

На правах рукописи



Лэ Ван Тхао

КОМПЛЕКСНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЦЕПНЫХ И МУЛЬТИФАЗНЫХ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В ФАЗНЫХ КООРДИНАТАХ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иркутск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

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

Официальные оппоненты: **Бурянина Надежда Сергеевна**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова», Чукотский филиал, директор

**Шишков Евгений Михайлович**, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет», филиал в г. Новокуйбышевске, заведующий кафедрой «Электроэнергетика, электротехника и автоматизация технологических процессов»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург

Защита состоится «08» июня 2021 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 355.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, каб. 407, и на сайте: <https://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2021-1/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 003.017.01,  
доктор технических наук, профессор



**Клер Александр Матвеевич**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Осуществляемый в настоящее время переход электроэнергетики на технологическую платформу, базирующуюся на использовании концепции интеллектуальных электрических сетей (smart grid), направлен, прежде всего, на повышение эффективности работы электроэнергетических систем (ЭЭС) и требует решения следующих технических задач: увеличение пропускной способности линий электропередачи; обеспечение статической и динамической устойчивости ЭЭС; снижение потерь мощности и энергии; уменьшение уровней напряженностей электромагнитных полей, создаваемых ЛЭП; сокращение полосы отчуждения земельных угодий под строительство линий электропередач. Для решения сформулированных задач возможно использование следующих подходов: перевод высоковольтных ЛЭП в многофазный режим; применение многоцепных и компактных линий электропередачи; разработка и внедрение ЛЭП специальной конструкции, например, разомкнутых и неполнофазных, использующих землю в качестве фазного провода.

Для практического использования описанных выше ЛЭП в условиях цифровизации электроэнергетики требуется разработка адекватных методов моделирования ЭЭС, имеющих в своем составе такие линии электропередачи.

Значительный вклад в решение проблемы создания и развития интеллектуальных сетей smart grid внесли О. М. Бударгин, В. Н. Вариводов, И. О. Волкова, Н. И. Воропай, В. Э. Воротницкий, И. А. Головинский, В. В. Дорофеев, Т. В. Иванов, С. Н. Иванов, М. И. Лондер, Б. Б. Кобец, В. Г. Курбацкий, Г. П. Кутовой, Ю. Н. Кучеров, Е. Л. Логинов, А. А. Макаров, Л. В. Массель, М. Ш. Мисриханов, Ю. И. Моржин, Э. Б. Наумов, В. Р. Окороков, А. В. Паздерин, В. Н. Рябченко, В. Ф. Ситников, В. А. Скопинцев, Ю. Г. Шакарян, В. J. Baliga, Bernd M. Buchholz, C. W. Gelling, A. Q. Huang, Y. Liu, Z. Styczynski, R. Wang, P. Wang, G. Xiao, W. Sung и другие.

Вопросам моделирования многофазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП посвящены работы Александрова Г. Н., Андреева Н. Н., Бушуева В. В., Быковой Е. В., Вариводова В. Н., Гершенгорна А. И. Гольдштейна В. Г., Зуева Э. Н., Каревой С. Н., Карницкого В. Ю., Константинова А. М. Королева А. Н., Короткова В. В., Крайильниковой Т. Г., Куликова К. В., Манусова В. З., Поспелова Г. Е., Постолатия В. М., Ракушева Н. Ф., Самородова Г. И., Степанова В. М., Сулова В. М., Тимашовой Л. В., Федина В. Т., Чипизубова Д. И., Шакаряна Ю. Г., Шишкова Е. М. и других авторов.

Работы этих авторов создают методологический базис для проведения исследований ЛЭП перечисленных типов. Одна из основных задач, требующая решения в условиях цифровизации электроэнергетики, состоит в разработке методов комплексного моделирования режимов интеллектуальных ЭЭС, имеющих в своем составе многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП.

**Цели и задачи.** Цель настоящей работы состояла в разработке математических моделей мультифазных, многоцепных, компактных, разомкнутых (РВЛ) и сдвоенных ЛЭП «два провода – земля» (ДПЗ); реализации методов моделирования режимов ЭЭС, имеющих в своем составе такие линии. Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать особенности многофазных, многоцепных и компактных ЛЭП, а также РВЛ и сдвоенных линий ДПЗ;
- разработать математические модели многофазных, многоцепных и компактных ЛЭП, а также РВЛ и линий ДПЗ;
- реализовать методы моделирования режимов ЭЭС, имеющих в своем составе перечисленные в предыдущем пункте линии;

- разработать методику моделирования электромагнитных полей, создаваемых перечисленными выше типами ЛЭП.

Решение сформулированных задач осуществлено на базе методов моделирования ЭЭС в фазных координатах, использующих решетчатые схемы замещения из RLC-элементов, соединенных по схемам полных графов.

**Объект исследований.** Интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивными сетями, имеющие в своем составе многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а также сдвоенные линии ДПЗ воздушного и кабельного исполнения.

**Предмет исследований.** Методы моделирования режимов ЭЭС, включающих в свой состав многоцепные, мультифазные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а также сдвоенные линии ДПЗ воздушного и кабельного исполнения.

**Научную новизну** составляют следующие результаты, выносимые на защиту:

- модели электроэнергетических систем, включающих в свой состав многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а также линии ДПЗ; в отличие от известных указанные модели и методы определения нормальных и аварийных режимов ЭЭС реализованы на основе фазных координат и решетчатых схем замещения;

- методы анализа электромагнитной обстановки на трассах многофазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП, а также линий ДПЗ, отличающиеся от известных способами определения электромагнитных полей, использующих результаты расчета режимов в фазных координатах;

- конструктивные схемы четырехфазной и шестифазной ЛЭП, отличающиеся от известных использованием кабелей специального исполнения с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена;

- оригинальные конструктивные схемы двухкабельной и четырехкабельной линий «два провода-земля» сдвоенного типа.

**Методы исследования** рассмотренных в диссертации задач базировались на анализе математических моделей ЭЭС с применением аппарата линейной алгебры, теории функций многих переменных, численных методов решения систем нелинейных уравнений большой размерности. В качестве основного инструмента для проведения вычислительных экспериментов использовался разработанный в ИрГУПС программный комплекс (ПК) «Fazonord».

**Достоверность результатов** полученных в диссертации, обеспечивалась на основе использования апробированных методов современной теории режимов ЭЭС, положенных в основу предлагаемых в работе методов моделирования многофазных, многоцепных и компактных ЛЭП, а также РВЛ и линий ДПЗ. Адекватность применяемых в работе моделей подтвердилась соответствием реальным принципам функционирования ЭЭС, а также согласованностью с результатами, полученными другими авторами и измерениями на реальных объектах.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость результатов диссертационных исследований состоит в разработке положений, обеспечивающих реализацию методов и алгоритмов адекватного определения режимов ЭЭС, имеющих в своем составе многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а также линии ДПЗ.

Практическая значимость полученных результатов состоит в том, что они могут применяться для определения режимов интеллектуальных ЭЭС, сетевая инфраструктура которых содержит многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а так-

же линии ДПЗ. С помощью предложенных в работе методов и алгоритмов можно решать следующие задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации:

- определение режимов интеллектуальных ЭЭС с активно-адаптивными сетями (ИЭЭС ААС);
- определение условий электромагнитной безопасности на трассах многофазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП, а также сдвоенных линий ДПЗ;
- повышение энергоэффективности и качества электроэнергии в ИЭЭС ААС.

**Апробация работы.** Результаты, полученные на основе проведенных в диссертации исследований, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: XXI Всероссийской Байкальской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении», 2016 г.; I(XVI) всероссийской научно-технической конференции студентов и магистрантов «Молодая мысль – развитию энергетики» (2016, 2018 гг.); Всероссийской научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири» (2017, 2018, 2019 гг.); международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (2017, 2018 гг.); международной научно-технической конференции имени профессора В. Я. Баденикова «Современные технологии и научно-технический прогресс» (2017, 2018, 2019 гг.); международной научной конференции «International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)», 2019 г.; международной научной конференции «International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019)», 2019 г.; международном научном семинаре «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики (RSES 2020)», 2020 г.; международной научной конференции «Энергетика XXI века: устойчивое развитие и интеллектуальное управление (ENERGY-21)», 2020 г.

**Реализация результатов работы.** Цифровые модели, а также практические рекомендации использованы в научно-исследовательской и проектной деятельности ООО «НТЦ Параметр» при решении задач по анализу режимов систем электроснабжения и выработке технических рекомендаций по повышению энергоэффективности.

