

*На правах рукописи*

Воронов Павел Леонидович

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА  
ПО ЧАСТЯМ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Чебоксары – 2019

Работа выполнена на кафедре Электроснабжения и интеллектуальных электроэнергетических систем имени А.А. Фёдорова федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор  
**Щедрин Владимир Александрович**

Официальные оппоненты: **Макаров Валерий Геннадьевич**,  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра Электропривода и электротехники, заведующий кафедрой;

**Пупин Валерий Михайлович**,  
кандидат технических наук, доцент, общества с ограниченной ответственностью «НПК Промир», управляющий проектами.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».**

Защита состоится «19» апреля 2019 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.301.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» в зале заседания Ученого совета (г. Чебоксары, ул. Университетская, д. 38 (учебный корпус № 3), к. 301.)

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова» и на сайте [www.chuvsu.ru](http://www.chuvsu.ru).

Автореферат разослан «26» февраля 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.302.06

Н.В. Руссова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Современные системы электроснабжения (СЭС), объединяющие в единый комплекс принципиально новые компоненты генерации, преобразования, передачи и потребления электроэнергии (ЭЭ), становятся все более технологически сложными и крупномасштабными инфраструктурами. Внедрение распределенной генерации, преобразователей напряжения, компенсаторов реактивной мощности и других регулирующих и управляющих устройств на базе современной силовой электроники, приводит к изменению традиционной иерархической (преимущественно радиальной) структуры сетей СЭС. Они превращаются в сложно-разветвленные и неструктурированные комплексы, нуждающиеся в интеллектуальном управлении, способном обеспечить совместную согласованную и функционально надежную работу всех элементов СЭС. Для успешного исследования режимов сложных СЭС, рационального использования управляющих и информационно-измерительных систем, вычислительных средств, устройств релейной защиты и автоматики требуется разработка систематизированного и единообразного метода анализа и расчета, одинаково применимого как для каждого отдельного элемента, так и для СЭС в целом. Разработка такого метода – весьма актуальная задача. Одним из направлений её эффективного решения является использование тензорно-топологической методологии, позволяющей в рамках единой обобщенной теории рассматривать стационарные сети, электрические машины, электротехнические комплексы и любые устройства управления и регулирования СЭС, а также вводить с целью упрощения анализа и расчета различные системы координат, находить требуемые решения по частям с помощью эффективных алгоритмов и стандартных процедур преобразования тензорных уравнений. основополагающие идеи, первые теоретические и практические обоснования применения тензорно-топологического метода, включая диакоптику или расчеты по частям, к электротехническим комплексам и системам принадлежат Г. Крону. Они базируются на ключевых понятиях тензорного анализа и топологии дифференцируемых многообразий. Значительный вклад в развитие разнообразных диакоптических методов применительно к электротехническим комплексам и электрическим системам наряду с зарубежными исследователями внесли отечественные ученые А.Е. Арменский, Р.И. Березуев, П.А. Бутырин, Н.М. Ермолаева, С.А. Курганов, А.Е. Петров, Г.Е. Пухов, Е.В. Сметанин, Ю.Н. Сохор, В.В. Филаретов, М.А. Шакиров и многие другие.

Практическая реализация тензорно-топологического метода сопряжена с обоснованием применимости тензоров к дискретным электрическим системам, выявлением характера наложенных на рассматриваемую СЭС связей, а также с проверкой правильности построения математических моделей, не нарушающих основных физических законов и топологических принципов. Развитие активно-адаптивных систем, внедрение элементов гибких передач ЭЭ и расширение доли распределенной генерации требуют дальнейшей разработки и реализации оптимальных и эффективных алгоритмов для режимных расчетов электротехнических комплексов и СЭС с учетом их особенностей и характеристик используемых программно-вычислительных комплексов (ПВК).

**Целью диссертации** является разработка и реализация ряда методик и алгоритмов расчета симметричных и несимметричных режимов сложно-разветвленных сетей СЭС тензорно-топологическим методом для повышения

эффективности их моделирования, проектирования и эксплуатации.

**Основные задачи.** Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие теоретические и практические задачи:

1. Обоснование и выбор модифицированной тензорно-топологической модели электрических сетей СЭС с уточнением понятия ортогональной сети, постулата об инвариантности мощности, а также применения несингулярных матриц преобразования координат.

2. Разработка методик и реализация алгоритмов анализа, расчета и эквивалентирования электротехнических комплексов и СЭС по частям в ортогональной системе координат.

3. Построение и практическая реализация алгоритмов режимных расчетов и токов короткого замыкания для начального и заданного момента времени крупномасштабных СЭС.

4. Определение математических моделей взаимосвязанных электрических машин и сетей СЭС во вращающихся вещественных и комплексных системах координат.

5. Разработка и реализация методик расчета несимметричных и сложных видов повреждений в СЭС тензорно-топологическим методом.

**Объектом исследования** являются сложно-разветвленные сети систем электроснабжения.

**Предметом исследования** является моделирование, анализ и расчет электромагнитных процессов на основе использования тензорного метода и диакоптики.

**Область исследования** относится к разработке и реализации методик анализа и расчета электрических величин при симметричных и несимметричных режимах и повреждениях в СЭС.

**Методология и методы исследования.** В работе применены методы теоретических основ электротехники, тензорного анализа электрических сетей и диакоптики, математического моделирования и расчетов электромагнитных процессов в СЭС с использованием программно-вычислительных комплексов.

**Достоверность результатов** подтверждается корректным использованием обоснованных методов исследования, обсуждением результатов работы на международных всероссийских и республиканских научно-практических конференциях, совпадением результатов с теоретическими и экспериментальными данными, в том числе и полученными другими исследователями.

**Соответствие паспорту специальности 05.09.03** – электротехнические комплексы и системы. Объект изучения: электротехнические комплексы и системы генерирования электрической энергии, электропривода, электроснабжения, электрооборудования. Область исследований (п.1): развитие теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное моделирование компонентов электрических комплексов и систем; (п.4): исследование работоспособности и качества функционирования в различных режимах при разнообразных внешних воздействиях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модифицированная топологическая модель ортогональной электрической сети, характеризующая соотношения между параметрами её в многомерных системах координат.

2. Алгоритмы и программы вычисления электрических величин в нормальных и аварийных режимах, автоматического формирования матриц преобразования и объединения решений фрагментов (подсхем) СЭС, рассчитанных по частям.

3. Методика упрощения и эквивалентирования сложно-разветвленных сетей тензорно-топологическим методом, позволяющая сохранять в эквивалентной модели все или часть узлов, к которым присоединены генераторы и обобщенные нагрузки СЭС.

4. Методика расчета несимметричных простых и сложных видов повреждения, использующая матрицы преобразования координат, уравнения связи и рассчитанные по частям схемы последовательностей СЭС для симметричных составляющих.

5. Результаты исследования и расчетов установившихся и электромагнитных процессов в конкретных СЭС при симметричных и несимметричных режимах.

#### **Научная новизна работы:**

1. Предложена и исследована модифицированная двухмерная топологическая модель ортогональной электрической сети и раскрыта двойственность между её геометрической конфигурацией и параметрами режима СЭС, отражающая физическое содержание сингулярных и несингулярных матриц преобразования, а также замкнутых (соленоидальных) и открытых (ламинарных) путей токов и напряжений в 1 – сети и 2 – сети.

2. Разработаны и практически реализованы алгоритмы расчета режимов СЭС, автоматического формирования матриц, используемых при объединении решений связанных и изолированных подсхем СЭС, рассчитанных по частям, не зависящие от числа и вида взаимосвязей подсхем и удобные для расчетов на ПК.

3. Построены и адаптированы математические модели синхронных генераторов и электрических сетей в вещественных и комплексных вращающихся системах координат с помощью тензорных преобразований, и ковариантной производной по времени.

4. Разработаны на основе тензорно-топологического метода и теории ортогональных сетей методика и алгоритмы расчета несимметричных и сложных видов повреждений в СЭС, отличающиеся от традиционных совместным использованием матриц преобразования координат, уравнений связи и рассчитанных по частям схем последовательностей для симметричных составляющих.

#### **Практическую и теоретическую ценность** в работе представляют:

1. Разработанные методики и алгоритмы, реализующие расчеты электрических величин при симметричных и несимметричных режимах в сложно-разветвленных СЭС по частям, могут быть использованы предприятиями и организациями, занимающимися проектированием и эксплуатацией электрооборудования электротехнических комплексов и систем любого класса напряжений.

2. Реализованные алгоритмы автоматического формирования схем замещения СЭС, рассчитываемых по частям, применение метода двойной факторизации, формирование матриц преобразования и объединения решений подсистем, обеспечивают высокую скорость режимных расчетов и могут быть применены в программном обеспечении для оценки и прогнозирования режимов в темпе процесса.

3. Методика эквивалентирования и упрощения сложно-разветвленных сетей СЭС, обеспечивающая инвариантность мощности, сохранение узлов подключения генераторов и мощных двигателей, участвующих в подпитке мест повреждения, может быть использована при анализе переходных электромагнитных процессов и при вычислении собственных значений уравнений, определяющих характер

свободных процессов.

4. Математические модели элементов СЭС, методика расчетов несимметричных и сложных видов повреждений, а также разработанное программное обеспечение могут применяться в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.02 – энергетика и электротехника.

