

На правах рукописи



Шепелев Александр Олегович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА УСТАНОВИВШИХСЯ
РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЁТОМ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Омск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Горюнов Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра систем электроснабжения предприятий, профессор

Неуймин Владимир Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент, АО «Научно-технический центр Единой энергетической системы Противоаварийное управление», заместитель научного руководителя, начальник центра моделирования и автоматизации управления энергосистем

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

Защита диссертации состоится «13» мая 2021 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 212.178.12, созданного на базе Омского государственного технического университета по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <http://omgtu.ru>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, ОмГТУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.12.

Тел.: 8 (3812) 65-24-79; e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Гиршин Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в электроэнергетике России происходит рост спроса на электроэнергию, что, в свою очередь, при рыночных отношениях приводит к росту требований, предъявляемых к экономичности работы электрических сетей. Данные требования порождают необходимость в совершенствовании теоретических и практических методов расчёта параметров режима электрических сетей. К таким параметрам относятся: потери активной мощности (электроэнергии), уточнение уровня которых повысит точность обоснования нормативов потерь при передаче по электрическим сетям группы компаний «Россети» и др.; уровни напряжений в узлах сети, а также допустимые токи, протекающие по элементам.

В настоящее время в Российской Федерации реализуются задачи повышения эффективности работы электросетевого комплекса на основе следующих нормативных документов: Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р «Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации»; «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года»; Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». В представленных документах ставится задача повышения пропускной способности существующих и вновь проектируемых электрических сетей, а также снижения потерь мощности и электрической энергии.

Расчёт установившихся режимов сетей различных классов напряжения необходим при проектировании и модернизации электрических сетей и является основой оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике.

При современном уровне развития компьютерной техники и повсеместного внедрения программного обеспечения, целесообразно постоянно совершенствовать методы расчёта установившихся режимов электрических сетей. Усовершенствованные алгоритмы позволяют повысить точность моделирования физических процессов, происходящих в элементах электрической сети и учитывать параметры, которые ранее не учитывались вовсе или учитывались не в полной мере.

К настоящему времени большинство программ расчёта установившихся режимов ЭЭС не учитывают фактор нагрева элементов электрических сетей, а именно, текущий температурный режим воздушных линий и трансформаторов.

В разрезе данной проблемы, в представленной диссертационной работе, разработаны новые алгоритмы, и на их основе модифицированы уже существующие алгоритмы расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем. Для этого было разработано три усовершенствованных метода расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем, основанных на решении систем уравнений по методу узловых напряжений, записанных в форме баланса токов и мощностей.

Степень разработанности темы исследования. Задача расчёта установившихся режимов электрических сетей возникла одновременно с появлением самих сетей. Развитие ЭЭС и усложнение их структуры закладывает основу для появления новых и совершенствования известных методов расчёта режимов. Среди отечественных и зарубежных учёных заметный вклад в развитие методов расчёта установившихся режимов внесли: Аюев Б.И., Баламетов А.Б.о., Бартоломей П.И., Веников В.А., Войтов О.Н., Гамм А.З., Горнштейн В.М., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Идельчик В.И., Крумм Л.А., Кулешов А.И., Липес А.В., Лыкин А.В., Манусов В.З., Неймин В.Г., Тарасов В.И., Bose A., Chen H., Cheng C.S., Dong X., Exposito A.G., Gomez A., Goswami S., Hubbi W., Hug G., Milano F., Monticelli A., Mohagheghi S., Nguyen H., Pandey A., Rajicic D., Ramos E.R., Robert A.M., Sereeter B., Shu J., Tate J. E., Tylavsky D.J., Wang L. и многие другие. Применение того или иного метода расчёта установившихся режимов обусловлено множеством факторов, основными из которых являются размер и конфигурация сети, её топология и т.д.

Расчёт температурных режимов элементов электроэнергетических систем был заложен достаточно давно, как и нормативная документация по расчёту предельных токовых нагрузок для ЛЭП и перегрузочной способности трансформаторов. Большой вклад в развитие этих методов внесли такие учёные как Воротницкий В.Э., Герасименко А.А., Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Железко Ю.С., Засыпкин А.С., Зарудский Г.К., Зиннер Л.Э., Калинкина М.А., Левченко И.И.,

Никифоров Е.П., Петрова Т.Е., Поспелов Г.Е., Сацук Е.И., Тимашова Л.В., Файбисович В.А., Фигурнов Е.П., Фурсанов М.И., Черемисин Н.М., Шведов Г. В., Gomez A., Dong X., Frank S., Kotni L., Teh J., Wang M., Cecchi V., Douglass D. A., Morgan V.T., Ahmed A., Prusty B., Du Y., Kubis A. Picanco A.F. и многие другие.

Цель работы – совершенствование существующих алгоритмов расчёта установившихся режимов ЭЭС с учётом температурной зависимости активных сопротивлений её элементов.

Задачи исследования.

1. Произвести анализ современного состояния проблемы определения параметров установившегося режима электрической сети с учётом фактической температуры ее элементов.

2. Разработать математическую модель теплового режима силового масляного трансформатора.

3. Разработать усовершенствованный метод расчёта установившихся режимов ЭЭС с учётом температурной зависимости активных сопротивлений для разомкнутых электрических сетей среднего класса напряжения.

4. Разработать универсальные усовершенствованные методы расчёта установившихся режимов ЭЭС с учётом температурной зависимости активных сопротивлений.

5. Исследовать преимущества предлагаемых автором усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов ЭЭС по сравнению с существующими методами.

Объектом исследования является электрическая сеть, работающая в стационарном режиме.

Предмет исследования – методы расчета установившихся режимов электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель стационарного режима электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений линий электропередачи и силовых трансформаторов.

2. Разработана математическая модель теплового режима силового масляного трансформатора для определения средней температуры обмотки, адаптированная к задачам расчёта установившихся режимов электрических сетей.

3. Разработан усовершенствованный метод расчёта установившихся режимов ЭЭС с учётом температурной зависимости активных сопротивлений для разомкнутых электрических сетей среднего класса напряжения, основанный на вычислении обратной матрицы узловых проводимостей.

4. Разработан усовершенствованный метод расчёта установившихся режимов ЭЭС, основанный на совместном решении расширенной системы уравнений электрического и теплового режимов методом Ньютона.

5. Разработан усовершенствованный метод расчёта установившихся режимов ЭЭС, реализующий алгоритм метода Ньютона для уравнений электрического режима, дополненный процедурой уточнения активных сопротивлений внутри каждой итерации (метод внутренней температурной коррекции).

Теоретическая и практическая значимость проведённых исследований заключается в том, что:

– разработана математическая модель для расчёта средней температуры обмотки трансформатора, которая может быть использована как для расчёта установившихся режимов ЭЭС, так и для более точного анализа уровня потерь в трансформаторе;

– разработаны усовершенствованные методы расчёта установившегося режима электрических сетей различных классов напряжения и конфигураций с учётом температурной зависимости активных сопротивлений элементов;

– разработаны две программы для расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. Достоинством первой программы является возможность рассчитывать сети различных классов напряжений любой конфигурации. Достоинством второй – является возможность рассчитывать разомкнутые электрические сети с учётом их характерных особенностей и, следовательно, с ускорением расчёта.

Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы проверена и подтверждается с помощью вычислительных экспериментов, выполненных на примере тестовых электрических сетей. При этом, результаты расчетов параметров ВЛ, полученных из решения уравнений теплового баланса и состояния провода, сопоставимы с результатами расчетных и измерительных экспериментов других авторов в этой сфере. Результаты расчётов установившихся режимов ЭЭС, полученных с помощью исследовательской MathCAD-программы и разработанных автором программ «Энергосеть СН» и «Энергосеть ВН», в сопоставимых случаях подтверждаются результатами расчётов, проведённых с помощью ПВК RastrWin3, который является основной программой для расчёта и анализа установившихся режимов в электросетевых компаниях и в региональных диспетчерских управлениях РФ.

Методы исследования. При выполнении работы использовались: элементы теории электрических цепей, теория теплопередачи, численные методы решения нелинейных алгебраических уравнений. Математическое моделирование проводилось в программных комплексах MathCAD, Ansys и RastrWin3.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Полная математическая модель стационарного режима электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений воздушных линий электропередачи и трансформаторов.

2. Математическая модель теплового режима силового масляного трансформатора для определения средней температуры обмотки, адаптированная к задачам расчёта установившихся режимов электрических сетей.

3. Усовершенствованные методы расчёта установившегося режима электрических сетей различных классов напряжения и конфигураций с учётом температурной зависимости активных сопротивлений.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных в работе исследований по расчету установившихся режимов электрических сетей с учётом температурной зависимости активных сопротивлений используются в филиале ПАО «Россети Сибирь» – Омскэнерго», а также применяются в научно–исследовательской работе и учебном процессе Омского государственного технического университета (ОмГТУ) при подготовке специалистов, бакалавров, магистров энергетического института ОмГТУ по таким дисциплинам как Электроэнергетические системы и сети, Математические задачи электроэнергетики, Методы расчёта и оптимизация режимов электроэнергетических систем.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

Диссертационное исследование соответствует паспорту научной специальности 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы:

П.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.

П.7. Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

П.13. Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!»: VII Всерос. науч.–техн. конф. с междунар. участием. – Омск: ОмГТУ, 2017; Междунар. науч.-техн. конф. «Пром-Инжиниринг». – Москва, 2018; 4nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2018; «Актуальные вопросы энергетики»: Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Омск: ОмГТУ, 2018; «Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России»: Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Сургут: СурГУ, 2020; «Актуальные вопросы энергетики»: Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Омск: ОмГТУ, 2020; «Учёные Омска – региону»: V Регион. науч.-техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 2020.

Личный вклад соискателя. Соискателю принадлежит разработка математических моделей, анализ результатов, программная реализация алгоритмов, проверка достоверности исследований. Научные и практические результаты, выносимые на защиту, разработаны и получены автором.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 5 статей, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 133 наименований. Она содержит: 137 страниц основного текста, 28 рисунков, 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, сформулирована цель и задачи исследования, отражены структура диссертации, охарактеризована научная новизна и практическая ценность результатов исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведён обзор современного состояния проблемы определения параметров режима электрической сети с учётом фактической температуры её элементов. Рассмотрены отечественные и зарубежные нормативные документы, направленные на более точное определение параметров воздушных линий электропередачи. Отмечено, что в действующем издании ПУЭ допустимая токовая нагрузка по нагреву неизолированных проводов определяется из наиболее высокой температуры провода равной 70 °С. Однако, в соответствии с ГОСТ 839-80Е, допустимая температура для неизолированных проводов ВЛЭП может достигать 90 °С. Данное увеличение связано с новыми способами соединения строительных длин проводов, что позволяет дополнительно повысить пропускную способность ВЛЭП с учётом климатических факторов.

