

На правах рукописи



Попова Екатерина Валерьевна

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА
ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С
УЧЕТОМ ТЕКУЩЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВОЗДУШНЫХ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск-2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Войтов Олег Николаевич

Официальные оппоненты: **Савина Наталья Викторовна,**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Амурский государственный университет», проректор по учебной работе

Лыкин Анатолий Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра «Автоматизированные электроэнергетические системы», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «19» сентября 2017 г. в 13:30 часов на заседании диссертационного совета Д 003.017.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: **664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к. 355.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИСЭМ СО РАН по адресу: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, к.407 и на сайте <http://isem.irk.ru/dissert/case/DIS-2017-6/>.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписью составителя, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан

2017 г.

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



Клер Александр Матвеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современных условиях функционирования электроэнергетических систем (ЭЭС) появляются новые информационные возможности для повышения точности математического описания элементов электрической сети. Накопленный методический материал, который не мог быть ранее реализован в полной мере из-за ограниченных возможностей вычислительной и измерительной техники, может служить основой для совершенствования методов расчета и моделей элементов электрической сети.

Одним из направлений уточнения моделей элементов сети является учет влияния изменчивости внешней среды на параметры элементов и, как следствие, параметры режима ЭЭС. Применительно к электрическим и механическим параметрам воздушных линий (ВЛ) значительную чувствительность к изменению температуры провода имеют его активное сопротивление и стрела провеса.

Температура провода в свою очередь зависит от параметров окружающей среды, таких как направление ветра, влажность, давление, температура воздуха, мощность солнечной радиации, а также от режима работы ВЛ, характеризующегося напряжением и током. Зависимость температуры провода от параметров внешней среды может быть представлена в виде уравнения теплового баланса провода. Коэффициенты такого уравнения для различных климатических условий и параметров внешней среды впервые были получены Бургсдорфом В.В.

Современные программные средства расчета потокораспределения в ЭЭС, в основе которых лежат уравнения баланса узловых токов и мощностей, не включают в себя уравнений тепловых балансов проводов ВЛ, что приводит к невозможности учета их температурного режима и к погрешности определения параметров режима ЭЭС из-за несоответствия активных сопротивлений проводов их температуре.

Сказанное определяет **научную актуальность** проблемы, заключающуюся в получении достоверных оценок активных сопротивлений и стрел провеса проводов в зависимости от их температуры.

Степень разработанности темы исследования.

Результаты расчета потокораспределения являются основой планирования и управления режимами ЭЭС. Заметный вклад в развитие методов и алгоритмов расчета потокораспределения в ЭЭС внесли отечественные и зарубежные ученые, такие как: Аюев Б.И., Бартоломей П.И., Веников В.А., Волобринский С.Д., Воропай Н.И., Гамм А.З., Давыдов В.В., Ерохин П.М., Железко Ю.С., Идельчик В.И., Караев Р.И., Крумм Л.А., Крюков А.В., Манусов В.З., Мельников Н.А., Паздерин А.В., Фишов А.Г., Bose A., Crocch P.E., Chen H., Cheng C.S., El-Hawary M.E., Exposito A.G., Garcia A., Hubbi W., Jarriel L., Monticelli A., Nagendra Rao P.S., Nandra J., Oberbye T.J., Pracasa Rao K.S., Rajcic D., Ramos E.R., Rofsum A., Robert A.M., Semlyen A., Saverdra O. R., Shirmohammadi D., Tate J.E., Tyalovsky D.J., Wang L.

Основы современной теории и методов расчета температурных режимов и предельных токовых нагрузок проводов ВЛ были разработаны в 20-30-е годы

20-го века Бургсдорфом В.В., Равдоником В.С., Мак-Адамсом В.Г., Frick С.W., Schurig O.R. и др.

Применительно к расчету потокораспределения методы, позволяющие учесть множество ранее не учитываемых природных факторов и тем самым повысить точность определения температуры, активного сопротивления и стрелы провеса проводов ВЛ, получили дальнейшее развитие в работах Бартоломея П.И., Бердина А.С., Воротницкого В.Э., Герасименко А.А., Гиршина С.С., Железко Ю.С., Жаркова Ю.И., Зарудского Г.К., Зиннер Л.Э., Левченко И.И., Лордкипанидзе В.Д., Мерзлякова А.С., Назарова И.А., Никифорова Е.П., Никитиной Л.Г., Петровой Т.Е., Сацук Е.И., Сыромятникова С.Ю., Тимашовой Л.В., Файбисович В.А., Фигурнова Е.П., Черемисина Н.М., Черкашиной В.В., Daniel J. Tylavsky, Di Shi, Korba P., Kristian M., Larsson M., Lovrencic V., Polak M., Peulic S., Rodriguer A., Tomazic R., Xiaomeing Bian, Yinger R.L., Zamora-Cardenas A., Zima M. и других ученых.

Тем не менее, единственными в России, программно реализованными алгоритмами расчета потокораспределения в сетях 6-110 кВ, учитывающими температурный режим проводов, являются алгоритмы, предложенные Герасименко А.А. Для их использования в сетях более высоких классов напряжений требуется учет дополнительных факторов, исследуемых в представляемой работе.

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.

Цель диссертационной работы заключается в усовершенствовании существующих алгоритмов расчета установившихся режимов ЭЭС, включением в них алгоритмов определения электрических и механических параметров проводов ВЛ с учетом их температуры. Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать, реализовать и протестировать усовершенствованный алгоритм определения температуры и активного сопротивления неизолированных стандартных проводов ВЛ, позволяющий определить коэффициенты квадратичной аппроксимации решений уравнения теплового баланса провода с использованием метода наименьших квадратов.

2. Разработать, реализовать и протестировать усовершенствованный алгоритм определения температуры и активного сопротивления проводов ВЛ на основе аналитического решения уравнения теплового баланса провода.

3. Разработать, реализовать и протестировать усовершенствованный алгоритм определения стрелы провеса и длины проводов в пролетах ВЛ на основе аналитического решения уравнения состояния провода.

4. Разработать, реализовать и протестировать усовершенствованные

алгоритмы расчетов потокораспределения в ЭЭС, включающие решение уравнений теплового баланса и состояния провода, численными и аналитическими методами.

5. Обосновать преимущества использования предложенных автором алгоритмов учета температуры провода при расчете потокораспределения в ЭЭС.

Объектом исследования: является электрическая сеть, работающая при различных условиях окружающей среды.

Предмет исследования: температура провода и природные факторы, оказывающие существенное влияние на активное сопротивление и стрелу провеса провода.

Методы исследования: современные методы расчета установившихся режимов ЭЭС, численные методы линейной алгебры и вычислительной математики, методы нелинейного программирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основе метода наименьших квадратов (МНК) разработан усовершенствованный алгоритм, в котором, в отличие от других известных алгоритмов определения температуры и активного сопротивления проводов ВЛ, используется два вида расширенной квадратичной аппроксимации решений уравнения теплового баланса провода, включающих зависимость параметров проводов от текущих значений тока (падения напряжения) в них и параметров окружающей среды, таких как температура воздуха, солнечная радиация, скорость и направление ветра.

2. Разработан усовершенствованный алгоритм решения уравнения теплового баланса провода ВЛ, учитывающего зависимость температуры провода от тока или падения напряжения в проводе, а также от параметров окружающей среды с учетом текущего значения атмосферного давления воздуха. Уравнение теплового баланса решается либо с использованием формул Кардано, либо итерационно методом Ньютона.

3. Разработан усовершенствованный алгоритм определения механических параметров проводов ВЛ, включающих стрелу провеса и длину проводов в пролетах, в котором температура провода определяется из уравнения теплового баланса. Для расчета механических параметров впервые используется аналитическое решение уравнения состояния провода.

4. Разработано четыре алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС на основе решения: системы уравнений состояния, системы уравнений баланса узловых токов, системы уравнений узловых мощностей с учетом и без учета ограничений-неравенств на переменные режима. Алгоритмы включают определение электрических и механических параметров проводов ВЛ из решения уравнений теплового баланса и состояния провода ВЛ.