**Апробация результатов исследования.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и республиканских конференциях: II Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России-2013» (Чебоксары, 2013), IV, V и VII Международные научно-технические конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск, 2013; Томск, 2014; Казань, 2016), IV Международная научно-практическая конференция и выставка «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» (Чебоксары, 2017). X Всероссийская научно-техническая конференция «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем» (Чебоксары, 2013), Республиканские научно-технические конференции молодых специалистов «Электротехника, Электромеханика, Электроэнергетика» (Чебоксары, 2009, 2010, 2018), Всероссийские 46-я и 47-я научные студенческие конференции по гуманитарным, естественным, техническим наукам (Чебоксары, 2012, 2013), Республиканская научно-техническая конференция молодых специалистов в рамках форума «РЕЛАВЭКСПО - 2017» (Чебоксары, 2017). XI Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в электротехнике и электроэнергетике» (Чебоксары, 2018)

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы для анализа режимов работы СЭС на предприятиях ООО НПП «ЭКРА» и ЗАО «ЭнЛАБ», что подтверждается актами о внедрении. На программное обеспечение, созданное в ходе работы, получено два свидетельства о государственной регистрации. Материалы диссертации также внедрены в учебный процесс факультета энергетики и электротехники Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова, что подтверждается соответствующей справкой.

**Публикации.** Основные результаты исследования отражены в 35 научных работах, в том числе, в 5 статьях, опубликованных в журналах из перечня ВАК, 2-х свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ, сборниках научных работ и докладах на конференциях.

**Структура и объем работы:** диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы (157 наименований), и приложений (5 страниц), включает в себя 258 страниц машинного текста, 27 рисунков и 1 таблицу.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая ценность диссертационной работы и представлена её структура.

**В первой главе** обсуждены основные дискуссионные моменты и проблемы развития тензорно-топологического метода анализа и расчета сложных электрических систем по частям, отмечены работы ряда отечественных и зарубежных ученых, внесших заметный вклад в разрешение указанных проблем. Здесь же рассмотрены основные понятия, относящиеся к тензорам, конфигурационным топологическим пространствам, обобщенным координатам электрических сетей и машин,

соответствующим уравнениям Лагранжа-Максвелла, в которых используются сосредоточенные параметры, линейные и квадратичные формы, выраженные через токи и напряжения. Построенные на базе этих уравнений топологические модели или схемы замещения могут быть обоснованно применены при анализе и расчете режимов работы квазистационарных электротехнических комплексов и устройств СЭС. В главе даны представления о трех видах 1-сетей (материальной, абстрактной, определяющей систему осей координат, и электрически возбужденной, характеризуемой эквипотенциальными линиями токов).

**Во второй главе,** исходя из тензорно-топологической методологии Г. Крона, предлагается простейшая модифицированная двойственная (двухфазная) топологическая модель электрической сети, учитывающая влияние окружающего её невидимого электромагнитного поля (рисунок 1 а, б).

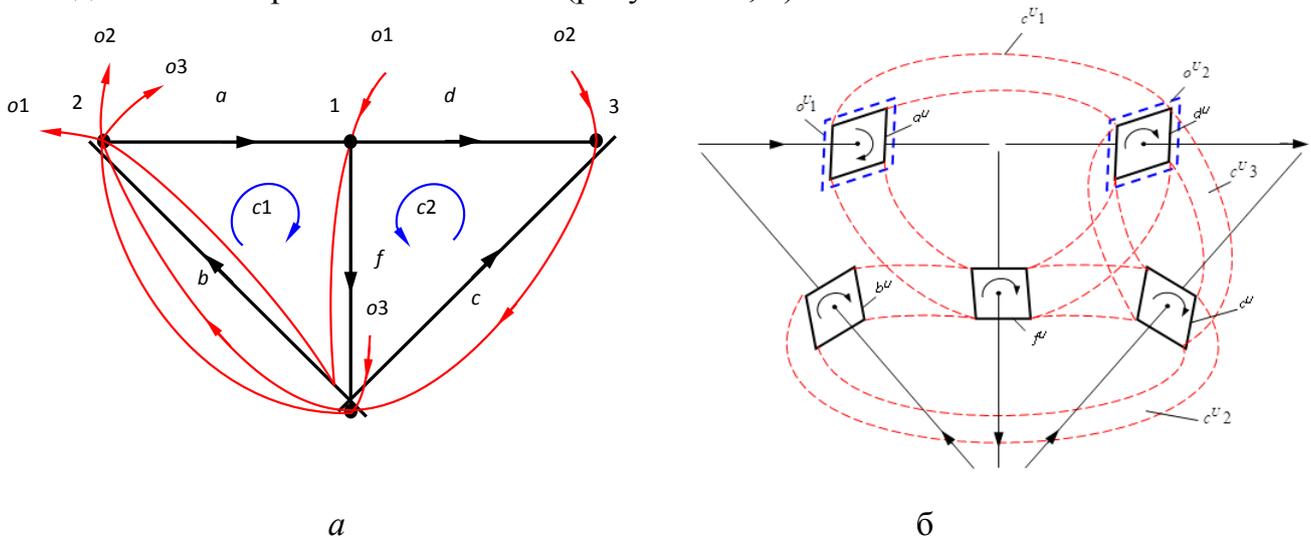


Рисунок 1 – Топологическая модель сети: а – замкнутые и открытые пути 1-сети токов; б – открытые и замкнутые пути 2-сети напряжений

Новая модель удовлетворяет топологическим принципам дифференцируемых многообразий и физическим законам, выраженным уравнениями в инвариантной тензорной форме. Такая модель на примере простейшей 1 сети, показана на рисунке 1, а. Она сопоставляется с графом из 5 ветвей и 4 узлов. Граф и видимая электрически невозбужденная 1-сеть топологической модели (рисунок 1, а) совпадают. Однако, электрически возбужденная 1-сеть в топологической модели характеризуется набором замкнутых и открытых путей токов, состоящих только из ветвей и формирующихся, в отличие от матриц инцидентий теории графов, посредством матрицы преобразования  $[C]$ . Столбцы  $[C]$  перечисляют ветви, образующие замкнутые (с) и открытые (о) пути токов, суммарное число которых равно количеству ветвей. Эти пути выполняют роль абстрактной системы осей координат. Здесь отсутствует система пространственных координат в обычном смысле. Двойственная же (двумерная) 2-сеть (рисунок 1, б) представляется набором эквипотенциальных поверхностей открытых и замкнутых путей напряжений, дуальных ветвям 1-сети. Поверхности 2-сети ориентированы с помощью единичных векторов абстрактной системы координат, которые условно обозначены площадками в виде ромбов. Им приписаны базисные векторы  $a^U$ ,  $b^U$  и т.д. Замкнутые и открытые пути напряжений формируются посредством матрицы  $[A]=[C]^{-1}$ , столбцы которой перечисляют поверхности, образующие соответствующие открытые и замкнутые пути напряжений, обозначенные пунктирными линиями. Матрицы преобразования  $[C]$  и  $[A]$  относятся к

особым понятиям и являются базовыми характеристиками рассмотренных ортогональных 1 и 2-сетей, выполняя роль тензоров преобразования. Для приведенного примера они имеют вид:

$$[C] = \begin{array}{c|ccc|ccc} & c1 & c2 & o1 & o2 & o3 & & & \\ \hline a & 1 & & & & & & & \\ \hline b & 1 & & 1 & 1 & 1 & & & \\ \hline c & & 1 & & -1 & & & & \\ \hline d & & -1 & & & & & & \\ \hline f & 1 & 1 & 1 & & & & & \\ \hline \end{array}; \quad [C_i^{-1}] = [A] = \begin{array}{c|ccc|ccc} & o^U_1 & o^U_2 & c^U_1 & c^U_2 & c^U_3 & & & \\ \hline a^U & 1 & & -1 & & & & & \\ \hline b^U & & & & & & & & 1 \\ \hline c^U & & & & -1 & 1 & & & \\ \hline d^U & & -1 & 1 & -1 & & & & \\ \hline f^U & & & 1 & & & & & -1 \\ \hline \end{array}.$$

Заметим, что в 2-сети в отличие от 1-сети имеет место два открытых и три замкнутых пути напряжения. Это означает, что геометрические пространства токов и напряжений являются сопряженными. Следовательно, возбужденную электрическую систему целесообразно характеризовать, по крайней мере, двойственной топологической моделью, состоящей из двух ортогональных друг другу сетей, и оперировать одновременно четырьмя тензорами (качественными параметрами режима), которые в каждой из них представляются в векторной форме записи:  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{U}$  и  $\mathbf{i}^*$ ,  $\mathbf{e}^*$ ,  $\mathbf{I}^*$ ,  $\mathbf{U}^*$ . Индекс (\*) подчеркивает сопряженность векторов 1-сети и 2-сети.