Согласно методу расчета, IEEE Std. 738-2012, уравнение теплового баланса для воздушных линий содержит четыре составляющих. Первой составляющей является тепло, выделяющееся в проводах при передаче электрической энергии (I^2R), второй – солнечное излучение (q_s), третьей – излучение с поверхности провода в окружающую среду (q_r), и наконец, четвертой является конвекция вокруг ВЛ (q_c), которая может быть вынужденной или естественной. Солнечное излучение и передаваемый ток нагревают воздушную линию, в то время, как и излучение в окружающую среду и конвекция имеют охлаждающий эффект на ЛЭП. Уравнение теплового баланса для установившегося теплового режима можно представить следующим уравнением

$$q_c + q_r = q_s + I^2R(T_c). \quad (1)$$

Математическая модель оценки температуры провода в установившемся режиме в соответствии с методикой CIGRE Working group B2.43-2014 учитывает множество метеорологических параметров. К метеорологическим параметрам, влияющим на тепловое состояние проводника, относятся: средняя скорость ветра, направление и турбулентность, температура окружающей среды и солнечная радиация. При условии неизменности этих параметров и незначительных колебаниях электрической нагрузки, температура проводника меняется в незначительных пределах.

В данной ситуации тепло, полученное проводником, уравновешено количеством рассеянной теплоты (тепловая энергия не накапливается), поэтому тепловое состояние провода определяется стационарным режимом. Уравнение теплового баланса в этом случае может быть представлено

$$P_J + P_M + P_S + P_i = P_c + P_r + P_w \quad (2)$$

где P_J – Джоулев нагрев; P_M – магнитный нагрев; P_S – солнечный нагрев; P_i – нагрев на корону; P_c – конвективное охлаждение; P_r – охлаждение рассеиванием; P_w – охлаждение испарением.

Методы и IEEE, и CIGRE основаны на уравнении теплового баланса в установившемся тепловом режиме, согласно которому полученное тепло равно рассеянному теплу. Также, обе методики принимают во внимание метеорологические параметры, влияющие на тепловое состояние проводов, такие как средняя скорость ветра, направление (угол атаки ветра), температура окружающего воздуха и солнечное излучение. Тем не менее, данные методы представляют собой различные способы решения уравнения теплового баланса. Сравнивая формулу, используемую CIGRE, представленную выражением (2), и уравнение теплового баланса, представленное в стандарте IEEE выражением (1) можно заметить, что в методе IEEE

опущены три элемента: магнитный нагрев, нагрев на корону и охлаждение испарением, так как обычно они оказывают незначительное влияние на определение нагрузочной способности.

Удельное активное сопротивление является одним из основных параметров, определяющих режим электроэнергетических систем (ЭЭС). Важной задачей, при расчете тепловых режимов электрических сетей всех классов напряжения, является учёт температуры проводника. Это вызвано тем, что температура проводников определяет техническую допустимость того или иного режима электрической сети.

В последнее время имеет место внедрение проводов повышенной пропускной способности (высокотемпературных проводов). Рабочая температура этих типов проводов значительно выше 90 °С. Для таких проводов наблюдается более сложная зависимость активного сопротивления от температуры, при температуре выше 130 °С, и тогда выражение для определения активного сопротивления провода примет следующий вид:

$$R(\Theta) = R_{20} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\Theta_{\text{пров}} - 20) + \zeta \cdot (\Theta_{\text{пров}} - 20)^2 \right) \quad (3)$$

где R_{20} – паспортное значение активного сопротивления при температуре 20 °С; α – линейный температурный коэффициент активного сопротивления металлического проводника; $\Theta_{\text{пров}}$ – фактическая температура проводника воздушной линии электропередачи, ζ – квадратичный температурный коэффициент активного сопротивления металлического проводника.

По результатам расчёта, для проводов АС 150/24 и АССР 297-Т16 при учёте и не учёте квадратичного коэффициента разница в определении активного сопротивления составляет 0,305 % и 2,009 %, соответственно. Данный факт позволяет рассчитывать сопротивление классических проводов марки АС, не принимая во внимание квадратичную составляющую, учитываемую в выражении (3). Для высокотемпературных проводов при фактической температуре выше 130 °С неучёт квадратичной составляющей может внести погрешность в определение активного сопротивления не более чем на 2,009%. Данный уровень погрешности лежит в пределах точности определения активного сопротивления с помощью существующих средств измерения. Поэтому в дальнейшем, при разработке методов расчёта установившегося режима ЭЭС для определения активного сопротивления будем пользоваться выражением, не учитывающим квадратичную составляющую. Выражение (3) целесообразно применять только для высокотемпературных проводов и только при их наличии в схеме.

Также был произведён анализ современного состояния проблемы определения параметров, входящих в уравнения теплового баланса для провода. Проанализированы работы различных как отечественных научных школ, занимающихся проблемой учёта фактической температуры элементов, так и зарубежных исследователей. Рассмотрен вопрос определения температуры обмоток силовых масляных трансформаторов на основе анализа российских и зарубежных стандартов и методик, а также публикационной активности зарубежных авторов.

Во второй главе произведён анализ математических моделей установившихся режимов электрических и тепловых режимов электрических систем.

В качестве основной формы записи уравнений режима в настоящее время является запись в форме баланса мощностей в полярной системе координат. Уравнения установившегося режима в форме баланса мощностей в полярной системе координат выглядят следующим образом:

$$\Delta P_i(P_i, U, \delta) = P_i + U_i^2 g_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j (g_{ij} \cos(\delta_{ij}) - b_{ij} \sin(\delta_{ij})) = 0 \quad (4)$$

$$\Delta Q_i(Q_i, U, \delta) = Q_i + U_i^2 b_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j (b_{ij} \cos(\delta_{ij}) + g_{ij} \sin(\delta_{ij})) = 0 \quad (5)$$

где $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$; $U_i, \delta_i, U_j, \delta_j$ – модули и фазы напряжений в узлах, кВ и град; P_i, Q_i – мощности потребителей, МВт и Мвар; g_{ii}, b_{ii} – действительная и мнимая части собственной проводимости узла; g_{ij}, b_{ij} – действительная и мнимая части взаимной проводимости узлов, k – общее число узлов с неизвестными напряжениями, балансирующих и базисных.

При расчете режимов электрических сетей традиционно используются различные вариации метода Ньютона. Данный метод обладает рядом преимуществ. Основное

преимущество заключается в малом количестве приближений, необходимым для определения искомых амплитуд и фаз напряжений с заданной точностью.

Далее рассмотрена математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи. В общем случае уравнение теплового баланса для воздушной линии электропередачи можно записать в форме

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{жс}) = d_{пр} \left[\pi \alpha_{вын} (\Theta_{внеш} - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right] \quad (6)$$

Выражение (6) можно решить как численными, так и прямыми методами. Сравним решение представленного уравнения теплового баланса прямыми, численными методами с методом конечных элементов (МКЭ). В качестве примера приведём расчёт температуры провода марки АС 120/19. Исходные данные для расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные для расчёта температуры провода АС 120/19

Параметр	Значение
Активное сопротивление при 20 °С	0,000244 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления	0,00403 °С ⁻¹
Диаметр провода	0,0152 м
Коэффициент вынужденной конвекции при скорости ветра $v = 0,6$ м/с	17,937
Степень черноты поверхности провода	0,6
Температура окружающей среды	10 °С
Ток	350

Результаты расчёта температуры различными методами сведены в таблицу 2. Картина теплового поля (температуры) провода марки АС 120/19, полученная в ПК Ansys, представлена на рисунке 1. Граничные условия для ПК Ansys приняты в соответствии с таблицей 1. За эталонный метод взят метод конечных элементов, доказавший свою достоверность при определении различных физических параметров.

Таблица 2 – Результаты расчёта температуры

Метод	$\Theta_{внеш}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\Theta_{внеш}^{МКЭ}, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_{внеш}^{МКЭ}, \%$
Аналитический	46,6068	0,00029	0,00062
Численный	46,6068	0,00026	0,00056
МКЭ	46,6066	-	-

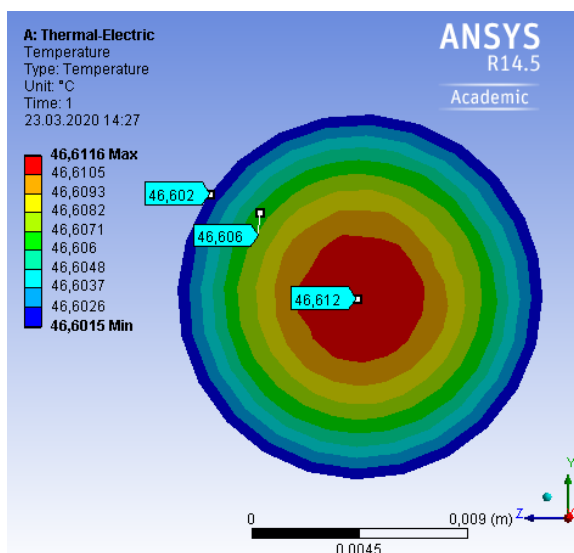


Рисунок 1 – Результаты расчёта температуры с помощью МКЭ в ПК Ansys

По результатам проведённых вычислений можно сделать вывод о том, что аналитический и численный методы решения уравнения теплового баланса обладают хорошей точностью относительно метода конечных элементов.

В дальнейшем, при разработке усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов ЭЭС, будем использовать два этих метода расчёта температуры провода воздушной линии электропередачи.

Также во второй главе представлена математическая модель теплового режима силового масляного трансформатора.

Запишем температурную зависимость активного сопротивления трансформатора через потери мощности.

Суммарные потери в обмотках трансформатора, как функцию температуры, можно представить в следующем виде:

$$\Delta P_{об} = 3I^2 R_{=0} \left(1 + \alpha_{ном} \Theta_{об,ср} + \frac{k_0}{1 + \alpha_{ном} \Theta_{об,ср}} \right), \quad (7)$$

где $R_{=0}$ – активное сопротивление обмоток трансформатора при 0 °С; α – температурный коэффициент потерь в обмотках трансформатора; $\Theta_{об,ср}$ – средняя температура обмоток; k_0 – отношение $\Delta P_{осн}$ к $\Delta P_{доб}$ при заданной температуре обмоток.

Квазилинейный характер зависимости потерь активной мощности в обмотках трансформатора от температуры позволяет приближенно представить их линейной функцией, аналогично потерям в линиях:

$$\Delta P_{об} = \Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{об,ср}), \quad (8)$$

где ΔP_0 – потери в обмотках при 0 °С.

Для решения этой задачи преобразуем нелинейное слагаемое в (7) $(1 + \alpha \Theta_{об,ср})^{-1}$ к функции вида $(A - B \Theta_{об,ср})$ на основе метода наименьших квадратов в интегральной форме. Данное преобразование сводится к минимизации следующего интеграла:

$$\Psi = \int_{\Theta_1}^{\Theta_2} \left(A - B \Theta_{об,ср} - \frac{1}{1 + \alpha \Theta_{об,ср}} \right)^2 d\Theta_{об,ср} \rightarrow \min \quad (9)$$

где $\Theta_1 \dots \Theta_2$ – интервал температур, на котором производится преобразование.

