

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи

Середкин Дмитрий Александрович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЛЭП НА  
ОСНОВЕ РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ  
СИСТЕМЫ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
**Крюков Андрей Васильевич**

Официальные оппоненты: **Третьяков Евгений Александрович**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Омский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог»;

**Сидоров Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, заведующий кафедрой безопасности жизнедеятельности;

**Закирова Альфия Резавановна**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уральский государственный университет путей сообщения», г. Екатеринбург, доцент кафедры техносферной безопасности

Защита состоится «08» ноября 2023 г. в 13:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.10.26 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д.19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=5172>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Самойленко  
Владислав Олегович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Электромагнитные поля (ЭМП) являются опасной формой загрязнения окружающей среды. Объекты электроэнергетики, в том числе линии электропередачи (ЛЭП), являются источниками ЭМП с повышенными уровнями напряженностей, которые могут вызывать нарушения работы электрических и электронных устройств, а также возгорание легковоспламеняющихся веществ. Дополнительно возникает опасность воздействия на персонал наведенных напряжений при выполнении работ на отключенных линиях электропередачи и связи. Воздействие ЭМП на человека также имеет негативные последствия.

Трехфазные ЛЭП при симметричной нагрузке являются электромагнитно уравновешенными и потому создают ЭМП со сравнительно малыми уровнями напряженностей на нормируемой высоте. Однако поля ЛЭП характеризуются значительной зоной распространения. Реализуемые на практике режимы характеризуются неравномерной нагрузкой фаз, кроме того, возможно применение несимметричных схем включения (например, при плавке гололеда), а также возникновение неполнофазных режимов работы. В таких ситуациях уровни напряженностей ЭМП могут существенно увеличиваться.

Развитие сетевой инфраструктуры приводит к необходимости организации пересечения нескольких высоковольтных ЛЭП различного класса напряжения и конструктивного исполнения. В местах таких пересечений происходит наложение электромагнитных полей и усложнение их структуры.

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) отличаются значительной долей потребителей с нелинейными вольтамперными характеристиками. Генерируемые ими высшие гармоники усложняют картину поляризации и могут приводить к повышению напряженностей ЭМП. Этот фактор необходимо учитывать при оценке помехоустойчивости оборудования, а также при определении условий электромагнитной безопасности (ЭМБ).

Для улучшения условий ЭМБ применяются организационные и технические мероприятия, выбор которых в условиях цифровизации электроэнергетики должен осуществляться на основе компьютерного моделирования. Поэтому задачи разработки цифровых моделей, обеспечивающих адекватное определение ЭМП, имеют несомненную актуальность.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам моделирования режимов работы электроэнергетических систем, а также анализа условий электромагнитной безопасности на трассах высоковольтных и многоамперных ЛЭП посвящены работы

Аполлонского С. М., Бадера М. П., Блейка Л. Б., Буяковой Н. В., Горского А. Н., Закарюкина В. П., Закировой А. Р., Кадомской К. П., Косарева А. Б., Косарева Б. И., Костенко М. В., Мисриханова М. Ш., Украинской И. С., Рубцовой Н. Б., Седунова В. Н., Сидорова А. И., Степанова И. М., Струмеляка А. В., Третьякова Е. А., Токарского А. Ю., Титова Е. В., Ogunsola A., Mariscotti A., Kircher R., Fritz E., Carson I. R. и их коллег.

Работы перечисленных авторов создают методологический базис для проведения исследований, направленных на разработку методов и средств моделирования ЭМП в местах пересечения ЛЭП, а также анализа условий ЭМБ при наличии гармонических искажений.

**Цели и задачи.** Цель диссертационного исследования состояла в разработке методов моделирования электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах. Для ее достижения необходимо было решить следующие задачи.

1. Разработать метод моделирования ЭМП в местах пересечения высоковольтных ЛЭП различного класса напряжения и конструктивного исполнения.

2. Предложить метод моделирования электромагнитных полей с учетом гармонических искажений.

3. Реализовать цифровые модели, позволяющие определять условия электромагнитной безопасности на трассах ЛЭП с учетом экранирования и стрел провеса проводов.

4. Подтвердить адекватность предложенных методов моделирования ЭМП сравнением с результатами инструментальных измерений, а также с данными, полученными в программе ELCUT.

#### **Научная новизна.**

1. Предложен метод определения электромагнитных полей в местах пересечений линий электропередачи различных классов напряжения и конструктивного исполнения, а также тяговых сетей и ЛЭП, позволяющий, в отличие от известных, производить моделирование на основе расчета режима сложных ЭЭС в фазных координатах с учетом нагрузок, изменяющихся во времени и перемещающихся в пространстве.

2. Разработан метод моделирования ЭМП с учетом высших гармоник (ВГ), базирующийся, в отличие от известных, на определении несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог и позволяющих корректно учитывать источники ВГ, параметры которых изменяются во времени, а точки приложения перемещаются в пространстве.

3. Реализованы цифровые модели, позволяющие определять условия электромагнитной безопасности на трассах ЛЭП с учетом экранирования и стрел провеса проводов, отличающиеся использованием решетчатых схем замещения, в которых каждая пара узлов соединяется ветвью.

4. Разработаны цифровые модели, обеспечивающие расчеты ЭМП тяговых сетей переменного тока, отличающиеся возможностью расчетов при реализации современных технологий организации движения поездов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость заключается в разработке положений, обеспечивающих реализацию методов и алгоритмов адекватного определения электромагнитных полей ЛЭП на частотах высших гармоник, а также в местах пересечений высоковольтных линий электропередачи.

Практическая значимость полученных результатов состоит в возможности их применения при разработке организационных и технических мероприятий, направленных на улучшение условий электромагнитной безопасности при проектировании, реконструкции и эксплуатации ЛЭП, а также тяговых сетей переменного тока. Предложенные в работе методы и модели позволяют обоснованно подходить к выбору конструкции и трассы ЛЭП, а также организации мест пересечений линий.

**Методология и методы исследования.** В работе использовано цифровое моделирование ЭЭС и систем тягового электроснабжения, базирующееся на методах численного решения нелинейных уравнений большой размерности, а также теории поля. В качестве основного инструмента использовался разработанный в ИрГУПС программный комплекс (ПК) «Fazonord», модифицированный с участием автора для реализации алгоритмов, предложенных в диссертации.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод определения электромагнитных полей в местах пересечений линий электропередачи между собой и с тяговыми сетями, базирующийся на расчете режима сложных электроэнергетических систем в фазных координатах.

2. Метод моделирования электромагнитных полей с учетом высших гармоник на основе расчета несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог.

3. Цифровые модели для определения условий электромагнитной безопасности на трассах ЛЭП с учетом экранирования и стрел провеса проводов.

4. Цифровые модели, обеспечивающие расчеты электромагнитных полей тяговых сетей при использовании современных технологий организации движения поездов.

**Достоверность результатов** обеспечивается совпадением в сопоставимых случаях результатов моделирования ЭМП с данными, полученными в программе ELCUT, разработанной в ООО «Тор». Кроме того, сравнение с измерениями на реальных объектах показало, что

наибольшее расхождение значений напряженностей ЭМП, измеренных и рассчитанных по предлагаемой автором методике, составило менее 4 %.

**Апробация работы.** Результаты и выводы, представленные в данной работе, обсуждались на следующих конференциях: международные научно-технические конференции «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов» (Благовещенск, 2019), «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (Челябинск, 2019); «Современные технологии и научно-технический прогресс» (Ангарск, 2019, 2020, 2021); международные научно-практические конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» (Севастополь, 2019, 2021), «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2019, 2022), международный симпозиум "Устойчивая энергетика и энергомашиностроение - 2021: SUSE-2021" (Казань, 2021); всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы электроэнергетики» (Новгород, 2021); всероссийские научно-практические конференции «Наука и образование: актуальные исследования и разработки» (Чита, 2019), «Образование – Наука – Производство» (Чита, 2019), «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» (Кемерово, 2021); всероссийские научно-практические конференции с международным участием «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (Иркутск, 2019, 2020); International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (Челябинск, 2020); Energy-21 – Sustainable Development & Smart Management (Иркутск, 2020); Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020) (Казань, 2020); The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020) (Иркутск, 2020); International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Сочи, 2020, 2022).

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 41 работе, из них 9 статей опубликованы в изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 6 статей в изданиях с индексацией в Scopus, одна монография и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Объем и структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из списка сокращений, введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 183 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, приведены его цель и задачи, отмечена научная новизна, опи-

саны практическая ценность и теоретическая значимость, представлено основное содержание диссертации.

