

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Иркутский государственный университет путей  
сообщения»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Иркутский национальный исследовательский  
технический университет»

На правах рукописи



Середкин Дмитрий Александрович

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

2.4.3. Электроэнергетика

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Крюков Андрей Васильевич

Иркутск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОТЯЖЕННЫХ МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ .....	11
1.1 Электромагнитное поле многопроводной системы.....	11
1.2 Расчет электромагнитных полей на основе режима работы ЭЭС .....	12
1.3 Электромагнитное поле пересечения многопроводных систем .....	26
1.4 Учет гармонических искажений при расчете электромагнитных полей .....	29
Выводы .....	34
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С УЧЕТОМ РЕЖИМА РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ.....	36
2.1 Электромагнитное поле воздушных линий типовой конструкции .....	36
2.2 Влияние стрелы провеса на электромагнитное поле воздушной линии .....	39
2.3 Электромагнитное поле ЛЭП при неполнофазных режимах работы и сложных повреждениях .....	43
2.4 Экранирование электрического поля воздушной линии .....	51
2.5 Электромагнитное поле электрифицированных железных дорог .....	54
2.6 Электромагнитное поле тяговой сети повышенного напряжения.....	60
2.7 Электромагнитное поле тяговой сети с повышенной нагрузкой.....	65
Выводы .....	69
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕСТАХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ .....	72
3.1 Кабельная и воздушная линия .....	72
3.2 Тяговые сети и ЛЭП.....	75
3.3 Тяговая сеть с ЛЗФ и линия дальней электропередачи .....	84
3.4 Тяговая сеть и многоцепные ЛЭП.....	91
3.5 Тяговые сети повышенного напряжения и ЛЭП 500 кВ.....	100

3.6 Тяговая сеть и гибкий токопровод .....	108
3.7 Двухуровневое пересечение железных дорог .....	113
3.8 Магистральные шинопроводы.....	119
Выводы .....	122
4 УЧЕТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.....	125
4.1 Типовая тяговая сеть.....	125
4.2 Тяговая сеть повышенного напряжения .....	130
4.3 Трехфазная тяговая сеть .....	135
4.4 Линии электропередачи.....	139
4.5 Мультифазные линии электропередачи .....	151
Выводы .....	158
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	161
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	163
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	180

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- ВЛ – воздушная линия  
КЛ – кабельная линия  
ЭМП – электромагнитное поле  
ЭП – электрическое поле  
МП – магнитное поле  
ЛЭП – линия электропередачи  
РСЗ – решетчатая схема замещения  
ВЛЭП – воздушная линия электропередачи  
ТС – тяговая сеть  
ЭЭС – электроэнергетическая система  
СТЭ – система тягового электроснабжения  
МПЗ – межподстанционная зона  
ТЭ – тросовый экран  
АТЭ – активный тросовый экран  
ПТЭ – пассивный тросовый экран  
ВГ – высшие гармоники  
ИРМ – источник реактивной мощности  
ОПС – опорная подстанция  
ТП – тяговая подстанция  
ЭПС – электроподвижной состав  
ЭМБ – электромагнитная безопасность  
ЭМС – электромагнитная совместимость  
СТП – симметричный токопровод  
ПК – программный комплекс  
СЭЖД – системы электроснабжения железных дорог  
ЛЗФ – линия с заземленной фазой

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Электромагнитные поля являются опасной формой загрязнения окружающей среды. Объекты электроэнергетики, в том числе линии электропередачи, являются источниками ЭМП с повышенными уровнями напряженностей, которые могут вызывать нарушения работы электрических и электронных устройств, а также возгорание легковоспламеняющихся веществ [1 – 29]. Дополнительно возникает опасность воздействия на персонал наведенных напряжений при выполнении работ на отключенных линиях электропередачи и связи [30]. Воздействие ЭМП на человека также имеет негативные последствия [4, 8, 14, 31 – 34].

Трехфазные ЛЭП при симметричной нагрузке являются электромагнитно уравновешенными и потому создают ЭМП со сравнительно малыми уровнями напряженностей на нормируемой высоте [35 – 40]. 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 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.

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 [4, 8, 14, 31 – 34].

**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., Левитт Б. Блейк., 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 [1 – 8, 10, 11, 13, 14, 16, 22 – 25, 29, 33 – 37, 41 – 87].

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, базирующийся, в отличие от известных, на определении несинусоидальных режимов электроэнергетических систем и систем электроснабжения железных дорог и позволяющий 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 позволят 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 ИрГУПСе программный комплекс «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 [35, 36, 38 – 40, 45 – 58, 73, 79 – 86, 88 – 100], из них 3 статьи в изданиях,

рекомендованных ВАК, 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.

# 1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОТЯЖЕННЫХ МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

## 1.1 Электромагнитное поле многопроводной системы

Электромагнитные поля объектов электроэнергетики обычно связывают с понятием электромагнитная обстановка, которое включает в себя совокупность электромагнитных явлений и процессов в заданной области пространства, частотном и временном диапазонах [101]. Задачи определения электромагнитной обстановки рассматриваются в двух основных направлениях:

- электромагнитная совместимость;
- электромагнитная безопасность.

Электромагнитная совместимость рассматривает способность технических средств функционировать при действии на них электромагнитных помех, а также не создавать недопустимых помех другим устройствам. Задачи ЭМС решаются для совокупности подвергающегося воздействиям объекта и их источников, при этом контролируемые параметры могут определяться для каждой задачи индивидуально. Так, например, электрифицированные железные дороги из-за электромагнитной несбалансированности являются одним из серьезных источников ЭМП, а нелинейные вольтамперные характеристики электровозов приводят к генерации высших гармоник.

Электромагнитная безопасность определяет защищенность людей от вредного и опасного воздействия электромагнитных полей. Нормирование параметров электромагнитных полей в задачах электромагнитной безопасности в настоящее время проводится на основе российских и межгосударственных нормативных документов. В частности, санитарные правила и нормы регламентируют требования наиболее подробно и сопровождаются методическими указаниями по выполнению контроля и проведению защитных мероприятий.

Условия ЭМБ определяются для двух укрупненных групп [73, 102 – 105]:

– персонала, профессионально связанного с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников, для которого допустимы повышенные уровни напряженности;

– людей, профессионально не связанных с эксплуатацией и обслуживанием излучающих источников; к ним относятся лица, находящиеся в жилых, общественных, служебных зданиях, на территориях жилой застройки, в местах массового отдыха; для них устанавливаются более жесткие требования по обеспечению ЭМБ.

Напряженности электромагнитного поля, создаваемые объектами электроэнергетики в нормальных режимах работы, обычно не превышают нормативных значений для электротехнического персонала. Однако, трассы линий электропередачи и электрифицированных железных дорог не редко располагаются на селитебных территориях или в непосредственной близости от них, что может приводить к превышению допустимых уровней.

## **1.2 Расчет электромагнитных полей на основе режима работы ЭЭС**

Определение значений напряженности ЭМП осуществляется с применением уравнений Максвелла, которые решаются аналитическими или численными методами. Используемые в настоящее время методы расчета ЭМП многопроводных систем [108] (линий электропередачи, тяговых сетей железных дорог) базируются в основном на рассмотрении участка многопроводной системы как локального объекта. Такой подход может приводить к значительным погрешностям моделирования, так как не учитывает важных системных свойств моделируемого объекта [59].

Определение напряженностей электромагнитного поля по предлагаемой методике осуществляется на основе решения уравнений установившегося режима, записанных в фазных координатах [60, 61]

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \mathbf{0}, \quad (1.1)$$

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 основу предлагаемых в настоящей работе моделей и методов расчета режимов для определения ЭМП положен подход, базирующийся на использовании фазных координат [61, 62]; при этом применяются решетчатые схемы замещения (РСЗ), обладающие полносвязной топологией, то есть

$$TEC : hub \cup con, \forall i, j \in hub \rightarrow con_{i,j} \subset con,$$

где  $TEC$  – обозначение РСЗ;  $hub$  – множество узлов РСЗ;  $con$  – множество ветвей РСЗ.

Множество силовых элементов ЭЭС можно представить как объединение двух подмножеств

$$EPS = Power \cup Conv.$$

В первое подмножество входят элементы для транспорта электроэнергии: воздушные и кабельные линии электропередачи, токопроводы, тяговые сети. Второе – образуют преобразовательные элементы, к которым относятся трансформаторы различных конструкций.

Несмотря на значительные конструктивные отличия устройств, входящих в  $EPS$ , их можно обобщенно рассматривать как статические многопроводные элементы, состоящие из набора проводов или обмоток с электромагнитными связями (рисунок 1.1).

Получение РСЗ для ЛЭП или ТС включает следующие этапы:

- формирование матрицы проводимостей без учета емкостных связей между проводами;
- добавление емкостных связей.

На первом этапе формируется матрица проводимостей РСЗ размерностью  $n = 2r$ , в которой не учтены емкостные связи между отдельными проводами, а также между проводами и землей:

$$\underline{\mathbf{Y}}_{PC} = -\underline{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{Z}}^{-1}\underline{\mathbf{M}}^T = \begin{bmatrix} -\underline{\mathbf{D}} & \underline{\mathbf{D}} \\ \underline{\mathbf{D}} & -\underline{\mathbf{D}} \end{bmatrix},$$

где  $\underline{\mathbf{D}} = \underline{\mathbf{Z}}^{-1}$ ;  $\underline{\mathbf{Z}}$  – матрица сопротивлений, имеющая размерность  $r \times r$ ;  $\underline{z}_{ik} = \underline{z}_{ki}$ ;  $r$  – число проводов ЛЭП.

Матрица  $\underline{\mathbf{M}}$  формируется так

$$\underline{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_r \\ -\mathbf{E}_r \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{E}_r$  – единичная матрица с размерностью  $r \times r$ .

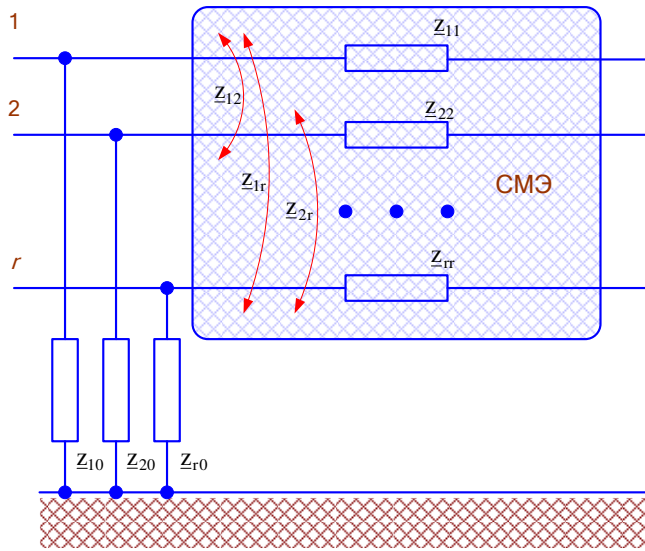


Рисунок 1.1. Эквивалентная схема статического многопроводного элемента

Учет емкостных связей осуществляется на основе соотношения

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

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

коэффициентов, имеющая размерность  $r \times r$ .

Компоненты матрицы  $\underline{\mathbf{A}}$  рассчитываются по следующим формулам:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{2h}{r_w}; \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}},$$

где  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $h$  – эквивалентная высота подвеса провода, учитывающая стрелу провеса;  $D_{ij}$  – расстояние между проводом  $i$  и зеркальным изображением провода  $j$ ;  $d_{ij}$  – расстояние между проводами  $i$  и  $j$ ;  $r_w$  – радиус провода.

Сопровитления шунтов, которые добавляются в узлы РСЗ, можно найти с помощью емкостных коэффициентов, содержащихся в матрице  $\mathbf{B}$ . Порядок формирования матриц РСЗ трансформаторов описан в работе [61].

Матрица проводимостей двухобмоточного трансформатора формируется по аналогичному принципу

$$\underline{\mathbf{Y}} = -\underline{\mathbf{M}}\underline{\mathbf{Z}}_E^{-1}\underline{\mathbf{M}}^T,$$

где  $\underline{\mathbf{Z}}_E = \underline{\mathbf{Z}} - j\omega \underline{\mathbf{W}}_1 \underline{\mathbf{R}}_M^{-1} \underline{\mathbf{W}}_2$ ;  $\underline{\mathbf{Z}}$ ,  $\underline{\mathbf{R}}_M$  – соответственно матрицы электрических и магнитных сопротивлений;  $\underline{\mathbf{W}}_1$ ,  $\underline{\mathbf{W}}_2$  – матрицы, составленные из чисел витков обмоток трансформатора. Такой же подход применяется при формировании РСЗ многообмоточных трансформаторов и автотрансформаторов.

Из матриц  $\underline{\mathbf{Y}}_{ck}$ ,  $k = 1 \dots n$ , отвечающих отдельным элементам, формируется модель сети, которой соответствует матрица проводимостей  $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma$ . Эту матрицу можно получить на основе следующего преобразования:

$$\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma = \underline{\mathbf{M}}_0 \underline{\mathbf{Y}}_V \underline{\mathbf{M}}_0^T,$$

где  $\underline{\mathbf{M}}_0$  – обобщенная матрица инцидентий, включающая подматрицы  $\mathbf{P}$ .

Матрица проводимостей ветвей  $\underline{\mathbf{Y}}_V$  является блочно-диагональной:

$$\underline{\mathbf{Y}}_V = \text{diag} \underline{\mathbf{Y}}_{sk}.$$

Система уравнений установившегося режима формируется на базе полученной матрицы  $\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma$ . Эту систему можно представить так

$$\underline{\mathbf{Y}}_\Sigma \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{I}}, \tag{1.2}$$

где  $\dot{\mathbf{U}}$  – вектор фазных напряжений;  $\dot{\mathbf{I}}$  – вектор задающих токов.

После задания фиксированных значений напряжений в балансирующих узлах уравнения (1.2) могут быть представлены так

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_1 & \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{B1} & \underline{\mathbf{Y}}_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{U}} \\ \dot{\mathbf{U}}_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{i}} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix},$$

где  $\dot{\mathbf{U}}_B$  – вектор напряжений балансирующих узлов;  $\underline{\mathbf{Y}}_{1B} = \underline{\mathbf{Y}}_{B1}^T$ ,  $\underline{\mathbf{Y}}_B$  – блоки, отвечающие ветвям, связанным с ними.

После исключения уравнений, отвечающих балансирующим узлам, можно записать

$$\underline{\mathbf{Y}}_1 \dot{\mathbf{U}} = \dot{\mathbf{i}} - \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \dot{\mathbf{U}}_B.$$

Путем замены токов мощностями может быть сформирована система нелинейных УУР

$$\underline{\mathbf{Y}}_1 \dot{\mathbf{U}} = \text{diag} \left( \frac{\tilde{S}_k}{\tilde{U}_k} \right) \mathbf{n} - \underline{\mathbf{Y}}_{1B} \dot{\mathbf{U}}_B, \quad (1.3)$$

где  $\tilde{S}_k$  – сопряженный комплекс мощности  $k$ -го узла;  $\mathbf{n}$  – вектор размерностью  $n - n_B$ , состоящий из единиц;  $n$  – общее число узлов сети;  $n_B$  – число балансирующих узлов;  $\tilde{U}_k$  – сопряженный комплекс напряжения  $k$ -го узла. Путем разделения вещественных и мнимых величин уравнения (1.3) могут быть представлены в виде (1.1).

Узловые напряжения  $\mathbf{U}$ , определяемые из решения системы уравнений установившегося режима, могут быть записаны в декартовой и полярной системах координат. В первом случае вектор  $\mathbf{U}$  может быть представлен набором вещественных и мнимых составляющих

$$\mathbf{U} = [U'_1 \quad U''_1 \quad U'_2 \quad U''_2 \quad \dots \quad U'_k \quad U''_k \quad \dots \quad U'_n \quad U''_n]^T.$$

При использовании полярных координат этот вектор составлен модулями и фазами узловых напряжений:

$$\mathbf{U} = [U_1 \quad \varphi_1 \quad U_2 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad U_k \quad \varphi_k \quad \dots \quad U_n \quad \varphi_n]^T.$$

Составляющие узловых напряжений, записанные в декартовых и полярных координатах, связаны очевидными соотношениями:

$$U'_k = U_k \cos \varphi_k; \quad U''_k = U_k \sin \varphi_k; \quad U = \sqrt{(U'_k)^2 + (U''_k)^2}.$$



По найденным значениям компонентов вектора  $\mathbf{U}$  вычисляются токи, протекающие по проводам анализируемой линии:

$$\dot{\mathbf{i}} = [\dot{i}_1 \quad \dot{i}_2 \quad \dots \dot{i}_j \dots \dot{i}_p]^T,$$

где  $\dot{i}_j = I_j e^{j\varphi_{ij}}$ .

В системах электроснабжения железных дорог 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  $T_M$  разбивается на малые промежутки  $\Delta t$ , внутри которых параметры режима принимаются неизменными. При этом интервал  $\Delta t$  выбирается индивидуально для каждой исследуемой системы с учетом особенностей режимов работы, так для систем тягового электроснабжения железной дороги переменного тока со скоростями движения менее 160 км/ч значение шага по времени может быть выбрано равным 1 минуте [107].

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

$$\mathbf{F}_k(\mathbf{U}_k, \mathbf{V}_k) = \mathbf{0}, \quad (1.4)$$

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

Напряжения и токи для  $k$ -ой схемы могут быть записаны следующим образом

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

где  $\dot{U}_j^{(k)} = U_j^{(k)} e^{j\varphi_j^{(k)}}$ ,  $\dot{i}_j^{(k)} = I_j^{(k)} e^{j\varphi_{ij}^{(k)}}$ .

После определения режима работы ЭЭС [60] может быть выполнен расчет напряженностей электрического и магнитного полей, создаваемых любой из многопроводных ЛЭП, входящих в состав моделируемой системы.

Для решения сформулированной задачи выбрана правосторонняя декартова система координат, ось  $Y$  которой направлена вертикально вверх, а ось  $X$  перпендикулярна трассе ЛЭП и направлена так, что ось  $Z$  противоположна току линии. Начало координат лежит на плоской поверхности земли.

Анализ электромагнитной обстановки ЛЭП и СТЭ сводится к определению комплексов эффективных значений напряженностей электрического  $\dot{E} = \dot{E}(x, y)$  и магнитного  $\dot{H} = \dot{H}(x, y)$  полей в различных точках с координатами  $x, y$  в плоскости, перпендикулярной оси рассматриваемой линии. Для расчета  $\dot{E}$  и  $\dot{H}$  необходимы следующие исходные данные:

- параметры токоведущих частей и координаты их расположения в пространстве;
- параметры и геометрия металлических конструкций и объектов, которые могут создавать экранирующие эффекты;
- токи  $\dot{I}_i, i = 1 \dots N$ , протекающие по проводам;
- напряжения  $\dot{U}_i, i = 1 \dots n$  в узлах сети.

В квазистационарной постановке для промышленной частоты задача расчета напряженностей может рассматриваться отдельно для электрического и магнитного полей.

Определение напряженности электрического поля системы параллельных проводов для области пространства, расположенной вне проводов и земли, производится с применением первой группы формул Максвелла [108]

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^N \dot{t}_i \cdot \alpha_i, \quad (1.5)$$

где потенциальные коэффициенты определяются из закона Гаусса в интегральной форме (третье уравнение Максвелла)  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_{k \in V} q_k$  для каждого провода:

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i}, \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}, \quad (1.6)$$

где  $\tau_i$  – заряд провода  $i$  на единицу длины;  $x_i, y_i$  – координаты расположения провода  $i$  радиуса  $r_i$ ;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

Заряды проводов вычисляются через напряжения после расчета режима ЭЭС, в состав которой входит рассматриваемая многопроводная система:

$$\mathbf{T} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{U} \quad (1.7)$$

где  $\mathbf{U} = [\dot{U}_1 \quad \dots \quad \dot{U}_N]^T$  – вектор-столбец напряжений проводов по отношению к земле;  $\mathbf{T} = [\dot{\tau}_1 \quad \dots \quad \dot{\tau}_N]^T$  – вектор-столбец зарядов проводов на единицу их длины;  $\mathbf{A}$  – симметричная матрица потенциальных коэффициентов.

Вектор напряженности электрического поля определяется градиентом потенциала, в котором для плоскопараллельного поля имеются только две составляющие:

$$\vec{E} = -\text{grad } \phi = -\vec{i} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \vec{j} \frac{\partial \phi}{\partial y}, \quad (1.8)$$

где  $\vec{i}, \vec{j}$  – направляющие векторы декартовой системы координат; знак минус учитывает направление вектора напряженности в сторону убывания потенциала.

При задании комплексного потенциала составляющие вектора напряженности электрического поля согласно (1.8) определяются путем нахождения частных производных потенциала (1.5) [54]:

$$\begin{aligned} \dot{E}_x &= -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{2}{\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{(x - x_i) y y_i}{d_i}, \\ \dot{E}_y &= -\frac{\partial \phi}{\partial y} = -\frac{1}{\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{y_i \left( (x - x_i)^2 - y^2 + y_i^2 \right)}{d_i} \end{aligned} \quad (1.9)$$

где  $d_i = [(x_i - x)^2 + (y_i + y)^2][(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]$ .

Уравнения (1.7) определяют комплексы действующих значений, поскольку при расчете режима вычисляются комплексы потенциалов

соответствующих узлов схемы. После перехода от комплексных действующих значений составляющих  $\dot{E}_x$  и  $\dot{E}_y$  к временным зависимостям получаются параметрические уравнения годографа вектора напряженности электрического поля:

$$E_x(t) = \sqrt{2} E_x \sin(\omega t + \varphi_x); E_y(t) = \sqrt{2} E_y \sin(\omega t + \varphi_y),$$

где множитель  $\sqrt{2}$  требуется из-за того, что расчеты напряжений проводятся по действующим значениям;  $\omega = 314$  рад/с.

Максимального значения  $E_{\max}$  напряженность поля достигает в моменты времени, определяемые следующим уравнением [86]:

$$t_{\max} = \frac{1}{2\omega} \operatorname{Arctg} \frac{E_x^2 \sin 2\varphi_x + E_y^2 \sin 2\varphi_y}{E_x^2 \cos 2\varphi_x + E_y^2 \cos 2\varphi_y}.$$

Выбор одного из значений арктангенса производится по условию отрицательного значения второй производной

$$E_x^2 \cos 2(\omega t_{\max} + \varphi_x) + E_y^2 \cos 2(\omega t_{\max} + \varphi_y) < 0.$$

Напряженность магнитного поля одиночного длинного провода определяется интегральной формой закона полного тока (первое уравнение Максвелла):

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I, \text{ или } \dot{H} = \frac{\dot{I}}{2\pi r}, \quad (1.10)$$

где  $r$  – расстояние от оси провода до точки наблюдения,  $\dot{I}_i$  – комплекс эффективного значения тока провода, определенного при расчете режима ЭЭС.

Поскольку вектор напряженности магнитного поля направлен по касательной к окружности с центром на оси провода, координатные составляющие вектора определяются формулами

$$\dot{H}_x = \frac{\dot{I}_i}{2\pi} \frac{y - y_i}{r^2}; \dot{H}_y = -\frac{\dot{I}_i}{2\pi} \frac{x - x_i}{r^2}, \quad (1.11)$$

где  $x, y$  – координаты точки наблюдения;  $x_i, y_i$  – координаты провода;  $r^2 = (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2$ . Ось  $Y$  декартовой системы координат направлена

вертикально вверх, ось  $X$  перпендикулярна проводу, ось  $Z$  направлена противоположно току провода, начало координат лежит на поверхности плоской земли.

Для системы из  $N$  проводов координатные составляющие напряженности определяются суммированием полей каждого провода:

$$\dot{H}_x = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \frac{y - y_i}{r^2}; \quad \dot{H}_y = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \frac{x_i - x}{r^2}. \quad (1.12)$$

Дальнейшие расчеты проводятся аналогично электрическому полю [46].

По найденным значениям  $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{H}_x, \dot{H}_y$  может быть определена плотность потока электромагнитной энергии (вектор Пойнтинга) [60]:

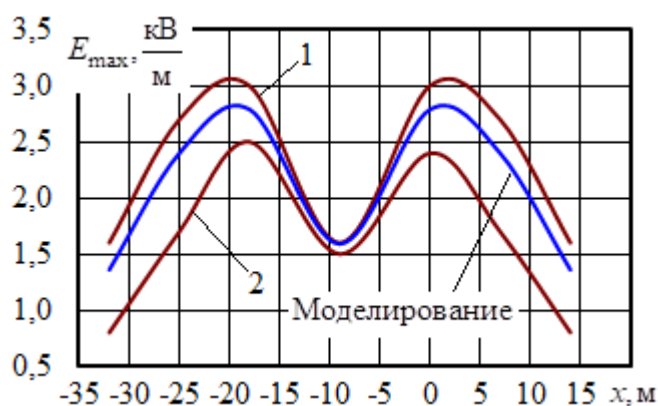
$$\Pi_0 = \frac{1}{2} [E_x \cdot H_y \cos(\varphi_{E_x} - \varphi_{H_y}) - E_y \cdot H_x \cos(\varphi_{E_y} - \varphi_{H_x})].$$

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

- системность – определение ЭМП на основе расчета режима сложной ЭЭС и СТЭ;
- мультифазность – расчет однофазных, трехфазных и многофазных систем, а также их различных сочетаний;
- многорежимность – вычисление напряженностей ЭМП для нормальных, аварийных, неполнофазных режимов, а также режимов плавки гололеда;
- универсальность – расчет ЭМП для ЛЭП и тяговых сетей различного конструктивного исполнения.

Данные особенности предлагаемых методов и моделей описывают ключевые отличия от известных подходов к расчету электромагнитных полей линий электропередачи.

Экспериментальная проверка методики проведена путем сравнения результатов расчета напряженности электрического поля, создаваемого воздушной ЛЭП 220 кВ, с экспериментальными данными, приведенными в работе [109]. Результаты измерений и расчетов, свидетельствующие о приемлемой точности, приведены на рисунке 1.2.



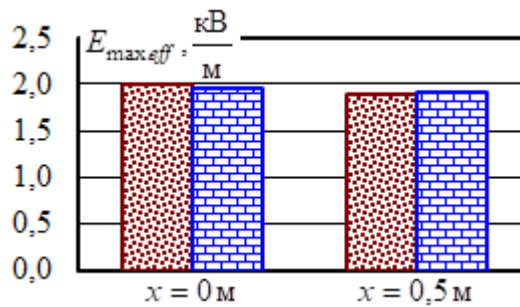
**Рисунок 1.2.** Сравнение экспериментальных и расчетных данных:

1, 2 – границы области рассеяния экспериментальных данных

На рисунке 1.3 представлены результаты расчетов и экспериментальных исследований электрического поля контактной сети [23]. Полученные результаты свидетельствуют о том, что расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превосходит 2 %.

Также проведены измерения напряженностей электрического и магнитного полей частотой 50 Гц и выполнены сопоставительные расчеты для двухцепной линии 110 кВ с грозозащитным тросом, расположенной в черте города. Измерения проводились в промежутке между двумя опорами. Высоты подвеса проводов над местом измерения составляли 19 м (грозотрос), 16 м, 13 м, 10 м (фазные провода). К линии у ближней к месту измерений опоры подключена одноцепная тупиковая отпайка 110 кВ. На расстоянии 10 м от ЛЭП с небольшим понижением поверхности земли расположен металлический забор гаражного кооператива, который должен оказывать существенное влияние на электрическое поле.

По данным режимных измерений двухцепной ЛЭП по цепи, ближайшей к отпайке, проходит поток мощности порядка  $9 - j12$  МВ·А; по второй цепи поток составляет  $6 - j9$  МВ·А; отпайка потребляет  $6 + j3$  МВ·А. Для корректного учета многопроводной системы с объектами, влияющими на ЭМП, реализована ее модель в ПК Fazonord, включающая 19 проводов.

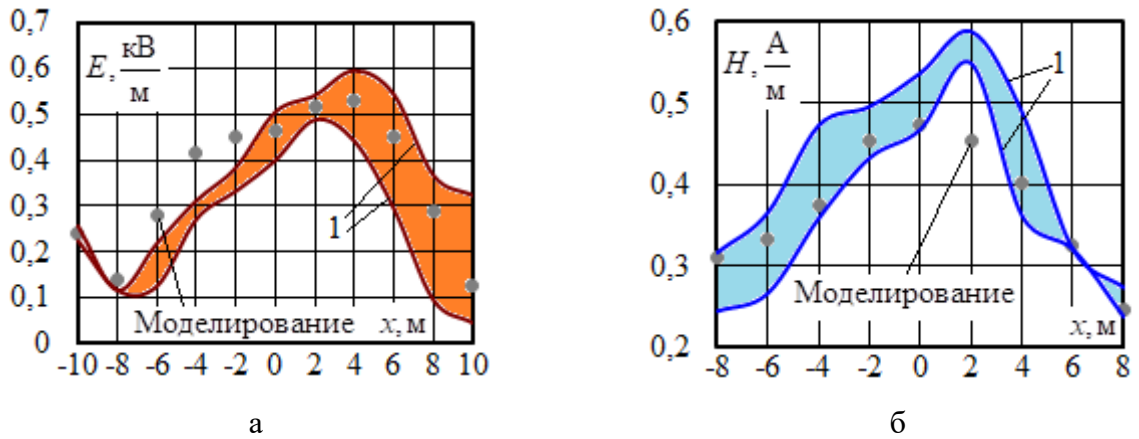


**Рисунок 1.3. Расчетные и экспериментальные значения напряженности электрического поля контактной сети**

Для более загруженной цепи фазные напряжения были взяты симметричными по 65 кВ, для менее загруженной – по 66 кВ. Указанные выше нагрузки, симметрично разложенные по фазам, при расчете режима привели к токам 77 А проводов левой цепи, 54 А правой цепи и 34 А – отпайки. В результате расчета режима ток грозотроса составил величину порядка 0,1 А. Таким образом, грозотрос, существенно изменяя электрическое поле, на напряженность магнитного поля влияния практически не оказывает.

Экспериментальные измерения напряженностей электромагнитного поля, выполненные прибором ПЗ-50, представлены тремя группами значений, полученных в разное время; при этом приняты такие же направления осей координат, как и в расчетной методике. Начало координат расположено под центром ЛЭП в середине пролета на поверхности земли. Измерения пересчитывались по проекциям напряженностей на соответствующие оси координат на высоте 1,5 м от поверхности земли. Результаты измерений и расчетов представлены на рисунке 1.4. Выход некоторых точек из границ рассеяния экспериментальных данных объясняется, в основном, погрешностями определения высот проводов, а также неточным заданием напряжений проводов и наличием несимметрии, вызванной нагрузками.

Ниже рассмотрено сравнение предлагаемой методики с результатами расчетов в программе ELCUT [106], которая позволяет решать большой объем электромагнитных, цепно-полевых, тепловых и механических задач методом конечных элементов, требующим сравнительно больших вычислительных затрат.



**Рисунок 1.4. Интервальное представление результатов измерений напряженностей ЭМП:** а – электрическое поле; б – магнитное поле; 1 – границы области рассеяния экспериментальных данных

Ниже рассмотрено сравнение предлагаемой методики с результатами расчетов в программе ELCUT [106], которая позволяет решать большой объем электромагнитных, цепно-полевых, тепловых и механических задач методом конечных элементов, требующим сравнительно больших вычислительных затрат.

Программа ELCUT может применяться для решения локальных задач электромагнитной совместимости и безопасности, при этом параметры токов и напряжений задаются по проектным данным или рассчитываются на основе схем замещения. Кроме того, в текущей версии программы не реализован расчет объемных задач для систем переменного тока.

Подходы, предлагаемые в данной работе и реализованные в ПК Fazonord, обладают преимуществом, заключающимся в возможности расчета ЭМП на основе определения режимов сложной ЭЭС.

Моделирование осуществлялось для линии электропередачи 220 кВ и системы тягового электроснабжения 25 кВ. Расположение токоведущих частей показано на рисунке 1.5, напряжения и токи заданного режима работы сведены в таблицах 1.1 и 1.2. Результаты сравнения значений напряженности электрического и магнитного полей проиллюстрированы на рисунках 1.6 и 1.7.



Результаты расчета режима работы ЛЭП

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	133	0	550	0
В	133	-120	550	-120
С	133	120	550	120

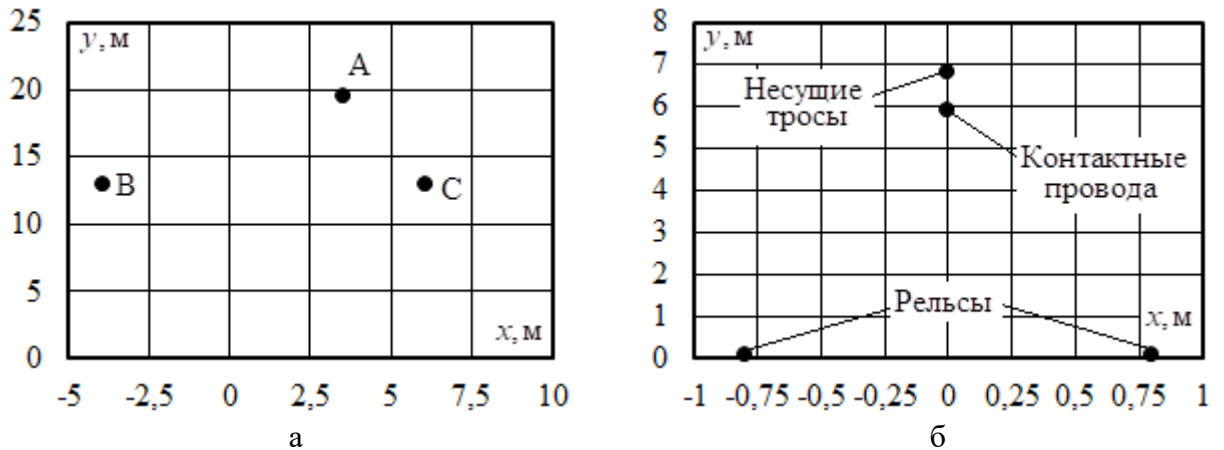


Рисунок 1.5. Расположение токоведущих частей: а – ЛЭП; б – СТЭ

Результаты расчета режима работы СТЭ

Элемент	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
Контактная подвеска	25	0	420	0
Рельс	0	-	210	180

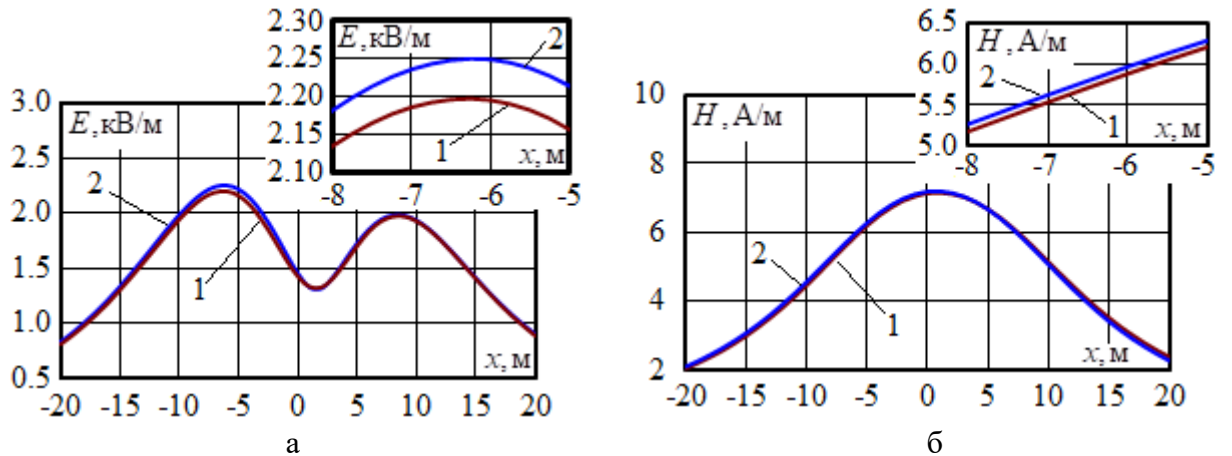


Рисунок 1.6. Сравнение расчетов напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП: 1 – ELCUT; 2 – Fazonord

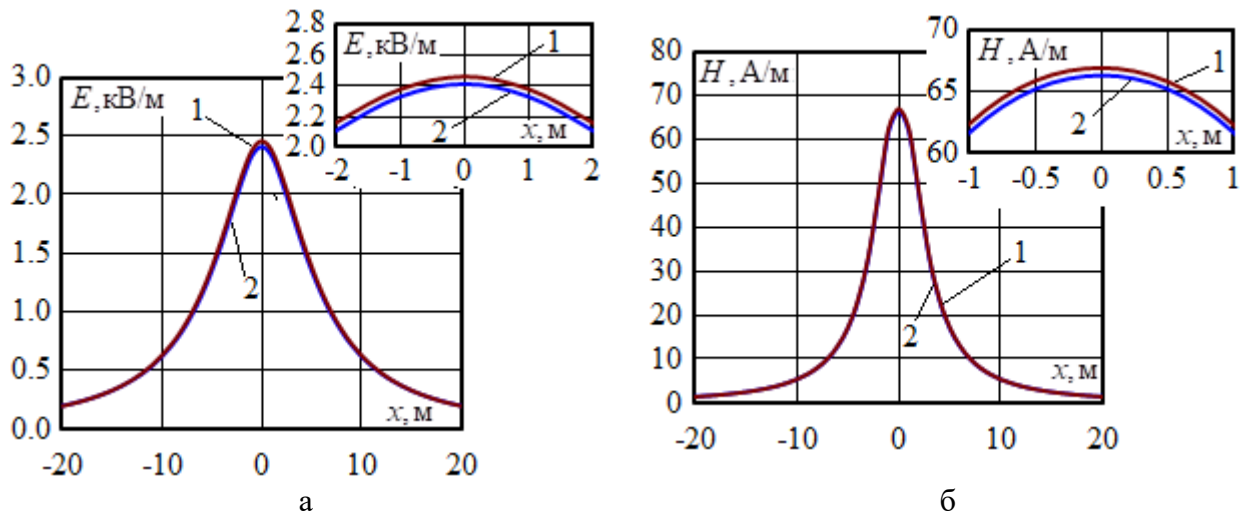


Рисунок 1.7. Сравнение расчетов напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей СТЭ: 1 – ELCUT; 2 – Fazonord

В целом характер зависимостей напряженности поля от координаты  $x$ , полученные по предлагаемой методике, отвечает аналогичным зависимостям, построенным на основе экспериментов или с помощью альтернативных методик. В первом эксперименте максимальные значения напряженности практически равны расчетным. Во втором – расчетные значения лежат внутри границ области рассеяния экспериментальных значений, а высокая корреляция между экспериментальными и расчетными данными подтверждает адекватность моделирования. Сравнение с программой ELCUT также показало практически полное совпадение результатов.

### 1.3 Электромагнитное поле пересечения многопроводных систем

На основе представленной в разделе 1.2 методики, предполагая взаимную перпендикулярность проводов пересекающихся линий электропередачи, можно рассчитать составляющие векторов ЭМП и затем определить суммарное поле. На рисунке 1.8 показана схема пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 220 кВ. Ниже описана методика моделирования на примере данного пересечения.

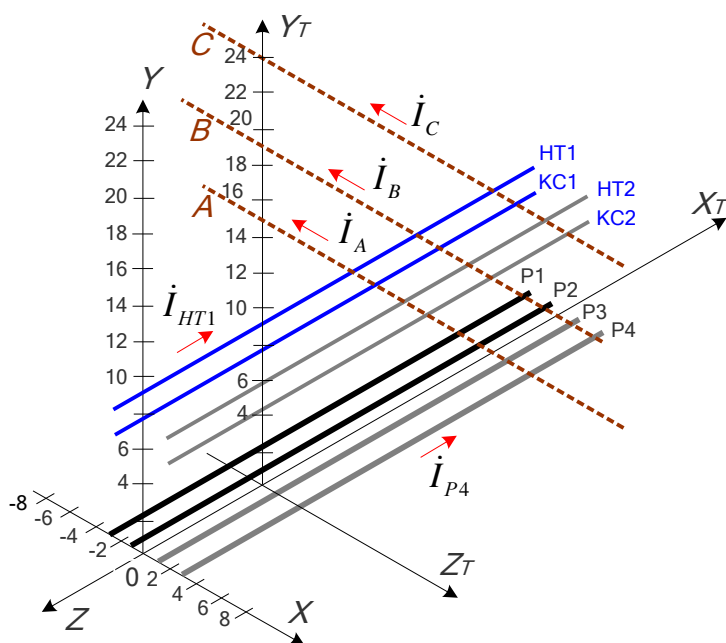


Рисунок 1.8. Схема взаимного расположения ЛЭП и тяговой сети 25 кВ

На рисунке 1.8 провода контактной подвески и рельсы нечетного пути выделены синим и черным цветом, а провода и рельсы четного пути – серым. Провода ЛЭП обозначены пунктирными линиями. Моделирование железной дороги и ЛЭП производится в разных системах координат, что облегчает расчеты полей. Координатные оси задаются следующим образом:  $Z$  направлена по трассе железной дороги, а  $Z_T$  вдоль проводов ЛЭП. Направления осей  $Z$  и  $Z_T$  противоположны направлениям токов. Начала координат расположены на оси железной дороги. Напряженности электромагнитного поля определяются по ранее описанной методике. Координаты в системе  $X_T Y_T Z_T$  связаны с  $XYZ$  следующими соотношениями

$$x = z_T; y = y_T; z = -x_T.$$

Составляющие векторов поля ЛЭП преобразуются из системы координат  $X_T Y_T Z_T$  в систему  $XYZ$  аналогичными соотношениями

$$\dot{E}_X' = \dot{E}_{TZ}; \dot{E}_Y' = \dot{E}_{TY}; \dot{E}_Z' = -\dot{E}_{TX}; \dot{H}_X' = \dot{H}_{TZ}; \dot{H}_Y' = \dot{H}_{TY}; \dot{H}_Z' = -\dot{H}_{TX}.$$

Тогда составляющие напряженностей в заданной точке могут быть определены по следующим формулам [54]

$$\dot{E}_{\Sigma X} = \dot{E}_X + \dot{E}_{TZ}; \dot{E}_{\Sigma Y} = \dot{E}_Y + \dot{E}_{TY}; \dot{E}_{\Sigma Z} = \dot{E}_Z - \dot{E}_{TX};$$

$$\dot{H}_{\Sigma X} = \dot{H}_X + \dot{H}_{TZ}; \dot{H}_{\Sigma Y} = \dot{H}_Y + \dot{H}_{TY}; \dot{H}_{\Sigma Z} = \dot{H}_Z - \dot{H}_{TX},$$

где  $\dot{E}_X, \dot{E}_Y, \dot{E}_Z, \dot{H}_X, \dot{H}_Y, \dot{H}_Z$  – составляющие напряженностей электрического и магнитного полей тяговой сети;  $\dot{E}_{TX}, \dot{E}_{TY}, \dot{E}_{TZ}, \dot{H}_{TX}, \dot{H}_{TY}, \dot{H}_{TZ}$  – составляющие напряженностей электрического и магнитного полей ЛЭП.

Таким образом напряженности ЭМП в окрестности ортогонального пересечения двух (или более) ЛЭП (ТС) могут быть получены на основе алгоритма, включающего следующие этапы.

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

2. По методике, изложенной в разделе 1.2, определяются составляющие напряженностей электрического и магнитного полей.

3. Вычисляются суммарные составляющие напряженностей в заданной точке трехмерного пространства, отвечающей окрестности пересечения

$$\dot{E}_{\Sigma X} = \dot{E}_X + \dot{E}_{TZ}; \dot{E}_{\Sigma Y} = \dot{E}_Y + \dot{E}_{TY}; \dot{E}_{\Sigma Z} = \dot{E}_Z - \dot{E}_{TX};$$

$$\dot{H}_{\Sigma X} = \dot{H}_X + \dot{H}_{TZ}; \dot{H}_{\Sigma Y} = \dot{H}_Y + \dot{H}_{TY}; \dot{H}_{\Sigma Z} = \dot{H}_Z - \dot{H}_{TX}.$$

4. Определяются временные зависимости и амплитудные значения напряженностей

$$\dot{E}_{\Sigma i} = E_{\Sigma i} e^{j\varphi_i}; E_{\Sigma i}(t) = \sqrt{2} E_{\Sigma i} \sin(\omega t + \varphi_i);$$

$$\dot{H}_{\Sigma i} = H_{\Sigma i} e^{j\psi_i}; H_{\Sigma i}(t) = \sqrt{2} H_{\Sigma i} \sin(\omega t + \psi_i);$$

$$i = 1 \dots 3.$$

Векторы напряженностей электрического и магнитного полей в каждой точке пространства описывают эллипсы в некоторой плоскости поляризации, которая определяется составляющими векторов [48, 110]. Годограф вектора напряженности, расположенный в плоскости поляризации, можно определить следующим путем.

1. Определяются направляющие косинусы большой полуоси эллипса поляризации, составляющие единичный вектор большой полуоси:

$$\cos \alpha_{\max} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma X} \sin (\omega t_{\max} + \varphi_X)}{\sqrt{E_S}}; \quad \cos \beta_{\max} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma Y} \sin (\omega t_{\max} + \varphi_Y)}{\sqrt{E_S}};$$

$$\cos \gamma_{\max} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma Z} \sin (\omega t_{\max} + \varphi_Z)}{\sqrt{E_S}}; \quad \vec{e}_{\max} = (\cos \alpha_{\max}, \cos \beta_{\max}, \cos \gamma_{\max}).$$

2. Аналогично определяются составляющие единичного вектора малой полуоси эллипса поляризации:

$$\cos \alpha_{\min} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma X} \sin (\omega t_{\min} + \varphi_X)}{\sqrt{E_S}}; \quad \cos \beta_{\min} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma Y} \sin (\omega t_{\min} + \varphi_Y)}{\sqrt{E_S}};$$

$$\cos \gamma_{\min} = \frac{\sqrt{2} E_{\Sigma Z} \sin (\omega t_{\min} + \varphi_Z)}{\sqrt{E_S}}; \quad \vec{e}_{\min} = (\cos \alpha_{\min}, \cos \beta_{\min}, \cos \gamma_{\min}).$$

3. Для каждого момента времени определяются скалярные произведения вектора напряженности и соответствующего единичного вектора эллипса поляризации, определяющие проекции на полуоси:

$$E_{\Sigma \max}(t) = \sqrt{2} [E_{\Sigma X} \sin (\omega t + \varphi_X) \cos \alpha_{\max} +$$

$$+ E_{\Sigma Y} \sin (\omega t + \varphi_Y) \cos \beta_{\max} + E_{\Sigma Z} \sin (\omega t + \varphi_Z) \cos \gamma_{\max}];$$

$$E_{\Sigma \min}(t) = \sqrt{2} [E_{\Sigma X} \sin (\omega t + \varphi_X) \cos \alpha_{\min} +$$

$$+ E_{\Sigma Y} \sin (\omega t + \varphi_Y) \cos \beta_{\min} + E_{\Sigma Z} \sin (\omega t + \varphi_Z) \cos \gamma_{\min}].$$

Далее в координатных осях декартовой системы  $E_{\min}$ ,  $E_{\max}$  может быть построена кривая годографа [63]. Годографы вектора напряженности магнитного поля определяются по аналогичной методике.

#### 1.4 Учет гармонических искажений при расчете электромагнитных полей

Железные дороги переменного тока являются источниками высших гармоник, напряжения которых часто превышают нормативные значения. Российские выпрямительные электровозы с номинальным напряжением 25 кВ наряду с потреблением тока из контактной сети генерируют значительные ВГ (рисунок 1.9), что приводит к существенным искажениям кривых токов и напряжений.

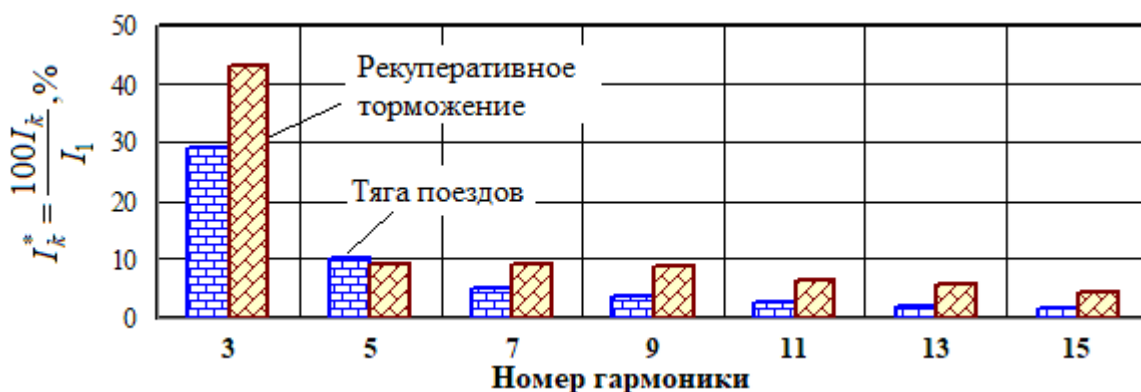


Рисунок 1.9. Типичные уровни гармоник тока электровоза в процентах от тока основной частоты

Тяговые гармоники трансформируются в питающие сети напряжением 110-220 кВ, приводя к увеличению гармоник сетевых напряжений. Поэтому электромагнитные поля, создаваемые контактной сетью 25 кВ и питающими ТП линиями электропередачи 110-220 кВ, содержат значительную долю ВГ [89]. Этот фактор необходимо учитывать при оценке помехоустойчивости различного оборудования, а также при определении условий электромагнитной безопасности [111 – 113].

Высшие гармоники усложняют картину поляризации, наиболее оптимальный путь моделирования состоит в отдельном анализе полей для разных гармоник с последующей их суперпозицией. Методика такого моделирования представлена ниже.

Определение ЭМП с учетом гармонических искажений 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.

По результатам расчета режима из первой группы формул Максвелла (1.5) для каждой гармоники определяются заряды проводов. Напряженности

электрического поля в точке с координатами  $x, y$  для каждой гармоники  $k$  линии из  $N$  проводов рассчитываются по формулам следующего вида [86]

$$\dot{E}_{kx} = \frac{2}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_{ki} \frac{(x - x_i) y y_i}{d_i}; \quad \dot{E}_{ky} = -\frac{1}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_{ki} \frac{y_i [(x - x_i)^2 - y^2 + y_i^2]}{d_i},$$

где  $d_i = [(x_i - x)^2 + (y_i + y)^2][(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2]$ ;  $\dot{\tau}_{ki}$  – заряд провода  $i$  на единицу длины на гармонике  $k$ .

Для каждой гармоники электрического поля зависимости пространственных составляющих от времени определяются выражением

$$\vec{E}_k(t) = E_{mx} \sin(k\omega t + \psi_{kx}) \vec{e}_x + E_{my} \sin(k\omega t + \psi_{ky}) \vec{e}_y,$$

где  $\vec{e}_x, \vec{e}_y$  – орты декартовой системы координат.

Векторы экстремумов поля  $\vec{E}_{k\max}$  и  $\vec{E}_{k\min}$  расположены в плоскости поляризации данной гармоники и вектор напряженности вращается в этой плоскости с годографом в форме эллипса. Моменты времени, отвечающие экстремальным значениям напряженности, рассчитываются для каждой гармоники на основе следующего соотношения:

$$k\omega t_{k\min, \max} = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left( \frac{E_{kmx}^2 \sin 2\psi_{kx} + E_{kmy}^2 \sin 2\psi_{ky}}{E_{kmx}^2 \cos 2\psi_{kx} + E_{kmy}^2 \cos 2\psi_{ky}} \right).$$

Первое значение арктангенса выбирается в пределах  $[-\pi/2, \pi/2]$ , второе – отличается на величину  $\pi$ . Максимум и минимум модуля напряженности определяются знаками второй производной

$$E_{kmx}^2 \cos[2(k\omega t_{k\max} + \psi_{kx})] + E_{kmy}^2 \cos[2(k\omega t_{k\max} + \psi_{ky})].$$

Направления векторов максимумов и минимумов  $\vec{E}(t)$  меняются в течение периода в соответствии с изменениями направляющих косинусов

$$\cos(\vec{e}_i, \vec{E}_{k\max}) = \frac{E_{kmi} \sin(k\omega t_{\max} + \psi_{ki})}{E_{k\max}}; \quad E_{k\max} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [E_{kmi} \sin(k\omega t_{\max} + \psi_{ki})]^2};$$

$$\cos(\vec{e}_i, \vec{E}_{k\min}) = \frac{E_{kmi} \sin(k\omega t_{\min} + \psi_{ki})}{E_{k\min}}; \quad E_{k\min} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 [E_{kmi} \sin(k\omega t_{\min} + \psi_{ki})]^2},$$

где  $i = x, y$ .

Горизонтальная и вертикальная составляющие напряженности магнитного поля многопроводной линии на гармониках вычисляются по формулам

$$\dot{H}_{kx} = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_{ki} \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}; \quad \dot{H}_{ky} = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_{ki} \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2},$$

где  $\dot{I}_{ki}$  – эффективное значение тока провода  $i$  на гармонике  $k$ .

Эти формулы справедливы для всех практически важных гармоник на расстояниях не более 100 м от системы проводов, создающих поле. Параметры вектора напряженности магнитного поля определяются так же, как и для электрического.

Укрупненный алгоритм расчета ЭМП с учетом высших гармоник включает следующие этапы.

1. На основе полученных результатов расчета несинусоидального режима работы ЭЭС для выбранной ЛЭП определяются заряды и токи проводов.

2. Рассчитываются горизонтальные и вертикальные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей для каждой гармоники.

3. Для каждой гармоники формируются временные зависимости напряженностей, а также находятся максимальные и минимальные значения.

4. Определяются суммарные значения напряженностей, временные зависимости и годографы векторов.

Проверка методики осуществлялась на основе измерений напряженностей электромагнитных полей линии электропередачи 500 кВ [14]. По результатам измерений под средней фазой ЛЭП амплитудные значения напряженностей ЭП и МП на частоте 50 Гц составили, соответственно, 11,7 кВ/м и 8,5 А/м. На рисунке 1.10 показано расположение токоведущих частей ЛЭП и отношения амплитуд напряженностей 3, 5 и 7 гармоник к первой, вычисляемые по формулам



$$E_k^* = \frac{100 \cdot E_k}{E_1}; H_k^* = \frac{100 \cdot H_k}{H_1},$$

где  $E_k$ ,  $H_k$  – амплитудное значение напряженности на гармонике  $k$ ;  $E_1$ ,  $H_1$  – амплитудное значение напряженности первой гармоники.

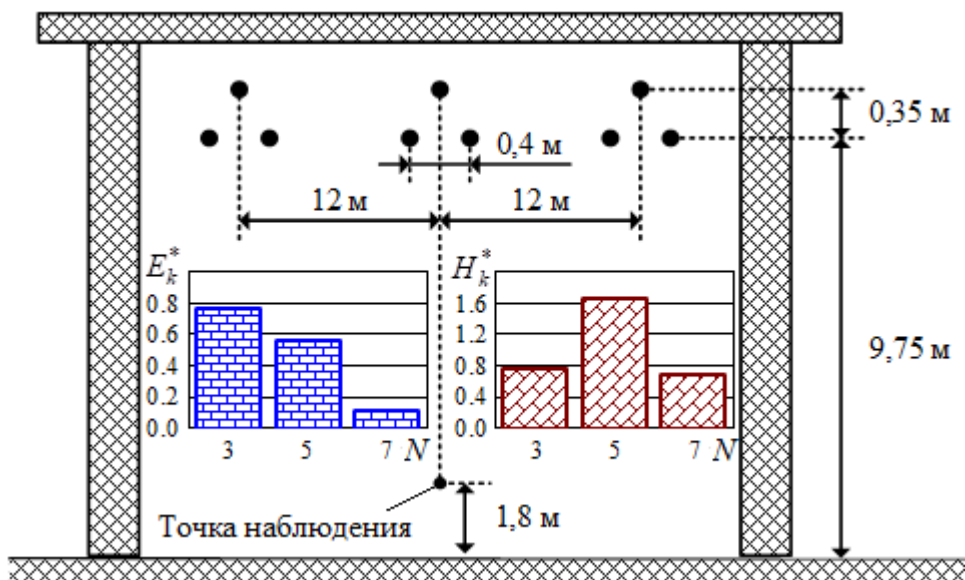


Рисунок 1.10. Расположение токоведущих частей и значения гармоник напряженностей электрического и магнитного полей

Для выполнения расчетов была разработана модель, отвечающая параметрам реальной ЛЭП. Сравнение результатов моделирования и измерений приведено в таблице 1.3. По результатам моделирования также были получены зависимости распределения амплитудных значений напряженностей от горизонтальной координаты для каждой гармоники (рисунки 1.11 и 1.12).

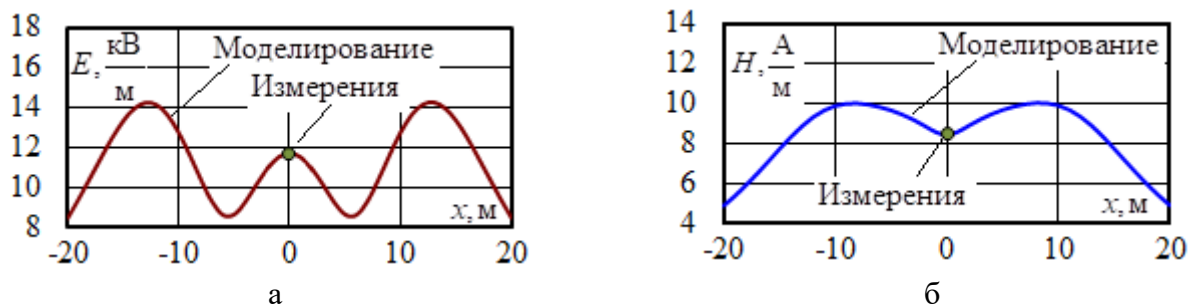


Рисунок 1.11. Распределение напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП на высоте 1,8 метра на основной частоте

Напряженность электрического и магнитного полей ЛЭП 500 кВ

Результаты	$E, \text{ В/м}$				$H, \text{ А/м}$			
	1	3	5	7	1	3	5	7
Измерения	11727	90,2	65,1	13,4	8476	65,0	140,0	58,5
Моделирование	11721	90,0	65,0	13,2	8420	64,9	140,0	58,0
Различие, %	0.05	0.22	0.15	1.49	0.66	0.15	0	0.85

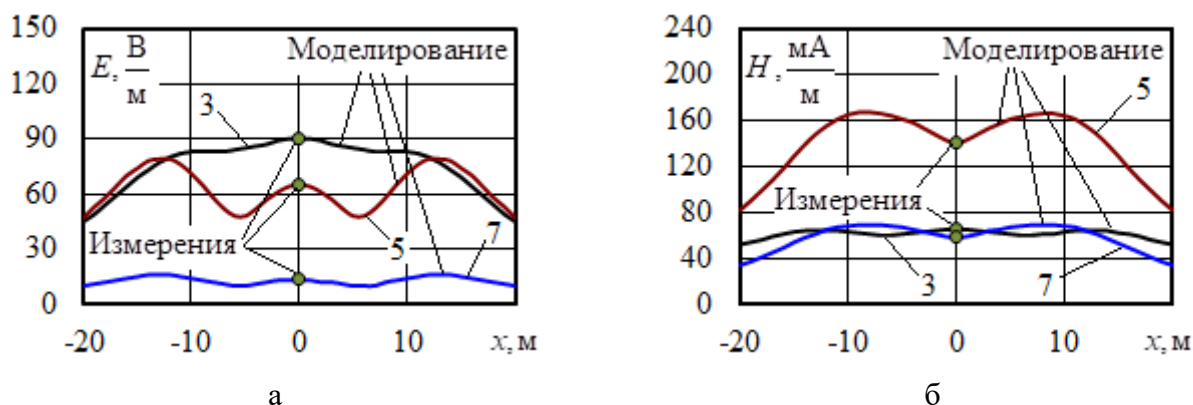


Рисунок 1.12. Распределение напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП на высоте 1,8 метра для 3, 5 и 7 гармоник

Полученные результаты подтверждают адекватность рассматриваемой методики, наибольшее отклонение амплитудных значений измеряемых гармоник составило менее 1,5 %. На основе моделирования могут быть определены зависимости значений напряженностей ЭМП вблизи многопроводных систем для каждой рассматриваемой гармоники и их суммарные значения, а также годографы суммарных векторов, что позволяет уточнить решение задач электромагнитной совместимости и безопасности.

## Выводы

1. Электромагнитные поля, создаваемые объектами электроэнергетики, являются опасной формой загрязнения окружающей среды. Выделяют два основных направления анализа электромагнитной обстановки:

– электромагнитная безопасность – отвечает защищенности людей от вредного и опасного воздействия электромагнитных полей;

– электромагнитная совместимость – определяет способность технических средств функционировать при действии на них электромагнитных помех, а также не создавать недопустимых помех другим устройствам.

Анализ электромагнитной безопасности ЛЭП и СТЭ требует определения напряженностей электрического и магнитного полей.

2. Методика моделирования электромагнитных полей на основе расчета режима работы ЭЭС в фазных координатах обеспечивает системный подход к решению задач определения электромагнитной обстановки. Кроме того, она позволяет моделировать ЛЭП и СТЭ различной конструкции с учетом профиля подстилающей поверхности, подземных коммуникаций и искусственных сооружений.

3. На основе рассматриваемой методики предложены алгоритмы расчета электромагнитных полей в местах ортогонального пересечения систем параллельных проводов между собой, а также методика моделирования полей с учетом высших гармоник.