Теоретическая и практическая значимость усовершенствованных алгоритмов расчета потокораспределения.

1. Предлагаемые алгоритмы расчета потокораспределения в ЭЭС позволяют повысить эффективность проектирования и диспетчерского управления энергосистемами. В работе показано, что при учете температуры

провода его активное сопротивление может измениться на 20,5%, стрела провеса проводов в пролетах – на 34,5%, а суммарные потери активной мощности в ЭЭС – на 35,3%.

2. Предложенные алгоритмы расчета потокораспределения в ЭЭС отличаются способами решения уравнений теплового баланса и состояния провода ВЛ, а также целесообразностью их использования в электрических сетях разного назначения.

2.1. В алгоритме решения системы уравнений состояния используется явная зависимость температуры проводов ВЛ от токов и параметров окружающей среды. Такая зависимость представлена либо уравнением теплового баланса провода четвертой степени, либо его квадратичной аппроксимацией. Алгоритм эффективен при расчетах установившихся режимов в распределительных сетях, содержащих одну ступень напряжения.

2.2. В алгоритмах, основанных на решении систем уравнений баланса узловых токов и мощностей, используется зависимость температуры проводов от падения напряжения в них и от параметров окружающей среды. Такая зависимость представлена либо уравнением теплового баланса провода шестой степени, либо квадратичной аппроксимацией этого уравнения четвертой степени. Алгоритмы эффективны при расчетах потокораспределения установившихся режимов ЭЭС при любом числе ступеней напряжения.

2.3. В алгоритме расчета допустимого режима в ЭЭС впервые в практике расчетов предлагается включать дополнительное ограничение-неравенство на стрелу провеса провода в пролете ВЛ. Стрела провеса определяется из уравнения состояния провода, решаемого аналитически.

3. Автор надеется, что предложенные алгоритмы будут полезны для обучения студентов ВУЗов электроэнергетических специальностей, а также для аспирантов и научных работников.

Достоверность результатов научных исследований, представленных в диссертации, проверена и подтверждается расчетами, выполненными для отдельных ВЛ, тестовых и реальных электрических сетей. Результаты расчетов параметров ВЛ, полученные с использованием предложенных в работе алгоритмов решения уравнений теплового баланса и состояния провода, сопоставимы с результатами, приведенными в работах других авторов. Результаты расчетов потокораспределения в ЭЭС, полученные по разработанной автором исследовательской MATLAB-программе, подтверждаются результатами расчетов, проведенных с использованием лицензированного программного средства СДО-7, имеющего промышленное внедрение в ряде энергосистем России.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритмы решения уравнений теплового баланса и состояния провода ВЛ.

2. Усовершенствованные алгоритмы расчета потокораспределения в ЭЭС, включающие уравнения теплового баланса и состояния провода.

Реализация результатов работы. Предложенные в работе алгоритмы реализованы в программном средстве СДО-7 и используются при выполнении

Программы фундаментальных исследований СО РАН III.17.4 «Теоретические основы создания интегрированных интеллектуальных энергетических систем и управления ими».

Материалы диссертации включены в программу учебного процесса базовой кафедры при ИСЭМ СО РАН "Электроэнергетические системы" и кафедры "Электрические станции, сети и системы" Института энергетики ИрННТУ.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на международных и региональных семинарах и конференциях: десятом научно-практическом семинаре «Современные программные средства для расчетов нормальных и аварийных режимов, анализа надежности, оценивания состояния, проектирования и автоматизации оперативно-диспетчерского управления электроэнергетических систем» (Иркутск, ИДУЭС, 2010г.), Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики» (Иркутск, 2011г.), Международном научном семинаре им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения» (Ивановская область, Решма, 2011г.), III Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Екатеринбург, 2012г.), Всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление» (Иркутск, 2015г.).

Личный вклад автора. Лично автором выполнены алгебраические преобразования уравнений теплового баланса и состояния провода, получены квадратичные аппроксимации решений уравнения теплового баланса и выражения для производных от активного сопротивления провода по переменным состояниям, выполнена в среде MATLAB программная реализация усовершенствованного алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС, основанного на решении системы уравнений баланса узловых токов.

Постановка задач, анализ результатов исследований, а также расчетная и программная реализация в программе СДО-7 усовершенствованного алгоритма расчета потокораспределения, основанного на решении системы уравнений баланса узловых мощностей, осуществлялись совместно с научным руководителем.

Публикации. По диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК, 4 статьи включены в материалы международных конференций и семинаров.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, трех основных глав, заключения, списка литературы, содержащего 108 наименований, и 3 приложений. Материал изложен на 124 страницах основного текста и 30 страницах приложений. В работе приведены 14 рисунков и 20 таблиц, в том числе 1 таблица включена в приложение П1.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность задачи расчета потокораспределения с учетом уравнений теплового баланса проводов ВЛ, определена цель работы, задачи исследования, научная новизна предлагаемых подходов и их практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Дается краткая характеристика существующих методов учета температуры провода при расчете потокораспределения ЭЭС и приводится краткая характеристика основных разделов диссертации.

В первой главе работы выполнен обзор существующих методов и алгоритмов определения электрических и механических параметров проводов ВЛ – активного сопротивления, температуры и стрелы провеса. Для определения электрических параметров используется уравнение теплового баланса провода, а для механических параметров – уравнение состояния провода.

Отмечено, что все существующие методы определения электрических и механических параметров можно условно разделить на три большие группы: теоретические, экспериментальные и методы косвенных измерений. Теоретические методы определения параметров проводов предполагают решение уравнений состояния и теплового баланса провода; в экспериментальных методах выполняется непосредственное измерение температуры проводов в местах установки датчиков и определение стрелы провеса проводов в контрольных точках контролируемых пролетов ВЛ; в методах косвенных измерений параметры проводов определяются на основе векторных измерений токов и напряжений по концам ВЛ.

В работе параметры проводов ВЛ определяются в соответствии с положениями действующих нормативных документов, в основе которых лежит уравнение теплового баланса, поэтому в обзоре литературы особое внимание уделяется вопросу определения этих коэффициентов, для расчета которых существует множество экспериментальных методов и аналитических выражений. Так, например, интенсивность солнечного излучения учитывается как значением мощности солнечной радиации, определенной на основе статистических данных метеостанций, так и значением температуры дополнительного нагрева проводов, определенной из эмпирических выражений с использованием измерений, выполненных для различных периодов года и суток. Коэффициент теплоотдачи конвекцией определяется с учетом нормальных, или текущих значений температуры и атмосферного давления воздуха.

Во второй главе работы рассматривается три алгоритма определения электрических и механических параметров проводов ВЛ – температуры, активного сопротивления, стрелы провеса и длины проводов в пролетах, получаемых из решения уравнений состояния и теплового баланса провода и применяемых в усовершенствованных алгоритмах расчета потокораспределения ЭЭС.

Первый алгоритм определения температуры и активного сопротивления проводов ВЛ предполагает использование квадратичной аппроксимации

решений уравнения теплового баланса провода. Квадратичная аппроксимация характеризует зависимость температуры провода T_{np} от параметров провода и окружающей среды $T_{np} = f(I, T_g, Q_r, v)$: тока провода I , температуры воздуха, изменяющейся в интервале значений $T_g = [-40 \div 50]^0 C$, мощности солнечной радиации Q_r , скорости v и направления ветра.

Квадратичная аппроксимация зависимости $T_{np} = f(I, T_g, Q_r, v)$ имеет следующий вид:

$$T_{np} = a + b \cdot I + c \cdot I^2 + d \cdot T_g + e \cdot T_g^2 + m \cdot Q_r + n \cdot Q_r^2 + k \cdot (I \cdot T_g) + p \cdot (I \cdot Q_r) + h \cdot (T_g \cdot Q_r), \quad (1)$$

где $a, b, c, d, e, m, n, k, p, h$ – коэффициенты аппроксимации определяются МНК.

