

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Омский государственный технический университет»

УДК 621.311

На правах рукописи



БИГУН Александр Ярославович

**РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ПРОВОДАХ
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ
РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

Специальность 05.14.02 –
«Электрические станции и электроэнергетические системы»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
Горюнов Владимир Николаевич

Омск – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭКЛЕКТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ	11
1.1. Способы повышения пропускной способности.....	11
1.2. Анализ и расчет потерь в электрических сетях.....	14
1.3. Учет температурной зависимости элементов сети при расчете потерь электрической энергии.....	17
1.3.1. Методы расчета потерь электрической энергии с учетом температуры провода в стационарном режиме работы сети.....	19
1.3.2. Эффективность учета температурной зависимости активного сопротивления проводов при выборе мероприятий по увеличению пропускной способности.....	22
1.4. Нестационарные тепловые режимы работы проводов воздушных линий электропередачи	25
1.5. Выводы.....	30
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ.....	31
2.1. Метод расчета IEEE.....	31
2.2. Метод SIGRE.....	34
2.3. Сравнение методов IEEE и SIGRE.....	39
2.3.1. Нагрев проводника.....	39
2.3.2. Охлаждение проводника.....	40
2.4. Устройства для контроля режимных и климатических факторов при мониторинге воздушных линий электропередачи.....	42
2.5. Выводы.....	46
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ	

НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ.....	47
3.1. Аналитическое решение уравнения теплового баланса нестационарного теплового режима неизолированного провода.....	49
3.2. Математическая модель расчета температуры изолированного провода линии электропередачи при изменении режимно-атмосферных факторов	57
3.3. Алгоритм расчета потерь электрической энергии в изолированных проводах с учетом температуры в нестационарном режиме.....	63
3.4. Алгоритм расчета потерь электрической энергии в неизолированных проводах с учетом температуры в нестационарном режиме.....	67
3.5. Выводы.....	71
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ.....	72
4.1. Сравнение аналитического и численного решений дифференциального уравнения нестационарного теплового режима работы провода	72
4.2. Сравнение аналитического решения дифференциального уравнения теплового режима в нестационарном тепловом режиме провода с экспериментальными данными.....	76
4.3. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи	86
4.4 Расчет температуры в нестационарном режиме с использованием программного комплекса ANSYS.....	94
4.5. Уточнение потерь электрической энергии	101
4.6. Вывод.....	105
Заключение.....	106
Библиографический список	108

Приложение 1.....	123
Приложение 2.....	124
Приложение 3.....	127
Приложение 4.....	130
Приложение 5.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время наблюдается рост спроса на электроэнергию, но низкая энергетическая и экономическая эффективность электросетевого комплекса не может удовлетворить в полном объеме имеющийся спрос. Причина сложившейся ситуации заключается в высоком износе основных производственных фондов [71], а также значительные потери электрической энергии в российских электросетях при ее передаче и распределении, которые составляют 11 % полезного отпуска, что выше аналогичных показателей зарубежных компаний, которые составляют 6–8 % [56]. Немаловажную роль также играет неэффективное использование имеющегося оборудования.

С целью повышения эффективности работы электросетевого комплекса разработаны и приводятся в исполнение следующие нормативные документы: Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р «Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации», «Энергетическая стратегия России на период до 2030 года», Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 "Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики». В данных документах говорится о необходимости внедрения технологий, которые уже используются в сетевых комплексах развитых стран, об увеличении пропускной способности существующих сетей электроснабжения и снижении потерь электрической энергии. Поэтому снижение потерь электрической энергии, увеличение пропускной способности, а также повышение энергоэффективности электросетевого комплекса в целом являются актуальной задачей и приоритетным направлением государственной политики Российской Федерации [46, 47, 51, 52, 56, 71].

Вопросом расчета потерь электроэнергии занимаются: коллективы АО «Институт «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ», АО «Научно-технический центр

Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы России», ВПО «Союзтехэнерго», ИСЭМ СО РАН, Национальный исследовательский университет «МЭИ», Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина – (МГАУ), Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Уральский федеральный университет (УрФУ) имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Сибирский федеральный университет, Белорусский национальный технический университет, Новосибирский государственный технический университет, ФИЦ Карельский научный центр РАН, Северо-Кавказский федеральный университет, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова; исследователи: А. А. Герасименко, В. Э. Воротницкий, И. В. Наумов, Д. А. Иванов, Г. К. Зарудский, Г. В. Шведов, Н. Н. Путилова, М. И. Фурсанов, В. И. Бартоломей, А. В. Ромодин, О. В. Дичина, В. В. Михайлов, В. А. Веников, В. С. Железко, В. И. Идельчик, М. А. Калинин, И. И. Левченко, В. Г. Пекелис, Г. Е. Поспелов, В. А. Строев, С. С. Гиршин, Т. П. Тихомирова, Г. А. Борисов, А. В. Лыкин, В. Н. Горюнов, А. И. Троицкий, С. С. Костинский, Е. И. Сацук, А. С. Засыпкин, А. А. Бубенчиков, V. Cecchi, J. R. Daconti, J. Fu, A. V. Garcia, A. Goran, Huu-Minh, Jianhui Wang, M. Knudson, D. C. Lawry, J.-L. Lilien, M. Mahmoudian, J. K. Raniga, R. K. Rayadu, D. Roberts, T. O. Seppa, P. Schell, Y. Yang и другие отечественные и зарубежные ученые.

Большая часть потерь электрической энергии приходится на потери, связанные с протеканием электрического тока, т.е. нагрузочные потери. В России, в связи с большими расстояниями, значительной протяженностью воздушных линий электропередачи происходят и большие нагрузочные потери в данных линиях. Использование новых типов проводов воздушных линий, таких как самонесущие изолированные провода, высокотемпературные провода повышенной пропускной способности,

позволяет уменьшить потери напряжения в сети, увеличить пропускную способность линий, сократить эксплуатационные расходы. Однако недостаточная исследованность нестационарных температурных режимов проводов неизбежно приводит к погрешности расчетов потерь электрической энергии и определения предельно допустимого тока. Таким образом, исследование нестационарных тепловых режимов работы проводов воздушных линий электропередачи положительно скажется на повышении точности расчетов электрических потерь и предельно допустимых токов.

Цель работы – повышение точности расчетов температуры и потерь электрической энергии при нестационарных тепловых режимах в современных проводах воздушных линий электроэнергетических систем при изменении атмосферных и режимных факторов.

Задачи исследования:

1. С учётом развития новых технологий в электроэнергетике проанализировать существующие в мире методы расчета температуры и потерь электрической энергии при изменении климатических и режимных факторов.

2. Разработать математическую модель решения уравнения теплового баланса при нестационарном режиме работы воздушных линий аналитическим методом.

3. Разработать и реализовать алгоритм расчета температуры и потерь энергии в динамических режимах работы линий электропередачи.

4. Провести исследование влияния атмосферных и режимных факторов на тепловые режимы работы проводов воздушных линий.

Объект исследования – воздушные линии электропередачи электроэнергетических систем.

Предмет исследования – методы расчета потерь электрической энергии и предельно допустимых токов в проводах воздушных линий электроэнергетических систем при нестационарном режиме работы.

Методы исследования.

При выполнении работы использовались: теория теплопередачи, элементы теории электрических цепей, методы аналитического решения линейных и нелинейных дифференциальных уравнений, численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений. Математическое моделирование проводилось в программных комплексах MathCAD и ANSYS.

Научная новизна:

1. Разработан приближенный аналитический метод решения дифференциального уравнения теплового баланса нестационарного теплового режима для неизолированных и изолированных проводов.

2. Получены выражения для определения средней температуры и потерь энергии за время нестационарного теплового режима.

3. Разработаны алгоритмы для расчета потерь электрической энергии и температуры в изолированных и неизолированных проводах воздушных линий при нестационарных тепловых режимах работы.

Практическая значимость:

Получен приближенный аналитический метод решения уравнения теплового баланса в нестационарном режиме, не уступающий по точности численным методам расчета, что позволяет, с необходимой на практике точностью рассчитывать температуру провода.

– Найдены выражения определения средней температуры и потерь энергии в проводах за время нестационарного теплового режима с учетом совместного влияния климатических и режимных факторов.

– Разработана программа для расчета потерь электрической энергии в современных проводах при изменении атмосферных и режимных факторов, основанная на аналитическом решении уравнения теплового баланса. Отличительной особенностью программы является простота подготовки исходных данных и анализа результатов расчета.

– Выявлена связь между допустимой токовой нагрузкой и температурой окружающей среды. Проведенные исследования по определению предельно допустимых токовых нагрузок позволяют повысить

пропускную способность воздушных линий с учетом климатических факторов.

Достоверность научных исследований и результатов диссертационной работы обоснована теоретически. Расхождение результатов полученных разработанным методом и численным методом Рунге–Кутта не превышает 0,03 %, а разности значений температур аналитического метода и численного – 0,01 °С. Расхождения с экспериментальными данными не превышают 9 %.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных в работе исследований по расчету температуры и потерь электрической энергии при нестационарных тепловых режимах работы современных типов проводов воздушных линий электроэнергетических систем используются в филиале ПАО «МРСК Сибири» – Омскэнерго», а также применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе Омского государственного технического университета (ОмГТУ) при подготовке специалистов, бакалавров, магистров энергетического института ОмГТУ.