Решение задачи (9) дает следующие коэффициенты аппроксимации:

$$B = 12 \frac{\left(\frac{\Theta_2 + \Theta_1}{2} + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{1 + \alpha \Theta_2}{1 + \alpha \Theta_1} \right) - (\Theta_2 - \Theta_1)}{\alpha (\Theta_2 - \Theta_1)^3} \quad (10)$$

$$A = \frac{1}{\alpha (\Theta_2 - \Theta_1)} \ln \left(\frac{1 + \alpha \Theta_2}{1 + \alpha \Theta_1} \right) + B \frac{\Theta_2 + \Theta_1}{2} \quad (11)$$

Далее на основе некоторых преобразований получим выражения для потерь в обмотках при 0 °С и температурного коэффициента потерь в обмотках трансформаторов:

$$\Delta P_0 = 3I^2 R_{=0} (1 + k_0 A) \quad (12)$$

$$\alpha_{ном} = \frac{\alpha - k_0 B}{1 + k_0 A} \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что температурный коэффициент потерь существенно меньше температурного коэффициента сопротивления. Это объясняется влиянием добавочных потерь, которые при увеличении температуры обмоток не возрастают, а снижаются.

Расчёт средней температуры обмоток произведём на основе уравнения теплового баланса трансформатора в упрощённой форме.

Основное допущение: превышение средней температуры обмоток над температурой окружающей среды прямо пропорционально потерям активной мощности в обмотках.

Этому допущению соответствует уравнение теплового баланса следующего вида:

$$\Delta P_0 (1 + \alpha_{ном} \Theta_{об,ср}) = A_m (\Theta_{об,ср} - \Theta_{окр}) \quad (14)$$

где $\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды; A_m – постоянный коэффициент, определяющий интенсивность теплопередачи от обмоток в окружающую среду.

Очевидно, что данное уравнение не учитывает, как реальную сложность процессов теплообмена между элементами трансформатора, так и различие способов охлаждения (но даже это уравнение с достаточной степенью точности подходит для расчёта потокораспределения). Однако, оно дает возможность получить аналитические выражения как для потерь мощности, так и для фактической температуры обмоток.

Параметр A_m можно определить по данным опыта короткого замыкания. В этом режиме потери в обмотках приводятся к средней температуре $\Theta_{об,ном} = 75$ °С. Нормированная температура окружающей среды для силовых трансформаторов $\Theta_{окр,ном} = 20$ °С. Тогда выражения для определения параметра A_m будет выглядеть следующим образом

$$A_m = \frac{\Delta P_{кз} - \Delta P_{бак,ном}}{\Theta_{об,ном} - \Theta_{окр,ном}} = \frac{\Delta P_{кз} - \Delta P_{бак,ном}}{55} \quad (15)$$

где $\Delta P_{бак,ном}$ – номинальные потери в баке трансформатора, которые можно определить по приближённому выражению:

$$\Delta P_{бак,ном} \approx 10 \cdot k \cdot S_{ном} \quad (16)$$

где k – коэффициент пропорциональности; $S_{ном}$ – полная мощность трансформатора, выраженная в кВт·А.

Фактическая температура обмоток трансформатора определяется из выражения (14) и записывается в следующем виде

$$\Theta_{обм,ср} = \frac{\frac{\Delta P_0}{A_m} + \Theta_{окр}}{1 - \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_{ном}}{A_m}} \quad (17)$$

В дальнейшем, именно выражение (17) будет использоваться при составлении уравнений установившегося режима.

В третьей главе представлена математическая модель установившегося режима электроэнергетической системы с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. В общем виде, уравнение теплового баланса для элемента электроэнергетической системы в общем виде может быть представлено как

$$q_{конв} + q_{изл} + q_{тепл} = q_{солн} + 3I^2 R(\Theta) + \Delta P_{пост} \quad (18)$$

где $q_{конв}$, $q_{изл}$ и $q_{тепл}$ – количества теплоты, отдаваемые элементом сети в окружающую среду соответственно конвекцией, излучением и теплопроводностью; $q_{солн}$ – поток солнечной радиации, поглощаемый элементом сети; I – ток нагрузки; $R(\Theta)$ – активное сопротивление элемента, приведенное к фактической температуре Θ ; $\Delta P_{пост}$ – условно-постоянные потери активной мощности внутри элемента сети.

Математическая модель стационарного режима электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений линий электропередачи и силовых трансформаторов на основе рассмотренной идеологии представлена ниже

$$P_{n,i} \cdot (a_{2,i} \cdot k_i^2 + a_{1,i} \cdot k_i + a_{0,i}) - P_{ген,i} + U_i^2 g_{\Theta ii} - \\ - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_j (g_{\Theta ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{\Theta ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (19)$$

$$Q_{n,i} \cdot (b_{2,i} \cdot k_i^2 + b_{1,i} \cdot k_i + b_{0,i}) - Q_{ген,i} + U_i^2 b_{\Theta ii} - \\ - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m U_j (b_{\Theta ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + g_{\Theta ij} \sin(\delta_i - \delta_j)) \quad (20)$$

$$\frac{1000}{3l_{ij}n_{u,ij}n_{\phi,ij}} [U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] g_{ij} - \quad \text{если } k_{mp} = 1 \quad (21)$$

$$-d_{np,ij} \left[\pi \alpha_{вын,ij} (\Theta_{ij} - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{ij}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн,ij} \right] \\ \Delta P_{0,ij} (1 + \alpha_{ном,ij} \Theta_{об,ср,ij}) = A_m (\Theta_{об,ср,ij} - \Theta_{окр}) \quad \text{если } k_{mp} \neq 1 \quad (22)$$

$$R(\Theta)_{ij} = R_{0,ij} (1 + \alpha \cdot \Theta_{ij}) \quad \text{если } k_{mp} = 1 \quad (23)$$

$$R(\Theta)_{ij} = R_{0,ij} (1 + \alpha_{ном} \cdot \Theta_{ij}) \quad \text{если } k_{mp} \neq 1 \quad (24)$$

$$Y_{ij} = \frac{1}{R(\Theta)_{ij} + jX_{ij}} = \frac{R(\Theta)_{ij} - jX_{ij}}{R(\Theta)_{ij}^2 + X_{ij}^2} = g_{\Theta i,j} - jb_{\Theta i,j} \quad (25)$$

где l_{ij} – длина линии, км; $n_{ц,ij}$ и $n_{ф,ij}$ – число цепей линии и число проводов в фазе; $d_{пр,ij}$ – диаметр провода, м; $\alpha_{вын,ij}$ – коэффициент теплоотдачи провода (вынужденной конвекцией), Вт/(м²·°C); Θ_{ij} , $\Theta_{окр}$ – температуры провода (выражение (23)), обмотки трансформатора (выражение (24)) и окружающей среды, °C; T_{ij} , $T_{окр}$ – абсолютные температуры провода и окружающей среды; ε_n и A_s – степень черноты поверхности провода и поглощательная способность поверхности для солнечного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана; $q_{солн,ij}$ – плотность потока солнечной радиации на поверхность провода, Вт/м²; $R_{0,ij}$ – активное сопротивление линии в выражении (23) и активное сопротивление трансформатора в выражении (24), Ом, при 0 °C; α – температурный коэффициент сопротивления; $\alpha_{ном}$ – температурный коэффициент потерь в обмотках трансформатора.

В третьей главе представлены усовершенствованные методы расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем и сетей с учётом температурной зависимости активных сопротивлений, реализующих идеологию, выраженную уравнениями (19)-(25). На рисунке (2) представлен алгоритм метода расчёта УР для разомкнутых сетей среднего класса напряжения.

Совместный расчёт параметров электрического и теплового режимов представляет достаточно трудоёмкую задачу. Уравнения, описывающие тепловые процессы, значительно отличаются от уравнений узловых напряжений, поэтому, при расчёте режима сети с учётом температуры, может наблюдаться ухудшение сходимости итерационного процесса.

Совместный метод основан на добавлении к уравнениям невязок по активной и реактивной мощностям уравнений теплового баланса, с помощью линеаризации уравнений методом Ньютона.

Таким образом уравнения невязок можно представить в общем виде как

$$\begin{aligned} \Delta P_i(P_i, U, \delta, \Theta) \\ \Delta Q_i(Q_i, U, \delta, \Theta) \\ \Delta T_i(U, \delta, \Theta) \end{aligned} \quad (26)$$

В выражении (26) каждая из составляющих по активной, реактивной мощностям узлов и температуры воздушной линии электропередачи соответственно определяется по следующим выражениям:

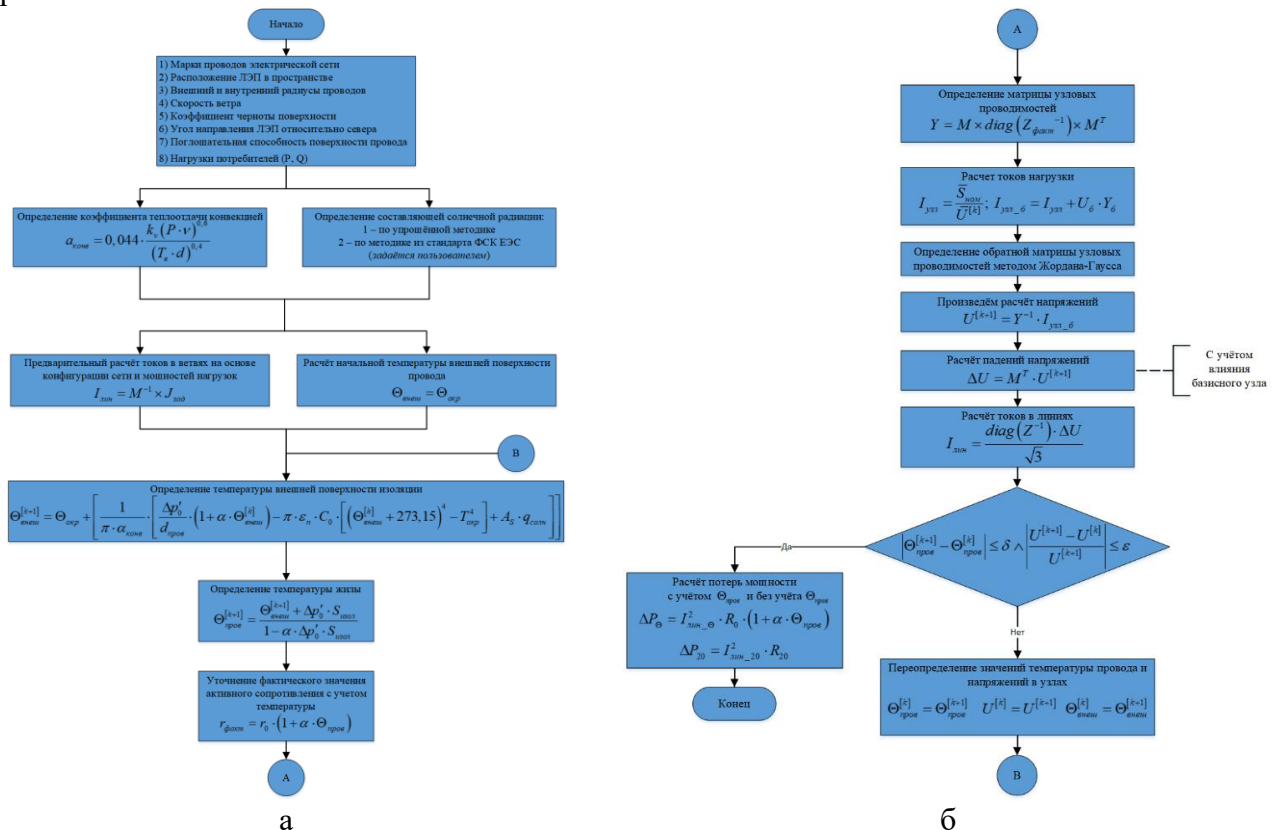


Рисунок 2 – Алгоритм расчета установившегося режима электрической сети напряжением 6-35 кВ

$$\Delta P_i(P_i, U, \delta, \Theta) = P_i + U_i^2 g_{\Theta ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j (g_{\Theta ij} \cos(\delta_{ij}) - b_{\Theta ij} \sin(\delta_{ij})) = 0 \quad (27)$$

$$\Delta Q_i(Q_i, U, \delta, \Theta) = Q_i + U_i^2 b_{\Theta ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^k U_j (b_{\Theta ij} \cos(\delta_{ij}) + g_{\Theta ij} \sin(\delta_{ij})) = 0 \quad (28)$$

$$\Delta T_{i,j}(U, \delta, \Theta) = \frac{1000}{3 \cdot L_{i,j} \cdot n_{\varphi i,j} \cdot n_{\varphi j,j}} \cdot [U_i^2 + U_j^2 - 2 \cdot U_i \cdot U_j \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \cdot g_{\Theta i,j} - \\ - d_{i,j} \left[\pi \alpha_{\text{вын},j} (\Theta_{i,j} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{i,j}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн},j} \right] = 0 \quad (29)$$

где i, j – номера узлов в начале и конце линии; $L_{i,j}$ – длина линии, км; $n_{\varphi i,j}$ и $n_{\varphi j,j}$ – число цепей линии и число проводов в фазе; $g_{\Theta ij}$ – активная проводимость с учётом фактической температуры $\Theta_{i,j}$ ($T_{i,j}$) линии электропередачи.

