed. – Moscow: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988. 512 p. (In Russ.)] Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://bookscat.org/dl/451228/de14ee>
10. Лонкина Д.В. Электродинамический анализ и синтез частотно-селективных устройств на цилиндрических волноведущих структурах со сложными металлическими гребнями и кусочно-слоистым диэлектрическим заполнением: дис.... канд. физ.-мат. наук. – Ростов-на-Дону; 2022. – 173 с. [Lonkina DV. *Elektrodinamicheskii analiz i sintez chastotno-selektivnykh ustroystv na tsilindricheskikh volnovedushchikh strukturakh so slozhnymi metallicheskimii grebnyami i kusochno-sloistym dielektricheskim zapolneniem [dissertation]*. Rostov-on-Don; 2022. 173 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://hub.sfedu.ru/storage/1/1298243/59601379-93ac-4d7a-83d0-8fe0fa772f4d/>
11. Калимов А.Г. Развитие численных методов расчета электромагнитных полей, основанных на применении пространственных интегральных уравнений: автореф. дис.... д-ра техн. наук – СПб; 2013. – 33 с. [Kalimov AG. *Razvitie chislennykh metodov rascheta elektromagnitnykh polei, osnovannykh na primenenii prostranstvennykh integral'nykh uravnenii [dissertation abstract]* St. Petersburg; 2017. 21 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://elib.spbstu.ru/dl/2/3718.pdf/info>
12. Таран В.Н., Шевлюгин М.В., Шандыбин А.В. Точность численных методов

- анализа электростатических полей // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – №1. – С. 59–70. [Taran VN, Shevlyugin MV, Shandybin AV. The Accuracy of Numerical Methods for Assessing External Electrical Influences. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(1):59-70. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217159-70
13. ГОСТ Р 58321-2018 Электроустановки систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока. [GOST R 58321-2018 Elektroustanovki sistem tyagovogo elektrosnabzheniya zheleznoi dorogi peremennogo toka (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: <https://docs.cntd.ru/document/1200161809>
 14. Мирошниченко Е.Е. Тяговый вентильно-индукторный двигатель с улучшенными показателями надежности подшипниковых узлов для электрического подвижного состава // Транспортные системы и технологии. – 2021. – Т. 7. – №2. – С. 97–105. [Miroshnichenko EE. Switched reluctance traction motor with improved indicators of the reliability of bearing units for an electric rolling stock. *Transportation Systems and Technology*. 2021;7(2):97-105. (In Russ.)]. doi: 10.17816/transsyst20217297-105
 15. Нгуен Ты. Определение электромагнитных влияний высоковольтных и многоамперных ЛЭП на смежные линии: дис.... канд. техн. наук. – Иркутск; 2021. – 188 с. [Nguen Ty. Opredelenie elektromagnitnykh vliyaniy vysokovol'tnykh i mnogoampornykh LEP na smezhnye linii: [dissertation]. Irkutsk; 2021. 188 p. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 01.09.2022. Доступно по: https://isem.irk.ru/upload/iblock/3d8/Nguen-Ty-dissertatsiya-na-sayt_.pdf

Сведения об авторе:

Шандыбин Алексей Викторович, старший преподаватель, заведующий лабораторией;

eLibrary SPIN: 4444-3213; ORCID: 0000-0003-2052-5480; Scopus ID: 57205099726;

E-mail: shav850@mail.ru

Information about the author:

Aleksey V. Shandybin, senior lecturer, head of the laboratory;

eLibrary SPIN: 4444-3213; ORCID: 0000-0003-2052-5480; Scopus ID: 57205099726;

E-mail: shav850@mail.ru

Цитировать:

Шандыбин А.В. Моделирование электромагнитного взаимодействия компонентов транспортного электротехнического комплекса // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 3. – С. 89–104. doi: 10.17816/transsyst20228389-104

To cite this article:

Shandybin AV. The simulation of electromagnetic interaction of the components of transport electrical complex. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(3):89-104. doi: 10.17816/transsyst20228389-104