4. Проверка адекватности проводилась путем сравнения с результатами, опубликованными в работах других авторов, с экспериментальными измерениям и с расчетом по альтернативной методике. Результаты сравнения подтвердили корректность предлагаемой методики. Максимальное отклонение от результатов в программе ELCUT составило 4,6 %, сопоставление с результатами других авторов показало расхождение менее 2 %. Результаты экспериментальной проверки также подтвердили адекватность моделирования.

## 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С УЧЕТОМ РЕЖИМА РАБОТЫ И КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

### 2.1 Электромагнитное поле воздушных линий типовой конструкции

Воздушные линии электропередачи в силу своей протяженности и многочисленности являются одним из основных источников электрических и магнитных полей. Трехфазные воздушные линии считаются электромагнитно уравновешенными в результате взаимной компенсации полей фаз. Снижение уровней напряженностей на нормируемой высоте достигается уменьшением расстояния между проводами и их рациональным размещением.

Задача выбора рационального расположения проводов на опорах ЛЭП по критерию минимизации напряженностей ЭМП может быть решена на основе методики определения ЭМП, описанной в первой главе. Ниже рассмотрено решение такой задачи на примере двух типовых схем расположения токоведущих частей одноцепной ЛЭП [40, 85] (таблица 2.1). Схема исследуемой сети представлена на рисунке 2.1.

Таблица 2.1

**Параметры ЛЭП**

Фаза	Омическое сопротивление, Ом/км	Радиус, см	Координаты				Площадь сечения, мм <sup>2</sup>
			Вертикальное расположение проводов		Треугольное расположение проводов		
			x, м	y, м	x, м	y, м	
А	0,051	1,66	0	23	3,5	19,5	652
В	0,051	1,66	0	18	-3,9	13	652
С	0,051	1,66	0	13	6,1	13	652

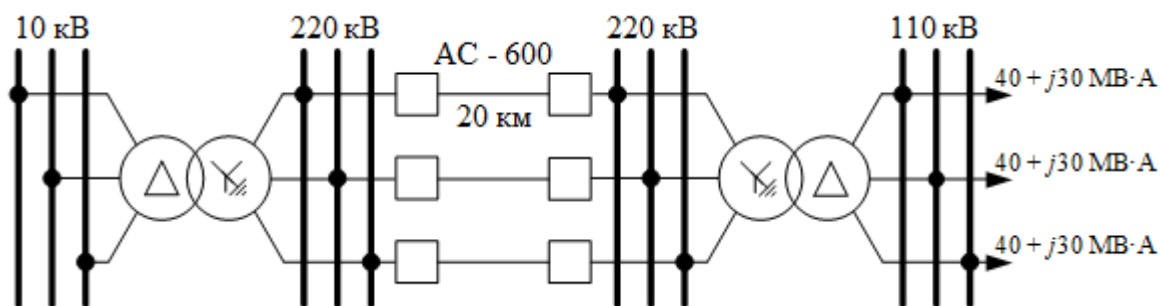


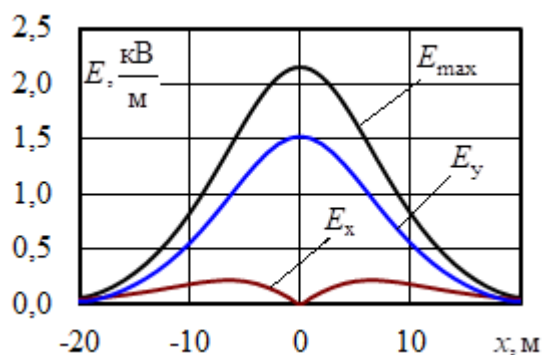
Рисунок 2.1. Схема электрической сети

Результаты расчетов напряжений и токов при симметричной нагрузке представлены в таблицах 2.2 и 2.3. Зависимости составляющих напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра от координаты  $x$  показаны на рисунках 2.2 и 2.3.

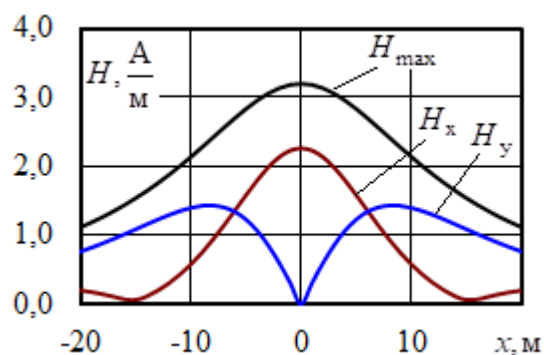
Таблица 2.2

#### Напряжения и токи при вертикальном расположении проводов ЛЭП

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	136,81	118,6	381,73	79,4
В	136,88	-121,4	375,33	-160,2
С	136,84	-1,4	379,29	-40,27



а



б

Рисунок 2.2. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при вертикальном расположении проводов ЛЭП

### Напряжения и токи при треугольном расположении проводов ЛЭП

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	136,82	-1,4	378,77	-40,7
В	136,84	-121,4	379,66	-160,3
С	136,84	118,6	379,17	79,7

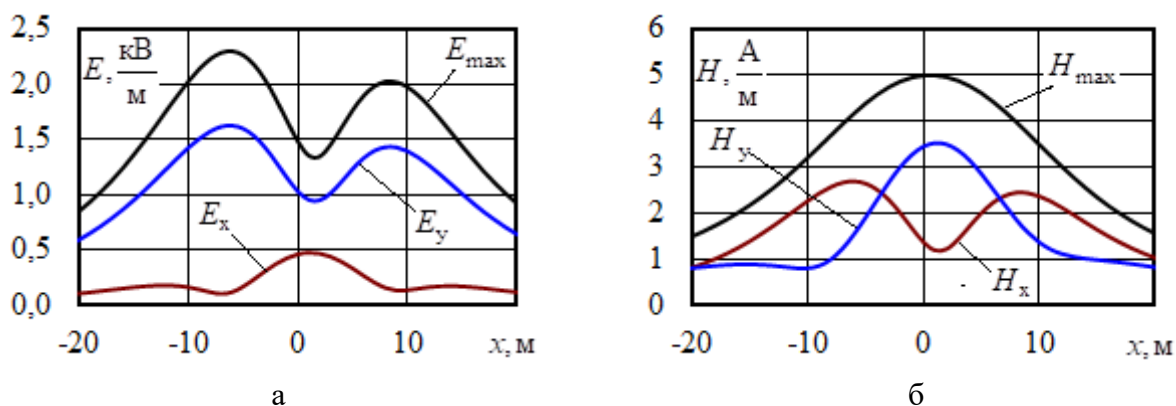


Рисунок 2.3. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при треугольном расположении проводов ЛЭП

Сравнительные графики амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 метра представлены на рисунке 2.4.

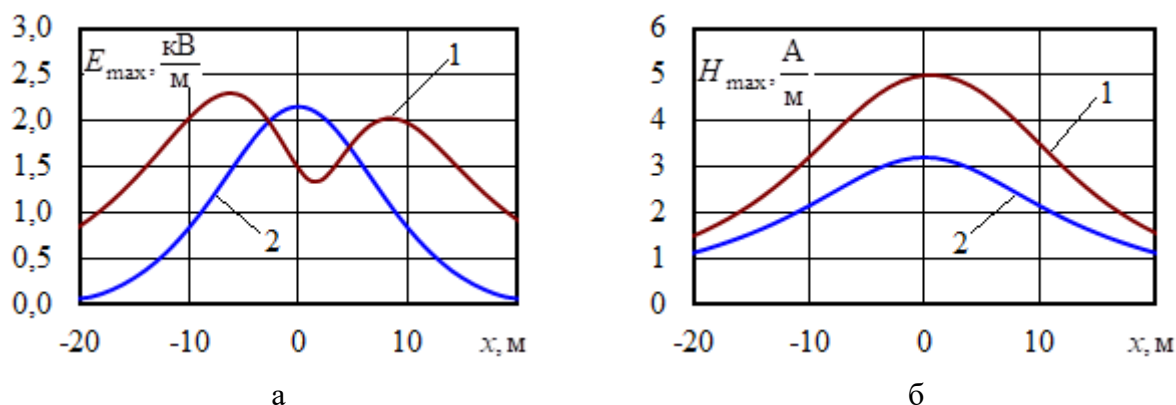


Рисунок 2.4. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1.8 м: 1 – треугольное; 2 – вертикальное

Максимальные значения амплитуд электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от земли сведены в таблицу 2.4.

**Максимальные значения амплитуд напряженностей ЭМП**

Параметр	Расположение проводов		Различие, %
	вертикальное	треугольное	
$E_{\max}$ , кВ/м	2,15	2,29	6,5
$H_{\max}$ , А/м	3,20	4,98	35,7

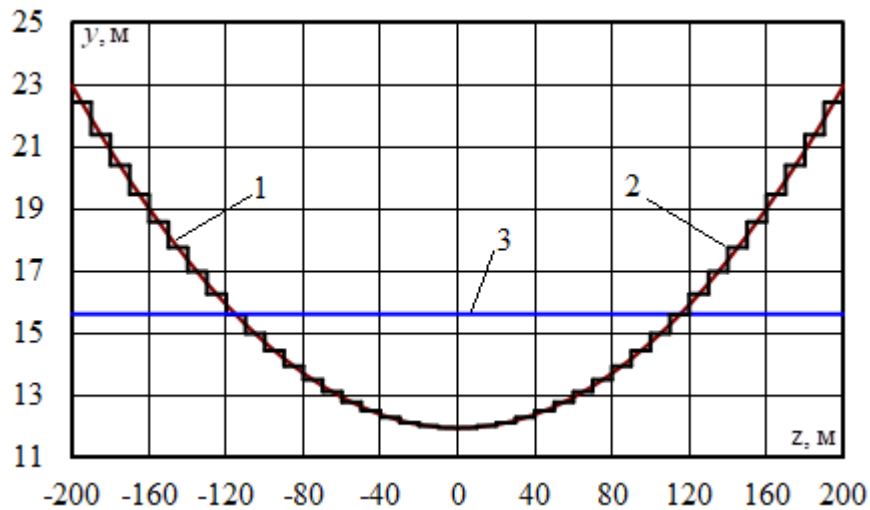
Таким образом, при симметричной нагрузке для ЛЭП с треугольным расположением проводов максимальное значение амплитуды напряженности электрического поля увеличивается на 7 % по сравнению с ЛЭП с вертикально расположенными проводами. Аналогичный показатель для магнитного поля возрастает на 36 %. Кроме того, вертикальное расположение проводов обеспечивает уменьшение зоны влияния и снижение напряженности электрического поля до 0,5 кВ/м уже на расстоянии 15 метров от оси ЛЭП. При возникновении аварийных режимов работы напряженности ЭМП могут существенно повышаться и для ЛЭП с треугольным расположением проводов превосходить допустимые значения при прохождении такой ЛЭП в зонах жилой застройки. Поэтому для линий, проходящих по территориям населенных пунктов, рационально применение вертикального расположения проводов.

## **2.2 Влияние стрелы провеса на электромагнитное поле воздушной линии**

Воздушные линии высокого напряжения характеризуются большими стрелами провеса проводов. В задачах определения ЭМП расчет часто производится с допущением, что проводник является прямолинейным и смещен на высоту центра тяжести реального провода. Однако такое допущение может вносить заметные искажения, поэтому важно учитывать реальное расположение токоведущих элементов в пролете ЛЭП.

Точный учет стрел провеса проводов требует применения сложного математического аппарата [114 – 116]. Предлагается более простой подход, обеспечивающий приемлемую для практики точность расчета напряженностей

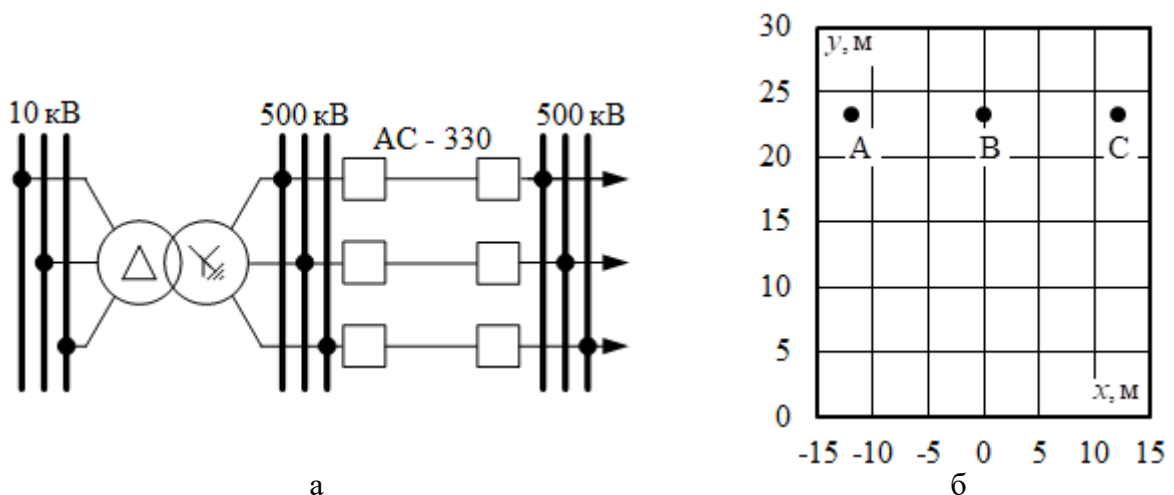
ЭМП. В основу предлагаемого подхода положена аппроксимация зависимости высоты провода  $y$  от координаты  $z$  отрезками прямых (рисунок 2.5) [93, 94, 100]. Моделирование осуществлялось для одного пролета ЛЭП 500 кВ протяженностью 400 метров. Схема исследуемой сети и расположение токоведущих частей в точке крепления на опоре показаны на рисунке 2.6.



**Рисунок 2.5. Расположение провода в пролете ЛЭП:**

1 – точное расположение; 2 – аппроксимация отрезками прямых;

3 – горизонтальное, на высоте  $h_{CP}$



**Рисунок 2.6. Схема исследуемой сети (а) и расположение токоведущих частей в пролете ЛЭП(б)**

Пролет ЛЭП разбивался на  $n$  участков небольшой длины, каждому из которых отвечала определенная высота подвеса проводов  $y$ . Для каждого



участка выполнялось сравнение полученных результатов с традиционной методикой определения напряженностей ЭМП, основанной на предположении, что провода расположены горизонтально на высоте, определяемой по выражению

$$h_{CP} = h_0 - L_G - \frac{2}{3}f,$$

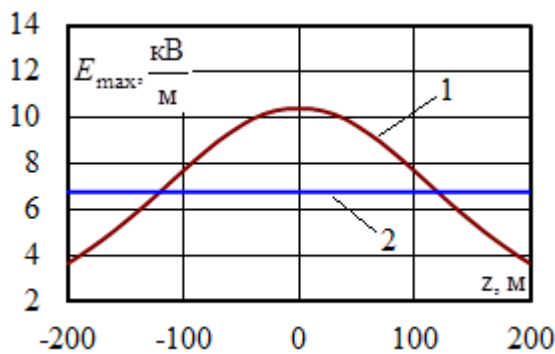
где  $h_0$  – высота крепления изоляторов, м;  $f$  – стрела провеса, м;  $L_G$  – длина гирлянды изоляторов, м.

Результаты расчетов напряжений и токов для заданного режима приведены в таблице 2.5. На рисунке 2.7 представлена зависимость амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от координаты  $z$ .

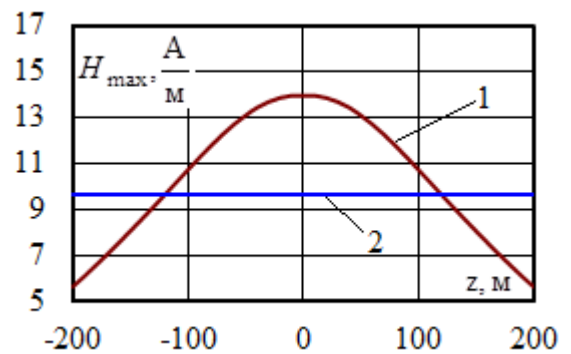
Таблица 2.5

#### Напряжения и токи ЛЭП

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	290	-6,9	693,9	-2,5
В	290	-126,9	694,1	-122,5
С	290	113,1	694,4	117,5



а



б

Рисунок 2.7. Распределение амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в пролете ЛЭП: 1 – с учетом стрелы провеса; 2 – на высоте  $h_{CP}$

В таблице 2.6 приведены максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в пролете ЛЭП для двух способов задания

расположения токоведущих частей: с учетом провеса проводов и горизонтально на высоте  $h_{CP}$ . На рисунке 2.8 показано распределение электромагнитного поля в сечении ЛЭП в точке с максимальными амплитудными значениями напряженностей.

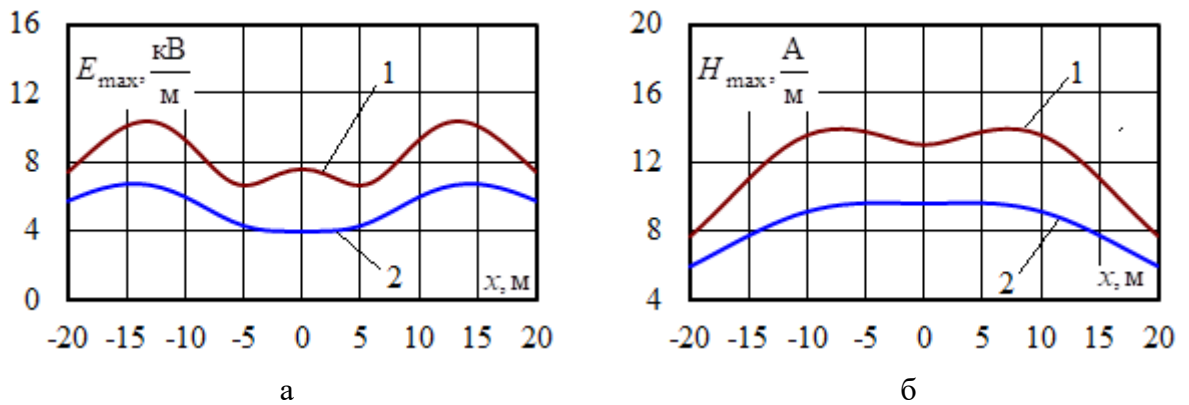


Рисунок 2.8. Распределение поля в сечении ЛЭП:

1 – с учетом стрелы провеса; 2 – на высоте  $h_{CP}$

Таблица 2.6

#### Максимумы значений напряженностей ЭМП

Параметр	Расположение токоведущих частей		Различие, %
	С учетом стрелы провеса	На высоте $h_{CP}$	
$\max(E_{max}), \text{кВ/м}$	10,38	6,75	34,9
$\max(H_{max}), \text{А/м}$	13,94	9,64	30,8

Предлагаемая методика учета стрел провеса проводов позволяет уточнить результаты определения электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными ЛЭП. Также на её основе может быть реализован учет неровности рельефа по трассе ЛЭП. Полученные результаты сопоставления показали значительные отклонения значений напряженностей электрического и магнитного полей на протяжении всего пролета ЛЭП, наибольшие отклонения превысили 30 %, что подтверждает необходимость более точного учета стрел провеса.

### 2.3 Электромагнитное поле ЛЭП при неполнофазных режимах работы и сложных повреждениях

Трехфазные ЛЭП являются электромагнитно уравновешенными при условии работы с симметричной нагрузкой. На практике часто имеет место несимметричная нагрузка, кроме того, возможно возникновение неполнофазных и аварийных режимов при несимметричных КЗ. Несимметричные режимы работы ЛЭП могут приводить к повышению уровней напряженностей полей. Предлагаемая методика моделирования позволяет производить расчет режимов короткого замыкания и обрыва фаз [51, 36, 38 – 40, 90 – 92].

Рассмотрены однофазное, двухфазное, двухфазное на землю и трехфазное короткие замыкания, а также обрыв фазы А на отправном и приемном концах ЛЭП. Схема исследуемой сети и расположение проводов на опоре линии показаны на рисунке 2.9.

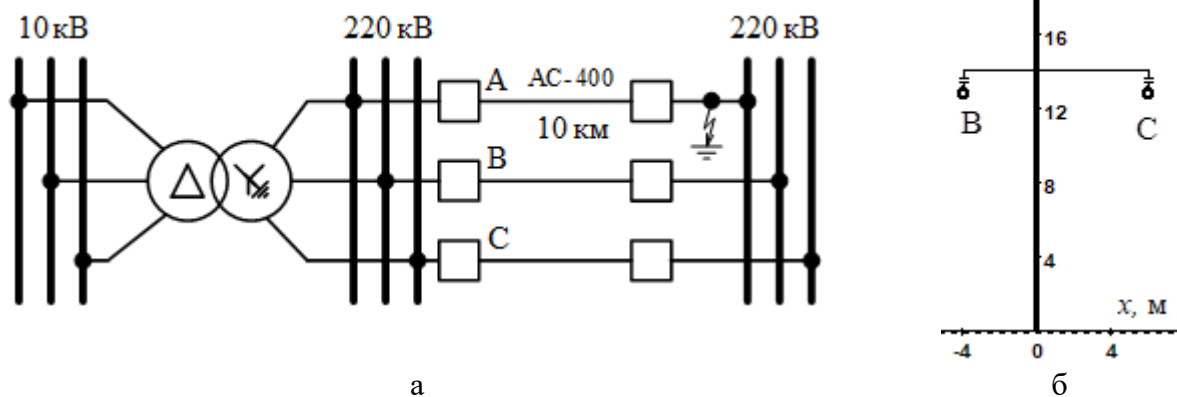


Рисунок 2.9. Схема электрической сети (а) и расположение проводов на опоре ЛЭП-220 (б)

В нормальном режиме работы каждой шине на приемном конце ЛЭП подключалась нагрузка  $50 + j30$  МВ·А. Результаты расчетов режима работы и зависимости напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра от горизонтальной координаты приведены в таблице 2.7 и на рисунке 2.10.

### Напряжения и токи исходного симметричного режима

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	136,7	-2	439,9	-35
В	136,8	-122	440,7	-155
С	136,8	118	440,7	85

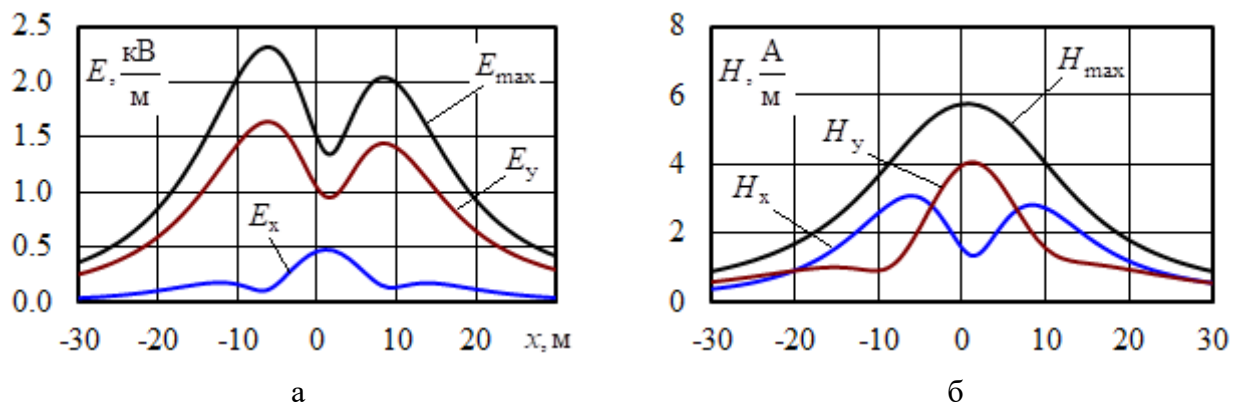


Рисунок 2.10. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей исходной схемы

Режимы коротких замыканий и обрыва фаз рассматривались при отсутствии нагрузок на приемном конце ЛЭП. Результаты расчетов неполнофазных режимов работы и зависимостей напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра от горизонтальной координаты приведены в таблицах 2.8 – 2.13 и на рисунках 2.11 – 2.16.

### Напряжения и токи при однофазном КЗ

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	58,3	-3,6	7174,3	-86,5
В	138,8	-119,4	3,8	-27,7
С	138,9	119,4	3,8	-151,8

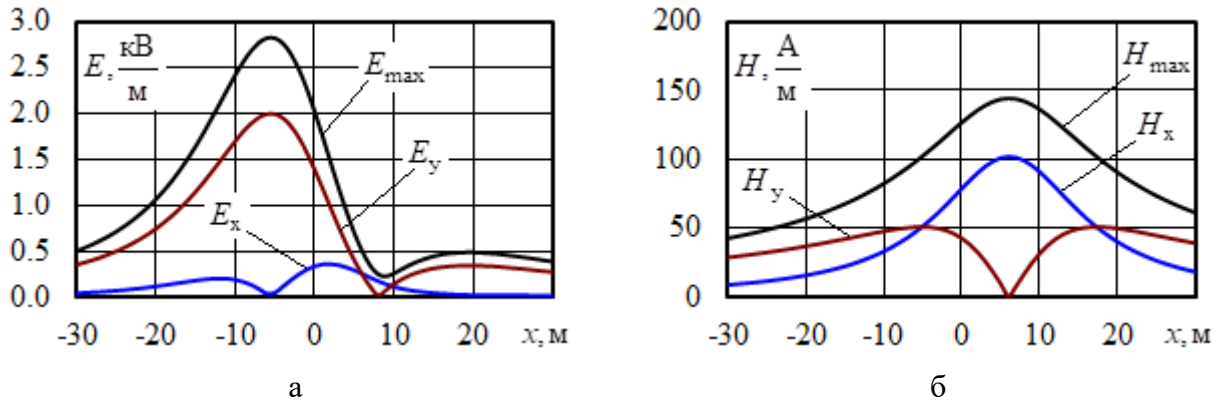


Рисунок 2.11. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при однофазном КЗ

Таблица 2.9

**Напряжения и токи при двухфазном КЗ**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	79,3	-36,0	7644,1	-57,4
В	74,6	-85,6	7643,9	122,6
С	139,8	119,9	3,9	-149,4

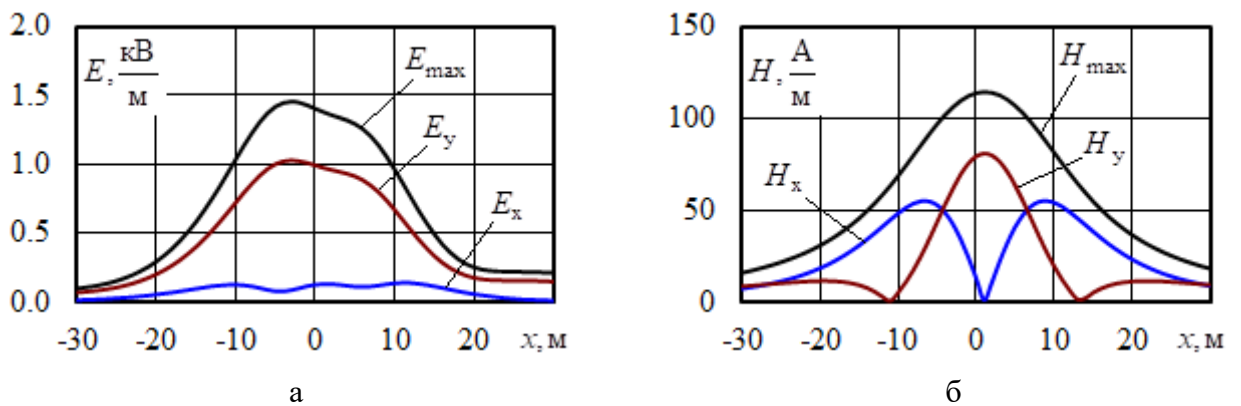


Рисунок 2.12. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при двухфазном КЗ

Таблица 2.10

**Напряжения и токи при двухфазном КЗ на землю**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	49,3	-22,0	8295,7	-78,8
В	47,9	-105,4	8141,6	144,4
С	138,3	120,0	3,7	-149,0

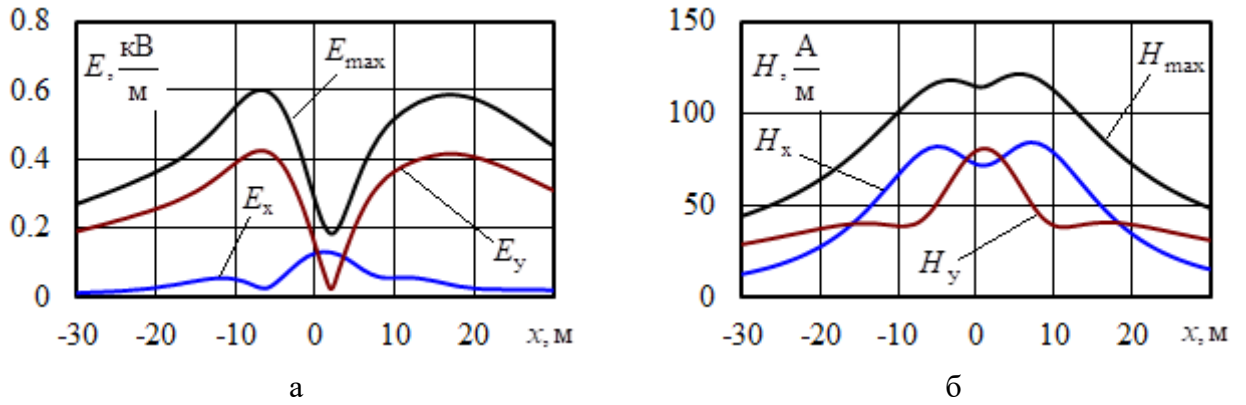


Рисунок 2.13. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при двухфазном КЗ на землю

Таблица 2.11

### Напряжения и токи при трехфазном КЗ

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	36,3	-3,5	8914,3	-87,8
В	37,8	-124,5	8788,7	152,6
С	36,5	113,9	8910,0	33,1

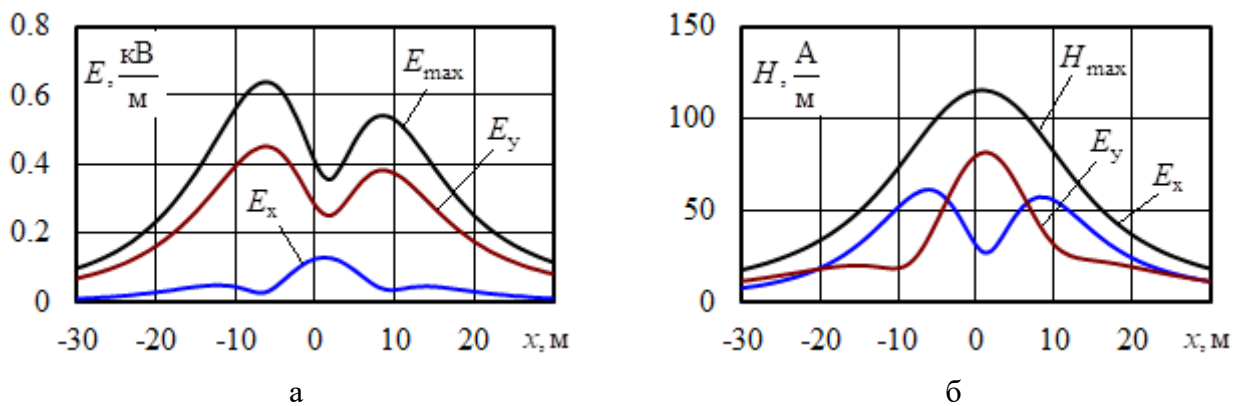


Рисунок 2.14. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при трехфазном КЗ

Таблица 2.12

### Напряжения и токи при обрыве фазы А на отправном конце

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	109,0	-18,6	0	45,8
В	131,0	-121,3	821,1	168,5
С	137,7	116,1	850,0	107,9

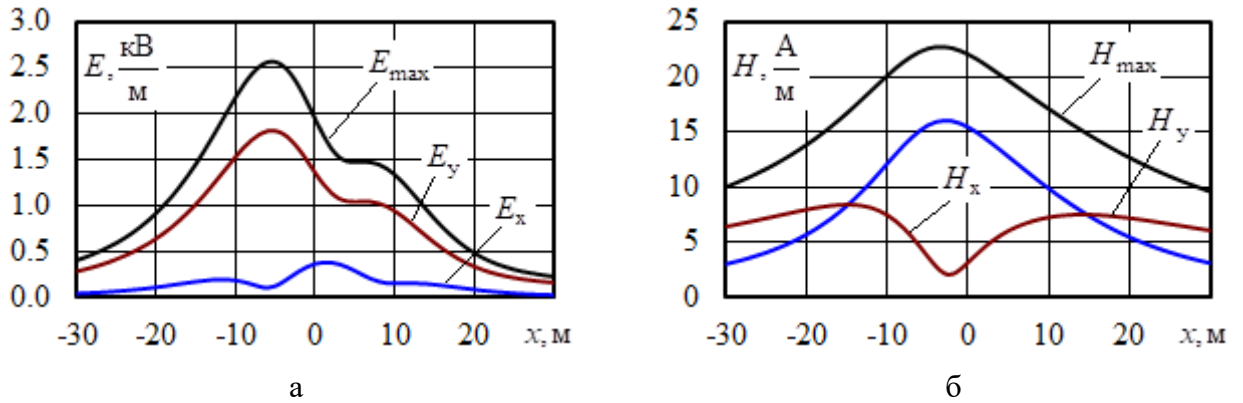


Рисунок 2.15. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при обрыве фазы А на отправном конце

Таблица 2.13

Напряжения и токи при обрыве фазы А на приемном конце

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	139,5	-0,1	4,0	86,5
В	131,0	-121,3	821,3	168,3
С	137,7	116,1	853,6	107,8

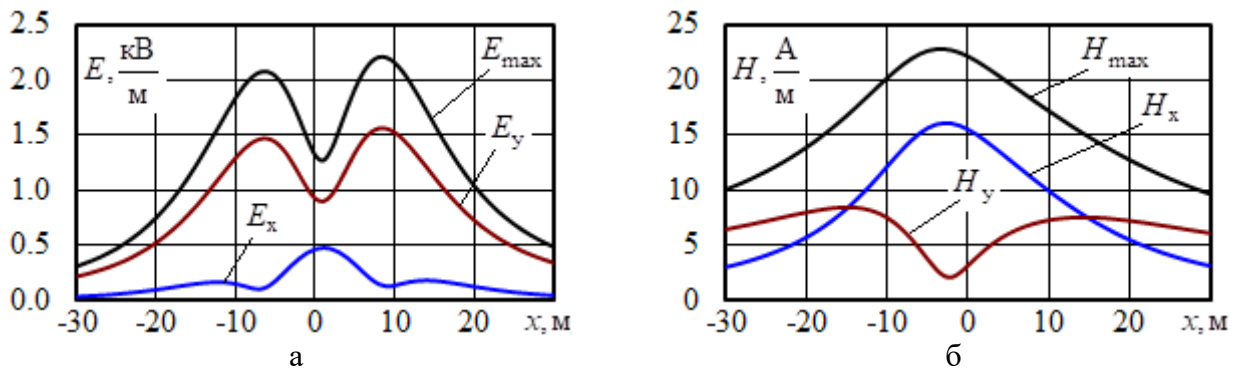
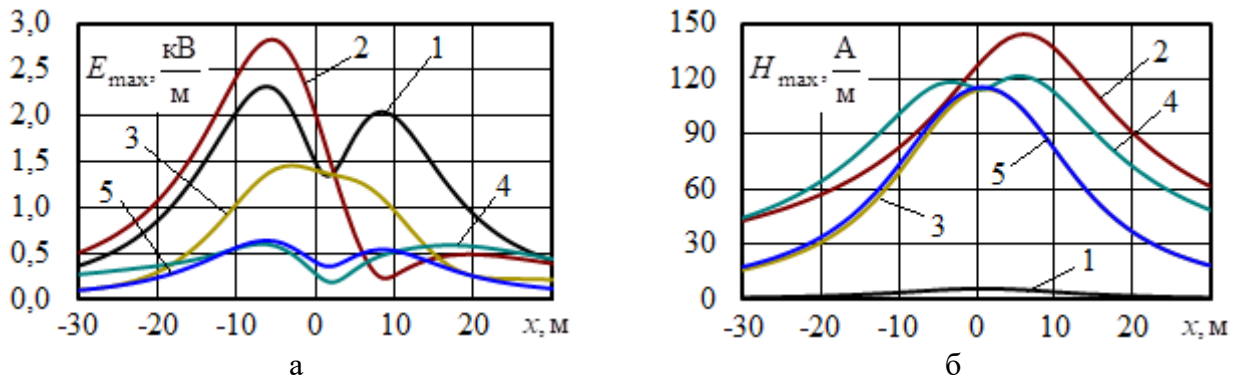


Рисунок 2.16. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей при обрыве фазы А на приемном конце

Результаты расчета максимальных значений напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра для различных значений горизонтальной координаты  $x$  представлены на рисунке 2.17. Максимальные значения амплитуд электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м от земли приведены в таблицах 2.14 и 2.15.



**Рисунок 2.17.** Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м: 1 – исходный полнофазный режим; 2 – однофазное КЗ; 3 – двухфазное КЗ; 4 – двухфазное КЗ на землю; 5 – трехфазное КЗ

Таблица 2.14

#### Максимальные значения напряженностей электромагнитного поля

Параметр	Режим работы				
	Нормальный	Короткое замыкание			
		Однофазное	Двухфазное	Двухфазное на землю	Трехфазное
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
$E_{\max}$ , кВ/м	2,3	2,8	1,5	0,6	0,6
$H_{\max}$ , А/м	5,8	144,2	114,4	121,3	115,3

Таблица 2.15

#### Максимальные значения напряженностей электромагнитного поля при обрыве фаз

Параметр	Исходная схема	Обрыв фазы А	
		На отправном конце	На приемном конце
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
$E_{\max}$ , кВ/м	2,3	2,6	2,2
$H_{\max}$ , А/м	5,8	22,7	22,8

Также проводилось моделирование ЭМП ЛЭП при несимметричном режиме работы, отвечающем питанию участка электрифицированных железных дорог (таблица 2.16). Сравнение осуществлялось с симметричным режимом при сохранении транзита мощности (таблица 2.17). Расположение фаз



рассматривалось в двух вариантах: в соответствии с рисунком 2.9б и при замене мест фаз А и В.

Таблица 2.16

### Напряжения и токи несимметричного режима

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	135,4	0	399,9	-45
В	134,8	-120	480,6	-165
С	135,2	119	440,3	75

Таблица 2.17

### Напряжения и токи симметричного режима

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	135,2	0	439	-45
В	135,2	-120	439	-165
С	135,1	119	440	75

Результаты сравнения максимальных значений напряженностей электромагнитных полей приведены на рисунках 2.18 и 2.19. Максимальные значения напряженностей сведены в таблицу 2.18.

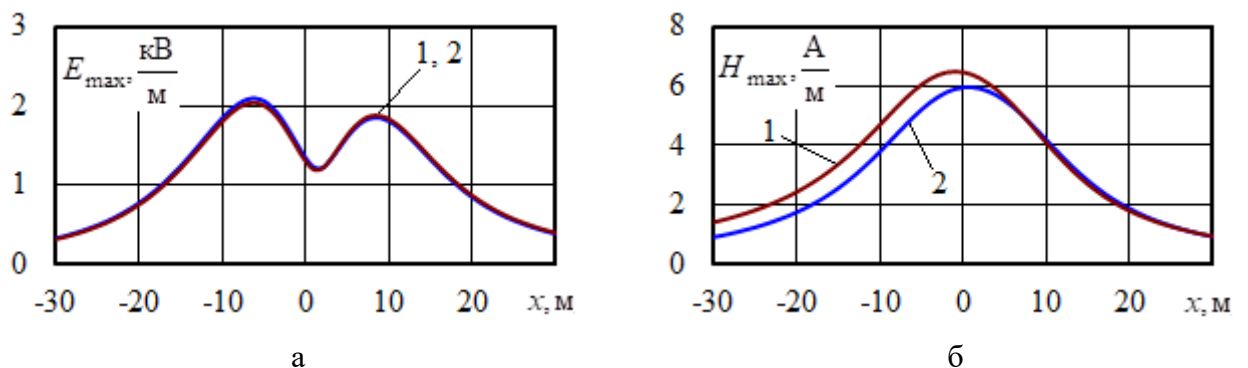
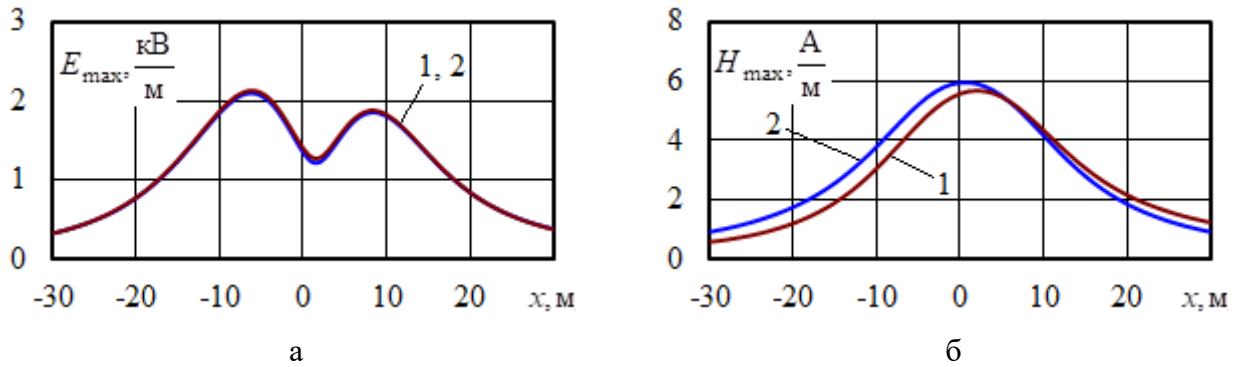


Рисунок 2.18. Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при исходном положении фаз: 1 – несимметричный режим; 2 – симметричный режим



**Рисунок 2.19.** Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м при перемещении фаз А и В: 1 – несимметричный режим; 2 – симметричный режим

Таблица 2.18

**Сравнение максимальных значений напряженностей при нормальном симметричном и несимметричном режимах работы**

Параметр	Симметричный режим		Несимметричный режим		Различие, %	
	Исходное положение фаз	Замена фаз А и В	Исходное положение фаз	Замена фаз А и В	Между 2 и 4	Между 3 и 5
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
$E_{\max}$ , кВ/м	<b>2,09</b>	<b>2,10</b>	<b>2,04</b>	<b>2,13</b>	<b>-2,6</b>	<b>1,6</b>
$H_{\max}$ , А/м	<b>5,95</b>	<b>5,95</b>	<b>6,48</b>	<b>5,67</b>	<b>8,9</b>	<b>-4,6</b>

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы по величинам напряженностей электромагнитного поля на высоте 1,8 м от поверхности земли.

1. Рассмотренные режимы КЗ не приводят к нарушению предельно допустимого уровня напряженности электрического поля, наибольшее значение наблюдается при однофазном коротком замыкании и достигает 2,8 кВ/м. Режимы мультифазных коротких замыканий характеризуются уменьшением максимального значения напряженности по отношению к нормальному режиму.

2. Напряженность магнитного поля в результате протекания токов короткого замыкания для всех рассмотренных случаев превышает допустимые

80 А/м. Максимальное значение соответствует режиму однофазного КЗ и равно 144,2 А/м, минимальное – двухфазному КЗ и составляет 114,4 А/м.

3. При обрыве фазы А на отправном конце ЛЭП и заданных величинах нагрузок максимум амплитуды напряженности электрического поля увеличился на 11 % до значения в 2,6 кВ/м, режим обрыва на приемном конце линии вызвал уменьшение данного параметра на 5 % до 2,2 кВ/м.

4. Значение напряженности магнитного поля в режиме обрыва фазы увеличилось в 4 раза, перемещение места обрыва не привело к значительным изменениям.

5. Максимумы амплитуд напряженностей магнитных полей на высоте 1,8 м при обрыве фазы не превышают допустимый уровень для электротехнического персонала, но могут приводить к существенному возрастанию наведенных напряжений на отключаемых ЛЭП, проходящих вблизи трассы анализируемой линии.

6. При несимметричном режиме работы ЛЭП напряженность электрического поля по отношению к полю симметричного режима изменяется незначительно. Изменение напряженности магнитного поля зависит от конфигурации линии и расположения проводов фаз, для рассматриваемых случаев изменение максимальных значений напряженности магнитного поля составило – 4 .. 9 %.

## **2.4 Экранирование электрического поля воздушной линии**

Линии электропередачи сверхвысокого напряжения создают повышенные уровни напряженности электрического поля, которые могут превышать допустимые значения для электротехнического персонала. Такие линии не располагают вблизи селитебных территорий, однако расширение городов и поселков часто приводит к сближению зон жилой застройки с трассами уже существующих ЛЭП. Возникает необходимость проведения мероприятий по защите от ЭМП: перенос воздушных линий, перевод на более низкое

напряжение, замена на кабельные линии, экранирование и другие. Предлагаемая в данной работе методика позволяет производить расчет электромагнитных полей и оценивать эффект от проводимых мероприятий.

Ниже представлены результаты моделирования электрического поля ЛЭП напряжением 500 кВ (рисунок 2.20).

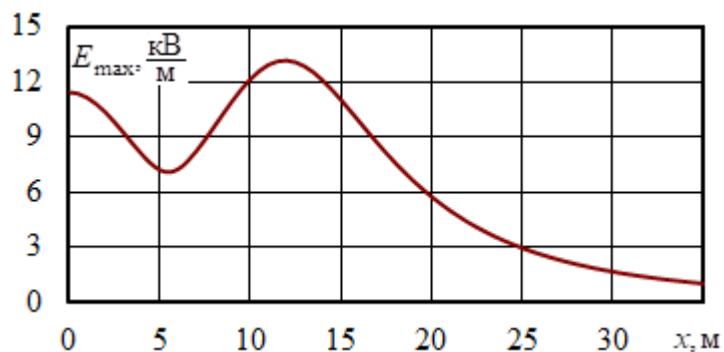


Рисунок 2.20. Напряженность электрического поля ЛЭП 500

Полученные результаты показывают, что напряженность электрического поля под фазами линии значительно превышает допустимое значение для электротехнического персонала. Кроме того, значение напряженности в 1 кВ/м (уровень для зоны жилой застройки) достигается лишь на расстоянии 35 м от оси ЛЭП. Для уменьшения напряженности поля под ЛЭП предлагается применить пассивные и активные тросовые экраны. АТЭ включают в себя два провода с фазным напряжением 63,5 кВ, фазный угол экрана вблизи фазы С составляет  $-60$  электрических градусов, вблизи фазы А – 180 градусов. ПТЭ представляют собой набор из трех заземленных проводов под каждой фазой ЛЭП. Расположение токоведущих частей ЛЭП с ТЭ показано на рисунке 2.21а. Результаты расчета напряженности электрического поля приведены на рисунке 2.21б.

В работе [68] проводилось аналогичное экранирование ЛЭП 500 кВ, на рисунках 2.22 и 2.23 показано сравнение результатов моделирования напряженности электрического поля по предлагаемой методике и опубликованных в работе.

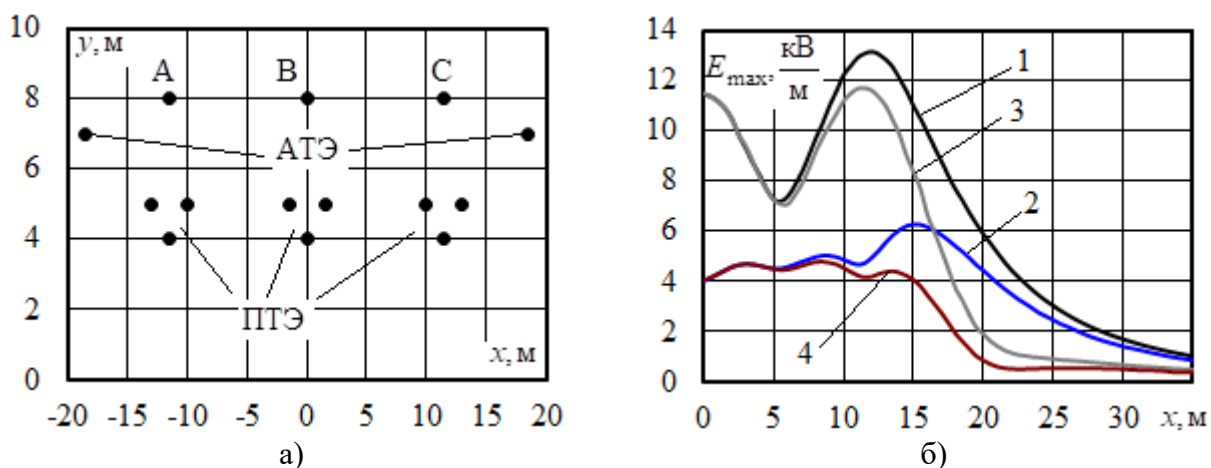
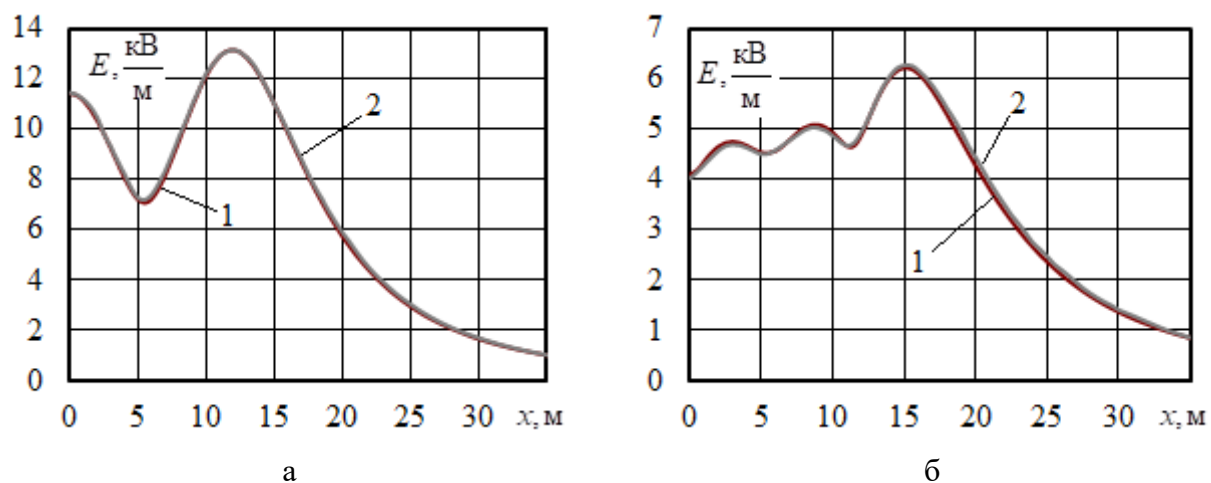
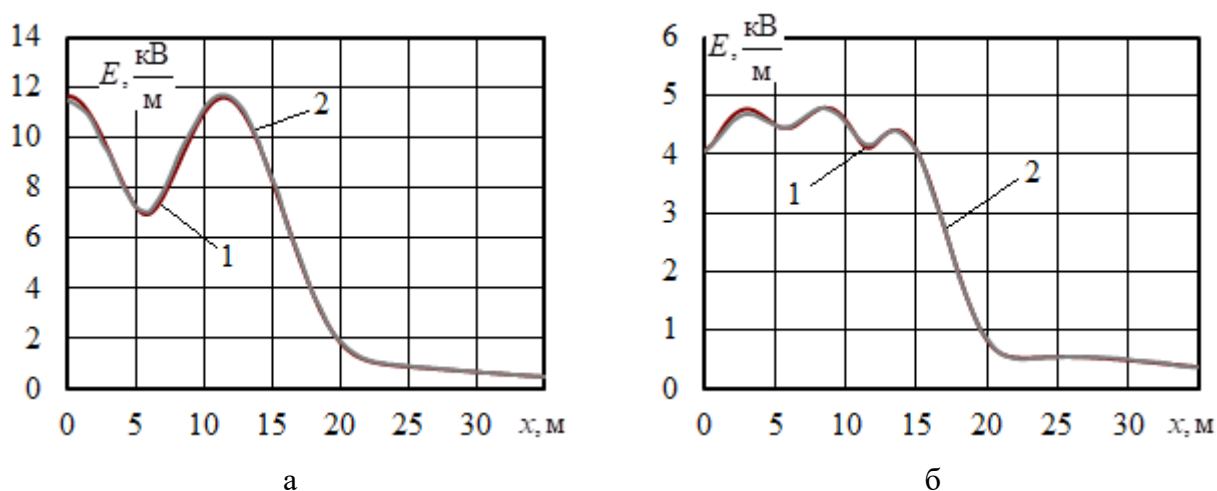


Рисунок 2.21. Расположение токоведущих частей (а) и распределение напряженности электрического поля (б) ЛЭП 500 кВ: 1 – без экранирования; 2 – ПТЭ; 3 – АТЭ; 4 – АТЭ и ПТЭ



Рисунке 2.22. Сравнение результатов моделирования напряженности электрического поля: а – без экранирования; б – ПТЭ; 1 – Монография; 2 – Fazonord



Рисунке 2.23. Сравнение результатов моделирования напряженности электрического поля: а – АТЭ; б – АТЭ и ПТЭ; 1 – Монография; 2 – Fazonord

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Применение пассивных тросовых экранов снижает максимальное значение в 2 раза, однако не позволяет обеспечить соблюдение норм.
2. АТЭ приводят к уменьшению зоны повышенных напряженностей электрического поля, значение в 1 кВ/м смещается с 35 м на отметку 25 м. Кроме того, максимальное значение напряженности снижается на 11 %.
3. Совместная установка активных и пассивных ТЭ позволяет снизить максимальное значение напряженности ЭП до допустимого уровня под ЛЭП, а также добиться уровня 1 кВ/м уже на расстоянии 20 м от оси ЛЭП.
4. Сопоставление результатов моделирования и работы [68] показало максимальное отклонение в 4 %, что дополнительно подтверждает адекватность предлагаемой методики.

## **2.5 Электромагнитное поле электрифицированных железных дорог**

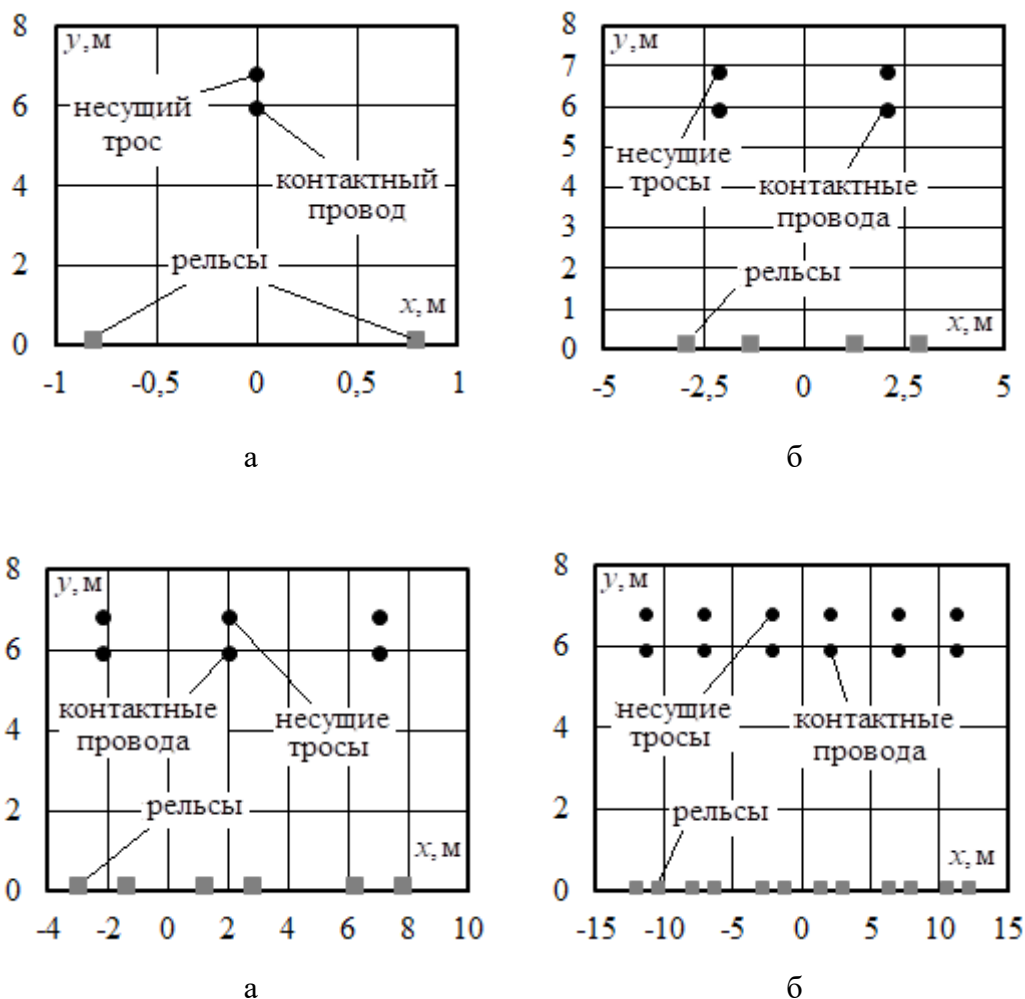
Система тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог может рассматриваться как однофазная ЛЭП. Однофазные системы имеют повышенные уровни напряженностей по сравнению с трехфазными, кроме того железные дороги не редко оказываются в непосредственной близости от территорий жилой застройки.

Наиболее простым является определение электромагнитной обстановки на однопутном участке, усложняют задачу тяговые сети со сложными контактными подвесками на многопутных участках. Наиболее распространены межподстанционные зоны, содержащие один, два или три пути, на станциях их количество может значительно увеличиваться.

Моделирование осуществлялось для четырех схем тяговых сетей 25 кВ с различным количеством путей: однопутной, двухпутной, трехпутной и шестипутной [46, 50, 83]. Предполагалось, что ТС питается от тяговых трансформаторов ТДТНЖ-40000/220/27,5 кВ. Для контактных подвесок были приняты провода МФ-100 и несущие тросы ПБСМ-95. Предусматривалось

консольное питание тяговой сети. В конце консолей была приложена нагрузка  $12 + j12$  МВ·А.

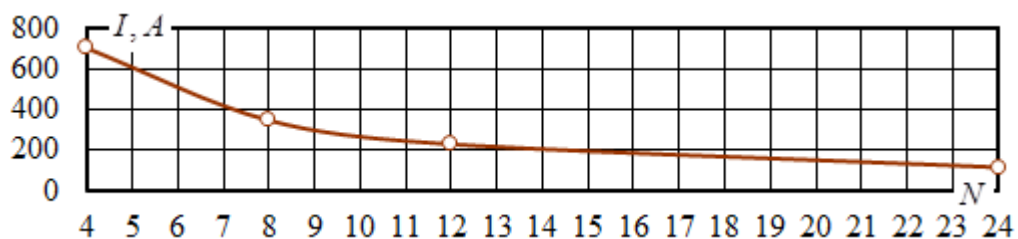
Координаты токоведущих частей ТС показаны на рисунке 2.24. Параметры режимов ТС приведены в таблице 2.19.



**Рисунок 2.24. Координаты токоведущих частей участков ТС:**

а – однопутного; б – двухпутного в – трехпутного; г – шестипутного

Результаты моделирования ЭМП иллюстрируются на рисунках 2.25 — 2.30. На рисунке 2.25 показан график, отвечающий зависимости токов отдельной контактной подвески от общего количества токоведущих частей  $N$ : контактных проводов, несущих тросов и рельсов.



**Рисунок 2.25. Зависимости токов контактной подвески количества токоведущих частей:** через  $N$  обозначено суммарное количество токоведущих частей

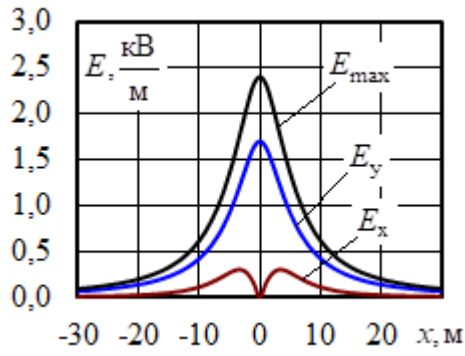
Таблица 2.19

**Результаты расчета режимов**

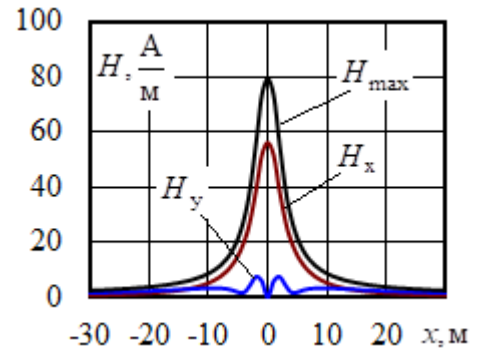
Количество путей	Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	1	24,98	-4,62	701,0	-49,9
2	1	25,03	-4,56	344,6	-49,8
	2	25,03	-4,56	345,3	-49,9
3	1	25,05	-4,54	228,3	-49,7
	2	25,05	-4,54	228,4	-49,7
	3	25,05	-4,54	228,6	-49,8
6	1	25,07	-4,52	113,4	-49,6
	2	25,07	-4,52	113,5	-49,6
	3	25,07	-4,52	113,5	-49,6
	4	25,07	-4,52	113,6	-49,7
	5	25,07	-4,52	113,6	-49,7
	6	25,07	-4,52	113,5	-49,6

Зависимости составляющих напряженностей ЭМП от координаты  $x$  представлены на рисунке 2.26. Зависимости амплитуд напряженностей электрического и магнитного поля на высоте 1,8 м от координаты  $x$  приведены на рисунке 2.27.