Материалы диссертации используются в учебном процессе на кафедрах «Электроэнергетика транспорта» ИрГУПСа и «Электроснабжение и электротехника» ИРНИТУ, «Электротехника и электроника» Военно-промышленного колледжа провинции Фу Тхо Социалистической Республики Вьетнам.

**Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:** п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике»; п. 10 «Теоретический анализ и расчетные исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблему повышения пропускной способности транспортных каналов»; п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике».

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников из 158 наименований. Общий объём диссертации 174 страницы, в тексте содержится 220 рисунков и 51 таблиц.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 25 работах, из них 3 статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 05.14.02 и одна статья по смежной специальности 05.14.01, а также в четырех статьях, проиндексированных в Scopus. В работах, которые опубликованы с соавторами, автору настоящей работы принадлежит от 25 до 33 % результатов. Положения, которые определяют научную новизну и выносятся на защиту, получены автором диссертации лично.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, отмечена научная новизна результатов, их теоретическая и практическая значимость, представлено основное содержание диссертации.

В первой главе дано описание многофазных электрических систем, приведена их классификация и проанализированы особенности. Здесь же дана характеристика многоцепных, компактных и разомкнутых линий электропередачи. Отмечено, что многофазные линии электропередачи (рис. 1) по сравнению с трехфазными обладают следующими преимуществами: меньшие габариты, различия токов проводов и потери электроэнергии; более высокая пропускная способность; пониженные магнитные поля. Основным недостатком многофазных ЛЭП заключается в повышенной стоимости преобразовательного оборудования.



Рис. 1. Мультифазная ЭЭС

Особую актуальность в современных условиях приобретает задача сокращения землеотвода под строительство объектов электроэнергетики. Один из возможных путей ее решения состоит в применении многоцепных воздушных линий (МВЛ), рис. 2. Такой способ позволяет сооружать новые ЛЭП путем увеличения числа цепей существующих ЛЭП и не выходить за пределы выделенных коридоров.

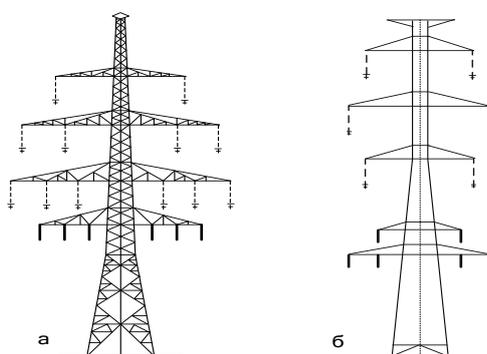
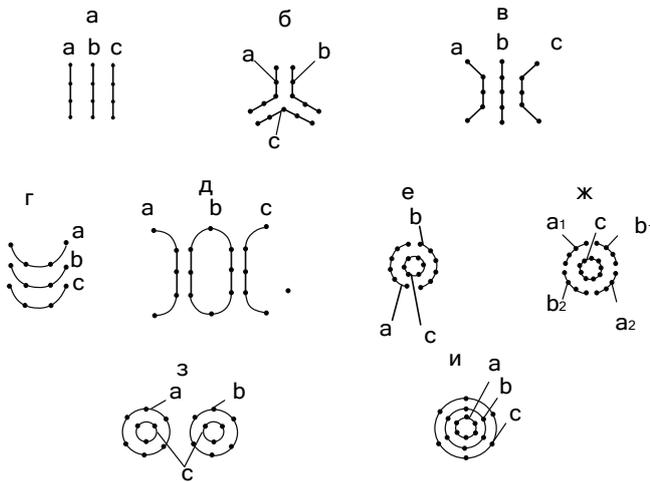


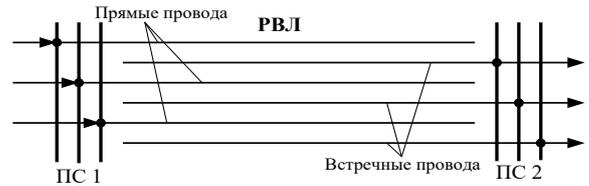
Рис. 2. Конструкции опор шестичеппной (а) МВЛ  $2 \times 380 \text{ кВ} + 2 \times 220 \text{ кВ} + 2 \times 110 \text{ кВ}$  и четырёхчеппной (б) линии  $2 \times 400 \text{ кВ} + 2 \times 110 \text{ кВ}$

Компактные линии электропередачи (рис. 3) характеризуются нетрадиционным расположением проводов и сближением фаз до минимально допустимых расстояний с учетом технических ограничений, которые определяются следующими факторами: перемещения проводов в пролете под воздействием ветра; несинхронные раскачивания; колебания при сбрасывании гололеда; перенапряжения и условия ограничения коронного разряда.

В разомкнутых ЛЭП каждая фаза включает два изолированных друг от друга провода (рис. 4). Один из них, называемый прямым, подключается к шинам передающей подстанции (ПС), а второй, называемый встречным, присоединяется к шинам приемной ПС. Положительной особенностью РВЛ является то, что при определенной длине ЛЭП емкостная проводимость между прямым и встречным проводниками может полностью скомпенсировать индуктивность линии.

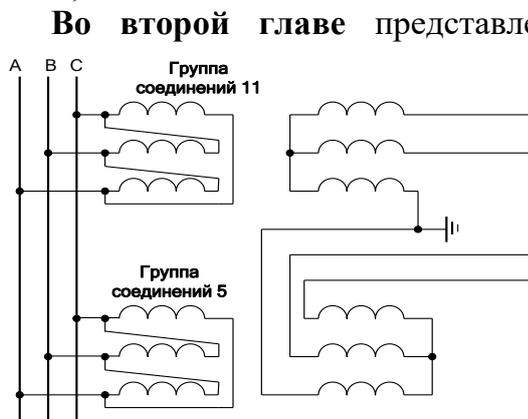


**Рис. 3. Расположение проводов компактных линий:** а, в – плоское; б – треугольное; г - параболическое; д – эллиптическое; е, ж, з, и – коаксиальное



**Рис. 4. Схема РВЛ**

Передача электроэнергии на удаленные объекты требует значительных затрат на сооружение ЛЭП среднего напряжения 6-10-35 кВ. Для их снижения и уменьшения расхода цветного металла возможно применение технологий, основанных на использовании земли в качестве токоведущего элемента. Один из главных недостатков линий ДПЗ состоит в снижении электробезопасности из-за протекания токов в земле. Значительно повысить условия безопасности возможно с помощью применения сдвоенных схем ДПЗ (рис. 5).



**Рис. 5. Схема сдвоенной ДПЗ**

Во второй главе представлены технологии моделирования режимов ЭЭС, включающих в свой состав описанные выше ЛЭП. Они основаны на использовании фазных координат; при этом модели элементов ЭЭС формируются на базе решетчатых схем замещения (РСЗ), имеющих полносвязную топологию.

Для  $k$ -й ЛЭП матрица проводимостей РСЗ может быть получена на основе следующего соотношения:

$$\underline{Y}_k = -\underline{M}_k \underline{Z}_k^{-1} \underline{M}_k^T + j\omega \underline{C}_k,$$

где  $\underline{Z}_k$  – симметричная матрица сопротивлений с размерностью  $r \times r$ ;

$j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 314$  рад/с;  $\underline{M}_k = [\underline{E}_r \quad -\underline{E}_r]^T$ ;  $\underline{E}_r$  – вектор-строка размерностью  $r$ , составленная из единиц;  $\underline{C}_k$  – матрица емкостных проводимостей.

Матрица  $\underline{C}_k$  определяется так

$$\underline{C}_k = 0,5 \begin{bmatrix} \underline{B}_k & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \underline{B}_k \end{bmatrix},$$

где  $\underline{B}_k = \underline{A}^{-1}$ ;  $\underline{A}$  – матрица потенциальных коэффициентов.

Для силовых трансформаторов, а также фазопреобразовательных устройств трансформаторного типа, матрица проводимостей РСЗ определяется следующим образом:

$$\underline{Y}_k = -\underline{M}_k \underline{Z}_k^{-1} \underline{M}_k^T; \quad \underline{Z}_k = \underline{Z}_T - j\omega \underline{W}_1 \underline{R}_M^{-1} \underline{W}_2,$$

где  $\underline{Z}_T$  – матрица электрических сопротивлений обмоток трансформатора;  $\mathbf{R}_M$  – матрица магнитных сопротивлений;  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$  матрицы, составленные из чисел витков обмоток трансформатора.

Результирующая матрица проводимостей сети  $\underline{Y}_\Sigma$  формируется на основе следующих преобразований:

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

где  $\underline{Y}_V = \text{diag} \underline{Y}_k$ ;  $\mathbf{M}_\Sigma$  – обобщенная матрица инцидентий блочного типа.