Значение T_{np} определяется подстановкой в выражение (1) значений параметров провода и окружающей среды.

Удельное активное сопротивление провода с учетом его температуры определяется из выражения

$$r_{0(T_{np})} = r_{0(20)} \cdot [1 + \alpha_T \cdot (T_{np} - 20)], \quad (2)$$

где $\alpha_T, r_{0(20)}$ – температурный коэффициент сопротивления провода и его удельное активное сопротивление при температуре $T_{np} = 20^0 C$.

Мощность солнечной радиации в (1) определяется как $Q_r = 60 \cdot q \cdot d_{np}$, где d_{np} – диаметр провода в см, $q = [0; 0,07] Bm / cm^2$ – удельное значение мощности солнечной радиации для зимнего и летнего периодов года.

Автором разработана исследовательская MATLAB-программа определения коэффициентов квадратичной аппроксимации. Расчеты, выполненные с помощью этой программы для 69-ти проводов различных марок, позволили сделать следующие выводы:

- при использовании аппроксимации при скорости ветра $v \leq 1,2 м/с$ относительная погрешность определения удельного активного сопротивления проводов $\delta r_{0(T_{np})}$ не превышает $(0,52 \div 0,6)\%$;
- коэффициенты аппроксимации могут быть рекомендованы в качестве дополнительного параметра неизолированных проводов ВЛ, указываемого в нормативной документации;
- коэффициенты аппроксимации могут быть использованы в любом алгоритме расчета потокораспределения ЭЭС;
- относительная погрешность $\delta r_{0(T_{np})}$ при $v > 1,2 м/с$ превышает 3%, что свидетельствует о необходимости уточнения аппроксимации, например, использованием методов кусочно-полиномиальной аппроксимации.

Второй алгоритм определения температуры и активного сопротивления проводов ВЛ заключается в аналитическом решении преобразованного «традиционного» квадратичного уравнения теплового баланса провода в форме

трансцендентного и алгебраического уравнений четвертой степени, полученных соответственно для скоростей ветра $v \leq 1,2 \text{ м/с}$ и $v > 1,2 \text{ м/с}$.

Преобразованное уравнение характеризует зависимость разницы температур провода и воздуха от тока в проводе и параметров окружающей среды $\Delta T = T_{np} - T_g = f(I, T_g, P_g, Q_r, v)$ с учетом текущего значения атмосферного давления воздуха, которое может отличаться от нормального значения 760 мм.рт.ст.

В развернутом виде при направлении ветра перпендикулярно проводу и скоростях ветра $v \leq 1,2 \text{ м/с}$ и $v > 1,2 \text{ м/с}$ трансцендентное и алгебраическое уравнения могут быть представлены как

$$0 = \Delta T^4 + 3 \cdot b \cdot \Delta T^3 + 3 \cdot b^2 \cdot \Delta T^2 + \left(g_1 - \frac{r_{0(20)} \cdot I^2 \cdot \alpha_T}{a} \right) \cdot \Delta T - \left(\frac{60 \cdot q \cdot d_{np}}{a} + \frac{r_{0(20)} \cdot \alpha_T \cdot c \cdot I^2}{a} \right); \quad (3)$$

$$0 = \Delta T^4 + 3 \cdot b \cdot \Delta T^3 + 3 \cdot b^2 \cdot \Delta T^2 + m \cdot \Delta T^{1,3} + \left(b^3 - \frac{r_{0(20)} \cdot I^2 \cdot \alpha_T}{a} \right) \cdot \Delta T - \left(\frac{60 \cdot q \cdot d_{np}}{a} + \frac{r_{0(20)} \cdot \alpha_T \cdot c \cdot I^2}{a} \right). \quad (4)$$

При направлении ветра вдоль провода и его скорости $v > 1,2 \text{ м/с}$ в выражении (3) коэффициент g_1 заменяется на g_2 :

$$g_1 = b^3 + \frac{0,661 \cdot \sqrt{P_g/T_g} \cdot \sqrt{v \cdot d_{np}}}{a}; \quad g_2 = b^3 + \frac{0,33 \cdot \sqrt{P_g/T_g} \cdot \sqrt{v \cdot d_{np}}}{a}.$$

Остальные коэффициенты в (3), (4) определяются как: $a = 0,543 \cdot 10^{-9} \cdot d_{np}$;

$$b = 2 \cdot T_g + 546; \quad c = 1/\alpha_T - 20 + T_g; \quad m = \frac{0,39 \cdot P_g^{0,5} \cdot d_{np}^{0,75}}{a} / T_g^{0,75}.$$

Расчеты, выполненные с помощью разработанной автором исследовательской MAPLE-программы, для ряда проводов различных марок показали, что уравнение (3) при любых сочетаниях модуля тока в проводе и параметров воздуха, входящих в состав уравнения, обязательно имеет два действительных и два комплексно-сопряженных корня. Один из двух действительных корней достигает значения, порядка (-2000°C) . Вторым действительным положительным корнем имеет физический смысл и принимается в качестве решения. Уравнение (4) при любых сочетаниях параметров, входящих в состав уравнения, обязательно имеет один действительный положительный и два комплексно-сопряженных корня. В качестве решения выбирается действительный положительный корень. После решения уравнений относительно $\Delta T = T_{np} - T_g$ температура проводов определяется как $T_{np} = \Delta T + T_g$.

Алгоритм аналитического решения уравнения теплового баланса провода

с помощью формул Кардано обеспечивает получение точного решения уравнений при любом значении скорости ветра при его направлении вдоль и поперек провода, и легко встраивается в алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС, основанный на решении системы уравнений состояния.

Алгоритм определения механических параметров проводов ВЛ, стрелы провеса и длины проводов в пролетах ВЛ основан на решении уравнения состояния провода

$$\sigma_n - \frac{E \cdot \gamma_n^2 \cdot l^3}{24 \cdot \sigma_n^2 \cdot l_{np}} = \sigma_m - \frac{E \cdot \gamma_m^2 \cdot l^3}{24 \cdot \sigma_m^2 \cdot l_{np}} - \alpha \cdot E \cdot (T_{np,n} - T_{np,m}), \quad (5)$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения материала провода, град⁻¹, E – модуль упругости провода, Па, значения которых берутся из справочников: $l \neq l_{np}$, где l, l_{np} – длина пролета и длина провода в пролете, м.

Все параметры с индексом « m » в выражении (5) соответствуют известным исходным климатическим условиям, согласно которым провод находится под воздействием наибольшего допустимого напряжения $y_m = y_{доп}$, его температура принимается равной наименьшей температуре воздуха $T_{np,m} = T_{e,m} = -40^{\circ}C$, ветер и гололед отсутствуют, на провод действует лишь удельная нагрузка от его собственного веса $\gamma_m = \gamma_1$. Значения $y_{доп}$, γ_1 берутся из нормативных документов.

Параметры с индексом « n » в уравнении (5) соответствуют расчетным климатическим условиям, при которых гололед отсутствует, $v \leq 1,2 м/с$, $\gamma_n = \gamma_1$, температура провода не равна температуре воздуха $T_{np,n} \neq T_e$ и определяется из решения уравнения теплового баланса.

Уравнение (5) является кубическим относительно σ_n и решается с помощью формул Кардано. Полученное значение σ_n используется для расчета стрелы провеса f_n и длины проводов в пролете $l_{np,n}$:

$$f_n = \frac{\gamma_n \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_n}; \quad l_{np} = l + \frac{\gamma_n^2 \cdot l}{24 \cdot \sigma_n^2}. \quad (6)$$

Расчеты, выполненные с помощью разработанной автором исследовательской MAPLE-программы, показали, что учет в уравнении (5) вместо температуры воздуха температуры провода приводит к изменению значения стрелы провеса на 34,5%, при этом изменение длины провода в пролете не превышает 0,2%.

Предлагаемый алгоритм определения механических параметров проводов ВЛ является основой для модификации алгоритма расчета допустимых режимов в ЭЭС.