Модифицированная модель возбужденной электрической 1-сети, характеризуется двумя наборами уравнений в форме закона Ома:  $(\mathbf{e}+\mathbf{U}) = \mathbf{Z}(\mathbf{i}+\mathbf{I})$ ,  $(\mathbf{i}+\mathbf{I}) = \mathbf{Y}(\mathbf{e}+\mathbf{U})$ , в которых задействовано четыре параметра режима и операторы  $\mathbf{Z}$ ,  $\mathbf{Y}$ , наделенные новыми свойствами, а также несингулярными матрицами преобразования  $[C]$ ,  $[A]$ , позволяющими представлять множество схем, состоящих из одних и тех же ветвей (элементов, устройств, подсхем), в виде одной и той же системы, но в различных координатах. Если разделить матрицы  $[C]$  и  $[A]$  вертикальными линиями по осям замкнутых и открытых путей токов или напряжений, как показано выше, то можно образовать соответственно четыре сингулярные матрицы  $[C_c]$ ,  $[C_o]$ ,  $[A^o]$ ,  $[A^c]$ . Они наделены физическим содержанием, поскольку являются матрицами соединения (связи) и обладают отличительными свойствами, выражаемыми матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} A^c \\ A^o \end{bmatrix} \cdot [C_c C_o] = \begin{bmatrix} A^c C_c & A^c C_o \\ A^o C_c & A^o C_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

из которого следует, что пространства замкнутых и открытых путей токов и напряжений ортогональны (перпендикулярны) друг другу. Отсюда следует и условное название «ортогональная сеть». Поскольку обе матрицы несингулярные и имеют обратные, то их можно использовать в базовых формулах преобразования тензоров электрических сетей при различных изменениях конфигурации и вводимых систем координат. Формулы преобразования тензоров в самой общей форме для такой сети имеют вид:

$$(e_{\alpha'} + U_{\alpha'}) = C_{\alpha'}^{\alpha} (e_{\alpha} + U_{\alpha}); (i^{\alpha'} + I^{\alpha'}) = C_{\alpha'}^{\alpha} (i^{\alpha} + I^{\alpha}); z_{\alpha'\alpha'} = C_{\alpha'}^{\alpha} z_{\alpha\alpha} C_{\alpha'}^{\alpha}; p' = p = (e_{\alpha} + U_{\alpha})(i^{\alpha} + I^{\alpha}).$$

На рисунок 1.б наложен комплект ветвей 1-сети без узлов графа (рисунок 1.а), поскольку в предлагаемой топологической модели они запрещены первым законом Кирхгофа. Нанесенные точки в местах пересечения элементов 1-сети и 2-сети, представляют собой скалярные произведения базисных векторов  $a^U$ ,  $a_U$ . В этих точках (абстрактной 0-сети), вероятно, можно локализовать источники энергии (мощности).

В этой же главе рассмотрены параметрами режима ортогональной электрической 1-сети, приведены ее полные и упрощенные уравнения, даны их решения в аналитической форме. Применения ортогональных уравнений проиллюстрированы на конкретных числовых примерах. Показано, как из общего аналитического решения уравнений ортогональной сети вытекает метод диакоптики или расчет сложных систем по частям.

Любой из тензоров (векторов) возбуждения ( $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{I}$ ) и отклика ( $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{U}$ ) в приведенных уравнениях имеет по одной компоненте на каждую координатную ось. Однако складывать компоненты разных типов токов (соленоидальных  $i$  и ламинарных  $I$ ) и напряжений ( $U$ ,  $e$ ) нельзя, поскольку они имеют различный физический смысл, аналогичный различию между токами проводимости и смещения в уравнениях Максвелла. Поэтому при решении ортогональных уравнений их сначала необходимо подразделять на два инвариантных, относящихся к координатным осям замкнутых и открытых путей токов. Для анализа и решения задач, рассматриваемых в данной работе, из большого семейства возможных форм выбраны ортогональные уравнения:

$$\begin{bmatrix} U_c \\ e_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{oo} & Z_{oc} \\ Z_{co} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I^o \\ i^c \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} I^o \\ i^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y^{oo} & Y^{oc} \\ Y^{co} & Y^{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_o \\ e_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

характерные для схем замещения электрических систем (решение же полных ортогональных уравнений приведено в диссертации). Решая системы матричных уравнений (1) относительно переменных отклика (тока  $i^c$  и напряжения  $U_o$ ), получаем соответственно следующие выражения:

$$i^c = Z_{cc}^{-1}(e_c - Z_{co}I^o), \quad U_o = Z_{o'c'}Z_{cc}^{-1}e_{c'} + (Z_{oo} - Z_{oc} \cdot Z_{cc}^{-1}Z_{co})I^o; \quad (2)$$

$$i^c = Y^{co}(Y^{oo})^{-1}I^o + [Y^{cc} - Y^{co}(Y^{oo})^{-1}Y^{oc}]e_c, \quad U_o = (Y^{oo})^{-1} \cdot [I^o - Y^{oc}e_c]. \quad (3)$$

Они содержат в себе точную запись решения электрической сети методом контурных токов и узловых потенциалов, предложенных Максвеллом, если принять в них, что в (2)  $I^o = 0$  и в (3)  $e_c = 0$ .

Из ортогональных уравнений вытекает обоснованная возможность расчета сетей по частям тензорным методом. Чтобы доказать идентичность расчёта электрической сети по частям с решением её ортогональных уравнений, достаточно воспользоваться наглядным примером схемы (рисунок 2). Задача состоит в вычислении вектора напряжений всех узлов  $U_\mu$  связанной схемы без составления её исходных уравнений  $I^\nu = Y^{\nu\mu}U_\mu$  и без обращения полной матрицы узловых проводимостей всей схемы  $[Y^{\nu\mu}]^{-1} = [Z_{\mu\nu}]$ .

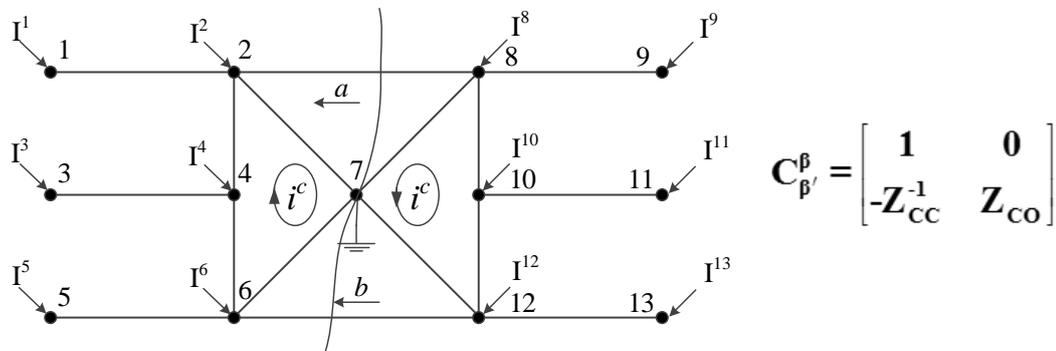


Рисунок 2 – Граф схемы замещения, решаемой по частям

Алгоритм предполагаемого решения по частям состоит из следующих этапов: 1) деления исходной схемы замещения линией разреза на части (подсхемы); 2)

составления уравнений подсхем  $I^\beta = Y^{\beta\alpha} U_\alpha$ ; 3) определения решений подсхем в форме матриц узловых сопротивлений, получаемых путем обращения матриц узловых проводимостей отдельных подсхем  $[Y^{\beta\alpha}]^{-1} = [Z_{\alpha\beta}]$ ; 4) объединения найденных решений подсхем с помощью ортогональных уравнений сети и процедур тензорных преобразований.

Четвертый этап является ключевым в методе расчета по частям любой системы. Он может быть реализован с помощью построения дополнительной сети, называемой цепью пересечения, или каким-либо другим известным или еще не известным способом. Однако, в работе преследуется другая цель. Суть ее – доказать, что такое объединение частных решений можно математически корректно выполнить, рассматривая исходную нерасчлененную схему и совокупность ее подсхем как две ортогональные сети.

Предположим, что схема (рисунок 2) разделяется разрезом ветвей  $a, b$  на две подсхемы. Условимся считать расчлененную схему «старой», а исходную - «новой» схемой, то есть выполним как бы обратное тензорное преобразование. Для этого воспользуемся следующим алгоритмом:

1. Представим в ортогональной форме, аналогичной уравнениям (1), определенные на третьем этапе тензорные уравнения решения каждой из подсхем в виде  $U_\alpha = Z_{\alpha\beta} I^\beta$ .

2. Из этих уравнений с помощью сформированной матрицы преобразования  $C_{\beta'}^\beta$  (она показана рядом с рисунком 2) исключим неизвестные контурные токи  $i^c$  и преобразуем уравнения решения каждой из подсхем к виду  $U_{\alpha'} = Z_{\alpha'\beta'} I^{\beta'} = [Z_{oo} - Z_{oc} \cdot Z_{cc}^{-1} Z_{co}]_{\alpha'\beta'} I^{\beta'}$ .

3. Введем дополнительные переменные (токи замкнутых контуров  $i^a$  и  $i^b$ , протекающие в разрезаемых ветвях) и запишем новые ортогональные уравнения уже связанной сети с учетом введенных дополнительных токов замкнутых контуров:

$$U_\mu = Z_{\mu\nu} I^\nu = \begin{bmatrix} U_o \\ 0 \end{bmatrix}_\mu = \begin{bmatrix} Z_{oo} & Z_{oc} \\ Z_{co} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{\mu\nu} \cdot \begin{bmatrix} I^o \\ i^c \end{bmatrix}_\nu, \quad (4)$$

где  $[i^c]_\nu = i^\nu$  - токи, протекающие в разрезаемых ветвях,  $[I^o]_\nu = I^{\beta'}$  - токи в узлах расчлененной сети.

4. С помощью новой матрицы связи  $C_\nu^{\beta''}$  определим суммарные токи, подтекающие к узлам подсхем с учетом токов от разрезанных ветвей  $I^{\beta''} = C_\nu^{\beta''} I^\nu = I^{\beta'} + C_\nu^{\beta''} i^\nu$ , где  $C_\nu^{\beta''} = \begin{bmatrix} 1 & C_\nu^{\beta'} \end{bmatrix}$ . Матрица  $C_\nu^{\beta''}$  преобразует параметры расчлененной («элементарной») сети в параметры связанной исходной сети. Обратим особое внимание на различие матриц  $C_\nu^{\beta''}$  и  $C_\nu^{\beta'}$ : первая из них преобразует подсхемы в соединенную схему, а вторая – в цепь пересечения, включающую в себя лишь узлы подсхем, связанные с разрезанными ветвями.