Система нелинейных уравнений установившегося режима может быть записана так

$$\underline{Y}_\Sigma^* \dot{\mathbf{U}} = \text{diag} \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{U}_i} - \underline{Y}_B \dot{\mathbf{U}}_B, \quad (1)$$

где  $\dot{\mathbf{U}}_B$  – вектор напряжений балансирующих узлов;  $\underline{Y}_B$  – блок матрицы  $\underline{Y}_\Sigma$ , соответствующий ветвям сети, связанным с балансирующими узлами;  $\underline{Y}_\Sigma^*$  – матрица  $\underline{Y}_\Sigma$ , в которой убраны строки и столбцы, отвечающие балансирующим узлам.

После разделения вещественных и мнимых составляющих система (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\mathbf{F}(\mathbf{U}, \boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{0}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{U}$  – вектор модулей узловых напряжений;  $\boldsymbol{\varphi}$  – вектор фаз.

На основе уравнений (2) могут быть определены режимы ЭЭС, имеющие в своем составе  $m$  – фазные элементы, а также ЛЭП специальных конструкций: многоцепные, компактные, разомкнутые, неполнофазные с использованием земли в качестве токоведущей части.

После решения уравнений (2) могут быть определены электромагнитные поля (ЭМП) для каждой из ЛЭП, входящих в состав ЭЭС, на основе алгоритма, включающего следующие этапы.

1. Определяются токи проводов ЛЭП

$$\Omega : \mathbf{U}, \boldsymbol{\varphi} \rightarrow \mathbf{I}, \boldsymbol{\varphi}_I$$

где  $\Omega$  – оператор;  $\mathbf{I}, \boldsymbol{\varphi}_I$  – векторы модулей и фаз токов проводов.

2. Рассчитываются наборы пространственных составляющих напряженностей электромагнитного поля, отвечающие совокупности координат  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$

$$\Xi_E : \mathbf{U}, \boldsymbol{\varphi} \rightarrow \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y; \Xi_H : \mathbf{I}, \boldsymbol{\varphi}_I \rightarrow \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y,$$

где  $\Xi_E, \Xi_H$  – операторы; индекс  $E$  относится к электрическому, а индекс  $H$  – к магнитному полю.

3. Определяются амплитудные значения напряженностей ЭМП

$$\Theta_E : \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y \rightarrow \mathbf{E}_{\max}; \Theta_H : \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y \rightarrow \mathbf{H}_{\max}.$$

4. Рассчитываются значения плотности потока электромагнитной энергии для выбранного набора координат пространственных координат  $\mathbf{x}, \mathbf{y}$

$$\Theta_\Pi : \dot{\mathbf{E}}_x, \dot{\mathbf{E}}_y, \dot{\mathbf{H}}_x, \dot{\mathbf{H}}_y \rightarrow \Pi_0.$$

Предложена оригинальная конструктивная схема девятифазной ЛЭП. Приведены результаты моделирования нормальных и аварийных режимов ЭЭС, имеющих в своем составе многофазные линии, и представлены данные, характеризующие условия электромагнитной безопасности на их трассах. Рассмотрены вопросы компактизации многофазных ЛЭП. Представлена концепция многофазных кабельных ЛЭП и результаты моделирования их режимов.

Полученные результаты позволили сформулировать следующие выводы:

- при передаче одинаковой мощности потери в четырехфазной ЛЭП (ЧЛЭП) существенно меньше аналогичного показателя для трехфазной линии; в приведенном примере максимальное снижение достигает 45 % (рис. 6 а); в ЧЛЭП возникает заметная несимметрия напряжений (рис. 6 б), обусловленная различием режимов работы базисного и высотного трансформаторов схемы Скотта; этот недостаток может быть устранен путем регулирования напряжения на шинах подстанций, расположенных на приемном конце линии;

- шестифазная и трехфазная двухцепная ЛЭП имеют соизмеримый уровень потерь активной мощности; в сопоставимом диапазоне передаваемых мощностей; девятифазная ЛЭП имеет лучшие показатели по качеству электроэнергии (ПКЭ) у потребителя по сравнению с трехфазной;

- при передаче одинаковой мощности потери в двенадцати фазной ЛЭП существенно меньше аналогичного показателя для шести фазной линии; в приведенном примере максимальное снижение достигает 48 %;

- четырехфазная ЛЭП (ЧЛЭП) обеспечивает приемлемое качество электроэнергии при обрыве одной фазы; потери мощности в неполнофазном режиме у ЧЛЭП значительно (в 2,5...3,5 раза) ниже, чем у трехфазной линии.

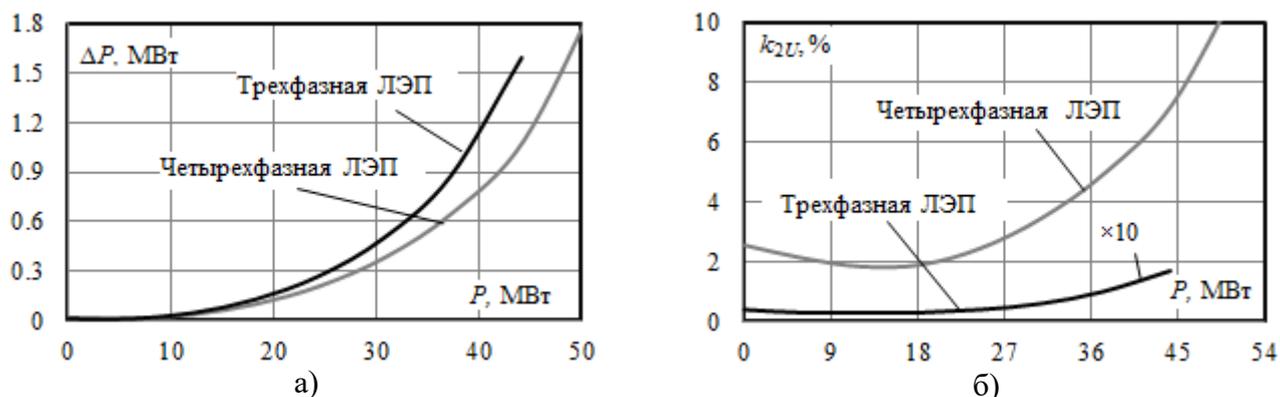


Рис. 6. Зависимости потерь (а) и коэффициента несимметрии (б) от передаваемой мощности

С помощью компьютерного моделирования показано, что многофазные ЛЭП могут более эффективно работать в режимах с отключенной фазой, чем традиционные трехфазные линии. Кроме того, величины токов межфазных коротких замыканий (КЗ) существенно зависят от фазировки замыкаемых проводов.

Фазировка проводов, изменяющаяся в циклах транспозиции, существенно влияет на уровни напряженностей ЭМП многофазных ЛЭП (рис. 7). Наиболее значительные уровни напряженности ЭМП создает девятифазная ЛЭП.

Наличие в многофазных ЛЭП линейных напряжений, равных или меньших фазного, позволяет выполнить компактизацию этих линий при размещении проводов по окружности и выполнении соответствующей фазировки. За счет компактизации достигается повышение энергоэффективности; компактная ЛЭП обеспечивает заметное улучшение ПКЭ по несимметрии (рис. 8); при этом напряженности ЭМП на высоте 1,8 м изменяются незначительно (рис. 9).

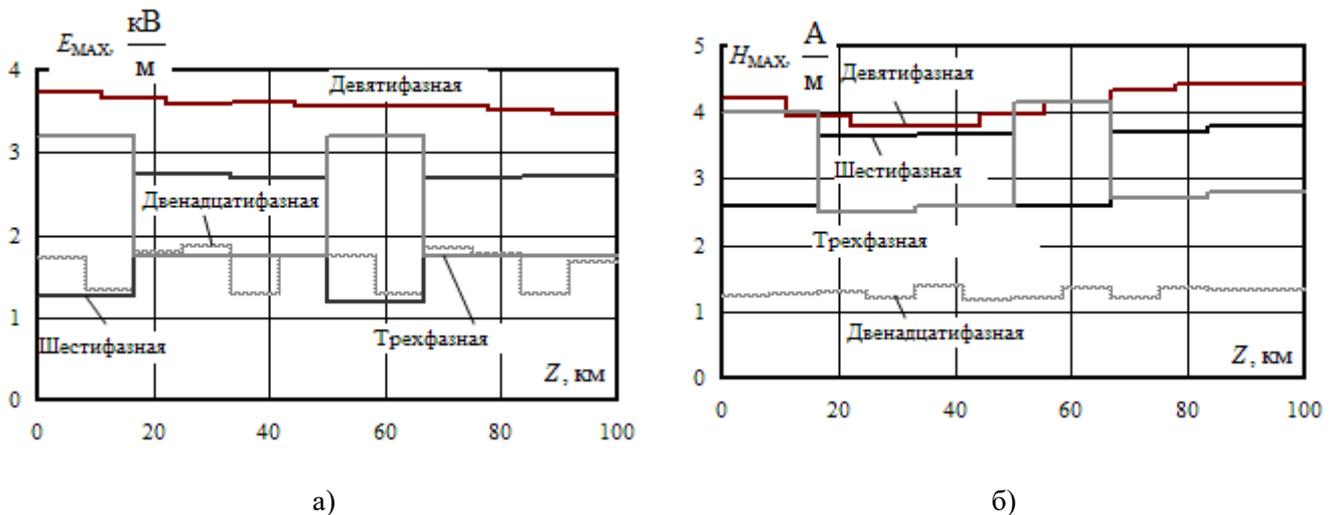


Рис. 7. Максимальные уровни напряженностей ЭМП по участкам ЛЭП:  
а – электрическое поле; б – магнитное поле