**В первой главе** сформулированы основные задачи анализа электромагнитной обстановки, базирующиеся на определении напряженностей электромагнитного поля, которые определяются на основе решения уравнений установившегося режима ЭЭС, записанных в фазных координатах

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \mathbf{0},$$

где  $\mathbf{F}$  – нелинейная вектор-функция размерностью  $n$ ;  $\mathbf{U}$  –  $n$  – мерный вектор нерегулируемых параметров (узловых напряжений);  $\mathbf{V}$  –  $m$  – мерный вектор регулируемых параметров (активных и реактивных мощностей генераторов и нагрузок).

В системах электроснабжения железных дорог (СЭЖД) тяговые нагрузки перемещаются в пространстве. Этот фактор приводит к необходимости моделирования серий режимов, каждый из которых отвечает конкретному расположению поездов, характер движения которых определяется заданным графиком; при этом используется концепция так называемых «мгновенных» схем и осуществляется редукция динамической модели СЭЖД к набору статических. Для выполнения процедуры моделирования исследуемый интервал разбивается на малые промежутки  $\Delta t$ , внутри которых параметры режима принимаются неизменными. В данной работе принят интервал в одну минуту, который согласно ГОСТ Р 57670-2017 является оптимальным с точки зрения расчета режимов и определения расходов электроэнергии на движение поездов в системах тягового электроснабжения переменного тока.

На каждом интервале  $\Delta t$  осуществляется решение нелинейной системы уравнений для режима мгновенной схемы

$$\mathbf{F}_k(\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k) = \mathbf{0}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k$  – значения векторов  $\mathbf{U}, \mathbf{V}$  для  $k$ -ой мгновенной схемы.

В основу предлагаемых в настоящей работе моделей и методов расчета режимов для определения ЭМП положен подход, базирующийся на использовании фазных координат; при этом применяются решетчатые схемы замещения (РСЗ), обладающие полносвязной топологией. Матрица проводимостей РСЗ многопроводной линии электропередачи определяется на основе следующего соотношения:

$$\underline{\mathbf{Y}}_C = \underline{\mathbf{Y}}_{PC} + j\omega \mathbf{C}_Y,$$

где  $\mathbf{C}_Y = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B} \end{bmatrix}$ ;  $\omega = 314$  рад/с;  $\mathbf{B} = \mathbf{A}^{-1}$ ;  $\mathbf{A}$  – матрица потенциальных

коэффициентов, имеющая размерность  $r \times r$ ;  $\underline{\mathbf{Y}}_{PC} = -\mathbf{M}\underline{\mathbf{Z}}^{-1}\mathbf{M}^T$ ;  $\underline{\mathbf{Z}}$  – матрица сопротивлений, имеющая размерность  $r \times r$ ;  $\underline{z}_{ik} = \underline{z}_{ki}$ ;  $r$  – число проводов ЛЭП;  $\mathbf{M} = [\mathbf{E}_r \quad -\mathbf{E}_r]^T$ ;  $\mathbf{E}_r$  – единичная матрица с размерностью  $r \times r$ .

Из матриц  $\underline{\mathbf{Y}}_{ck}$ ,  $k = 1 \dots n$ , отвечающих отдельным элементам, формируется матрица проводимостей сети  $\underline{\mathbf{Y}}_{\Sigma}$ , на базе которой формируется система уравнений установившегося режима (УУР). После исключения уравнений, отвечающих балансирующим узлам, и замены токов мощностями может быть сформирована система нелинейных УУР

$$\underline{\mathbf{Y}}_1 \dot{\mathbf{U}} = \text{diag} \left( \frac{\tilde{S}_k}{\tilde{U}_k} \right) \mathbf{n} - \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \dot{\mathbf{U}}_B, \quad (2)$$

где  $\tilde{S}_k$ ,  $\tilde{U}_k$  – сопряженные комплекс мощности и напряжения  $k$ -го узла;  $\mathbf{n}$  – вектор размерностью  $n - n_B$ , состоящий из единиц;  $n$  – общее число узлов сети;  $n_B$  – количество балансирующих узлов (БУ);  $\dot{\mathbf{U}}_B$  – вектор напряжений балансирующих узлов;  $\underline{\mathbf{Y}}_{1B}$  – блок, отвечающий ветвям, связанным с ними;  $\underline{\mathbf{Y}}_1$  – матрица  $\underline{\mathbf{Y}}_{\Sigma}$ , в которой отсутствуют блоки, отвечающие БУ. Путем разделения вещественных и мнимых величин уравнения (2) могут быть представлены в виде (1).

По найденным значениям компонентов вектора  $\mathbf{U}$  могут быть вычислены токи, протекающие по проводам анализируемой ЛЭП или участка тяговой сети, а также заряды проводов

$$\dot{\mathbf{I}}^{(k)} = \left[ \dot{I}_1^{(k)} \quad \dot{I}_2^{(k)} \quad \dots \dot{I}_j^{(k)} \dots \quad \dot{I}_p^{(k)} \right]^T, \quad \dot{\mathbf{T}}^{(k)} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \dot{\mathbf{U}}^{(k)},$$

где  $\dot{I}_j^{(k)} = I_j^{(k)} e^{j\phi_j^{(k)}}$ ;  $\dot{\mathbf{U}}^{(k)} = \left[ \dot{U}_1^{(k)}, \dot{U}_2^{(k)} \quad \dots \dot{U}_j^{(k)} \dots \quad \dot{U}_p^{(k)} \right]^T$ ;  $\dot{U}_j^{(k)} = U_j^{(k)} e^{j\phi_j^{(k)}}$ .

По найденным значениям  $\dot{\mathbf{T}}^{(k)}$  и  $\dot{\mathbf{I}}^{(k)}$  определяются горизонтальные и вертикальные составляющие напряженностей электрического (ЭП) и магнитного (МП) полей для выбранного набора точек  $\mathbf{P} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$  плоскости, расположенной перпендикулярно оси ЛЭП или тяговой сети (ТС):

$$\mathfrak{S}_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}): \dot{\mathbf{T}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y; \quad \mathfrak{S}_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}): \dot{\mathbf{I}}^{(k)} \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y$$

Затем находятся амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y}): \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y \rightarrow \mathbf{E}_{\max}; \quad \Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y}): \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y \rightarrow \mathbf{H}_{\max},$$

где  $\Theta_E(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ ,  $\Theta_H(\mathbf{x}, \mathbf{y})$  – операторы; индекс  $E$  относится к электрическому полю, а  $H$  – к магнитному.

Кроме того, на основании найденных значений  $\dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y, \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y$  можно определить плотность потока электромагнитной энергии (вектор Пойнтинга)

$$\mathfrak{S}_P(\mathbf{x}, \mathbf{y}): \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y, \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y \rightarrow \Pi_0(\mathbf{x}, \mathbf{y}).$$

Модели и методы анализа электромагнитной обстановки, реализованные на основе описанного выше подхода, отличаются от известных следующие особенности:

а) системность – определение ЭМП на основе режима сложной ЭЭС и СЭЖД с учетом переменных во времени и перемещающихся в простран-

стве нагрузок;

б) мультифазность – расчет однофазных, трехфазных и многофазных систем, а также их различных сочетаний;

в) многорежимность – вычисление напряженностей ЭМП для нормальных, аварийных, неполнофазных режимов, а также режимов плавки гололеда;

г) универсальность – расчет ЭМП для ЛЭП и тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Для проверки адекватности моделирования выполнено сравнение с расчетами ЭМП в программе ELCUT, которая позволяет решать большой объем полевых задач методом конечных элементов, однако требует значительных вычислительных затрат (рисунок 1).

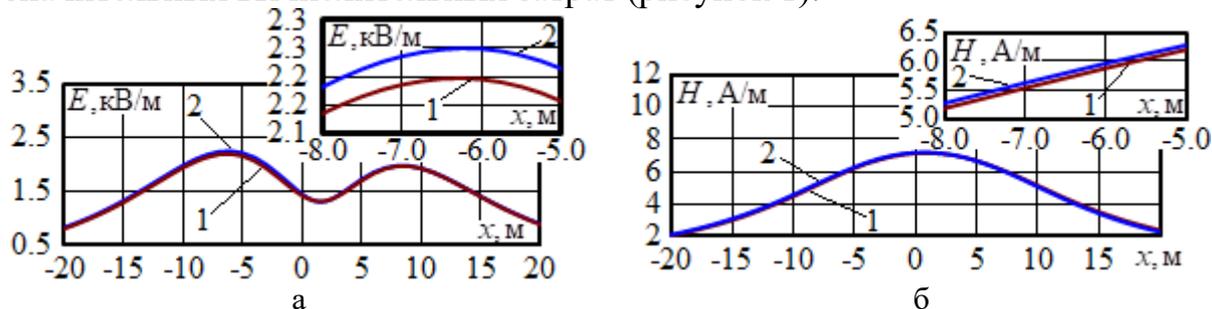


Рисунок 1. Сравнение расчетов напряженностей электрического и магнитного полей ЛЭП: 1 – ELCUT; 2 – Fazonord

Моделирование осуществлялось для линии электропередачи 220 кВ. Результаты сравнения значений напряженности электрического и магнитного полей ЛЭП, проиллюстрированные на рисунке 1, позволяют сделать вывод о том, что зависимости напряженностей от координаты  $x$  оси, направленной перпендикулярно трассе ЛЭП, полученные в программе ELCUT и ПК Fazonord, в котором реализованы представленные выше алгоритмы, отличаются менее чем на 5%.