Соответственно, произойдёт расширение системы уравнений на количество ветвей в схеме. В дополнении к обычным переменным состояния, U и δ , в каждом узле сети необходимо определение переменной состояния Θ для каждой ветви схемы. Т.е. при классической записи уравнений режима без учёта температуры матрица Якоби будет выглядеть следующим образом (блочная структура):

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} \end{bmatrix} \quad (30)$$

В случае совместного решения уравнений электрического и теплового режимов матрица Якоби преобразуется к виду:

$$J_{\Theta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} & \frac{\partial \Delta P}{\partial \Theta} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial \Theta} \\ \frac{\partial \Delta T}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta T}{\partial U} & \frac{\partial \Delta T}{\partial \Theta} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Так как из-за учёта температурной зависимости активных сопротивлений происходит увеличение размерности матрицы Якоби, то расширится конечная система, решаемая методом Гаусса. Из-за того, что уравнения электрического и теплового режима отличаются по своей природе, может произойти следующая ситуация. Если система электрических уравнений была хорошо обусловлена, то тепловые уравнения ухудшат обусловленность системы, решаемой методом Гаусса, что может привести к расходимости метода Ньютона. Способами улучшения сходимости в данном случае могут быть:

- запись параметров состояния системы U и Θ в относительных единицах, что улучшит численную устойчивость алгоритма и обусловленность матрицы Якоби;
- использование методов декомпозиции или, так называемых, разделённых методов Ньютона.

Блок-схема алгоритма совместного решения уравнений электрического и теплового режимов представлена на рисунке 3а.

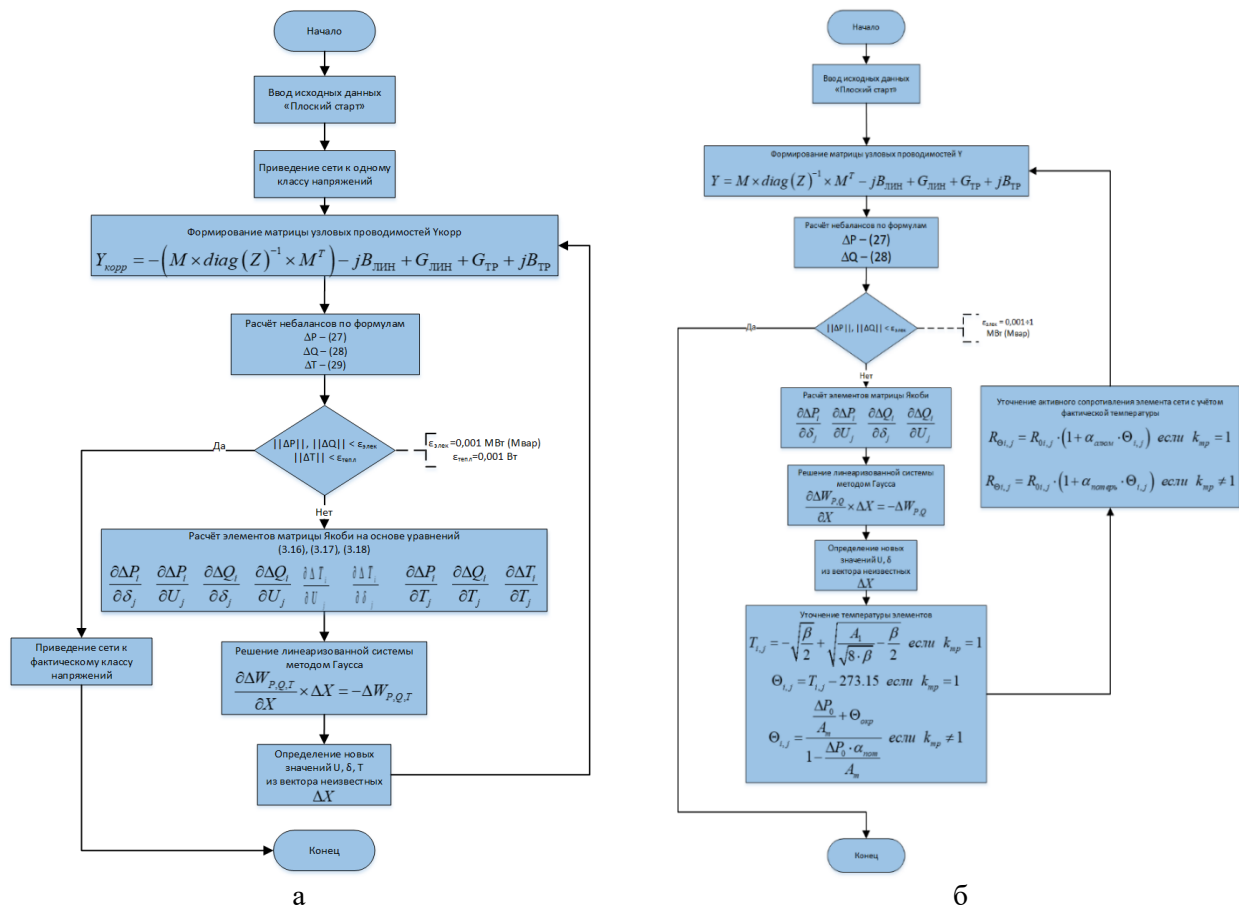


Рисунок 3 – Блок-схема алгоритмов:

а – совместный метод
б – метод внутренней температурной коррекции

Совместное решение уравнений теплового и электрического режимов связано с вычислением дополнительных производных, что усложняет задачу расчёта УР. Для уменьшения размерности матрицы Якоби воспользуемся разработанной специальной модификацией метода Ньютона – методом внутренней температурной коррекции (ВТК). Метод ВТК позволяет не переходить к форме записи матрицы Якоби в виде (31), а позволяет решать систему на основе матрицы Якоби по форме (30). Линеаризация уравнений осуществляется при допущении, что активные сопротивления – это постоянные величины. Однако величина активных сопротивлений на каждой итерации корректируется с учетом температуры. Блок-схема алгоритма, реализующего метод внутренней температурной коррекции, представлена на рисунке 3б.

Также в третьей главе представлены практические способы реализации усовершенствованных методов расчёта УР с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. В частности, более точная оценка уровня потерь при учёте температурной зависимости сопротивлений может уменьшить вероятность дефицита мощности в энергосистеме. Уточнение фактического уровня потерь в сетях позволит повысить точность при расчётах потокораспределения, а именно уточнение фактических значений токов и напряжений, что в целом потенциально может снизить общие затраты. Расчёт потокораспределения с учётом тепловых процессов также может представлять интерес в задачах поддержания требуемых уровней напряжения и повышения пропускной способности линий электропередачи, а также возможность более обоснованного выбора мероприятий по снижению потерь энергии в электрических сетях.

Одним из вариантов практической реализации расчёта потокораспределения с учётом тепловых процессов в элементах может быть схема, представленная на рисунке 4а. В этой схеме данные о температуре окружающей среды, солнечной радиации, скорости и направления ветра могут быть получены с метеостанций, установленных или на подстанциях, или ближайших доступных метеостанций метеослужб. При этом необходимо будет взаимодействие с геоинформационной системой для связи полученных параметров окружающей среды с

фактическим расположением линий электропередачи. Если при расчёте потокораспределения будут использоваться данные телеметрии, то необходимо будет произвести предварительную обработку полученных значений. В ином случае, можно использовать значения, полученные по данным контрольных замеров, обычно проводимых или 2, или 4 раза в год.

Другим вариантом реализации учёта тепловых процессов в элементах ЭЭС при расчёте потокораспределения является схема, представленная на рисунке 4а. Эта схема требует больших капиталовложений и основывается на использовании датчиков температуры, устанавливаемых на линиях электропередачи и трансформаторах. Информация с них может быть передана в центр управления сетями через SCADA-систему. Данная система позволит наиболее точно оценивать температуру элементов, но только в случае рациональной установки датчиков температуры по всей длине линии электропередачи.

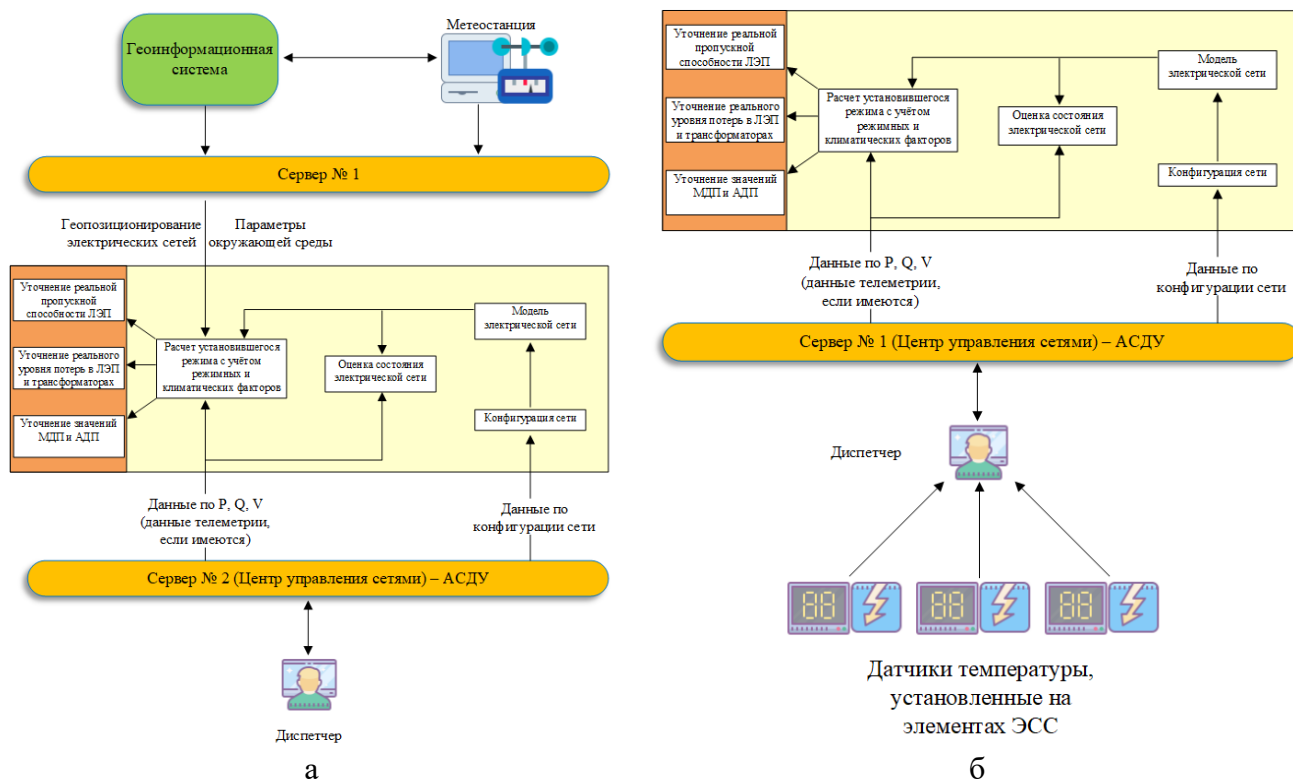


Рисунок 4 – Реализация расчёта установившегося режима с учётом тепловых процессов

В четвёртой главе представлена экспериментальная проверка усовершенствованных методов расчёта УР ЭЭС с учётом температурной зависимости активных сопротивлений.