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

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!»: V Всерос. науч.–техн. конф. с междунар. участием. – Омск : ОмГТУ, 2013; «Актуальные проблемы энергетики АПК» : VI Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2015; Междунар. науч.-техн. Конф. «Пром-Инжиниринг». – Челябинск, 2016; 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) 2016; Динамика систем, механизмов и машин: X Международная IEEE науч.-техн. – Омск: ОмГТУ, 2016; «Россия молодая: передовые технологии – в промышленность!»: V Всерос. науч.–техн. конф. с междунар. участием. –

Омск : ОмГТУ, 2017; Динамика систем, механизмов и машин: XI Международная IEEE науч.-техн. – Омск. ОмГТУ, 2017.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 6 статей в изданиях рекомендованных ВАК.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит: из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований. Содержит: 121 страницу основного текста, 43 рисунка , 21 таблицу.

ГЛАВА 1. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ И СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

1.1. Способы повышения пропускной способности

Развитие техники приводит к увеличению темпов потребления энергетических ресурсов [21, 42]. Современные предприятия и частные потребители потребляют все большие объемы электрической энергии, и это потребление растет. Российская Федерация не является исключением. Такие регионы как Московская, Ленинградская, Архангельская, Волгоградская области, Краснодарский и Пермский края, Республика Коми, Карелия, Тува, Дагестан и др. превышают запланированные величины электропотребления [47, 56, 71]. В часы пиковых нагрузок данный факт приводит к недостатку генерирующих мощностей и большим потерям электрической энергии. Увеличение потерь приводит к снижению и так недостаточной пропускной способности линий электропередачи. Немаловажную роль в снижении пропускной способности сети играет износ электротехнологического оборудования станций и подстанций [71].

Для улучшения сложившейся ситуации в работу вводятся новые генерирующие мощности как от классических источников, так и от возобновляемых источников электрической энергии. Помимо этого производится модернизация и замена оборудования электроэнергетического сектора.

Для модернизации электрических сетей используются следующие методы, которые имеют как свои плюсы, так и свои недостатки [19, 27, 35, 41, 42]:

Повышение номинального напряжения. Применение более высоких уровней напряжения приводит к увеличению пропускной способности за счет того, что снижаются токи по линиям и оборудованию. В то же время с увеличением пропускной способности требуются значительные

капиталовложения: на закупку нового оборудования с изоляцией, соответствующей выбранному классу напряжения, на замену опор воздушных линий, так как требуется новое размещение проводов на опоре и на высоте над поверхностью земли, на сопутствующие работы по обрезке и выкорчевыванию деревьев и кустарников. Также необходимо учитывать ширину коридоров трасс воздушных линий.

Увеличение сечения. С увеличением сечения провода растет нагрузка на опоры воздушных линий (ВЛ) электропередачи за счет увеличения массы провода. Также увеличение сечения проводов увеличивает ветровую и гололедную нагрузку, что может привести к разрушению опор.

Строительство новых линий. Строительство новых линий производится, как правило, уже в существующих коридорах, отведенных для ВЛ. Строительство новых линий зачастую затрудняется расположением ВЛ на территориях с ограничением строительства, таких как: заповедники, государственные заказники, населенные пункты. В населенных пунктах строительство новых линий затрудняется тем, что есть определенные требования по электромагнитному излучению, помехам и выделению места для зоны отчуждения.

Замена традиционных марок проводов на провода с улучшенными эксплуатационными характеристиками (высокотемпературные провода повышенной пропускной способности (термические провода) [13, 45, 53], провода с уменьшенным провесом). Среди путей повышения пропускной способности электросетей использование проводов нового поколения – это достаточно результативный и мало затратный способ. Провода с повышенной рабочей температурой и пропускной способностью получили достаточно широкое распространение за рубежом. Из опыта применения таких проводов за рубежом видно, что в значительной степени снижается риск выхода воздушной линии из строя из-за повреждений и воздействий экстремальных погодных условий.

Повышение нагрузки с учетом метеоусловий. Данный метод основывается на расчете температуры провода в стационарном режиме по усредненным значениям погодных условий по всей протяженности линии за достаточно большой промежуток времени, что позволяет выявить возможность увеличения передачи электрической энергии [4, 5, 14, 15, 18, 39, 40, 43, 60, 70, 87]. Такой подход обладает минимальными капитальными затратами на реализацию, но несет за собой возможность больших потерь электрической энергии и стрелы провеса проводов в местах с наихудшими условиями охлаждения, по сравнению со средними значениями. Для того, чтобы избежать больших стрел провесов проводов расчет допустимой токовой нагрузки производится по наихудшим условиям охлаждения проводов, которые выбираются по всей трассе.

Приведенные выше методы направлены как на повышение пропускной способности, так и на снижение потерь электрической энергии. Этот факт немаловажен, так как с ростом потребления электрической энергии растут и потери. По данным ОАО «ФСК ЕЭС» потери электрической энергии увеличиваются. Потери электрической энергии в сетях ОАО «ФСК ЕЭС» 2015 году превысили аналогичные 2008 года на 7,37 % (рисунок 1.1) [69].

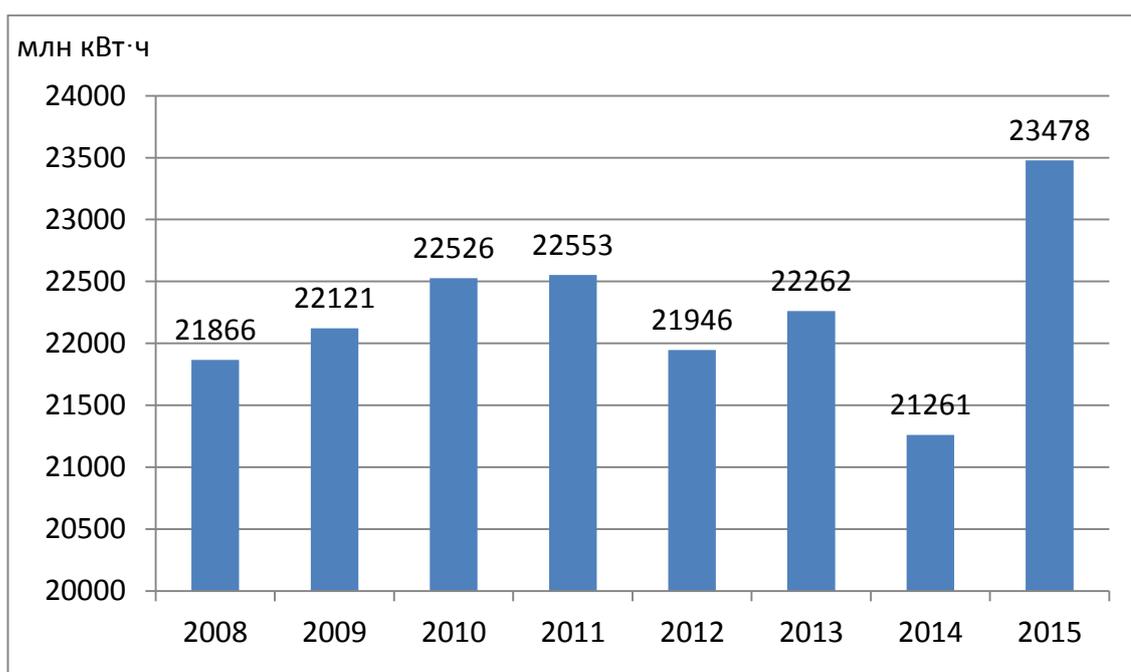


Рисунок 1.1 – Годовой объем потерь электроэнергии.

1.2. Анализ и расчет потерь в электрических сетях

Стоимость электрической энергии косвенно, а порой и напрямую зависит от потерь в различных элементах электрической сети. На рисунке 1.2 изображена структура потерь. Каждая из укрупненных составляющих сгруппирована по различным критериям.

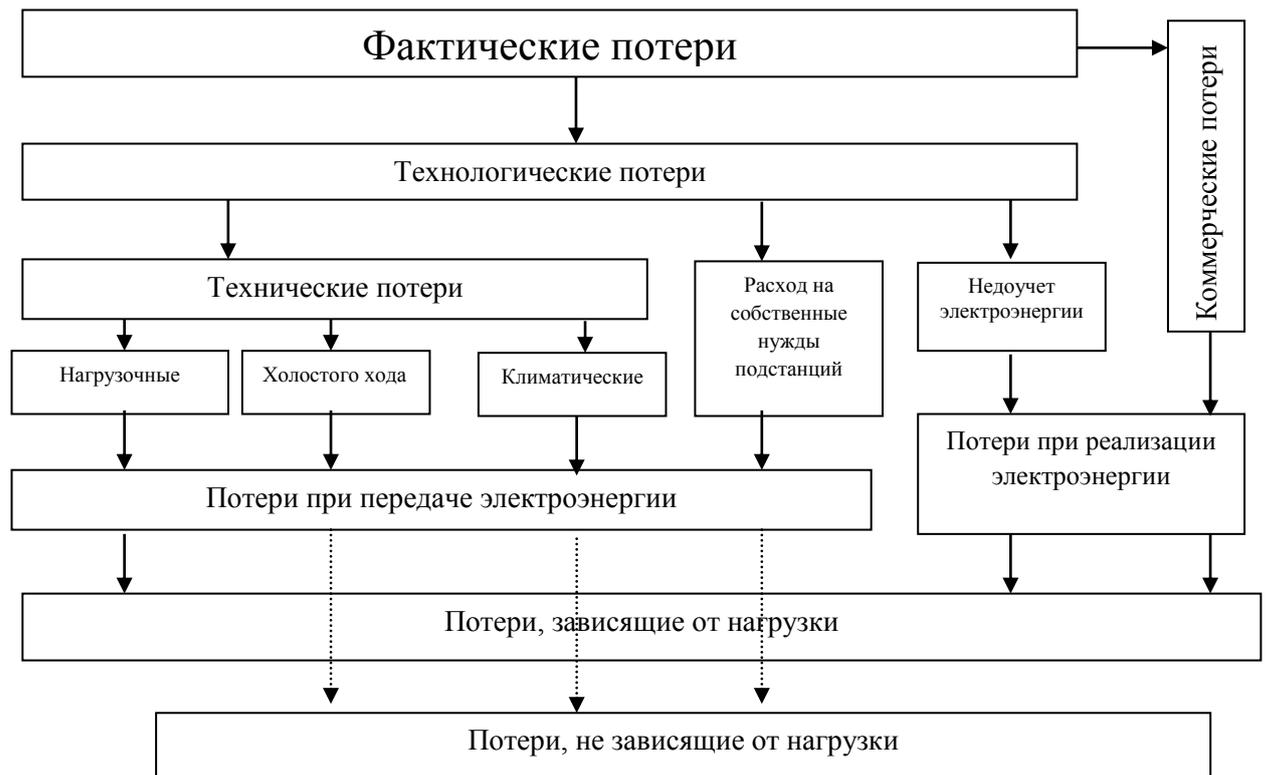


Рисунок 1.2 – Структура потерь электрической энергии

Укрупненные составляющие потерь электрической энергии:

1) технические потери электроэнергии – это потери, обусловленные нагревом токоведущих частей оборудования при протекании по ним тока. Джоулевы потери можно рассчитать и измерить путем установки фиксирующих электрическую энергию приборов на входе оборудования и на выходе. Технические потери включают в себя потери в воздушных и кабельных линиях, силовых трансформаторах и автотрансформаторах, в измерительных трансформаторах, шинах;

2) расход электроэнергии на собственные нужды подстанций регистрируется электрическими счетчиками за трансформаторами

собственных нужд. К этой категории относится потребляемая энергия на работу оборудования, непосредственно связанного с передачей энергии подстанции и на обеспечение жизнедеятельности обслуживающего персонала;

3) потери электроэнергии, обусловленные погрешностями ее измерения, – метрологические потери. Данный тип потерь рассчитывают по метрологическим характеристикам и режимам работы приборов, используемых для измерения энергии;

4) коммерческие потери – эта та энергия, которая была взята из сети без приборов учета и никаким образом не оплачена потребителем. С данным типом потерь борются путем организации контроля за потреблением энергии. Произвести расчет потерь невозможно. Их значение определяют как разницу между фактическими потерями и суммой первых трех составляющих. Первые три составляющие потерь входят в укрупненную группу технологических потерь, обусловленных процессом передачи по сетям и инструментального учета ее отпуска и поступления.

Согласно приведенной выше структуре потери в сети Единая национальная электрическая сеть (ЕНЭС) отображены на рисунке 1.3, из которого видно, что преобладающее место среди потерь при передаче электрической энергии занимают нагрузочные потери [69].

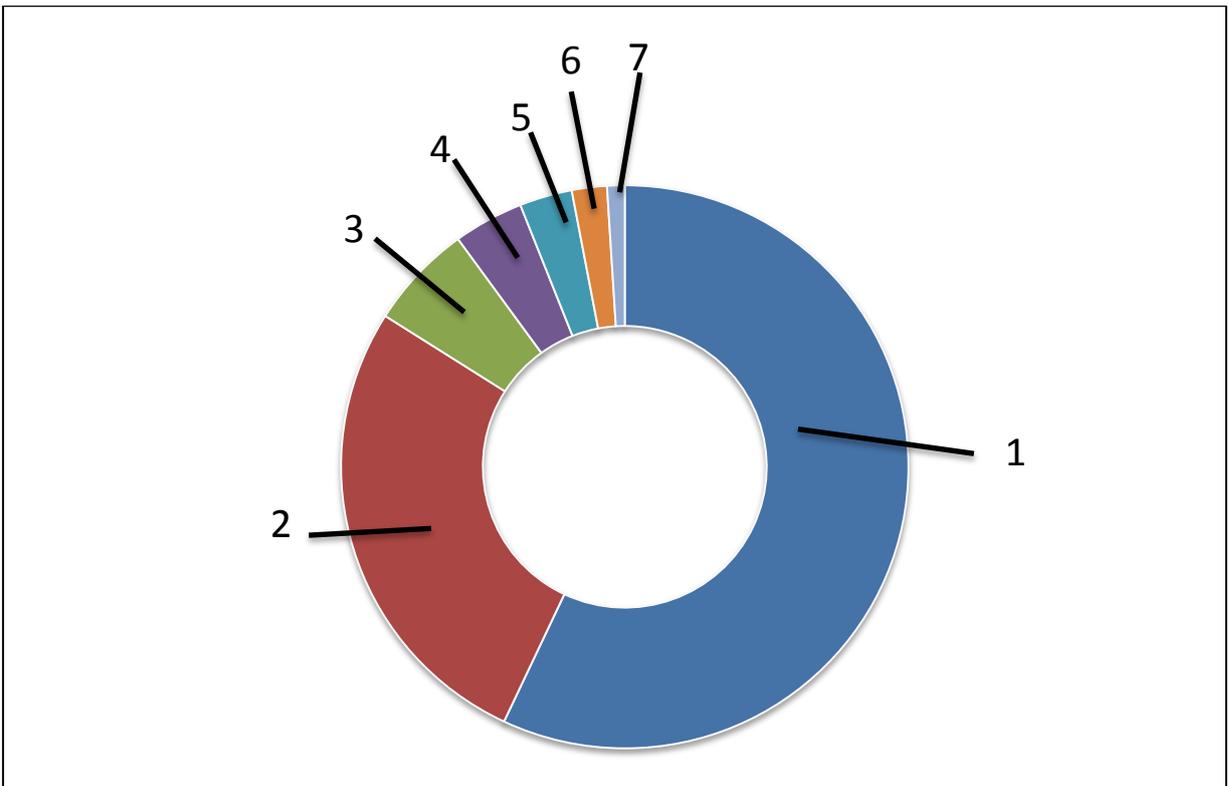


Рисунок 1.3 – Структура потерь электрической энергии в сети ЕНЭС:
1 – нагрузочные; 2 – корона у воздушных линий; 3 – потери в автотрансформаторах и трансформаторах; 4 – расход на собственные нужды подстанций; 5 – потери в распределительных шкафах, 6 – потери в комплектных устройствах; 7 – прочие потери

1.3. Учет температурной зависимости элементов сети при расчете потерь электрической энергии

Как было сказано выше, из-за значительных длин воздушных линий электропередачи на них приходится большая часть потерь. По разработке и по уточнению методов расчета потерь в линиях электроэнергетических систем существует много работ [1–12, 20, 22, 29, 31–33, 36–44, 57– 63, 65]

В основе определения потерь активной мощности в проводе линий электропередачи (ЛЭП) лежит формула

$$\Delta P = I^2 R_{\Theta}, \quad (1.5)$$

где ΔP – потери активной мощности, Вт; I – ток в линии, А; R_{Θ} – активное сопротивление линии при температуре провода $\Theta^{\circ}\text{C}$.

Температура токопроводящих частей является одним из факторов, существенно влияющих на потери электрической энергии в элементах электрической сети [6, 8, 9, 10, 16, 17, 48, 58, 65]. Влияние этого фактора обусловлено температурной зависимостью активного сопротивления [81, 82]:

$$R_{\Theta} = R_{20}(1 + \alpha(\Theta_{np} - 20)), \quad (1.6)$$

где R_{Θ} и R_{20} – активные сопротивления соответственно при температурах Θ и 20°C ; α – температурный коэффициент активного сопротивления алюминиевых проводов, который примерно равен $0,004^{\circ}\text{C}^{-1}$.

При расчетах, как правило, используется сопротивление из справочников при 20°C . Температура провода зависит не только от температуры воздуха, но и от тока, протекающего по проводу, солнечного излучения, скоростей и углов атаки ветра. На практике учет этих всех параметров сложен. В целях увеличения точности расчетов потерь электрической энергии сопротивление корректируют с учетом температуры воздуха;

$$R_{BL} = R_0^{20} l (1 + 0,004(T - 20)) / n_{\psi}, \quad (1.7)$$

где R_0^{20} - удельное активное сопротивление на 1 км провода при его температуре 20 °С, Ом/км; l – длина линии, км; T – средняя температура провода за базовый период, °С; n_{\parallel} – количество параллельных цепей, шт.

Если ток, протекающий по линии, меньше экономической плотности тока, то температуру провода принимают равной температуре воздуха и используют выражение 1.7 [24–26].

Погрешность определения активного сопротивления неизолированных проводов в зависимости от температуры по отношению к справочным данным определяется:

$$|\delta| = \left| \frac{R_{20} - R_{\Theta}}{R_{20}} \right| \cdot 100\%, \quad (1.8)$$

которое, с учетом соотношения (1.6) преобразуется к виду

$$|\delta| = \left| \frac{R_{20} - R_{20}(1 + \alpha(\Theta_{np} - 20))}{R_{20}} \right| \cdot 100\% = \alpha(\Theta_{np} - 20) \cdot 100\%. \quad (1.9)$$

Таблица 1.1 – Диапазон неопределенности ΔP_t , найденный без учета изменения t_{np}

Марка провода	Температура эксплуатации, °С	Диапазон неопределенности потерь, %
АС	от –50 до +70	48
Высокотемпературные провода повышенной пропускной способности		
ZTACSR/НАСIN	от –50 до +210	104
TACSR/ACS	от –50 до +150	80
GTACSR	от –50 до +150	80
АССР	от –50 до +210	104
АСПТ АТ1/20AS	от –50 до +150	80

Значительные величины погрешностей (таблица 1.1) расчета сопротивлений приводят к значительным неточностям определения потерь электрической энергии. Данный факт говорит о необходимости учета реальной t_{np} для ΔW в воздушных линиях электропередачи.