Рассмотренный подход позволяет решать задачи моделирования ЭМП с учетом высших гармоник и в местах ортогонального пересечения нескольких линий. Напряженности ЭМП в окрестности ортогонального пересечения двух (или более) ЛЭП (ТС) могут быть рассчитаны на основе алгоритма, включающего следующие этапы.

1. На основе расчета режима в фазных координатах определяются векторы напряжений и токов пересекающихся ЛЭП (ТС):

$$\dot{\mathbf{U}}^{(k)} = [\dot{U}_1^{(k)}, \dot{U}_2^{(k)} \dots \dot{U}_j^{(k)} \dots \dot{U}_p^{(k)}]^T; \quad \dot{\mathbf{U}}^{(\ell)} = [\dot{U}_1^{(\ell)}, \dot{U}_2^{(\ell)} \dots \dot{U}_j^{(\ell)} \dots \dot{U}_p^{(\ell)}]^T;$$

$$\dot{\mathbf{I}}^{(k)} = [\dot{I}_1^{(k)} \quad \dot{I}_2^{(k)} \quad \dots \dot{I}_j^{(k)} \quad \dots \quad \dot{I}_p^{(k)}]^T; \quad \dot{\mathbf{I}}^{(\ell)} = [\dot{I}_1^{(\ell)} \quad \dot{I}_2^{(\ell)} \quad \dots \dot{I}_j^{(\ell)} \quad \dots \quad \dot{I}_p^{(\ell)}]^T.$$

2. По изложенной выше методике определяются составляющие напряженностей электрического и магнитного полей:  $\dot{\mathbf{E}}_x^{(k)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(k)}, \dot{\mathbf{H}}_x^{(k)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(k)}, \dot{\mathbf{E}}_x^{(\ell)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(\ell)}, \dot{\mathbf{H}}_x^{(\ell)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(\ell)}$ .

3. Рассчитываются напряженности в выбранных точках трехмерного пространства, отвечающих окрестности пересечения:

$$\Xi_E : \dot{\mathbf{E}}_x^{(k)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(k)}, \dot{\mathbf{E}}_x^{(\ell)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(\ell)} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_z^{(\Sigma)};$$

$$\Xi_H : \dot{\mathbf{H}}_x^{(k)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(k)}, \dot{\mathbf{H}}_x^{(\ell)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(\ell)} \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_z^{(\Sigma)},$$

где  $\Xi_E, \Xi_H$  – операторы; индекс  $E$  относится к электрическому полю, а индекс  $H$  – к магнитному;  $\dot{\mathbf{E}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_z^{(\Sigma)}$  – составляющие результирующих напряженностей электрического поля;  $\dot{\mathbf{H}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_z^{(\Sigma)}$  – то же для магнитного поля.

4. Определяются амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E : \dot{\mathbf{E}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{E}}_z^{(\Sigma)} \rightarrow \mathbf{E}_{\max}; \Theta_H : \dot{\mathbf{H}}_x^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(\Sigma)}, \dot{\mathbf{H}}_z^{(\Sigma)} \rightarrow \mathbf{H}_{\max}.$$

Определение ЭМП с учетом высших гармоник (ВГ) осуществляется на основе расчета режимов на основной частоте и частотах высших гармоник с применением следующих систем уравнений

$$\mathbf{F}[\mathbf{X}(f_1)] = \mathbf{0}; \mathbf{Y}(f_3)\dot{\mathbf{U}}(f_3) = \dot{\mathbf{I}}(f_3);$$

$$\mathbf{Y}(f_5)\dot{\mathbf{U}}(f_5) = \dot{\mathbf{I}}(f_5) \dots \mathbf{Y}(f_{39})\dot{\mathbf{U}}(f_{39}) = \dot{\mathbf{I}}(f_{39}),$$

где  $f_i$  – частоты гармоник с номерами  $i = 3, 5, \dots, 39$ ;  $f_i = i \cdot f$ ;  $f = 50$  Гц;  $\mathbf{Y}(f_i)$  – рассчитанная для частоты  $f_i$ ; матрица проводимостей расчетной модели ЭЭС;  $\dot{\mathbf{U}}(f_i)$  – напряжения в узлах сети, которые получаются в результате расчета режима на частоте  $f_i$ ;  $\dot{\mathbf{I}}(f_i)$  – вектор, образованный токами источников ВГ.

Алгоритм расчета напряженностей ЭМП с учетом ВГ включает следующие этапы.

1. На основе полученных результатов для выбранной ЛЭП определяются заряды проводов и токи, протекающие по ним, для каждой из учитываемых гармоник:  $\dot{\mathbf{T}}^{(s)}, \dot{\mathbf{I}}^{(s)}$ ,  $s = 1, 3, 5, \dots, 39$ .

2. Определяются горизонтальные и вертикальные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей для каждой гармоники, включая основную, и выбранного набора точек  $\mathbf{P} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$  плоскости, расположенной перпендикулярно оси ЛЭП (ТС):

$$\mathfrak{Z}_E^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{T}}^{(s)} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x^{(s)}, \dot{\mathbf{E}}_y^{(s)}; \mathfrak{Z}_H^{(s)}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) : \dot{\mathbf{I}}^{(s)} \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x^{(s)}, \dot{\mathbf{H}}_y^{(s)}$$

Затем находятся амплитудные значения напряженностей ЭМП.

Проверка адекватности методики учета высших гармоник осуществлялась сравнением результатов моделирования с измерениями напряженностей ЭМП ЛЭП 500 кВ, представленных в работе Сидорова А. И. и Окраинской И. С. (2008 г.) (рисунок 2). Полученные результаты подтверждают точность рассматриваемой методики, при этом наибольшее отличие амплитудных значений измеряемых и рассчитанных гармоник составило менее 1,5 %.

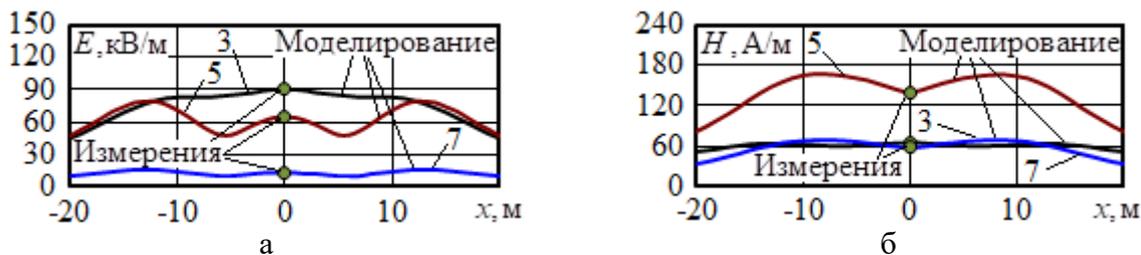


Рисунок 2. Распределение напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП на высоте 1,8 метра для 3, 5 и 7 гармоник

Вторая глава посвящена задачам определения электромагнитных полей с учетом режима работы и конструктивного исполнения рассматриваемого объекта. Приведено решение задачи выбора оптимального расположения токоведущих частей на опоре с точки зрения минимизации электромагнитного поля. Результаты сравнения трехфазных ЛЭП 220 кВ с вертикальным и треугольным расположением токоведущих частей показали снижение максимальных значений напряженности электрического и магнитного полей для вертикального расположения проводов на 7 и 56 % соответственно (рисунок 3).

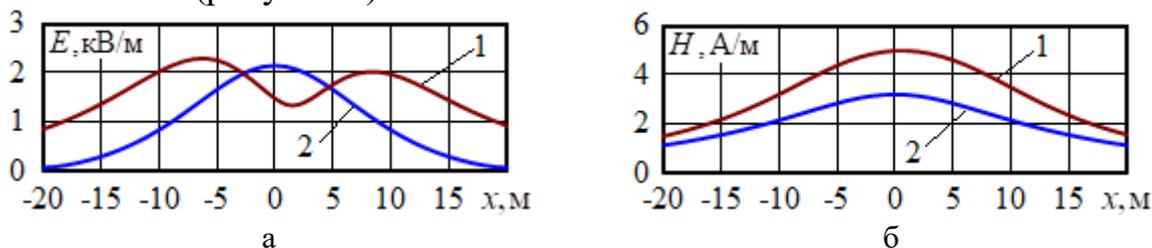


Рисунок 3. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м: 1 – треугольное; 2 – вертикальное

Предложен подход и компьютерные модели для учета стрел провеса проводов ЛЭП. Получены результаты сравнения с применяемым на практике подходом, когда высота подвеса принимается на высоте его центра тяжести ( $h_{CP}$ ), и разработанной методикой. Для рассматриваемого случая наибольшие отклонения значений напряженностей полей превысили 30 %, что подтверждает необходимость учета провеса проводов при определении ЭМП (рисунок 4).