При расчёте установившегося режима электрической сети с учётом температурной зависимости сопротивлений необходимо первоначально определить напряжения в узлах, затем определить протекающие токи и только после определения параметров электрического режима перейти к определению тепловых параметров. Далее необходимо произвести корректировку существующих значений активных сопротивлений, которые обычно принимаются по паспортным данным и приводятся к температуре 20 °С.

Расчёт установившегося режима с учётом температурной зависимости для разомкнутой распределительной сети напряжением 6-35 кВ произведён с помощью алгоритма, представленного на рисунке 2. Для расчета взаимного влияния электрического и теплового режимов рассмотрим распределительную сеть, представленную на рисунке 5. В данной схеме за балансирующий (базисный) узел принимается шина низкого напряжения понижающей подстанции 110/10 или 35/10 кВ. Температура окружающего воздуха принимается равной $\Theta_{окр} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость ветра варьировалась от 0,6 до 1,2 м/с. Солнечная радиация принималась в соответствии с солнечным днём, чистой атмосферой в день летнего “солнцестояния”.

В результате проведённого математического моделирования (расчета электрического режима) были получены следующие результаты (Таблица 3):

- 1) Напряжения в узлах сети.
- 2) Токи в линиях с учётом тепловых процессов.

- 3) Токи в линиях без учета тепловых процессов.
- 4) Сопротивления линий с учётом и без учета климатических факторов.
- 5) Фактическая температура проводника.

Далее произведём расчет активной мощности в линиях электропередачи без учета и с учетом температуры, а также разницу потерь с учётом и без учета температуры:

- 1) С учетом температуры:

$$\Delta P_{\text{темп}} = \sum I_{\Theta}^2 \cdot R_{\Theta} = 156,546 \text{ кВт}.$$

- 2) Без учета температуры:

$$\Delta P = \sum I_{20}^2 \cdot R_{20} = 135,39 \text{ кВт}.$$

- 3) Разница потерь с учётом температуры и без учёта:

$$\Delta P_{\text{о.е.}} = \frac{\Delta P_{\text{темп}} - \Delta P}{\Delta P_{\text{темп}}} \cdot 100 = 13,514 \text{ \%}.$$

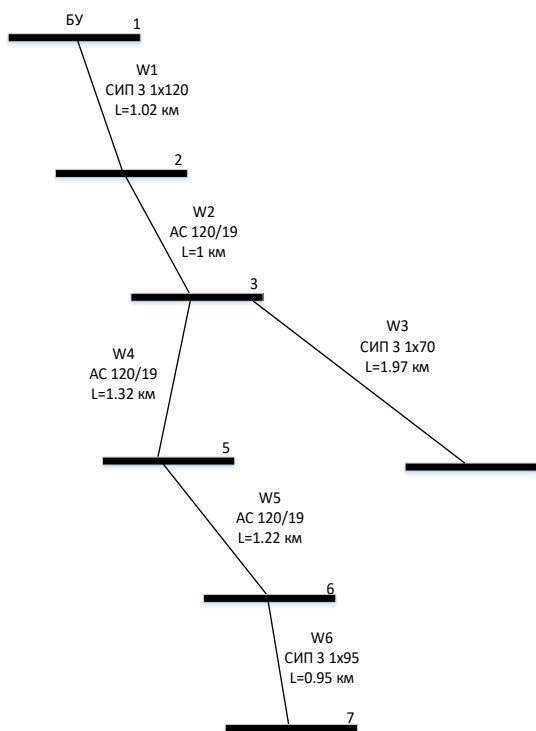


Рисунок 5 – Схема рассматриваемой распределительной сети 10 кВ

Дополнительные расчёты установившегося режима с учётом температурной зависимости активных сопротивлений по разработанному алгоритму приведены в Приложениях В и Г, диссертационной работы.

Сравним метод расчёта УР для разомкнутых сетей среднего класса напряжения с учётом температурной зависимости активных сопротивлений с методом внутренней температурной коррекции, с классическим методом Ньютона и с методом расчёта УР для разомкнутых сетей среднего класса напряжения без учёта температурной зависимости. Ниже приведены результаты только численного анализа сходимости на основе бесконечной (максимальной) нормы матрицы небалансов.

Для оценки сходимости метода расчёта УР для разомкнутой сети среднего класса напряжения были построены зависимости нормы матрицы небалансов от номера итерации для схем IEEE 33 и 69 Bus Radial network.

Как видно из рисунка 6 метод СН (метод для расчёта УР сетей среднего напряжения с учётом тепловых процессов) устойчиво сходится для обеих схем и не уступает методу ВТК.

Таблица 3 – Результаты расчёта установившегося режима электрической сети 10 кВ с учётом температурной зависимости активных сопротивлений

U_{Θ} , В	U_{20} , В	I_{Θ} , А	I_{20} , А	R_{Θ} , Ом	R_{20} , Ом	ΔP_{Θ} , кВт	ΔP_{20} , кВт	$\Theta_{\text{лин}}$, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10274,4	10301,2	282,7	284,5	0,355	0,294	85,14	69,909	76,02
10121	10156,1	226,2	226,5	0,267	0,244	40,97	37,171	45,082
10026,5	10065,8	45,6	45,7	1,026	0,971	6,395	6,006	35,114
10009,4	10049,2	126	125,5	0,345	0,322	16,431	15,208	39,163
9944,7	9987,1	79,9	79,4	0,315	0,298	6,037	5,653	35,779
9914,6	9958,6	37,5	37,2	0,373	0,345	1,572	1,442	41,608

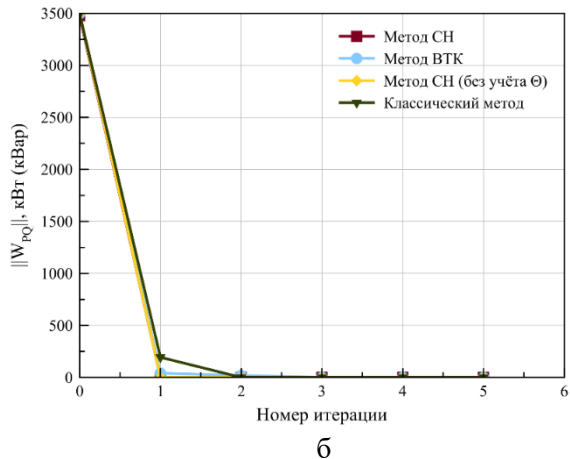
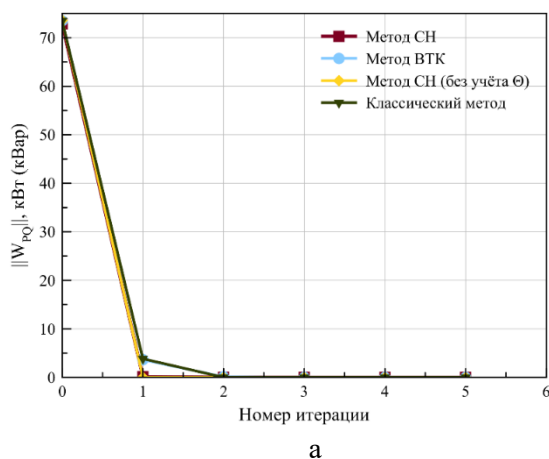


Рисунок 6 – Сходимость метода расчёта УР для сетей среднего класса напряжения (с учётом и без учёта температуры), метода ВТК, классического метода Ньютона
а – IEEE 33 Bus Radial
б – IEEE 69 Bus Radial

Однако, этот метод имеет преимущество относительно метода ВТК – быстродействие алгоритма. Результаты сравнения быстродействия алгоритмов представлены в таблице 4.

По результатам, представленным в таблице 4 видно, что все методы устойчиво сходятся для обеих схем. Классический метод Ньютона принят за “эталонный” и расчёт быстродействия других алгоритмов рассчитывался относительно данного метода. Основное преимущество метода расчёта УР для сетей среднего напряжения с учётом температурной зависимости активных сопротивлений заключается в том, что он обладает как минимум двукратным быстродействием относительно классического метода Ньютона и примерно трёхкратным быстродействием относительно метода ВТК.

Таблица 4 – Результаты сравнения быстродействия алгоритмов для схем IEEE 33 и 69 Bus

Метод	Итерации	Время, с	Отношение*
33 Bus			
Классический метод Ньютона	3	0,034	100%
Метод СН	4	0,01	29,412%
Метод ВТК	4	0,057	167,647%
Метод СН (без учёта Θ)	5	0,001	2,941%
69 Bus			
Классический метод Ньютона	3	0,136	100%
Метод СН	4	0,035	25,735%
Метод ВТК	4	0,17	125%
Метод СН (без учёта Θ)	5	0,014	10,294%

*Время выполнения в % от классического метода Ньютона

2-узловая тестовая схема позволяет оценить влияние температурной зависимости активного сопротивления на электрический режим, а также на сходимость итерационного процесса при наиболее простых условиях. 5-узловая схема представляет собой модифицированную схему IEEE 5. Она позволяет протестировать предлагаемые методы расчета при сложной конфигурации сети.

Далее произведём расчёты на основе методов, представленных на рисунке 3. Исходные данные были выбраны так, чтобы напряжения в узлах сети и температуры линий электропередачи варьировались в достаточно широких пределах. Расчёты производились для двух тестовых схем, представленных на рисунке 7а и 7б, соответственно, следующими методами:

1. Совместное решение уравнений электрического и тепловых режимов (Совместный метод).
2. Метод внутренней температурной коррекции (ВТК).
3. Метод Ньютона без учёта температурной зависимости активных сопротивлений (Классический метод).