5. Находим тензор узловых сопротивлений исходной схемы:

$$Z_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} Z_{\alpha'\beta'} & Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} \\ C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} & C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} + z_{bb} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

который сопоставим с тензором импеданса  $Z_{\mu\nu}$  связанной сети, определяемый выражением (4). Заметим, что к последней компоненте  $C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'}$  тензора  $Z_{\mu\nu}$

добавлены сопротивления разрезанных ветвей  $z_{bb}$ . Такое сложение выполнено согласно теореме Тевенина, суть которой заключается в том, что ток в ветви, присоединяемой к активному двухполюснику определяется напряжением холостого хода и входным сопротивлением двухполюсника  $i_b = u_{xx}(z_{ex} + z_{bb})^{-1}$ .

6. Исключив из (4) неизвестные токи  $[i^c]_v$ , находим с учетом (5) искомое решение задачи:

$$U_\mu = Z_{\mu\nu} I^\nu = I_\mu^{\alpha'} \left[ Z_{\alpha'\beta'} - Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} + z_{bb}^{-1} C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} \right] I^{\beta'}. \quad (6)$$

Анализ полученного уравнения (6) показывает, что любая СЭС, представленная своей схемой замещения, может считаться решенной по частям если определены её три тензора:  $Z_{\alpha'\beta'}$ ,  $C_\nu^{\beta'}$  и  $y^{\nu\mu} = C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} + z_{bb}^{-1}$ , называемые обычно матрицами. Матрица  $y^{\nu\mu}$  является решением уравнений дополнительной контурной цепи пересечений. Эта цепь или модель суть миниатюрная копия или эквивалент полной схемы замещения СЭС, описываемой значительно меньшим числом независимых переменных (координат). Она содержит в себе все разрезаемые ветви и переменные, полученные в результате решения уравнений подсхем, образованных при делении схемы СЭС на части. Матрицы подсхем  $Z_{\alpha'\beta'}$  могут быть вычислены каким-либо из методов обращения матриц узловых проводимостей  $Y^{\beta'\alpha'}$  (в работе для этого используется эффективный метод двойной факторизации). Ключевой задачей расчета по частям является вычисление матрицы  $y^{\nu\mu} = C_\mu^{\alpha'} Z_{\alpha'\beta'} C_\nu^{\beta'} + z_{bb}^{-1}$  на основе формирования матриц преобразования, учитывающих граничные условия при объединении решений отдельных подсхем. Практическая реализация алгоритмов автоматической формализации решения этой ключевой задачи на ЭВМ, а также разработка программного обеспечения расчетов в целом выполнена в работе с помощью дополнительных специальных приемов кодирования и процедур аналитического и топологического преобразования переменных.

**В третьей главе** представлены алгоритмы расчета СЭС по частям, проиллюстрированные конкретными числовыми примерами расчетов СЭС. Два базовых алгоритма полностью реализованы на ЭВМ. Они основаны на методе узловых напряжений, как наиболее удобном для расчетов установившихся режимов и токов короткого замыкания (КЗ) в СЭС.

Первый из алгоритмов предусматривает деление схем замещения СЭС на связанные подсхемы, когда в каждой из них имеют место точки заземления (нейтрали элементов СЭС заземлены). Второй – на изолированные подсхемы, когда заземленные точки в подсхемах отсутствуют (нейтрали изолированы). К таким системам относится обширный класс электрических сетей, включающих многообмоточные трансформаторы, электрические машины, устройства автоматического регулирования и т.д. И хотя такие схемы СЭС кажутся более простыми, однако их расчет по частям осложняется необходимостью вычисления разности между абсолютными потенциалами подсхем. Первый алгоритм гораздо проще реализуется. Он является частным случаем второго, требующего введения дополнительных шагов на отдельных этапах методики расчета по частям. Шаги вычислений по обоим алгоритмам представлены в таблице 1 и реализованы в программных продуктах.

Таблица 1 – Алгоритмы расчета СЭС по частям

Шаги для связанных подсхем	Шаги для изолированных подсхем
$1. U_{\alpha''} = Z_{\alpha''\beta''} I^{\beta''};$ $2. z_{\mu''\nu''} = C_{\mu''}^{\alpha''} Z_{\alpha''\beta''} C_{\nu''}^{\beta''} + [z_{bb}]_{\mu''\nu''};$ $3. e_{\mu''} = -C_{\mu''}^{\alpha''} U_{\alpha''};$ $4. i^{\nu''} = (z_{\mu''\nu''})^{-1} e_{\mu''} = y^{\nu''\mu''} e_{\mu''};$ $5. \Delta I^{\beta''} = C_{\nu''}^{\beta''} i^{\nu''};$ $6. \Delta U_{\alpha''} = Z_{\alpha''\beta''} \Delta I^{\beta''};$ $7. U_{\mu''} = 1_{\mu''}^{\alpha''} (U_{\alpha''} + \Delta U_{\alpha''}).$	$1. U_{\gamma''} = Z_{\gamma''\delta''} I^{\delta''},$ $2. Z_{\mu'\nu'} = C_{\mu'}^{\gamma''} Z_{\gamma''\delta''} C_{\nu'}^{\delta''} = \begin{bmatrix} Z_{oo} & Z_{oc} \\ Z_{co} & Z_{cc} \end{bmatrix}_{\mu'\nu'},$ $3. e_{\mu'} = -C_{\mu'(c)}^{\gamma''} U_{\gamma''} - (Z_{co})_{\mu'\nu'} I^{\nu'},$ $4. i^{\nu'} = (Z_{cc})_{\mu'\nu'}^{-1} e_{\mu'},$ $5. \Delta I^{\delta''} = C_{\nu'(o)}^{\delta''} I^{\nu'} + C_{\nu'}^{\delta''} i^{\nu'},$ $6. \Delta U_{\gamma''} = Z_{\gamma''\delta''} \Delta I^{\delta''},$ $7. U_{\mu''} = 1_{\mu''}^{\gamma''} (U_{\gamma''} + \Delta U_{\gamma''}),$ $8. \Delta U_{\mu'} = C_{\mu'(o)}^{\gamma''} U_{\gamma''} + (Z_{oo})_{\mu'\nu'} I^{\nu'} + (Z_{oc})_{\mu'\nu'} i^{\nu'},$ $9. U_{\mu} = 1_{\mu}^{\mu''} (U_{\mu''} + 1_{\mu''}^{\mu'} \Delta U_{\mu'}).$

Методика расчета СЭС по частям для случая изолированных подсхем состоит из следующих этапов:

1. Схема замещения исходной СЭС разделяется на  $p$  частей с учетом предварительно заданных условий или ограничений (то же и для связанных подсхем).

2. Разрезанные ветви связи между подсхемами временно удаляются (то же и для связанных подсхем).

3. В одной из подсхем выбирается и заземляется точка, абсолютное значение потенциала которой, принимается равным нулю (для связанных подсхем такие точки уже имеются).

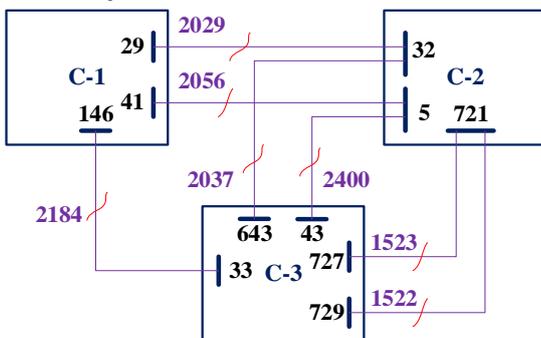
4. В каждой из остальных  $(p-1)$  подсхем временно заземляется по одному узлу, к которым согласно исходной схеме приложены задающие токи. Цель введения заземлений максимально использовать методику и шаги простого алгоритма, предназначенного для расчета схем, разделяемых на связанные подсхемы. Заметим, что заземленная точка в первой выбранной подсхеме не разделяется на  $p$  частей, как это имело бы место при расчете СЭС с заземленными нейтральными. Заземление  $(p-1)$  узлов по одному в каждой из подсхем позволяет приравнять напряжения в каждом из них нулю, а также исключить временно из рассмотрения  $(p-1)$  заданных токов  $I^N$  исходной схемы. Если предположить, что в исходной схеме СЭС  $n$  узлов и она разделена на  $p$  подсхем, то число токов, оставшихся в измененных подсхемах после исключения токов  $I^N$  будет равно  $n-(p-1)$ . Их в отличие от нагрузочных токов  $I^N$  можно считать генераторными токами  $I^G$ .

5. Составляются и обращаются матрицы узловых проводимостей  $Y^{\beta''\alpha''}$  или  $Y^{\delta''\gamma''}$  преобразованных подсхем и формируются квазидиагональные матрицы узловых сопротивлений  $Z_{\alpha''\beta''} = Y^{\beta''\alpha''}{}^{-1}$ ,  $Z_{\gamma''\delta''} = Y^{\delta''\gamma''}{}^{-1}$ .

6. Реализуется первый шаг вычислений по алгоритмам (таблица 1) и определяются напряжения узлов  $U_{\alpha''} = Z_{\alpha''\beta''} I^{\beta''}$  или  $U_{\gamma''} = Z_{\gamma''\delta''} I^{\delta''}$ . Введением новых индексов  $\gamma$  и  $\delta$  подчеркивается, что для случая изолированных подсхем сначала вычисляются напряжения узлов от действия лишь генераторных токов  $I^G$ .

Существенные различия между двумя алгоритмами начинается со второго шага, предусматривающего вычисление контурных ЭДС цепей пересечений. На этом шаге с помощью тензорных преобразований и уравнений ортогональных сетей необходимо отсоединить дополнительные заземления, связанные с токами  $I^N$ , и включить в расчет  $(p-1)$  напряжений  $U^N$ , исключенных ранее из рассмотрения. Расчет по первому алгоритму очевиден.

