

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

На правах рукописи



Баннских Павел Юрьевич

**РАЗВИТИЕ ПОТОКОВОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ В ТРЕХФАЗНОМ И ОДНОЛИНЕЙНОМ
ПРЕДСТАВЛЕНИИ**

05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты: **Крюков Андрей Васильевич**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», г. Иркутск, профессор кафедры электроэнергетики транспорта;

Черных Илья Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, заведующий кафедрой техники высоких напряжений;

Панова Евгения Александровна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Защита состоится 04 февраля 2020 г. в 10:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=892>.

Автореферат разослан « »

Ученый секретарь

диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ¹

Актуальность темы. Одной из основных современных тенденций в развитии электроэнергетических систем является переход к концепции интеллектуальных сетей (Smart Grid). «Внедрение интеллектуальных систем управления электросетевым хозяйством на базе цифровых технологий» – один из пунктов Указа Президента от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года».

Современные IT-технологии для построения цифровых интеллектуальных сетей внедряются не только на уровне высоковольтных электрических сетей, где задачи мониторинга и управления технологическим процессом решаются уже многие десятилетия, но и на уровне распределительных сетей 6-35 кВ. До недавнего времени распределительные сети работали в пассивном режиме одностороннего электроснабжения потребителей от источников питания. С внедрением распределенной генерации и технологий интеллектуальных сетей усложнились режимы работы этих сетей, но появились возможности по управлению и оптимизации режимов их работы. Это требует разработки математической модели режима работы электрической сети в трехфазной постановке, так как степень несимметрии в распределительных сетях весьма высока. Проблема усложняется тем, что существующие средства измерения таких режимных параметров, как токи, напряжения и мощности, были ориентированы на однолинейную модель установившегося режима без учета фазной несимметрии. В настоящее время эти измерения активно заменяются трехфазными, но процесс такой замены может потребовать нескольких лет.

Полный переход на трехфазное моделирование установившихся режимов работы электрических сетей не требуется, поскольку в сетях высоких классов напряжения несимметрия практически отсутствует. По этой причине актуальна разработка режимной модели, совмещающей возможность расчета режима для части сети в однолинейном представлении, а для остальной части – в трехфазном представлении.

Традиционные алгоритмы расчета и анализа установившихся электрических режимов в большей степени ориентированы на однолинейную модель режима работы сети. В основе однолинейного представления лежит допущение, что все элементы схемы замещения симметричны, нагрузки представляются суммарным значением мощностей всех трех фаз. С увеличением степени несимметрии подобное допущение будет приводить к погрешности расчёта режимных параметров. Из этого следует необходимость применения методов анализа несимметричных режимов для получения более точного математического описания режимов работы.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», номер соглашения 075-15-2019-1214 (внутренний номер соглашения 14.578.21.0226, уникальный идентификатор проекта: RFMEFI57817X0226).

Степень разработанности темы исследования. На сегодняшний день существует два базовых подхода для анализа несимметричных режимов – это метод фазных координат и метод симметричных составляющих. Метод симметричных составляющих хорошо теоретически проработан и широко представлен в литературе. Этот метод требует меньших объемов памяти для программной реализации по сравнению с методом фазных координат. Размерность решаемой системы уравнений для симметричных составляющих меньше по сравнению с расчетами в фазных координатах, но при современном уровне развития вычислительной техники эти преимущества уже не существенны.

В основе метода симметричных составляющих лежит принцип, что несимметрия рассматривается только в одной точке сети (как правило, это точка короткого замыкания или обрыва). Схемы прямой, обратной и нулевой последовательности связаны только в точке возмущения, в остальном они независимы. Стандартный алгоритм не позволяет рассматривать более одного возмущения в схеме. При рассмотрении многократной несимметрии данный метод значительно усложняется. Метод не позволяет учесть несимметрию элементов схемы замещения. Кроме того, в методе симметричных составляющих отсутствует возможность учета неполнофазных ответвлений от трехфазной сети.

При рассмотрении режимов в фазных координатах наибольшее распространение получили уравнения узловых напряжений в форме баланса мощности. При этом существует проблема плохой сходимости данного метода. Кроме уравнений узловых напряжений, для расчётов режимов в фазных координатах может применяться метод прямого-обратного хода. Этот метод позволяет с хорошей сходимостью рассчитывать режимы сетей без замкнутых контуров и генераторов.

В диссертационной работе исследуется и развивается трехфазная модель установившегося режима на основе потоковой модели (ПМ). Однолинейная потоковая модель для расчёта и оценивания состояния установившегося режима была разработана на основе задачи энергораспределения на кафедре автоматизированных электрических систем УрФУ. В отличие от классических уравнений узловых напряжений, где в качестве неизвестных величин используются напряжения в комплексной форме, ПМ в качестве расчетных (искомых) переменных использует активные и реактивные потоки мощности ветвей и модули узловых напряжений. Эта особенность меняет ряд вычислительных аспектов. Расчёты на основе потоковой модели обладают высокой сходимостью, не зависящей от отношения R/X . Кроме того, могут быть учтены ветви с нулевыми сопротивлениями без алгоритмических изменений и проблем численной неустойчивости, которые присущи классическим уравнениям узловых напряжений. В рамках потоковой модели автором предложены способы учета генерирующих узлов с фиксированным напряжением и замкнутых контуров, что позволяет учесть современные особенности распределительных сетей.

Несимметрия, как правило, увеличивается с понижением класса напряжения и с приближением к узлам нагрузки. Современные информационно-измерительные системы, установленные в распределительных сетях, позволяют получать измерения фазных величин (токов, напряжений и мощностей). Однако в эксплуатации

находятся и устаревшие информационно-измерительные системы, которые передают только усреднённые по трем фазам измерения. Кроме того, в трехфазной сети могут присутствовать однофазные и двухфазные ответвления, которые необходимо учитывать. Весь этот массив информации должен присутствовать в модели установившегося режима. При этом в системообразующей сети высокого напряжения применение детальных трехфазных моделей ограничено.

Разработанная в диссертационной работе математическая модель позволяет производить расчёт электрического режима сети, причем часть фрагментов сети находится в трехфазном представлении, а часть в однолинейном. Модель получила название «гибридная трехфазно-однолинейная модель» (ГТО модель). Она позволяет в рамках одной вычислительной процедуры объединить расчёт режима электрической сети в трехфазном и однолинейном представлении. Это дает возможность использовать трехфазную модель только в тех фрагментах сети, где присутствует несимметрия, имеются трехфазные измерения и целесообразен расчёт фазных величин. В той части сети, где трехфазные измерения режимных параметров отсутствуют, или степень несимметрии крайне мала, расчёт режима производится в однолинейной постановке.

Одной из основных областей применения разработанной модели являются SCADA системы. В современных SCADA системах начинают появляться расчётные модули, которые анализируют последствия возможных изменений режима, для чего осуществляется большое количество вариантных расчётов установившихся режимов. Эти задачи решаются в оперативном цикле с периодичностью в несколько секунд на основе решения задачи оценивания состояния по данным измерений. В связи с ростом объема измерительной информации, поступающей от контролируемой сети, к скорости работы расчётных модулей предъявляются высокие требования. Поэтому становится актуальным вопрос повышения скорости расчёта, который также рассмотрен в диссертационной работе.

Целью работы является разработка алгоритмов для анализа несимметричных режимов энергосистем в трехфазном представлении на основе потоковой модели установившегося режима.

Для достижения цели в рамках диссертации решались следующие **задачи**:

1. Обзор существующих моделей и способов описания элементов электрических сетей в трехфазном представлении, на основе которых составляются расчётные схемы замещения и вычислительные алгоритмы для анализа установившихся режимов.
2. Обзор существующих алгоритмов расчёта установившихся режимов в трех фазах, анализ особенностей алгоритмов применительно к современным распределительным сетям, в которых могут присутствовать замкнутые контуры и источники генерации.
3. Добавление в существующую потоковую модель способов анализа схем любой конфигурации, включая замкнутые контуры и генерирующие установки.
4. Разработка метода ускорения расчёта установившегося режима на основе потоковой модели для анализа разветвлённых распределительных сетей с большим количеством узлов.