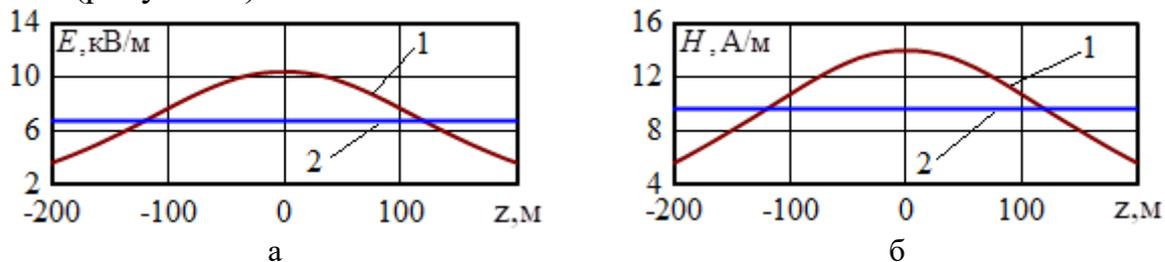


Рисунок 4. Распределение амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в пролете ЛЭП: 1 – с учетом стрелы провеса; 2 – на высоте  $h_{CP}$

Проведено исследование линий электропередачи при несимметрич-

ных и неполнофазных режимах. Проводилось сравнение ЭМП при симметричной и несимметричной нагрузке ЛЭП 220 кВ (рисунок 5). Несимметричный режим работы ЛЭП не привел к значительным изменениям уровней напряженностей электрического поля, изменение напряженности магнитного поля составило от 4 до 9 %, в зависимости от расположения проводов фаз.

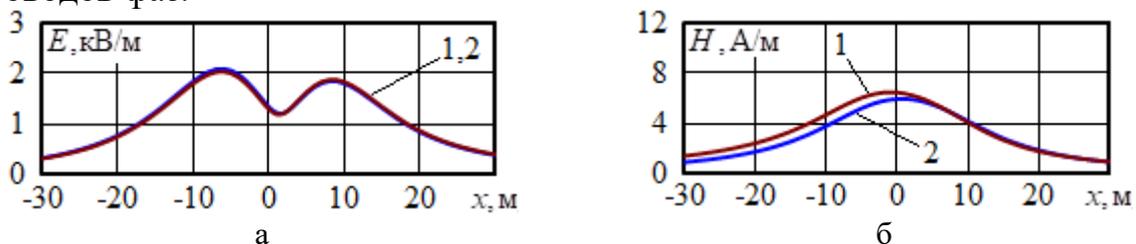


Рисунок 5. Амплитуды напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля: 1 – несимметричный режим; 2 – симметричный режим

Среди режимов несимметричных коротких замыканий (КЗ) может быть выделен режим однофазного КЗ, который характеризуется увеличением максимального значения напряженности электрического поля на 22 %, напряженность магнитного поля увеличивается до 144 А/м (рисунок 6).

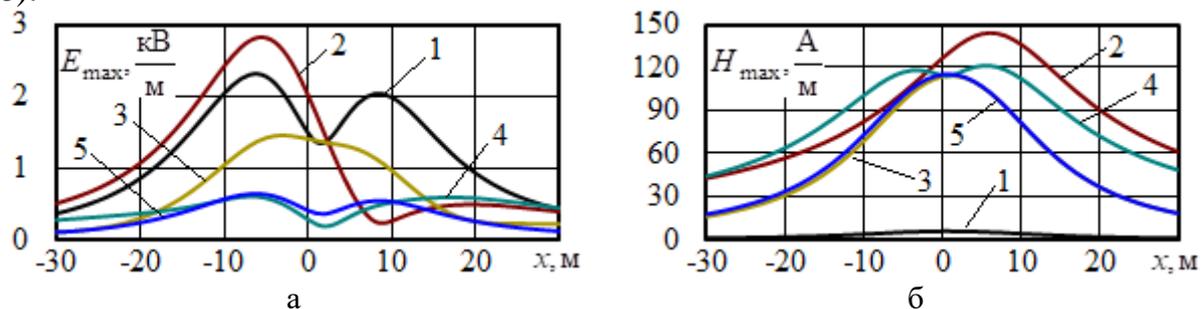


Рисунок 6. Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м для ЛЭП 220 кВ: 1 – исходный полнофазный режим; 2 – однофазное КЗ; 3 – двухфазное КЗ; 4 – двухфазное КЗ на землю; 5 – трехфазное КЗ

На основе разработанной методики проведен анализ экранирования электрического поля ЛЭП с помощью активных и пассивных тросовых экранов (рисунок 7а). Результаты показали, что допустимое значение в 5 кВ/м на высоте 1,8 метров под трассой ЛЭП достигается только при совместной установке активных и пассивных тросовых экранов (рисунок 7б).

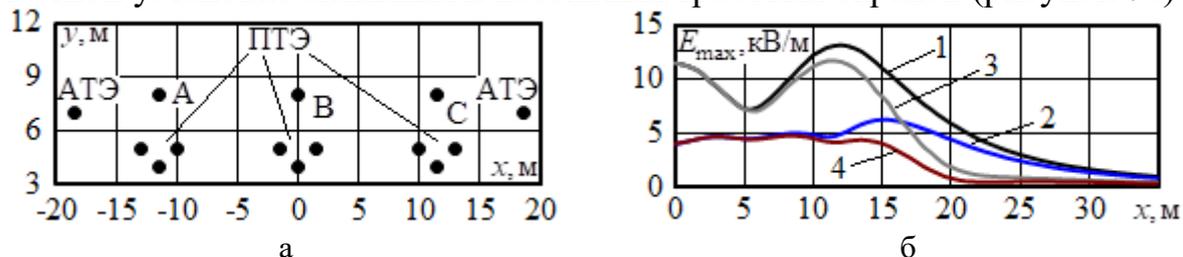
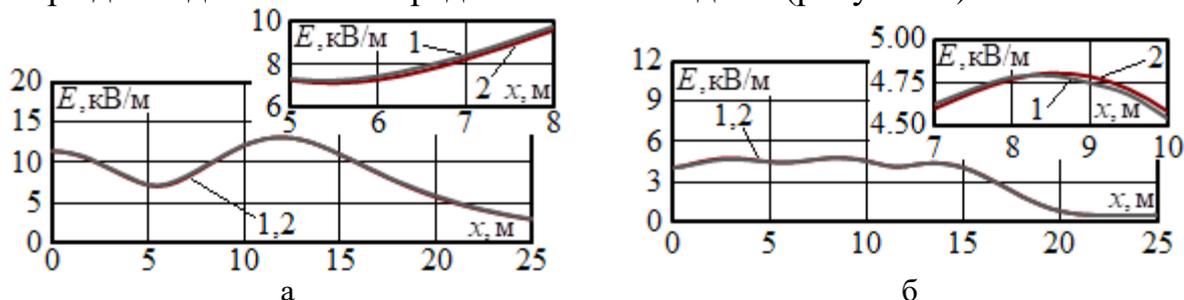


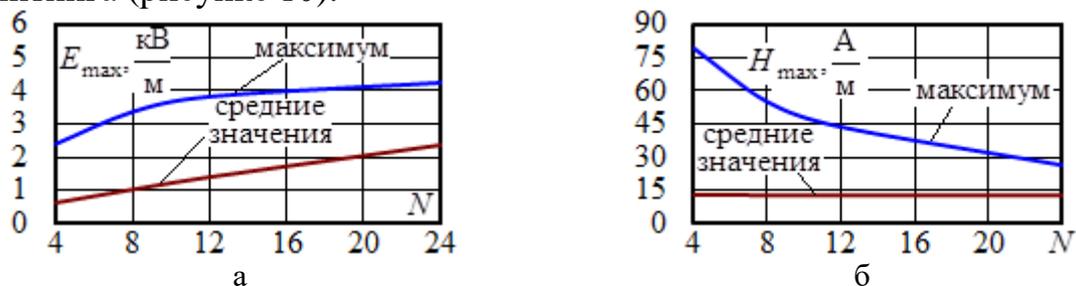
Рисунок 7. Расположение токоведущих частей (а) и напряженность электрического поля (б) в сечении ЛЭП 500 кВ: 1 – без экранирования; 2 – пассивные тросовые экраны (ПТЭ); 3 – активные тросовые экраны (АТЭ); 4 – АТЭ и ПТЭ

Аналогичные данные приведены в монографии Мисриханова М. Ш., Рубцовой Н. Б. и Токарского А. Ю. (2019 г). Их сопоставление с результатами выполненных расчетов показало максимальное расхождение значений напряженности электрического поля в 4 %, что дополнительно подтверждает адекватность предлагаемой методики (рисунок 8).