В **третьей** главе работы предлагаются четыре усовершенствованных алгоритма расчета потокораспределения ЭЭС, основанных на решении систем уравнений состояния, баланса узловых токов и мощностей с учетом и без учета

ограничений на переменные режима. Алгоритмы включают либо уравнения теплового баланса провода, либо квадратичную аппроксимацию его решений.

Для алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС на основе системы уравнений состояния разработано два варианта учета уравнения теплового баланса провода, либо в форме трансцендентного и алгебраического уравнений четвертой степени (3), (4), либо с использованием квадратичной аппроксимации к уравнению теплового баланса (1).

Уравнение состояния может быть представлено как

$$\begin{pmatrix} M \\ NZ \end{pmatrix} I = \begin{pmatrix} J \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где J – матрица-столбец узловых токов в узлах схемы замещения ЭЭС; I, Z – комплексные матрицы токов и сопротивлений ветвей; M, N – первая и вторая матрицы инцидентий.

При учете в системе уравнений (7) уравнения теплового баланса (1) или выражений (3), (4) элементы матрицы Z становятся функциями тока в проводе и параметров окружающей среды второго или четвертого порядка. В обоих случаях система уравнений (7) становится нелинейной, в ней явно учитывается зависимость активного сопротивления провода от тока и параметров окружающей среды. Для ее решения использовался метод Ньютона-Рафсона. При этом в точке решения такой системы будут получены значения переменных режима с учетом зависимости активных сопротивлений проводов от токов в них.

Несмотря на очевидную простоту рассмотренного подхода его дальнейшее развитие и реализация сдерживаются сложностью учета коэффициентов трансформации трансформаторов в схеме замещения ЭЭС и большой размерностью задачи, определяемой числом ветвей. Поэтому при выполнении расчетов потокораспределения обычно используются уравнения узловых напряжений в форме баланса узловых токов или узловых мощностей.

Следующий усовершенствованный алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС основан на решении системы уравнений балансов узловых токов (8) и включает для учета зависимости активного сопротивления провода от тока квадратичную аппроксимацию (1). Система уравнений (8), решаемая методом Ньютона-Рафсона, может быть представлена как

$$Y \cdot U + J = 0, \quad (8)$$

где Y, U, J – матрицы узловых комплексных проводимостей, напряжений и токов.

В усовершенствованном алгоритме расчета, в отличие от «традиционного», учет зависимости $T_{np} = f(I, T_e, Q_r, \nu)$ на каждой итерации расчета приводит к необходимости выполнения дополнительных операций, связанных учетом зависимости элементов матрицы узловых проводимостей в ветви ij от значений токов ветвей и параметров окружающей среды $y_{ij} = f(I_{ij}, T_e, Q_r, \nu)$.

В такой ситуации для сокращения числа промежуточных операций на

каждом шаге алгоритма зависимость $T_{np} = f(I, T_6, Q_r, \nu)$ преобразуется в зависимость удельного активного сопротивления провода от параметров окружающей среды $r_{0,(T_{np})} = f(U_{ij}, T_6, Q_r, \nu)$ заменой переменных $I = \frac{U_{ij}}{\sqrt{3} \cdot z_{ij}}$, где U_{ij}, z_{ij} – модули падения напряжения и сопротивления в ветви ij .

В этом случае удельное активное сопротивление провода ВЛ с учетом его температуры преобразуется в кубическое уравнение:

$$\begin{aligned} r_{0,(T_{np})} &= r_{0,(20)} \cdot [1 + \alpha_T \cdot (T_{np} - 20)] = r_{0,(20)} \cdot (kk + \alpha_T \cdot [a + b \cdot I_{ij} + c \cdot I_{ij}^2 + d \cdot T_6 + \\ &+ e \cdot T_6^2 + m \cdot Q_r + n \cdot Q_r^2 + k \cdot (I_{ij} \cdot T_6) + p \cdot (I_{ij} \cdot Q_r) + h \cdot (T_6 \cdot Q_r)]) = \\ &= b1 + b2 \cdot I_{ij} + b3 \cdot I_{ij}^2 = c1 + c2 \cdot \frac{U_{ij}}{z_{ij,0}} + c3 \cdot \frac{U_{ij}^2}{z_{ij,0}^2} = \\ &= \frac{z_{ij,0}^2 \cdot r_{0(T_{np})} - c1 \cdot z_{ij,0}^2 - c2 \cdot z_{ij,0} \cdot U_{ij} - c3 \cdot U_{ij}^2}{z_{ij,0}^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

где $c1 = r_{0(20)} \cdot (kk + \alpha_T \cdot [a + d \cdot T_6 + e \cdot T_6^2 + m \cdot Q_r + n \cdot Q_r^2 + h \cdot (T_6 \cdot Q_r)])$,
 $c2 = r_{0(20)} \cdot \alpha_T \cdot (b + k \cdot T_6 + p \cdot Q_r) / (\sqrt{3} \cdot l_{ij})$, $c3 = r_{0(20)} \cdot \alpha_T \cdot c / (3 \cdot l_{ij}^2)$.

Для сталеалюминевых проводов при $\alpha_T = 0,004 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ значение коэффициента $kk = 1 - \alpha_T \cdot 20 = 0,92$, а без учета солнечной радиации в коэффициентах $c1, c2$ значение $Q_r = 0$.

Полагаем на основе физических соображений, что $z_{ij,0}^2 \neq 0$, и раскладывая (9), на действительную и мнимую составляющие

$$\begin{aligned} 0 &= z_{ij,0}^2 \cdot r_{0(T_{np})} - c1 \cdot z_{ij,0}^2 - c2 \cdot z_{ij,0} \cdot U_{ij} - c3 \cdot U_{ij}^2 = \\ &= r_{0(T_{np})}^3 - c1 \cdot r_{0(T_{np})}^2 + r_{0(T_{np})} \cdot (x_0^2 - c2 \cdot U_{ij,a}) - c1 \cdot x_0^2 - c3 \cdot U_{ij}^2 + c2 \cdot x_0 \cdot U_{ij,r} - \\ &\quad - j(c2 \cdot r_{0(T_{np})} \cdot U_{ij,r} + c2 \cdot x_0 \cdot U_{ij,a}), \end{aligned}$$

получаем систему из двух уравнений:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= r_{0(T_{np})}^3 + d1 \cdot r_{0(T_{np})}^2 + d2 \cdot r_{0(T_{np})} + d3 \\ 0 &= -c2 \cdot r_{0(T_{np})} \cdot U_{ij,r} - c2 \cdot x_0 \cdot U_{ij,a} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где $d1 = -c1, d2 = (x_0^2 - c2 \cdot U_{ij}), d3 = -(c1 \cdot x_0^2 - c2 \cdot x_0 \cdot U_{ij,r} + c3 \cdot U_{ij}^2)$, корень второго уравнения $r_{0(T_{np})} = -x_0 \cdot \frac{U_{ij,a}}{U_{ij,r}}$ не имеет физического смысла, а первое кубическое уравнение, имеющее три корня, решается с помощью формул Кардано.

Расчеты, выполненные с помощью исследовательской MAPLE-программы для ряда проводов различных марок, показали, что дискриминант уравнения (10) положителен при любых значениях входящих в него параметров. В этом случае один из трех корней уравнения, который

принимается в качестве решения, обязательно будет действительным и положительным.

Решение кубического уравнения (10) методом Кардано включается в усовершенствованный алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС.

Существенной особенностью алгоритма является определение элементов матрицы Якоби, являющихся производными от неявной функции удельного активного сопротивления ветвей по параметрам режима.

Блок-схема алгоритма, показанная на рис. 1, содержит следующие блоки.

1. Ввод параметров электрической сети и коэффициентов квадратичной зависимости $T_{np} = f(I_{ij}, T_e, \nu, Q_r)$ для проводов каждой ВЛ.

2. Задание на $k=0$ итерации исходного приближения узловых напряжений.

