

На правах рукописи



Бубенчиков Антон Анатольевич

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В  
САМОНЕСУЩИХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ  
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.14.02 – «Электрические станции и  
электроэнергетические системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

ОМСК 2012

Работа выполнена в **Федеральном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет» (ОмГТУ).**

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Гиршин Станислав Сергеевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Сидоров Олег Алексеевич**  
зав. кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта», ОмГУПС (ОМИИТ)

кандидат технических наук, доцент  
**Татевосян Андрей Александрович**  
доцент кафедры «Электрическая техника», ОмГТУ

Ведущая организация: **ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»**

Защита диссертации состоится 15 марта 2012 года в 14:00 на заседании диссертационного совета Д 212.178.12 при Омском государственном техническом университете по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, корп. 6, ауд. 340. Тел/факс: (8-3812)65-64-92, e-mail: dissov\_omgtu@omgtu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета по адресу: г. Омск, проспект Мира, 11.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения, просим направлять по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, 11, диссертационный совет.

Автореферат разослан 6 февраля 2012 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Д. С. Осипов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Величина потерь энергии в электрических сетях ОАО «ФЭК ЕЭС», ОАО «Холдинг МРСК» по различным оценкам в последние годы составляет 12-13%, что значительно превышает уровень потерь в сетях стран западной Европы, США и Японии. По этой причине и в связи с тем, что энергосбережение и энергоэффективность выдвигается правительством России как приоритетное направление развития, снижение потерь энергии является актуальной проблемой.

Существенный вклад в решение вопросов расчета потерь электрической энергии внесли: Арзамасцев Д.А., Бартоломей В.И., Бердин А.С., Веников В.А., Воротницкий В.Э., Герасименко А.А., Железко В.С., Ершевич В.В., Идельчик В.И., Калинин М.А., Кононов Ю.Г., Конюхова Е.А., Курбацкий В.Г., Левченко И.И., Левин М.С., Никифоров Е.П., Паздерин А.В., Пекелис В.Г., Поспелов Г.Е., Потребич А.А., Савин Н.В., Строев В.А., Фурсанов М.И., Щербина Ю.В. и другие отечественные и зарубежные ученые.

Значительная доля потерь энергии в электрических сетях приходится на нагрузочные потери в проводах воздушных линий электропередачи. Использование новых типов линий – самонесущих с изолированными проводами (СИП) – позволяет уменьшить потери напряжения в сети, сократить эксплуатационные расходы, и имеет ряд других достоинств. Однако недостаточная исследованность СИП, с одной стороны, и повышение актуальности задач анализа и снижения потерь энергии с другой предъявляет повышенные требования к точности расчета электрических потерь в СИП. Одним из способов снижения погрешностей соответствующих расчетов является учет температуры проводов.

**Цель работы** – повышение точности расчетов температуры и потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах воздушных линий электроэнергетических систем на основе учета характерных особенностей и взаимного влияния токопроводящих жил.

### **Задачи исследования.**

1. Разработать цепно-полевой подход расчета температуры и потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов воздушных линий электропередачи.

2. Создать математические модели определения потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов с учетом температуры токопроводящих жил, основанные на использовании собственных и взаимных тепловых сопротивлений.

3. Провести исследование потерь электрической энергии в симметричных и несимметричных режимах эксплуатации самонесущих изолированных проводов.

**Объект исследования** - самонесущие изолированные провода воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем.

**Предмет исследования** - методы расчета температуры и потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом режимных и климатических факторов.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались: метод конечных элементов, теория теплопередачи, элементы теории электрических цепей, дифференциальные уравнения в частных производных. Математическое моделирование проводилось в программных средах MathCAD и в программных комплексах Ansys и ElCut. Экспериментальная часть исследований выполнена на базе сетей Омского филиала «МРСК Сибири» на подстанции «Дружино» 10/0,4 кВ. Измерение температуры проводилось тепловизионным комплексом NEC 7700TH. Изменение скорости и направления ветра осуществлялось анемометром TESTO 416. Величины фазных токов определялись посредством измерительно-вычислительного комплекса «ОМСК-М».

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- Определены соотношения описывающие распределение температуры в изоляции СИП с учетом и без учета диэлектрических потерь. Обоснована возможность пренебрежения диэлектрическими потерями при исследовании тепловых процессов в СИП;

- Найдены выражения для коэффициентов теплоотдачи самонесущих изолированных проводов воздушных линий при естественной и вынужденной конвекции, определенные на основе числовых критериев подобия Нуссельта, Грасгофа, Прандтля и Рейнольдса;

- Получены зависимости собственных (фазных) и взаимных (междуфазных) тепловых сопротивлений четырехпроводной системы СИП от коэффициентов теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением и разработана основанная на расчете тепловых полей методика определения параметров схем замещения тепловых режимов самонесущих изолированных проводов для расчетов потерь электрической энергии;

- Разработаны алгоритмы и программа для расчета потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов, основанные на использовании собственных и взаимных тепловых сопротивлений, найденных в результате исследования особенностей распределения тепловых полей методом конечных элементов;

- Установлено, что несимметрия режима и температурная зависимость активных сопротивлений могут практически на порядок увеличить потери электрической энергии в четырехпроводной системе СИП по отношению к симметричному режиму.

**Практическая ценность.**

- Выведенные соотношения для нахождения распределения температуры в изоляции СИП дают возможность формирования математических моделей для расчета потерь электрической энергии, с учетом характерных особенностей рассматриваемого типа проводов;

- Найденные выражения для коэффициентов теплоотдачи самонесущих

изолированных проводов воздушных линий при естественной и вынужденной конвекции отличаются от известных выражений тем, что позволяют проводить анализ потерь энергии с учетом совместного влияния температуры окружающей среды и атмосферного давления;

– Полученные зависимости собственных и межфазных тепловых сопротивлений СИП в несимметричном режиме от коэффициентов теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением и разработанная методика определения параметров схем замещения тепловых режимов повышают достоверность расчетов потерь в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов для произвольного вида несимметрии;

– Разработанные алгоритмы и программа определения потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов, основанные на использовании собственных и взаимных тепловых сопротивлений, отличаются возможностью подробного учета особенностей исследуемого типа проводов при необходимой на практике точности, простоте подготовки исходных данных и анализе результатов расчета;

– Проведенные исследования тепловых полей в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов позволяют определять параметры схем замещения рассматриваемых проводов, повысить точность расчета потерь электрической энергии и проводить количественные сравнения величин потерь в симметричных и несимметричных режимах.

**Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы** обоснована теоретически и подтверждена результатами экспериментальных измерений температуры проводов на подстанции «Дружино» 10/0,4 кВ г. Омска. Расхождение результатов теоретических исследований с экспериментальными данными не превышает 7,2 %, а разности экспериментальных и расчетных значений температур – 1,2°С.

**Реализация результатов работы.** Результаты проведенных в диссертации исследований по расчету температуры и потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах воздушных линий электроэнергетических используются в ООО «Юнг – Энергонефть» г. Нефтеюганск; предложенные математические модели, алгоритмы, программа применяются в научно - исследовательской работе и учебном процессе Омского государственного технического университета (ОмГТУ) при подготовке инженеров, бакалавров, магистров энергетического института ОмГТУ.

**Личный вклад соискателя.** Постановка задач исследования, определение путей их решения, разработка математических моделей, алгоритмов, методов, анализ, обобщение, проверка достоверности исследований, полученные научные результаты и выводы принадлежат автору.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались на Международной научно-практической конференции «Энергоэффективность» (Омск, 2010г.), Всероссийской научно – технической конференции «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность» (Омск, 2009г.), Региональной молодежной научно – технической конференции «Омское время –

взгляд в будущее» (Омск, 2010г.), научных семинарах кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Энергетического института ОмГТУ.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 13 печатных работ, из них 3 статьи в изданиях рекомендованных ВАК.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 110 названий, содержит 154 стр. основного текста, 23 рис., 30 табл. на 23 страницах.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.**

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

**В первой главе** рассмотрены актуальные задачи учета температуры самонесущих изолированных проводов при расчете потерь энергии в воздушных линиях электроэнергетических систем, проведен анализ эффективности применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах, показана необходимость учета температуры в проводах воздушных линий электропередачи (ВЛЭП), выполнен обзор методов расчета потерь энергии в ВЛЭП и проведен анализ методов расчета тепловых полей.

Самонесущие изолированные провода обеспечивают высокую надежность и значительное сокращение затрат на обслуживание. Целесообразность преимущественного использования СИП в электроэнергетических системах отмечается в главе 2.4 ПУЭ и в «Положении о технической политике в распределительном электросетевом комплексе», утвержденном в 2006 г. совместным распоряжением ОАО РАО «ЕЭС России» и ОАО «ФСК ЕЭС».

Основные преимущества СИП:

– практически исключаются короткие замыкания на землю и между проводами отдельных фаз;

– снижение потерь напряжения благодаря снижению реактивного сопротивления линии - 0,1 Ом/км по сравнению с 0,35 Ом/км для неизолированных проводов (при 0,4 кВ);

– обеспечиваются потенциально более высокие допустимые токовые и температурные нагрузки, чем у неизолированных проводов аналогичного сечения;

– исключается возможность хищения электрической энергии путем прямого подключения к линии, и т.д.

Необходимость решения проблемы энергосбережения и постоянное увеличение объемов применения СИП в электроэнергетических системах обуславливает высокие требования к точности расчета потерь электрической энергии у данного типа проводов. Особенности, которые необходимо учитывать при расчетах СИП, являются зависимость сопротивления от температуры, наличие изоляции, взаимное влияние отдельных фаз друг на друга,

особенно, при несимметричной нагрузке. Эффективный учет данных особенностей СИП возможен только с позиции теории поля с использованием аналитических и численных методов расчета.

Алюминиевые токопроводящие жилы СИП характеризуются температурным коэффициентом активного сопротивления  $\alpha$ , который составляет примерно  $0,00403 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Изменению температуры СИП на  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$  соответствует изменение сопротивления алюминиевых жил на 4%. В воздушных линиях с изолированными проводами в настоящее время используется изоляция из сшитого полиэтилена, которая в нормальном режиме допускает нагрев до  $+90 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Минимальная же допустимая температура для этого материала составляет  $-50 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Тогда в рабочем диапазоне температур ( $\Delta\Theta = 90+50 = 140 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) активное сопротивление согласно будет изменяться на  $\alpha \cdot \Delta\Theta \cdot 100\% = 56\%$ . Это значение представляет собой диапазон неопределенности потерь активной мощности, рассчитываемых без учета температуры. Его величина показывает, что температура является существенным фактором, определяющим нагрузочные потери активной мощности в ВЛЭП.

В связи с необходимостью исследования тепловых полей приведена классификация численных методов расчета полей и указаны основные методы, широко применяемые на практике: метод конечных разностей, метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов, метод интегральных уравнений и гибридный метод. Раскрыта суть методов и, принимая во внимание функциональные возможности и универсальность, для расчета тепловых полей в изолированных проводах выбран МКЭ.

**Во второй главе** описываются математические модели учета температуры провода  $\Theta_{пр}$  при расчете потерь энергии в воздушных линиях электропередачи с позиции теории поля.

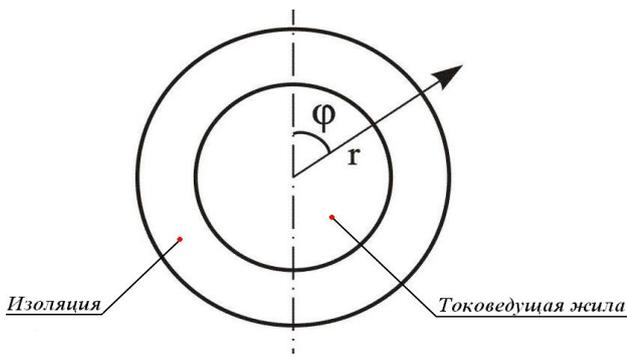


Рисунок 1 – Токоведущая жила СИП с изоляцией

При допущении равномерного распределения внутренних источников тепла по всему сечению токоведущей жилы (рисунок 1) применительно к цилиндрическим проводам бесконечной длины уравнения теплопроводности для токопроводящей жилы и изоляции самонесущих изолированных проводов в стационарном режиме в полярной системе координат имеют

вид:

$$\frac{d^2\Theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} + \frac{q_v}{\lambda_{пр}} = 0, \quad \frac{d^2\Theta}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\Theta}{dr} + \frac{q_{v,из}}{\lambda_{из}} = 0, \quad (1)$$

где  $q_v$  и  $q_{v,из}$  – объемная плотность тепловыделения в проводе и в изоляции соответственно;  $r$  – расстояние от оси провода до данной точки;  $\lambda_{пр}$  и  $\lambda_{из}$  – коэффициенты теплопроводности токоведущей жилы и изоляции соответственно.