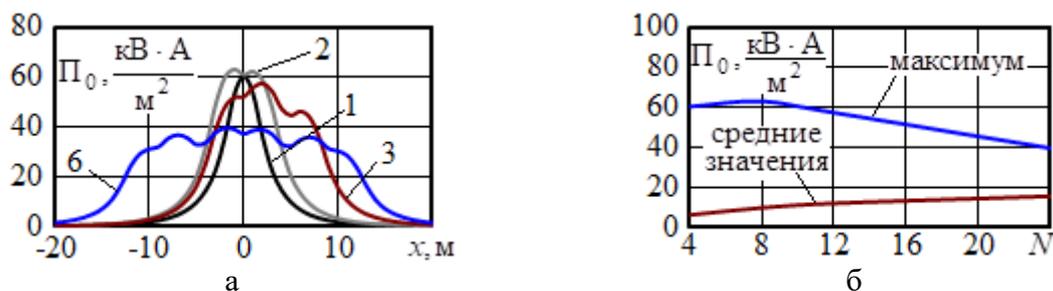


**Рисунок 8. Сравнение результатов расчетов напряженности ЭМП ЛЭП 500:**  
а – исходный режим; б – экранирование АТЭ и ПТЭ; 1 – монография; 2 – Fazonord

Тяговые сети электрифицированных железных дорог ввиду электромагнитной неуравновешенности могут создавать повышенные уровни напряженностей ЭМП. Кроме того, ТС могут различаться по количеству токоведущих частей из-за изменения числа путей. Для определения влияния этого фактора проведено моделирование одно-, двух-, трех- и шестипутного участков типовой тяговой сети 25 кВ. Результаты моделирования позволили выявить характер зависимостей максимальных значений напряженностей от числа токоведущих частей ТС (рисунок 9), а также плотность потока электромагнитной энергии, определяемая вектором Пойнтинга (рисунок 10).



**Рисунок 9. Зависимости максимумов и средних значений амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м от количества токоведущих частей**



**Рисунок 10. Плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 метра: цифрами обозначено число путей**

Для увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей разрабатываются новые технологии организации движения поездов, например, основанные на применении виртуальной сцепки поездов; при этом составы не соединяются механически, а следуют друг за другом с малым интервалом времени. Между локомотивами осуществляется непрерывный обмен данными для выбора оптимального режима работы. Для выявления влияния виртуальной сцепки на электромагнитные поля проведено моделирование режима пропуска сдвоенных поездов и поездов аналогичной массы с использованием такого способа организации движения. Полученные результаты позволили сделать следующие выводы: максимальные и средние амплитудные значения напряженности электрического поля при применении виртуальной сцепки изменяются незначительно. Аналогичное сопоставление параметров магнитного поля показало уменьшение максимального значения на 20 % и увеличение среднего на 5 %.

Для повышения пропускной способности планируется применять ТС повышенного напряжения 50 кВ и 50+110 кВ. Анализ данных систем проводился в сравнении с наиболее распространенной тяговой сетью 25 кВ. По результатам моделирования были получены временные зависимости напряженностей, на рисунке 11 продемонстрирован один вариант таких зависимостей. Применение перспективных ТС показало увеличение уровней напряженности электрического поля. Так, максимальные и средние значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ, соответственно, на 81 и 83 %. Аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода, оказывающего экранирующее воздействие, уменьшаются на 16 и 17 %. Максимальные значения напряженностей магнитного поля снижаются по сравнению с ТС 25 кВ на 53 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ, соответственно.

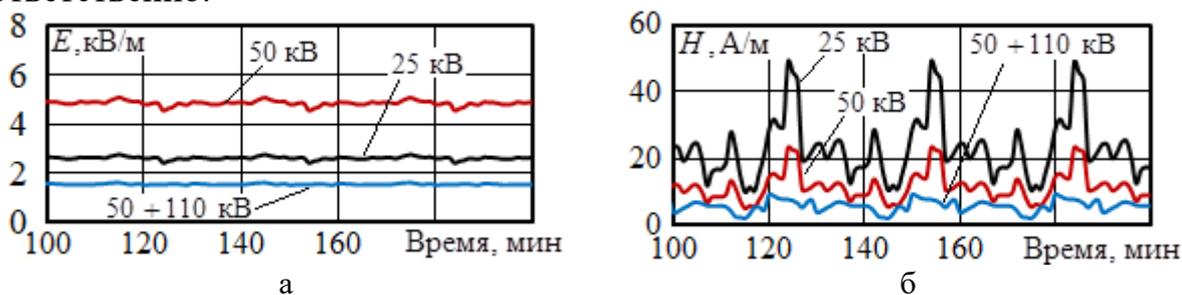
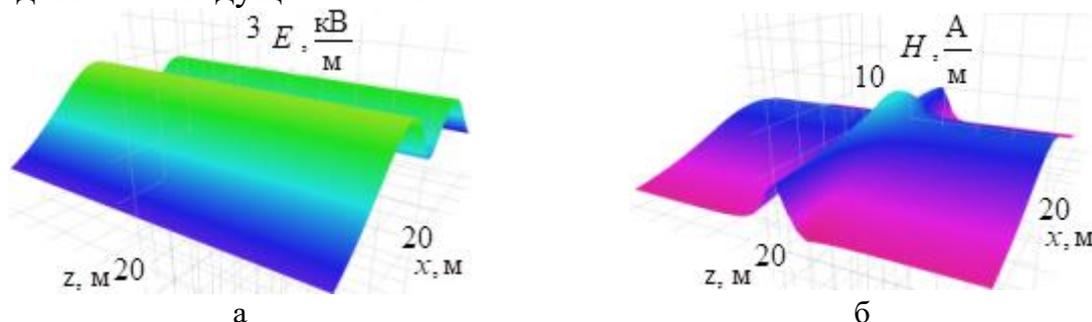


Рисунок 11. Динамика напряженности электрического(а) и магнитного(б) полей

В третьей главе представлены результаты моделирования электромагнитных полей в местах пересечения линий электропередачи. Рассмотрены пересечения ЛЭП и тяговых сетей, кабельной (КЛ) и воздушной (ВЛ) линий, тяговых сетей и магистральных шинопроводов между собой.

Результаты моделирования пересечения КЛ и ВЛ показали, что значения напряженности электрического поля в месте пересечения полностью определяется вкладом ВЛ, напряженность магнитного поля увеличивается

по отношению к ВЛ и КЛ на 32 % и 43 %, соответственно. Распределение напряженностей в пространстве показано на рисунке 12. Для моделирования КЛ использовался прием, заключающийся в замене жил и экрана наборами тонких проводников с суммарным сечением, равным сечению исходных токоведущих частей.