3. Расчет небалансов узловых токов $I_{неб(a,r)i}$ по выражению (8) с его разложением на активную и реактивную составляющие

$$\left. \begin{aligned} I_{неб,a,i} &= U_{a,i} \cdot Y_{a,i} - \sum_{j \in R_i} U_{a,j} \cdot Y_{a,ij} - U_{r,i} \cdot Y_{r,i} + \sum_{j \in R_i} U_{r,j} \cdot Y_{r,ij} + J_{a,i} = 0 \\ I_{неб,r,i} &= U_{a,i} \cdot Y_{r,i} - \sum_{j \in R_i} U_{a,j} \cdot Y_{r,ij} + U_{r,i} \cdot Y_{a,i} - \sum_{j \in R_i} U_{r,j} \cdot Y_{a,ij} + J_{r,i} = 0 \end{aligned} \right\},$$

где $i = 1, \dots, n$, n – число узлов расчетной схемы ЭЭС.

4. Определение активных сопротивлений ветвей схемы замещения ЭЭС из решения первого уравнения системы (10).

5. Определение элементов матрицы Якоби с учетом неявных производных удельного активного сопротивления ветвей схемы замещения ВЛ

по узловым напряжениям в этих ветвях $\frac{\partial r_{0(T_{np})}}{\partial U_i}, \frac{\partial r_{0(T_{np})}}{\partial U_j}$.

6. Определение поправки к узловым напряжениям.

7. Определение напряжений в узлах схемы $U_{(a,r)i}$, переход на следующую итерацию расчета и проверка условия завершения расчета $|I_{неб,(a,r)i}| \leq 0.001 A$, при его невыполнении – продолжение расчета, иначе – завершение расчета.

Предложенный усовершенствованный алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС реализован в исследовательской MATLAB-программе и отличается от «традиционного» алгоритма наличием следующих процедур: 1 – определение с помощью МНК коэффициентов квадратичной аппроксимации к уравнению теплового баланса провода, выполняемое на внешнем цикле работы алгоритма; 4 – определение активного сопротивления проводов ВЛ из решения кубического уравнения (10) с применением формул Кардано; 5 – расчет элементов матрицы Якоби с учетом производной неявной функции активного сопротивления ветвей ВЛ по узловым напряжениям.

В качестве достоинства следует отметить относительную простоту предлагаемой модификации «традиционного» алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС, основанного на решении системы уравнений баланса узловых токов, когда сохранена вся структура «традиционного»

итерационного алгоритма расчета, в который добавлены лишь три отдельных дополнительных блока.

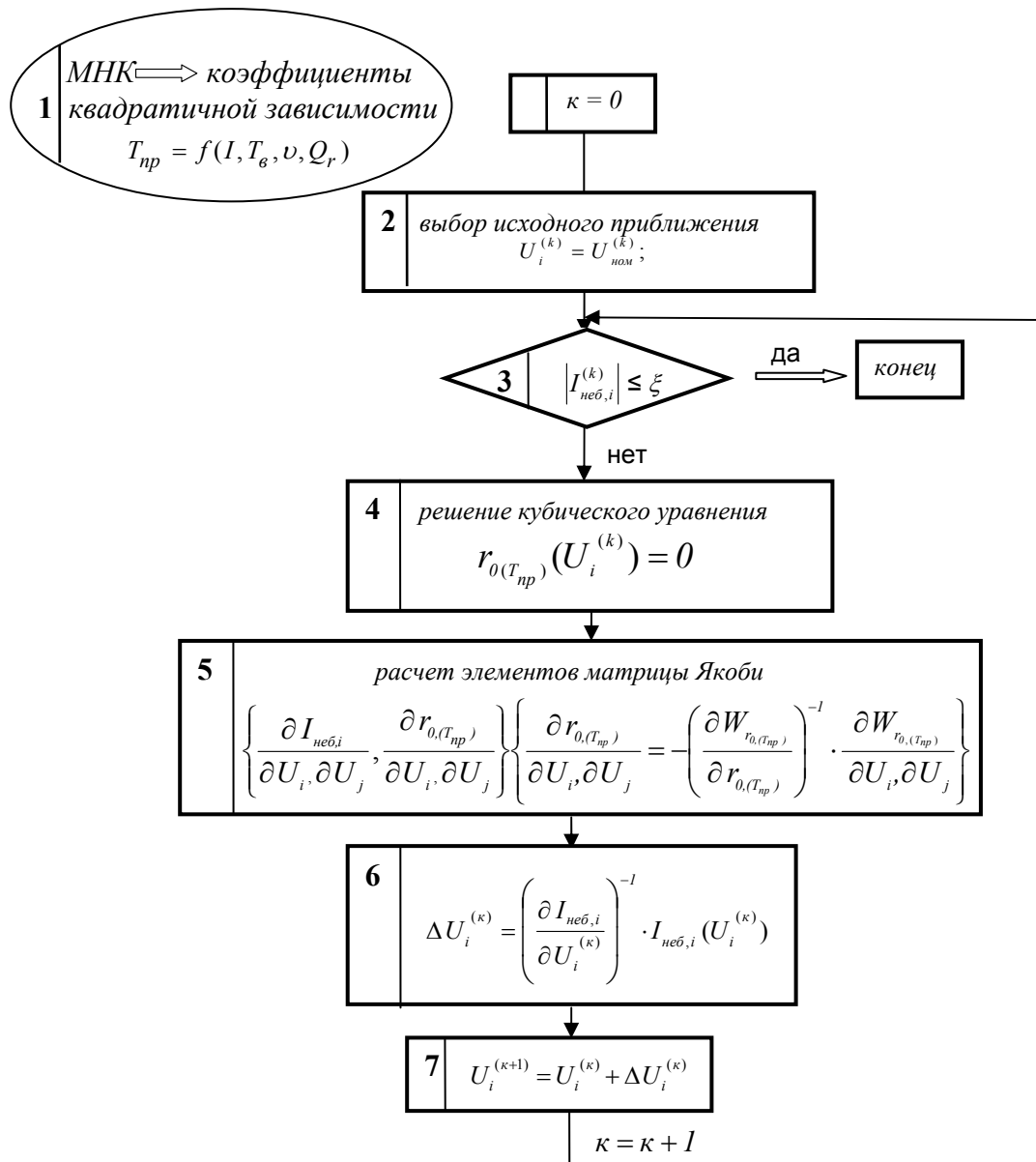


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС, основанного на решении системы уравнений баланса узловых токов

В этом случае при выполнении расчетов потокораспределения, кроме «традиционных» исходных данных о параметрах расчетной энергосистемы, необходимо вводить лишь дополнительные данные о параметрах окружающей среды: температуре воздуха, мощности солнечной радиации, скорости и направлении ветра, а также коэффициенты квадратичной аппроксимации к уравнению теплового баланса провода.

Третий разработанный, программно реализованный и протестированный автором алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС основан на решении системы уравнений баланса узловых мощностей (11) и включает аналитически

решаемое уравнение теплового баланса провода.

Используемая в алгоритме система уравнений баланса узловых мощностей получается при умножении слева системы уравнений баланса узловых токов (8) на матрицу узловых комплексно-сопряженных напряжений \hat{U} , что позволяет не рассчитывать на каждой итерации алгоритма расчета потокораспределения задающий узловой ток нагрузки, для которой обычно известно значение узловой мощности \hat{S} :

$$\hat{U} \cdot Y \cdot U + \hat{S} = 0. \quad (11)$$

Все параметры ЭЭС, входящие в (11), те же, что и в системе уравнений баланса узловых токов (8). Элементы матрицы проводимостей, зависящие от температуры ветвей ВЛ, определяются из решения уравнений теплового баланса (3), (4) в форме зависимости $\Delta T = T_{np} - T_g = f(I, T_g, Q_r, \nu)$, которая для удобства реализации алгоритма преобразуется в зависимость $\Delta T = f(U_{ij}, T_g, P_g, Q_r, \nu)$, где среди параметров окружающей среды учитывается текущее значение атмосферного давления, отличающееся от нормального давления.