1.3.1. Методы расчета потерь электрической энергии с учетом температуры провода в стационарном режиме работы сети

В настоящее время для расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом температуры токопроводящих жил используются различные методы расчета как аналитические, так и численные [11, 15, 22, 23, 28, 30, 62, 64, 74, 82, 88]. Эти методы используются в основном для расчета неизолированных проводов традиционного исполнения и отличаются коэффициентами теплоотдачи конвекции (таблица 1.2) и рядом других особенностей. В работах [3, 15, 37] проводилось сравнение методов [12, 22, 30, 15] на основе расчетов превышения температуры провода t_{np} над температурой воздуха t_{ϵ} ($\Delta t = t_{\epsilon} - t_{np}$), потерь в проводе (ΔP) и коэффициента теплоотдачи (α_k) для скорости ветра 0,6 м/с. Плотность тока j принималась равной $j = 1$ А/мм² или $j = 3$ А/мм². Анализ проводился по величинам отклонения Δt , ΔP от средних значений этих величин найденных по всем семи методам расчета (таблица 1.2) согласно формулам:

$$\Delta t_{отк} = \frac{\Delta t_i - \Delta t_{cp}}{\Delta t_{cp}} \cdot 100\% , \quad (1.10)$$

$$\Delta P_{отк} = \frac{\Delta P_i - \Delta P_{cp}}{\Delta P_{cp}} \cdot 100\% , \quad (1.11)$$

где $\Delta t_{отк}$, $\Delta P_{отк}$ – температура перегрева провода и потери активной мощности в проводе; Δt_{cp} , ΔP_{cp} – среднее значение температуры перегрева провода и среднее значение потерь активной мощности в проводе; i – номер метода.

Произведем сравнение методов расчета, которые используются для естественной конвекции (α_{k3} , α_{k4} , α_{k6}) и методы, предназначенные для вынужденной конвекции (α_{k1} , α_{k2} , α_{k5} , α_{k7}), учитывающие скорость ветра, т.е. $v \neq 0$. Расчеты произведем для традиционных неизолированных проводов марки АС разных диаметров при $v=0.6$ м/с, с использованием комплекса программ [55], в котором реализованы методы [11, 22, 30, 15].

Таблица 1.2 – Коэффициенты теплоотдачи конвекцией проводов воздушных линий

№ метода (подхода)	Совокупность уравнений, Вт/м ² ·К	Тип конвекции	Организация, использующая подход в настоящее время
1	$\alpha_{k2} = 7,80836 \frac{(k_v v)^{0,71719}}{d^{0,28281}}$	<i>вынужденная</i> v - скорость ветра; k _v - коэффициент характеризующий угол атаки ветра	Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» - ВНИИЭ (г. Москва)
2	$\alpha_{k1} = 1,7507 \frac{\sqrt{v}}{d}$	<i>вынужденная</i> d – диаметр провода	Сибирский федеральный университет (г. Красноярск) Южно-Российский государственный технический университет (г. Новочеркасск)
	$\alpha_{k3} = 1,61053 \frac{(\Delta t)^{0,3}}{d^{0,25}}$	<i>естественная</i> Δt=Δt _{нар}	
3	$\alpha_{k4} = 4,83 \frac{\Delta t^{0,288} k_{HT}^{0,456}}{T_{cp}^{0,274} d^{0,316}}$	естественная T _{cp} =(T _{np} +T _е)/2	Московский энергетический институт (г. Москва)
	$\alpha_{k5} = 25,884 \frac{k_v (vk_{HT})^{0,6}}{T_{cp}^{0,298} d^{0,4}}$	вынужденная T _е =t _е +273	
4	$\alpha_{k6} = 0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_e}} \cdot 4 \sqrt{\frac{\Delta t}{d}}$	естественная P - атмосферное давление	Омский государственный технический университет (г. Омск)
	$\alpha_{k7} = 0,044 \frac{k_v (vP)^{0,6}}{(T_e d)^{0,4}}$	вынужденная	

В результате проведения численного эксперимента были получены максимальные отклонения от среднего значения температуры при разных плотностях тока, которые приведены в таблице 1.3, а так же в работе [63].

Анализ результатов показал, что отклонения потерь активной мощности во всем диапазоне сечений при плотности тока $j = 1$ А/мм² не превышают 1 %. Можно отметить также практически одинаковые значения ΔP_{отк} по различным формам усреднения. В этих условиях представляется возможным при плотности тока $j = 1$ А/мм² использовать для практических расчетов потерь активной мощности любой из рассматриваемых методов.

Отклонение по превышению температуры (таблица 1.3) достигает 60 %. Значительные величины $\Delta t_{отк}$ объясняются в этом случае малым значением Δt_{cp} . Она составляет 1.7 °С. Абсолютные же значения отклонений от среднего значения Δt_{cp} не превышают 0,9 °С.

Таблица 1.3 – Максимальные отклонения от среднего значения температуры при разных плотностях тока

Усредненные величины по методам	Максимальное отклонение от среднего, %			
	$\Delta t_{отк}$		$\Delta P_{отк}$	
	$j = 1 \text{ А/мм}^2$	$j = 3 \text{ А/мм}^2$	$j = 1 \text{ А/мм}^2$	$j = 3 \text{ А/мм}^2$
Естественная конвекция	- 20 25	- 13 15	- 0,6 0,6	- 5 5
Вынужденная конвекция	- 15 8	- 15 16	- 0,6 0,5	- 3 7
Вынужденная и естественная конвекции совместно	- 30 30	- 25 25	- 0,8 0,6	- 10 10

Повышение плотности тока до $j = 3 \text{ А/мм}^2$ значительно меняет картину графиков и величину отклонений $\Delta t_{отк}$ и $\Delta P_{отк}$ при различных формах усреднения. $\Delta t_{отк}$, $\Delta P_{отк}$ в диапазоне сечений от 16 мм² до 240 мм² находятся в пределах 5 %. Таким образом, при $j = 3 \text{ А/мм}^2$ и $v = 0,6 \text{ м/с}$ для практических расчетов потерь активной мощности или электрической энергии в проводах сечением до 240 мм² можно использовать любой из семи методов. В диапазоне сечений от 240 мм² до 500 мм² целесообразно рекомендовать методы с использованием коэффициентов $\alpha_{к1}$, $\alpha_{к2}$, $\alpha_{к4}$, $\alpha_{к7}$ (таблицы 1.2)

Проведенный анализ показал, что в широком диапазоне скоростей ($0,6 \text{ м/с} \leq v \leq 5 \text{ м/с}$), нагрузок ($1 \text{ А/мм}^2 \leq j \leq 3 \text{ А/мм}^2$) и сечений проводов можно рекомендовать усовершенствованные и разработанные в Омском государственном техническом университете методы с использованием коэффициентов $\alpha_{к2}$, $\alpha_{к7}$ (таблица 1.3) и специально созданных математических моделей.

1.3.2. Эффективность учета температурной зависимости активного сопротивления проводов при выборе мероприятий по увеличению пропускной способности

Результаты исследования по определению срока окупаемости вводимого мероприятия по снижению потерь энергии можно оценить по формуле [54, 66, 67, 68]:

$$T_{ок} = \frac{K}{I_{исх} - I_{ПМ}} = \frac{K}{I_{a,исх} - I_{a,ПМ} + C_{э}(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ})}, \quad (1.12)$$

где $I_{ПМ}$ и $I_{исх}$ – годовые эксплуатационные издержки соответственно после ввода мероприятия и в исходном состоянии; $I_{a,ПМ}$ и $I_{a,исх}$ – составляющие издержек на амортизацию, обслуживание ремонт оборудования соответственно после ввода мероприятия и в исходном состоянии; $W_{ПМ}$ и $W_{исх}$ – потери электрической энергии после ввода мероприятия и в исходном режиме; K – капиталовложения.

Проанализировав уравнение (1.12) можно сделать следующие выводы:

1. Если погрешности расчета $\delta(W_{ПМ})$ и $\delta(W_{исх})$ неодинаковы, то должны выполняться неравенства:

$$\delta(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ}) \gg \delta \Delta W_{исх}; \quad (1.13)$$

$$\delta(\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ}) \gg \delta \Delta W_{нм}. \quad (1.14)$$

2. Погрешность нахождения $T_{ок}$ для большинства случаев будет еще значительнее, так как разность $(I_{a,исх} - I_{a,нм})$ имеет, как правило, отрицательные значения.

Первые два вывода проявляются при неучете температуры элементов сети, которая сама меняется в результате ввода мероприятия.

Основными мероприятиями по снижению потерь являются: повышение номинального напряжения, увеличение сечения, строительство новых линий, установка устройств компенсации реактивной мощности. Каждый из перечисленных методов имеют как достоинства, так и недостатки. Наибольшее распространение получило мероприятие по установке устройств

компенсации реактивной мощности. Для чего произведем оценку сроков окупаемости устройств компенсации реактивной мощности.