В качестве примера выполнен расчет начальных сверхпереходных токов КЗ во всех узлах большого фрагмента Чувашской энергосистемы, расчленённого на три части (рисунок 3), с учетом планируемого присоединения к ней двух когенерационных электростанций. Для когенерационных установок в районе котельных 8-9К и 4С составлены две модели электрических сетей с 2 генераторами по 15 МВт в каждой, работающими на секционированные шины 6 кВ, которые связываются кабельными линиями с шинами 6 кВ ПС-110/6 «Чапаевская» и РП-6. Схема распределительной сети 110 кВ включает в себя эквиваленты Чувашской энергосистемы относительно III и IV секций ТЭЦ-2 ОАО» ТГК-5, ВЛ-110 кВ Южная I, II и нагрузки подстанций ВНИИР, Парковая, Южная, Чапаевская, Кировская, Заовражная и трансформаторы ПС-110/6 кВ Западная, Студенческая. Расчетная схема распределительной сети 6 кВ включает секционированные шины ПС-110/6 кВ Западная, Студенческая, кабельные линии связи 6 кВ, РП-6 с обобщенными нагрузками силовых трансформаторов ТП-6/0,4 кВ. Схема электрических соединений и топологическая модель в виде схемы замещения всего исследуемого фрагмента, а также матрицы решения подсхем здесь не приводятся в виду их громоздкости. Рядом с рисунком 3 дана матрица преобразования  $C_{\alpha'}^{\alpha}$ , которая легко формируется по рисунку 3. Ее столбцы (число их равно количеству разрезаемых ветвей) перечисляют узлы, которые эти ветви связывают с учетом знаков положительных направлений токов в ветвях. Токи КЗ рассчитаны по вычисленным из предшествующего режима ЭДС  $E_q''$ , сохраняющим свои значения в первый момент изменения режима.



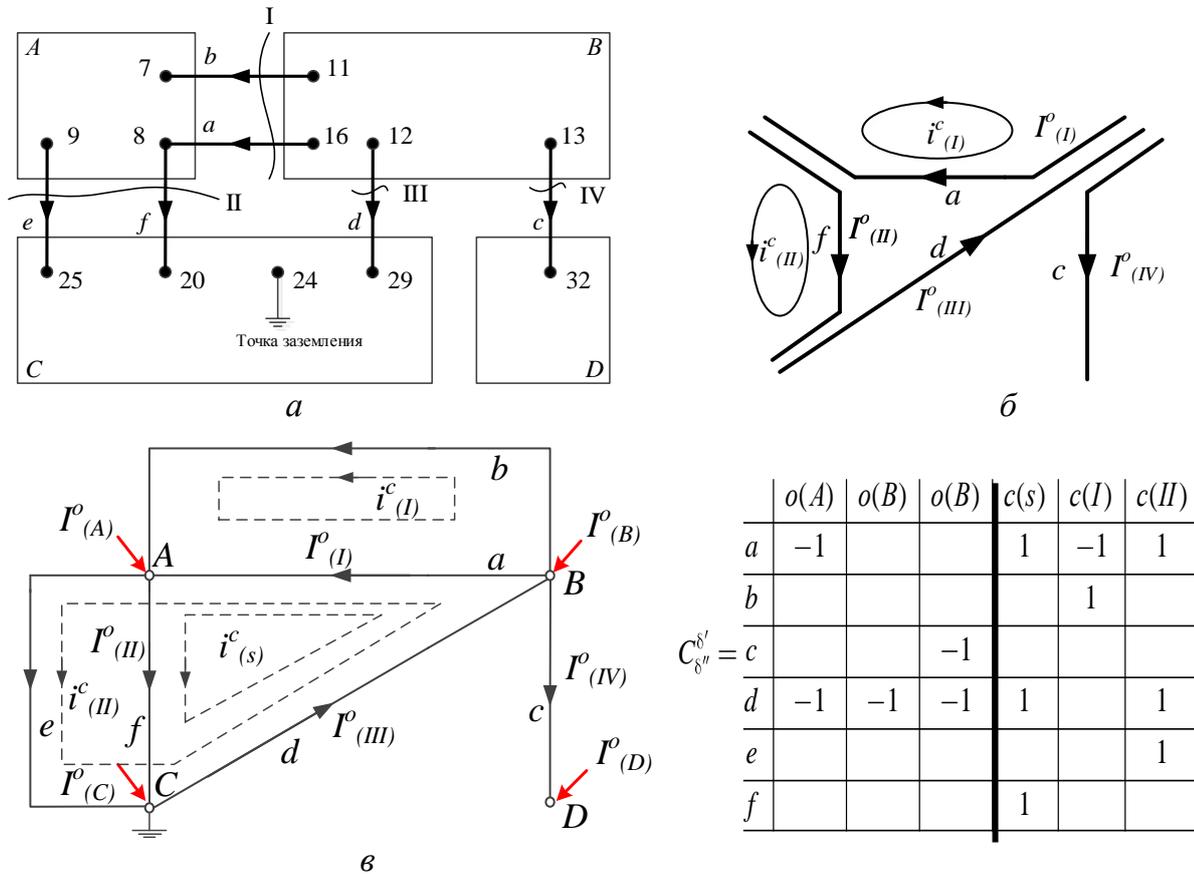
	2029	2037	2056	2400	2184	1572	1573
29	1						
41			1				
146					1		
32	-1	-1					
5			-1	-1			
721						-1	-1
643		1					
43				1			
33					-1		
727						1	
729							1

Рисунок 3 – Цепь пересечений фрагмента СЭС

С целью сравнения и проверки правильности результатов вычислений выполнен также расчет токов КЗ: методом узловых напряжений путем составления полной системы уравнений и обращения полной матрицы узловых проводимостей  $[Y]$  исследуемого фрагмента. Сравнительный анализ для более сложных систем показывает, что время обращения комплексной матрицы узловых проводимостей прямым методом возрастает с увеличением ее порядка, определяемого количеством узлов схемы. Так при 1000 узлах оно составляет на ПЭВМ с процессором Pentium IV 1024 Мб порядка 20с, а с увеличением числа узлов в три раза достигает 900с. Использование двойной факторизации сокращает время обращения матриц тех же самых исследуемых систем соответственно до 0,2с и 1,5с. Применение же метода

диакоптики делает время расчета этих систем, разделенных на несколько подсистем, исчезающе малым. Точность расчетов методом диакоптики возрастает и приблизительно оценивается соотношением  $(N/p + k)$ , где  $N$  – порядок матрицы переменных системы,  $p$  – число подсхем,  $k$  – порядок цепи пересечений. Для данного фрагмента (126 узлов, 3 подсхем и 7 разрезаемых ветвей) эквивалентная по точности матрица имеет приблизительно 44 порядок.

Для реализации второго алгоритма требуются дополнительные преобразования. Суть дополнительных преобразований с топологической точки зрения сводится к построению и расчету искусственной субминиатюрной ортогональной сети, число узлов которой эквивалентно числу подсхем, а число ветвей – числу сечений. Эта новая цепь (рисунок 4, в) получается из цепи пересечений (рисунок 4, а), построенной для данной СЭС, разделенной на четыре условно связанные подсхемы. Новая искусственная цепь (рисунок 4, в) не может служить миниатюрной копией (быть эквивалентом) исходной СЭС, как цепь (рисунок 4, а), поскольку число узлов в ней сокращено. На ней показаны 4 сечения (I-IV) разрезов линий связи и лишь узлы, соединяемые 6 линиями связи. Она предназначена лишь для вспомогательных целей в алгоритме расчета СЭС, разделяемых на изолированные подсхемы. Её построение подробно рассмотрено в диссертации. Оно основано на применении уравнений ортогональных сетей и преобразований переменных и координатных осей. Оба алгоритма реализованы в программном обеспечении с помощью дополнительных процедур, позволяющих непосредственно формировать матрицы цепей пересечений и исключаящих операции составления и перемножения матриц преобразования.



$$C_{\delta''}^{\delta'} =$$

	$o(A)$	$o(B)$	$o(B)$	$c(s)$	$c(I)$	$c(II)$
$a$	-1			1	-1	1
$b$					1	
$c$			-1			
$d$	-1	-1	-1	1		1
$e$						1
$f$				1		

Рисунок 4 – Построение цепи пересечений: а - подсхемы и линии связи; б – промежуточная цепь пересечений; в – ортогональная цепь пересечений

В этой же главе представлена методика и процедуры параметрического эквивалентирования и упрощения сложно-разветвленных СЭС, основанные на использовании теории ортогональных сетей и сингулярных матриц преобразования  $[C_c], [C_o], [A^o], [A^c]$ , приводящие к обобщенным уравнениям 1-сети. Существенным моментом такого эквивалентирования является не требование обязательного физического подобия эквивалента и оригинала, а обеспечение соответствия и действительного отражения электромагнитных процессов, имеющих место в оригинале. Это достигается тензорным характером уравнений оригинала и эквивалента, представляемого математической моделью, используемой при расчетах на ЭЦВМ. Такая модель может быть преобразована к различным системам координат. Следовательно, методом расчета по частям можно построить эквивалент как миниатюрную копию сложной СЭС, рассматриваемую со стороны разрезаемых ветвей, а также эквиваленты, например, сохраняющие все или часть узлов оригинала.