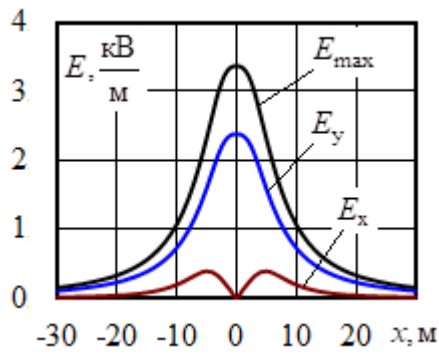




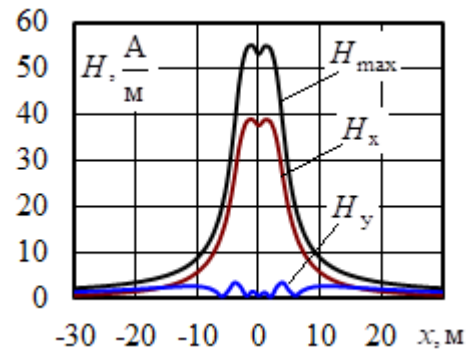
а



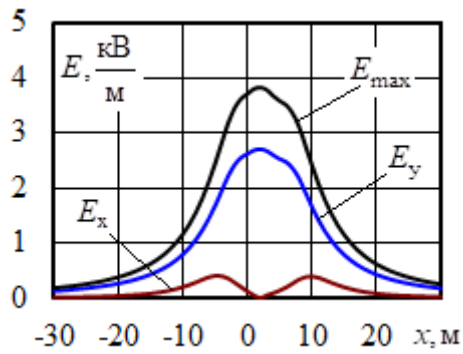
б



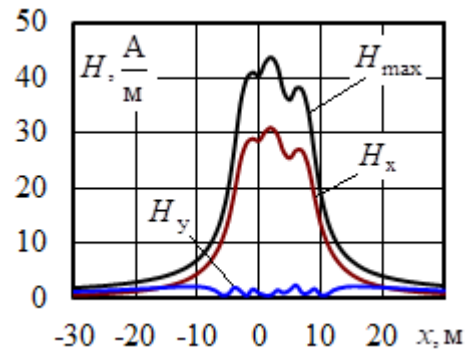
в



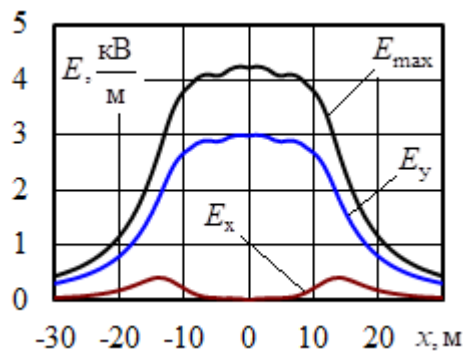
г



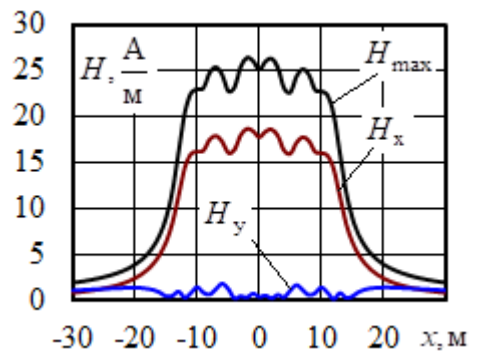
д



е



ж



з

Рисунок 2.26. Распределение составляющих поля в сечении участка ТС на высоте 1,8 м:

а, б – однопутный; в, г – двухпутный; д, е – трехпутный; ж, з – шестипутный

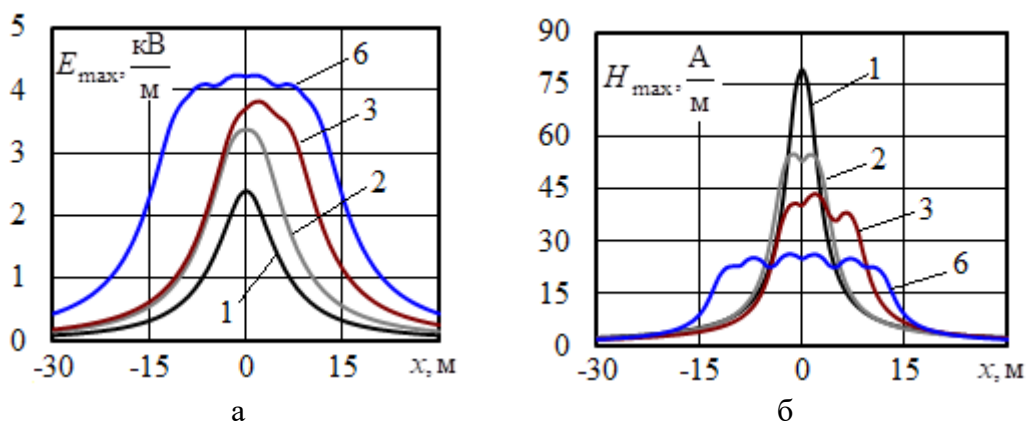


Рисунок 2.27. Зависимости амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1.8 м от координаты  $x$ : цифрами обозначено число путей

Зависимости максимумов и средних значений амплитуд напряженностей ЭМП от параметра  $N$  показаны на рисунке 2.28. Диаграммы рисунка 2.29 отвечают плотностям потоков активной электромагнитной энергии.

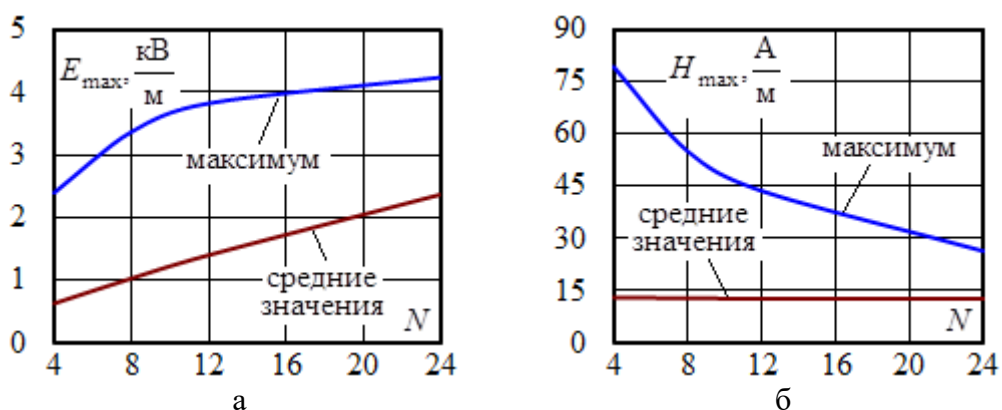


Рисунок 2.28. Зависимости максимумов и средних значений амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) поля на высоте 1.8 м от количества токоведущих частей

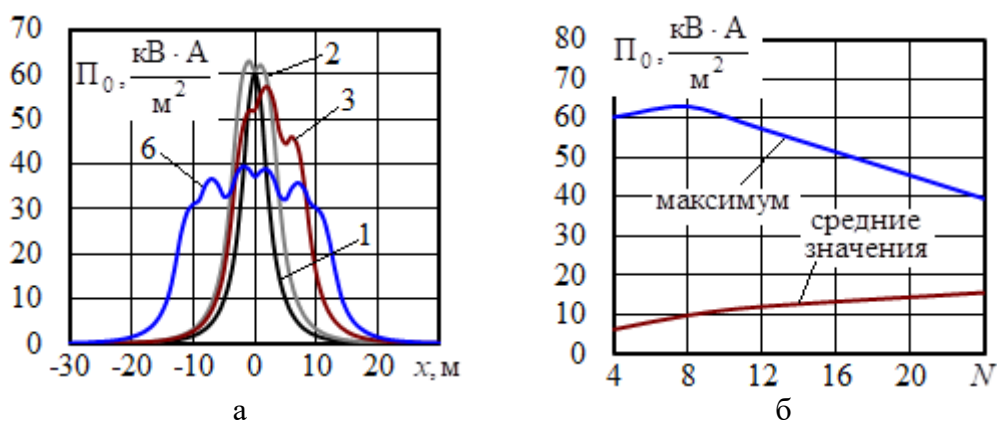
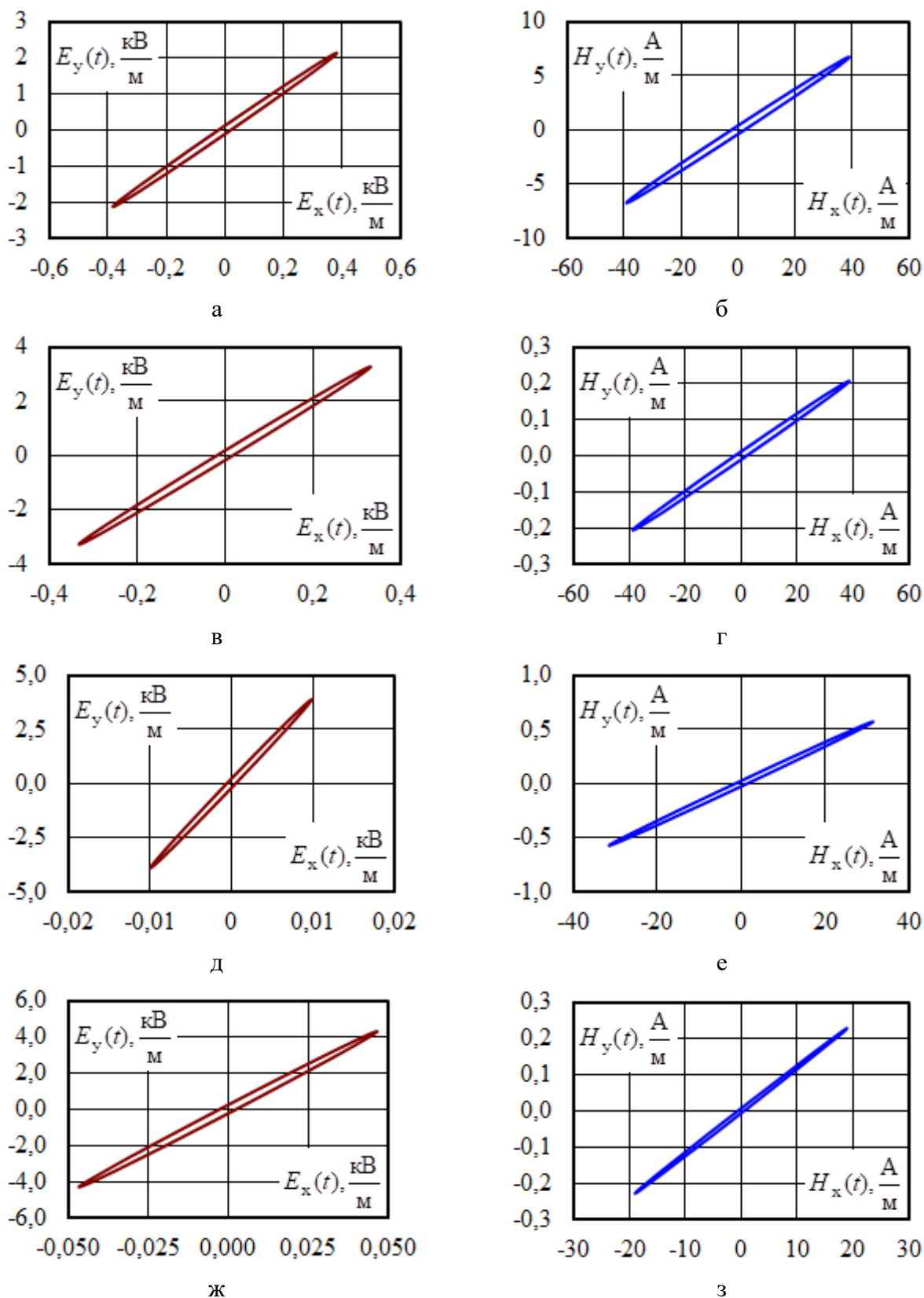


Рисунок 2.29. Плотность потока активной электромагнитной энергии на высоте 1,8 метра: цифрами обозначено число путей

Годографы векторов напряженностей в точке с координатами  $x = 2$  м;  $y = 1,8$  м приведены на рисунке 2.30.



**Рисунок 2.30.** Годографы векторов напряженности электрического (а, в, д, ж) и магнитного (б, г, е, з) полей в точке с координатой  $x = 2$  м: а, б – однопутный; в, г – двухпутный; д, е – трехпутный участок; д, з – шестипутный участок

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. С ростом количества токоведущих частей максимальные и средние значения амплитуд напряженностей электрического поля увеличиваются, но не превышают допустимого значения в 5 кВ/м. Зависимость  $\max(E_{\max})$  от количества токоведущих частей  $N$  имеет выраженный нелинейный характер, а аналогичный график для средних значений является практически линейным (рисунок 2.31а).

2. Максимумы амплитуд напряженностей магнитного поля уменьшаются с ростом числа  $N$ , а средние значения от этого параметра практически не зависят. При принятых величинах нагрузки уровни напряженностей магнитного поля не превышают допустимого значения в 80 А/м. Зависимость  $\max(H_{\max})$  от  $N$  имеет нелинейный характер (рисунок 2.31б).

3. Наибольшие значения  $\Pi_0$  создаются тяговой сетью двухпутного участка, а наименьшие – на шестипутном; зависимость максимумов  $\Pi_0 = \Pi_0(N)$  имеет экстремум при  $N = 8$ ; аналогичный график для средних значений отличается монотонно возрастающим характером (рисунок 2.32б).

4. Изменение числа токоведущих частей приводит к вариации годографов векторов напряженностей (рисунки 2.33 и 2.34). В наибольшей степени изменяются годографы напряженностей магнитного поля.

## 2.6 Электромагнитное поле тяговой сети повышенного напряжения

Один из путей решения задач увеличения пропускной способности железнодорожных магистралей, снижения потерь мощности и улучшения качества электроэнергии заключается в использовании СТЭ повышенного напряжения, например, 50 кВ и 50+110 кВ [117]. Для практического применения этих СТЭ необходим детальный анализ их режимов на основе цифровых моделей. Задачи такого анализа заключаются в определении показателей качества электрической энергии и энергетической эффективности,

а также условий электромагнитной совместимости и безопасности [43, 44]. В разделе представлены результаты определения электромагнитной обстановки для перспективных СТЭ повышенного напряжения. Для сравнения выполнено моделирование традиционной СТЭ 25 кВ [88, 89, 96].

По рассматриваемому участку осуществлялось движение 7 поездов массой 6300 т в нечетном направлении и такого же количества поездов массой 6000 т – в четном. Движение поездов учитывалось с помощью методов имитационного моделирования, исследуемый интервал времени разбивался на малые промежутки, для каждого из которых определялись исходные данные и формировалась мгновенная схема, таким образом динамическая модель заменялась набором статических схем. Дополнительными данными для такого расчета являются график движения поездов (рисунок 2.31) и токовые профили пути (рисунок 2.32).

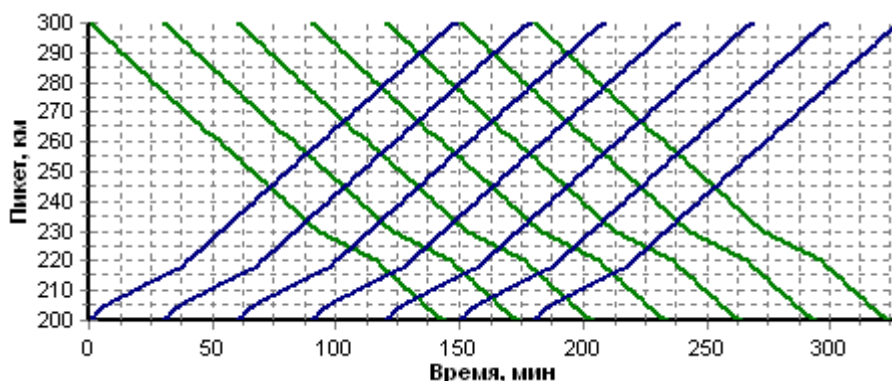


Рисунок 2.31. График движения поездов

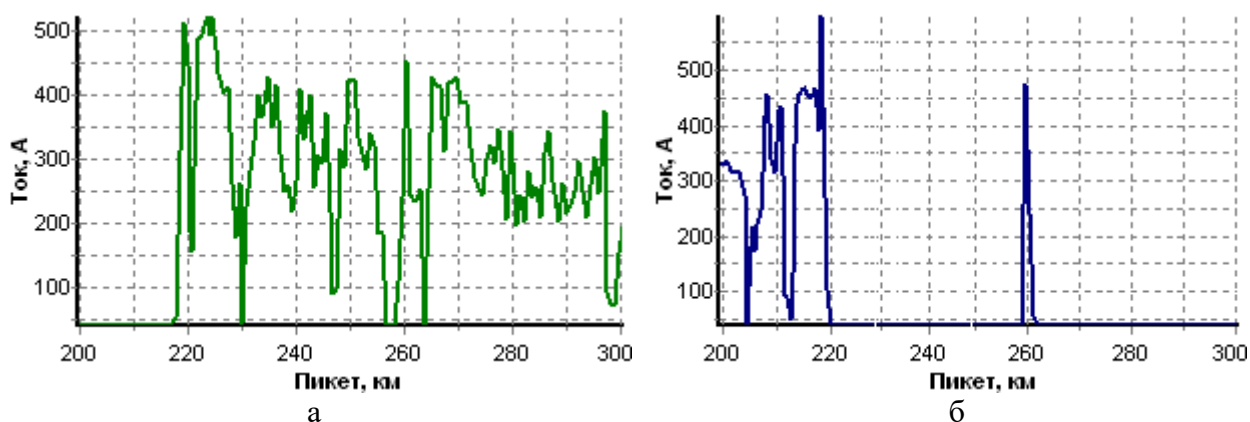
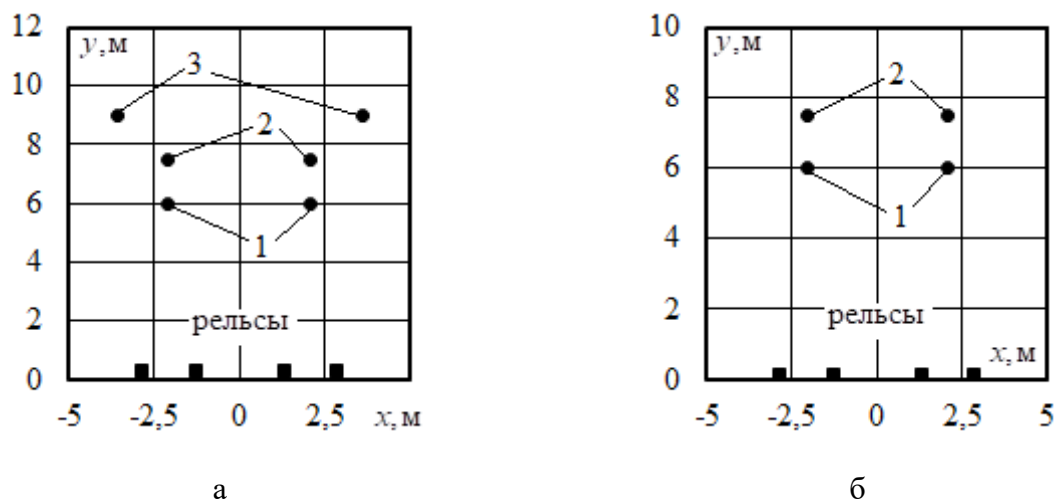


Рисунок 2.32. Токовые профили поездов: а – токовый профиль нечетного массой 6300 т;

б – то же для четного массой 6000 т

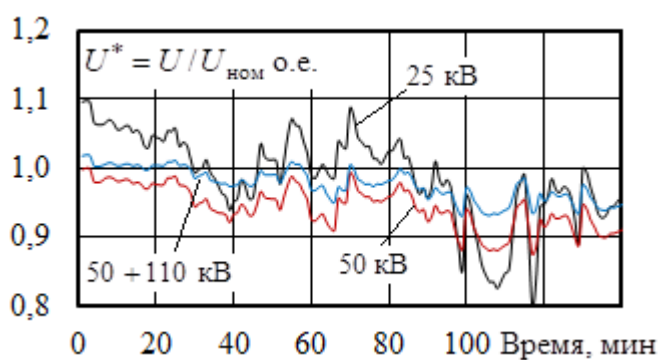
Моделирование режимов СТЭ 50 кВ и 50+110 кВ проведено применительно к двухпутному участку, расположение токоведущих частей показано на рисунке 2.33. Расчетные схемы имели в своем составе модели трех тяговых трансформаторов и двух межподстанционных зон. Левая МПЗ была разбита на пять участков протяженностью по 10 км. Кроме того, в схеме были представлены модели четырех линий электропередачи 220 кВ.



**Рисунок 2.33. Расположение токоведущих частей в сечении тяговой сети:**

а – СТЭ 50+110 кВ; б – СТЭ 25 и 50 кВ; 1 – контактный провод;  
2 – несущий трос; 3 – питающий провод

На рисунках 2.34, 2.35 и в таблице 2.20 представлены результаты расчетов напряжений и токов первого поезда.



**Рисунок 2.34. Напряжения на токоприемнике первого поезда**

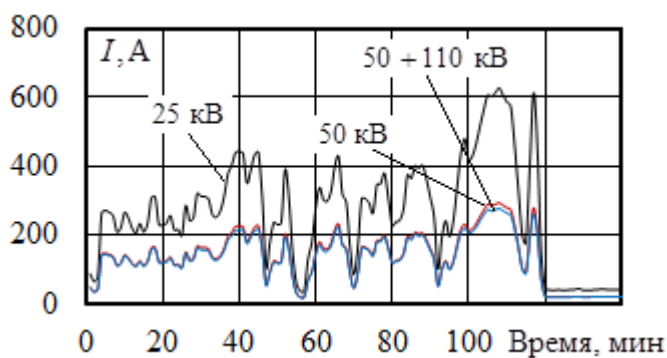


Рисунок 2.35. Токи электровоза первого поезда

Таблица 2.20

## Напряжения на токоприемнике первого поезда

Показатель	Тип ТС		
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ
Максимум	<i>1,10</i>	1,00	1,02
Ср. значение	<i>0,99</i>	0,94	<i>0,98</i>
Минимум	<i>0,80</i>	0,88	<i>0,93</i>
Размах	<i>0,30</i>	0,12	<i>0,09</i>
СКО	<i>0,06</i>	0,03	<i>0,02</i>

Примечание: СКО – среднеквадратичное отклонение; курсивом выделены экстремальные значения.

Результаты моделирования ЭМП показаны на рисунках 2.36 – 2.38 и в таблице 2.21. Электромагнитные поля определялись на высоте 1,8 м.

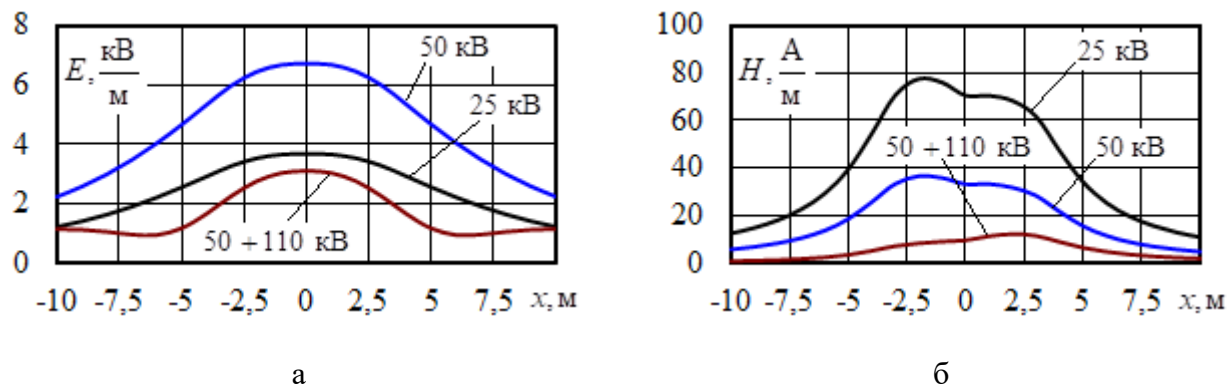
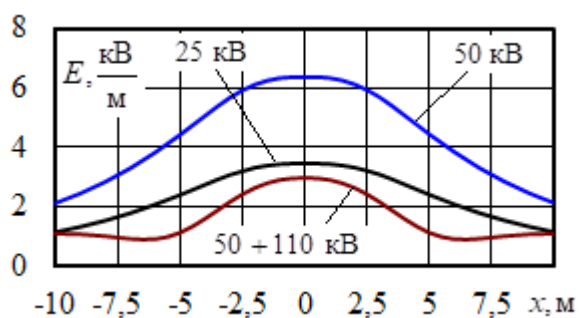
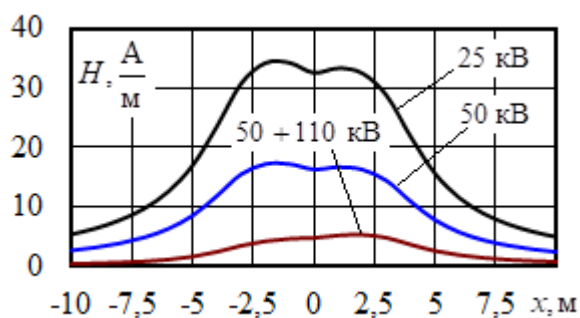


Рисунок 2.36. Максимальные значения напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля

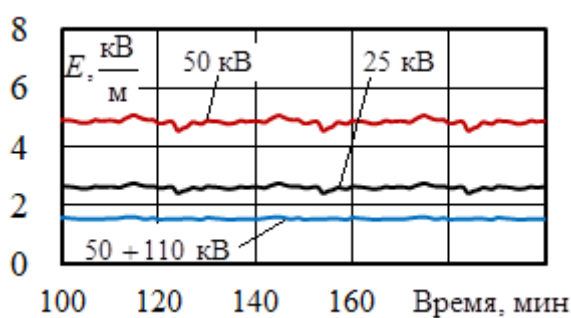


а

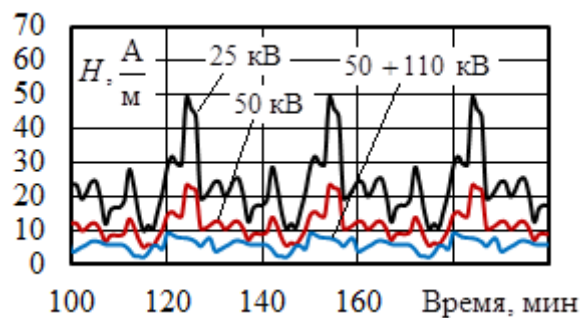


б

Рисунок 2.37. Средние значения напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля



а



б

Рисунок 2.38. Динамика напряженности электрического(а) и магнитного(б) поля

Таблица 2.21

Напряженность электрического и магнитного поля

Параметр	Тип ТС			Различие, %	
	25 кВ	50 кВ	50+110 кВ	Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 2 и 4
1	2	3	4	5	6
$max (E_{max}), \text{кВ/м}$	3,7	6,7	3,1	-81,1	16,2
$max (H_{max}), \text{А/м}$	77,5	36,7	12,4	52,6	84,0
$mid (E_{max}), \text{кВ/м}$	3,5	6,4	2,9	-82,9	17,1
$mid (H_{max}), \text{А/м}$	34,2	17,2	5,3	49,7	84,5

Результаты расчета электромагнитных полей позволяют сделать следующие выводы



1. Значения напряженности электрического и магнитного полей СТЭ повышенного напряжения не превышают допустимые значения для электротехнического персонала.

2. Применение перспективных СТЭ приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля, так максимальные и средние значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ, соответственно, на 81 и 83 %. Однако аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 16 и 17 %.

3. Максимальные значения напряженностей магнитного поля уменьшается по сравнению с СТЭ 25 кВ на 53 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110 кВ, соответственно.

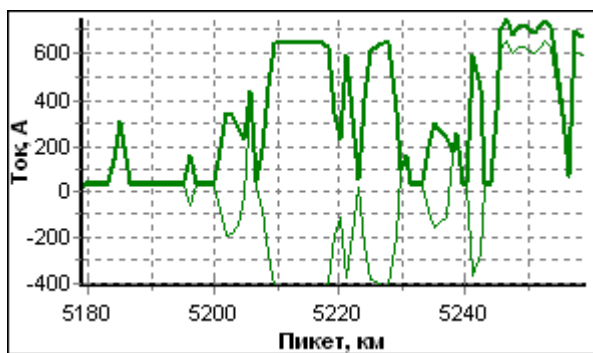
## **2.7 Электромагнитное поле тяговой сети с повышенной нагрузкой**

Применяемые на данный момент системы электроснабжения железных дорог, как указывалось ранее, создают повышенные электромагнитные поля. Растущие требования по увеличению пропускной способности участков приводят к увеличению массы поездов и их количества.

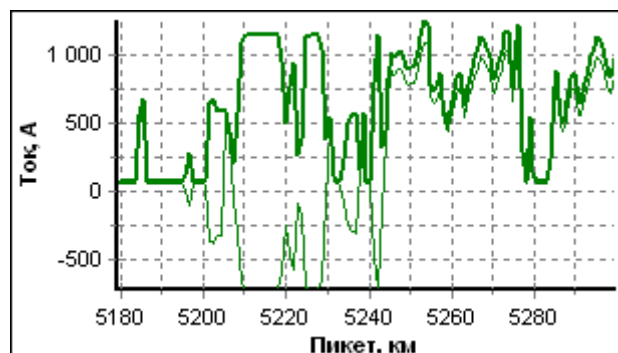
Для повышения пропускной способности может применяться технология виртуальной сцепки. Она позволяет увеличить пропускную способность за счет уменьшения межпоездного интервала [57]. Для оценки влияния технологии виртуальной сцепки на электромагнитное поле тяговой сети далее рассмотрен двухпутный участок при двух режимах пропуска поездов:

- три сдвоенных поезда массой 12600 т;
- шесть поездов массой 6300 т с применением виртуальной сцепки.

Графики движения поездов и токовые профили пути показаны на рисунках 2.39 и 2.40. На рисунке 2.41 показан фрагмент схемы тягового и внешнего электроснабжения, а также расположение токоведущих частей тяговой сети.

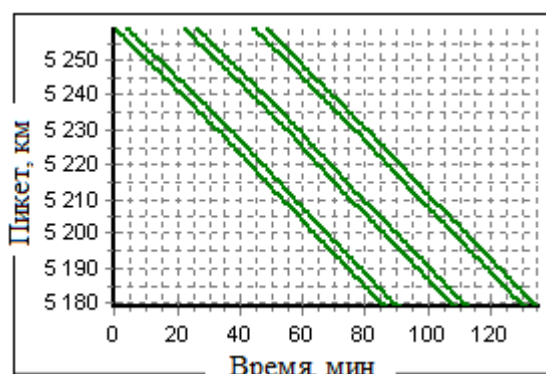


а

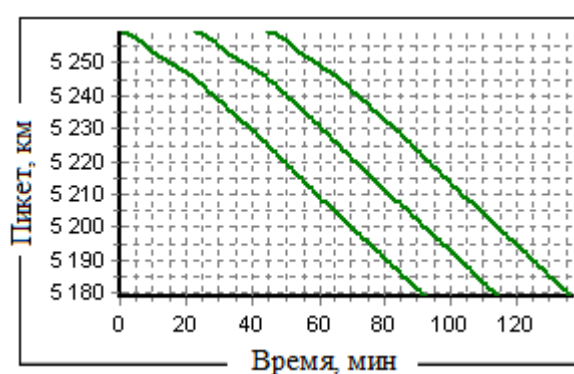


б

Рисунок 2.39. Токвые профили поезда: а – виртуальная сцепка; б – сдвоенный поезд

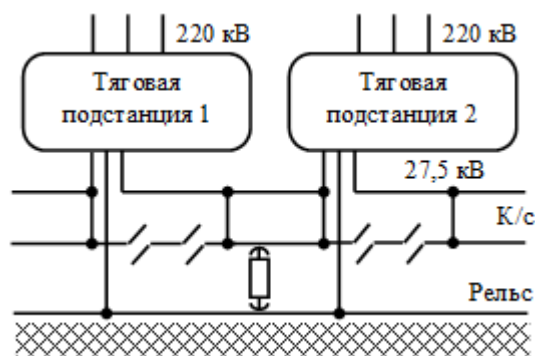


а



б

Рисунок 2.40. График движения поездов: а – виртуальная сцепка; б – сдвоенные поезда



а



б

Рисунок 2.41. Фрагмент схемы(а) и расположение токоведущих частей (б)

Распределение напряженности электрического и магнитного полей в сечении тяговой сети показано на рисунках 2.42 и 2.43.

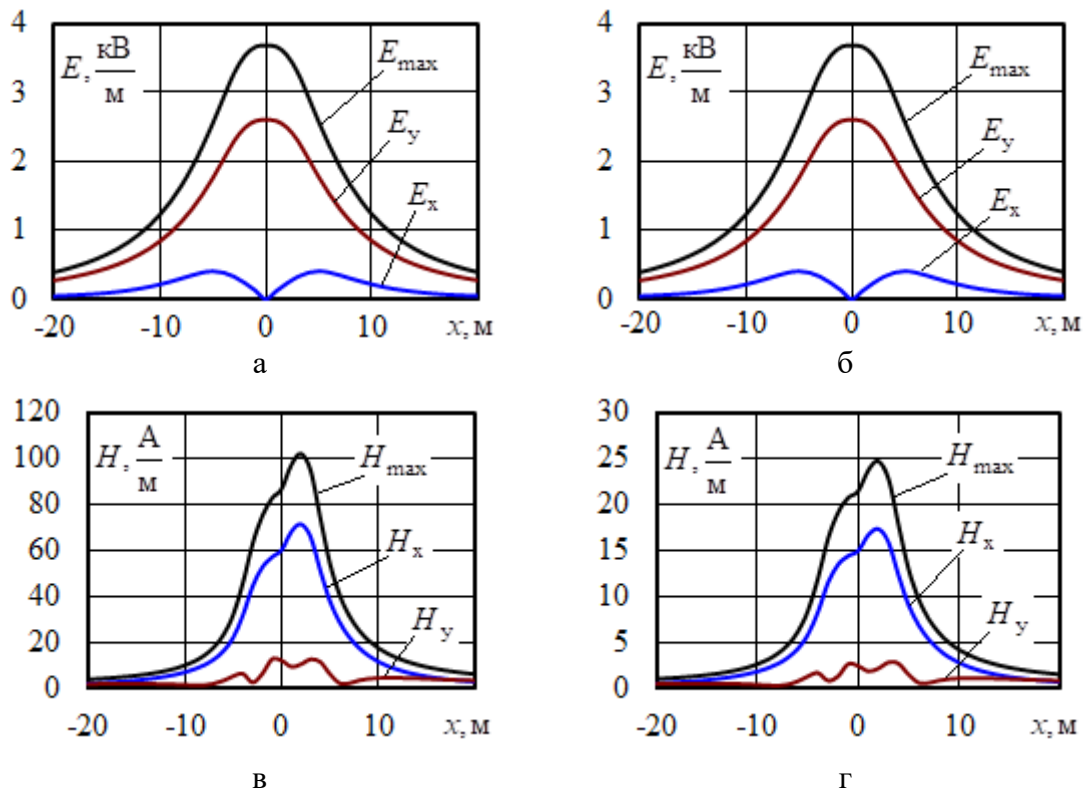


Рисунок 2.42. Распределение максимальных (а, в) и средних (б, г) значений напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей при пропуске двояных поездов

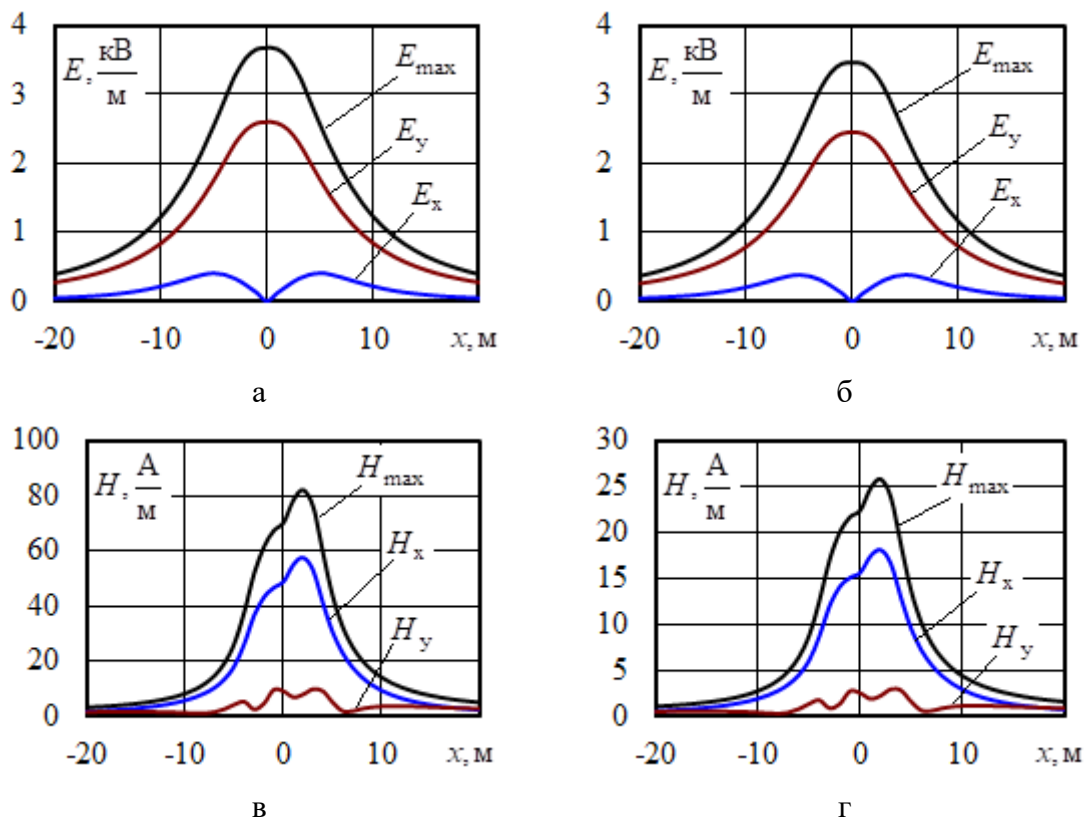


Рисунок 2.43. Распределение максимальных (а, в) и средних (б, г) значений напряженностей электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей при организации виртуальной сцепки

На рисунках 2.44 и 2.45 показана зависимость амплитудных значений напряженности электрического поля от времени в точке на оси нечетного пути на высоте 1,8 м. Распределение в сечении тяговой сети максимальных и средних амплитудных значений напряженности магнитного поля за время движения поездов показано на рисунке 2.46.

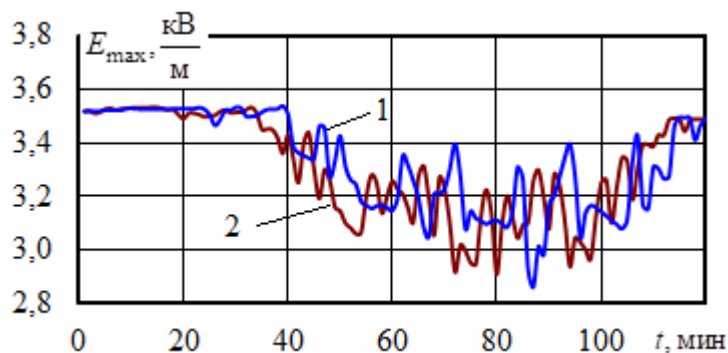


Рисунок 2.44. Динамика изменения напряженности электрического поля:

1 – сдвоенные поезда, 2 – виртуальная сцепка

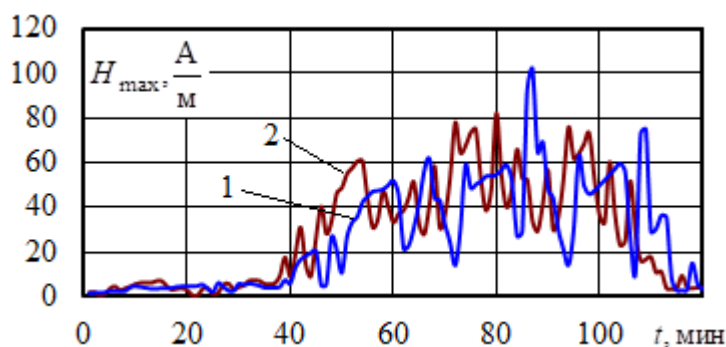


Рисунок 2.45. Динамика изменения напряженности магнитного поля:

1 – сдвоенные поезда, 2 – виртуальная сцепка

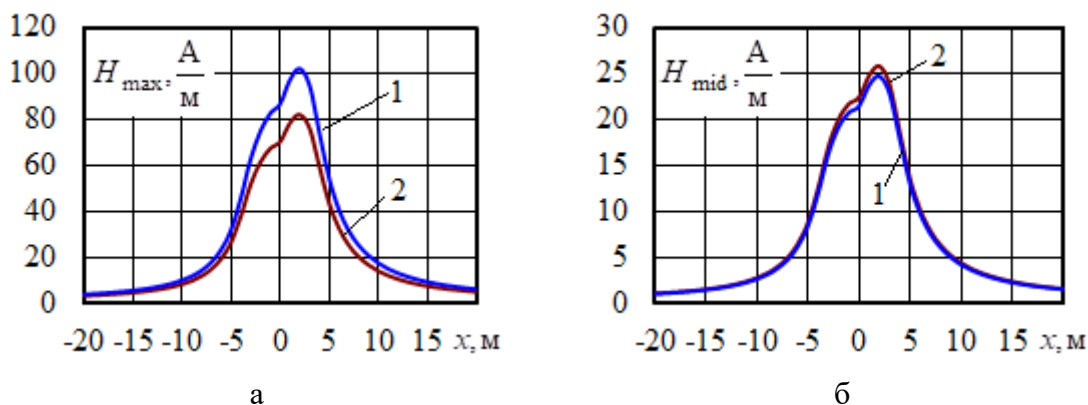


Рисунок 2.46. Максимальные (а) и средние (б) значения напряженности магнитного поля в сечении тяговой сети: 1 – сдвоенные поезда, 2 – виртуальная сцепка

**Напряженность электрического и магнитного полей**

Параметр	Сдвоенные		Виртуальная сцепка		Различие, %	
	max	mid	max	mid	Между 2 и 4	Между 3 и 5
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<i>E</i> , кВ/м	3.68	3.48	3.67	3.46	0.3	0.5
<i>H</i> , А/м	102	24.7	82.1	25.9	19.5	-4.9

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Максимальные и средние амплитудные значения напряженности электрического поля при применении виртуальной сцепки изменяются незначительно. Аналогичное сопоставление параметров для магнитного поля показало уменьшение максимального значения на 20 % и увеличение среднего на 5 %

2. Применение технологии виртуальной сцепки приводит к значительному изменению динамики напряженности электрического и магнитного полей.

3. Значения напряженности электрического и магнитного полей для рассматриваемых режимов не превышают допустимые уровни для электротехнического персонала.

### **Выводы**

На основе предлагаемой методики могут быть решены задачи выбора конструктивного исполнения ЛЭП и мероприятий для обеспечения электромагнитной совместимости и безопасности.

1. Сопоставление значений напряженностей электромагнитного поля для треугольного и вертикального расположения проводов на опоре ЛЭП при соблюдении одинаковой минимальной высоты подвеса провода показало

снижение максимальных значений в пользу вертикального расположения, также при вертикальном расположении уменьшается зона, в которой параметры поля превышают ПДУ для территорий жилой застройки.

2. Расчет напряженностей электрического и магнитного полей воздушных линий требует определение точного расположения проводов с учетом стрелы провеса. Классическое упрощение, основанное на предположении, что провода расположены горизонтально на высоте центра тяжести, приводит к заметным искажениям. Для рассматриваемой линии с учетом точного расположения стрелы провеса отклонение максимальных значений напряженностей ЭМП составило более 30 %.

3. Наравне с конструктивным исполнением линии необходимо учитывать режимные особенности, в том числе аварийные режимы. Режим обрыва (отключения) фазы привел к перераспределению напряженности электрического и магнитного полей ЛЭП и увеличению напряженности электрического поля на 11 %, напряженности магнитного поля – в 4 раза, данные изменения не привели к нарушению ПДУ для электротехнического персонала. В режимах короткого замыкания наибольшую опасность представляет магнитное поле, значения напряженности которого значительно возрастают в результате протекания больших токов. Данные режимы являются кратковременными, однако под действием повышенных магнитных полей могут возникать наведенные напряжения, представляющие опасность для персонала даже при кратковременном воздействии.

4. Рассматриваемые модели и методы могут применяться при решении задач определения мер для обеспечения заданных уровней напряженностей ЭМП. Для ЛЭП 500 кВ раздельное применение активных и пассивных тросовых экранов не дает требуемого эффекта; для уменьшения напряженности электрического поля до допустимых значений необходимо их совместное применение.

5. Особую актуальность вопросы электромагнитной безопасности, ввиду непосредственной близости пассажиров к системе электроснабжения,

приобретают на территориях ЖД станций. На основе анализа полученных результатов моделирования одно-, двух-, трех- и шестипутного участков было определено, что с ростом количества токоведущих частей максимальные и средние значения амплитуд напряженностей электрического поля увеличиваются. Зависимость максимальных значений от числа путей имеет выраженный нелинейный характер, а для средних значений является практически линейной. Максимальное значение напряженности магнитного поля с ростом числа токоведущих частей нелинейно уменьшается, в то время как среднее значение практически не изменяется.

2. Результаты моделирования СТЭ повышенного напряжения показали, что применение таких систем приводит к увеличению уровней напряженности электрического поля. Так максимальные и средние значения напряженности ТС 50 кВ больше, чем в ТС 25 кВ, соответственно, на 81 и 83 %. Однако, аналогичные параметры ТС 50+110 кВ за счет питающего провода уменьшаются на 16 и 17 %. Максимальные значения напряженностей магнитного поля уменьшается по сравнению с СТЭ 25 кВ на 53 и 84 % для ТС 50 кВ и 50+110.

3. Для эксплуатируемых систем электроснабжения разрабатываются мероприятия по увеличению пропускной способности, которые могут приводить к значительным изменениям в режимах работы СТЭ. Одним из таких мероприятий является применение технологии виртуальной сцепки поездов, что позволяет поездам следовать с уменьшенным интервалом. С помощью данной технологии тяжеловесный поезд был заменен на два поезда уменьшенной массы. Применение технологии виртуальной сцепки приводит к значительной вариации динамики напряженности электрического и магнитного полей. Однако, максимальные и средние амплитудные значения напряженности электрического поля изменились незначительно. Аналогичное сопоставление параметров для магнитного поля показало уменьшение максимального значения на 20 % и увеличение среднего на 5 %.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В МЕСТАХ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МНОГОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

#### 3.1 Кабельная и воздушная линия

Рассмотрена ситуация ортогонального пересечения воздушной ЛЭП 220 кВ и кабельной ЛЭП 110 кВ, выполненной из трех одножильных экранированных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [35].

Моделирование ЭМП проводилось для пространства, окружающего место пересечения воздушной линии 220 кВ, выполненной проводами АС-650, и кабельной линии 110 кВ с сечением жил 630 мм<sup>2</sup>. Сечение экрана составляло 95 мм<sup>2</sup>. По каждой фазе воздушной линии осуществлялся транзит мощности  $50 + j50$  МВ·А, для кабельной линии величина этого параметра была принята равной  $50 + j30$  МВ·А. Для моделирования КЛ использовался прием, заключающийся в замене жил и экрана наборами тонких проводников с суммарным сечением, равным сечению исходных токоведущих частей. Координаты расположения проводов ВЛ, а также проводников жил и экрана КЛ показаны на рисунке 3.1. Результаты расчета режимов работы ВЛ и КЛ приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

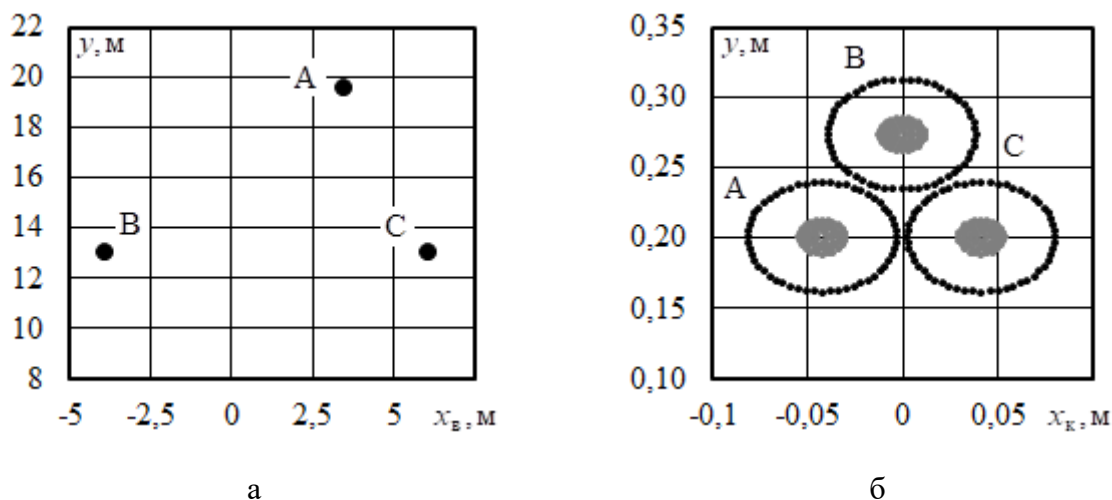


Рисунок 3.1. Расположение токоведущих частей воздушной (а) и кабельной (б) линий



Таблица 3.1

**Модули и фазы напряжений и токов кабельной линии**

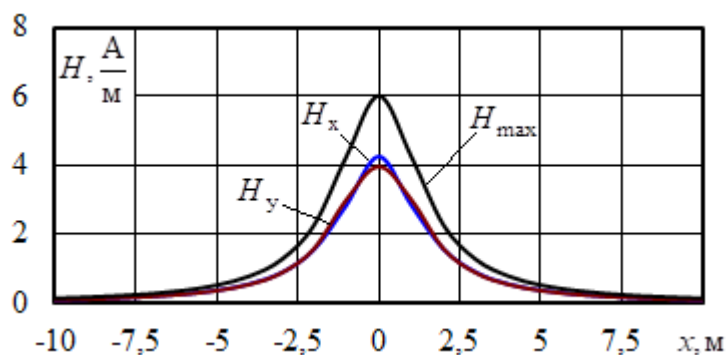
Токоведущая часть	Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
Жилы	А	64	0	907,8	-30
	В	64	-120	907,9	-120
	С	64	120	907,9	120
Экран	А	0,25	64	48,2	-117
	В	0,25	-56	48,2	122
	С	0,25	-176	48,1	2,6

Таблица 3.2

**Модули и фазы напряжений и токов воздушной линии**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	134,9	-2	547,3	-48
В	134,9	-122	550,7	-169
С	134,9	118	550,4	72

Экранированная кабельная линия не создает заметных уровней напряженности электрического поля, а распределение напряженности магнитного поля в ее сечении при раздельном моделировании ВЛ и КЛ показано на рисунке 3.2. На рисунке 3.3 приведено распределение напряженностей электрического и магнитного полей в сечении ВЛ.



**Рисунок 3.2. Распределение напряженности магнитного поля кабельной линии**

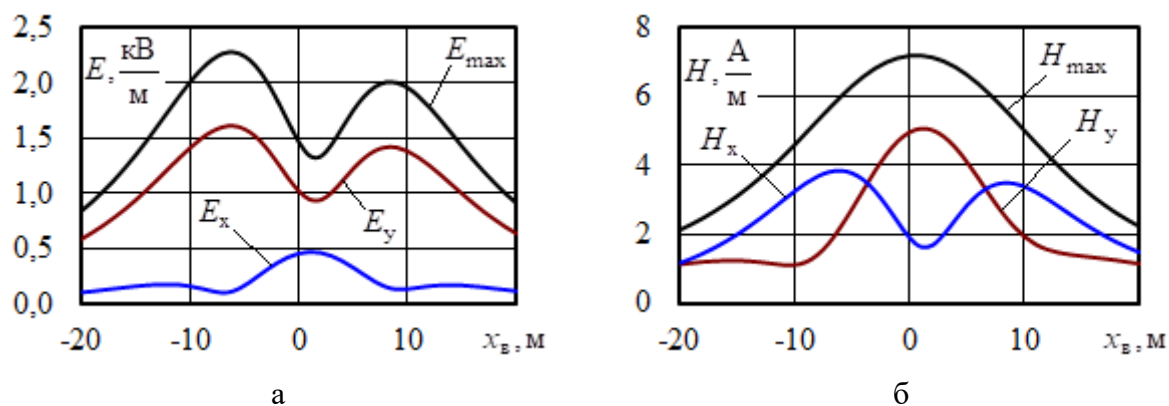


Рисунок 3.3. Распределение напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей воздушной линии

Результаты моделирования полей на высоте 1,8 метра в месте пересечения линий представлены на рисунке 3.4, максимальные значения напряженностей сведены в таблицу 3.3. На рисунке 3.5 приведены годографы векторов напряженности в месте пересечения.

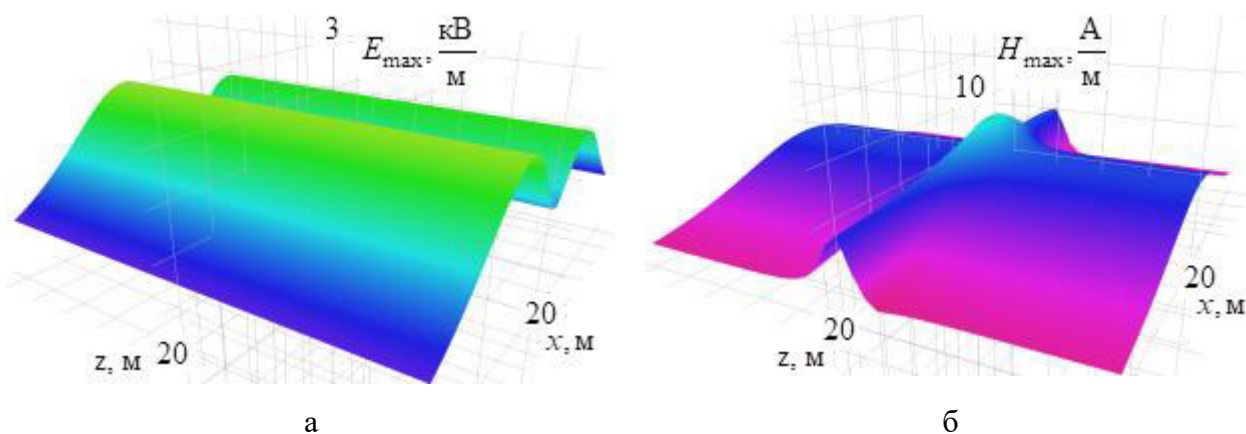


Рисунок 3.4. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения ВЛ и КЛ

Таблица 3.3

Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей

Параметр	Воздушная линия 220 кВ	Кабельная линия 110 кВ	Пересечение	Различие, %	
				Между 2 и 4	Между 3 и 4
<i>l</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
$E_{\max}$ , кВ/м	2,28	0,01	2,28	–	–
$H_{\max}$ , А/м	7,19	6,02	10,6	32	43

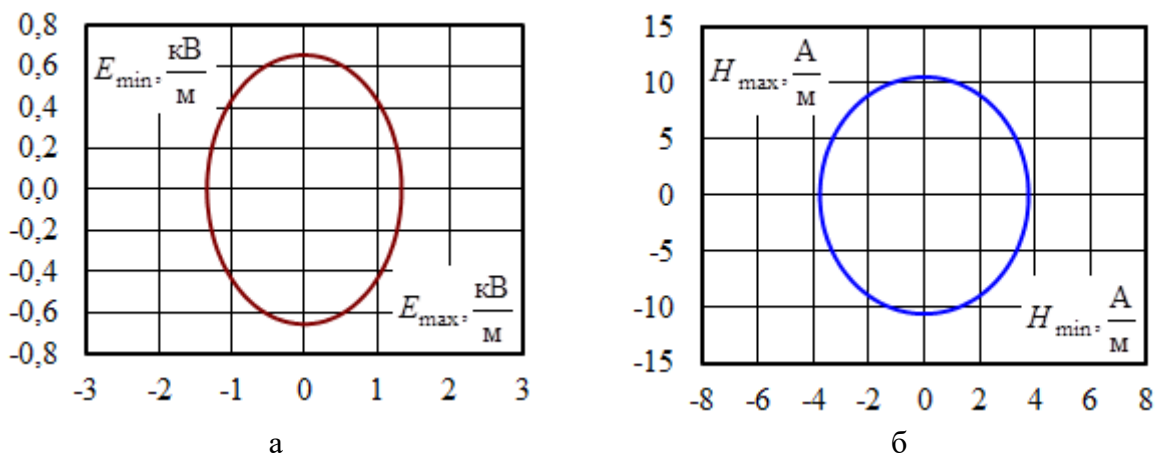


Рисунок 3.5. Годографы напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в точке с координатами  $x = 1$  м,  $y = 1,8$  м,  $z = -1$  м

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Значения напряженности электрического поля воздушной линии при раздельном моделировании не превышают предельно допустимых уровней для электротехнического персонала. Из-за наличия экранов КЛ напряженность электрического поля в месте пересечения определяется только вкладом воздушной линии.

2. В месте пересечения происходит наложение магнитных полей и изменение их пространственной структуры. Напряженности магнитного поля относительно раздельного моделирования ВЛ и КЛ увеличиваются, соответственно, на 32 % и 43 %.

### 3.2 Тяговые сети и ЛЭП

Тяговые сети электрифицированных железных дорог, ввиду особенностей конструкции, характеризуются повышенными уровнями электромагнитных полей, которые обычно не превышают допустимые значения для электротехнического персонала, но могут нарушать нормы для других групп населения. Кроме того, в местах пересечения с ЛЭП происходит наложение полей, что может приводить к значительному повышению уровней

напряженностей. Ниже рассмотрено несколько случаев таких пересечений [48, 52, 53, 79, 95, 97].

Моделирование осуществлялось для мест пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 220, 500 и 750 кВ. Схема ЛЭП 220 кВ представлена на рисунке 3.6. Схема тяговой сети показана на рисунке 3.7. Пространственное расположение токоведущих частей приведено на рисунке 3.8. Результаты определения напряжений и токов для заданного режима представлены в таблицах 3.4 и 3.5.