5. Расширение однолинейной потоковой модели установившегося режима на трехфазное представление электрической сети для детального моделирования несимметричных установившихся режимов распределительных сетей.
6. Разработка гибридной трехфазно-однолинейной модели, которая объединяет в рамках единой расчётной процедуры однолинейное и трехфазное представление электрической сети для задач расчёта установившегося режима и оценивания состояния.

Объектами исследования являются методы математического моделирования установившихся режимов работы распределительных сетей 6–35 кВ и их совместная работа с системообразующими сетями.

Научная новизна:

1. Расширена и обобщена существующая потоковая модель для расчета установившегося режима, которая теперь позволяет учитывать замкнутые контуры и источники генерации.
2. Разработан алгоритм ускорения расчётов установившихся режимов на основе потоковой модели, позволяющий снизить размерность решаемой задачи.
3. Разработана трехфазная потоковая модель установившегося режима энергосистемы, позволяющая детально моделировать элементы электрической сети.
4. Разработана гибридная трехфазно-однолинейная модель установившегося режима, позволяющая в рамках единой расчётной процедуры учитывать как трехфазное, так и однолинейное представление фрагментов и элементов электрической сети.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии потоковой модели для анализа установившихся режимов работы распределительных электрических сетей любой конфигурации в трех фазах.

Практическая значимость работы заключается в повышении точности расчётов установившихся режимов за счет рассмотрения ряда элементов электрической сети в фазных координатах, а также в ускорении расчётов режимов за счёт применения предложенных методов и алгоритмов.

Методология и методы исследования. При проведении исследования использовались теоретические основы электротехники, методы оптимизации и нелинейного программирования. Применялась система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica, в которой разрабатывались алгоритмы и проводились расчёты на тестовых схемах IEEE. Для верификации получаемых результатов создавались модели тестовых сетей в интерактивной среде для моделирования MATLAB Simulink.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Однолинейная потоковая модель установившегося режима, включающая замкнутые контуры и генераторные узлы.
2. Алгоритм ускорения расчётов установившихся режимов на основе потоковой модели, позволяющий уменьшить вычислительную сложность

итерационного процесса метода Ньютона для решения нелинейной системы уравнений.

3. Трёхфазная потоковая модель установившегося режима, которая может быть применена как к задаче расчёта установившегося режима, так и к задаче оценивания состояния.
4. Гибридная трёхфазно-однолинейная модель установившегося режима, которая позволяет объединять в рамках единой расчётной процедуры части электрической сети в однолинейном и трёхфазном представлении.

Личный вклад автора заключается в расширении потоковой модели для задач установившегося режима, адаптация потоковой модели к трёхфазным моделям элементов электрической сети, разработка программ для ЭВМ, которые реализуют все разработанные в рамках диссертационной работы алгоритмы.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на трех конференциях:

- Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» – Казань-2018;
- VI-я международная конференция молодых ученых «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления», Екатеринбург, 6-8 декабря 2018 г.;
- 59th IEEE Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2018; Riga; Latvia; 12 November 2018 to 13 November 2018.

Основные положения работы рассматривались на ежегодных научных семинарах кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИИ УрФУ, г. Екатеринбург, в период с 2015 года по 2019 год.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК, включая 2 статьи в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus; 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 106 наименований и 1 приложения. Содержит 129 страниц, включает 33 рисунка и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена краткая аннотация работы, изложена актуальность, сформулированы цели и задачи, пояснены научная новизна и практическая значимость достигнутых в работе результатов.

В первой главе выполнен обзор способов моделирования различных элементов электрической сети в трёхфазном представлении. Рассмотрены основные допущения, лежащие в основе моделей элементов. Далее эти элементы использованы при описании алгоритмов расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем. При этом целью данной главы является рассмотрение схем замещения элементов и их представления в расчётных

алгоритмах. Способы получения параметров описанных элементов не являются целью данной диссертации. В дальнейших алгоритмах принято, что параметры элементов известны и являются исходными данными.

Принятая в работе модель линии электропередачи в трех фазах представлена на рисунке 1.

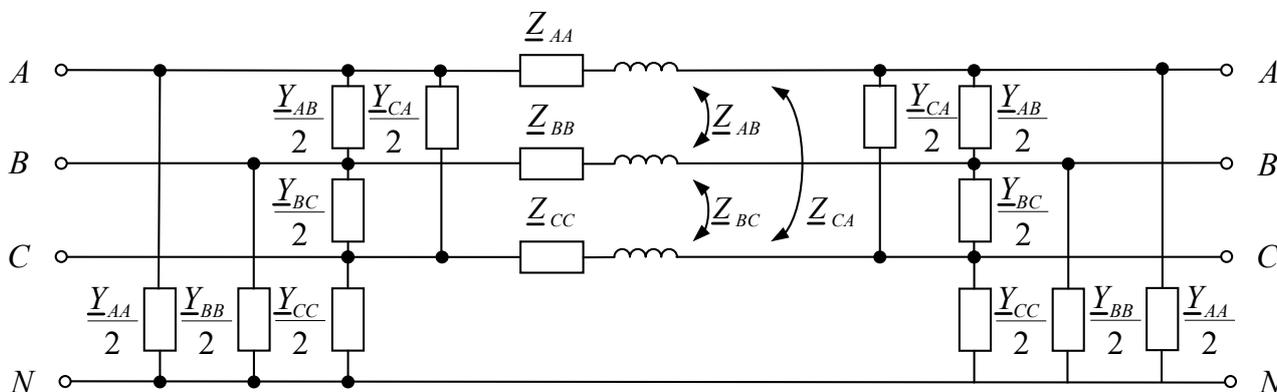


Рисунок 1 – Модель линии электропередач

Математически линия описывается двумя матрицами: матрицей продольных сопротивлений $Z_{ВЛ\text{Прод}}$ и матрицей поперечных проводимостей $Y_{ВЛ\text{Поп}}$. Модель используется и для воздушных, и для кабельных линий электропередачи. Для исключения нейтрального провода из рассмотрения применено преобразование Крона, которое описано в диссертационной работе.

Принятая в работе трехфазная модель трансформатора представлена на рисунке 2.

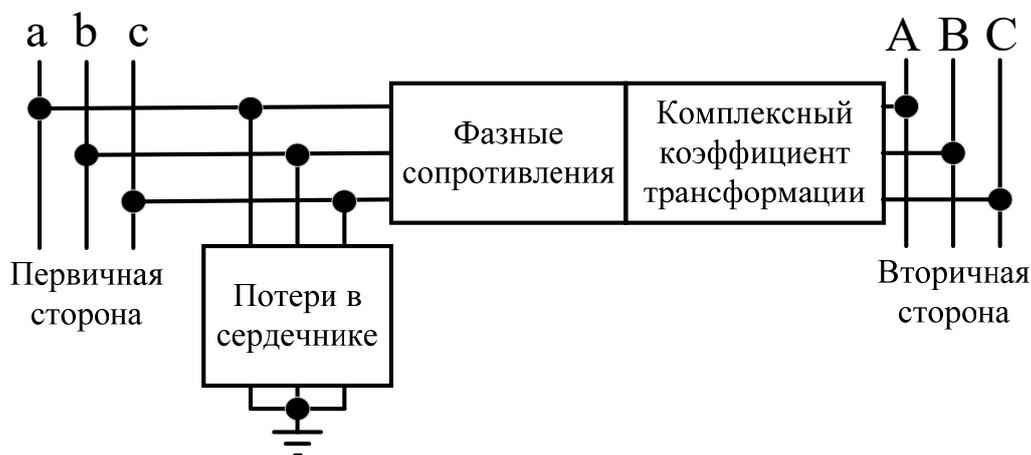


Рисунок 2 – Модель трансформатора

Модель трансформатора разделена на три блока: потери в сердечнике, фазные сопротивления (потери в меди и эффекты взаимного влияния фаз), комплексный коэффициент трансформации.