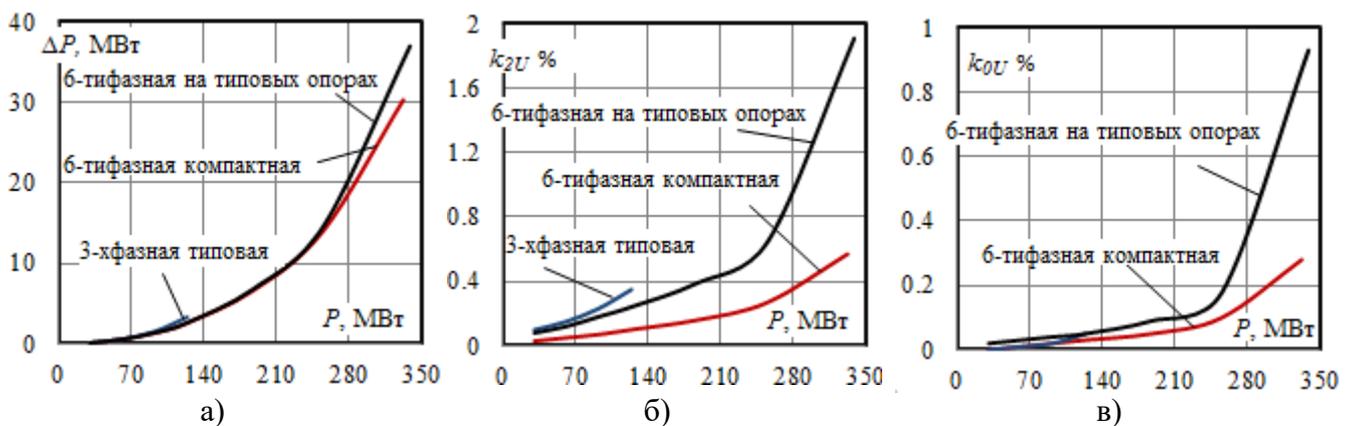


Рис. 8. Зависимости потерь и коэффициентов несимметрии от передаваемой мощности:  
а – потери; б – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности, в – коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности

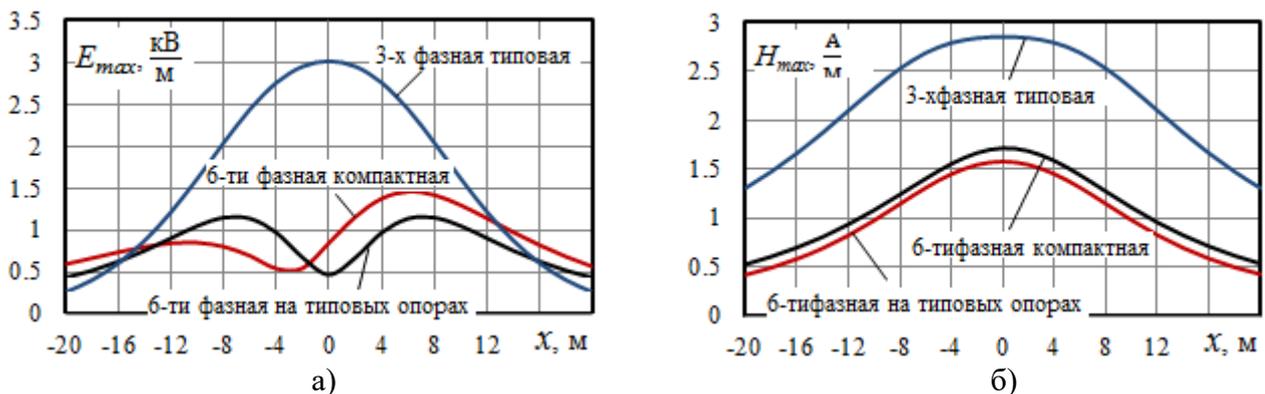


Рис. 9. Зависимости амплитуд напряженностей от координаты  $x$  оси, расположенной перпендикулярно трассе ЛЭП: а – электрическое поле, б – магнитное поле

Разработаны конструктивные схемы многофазные кабельных линий (КЛ). Схема четырехфазной КЛ показана на рис. 10 а, конструкция специального кабеля с изоляцией из молекулярного сшитого полиэтилена с двумя токоведущими частями представлена на рис. 10 б. Для моделирования режимов сети с кабельной линией разработана расчетная модель в ПК Fazonord. Для сравнения использовалась модель сети с четырехфазной воздушной линией (ВЛ).

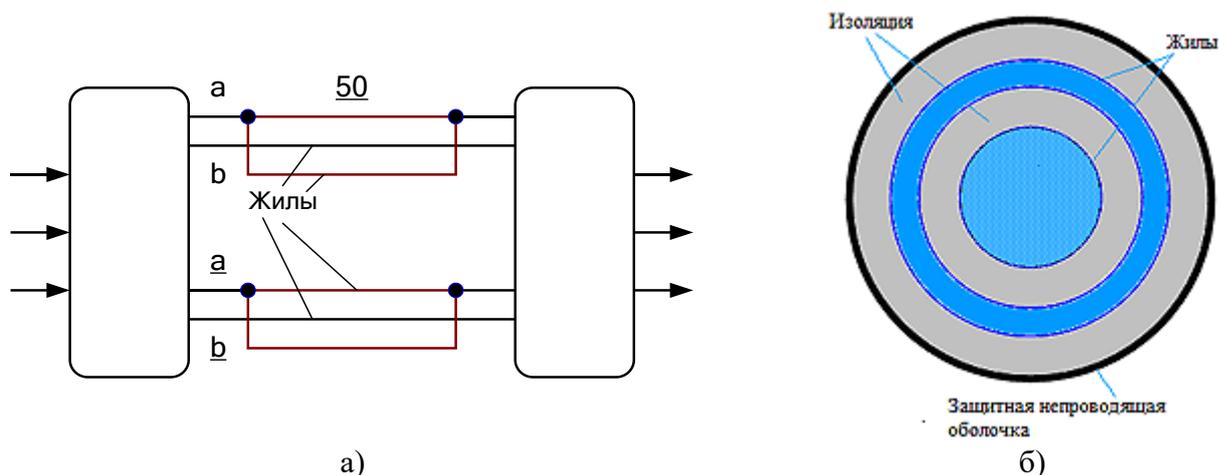


Рис. 10. Схема четырехфазной кабельной ЛЭП (а) и конструкция кабеля (б)

В диапазонах реальных нагрузок (рис. 11) четырехфазная КЛ обеспечивает лучшие показатели по энергоэффективности и качеству электроэнергии по сравнению с ВЛ такой же конструкции и одинаковыми сечениями токоведущих частей; в рассмотренной схеме при передаваемой мощности в 80 МВт потери в КЛ снижаются на 44 %, а коэффициент несимметрии на 80 %; напряженности ЭМП КЛ заметно выше (рис. 12), чем для ВЛ, но их величины не превосходят допустимых значений.