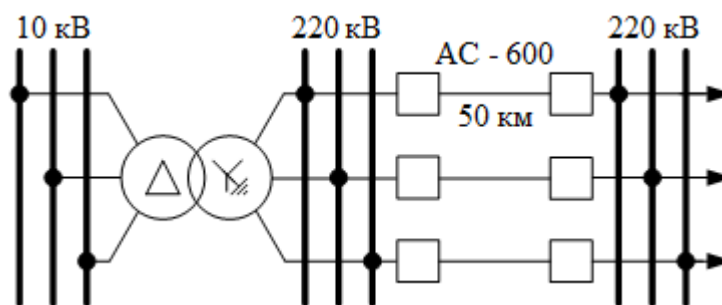


Рисунок 3.6. Схема электрической сети ЛЭП 220 кВ

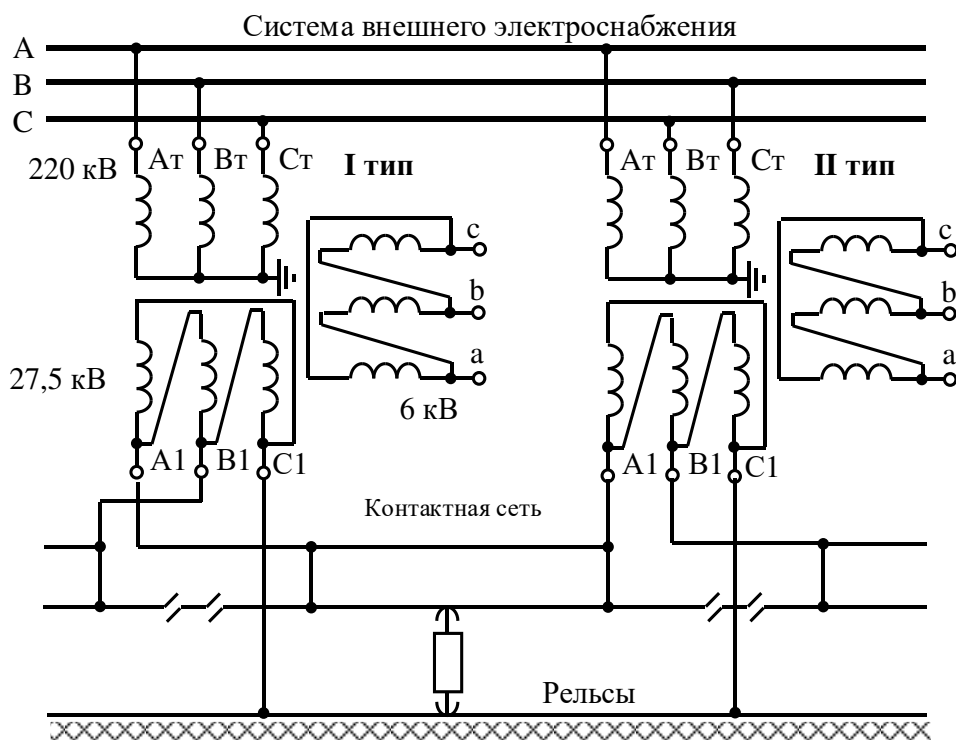


Рисунок 3.7. Фрагменты схем СТЭ 25 кВ

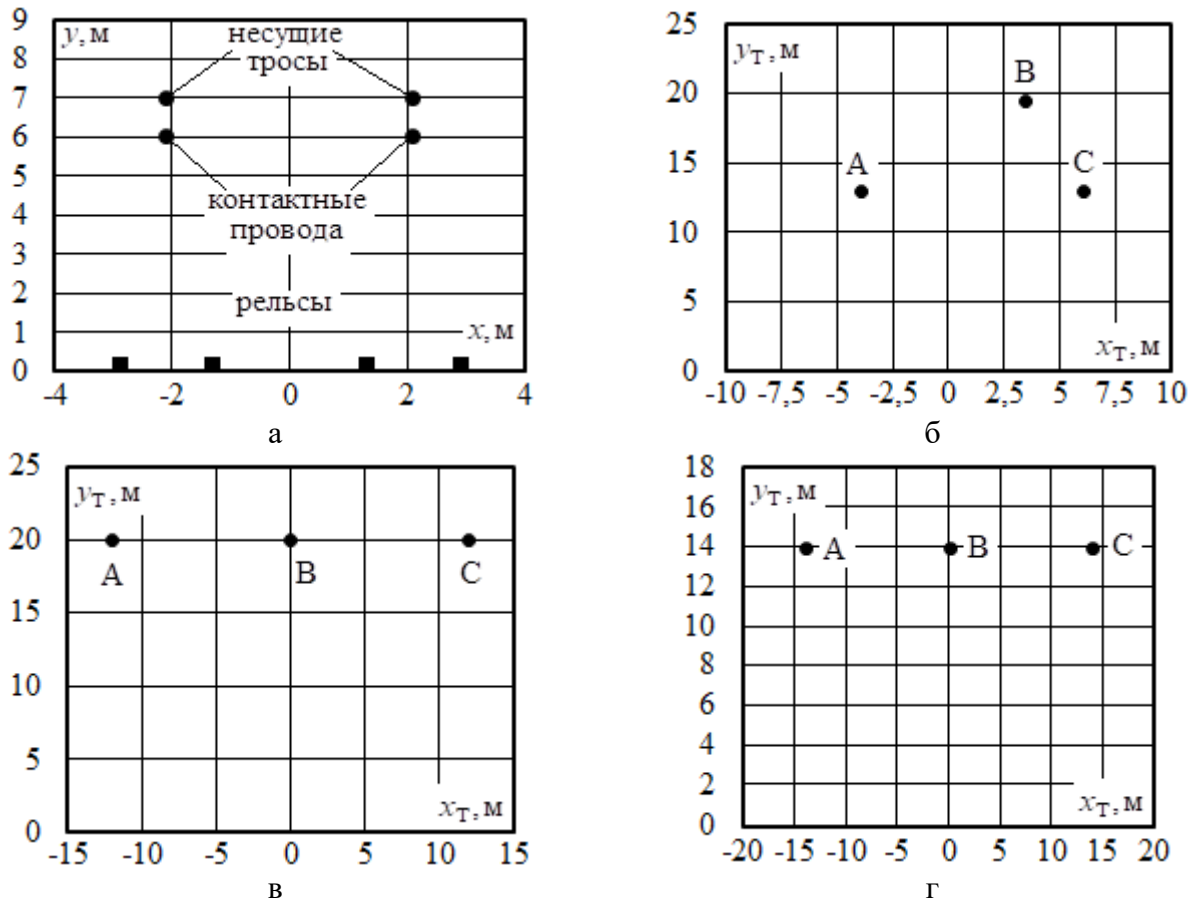


Рисунок 3.8. Расположение токоведущих частей в сечении:

а – СТЭ 25 кВ; б – ЛЭП 220 кВ; в – ЛЭП 500 кВ; г – ЛЭП 750 кВ

Таблица 3.5

Напряжения и токи ЛЭП 220 кВ

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
ЛЭП 220 кВ				
А	134,9	-1,8	547,3	-48,5
В	134,9	-121	550,7	-169
С	134,9	118	550,3	71,6
ЛЭП 500 кВ				
А	321,7	0	635,9	86,5
В	321,7	-121	682,9	-39,6
С	320,6	118	632,9	-164,8
ЛЭП 750 кВ				
А	433	0	289,8	90,2
В	433	-120	290,6	-30,1
С	433	110	289,3	-150,5

Напряжения и токи тяговой сети 25 кВ

Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	25,64	-5,6	450,2	-51
2	25,64	-5,6	450,2	-51

Рассчитанные напряженности электрического и магнитного полей в собственных координатах тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 метра для различных значений горизонтальных координат представлены на рисунках 3.9 и 3.10. Объемные диаграммы суммарных напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 м и 7 м показаны на рисунках 3.11 – 3.13.

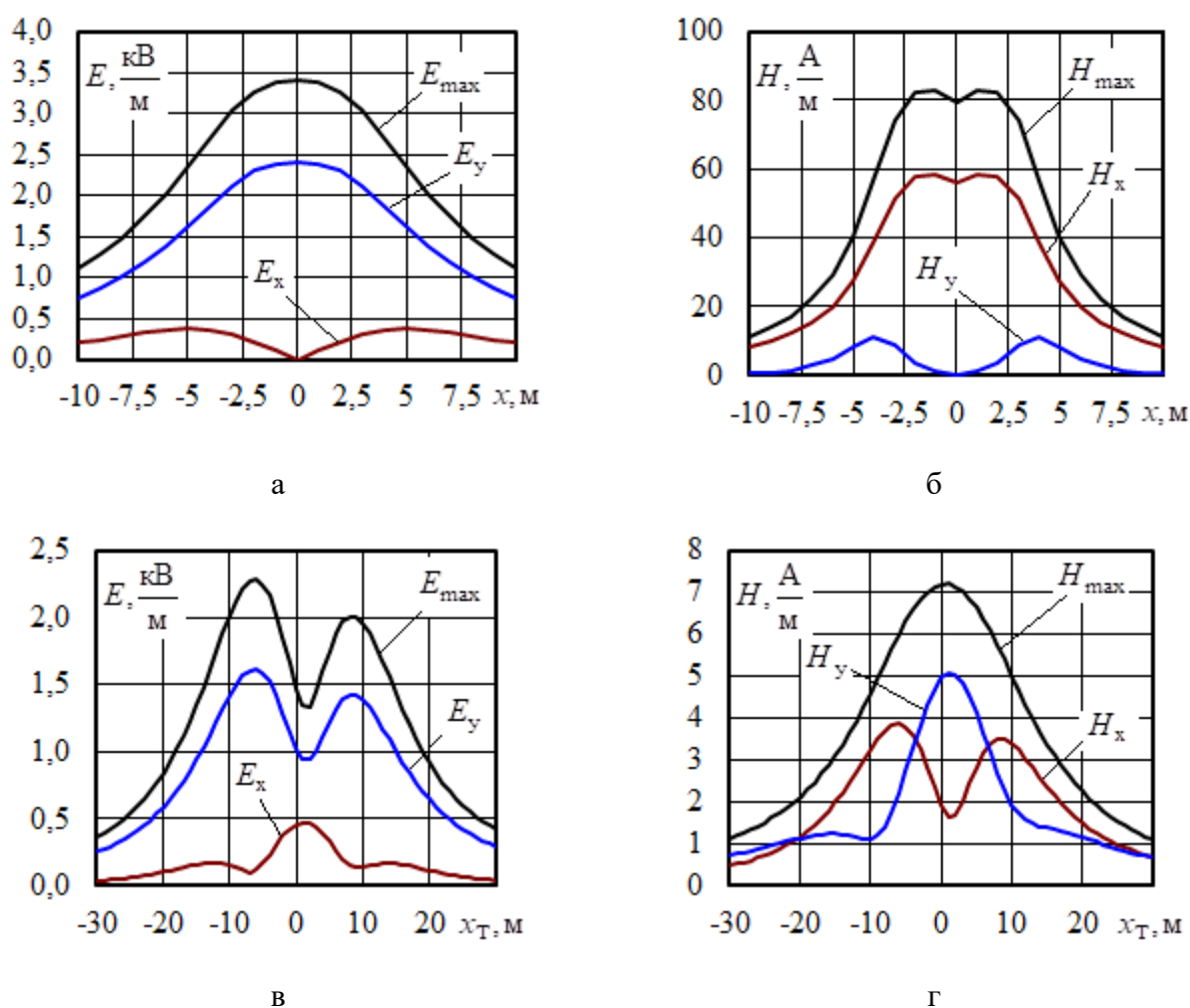
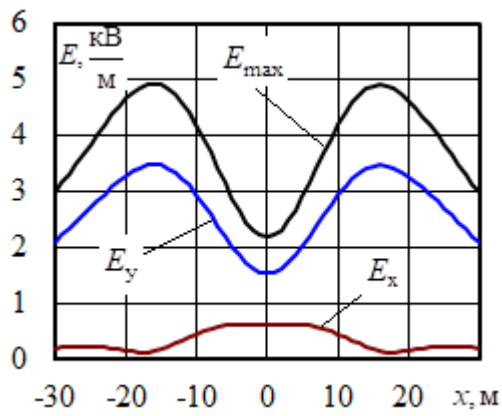
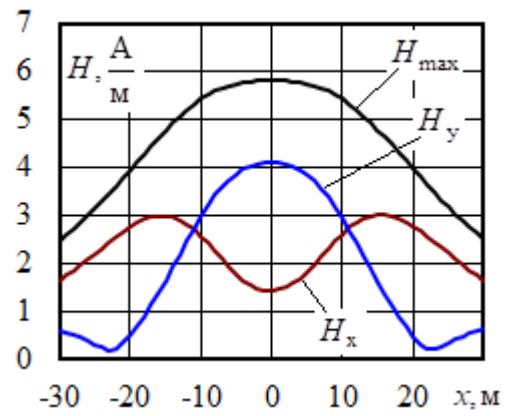


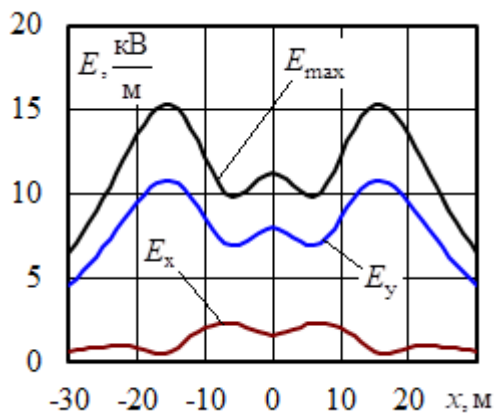
Рисунок 3.9. Напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей на высоте 1,8 м: а, б – СТЭ 25 кВ; в, г – ЛЭП 220 кВ;



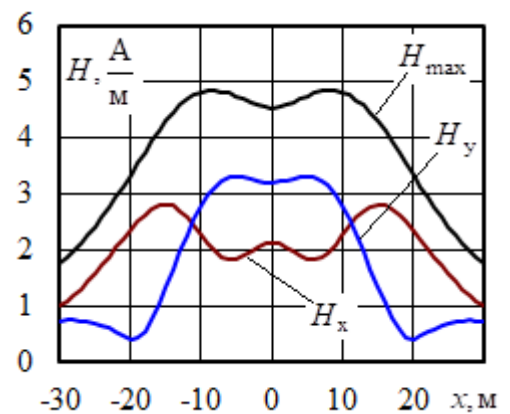
а



б

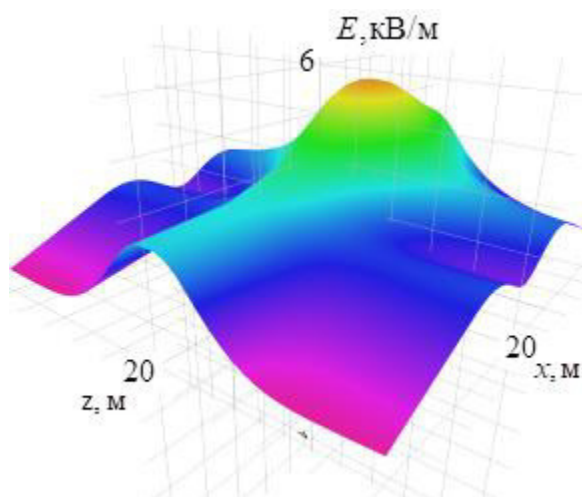


в

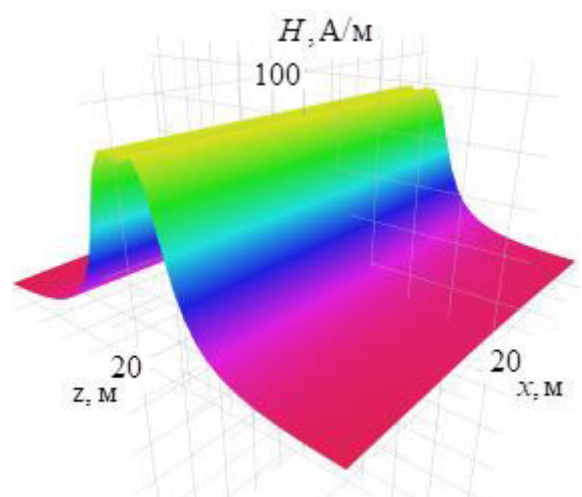


г

**Рисунок 3.10.** Напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей на высоте 1,8 м: а, б – ЛЭП 500; в, г – ЛЭП 750 кВ

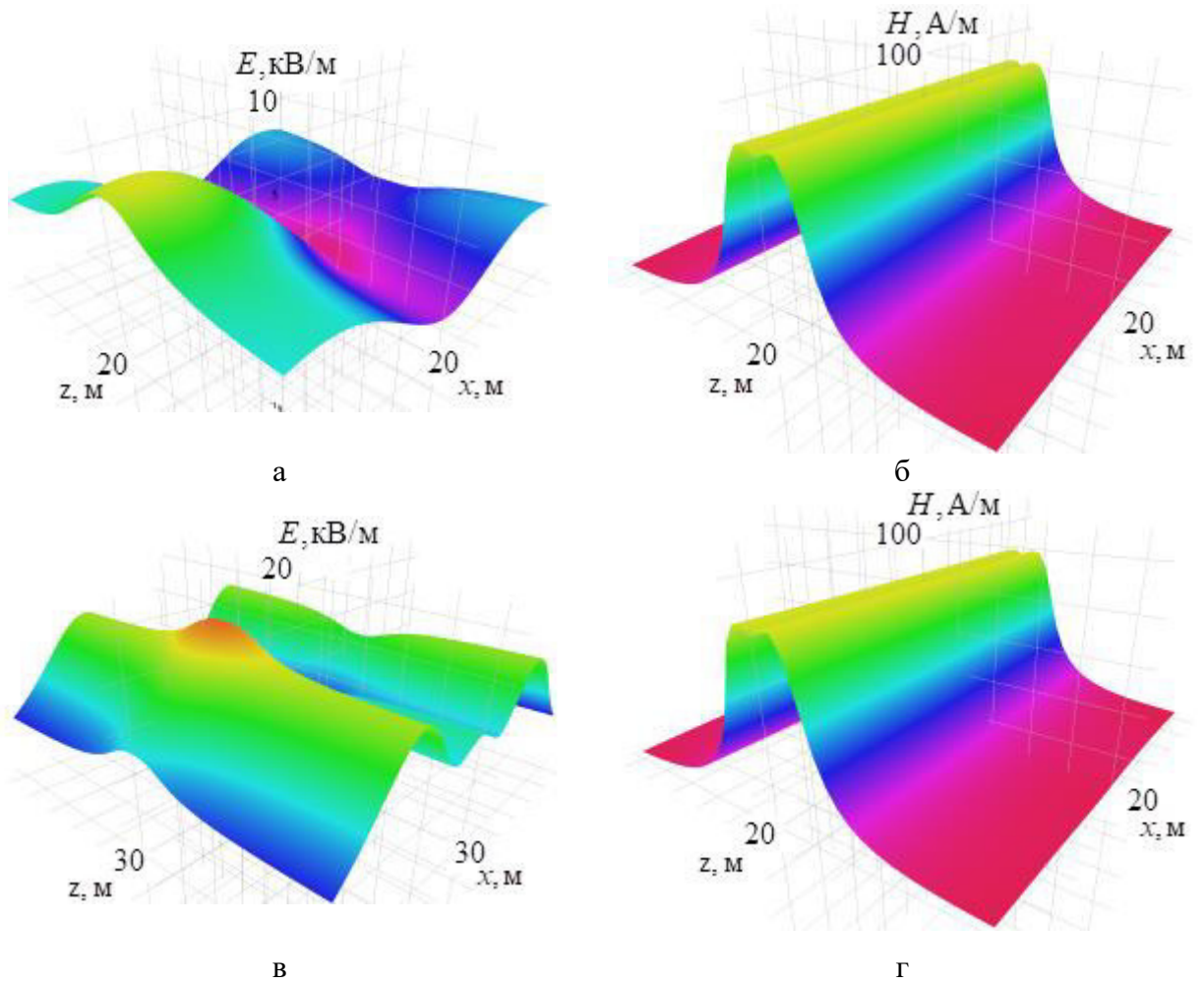


а

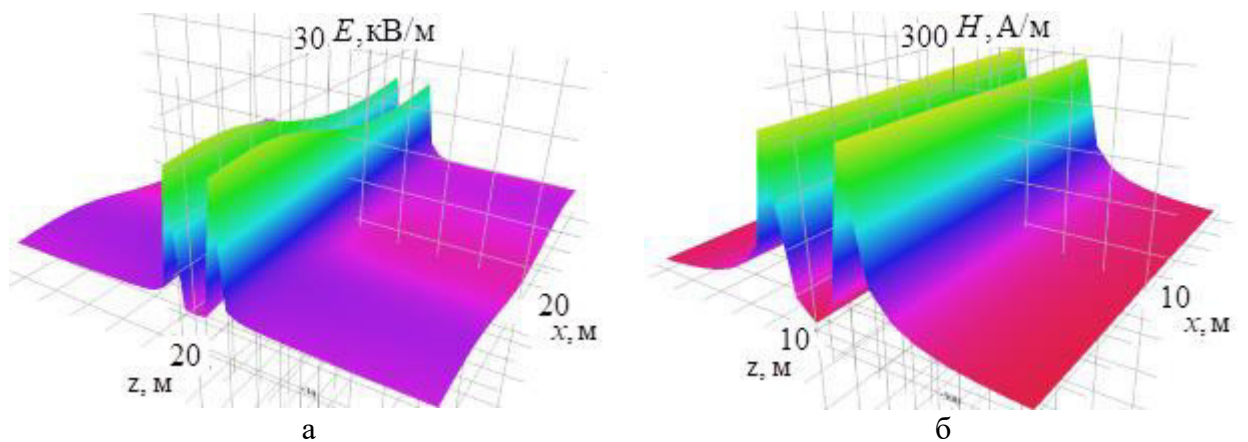


б

**Рисунок 3.11.** Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП на высоте 1,8 метра: а, б – ЛЭП 220 кВ



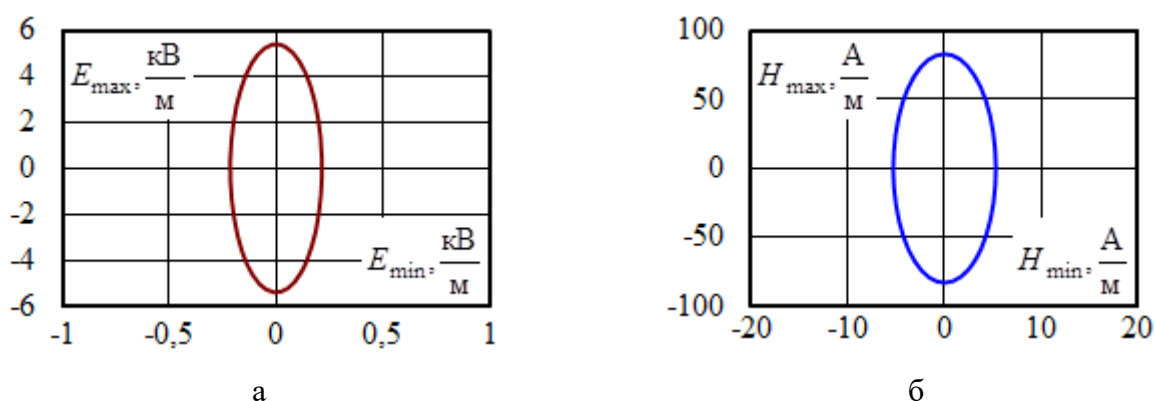
**Рисунок 3.12.** Амплитудные значения напряженностей электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП на высоте 1,8 метра: а, б – ЛЭП 500 кВ; в, г – ЛЭП 750 кВ



**Рисунок 3.13.** Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 500 кВ на высоте 7 м



На рисунке 3.14 приведены годографы суммарных векторов напряженностей в месте пересечения тяговой сети и ЛЭП 220 кВ. В таблице 3.6 представлены максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения, в таблице 3.7 – сравнение данных значений.



**Рисунок 3.14. Годографы суммарных векторов в точках с максимальными значениями напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей для пересечения ТС 25 кВ и ЛЭП 220 кВ: а – точка  $x = 0$  м,  $z = -8$  м; б – точка  $x = -1$  м,  $z = -2$  м**

Таблица 3.6

**Максимальные амплитудные значения напряженности электромагнитного поля на высоте 1.8 метра**

Параметр	ТС 25	ЛЭП 220	ЛЭП 500	ЛЭП 750	Пересечение ТС с ЛЭП		
					220	500	750
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
$E_{\max}$ , кВ/м	3,39	2,28	4,92	15,27	5,4	8,3	18,65
$H_{\max}$ , А/м	82,6	7,19	5,8	4,84	82,9	82,7	82,8

Таблица 3.7

**Сравнение значений напряженности электромагнитного поля**

Параметр	Различие между столбцами таблицы 3.6, %					
	2 и 6	2 и 7	2 и 8	3 и 6	4 и 7	5 и 8
$E_{\max}$ , кВ/м	59,3	145	450	137	68,7	22,1
$H_{\max}$ , А/м	0,4	0,1	0,2	1053	1326	1611

Для пересечения двухпутного участка тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 220 кВ дополнительно рассматривалась задача определения временных зависимостей напряженностей в окрестности пересечения. Для этого по участку тяговой сети 20 км осуществлялся пропуск одного поезда массой 3000 т, токовый профиль поезда приведен на рисунке 3.15.

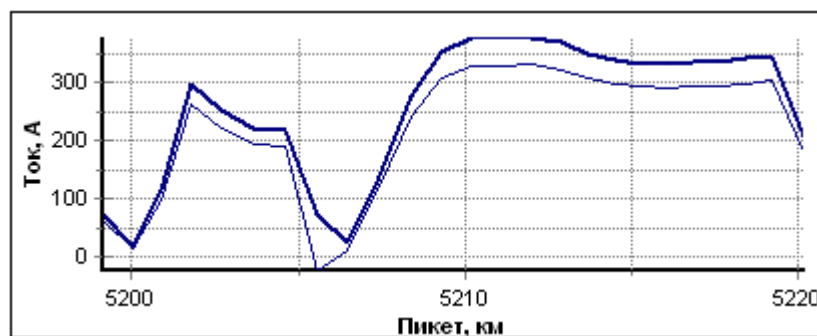


Рисунок 3.15. Токовый профиль поезда массой 3000 т

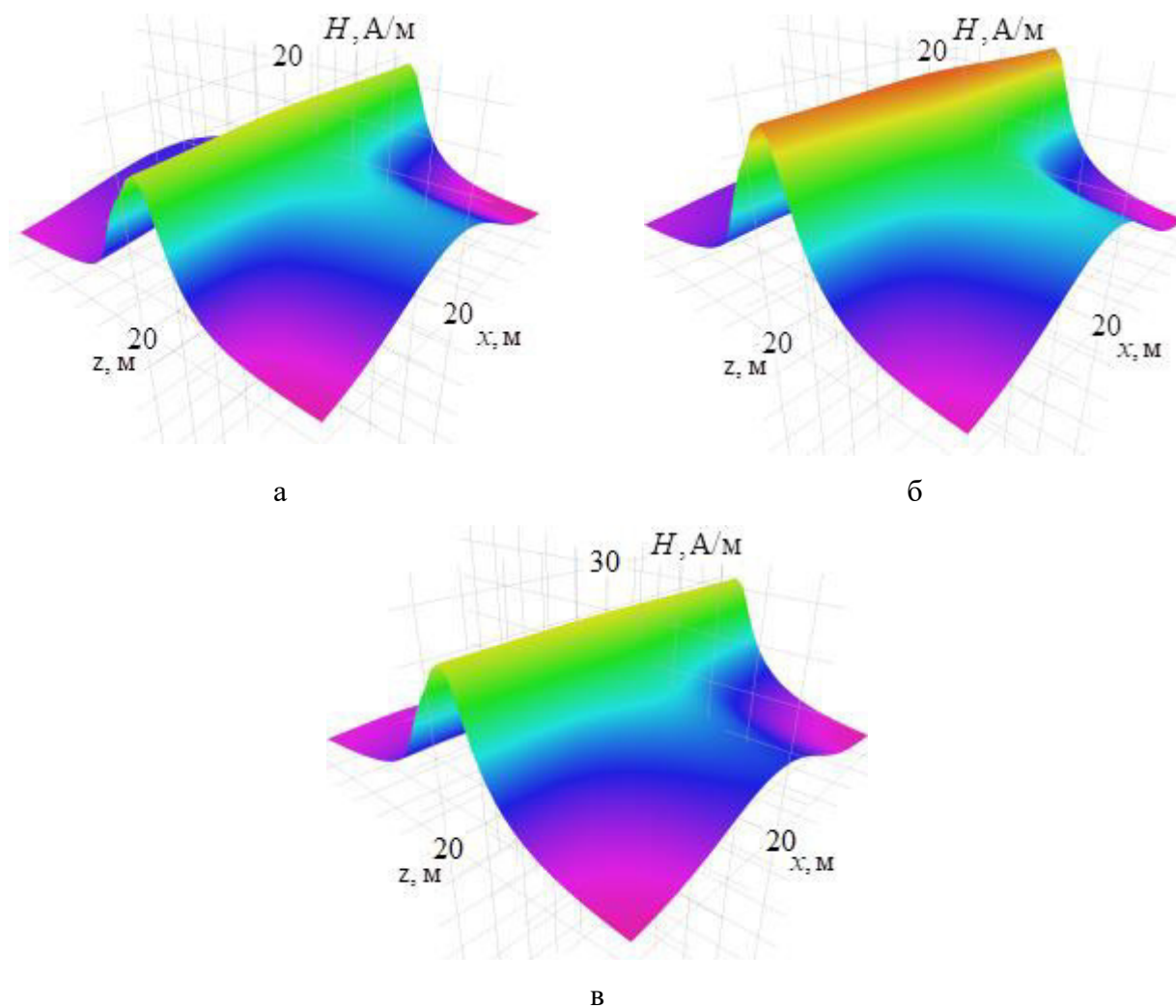
Расчет производился для пересечения с ЛЭП на третьем километре участка тяговой сети, результаты расчета режима на 5, 10 и 15 минутах моделирования движения поезда сведены в таблицу 3.8, напряжения и токи ЛЭП 220 соответствуют таблице 3.5.

Таблица 3.8

**Напряжения и токи первого пути на 5, 10 и 15 минутах движения поезда**

Время движения	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
5 минута	26,9	-1,9	204,7	-31,4
10 минута	26,6	-2,5	265,1	-32,6
15 минута	26,2	-3,4	370,5	-34,7

Напряженность электрического поля от времени изменяется незначительно ввиду малых изменений напряжений ТС в месте рассматриваемого пересечения. Результаты расчета напряженности магнитного поля для 5, 10 и 15 минут моделирования приведены на рисунке 3.16, максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей для данных моментов времени сведены в таблицу 3.9



**Рисунок 3.16. Напряженность магнитного поля: а – 5 минута;  
б – 10 минута; в – 15 минута**

Таблица 3.9

**Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и ЛЭП 220**

Параметр	Время моделирования, мин		
	5	10	15
$E_{\max}$ , кВ/м	5,56	5,53	5,48
$H_{\max}$ , А/м	16,4	18,9	24,8

Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

1. При раздельном моделировании напряженности электрического поля на нормируемой высоте 1,8 м для тяговой сети и ЛЭП 220 и 500 кВ не превышают допустимые для электротехнического персонала нормы в 5 кВ/м.

2. Напряженность магнитного поля тяговой сети 25 кВ также не превышает допустимую величину в 80 А/м, однако амплитудное значение напряженности достигает 83 А/м. ЛЭП отличается сравнительно малыми уровнями напряженности магнитных полей.

3. Пересечение ЛЭП 220, 500 и 750 кВ с тяговой сетью 25 кВ приводит к увеличению напряженности электрического поля на 137, 69 и 22%, для случаев пересечения с ЛЭП 500 и 750 кВ превышаются допустимые значения для электротехнического персонала. Аналогичный параметр магнитного поля определяется тяговой сетью и изменяется под действием ЛЭП незначительно.

4. Электрические и магнитные поля на высоте 1,8 м в рассмотренных местах пересечений ТС и ЛЭП имеют эллиптическую поляризацию.

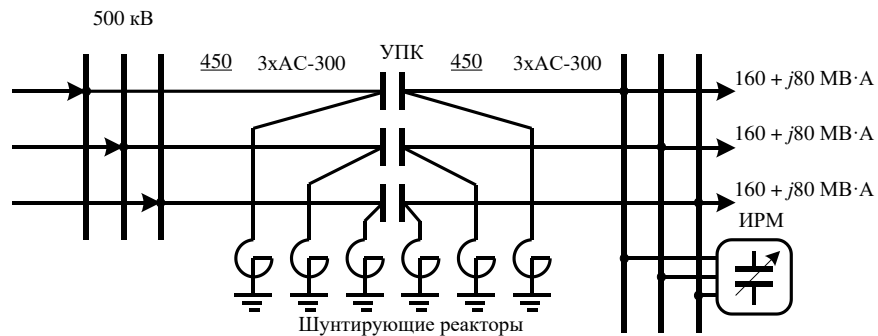
5. При работе с лейтером в месте пересечения ТС 25 кВ и ЛЭП 500 кВ на персонал воздействуют повышенные уровни напряженности электрического и магнитного полей, наибольшие значения напряженностей наблюдаются на высоте 7 м составляют 28,1 кВ/м и 351 А/м для электрического и магнитного поля, соответственно.

6. В местах пересечения тяговой сети и линий электропередачи напряженности электромагнитных полей могут заметно изменяться в результате переменных во времени и пространстве нагрузок. Так, для рассматриваемого случая значение напряженности магнитного поля на интервале 10 минут увеличилось в 1,5 раза, что подтверждает необходимость оценки электромагнитных полей вблизи мест пересечений.

### **3.3 Тяговая сеть с ЛЗФ и линия дальней электропередачи**

Питание нетяговых потребителей электрифицированных железных дорог обычно осуществляется от линий, расположенных на опорах контактной сети с полевой стороны или на отдельно стоящих опорах вблизи пути. Наличие таких линий в местах пересечения тяговой сети и ЛЭП приводит к усложнению структуры поля. Ниже рассмотрена задача моделирования ЭМП в месте

пересечения сложной ТС 25 кВ с линией с заземленной фазой [118] и дальней электропередачи 500 кВ [49]. Схема ЛЭП 500, протяженностью 900 км, показана на рисунке 3.17.



**Рисунок 3.17. Схема ЛЭП 500 кВ с установкой продольной компенсации, реакторами и источником реактивной мощности**

В состав электропередачи входили дополнительные элементы: установка продольной компенсации [119 – 121], шунтирующие реакторы и управляемый источник реактивной мощности (FACTS), поддерживающий требуемые уровни напряжений на приемном конце ЛЭП. Нагрузка ЛЭП 500 кВ составляла  $160 + j80$  МВ·А на каждую фазу. При моделировании дальней ЛЭП учитывалась распределенность ее параметров путем формирования цепочечной схемы замещения [61]. Пространственные координаты проводов ЛЭП 500 приведены на диаграмме, показанной на рисунке 3.18.



**Рисунок 3.18. Координаты токоведущих частей и фрагмент визуального отображения расчетной модели ЛЭП 500: а – координаты расположения проводов ЛЭП 500 кВ;**

Тяговая сеть двухпутного участка включала провода ПБСМ-95+МФ-100 и рельсы Р65. Кроме того, предполагалось, что на опорах контактной сети смонтирована линия с заземленной фазой 25 кВ [118], выполненная проводами АС-70. Координаты расположения токоведущих частей приведены на рисунке 3.19а. Нагрузка ЛЗФ 27,5 кВ составляла  $1,5 + j1$  МВ·А на фазу. Также, в модели ТС учитывалась ЛЭП 220 кВ, проложенная параллельно трассе ЖД на расстоянии 40 м от оси дороги. На ее приемном конце была подключена суммарная нагрузка  $25 + j16$  МВ·А (рис. 3.19б). По контактной подвеске каждого пути осуществлялся транзит мощности  $5 + j5$  МВ·А. Моделирование ЛЭП 220 кВ осуществлялось для двух режимов работы: нормальный режим и обрыв фазы А.

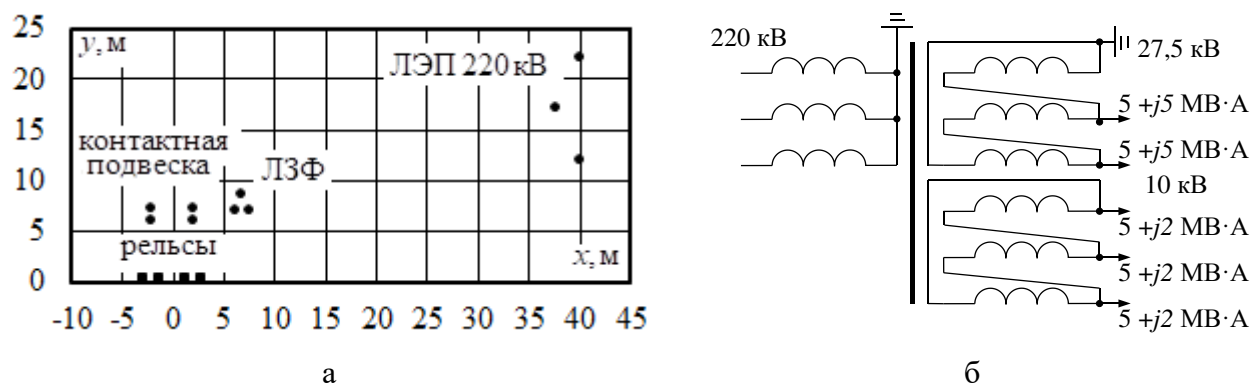


Рисунок 3.19. Расположение токоведущих частей в пространстве (а) и нагрузки на приемном конце ЛЭП 220 кВ (б)

Результаты расчетов напряжений и токов ЛЭП 500 кВ приведены в таблице 3.10. Распределение составляющих напряженности в сечении ЛЭП показано на рисунке 3.20.

Таблица 3.10

Напряжения и токи ЛЭП 500 кВ

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	290	0	646,2	23
В	290	-120	648,1	-96,9
С	290	120	642,1	143,2

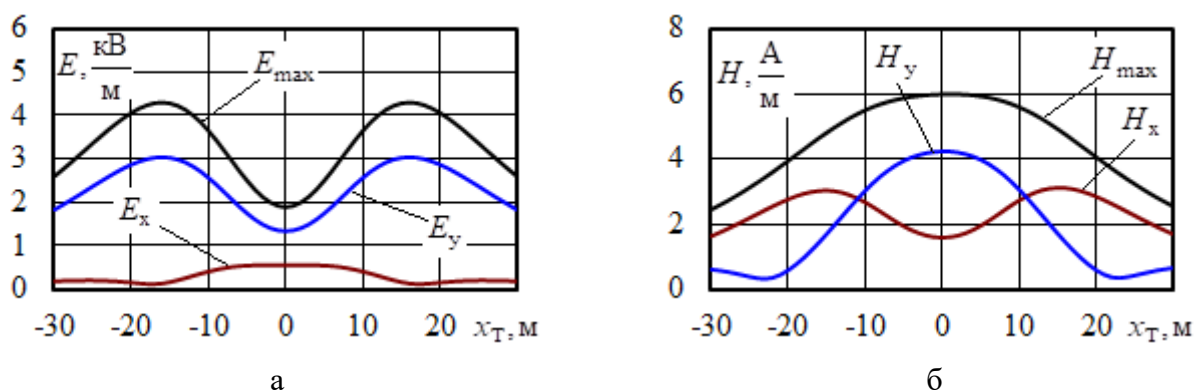


Рисунок 3.20 Напряженности электрического(а) и магнитного(б) полей ЛЭП 500 кВ на высоте 1,8 м

Результаты расчета нормального режима работы сложной системы, включающей в себя тяговую сеть, линию с заземленной фазой и ЛЭП 220 кВ сведены в таблицу 3.11. Зависимости значений напряженностей электрического и магнитного полей в сечении системы показаны на рисунках 3.21 и 3.22.

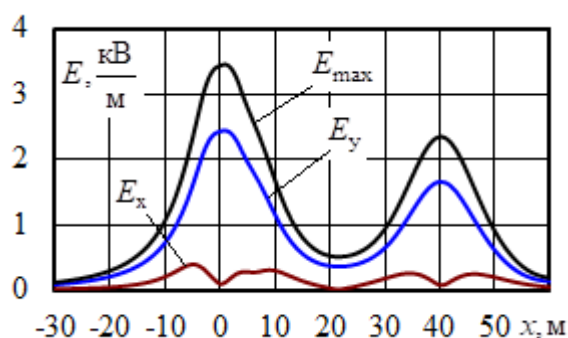


Рисунок 3.21. Напряженности электрического поля многопроводной ТС на высоте 1,8 м при нормальном режиме работы

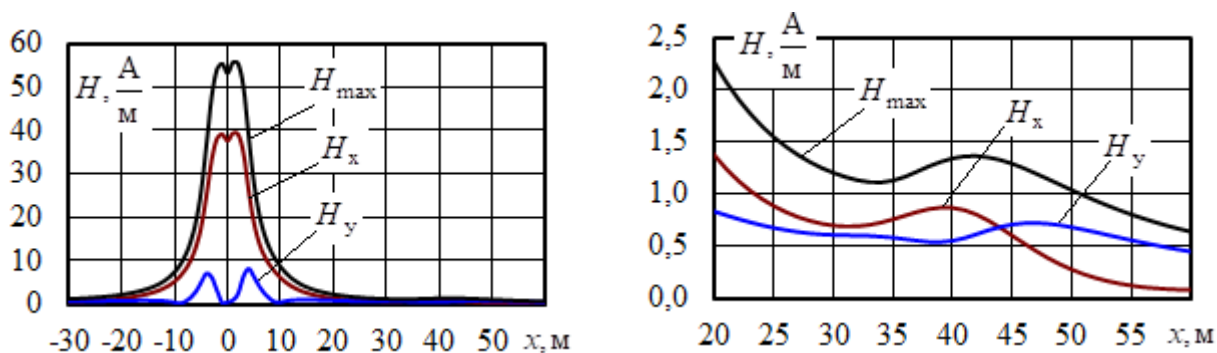


Рисунок 3.22. Напряженности магнитного поля многопроводной ТС на высоте 1,8 м при нормальном режиме работы

Таблица 3.11

**Напряжения и токи в нормальном режиме работы**

СТЭ 25 кВ				
Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	24,9	-64,9	303,8	-111,4
2	24,9	-64,9	303,7	-111,4
ЛЗФ 27,5 кВ				
Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	25,8	0	131,7	-9,7
В	24,9	-64,9	131,3	-129,1
С	0	-	132,9	110,6
ЛЭП 220 кВ				
Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	133	0	92,6	-46,7
В	133	-120	55,5	-160,4
С	133	120	91,1	95,1

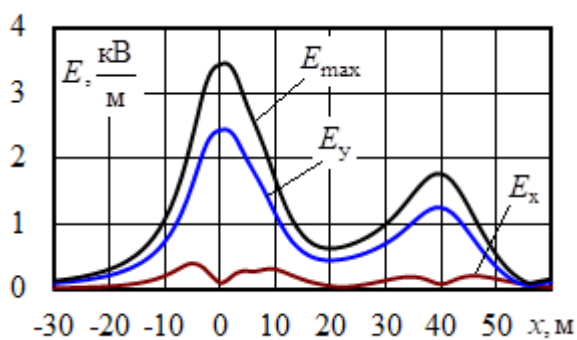
Обрыв фазы А ЛЭП 220 кВ приведет к изменению параметров режима работы линии, результаты расчета режима показаны в таблице 3.12. Распределение амплитудных значений и составляющих напряженностей электрического и магнитного полей в сечении системы при обрыве фазы показаны на рисунке 3.23

Таблица 3.12

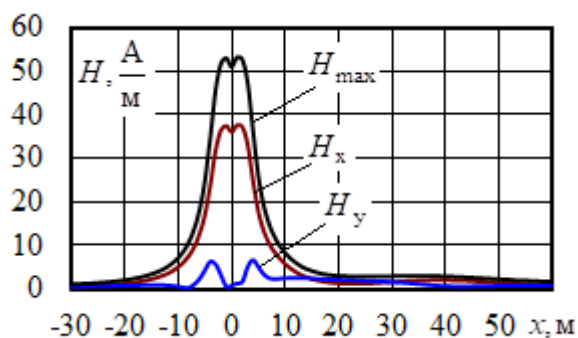
**Напряжения и токи ЛЭП 220 кВ при обрыве фазы**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	100,3	-13,4	0	-
В	133	-120	114,5	164,5
С	133	120	172,9	99,1

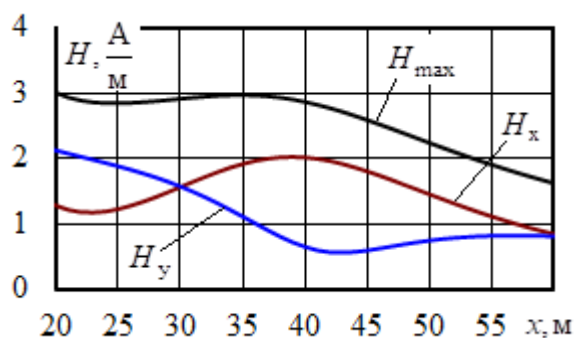




а



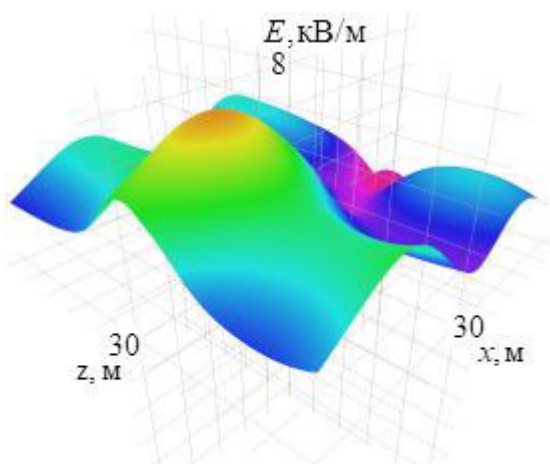
б



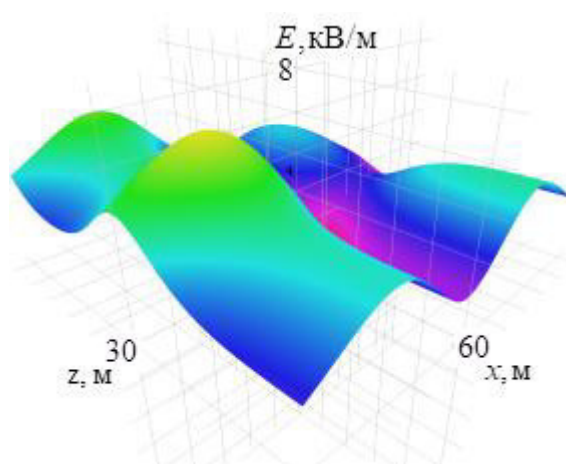
в

**Рисунок 3.23. Напряженности электрического(а) и магнитного (б, в) полей многопроводной ТС на высоте 1,8 м при обрыве фазы А ЛЭП 220 кВ**

Объемные диаграммы напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения тяговой сети и ЛЭП показаны на рисунках 3.24 – 3.27.

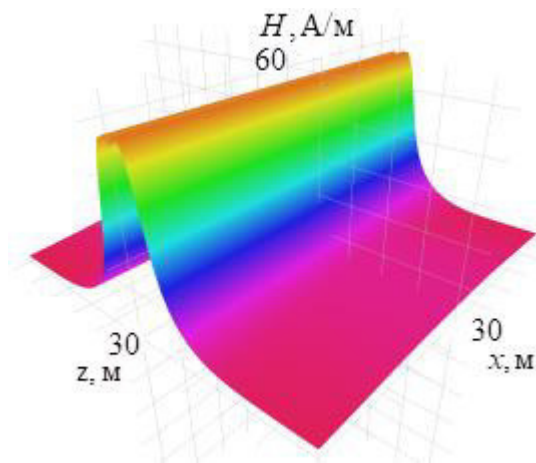


а

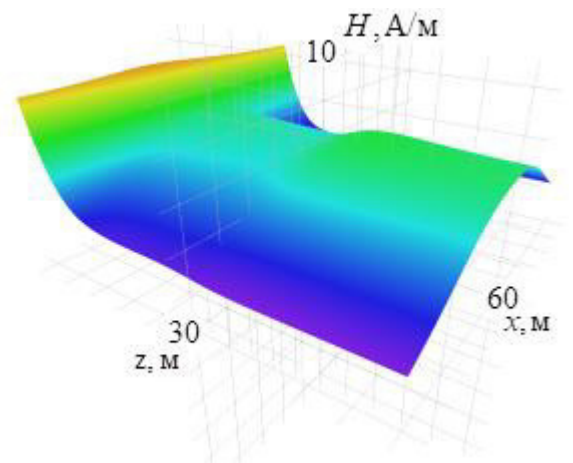


б

**Рисунок 3.24. Результирующие диаграммы напряженностей электрического поля при нормальном режиме ЛЭП 220 кВ: а – вблизи СТЭ 25 кВ; б – вблизи ЛЭП 220 кВ**

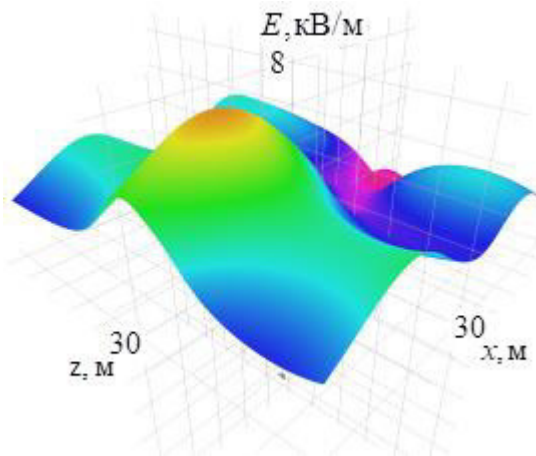


а

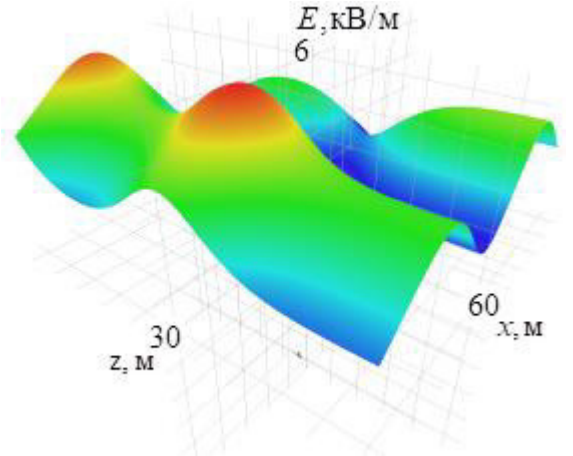


б

**Рисунок 3.25. Результирующие диаграммы напряженностей магнитного поля при нормальном режиме ЛЭП 220 кВ: а – вблизи СТЭ 25 кВ; б – вблизи ЛЭП 220 кВ**

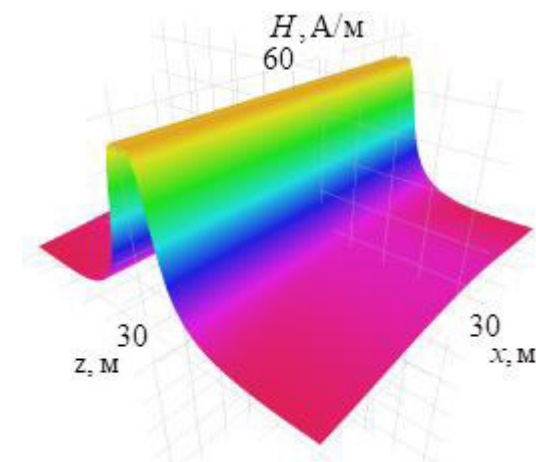


а

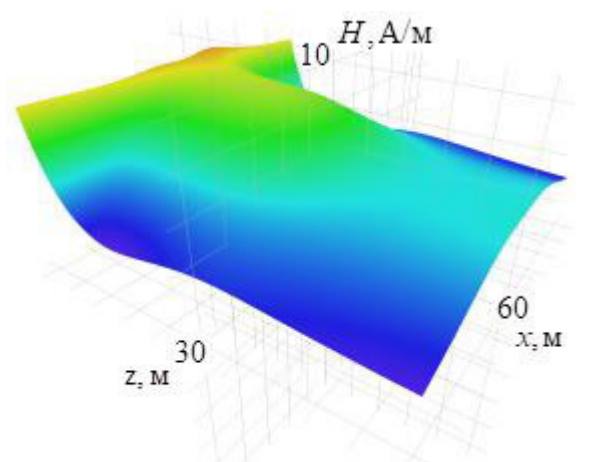


б

**Рисунок 3.26. Результирующие диаграммы напряженностей электрического поля при обрыве фазы А ЛЭП 220 кВ: а – вблизи СТЭ 25 кВ; б – вблизи ЛЭП 220 кВ**



а



б

**Рисунок 3.27. Результирующие диаграммы напряженностей магнитного поля при обрыве фазы А ЛЭП 220 кВ: а – вблизи СТЭ 25 кВ; б – вблизи ЛЭП 220 кВ**

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы

1. Наличие большого числа токоведущих частей приводит к существенному усложнению картины распределения ЭМП в пространстве. Наглядное представление такой картины в виде объемных диаграмм позволит принимать обоснованные решения по защите электронного оборудования (в частности устройств железнодорожных автоматики и телемеханики) от негативного воздействия ЭМП.

2. При нормальном режиме работы максимумы напряженности электрического поля для рассмотренного пересечения превышают допустимые значения для электротехнического персонала. Напряженности магнитного поля находятся в допустимых пределах. При обрыве фазного провода ЛЭП 220 кВ наблюдается увеличение напряженностей магнитного поля для точек наблюдения, расположенных на оси, перпендикулярной трассе дороги.

### 3.4 Тяговая сеть и многоцепные ЛЭП

Электросетевое строительство требует выделения значительных площадей земельных участков. Задача сокращения землеотвода может быть решена применением многоцепных ЛЭП. Однако такое решение требует подробного анализа электромагнитных полей ввиду взаимного влияния различных цепей друг на друга и усложнения структуры поля.

Далее рассмотрена задача определения электромагнитных полей при пересечении тяговых сетей 25 кВ и 2×25 кВ с трехцепной ЛЭП 110 – 220 кВ [53, 69, 80, 81] и шестицепной ЛЭП 110-220-500 кВ. Пространственное расположение токоведущих частей показано на рисунках 3.28, 3.29. Предполагалось, что на опорах трехцепной ЛЭП смонтированы провода АС-300. Схема транспозиции проводов трехцепной ЛЭП показана на рисунке 3.30. Протяженность транспонированной ЛЭП, разбитой на три участка, принята равной 100 км. Нагрузки на приемном конце цепей 220 кВ равнялись  $20 + j10$  МВ·А, цепи 110 кВ -  $6 + j3$  МВ·А на фазу.



Рисунок 3.28. Расположение проводов: а – ТС 25 кВ; б – ТС 2x25 кВ; в – трехцепная ЛЭП

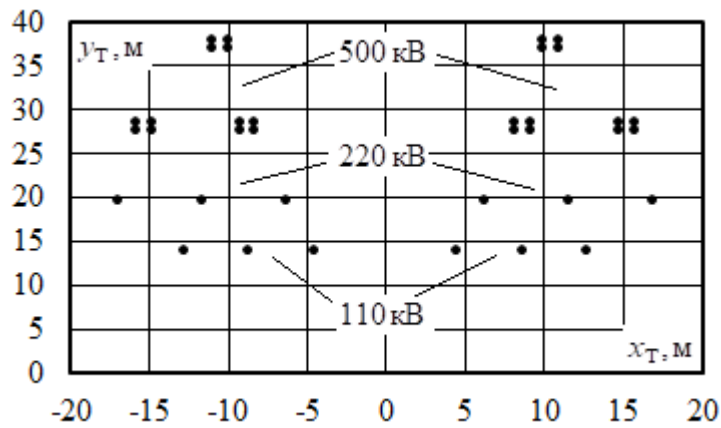


Рисунок 3.29. Расположение проводов шестицепной ЛЭП

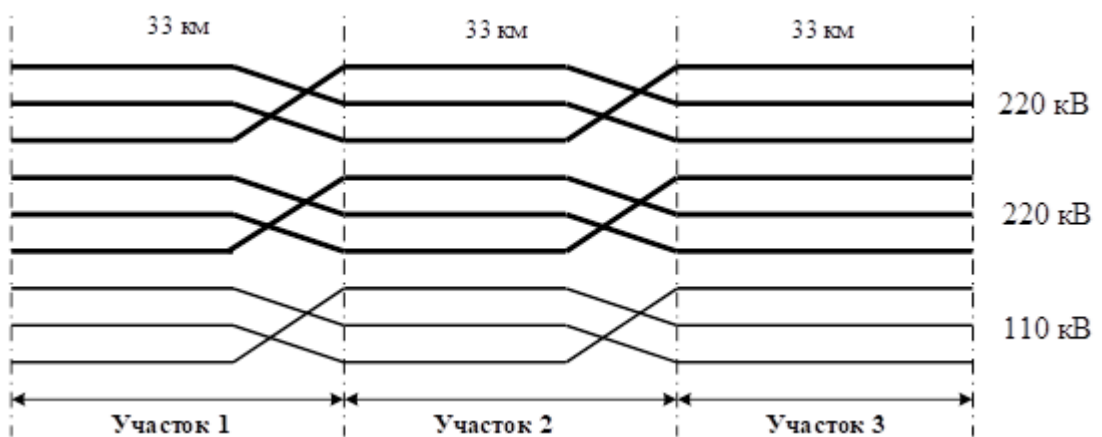


Рисунок 3.30. Схема транспозиции трехцепной ЛЭП

На опорах шестицепной ЛЭП смонтированы провода АС-120, АС-185 и АС-240, соответственно, для цепей 110 кВ, 220 кВ и 500 кВ. Длина участка

шестицепной принята равной 30 км. Нагрузки на приемном конце цепей 110 кВ –  $28 + j14$  МВ·А, 220 кВ –  $75 + j37$  МВ·А, 500 кВ –  $760 + j380$  МВ·А на фазу. По контактными подвескам каждого пути тяговой сети протяженностью в 2 км происходил транзит мощности  $8 + j8$  МВ·А. Расчет производился для пересечения тяговой сети с первыми участками ЛЭП.

Результаты расчета режима применительно к тяговым сетям и первому участку ЛЭП приведены в таблицах 3.13 – 3.16.

Таблица 3.13

**Результаты расчета режима шестицепной ЛЭП**

ЛЭП	Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
Левая 110 кВ	А	110	0	290	-28,1
	В	110	-120	284,7	-144,7
	С	110	120	298,6	93,2
Правая 110 кВ	А	110	0	287	-27,6
	В	110	-120	288	-144,4
	С	110	120	298,7	92,5
Левая 220 кВ	А	220	0	382,1	-26,6
	В	220	-120	373,9	-143,4
	С	220	120	385	94,6
Правая 220 кВ	А	220	0	378,3	-25,8
	В	220	-120	375,8	-143,3
	С	220	120	387,1	93,6
Левая 500 кВ	А	500	0	1684,5	-25,2
	В	500	-120	1687,8	-145,4
	С	500	120	1681,6	95,3
Правая 500 кВ	А	500	0	1676,2	-24,7
	В	500	-120	1689,9	-145,4
	С	500	120	1686,5	94,8

Таблица 3.14

**Результаты расчета режима участка 1 трехцепной ЛЭП**

ЛЭП	Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
Левая 220 кВ	А	133	0	160,6	-18,4
	В	133	-120	160,5	-138,3
	С	133	120	160,5	101,7
Правая 220 кВ	А	133	0	160,9	-18,6
	В	133	-120	160,9	-138,5
	С	133	120	160,9	101,5
110 кВ	А	65	0	100,7	-21,1
	В	65	-120	100,6	-141
	С	65	120	100,6	99,2

Таблица 3.15

**Напряжения и токи тяговой сети 2×25 кВ**

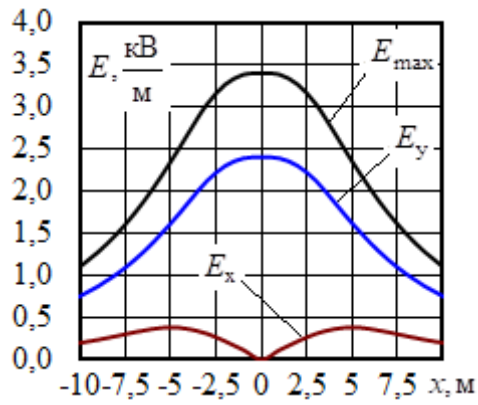
Путь	Место измерения	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	Контактная подвеска	25,8	26,2	246,2	-21,2
2		25,8	26,2	246,2	-21,2
1	Питающий провод	26,5	-153,3	198,7	164,2
2		26,5	-153,3	198,7	164,2

Таблица 3.16

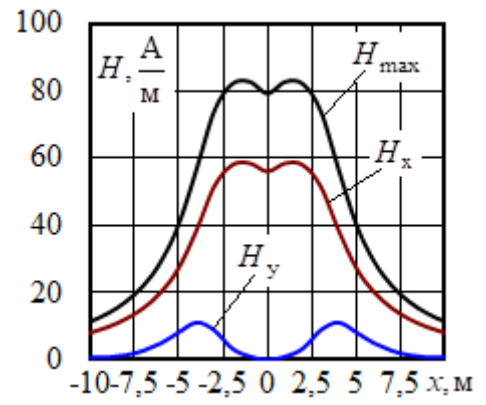
**Напряжения и токи тяговой сети 25 кВ**

Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	25,6	-5,6	450	-51
2	25,6	-5,6	450	-51

Рассчитанные напряженности электрического и магнитного полей в собственных координатах тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 метра представлены на рисунках 3.31 – 3.34.