Уменьшение потерь электрической энергии $\Delta W = (\Delta W_{исх} - \Delta W_{ПМ})$ без учета и с учетом нагрева определяется соответственно уравнениями:

$$\Delta W = T \left[\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R - \frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U^2} R - \rho_{уд} Q_{кв} \right] = T \left[\frac{2QQ_{кв} - Q_{кв}^2}{U^2} R - \rho_{уд} Q_{кв} \right], \quad (1.15)$$

$$\Delta W = T \left[\frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_{исх} - \frac{P^2 + (Q - Q_{кв})^2}{U^2} R_{нм} - \rho_{уд} Q_{кв} \right], \quad (1.16)$$

где $R_{нм}$ и $R_{исх} > R_{нм}$ – активные сопротивления линии после и до ввода Устройства компенсации реактивной мощности (УКРМ), которые имеют разные значения из-за учета температурной зависимости.

Из соотношения (1.16) следует, что при учете температуры провода потери электрической энергии уменьшаются по следующим причинам:

- за счет уменьшения передаваемой реактивной мощности;
- в результате уменьшения активного сопротивления;
- благодаря сокращению потерь на передачу активной мощности.

В этом плане уравнение (1.15), записанное при допущении независимости сопротивления от температуры является ограниченным, так как не позволяет учесть указанные факторы. Отдавая должное позитивности применения УКРМ с точки зрения уменьшения потерь, полезно оценить сроки окупаемости УКРМ.

Результаты таких исследований с учетом и без учета нагрева представлены в таблице 1.4.

Погрешность определения сроков окупаемости, обусловленная не учетом нагрева ε_2 вычисляется по уравнению:

$$\varepsilon_2 = ((T_{окт} - T_{ок}) / T_{окт}) \cdot 100\% \quad (1.17)$$

где $T_{окт}$ и $T_{ок}$ – сроки окупаемости УКРМ с учетом и без учета температуры.

Представленные в таблице 1.4 результаты вычислений по формуле (1.17) показывают, что минимальная погрешность срока окупаемости равна

104%, максимальная – 136 %, средняя – 117 %. Факт соизмеримости средней погрешности с определяемой величиной свидетельствует о необходимости учета фактора нагрева при расчете сроков окупаемости установки УКРМ. Особую значимость приобретает учет нагрева при больших нагрузках элементов сети [66, 67].

Таблица 1.4 – Стоимости и сроки окупаемости установки УКРМ для провода АСПТ АТ1/20АС 50/8 при мощностях нагрузки $P=5000$ кВт, $Q=3600$ квар

Длина линии, км	Расчет без учета t_{np}			Расчет с учетом t_{np}			ε_2 , %
	$Q_{ку, опт}$, квар	Стоимость УКРМ, тыс. руб	$T_{ок}$, лет	$Q_{ку, опт}$, квар	Стоимость УКРМ, тыс. руб	$T_{ок}$, лет	
0,3	2250	488,8	3,92	2700	585,9	1,66	136,1
0,4	2250	488,8	2,55	2700	585,9	1,17	117,9
0,6	2700	585,9	1,69	3150	673,1	0,82	106,1
0,8	3150	673,1	1,33	3150	673,1	0,6	121,7
1	3150	673,1	1,02	3150	673,1	0,5	104

1.4. Нестационарные тепловые режимы работы проводов воздушных линий электропередачи

В настоящее время существуют тепловые электростанции и источники электрической энергии от возобновляемых ресурсов, которые готовы к выработке электроэнергии, но линии, отходящие от них имеют недостаточную пропускную способность. Высокая плотность населения и интенсивное использование земель оставляет всё меньше места, где возможно строительство линий. Системы оценки динамического теплового режима воздушных линий являются вариантом снижения темпа строительства новых линий [88–96]. Стоимость контроля цепи, включая установку оборудования и программного обеспечения, составляет менее 2 % от затрат на достижение этих же результатов пропускной способности путем применения стандартных методов повышения пропускной способности (строительство новых линий, повышение класса напряжения и т.д.).

При помощи систем оценки динамического теплового режима линий можно определить максимально допустимый ток, при протекании которого достигается максимальная допустимая температура проводника, но при которой не происходит обрыв линии или существенное ухудшение прочности проводника из-за отжига материала [72–78]. Передача электроэнергии традиционно ограничена максимально допустимой температурой проводника, определенной при помощи статических моделей линии, которые основаны на постоянных погодных условиях в течение продолжительного периода времени, дней, месяцев или лет. Таким образом предел мощности передаваемой по линии определяется при неблагоприятных условиях охлаждения провода. Как правило, условия при расчете моделями стационарного режима принимаются следующими: низкая скорость ветра (0,6 м/с), полное солнечное излучение (1000 Вт/м^2) и высокая температура воздуха ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) [79–84]. На практике погодные условия значительно отличаются от принимаемых значений (рисунок 1.4) [85]. При реальных

погодных условиях охлаждение проводника лучше, чем при расчете статическими методами, что позволяет передавать значительно больше электрической энергии. По этой причине, в последние два десятилетия, появились технологии и стратегии, которые в режиме реального времени или псевдо-реального времени производят измерения характеристик линий электропередачи и погодных условий. Полученные данные позволяют в реальном времени рассчитать температуру проводника, потери электрической энергии и предельно допустимый ток. Различные опыты наблюдения в реальном времени за параметрами температуры провода показали, что значения, полученные при расчете методами расчета стационарного режима, завышают температуру, а следовательно на 10-30 % статические методы расчета занижают предельно допустимые токи по сравнению с реально возможными.

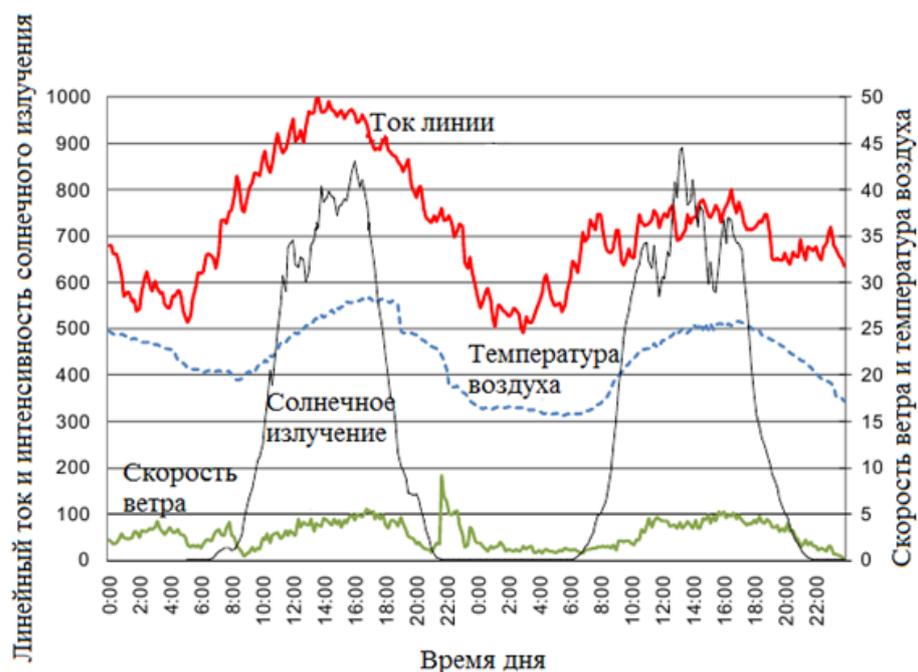


Рисунок 1.4 – Линейный ток и погодные условия в течении двух дней в летний период

Для моделирования нестационарных тепловых режимов воздушных линий используются аналитические, численные, имитационные и вероятностно-статистические методы, которые решают задачу идентификации математической модели [34].

Наиболее простыми в решении являются аналитические методы. Данные методы позволяют получить характеристики системы путем записи системы уравнений. При решении полученных систем уравнений получают параметры, необходимые для оценки системы. Помимо простоты решения к достоинствам аналитических методов относится малое время на решение, а также дает точное соотношение между параметрами исследуемой системы [34].

Как у численных методов, так и у аналитических методов, математическая модель представлена системой линейных или нелинейных уравнений. Численные методы имеют итерационное решение, т.е. они не дают точного решения как аналитические, а дают приближенное решение, но с той степенью точности, которая задается исследователем. На первоначальном этапе задается начальное решение и сравнивается с заданной точностью, в дальнейшем на следующих шагах итерации идет уточнение, итерационный процесс происходит до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность. Использование численных методов оправдано, когда аналитические методы не существуют [34].

Имитационное моделирование свое развитие получило с развитием компьютеров и компьютерных технологий. При помощи данного метода осуществляется анализ систем, преобладающими в которых являются стохастические воздействия. Имитационное моделирование заключается в точном моделировании объектов системы, их логической структуры, времени воздействия и порядка протекания процесса. По итогам моделирования можно получить оценку системы как в целом, так и ее отдельных элементов [34].

Как известно перенос тепла от поверхности провода в окружающую среду осуществляется конвекцией и излучением. Интенсивность лучистого теплообмена определяется законом Стефана–Больцмана и выражается через четвертые степени абсолютных температур. Данный факт является причиной нелинейности уравнения теплового баланса воздушных линий. В работе для

решения уравнения теплового баланса в нестационарном режиме будут использоваться аналитические методы, а для понижения четвертой степени будет использован метод наименьших квадратов. Для проверки точности полученного решения предложенным методом будут использованы: метод Рунге–Кутты четвертого порядка, как численный метод, обладающей высокой точностью получаемых результатов, а также метод конечных элементов.

Метод конечных элементов является одним из современных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных. Метод конечных элементов базируется на замене исследуемого объекта совокупностью конечного числа взаимосвязанных в узлах дискретных элементов. Этот метод позволяет более точно формулировать граничные условия, производить произвольное расположение конечных элементов, увеличивая их число в местах наибольшего градиента искомых величин. Позволяет производить исследование объектов, состоящих из множества элементов с разными физическими параметрами. Основная идея метода – аппроксимация дискретной модели любой непрерывной величины (температуры) в расчетной области, т.е. определение значения искомой функции в конечном числе расчетных точек.