В результате решения уравнений (1) с учетом заданных граничных условий в работе получены формулы, описывающие распределение температуры в изоляции без учета диэлектрических потерь ( $q_{v,uz}=0$ ) и с их учетом. Данные формулы соответственно имеют вид:

$$\Theta = \Theta_{внеш} + \frac{q_v r_1^2}{2\lambda_{из}} \ln \frac{r_2}{r}, \quad \Theta = \Theta_{внеш} + \frac{q_v r_1^2 - 2K_1 \ln r_1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{r_2}{r} + \frac{K_1}{2\lambda_{из}} (\ln^2 r_2 - \ln^2 r), \quad (2)$$

где  $\Theta_{внеш}$  - температура наружной поверхности провода;  $K_1 = q_{v,uz} r^2$ ;  $r_2$  и  $r_1$  - соответственно радиусы провода с изоляцией и токоведущей жилы.

На основе анализа соотношений (2) в работе обосновано, что диэлектрические потери в изоляции малы и при расчете потерь в СИП их можно не учитывать. На основе проведенных исследований, на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, в работе рассмотрены два вида соотношений для расчета потерь в СИП с учетом тепловых процессов. Первый вариант соответствует приближенному расчету и приводит к необходимости решения квадратного уравнения относительно температуры внешней поверхности изоляции  $\Theta_{внеш}$ . Второй вариант используется в практических расчетах температуры СИП методом итераций на базе формулы:

$$\Theta_{внеш}^{[k]} = \Theta_{окр} + \frac{\Delta p_0 (1 - \alpha \Theta_{окр})}{F_{нов} (1 - \alpha \Delta p_0 S_{из}) [\alpha_k (\Theta_{внеш}^{[k-1]}) + \alpha_u (\Theta_{внеш}^{[k-1]})] - \alpha \Delta p_0}, \quad (3)$$

где  $k$  - номер итерации;  $\alpha_k$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией;  $\alpha_u$  - коэффициент теплопередачи излучением;  $F_{нов}$  - площадь поверхности провода;  $\Theta_{окр}$  - температура окружающей среды;  $\Delta p_0$  - потери активной мощности, рассчитанные по сопротивлению, приведенному к температуре  $0^\circ\text{C}$ .

В выражении (3) величину  $S_{из} = \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{r_2}{r}$  можно трактовать как тепловое сопротивление изоляции. Для реализации расчетов по формуле (3) была проведена работа по нахождению выражений для коэффициентов теплопередачи излучением  $\alpha_u$  и теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$ .

Высокая точность определения  $\alpha_u$  реализуется по закону Стефана-Больцмана, согласно которому интенсивность теплопередачи излучением пропорциональна разности четвертых степеней абсолютных температур излучающего тела и окружающих поверхностей. Суммарная площадь окружающих поверхностей значительно больше площади излучающего тела (провода), а температуру окружающих поверхностей можно приближенно принять равной температуре окружающей среды (воздуха). При этих допущениях коэффициент теплопередачи излучением зависит от температуры поверхности изоляции нелинейно и рассчитывается следующим образом:

$$\alpha_u = 4,56 \cdot 10^{-8} \frac{T_{внеш}^4 - T_{окр}^4}{T_{внеш} - T_{окр}} \quad (4)$$

где  $T_{внеш}$  и  $T_{окр}$  - абсолютная температура внешней поверхности изоляции и окружающей среды.

Исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена, автором получены выражения для коэффициентов теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекции

$$\alpha_{ке} = 0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \sqrt[4]{\frac{\Delta\Theta_{внеш}}{d_2}}, \quad \alpha_{кв} = 0,044 \frac{k_v (Pv)^{0,6}}{(T_{окр} d_2)^{0,4}}. \quad (5)$$

которые отличаются от известных выражений тем, что позволяют проводить анализ температуры провода и потерь мощности в изолированных проводах с одновременным учетом атмосферного давления и температуры окружающей среды. В представленных формулах  $d_2 = 2 \cdot r_2$  – диаметр внешней поверхности изоляции;  $k_v$  – коэффициент, характеризующий угол атаки ветра;  $P$  – атмосферное давление;  $v$  – скорость ветра.

Особенностью температурных режимов четырехпроводных линий типа СИП-1 и СИП-2 является наличие теплообмена между проводами, обусловленного контактом их поверхностей. Теоретически возможны два граничных случая: 1) тепловые контактные сопротивления бесконечно велики; 2) тепловые контактные сопротивления стремятся к нулю. Первый случай означает отсутствие теплообмена между проводами. Во втором случае теплообмен, наоборот, максимален, что приводит к относительному выравниванию температур проводов, и, как следствие, к снижению потерь энергии. По оценке, сделанной автором диссертации, различие потерь энергии в несимметричных режимах при отсутствии теплообмена и при полном выравнивании температур может достигать 20%.

В действительности поверхность контакта проводов сравнительно мала. Кроме того, полное выравнивание температур невозможно даже при тепловом контактном сопротивлении, близком к нулю, поскольку теплопроводность изоляции недостаточно велика. Все это позволяет считать, что реальный тепловой режим линии будет ближе к случаю отсутствия теплообмена, чем к случаю полного выравнивания температур. Однако имеются и противоположно действующие факторы. Так, теплообмен между проводами происходит не только путем теплопроводности, но и посредством излучения. Изоляция в области соприкосновения проводов деформируется, что приводит к увеличению поверхности контакта. Кроме того, там, где расстояние между проводами не превышает толщины слоя трения воздуха, будет происходить теплообмен между проводами через тонкий слой воздуха путем теплопроводности. В целом фактические значения тепловых контактных сопротивлений требуют дополнительных исследований.