**Четвертая глава** посвящена некоторым вопросам применения тензорного метода к анализу СЭС с распределенными источниками ЭЭ, когда возникают трудности принципиального характера, которые не могут быть устранены применением даже самых мощных ПК. Речь идет о физическом понимании происходящих явлений при несимметричных и сложных видах повреждений, качаниях роторов и при других динамических режимах нескольких машин, работающих параллельно в сложно-разветвленной сети, а также о построении математических моделей, адекватно отражающих переходные процессы в СЭС. Практикой доказано, что эффективного решения этих задач можно достичь тензорным методом, используя различные системы координат, например,  $A, B, C$ ;  $\alpha, \beta, 0$ ;  $1, 2, 0$ ;  $d, q, 0$ ;  $f, b, 0$  и соответствующие им схемы замещения. Поскольку первоначальная информация о параметрах элементов системы может быть задана в любой из них, то в процессе анализа приходится приводить уравнения всех элементов СЭС к одной и той же системе координат. Так как анализируются трехфазные сети и машины, соединенные общей сетью, то в работе получены матрицы полных сопротивлений и уравнения идеализированной трехфазной СМ (рисунок 5) в перечисленных выше координатных системах, а также матрицы и уравнения стационарных (неподвижных) сетей  $R, L, S$  во вращающихся действительных  $d, q, 0$  и комплексных  $f, b, 0$  координатах осей, ( $S$  – это величина, обратная емкости контура сети).

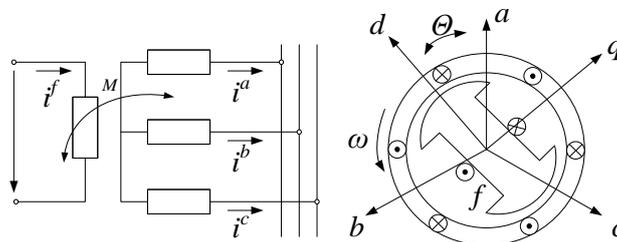


Рисунок 5 – Идеализированная синхронная машина

Особенность уравнений сети в синхронно вращающихся осях состоит в том, что в них, как и в уравнениях для напряжений статора СМ в координатах  $d, q, 0$ , появляются ЭДС вращения - объекты, которые не являются тензорами. Они обусловлены вращением координатных осей, а матрица преобразования в данном случае является функцией угла положения ротора  $\theta = f(\omega t)$ . В матрицах контурных сопротивлений сети возникают взаимные антисимметричные связи. Чтобы упростить

уравнения сети и сделать их наиболее удобными для расчета по частям, нужно выполнить преобразование уравнений машины и сети к новым комплексным переменным в мгновенных значениях  $f, b, 0$ . Тогда матрицы контура сети  $[z]_{d,q}$  и  $[z']_{f,b}$  приобретают вид:

$$\begin{array}{c|c|c} & d & q \\ \hline d & R + (L + \frac{S}{p^2 + p\theta^2})p & -(L - \frac{S}{p^2 + p\theta^2})p\theta \\ \hline q & (L - \frac{S}{p^2 + p\theta^2})p\theta & R + (L + \frac{S}{p^2 + p\theta^2})p \end{array}, \begin{array}{c|c} f & b \\ \hline f & R' + L'(p + jp\theta) \\ \hline b & R' + L'(p - jp\theta) \end{array}. \quad (7)$$

Матрица сети в осях  $f, b, 0$  (7) становится диагональной. Она заметно упрощается, если пренебречь емкостью сети и не учитывать дополнительные слагаемые в ее диагональных элементах типа  $S'/(p \pm jp\theta)$ . В диссертации такое преобразование осуществлено с помощью абсолютной ковариантной производной по времени, определяемой через тензор вращения.

Эти выражения могут быть распространены на многоконтурные сети, если под скалярами  $R, L, S$  понимать тензорные величины и составлять матрицы сопротивлений «элементарной» сети в форме квазидиагональных матриц машин и контуров сети. С помощью матриц связи затем можно объединить уравнения параллельно работающих машин и сетей и найти их решения обычными методами или по частям, используя схемы замещения в прямых и инверсных координатах  $f, b, 0$ . Из тензорных уравнений, записанных в синхронно вращающихся осях, вытекают, как частный случай, уравнения Парка-Горева, аналитически решаемые при постоянной скорости вращения роторов СМ с помощью преобразования Лапласа или интеграла Фурье. Но поскольку в работе решаются прикладные задачи расчета по частям, связанные только с электромагнитными переходными процессами, важно оценить промежутки времени, в течение которых скорости СМ не изменяются. Анализ показывает, что расчетные ЭДС  $E_i$  и сопротивления  $x_i$  любой СМ для произвольного момента времени КЗ можно определить с погрешностью, не превышающей (5-7) %, если воспользоваться построенными и спрямленными с помощью ЭВМ внешними характеристиками  $U_{Gi} = f(x_{en}, t, I_{Gi})$ . Естественно, что для СЭС с несколькими распределенными источниками генерации найти точные значения  $E_i$  и  $x_i$  с учетом действия и взаимного влияния машин друг на друга при КЗ крайне затруднительно. Однако, для  $t \leq 0,5$  с, когда роторы СМ практически продолжают вращаться синхронно, а устройства АРВ настроены по условиям сохранения устойчивости на поддержание ЭДС  $E'_q = const$ , допустимо считать, что все машины работают в режиме подъема возбуждения и вводить их в расчетные схемы замещения своими  $E_i$  и  $x_i$  или даже  $E'_q$  и  $x'_d$ . Достоинство данного метода состоит в том, что он позволяет с достаточной степенью точности вычислять периодическую составляющую тока КЗ не только в месте повреждения, но и определять токораспределение по ветвям схемы СЭС.

В главе приведены примеры расчета установившихся режимов КЗ в СЭС со многими генераторами. Под установившемся режимом обычно понимают стадию электромагнитного процесса, когда возникшие свободные токи его полностью затухают, заканчивается действие АРВ и изменение токов в обмотках возбуждения и в других контурах машин, а скорость их роторов предполагается равной синхронной. Такое

определение установившегося режима КЗ является чисто условным (гипотетическим) и носит теоретический характер, поскольку в реальности он возможен лишь при значительной электрической удаленности места КЗ от источников, когда снижение напряжения на шинах и размагничивающее действие токами полностью компенсируется АРВ. Фактически речь идет о нормальном режиме работы СМ при изменении нагрузки СЭС. В диссертации рассмотрен конкретный пример расчета установившегося режима СЭС со многими генераторами с учетом явнополюсности, углов положения продольной оси роторов машин относительно синхронно вращающегося вектора напряжения системы, иллюстрирующий процедуру объединения уравнений машин и сети тензорным методом. В действительности же при близких КЗ, имеющих продолжительность в несколько секунд, генераторы переходят в режим качаний, выпадения из синхронизма по критериям динамической устойчивости, с последующим асинхронным ходом, их остановом или ресинхронизацией, после устранения КЗ. Расчеты таких режимов в сложно-разветвленных СЭС требуют учета электромеханических переходных процессов и построения соответствующих эквивалентных моделей, поскольку решить уравнения, составленные в различных координатных осях для всей системы в целом, крайне затруднительно.

В пятой главе по предлагаемой методике выполнены конкретные расчеты по частям трехфазных сетей при несимметричных и сложных видах повреждений при узловом и контурном возбуждении. На примере одной схемы (рисунок 6) проиллюстрируем методику расчета сложного вида повреждения тензорным методом с применением диакоптики.

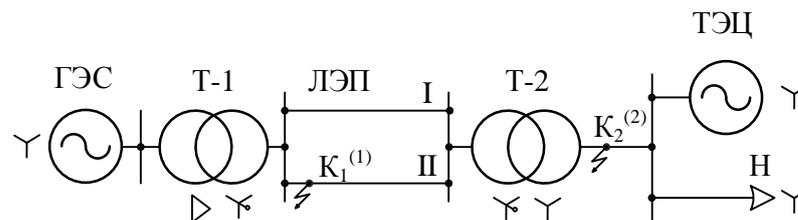


Рисунок 6 – Схема СЭС с двумя повреждениями

Пусть задана трехфазная СЭС, характеризующаяся следующими исходными параметрами: ГЭС (6 генераторов с единичной мощностью 50 МВт,  $\cos \varphi_G = 0,8$ ;  $X_{d\Sigma}'' = 0,3$ ;  $X_{2\Sigma} = 1,45X_{d\Sigma}''$ ;  $U_G = 10,5 \text{ кВ}$ ); ТЭЦ (2 турбогенератора мощностью по 50 МВт каждый,  $\cos \varphi_G = 0,8$ ;  $X_{d\Sigma}'' = 0,35$ ;  $X_{2\Sigma} = 1,45X_{d\Sigma}''$ ;  $U_G = 10,5 \text{ кВ}$ ); трансформаторы: Т-1 (два по 180 МВА;  $u_k\% = 12\%$ ;  $k_T = 10,5/242$ ); Т-2 (два по 180 МВА;  $u_k\% = 12\%$ ;  $k_T = 220/10,5$ ); ЛЭП (две линии с  $l=250$  км,  $X_{1л} = 0,4$  Ом/км;  $X_{0л} = 1,88$  Ом/км); нагрузка ( $P_{НГ} = 400$  МВт,  $\cos \varphi_{НГ} = 0,9$ ;  $U_{НГ} = 10,5$  кВ). Требуется рассчитать напряжения в схеме замещения системы при одновременных однофазном (фаза А) и двухфазном (фазы В и С) КЗ соответственно в точках  $K_1$  и  $K_2$  для начального момента времени. Расчет выполняется в системе относительных единиц при базисных условиях:  $S_6 = 50$  МВА,  $U_{61} = 10,5$  кВ;  $U_{62} = 242$  кВ;  $U_{63} = 242 \frac{10,5}{220} = 11,55$  кВ. Значения сопротивлений элементов сети, ЭДС генераторов и нагрузки указаны на схемах замещения прямой, и нулевой последовательностей (рисунок 7). Конфигурации схем прямой и обратной последовательностей совпадают, но в последней отсутствуют ЭДС. Сопротивления обратной последовательностей ее генераторов указаны на схеме в скобках.

Решение рассматриваемой задачи по частям можно провести при узловом или контурном возбуждении. Узловой метод анализа токов КЗ обладает многими

преимуществами. Совокупность схем последовательностей для симметричных режимов используется нами в качестве «элементарной» цепи.