Модель генератора зависит от настройки системы регулирования возбуждения. Генератор может моделироваться одним из вариантов: тремя PQ узлами с заданными значениями активной и реактивной мощности, тремя PV узлами, с заданными значениями напряжения в каждой фазе и активной

мощностью генерации, заданной трехфазной мощностью генератора и заданным напряжением прямой последовательности на зажимах генератора.

Нагрузка моделируется тремя PQ узлами с заданными значениями активной и реактивной мощности нагрузки в каждой фазе и может усложняться за счёт статических характеристик по напряжению.

Во **второй главе** описаны существующие модели установившегося режима в трехфазном представлении. Для моделирования несимметричных режимов могут быть использованы либо модели в фазных координатах, либо модели с применением симметричных составляющих. Метод симметричных составляющих получил наиболее широкое применение для анализа коротких замыканий. Одним из базовых допущений данного метода является связь между последовательностями только в одной точке сети. В противном случае происходят значительные усложнения моделей и алгоритмов, что ограничивает область применения этих моделей.

Трехфазные модели, как правило, рассматривают в контексте режимов распределительных сетей. В современных распределительных сетях начинают появляться генерирующие установки и, как следствие, замкнутые контуры. Эти обстоятельства создают дополнительные сложности для моделирования режимов работы распределительных сетей.

На сегодняшний день в качестве модели установившегося режима принято использовать уравнения узловых напряжений (УУН). При рассмотрении однолинейных моделей они получили наибольшее распространение. В качестве вектора неизвестных в данной модели используются узловые напряжения в полярной или прямоугольной формах. Модель установившегося режима на основе уравнений узловых напряжений не имеет ограничений на конфигурации схемы и типы узлов. При этом существует проблема сходимости данного метода. Кроме того, эта проблема для трехфазных моделей стоит гораздо более остро в связи с большими различиями активных и реактивных сопротивлений элементов схемы замещения, а также сложностью учета трансформаторов с группой соединения «звезда-треугольник».

Метод прямого-обратного хода хорошо сходится в радиальных схемах, метод имеет низкие вычислительные затраты, что позволяет быстро выполнять расчёты. Основной проблемой данного метода является учет генерирующих узлов и учет замкнутых контуров. При учете этих элементов итерационная процедура сходится недостаточно стабильно.

Альтернативные методы расчёта не получили широкого распространения. В ряде случаев это связано со сложностью алгоритмизации. В частности, метод контурных токов при рассмотрении режимов в трех фазах значительно усложняется, поскольку необходимо учитывать контуры не только в графе электрической сети, но и в схемах замещения отдельных элементов. В других случаях авторы в ходе развития методов приходят к тому, что эти методы не эффективны по сравнению с классическими УУН и методом прямого-обратного хода.

При расчёте режимов в трех фазах значительно увеличивается размерность задачи, по сравнению с однолинейной постановкой. Для ускорения расчётов используют различные способы разделения – и классические методы типа разделённого метода Ньютона, и фазное разделение. Ряд методов адаптирован к радиальной структуре распределительных сетей таким образом, что это позволяет получить ускорение расчёта.

В третьей главе описывается потоковая модель применительно к задаче расчёта установившегося режима как в однолинейном, так и в трехфазном представлении сети. Исходными данными для расчёта установившегося режима на основе потоковой модели являются сопротивления элементов электрической сети, активная и реактивная мощность узлов нагрузки, активная мощность узлов генерации, напряжения узлов генерации. При этом сохраняются разделение на узлы нагрузки (PQ тип), узлы генерации (PV тип) и балансирующие узлы (Vδ). Эти данные не имеют отличий от данных для традиционных методов расчёта УР.

Для иллюстрации всех переменных в уравнениях, которые будут описаны далее, они изображены на рисунке 3.

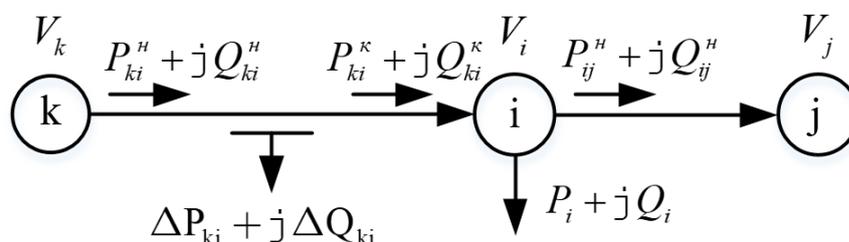


Рисунок 3 – Иллюстрация обозначений

Уравнения будут описаны для узла с индексом «i». Для ветвей задаются условно положительные направления протекания мощности. Индекс «ij» обозначает линию, чьё условно положительное направление выбрано от узла «i» в узел «j», и мощность по линии «ij» вытекает из узла «i». Индекс «ki» обозначает линию, чьё условно положительное направление выбрано от узла «k» к узлу «i», и мощность по линии «ki» втекает в узел «i». Символ «н» обозначает параметры, связанные с началом ветви, символ «к» обозначает параметры связанные с концом ветви. P^H и Q^H – активная и реактивная мощность начала ветви; P^K и Q^K – активная и реактивная мощность конца ветви; ΔP_{ki} и ΔQ_{ki} – активные и реактивные потери в линиях; P_i и Q_i – активная и реактивная мощность нагрузки; V_i, V_j, V_k – модуль напряжения узла; R_{ki} и X_{ki} – активное и реактивное сопротивление линии.

В потоковой модели вектор неизвестных состоит из: активных P^H и реактивных Q^H мощностей начала ветви, модулей напряжения узлов V :

$$X = \{P^H, Q^H, V\}. \quad (1)$$

Система уравнений установившегося режима сети в рамках потоковой модели состоит из следующих типов уравнений.

Уравнения балансов узлов по активной и реактивной мощности:

$$\sum (P_{ij}^H) - \sum (P_{ki}^K) + P_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} + N_{PV}; \quad (2)$$

$$\sum (Q_{ij}^H) - \sum (Q_{ki}^K) + Q_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ}, \quad (3)$$

где N_{PQ} – число PQ узлов в схеме, N_{PV} – число PV узлов в схеме, $\sum(P_{ij}^H)$ и $\sum(Q_{ij}^H)$ – сумма активных и реактивных мощностей, которые вытекают из узла i по ветвям, $\sum(P_{ij}^K)$ и $\sum(Q_{ij}^K)$ – сумма активных и реактивных мощностей, которые втекают в узел i по ветвям, P_i и Q_i – активная и реактивная мощность нагрузки узла i . Мощности, вытекающие из узла, приняты со знаком «+», мощности, втекающие в узел, приняты со знаком «-».

Уравнения балансов ветвей по активной и реактивной мощности во всех M ветвях схемы:

$$P_{ki}^K = P_{ki}^H - \Delta P_{ki}, \quad ki = 1, 2, \dots, M; \quad (4)$$

$$Q_{ki}^K = Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}, \quad ki = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

где ΔP_{ki} и ΔQ_{ki} – потери активной и реактивной мощности в ветвях:

$$\Delta P_{ki} = \frac{P_{ki}^{H^2} + Q_{ki}^{H^2}}{V_k^2} R_{ki}, \quad (6)$$

$$\Delta Q_{ki} = \frac{P_{ki}^{H^2} + Q_{ki}^{H^2}}{V_k^2} X_{ki}. \quad (7)$$

Для упрощения уравнений баланса (2)–(5) мощности потери в проводимостях на землю не выделены в отдельные слагаемые и считаются частью узловых мощностей.