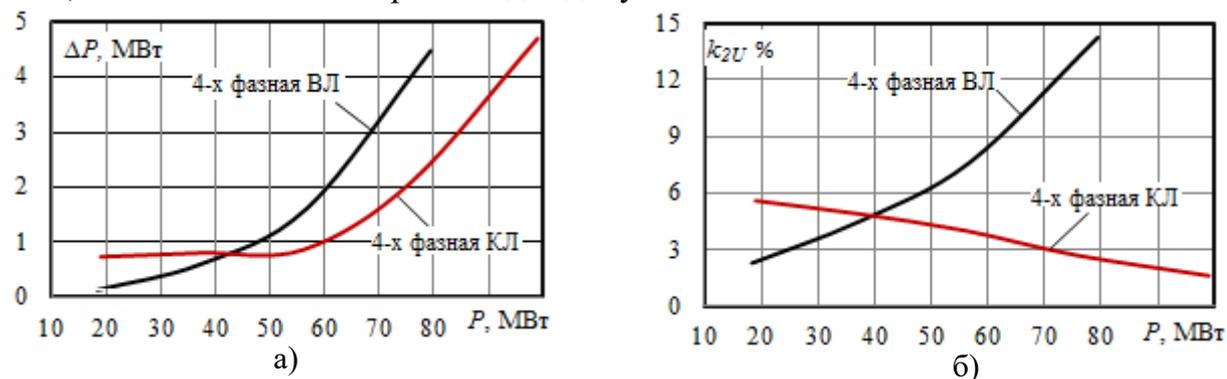


Рис. 11. Зависимости потерь и коэффициентов несимметрии от передаваемой мощности: а – потери, б - коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

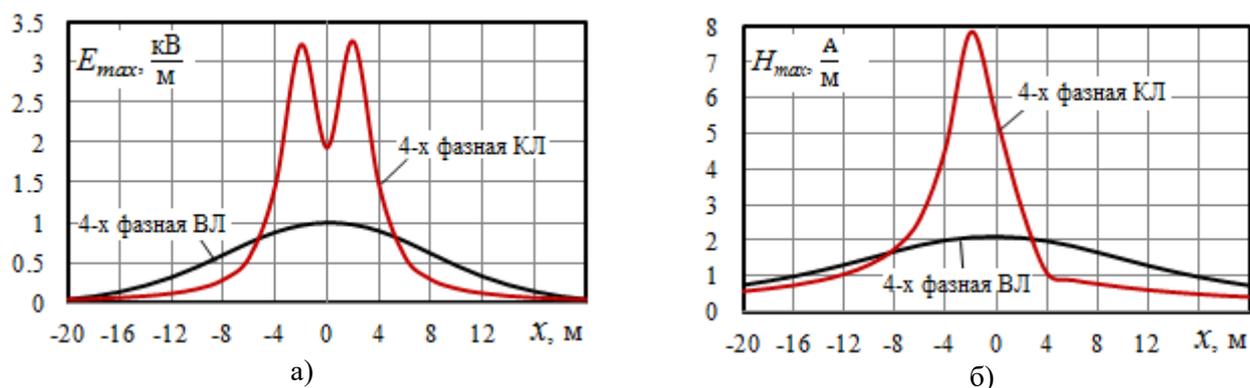


Рис. 12. Зависимости амплитуд напряженностей от координаты  $x$ : а - электрическое поле; б- магнитное поле

В третьей главе рассмотрены вопросы моделирования режимов систем с многоцепными, компактными и разомкнутыми линиями электропередачи, а также сдвоенными линиями ДПЗ. Основная задача моделирования заключалась в выявлении особенно-

стей разных типов ЛЭП по возможностям передачи мощности, качеству электроэнергии и создаваемым электромагнитным полям.

Выполнено моделирование режимов и ЭМП трехцепной линии электропередачи.  $2 \times 220 + 1 \times 110$  кВ. Для сравнения проведены расчеты режимов и ЭМП коридора ЛЭП из трех линий, смонтированных на отдельных опорах. Результаты моделирования показали, что по электрическому режиму трехцепная ЛЭП мало отличается от коридора линий. Потери коридора ЛЭП почти совпадают с потерями трехцепной линии. Несимметрия трехфазных напряжений при значительных нагрузках больше для трехцепной линии, особенно для цепи 110 кВ. Несколько ниже и уровни напряжений. Это связано со взаимовлиянием цепей. Напряженность электрического поля трехцепной ЛЭП значительно меньше напряженности поля коридора линий. Магнитное поле (МП) трехцепной ЛЭП мало отличается от магнитного поля коридора линий, за исключением более обширного диапазона охвата территории значительным МП для коридора линий.

Компактные воздушные линии (КВЛ) кроме очевидного обстоятельства сокращения площади занятого земельного участка позволяют снизить воздействие электромагнитных полей на природную среду, повысить пропускную способность, снизить потери электроэнергии по сравнению с традиционными трехфазными линиями.