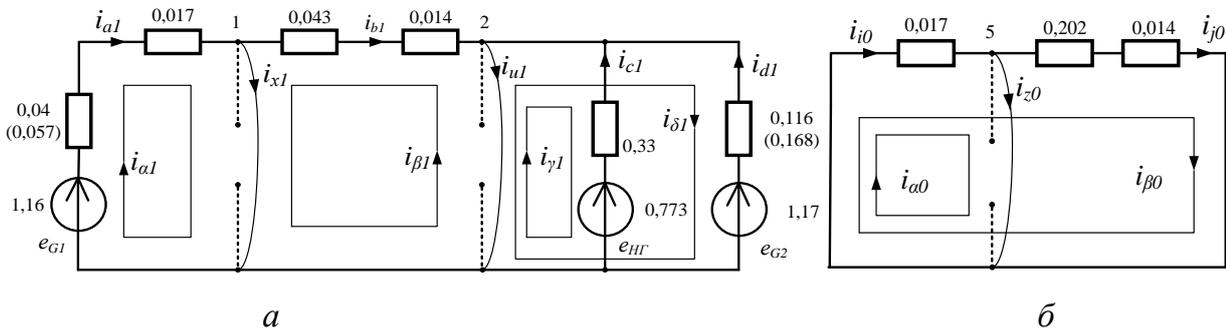


Рисунок 7 – Схемы замещения СЭС: *a* – прямая последовательность, *б* – нулевая последовательность

Представим методику расчета сложных повреждений по частям и ее характерные особенности.

1. Составляются схемы замещения отдельных последовательностей. В схемах все места повреждений при узловом возбуждении заменяются разрывами (пунктирные линии на схемах), а при контурном - трехфазными КЗ (дуговые линии на схемах). В каждой схеме выбираются либо узловые пары (открытые пути), либо контурные токи (показаны на схемах замкнутыми линиями). Число узловых пар в данном примере в два раза меньше числа контуров. Следовательно, в узловом методе придется обращаться матрицы второго порядка, а в контурном – четвертого. Выбираем узловой метод (решение контурным методом приведено в диссертации наряду с другими примерами).

2. После выбора узловой пар, для каждой схемы записываются матрицы узловых проводимостей. Для обозначения этих матриц используются соответствующие индексы:

$$Y^{\lambda\eta} = \begin{array}{c|cc} & 1 & 2 \\ \hline 1 & 35,088 & -17,544 \\ \hline 2 & -17,544 & 56,468 \end{array}; Y^{\mu\nu} = \begin{array}{c|cc} & 3 & 4 \\ \hline 3 & 31,057 & -17,544 \\ \hline 4 & -17,544 & 53,8 \end{array}; Y^{\sigma\tau} = \begin{array}{c|c} & 5 \\ \hline 5 & 63,453 \end{array}.$$

Матрица-столбец токов  $I^\lambda$  состоит всего из двух элементов, относящихся к узлам 1 и 2 прямой последовательности. Она определяется путем преобразования соответствующих ЭДС генераторов в задающие источники тока, которые для рассматриваемого примера будут равны 20,351 и 33,51.

3. Матрицы узловых проводимостей подсистем обращаются и определяются соответствующие им матрицы узловых сопротивлений:

$$z_{\eta\lambda} = \begin{array}{c|cc} & 1 & 2 \\ \hline 1 & 0,034 & 0,01 \\ \hline 2 & 0,01 & 0,021 \end{array}; z_{\mu\nu} = \begin{array}{c|cc} & 3 & 4 \\ \hline 3 & 0,039 & 0,013 \\ \hline 4 & 0,013 & 0,023 \end{array}; z_{\sigma\tau} = \begin{array}{c|c} & 5 \\ \hline 5 & 0,0158 \end{array}.$$

4. Вычисляются напряжения узлов в схеме прямой последовательности

$$U_\eta = z_{\eta\lambda} I^\lambda = \begin{array}{c|cc} & 1 & 2 \\ \hline 1 & 0,034 & 0,01 \\ \hline 2 & 0,01 & 0,021 \end{array} \cdot \begin{array}{c|c} 1 & 20,351 \\ \hline 2 & 33,51 \end{array} = \begin{array}{c|cc} 1 & 1,027 \\ \hline 2 & 0,907 \end{array}.$$

5. Составляется диагональная матрица схемы строчная матрица напряжений узлов

$$z_{\eta\lambda} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline 1 & 0,034 & 0,01 & & & \\ \hline 2 & 0,01 & 0,021 & & & \\ \hline 3 & & & 0,039 & 0,013 & \\ \hline 4 & & & 0,013 & 0,023 & \\ \hline 5 & & & & & 0,016 \\ \hline \end{array}; U_{\eta} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline & 1,027 & 0,907 & & & \\ \hline \end{array}.$$

6. Записывается матрица преобразования для соединения подсистем с учетом следствий из граничных условий для токов (ветвей замыканий, которым принадлежат узлы). Эти следствия хорошо известны: для однофазного КЗ токи всех трех последовательностей в месте повреждения равны, а при двухфазном КЗ токи прямой и обратной последовательностей равны и противоположно направлены. Матрица имеет вид

$$C_{\eta'}^{\eta} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline \kappa^{(1)} & 1 & & 1 & & 1 \\ \hline \kappa^{(2)} & & 1 & & -1 & \\ \hline \end{array}.$$

7. С помощью формул преобразования осуществляется переход к новой системе координат (x, u). Матрица узловых напряжений  $U_{\eta'} = C_{\eta'}^{\eta} U_{\eta}$  в новой системе координат представлена в форме столбца, а матрица сопротивлений найдена по формуле  $z_{\eta'\lambda'} = C_{\eta'}^{\eta} z_{\eta\lambda} C_{\lambda'}^{\lambda}$ :

$$U_{\eta'} = \begin{array}{c|c} & \\ \hline \kappa^{(1)} & 1,027 \\ \hline \kappa^{(2)} & 0,907 \\ \hline \end{array}, \quad z_{\eta'\lambda'} = \begin{array}{c|cc} & \kappa^{(1)} & \kappa^{(2)} \\ \hline \kappa^{(1)} & 0,089 & -0,003 \\ \hline \kappa^{(2)} & -0,003 & 0,044 \\ \hline \end{array}.$$

8. Вычисляются узловые токи в новой системе переменных по выражению

$$I^{\lambda'} = (z_{\eta'\lambda'})^{-1} U_{\eta'} = \begin{array}{c|cc} & \kappa^{(1)} & \kappa^{(2)} \\ \hline \kappa^{(1)} & 11,262 & 0,768 \\ \hline \kappa^{(2)} & 0,768 & 22,78 \\ \hline \end{array} \cdot \begin{array}{c|c} & \\ \hline \kappa^{(1)} & 1,027 \\ \hline \kappa^{(2)} & 0,907 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{c|c} & \\ \hline \kappa^{(1)} & 12,262 \\ \hline \kappa^{(2)} & 21,45 \\ \hline \end{array}.$$

9. Рассчитываются дополнительные токи и дополнительные напряжения, появляющиеся в результате соединения подсистем, по формулам:

$$\Delta I^{\lambda'} = C_{\lambda'}^{\lambda} I^{\lambda} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline & 12,262 & 21,45 & 12,262 & -21,45 & 12,262 \\ \hline \end{array},$$

$$\Delta U_{\eta} = z_{\eta\lambda} I^{\lambda} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline & 0,631 & 0,571 & 0,20 & -0,334 & 0,196 \\ \hline \end{array}.$$

10. Определяются искоемые (действительные) напряжения в узлах:

$$\partial U_{\eta} = U_{\eta} - \Delta U_{\eta} = \begin{array}{c|ccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 \\ \hline & 0,398 & 0,334 & 0,205 & 0,334 & -0,196 \\ \hline \end{array}.$$

Процедура расчета по частям при контурном виде возбуждения включает аналогичные шаги. На место любого КЗ в схемах замещения последовательностей ставятся закоротки (если имеет место разрыв фазы, то место повреждения обозначается разрывом). Закоротки в схемах последовательностей для рассматриваемого примера показаны (рисунок 7, а, б) в виде дуг. Пунктирные линии с разрывами на рисунке 7 в точках КЗ использованы вместо дуг в расчете при узловом возбуждении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выявлены и исследованы особенности применения тензорного метода и многомерных римановых пространств к анализу квазистационарных дискретных СЭС, а также геометрического представления метрических тензоров и тензоров (параметров режима) электрических сетей.

2. Предложена и проанализирована модифицированная двухфазная топологическая модель возбужденной электрической сети, показано соответствие между её геометрической конфигурацией и параметрами режима СЭС, выяснена топологическая роль сингулярных и несингулярных матриц преобразования, а также замкнутых (соленоидальных) и открытых (ламинарных) путей токов и напряжений в 1-сети и 2-сети.

3. Раскрыта двойственность и ортогональность 1-сети, применительно к СЭС составлены и решены ее ортогональные уравнения, доказана идентичность их решения с расчетом электрических сетей по частям.

4. Разработаны методики, алгоритмы и программы расчета, эквивалентирования и упрощения крупномасштабных СЭС по частям, а также формирования на ЭВМ матриц преобразования и объединения решений фрагментов (подсхем) СЭС, рассчитанных по частям, удобные для вычисления электрических величин в нормальных и аварийных режимах.

5. Усовершенствованы и реализованы на основе ортогональных уравнений алгоритмы автоматического разбиения исходной системы на части и формирования матриц цепи пересечения СЭС, расчлененной на изолированные подсистемы. На программное обеспечение этих алгоритмов имеется два свидетельства о государственной регистрации.