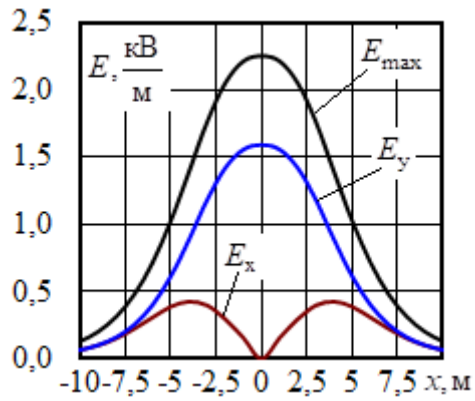


а

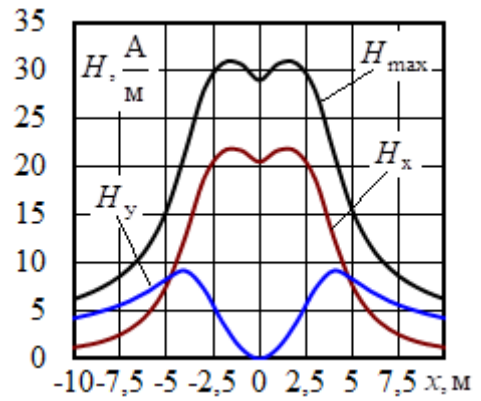


б

Рисунок 3.31. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей тяговой сети 25 кВ на высоте 1,8 м

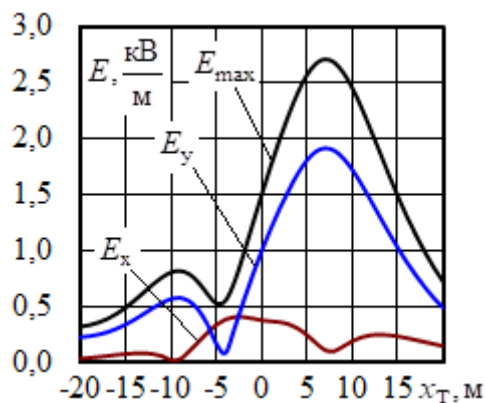


а

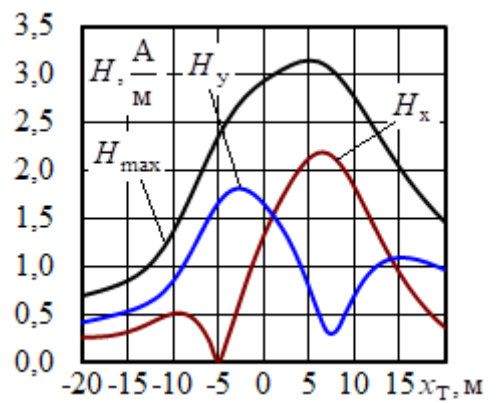


б

Рисунок 3.32. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей тяговой сети 2x25 кВ на высоте 1,8 м

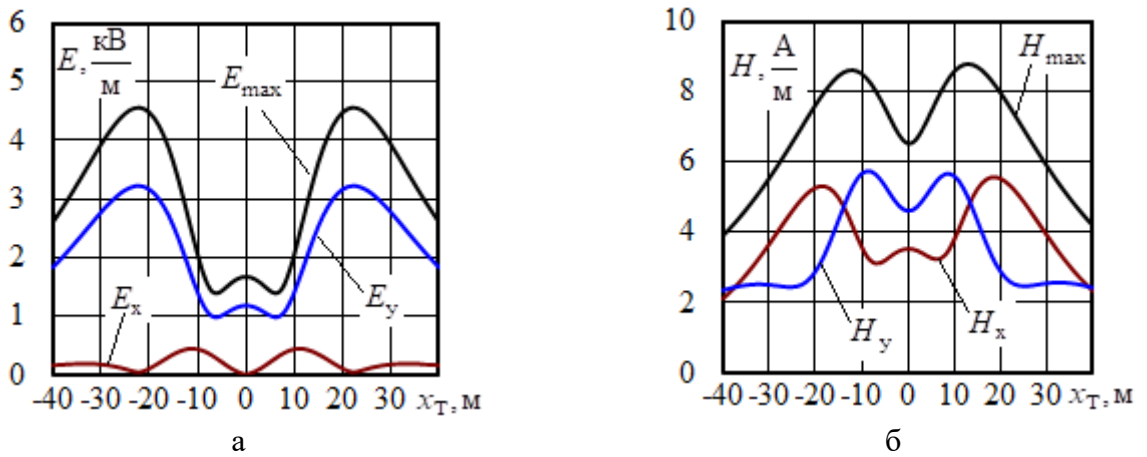


а



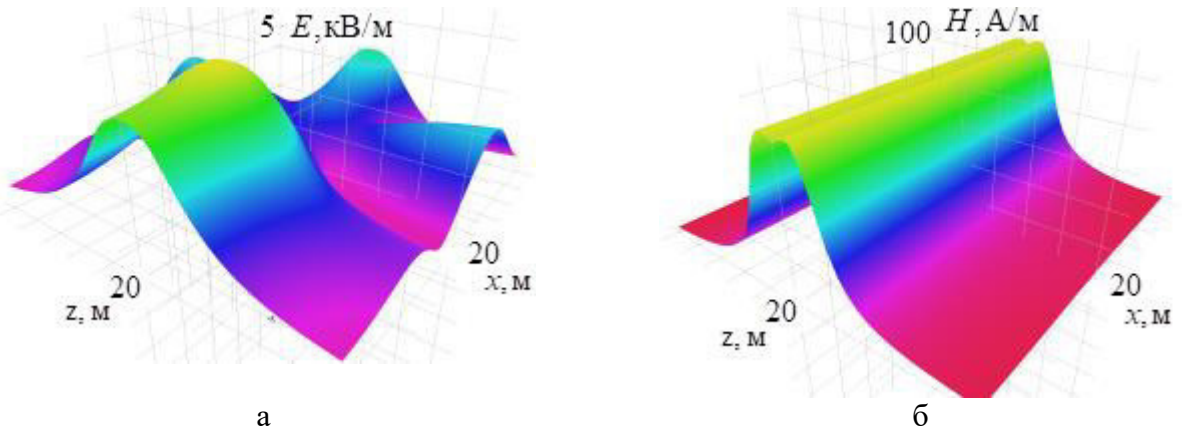
б

Рисунок 3.33. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей трехфазной ЛЭП на высоте 1,8 м

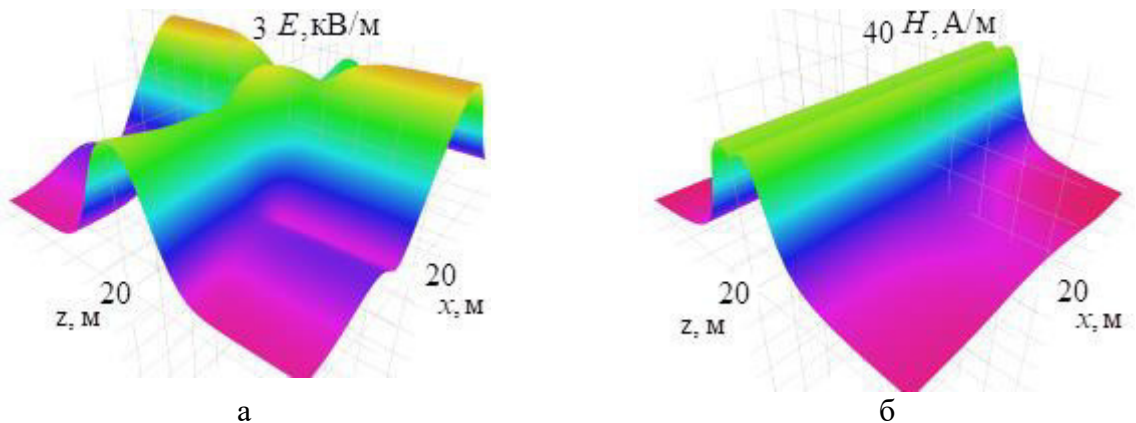


**Рисунок 3.34. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей шестицепной ЛЭП на высоте 1,8 м**

Объемные диаграммы суммарных напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 м показаны на рисунках 3.35 – 3.38.

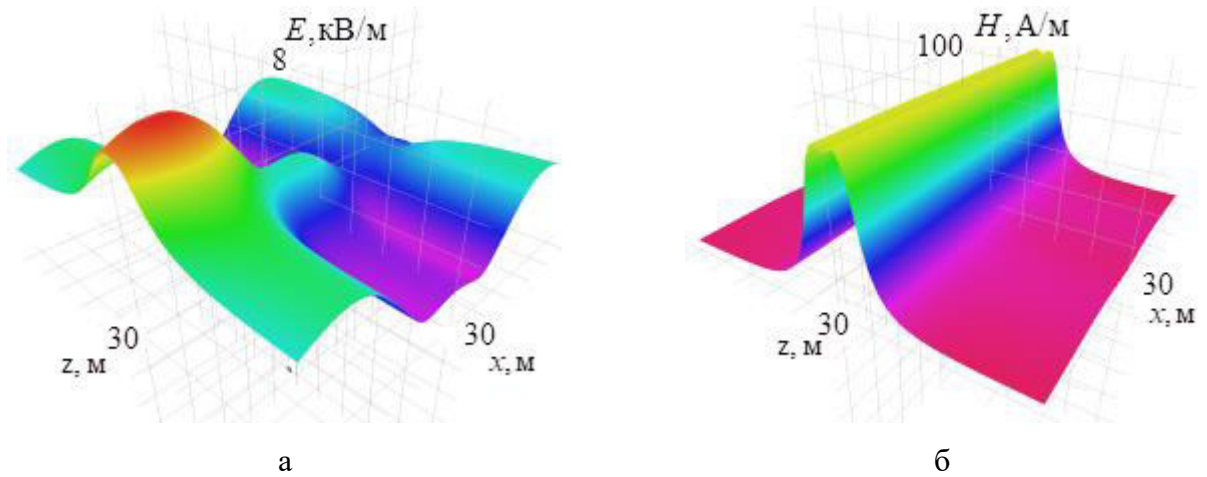


**Рисунок 3.35. Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и трехцепной ЛЭП: а – электрическое поле; б – магнитное поле**

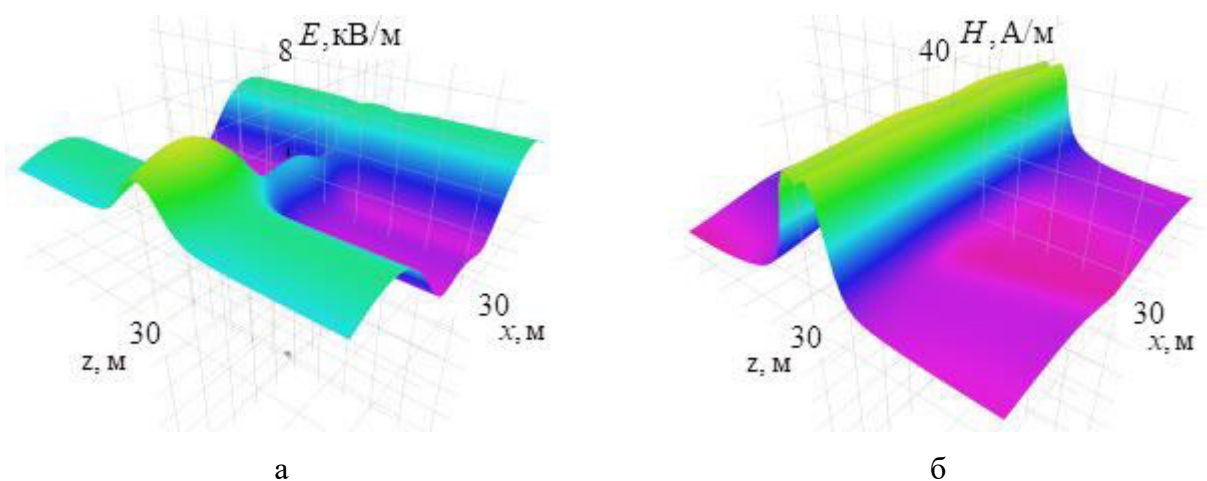


**Рисунок 3.36. Амплитудные значения напряженностей магнитного поля в месте пересечения тяговой сети 2×25 кВ и трехцепной ЛЭП: а - электрическое поле; б - магнитное поле**



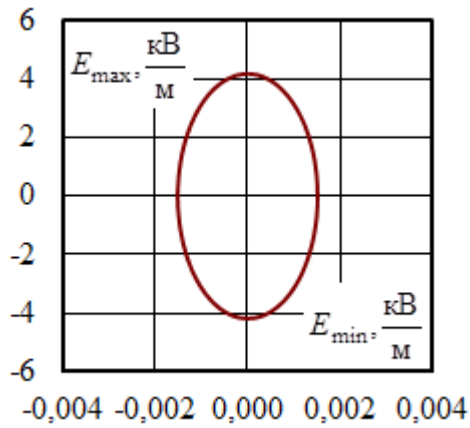


**Рисунок 3.37** Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения тяговой сети 25 кВ и шестицепной ЛЭП: а – электрическое поле; б – магнитное поле

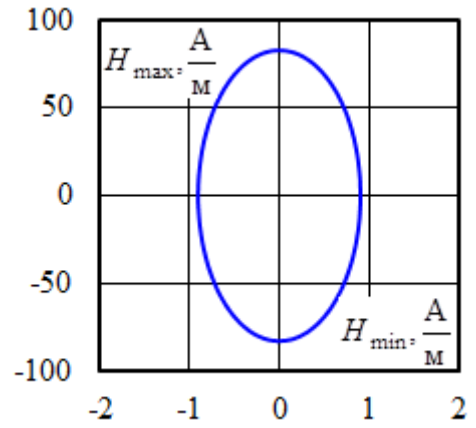


**Рисунок 3.38.** Амплитудные значения напряженностей магнитного поля в месте пересечения тяговой сети  $2 \times 25$  кВ и шестицепной ЛЭП: а - электрическое поле; б - магнитное поле

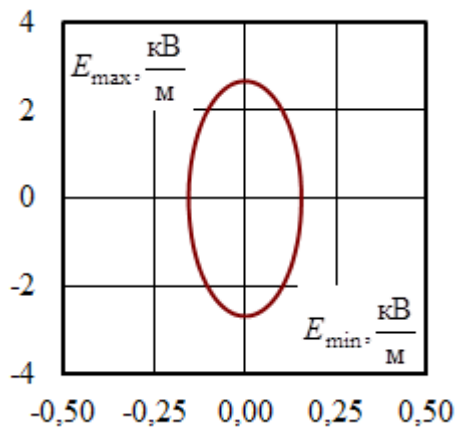
На рисунках 3.39 – 3.41 приведены годографы суммарных векторов напряженностей. В таблице 3.17 представлены максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей при раздельном моделировании, в таблице 3.18 – в местах пересечения.



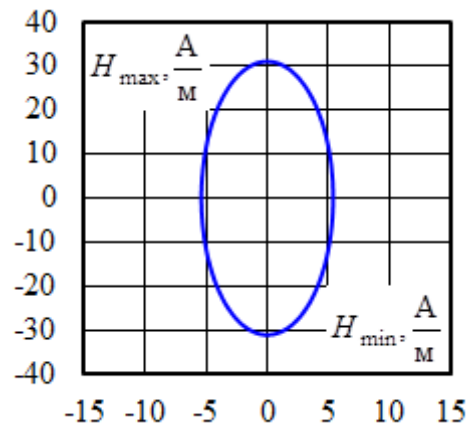
а



б

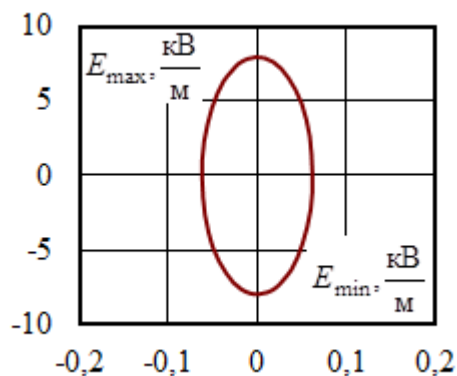


в

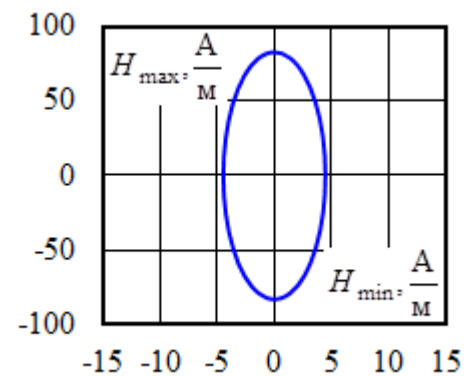


г

**Рисунок 3.39. Годографы суммарных векторов в точках с максимальными значениями напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей для пересечений ТС 25 кВ (а, б) и 2х25 кВ(в, г) с трехцепной ЛЭП: а – точка  $x = 0$  м,  $z = 9$  м; б – точка  $x = 1$  м,  $z = 0$  м; в – точка  $x = -18$  м,  $z = -7$  м; г – точка  $x = 2$  м,  $z = 3$  м**

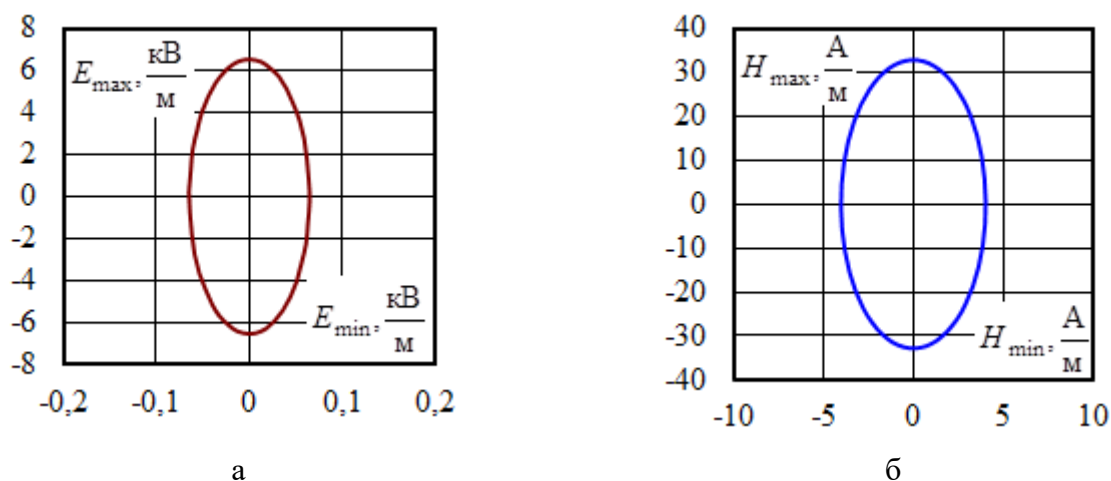


а



б

**Рисунок 3.40. Годографы суммарных векторов напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей для пересечений ТС 25 кВ с шестицепной ЛЭП: а – точка  $x = 0$  м,  $z = 22$  м; б – точка  $x = -1$  м,  $z = -14$  м;**



**Рисунок 3.41. Годографы суммарных векторов напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей для пересечений 2х25 кВ с шестицепной ЛЭП: а – точка  $x = 0$  м,  $z = 22$  м; б – точка  $x = -2$  м,  $z = -11$  м**

Таблица 3.17

**Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей**

Параметр	ТС 25 кВ	ТС 2×25 кВ	Трехцепная ЛЭП 110-220 кВ	Шестицепная ЛЭП 110-220-500 кВ	Различие, %	
					Между столбцами 2 и 3	Между столбцами 4 и 5
1	2	3	4	5	6	7
$E_{\max}$ , кВ/м	3,4	2,3	2,7	4,6	32	70
$H_{\max}$ , А/м	83	31	3,1	8,8	63	184

Таблица 3.18

**Максимальные значения напряженностей электромагнитного поля в местах пересечения**

Параметр	Пересечение ТС и трехцепной ЛЭП		Пересечение ТС и шестицепной ЛЭП		Различие, %	
	25 кВ	2×25 кВ	25 кВ	2×25 кВ	Между столбцами 2 и 4	Между столбцами 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7
$E_{\max}$ , кВ/м	4,2	2,7	7,9	6,5	88	141
$H_{\max}$ , А/м	83	31	83	32,8	0	6

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1. При раздельном моделировании напряженности электрического поля на нормируемой высоте 1,8 м, как для тяговых сетей, так и для ЛЭП не превышают допустимые для электротехнического персонала нормы в 5 кВ/м.

2. Амплитудное значение напряженности магнитного поля тяговой сети 25 кВ достигает значения в 83 А/м. Аналогичный параметр для тяговой сети 2×25 кВ снижен до 30 А/м, что связано с взаимной компенсацией магнитных полей, создаваемых контактными подвесками и питающими проводами.

3. Напряженность электрического поля в местах пересечения электрифицированных железных дорог системы тяги 25 кВ с шестицепной ЛЭП достигает 5,6 кВ/м.

4. Пересечение тяговых сетей с шестицепной ЛЭП, в сравнение с трехцепной, приводит к увеличению напряженности электрического поля при системе тяги 25 кВ на 88 %, при системе тяги 2х25 кВ – в 2,5 раза. Напряженность магнитного поля увеличивается незначительно.

### **3.5 Тяговые сети повышенного напряжения и ЛЭП 500 кВ**

Применение тяговых сетей повышенного напряжения повышает нагрузочную способность системы тягового электроснабжения, но может приводить к ухудшению электромагнитной обстановки. Кроме того, в местах пересечения линий и железной дороги происходит наложение электромагнитных полей тяговой сети и линии электропередачи, что также может привести к увеличению напряженностей и усложнению пространственной структуры поля. Электромагнитное поле тяговой сети 50 кВ ранее было рассмотрено в главе 2, в данном разделе приведены результаты моделирования для мест пересечения тяговых сетей систем тяги 50, 2×50 и 94 кВ с ЛЭП 500 кВ [88]. Схемы тяговых сетей и ЛЭП 500 кВ, а также расположение токоведущих частей приведены на рисунках 3.42 – 3.47.

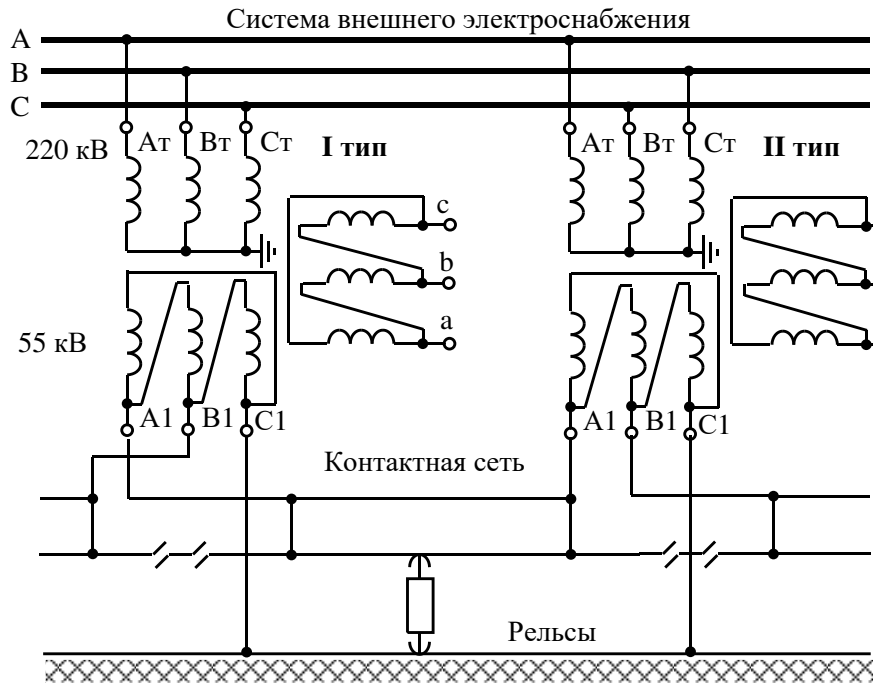


Рисунок 3.42. Фрагмент схемы СТЭ 50 кВ

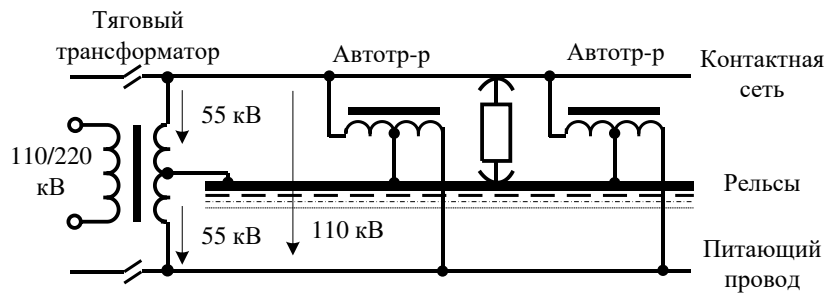


Рисунок 3.43. Фрагмент схемы СТЭ 2×50 кВ

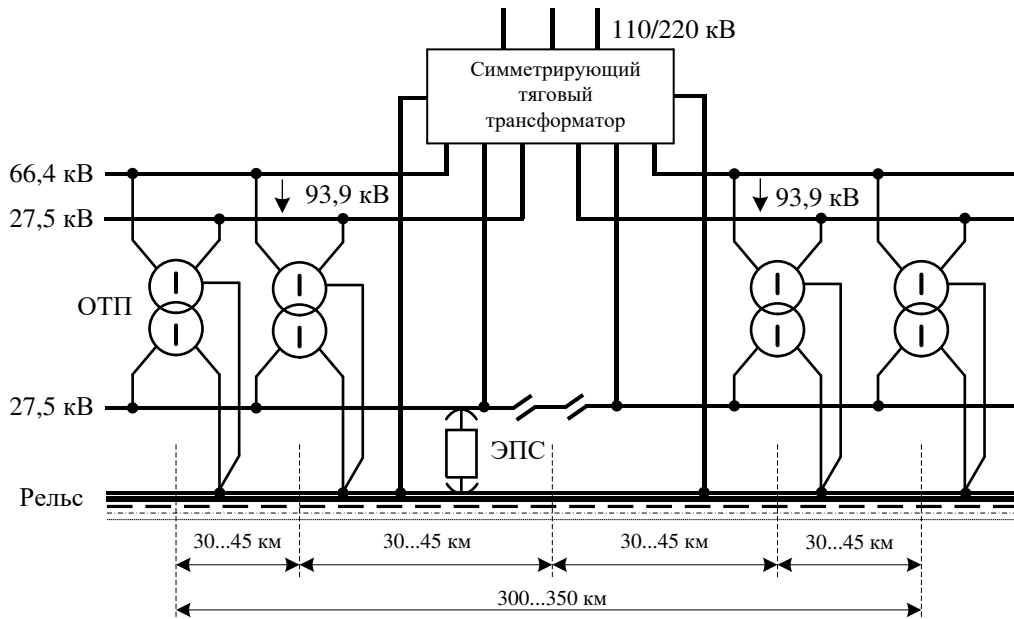


Рисунок 3.44. Фрагмент схемы СТЭ 94 кВ

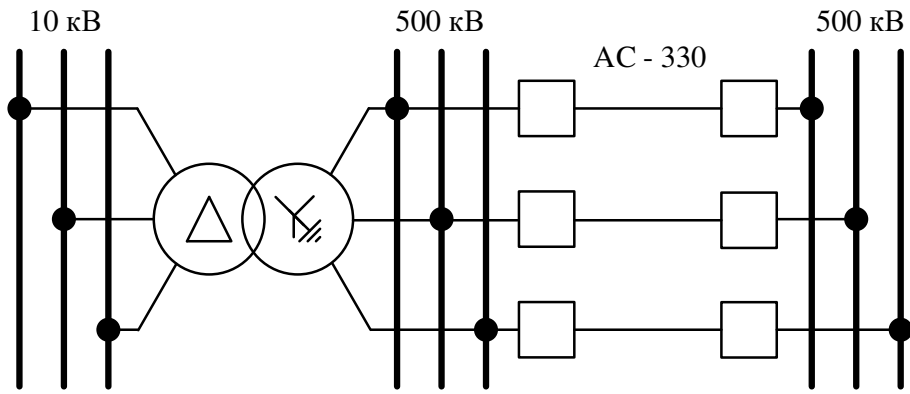
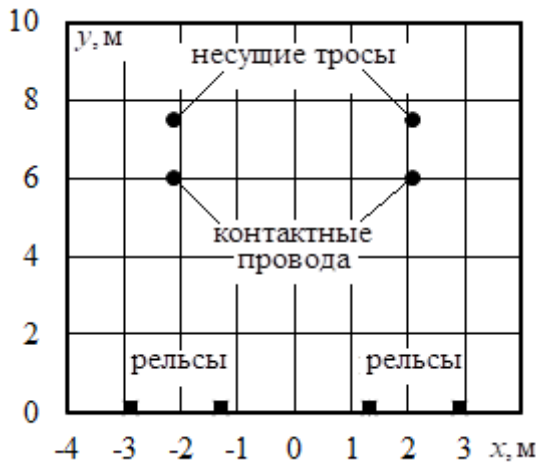


Рисунок 3.45. Схема электрической сети ЛЭП 500 кВ

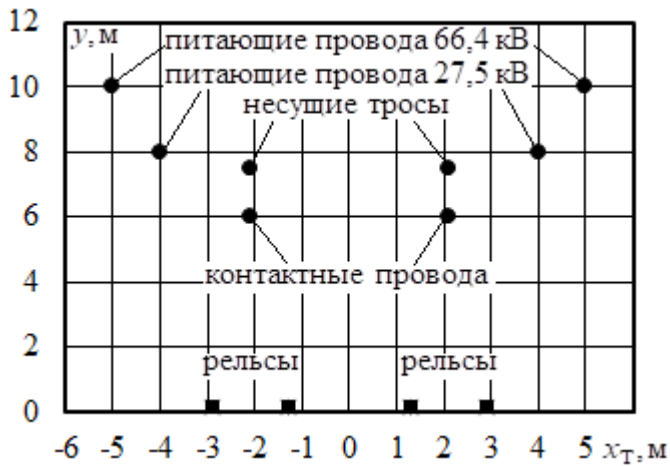


а

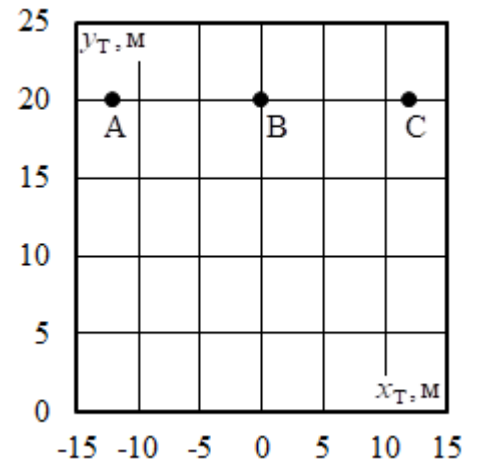


б

Рисунок 3.46. Координаты токоведущих частей: а – СТЭ 50 кВ; б – СТЭ 2×50 кВ



а



б

Рисунок 3.47. Координаты токоведущих частей: а – СТЭ 94 кВ; б – ЛЭП 500 кВ

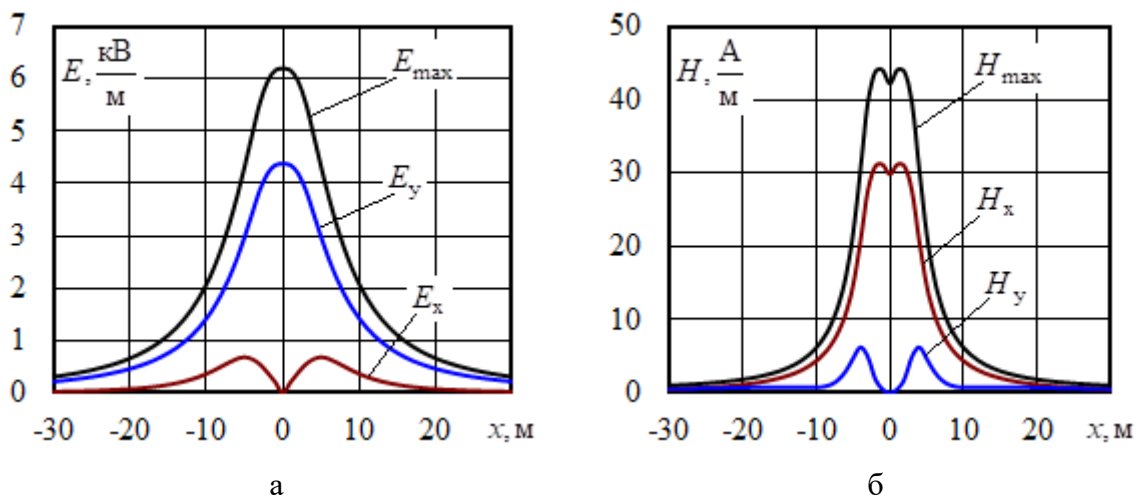
Результаты расчетов напряжений и токов для заданного режима приведены в таблицах 3.19 – 3.22. Результаты расчета напряженностей

электрического и магнитного полей в собственных координатах тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 м для различных значений горизонтальных координат представлены на рисунках 3.48 – 3.51.

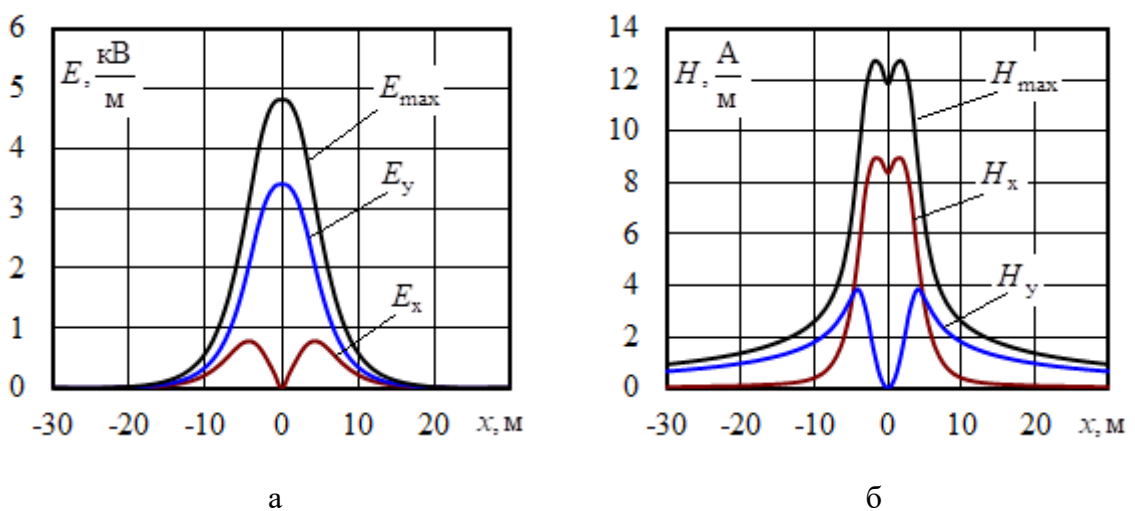
Таблица 3.19

**Напряжения и токи тяговой сети 50 кВ**

Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	46,8	-5,6	242,9	-50,7
2	46,8	-5,6	242,9	-50,7



**Рисунок 3.48. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) полей тяговой сети 50 кВ на высоте 1,8 м**



**Рисунок 3.49. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) полей тяговой сети 2×50 кВ на высоте 1,8 м**

### Напряжения и токи тяговой сети 2×50 кВ

Путь	Контактный провод				Питающий провод			
	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	52,9	26,4	113,4	-19,7	53,7	-153,2	100,6	163
2	52,9	26,4	113,4	-19,7	53,7	-153,2	100,6	163

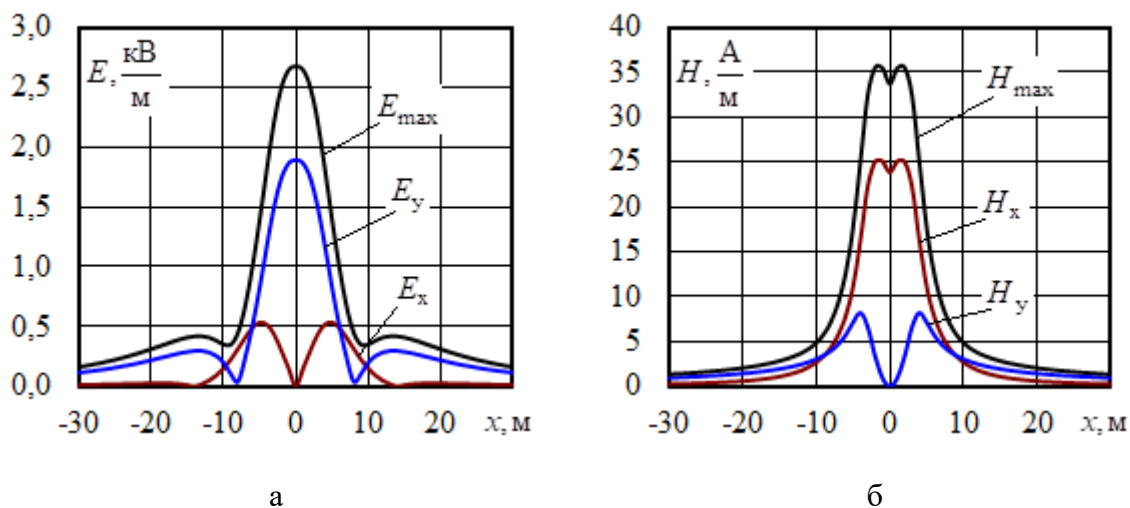


Рисунок 3.50. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) полей тяговой сети 94 кВ на высоте 1,8 м

### Напряжения и токи тяговой сети 94 кВ

Путь	Элемент	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	КП	26,4	133,2	194,3	93,5
	ПП1	26,4	133,2	47,9	50,7
	ПП2	64,3	-46,7	85,1	-89,5
2	КП	26,4	133,2	194,3	93,5
	ПП1	26,4	133,2	47,9	50,7
	ПП2	64,3	-46,7	85,1	-89,5



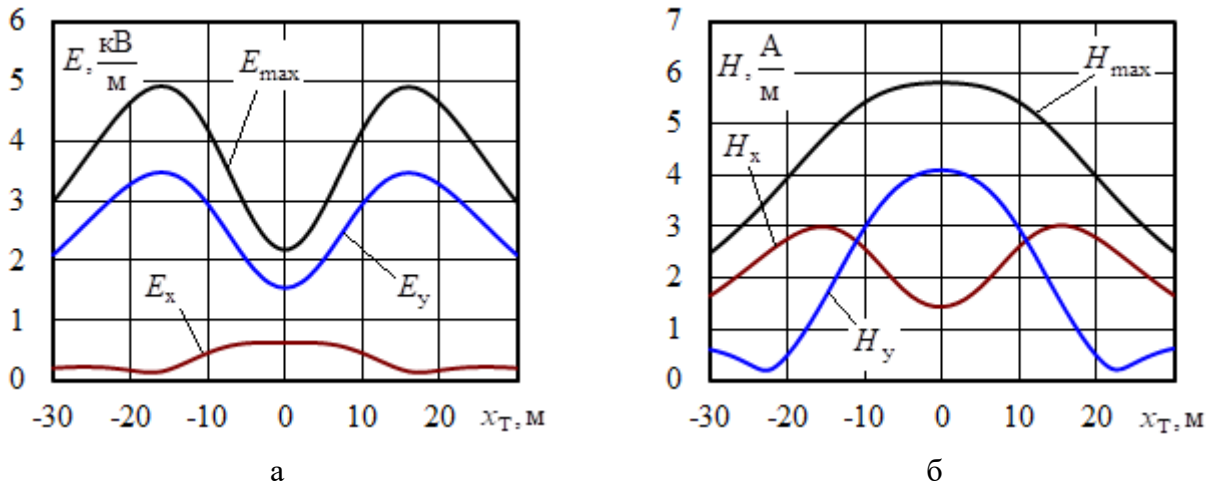


Рисунок 3.51. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП 500 кВ на высоте 1,8 м

Таблица 3.22

### Напряжения и токи ЛЭП

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	321,7	0	635,9	86,5
В	321,7	-121	682,9	-39,6
С	320,6	118	632,9	-164,8

Результаты моделирования напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения тяговых сетей и ЛЭП на высоте 1,8 м представлены на рисунках 3.52 – 3.54.

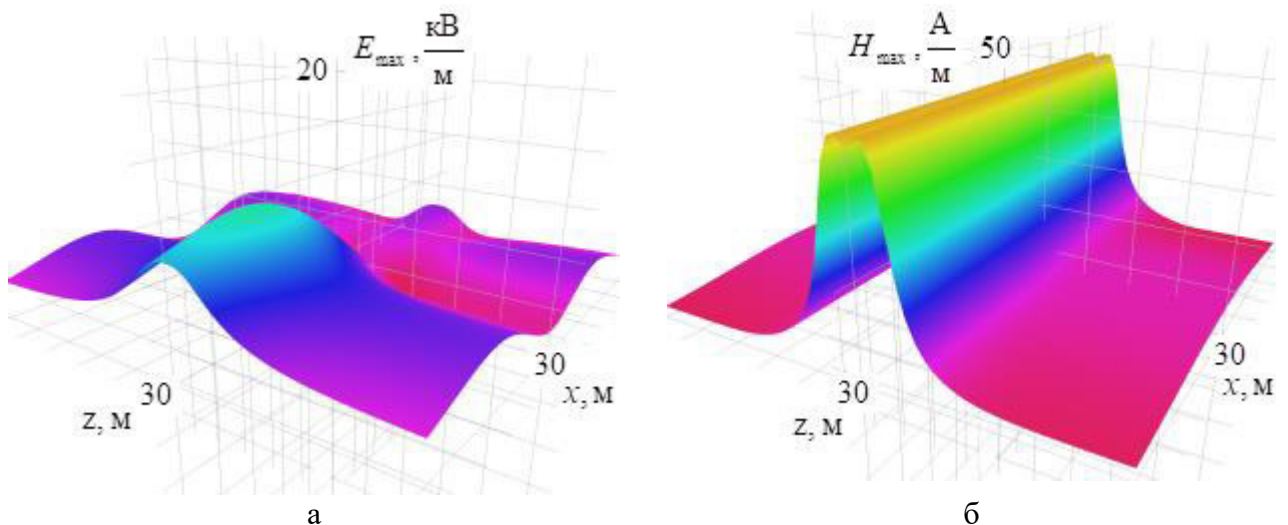
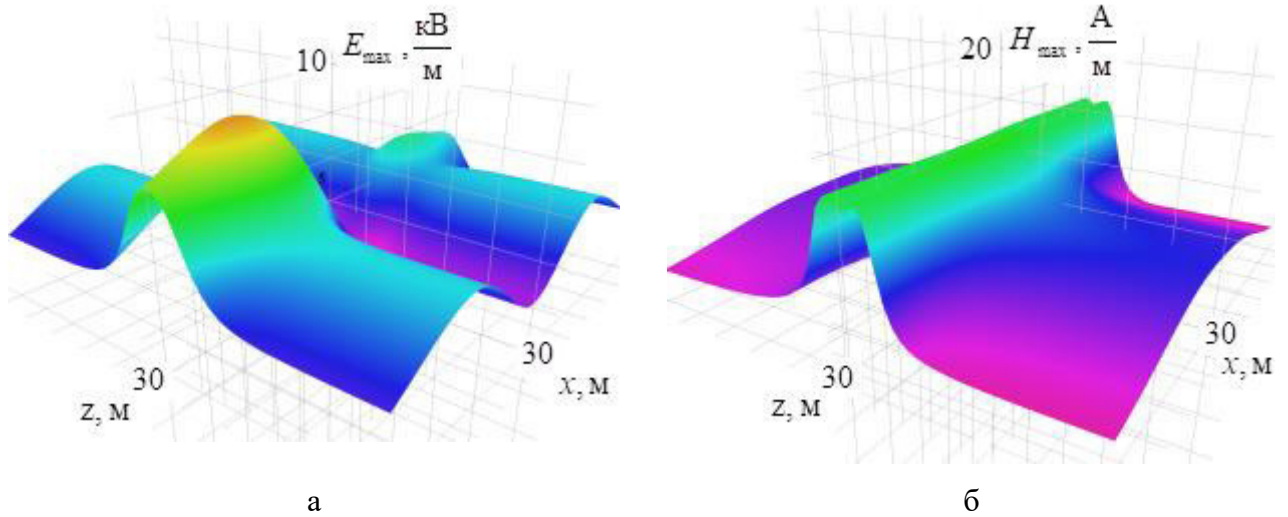
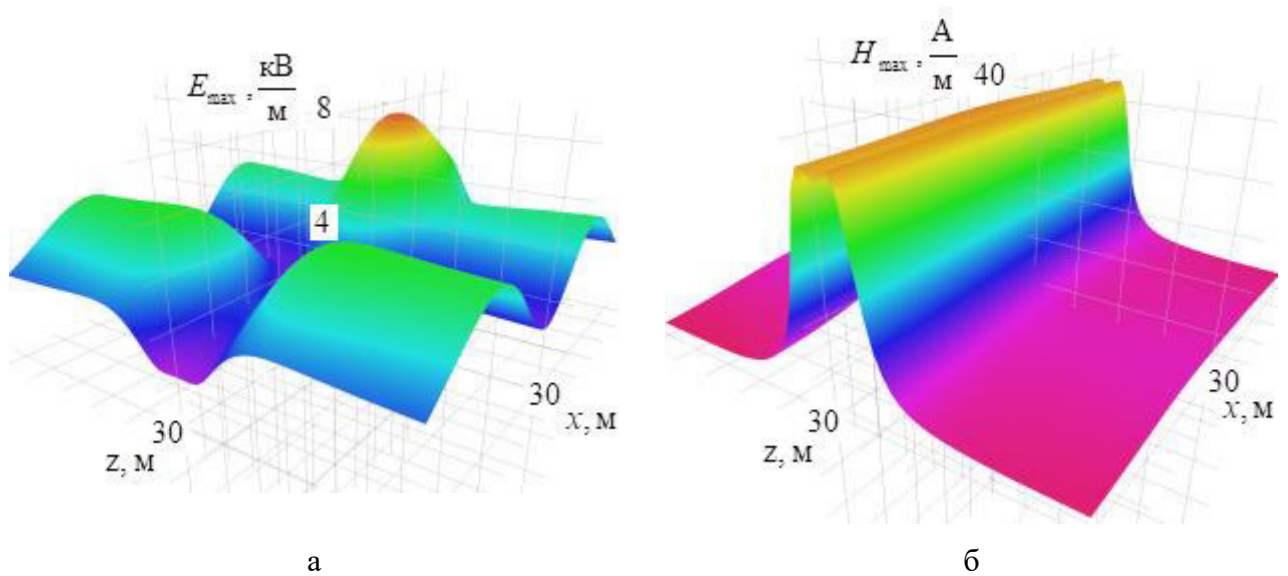


Рисунок 3.52. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения тяговой сети 50 кВ и ЛЭП 500 кВ



**Рисунок 3.53. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения тяговой сети 2×50 кВ и ЛЭП 500 кВ**



**Рисунок 3.54. Амплитудные значения напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей в месте пересечения тяговой сети 94 кВ и ЛЭП 500 кВ**

Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в собственных координатах рассматриваемых систем и в местах пересечения сведены в таблицы 3.23 и 3.24

Таблица 3.23

**Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей при  
раздельном моделировании**

Параметр	Тяговая сеть 50 кВ	Тяговая сеть 2×50 кВ	Тяговая сеть 94 кВ	ЛЭП 500 кВ
$E_{\max}$ , кВ/м	6,19	4,81	2,67	4,92
$H_{\max}$ , А/м	44,06	12,69	35,55	5,8

Таблица 3.24

**Максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в местах  
пересечения**

Параметр	Пересечения ТС и ЛЭП			Различие, %		
	Тяговая сеть 50 кВ	Тяговая сеть 2×50 кВ	Тяговая сеть 94 кВ	Между 2 и 3	Между 2 и 4	Между 3 и 4
1	2	3	4	5	6	7
$E_{\max}$ , кВ/м	11,03	8,99	7,58	23	46	19
$H_{\max}$ , А/м	44,21	13,03	36,54	239	21	180

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Напряженности электрического и магнитного полей тяговых сетей находятся в допустимых пределах.

2. Пересечение тяговых сетей повышенного напряжения с ЛЭП 500 кВ приводит к превышению ПДУ, так, вблизи тяговой сети 50 кВ напряженность электрического поля увеличивается в 2 раза и достигает 11 кВ/м. Значения напряженности магнитного поля в результате пересечения с ЛЭП изменяются незначительно.

3. Тяговая сеть 94 кВ, в сравнении с СТЭ 50 и 2х50, позволяет снизить напряженность электрического поля в месте пересечения на 46 % и 19 %, соответственно.

4. Применение тяговой сети 2х50 кВ приводит к снижению напряженности магнитного поля в месте пересечения более чем в 2,5 раза.

### 3.6 Тяговая сеть и гибкий токопровод

Токопроводы выполняются на напряжения 6-10-35 кВ, поэтому проблем с электромагнитной безопасностью по критерию напряженности электрического поля на их трассах не возникает. Однако суммарные токи фаз могут достигать нескольких килоампер, что приводит к появлению повышенных уровней напряженностей магнитного поля, превышающих в отдельных ситуациях допустимые значения. Поэтому при проектировании и эксплуатации таких ЛЭП необходим контроль условий ЭМБ. Кроме того, при протекании больших токов в фазах токопровода наблюдается значительное электромагнитное влияние токоведущих частей друг на друга.

Ниже представлены результаты исследований условий электромагнитной безопасности в местах пересечения двух силовых ЛЭП: гибкого симметричного токопровода 10 кВ и тяговой сети 25 кВ электрифицированной железной дороги [54, 82]. Схема исследуемой ЭЭС показана на рисунке 3.55.

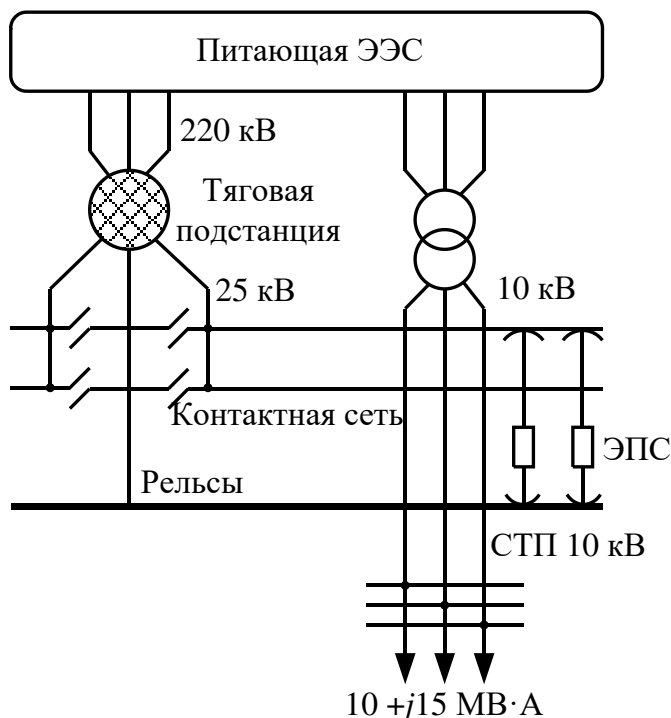


Рисунок 3.55. Схема электрической сети

Рассматривались две режимные ситуации:

- симметричный режим работы двухцепного СТП с нагрузками каждой фазы в  $10 + j5$  МВ·А;
- короткое замыкание фаз В и С на приемном конце правой цепи СТП.

Гибкие симметричные токопроводы [122] имеют двухцепное исполнение (рисунок 3.56а) и расщепленную конструкцию фаз, в которых используются провода сечением  $600 \text{ мм}^2$  (рисунок 3.56б).

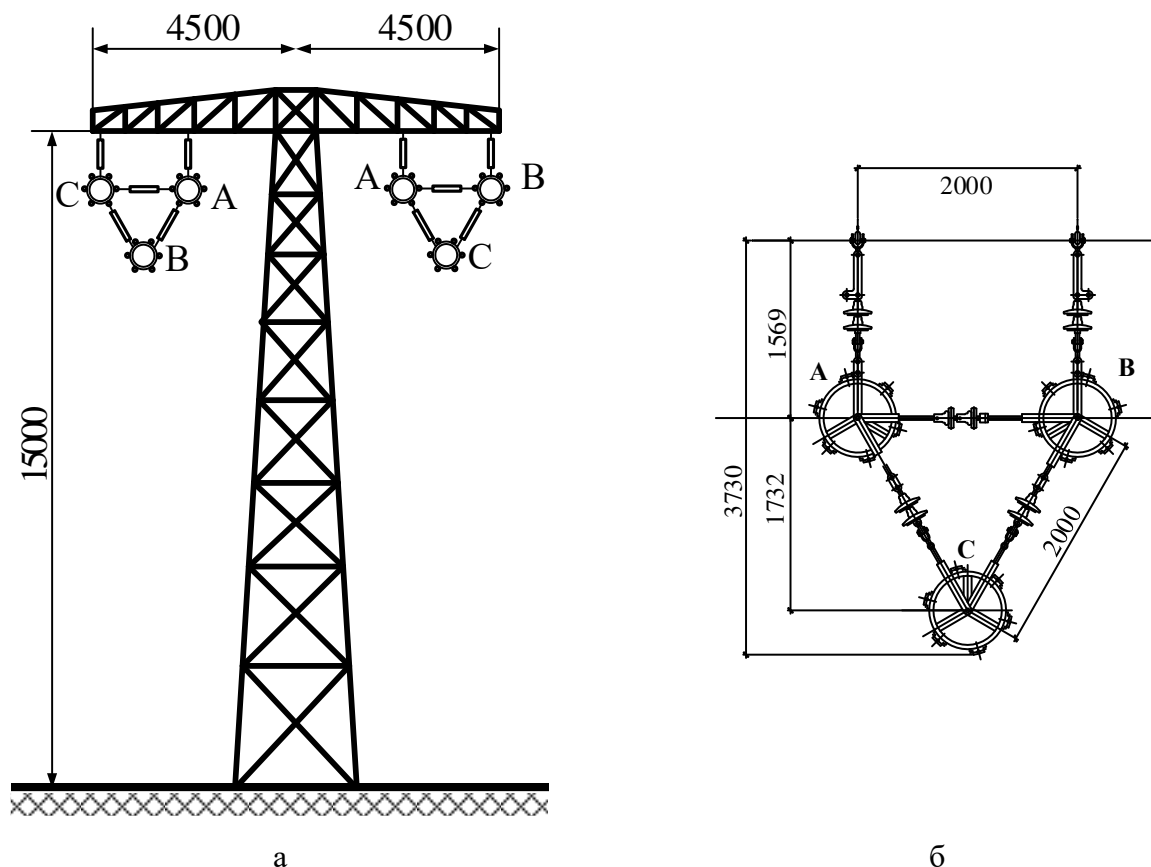


Рисунок 3.56. Опора (а) симметричного токопровода и конструкция (б) токоведущих частей

Для обеих из рассмотренных ситуаций по контактным подвескам каждого пути ТС осуществлялся транзит мощности  $8 + j8$  МВ·А. Пространственное расположение токоведущих частей показаны на рисунке 3.57. Результаты определения напряжений и токов для нормального режима приведены в таблицах 3.25, 3.26. В таблице 3.27 сведены результаты расчета режима КЗ для СТП.

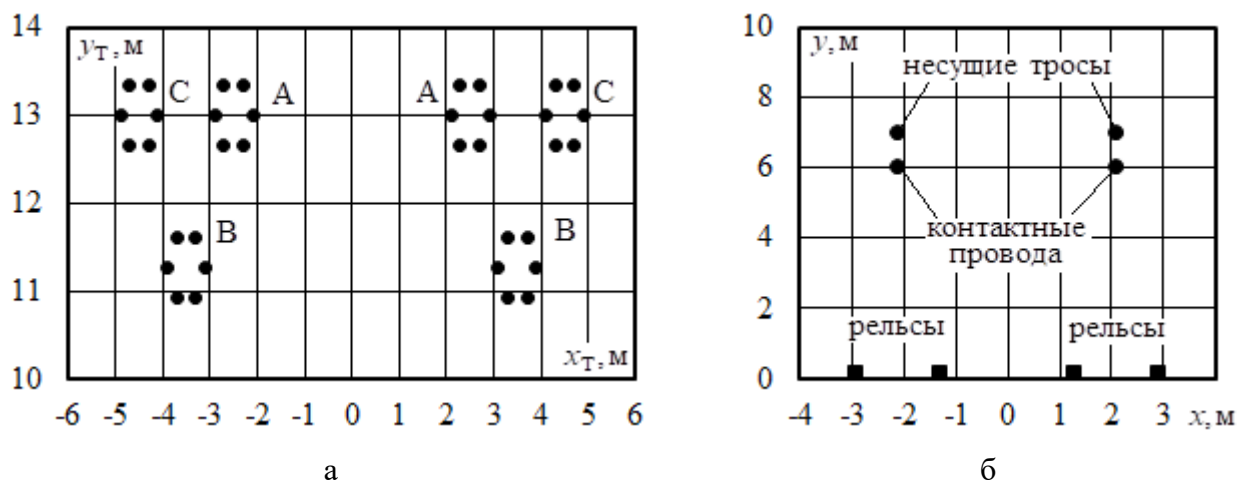


Рисунок 3.57. Координаты токоведущих частей токопровода (а) и ТС 25 кВ (б)

Таблица 3.25

**Напряжения и токи тяговой сети 25 кВ**

Путь	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
1	25,65	-5,59	449,3	-51
2	25,65	-5,59	449,3	-51

Таблица 3.26

**Напряжения и токи приемных концов правой цепи токопровода в нормальном режиме работы**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	5,75	-3,3	1946,1	-30
В	5,83	-123	1917,5	-150
С	5,79	118	1931,4	91

Таблица 3.27

**Напряжения и токи приемных концов правой цепи токопровода в режиме короткого замыкания**

Фаза	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
А	5,98	0,05	0	-
В	3,17	-180	27291	-172
С	2,85	179	27291	7,9

Вычисленные отдельно для ТС и СТП напряженности ЭМП для различных значений горизонтальных координат представлены на рисунках 3.58 – 3.60.

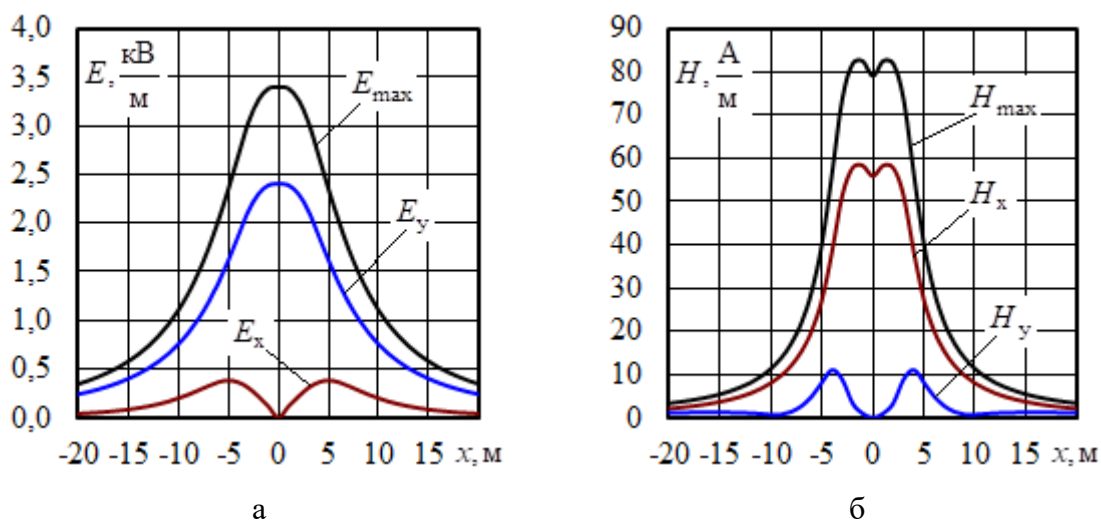


Рисунок 3.58. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей ТС 25 кВ

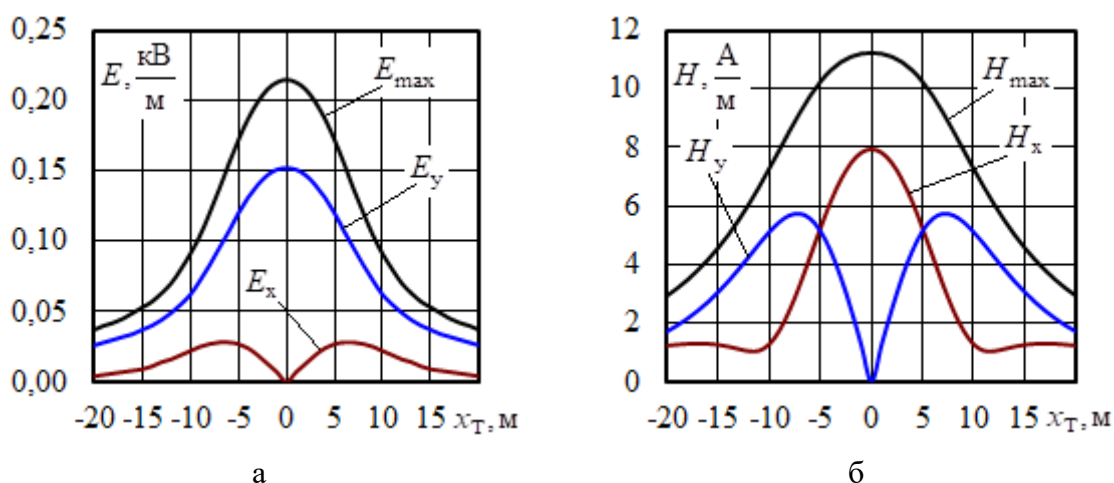


Рисунок 3.59. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) поля СТП в нормальный режим работы

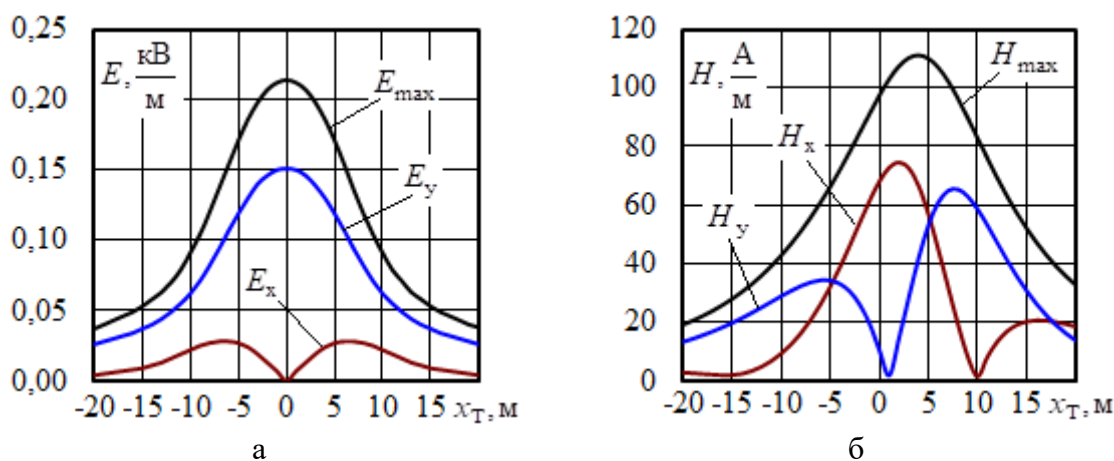
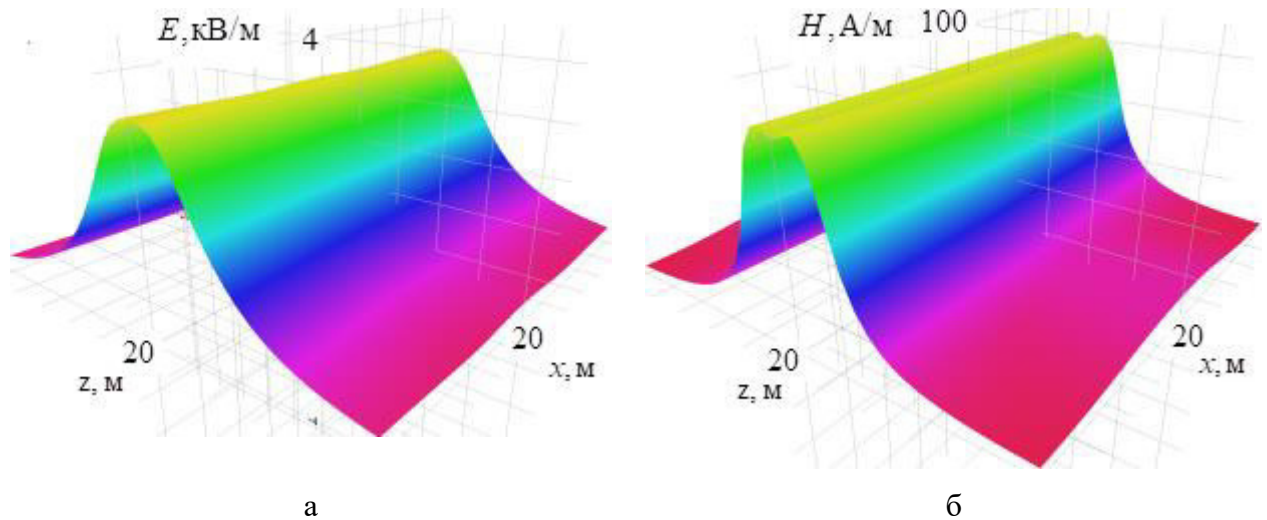
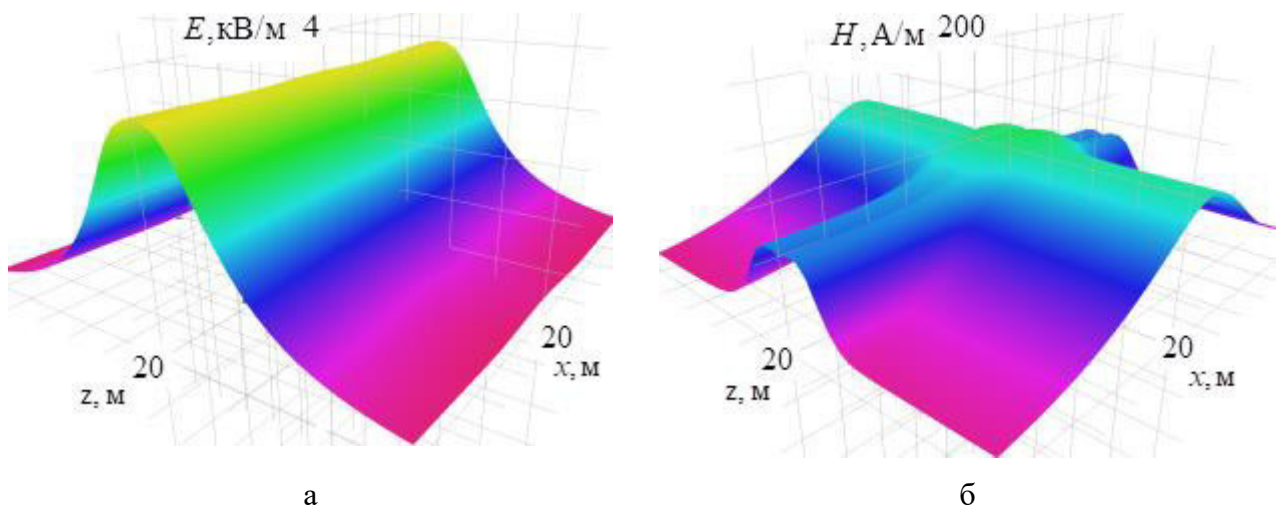


Рисунок 3.60. Напряженность электрического (а) и магнитного (б) поля СТП в режиме короткого замыкания

Объемные диаграммы суммарных напряженностей ЭМП в месте пересечения тяговой сети и СТП показаны на рисунках 3.61, 3.62. В таблице 3.28 приведены максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения.