Преобразование зависимости выполняется заменой переменных $I = U_{ij} / (\sqrt{3} \cdot z_{ij})$. При скорости ветра $\nu \leq 1,2 \text{ м/с}$ уравнение теплового баланса провода (3) становится трансцендентным уравнением шестой степени (12):

$$0 = \Delta T^6 + a_5 \cdot \Delta T^5 + a_4 \cdot \Delta T^4 + a_{33} \cdot \Delta T^{3,3} + a_3 \cdot \Delta T^3 + a_{23} \cdot \Delta T^{2,3} + a_2 \cdot \Delta T^2 + a_{13} \cdot \Delta T^{1,3} + a_1 \cdot \Delta T + a_0, \quad (12)$$

где

$$a_{33} = m; \quad a_3 = 3b \cdot x_{np}^2 / f + b^3 + 6b^2c + 3bc^2; \quad a_{23} = 2mc;$$

$$a_2 = p + 3b^3c + 3b^2 \cdot x_{np}^2 / f + 3b^2c^2;$$

$$a_{13} = m \cdot x_{np}^2 / f + mc^2; \quad a_1 = b^3 \cdot x_{np}^2 / f + 2cp + b^3c^2 - n \cdot U_{ij}^2 / f.$$

При скорости ветра $\nu > 1,2 \text{ м/с}$ и его направлении перпендикулярном проводу уравнение (4) преобразуется в алгебраическое уравнение шестой степени (13):

$$0 = \Delta T^6 + a_5 \cdot \Delta T^5 + a_4 \cdot \Delta T^4 + a_3 \cdot \Delta T^3 + a_2 \cdot \Delta T^2 + a_1 \cdot \Delta T + a_0, \quad (13)$$

где $a_3 = g_1 + 3b \cdot x_{np}^2 / f + 6b^2c + 3bc^2$; $a_2 = 3b^2 \cdot x_{np}^2 / f + p + 2cg_1 + 3b^2c^2$;

$$a_1 = g_1 \cdot x_{np}^2 / f + 2cp + g_1c^2 - n \cdot U_{ij}^2 / f.$$

Остальные коэффициенты в (12), (13) одинаковы и определяются как

$$a_5 = 3b + 2c; \quad a_4 = x_{np}^2 / f + 3b^2 + 6cb + c^2; \quad a_0 = p \cdot x_{np}^2 / f + pc^2 - nc \cdot U_{ij}^2 / f;$$

$$f = (l_{ij} \cdot r_{0(20)} \cdot \alpha_T)^2; \quad p = -\frac{60 \cdot q \cdot d}{a}; \quad n = \frac{r_{0(20)} \cdot \alpha_T}{3a}.$$

При скорости ветра $\nu > 1,2 \text{ м/с}$ при его направлении вдоль провода в выражении (13) также как и в (4) коэффициент g_1 заменяется на коэффициент g_2 .

Поскольку уравнения (12), (13) являются уравнениями высоких порядков, для решения которых не применимы прямые методы, и в том числе формулы Кардано, то для их решения используется итерационный метод Ньютона, позволяющий получать корни уравнений с наперед заданной точностью равной $\xi_{\Delta T} = 10^{-9}$.

Поскольку метод Ньютона обладает локальной сходимостью, т.е. обеспечивает получение решения уравнений из хорошего начального приближения, то для гарантированного получения корней уравнений выполнено исследование структуры и поведения коэффициентов, корней и первой производной уравнений, а также определены выражения для вычисления начального приближения к их действительному положительному корню.

В результате исследований, выполненных для ряда проводов различных марок, выяснилось, что трансцендентное уравнение (12) при любых сочетаниях параметров U_{ij}, T_g, Q_r, ν , входящих в его состав, имеет пять корней, четыре из которых являются комплексно-сопряженными, а один корень – вещественным, положительным, имеющим физический смысл. Вещественный корень принимается в качестве решения уравнения. Алгебраическое уравнение (13) при любых сочетаниях параметров, входящих в состав уравнения, обязательно имеет четыре попарно комплексно-сопряженных корня и два действительных, один из которых имеет физический смысл и выбирается в качестве решения.

Кроме того при коэффициенте загрузки проводов по току $K_s \leq 1$ первая производная и все коэффициенты уравнений (12), (13), кроме последнего, положительны. В этом случае обеспечивается получение решения уравнений при любом исходном приближении, равном $\Delta T \geq 0$.

При перегрузке проводов по току $K_s > 1$ все коэффициенты уравнений положительны, кроме последнего и предпоследнего. В этом случае при начальном приближении $\Delta T^{v>1,2} = -a_1 / (2 \cdot a_2)$, где a_1, a_2 – коэффициенты уравнения при слагаемых $\Delta T^1, \Delta T^2$ обеспечивается решение уравнения (12).

Исходное приближение к уравнению (13) определяется как $\Delta T = X$, где X – значение правой границы интервала локализации корня.

Предложенный алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС основан на использовании метода Ньютона-Рафсона с деформацией шага и включает решение «классическим» методом Ньютона уравнения теплового баланса провода при формировании элементов матрицы Якоби с учетом зависимости активного сопротивления ветвей ВЛ от падения напряжения в них и параметров окружающей среды.

Блок-схема алгоритма показана на рис. 2 и содержит следующие блоки.

1. Выбор исходного приближения напряжений U_i^k на итерации $k = 0$ для каждого узла $i = 1, \dots, n$.

2. Расчет небалансов узловых мощностей $S_{неб,i}^{(k)}$ по выражению (11) с его разложением на активную и реактивную составляющие

$$\left. \begin{aligned} W_{P,i} &= P_i - V_i^2 \cdot Y_{a,ii} - V_i \cdot \sum_{j \in R_i} V_j \cdot (Y_{a,ij} \cdot \cos \delta_{ij} + Y_{r,ij} \cdot \sin \delta_{ij}) = 0 \\ W_{Q,i} &= Q_i + V_i^2 \cdot Y_{r,ii} + V_i \cdot \sum_{j \in R_i} V_j \cdot (Y_{r,ij} \cdot \cos \delta_{ij} - Y_{a,ij} \cdot \sin \delta_{ij}) = 0 \end{aligned} \right\}$$

где $V_i, V_j, \delta_i, \delta_j$ – модуль и фазовый угол сдвига комплексов напряжений узлов i, j относительно напряжения базисного узла.

Завершение расчета, если $|S_{неб,i}^{(k)}| \leq \xi$, иначе переход к следующему пункту.

3. Определение температуры и удельного активного сопротивления проводов ВЛ из решения методом Ньютона уравнения теплового баланса провода (12), (13) – для $v > 1,2 \text{ м/с}$ и $v \leq 1,2 \text{ м/с}$ соответственно.