Расчет температурного режима четырехпроводной системы СИП производился на основе разработанной схемы замещения тепловых процессов (рисунок 2). Здесь  $\Delta P_A$ ,  $\Delta P_B$ ,  $\Delta P_C$  и  $\Delta P_0$  – тепловыделения (потери активной мощности) соответственно в проводах фаз и в нулевом проводе;  $S_A$ ,  $S_B$ ,  $S_C$ ,  $S_0$  – тепловые сопротивления между соответствующей токоведущей жилой и окружающей средой (собственные тепловые сопротивления);  $S_{AB}$ ,  $S_{BC}$ ,  $S_{AC}$ ,  $S_{A0}$ ,  $S_{B0}$ ,  $S_{C0}$  – взаимные тепловые сопротивления между жилами;  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$ ,  $T_0$  и  $T_{окр}$  – абсолютные температуры соответственно фазных жил, нулевой жилы и окружающей среды, К.

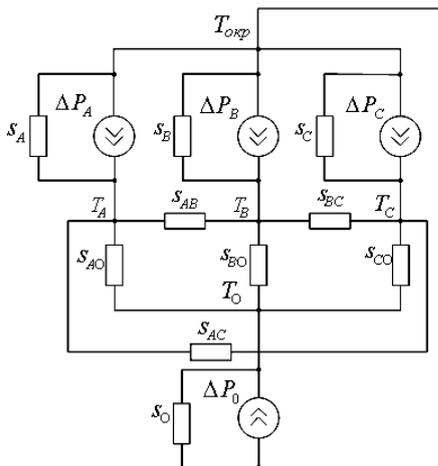


Рисунок 2 – Схема замещения тепловых процессов в четырехпроводной системе СИП

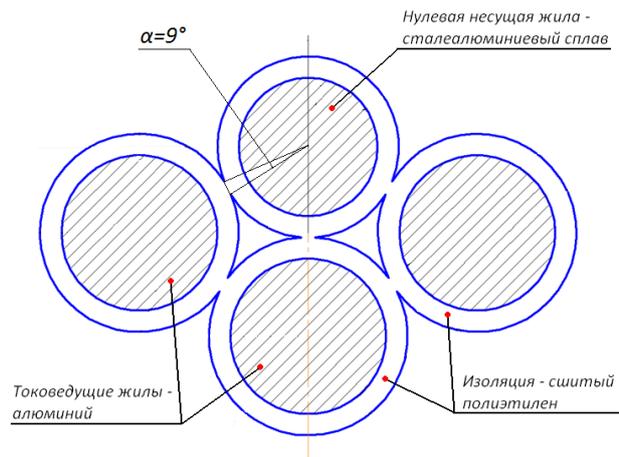


Рисунок 3 – Геометрия четырехпроводной системы СИП-2 3×120 1×95: справа и слева расположены провода фаз А и С, снизу – фаза В, сверху – нулевой провод

Данной схеме соответствует следующая система уравнений установившегося температурного режима:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta P_A &= \frac{T_A - T_B}{S_{AB}} + \frac{T_A - T_C}{S_{AC}} + \frac{T_A - T_0}{S_{A0}} + \frac{T_A - T_{окр}}{S_A}, \\ \Delta P_B &= \frac{T_B - T_A}{S_{AB}} + \frac{T_B - T_C}{S_{BC}} + \frac{T_B - T_0}{S_{B0}} + \frac{T_B - T_{окр}}{S_B}, \\ \Delta P_C &= \frac{T_C - T_A}{S_{AC}} + \frac{T_C - T_B}{S_{BC}} + \frac{T_C - T_0}{S_{C0}} + \frac{T_C - T_{окр}}{S_C}, \\ \Delta P_0 &= \frac{T_0 - T_A}{S_{A0}} + \frac{T_0 - T_B}{S_{B0}} + \frac{T_0 - T_C}{S_{C0}} + \frac{T_0 - T_{окр}}{S_0}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Особенности геометрии четырехпроводной воздушной линии (рисунок 3) позволяют уменьшить число параметров системы (6). Поскольку фазы А и С находятся в одинаковых условиях по отношению к фазе В и нулевому проводу, то  $S_{AB} = S_{BC}$  и  $S_{A0} = S_{C0}$ . Кроме того, фазы А и С не имеют непосредственного теплового контакта, следовательно,  $S_{AC} \rightarrow \infty$ .

С учетом геометрии четырехпроводной воздушной линии и зависимости активного сопротивления от температуры, систему (6) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} I_A^2 R_{20,\phi} [1 + \alpha(T_A - 293)] = \frac{T_A - T_B}{S_{AB}} + \frac{T_A - T_0}{S_{A0}} + \frac{T_A - T_{окр}}{S_A}, \\ I_B^2 R_{20,\phi} [1 + \alpha(T_B - 293)] = \frac{2T_B - T_A - T_C}{S_{AB}} + \frac{T_B - T_0}{S_{B0}} + \frac{T_B - T_{окр}}{S_B}, \\ I_C^2 R_{20,\phi} [1 + \alpha(T_C - 293)] = \frac{T_C - T_B}{S_{AB}} + \frac{T_C - T_0}{S_{A0}} + \frac{T_C - T_{окр}}{S_C}, \\ I_0^2 R_{20,0} [1 + \alpha(T_0 - 293)] = \frac{2T_0 - T_A - T_C}{S_{A0}} + \frac{T_0 - T_B}{S_{B0}} + \frac{T_0 - T_{окр}}{S_0}. \end{cases} \quad (7)$$

где  $R_{20,\phi}$  и  $R_{20,0}$  – активные сопротивления соответственно фазной и нулевой жил при температуре  $20\text{ }^\circ\text{C} \approx 293\text{ K}$ ;

Основную сложность при решении данной задачи представляет идентификация параметров системы (7), т.е. определение тепловых сопротивлений. В общем случае это можно сделать на основе расчета теплового поля четырехпроводной системы. При этом необходимо учитывать, что собственные тепловые сопротивления нелинейны.

С целью определения тепловых сопротивлений автором был проведен ряд расчетов теплового поля четырехпроводной системы провода марки СИП-2  $3 \times 120 \ 1 \times 95$ . Моделирование поля осуществлялось методом конечных элементов с помощью программы Elcut 5.6 (рисунок 4). При этом  $\alpha_k$  принимался равным постоянной величине (что соответствует вынужденной конвекции), а лучистый теплообмен не учитывался. Кроме того, не учитывалась температурная зависимость активных сопротивлений токоведущих жил и нулевого провода. Данные допущения не позволяют правильно рассчитать тепловой режим в реальных условиях. Однако каждому решению, полученному таким способом, соответствует вполне реальный режим при несколько других токах и условиях охлаждения (коэффициентах теплоотдачи). Этого достаточно для расчета тепловых сопротивлений.