Уравнения падения напряжения для каждой линии:

$$\sqrt{(V_k - \Delta V'_{ki})^2 + (\Delta V''_{ki})^2} - V_i = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

где продольная $\Delta V'_{ki}$ и поперечная $\Delta V''_{ki}$ составляющие падения напряжения считаются как:

$$\Delta V'_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot R_{ki} + Q_{ki}^H \cdot X_{ki}}{V_k}, \quad (9)$$

$$\Delta V''_{ki} = \frac{P_{ki}^H \cdot X_{ki} - Q_{ki}^H \cdot R_{ki}}{V_k}. \quad (10)$$

Для исключения переменных мощности конца ветви (P_{ki}^K и Q_{ki}^K) и исключения дополнительных уравнений балансов по ветвям (4) и (5), в уравнениях (2) и (3) P_{ki}^K и Q_{ki}^K выражаются через мощности начала ветви P_{ki}^H и Q_{ki}^H и потери ΔP_{ki} и ΔQ_{ki} , тогда уравнения (2) и (3) примут вид:

$$\sum(P_{ij}^H) - \sum(P_{ki}^H - \Delta P_{ki}) + P_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ} + N_{PV}; \quad (11)$$

$$\sum(Q_{ij}^H) - \sum(Q_{ki}^H - \Delta Q_{ki}) + Q_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_{PQ}. \quad (12)$$

Уравнения баланса по активной мощности записываются для каждого PQ и PV узла, уравнения баланса по реактивной мощности записываются для каждого PQ узла. В случае чисто радиальной структуры сети этих уравнений достаточно для описания установившегося режима.

При наличии в сети замкнутых контуров предлагается использовать дополнительное уравнение на основании второго закона Кирхгофа. Из второго

закона Кирхгофа следует, что сумма разностей углов между комплексными векторами напряжений начала и конца ветви в замкнутом контуре равна нулю:

$$\sum \Delta\delta_{ki} = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, G, \quad (13)$$

где G – множество ветвей, образующих замкнутый контур. Если разности углов $\Delta\delta_{ki}$ выразить через вектор неизвестных (1), то уравнение примет вид:

$$\sum \arctan\left(\frac{\Delta V''_{ki}}{V_k - \Delta V'_{ki}}\right) = 0, \quad ki = 1, 2, \dots, G. \quad (14)$$

$\Delta V'_{ki}$ и $\Delta V''_{ki}$ рассчитываются по выражениям (9) и (10).

По своей сути предлагаемая потоковая модель уравнений установившегося режима выражает первый и второй законы Кирхгофа через расчетный вектор переменных $\{P^H, Q^H, V\}$. При этом сохраняются разделение сети на узлы нагрузки, узлы генерации и балансирующие узлы. Таким образом, исходные данные для такой постановки задачи совпадают с данными для расчёта с применением классических уравнений узловых напряжений.

Полученную систему уравнений предлагается решать методом Ньютона. В качестве начальных приближений активная и реактивная мощности ветвей принимаются равными нулю, а модули напряжений равны номинальным значениям.

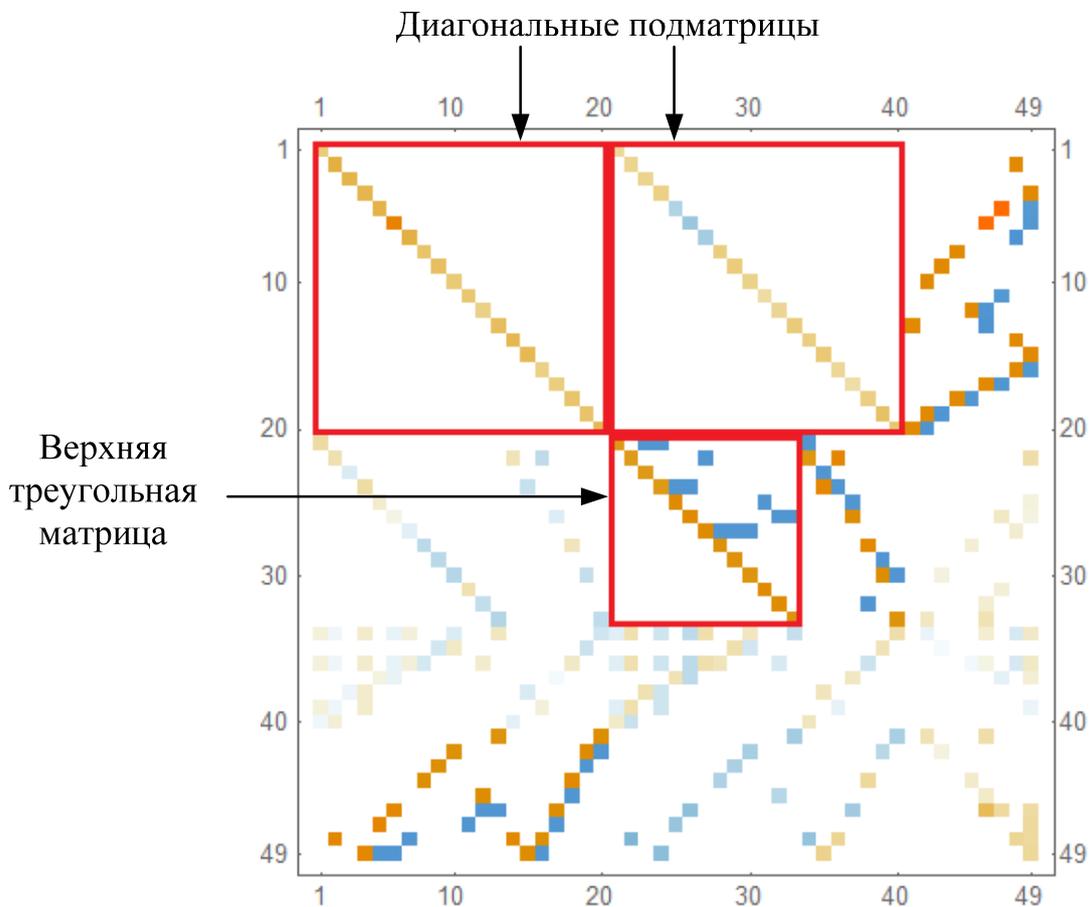
Режимная потоковая модель установившегося режима обладает рядом преимуществ по сравнению с классической моделью на основе уравнений узловых напряжений. ПМ не чувствительна к неоднородности параметров схемы замещения сети, а её система уравнений существенно лучше обусловлена. Вычислительные эксперименты показывают, что ПМ сходится за меньшее число итераций по сравнению с классическими уравнениями узловых напряжений, особенно для схем, когда активное и реактивное сопротивление элементов сопоставимы ($R/X \approx 1$). Потоковая модель позволяет учитывать связи с нулевыми сопротивлениями, без фиктивных топологических изменений схемы.

В качестве недостатков полученной модели можно выделить следующие: большая размерность задачи, по сравнению с уравнениями узловых напряжений; необходимость составления контурных уравнений.

В работе представлен способ ускорения расчёта при решении вышеописанной нелинейной системы уравнений методом Ньютона. При определённой последовательности уравнений и переменных линейная система уравнений, которая решается на каждой итерации метода Ньютона примет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial R_V}{\partial Q^H} & \frac{\partial R_V}{\partial P^H} & \frac{\partial R_V}{\partial V} \\ \frac{\partial R_P}{\partial Q^H} & \frac{\partial R_P}{\partial P^H} & \frac{\partial R_P}{\partial V} \\ \frac{\partial R_\delta}{\partial Q^H} & \frac{\partial R_\delta}{\partial P^H} & \frac{\partial R_\delta}{\partial V} \\ \frac{\partial R_Q}{\partial Q^H} & \frac{\partial R_Q}{\partial P^H} & \frac{\partial R_Q}{\partial V} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta Q^H \\ \Delta P^H \\ \Delta V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_V \\ R_P \\ R_\delta \\ R_Q \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Где R_V, R_P, R_δ, R_Q обозначают невязки уравнений (8), (11), (14) и (12) соответственно. Число уравнений в данной системе равно сумме: числа ветвей, удвоенного числа PQ узлов n_{PQ} , числа PV узлов n_{PV} , числа замкнутых контуров n_δ . Это превышает число уравнений для классических уравнений узловых напряжений. Алгоритмическая сложность данной системы составляет куб числа элементов $O(n^3)$. В работе представлен подход, который использует особенности структуры матрицы Якоби, что позволяет снизить алгоритмическую сложность до $O\left(1\frac{1}{3}n_{PQ}^3 + \frac{1}{3}n_{PV}^3 + n_\delta^3\right)$. Графическая визуализация матрицы Якоби для схемы IEEE 14 с выделенными характерными блоками, которые используются в алгоритме, представлена на рисунке 4. Подматрицы $\partial R_V / \partial Q^H$ и $\partial R_V / \partial P^H$ имеют диагональную структуру, это позволяет сделать линейное исключение переменных ΔQ^H из системы (15) с линейной вычислительной сложностью. Так же в матрице Якоби присутствует верхняя треугольная подматрица, это используется для решения оставшейся системы с помощью блочных матриц.