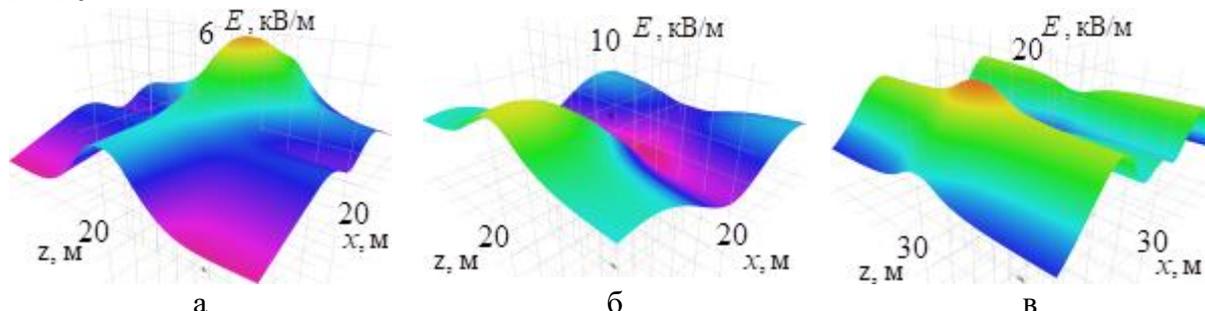


**Рисунок 12. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения ВЛ и КЛ**

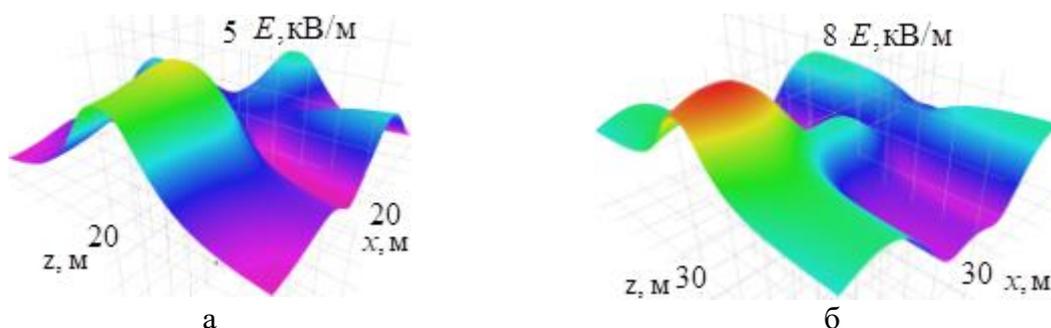
Моделирование электромагнитных полей в местах пересечения тяговых сетей и воздушных линий показало, что в нормальном режиме работы напряженность магнитного поля определяется полем ТС; напряженность электрического поля в значительной степени зависит от класса напряжения ЛЭП и их конструктивного исполнения. Осуществлялось моделирование пересечения тяговой сети 25 кВ с одноцепными ЛЭП 220, 500 и 750 кВ. В местах таких пересечений происходит усложнение пространственной структуры поля (рисунок 13), максимальные значения напряженности электрического поля по отношению к полю тяговой сети увеличились, соответственно, в 1,5, 2,5 и 5,5 раз. Увеличение данных параметров по отношению к ЭП ЛЭП составило 137, 69 и 22 %. Кроме того, в главе представлены результаты моделирования пересечений ТС 25 кВ с трехцепной ЛЭП-110-220 кВ и шестицепной ЛЭП-110-220-500 кВ. В месте пересечения наблюдалось заметное по сравнению с рисунками 12, 13 изменение объемных диаграмм электрического поля (рисунок 14).

Также было проведено моделирование пересечения перспективных тяговых сетей повышенного напряжения 50 кВ, 2×50 кВ и 94 кВ с ЛЭП 500 кВ. В тяговых сетях повышенного напряжения значительно уменьшаются токи контактных подвесок и, соответственно, уровни напряженностей магнитного поля. Тем не менее, в местах пересечения с трехфазными ЛЭП напряженность магнитного поля также определяется МП тяговой сети, в рассмотренных случаях вклад ЛЭП составил менее 4 %. Результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы: пересечение тяговых сетей повышенного напряжения с ЛЭП 500 кВ приводит к превышению допустимого уровня в 5 кВ/м. Так, вблизи тяговой сети 50 кВ напряженность электрического поля увеличивается в 2 раза и достигает 11 кВ/м, данное пересечение также характеризуется наибольшим значением напряженности магнитного поля в 44 А/м; наименьшее значение напряженности

электрического поля соответствует пересечению с тяговой сетью 94 кВ, магнитного поля – с тяговой сетью 2×50 кВ; применение ТС 2×50 кВ обеспечивает уменьшение напряженности магнитного поля по отношению к ТС 94 кВ в 2,5 раза при увеличении напряженности электрического поля на 20 %.

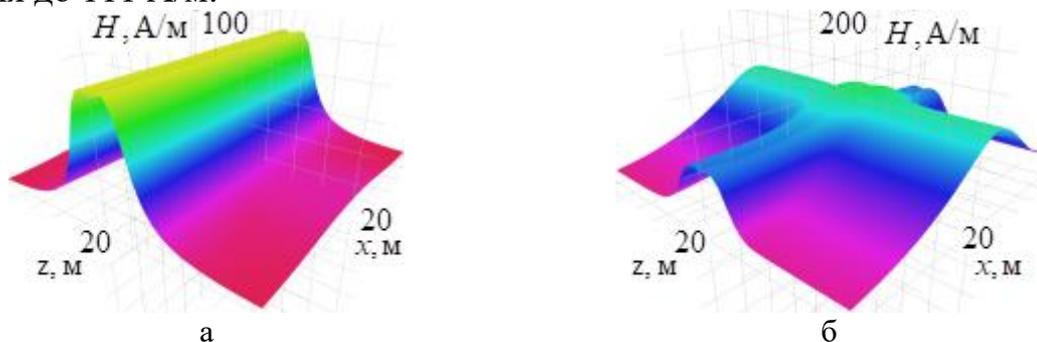


**Рисунок 13.** Амплитуды напряженностей электрического поля в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП на высоте 1,8 метра: а – ЛЭП 220 кВ; б – ЛЭП 500 кВ; в – ЛЭП 750 кВ



**Рисунок 14.** Амплитуды напряженностей электрического поля в месте пересечения ТС 25 кВ с трехцепной (а) и шестицепной (б) ЛЭП

Рассмотрена ситуация пересечения ТС 25 кВ и гибкого симметричного токопровода (СТП). По результатам моделирования токи СТП в нормальном режиме работы достигали 1,9 кА, что, однако, не приводило к значительному изменению пространственной структуры поля в месте пересечения с тяговой сетью (рисунок 15). В режиме двухфазного короткого замыкания СТП наблюдалось значительное увеличение токов, протекающих по проводам СТП и увеличение амплитуды напряженности магнитного поля до 111 А/м.



**Рисунок 15.** Амплитуды напряженностей магнитного поля в месте пересечения ТС и СТП: а – нормальный режим СТП; б – двухфазное КЗ СТП

В четвертой главе представлены результаты моделирования электромагнитных полей с учетом высших гармоник. Для анализа их влияния на ЭМП выбраны следующие объекты: широко применяемые тяговые сети 25 кВ и 2×25 кВ; ТС повышенного напряжения 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ; трехфазная ТС 25 кВ; трехфазная и шестифазная ЛЭП, питающие тяговые подстанции.

Результаты расчета для типовых тяговых сетей позволяют сделать следующие выводы: высшие гармоники приводят к значительным изменениям годографов векторов напряженностей ЭМП (рисунок 16); максимумы напряженности электрического поля увеличились на 9...15 %, магнитного – на 18...22 %, меньшие значения соответствуют ТС 2×25 кВ, большие – ТС 25 кВ.

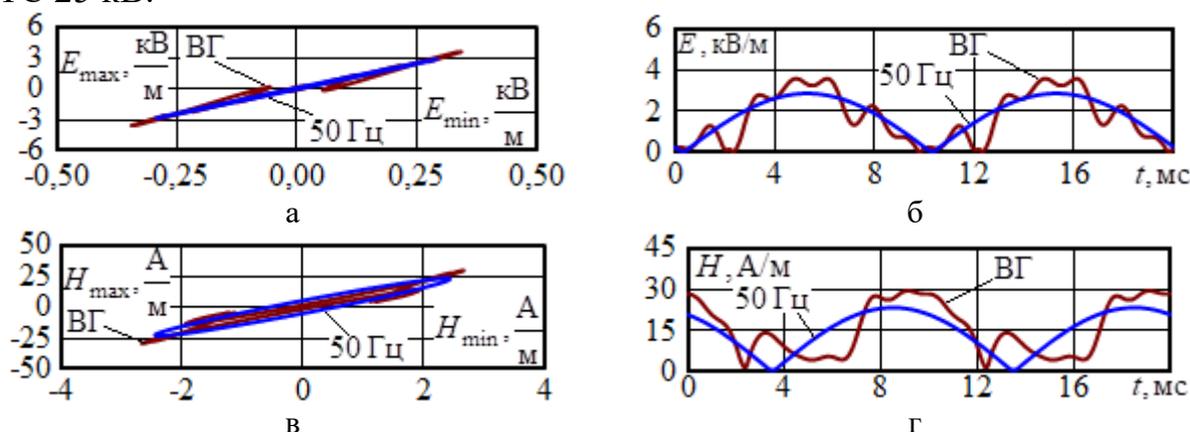


Рисунок 16. Годографы (а, в) и временные зависимости (б, г) напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей СТЭ 25 кВ

Также было проведено моделирование ТС повышенного напряжения 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ, полученные результаты показали увеличение максимальных значений напряженностей ЭМП в результате учета высших гармоник для всех рассматриваемых объектов. Так, учет высших гармоник СТЭ 50 кВ привел к росту напряженности электрического поля на 8 % до значения 7,5 кВ/м. Для ТС 2×50 кВ и 50+110 кВ данный параметр увеличился соответственно на 18 % и 14 %; аналогичный параметр для магнитного поля в результате учета ВГ повысился на 16, 21 и 20 % для СТЭ 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ соответственно.