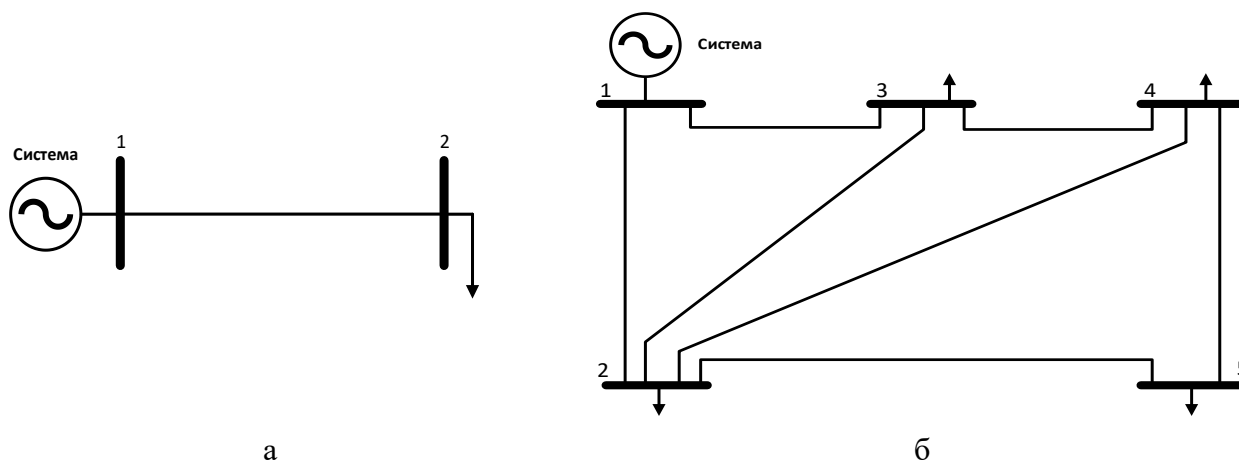


Рисунок 7 – Тестовые схемы:
а – 2-узловая тестовая схема; б – 5-узловая тестовая схема

В таблице 5 представлены результаты по уровню суммарных потерь мощности по обеим схемам при различных уровнях нагрузок. Из таблицы 5 видно, что для 2-узловой схемы учёт температурной зависимости активных сопротивлений имеет смысл во всех рассматриваемых режимах. Для 5-узловой схемы учёт температуры дает существенное уточнение потерь только в режимах № 3, 4.

Таблица 5 – Суммарные потери активной мощности

Схема	Режим	ΔP_{20} , МВт	ΔP_{Θ} , МВт	Δ , %
2-узловая	1	3,199	3,388	5,579
	2	4,135	4,619	10,479
	3	5,218	6,229	16,231
	4	6,459	8,384	22,960
5-узловая	1	4,69	4,553	-3,009
	2	7,75	7,805	0,705
	3	11,869	12,613	5,899
	4	14,409	15,866	9,183

позволяет существенно уточнить значения передаваемой мощности и сопротивления элементов сети. В 5-узловой схеме (таблица 7) влияние температурной зависимости сопротивлений на эти параметры режима выражено несколько слабее (как и на суммарные потери активной мощности). Это связано с тем, что 5-узловая сеть содержит большее число линий по сравнению с 2-узловой схемой. Эти линии не могут быть одинаково загружены, и поэтому влияние тепловых процессов в каждой линии на режим имеет разный и иногда противоположный характер, что приводит к осреднению результатов. Однако, если рассматривать влияние температуры на потери мощности в отдельных линиях 5-узловой схемы, то оно оказывается существенным во всех режимах (таблица 7). Максимальное увеличение потерь, обусловленное температурой, составило 20,962% (режим № 4, ветвь 1-3). Символом « Δ » в таблицах обозначено различие значений параметров, рассчитанных с учетом и без учета температуры. Параметры, рассчитанные без учета температуры (через сопротивления, приведенные к 20 °С), обозначены нижним индексом «20», а параметры, рассчитанные с учетом температуры - индексом « Θ ».

Таблица 6 – Результаты по ветвям 2-узловой тестовой схемы

Ветвь	№ режима	Переток активной мощности в начале ветви		Θ_{ij} , °С	Сопротивление ветвей			Потери активной мощности		
		P_{20} , МВт	P_{Θ} , МВт		R_{20} , Ом	R_{Θ} , Ом	Δ , %	ΔP_{20} , МВт	ΔP_{Θ} , МВт	Δ , %
1-2	1	63,199	63,388	34,473	9,18	9,675	5,116	3,199	3,388	5,579
	2	71,635	72,119	47,982		10,138	9,45	4,135	4,619	10,479
	3	80,218	81,229	65,18		10,727	14,422	5,218	6,229	16,231
	4	88,959	90,884	87,347		11,486	20,077	6,459	8,384	22,960

Таблица 7 – Результаты по ветвям 5-узловой тестовой схемы

№ режима	Ветвь	Переток активной мощности в начале ветви		$\Theta_{ij}, ^\circ\text{C}$	Сопротивление ветвей			Потери активной мощности		
		$P_{20}, \text{МВт}$	$P_{\Theta}, \text{МВт}$		$R_{20}, \text{Ом}$	$R_{\Theta}, \text{Ом}$	$\Delta, \%$	$\Delta P_{20}, \text{МВт}$	$\Delta P_{\Theta}, \text{МВт}$	$\Delta, \%$
1	1-2	48,559	48,483	5,438	8,26	7,811	-5,748	1,442	1,366	-5,564
	1-3	84,131	84,07	27,225	3,54	3,635	2,613	1,888	1,93	2,176
	2-3	-14,039	-14,014	2,331	7,08	6,613	-7,062	0,107	0,099	-8,081
	2-4	19,258	19,255	-0,916	4,72	4,352	-8,456	0,135	0,125	-8
	2-5	25,898	25,876	-0,57	7,67	7,082	-8,303	0,401	0,369	-8,672
	3-4	36,097	36,027	1,973	5,31	4,953	-7,208	0,524	0,487	-7,598
	4-5	22,696	22,671	-0,156	4,72	4,365	-8,133	0,193	0,178	-8,427
2	1-2	61,422	61,354	9,792	8,26	7,946	-3,952	2,384	2,31	-3,203
	1-3	106,328	106,451	45,511	3,54	3,877	8,692	3,115	3,4	8,382
	2-3	-17,623	-17,588	2,778	7,08	6,625	-6,868	0,177	0,164	-7,927
	2-4	24,15	24,151	-0,394	4,72	4,361	-8,232	0,222	0,206	-7,767
	2-5	32,511	32,481	0,483	7,67	7,112	-7,846	0,663	0,615	-7,805
	3-4	45,412	45,298	4,179	5,31	4,997	-6,264	0,866	0,812	-6,650
	4-5	28,474	28,431	0,637	4,72	4,379	-7,787	0,321	0,297	-8,081
3	1-2	74,687	74,733	15,969	8,26	8,136	-1,524	3,652	3,665	0,355
	1-3	129,182	129,88	72,025	3,54	4,227	16,253	4,759	5,688	16,333
	2-3	-21,25	-21,207	3,391	7,08	6,641	-6,610	0,273	0,254	-7,480
	2-4	29,085	-29,102	0,326	4,72	4,374	-7,910	0,34	0,32	-6,250
	2-5	39,2	39,173	1,948	7,67	7,154	-7,213	1,019	0,958	-6,367
	3-4	54,899	54,73	7,241	5,31	5,057	-5,003	1,329	1,265	-5,059
	4-5	34,315	34,248	1,741	4,72	4,399	-7,297	0,497	0,463	-7,343
4	1-2	81,501	81,693	20,003	8,26	8,26	0,000	4,434	4,56	2,763
	1-3	140,908	142,174	89,387	3,54	4,456	20,557	5,769	7,299	20,962
	2-3	-23,085	-23,038	3,778	7,08	6,652	-6,434	0,333	0,311	-7,074
	2-4	31,572	31,607	0,784	4,72	4,382	-7,713	0,412	0,392	-5,102
	2-5	42,58	42,564	2,886	7,67	7,18	-6,825	1,24	1,178	-5,263
	3-4	59,721	59,525	9,199	5,31	5,096	-4,199	1,616	1,557	-3,789
	4-5	37,265	37,184	2,449	4,72	4,411	-7,005	0,606	0,57	-6,316

В таблице 8 представлены результаты по уровню суммарных потерь мощности для других трёх тестовых схем. Для учёта температурной зависимости активных сопротивлений при расчёте УР был использован метод внутренней температурной коррекции, так как он показал наиболее удовлетворительную сходимость относительно совместного метода для замкнутых сетей. Для тестовых схем выбраны наиболее тяжёлые режимы из представленных.

Таблица 8 – Результаты расчёта УР в ЭЭС с учётом и без учёта влияния температуры

Схема	$N_{уз}$	$N_{ветв}$	$t_{эл}, ^\circ\text{C}$		$\Delta P(t_{эл}), \text{МВт}$		$\frac{\Delta P(t_{эл})}{\Delta P(t = \text{const})}$	$\frac{n_{ум}(t_{эл})}{n_{ум}(t = \text{const})}$
			ЛЭП	Тр-р	ЛЭП	Тр-р		
IEEE 14	14	20	40,86	89,52	7,368	-17,65	9,797/9,507	3/2
IEEE 30	30	41	65,83	63,91	15,315	-32,35	21,816/19,239	3/3
IEEE RTS 96	48	79	56,76	68,88	11,533	-13,33	60,13/56,493	4/4

Анализ результатов расчётов УР, приведённых в таблице 8, показывает, что учёт температурной зависимости активных сопротивлений позволяет уточнить значения потерь активной мощности как в линиях электропередачи, так и в трансформаторах.

В таблице 9 приведены перетоки активной мощности по ветвям, температуры проводов и трансформаторов, значения активного сопротивления с учётом температуры, а также потери активной мощности для IEEE 14 узлов. Обозначения приняты такие же, как и в таблице 7, в том числе и для трансформаторов. Параметры, рассчитанные без учета температуры (через сопротивления, приведенные к 20 °C и 75 °C), обозначены нижним индексом «20 (75)», а параметры, рассчитанные с учетом температуры, - индексом « Θ ».