Таблица 1 – Расчетные режимы СИП

	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$
1	$0,25 I_{НОМ}$	$0,5 I_{НОМ}$	$0,75 I_{НОМ}$	$I_{НОМ}$
2	$0,5 I_{НОМ}$	$0,75 I_{НОМ}$	$I_{НОМ}$	$0,25 I_{НОМ}$
3	$0,75 I_{НОМ}$	$0, I_{НОМ}$	$0,25 I_{НОМ}$	$0,5 I_{НОМ}$
4	$I_{НОМ}$	$0,25 I_{НОМ}$	$0,5 I_{НОМ}$	$0,75 I_{НОМ}$

Созданная методика основана на расчете четырех режимов, различающихся значениями токов в жилах, один из вариантов которых представлен в таблице 1.

При этом  $\alpha_k$  и  $T_{окр}$  оставались постоянными для всех режимов, поскольку иначе менялись бы собственные тепловые сопротивления. Площади соприкосновения проводов задавались с помощью углов с вершинами в центрах жил (рисунок 3).

Обозначим результаты расчета температур жил в  $i$ -м режиме как  $T_{Ai}$ ,  $T_{Bi}$ ,  $T_{Ci}$ ,  $T_{0i}$ , а соответствующие тепловыделения как  $\Delta P_{Ai}$ ,  $\Delta P_{Bi}$ ,  $\Delta P_{Ci}$  и  $\Delta P_{0i}$ . Тогда на основании системы (6) для фазы А можно записать:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P_{A1} = \frac{T_{A1} - T_{B1}}{S_{AB}} + \frac{T_{A1} - T_{C1}}{S_{AC}} + \frac{T_{A1} - T_{01}}{S_{A0}} + \frac{T_{A1} - T_{окр}}{S_A}, \\ \Delta P_{A2} = \frac{T_{A2} - T_{B2}}{S_{AB}} + \frac{T_{A2} - T_{C2}}{S_{AC}} + \frac{T_{A2} - T_{02}}{S_{A0}} + \frac{T_{A2} - T_{окр}}{S_A}, \\ \Delta P_{A3} = \frac{T_{A3} - T_{B3}}{S_{AB}} + \frac{T_{A3} - T_{C3}}{S_{AC}} + \frac{T_{A3} - T_{03}}{S_{A0}} + \frac{T_{A3} - T_{окр}}{S_A}, \\ \Delta P_{A4} = \frac{T_{A4} - T_{B4}}{S_{AB}} + \frac{T_{A4} - T_{C4}}{S_{AC}} + \frac{T_{A4} - T_{04}}{S_{A0}} + \frac{T_{A4} - T_{окр}}{S_A}. \end{array} \right. \quad (8)$$

Путем решения системы (8) определяются тепловые сопротивления  $S_{AB}$ ,  $S_{AC}$ ,  $S_{A0}$ ,  $S_A$ .

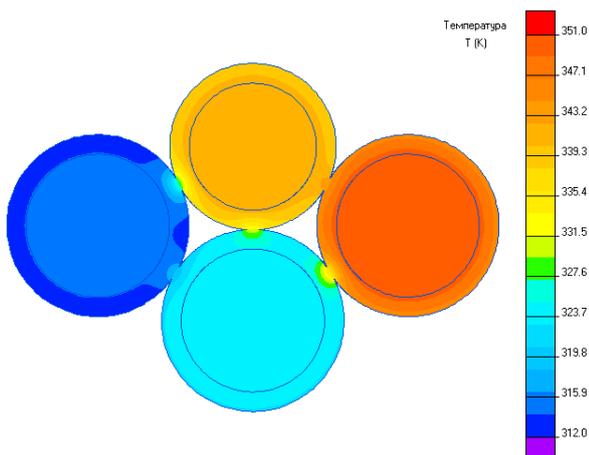


Рисунок 4 – Распределение температуры в проводе СИП-2 3×120 1×95, при расчете для режима №1 (таблица 2)

Системы уравнений, аналогичные (8), были составлены и решены также для других фаз и нулевого провода. На основе этого были найдены значения всех тепловых сопротивлений, входящих в систему (6) или (7), при данных условиях охлаждения. Суммарное число уравнений в системах (8) равно 16, что больше общего количества тепловых сопротивлений как в системе (7), так и в системе (6). Поэтому некоторые тепловые сопротивления вычислялись более одного раза. При этом полученные значения оказывались близкими, но отличными друг от друга (таблица 2). Вероятно, это связано с перераспределением температуры по открытой

12

поверхности каждого провода под действием тепловых процессов в соседних проводах. В качестве окончательного результата были приняты средние значения сопротивлений. Исключение составляют величины  $S_{AC}$ , которые различаются достаточно сильно. Однако эти различия не противоречат сделанному выводу, поскольку ввиду больших значений  $S_{AC}$  они исключаются из системы (7) и из дальнейшего рассмотрения.

Аналогичные расчеты проводились также при других условиях охлаждения (скорости ветра) с целью варьирования коэффициента теплоотдачи, и, как следствие, собственных тепловых сопротивлений. Было обнаружено, что при этом взаимные сопротивления тоже изменяются, хотя и в значительно меньшей степени, чем собственные; изменения собственных и взаимных сопротивлений имеют разные знаки (таблица 3).