Достоинства МКЭ:

- простота подготовки исходных данных;
- простота учета граничных условий;
- решение задач с нестационарным тепловым процессом при нелинейности и неоднородности теплофизических параметров;
- высокая точность расчетов из-за возможности использования элементов высокого порядка и увеличения числа конечных элементов в интересующих областях;
- возможность исследования областей любой мерности и геометрической формы с учетом различных конструктивных особенностей.

Приведенные выше достоинства метода конечных элементов позволяют производить расчет тел из нескольких материалов с нерегулярными границами с возможностью сгущения сетки в местах концентрации градиентов, простоте учета различных граничных условий.

1.5. Выводы

1. Климатические условия, влияющие на температуру в проводе, являются существенным фактором при определении фактического активного сопротивления провода, так как сопротивление зависит от температуры. Погрешность расчета сопротивления без учета фактической температуры проводов современных марок достигает 104 %.

2. Произведен обзор существующих методов расчета температуры провода с учетом атмосферных и режимных факторов. Данные методы являются численными и рассчитывают температуру провода при установившемся режиме, что является их недостатком. Так как режим работы линий изменяется фактически постоянно, целесообразно считать динамический тепловой режим проводов воздушных линий электропередачи.

3. Произведен расчет сроков окупаемости установки компенсирующих устройств с учетом и без учета температуры. Данные отличаются в 2 и более раз или на 121,7 %.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ И УСТРОЙСТВА ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

2.1. Метод расчета IEEE

Температура воздушных линий электропередачи постоянно меняется при изменении тока и погодных условий. Однако, как предполагается в стандарте IEEE [85], метеорологические параметры (скорость ветра и его направление, температура окружающей среды и т.д.) остаются постоянными, и любые изменения тока ограничены шаговым изменением его значения от начального значения (I_i) до конечного (I_f), как это показано на рисунке 2.1.

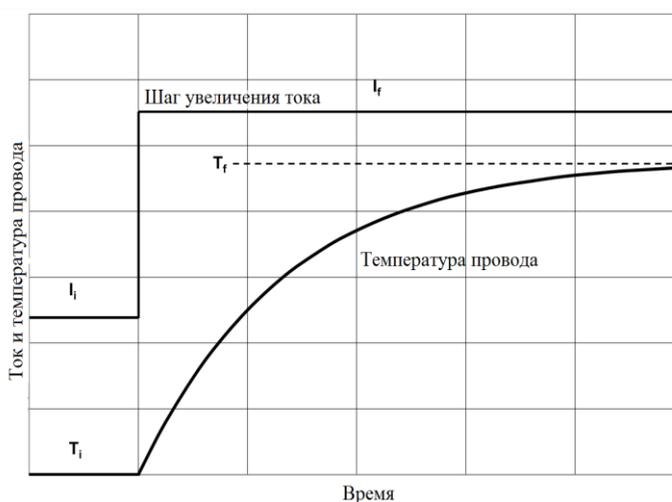


Рисунок 2.1 – «Шаговое» изменение тока

Непосредственно перед скачкообразным изменением тока ($t=0-$), считается, что провод находится в тепловом равновесии. То есть сумма теплоты, выделяемой вследствие омических потерь и получаемая от солнечного нагрева, равна сумме тепловых потерь при конвекции и разности потерь при излучении и встречного излучения окружающих тел.

При мгновенном изменении тока ($t=0+$) температура кабеля скачком измениться не может из-за теплоемкости материала провода, но он начинает нагреваться за счет повышения омических потерь. Таким образом, во время $t=0+$, температура кабеля начинает повышаться на значение, которое можно определить из уравнения (2.1) нестационарного теплового режима:

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 R(T_c), \quad (2.1)$$

где, q_c – конвекционные тепловые потери; q_r – потери за счет теплового излучения; mC_p – общая теплоемкость провода; T_c – температура кабеля; q_s – теплота от солнечного излучения; I – ток кабеля; $R(T_c)$ – сопротивление провода при температуре T_c .

Выражение для вычисления температуры провода в определенный момент времени по уравнению (2.2)

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [q_s + I^2 R(T_c) - q_c - q_r] \quad (2.2)$$

По истечении определенного периода времени Δt , температура кабеля повысится на значение ΔT_c . Повышение температуры проводника приводит к повышению тепловых потерь за счет конвекции и излучения и некоторому повышению омических потерь в связи с увеличением сопротивления проводника. В промежутке от Δt до $2\Delta t$, температура кабеля продолжает расти, но не так интенсивно. По окончании большого числа таких интервалов, температура кабеля достигает окончательного установившегося значения (T_f).

Теплоемкость кабеля может быть рассчитана как сумма теплоемкостей отдельных его частей (2.3):

$$mC_p = \sum m_i C_{pi}. \quad (2.3)$$

Значения теплоемкостей основных металлов, используемых при производстве проводов, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Теплоемкости материалов [1.1.1.1(i)8585]

Материал	C_p , Дж/(кг·°C)
Алюминий	955
Медь	423
Сталь	476
Биметалл (сталь-алюминий)	534

Уравнение баланса нестационарного теплового режима (2.1) не может быть решено аналитически относительно температуры провода как функция времени, так как некоторые элементы нелинейные. Рассматривая каждый элемент уравнения, можно заметить, что омический нагрев имеет линейную зависимость от температуры кабеля. Элемент солнечного нагрева также линеен, так как не зависит от температуры линии. Как элемент тепловых потерь при излучении, так и элемент естественной конвекции (скорость ветра равна 0) имеют нелинейную зависимость от температуры.

В работе [85] Блек и Рехберг привели метод аппроксимации уравнения охлаждения при излучении линейной функции температуры. Используя этот метод, получаем линейное уравнение теплового баланса нестационарного режима – уравнение (2.4):

$$\frac{d}{dt}(T_c - T_a) = K_1(T_c - T_a) + K_2 I^2. \quad (2.4)$$

Для ступенчато изменяющегося тока решение линеаризованного уравнения теплового баланса нестационарного режима имеет вид:

$$T_c(t) = T_i + (T_f - T_i)(1 - e^{-t/\tau}). \quad (2.5)$$

Температура кабеля стационарного режима до скачкообразного увеличения тока – T_i . Установившаяся температура кабеля, достигаемая по истечении времени, T_f . Тепловая постоянная времени, τ может быть определена по уравнению (2.6).

$$\tau = \frac{(T_f - T_i)mC_p}{R(T_c)(I_f^2 - I_i^2)}, \quad (2.6)$$

где сопротивление кабеля соответствует средней температуре, $(T_i + T_f)/2$.

2.2. Метод CIGRE

Уравнение теплового баланса для однородной и изотропной твердой среды может быть выражено в цилиндрических координатах в виде [78]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q(T, \phi, z, r, t)}{\gamma c}, \quad (2.7)$$

где c – удельная теплоемкость; q – мощность на единицу объема; r – радиус; T – температура; t – время; z – длина по оси; γ – плотность массы; λ – теплопроводность; ϕ – азимутальный угол.

Если предположить, что провод обладает цилиндрической симметрией и имеет полубесконечную длину, то по азимутальному углу и длине по оси будет отсутствовать изменение температуры, соответственно ими можно пренебречь, и тогда уравнение (2.7) будет иметь вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\gamma c} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{q(T, r, t)}{\gamma c}, \quad (2.8)$$

где λ – эффективный коэффициент радиальной теплопроводности.

Уравнение (2.8) требует нахождения численного решения с соответствующими начальными и граничными условиями. Если предположить, что температура распределена радиально для провода со стальным сердечником или для монометаллического проводника, то мы получим установившуюся связь между температурой T_c сердечника и температурой поверхности T при заданной общей потребляемой мощности на единицу длины. Средняя температура может быть вычислена согласно [78], но, как правило, достаточным является предположить, что:

$$T_{av} = \frac{T_c + T_s}{2}, \quad (2.9)$$

где T_c – средняя температура провода; T_s – температура поверхности.

Так как масса на единицу длины $m = \gamma A$ и $q = P/A$, где A – площадь поперечного сечения и P – мощность на единицу длины, уравнение (2.8) можно привести к дифференциальному виду:

$$mc \frac{dT_{av}}{dt} = P_J + P_M + P_S - P_r - P_c. \quad (2.10)$$

где P_J – джоулев нагрев; P_M – магнитный нагрев; P_S – солнечный нагрев; P_i – нагрев на корону; P_c – конвективное охлаждение; P_r – охлаждение излучением; P_w – охлаждение испарением

Для провода со стальным сердечником

$$mc = m_a c_a + m_s c_s. \quad (2.11)$$

Индексы a и s означают параметры, приведенные для цветных и черных металлов соответственно. Значения массовой плотности и удельной теплоемкости различных материалов проводников приведены в стандарте [78]. Массовая плотность практически постоянна (до 100 °С), а удельная теплоемкость линейно зависит от температуры

$$c(T) = c [1 + \beta(T - 20)]. \quad (2.12)$$

Если параметры, приведенные в правой части уравнения (2.10), в частности джоулев нагрев и конвективные тепловые потери, будут изменяться в течение интервала времени dt , то температура провода будет также меняться. Если коэффициенты теплового нагрева превышают тепловые потери, значение dT/dt будет положительным, в то время как если потери тепла превышают тепловой нагрев, dT/dt будет отрицательным.