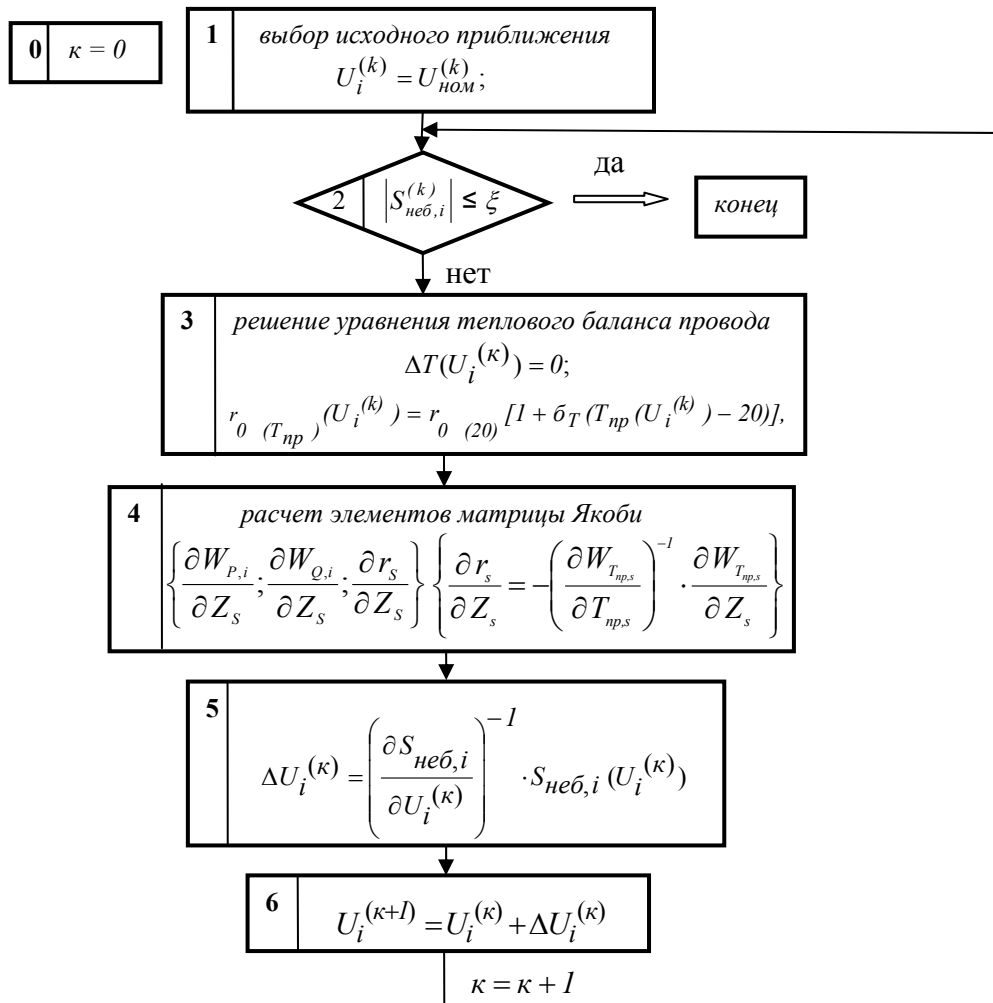


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС, основанного на решении системы уравнений баланса узловых мощностей

4. Вычисление элементов матрицы Якоби из системы уравнений (11) с учетом зависимости активных сопротивлений ветвей ВЛ s , содержащих ВЛ, по параметрам Z_s – модулям и фазам напряжений узлов, где $\frac{\partial W_{P,i}}{\partial Z_s}, \frac{\partial W_{Q,i}}{\partial Z_s}$ –

общеизвестные выражения для определения производных узловых мощностей по узловым напряжениям, а выражение

$$\frac{\partial r_s}{\partial Z_s} = - \left(\frac{\partial W_{T_{np}}}{\partial T_{np}} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial W_{T_{np}}}{\partial Z_s}$$

является производной неявной функции от активного сопротивления ветви s по параметрам режима и определяется из уравнений теплового баланса провода (12), (13).

5. Определение поправки к узловым напряжениям для следующей итерации расчета.

6. Учет поправки, определение узловых напряжений и переход на следующую итерацию или завершение расчета.

Предложенный алгоритм реализован в программе СДО-7 и отличается от «традиционного» двумя дополнительными блоками: 3 – определением разницы температур провода и воздуха $\Delta T = T_{np} - T_e$ из решения методом Ньютона уравнения теплового баланса провода и 4 – определением производной неявной функции активного сопротивления ветвей ВЛ по параметрам режима.

Пользователям алгоритма при выполнении расчетов потокораспределения, кроме «традиционных» исходных данных о параметрах рассматриваемых энергосистем, необходимо вводить лишь дополнительные расчетные данные о параметрах окружающего воздуха.

Усовершенствованный алгоритм расчета допустимого режима в ЭЭС, для которого разработан и программно реализован алгоритм определения механических параметров ВЛ из решения уравнения состояния провода (5). Алгоритм предполагает выполнение расчетов установившихся режимов в ЭЭС на основе применения одного из трех алгоритмов, изложенных выше, основанных на решении систем уравнений состояния, баланса узловых токов или мощностей.

Для введения режима в допустимую область необходимо использовать общеизвестные алгоритмы расчета допустимого режима, основанные, например, на применении градиентного метода, где в состав «традиционных» ограничений-неравенств, накладываемых на параметры режима Z_s , включено дополнительное ограничение-неравенство на стрелу провеса провода f_s

$$f_{s,min} \leq f_s \leq f_{s,max}, \quad (14)$$

где $f_{s,min}, f_{s,max}$ – ее минимальное и максимальное значения, определяемые из решения уравнения состояния провода (5), в котором температура проводов T_{np} определяется из решения уравнения теплового баланса провода или квадратичной аппроксимации к нему и зависит от параметров режима.

Для функциональной зависимости $f_s(Z_s)$ на каждой итерации расчета допустимого режима необходимо определить производную сложной функции от уравнения (5):

$$\frac{\partial f_s}{\partial Z_s} = \frac{\partial f_s}{\partial T_{np,n}} \cdot \frac{\partial T_{np,n}}{\partial Z_s}, \quad (15)$$

где второй сомножитель определяется в алгоритме расчета установившегося режима, первый представляет собой производную неявной функции $y_n(T_{np,n})$ от выражения (5):

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_s}{\partial T_{np,n}} &= -A_4 \cdot \sigma_n^{-2} \cdot \frac{\partial(\sigma_n)}{\partial T_{np,n}} = \frac{A_4}{\sigma_n^2} \left[\frac{\partial(\sigma_n(T_{np,n}))}{\partial \sigma_n} \right]^{-1} \cdot \frac{\partial(\sigma_n(T_{np,n}))}{\partial T_{np,n}} = \\ &= -\frac{A_4 A_3}{3\sigma_n^2 - 2\sigma_n(A_2 + A_3(T_{np,n} - T_{np,m}))}, \end{aligned} \quad (16)$$

а коэффициенты выражения (16) зависят от его параметров и определяются как

$$A_1 = \frac{E \cdot \gamma_n^2 \cdot l^3}{24 \cdot \sigma_n^2 \cdot l_{np}}, A_2 = \sigma_m - \frac{E \cdot \gamma_m^2 \cdot l^3}{24 \cdot \sigma_m^2 \cdot l_{np}}, A_3 = -\alpha \cdot E, A_4 = \frac{\gamma_n l^2}{8}, \Delta T_{np} = T_{np,n} - T_{np,m}.$$

Предлагаемый алгоритм расчета допустимого режима отличается от его «традиционной» версии тремя дополнительными блоками: расчет потокораспределения в ЭЭС в соответствии с одним из трех, изложенных выше алгоритмов; определение механических параметров проводов ВЛ из решения уравнения состояния провода, с помощью формул Кардано; учет производной сложной функции от стрелы провеса провода по параметрам режима. При этом два последних блока алгоритма реализованы и протестированы в MAPLE-среде программирования.

Пользователям реализованного алгоритма, при выполнении расчетов допустимых режимов в ЭЭС, необходимо вводить дополнительные данные о параметрах окружающей среды и параметрах проводов в контролируемых пролетах ВЛ, входящих в состав уравнения состояния провода.

В четвертой главе на примере тестовых и реальных ЭЭС приведены результаты тестирования усовершенствованного алгоритма расчета потокораспределения в ЭЭС, основанного на решении систем уравнений баланса узловых мощностей. При выполнении тестирования для каждой расчетной схемы ЭЭС сопоставлялись результаты двух вариантов расчетов потокораспределения: при неизменной температуре проводов, равной температуре воздуха, и при расчете температуры проводов в зависимости от тока в них и от параметров окружающей среды. Расчетные схемы содержали от 14 до 7426 узлов и имели различную токовую загрузку ВЛ, что позволило разбить их на две группы – сильно и слабо загруженные. Общее число схем равно 10. Для каждой из схем, входящих в первую или вторую группу, сравнивались значения температур проводов для двух вариантов расчета и суммарные потери активной мощности.