Ряд преимуществ потоковой модели раскрывается именно применительно к распределительным сетям. Как известно, в распределительных сетях степень несимметрии значительно выше, чем в магистральных сетях. Поэтому потоковая модель была расширена на трехфазную постановку задачи.

Вектор неизвестных. Если в однолинейной модели в качестве вектора неизвестных использовались $\{P^H, Q^H, V\}$, то при переходе к трехфазной модели в вектор неизвестных добавляются междуфазные углы $\psi_{AB}, \psi_{BC}, \psi_{CA}$. Добавление углов связано с необходимостью учета взаимоиндукций. Если учесть тот факт, что $\psi_{AB} + \psi_{BC} + \psi_{CA} = 2\pi$, то достаточно использовать только два из трех взаимных углов.

В уравнениях падения напряжения (8), баланса по активной (11) и реактивной (12) мощности в узлах, контурных уравнениях (14) расширяются составляющие падения напряжения (9), (10) и выражения для потерь (6), (7).

Проводимости на землю и междуфазные проводимости учитываются только в уравнениях баланса по активной и реактивной мощности. Дополнительных уравнений и переменных для этих элементов схем замещения не составляется.

Уравнения составляются для каждой из трех фаз. Далее приводятся уравнения для фазы А, для фаз В и С уравнения могут быть составлены по аналогии. В формулах принято следующие обозначения: у переменных индекс с названием фазы, написанный с заглавной буквы («А», «В», «С») будет обозначать принадлежность к условному началу линии, индекс с названием фазы, написанный с прописной буквы («а», «b», «с») будет обозначать принадлежность к условному концу линии, сопротивления линии будут обозначаться индексами фаз с заглавной буквы.

Выражения для потерь активной мощности принимает вид:

$$\Delta P_{Aa} = \frac{[P_A^2 - Q_A^2]R_{AA}}{V_A^{H^2}} - \frac{[P_A Q_B - P_B Q_A]Im(\underline{Z}_{AB}e^{j\psi_{AB}}) + [P_A P_B - Q_A Q_B]Re(\underline{Z}_{AB}e^{j\psi_{AB}})}{V_A V_B} - \frac{[P_A Q_C - P_C Q_A]Im(\underline{Z}_{AC}e^{j\psi_{AC}}) + [P_A P_C - Q_A Q_C]Re(\underline{Z}_{AC}e^{j\psi_{AC}})}{V_A V_C}. \quad (16)$$

Выражение для потерь реактивной мощности принимает вид:

$$\Delta Q_{Aa} = \frac{[P_A^2 - Q_A^2]X_{AA}}{V_A^{H^2}} - \frac{[P_A Q_B - P_B Q_A]Re(\underline{Z}_{AB}e^{j\psi_{AB}}) + [P_A P_B - Q_A Q_B]Im(\underline{Z}_{AB}e^{j\psi_{AB}})}{V_A V_B} - \frac{[P_A Q_C - P_C Q_A]Re(\underline{Z}_{AC}e^{j\psi_{AC}}) + [P_A P_C - Q_A Q_C]Im(\underline{Z}_{AC}e^{j\psi_{AC}})}{V_A V_C}. \quad (17)$$

Выражения составляющих потерь напряжения принимают вид:

$$\begin{aligned} \Delta V'_{Aa} &= \frac{P_A R_{AA} + Q_A X_{AA}}{V_A} + \\ &+ \frac{Q_B \operatorname{Im}(\underline{Z}_{AB} e^{j\psi_{AB}}) + P_B \operatorname{Re}(\underline{Z}_{AB} e^{j\psi_{AB}})}{V_B} \\ &+ \frac{Q_C \operatorname{Im}(\underline{Z}_{AC} e^{j\psi_{AC}}) + P_C \operatorname{Re}(\underline{Z}_{AC} e^{j\psi_{AC}})}{V_C}, \\ \Delta V''_{Aa} &= -\frac{Q_A R_{AA} + P_A X_{AA}}{V_A} + \\ &+ \frac{P_B \operatorname{Im}(\underline{Z}_{AB} e^{j\psi_{AB}}) - Q_B \operatorname{Re}(\underline{Z}_{AB} e^{j\psi_{AB}})}{V_B} \\ &+ \frac{P_C \operatorname{Im}(\underline{Z}_{AC} e^{j\psi_{AC}}) - Q_C \operatorname{Re}(\underline{Z}_{AC} e^{j\psi_{AC}})}{V_C}. \end{aligned} \quad (18)$$

P_A, P_B, P_C – активные мощности в фазах А, В и С начала ветви; Q_A, Q_B, Q_C – реактивные мощности в фазах А, В и С начала ветви; V_A, V_B, V_C – модули напряжения в узлах начал трехфазной ветви; $R_{AA}, X_{AA}, \underline{Z}_{AB}, \underline{Z}_{AC}$ – сопротивления элемента, описывающие параметры линий электропередачи; ψ_{AB}, ψ_{AC} – углы между векторами напряжений в узлах начала линии. Для трансформаторов с группой соединения «звезда-треугольник» выражения (16)–(18) отличаются, формулы приведены в тексте диссертации.

Для учета взаимных углов добавляются новые уравнения, которые связывают междофазные углы начала и конца линии. Далее описывается уравнение для углов между фазами А и В (для углов между фазами А и С составляется аналогично). Уравнение выглядит следующим образом:

$$\psi_{AB} + \Delta\delta_{Aa} - \Delta\delta_{Bb} = \psi_{ab}. \quad (19)$$

Здесь:

ψ_{AB} – угол между фазами А и В в начале ветви;

ψ_{ab} – угол между фазами А и В в конце ветви;

$\Delta\delta_{Aa}$ – изменение угла фазы А на линии;

$\Delta\delta_{Bb}$ – изменение угла фазы В на линии.