Дифференциальное уравнение теплового баланса (2.10) может быть решено численным интегрированием, но с определенной степенью аппроксимации можно получить решение в аналитическом виде. В частности, если потери тепла за счет излучения представить в линейном виде, они будут малы по сравнению с потерями при принудительной конвекции, а солнечный и магнитный нагрев являются постоянными величинами:

$$t = \frac{-mc\theta_m}{I^2 R_{ac} + P_S} \left[\beta(\theta - \theta_1) + (1 + \beta\theta_m) \ln \left(\frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_1} \right) \right], \quad (2.13)$$

где удельная теплоемкость c рассчитывается для температуры окружающей среды.

Так как β мало:

$$t = \frac{-mc\theta_m}{I^2 R_{ac} + P_S} \ln \left(\frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_1} \right), \quad (2.14)$$

где R_{ac} – сопротивление переменного тока на единицу длины при температуре окружающей среды; $\theta = T_{av} - T_a$ – среднее значение повышения температуры провода; $\theta_1 = T_{av1} - T_a$ – начальное среднее значение повышения температуры провода в момент времени t_1 ; $\theta_m = T_{avm} - T_a$ – асимптотическое среднее значение повышения температуры провода.

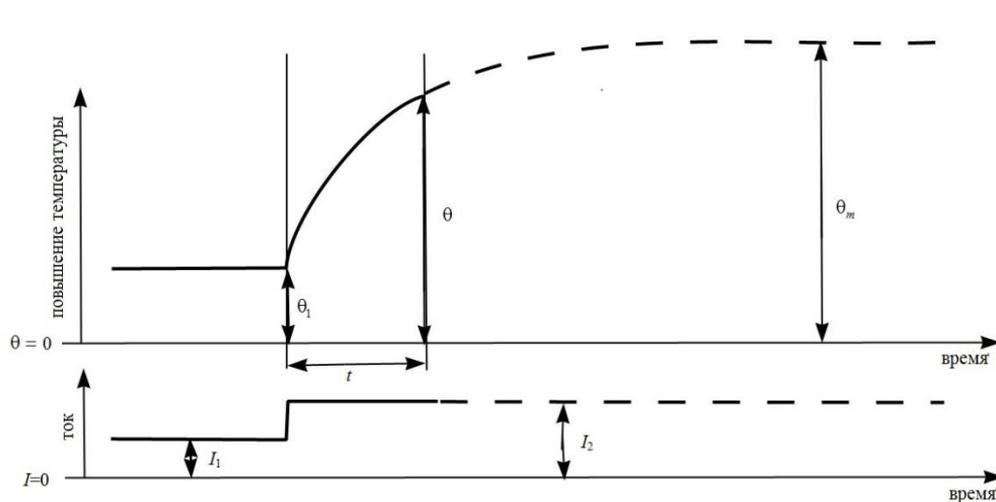


Рисунок 2.3 – Тепловое поведение провода при шаговом повышении тока

Тепловая постоянная времени τ_h – это интервал времени, за который температура провода достигает 63,2 % от его асимптотического (установившегося) значения θ_m . Тепловая постоянная времени находится по формуле:

$$\tau_h = \frac{mc\theta_m}{I^2 R_{ac} + P_S}. \quad (2.15)$$

Таким образом, из уравнений (2.14) и (2.15)

$$t \cong -\tau_h \ln \left(\frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_1} \right) \quad (2.16)$$

и

$$\theta \cong \theta_m - (\theta_m - \theta_1) e^{-\frac{t}{\tau_h}}. \quad (2.17)$$

Тепловая постоянная времени для провода со стальным сердечником может быть найдена из уравнения:

$$\tau_h = \frac{(m_a c_a + m_s c_s) \theta_m}{I^2 R_{ac} + P_s} + \frac{m_s c_s \ln \left(\frac{D}{D_2} \right)}{2\pi \lambda_a} \quad (2.18)$$

где λ_a – радиальная теплопроводность жилы из цветного металла.

Если установившийся ток I_1 нагревает провод до температуры θ_{m1} , а затем при повышении тока скачком до значения I_2 (рисунок 2.3) температура повышается до значения θ_{m2} соответственно, тогда интервал времени t_{12} изменения температуры от θ_{m1} до θ_{m2} может быть найден:

$$t_{12} \cong -\tau_h \ln \left(\frac{\theta_{m2} - \theta_2}{\theta_{m2} - \theta_{m1}} \right) \quad (2.19)$$

где вместо значения тока I в формулах (2.15) и (2.18) используем значение I_2 .

Температуры θ_{m1} и θ_{m2} рассчитываются согласно методам стационарного режима.

При уменьшении тока скачком с начального значения I_1 (рисунок 2.4), под действием которого провод нагревается до установившегося значения температуры θ_{m1} , до значения I_2 при условии неизменности погодных условий, решение уравнения (2.10) будет выглядеть

$$t = \frac{-mc\theta_{m1}}{P_1} \left[\beta(\theta - \theta_{m1}) + \left(1 + \frac{\beta P_2 \theta_{m1}}{P_1} \right) \ln \left(\frac{P_1 \frac{\theta}{\theta_{m1}} - P_2}{P_1 - P_2} \right) \right], \quad (2.20)$$

где

$$P_1 = I_1^2 R_{ac} (1 + \alpha \theta_{m1}) + P_s - \alpha I_2^2 R_{ac} \theta_{m1};$$

$$P_2 = I_1^2 R_{ac} + P_s.$$

Так как β мало, уравнение (2.20) принимает вид

$$t \cong \frac{-mc\theta_{m1}}{P_1} n \left(\frac{P_1 \frac{\theta}{\theta_{m1}} - P_2}{P_1 - P_2} \right) \quad (2.21)$$

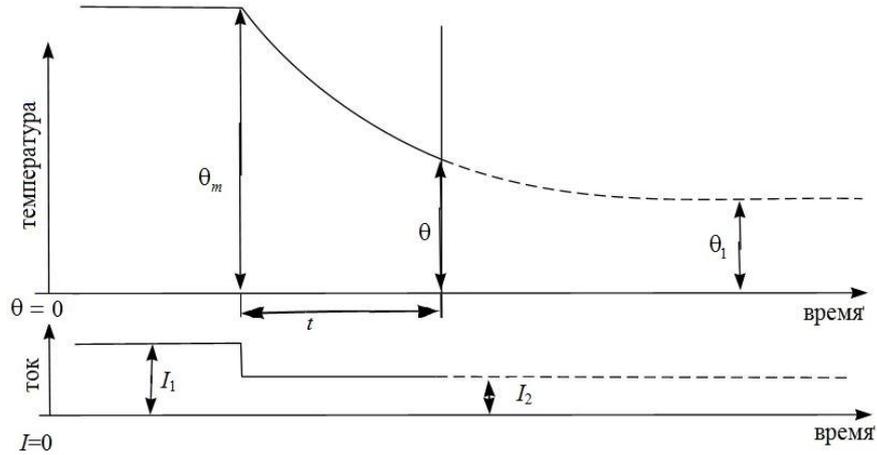


Рисунок 2.4 – Изменение температуры провода при скачкообразном изменении тока

Тепловая постоянная времени за период охлаждения провода определяется как временной интервал, за который температура уменьшается до 36,8 % от начального значения. Тепловая постоянная времени для однородного провода

$$\tau_{co} = \frac{mc\theta_{m1}}{P_1}, \quad (2.22)$$

для сталеалюминиевого провода [78]:

$$\tau_{co} = \frac{(m_a c_a + m_s c_s) \theta_{m1}}{P_1} + \frac{m_s c_s \ln \left(\frac{D}{D_2} \right)}{2\pi\lambda_a} \quad (2.23)$$

Интервал времени t_{12} , за который температура провода уменьшается с θ_1 до θ_2 :

$$t_{12} = -\tau_{co} \ln \left(\frac{P_1 \frac{\theta_2}{\theta_{m1}} - P_2}{P_1 \frac{\theta_1}{\theta_{m1}} - P_2} \right). \quad (2.24)$$

2.3. Сравнение методов IEEE и CIGRE

2.3.1. Нагрев проводника

Есть два основных механизма, которые вносят тепло в проводник, несущий токи, а именно джоулев нагрев и солнечный нагрев. Джоулев нагрев происходит, когда электрический ток проходит через проводник, а часть электрической энергии преобразуется в тепло посредством сопротивления проводника. В стандартах CIGRE и IEEE аналогичным образом рассчитывается зависящее от температуры постоянное сопротивление проводника, основанное на приближении температуры с линейным сопротивлением. Этого достаточно для грубых расчетов до температуры около 150 °С. В расчетах по току предполагается, что ток постоянный (установившийся) или предполагается, что он подвергается ступенчатому изменению (нестационарному) от начального тока до конечного тока. Основное отличие между двумя моделями заключается в том, что модель CIGRE обеспечивает преобразование переменного тока в постоянный, основанное на частоте 60 Гц. В модели IEEE отсутствует метод преобразования.

Солнечный нагрев проводника зависит от поглотительной способности и ориентации проводника, времени года и времени суток, широты рабочей области и ясности местной атмосферы. Для предсказания нагрева проводника необходимо определить два свойства солнца: положение солнца и интенсивность солнечного излучения. Методы CIGRE и IEEE определяют интенсивность солнечного излучения путем измерения прямого и рассеянного солнечного излучения. Однако из-за значительной стоимости оборудования и эксплуатационных требований к обслуживанию, полевые испытания не измеряют прямое солнечное излучение и рассеянное солнечное излучение. Вместо этого обе представленные модели используют альтернативный, более практичный и упрощенный метод для расчета

солнечного нагрева, основанный на знании глобальной солнечной радиации, как это предусмотрено моделью CIGRE .