**Рисунок 3.61. Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения ТС и СТП в нормальном режиме работы: а – электрическое поле; б – магнитное поле**



**Рисунок 3.62 – Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения ТС и СТП в режиме КЗ: а – электрическое поле; б – магнитное поле**



Амплитуды напряженностей ЭМП

№	Объект	Режим	$E_{\max}$ , кВ/м	$H_{\max}$ , А/м
1	Тяговая сеть	Нормальный	3,39	82,6
2	Токопровод	Нормальный	0,22	11,2
		КЗ	0,21	111,2
3	Пересечение ТС и СТП	Нормальный	3,37	82,6
		КЗ на токопроводе	3,37	121,8

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. При раздельном моделировании напряженности электрического поля для ТС и СТП не превышают допустимые для электротехнического персонала нормы в 5 кВ/м.

2. Напряженность магнитного поля ТС не превышает допустимую величину в 80 А/м. Аналогичный параметр для токопровода 10 кВ при нормальном режиме работы находится в пределах нормы, двухфазное короткое замыкание на приемном конце токопровода приводит к увеличению напряженности до 111 А/м.

3. Напряженности электрического и магнитного полей, в местах пересечения ТС и СТП в нормальном режиме работы, отличаются от аналогичных показателей для раздельного моделирования незначительно.

4. В режиме КЗ токопровода амплитудное значение напряженности магнитного поля в месте пересечения увеличивается на 32 % по сравнению с аналогичным показателем для ТС и достигает 122 А/м.

### 3.7 Двухуровневое пересечение железных дорог

На электрифицированных железных дорогах имеются массивные металлические сооружения, которые значительно изменяют распределение напряженностей электромагнитных полей в пространстве [41, 60]. В местах

двухуровневого пересечения электрифицированных железных дорог через путепровод происходит существенное усложнение пространственных структур ЭМП из-за наличия большого числа металлических конструкций путепровода, влияющих на распределение напряженностей в пространстве.

Моделирование осуществлялось для ситуации пересечения двух однопутных участков электрифицированных железных дорог с тяговыми сетями 25 кВ [55]. Предполагалось, что пересечение организовано через путепровод с ездой поверху. По контактным подвескам каждой ТС осуществлялся транзит мощности  $8 + j8$  МВ·А. Расчеты проводились на высотах 1,8 м и 11,8 м, что соответствовало нахождению персонала под путепроводом и на его поверхности. На рисунке 3.63 показана схема системы тягового электроснабжения 25 кВ и пространственное расположение токоведущих частей ТС с элементами путепровода. Результаты расчета режима тяговых сетей приведены в таблице 3.29.

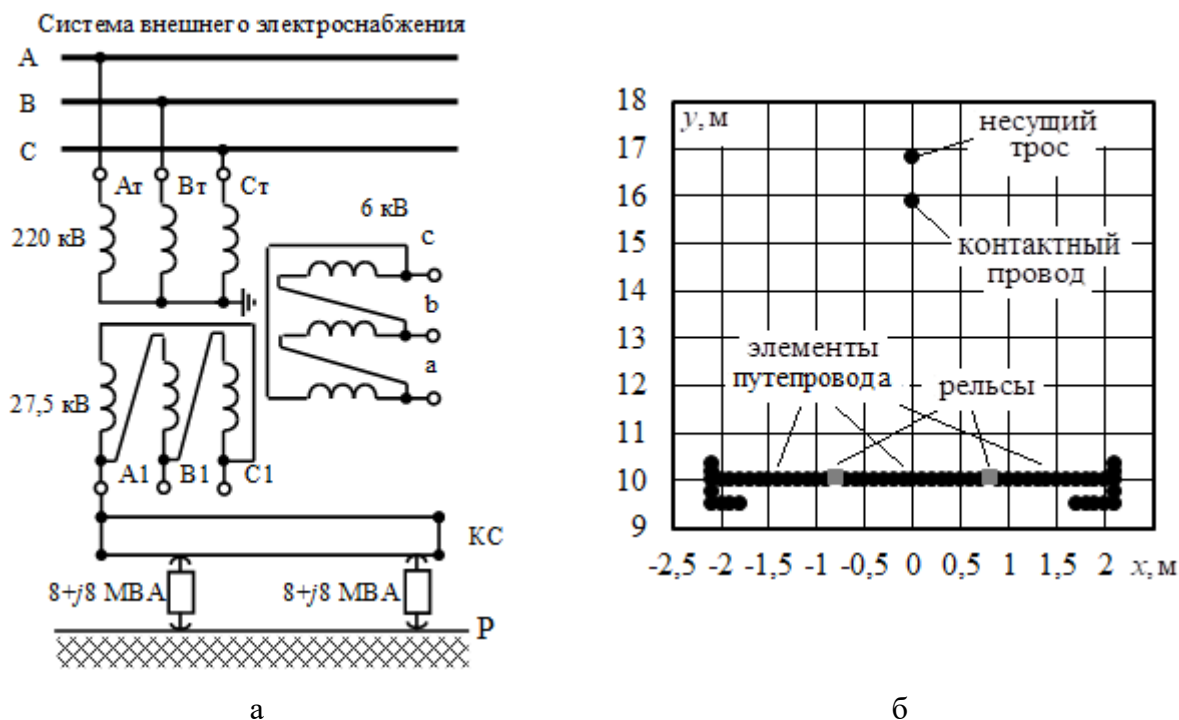


Рисунок 3.63. Схема системы тягового электроснабжения 25 кВ (а) и расположение проводов путепровода с ездой поверху (б)

Напряжения и токи тяговых сетей

ТС	$U$ , кВ	$\varphi_U$ , град	$I$ , А	$\varphi_I$ , град.
над путепроводом	25,95	-2,9	441,8	-48
под путепроводом	25,93	-2,9	444,9	-48

На рисунке 3.64 представлены результаты отдельного моделирования напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей для тяговой сети на поверхности путепровода, а на рисунке 3.65 – для тяговой сети под путепроводом.

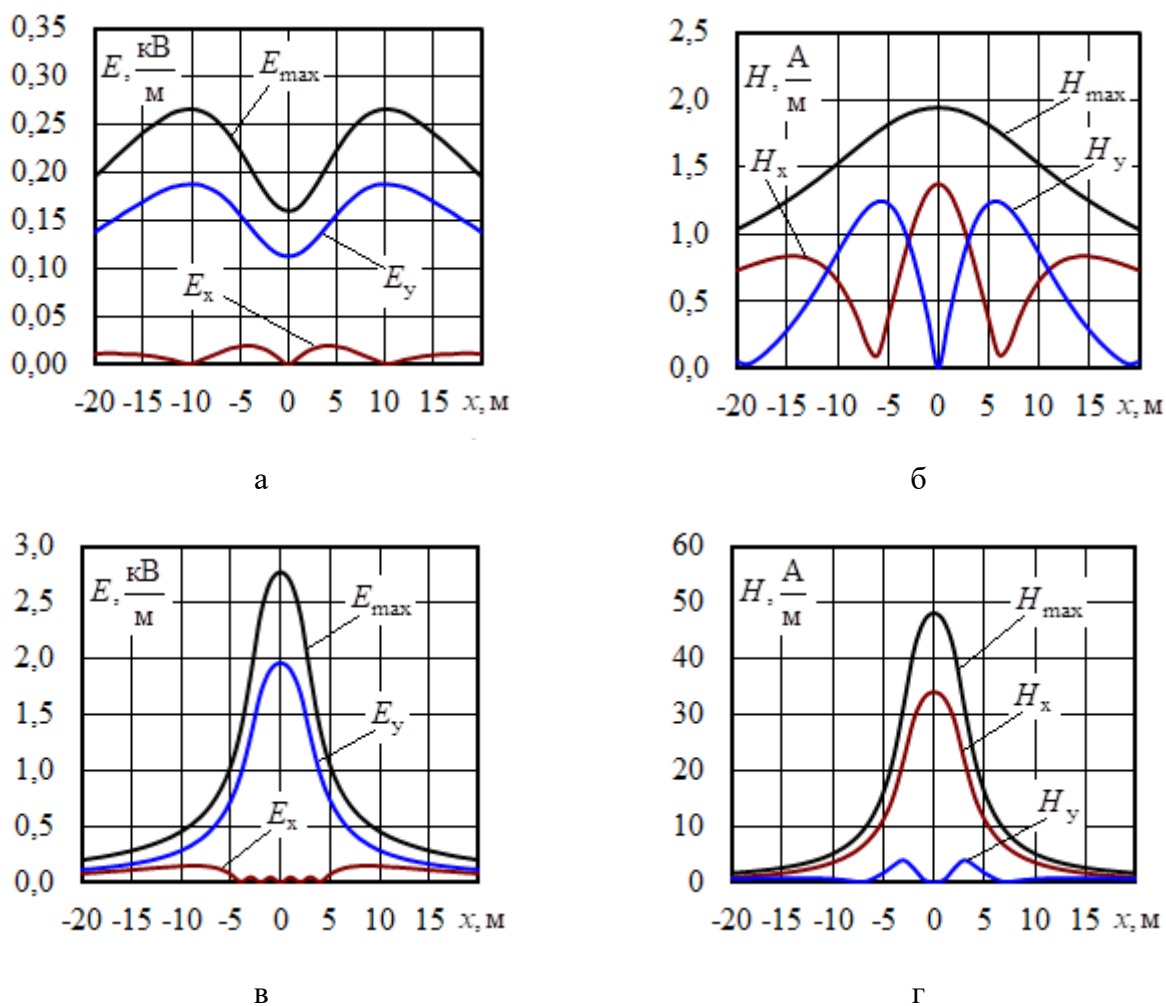
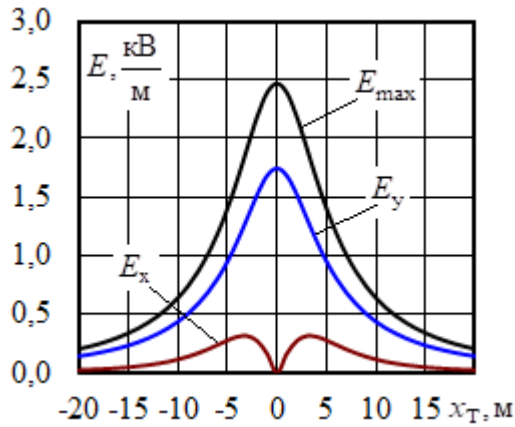
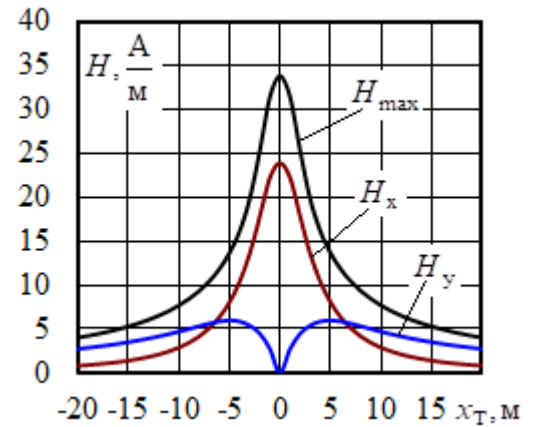


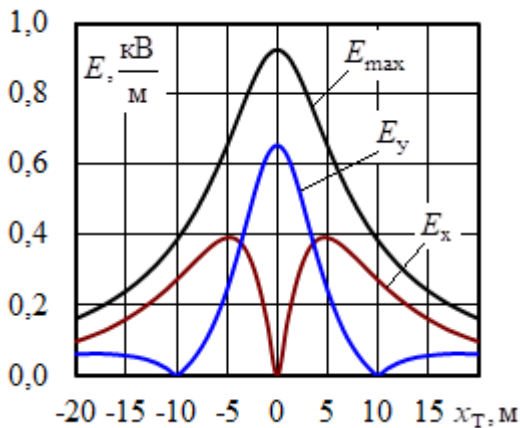
Рисунок 3.64. Напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей, создаваемые верхней ТС на высотах: а, б – 1,8 м; в, г – 11,8 м



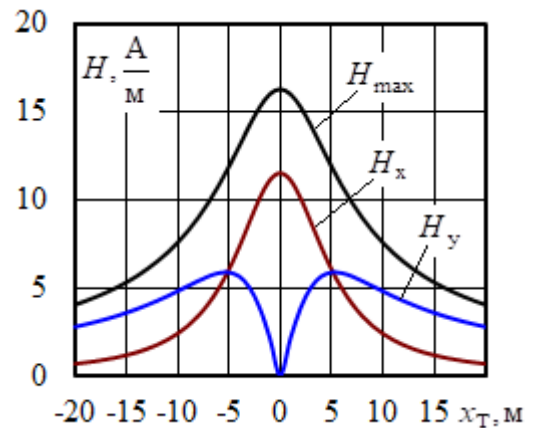
а



б



в



г

**Рисунок 3.65** Напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей, создаваемые нижней ТС на высотах: а, б – 1,8 м; в, г – 11,8 м

Объемные диаграммы суммарных напряженностей электрического и магнитного полей в местах пересечения тяговых сетей приведены на рисунках 3.66, 3.67. На рисунках 3.68, 3.69 приведены годографы суммарных векторов напряженностей. В таблице 3.30 представлены максимальные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения.

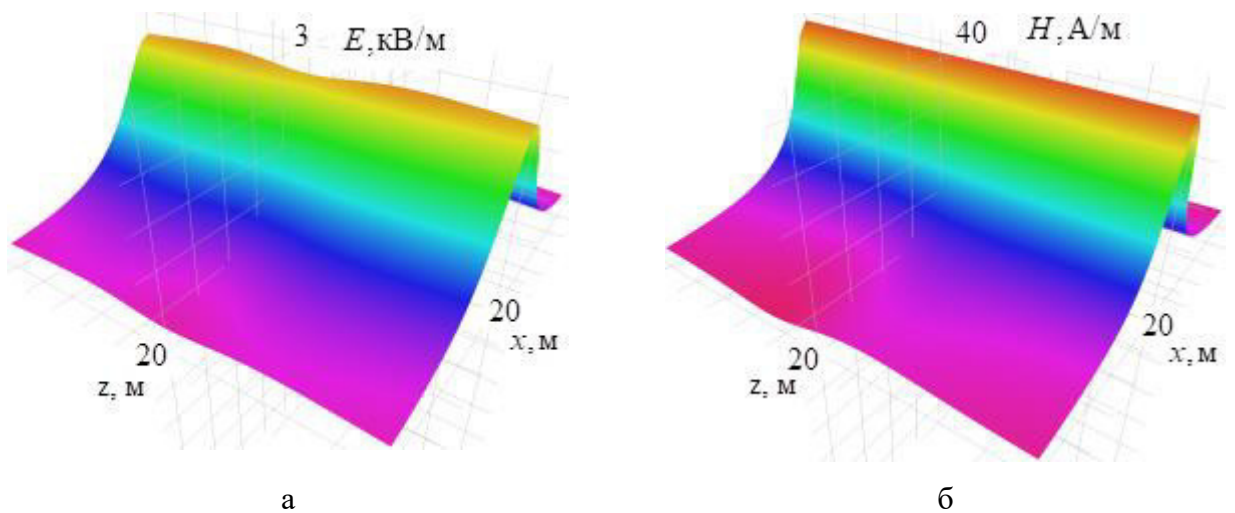


Рисунок 3.66. Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения на высоте 1,8 м

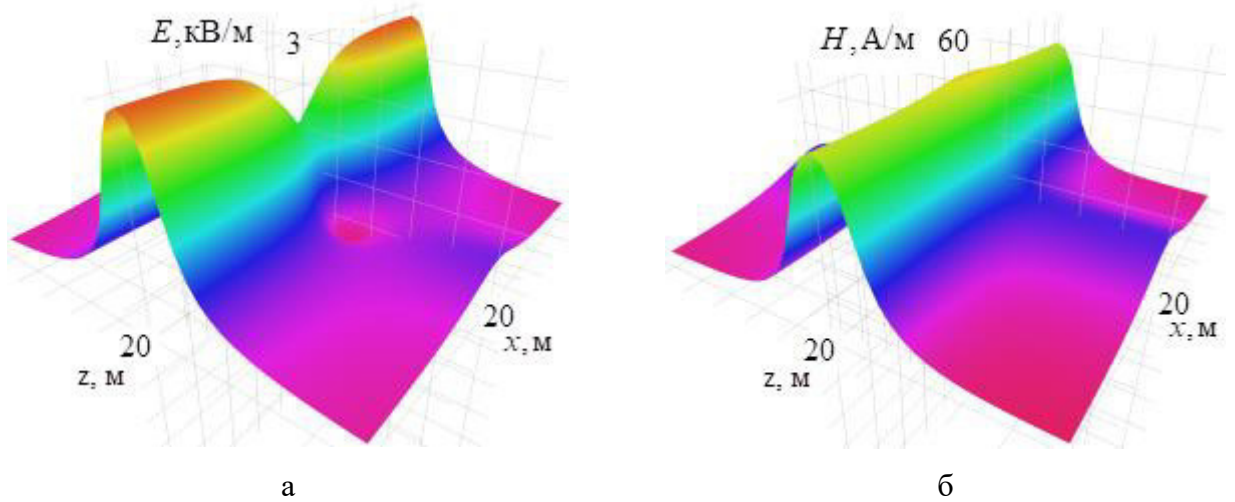


Рисунок 3.67. Амплитудные значения напряженностей ЭМП в месте пересечения на высоте 11,8 м

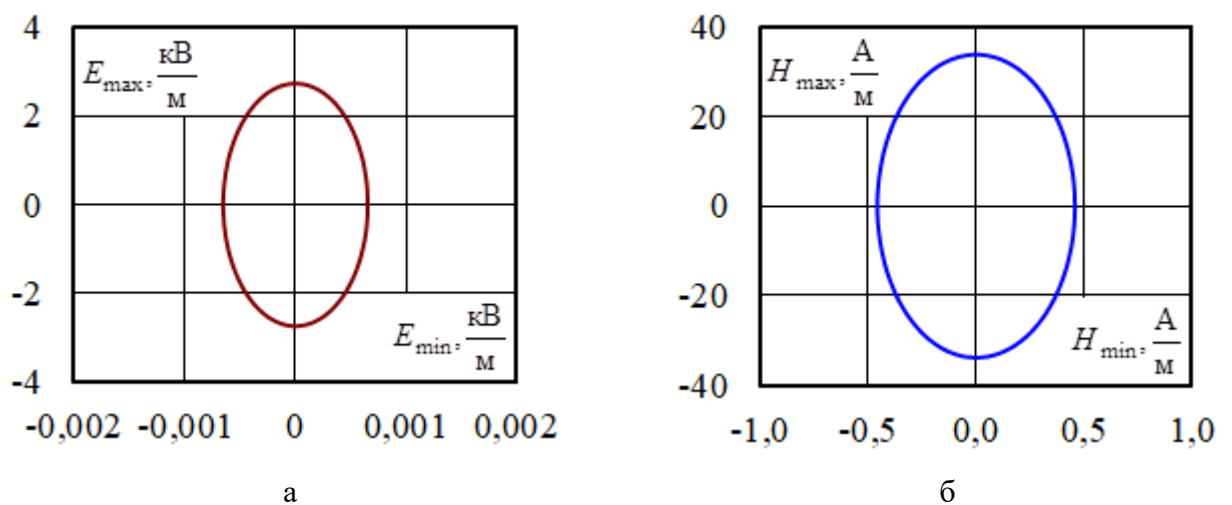


Рисунок 3.68. Годографы суммарных векторов напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей в точке с координатами  $x = 8$  м,  $y = 1,8$  м,  $z = 0$  м

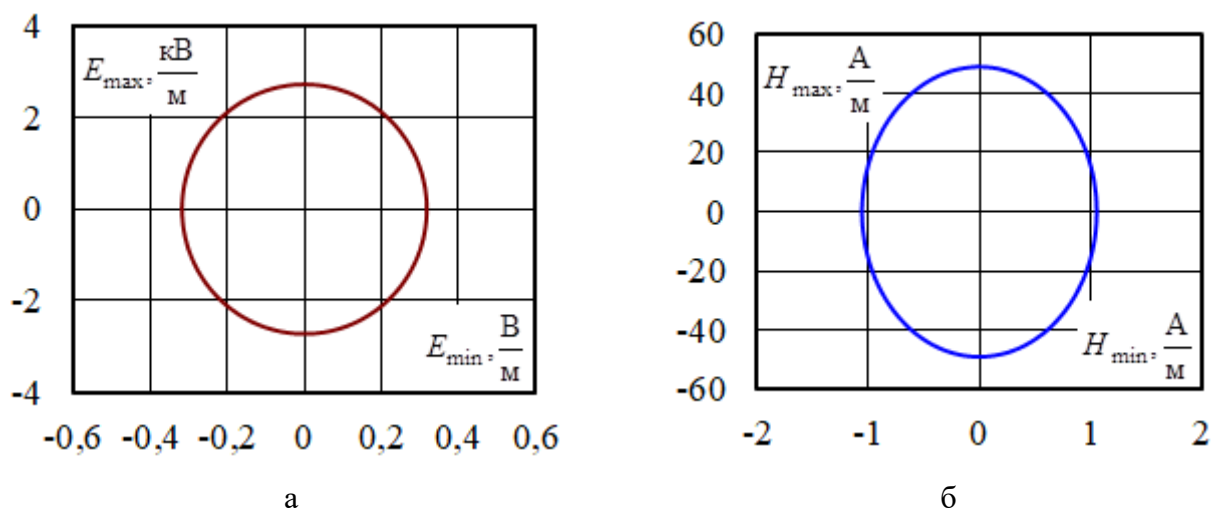


Рисунок 3.69. Годографы суммарных векторов напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей в точке с координатами  $x = 0$  м,  $y = 11,8$  м,  $z = 8$  м

Таблица 3.30

Значения напряженностей электрического и магнитного полей

Параметр	Раздельное моделирование		Двухуровневое пересечение		Различие, %		
	Верхняя ТС (11,8 м)	Нижняя ТС (1,8 м)	1,8 м	11,8 м	Между 2 и 5	Между 3 и 4	Между 4 и 5
1	2	3	4	5	6	7	8
$E_{\max}$ , кВ/м	2,77	2,47	2,74	2,86	3,1	9,9	4,2
$H_{\max}$ , А/м	48,1	33,8	33,8	50,8	5,3	0	33,5

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Напряженности электрического и магнитного полей при нахождении персонала под путепроводом и на его поверхности не превышают предельно допустимые значения.

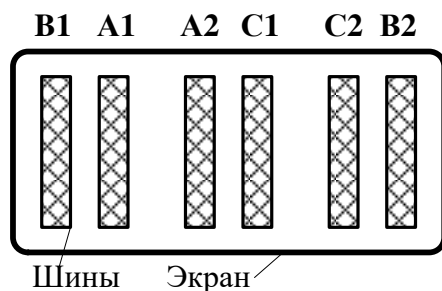
2. В месте двухуровневого пересечения электрифицированных железнодорожных линий наблюдается увеличение напряженности электрического поля на высоте 1,8 м на 10 %, на высоте 11,8 м – на 3 %. Аналогичный параметр для магнитного поля на высоте 1,8 м не изменяется, на высоте 11,8 м увеличивается на 5 %.

3. Двухуровневое пересечение приводит к изменению пространственной структуры электрического поля на высоте 11,8 м. В частности, вблизи начала координат наблюдается уменьшение максимальных значений напряженностей.

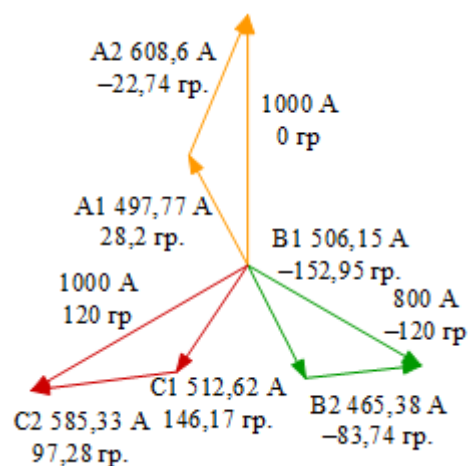
### 3.8 Магистральные шинопроводы

При формировании цеховых электрических сетей энергоемких производств широко применяются магистральные шинопроводы, обеспечивающие пропускание электрических токов, достигающих нескольких килоампер [123 – 125]. Наличие таких элементов ухудшает условия электромагнитной безопасности [60] из-за возникновения значительных магнитных полей. Наибольшими уровнями напряженностей МП характеризуются места пересечений отдельных шинопроводов.

Моделирование осуществлялось для ситуации пересечения двух шинопроводов со спаренными фазами ШМА-73 [56, 84] (рисунок 3.70а). В месте пересечения верхний шинопровод был расположен на высоте 3 м, нижний – 2,5 м. Напряженности магнитных полей определялись на высоте 1,8 м. Результаты расчета режимов шинопроводов приведены в таблице 3.31, векторная диаграмма показана на рисунке 3.70б.



а



б

Рисунок 3.70. Сечение шинопровода (а) и векторная диаграмма

Результаты отдельного моделирования напряженностей магнитного поля шин проводов на высоте 1,8 метра представлены на рисунке 3.71.

Таблица 3.31

## Результаты расчета режима

Параметр	Фаза					
	A1	A2	B1	B2	C1	C2
$I, A$	497,77	608,6	506,15	465,38	512,62	585,33
$\varphi_I, \text{град.}$	28,2	-22,74	-152,95	-83,74	146,17	97,28

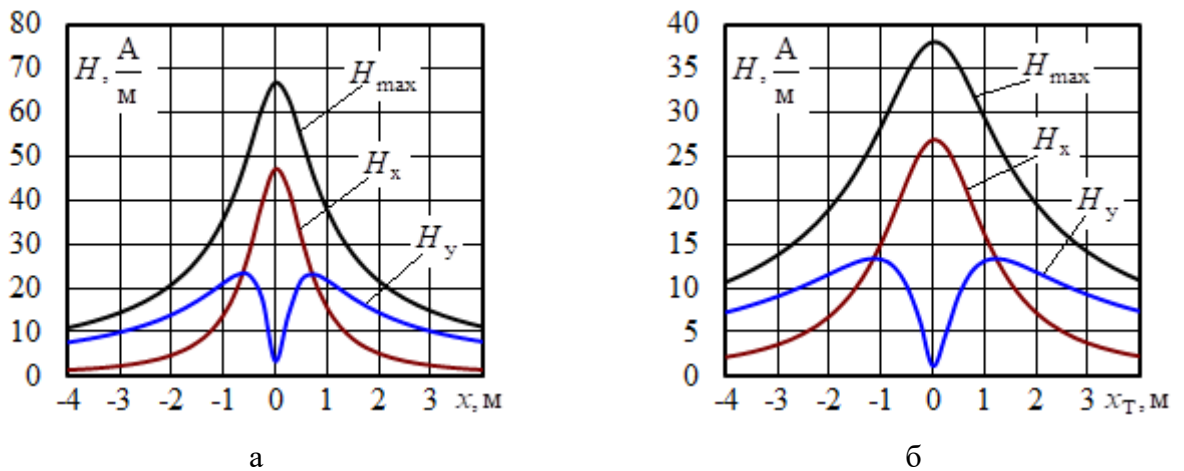


Рисунок 3.71. Напряженность магнитного поля на высоте 1,8 м: а – нижнего шинпровода, б – верхнего шинпровода

Объемная диаграмма суммарных напряженностей магнитного поля в месте пересечения шин проводов на высоте 1,8 м показана на рисунке 3.72.

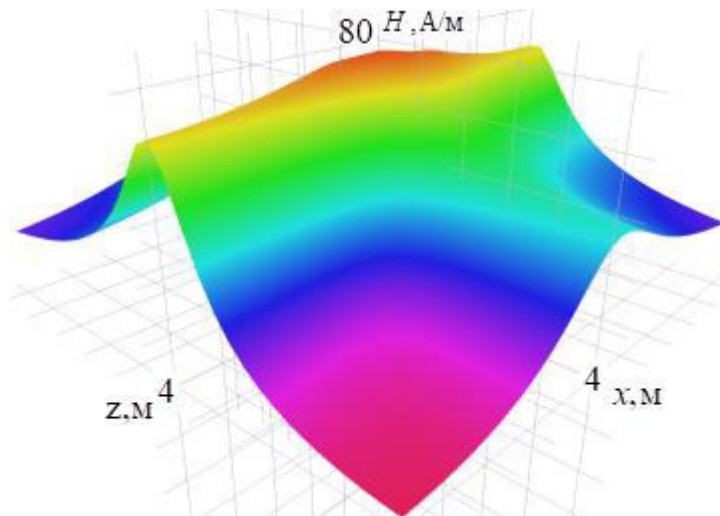


Рисунок 3.72. Амплитудные значения напряженностей магнитного поля в месте пересечения шин проводов

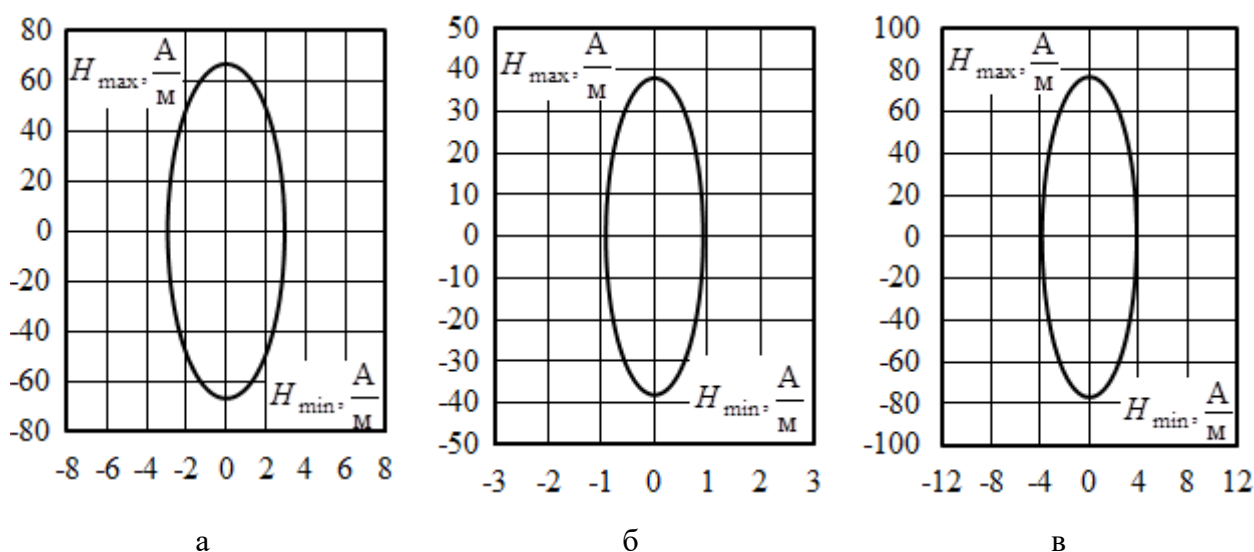


В таблице 3.32 представлены максимальные значения амплитуд напряженностей магнитного поля. На рисунке 3.73 приведены годографы векторов напряженности в точке с координатами  $z = 0$  м,  $x = 0$  м отдельно для каждого шинпровода (а, б) и для их пересечения (в).

Таблица 3.32

**Максимальные значения амплитуд напряженностей магнитного поля**

Параметр	Раздельное моделирование		Пересечение	Различие, %	
	Верхний шинпровод	Нижний шинпровод		Между столбцами 2 и 4	Между столбцами 3 и 4
1	2	3	4	5	6
$H_{\max}$ , А/м	38	66,7	76,8	51	13



**Рисунок 3.73. Годографы векторов напряженности магнитного поля:**

а – нижнего шинпровода, б – верхнего шинпровода, в – пересечение

Полученные результаты показали, что в месте пересечения шинпроводов амплитудное значение напряженности магнитного поля увеличивается относительно аналогичных значений для верхнего и нижнего шинпровода на 51 и 13 %, соответственно; в местах пересечения шинпроводов напряженность магнитного поля достигает 77 А/м.

## Выводы

1. В местах пересечения линий электропередачи происходит наложение электромагнитных полей и усложнение пространственной структуры поля. Для обеспечения требуемых условий электромагнитной безопасности в местах пересечения необходимо производить дополнительное исследование электромагнитных полей. Предлагаемый подход позволяет получить объемную картину поля вблизи пересечений, а также определить годографы векторов в каждой точке пространства.

2. В месте пересечения воздушной и кабельной линии, из-за наличия экранов КЛ, напряженность электрического поля определяется только вкладом воздушной линии. Напряженности магнитного поля увеличиваются по отношению к отдельно стоящим воздушной и кабельной линий, соответственно, на 32 % и 43 %.

3. Напряженность магнитного поля в месте пересечения ТС и ЛЭП определяется вкладом тяговой сети и изменяется под действием ЛЭП незначительно. Аналогичный параметр электрического поля в результате пересечения с ЛЭП 500 и 750 кВ превышает допустимое значение для электротехнического персонала, увеличение напряженности по отношению к ЛЭП составило, соответственно, 69 и 22 %. Пересечение ТС 25 кВ и ЛЭП 220 кВ не привело к превышению допустимых 5 кВ/м, однако максимальное значение увеличилось на 137 %.

4. Наличие большого числа токоведущих частей приводит к существенному усложнению картины распределения ЭМП в пространстве. Наглядное представление такой картины в виде объемных диаграмм позволит принимать обоснованные решения по защите электронного оборудования от негативного воздействия ЭМП.

5. Напряженность электрического поля в местах пересечения электрифицированных железных дорог с шестицепной ЛЭП для ТС 25 кВ

превышает ПДУ, амплитудное значение достигает 7,9 кВ/м, применение тяговой сети 2×25 кВ позволяет снизить этот параметр до 6,5 кВ/м.

Пересечение тяговых сетей с шестипековой ЛЭП, в сравнение с трехцепной, приводит к увеличению напряженности электрического поля при системе тяги 25 кВ на 88%, при системе тяги 2×25 кВ – в 2,5 раза. Напряженность магнитного поля увеличивается незначительно.

6. Переход к тяговым сетям повышенного напряжения приводит к нарушению допустимых значений, так вблизи тяговой сети 50 кВ напряженность электрического поля увеличивается в 2 раза и достигает 11 кВ/м. Значения напряженности магнитного поля в результате пересечения с ЛЭП изменяются незначительно. Тяговая сеть 94 кВ в сравнении с СТЭ 50 и 2х50 позволяет снизить напряженность электрического поля в месте пересечения на 46 % и 19 %, соответственно. Применение тяговой сети 2х50 кВ приводит к снижению напряженности магнитного поля в месте пересечения более чем в 2,5 раза.

7. Значения напряженностей электрического и магнитного полей тяговой сети 25 кВ и СТП 10 кВ в нормальном режиме работы не превышают допустимые для электротехнического персонала нормы, двухфазное короткое замыкание на приемном конце токопровода приводит к увеличению напряженности магнитного поля до 111 А/м

Аналогичные показатели в местах пересечения ТС и СТП в нормальном режиме работы отличаются от отдельного моделирования незначительно и также не нарушают ПДУ. В режиме КЗ токопровода напряженность магнитного поля в месте пересечения увеличивается на 32 % по сравнению с аналогичным показателем для ТС и достигает 122 А/м.

8. В месте двухуровневого пересечения электрифицированных железнодорожных линий наблюдается увеличение напряженности электрического поля на высоте 1,8 м на 10 %, на высоте 11,8 м – на 3 %. Аналогичный параметр для магнитного поля на высоте 1,8 м не изменяется, на высоте 11,8 м увеличивается на 5 %. Двухуровневое пересечение приводит к

изменению пространственной структуры электрического поля на высоте 11,8 м. В частности, вблизи начала координат наблюдается уменьшение максимальных значений напряженностей. Массивные металлические конструкции путепровода приводят к ограничению взаимного влияния электромагнитных полей тяговых сетей.

9. Полученные результаты показали, что в месте пересечения шинопроводов амплитудное значение напряженности магнитного поля увеличивается относительно аналогичных значений для верхнего и нижнего шинопровода на 51 и 13 %, соответственно; в местах пересечения шинопроводов амплитудное значение напряженности магнитного поля достигает 77 А/м.

## 4 УЧЕТ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

### 4.1 Типовая тяговая сеть

Российские выпрямительные электровозы наряду с потреблением тока из контактной сети генерируют значительные уровни высших гармоник, что приводит к существенным искажениям кривых токов и напряжений. Типовые уровни гармоник тока показаны на рисунке 1.9. Электромагнитные поля, создаваемые контактной сетью и питающими тяговые подстанции линиями электропередачи, также содержат значительную долю ВГ [61, 117]. Высшие гармоники усложняют картину поляризации и могут приводить к повышению уровней напряженности [14, 61, 83, 126]. Этот фактор необходимо учитывать при оценке помехоустойчивости различного оборудования, а также при определении условий электромагнитной безопасности.

Режимы работы СТЭ определяются графиком движения поездов и токовым профилем пути (рисунки 4.1 и 4.2). График движения поездов составлен из двух поездов четного направления и такого же количества поездов нечетного направления (рисунок 4.2). Масса каждого поезда 6150 т, токовые профили четного и нечетного пути для заданной массы поездов показаны на рисунке 4.1.

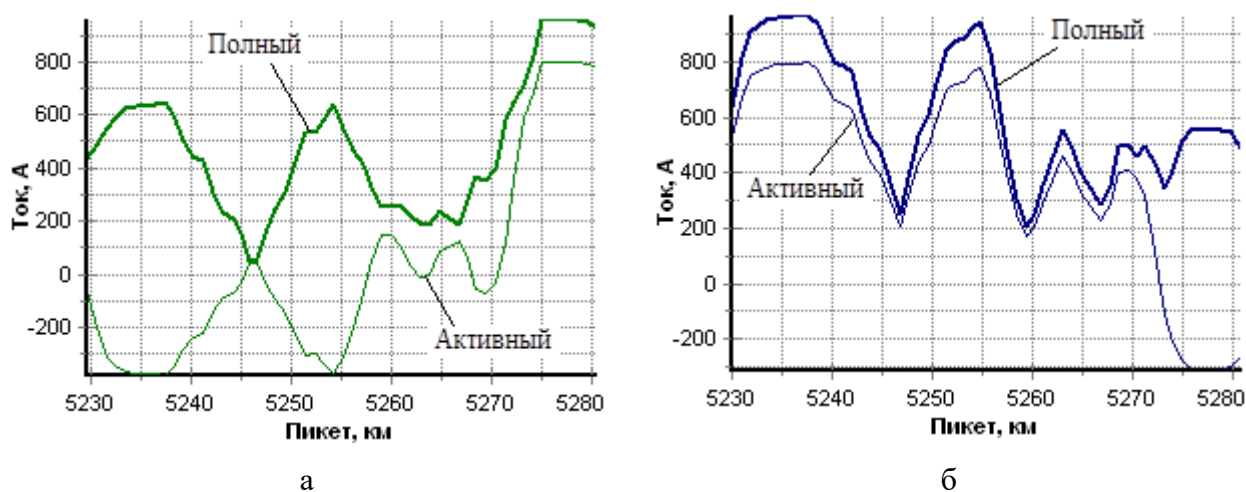


Рисунок 4.1. Токовый профиль: а – нечетного пути; б – четного пути

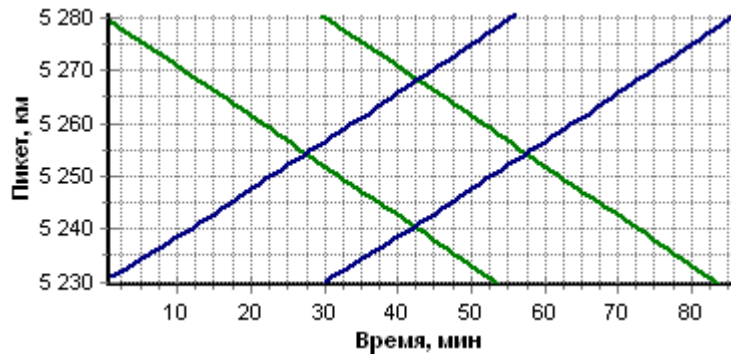


Рисунок 4.2. График движения поездов

Выпрямительные электровозы являются источником высших гармоник, которые искажают кривые тока и напряжения. На рисунках 4.3 и 4.4 показаны зависимости коэффициентов несинусоидальности от времени.

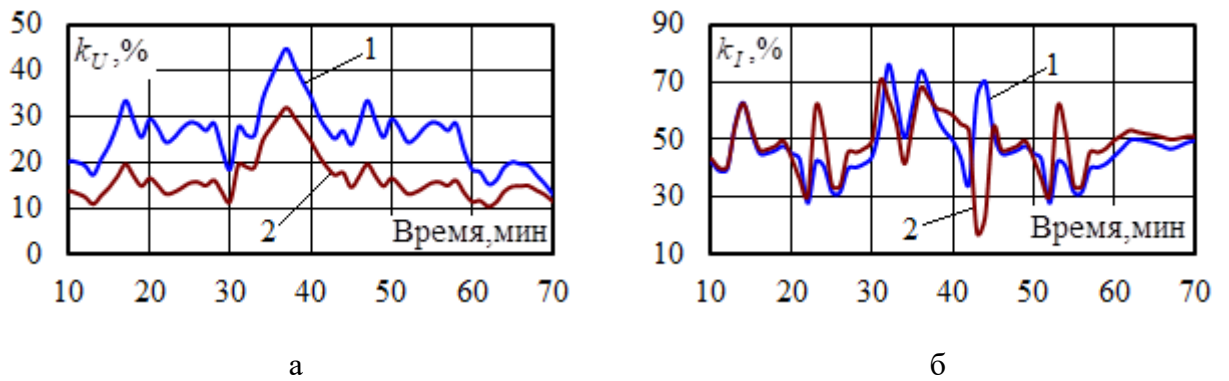


Рисунок 4.3. Коэффициенты несинусоидальности напряжения (а) и тока (б)

СТЭ 1x25 кВ: 1 – четное направление; 2 – нечетное направление

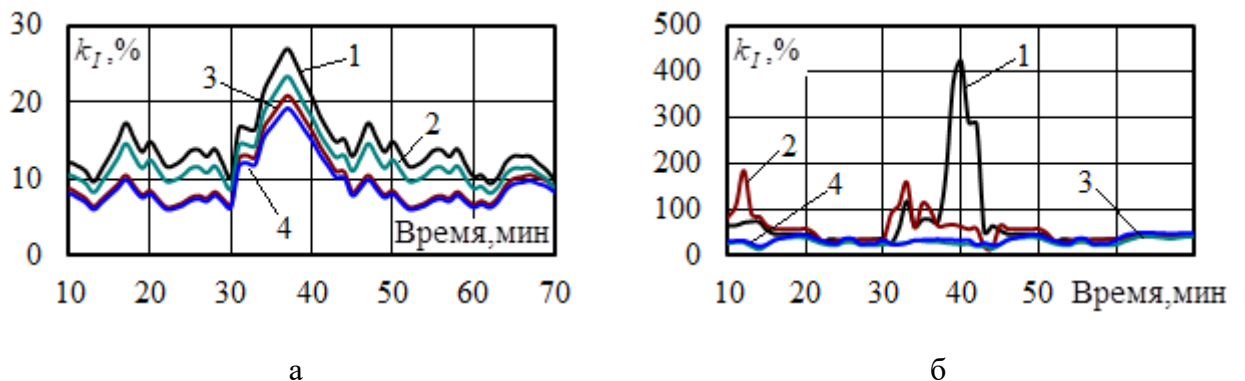


Рисунок 4.4. Коэффициенты несинусоидальности напряжения (а) и тока (б)

СТЭ 2x25 кВ: 1 – контактный провод четного направления; 2 – контактный провод нечетного направления; 3 – питающий провод четного направления; 4 – питающий провод нечетного направления

Расчет электромагнитных полей(ЭМП) требует определение расположения всех токоведущих элементов. Координаты расположения токоведущих элементов в сечениях тяговых сетей показаны на рисунке 4.5.

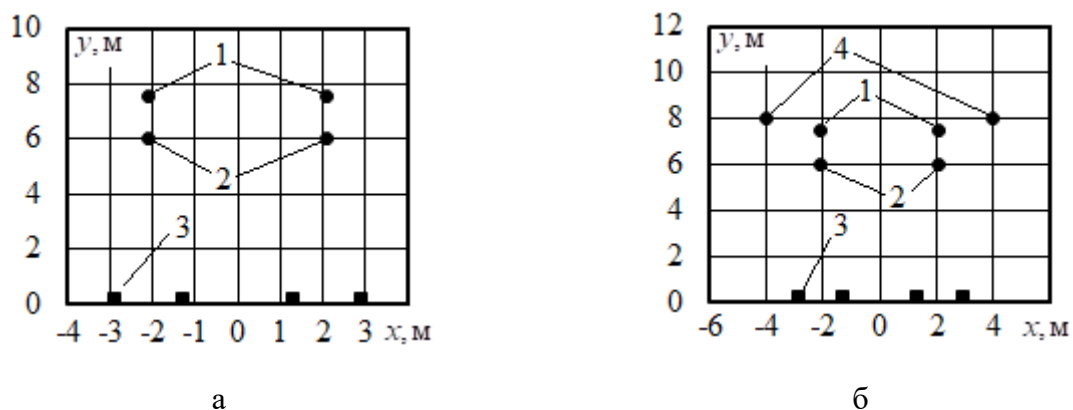


Рисунок 4.5. Расположение токоведущих частей СТЭ 25 кВ (а) и 2х25 кВ (б):

1 – несущий трос; 2 – контактный провод; 3 – рельс 4 – питающий провод;

Результаты расчета составляющих и амплитудных значений напряженностей ЭМП на высоте 1,8 метра с учетом высших гармоник показаны на рисунке 4.6.

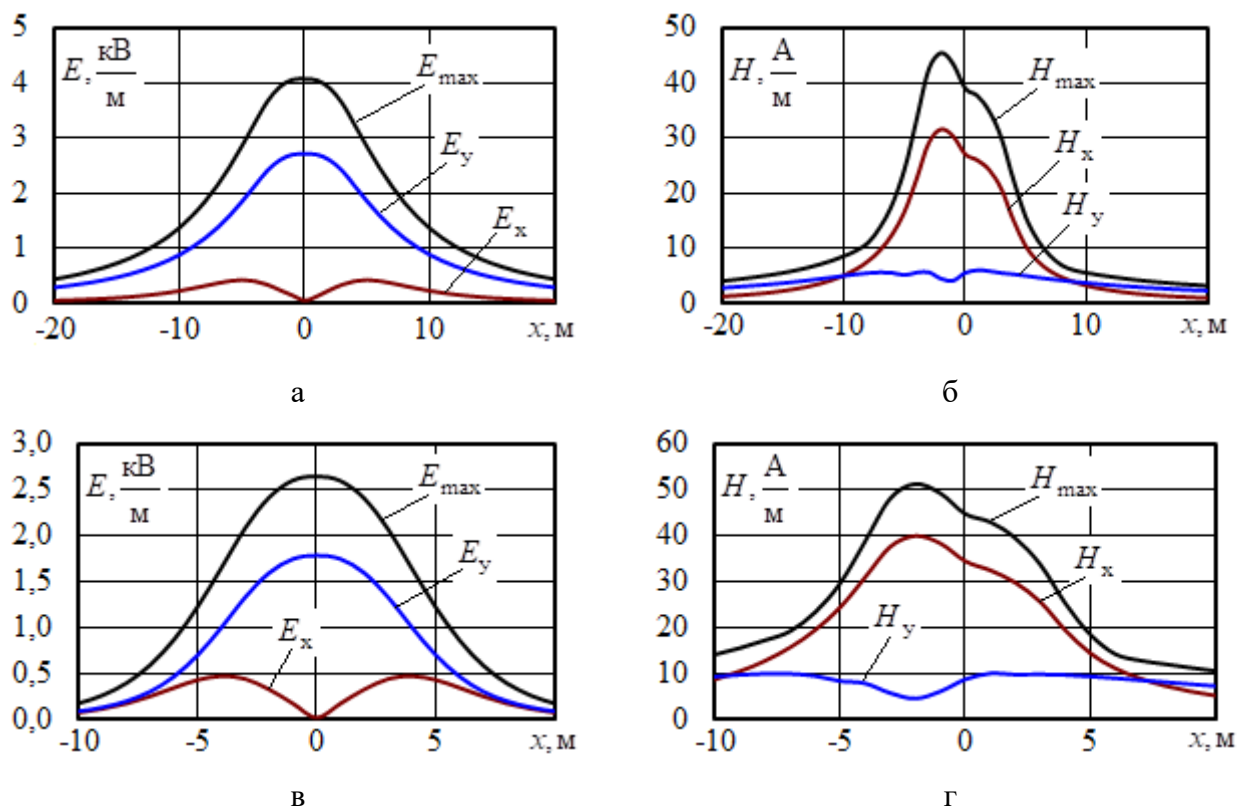
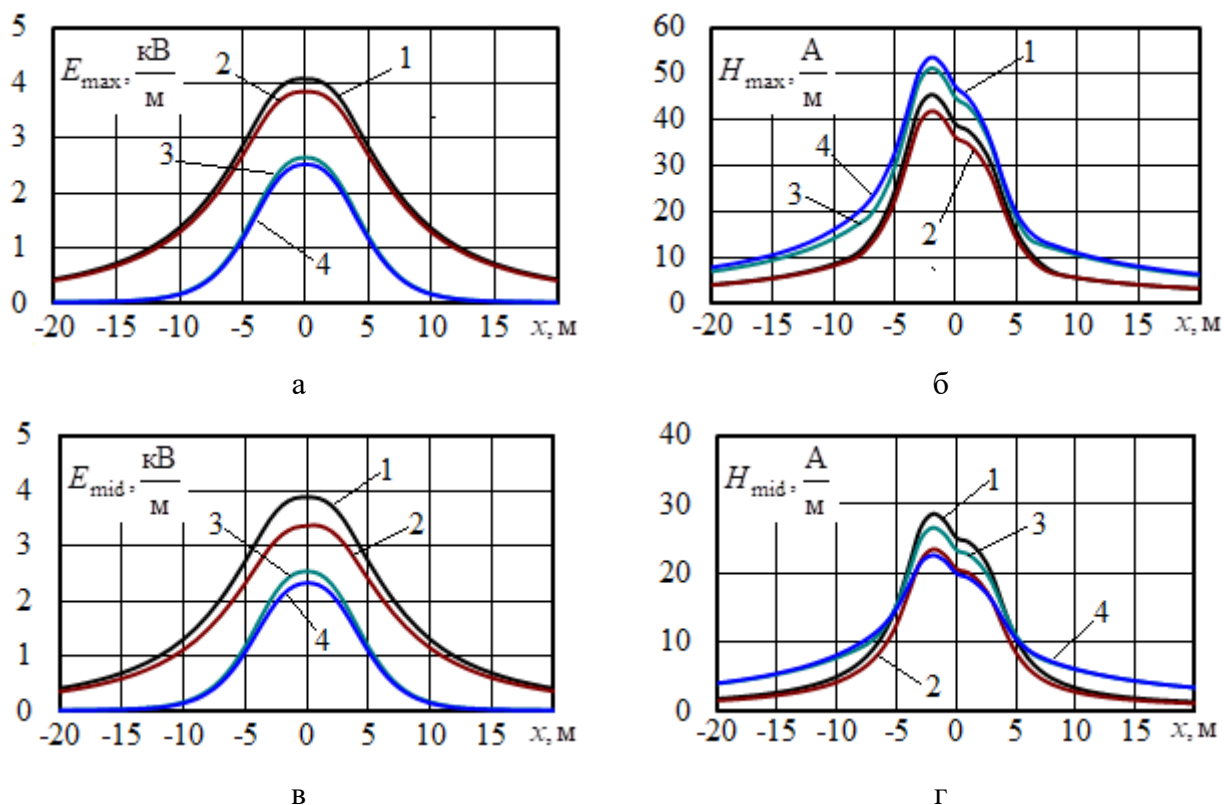


Рисунок 4.6. Распределение напряженности электрического (а, в) и магнитного (б, г) полей в сечении тяговой сети

Сравнение максимальных значений напряженностей поля приведено на рисунке 4.7 (а, б). На рисунке 4.7 (в, г) приведено сравнение значений, усредненных за все время моделирования. Для оценки влияния высших гармоник на рисунке 4.7 также приводятся результаты расчетов на основной частоте (50 Гц). Экстремумы максимальных и усредненных значений рисунка 4.7 сведены в таблицу 4.1.



**Рисунок 4.7.** Сравнение напряженностей электрического (а, в) и магнитного (б, г) поля: а, б – максимальные значения; в, г – средние значения; 1 – ТС 25 с ВГ; 2 – ТС 25 на основной частоте; 3 – ТС 2×25 с ВГ; 4 – ТС 2×25 на основной частоте

Таблица 4.1

#### Напряженности электрического и магнитного поля СТЭ

Параметр	СТЭ 25		СТЭ 2×25		Различие, %	
	50 Гц	ВГ	50 Гц	ВГ	25	2×25
max( $E_{max}$ )	3.83	4.07	2.52	2.64	6	5
max( $H_{max}$ )	41.8	45.4	53.5	51.2	9	-4
mid( $E_{max}$ )	3.36	3.88	2.33	2.54	15	9
mid( $H_{max}$ )	23.5	28.6	22.6	26.6	22	18



На рисунках 4.8 и 4.9 приведены годографы векторов напряженности поля, а также зависимости напряженности от времени.

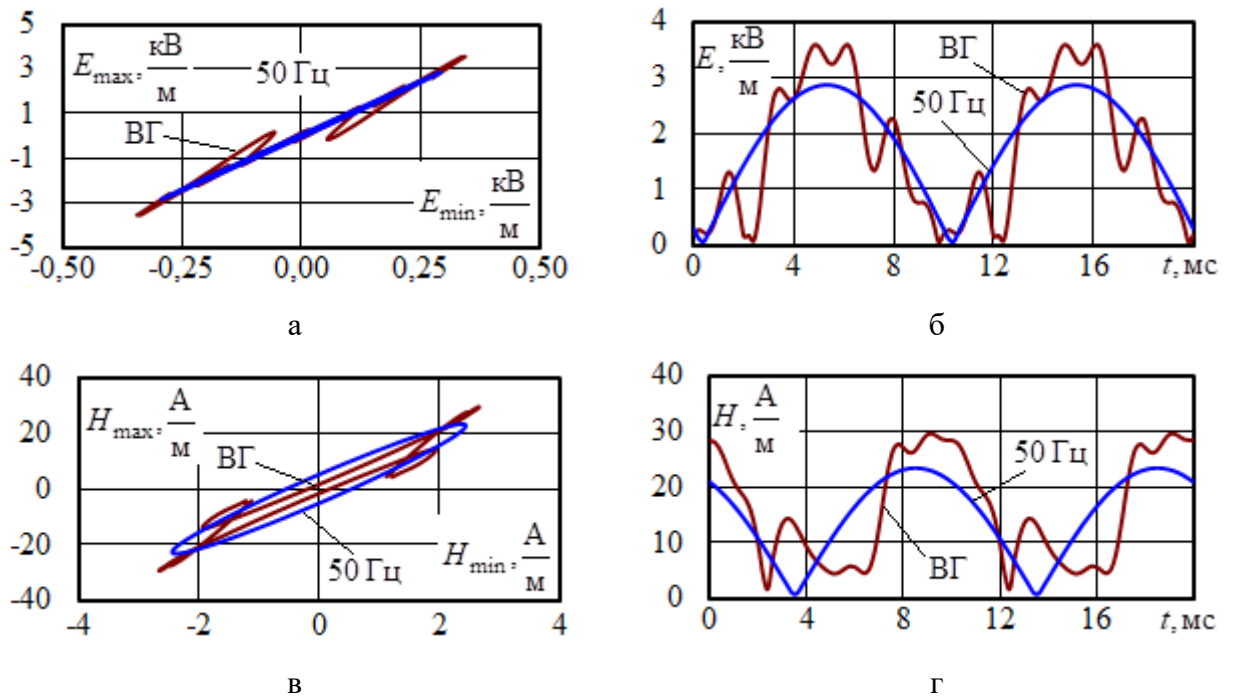


Рисунок 4.8. Годографы (а, в) и динамика (б, г) напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей СТЭ 25 кВ

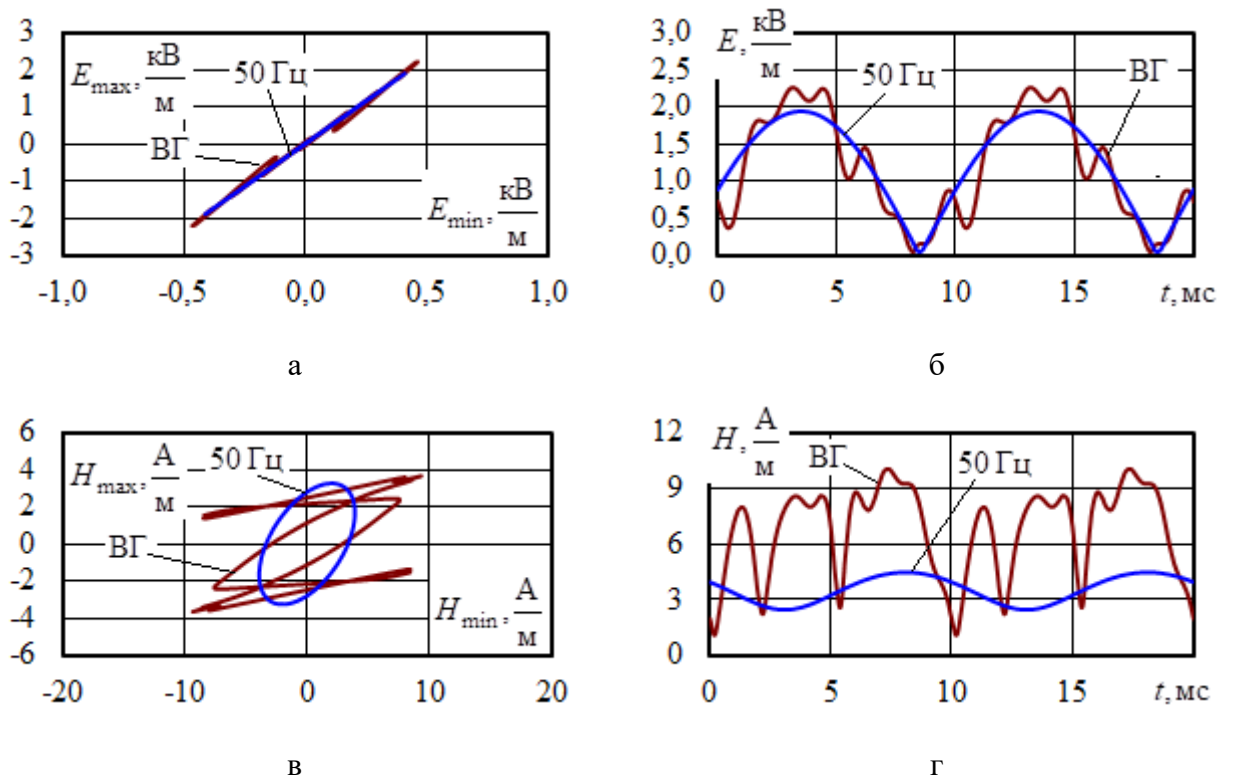


Рисунок 4.9. Годографы (а, в) и динамика (б, г) напряженности электрического (а, б) и магнитного (в, г) полей СТЭ 2x25 кВ

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

1) Значения напряженности электрического и магнитного полей СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ находятся в допустимых пределах для электротехнического персонала как на основной частоте, так и с учетом высших гармоник.