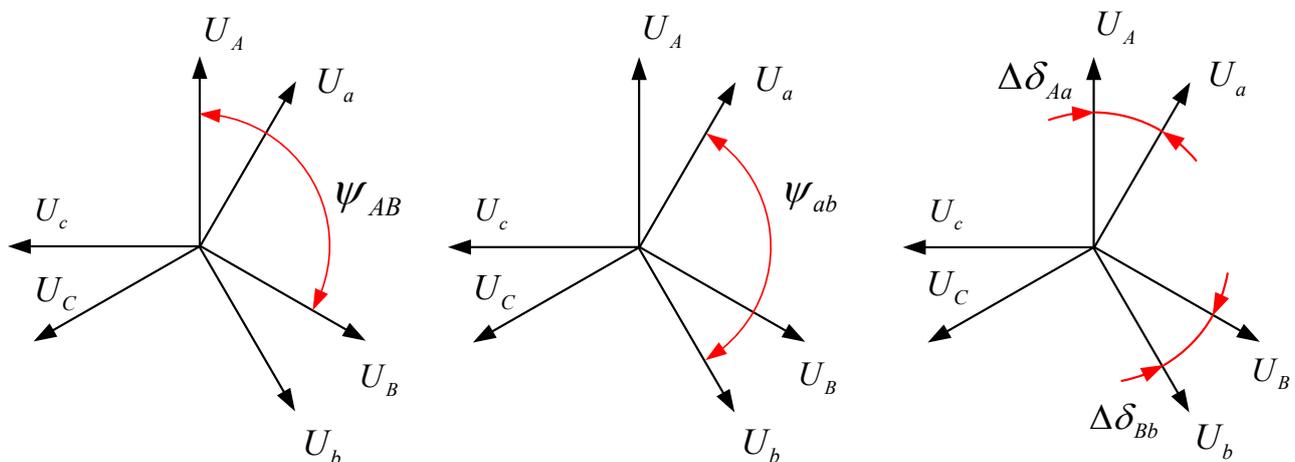


Рисунок 5 – Элементы уравнения изменения взаимных углов

Графическое представление элементов уравнения изображены на рисунке 5, где показаны векторы напряжения по концам линии. ψ_{AB} и ψ_{ab} являются элементами вектора неизвестных, $\Delta\delta_{Aa}$ и $\Delta\delta_{Bb}$ вычисляются по выражению:

$$\begin{aligned}\Delta\delta_{Aa} &= \arctan\left(\frac{\Delta V''_{Aa}}{V_A - \Delta V'_{Aa}}\right), \\ \Delta\delta_{Bb} &= \arctan\left(\frac{\Delta V''_{Bb}}{V_B - \Delta V'_{Bb}}\right).\end{aligned}\tag{20}$$

$\Delta V''_{Aa}$, $\Delta V'_{Aa}$, $\Delta V''_{Bb}$, $\Delta V'_{Bb}$ вычисляются по выражениям (18).

Уравнения вида (20) составляются для каждой ветви дерева графа сети для междуфазных углов ψ_{AB} и ψ_{AC} (угол ψ_{BC} может быть вычислен из соотношения $\psi_{AB} + \psi_{BC} + \psi_{CA} = 0$).

Для анализа сходимости полученного метода использовались тестовые схемы IEEE 13, 37 и 123 узла. Исходные тестовые схемы имеют чисто радиальную структуру, в схемах отсутствуют генерирующие узлы и трансформаторы с группой соединения «звезда-треугольник» (Yg/D). Для сравнительного анализа сходимости различных методов в тестовые схемы вносились модификации, ухудшающие обусловленность и сходимость задачи расчёта установившегося режима: добавлялись замкнутые контуры, добавлялись генерирующие узлы, добавлялись трансформаторы с группой соединения «звезда-треугольник», увеличивалась степень несимметрии нагрузки.

Для проведения численных экспериментов автором была выполнена программная реализация и проведён сравнительный анализ следующих методов расчёта установившихся режимов в трех фазах:

1. Нелинейные УУН в форме баланса мощности.
2. Метод Z-матрицы.
3. Метод прямого-обратного хода.
4. Потокосная модель.

В таблице 1 приведено количество итераций, за которое методы сходятся при одинаковой заданной точности для схемы IEEE 123. Результаты для IEEE 13 и IEEE 37 узловой схемы приведены в тексте диссертационной работы. Расчёты показывают, что потокосная модель обладает лучшей сходимостью по сравнению с другими анализируемыми методами. Коэффициент обусловленности матрицы Якоби не превышал 10^3 , в то время как для УУН в форме баланса мощности он был не менее 10^6 .

Несмотря на то, что расчёт с использованием потокосной модели сходится за меньшее число итераций, размерность задачи в потокосной модели больше. Поэтому нельзя утверждать, что расчёт за меньшее число итераций быстрее, многое зависит от программной реализации алгоритмов. Значительное влияние на скорость вычисления оказывает программная реализация обработки разреженных матриц.

Таблица 1 – Число итераций для различных методов расчёта установившегося режима схемы IEEE 123

Тип усложнения схемы IEEE 123	Уравнения узловых напряжений	Метод Z-матрицы	Метод прямого-обратного хода	Потоковая модель
Исходная схема	5 итераций	6 итераций	8 итераций	5 итераций
+ Замкнутые контуры + Генераторы	4 итерации	8 итераций	10 итераций	4 итерации
+ Трансформаторы Yg/D	расходится	7 итераций	8 итераций	5 итераций
+ Трансформаторы Yg/D + Доп. несимметрия нагрузки	расходится	расходится	8 итераций	4 итерации
+ Замкнутые контуры + Генераторы + Трансформаторы Yg/D	расходится	18 итераций	расходится	4 итерации
+ Замкнутые контуры + Генераторы + Трансформаторы Yg/D + Доп. несимметрия нагрузки	расходится	расходится	расходится	4 итерации

В **четвёртой** главе описывается гибридная трехфазно-однолинейная потоковая модель (ГТО модель). ГТО модель позволяет в рамках единой расчётной процедуры производить для части сети расчёт режима в однолинейной постановке, а для оставшейся части сети использовать трехфазную модель установившегося режима. Модель может быть использована как в задаче расчёта установившихся режимов, так и для решения задачи оценивания состояния.

В распределительных сетях присутствует высокая степень несимметрии, но в системообразующих сетях она значительно меньше. Режимы распределительных и системообразующих сетей неразрывно связаны, и в ряде случаев их необходимо рассматривать совместно. При этом магистральные сети моделировать в трех фазах нецелесообразно. Во-первых, потому что степень несимметрии мала и расчёт в трех фазах будет ненужным усложнением математической модели. Во-вторых, в системообразующих сетях, как правило, отсутствуют трехфазные (пофазные) измерения параметров электрического режима, необходимые для выполнения расчётов.

Современные цифровые устройства позволяют измерять как трехфазные, так и однолинейные параметры режима, но зачастую трехфазные измерения не передаются в диспетчерские центры за ненадобностью. Это может являться одной из причин ненаблюдаемости трехфазных режимных параметров при наблюдаемости однолинейных.

Информационно-измерительные системы контроля технологических параметров электрической сети совершенствуются достаточно быстро. Устаревающие аналоговые комплексы телеизмерений заменяются на более современные цифровые, которые ориентированы передачу измерений по всем

трем фазам. На сегодняшний день используются как усреднённые по фазам (однолинейные) измерения, так и измерения по каждой фазе в отдельности. Экспертные оценки показывают, что в свердловской энергосистеме соотношение современных цифровых трехфазных комплексов телеизмерений и однолинейных аналоговых находится на уровне 70% на 30 % в пользу современных. Однако до полного оснащения всех объектов трехфазными измерительными комплексами может потребоваться еще много лет.

Объединение однолинейной и трехфазной моделей в единую расчётную процедуру предлагается осуществлять при помощи узлов интерфейса, которые должны связывать математические зависимости между переменными двух моделей. Уравнения для узла интерфейса должны определять зависимость между параметрами этих двух моделей.

В потоковой модели в качестве неизвестных переменных приняты потоки мощности по ветвям и модули напряжений в узлах, а значит, именно для них необходимо предусмотреть выражения, объединяющие в рамках единой расчётной процедуры однолинейное и трехфазное представление сети.

В рамках потоковой модели интерфейс для мощностей осуществляется достаточно просто. В однолинейном представлении сети используются трехфазные мощности, которые являются суммой мощностей трех фаз. Таким образом, уравнение баланса по активной и реактивной мощности для узла интерфейса просто объединяет трехфазные мощности однолинейной модели и фазные мощности трехфазной модели без каких-либо допущений. Данный аспект проиллюстрирован на рисунке 6.