6. Построены математические модели синхронных генераторов и электрических сетей в вещественных и комплексных вращающихся системах координат с помощью тензорных преобразований, и ковариантной производной по времени. Метод расчета по частям, адаптирован к анализу симметричных и несимметричных режимов крупномасштабных СЭС, позволяющий в рамках обобщенной теории рассматривать стационарные сети, электрические машины, устройства регулирования и управления, а также вводить с целью упрощения расчетов различные системы координат.

7. Разработаны на основе тензорно-топологического метода и теории ортогональных сетей методики, и алгоритмы расчета несимметричных и сложных видов повреждений в СЭС, отличающиеся от традиционных совместным использованием матриц преобразования координат, уравнений связи и рассчитанных по частям схем последовательностей для симметричных составляющих.

8. Развитые в диссертации положения теории ортогональных сетей и реализованные на их основе методики и программное обеспечение применены для анализа и расчета симметричных и несимметричных режимов, токов КЗ и сложных видов повреждения в реальных системах электроснабжения, состоящих из разветвленных электрических сетей с распределенными источниками генерации и узлов комплексных нагрузок. Показаны универсальность рекомендуемых алгоритмов и эффективность одновременного использования двух источников информации: тензорных уравнений и топологических моделей в виде схем замещения для расчета сложных СЭС по частям с помощью несингулярных матриц преобразования.

9. Перспективными направлениями дальнейшего исследования по теме

диссертации могут стать разработки алгоритмов для создаваемых согласно концепции, Smart Grid современных систем управления СЭС, включающими комплексы средств для расчета и анализа состояния их в темпе процесса, для текущего планирования и оптимального выбора работающих агрегатов и нагрузок, а также для расчетов нормальных и аварийных режимов системной автоматики на основе гибкой и дискретной ортогональной теории моделирования и решения по частям широкого класса задач тензорно топологическим методом.

### **Список основных научных трудов по теме диссертации:**

#### *Статьи в изданиях из перечня ВАК:*

1. Воронов, П.Л. Анализ сложных электрических систем по частям на основе свойств активного двухполюсника / П. Л. Воронов // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 35-43.
2. Воронов, П.Л. Эквивалентирование и упрощение сложных электрических систем по частям при моделировании / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Вестник Чувашского университета. – 2015. – №1. – С. 44-55. (авторский вклад – 5 с.)
3. Воронов, П.Л. Представление параметров режима электротехнических комплексов и сетей в пространственно-временной системе физических величин. / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Вестник Чувашского университета. – 2016. – №3. – С. 132-148. (авторский вклад – 9 с.)
4. Воронов, П.Л. Расчет по частям трехфазных сетей при несимметричных и сложных видах повреждений. / П. Л. Воронов // Вестник Чувашского университета. – 2017. – №1. – С. 76-87.
5. Воронов, П.Л. Особенности применения матриц преобразования и уравнений связи при анализе несимметричных повреждений / П.Л. Воронов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18. – № 1. – С. 27-37.

#### *Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:*

6. Свид. 2018613041 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета режимов электрических систем методом диакоптики при делении на несвязанные подсистемы DIANSW / Ермолаева Н.М., Воронов П.Л.; правообладатель ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». – № 2018610281; заявл. 10.01.2018; рег. 02.03.2018.
7. Свид. 2018613339 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Программа автоматического деления схем замещения сложно-разветвленных систем электроснабжения при расчетах методом диакоптики RAZBIF / Ермолаева Н.М., Воронов П.Л.; правообладатель ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова». – № 2018610699; заявл. 28.01.2018; рег. 13.03.2018.

#### *Публикации в других изданиях:*

8. Воронов, П.Л. К вопросу о применении сингулярных матриц в электротехнике / В.А. Щедрин, Н.Я. Попова, П.Л. Воронов // Математические модели и их приложения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2009. – Вып. 11. – С. 76-84. (авторский вклад – 5 с.)

9. Воронов, П.Л. О применении сингулярной матрицы преобразования при анализе сложных электрических цепей / В.А. Щедрин, Н.Я. Попова, П.Л. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2009. – № 1. – С. 60-63. (авторский вклад – 2 с.)
10. Воронов, П.Л. Практическое применение уравнений ортогональной цепи / П.Л. Воронов // Труды академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 38-44.
11. Воронов, П. Л. Энергетика Чувашии: состояние и перспективы совместного производства электроэнергии и тепла / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2010. – № 1. – С. 7-15. (авторский вклад – 6 с.)
12. Воронов, П.Л. Уравнения ортогональной цепи и их практическое применение / П.Л. Воронов, Н.Я. Попова // Юность Большой Волги: сб. мат. XII Межрегион. конф.-фестиваля научного творчества учащейся молодежи. – Чебоксары, 2010. – С. 42-46. (авторский вклад – 4 с.)
13. Воронов, П.Л. Энергетика Чувашии: перспективы надстроек районных отопительных котельных / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. – Вып. VI. – С.14-30. (авторский вклад – 8 с.)
14. Воронов, П.Л. О параметрах мощных электрических машин в симметричных и несимметричных режимах // В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – Вып. VIII. – С. 45-57. (авторский вклад – 6 с.)
15. Воронов, П.Л. Применение алгебраической топологии к эквивалентированию электрических сетей на основе диакоптики / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – Вып. VIII. – С.147-158. (авторский вклад – 8 с.)
16. Воронов, П.Л. Сравнительный анализ программ расчета токов трехфазного короткого замыкания / П.Л. Воронов, Н.М. Ермолаева. // Россия. Наука. Университет: сб. тр. Всерос. 46-й науч. студ. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2012. – С. 7-8. (авторский вклад – 2 с.)
17. Воронов, П.Л. Использование уравнений ортогональных цепей к моделированию энергосистем в реальном времени / П.Л. Воронов // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. IV междунар. науч.-техн. конференции. – Новочеркасск: Лик, 2013. – Т.1 – С. 87-90.
18. Воронов, П.Л. Особенности режимов замыкания фазы на землю в системах с мощными преобразовательными агрегатами / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем: мат. 10-й Всерос. науч.-техн. конф. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – С. 313-317. (авторский вклад – 3 с.)
19. Воронов, П.Л. Применение метода диакоптики к расчету переходных процессов в разветвленных электрических цепях / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – Вып. IX. – С. 107-118. (авторский вклад – 5 с.)
20. Воронов, П.Л. Тензорно-топологический метод анализа электрических цепей / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2013. – Вып. IX. – С. 236-253. (авторский вклад – 10 с.)

21. Воронов, П.Л. Основные аспекты и оценка применения дугогасящих реакторов и резистивного заземления нейтралей в системах электроснабжения / В.А. Щедрин, П.Л. Воронов // РЕЛАВЭКСПО-2013: сб. тез. док. – Чебоксары: РИЦ «СРЗАУ», 2013. – С. 109-110. (авторский вклад – 1 с.)

22. Воронов, П.Л. Разработка программного обеспечения для анализа и расчета переходных процессов в сложных электроэнергетических системах в реальном времени / П.Л. Воронов // Молодая инновационная Чувашия: творчество и активность: сб. трудов Открытой науч. конф. молодежи и студентов. – Чебоксары: Изд-во ЧПИ МГМУ, 2014. – С. 4-5.

23. Воронов, П.Л. Двойственность и ортогональность электрической цепи / П. Л. Воронов, В. А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – Вып. 10. – С. 94-109. (авторский вклад – 9 с.)

24. Воронов, П.Л. Формирование эквивалентных схем решения при моделировании и расчете электроэнергетических систем по частям / Воронов П.Л. // Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. науч.-техн. конф. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2014. – Т.1. – С. 53-57.

25. Воронов, П.Л. Применение метода преобразования координат к анализу электрических сетей с распределенными источниками энергии / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – Вып. 11. – С. 42-65. (авторский вклад – 12 с.)

26. Воронов, П.Л. Сингулярные и несингулярные матрицы преобразования электрических сетей и инвариантность мощности / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2015. – Вып. 11. – С. 194-211. (авторский вклад – 11 с.)

27. Воронов, П.Л. Расчет режимов систем электроснабжения с распределенной генерацией методом диакоптики / П. Л. Воронов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2016: мат. VII Междунар. науч.-техн. конф. – Казань: Изд-во Казан. гос. энерг. ун-та, 2016. – Т. 3. – С. 180-184.

28. Воронов, П.Л. Особенности алгоритма формирования общего решения при объединении решений сложно-разветвленных электрических систем, рассчитанных по частям / П. Л. Воронов. // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики.. – 2017. – № 1. – С. 87-92.

29. Воронов, П.Л. Совместное использование матриц преобразования координат и уравнений связи при анализе несимметричных повреждений. / П. Л. Воронов. // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2017. – №1. – С. 93-95.

30. Воронов, П.Л. Корректность применения традиционных схем замещения трансформаторов в расчетах электроэнергетических систем / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – Вып. 12. – С. 112-140. (авторский вклад – 11 с.)

31. Воронов, П.Л. Индуктивности рассеяния и схемы замещения силовых трансформаторов. / П. Л. Воронов, В.А. Щедрин // Региональная энергетика и электротехника: проблемы и решения: сб. науч. тр. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2017. – Вып. 12. – С. 141-164. (авторский вклад – 12 с.)

Воронов Павел Леонидович

**РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДИК И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА  
ПО ЧАСТЯМ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ  
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Подписано в печать 14.02.2019 г. Формат 60x80/16. Печ. л. 1,0.  
Бумага офсетная. Печать оперативная. Тираж 100 экз. Заказ № 154.

Отпечатано с готового оригинала-макета в типографии

ФГБОУ ВПО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова»

428015, г. Чебоксары, Московский проспект, д. 15