Перспективная трехфазная тяговая сеть существенно отличается от рассмотренных выше. Ее главное достоинство состоит в том, что в питающих сетях 110-220 кВ не возникает повышенная несимметрия. Распределение максимальных значений напряженности МП в сечениях СТЭ показано на рисунке 17. На основе результатов моделирования можно сделать следующие выводы: по сравнению с типовой ТС 25 кВ трехфазная создает повышенные напряженности электрического поля, однако уровни магнитного заметно снижаются; трехфазная ТС по сравнению с однофазной отличается пониженными уровнями гармонических искажений, что приводит к

незначительным изменениям электрического поля при учете ВГ, максимальные и средние значения напряженности магнитного поля увеличиваются, соответственно, на 7 и 5 %.

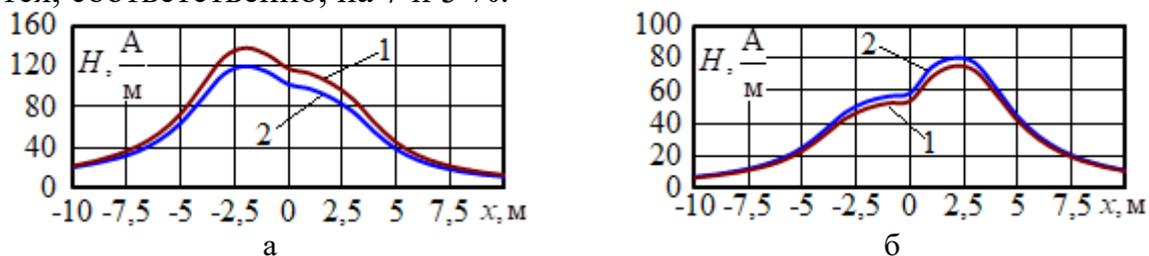


Рисунок 17. Максимальные значения амплитуд напряженностей магнитного поля типовой (а) и трехфазной (б) СТЭ: 1 – на основной частоте; 2 – с ВГ

Для анализа ЭМП, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции (ТП), выбрана схема с тремя ТП и двумя межподстанционными зонами. Расчет ЭМП осуществлялся для ЛЭП, примыкающей к средней ТП. По результатам моделирования получены зависимости максимумов амплитудных значений напряженностей (рисунок 18). Полученные зависимости демонстрируют увеличение значений напряженностей при расчете с учетом ВГ, максимумы амплитуд повышаются на 6 %. Аналогичные показатели средних значений для электрического поля равны 4 %, а для магнитного – 18 %.

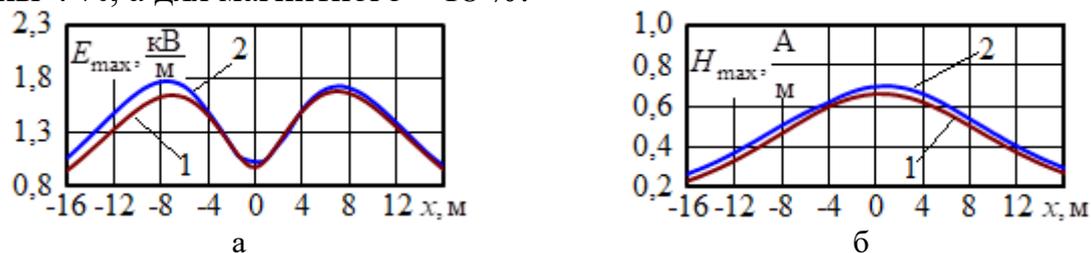


Рисунок 18. Зависимости максимальных значений амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) поля от координаты  $x$ : 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

Дополнительно проводился расчет для схемы тягового и внешнего электроснабжения одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири, включающей 1969 узлов и 10185 ветвей, полученные результаты также подтвердили необходимость учета высших гармоник.

Для повышения надежности и энергоэффективности электрических сетей, а также для улучшения качества электроэнергии можно использовать перевод трехфазных ЛЭП в многофазный режим. Рассмотрен вариант внешней сети магистральной железной дороги в двух вариантах: трехфазная ЛЭП, а также перспективная линия шестифазной конструкции. Результаты моделирования позволили сделать следующие выводы: максимумы амплитуд напряженностей электрического поля трехфазной ЛЭП ниже аналогичных показателей для шестифазной линии; при учете высших гармоник результирующие величины напряженностей ЭМП могут заметно

увеличиваться (рисунок 19), что подтверждает важность учета гармонических искажений при моделировании ЭМП, создаваемых линиями электропередачи, примыкающими к тяговым подстанциям.

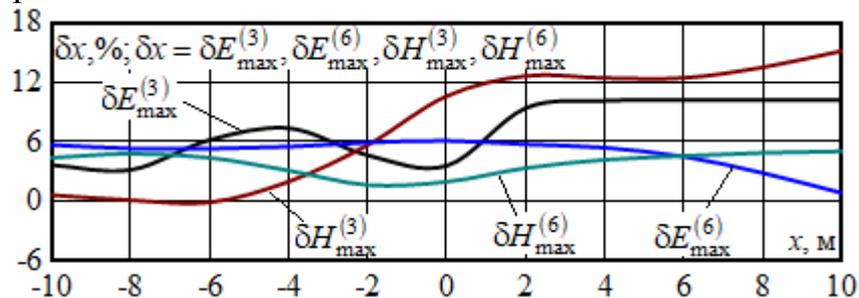


Рисунок 19. Отличия максимальных значений амплитуд напряженностей на основной частоте и с учетом ВГ

В приложении к тексту диссертации представлены материалы о внедрении результатов работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. Предложен подход к моделированию ЭМП, отличающийся от известных возможностью определения ЭМП ЛЭП и ТС различного конструктивного исполнения, базирующийся на расчете режимов сложных ЭЭС и СТЭ, представляющих собой однофазные, трехфазные, многофазные системы и различные их сочетания, при нормальных, аварийных и неполнофазных режимах.

2. Предложен метод моделирования электромагнитных полей в местах пересечения высоковольтных ЛЭП различного класса напряжения и конструктивного исполнения, позволяющий производить моделирование на основе расчета режима сложных ЭЭС в фазных координатах.

3. Разработан метод моделирования электромагнитных полей с учетом гармонических искажений, базирующийся на определении несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог.

4. Реализованы цифровые модели, позволяющие определять условия электромагнитной безопасности на трассах ЛЭП с учетом активных и пассивных экранов, а также стрел провеса проводов, основанные на использовании решетчатых схем замещения.

5. Разработаны цифровые модели, обеспечивающие возможность расчетов ЭМП тяговых сетей переменного тока при реализации современных технологий организации движения тяжеловесных поездов.

6. Подтверждена адекватность моделирования электромагнитных полей сравнением с результатами инструментальных измерений, а также с данными, полученными в программе ELCUT.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:*

1. Buyakova, N. V. Modeling of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Overhead Power Supply Lines / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, **D.A. Sereдкин** // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) – Sochi, 2020. – 9111873 (0,375 п.л. / 0,125 п.л.) (Scopus)

2. Buyakova, N.V. Simulation of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Three-Circuit Power Supply Line / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, **D.A. Sereдкин** // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) – Chelyabinsk, 2020. – С.76-81, 9216290. (0,375 п.л. / 0,125 п.л.) (Scopus)

3. Buyakova, N.V. Simulation of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Multicircuit Power Lines / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, Le Van Tхao, **D.A. Sereдкин** // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management – Иркутск: E3S Web of Conferences, 2020. – Vol.209. – 07002 (0,375 п.л. / 0,1 п.л.) (Scopus)

4. Buyakova, N.V. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, Le Van Tхao, **D.A. Sereдкин** // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020) – Kazan’: E3S Web of Conferences, 2020. – Vol.216. – 01062. (0,438 п.л. / 0,11 п.л.) (Scopus)

5. Buyakova, N.V. Modelling of electromagnetic fields generated by 25 kV traction networks on multi-track sections / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, **D.A. Sereдкин** // Proceedings – 2022 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2022. – Сочи: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. – С.52 – 56. (0,313 п.л. / 0,104 п.л.) (Scopus)

6. Buyakova N.V. Magnetic Field Simulation at Busways Intersections / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, **D.A. Sereдкин**, A.D. Stepanov // AIP Conference Proceedings. – 2022. – Vol. 2647. – 060003. (0,438 п.л. / 0,11 п.л.) (Scopus)

7. Буякова, Н.В. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, питающими тяговые подстанции железных дорог / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, **Д.А. Сereдкин** // Электричество. – 2022. – №5. – С.28–38. (0,688 п.л. / 0,17 п.л.)

8. Буякова, Н. В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых тяговыми сетями 25 кВ на многопутных участках / Н. В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Сereдкин**, К.В. Суслов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – № 2(54). – С. 3 – 14.