2) Высшие гармоники приводят к значительным изменениям зависимостей напряженностей электрического и магнитного поля электроустановок от времени и, как следствие, к изменению уровней напряженностей.

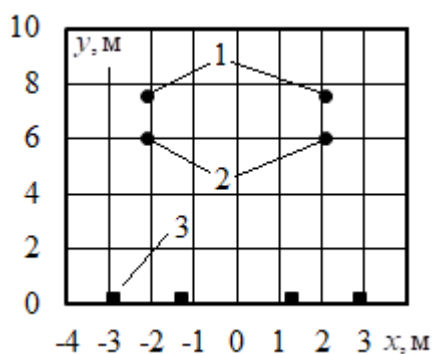
3) При рассматриваемом режиме работы максимальное значение напряженности электрического поля с учетом высших гармоник увеличилось на 6 и 5 % соответственно для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ. Аналогичный параметр магнитного поля для системы тяги 25 кВ увеличился на 9 %, для 2×25 кВ уменьшился на 4 %.

4) Экстремумы усредненных за время моделирования значений напряженности электрического поля увеличились на 9...15 %, магнитного – 18...22 %, где первое число соответствует СТЭ 2×25 кВ, второе – СТЭ 25 кВ.

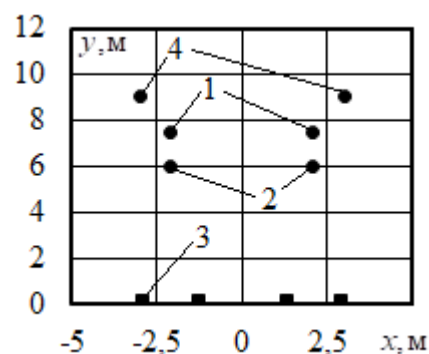
#### **4.2 Тяговая сеть повышенного напряжения**

Расчеты проводились для двухпутного участка контактной сети длиной 40 км, по которому осуществлялся пропуск двух поездов массой 6150 т в четном направлении и такого же количества в нечетном. Токовые профили пути и график движения поездов представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

Для моделирования были выбраны следующие системы тягового электроснабжения: 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ. Также для проведения сравнительного анализа систем повышенного напряжения была рассмотрена СТЭ 25 кВ. На рисунке 4.12 показано расположение токоведущих частей исследуемых тяговых сетей.



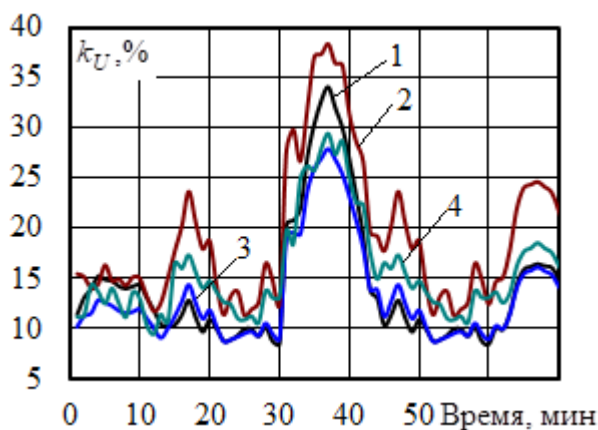
а



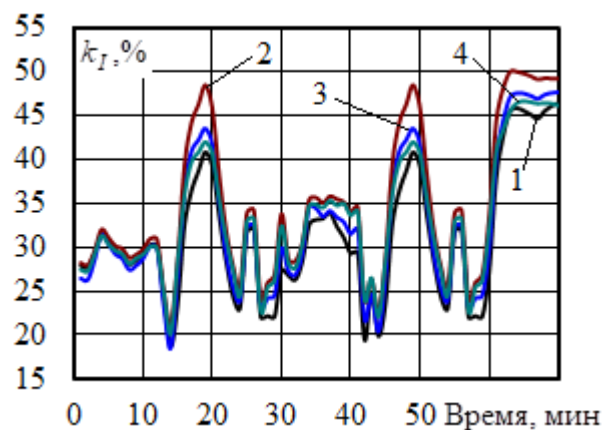
б

**Рисунок 4.10. Расположение токоведущих частей:** а – ТС 25 кВ и ТС 50 кВ;  
б – 2×50 кВ и 50+110 кВ; 1 – несущий трос; 2 – контактный провод; 3 – рельс  
4 – питающий провод;

Полученные результаты имитационного моделирования, приведенные на рисунке 4.11, показывают наличие значительной доли высших гармоник в тяговой сети.



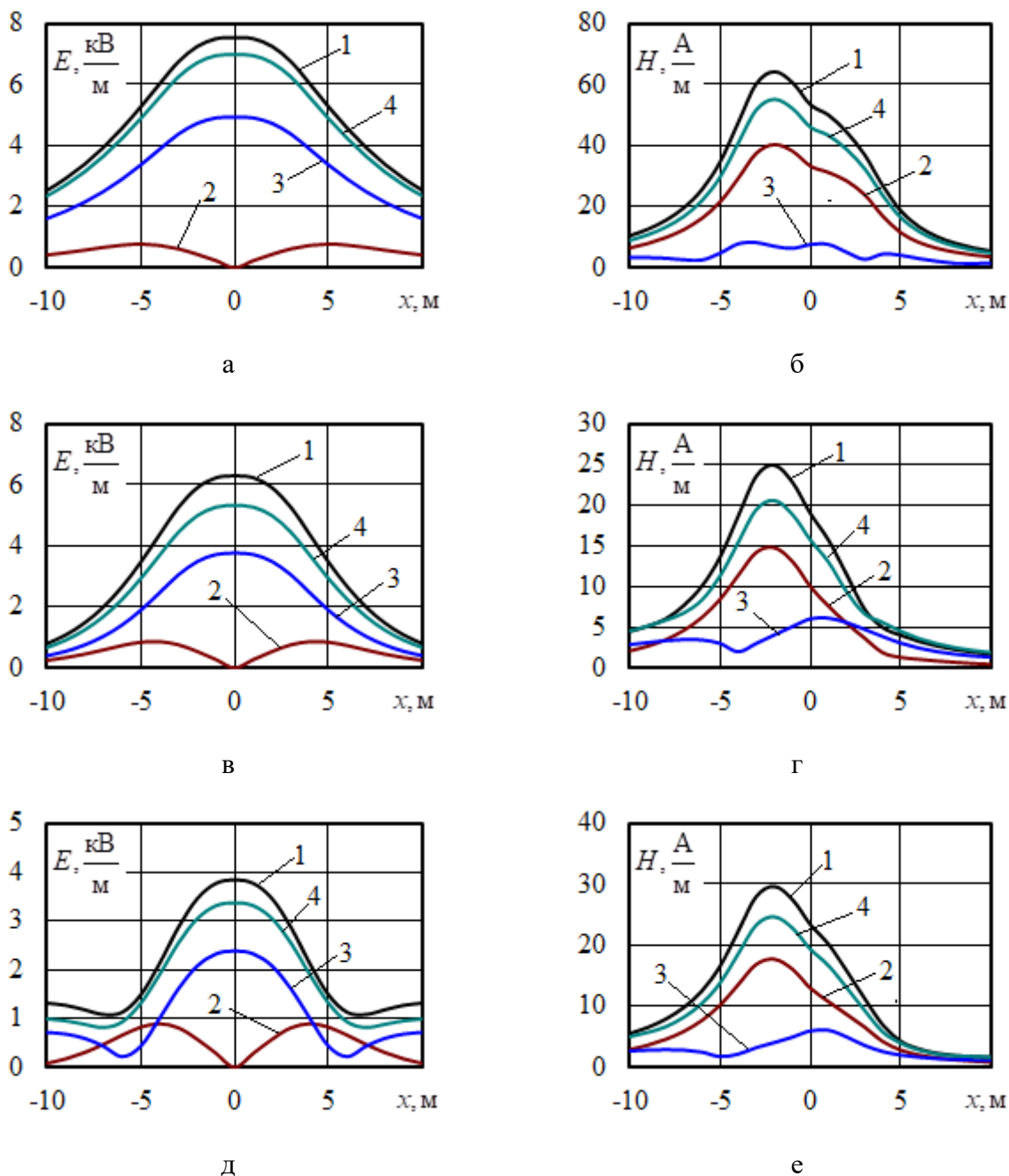
а



б

**Рисунок 4.11. Зависимости суммарных коэффициентов гармоник тока (б) и напряжения (а) от времени моделирования для СТЭ:** 1 – ТС 25 кВ; 2 – ТС 50 кВ;  
3 – 2×50 кВ; 4 – 50+110 кВ

Зависимости максимальных значений напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 метра от значения координаты  $x$  для рассматриваемых СТЭ показаны на рисунке 4.12.

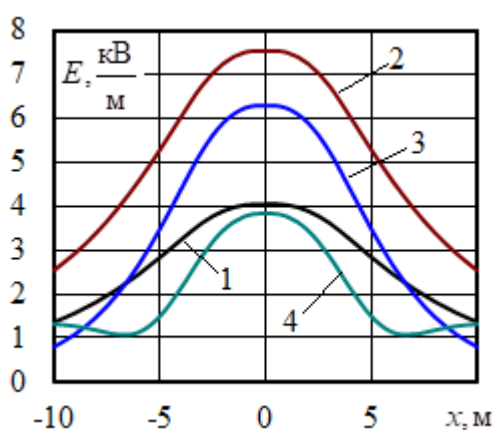


**Рисунок 4.12 – Составляющие напряженности электрического (а, в, д) и магнитного (б, г, е) поля тяговых сетей: а, б – 50 кВ; в, г – 2×50 кВ; д, е – 50+110 кВ; 1 – амплитудные значения; 2 – составляющая  $x$ ; 3 – составляющая  $y$ ; 4 – амплитудные значения без учета ВГ**

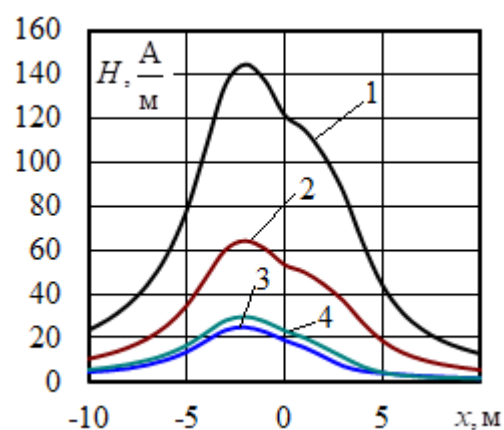
Максимальные амплитудные значения напряженностей сведены в таблицу 4.2. На рисунке 4.13 и в таблице 4.3 приводится сравнение суммарных векторов напряженности. На рисунке 4.14 показаны зависимости значений напряженности от времени в точке  $x = 2$  метра на 40 минуте моделирования.

## Результаты моделирования ЭМП

Пар-р	На основной частоте				С учетом ВГ				Различие, %			
	25	50	2×50	50+110	25	50	2×50	50+110	25	50	2×50	50+110
$E_{\max}$ , кВ/м	3,8	6,9	5,3	3,4	4,1	7,5	6,3	3,8	6,1	7,9	18,3	13,9
$H_{\max}$ , А/м	124,1	55,2	20,6	24,7	144,5	64,2	24,9	29,6	16,4	16,4	21,1	20,2



а

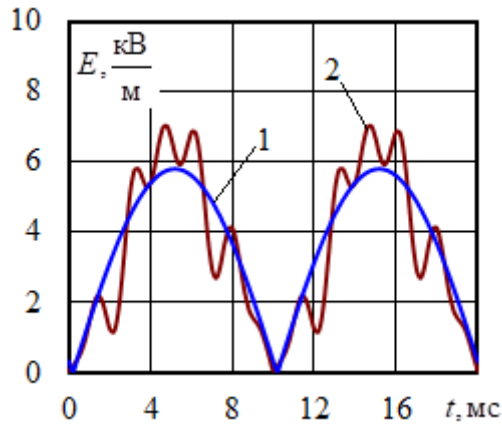


б

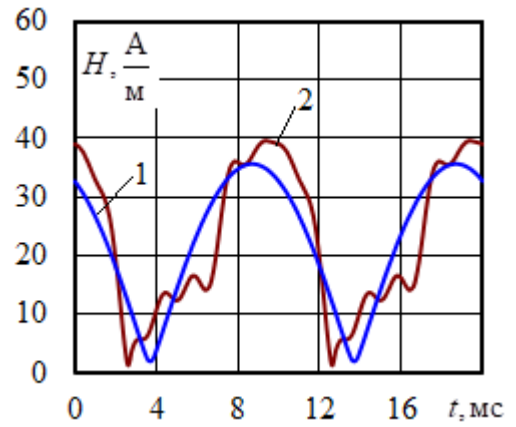
Рисунок 4.13. Сравнение амплитудных значений напряженности электрического (а) и магнитного (б) поля СТЭ на высоте 1,8 метра: 1 – 25 кВ; 2 – 50 кВ; 3 – 2×50 кВ; 4 – 50+110 кВ

## Сравнение результатов расчета ЭМП с учетом ВГ

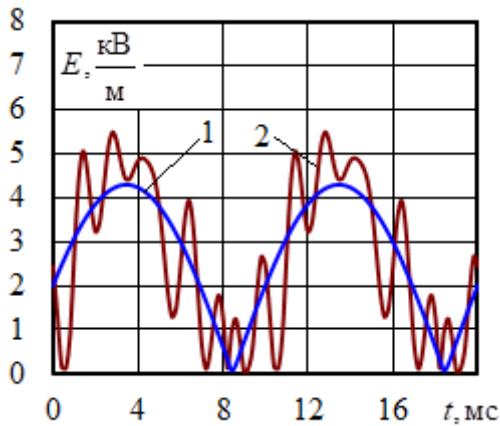
Параметр	СТЭ				Различие, %		
	25	50	2×50	50+110	Между 2 и 3	Между 2 и 4	Между 2 и 5
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
$E_{\max}$ , кВ/м	4,1	7,5	6,3	3,8	-86,2	-55,5	5,2
$H_{\max}$ , А/м	144,5	64,2	24,9	29,6	55,6	82,8	79,5



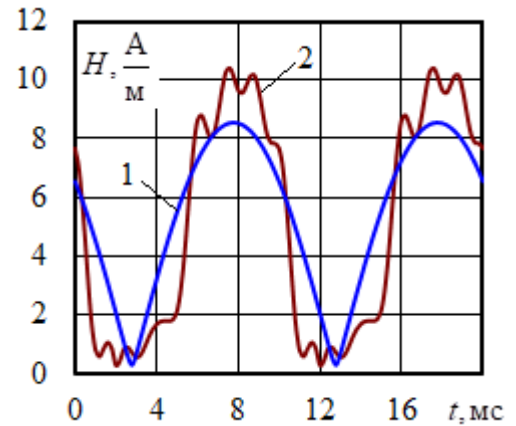
а



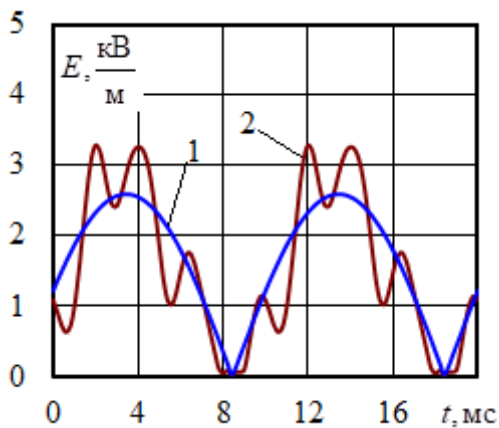
б



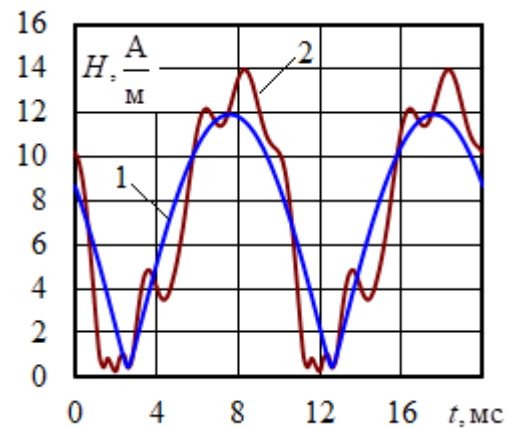
в



г



д



е

**Рисунок 4.14.** Зависимости напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей от времени: а, б – 50 кВ; в, г –  $2 \times 50$  кВ; д, е –  $50 + 110$  кВ; 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

По результатам расчета можно сделать следующие выводы:

- 1) Значения напряженности электрического и магнитного полей СТЭ

повышенного напряжения на основной частоте находятся в допустимых пределах для электротехнического персонала.

2) Учет высших гармоник СТЭ 50 кВ приводит к увеличению напряженности электрического поля на 8 % до значения 7,5 кВ/м, что превышает допустимый уровень. Также данный параметр для СТЭ 2×50 кВ и 50+110 кВ, соответственно, увеличивается на 18 % и 14 %, однако не приводит к нарушению допустимых значений.

3) Аналогичный параметр для магнитного поля в результате учета ВГ увеличивается на 16%, 21% и 20% для СТЭ 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ и не достигает предельно допустимого уровня.

4) Рассмотренная методика моделирования электромагнитных полей с учетом высших гармоник позволяет уточнить результаты расчетов, а также определить динамику напряженности в заданной точке.

### **4.3 Трехфазная тяговая сеть**

Важным фактором, ограничивающим пропускную способность железнодорожных магистралей, является применяемая система тягового электроснабжения [117]. В качестве одного из перспективных направлений развития ТС можно рассматривать переход от однофазных конструкций к трехфазным [64, 127]. Для реализации трехфазной СТЭ требуется анализ различных факторов, в том числе и условий электромагнитной безопасности [14, 42].

Для расчета ЭМП с учетом высших гармоник необходима информация о применяемых на подвижном составе схемах выпрямления. Ввиду ограниченности полезного объема локомотива можно ожидать, что для трехфазной ТС будет применяться шестипульсовая мостовая схема выпрямительно-инверторного блока, обладающая хорошим коэффициентом использования трансформаторной мощности при сравнительно низком уровне генерируемых в тяговую сеть гармоник [64].

Моделирование проводилось для межподстанционной зоны (МПЗ) разбитой на два участка по 25 км [47, 99]. Участки приняты двухпутными, а расположение токоведущих частей показано на рисунке 4.15. Питание МПЗ осуществлялось от двух тяговых подстанций. Часть схемы расчетной модели показана на рисунке 4.16.

По участкам осуществлялся пропуск двух поездов массой 6150 т в каждом направлении с межпоездным интервалом в 30 минут. График движения и токовые профили представлены на рисунках 4.1 и 4.2.



Рисунок 4.15. Расположение токоведущих частей трехфазной тяговой сети

Результаты представлены в таблице 4.4 и на рисунках 4.17 – 4.18. Для проведения сравнительного анализа проведены расчеты на основной частоте, а также выполнено моделирование для традиционной системы тягового электроснабжения 25 кВ. Напряженности ЭМП определялись на нормативной высоте 1,8 м.

Таблица 4.4

Результаты моделирования ЭМП при движении поездов

Параметр	без ВГ		с ВГ		Различие, %			
	25 кВ	Трехфа зная	25 кВ	Трехфа зная	Между 2 и 3	Между 4 и 5	Между 2 и 4	Между 3 и 5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\max(E_{\max})$ , кВ/м	3,75	4,25	3,82	4,27	-13,3	-11,8	-1,9	-0,5
$\max(H_{\max})$ , А/м	138,0	75,0	120,1	80,0	45,7	33,4	12,9	-6,7
$\text{mid}(E_{\max})$ , кВ/м	3,53	4,15	3,71	4,17	-17,6	-12,4	-5,1	-0,5
$\text{mid}(H_{\max})$ , А/м	66,9	25,3	66,2	26,6	62,2	59,8	1,1	-5,1



На рисунках 4.16, 4.17 представлены зависимости распределения напряженностей электрического и магнитного полей в сечении тяговой сети

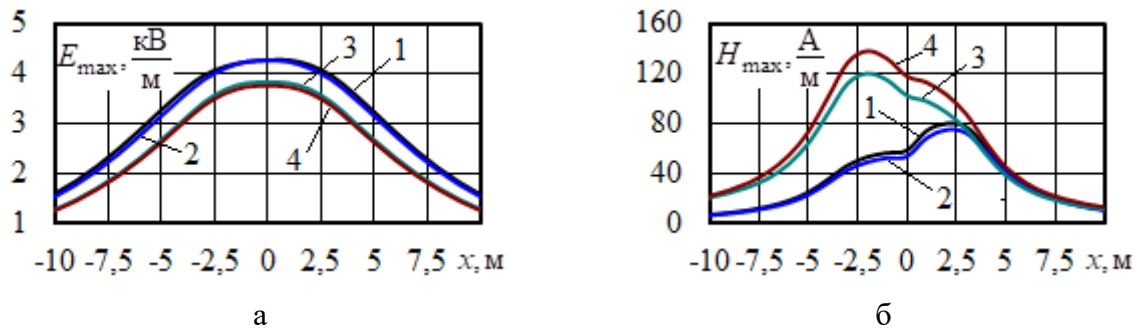


Рисунок 4.16. Максимальные амплитудные значения напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте

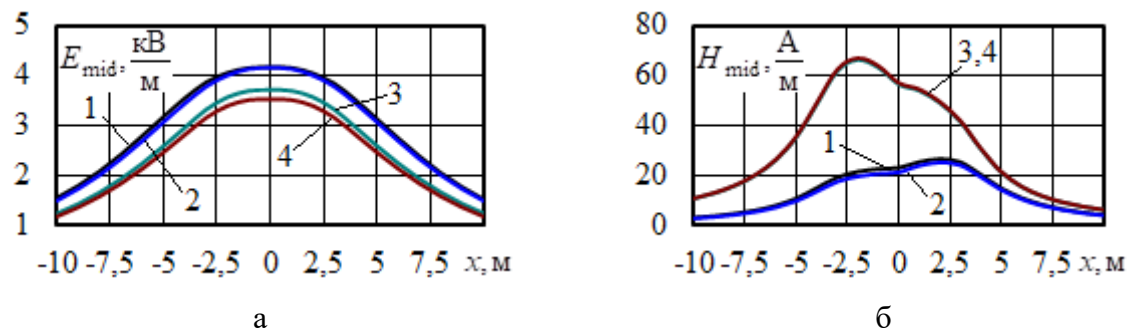


Рисунок 4.17. Средние значения амплитуд напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте

По рисункам 4.16 и 4.17 определены точки с наибольшими величинами напряженностей. Для этих точек построены временные зависимости, представленные на рисунках 4.18 – 4.20.

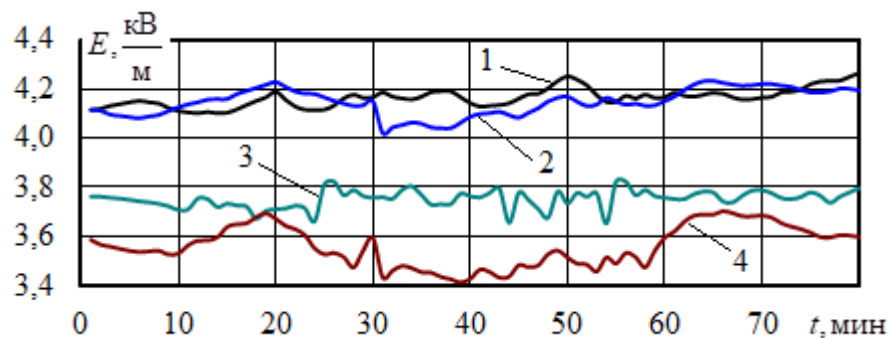
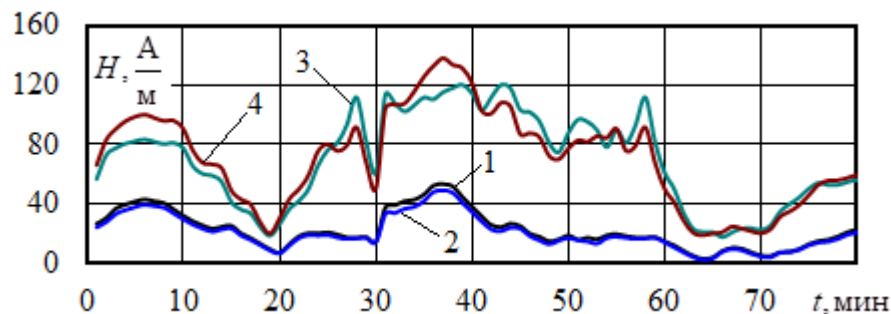
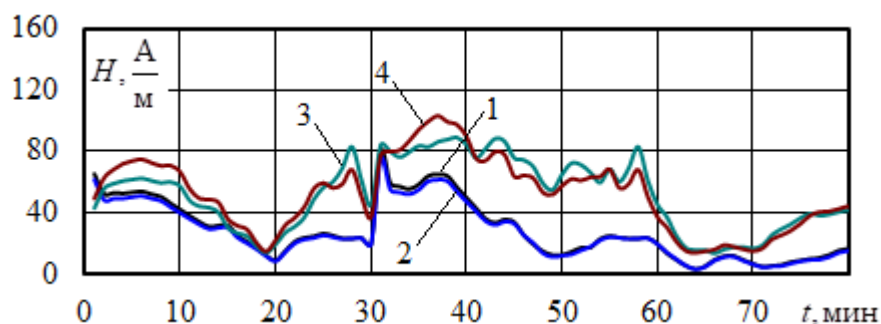


Рисунок 4.18. Временные зависимости амплитуд напряженностей ЭП в точке с координатой  $x = 0$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте



**Рисунок 4.19.** Временные зависимости амплитуд напряженностей МП в точке с координатой  $x = -2$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте



**Рисунок 4.20.** Временные зависимости амплитуд напряженностей МП в точке с координатой  $x = 2$  м: 1 – трехфазная с ВГ; 2 – трехфазная на основной частоте; 3 – типовая с ВГ; 4 – типовая на основной частоте

На основе результатов моделирования можно сделать следующие выводы:

1. По сравнению с типовой СТЭ 25 кВ трехфазная ТС создает повышенные напряженности электрического поля. Однако уровни МП в трехфазной сети заметно снижаются.

2. Так как трехфазная ТС по сравнению с однофазной отличается пониженными уровнями гармонических искажений, то при учете ВГ напряженности электрического поля изменяется незначительно. Максимальные и средние значения напряженности магнитного поля увеличиваются, соответственно, на 7 и 5 %. Изменение аналогичных параметров для электрического поля однофазной тяговой сети 25 кВ составило 11,8 и 12,4 %, а



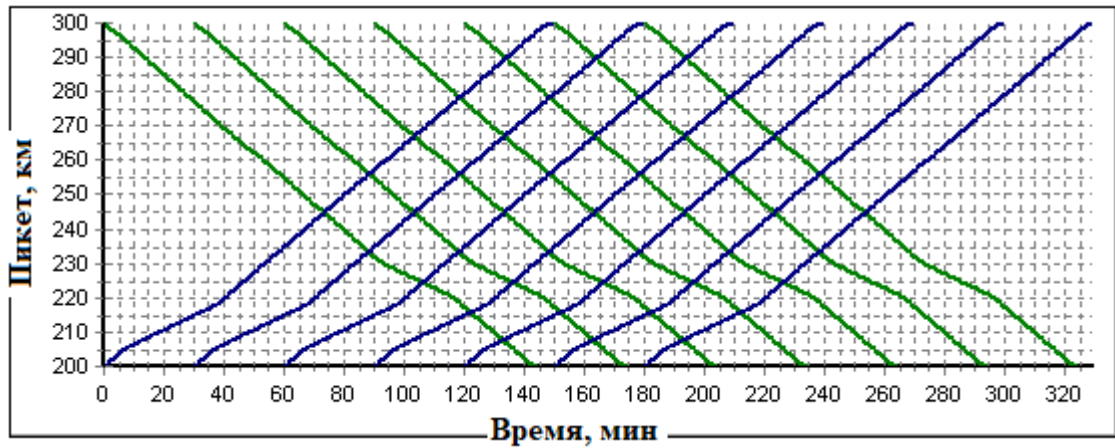


Рисунок 4.22. График движения поездов

Горно-перевальный участок железной дороги с перевалом на пикете 219 км создает большое токопотребление в соответствии с рисунком 4.23. Рисунок 4.24 отображает положение проводов ЛЭП 3 в поперечном сечении.

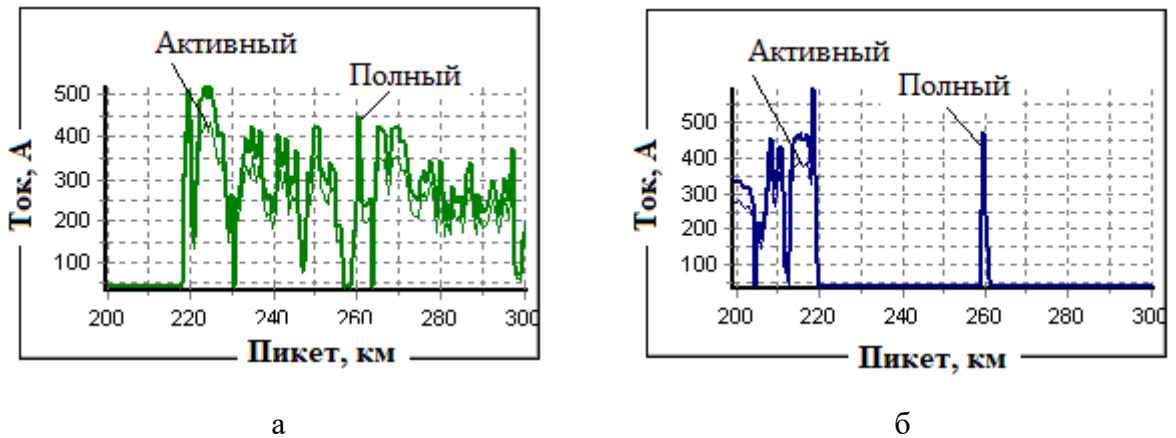


Рисунок 4.23. Токовые профили поездов: а – нечетное направление;  
б – четное направление

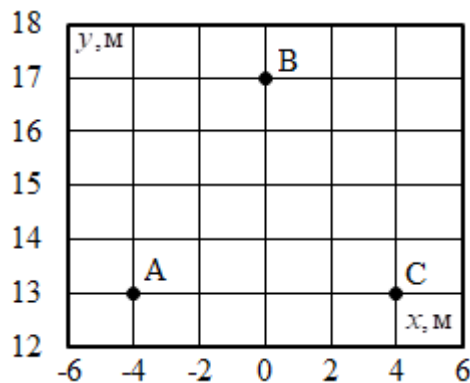
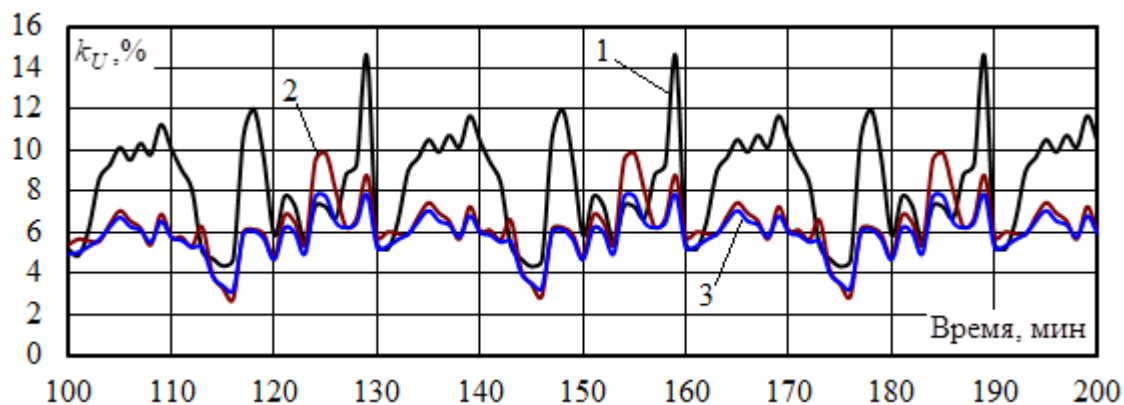
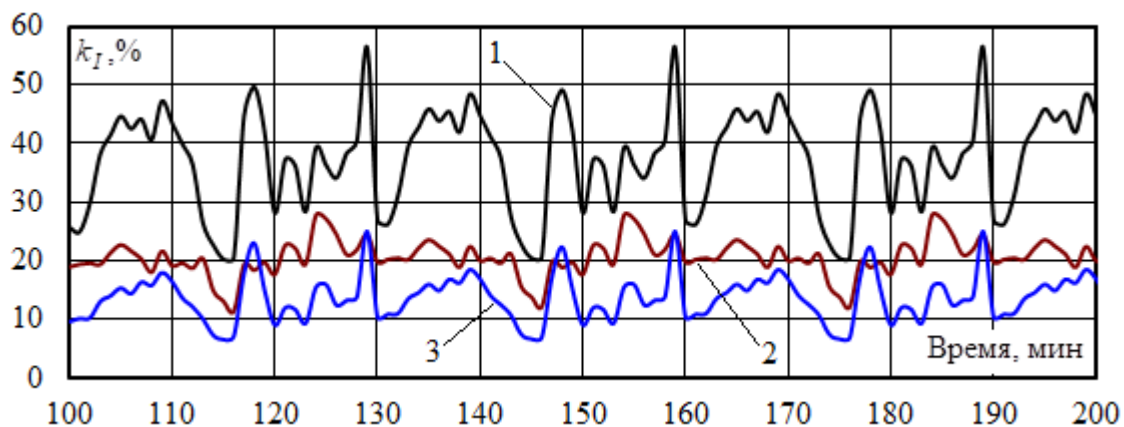


Рисунок 4.24. Координаты токоведущих частей

В результате моделирования режимов при движении поездов получены зависимости суммарных коэффициентов гармоник напряжений и токов на отправном конце ЛЭП 3, питающей справа вторую подстанцию. На рисунках 4.25 и 4.26 показаны зависимости в интервале от 100-й до 200-й мин, когда участок железной дороги полностью заполнен поездами.

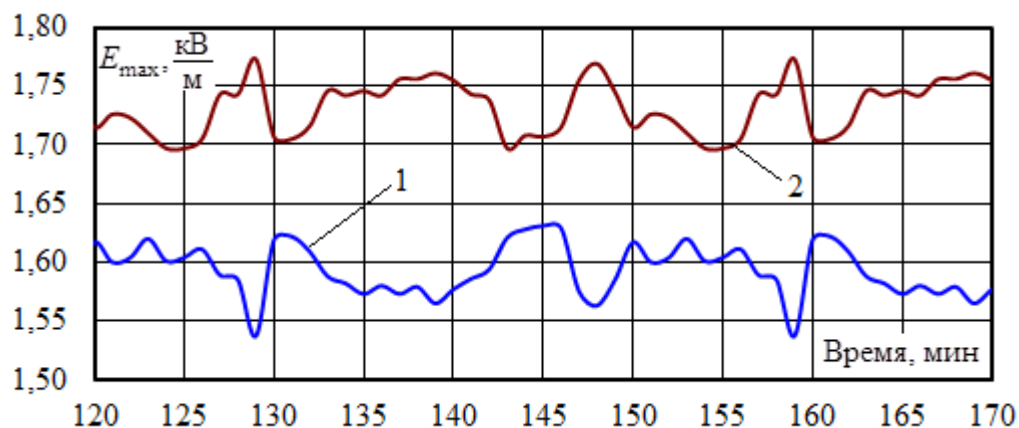


**Рисунок 4.25. Временные зависимости суммарных коэффициентов гармоник напряжения: 1 – фаза А; 2 – фаза В; 3 – фаза С**

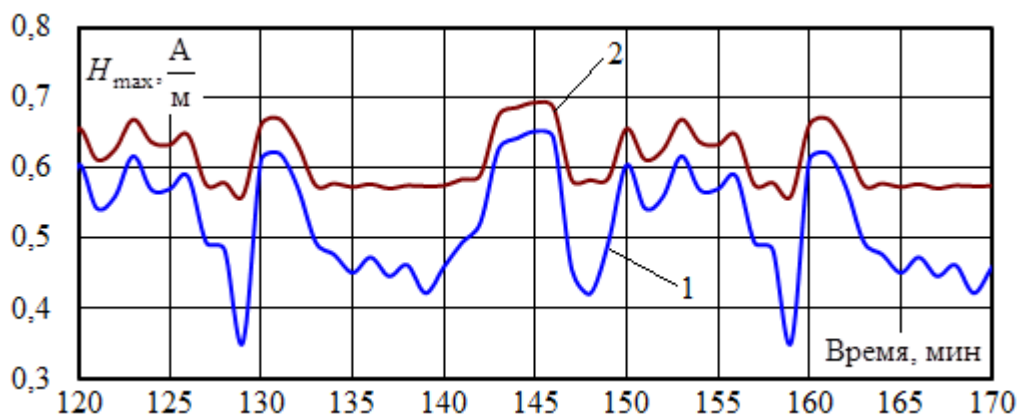


**Рисунок 4.26. Временные зависимости суммарных коэффициентов гармоник тока: 1 – фаза А; 2 – фаза В; 3 – фаза С**

Амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей на высоте 1,8 м представлены на рисунках 4.27, 4.28; напряженности электрического поля вычислялись в точке с координатами  $x = -8$  м;  $y = 1,8$  м, а для магнитного использовались координаты  $x = 2$  м,  $y = 1,8$  м.



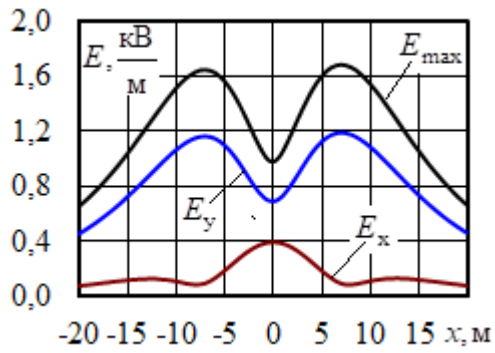
**Рисунок 4.27.** Временные зависимости амплитуд напряженностей электрического поля, создаваемых ЛЭП в точке с координатами  $x = -8$  м,  $y = 1,8$  м: 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ



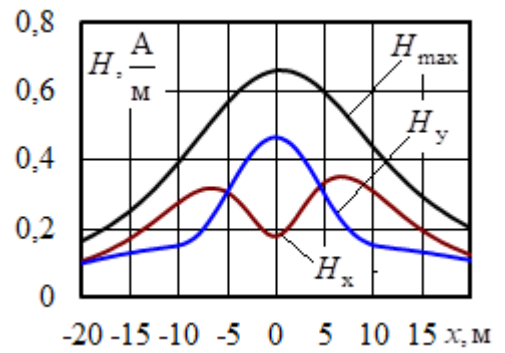
**Рисунок 4.28.** Временные зависимости амплитуд напряженностей магнитного поля, создаваемых ЛЭП в точке с координатами  $x = 2$  м,  $y = 1,8$  м: 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

Кроме того, на рисунке 4.29 приведены зависимости максимумов составляющих напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$ ; максимумы рассчитывались для интервала времени 100...200 мин.

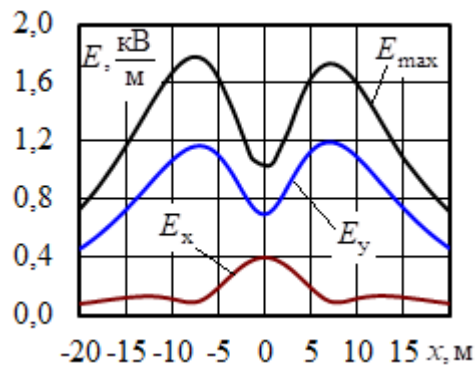
Для 165-й минуты моделирования построены годографы векторов напряженностей ЭМП, представленные на рисунке 4.30. На рисунке 4.31 показаны формы кривых абсолютных значений напряженностей ЭМП, которые в связи с поляризацией не принимают нулевых значений в течение периода.



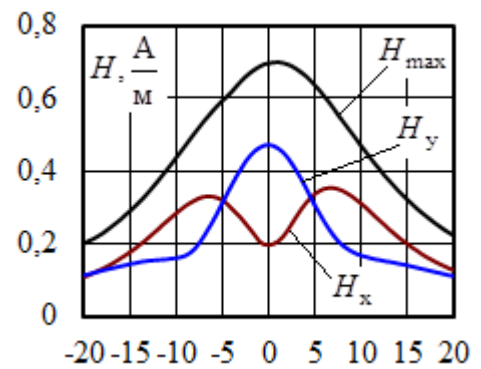
а



б

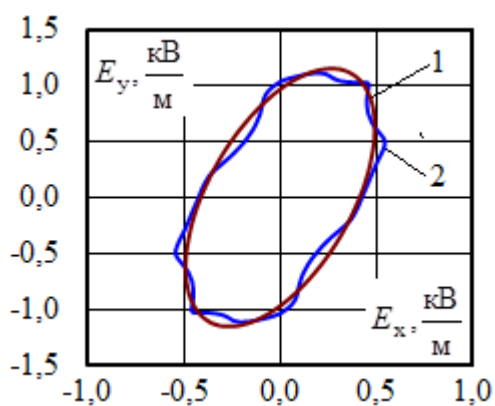


в

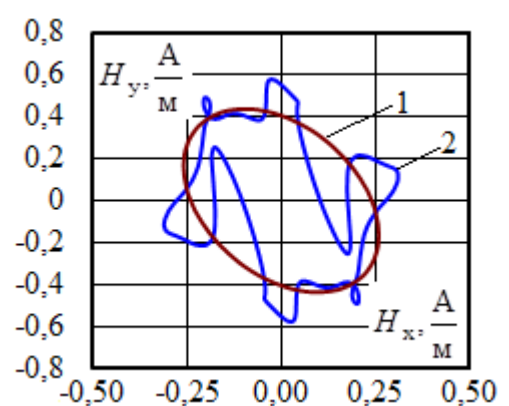


г

**Рисунок 4.29.** Зависимости максимумов составляющих напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$ : а, в – электрическое поле; б, г – магнитное поле; а, б – для основной частоты; в, г – с учетом ВГ

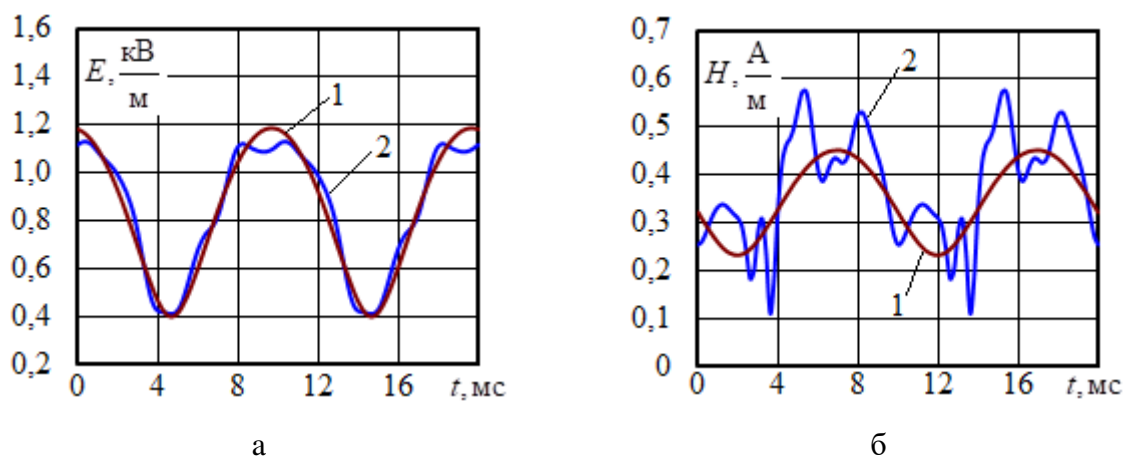


а



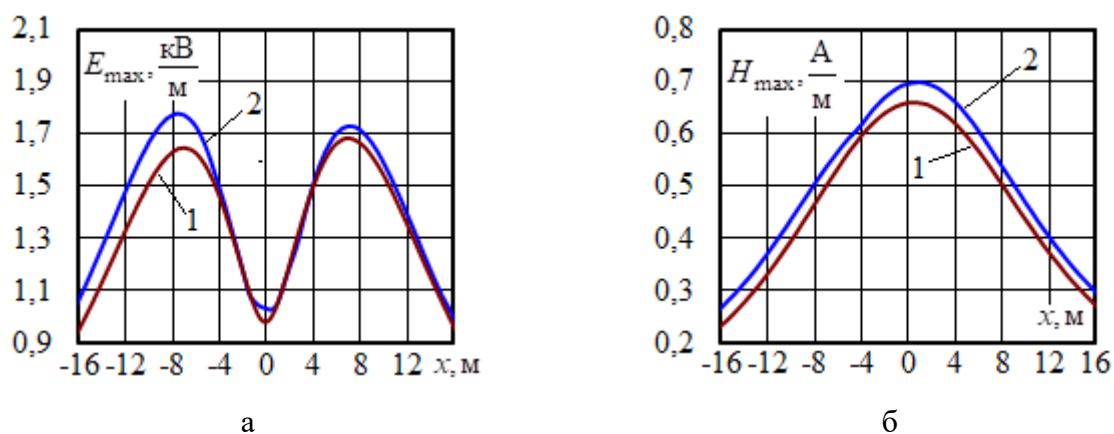
б

**Рисунок 4.30.** Годографы векторов напряженности ЛЭП на 165-й минуте моделирования в точке с координатами  $x = 2$  м,  $y = 1,8$  м: а – электрическое поле; б – магнитное поле; 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ



**Рисунок 4.31.** Формы кривых напряженностей на 165-й минуте моделирования в точке с координатами  $x = 2$  м,  $y = 1,8$  м: а – электрическое поле; б – магнитное поле; 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

На рисунке 4.32 представлены сравнительные зависимости максимумов амплитуд напряженностей. Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП ЛЭП приведены в таблице 4.5.



**Рисунок 4.32.** Зависимости максимумов амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$ : а – электрическое поле; б – магнитное поле; 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

Временные зависимости параметров  $k_U$ ,  $k_I$ , приведенные на рисунке 4.29, показывают, что рассматриваемые режимы отличаются значительными уровнями гармонических искажений токов и напряжений. Максимумы величин  $k_U$ ,  $k_I$  в интервале времени 100...200 мин отвечают фазе А и достигают соответственно 15 и 57 %.



Рисунки 4.30, 4.31 демонстрируют существенную вариабельность параметров несинусоидальности и напряженностей ЭМП, связанную с движением поездов. Максимумы амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей ЛЭП, рассчитанные с учетом ВГ, выше аналогичных показателей для поля основной частоты на 6 % (таблица 4.5). Аналогичные показатели средних значений электрического поля равны 4 %, а магнитного – 18%.

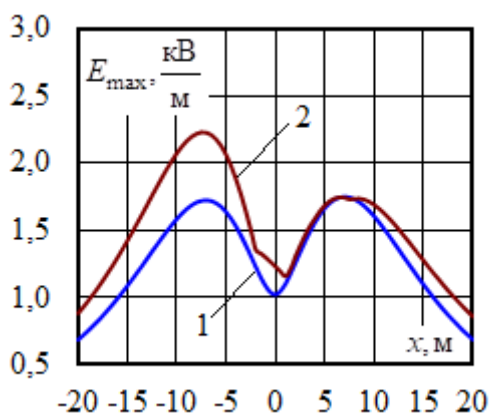
Годографы векторов напряженностей ЭМП показывают искажения эллипсов из-за влияния высших гармоник токов и напряжений. Такие же искажения наблюдается и на формах кривых амплитудных значений поля в течение периода основной частоты, показанных на рисунке 4.31.

Таблица 4.5

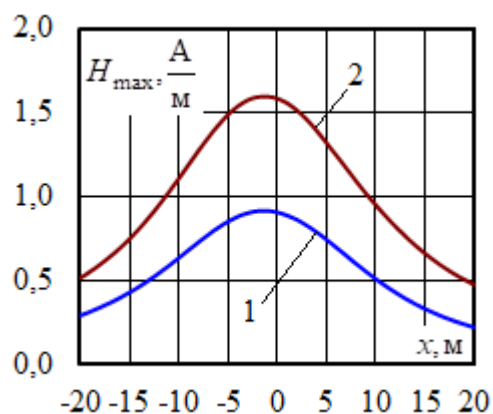
**Максимальные и средние значения амплитуд напряженностей ЭМП ЛЭП**

Элемент сети	Поле	Показатель	Без учета ВГ	С учетом ВГ	Различие величин в столбцах 4 и 5, %
1	2	3	4	5	6
ЛЭП	Электрическое, кВ/м	Максимум	1,68	1,78	5,58
		Среднее	1,67	1,74	4,21
	Магнитное, А/м	Максимум	0,66	0,70	5,91
		Среднее	0,54	0,63	17,6

На рисунке 4.33 показаны зависимости максимумов амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$  для режима отсутствия транзитных нагрузок, подключенных на шинах 220 кВ опорной подстанции ОПС 2; при этом увеличиваются гармонические искажения токов и напряжений в сети 220 кВ и возрастают различия величин напряженностей, рассчитанных для основной частоты и с учетом высших гармоник. Эти различия достигают 27 % для электрического поля и 74 % для магнитного.



а

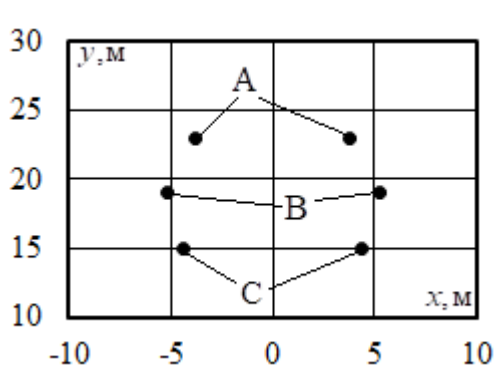


б

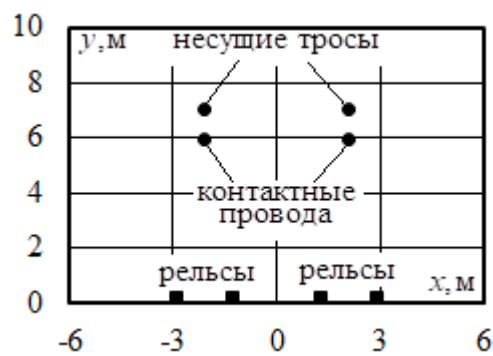
**Рисунок 4.33. Зависимости максимумов амплитуд напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$  для режима отключения транзитных нагрузок ОПС 2:**

а – электрическое поле; б – магнитное поле; 1 – для основной частоты; 2 – с учетом ВГ

Также была рассмотрена схема тягового и внешнего электроснабжения участка одной из магистральных железных дорог Восточной Сибири, включающая 39 подстанции внешней сети и 31 тяговые подстанции. Модель данного участка состоит из 1969 узлов и 10185 ветвей. Осуществлялся пропуск 91 поезда в каждом направлении с интервалом 15 минут, масса поездов четного направления 5590 т, нечетного – 2550 т. Время хода каждого поезда составляет более 1300 минут. Ниже представлены результаты моделирования напряженности электромагнитного поля для тяговой сети и линии электропередачи, примыкающих справа к ТП 7 (рисунок 4.35), на рисунке 4.34 показано расположение токоведущих частей данных элементов.

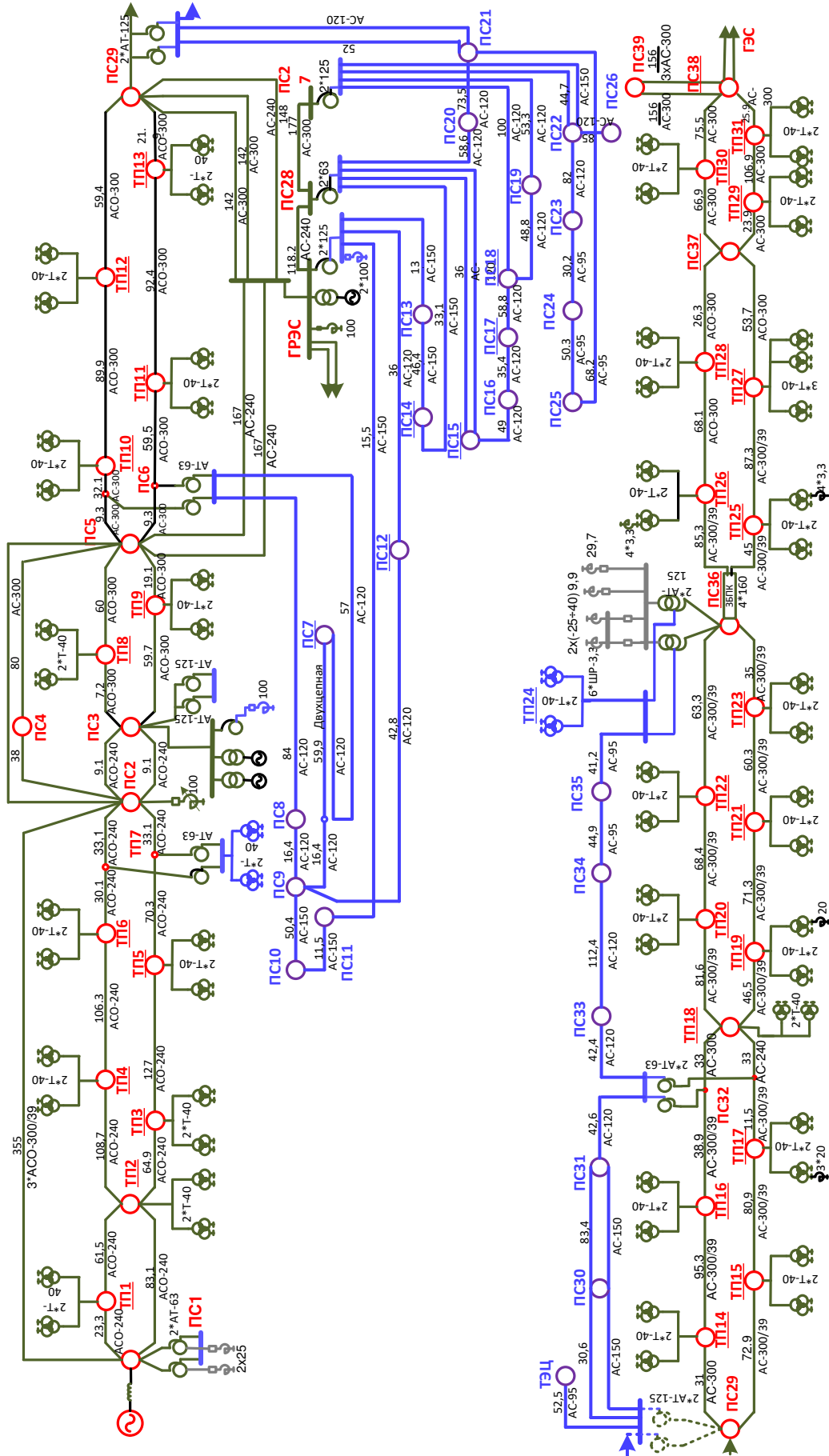


а

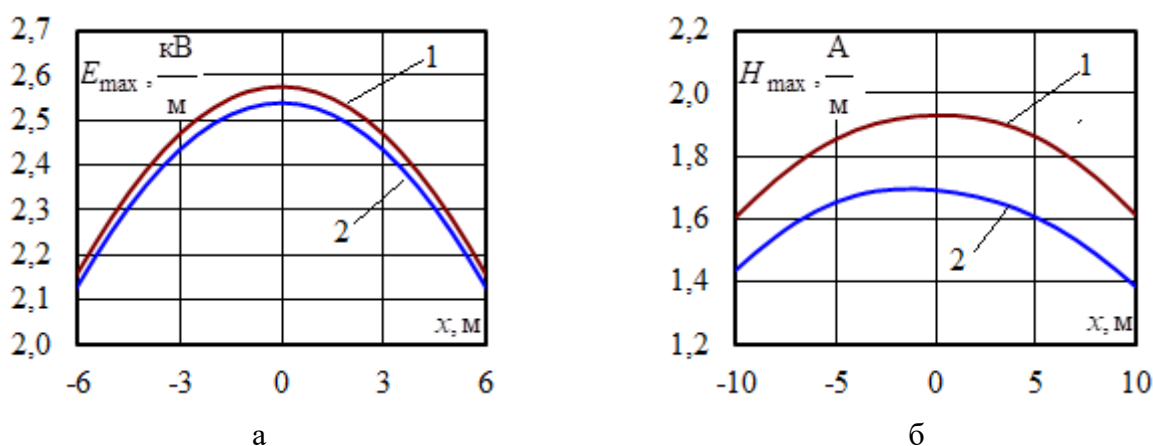


б

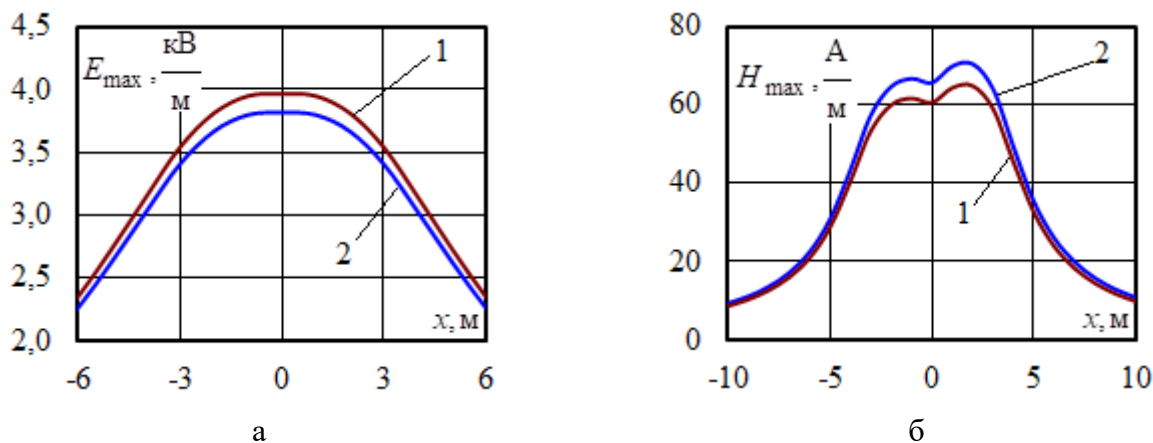
**Рисунок 4.34. Расположение токоведущих частей ЛЭП (а) и ТС (б)**



Моделирование осуществлялось для основной частоты и с учетом высших гармоник. На рисунках 4.36 и 4.37 показано сравнение максимальных значений напряженностей электрического и магнитного полей у поверхности земли на высоте 1,8 метров. Горизонтальная координата в сечении линии электропередачи (тяговой сети) изменялась от  $-10$  до  $10$  метров, где ноль соответствовал оси ЛЭП (ТС).

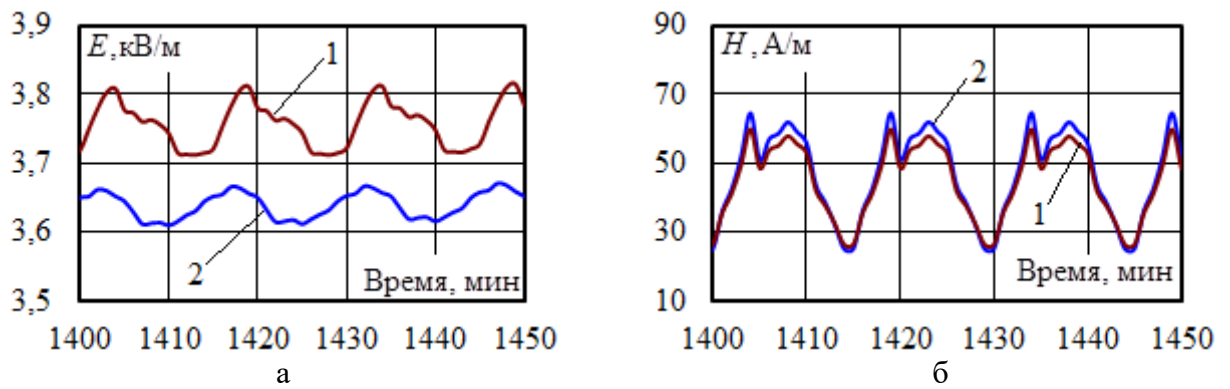


**Рисунок 4.36. Распределение напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте**

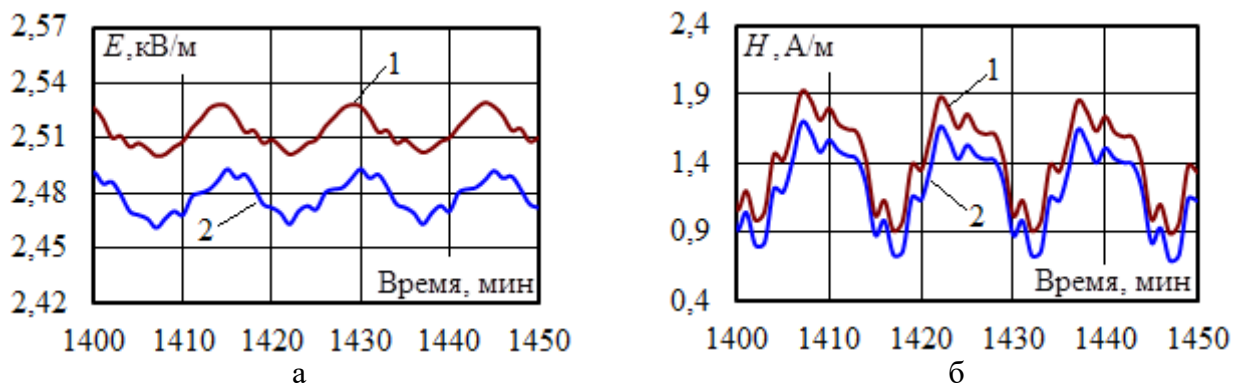


**Рисунок 4.37. Распределение напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ТС: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте**

Для каждой координаты в сечении системы определена временная зависимость, на рисунках 4.38 и 4.39 приведены зависимости напряженностей для координаты  $x = -2$  метра, представленный временной диапазон отвечает полной загруженности участка.