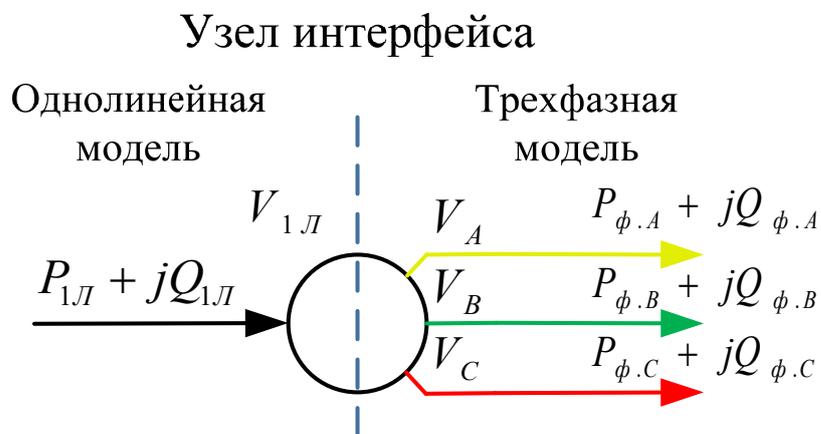


Рисунок 6 – Интерфейс мощностей

Математически это описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} P_{1л} &= P_{ф.А} + P_{ф.В} + P_{ф.С}, \\ Q_{1л} &= Q_{ф.А} + Q_{ф.В} + Q_{ф.С}. \end{aligned} \quad (21)$$

В качестве способа связи напряжений двух моделей предлагается использовать выражение для усреднения измеренного линейного напряжения на основе фазных напряжений, используемое в измерительных комплексах:

$$V_{1л} = \frac{V_A + V_B + V_C}{\sqrt{3}}. \quad (22)$$

Для анализа применения ГТО модели в задаче расчёта установившегося режима, выполнен ряд численных экспериментов на тестовой схеме, приведённой на рисунке 7. Для анализа ГТО модели схема разделена на две части: сеть 110 кВ представлена в однолинейном исполнении, распределительная сеть 10 кВ представлена в трех фазах. В качестве узла интерфейса выбран узел 4, который является точкой соединения распределительной и высоковольтной сетей.

В численном эксперименте по анализу погрешности изменялись нагрузки в узлах 7 и 8. Суммарная трехфазная нагрузка соответствовала значениям, указанным на рисунке 7, при этом она распределялась между фазами, что создавало различную степень несимметрии нагрузки. Результаты численного эксперимента приведены на рисунке 8.

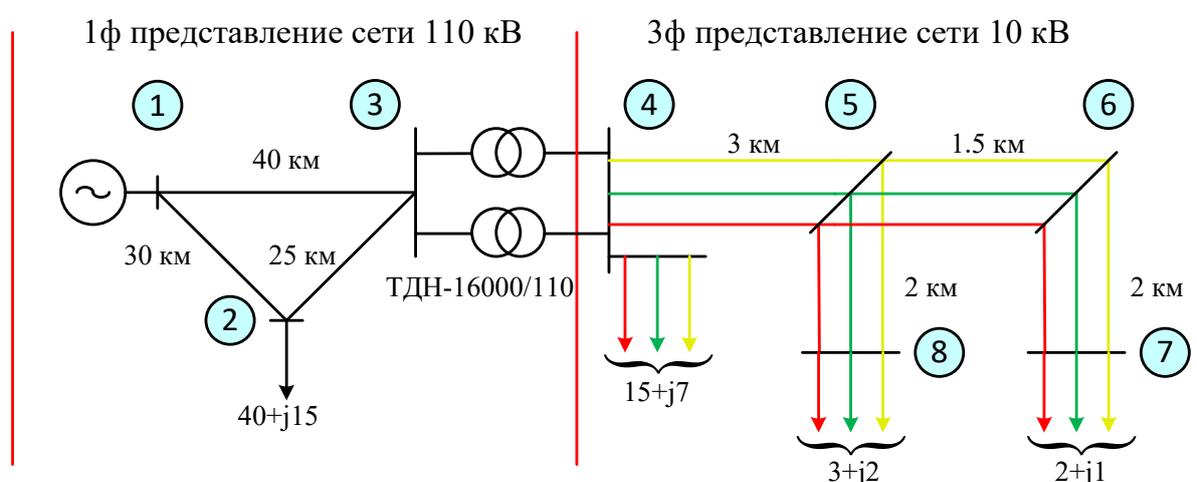


Рисунок 7 – Тестовая схема для анализа ГТО модели

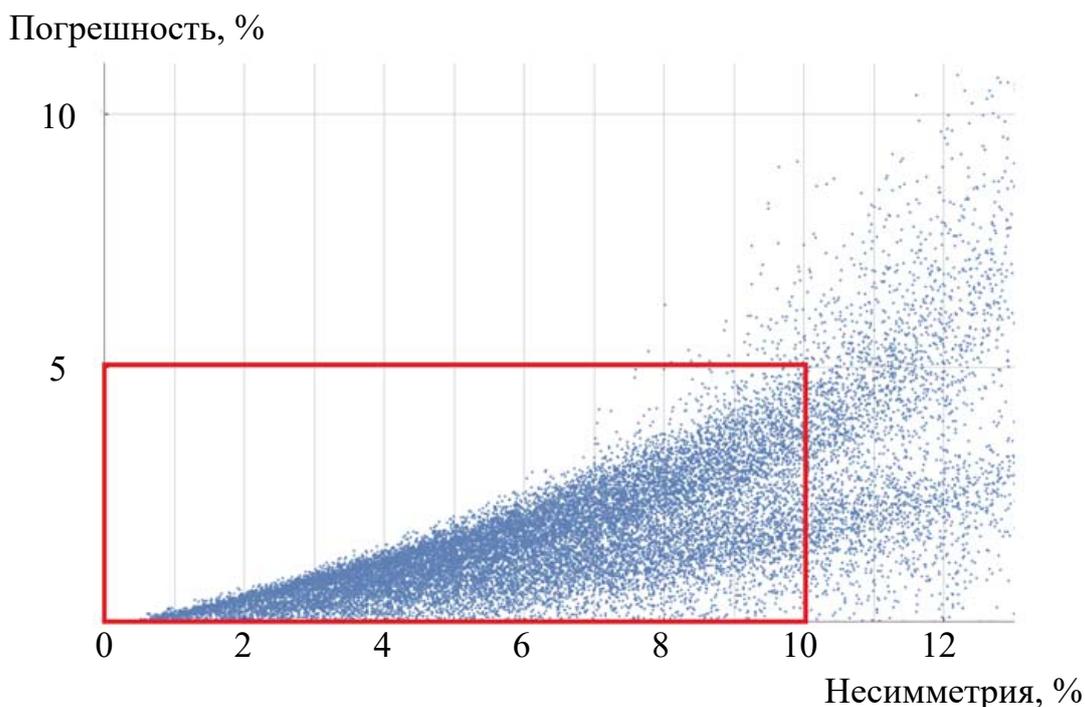


Рисунок 8 – Результаты численного эксперимента по анализу ГТО модели

Каждая точка на графике соответствует рассчитанному установившемуся режиму с различной несимметрией нагрузки в узлах 7 и 8. По оси абсцисс задано среднеквадратичное отклонение модулей напряжений в узле интерфейса (узел 4), по оси ординат – погрешность, рассчитанная как максимальное отклонение напряжения в расчёте с использованием ГТО модели от значения напряжения в эталонном расчёте (на основе полного трехфазного представления всей сети). Как можно видеть, если фазные напряжения в узле интерфейса отличаются друг от друга менее чем на 10%, то погрешность в расчёте напряжений нагрузочных узлов не превышает 5%. Погрешность величиной в 5% можно считать приемлемой инженерной точностью расчёта. Помимо этого, при высокой степени несимметрии нагрузки и, как следствие, несимметрии напряжений итерационная процедура начинает хуже сходиться. Сначала увеличивается число итераций (с 3 до 6-8), при дальнейшем увеличении несимметрии итерационная процедура на основе ГТО модели начинает расходиться. При этом эталонный трехфазный расчёт на основе полной модели сети считается также за 3 итерации и режимы существуют.