Таблица 2 – Результаты расчета взаимных тепловых сопротивлений провода СИП-2 3×120 1×95 (скорость ветра 1 м/с, угол соприкосновения 9°, лучистый теплообмен отсутствует)

Фаза	Ток в режиме №1, А	Ток в режиме №2, А	Ток в режиме №3, А	Ток в режиме №4, А	$S_{AB}$ , К/Вт	$S_{BC}$ , К/Вт	$S_{AC}$ , К/Вт	$S_{A0}$ , К/Вт	$S_{B0}$ , К/Вт	$S_{C0}$ , К/Вт
A	100	200	100	300	3,767	–	1554	3,922	–	–
B	200	100	400	200	3,796	3,634	–	–	4,024	–
C	400	400	200	400	–	3,673	91	–	–	3,953
0	300	300	300	100	–	–	–	3,891	3,917	3,912

Таблица 3 – Зависимость тепловых сопротивлений  $S_A$  и  $S_{AB}$  провода СИП-2 3×120 1×95 от скорости ветра (угол соприкосновения 9°, лучистый теплообмен отсутствует)

Скорость ветра, м/с	1	2	3	4	5
$S_A$ , К/Вт	1,143	0,807	0,654	0,561	0,5
$S_{AB}$ , К/Вт (расчет по фазе A)	3,767	3,911	4,073	4,169	4,268

Учет взаимосвязи собственных и взаимных сопротивлений удобнее всего осуществить путем аппроксимации обратных величин линейными функциями:

$$S_{AB}^{-1} = a_1 + b_1 S_{cp}^{-1}, \quad S_{A0}^{-1} = a_2 + b_2 S_{cp}^{-1}, \quad S_{B0}^{-1} = a_3 + b_3 S_{cp}^{-1}, \quad (9)$$

где  $S_{cp}$  – среднее значение собственных сопротивлений.

$$S_{cp} = \frac{S_A + S_B + S_C + S_0}{4}. \quad (10)$$

В свою очередь, собственные сопротивления могут быть аппроксимированы следующим образом:

$$S_i = c_i + \frac{d_i}{\alpha_{\kappa,i} + \alpha_{u,i}}, \quad (11)$$

где  $i = A, B, C, 0$ ;  $\alpha_{\kappa,i}$  и  $\alpha_{u,i}$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением соответственно; первое слагаемое моделирует

тепловое сопротивление изоляции, а второе – тепловое сопротивление окружающей среды.

Как следует из (5), коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{к,i}$  при вынужденной конвекции представляют собой постоянные величины, а при естественной конвекции, так же как и  $\alpha_{u,i}$ , являются функциями средней температуры внешней поверхности соответствующего провода  $T_{внеш,i}$ . Эту температуру можно приближенно определить следующим образом:

$$T_{внеш,i} = T_i - \Delta P_i c_i, \quad (12)$$

Система уравнений (7) дополняется выражениями (9-12), а также формулами, определяющими зависимость коэффициентов теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением от температуры поверхности соответствующего провода. В результате получается система уравнений (13), которая представляет собой математическую модель, позволяющую определить температуры и потери мощности всех жил СИП с учетом их взаимного влияния:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_A \left[ \frac{1}{S_A} + a_1 + a_2 + \frac{(b_1 + b_2)}{S_{CP}} \right] = \Delta P_A + \frac{T_{окр}}{S_A} + T_B \left( a_1 + \frac{b_1}{S_{CP}} \right) + T_0 \left( a_2 + \frac{b_2}{S_{CP}} \right) \\ T_B \left[ \frac{1}{S_B} + 2a_1 + a_3 + \frac{(2b_1 + b_3)}{S_{CP}} \right] = \Delta P_B + \frac{T_{окр}}{S_B} + (T_A + T_C) \left( a_1 + \frac{b_1}{S_{CP}} \right) + T_0 \left( a_3 + \frac{b_3}{S_{CP}} \right) \\ T_C \left[ \frac{1}{S_C} + a_1 + a_2 + \frac{(b_1 + b_2)}{S_{CP}} \right] = \Delta P_C + \frac{T_{окр}}{S_C} + T_B \left( a_1 + \frac{b_1}{S_{CP}} \right) + T_0 \left( a_2 + \frac{b_2}{S_{CP}} \right) \\ T_0 \left[ \frac{1}{S_0} + 2a_2 + a_3 + \frac{(2b_2 + b_3)}{S_{CP}} \right] = \Delta P_2 + \frac{T_{окр}}{S_0} + (T_A + T_C) \left( a_2 + \frac{b_2}{S_{CP}} \right) + T_B \left( a_3 + \frac{b_3}{S_{CP}} \right) \\ S_{CP} = \frac{S_A + S_B + S_C + S_0}{4}; \quad S_i = c_i + \frac{d_i}{a_{к,i} + a_{u,i}}; \\ T_{внеш,i} = T_i - \Delta P_i c_i; \quad \Delta P_i = I_i^2 r_{20,i} (1 + 0,00403(T_i - T_{окр})); \\ a_{кe,i} = 0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \sqrt[4]{\frac{T_{внеш,i} - T_{окр}}{d_{2,i}}}; \quad a_{кв,i} = 0,044 \frac{k_v (Pv)^{0,6}}{(T_{окр} d_{2,i})^{0,4}}; \quad a_{кв,i} = 4,56 \cdot 10^{-8} \frac{T_{внеш,i}^4 - T_{окр}^4}{T_{внеш,i} - T_{окр}} \end{array} \right. \quad (13)$$

Проведенные на основе системы (13) исследования показали, что несимметрия режима приводит к значительному увеличению потерь энергии при той же передаваемой мощности. Этот эффект дополнительно усиливается температурной зависимостью сопротивления. В результате кратность потерь в четырехпроводной системе по отношению к симметричному режиму может достигать 8.

В третьей главе представлены алгоритмы и программы расчета потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах с учетом температуры.

Разработанный алгоритм расчета потерь в одиночном изолированном проводе основывается на использовании уравнений (3-5). В работе также создан алгоритм расчета потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов, использующий математическую модель представленную системой уравнений (13). Соответствующие алгоритмам программы расчета потерь реализованы в программном комплексе MathCAD.

Параметры схемы замещения тепловых процессов в четырехпроводной системе СИП определяются методом конечных элементов

В случае изотропной среды дифференциальное уравнение теплопроводности при заданных граничных условиях имеет вид

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v ; \quad (14)$$

В уравнении (14)  $T$  и  $q_v$  – температура и объемная плотность внутренних источников тепла,  $c$  - удельная теплоемкость среды;  $\rho$  – плотность среды;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности.

Граничные условия на поверхности тела задаются следующим образом:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} l_x + \lambda \frac{\partial T}{\partial y} l_y + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} l_z + q_s + \alpha(T - T_{окр}) = 0 \text{ на } S \quad (15)$$

где  $q_s$  – тепловой поток на поверхности  $S$ ,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

При использовании метода конечных элементов решение дифференциального уравнения в частных производных (14) с заданными граничными условиями (15) заменяется поиском нахождения минимума функционала вида

$$\Omega = \int_V 0,5 \left[ \lambda_x \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_y \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_z \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 - 2q_v T \right] dV + \int_S [q_s T + 0,5\alpha(T - T_{окр})^2] dS . \quad (16)$$

При минимизации функционала получается система алгебраических уравнений, решение которой позволяет определить численные значения температуры в исследуемой области.