По результатам таблицы 9 можно сделать вывод о том, что в тестовой схеме IEEE 14 наблюдается уточнение как потерь активной мощности, так и активного сопротивления в случае

Таблица 9 – Результаты по ветвям 14-узловой схемы*

Ветвь	Переток активной мощности в начале ветви				Θ _{ij} , °C				Сопротивление ветвей						Потери активной мощности					
	P ₂₀₍₇₅₎ , МВт		P _е , МВт						R ₂₀₍₇₅₎ , Ом		R _е , Ом		Δ, %		ΔP ₂₀₍₇₅₎ , МВт		ΔP _е , МВт		Δ, %	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II		
1-2	-137,431	-136,97	-137,43	-0,29	21,26	9,44	8,73	9,48	8,13	0,42	3,509	3,272	3,523	-7,243	0,4					
1-5	-87,558	-87,219	-87,534	-6,73	19,07	17,7	15,94	17,64	-11,04	-0,34	2,636	2,388	2,627	-10,36	-0,34					
2-3	-66,144	-66,039	-66,127	-8,42	18,5	14,16	12,66	14,08	-11,85	-0,57	1,282	1,128	1,273	-13,65	-0,71					
2-4	-59,579	-59,581	-59,573	-8,97	18,3	11,8	10,53	11,72	-12,06	-0,68	0,821	0,729	0,815	-12,62	-0,74					
2-5	-24,697	-24,686	-24,702	-10,54	17,74	10,62	9,41	10,53	-12,86	-0,85	0,128	0,113	0,127	-13,27	-0,79					
3-4	27,778	27,79	27,786	-10,3	17,84	8,26	7,33	8,19	-12,69	-0,85	0,183	0,152	0,181	-20,4	-1,11					
4-5	62,027	62,185	62,022	-8,8	18,36	7,08	6,32	7,04	-12,03	-0,57	0,536	0,477	0,533	-12,37	-0,56					
6-11	-7,489	-7,406	-7,491	-10,89	17,55	1,273	1,13	1,26	-12,65	-1,03	0,005	0,005	0,005	0	0					
6-12	-10,442	-10,423	-10,443	-10,71	17,61	2,386	2,11	2,37	-13,08	-0,68	0,021	0,018	0,021	-16,67	0					
6-13	-11,888	-11,863	-11,888	-10,61	17,65	2,386	2,11	2,37	-13,08	-0,68	0,027	0,024	0,027	-12,5	0					
7-8	-0,032	-0,023	-0,03	-10,79	17,58	1,591	1,41	1,58	-12,84	-0,70	0,01	0,01	0,01	0	0					
7-9	-20,926	-21,04	-20,941	-9,7	17,97	1,909	1,7	1,89	-12,29	-1,01	0,064	0,057	0,064	-12,28	0					
9-10	-4,974	-5,06	-4,973	-10,85	17,56	1,273	1,13	1,26	-12,65	-1,03	0,006	0,006	0,006	0	0					
9-14	-12,097	-12,153	-12,098	-10,52	17,67	2,386	2,11	2,37	-13,08	-0,68	0,031	0,028	0,031	-10,71	0					
10-11	3,978	3,896	3,98	-11,01	17,5	1,273	1,13	1,26	-12,65	-1,03	0,002	0,001	0,002	-100	0					
12-13	-4,33	-4,313	-4,331	-11	17,51	0,796	0,7	0,79	-13,71	-0,76	0,001	0,001	0,001	0	0					
13-14	-2,732	-2,689	-2,733	-11,04	17,5	3,182	2,81	3,15	-13,24	-1,02	0,002	0,002	0,002	0	0					
4-7	-20,953	-21,071	-20,96	-8,49	22,2	2,87	2,13	2,4	-34,74	-19,58	0,027	0,02	0,022	-35	-22,73					
4-9	-25,407	-25,469	-25,389	-3,94	27,31	2,87	2,17	2,45	-32,26	-17,14	0,045	0,034	0,038	-32,35	-18,42					
5-6	-41,018	-40,897	-41,012	32,82	68,47	2,87	2,49	2,81	-15,26	-2,14	0,170	0,149	0,166	-14,09	-2,41					

*В таблице: I и II – Случай 1 и Случай 2, соответственно

метода Ньютона, является уровень нагрузок. Для оценки сходимости разработанных алгоритмов

№ 1. В случае № 2, когда скорость ветра составляет 5 м/с наблюдается слабое влияние температурной зависимости активного сопротивления на потери активной мощности, сопротивление элементов сети, так как фактическая температура проводов ВЛЭП приблизительно равна температуре к которой приводятся сопротивления в паспортных данных. Как видно из таблицы 9 для трансформаторов наблюдается отрицательный знак погрешности. Данный факт объясняется тем, что активное сопротивление, приводимое к температуре 75 °С, соответствует номинальному току трансформатора. При этом трансформаторы редко бывают загружены на 100% номинального тока, обычно, не более 70-80%. Приведение активного сопротивления к температуре 75 °С справедливо только для масляных трансформаторов с естественным и принудительным охлаждением воздуха, в остальных же случаях необходимо руководствоваться требованиями ГОСТ 11677-85. Данные выводы соответствуют и другим тестовым схемам, рассмотренными автором.

Наибольшее влияние температурной зависимости активного сопротивления наблюдается в случаях отрицательной температуры окружающей среды, малых уровнях солнечной радиации, а также положительной температуры окружающей среды и значительных уровнях солнечной радиации. В случаях, когда фактическая температура провода близка к паспортному значению учёт влияния температурной зависимости на активное сопротивление можно пренебречь, т.к. значения уточнения потерь активной мощности будут лежать в пределах погрешности.

Сходимость при вариации нагрузок. Одним из основных факторов, влияющих на сходимость

были построены зависимости нормы матрицы небалансов от номера итерации для режима № 1 (рисунок 8) и режима № 4 (рисунок 9). Режим № 1 соответствует уровню малых нагрузок (фактическая температура элемента сети значительно ниже длительно-допустимой). Режим № 4 соответствует уровню больших нагрузок (фактическая температура по крайней мере в некоторых элементах сети близка к длительно-допустимой).

Как видно из рисунков 8а и 9а, метод совместного решения уравнений электрического и теплового режимов в 2-узловой схеме сходится практически так же, как классический метод, не учитывающий температуру. В то же время, метод внутренней температурной коррекции сходится за большее число итераций, чем два других метода.

Для 5-узловой схемы (рисунки 8б и 9б) закономерность меняется: метод внутренней температурной коррекции сходится значительно лучше, чем совместный метод. Возможно, это связано с наличием замкнутых контуров в 5-узловой схеме, однако данный вопрос требует дополнительной теоретической проработки.

Как и следовало ожидать, при увеличении нагрузок число итераций во всех методах несколько увеличивается. Однако сходимость остается достаточно быстрой.

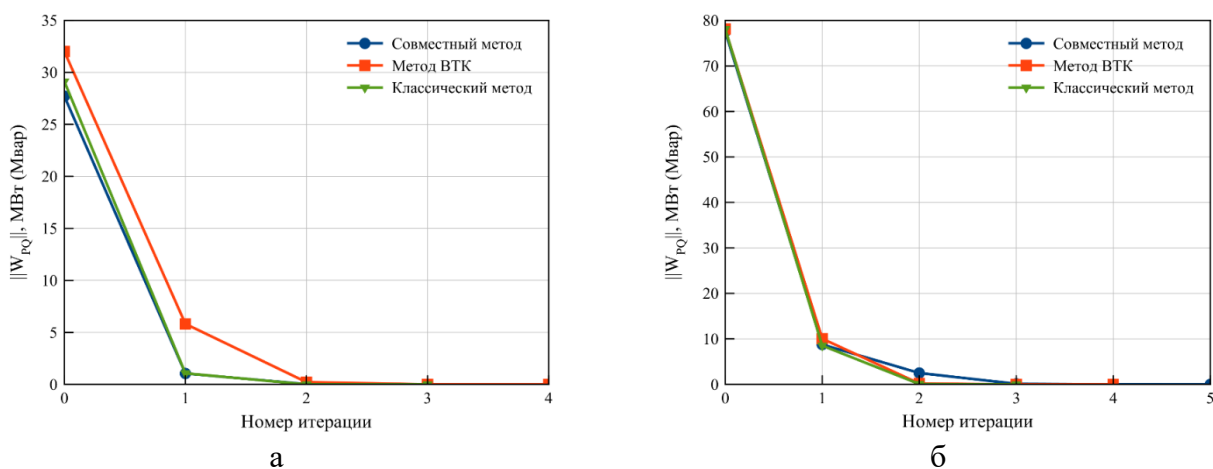


Рисунок 8 – Сходимость совместного метода, метода внутренней температурной коррекции, классического метода для Режимы № 1 – 2-узловая схема:

а – 2-узловая схема

б – 5-узловая схема

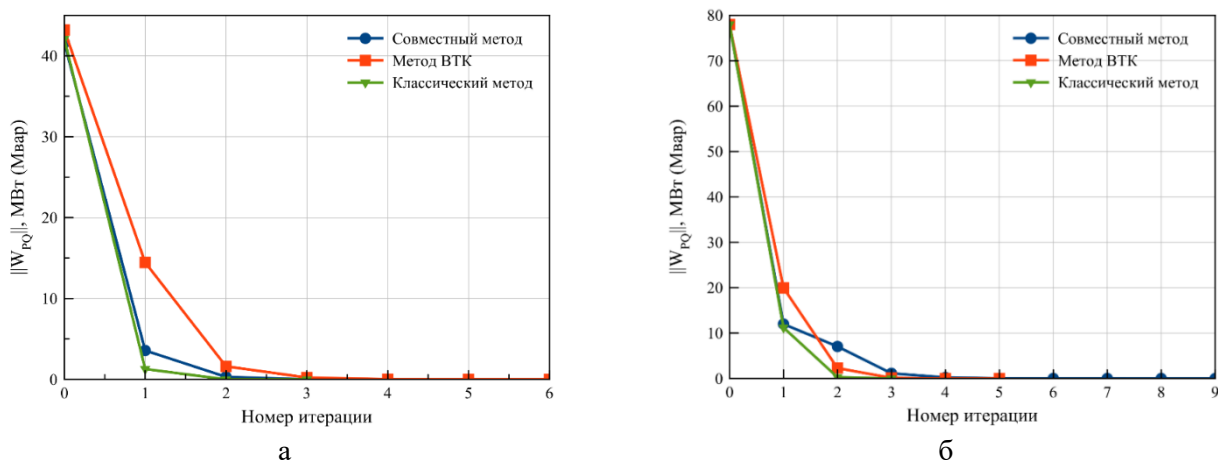


Рисунок 9 – Сходимость совместного метода, метода внутренней температурной коррекции, классического метода – Режим № 4:

а – 2-узловая схема

б – 5-узловая схема

Сходимость при вариации длины линий. Другим фактором, влияющим на сходимость, являются сопротивления сети, которые зависят главным образом от длины линий. Для анализа сходимости итерационного процесса при вариации длины линии воспользуемся 2-узловой

схемой. Погонные параметры линии и условия окружающей среды остаются прежними. Мощности нагрузок соответствуют режиму №2. Использованы два способа задания нагрузок:

1) Постоянными мощностями $P = const$, $Q = const$.

2) Статическими характеристиками по напряжению (СХН) $P(U)$, $Q(U)$, аппроксимированными квадратичными полиномами.