(0,75 п.л. / 0,19 п.л.)

9. Буякова, Н. В. Моделирование электромагнитных полей трехфазной системы тягового электроснабжения / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, И.А. Фесак // Известия Транссиба. – 2022. – № 1(49). – С.83 – 94. (0,75 п.л. / 0,19 п.л.)

*Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:*

10. Крюков А.В. Программа для построения зависимостей напряженности электромагнитных полей, создаваемых линиями передачи, от стрелы провеса проводов / А.В. Крюков, А.П. Куцкий, Лэ Ван Тхао, **Д.А. Середкин**, Нгуен Ты // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021619265, дата гос. рег. 07.06.2021.

*Монография:*

11. Крюков, А.В. Моделирование перспективных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока: монография / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, А.В. Черепанов, И.А. Фесак – Иркутск: ИрГУПС, 2021. – 180 с. (11,25 п.л. / 2,81 п.л.)

*Другие публикации:*

12. Буякова, Н.В. Моделирование электромагнитных полей, возникающих в местах пересечения тяговых сетей и воздушных линий электропередачи / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2019. – Т. 64, № 4. – С.138–147. (0,625 п.л. / 0,21 п.л.)

13. Закарюкин, В.П. Моделирование электромагнитных полей высоковольтной ЛЭП при неполнофазных режимах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Наука и образование: актуальные исследования и разработки: материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Чита: ЗабГУ, 2019. – С. 116-120. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

14. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи при обрывах фаз / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов IX Международной научно-технической конференции. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2019. – С. 22-27. (0,375 п.л. / 0,19 п.л.)

15. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых высоковольтной ЛЭП при коротких замыканиях / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – Т.2. – С. 196-201. (0,375 п.л. / 0,19 п.л.)

16 Крюков, А. В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи при обрыве фазы с замыканием на землю / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Молодая наука Сибири. – 2019. – № 2(4). – С. 1-5. (0,3 п.л. / 0,16 п.л.)

17. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых линиями электропередачи при плавке гололеда / А.В. Крюков, Н.С. Лагунова, **Д.А. Середкин** // Современные технологии и научно-технический прогресс: Междунар. научн.-техн. конф. имени проф. В.Я. Баденикова. – Ангарск: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2019. – С. 246-247. (0,125 п.л. / 0,04 п.л.)

18. Буякова, Н.В. Электромагнитная безопасность на трассах высоковольтных ЛЭП в режимах несимметричных коротких замыканий / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019: сборник статей по материалам международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» – Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 333-337. (0,313 п.л. / 0,1 п.л.)

19. Середкин, Д.А. Влияние пространственного расположения проводов на электромагнитное поле высоковольтной ЛЭП // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – Т.2. – С. 22-27. (0,375 п.л. / 0,375 п.л.)

20. Буякова, Н.В. Электромагнитные поля в местах пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 750 кВ / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов Международной научно-практической конференции – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – С. 43-49. (0,435 п.л. / 0,15 п.л.)

21. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных полей высоковольтной ЛЭП при двойных замыканиях на землю / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Образование – наука – производство: материалы III Всероссийской научно-практической конференции – Чита, 2019. – Т. 1 – С. 188-193. (0,375 п.л. / 0,19 п.л.)

22. Буякова, Н.В. Моделирование электромагнитных полей сложной структуры, возникающих в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередачи / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – Т. 68, № 4. – С. 93–102. (0,625 п.л. / 0,21 п.л.)

23. Buyakova, N.V. Influence of spatial arrangement of wires on electromagnetic ecology near high-voltage power transmission lines at railway station / N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, Le Van Tхаo, **D.A. Sereckin**, K.V. Suslov // The 2020 International Conference on Transport and Infrastructure of the Siberian Region (SibTrans 2020) – Irkutsk: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020. – С. 1 – 5. (0,313 п.л. / 0,06 п.л.)

24. Буякова, Н.В. Электромагнитные поля в местах пересечения тяговых сетей и трехцепной ЛЭП / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2020. – №2. – С.68-75. (0,5 п.л. / 0,17 п.л.)

25. Середкин, Д.А. Влияние провеса проводов на электромагнитное поле высоковольтной линии электропередач // Современные технологии и научно-технический прогресс: Междунар. научн.-техн. конф. имени проф. В.Я. Баденикова. – Ангарск: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2020. – С. 221-222. (0,125 п.л. / 0,125 п.л.)

26. Крюков, А.В. Влияние провеса проводов на электромагнитное поле высоковольтной линии электропередач / А.В. Крюков, Д.А. Середкин // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. с межд. участием – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2020. – Т.1. – С.168-172. (0,313 п.л. / 0,16 п.л.)

27. Буякова, Н.В. Компьютерные модели в задачах обеспечения электромагнитной безопасности / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао, Д.А. Середкин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020. – С.73-83. (0,625 п.л. / 0,17 п.л.)

28. Крюков, А. В. Цифровые модели перспективных систем тягового электроснабжения повышенного напряжения / А.В. Крюков, Д.А. Середкин, А.Д. Степанов, А.В. Черепанов, И.А. Фесак // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – Т. 71, № 3. – С. 83–91. (0,563 п.л. / 0,11 п.л.)

29. Buyakova, N.V. Simulation of Electromagnetic Fields Generated by Overhead Power Lines and Railroad Traction Networks / N.V Buyakova, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov, D.A. Sereckin // Energy Systems Research. – 2021. – Vol. 4. No 2. – С. 70 – 88. (1,188 п.л. / 0,3 п.л.)

30. Середкин, Д.А. Электромагнитная безопасность в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередач при работе на высоте // Современные технологии и научно-технический прогресс: Междунар. научн.-техн. конф. имени проф. В.Я. Баденикова. – Ангарск: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2021. – С. 237-238. (0,125 п.л. / 0,125 п.л.)

31. Буякова, Н.В. Электромагнитные поля в местах двухуровневого пересечения электрифицированных железных дорог / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, Д.А. Середкин // Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции – Кемерово: КузГТУ, 2021 – С. 1- 5. (0,313 п.л. / 0,1 п.л.)

32. Буякова, Н.В. Моделирование магнитного поля в местах пересечения магистральных шинопроводов / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, Д.А. Середкин // Труды Братского Государственного Университета. Серия: естественные и инженерные науки. – 2021. – Т. 1. – С. 125-131. (0,438 п.л. / 0,15 п.л.)

33. Буякова, Н.В. Электромагнитная безопасность тяговых сетей при виртуальной сцепке тяжеловесных поездов / Н.В. Буякова, А.В. Крюков,

**Д.А. Середкин** // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021: сборник статей по материалам международной научно–практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2021» – Севастополь: СевГУ, 2021. – С. 106-110. (0,313 п.л. / 0,1 п.л.)

34. Крюков, А.В. Качество электроэнергии в перспективных системах электроснабжения магистральных железных дорог / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, И.А. Фесак // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 206-212. (0,438 п.л. / 0,15 п.л.)

35. Буякова, Н.В. Электромагнитные поля в местах пересечения воздушных и кабельных линий / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2021. – С. 180-185. (0,375 п.л. / 0,13 п.л.)

36. Середкин, Д.А. Моделирование электромагнитных полей в местах пересечения тяговых сетей и коридоров ЛЭП // Наука и образование – транспорту. – 2021. – №2. – С. 75-79. (0,313 п.л. / 0,313 п.л.)

37. Буякова, Н.В. Цифровые модели для определения условий электромагнитной безопасности на трассах управляемых самокомпенсирующихся ЛЭП / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин** // Международный симпозиум «Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE-2021» Материалы Международной конференции. – Казань: КГЭУ, 2021. – С. 291-302. (0,75 п.л. / 0,25 п.л.)

38. Буякова, Н. В. Электромагнитная безопасность на трассах многопутных участков тяговых сетей 25 кВ. / Н.В. Буякова, А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, А.Д. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – Т. 73, № 1. – С. 104–113. (0,625 п.л. / 0,16 п.л.)

39. Крюков, А.В. Сравнительный анализ подходов к нормированию электромагнитного поля в производственных условиях в соответствии с российскими и европейскими нормативными документами / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, Е.В. Титов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2022. – №10 (216). – С. 81 – 89. (0,563 п.л. / 0,19 п.л.)

40. Крюков, А.В. Учет гармонических искажений при моделировании электромагнитных полей линий электропередачи, питающих тяговые подстанции / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, А.В. Черепанов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2022. – №6. – С. 34-43. (0,625 п.л. / 0,21 п.л.)

41. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных полей трехфазных тяговых сетей с учетом гармонических искажений / А.В. Крюков, **Д.А. Середкин**, И.А. Фесак // Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2022. – С. 160-165. (0,375 п.л. / 0,125 п.л.)