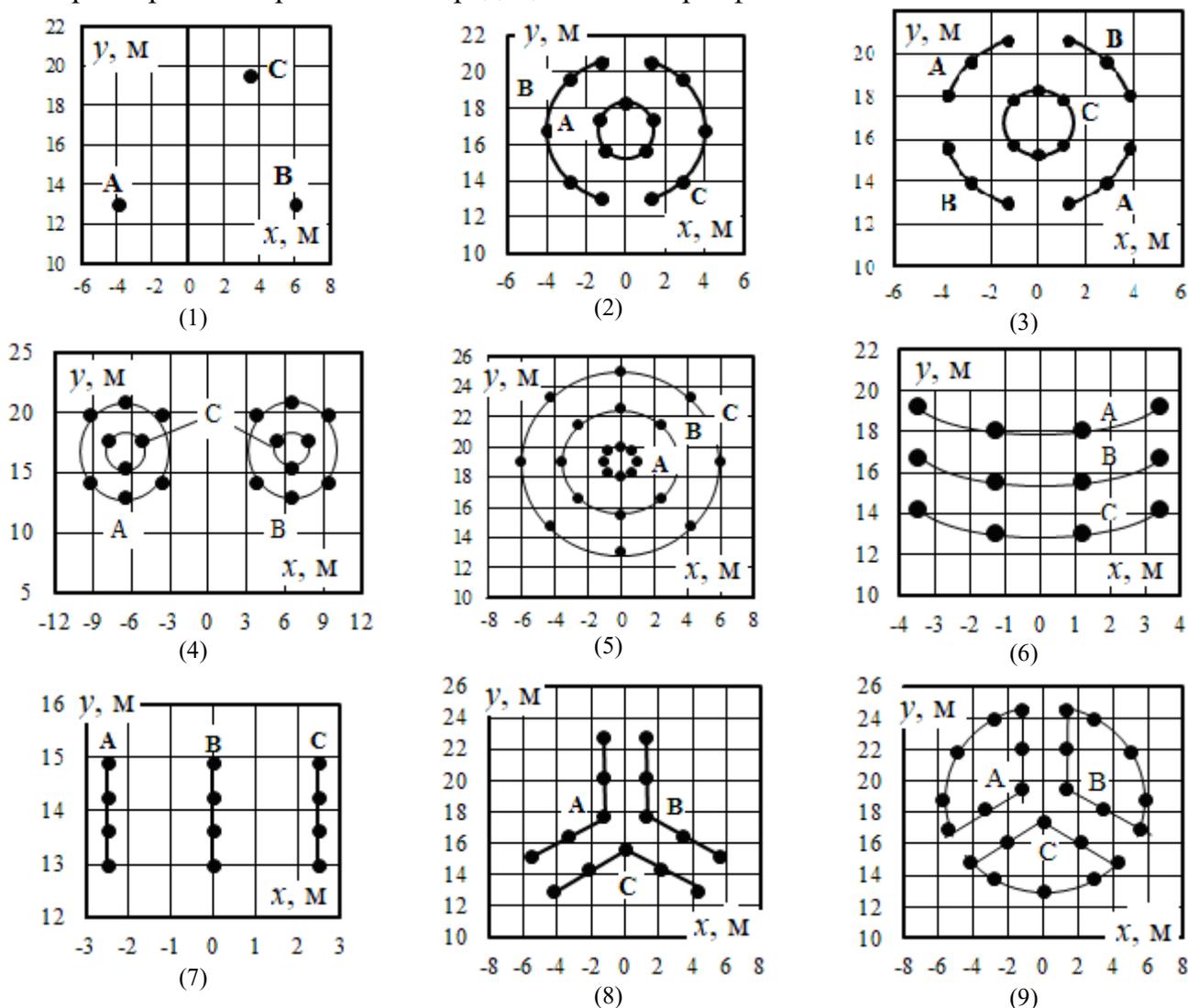


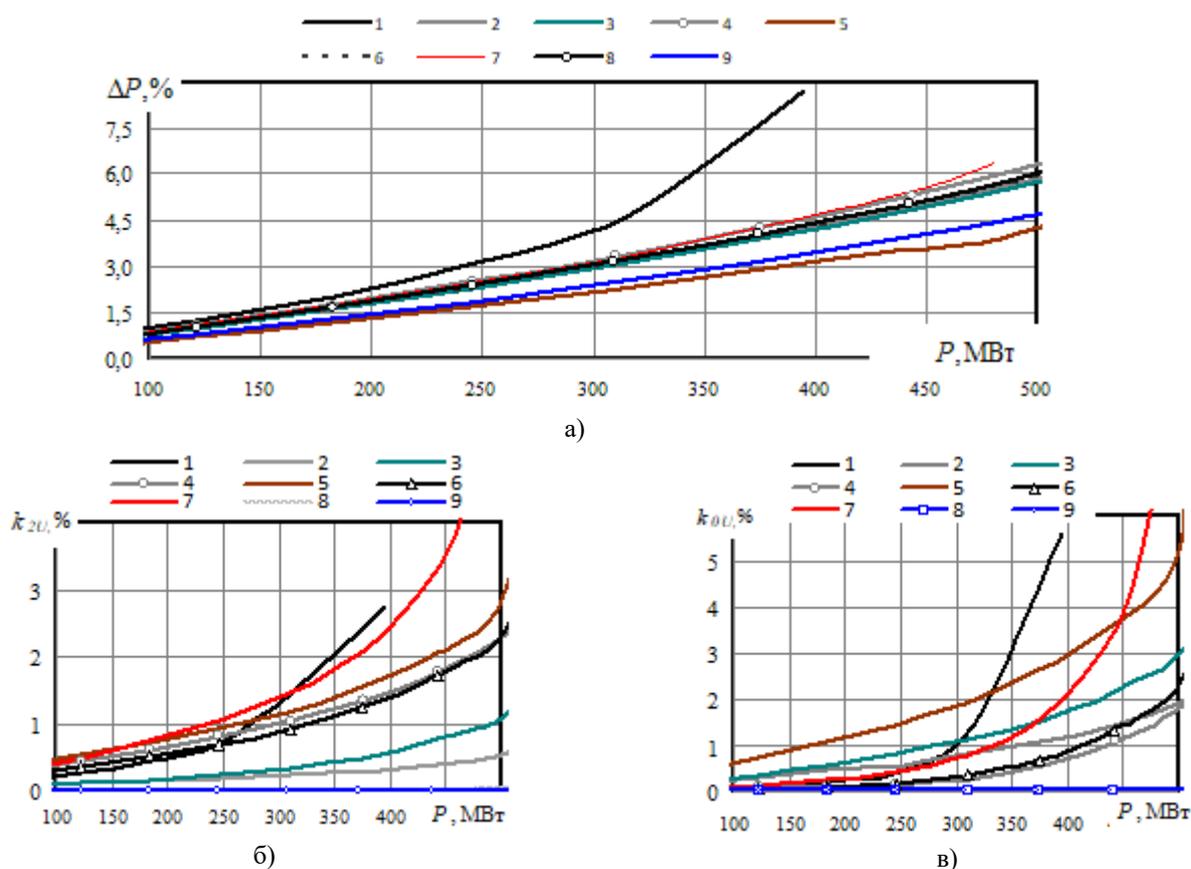
Рис. 13. Координаты расположения проводов КВЛ

В работе рассмотрены конструкции следующих ЛЭП (рис. 13) с примерно одинаковым суммарным сечением проводов: 1– трехфазная ЛЭП АС-600 традиционной кон-

струкции (ТВЛ); 2 – коаксиальная двухсегментная КВЛ; 3 – коаксиальная четырехсегментная КВЛ; 4 – коаксиальная двойная КВЛ; 5 – КВЛ с концентрическим расположением проводов; 6 – КВЛ с параболическим расположением проводов; 7 – КВЛ с вертикальным расположением проводов, 8 – КВЛ с треугольным расположением проводов, 9 – КВЛ с трехсегментным расположением проводов.

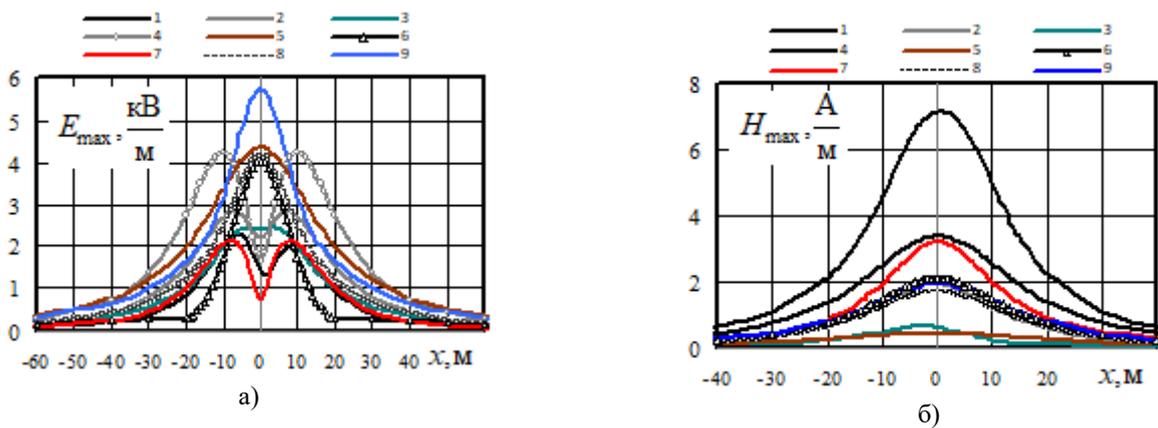
Для анализа КВЛ построены зависимости потерь и коэффициентов несимметрии от передаваемой мощности, а также диаграммы, характеризующие распределение токов по проводам расщепленных фаз. На рис. 14 приведены сводные графики потерь и несимметрии по вариантам КВЛ 220 кВ. Цифрами на рисунках обозначены соответствующие типы КВЛ.

Для анализа ЭМП построены зависимости составляющих напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м от координаты  $x$  оси, расположенной перпендикулярно трассе линии. Также представлены аналогичные графики для плотностей потоков электромагнитной энергии, определяемой вектором Пойнтинга. На рис. 15 представлены результаты расчета ЭМП КВЛ при нагрузке на приемном конце линий  $50 + j50$  МВ·А и длине ЛЭП 50 км.



**Рис. 14. Зависимости потерь и коэффициентов несимметрии от передаваемой мощности:**  
 а – потери; б – коэффициенты несимметрии по обратной последовательности, в – коэффициенты несимметрии по нулевой последовательности

Полученные результаты свидетельствуют о том, что показатели, характеризующие энергоэффективность и качество электроэнергии, для большинства из рассмотренных КВЛ, значительно лучше, чем у ТВЛ. Лидером по этим показателям является вариант № 9, однако он является наиболее сложным в реализации. К нему примыкает схожий по конструкции вариант с треугольным расположением проводов.



**Рис. 15. Зависимости амплитуд напряженностей от координаты  $x$  оси, расположенной перпендикулярно трассе ЛЭП: а – электрическое поле, б – магнитное поле**

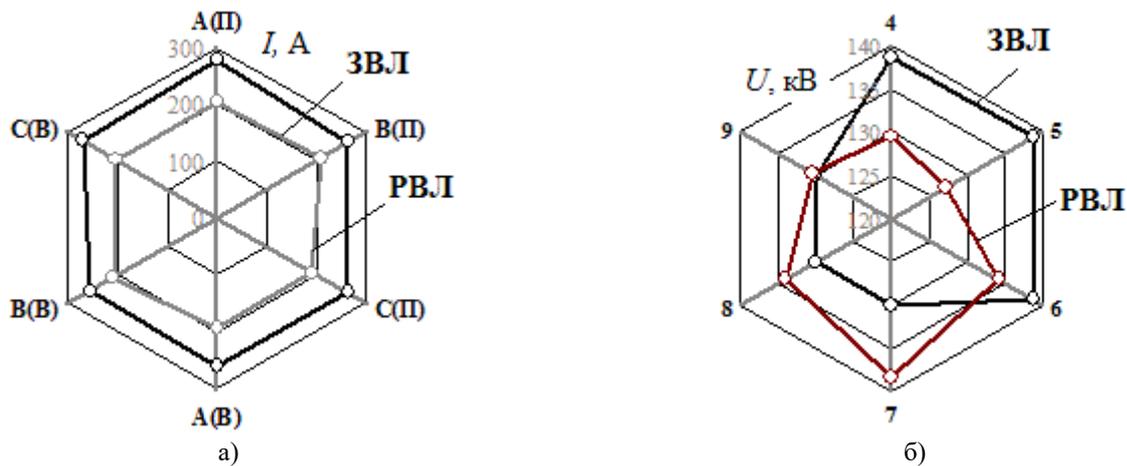
Полученные результаты показывают, что амплитуда напряженности электрического поля (ЭП) на высоте 1,8 м для КВЛ почти всех типов превышают аналогичные параметры для традиционной ЛЭП, и только КВЛ с вертикальным расположением проводов создает ЭП, сопоставимое с полем ТВЛ. Напряженность магнитного поля для всех типов КВЛ значительно ниже аналогичного параметра ТВЛ, максимальное различие имеет место для КВЛ с концентрическим расположением проводов и достигает 18 раз.