Расчет тепловых полей методом конечных элементов четырехпроводной системе СИП осуществлялся с помощью программных комплексов Ansys и Elcut. Принимая во внимание возможности инженерного моделирования тепловых задач, несложный, русифицированный интерфейс, простоту описания сложных моделей и широкие аналитические возможности, основной объем работ по расчету тепловых полей был выполнен программным комплексом Elcut 5.6.

**В четвертой главе** рассматривается применение результатов проведенных исследований к определению  $\Theta_{\text{пр}}$  и потерь в ВЛЭП в зависимости от режимных и климатических факторов.

В настоящее время расчеты потерь активной мощности и энергии в самонесущих изолированных проводах осуществляются согласно Инструкции по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям, утвержденной приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008, №326. При средней загрузке линий ниже экономической плотности тока температура провода может приравниваться температуре окружающей среды. В случае отсутствия данных о температуре провода рекомендуется принимать её равной 20°C.

Проведено сравнение потерь активной мощности для четырехпроводной системы самонесущих изолированных проводов, найденных по следующим методам:

Метод №1 – Расчет потерь при отсутствии данных о реальной температуре провода (температура провода принимается равной 20 °С).

Метод №2 – Расчет потерь при температуре провода, равной температуре окружающей среды ( $\Theta_{\text{пр}} = \Theta_{\text{окр}}$ ).

Метод №3 – Расчет потерь при температуре провода, рассчитанной с учетом тепловых процессов в изоляции, но без учета теплообмена между фазами. Провода отдалены друг от друга, теплообмен между фазами отсутствует.

Метод №4 – Расчет потерь при температуре провода, рассчитанной с учетом тепловых процессов в изоляции и теплообмена между фазами. Площадь соприкосновения проводов определена с помощью углов с вершинами в центрах жил (рисунок 3). Для четырехпроводной системы СИП угол соприкосновения принят равным 9°.

Исходные данные: температурный коэффициент электрического сопротивления сталеалюминевых проводов  $\alpha=0,00403$  1/град; коэффициент лучеиспускания для самонесущих изолированных проводов, находящихся в эксплуатации, принят равным  $\varepsilon=0,8$ ; коэффициент, учитывающий угол атаки ветра, принят равным  $k_v=0,5$ ; токи в фазах:  $I_A=100$  А,  $I_B=200$  А,  $I_C=100$  А,  $I_0=300$  А.

Результаты расчетов потерь активной мощности на метр длины по четырем методам для провода СИП-2 3×120 1×95 в условиях вынужденной конвекции при температурах окружающей среды  $\Theta_{\text{окр}} = -20$  °С и  $\Theta_{\text{окр}} = 20$  °С представлены соответственно на рисунках 5а и 5б, а также в таблице 4. Погрешности методов

№1, №2 и №3 относительно метода №4 обозначены соответственно  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\delta_3$ . Значительные величины погрешностей  $\delta_1$  и  $\delta_2$  (таблица 4), достигающие 16%, указывают на необходимость учета реальной температуры токопроводящих жил.

Таблица 4 – Потери активной мощности для провода СИП-2 3×120 1×95

Температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}$ , °C	Скорость ветра, м/с	Потери активной мощности, рассчитанные по методу, Вт				$\delta_1, \%$	$\delta_2, \%$	$\delta_3, \%$
		№1	№2	№3	№4			
20	1	85,80	85,80	95,41	101,26	15,27	15,27	5,77
	2			93,04	97,57	12,06	12,06	4,64
	3			91,85	95,73	10,37	10,37	4,05
	4			91,10	94,59	9,29	9,29	3,68
	5			90,58	93,79	8,51	8,51	3,42
-20	1	85,80	72,07	81,17	85,88	0,09	16,08	5,49
	2			78,62	82,15	4,44	12,27	4,30
	3			77,43	80,42	6,70	10,37	3,72
	4			76,71	79,37	8,11	9,19	3,35
	5			76,21	78,65	9,10	8,36	3,10

Погрешность между методами №3 и №4 варьируется в пределах от 3,10% до 5,77%, что находится на уровне инженерной погрешности расчетов. Однако это не исключает возможности большей погрешности при других условиях. На этом основании сделан вывод о целесообразности использования метода, учитывающего теплообмен между фазами, то есть метода №4.