Коэффициенты СХН приняты согласно известным значениям. Но обычно коэффициенты СХН необходимо определять путём активного эксперимента, так как распространённые в настоящее время коэффициенты были определены уже достаточно давно и не учитывают реальный состав электроприёмников. Результаты расчетов при варьировании длины линии приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Напряжение нагрузки, температура провода и число итераций для 2-узловой схемы при вариации длины линии

L, км	$P = const; Q = const$				$P(U); Q(U)$				
	U, кВ	Θ , °C	Число итераций		U, кВ	Θ , °C	Число итераций		
			ВТК	Совместный метод			ВТК	Совместный метод	
30	110,048	47,982	4	3	110,045	48,015	6	4	
35	108,114	50,128	5	4	108,264	48,804	6	5	
40	106,065	52,562	5	4	106,424	49,735	6	5	
45	103,876	55,363	5	4	104,512	50,838	6	5	
50	101,514	58,643	5	4	102,507	52,156	6	5	
55	98,931	62,572	6	4	100,385	53,753	6	5	
60	96,048	67,435	6	4	98,11	55,722	7	5	
65	92,728	73,761	7	5	95,627	58,219	7	5	
70	88,677	82,733	8	5	92,841	61,523	6	5	
75	82,948	98,402	11	6	89,565	66,226	7	5	
78	-	-	Метод разошёлся	280	Найдено постороннее решение	87,192	70,3	7	5
80				43		85,302	74,019	9	6
82				150		82,944	79,358	11	7
84				78		79,238	89,669	20	11
85				26		-	-	Метод разошёлся	

Чем больше длина линии при заданной мощности нагрузок, тем ближе режим к пределу по статической устойчивости. При этом сходимость обоих методов закономерно замедляется, а при определенной длине итерационные процессы начинают расходиться (для совместного метода вместо обычной расходимости, при задании нагрузок постоянной мощностью, имеет место сходимость к постороннему решению, не имеющему физического смысла). Если нагрузки заданы статическими характеристиками, то итерационные процессы сходятся до больших длин линии по сравнению с постоянными мощностями. Это объясняется тем, что статические характеристики учитывают снижение мощности нагрузки при уменьшении напряжения, что замедляет приближение к пределу по статической устойчивости.

Необходимо заметить, что расходимость или сходимость к постороннему решению наблюдается только в тех случаях, когда напряжение в конце линии выходит за технические допустимые пределы. Если параметры режима находятся в допустимых пределах, оба метода устойчиво сходятся.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведён обзор современных российских и зарубежных стандартов и методик определения фактической температуры проводов воздушных линий электропередачи. Произведена оценка влияния квадратичного коэффициента температурной зависимости на активное сопротивление провода воздушной линии электропередачи. Установлено, что влияние квадратичного коэффициента на активное сопротивление составляет не более 2,009%, в отличие от случая, когда этот коэффициент не учитывается.

2. На основе литературного обзора было определено, что расчёт длительно-допустимого тока обычно производится при наихудших условиях охлаждения провода ВЛЭП. Современные исследования, проводимые отечественными и зарубежными авторами, показывают высокую степень проработанности в теме создания математических моделей тепловых режимов воздушных линий электропередачи, выполненных как неизолированными, так и изолированными проводами. Однако, степень проработанности темы внедрения тепловых моделей элементов электрической сети при расчёте потокораспределения остаётся достаточно низкой.

3. Использование прямых и численных методов решения уравнения теплового баланса воздушных линий электропередачи, с достаточной для практических расчётов точностью, может быть применено в качестве способа определения фактической температуры провода при расчёте установившихся режимов ЭЭС. Абсолютная погрешность определения температуры прямым и упрощёнными численными методами в сравнении с методом конечных элементов, заложенном в программном продукте Ansys, не превышает 0,0003 °C.

4. Разработана упрощённая математическая модель для расчёта средней температуры обмоток трансформатора в установившемся тепловом режиме. Погрешность определения средней температуры обмоток трансформатора по представленной методике составляет не более 3,08 °C и 0,967 °C, относительно методик, изложенных в ГОСТ 14209-85 и IEEE Std. C57.12.97-2011, соответственно. Достоинством представленной методики, относительно методики, изложенной в ГОСТ 14208-85, является малый объём исходных данных, а также возможность рассчитать среднюю температуру обмотки трансформатора без применения дополнительных расчётов.

5. Разработана математическая модель стационарного режима электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений линий электропередачи и силовых трансформаторов.

6. Разработан алгоритм расчёта установившегося режима разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения с учётом температурной зависимости активных сопротивлений.

7. Проверка алгоритма, реализующего метод расчёта УР разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения с учётом температурной зависимости активных сопротивлений, показала, что в технически допустимых режимах разработанный алгоритм обладает достаточно хорошей сходимостью. Основное преимущество метода расчёта УР для сетей среднего напряжения с учётом температурной зависимости активных сопротивлений заключается в том, что он обладает как минимум двукратным быстродействием относительно классического метода Ньютона и примерно трёхкратным быстродействием относительно метода ВТК.

8. Разработан алгоритм расчёта установившегося режима электрической сети произвольной конфигурации, реализующий метод совместного решения уравнений электрического и теплового режимов, названный совместным методом.

9. Разработан алгоритм расчёта установившегося режима электрической сети произвольной конфигурации, реализующий метод внутренней температурной коррекции. Данный метод основан на линеаризации уравнений режима с допущением, что активные сопротивления – это постоянные величины. Величина активных сопротивлений на каждой итерации корректируется с учетом температуры элементов.

10. Проверка алгоритмов, реализующих метод ВТК и совместный метод, показала, что в технически допустимых режимах разработанные алгоритмы обладают достаточно хорошей сходимостью. Следует учитывать, что каждая итерация совместного метода включает в себя большее число вычислительных операций, чем в методе ВТК. Для совместного метода в ряде случаев наблюдалась сходимость к постороннему решению, не имеющему физического смысла.

11. Были предложены два способа практической реализации усовершенствованных методов расчёта УР с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. Предлагаемые способы основаны на применении современных средств мониторинга фактической температуры элементов или на использовании данных с ближайших метеостанций и геоинформационной системы электросетевых предприятий.

12. Результаты расчётов УР, выполненные на примере тестовых схем различной размерности, классов напряжения и конфигураций, показали уточнение уровней напряжения,

значений токов и потерь активной мощности в рассматриваемых схемах при использовании усовершенствованных методов расчёта УР. Степень уточнения режимных параметров зависит от сочетания режимных и климатических факторов, и наиболее значительное уточнение наблюдается при расчёте потерь активной мощности. В дальнейшем возможно развитие принятой в диссертационной работе идеологии для расчёта апериодической статической устойчивости с учётом температурной зависимости активных сопротивлений, в том числе, и для поиска опасных сечений в энергосистемах.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1. **Шепелев, А.О.** Разработка алгоритма и метода расчёта режима разомкнутой электрической сети напряжением 6-35 кВ с учётом температурной зависимости активных сопротивлений / А.О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Известия Транссиба. – 2020. – № 2. – С. 103-114.
2. **Шепелев, А.О.** Применение метода внутренней температурной коррекции для расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом тепловых процессов в элементах / А.О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2020. – № 9. – С. 9–19.
3. **Шепелев, А.О.** Разработка усовершенствованных методов расчёта установившихся режимов электроэнергетических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений ВЛ / С.С. Гиршин, А.О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Электрические станции. – 2019. – № 11. – С. 44–54. **Версия:** Development of Improved Methods for Calculating Steady States of Power Systems Taking Into Account the Temperature Dependence of the Resistances of the Overhead Transmission Lines / S.S. Girshin, A.O. Shepelev. – DOI: 10.1007/s10749-020-01196-w. – Текст : электронный // Power Technology and Engineering. – 2020. – № 7. pp. 42-46. (Перевод из журнала Электрические станции. – Москва. – 2019. – № 11. – С. 44-54.). (индексирована в Scopus)
4. **Шепелев, А.О.** Математическое моделирование электрического режима замкнутой питающей сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений. – Текст : непосредственный / А.О. Шепелев, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, О.А. Сидоров, К.В. Хацевский, Е.Ю. Шепелева // Омский научный вестник. – 2018. – № 4 (160). – С. 103–109.
5. **Шепелев, А.О.** Разработка алгоритма расчета потерь мощности в воздушных линиях электропередачи распределительных сетей с учетом режимных и климатических факторов. – Текст : непосредственный / А.О. Шепелев, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, Е.А. Кузнецов, Е.В. Петрова, В.О. Кропотин // Омский научный вестник. – 2017. – № 3 (153). – С. 78–81.

Публикации в журналах, входящих в библиографическую базу Scopus

6. **Shepelev, A.O.** Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature / A.O. Shepelev, S.S. Girshin, O.V. Kropotin, V.M. Trotsenko, V.N. Goryunov, E.V. Petrova. – DOI: 10.15199/48.2019.07.10. – Текст : непосредственный // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – Vol. 95, Is. 7. – P. 42-46.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Web of Science

7. **Shepelev, A.O.** Consideration of Active Resistances Temperature Dependency of Power Transformers When Calculating Power Losses in Grids / A.O. Shepelev, E.V. Petrova, O.A. Sidorov. – DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481. – Текст : электронный // 2018 4th International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Moscow, 2018, P. 7555481-1–7555481-5.

Другие работы автора, индексируемые в РИНЦ

8. **Шепелев, А.О.** Практические способы реализации методов расчёта установившихся режимов электрических систем с учётом температурной зависимости активных сопротивлений /

А.О. Шепелев, С.С. Гиршин, В.А. Ткаченко, Р.А. Северинов. – Текст : электронный // Учёные Омска – региону: материалы V Регион. науч.-техн. конф. – Омск: ОмГТУ, 2020. – С. 119–123.

9. **Шепелев, А.О.** Анализ сходимости численных методов расчёта установившихся режимов с учётом температурной зависимости активных сопротивлений / А.О. Шепелев. – Текст : непосредственный // Проблемы электроэнергетики и телекоммуникаций Севера России: материалы I Всероссийской с международным участием научно-практической конференции. – Сургут: СурГУ. 2020. – С. 153–160.

10. **Шепелев, А.О.** Сравнение алгоритмов расчёта установившихся режимов с учётом температурной зависимости активных сопротивлений для разомкнутой электрической сети среднего класса напряжения / А.О. Шепелев, В.А. Ткаченко, А.Я. Бигун. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Омск: ОмГТУ, 2020. – С. 16–22.

11. **Шепелев, А.О.** Расчет режима электрической сети с учётом температурной зависимости активных сопротивлений / А.О. Шепелев, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, А.Я. Бигун, Е.Ю. Шепелева. – Текст : непосредственный // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всеросс. науч.-практ. конф. с межд. участием. – Омск: ОмГТУ, 2018. – С. 211–215.

12. **Шепелев, А.О.** Внедрение теплового расчета линий электропередачи в оптимизацию электрических сетей / А.О. Шепелев, Е.А. Кузнецов, С.С. Гиршин, В.Н. Горюнов, Е.В. Петрова, А.Я. Бигун. – Текст : непосредственный // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2017. – № 1. – С. 129–133.

Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ

13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020610724 Российская Федерация. Энергосеть ВН. Расчёт и анализ установившихся режимов электроэнергетических систем : № 2019667460 : заявлено 25.12.2019 : опубликовано (зарегистрировано) 17.01.2020 / **А.О. Шепелев**, В.А. Ткаченко ; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019616964 Российская Федерация. «Тепловой расчет изолированного провода» : № 2019615716 : заявлено 20.05.2019 : опубликовано (зарегистрировано) 03.06.2019 / С.С. Гиршин, В.А. Ткаченко, Е.В. Петрова, **А.О. Шепелев** ; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019615297 Российская Федерация. «Энергосеть СН» : № 2019614258 : заявлено 15.04.2019 : опубликовано (зарегистрировано) 23.04.2019 / **А.О. Шепелев**, В.А. Ткаченко, С.С. Гиршин, А.Я. Бигун ; заявитель ОмГТУ. – 1 с. – Текст : непосредственный.

Печатается в авторской редакции
Подписано в печать 24.02.2021 г. Формат 60х84/16.
Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1.5.
Тираж 100 экз. Заказ №14

Типография: 644050, Омск-50, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08.
Омский государственный технический университет,
отдел научной информации