Результаты расчетов неполнофазных режимов позволили сделать следующие выводы: КВЛ с меньшим количеством проводов отличаются пониженными потерями и несимметрией; к таким ЛЭП относятся КВЛ с вертикальным и параболическим расположением токоведущих частей. Этот фактор прямо связан с емкостными токами в многопроводных системах. Тем не менее, ТВЛ всего с тремя проводами при передаваемых мощностях, выше 40 МВт становится лидером по потерям и несимметрии, что очевидно связано с приближением к пределу передаваемой мощности. В КВЛ с концентрическим расположением проводов потери мощности растут до величины передаваемой мощности 20 МВт, а затем начинают падать.

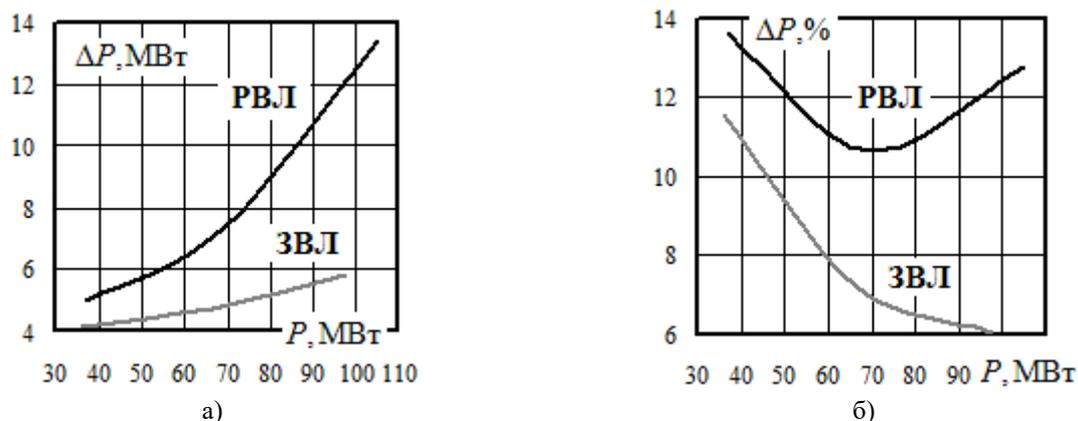
Коэффициент несимметрии по обратной последовательности лежит в довольно узких пределах, мало изменяясь в зависимости от передаваемой мощности. Наибольшую несимметрию вносит КВЛ с концентрическим расположением проводов, причем с ростом нагрузки несимметрия снижается.

Для анализа режимов и ЭМП линии электропередачи разомкнутого типа проведено комплексное моделирование ЭЭС, включающей РВЛ 220 кВ протяженностью 1200 км. Для получения приемлемых уровней напряжения потребовалась установка шунтирующих реакторов с индуктивным сопротивлением 500 Ом на разомкнутых концах прямых и встречных проводов, а также управляемого источника реактивной мощности на шинах приемной подстанции обеспечивающего стабилизацию фазных напряжений на уровне 130 кВ. При отсутствии реакторов фазные напряжения на разомкнутых концах РВЛ повышались до значений 242...254 кВ.

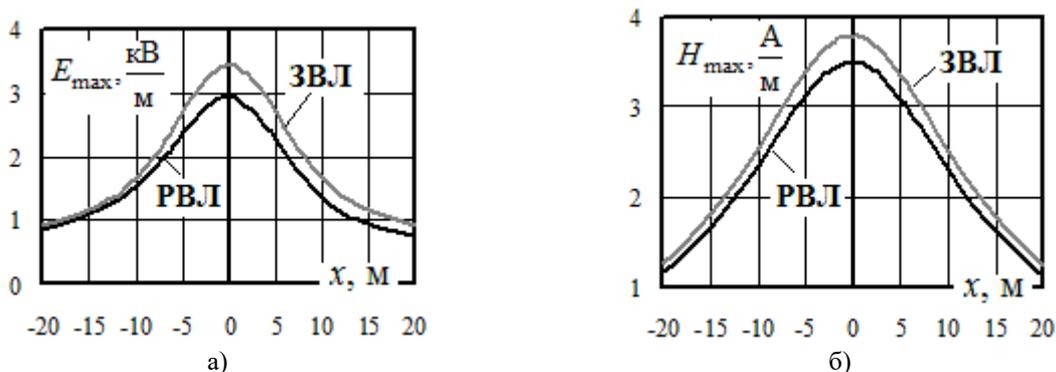
Результаты компьютерного моделирования проиллюстрированы на рис. 16-18. Для сравнения выполнено моделирование аналогичной ЛЭП 220 кВ в замкнутом исполнении (ЗВЛ). Для получения модели такой линии прямые и встречные провода отдельных фаз были замкнуты на отправном и приемном концах ЛЭП через RL-элементы с активным сопротивлением в 0,01 Ом.



**Рис. 16.** Токи проводов и напряжения в узловых точках: а – токи проводов на отправном конце ЛЭП; б – напряжения в узловых точках; цифры 4, 5, 6 – встречным проводам; 7, 8, 9 – прямым проводам



**Рис. 17.** Зависимости абсолютных и относительных потерь от передаваемой мощности



**Рис. 18.** Амплитуды напряженностей электрического (а) и магнитного (б) полей на высоте 1,8 м; суммарная нагрузка на приемном конце  $60 + j60$  МВ·А

Результаты моделирования показали следующее:

- при одинаковой суммарной нагрузке в  $60 + j60$  МВ·А по проводам РВЛ протекают токи на 9 ... 37 % больше, чем в ЗВЛ; это приводит к повышению потерь мощности;
- различие в величинах потерь РВЛ и ЗВЛ возрастает с увеличением передаваемой мощности и достигает двухкратного значения при суммарной нагрузке  $90 + j90$  МВ·А;
- в режимах симметричной трехфазной нагрузки наблюдается достаточно равномерное распределение токов по отдельным проводам РВЛ и ЗВЛ;
- имеет место заметная вариация напряжений на разомкнутых концах РВЛ; при этом размах отклонений напряжений достигает 11 кВ, а коэффициенты несимметрии

напряжений по нулевой последовательности превышают 4 %.

Из рис. 19 видно, что на трассе РВЛ создаются немного меньшие напряженности электрического и магнитного полей по сравнению с линией традиционной конструкции. Различия средних величин достигают следующих значений: по электрическому полю 13 %, а по магнитному 8 %.

Для формирования сетей на территориях сельских поселений, а также для электропитания объектов, расположенных в районах, удаленных от развитой сетевой инфраструктуры, возможно применение ЛЭП, выполненных с использованием земли в качестве фазного или обратного проводов. Однако при этом возникают проблемы, связанные с обеспечением условий электробезопасности. Для их решения могут применяться сдвоенные линии «два провода – земля» (рис. 5), в которых ток в земле не протекает.

Сдвоенная линия «два провода – земля» по сравнению с двухцепной трехфазной ЛЭП обеспечивает заметную экономию цветного металла, однако линия ДПЗ имеет ухудшенные показатели по потерям и несимметрии напряжений на шинах подстанции потребителя. Напряженности электрического поля под проводами ДПЗ на высоте 1,8 м на 33 % выше аналогичного показателя трехфазной ЛЭП такого же класса напряжения. Максимальное значение амплитуды магнитного поля ДПЗ вдвое выше напряженности поля трехфазной ЛЭП.

Разработаны конструктивные схемы кабельных ДПЗ сдвоенного типа (рис. 19), которые могут применяться для формирования сетей в ситуациях, ограничивающих применение воздушных линий. Такие ситуации возникают в городской застройке, а также при организации изолированных систем электроснабжения удаленных районов, характеризующихся значительными ветровыми нагрузками. Кроме того, ее использование может быть целесообразным для передачи электроэнергии подводными кабелями на островные территории. Предложены две конструктивные схемы КЛ: на основе двух кабелей специального типа по рис. 11 б и на базе четырех одножильных кабелей типовой конструкции.