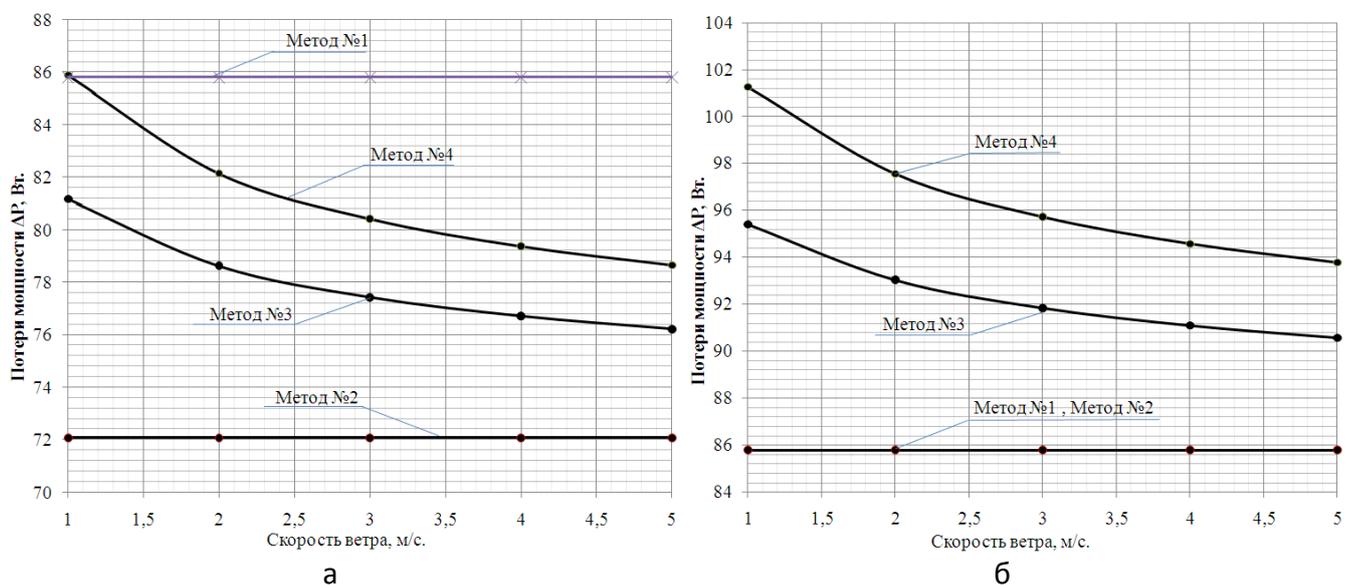


Рисунок 5 – Потери активной мощности для провода СИП-2 3×120 1×95: а – при температуре окружающей среды  $\Theta_{\text{окр}} = -20^\circ\text{C}$ ; б – при температуре окружающей среды  $\Theta_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}$

Для подтверждения достоверности теоретических результатов проведенных исследований и апробации программного комплекса на подстанции «Дружино» 10/0,4 кВ г. Омска был проведен ряд экспериментальных исследований. Объектом исследования являлись самонесущие изолированные провода ВЛЭП марки СИП-2 3х35 1х35. Измерение температуры проводилось

тепловизионным комплексом NEC 7700TH с приборной погрешностью 2 %. Изменение скорости и направления ветра осуществлялось анемометром TESTO 416, характеризующимся приборной погрешностью 1,5 %. Проведенный анализ показал превышения реальной температуры над расчетной. При этом погрешности расчета по усовершенствованным и созданным математическим моделям не превышают 7,2 %, а разности экспериментальных и расчетных значений температур – 1,2°C.

### **Основные выводы и результаты**

1. Проведен обзор положительного опыта применения самонесущих изолированных проводов в воздушных линиях электроэнергетических систем. Установлено, что для достоверного определения потерь в самонесущих изолированных проводах из-за сложного характера взаимного влияния отдельных фаз необходимо проведение расчетов тепловых полей численным методом.

2. Созданная методика, использующая основанный на методе конечных элементов цепно-полевой подход к построению математических моделей, описывающих тепловые процессы в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов, закладывает теоретическую основу для расчета потерь электрической энергии в получающих все большее распространение проводах нового типа.

3. Найденные выражения для коэффициентов теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением самонесущих изолированных проводов воздушных линий электропередачи отличаются от известных выражений тем, что позволяют проводить анализ потерь в изолированных проводах с одновременным учетом атмосферного давления и температуры окружающей среды.

4. Полученные зависимости собственных и взаимных тепловых сопротивлений от коэффициентов теплоотдачи конвекцией и теплопередачи излучением и разработанная методика определения параметров схем замещения тепловых режимов повышают достоверность расчетов потерь в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов для произвольного вида несимметрии.

5. Разработанные алгоритмы и программа определения потерь электрической энергии, основанные на использовании собственных и взаимных тепловых сопротивлений, отличаются возможностью подробного учета особенностей самонесущих изолированных проводов при необходимой на практике точности, простоте подготовки исходных данных и анализе результатов расчета.

6. Выполненные исследования тепловых полей в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов позволили определить параметры схемы замещения тепловых режимов рассматриваемых проводов и повысить точность расчета потерь электрической энергии.

7. Проведенные экспериментальные исследования температуры самонесущих изолированных проводов в условиях эксплуатации свидетельствуют о достоверности созданного цепно-полевого подхода моделирования потерь.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

***Статьи в периодических научных изданиях по перечню ВАК***

1. Коррекция технологических потерь электрической энергии ВЛ 35кВ электрических сетей ООО «Роснефть-Юганскнефтегаз» на основе учета климатических и режимных условий / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник. - 2010. - № 1(87). - С. 127-132.

2. Оценка достоверности результатов моделирования комплексом программ для расчета потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом температуры токопроводящих жил / А. А. Бубенчиков [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.- 2011. - №2. - С. 302-306.

3. Исследование потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводах на основе расчета тепловых полей методом конечных элементов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник.- 2012. - № 1(107). - С. 172-176

***Статьи в научных изданиях, материалы региональных и международных конференций***

4. Бубенчиков, А. А. Применение численных методов расчета тепловых полей для вычисления потерь энергии в электрических сетях с учетом температуры проводников / А. А. Бубенчиков, С. С.Гиршин, Е. В. Петрова // Омский научный вестник. – 2008. – № 1(64). – С. 84-87.

5. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник. - 2009. - № 3(83). - С. 171-175

6. Эффективность применения самонесущих изолированных проводов в современных электроэнергетических системах / А. А. Бубенчиков [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – № 1(77). – С. 106-108.

7. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / А. А. Бубенчиков, [и др.] // Омский научный вестник. - 2009. - № 3(83). - С. 176-179

8. Вывод уравнения для коэффициента теплоотдачи вынужденной конвекцией в самонесущих изолированных проводах / А. А. Бубенчиков [и др.] // Энергоэффективность / Материалы междунар. научн-практ. конф. – Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 20-24.

9. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов / А. А. Бубенчиков [и др.] // ОмГТУ, 2010. – 23с. Деп. в ВИНТИ 08.04.10 № 198-В2010.

10. Исследование перегрева проводов и потерь мощности в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом режимных и климатических факторов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Энергетика и энергосбережение : межвуз. темат. сб. науч. тр.. – Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 97-103.

11. Бубенчиков, А. А. Влияние несимметрии режима четырехпроводных линий электропередачи на потери мощности и энергии / А. А. Бубенчиков, С. С. Гиршин // Энергетика и энергосбережение : межвуз. темат. сб. науч. тр.. – Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 46-55.

12. Бубенчиков, А. А. Математическая модель определения потерь энергии в самонесущих изолированных проводах электроэнергетических систем с учетом нагрузки и климатических факторов / А. А. Бубенчиков // Россия молодая: передовые технологии в промышленность / Материалы Всерос. научн-техн. конф. – Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2011. – Кн 2. – С. 14-20.

13. Методика потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов на основе расчета тепловых полей методом конечных элементов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Тематич. сб. науч. трудов. – Омск. – 2011. С.-198-203.