Сопоставление проводилось для температуры окружающего воздуха, изменяющейся от -20°C до $+40^\circ\text{C}$. Результаты множества проведенных расчетов сгруппированы в таблице, в которой указаны значения перегрева провода ΔT , вычисляемого как разность температур провода и воздуха и

значения относительных суммарных потерь активной мощности $\delta\Delta\pi = \frac{\pi_2 - \pi_1}{\pi_1} 100$ %, где π_1, π_2 – суммарные потери активной мощности первого и второго варианта расчета.

Таблица – Значения температур и перегрева проводов, относительных суммарных потерь активной мощности

Режимы	Сильно загруженные	Слабо загруженные	РП ВЛ, $Q_r = 0$	РП ВЛ, $Q_r \neq 0$
$T_{np}, ^\circ\text{C}$	62,9-95,5	40,0-62,9	-	-
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	41,9-75,5	10,0-37,9	-	-
$\delta\Delta\pi, \%$	10,1-35,3	0,2-3,0	1,48-3,71	2,76-6,78

Из таблицы видно, что уточнение (коррекция) суммарных потерь, вызванное учетом температуры провода, изменяется в широком диапазоне и зависит от параметров окружающего воздуха и токовой загрузки проводов.

Наиболее существенное уточнение суммарных потерь достигается при наличии перегруженных по току проводов ВЛ, температура которых составляет $T_{np} = (62 \div 96)^\circ\text{C}$, а перегрев ΔT над температурой воздуха находится в диапазоне $\Delta T = (42 \div 76)^\circ\text{C}$. В этом случае уточнение суммарных потерь активной мощности составляет (10,1-35,3) %.

Для слабо загруженных режимов температура проводов ВЛ не превышает $T_{np} = 63^\circ\text{C}$, а уточнение потерь составляет 3,0 %.

Для оценки влияния распределенности электрических параметров (РП) ВЛ и распределения температуры провода по длине ВЛ на потери мощности производилась разбивка ВЛ длиной 200 км на участки.

Исследование влияния разбивки ВЛ, питающей одну нагрузку, осуществлялось с учетом и без учета солнечной радиации Q_r .

Вычислялись потери, соответствующие разбивке ВЛ на 2, 4, 8 и 16 одинаковых участков, каждый из которых моделировался П-образной схемой замещения. Полученные суммарные потери сравнивались с потерями при отсутствии разбивки.

Как следует из таблицы, разбивка линии на участки приводит к уменьшению суммарных потерь мощности. Для 16 участков с учетом солнечной радиации уменьшение составило 6,8%, а без учета – 3,7%.

Анализ приведенных данных показывает, что учет температуры провода позволяет уточнить результаты расчета потокораспределения ЭЭС.

Заключение

На основании проведенных в диссертации исследований найдено решение актуальной научно-технической задачи повышения точности моделирования установившихся режимов в ЭЭС и моделирования ВЛ – одного

из основных элементов электрической сети. Достижение поставленной цели получено с использованием предложенных в работе усовершенствованных алгоритмов расчета потокораспределения ЭЭС, включающих возможность определения электрических и механических параметров проводов ВЛ, таких как температура, активное сопротивление и стрела провеса провода. Для определения электрических и механических параметров использовались полученные в работе различные виды уравнений теплового баланса и уравнения состояния провода.

Для верификации работоспособности предложенных подходов проведено их тестирование с помощью разработанных автором экспериментальных программ и программы СДО-7. Численные результаты тестирования подтверждают эффективность разработанных методов.

При выполнении исследований получены следующие результаты.

1. Разработан усовершенствованный алгоритм квадратичной аппроксимации решений уравнения теплового баланса провода. Получено два вида аппроксимации, характеризующих зависимость температуры проводов ВЛ от тока (или падения напряжения) в проводе, температуры воздуха, мощности солнечной радиации, а также скорости и направления ветра. Рассчитаны коэффициенты квадратичной аппроксимации для 69-ти неизолированных проводов различных марок и заданной скорости ветра, без учета солнечной радиации. Коэффициенты просты в применении, позволяют определять удельное активное сопротивление проводов с погрешностью, не превышающей 0,6%, и могут быть рекомендованы в качестве дополнительного параметра проводов, указываемого в справочной литературе.

2. Предложен усовершенствованный алгоритм аналитического решения уравнения теплового баланса провода, использующий два вида записи разности температур провода и воздуха в зависимости от параметров окружающей среды, включая текущее значение атмосферного давления, и либо от тока, либо от падения напряжения в проводе. Уравнение, включающее ток, решается с помощью формул Кардано, а включающее падение напряжения – методом Ньютона.

3. Разработан и протестирован усовершенствованный алгоритм определения длины и стрелы провеса провода ВЛ из аналитического решения уравнения состояния провода с учетом его текущей температуры, найденной из решения уравнения теплового баланса. Предложенный алгоритм позволяет существенно уточнить стрелу провеса в пролете ВЛ.

4. Разработан усовершенствованный алгоритм расчета потокораспределения в ЭЭС, основанный на решении системы уравнений состояния, в котором используется явная зависимость температуры проводов ВЛ от токов и параметров окружающей среды. Такая зависимость представлена либо уравнением теплового баланса провода, либо его квадратичной аппроксимацией.

5. Разработаны, программно реализованы и протестированы усовершенствованные алгоритмы расчета потокораспределения в ЭЭС, основанные на решении систем уравнений баланса узловых токов и мощностей,

в которых используется зависимость температуры проводов от падения напряжения и от параметров окружающей среды. Такая зависимость представлена либо уравнением теплового баланса провода шестой степени, либо квадратичной аппроксимацией этого уравнения четвертой степени.

6. Разработан усовершенствованный алгоритм расчета допустимого режима в ЭЭС с учетом дополнительного ограничения-неравенства на стрелу провеса провода в пролете ВЛ, которая определяется из уравнения состояния провода, решаемого аналитически.

7. Апробация предложенных алгоритмов расчета потокораспределения в форме систем уравнений балансов узловых токов и мощностей на примере тестовых и реальных ЭЭС подтвердила их эффективность.

8. Все предложенные в работе алгоритмы решения уравнения состояния провода и различных форм уравнения теплового баланса допускают их использование в современных программных средствах расчета потокораспределения ЭЭС.

Основные публикации по теме диссертации

Научные статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гамм А.З., **Попова Е.В.** Адаптивное эквивалентирование электроэнергетических систем //Электричество. – 2000. –№ 5. – С. 10-15.

2. Войтов О.Н., **Попова Е.В.** Алгоритм учета температуры провода при расчете потокораспределения в электрической сети //Электричество. –2010. –№ 9. – С. 24-30.

3. Войтов О.Н., **Попова Е.В.**, Семенова Л.В. Алгоритмы расчета потокораспределения в электрических сетях //Электричество. –2013. –№ 3. – С. 19-26.

Публикации в других изданиях

4. **Попова Е.В.** Алгоритм определения температуры провода с учетом солнечной радиации //Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики. Сб. докл. международного научн. сем. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. – 2011. –Вып. 61. – С. 49-56.

5. Войтов О.Н., Семенова Л.В., **Попова Е.В.** Расчет потокораспределения в электрической сети с учетом уравнения теплового баланса проводов воздушных линий//Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Проблемы надежности существующих и перспективных систем энергетики и методы их решения. Сб. докл. международного научн. сем. Иваново: ПресСто. – 2011. – Вып. 62. – С. 406-414.

6. **Попова Е.В.** Алгоритм определения температуры провода с учетом параметров окружающей среды //Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды III международной научн.-технич. конф. Сб. статей. В 2 т. Екатеринбург: УрФУ. – 2012. – Т.1. – С. 351-356.

7. **Попова Е.В.** Расчеты потокораспределения в ЭЭС с учетом габаритов ВЛ//Энергетика России в XXI веке. Инновационное развитие и управление: сб. статей всероссийской конференции. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. -2015.-С.372-378.

Отпечатано в ИСЭМ СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130
Тираж 100 экз. Заказ № 71.