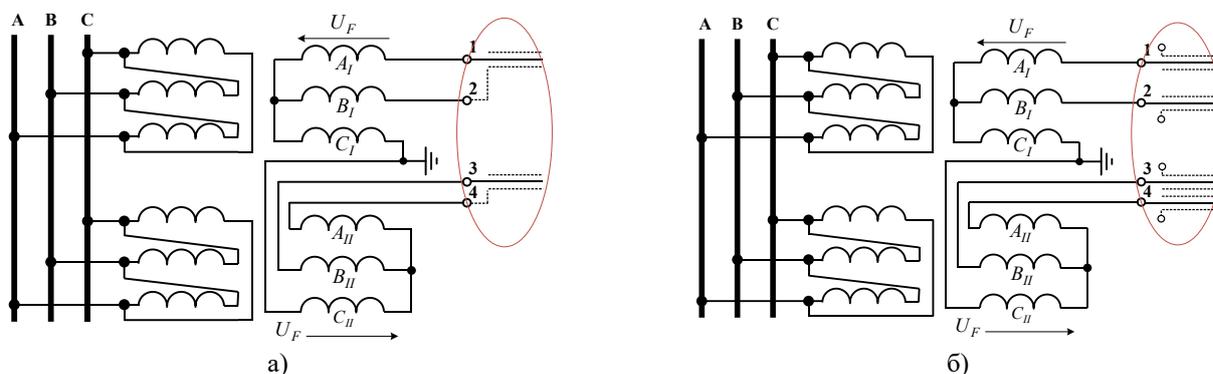


Рис. 19. Схемы кабельных ДПЗ сдвоенного типа: а – двухкабельная ДПЗ; б – четырехкабельная ДПЗ

Двухкабельная ДПЗ (рис. 19 а) характеризуется пониженными потерями и значительно меньшим уровнем несимметрии по сравнению с воздушной ДПЗ, однако создает более высокие напряженности магнитного поля в непосредственной близости от оси линии, требует изолирующих покровов, рассчитанных на рабочие напряжения линии, и повышенного поперечного сечения экрана, используемого в качестве токоведущей части. Четырехкабельная ДПЗ (рис. 19 б) по своим режимным свойствам мало отличается от двухкабельной линии, но не требует применения специализированных одножильных кабелей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных диссертационных исследований получены новые научные результаты, направленные на реализацию математических моделей мультифазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП, а также методов моделирования режимов электроэнергетических систем, имеющих в своем составе такие линии.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы состоят в следующем:

1. Разработаны модели электроэнергетических систем, включающих в свой состав многофазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП, а также линии ДПЗ; в отличие от известных указанные модели и методы определения нормальных, аварийных и неполнофазных режимов ЭЭС реализованы на основе фазных координат и решетчатых схем замещения.

2. Предложены методы анализа электромагнитной обстановки на трассах многофазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП, а также линий ДПЗ, отличающиеся от известных способами определения электромагнитных полей, использующих результаты расчета режимов в фазных координатах.

3. Разработаны конструктивные схемы четырехфазной и шестифазной ЛЭП, отличающиеся от известных использованием кабелей специального исполнения с изоляцией из молекулярно сшитого полиэтилена.

4. Предложены оригинальные конструктивные схемы двухкабельной и четырехкабельной линий «два провода-земля» сдвоенного типа.

5. С помощью предложенных в работе методов и алгоритмов можно решать следующие задачи, возникающие при проектировании и эксплуатации: определение режимов интеллектуальных ЭЭС с активно-адаптивными сетями, имеющие в своем составе мультифазные, многоцепные, компактные и разомкнутые ЛЭП; определение условий электромагнитной безопасности на трассах многофазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП, а также сдвоенных линий ДПЗ; повышение энергоэффективности и качества электроэнергии в ИЭЭС ААС.

6. Цифровые модели и результаты моделирования режимов, а также практические рекомендации по применению предложенных алгоритмов использованы в разработках ООО «НТЦ Параметр». Материалы диссертации применяются в учебном процессе на кафедрах «Электроэнергетика транспорта» ИрГУПС и «Электроснабжение и электротехника» ИРНТУ, «Электротехника и электроника» Военно-промышленного колледжа провинции Фу Тхо Социалистической Республики Вьетнам.

Перспектива дальнейшей разработки темы может состоять в проведении исследований, направленных на разработку методов определения электромагнитных полей в местах непараллельного сближения мультифазных, многоцепных, компактных и разомкнутых ЛЭП.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 05.14.02

1. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых многофазными линиями электропередачи // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 3(110). 2016. С. 67-75

2. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование нормальных и аварийных режимов четырехфазных линий электропередачи // Вестник Иркутского государственного технического университета. Т. 20. № 12. 2016. С. 136–145. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-12-136-145

3. Буякова Н. В., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование компактных линий электропередачи с вертикальным расположением проводов // Вестник Иркутского государственного технического университета. Т. 22. № 11. 2018. С. 159-169.

#### **Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК по смежной специальности 05.14.01**

4. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитной обстановки на трассах многофазных линий электропередачи // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. № 4(52). 2016. С. 209-218.

#### **Статьи в изданиях, индексируемых в Scopus**

5. N. V. Buyakova, Le Van Thao, A.V. Kryukov. Simulation of Compact Power Lines. 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon).2019. Publisher: IEEE. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934106.

6. N. V. Buyakova, A. V. Kryukov; Le Van Thao. Integrated modeling of compact power lines. International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019). 2019. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405007>

7. Natalia V. Buyakova, Andrey V. Kryukov, Dmitriy A. Sereдкин and Le Van Thao. Computer models in problems of ensuring electromagnetic safety. E3S Web of Conferences 216, 01062 (2020). RSES 2020. pp. 1-7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601062>.

8. Buyakova N. V., Kryukov A. V., Sereдкин D. A., Van Thao Le. Simulation of Electromagnetic Fields Occurring at Intersection of Traction Networks and Multicircuit Power Lines. E3S Web of Conferences 209, 07002 (2020). ENERGY-21. pp. 1-6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020907002>.

#### **В других изданиях**

9. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Учет транспозиции проводов при моделировании электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи // Информационные и математические технологии в науке и управлении. № 2. 2016. С. 71-80.

10. Закарюкин В. П., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование режимов четырехфазных линий электропередачи // Вестник Ангарского государственного технического университета. №10 . 2016. С. 53-58.

11. Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитных полей многофазных линий электропередачи // Молодая мысль – развитию энергетики. Братск: БрГУ, 2016. С. 282-286.

12. Лэ Ван Тхао. Моделирование режимов с продольной несимметрией в многофазных линиях электропередачи // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. В 2-х тт. Т. 1. Иркутск: ИрГУПС, 2017. С. 721-725.

13. Лэ Ван Тхао. Моделирование неполнофазных режимов девятифазных линий электропередачи // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. В 2-х тт. Т. 2. Иркутск: ИРНТУ 2017. С. 221-226.

14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао. Моделирование неполнофазных режимов четырехфазных линий электропередачи// Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Иркутск: Выпуск 27, 2017. С. 47-53.

15. Лэ Ван Тхао. Моделирование неполнофазных режимов двенадцати фазных линий электропередачи // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Иркутск: Вып. 27, 2017. С. 53-58.

16. Лэ Ван Тхао. Моделирование режимов разрыва двух фаз девятифазных линий электропередачи // Энергетика в современном мире. Чита, 2017. С. 58-64.

17. Моделирование электромагнитных полей, создаваемых компактными многосегментными линиями электропередачи / Н. В. Буякова, В. П. Закарюкин, А.В. Крюков, Лэ Ван Тхао // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. Ангарск, 2018. С. 152-161

18. Лэ Ван Тхао. Моделирование компактных линий электропередачи с коаксиальным расположением проводов // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Рубцовск, 2018. С. 351-357

19. Лэ Ван Тхао, Ле Конг Зань. Моделирование аварийных режимов девятифазных линий электропередачи// Транспортная инфраструктура сибирского региона. Иркутск. 2018. С. 655-659

20. Лэ Ван Тхао. Режимные особенности многофазных линий электропередачи // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. в 2 тт. Т. 2. Иркутск. 2018. С. 170-175.

21. Буюкова Н. В., Крюков А. В., Лэ Ван Тхао. Моделирование компактных линий электропередачи с треугольным расположением проводов. Вестник ангарского государственного технического университета. Ангарск: 2018. С 20-28.

22. Лэ Ван Тхао. Моделирование электромагнитных полей коаксиальной трехсегментной линии электропередачи // Молодая мысль – развитию энергетики. Братск: БрГУ, 2018. С. 104 -108.

23. Лэ Ван Тхао. Моделирование компактных воздушных линий с коаксиальным двойным расположением проводов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. Иркутск, 2019. С. 212 – 216

24. Лэ Ван Тхао. Электромагнитная безопасность на трассах компактных линий электропередачи // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения. В 2 частях. Тольятти. 2019. С 185 - 190.

25. Компьютерные модели в задачах обеспечения электромагнитной безопасности / Н. В. Буюкова, А. В. Крюков, Д. А. Середкин, Лэ Ван Тхао // Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. Иркутск, 2020. С. 73-82