Представленный вычислительный эксперимент по анализу ГТО модели в задаче расчёта установившегося режима можно интерпретировать следующим образом: если фазные напряжения в точке интерфейса различаются менее чем на 10%, то в этом случае может быть применена ГТО модель, что даст оптимальное соотношение между точностью расчёта и вычислительной сложностью задачи.

ГТО модель так же может использоваться в задаче *оценивания состояния* (ОС). Переход к трехфазному ОС на основе потоковой модели не имеет принципиальных особенностей, сохраняются тот же принцип составления уравнений, что и для однолинейной потоковой модели. Изменяются выражения для потерь и падения напряжения (16)–(18) для трехфазной постановки задачи в аналитических выражениях.

ГТО модель для ОС позволяет объединять в единую систему фрагменты сети, где имеются усреднённые однолинейные измерения, и фрагменты сети, где имеются трехфазные измерения. Программная реализация ГТО модели для задачи ОС была реализована на основе минимизации классической целевой функции – взвешенной суммы квадратов ошибок измерений.

В случае, когда в части электрической сети с несимметрией, присутствуют только усреднённые однолинейные измерения, применение ГТО модели является вынужденной мерой. Результатом расчёта фрагмента сети с однолинейными измерениями будет усреднённый по трем фазам режим, несимметрия в котором не наблюдается. В части сети, оснащённой пофазными измерениями, результатом расчёта будут фазные значения режимных параметров.

Альтернативой использования ГТО модели является применение классических методов ОС на основе однолинейного представления сети. При этом имеющиеся пофазные измерения будут усредняться, а информация о несимметрии будет теряться.

Для сравнения ОС на основе однолинейной модели сети и ОС на основе ГТО модели была проведена серия численных экспериментов на схеме, изображённой на рисунке 7. Нагрузки в сети 10 кВ были несимметричны, что приводило к несимметрии режима, режим сети 110 кВ был близок к симметричному. В сети 110 кВ и узлах 6, 7 сети 10 кВ учитывались усреднённые измерения, в узлах 4, 5 и 8 учитывались трехфазные измерения.

Расчёты показывают, что при несимметрии по обратной последовательности 3%, разница между значениями напряжений с применением однолинейного ОС и с применением ГТО модели для ОС может превышать 5%. При этом, разница между режимом, оцененным с помощью ГТО модели и точным эталонным трехфазным режимом не превышала погрешности измерительных комплексов.

В заключении приведены выводы и обобщены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. В обзоре литературы были рассмотрены существующие математические модели в фазных координатах основных элементов электрической сети: линии электропередачи, трансформаторов, генераторов и нагрузок. Задача моделирования трансформаторов с учетом сдвига фаз не имеет однозначного решения, в работе выбран подход, который использует метод симметричных составляющих, предложенный W.H. Kersting.
2. Анализ публикаций выявил, что наибольшее распространение для расчёта установившихся режимов в трех фазах получили уравнения узловых напряжений. Недостатками этого подхода являются проблемы со сходимостью и размерность задачи для трехфазной постановки. Для чисто радиальных сетей без источников генерации нашел широкое применение метод прямого-обратного хода (в два этапа).
3. Получила развитие потоковая модель установившегося режима, позволяющая учитывать схемы любой конфигурации и генерирующие узлы. В исходную постановку задачи добавлены контурные уравнения на основании второго закона Кирхгофа. Полученный метод обладает лучшими характеристиками сходимости применительно к распределительным сетям по сравнению с существующими.
4. Представлен алгоритм ускорения расчёта потоковой модели, который позволяет уменьшить размерность решаемой задачи, которая является одним из основных недостатков потоковой модели. При этом сохраняются плюсы потоковой модели, связанные с высокой скоростью и надежностью сходимости.
5. Разработана потоковая модель установившегося режима в трехфазной постановке, которая позволяет использовать детальные модели элементов, учитывающие несимметрию режимных параметров. Это особенно актуально для распределительных сетей, где высока степень несимметрии и пренебрежение этим аспектом может приводить к значительной погрешности.
6. Предложена гибридная трехфазно-однолинейная модель, которая позволяет объединить в рамках единого расчётного цикла фрагменты (районы) электрической сети с однолинейным и трехфазным

представлением. При этом появляется возможность использовать точное трехфазное математическое представление сети только в тех районах, где присутствует несимметрия режима работы электрической сети и имеются трехфазные измерения, все остальные районы электрической сети моделируются с использованием однолинейных моделей. Численные эксперименты показывают, что допущения, лежащие в основе модели, не приводят к значительным погрешностям.

7. Разработана единая система уравнений для гибридной трехфазно-однолинейной модели, которая может быть использована, как в задачах расчёта установившихся режимов, так и в задачах оценивания состояния. Тем самым обеспечивается возможность реализации единого расчётного ядра, обобщающего все представленные в работе алгоритмы. ГТО модель позволяет использовать всю имеющуюся измерительную информацию, что дает возможность точнее оценивать режимы работы сетей за счёт применения и усреднённых и трехфазных измерений.
8. Перспективы развития данной работы связаны с разработкой методов ускорения расчёта на основе потоковой модели, наибольший интерес представляет применение принципа фазного разделения, а также применение потоковой модели в задаче анализа предельных режимов ввиду хорошей обусловленности и быстрой сходимости модели.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК:

1. Банных, П.Ю. Гибридная трехфазно-однолинейная режимная модель для оценки состояния электроэнергетической системы / А.В. Паздерин, Мухлынин Н.Д., Банных П.Ю., Поляков И.Д. // *Электричество*. – 2019. – № 3. С. 15-23, 1,05 п.л./0,55 п.л.
2. Bannykh P., Lozhkin S, Pazderin A., Software package for power flow mathematical modeling with single-phase and three-phase power-energy flow model // 5th International Young Scientists Conference on Information Technologies, Telecommunications and Control Systems, ITTCS 2018; Yekaterinburg; Russian Federation. pp. 1-6, 0,7 п.л./0,4 п.л. (*Scopus*)
3. Bannykh P., Lozhkin S, Mukhlynin N, Pazderin A., Malozemova O. Distribution Grid Power Flow Algorithm Based On Power-Energy Flow Model // 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia. 2018, pp. 1-6, 0,7 п.л./0,4 п.л. (*Scopus u WoS*)

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

4. Банных П.Ю., Программное обеспечение для расчёта режима электроэнергетической системы в трехфазных координатах на основе уравнений узловых напряжений: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018660547 Российская Федерация / Банных П.Ю., Чусовитин П.В., заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – заявл. 16.07.2018; опубл. 23.08.18

5. Банных П.Ю., Программное обеспечение для расчёта режима электроэнергетической системы в трехфазных координатах на основе потоковой модели: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018663684 Российская Федерация / Банных П.Ю., Чусовитин П.В., Мухлынин Н.Д., Паздерин А.В., заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – заявл. 01.10.18; опубл. 1.11.18
6. Банных П.Ю., Программное обеспечение для оценивания состояния электроэнергетической системы в трехфазных координатах на основе потоковой модели: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018663393 Российская Федерация / Банных П.Ю., Чусовитин П.В., Мухлынин Н.Д., Паздерин А.В., заявитель и правообладатель: ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – заявл. 01.10.18; опубл. 26.10.18

Другие публикации:

7. Банных П.Ю., Ложкин С.А., Расчёт установившихся режимов распределительных сетей на основании потоковой модели // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы IX Международной научно-технической конференции, 1 – 5 октября 2018 г., Казань. – Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. С 152-155, 0,47 п.л./0,3 п.л.

Подписано в печать 25.12.2019	Печать цветная	Формат 60×84 1/16
Бумага типографская		Усл. печ. л. 1.50
Уч.-изд.л. 1.50	Тираж 120 экз.	Заказ 220

Отпечатано в типографии ООО «А-Принт»
620075, г. Екатеринбург, пер. Лобачевского, д. 1