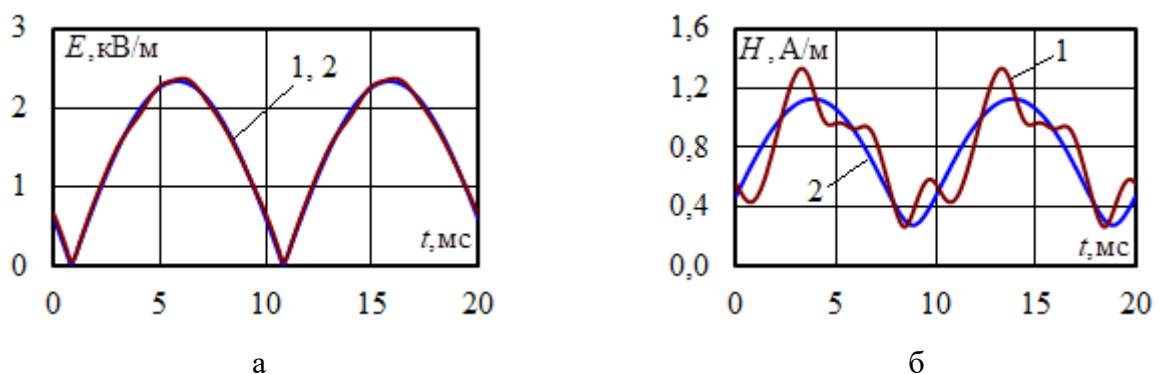


**Рисунок 4.38.** Зависимости значений напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП от времени: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте

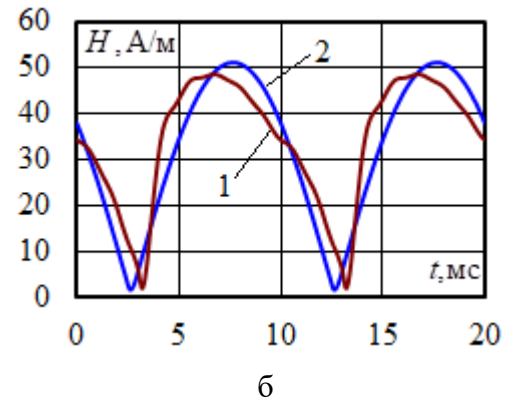
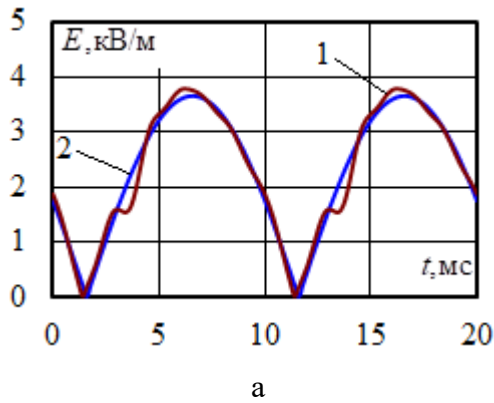


**Рисунок 4.39** – Зависимости значений напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ТС от времени: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте

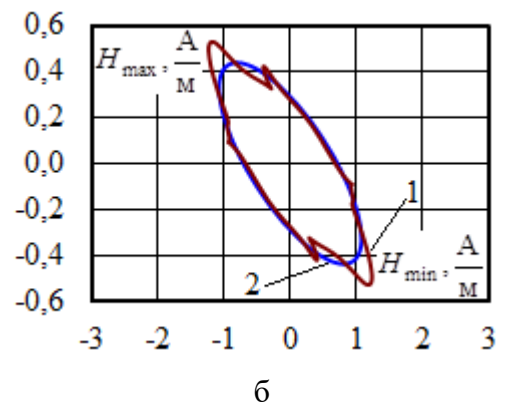
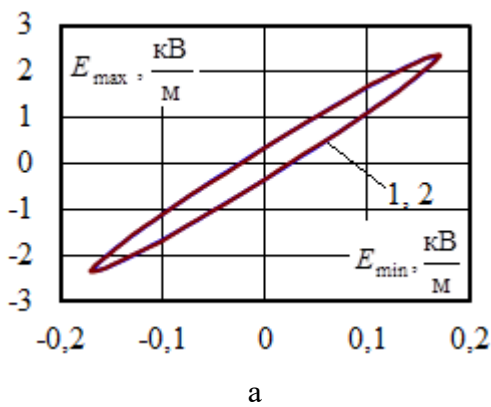
Для момента времени на 1420 минуте в точке  $x = -2$  метра получены формы кривых напряженностей, а также годографы векторов (рисунки 4.40 – 4.43).



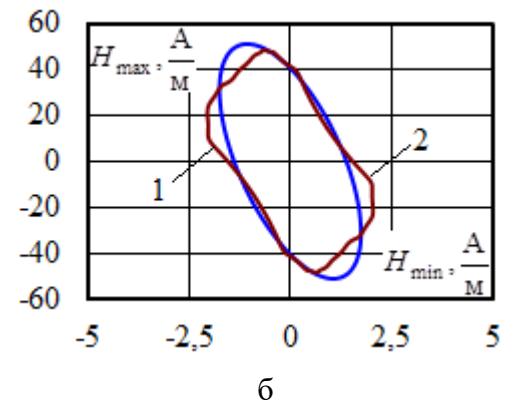
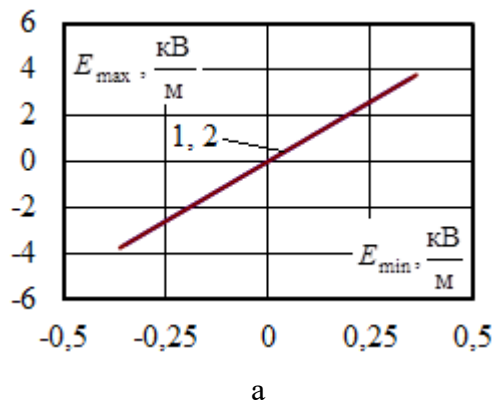
**Рисунок 4.40.** Формы кривых напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ЛЭП: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте



**Рисунок 4.41.** Формы кривых напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей ТС: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте



**Рисунок 4.42.** Годографы вектора напряженности электрического и магнитного полей ЛЭП: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте



**Рисунок 4.43.** Годографы вектора напряженности электрического и магнитного полей ТС: 1 – с учетом высших гармоник; 2 – на основной частоте

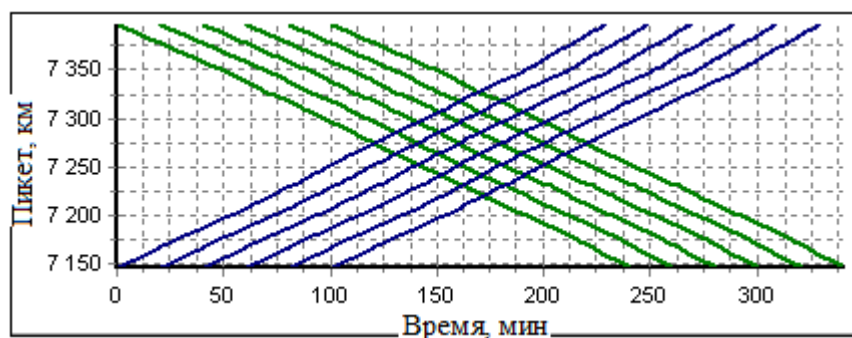
Результаты моделирования показали изменение уровней напряженностей ЭМП тяговых сетей и ЛЭП при учете гармонических искажений. Вблизи тяговой сети максимальные значения напряженности электрического поля при

расчете на основной частоте оказались ниже на 4 %, значения напряженности магнитного поля – больше на 8 %. Для рассматриваемой линии электропередачи изменения напряженности электрического поля в результате учета высших гармоник оказались незначительны, однако напряженность магнитного поля увеличилась на 14 %, кроме того, полученные формы кривых и годографы векторов напряженности магнитного поля демонстрируют значительные искажения в результате воздействия высших гармоник.

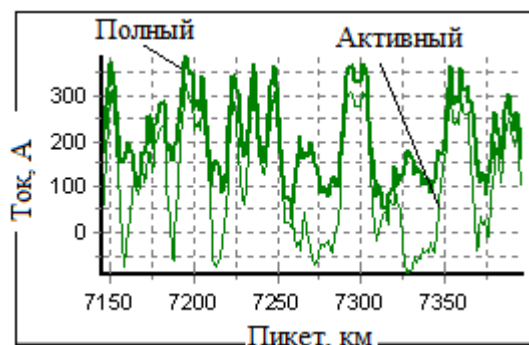
#### **4.5 Мультифазные линии электропередачи**

Повышение надежности и энергоэффективности электрических сетей, а также улучшение качества электроэнергии может быть достигнуто переводом высоковольтных ЛЭП в многофазный режим [65, 128]. Получение многофазной системы напряжений может быть реализовано на основе специальных трансформаторов [129]. Изучению многофазных ЛЭП, в частности шестифазных, посвящен ряд работ [130 – 132]. Ниже представлены результаты исследований для системы электроснабжения железной дороги, внешняя сеть которой была реализована в двух вариантах: на основе трехфазных ЛЭП 220, а также перспективных линий шестифазной конструкции.

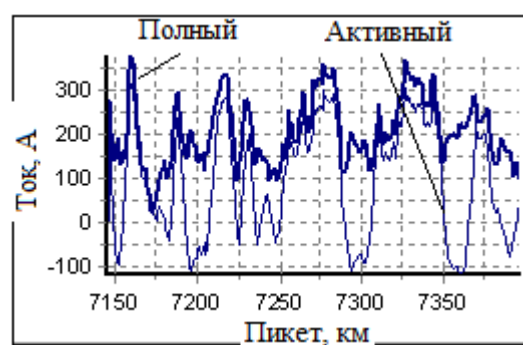
Рассматривалась типовая система электроснабжения магистральной ЖД, включающая шесть тяговых подстанций и пять линий электропередачи 220 кВ, выполненных проводами АС-240. На ТП были установлены трансформаторы типа ТДТНЖ-40000/220/27,5 кВ. Тяговая сеть двухпутного участка включала пять межподстанционных зон протяженностью в 50 км [98]. Моделировалось движение шести поездов массой 3900 т в четном и нечетном направлениях (рисунок 4.44а). Зависимости токов, потребляемых локомотивами от их положения в пространстве показаны на рисунках 4.44б, в. Спектральный состав токов электровозов иллюстрируется диаграммой, приведенной на рисунке 4.45.



а



б



в

Рисунок 4.44. График движения (а) и зависимости токов поездов массой 3900 т от пикета (б, в): б – нечетный поезд массой 3900 т; в – четный той же массы



Рисунок 4.45. Спектральный состав токов электровозов

На рисунке 4.46 показано расположение токоведущих частей шестифазной ЛЭП. Максимальные значения суммарных коэффициентов гармоник для этой ЛЭП сведены в таблица 4.6. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.47 – 4.59.

На рисунке 4.47 показаны графики, характеризующие вариацию напряженностей электрического и магнитного полей.



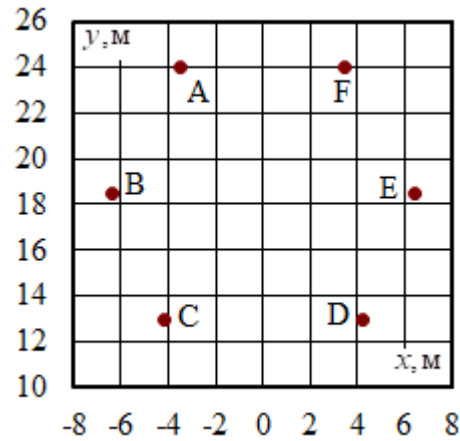
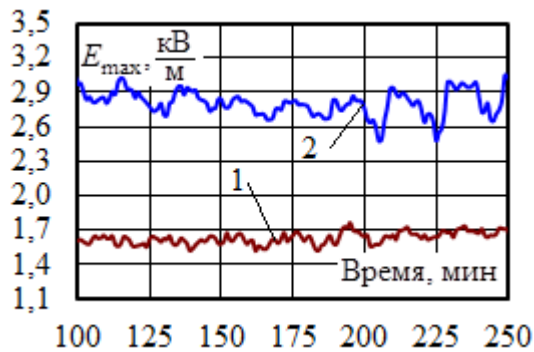


Рисунок 4.46. Расположение проводов шестифазной ЛЭП в пространстве

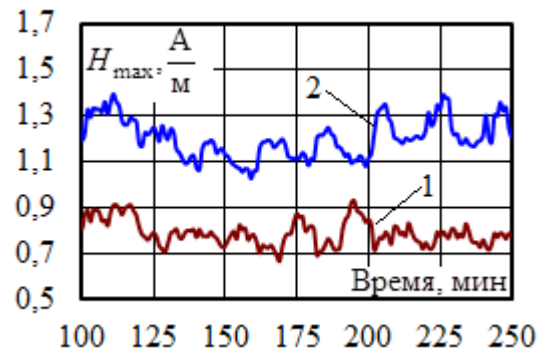
Таблица 4.6

## Максимумы суммарных коэффициентов гармоник, %

Тип ЛЭП	Провода фаз по рис. 4.36					
	A	B	C	D	E	F
Трехфазная	12,29	17,47	14,4	17,37	14,25	12,67
Шестифазная	12,15	17,37	14,19	17,24	14,29	12,11
Различие, %	1,14	0,57	1,46	0,75	-0,28	4,42



а

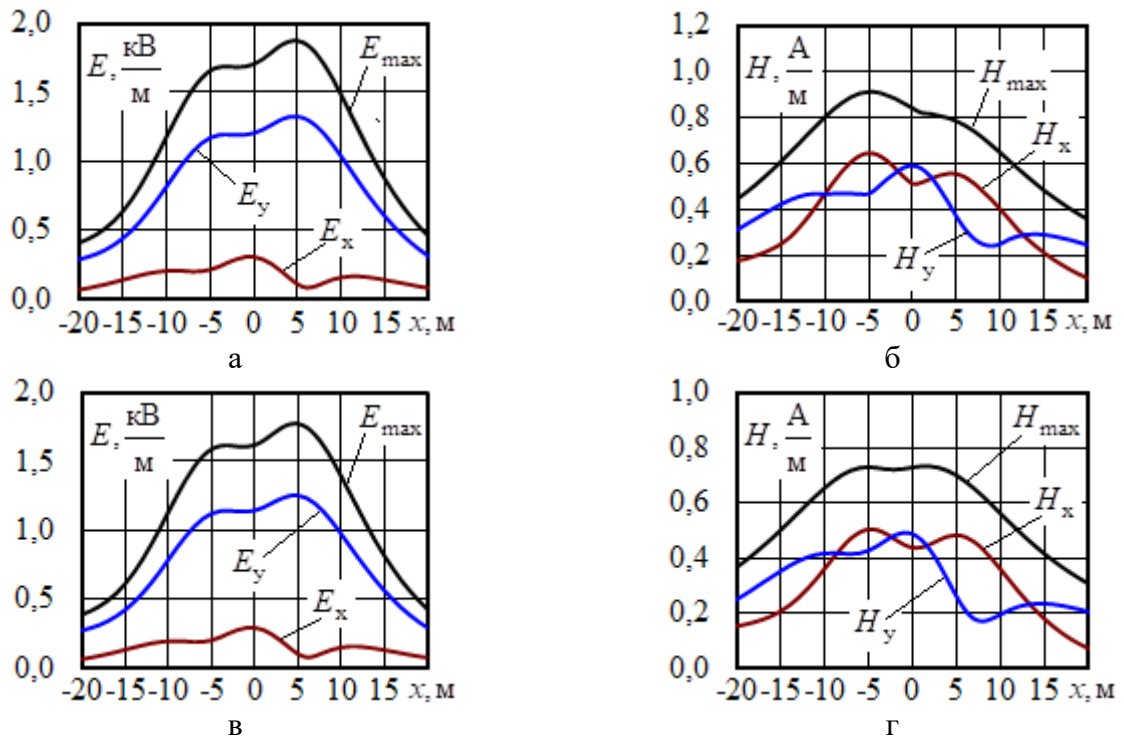


б

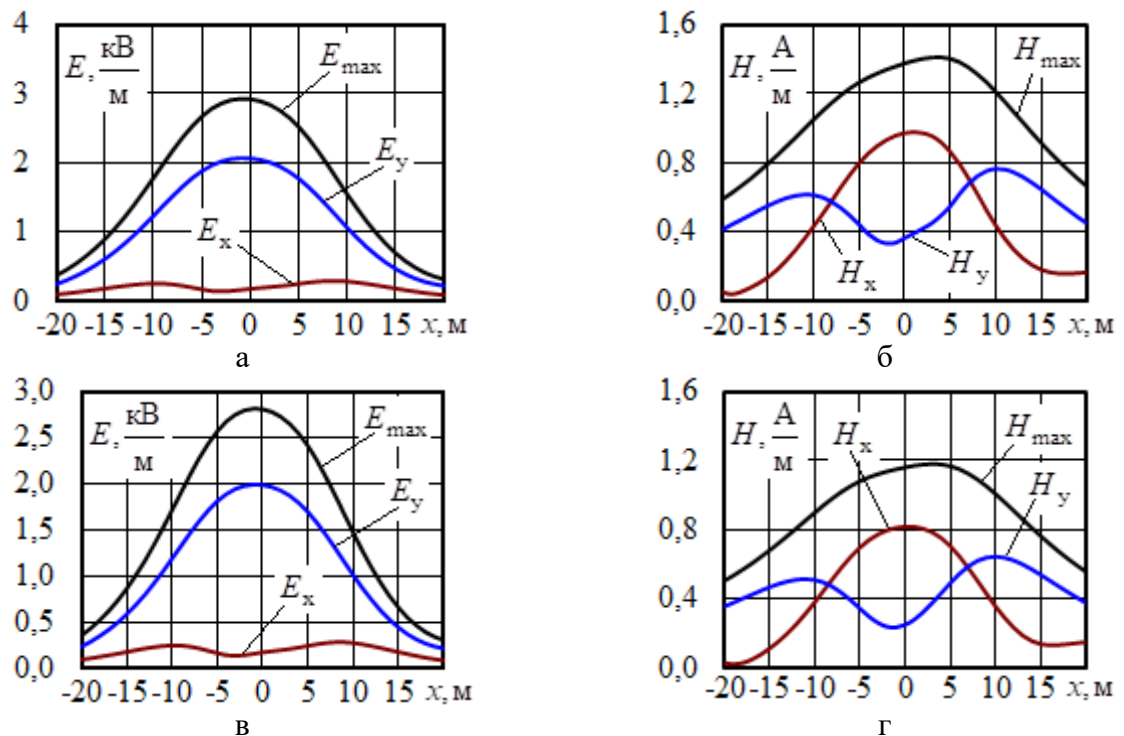
Рисунок 4.47. Изменения напряженностей во времени в точке с координатами  $x = 0$  м;  $y = 1,8$  м: а – напряженности электрического поля; б – напряженности магнитного поля;

1 – трехфазная ЛЭП; 2 – шестифазная ЛЭП

Результаты моделирования напряженностей электромагнитного поля на основной частоте приведены на рисунках 4.48 – 4.51.

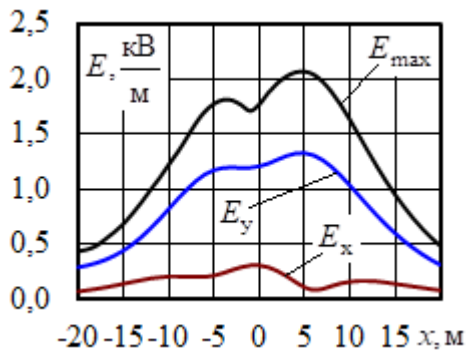


**Рисунок 4.48.** Зависимости максимальных (а, б) и средних (в, г) значений составляющих напряженностей ЭМП на частоте 50 Гц от координаты  $x$  для трехфазной ЛЭП: а, в – составляющие напряженности электрического поля; б, г – составляющие напряженности магнитного поля

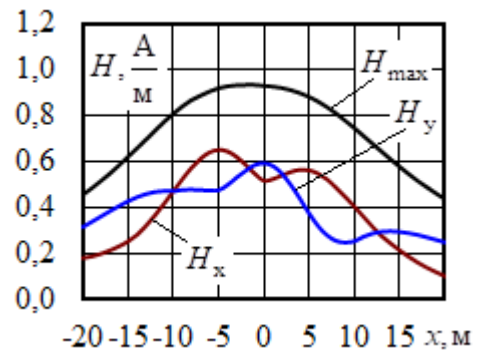


**Рисунок 4.50.** Зависимости максимальных (а, б) и средних (в, г) значений составляющих напряженностей ЭМП на частоте 50 Гц от координаты  $x$  для шестифазной ЛЭП: а, в – составляющие напряженности электрического поля; б, г – составляющие напряженности магнитного поля

Аналогичные зависимости для варианта расчета с учетом высших гармоник показаны на рисунках 4.52 – 4.55

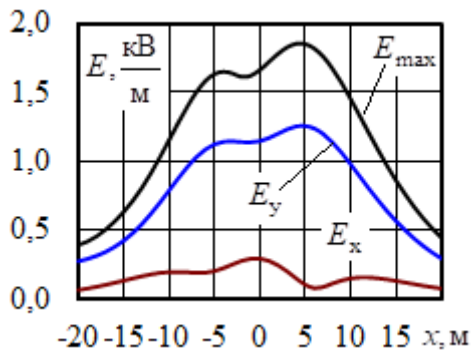


а

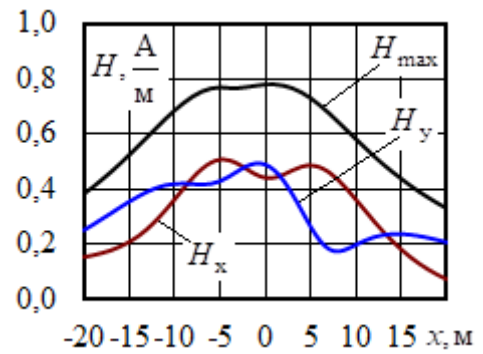


б

**Рисунок 4.52.** Зависимости максимальных значений составляющих напряженностей ЭМП на частотах ВГ от координаты  $x$  для трехфазной ЛЭП: а – составляющие напряженности электрического поля; б – составляющие напряженности магнитного поля

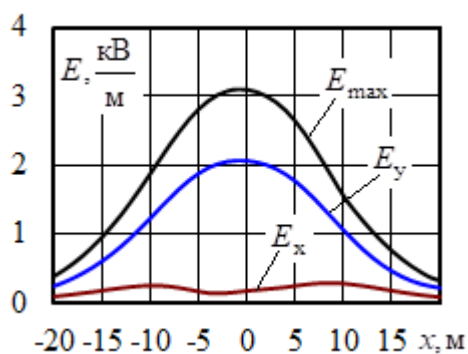


а

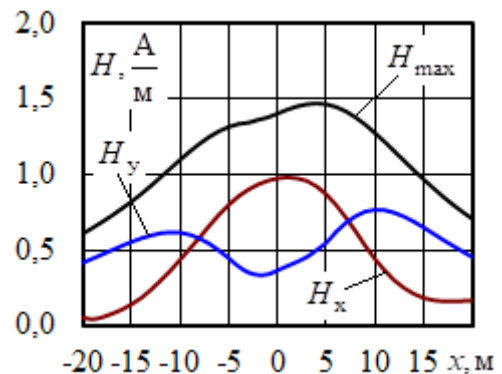


б

**Рисунок 4.53.** Зависимости средних значений составляющих напряженностей ЭМП на частоте ВГ от координаты  $x$  для трехфазной ЛЭП: а – составляющие напряженности электрического поля; б – составляющие напряженности магнитного поля

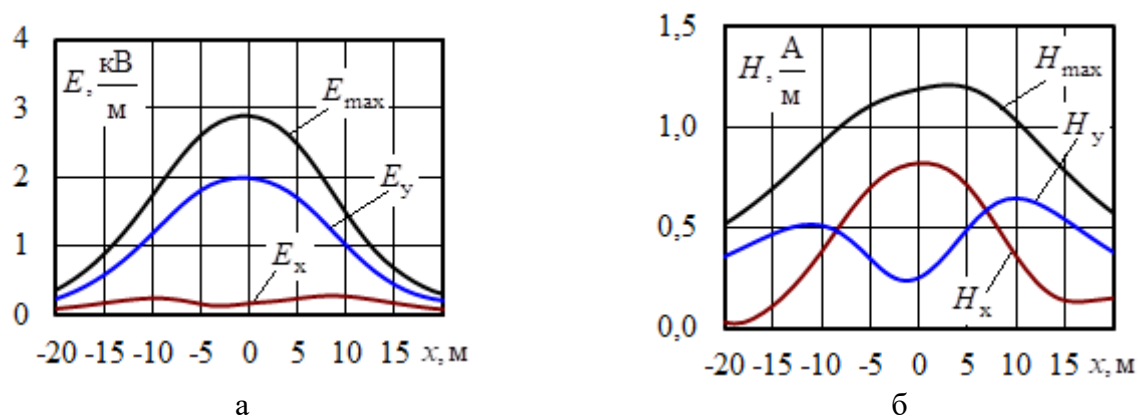


а



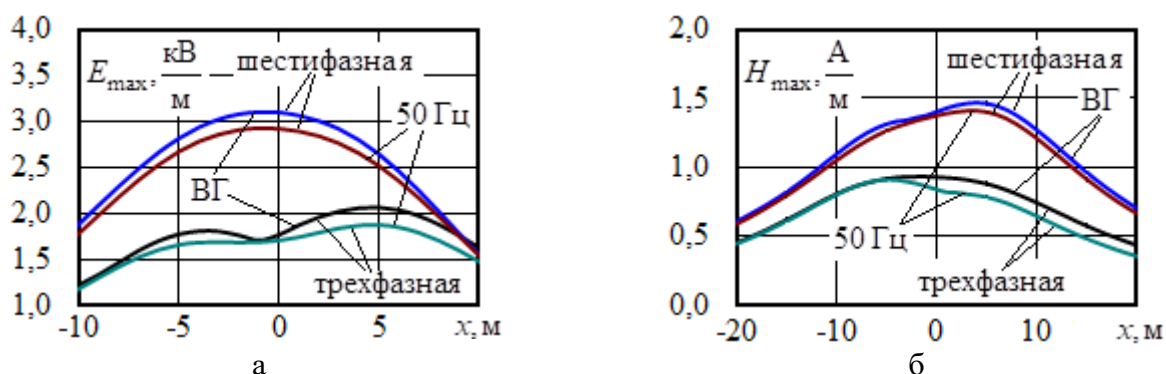
б

**Рисунок 4.54.** Зависимости максимальных значений составляющих напряженностей ЭМП на частоте ВГ от координаты  $x$  для шестифазной ЛЭП: а – составляющие напряженности электрического поля; б – составляющие напряженности магнитного поля



**Рисунок 4.55.** Зависимости средних значений составляющих напряженностей ЭМП на частоте ВГ от координаты  $x$  для шестифазной ЛЭП: а – составляющие напряженности электрического поля; б – составляющие напряженности магнитного поля

На рисунке 4.46 сведены зависимости максимумов амплитуд напряженностей от координаты  $x$ .



**Рисунок 4.56.** Сравнительные графики: а – максимумы амплитуд напряженности электрического поля; б – максимумы амплитуд напряженности магнитного поля

Годографы векторов напряженностей представлены на рисунках 4.48, 4.49. Они отвечают точке с координатами  $x = 0$ ,  $y = 1,8$  и 175 минуте времени моделирования. На рисунке 4.47 проиллюстрированы отличия максимумов амплитуд напряженностей на основной частоте и с учетом высших гармоник, расчет параметров для построения зависимостей осуществлялся по формулам

$$\delta E_{\max} = \frac{E_{\max}^{(\text{вГ})} - E_{\max}^{(50)}}{E_{\max}^{(50)}} \cdot 100; \quad \delta H_{\max} = \frac{H_{\max}^{(\text{вГ})} - H_{\max}^{(50)}}{H_{\max}^{(50)}} \cdot 100,$$

где  $E_{\max}^{(\text{вГ})}$  – максимум амплитуды электрического поля с учетом ВГ;  $E_{\max}^{(50)}$  – максимум амплитуды электрического поля на основной частоте;  $H_{\max}^{(\text{вГ})}$  –

максимум амплитуды электрического поля с учетом ВГ;  $H_{\max}^{(50)}$  – максимум амплитуды электрического поля на основной частоте;

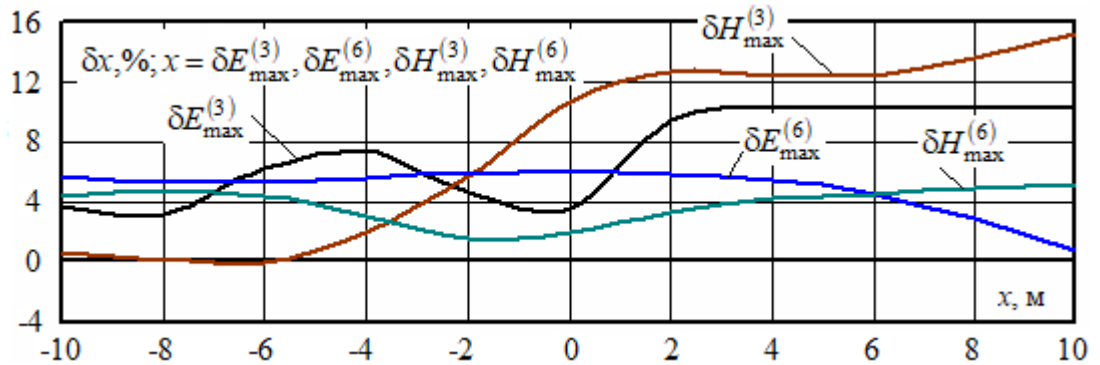


Рисунок 4.57. Отличия максимумов амплитуд напряженностей на основной частоте и с учетом ВГ

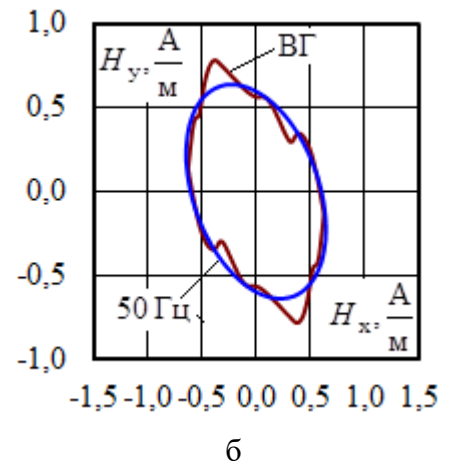
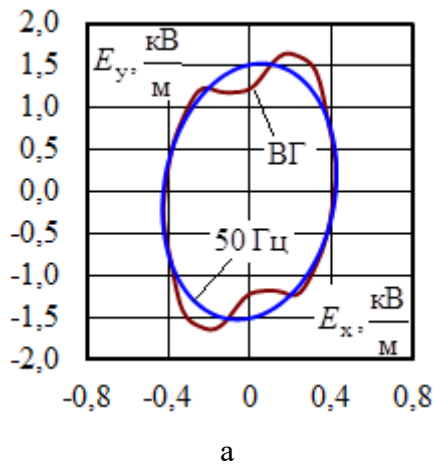


Рисунок 4.58. Годографы векторов напряженностей трехфазной ЛЭП в точке с координатами  $x = 0$  м;  $y = 1,8$  м: а – электрическое поле; б – магнитное поле;

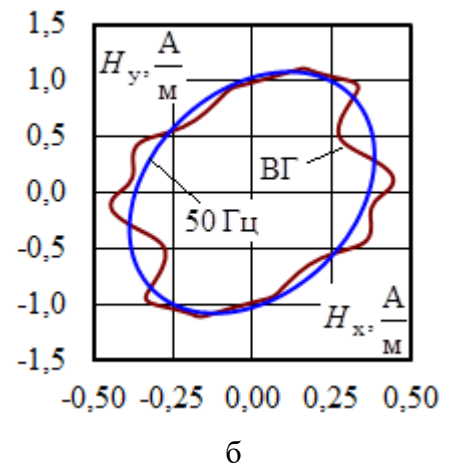
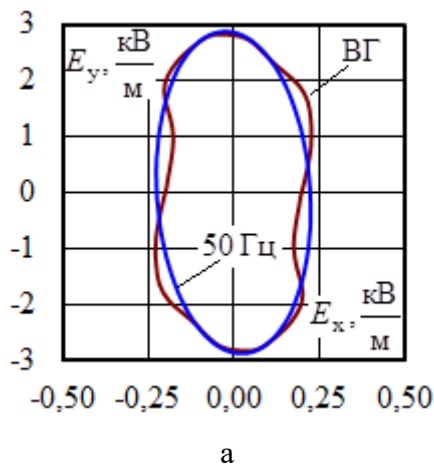


Рисунок 4.59. Годографы векторов напряженностей шестифазной ЛЭП в точке с координатами  $x = 0$  м;  $y = 1,8$  м: а – электрическое поле; б – магнитное поле

Представленные выше результаты моделирования позволяют сделать следующие выводы:

1. Рисунок 4.47 демонстрируют существенную вариабельность напряженностей ЭМП, связанную с движением поездов. Максимумы амплитуд напряженностей электрического поля ЛЭП, рассчитанные для трехфазной ЛЭП, ниже аналогичных показателей для шестифазной линии на 1,36...82 % (рисунки 4.48 – 4.57). По магнитному полю различия лежат в пределах 36...71 %. Следует отметить, что данные различия характерны для конкретной фазировки участка ЛЭП. При транспонировании ЛЭП фазировки проводов могут меняться; при этом уровни напряженностей ЭМП для шестифазной ЛЭП могут быть меньше, чем у трехфазной.

2. При учете высших гармоник результирующие величины напряженностей ЭМП могут заметно увеличиваться (рисунок 4.57), что подтверждают важность учета гармонических искажений при моделировании ЭМП, создаваемых линиями электропередачи, примыкающими к тяговым подстанциям.

3. Годографы векторов напряженностей ЭМП (рисунки 4.58 и 4.59) показывают наличие искажений эллипсов из-за влияния высших гармоник токов и напряжений.

## **Выводы**

1. Высшие гармоники, генерируемые современными электровозами, приводят к искажению кривых токов и напряжений и, следовательно, к искажению временных зависимостей напряженностей электрического и магнитного полей, что необходимо учитывать при оценке условий электромагнитной безопасности.

2. Значения напряженности электрического и магнитного полей применяемых на данный момент СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ находятся в допустимых пределах для электротехнического персонала как на основной частоте, так и с

учетом высших гармоник. Однако высшие гармоники приводят к значительным изменениям зависимостей напряженностей поля от времени и, как следствие, к изменению уровней напряженностей.

При рассматриваемом режиме работы максимальное значение напряженности электрического поля с учетом высших гармоник увеличилось на 6 и 5 % соответственно для СТЭ 25 кВ и 2×25 кВ. Аналогичный параметр магнитного поля для системы тяги 25 кВ увеличился на 9 %, для 2×25 кВ уменьшился на 4 %. Экстремумы усредненных за время моделирования значений напряженности электрического поля увеличились на 9...15 %, магнитного – 18...22 %, где первое число соответствует СТЭ 2×25 кВ, второе – СТЭ 25 кВ.

3. Учет высших гармоник в перспективных тяговых сетях повышенного напряжения также показал изменение параметров поля. Так, для СТЭ повышенного напряжения 50 кВ увеличение напряженности электрического поля составило 8 % до значения 7,5 кВ/м, что превышает ПДУ. Также данный параметр для СТЭ 2×50 кВ и 50+110 кВ, соответственно, увеличивается на 18 % и 14 %, однако не приводит к нарушению допустимых значений. Аналогичный параметр для магнитного поля в результате учета ВГ увеличивается на 16, 21 и 20 % для СТЭ 50 кВ, 2×50 кВ и 50+110 кВ.

4. Трехфазная тяговая сеть по сравнению с однофазной отличается пониженными уровнями гармонических искажений, таким образом при учете ВГ в такой сети напряженность электрического поля изменяется незначительно. Максимальные и средние значения напряженности магнитного поля увеличиваются, соответственно, на 7 и 5 %. Изменение аналогичных параметров для электрического поля однофазной тяговой сети 25 кВ составило 11,8 и 12,4 %, а для магнитного – 33 и 60 %.

Генерируемые электровозами гармоники не вызывают изменений характера распределения максимальных и средних значений напряженностей в сечениях тяговых сетей, однако могут приводить к заметным вариациям временных зависимостей.

5. Линии электропередачи, питающие тяговые подстанции, демонстрируют существенную вариабельность параметров несинусоидальности и напряженностей ЭМП, связанную с движением поездов. Максимумы амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей ЛЭП, рассчитанные с учетом ВГ, выше аналогичных показателей для поля основной частоты на 6 %. Средние значения аналогичных показателей для электрического поля равны 4 %, а для магнитного – 18 %.

Дополнительно было определено, что отсутствие транзитных нагрузок в ЛЭП, приводит к увеличению гармонических искажений токов и напряжений в сети 220 кВ и возрастанию различия величин напряженностей, рассчитанных для основной частоты и с учетом высших гармоник. Эти различия достигают 27 % для электрического поля и 74 % для магнитного.

6. Временные зависимости напряженностей ЭМП мультифазных ЛЭП также демонстрируют существенную вариабельность, связанную с движением поездов. Максимумы амплитуд напряженностей электрического поля ЛЭП, рассчитанные для трехфазной ЛЭП, ниже аналогичных показателей для шестифазной линии на 1,36...82 %. По магнитному полю различия лежат в пределах 36...71 %. Следует отметить, что данные различия характерны для конкретной фазировки участка ЛЭП. При транспонировании ЛЭП фазировки проводов могут меняться; при этом уровни напряженностей ЭМП для шестифазной ЛЭП могут быть меньше, чем у трехфазной.

При учете высших гармоник результирующие величины напряженностей ЭМП могут заметно увеличиваться, а годографы векторов напряженностей показывают наличие искажений эллипсов, что подтверждают важность учета гармонических искажений при моделировании ЭМП, создаваемых линиями электропередачи, примыкающими к тяговым подстанциям.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работе 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 определение ЭМП тяговых сетей переменного тока, обеспечивающие возможность расчетов 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.

**Перспективами дальнейших исследований являются:**

- уточнение расчетов электромагнитных полей с учетом влияния опорных конструкций, а также наложения полей смежных пролетов;
- разработка методов учета подземных сооружений при моделировании электромагнитных полей;
- разработка методов определения электромагнитных полей с учетом переходных процессов сложных электроэнергетических систем и систем тягового электроснабжения.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Аполлонский, С.М., Напряженности воздушной среды на электрифицированной железной дороге / С.М. Аполлонский, А.Н. Богаринова // Сборник докладов девятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. – СПб., 2006. – С. 579–583.
2. Аполлонский, С.М. Внешние электромагнитные поля электрооборудования и средства их снижения. – СПб: Безопасность, 2001. – 620 с.
3. Аполлонский, С.М. Расчеты электромагнитных полей / С.М. Аполлонский, А.Н. Горский – М.: Маршрут, 2006. – 992 с.
4. Левитт, Б. Блейк. Защита от электромагнитных полей. О влиянии на организм человека бытовых электроприборов, мобильных телефонов, линий электропередачи и других электрических устройств. – М.: АСТ, Астрель, 2007. – 447 с
5. Аполлонский, С.М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 тт. Т.1. Виды физических полей и излучений. Нормативно-правовые документы. – М.: РУСАЙНС, 2016. – 334 с.
6. Аполлонский, С.М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 тт. Т.2. Защитные материалы от физических полей и излучений. – М.: РУСАЙНС, 2016. – 342 с.
7. Аполлонский, С.М. Защита техносферы от воздействия физических полей и излучений. В 3 тт. Т.3. Методы защиты от физических полей и излучений. – М.: РУСАЙНС, 2016. – 336 с.
8. Аполлонский, С.М. Безопасность жизнедеятельности человека в электромагнитных полях / С.М. Аполлонский, А.Н. Горский – СПб: Политехника, 2004. – 263 с.

9. Беляев, Р.Ю. Мониторинг электромагнитной обстановки линий электропередачи Хакасской энергосистемы / Р.Ю. Беляев, Г.Н. Чистяков // Проблемы энергетики. – 2009. – № 5-6. – С. 60–66.
10. Горский, А.Н. Электромагнитные излучения и защита от них / А.Н. Горский, Л.К. Васильева – СПб: ПГУПС, 2000. – 100 с.
11. Дикой, В.П. Оценка электромагнитных факторов, действующих на человека при эксплуатации высоковольтных установок / В.П. Дикой, Н.Б. Рубцова, А.Ю. Токарский // Электромагнитные поля. Биологическое действие и гигиеническое нормирование. – М. 1999. – С. 101-125.
12. Рябов, Ю.Г. Концепция потенциальной электромагнитной безопасности / Ю.Г. Рябов, З.С. Салихов, О.Н. Шологин и др. // Экология и промышленность России – 2005. – № 7. – С. 42-45.
13. Костенко, М.В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно- и биосферу. – Л.: ЛПИ. 1984. – 56 с.
14. Сидоров, А.И. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – 204 с
15. Копытенко, Ю.А. Электромагнитная безопасность городского электротранспорта: параметры магнитных полей в трамвае, метро и троллейбусе Петербурга и Москвы / Ю.А. Копытенко, Н.Г. Птицына, В.С. Исмаилов и др. // Сборник докладов девятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. – СПб. 2006. – С. 575 – 579.
16. Кадомская, К.П. Электромагнитная совместимость воздушных, подземных и подводных линий электропередачи высокого напряжения с биосферой и окружающей средой / К.П. Кадомская, С.А. Кандаков, Ю.А. Лавров, С.С. Шевченко. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 119 с.
17. Вэнс, Э.Ф. Влияние электромагнитных полей на экранированные кабели. – М.: Радио и связь, 1982. – 120 с.

18. Гуревич, В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч.1 // Компоненты и технологии. – 2010. – № 2. – С. 80-84.

19. Гуревич, В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч.2 // Компоненты и технологии. – 2010. – № 3. – С. 91-96.

20. Гуревич, В.И. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Ч.3 // Компоненты и технологии. – 2010. – № 4. – С. 91-96.

21. Довбыш, В.Н. Электромагнитная безопасность элементов электрических систем / В.Н. Довбыш, М.Ю. Маслов, Ю.М. Сподобаев. – Самара: ООО «ИПК «Содружество», 2009. – 198 с.

22. Кадомская, К.П. Анализ интенсивности электромагнитного поля, инициируемого воздушными линиями высокого напряжения / К.П. Кадомская, И.М. Степанов // Электричество. – 2009. – № 3. – С. 24-31.

23. Косарев, А.Б. Основы электромагнитной безопасности систем электроснабжения железнодорожного транспорта / А.Б. Косарев, Б.И. Косарев. – М.: Интекст, 2008. – 480 с.

24. Косарев, Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока. – М.: Транспорт, 1976. – 216 с.

25. Курбацкий, В.Г. Исследование электромагнитной обстановки объектов электроэнергетики и муниципального сектора / В.Г. Курбацкий, А.В. Струмемяк // Электрика. – 2006. – № 11. – С.29–37.

26. Маслов, М.Ю. Задачи электромагнитной экологии в теории и практике излучающих систем / М.Ю. Маслов, М.Ю. Сподобаев, Ю.М. Сподобаев // Электросвязь. – 2001. – № 12. – С. 28-34.

27. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности. – Л., Энергия, 1976. – 344 с.

28. Беляев, А.В. Электробезопасность в трехфазных сетях переменного тока. – Самара: СамГТУ, 2011. – 94 с.

29. Струмемяк, А.В. Анализ электромагнитных полей промышленной частоты в электрических сетях // Труды Братского государственного университета. – 2012. – № 5. – С. 85-98
30. Михайлов, М.И. Электромагнитные влияния на сооружения связи / М.И. Михайлов, Л.Д. Разумов, С.А. Соколов. – М.: Связь, 1973. – 264 с
31. Холодов, Ю.А. Мозг в электромагнитных полях. – М.: Наука, 1982. – 123 с.
32. Долин, П.А. Электробезопасность. Теория и практика / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Корочков, А.Ф. Монахов: под. ред. В.Т. Медведева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 280 с.
33. Задоя, Н.И. Электромагнитная безопасность: Учебное пособие для бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» – Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2014. – 108 с.
34. Кузнецов, К.Б. Оценка электромагнитной обстановки и вероятности возникновения профессионально обусловленного заболевания / К.Б. Кузнецов, А.Р. Закирова // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2014 – №4(24). – С.82-90
35. Буюкова, Н.В. Электромагнитные поля в местах пересечения воздушных и кабельных линий / Н.В. Буюкова, 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.
36. 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.
37. Крюков, А.В. Моделирование систем электроснабжения с мощными токопроводами / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, В.Ю. Соколов. - Иркутск: ИрГУПС, 2010. - 80 с.

38. 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.

39. 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: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2019. – Т.2. – С. 196-201.

40. Середкин, Д.А. Влияние пространственного расположения проводов на электромагнитное поле высоковольтной ЛЭП // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Международной научно-практической конференции. – Иркутск: ИрГУПС, 2019. – Т.2. – С. 22-27.

41. Аполлонский, С.М. Воздействие на напряженности электромагнитной среды железнодорожных составов с жидкими грузами / С.М. Аполлонский, А.Н. Богаринова. – Вестник МАНЭБ. – 2009. – Т.14. – №2. – С. 8-14

42. Аполлонский, С. М. Электромагнитная совместимость и функциональная безопасность в электроэнергетике. – М.: РУСАЙНС, 2016. – 326 с.

43. Бочариков, Ю.В. Влияние качества электроэнергии питающей сети на уровень электромагнитного воздействия системы тягового электроснабжения на аппаратуру рельсовых цепей / Ю.В. Бочариков, М.П. Бадер, В.Р. Антонец // Наука и техника транспорта. – 2008. – №1. – С.6-14

44. Бадер, М.П. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения и элементов инфраструктуры на участках с

высокоскоростным движением / М.П. Бадер, Ю.М. Иньков // Электротехника. – 2014. – №8. – С.12-17

45. 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. Середкин // Электричество. – 2022. – №5. – С.28–38.

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

47. 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.

48. 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.

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. 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.

55. 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.

56. 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.

57. 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.

58. 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 с размещением в Международной базе Scopus. – Казань: КГЭУ, 2021. – С. 291-302.

59. Буякова, Н.В. Системный подход к моделированию электромагнитной обстановки на железных дорогах переменного тока / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Информатика и системы управления. – 2011. – №1(27). – С. 38-49

60. Буякова, Н.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление: монография / Н.В. Буякова, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков; под общ. ред. А. В. Крюкова. – Ангарск: РИО АнГТУ, 2018. – 392 с.

61. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2005. – 272 с.

62. Закарюкин, В.П. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2011. – 160 с.

63. Закарюкин, В.П. Электромагнитная безопасность в местах пересечения высоковольтных ЛЭП и электрифицированных железных дорог. Часть 2 / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2018. – Т.1. – С. 646-650.

64. Закарюкин, В.П. Моделирование режимов трехфазных систем тягового электроснабжения / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков // Повышение

эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск, 2021. – С. 136-142.

65. Закарюкин, В.П. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых многофазными линиями электропередачи / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао // Вестник ИрГТУ. – 2016. – № 3(110). – С. 67-75.

66. Закирова, А. Р. Защита электротехнического персонала от вредного воздействия электромагнитных полей / А. Р. Закирова. – Екатеринбург, 2018. – 171 с.

67. Закирова, А.Р. Исследования электромагнитных полей на рабочих местах персонала, обслуживающего контактную сеть / А.Р. Закирова, Ж.М. Буканов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2016. – № 2 (30). – С. 73-83.

68. Мисриханов, М. Ш. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов: монография / М. Ш. Мисриханов, Н. Б. Рубцова, А. Ю. Токарский. – Москва; Вологда: ИнфраИнженерия, 2019. – 508 с.

69. Рубцова, Н.Б. Альтернативные варианты обеспечения электромагнитной безопасности линий электропередачи / Н.Б. Рубцова, М.Ш. Мисриханов, В.Н. Седунов, А.Ю. Токарский // Известия Самарского научного центра РАН. — 2012. – Т. 14. – № 5(3). – С. 839-845.

70. Малышева, Н.Н. Моделирование группового управления напряжением с источниками активной и реактивной мощности в электрических сетях / Н.Н. Малышева, Е.А. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – №31. – С.22 – 34.

71. Третьяков, Е.А. Реконфигурация распределительных электрических сетей / Е.А. Третьяков, Н.Н. Малышева // Вестник Южно–Уральского государственного университета. Серия: Энергетика – 2021. – Т.21. – №1. – С.38 – 47.

72. Дикой, В.П. Методы расчета и измерения эллипсоидных магнитных полей промышленной частоты / В.П. Дикой, А.Ю. Токарский, Ю.А. Иостсон, О.В. Красин // Тр. ИГЭУ. - Вып. 4I. - Иваново, 2001. - С. 215-222.

73. 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.

74. Ogunsola, A. Electromagnetic Compatibility in Railways / A. Ogunsola, A. Mariscotti // Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, p. 568.

75. Ogunsola, A. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM / A. Ogunsola, U. Reggiani, L. Sandrolini // International Symposium on Electromagnetic Compatibility – Kyoto, 2009. – P. 567–570.

76. Kircher, R. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems / R. Kircher, R. Palka, E. Fritz, K. Eiler, M. Witt, J. Klühspies // Transportation Systems and Technology – 2018 – vol. 4(2) – pp. 152-166.

77. Kircher, R. Electromagnetic Fields of High-Speed Transportation Systems Maglev Technologies in Comparison with Steel-Wheel-Rail / R. Kircher, R. Palka, E. Fritz, K. Eiler, M. Witt, L. Blow, J. Klühspies // The International Maglev Board C/O CERM Institute, Technical University of Deggendorf of Applied Sciences.

78. Kircher, R. Electromagnetic Fields Related to High Speed Transportation Systems / Kircher R., Klühspies J., Palka R. et al. // Transportation Systems and Technology. – 2018. – №. 4(2). – P. 152 – 166.

79. 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. Seredkin // 2020 International Conference on

Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) – Sochi, 2020. – 9111873.

80. 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. – C.76-81, 9216290.

81. 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 Txao, D.A Sereдкин // ENERGY-21 – Sustainable Development & Smart Management – Irkutsk: E3S Web of Conferences, 2020. – 07002.

82. Buyakova, N.V. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety/ N.V. Buyakova, A.V. Kryukov, Le Van Txao, D.A Sereдкин // Rudenko International Conference “Methodological problems in reliability study of large energy systems” (RSES 2020) – Kazan’: E3S Web of Conferences, 2020. – 01062.

83. 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. – Sochi: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. – C.52 – 56.

84. 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.

85. 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 Txao, D.A. Sereдкин, 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.

86. 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. Seredkin // Energy Systems Research. – 2021. – Vol. 4. No 2. – С. 70 – 88.

87. Carson, I.R. Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return // Bell System Technical Journal – 1926 – vol. 5. – pp. 539-554.

88. 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.

89. Крюков, А.В. Моделирование перспективных систем тягового электроснабжения железных дорог переменного тока / А.В. Крюков, Д.А. Середкин, А.В. Черепанов, И.А. Фесак – Иркутск: ИрГУПС, 2021. – 180 с.

90. 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.

91. 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: Международная научно-техническая конференция имени проф. В.Я. Баденикова. – Ангарск: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2019. – С. 246-247.

92. 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.

93. 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.

94. 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: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием – Иркутск: Изд-во ИРННТУ, 2020. –Т.1. – С.168-172.

95. Середкин, Д.А. Электромагнитная безопасность в местах пересечения тяговых сетей и линий электропередач при работе на высоте // Современные технологии и научно-технический прогресс: Международная научно-техническая конференция имени проф. В.Я. Баденикова. – Ангарск: ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 2021. – С. 237-238.

96. 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.

97. Середкин, Д.А. Моделирование электромагнитных полей в местах пересечения тяговых сетей и коридоров ЛЭП // Наука и образование транспорту. – 2021. – №2. – С. 75-79.

98. 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.

99. 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.

100. 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.

101. ГОСТ 30372-2017. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2020. – 58 с.

102. СанПиН 1.2.36.85-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Москва: Роспотребнадзор, 2021. – 452 с.

103. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации средств сухопутной подвижной радиосвязи. – Москва: Минздрав России, 2003. – 13 с.

104. СанПиН 2.1.8/2.2.4.1383-03. Гигиенические требования к размещению и эксплуатации передающих радиотехнических объектов. – Москва: Минздрав России, 2007. – 22 с.

105. Куликова, Л. В. Основы электромагнитной совместимости: учебник для вузов / Л. В. Куликова, О. К. Никольский, А. А. Сошников. - Изд. 4-е, стер. - Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2020. - 404 с

106. Дубицкий, С.Д. Программа «ELCUT» / С.Д. Дубицкий, Е.Э. Мазин, В.Г. Поднос // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2002610850, дата гос. рег. 29.05.2002.

107. ГОСТ Р 57670 – 2017. Системы тягового электроснабжения железной дороги. Методика выбора основных параметров. – М.: Стандартинформ, 2017 – 52 с.



108. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – М.: Гардарики, 2003. – 317 с.
109. Митруев, О.И. Метод фазных координат для расчета электромагнитных полей промышленной частоты // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – Иркутск, 2006. – С. 301–311.
110. Белицын, И.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования / И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – №4. – Т.312. – С.61-65.
111. Белинский, С.О. Проблемы оценки профессионального риска при воздействии электромагнитных полей частотой 50 Гц и выше на персонал железнодорожного транспорта // Охрана и экономика труда. – 2014 – №1(14). – 36-48.
112. Белинский, С.О., Оценка параметров электромагнитных полей низкочастотного диапазона в электроустановках тягового электроснабжения / С.О. Белинский, К.Б. Кузнецов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2012. – №16(275). – С. 62-69.
113. Белинский, С.О. Нормирование параметров электромагнитных полей частотой от 50 Гц до 10 кГц в производственных условиях // Охрана и экономика труда. – 2014. – № 3 (16). – С.40-46.
114. Белицын, И. В. Влияние стрелы провеса провода воздушной линии электропередач на параметры ЭМП / И. В. Белицын, А. В. Макаров // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – №4. – С. 56 – 60.
115. Краснитский, Ю. А. Магнитное поле цепной линии на низких частотах // Transport and Telecommunication. – 2003. – Vol. 4. – N 1. – С. 9-14.
116. Шимони, К. Теоретическая электротехника. – М.: Мир, 1986. – 514 с.
117. Котельников, А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.

118. Финоченко, Т. Э. Исследование режимов работы и качества электроэнергии в линиях ДПР // Вестник РГУПС. – 2002. – № 3. С. 60-62.
119. Анисимова, Н.Д. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Анисимова Н.Д., Веников В.А., Ежков В.В. – М.: Высшая школа, 1967. – 296 с.
120. Ивакин, В. Н., Применение установок тиристорно-управляемой продольной компенсации на линиях электропередачи переменного тока / В.Н. Ивакин, А.А. Магницкий, Р.Н. Шульга // Электротехника. – 2006. – № 9. – С. 42-49.
121. Шамардин, А. О. Исследование влияния установки продольной компенсации на режимы дальней электропередачи // Современные научные исследования и инновации. – 2016. – № 6 (62). – С. 164-173.
122. Семчинов, А.М. Токопроводы промышленных предприятий. – Л.: Энергия, 1982. – 208 с.
123. Мукосеев, Ю.Л. Распределение переменного тока в токопроводах. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 136 с.
124. Зевакин, А.И. Шинопроводы в электрических сетях промышленных предприятий / А.И. Зевакин, И.И. Лигерман. - Москва: Энергия, 1979. – 96 с.
125. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 745 с.
126. Greenberg, G.A. Fundamentals of the exact theory of the wave field of power lines / G.A. Greenberg, V.E. Bonstedt // Journal of Theoretical Physics. – 1954. – V 24 No.1 – pp 7-95.
127. Аржанников, Б.А. Трехфазная система электрической тяги переменного тока: Монография. – Екатеринбург: УрГУПС, 2019. – 90 с.
128. Гершенгорн, А.И. Многофазные линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения // Электрические станции. – 1994. – № 8. – С. 67-70.

129. Красильникова, Т.Г. Фазопреобразующий трансформатор для четырехфазных электропередач / Т.Г. Красильникова, В.З. Манусов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – № 3(40). – С. 143-151.

130. Apostolov, A. P. Relay protection operation for faults on Nyseg's six-phase transmission line / A.P. Apostolov, R.G. Raffensperger // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1996. – Vol. 11, № 1. – P. 191-196.

131. Guyker, W.C. Protection of 138 kV six phase transmission systems / W.C. Guyker, W.H. Booth, J.R. Kontragunta, E.K. Stanek, S.S. Venkata // Proceedings of the Pennsylvania Electrical Association's (PEA). Electric Relay Committee Meeting in Tamiment, Pennsylvania. – 1979. – Vol. PAS-101, № 5. – P. 1203-1218.

132. Rebbapragada, R.V. Selection and application of relay protection for six phase demonstration project / R.V. Rebbapragada, H. Panke, H.J. Jr. Pierce, J.R. Stewart, L.J. Opper // IEEE Trans. Power Delivery. – 1992. – Vol. 7, № 4. – P. 1900-1911.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****Акты внедрения результатов диссертационной работы**

**«Транс-Атом»**  
Общество с ограниченной ответственностью  
ИНН/КПП 3812073907/381201001

664043, г. Иркутск, ул. Медведова, стр. 20  
тел. (3952) 39-53-06, факс 39-53-04  
e-mail: trans-atom@mail.ru

Р/с 4070 2810 2371 1000 5340 Филиал 5340  
Филиал «Центральный» Банка ВТБ г. Москве  
К/с 3010 1810 1452 5000 0411 БИК 044525411

**АКТ**

об использовании результатов диссертации «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной аспирантом Середкиным Д. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности:  
2.4.3 – Электроэнергетика

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной аспирантом Середкиным Д. А. на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научно-исследовательской и проектной деятельности при решении задач по анализу режимов систем электроснабжения и выработке технических рекомендаций по повышению электромагнитной безопасности.

Генеральный директор  
ООО «Транс-Атом»

А.В. Пупькин



ООО «Смарт грид»  
ИНН 3827053276, КПП 382701001  
**Общество с ограниченной ответственностью «Смарт грид»**

**АКТ**

об использовании результатов диссертации «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной аспирантом Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.3 – Электроэнергетика

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной аспирантом Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в научно-исследовательской и проектной деятельности при разработке программного модуля расчета электромагнитных полей, создаваемых протяженными линиями электропередачи.

Генеральный директор ООО «Смарт грид»

Черепанов А.В.



## ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Иркутский государственный университет путей сообщения»  
(ФГБОУ ВО ИрГУПС)

Чернышевского ул., д. 15, Иркутск, 664074

Тел.: (3952) 63-83-01, E-mail: [mail@irgups.ru](mailto:mail@irgups.ru), <http://www.irgups.ru>  
ОКПО 01115780; ОГРН 1023801748761; ИНН/КПП 3812010086/381201001



Утверждаю  
Ректор ИрГУПС,  
Трофимов Ю.А.

«21» февраля 2023г.

## АКТ

об использовании результатов диссертации «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.3 – Электроэнергетика

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе по программе специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов».

Предложенные в диссертации методы расчета электромагнитных полей линий электропередачи и тяговых сетей используются в разделе «Источники электромагнитных влияний. Основные величины и законы, определяющие влияние» дисциплины «Электромагнитная совместимость и средства защиты».

Заведующий кафедрой  
«Электроэнергетика транспорта»,  
к.т.н., доцент

Тихомиров В.А.

«21» февраля 2023г.

Утверждаю  
Проректор по учебной работе ИРНИТУ,  
Кандидат химических наук, доцент  
В. В. Смирнов



«13» марта 2023г.

#### АКТ

об использовании результатов диссертации «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.4.3 – Электроэнергетика

Настоящим актом удостоверяется, что результаты диссертационной работы «Моделирование электромагнитных полей ЛЭП на основе расчета режимов электроэнергетической системы в фазных координатах», представленной Середкиным Дмитрием Александровичем на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», программе подготовки «Электроснабжение».

Предложенные в диссертации методы расчета электромагнитных полей линий электропередачи и тяговых сетей используются в разделе «Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики» дисциплины «Электромагнитная экология и электромагнитная совместимость».

**И.о. Заведующего кафедрой  
Электроснабжения и электротехники  
к.т.н.**

**Шушпанов И. Н.**

«13» марта 2023г.