Ток по спирали вокруг стального сердечника ACSR-проводника вызывает продольный магнитный поток в сердечнике. Этот магнитный поток вызывает нагрев за счет вихревых токов, гистерезиса и магнитной вязкости. Поэтому магнитный нагрев зависит от тока и числа алюминиевых слоев, которые окружают стальной сердечник. Он учитывается в модели CIGRE как часть приближенного уравнения коррекции, которое комбинирует поверхностный эффект и магнитные потери, связанные с ACSR-проводниками. Стандарт IEEE игнорирует как поверхностный эффект, так и магнитные потери.

2.3.2. Охлаждение проводника

Два главных механизма удаляют тепло от токоведущего проводника, а именно конвективное охлаждение и радиационное охлаждение. Радиационное охлаждение зависит от градиента температуры между поверхностью проводника, окружающей атмосферой и землей. Это также зависит от диаметра проводника и его коэффициента излучения, как способность проводника излучать энергию. При определении радиационного охлаждения оба метода игнорируют влияние температуры грунта, так как он вносит лишь небольшую часть общих тепловых потерь, особенно при наличии принудительной конвекции. Оба метода вычисляют радиационное охлаждение и требуют «инженерного решения» для выбора коэффициента излучения.

Наиболее существенное отличие моделей CIGRE и IEEE заключается в моделировании конвективного охлаждения. Конвективное охлаждение состоит из естественной конвекции, которая является естественным движением воздуха из-за разности температур, давления и вынужденной конвекции из-за метеорологических условий. Таким образом, на конвекционное охлаждение влияет скорость и направление ветра, разница

температур окружающей среды и проводника, а также диаметр проводника, шероховатость. Для расчетов мощности оба метода предполагают, что скорость ветра постоянна. Это нереалистичное предположение, так как на самом деле и скорость ветра, и турбулентность определяются многими факторами, включая перепад давления и местной территории. Модель IEEE рассчитывает принудительную конвекцию охлаждения с использованием комбинации двух уравнений, оба из которых составляют чистоту местной атмосферы. Один предназначен для низких скоростей ветра, а другой – для высоких скоростей ветра. Напротив, модель CIGRE пренебрегает эксплуатационными условиями и использует анализ размеров: использование чисел Нуссельта, Рейнольдса, Грашоффа и Прандтля для моделирования турбулентности и вихрей, связанных со скручиванием проводников, для определения теплопередачи между проводником и окружающим воздухом. Как и модель IEEE, модель CIGRE выбирает наибольшее значение охлаждения, что приводит к консервативным прогнозам мощности.

При заданных погодных условиях и номинальной тепловой мощности, токе проводника, температуре проводника можно прогнозировать последующую амплитуду. Однако, поскольку конвективное охлаждение, сопротивление проводника и т. д. – все функции температуры проводника, следует выполнить расчет с использованием итеративного подхода.

2.4. Устройства для контроля режимных и климатических факторов при мониторинге воздушных линий электропередачи

Параметры окружающих погодных условий и токовой нагрузки передаются в вычислительный центр, где происходит расчет температуры провода, стрелы провеса и допустимой токовой нагрузки при данных условиях. Данные расчеты производятся при помощи различных математических моделей оценки динамического теплового режима проводов линий электропередачи. Контроль параметров для расчета производится вдоль всей линии, так как на больших расстояниях условия эксплуатации могут отличаться. Кроме метеостанций и вычислительных центров на практике используются устройства непосредственного контроля температуры провода. Данные устройства приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Устройства контроля температуры проводника

№	Фотография устройства	Краткое описание устройства
1		<p>Power Donut Устройство осуществляет мониторинг температуры проводника, отслеживает текущую нагрузку и угол наклона проводника. Минимальный ток для корректной работы 70 А. При нагрузке ниже 70 А возможна работа от встроенного элемента питания.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Максимальная измеряемая температура – 150 °С. - Минимальная измеряемая температура – –50 °С. - Погрешность измерения – 0,75 °С.
2		<p>FMC-T6 Измеряет температуру проводника и текущую нагрузку. Это – часть интеллектуальной системы контроля Серии Multilin General Electric.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Максимальная измеряемая температура – 85 °С. - Минимальная измеряемая температура – –10 °С. - Погрешность измерения – 2 °С.

Продолжение таблицы 2.2.

3		<p>Overhead Transmission Line Monitoring (OTLM, Мониторинг воздушных линий электропередач) Осуществляет контроль температуры проводника и тока нагрузки. – Максимальная измеряемая температура – 125 °С. – Минимальная измеряемая температура – -40 °С. – Погрешность измерения – 2 °С.</p>
4		<p>Transmission Line Monitor (TLM, Мониторинг передающей линии). Оценивает температуру проводника и контролирует провисание линии. Измерение провисания происходит при помощи технологии оптического локатора, которая определяет высоту проводника до земли. – Максимальная измеряемая температура – 250 °С. – Минимальная измеряемая температура – –. – Погрешность измерения – –.</p>
5		<p>ЕМО Простая система, которая только измеряет температуру проводника. – Максимальная измеряемая температура стандартной версии – 85 °С, высокотемпературной – 250 °С. – Минимальная измеряемая температура – -25 °С. – Погрешность измерения – 1,5 °С.</p>
6		<p>Ritherm Устройство на основе поверхностных акустических волн (ПАВ). Система включает в себя радар, который посылает и принимает высокочастотные электромагнитные волны и пассивный датчик SAW, установленный на проводнике. SAW пассивный датчик представляет собой пьезоэлектрический кристалл, который вступает в реакцию, с движущейся электромагнитной волной, посланной радаром. Определение температуры определяется по удлинению проводника из-за температурного расширения. – Максимальная измеряемая температура – 150 °С – Минимальная измеряемая температура – -35 °С. – Погрешность измерения – 0,5 °С.</p>

В таблицах 2.3 – 2.7 сравниваются различные аспекты коммерческих систем на основе мониторинга температуры проводника. Помимо указанных

коммерческих систем контроля температуры проводов существует еще один вариант для измерения температуры проводника, который позволяет определить распределение температуры вдоль проводника с использованием оптических волокон, внедренных в нее.

Таблица 2.3 – Параметры измерений

Название	Температура проводника, °С	Сила тока, А	Наклон	Угол, рад	Провисание
Power Donut	γ	γ	γ		
SMT	γ	γ			
OTLM	γ	γ			
TLM	γ			γ	γ
FMC-T6	γ	γ			
EMO	γ				
Ritherm	γ				

Таблица 2.4 – Параметры температуры проводника и точность

Название	Минимальная температура проводника, °С	Максимальная температура проводника, °С	Точность измерения температуры проводника, %
Power Donut	-50	150	0,5
SMT	0	250	–
OTLM	-40	125	2
TLM	–	250	–
FMC-T6	-10	85	2
EMO standard	-25	85	1,5
EMO high temperature	-25	210	1,5
Ritherm	-35	150	0,5

Таблица 2.5 – Параметры температуры проводника и точность

Название	Минимальная сила тока, А	Максимальная сила тока, А	Точность измерения силы тока, %
Power Donut	0	3000	0,5
SMT	100	1400	–
OTLM	65	–	–
FMC-T6 300	10	300	1
FMC-T6 600	30	600	1

Таблица 2.6 – Питание

Название	Питание датчика проводника	Протекающий ток в линии, А	Запасная батарея	Время автономного питания, ч
Power Donut	Самообеспечение	70	1	1
SMT	Самообеспечение	100	0	
OTLM	Самообеспечение	65	0	
TLM	Самообеспечение	100	0	
FMC-T6 300	Самообеспечение	10	48	

Продолжение таблицы 2.6

FMC-T6 600	Само обеспечение	30	48	
ЕМО	Батарея в комплекте			10
Ritherm	Пассивный (центральный блок нуждается в поставке)			

Таблица 2.7 – Вес

Название	Вес, кг
Power Donut	9,2
SMT	6
OTLM	9,5
TLM	11
FMC-T6	6

2.5. Выводы

В общем случае стандарты IEEE и CIGRE имеют огромное значение и представляют достаточную точность – обычно различие в расчетах не более 5–15 %. До января 2007 года стандарт CIGRE имел меньшее практическое значение вследствие табличного метода выбора параметров и пространственных ограничений (например, была известна солнечная интенсивность только для одного полушария), но в настоящее время оба стандарта используются с одинаковым успехом. Нельзя выделить какой из методов лучше или хуже, они имеют только некоторые различия и предлагают широкий спектр прикладных возможностей. Так как методы IEEE и CIGRE имеют много общего, то соответственно, у них и общие недостатки. К недостаткам можно отнести: сложность подготовки исходных данных для определения температуры провода, невозможность определить потери электрической энергии за время переходного теплового процесса. Помимо представленных методов существуют устройства прямого или косвенного контроля температуры проводника. Основным недостатком которых является значительные капиталовложения и сложность выбора мест установки на линиях. Для регулирования потоков электрической энергии в реальном времени требуется более простой и не менее точный метод расчета температуры проводника при динамическом тепловом процессе.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ.

Передача тепла от провода в окружающую среду осуществляется путем конвекции (Q_k) и теплового излучения (Q_l).

$$Q_k + Q_l = A_k (T_{внеш} - T_{окр})^k + A_l (T_{внеш}^4 + T_{окр}^4), \quad (3.1)$$

где $T_{внеш}$ и $T_{окр}$ – абсолютная температура внешней поверхности провода и окружающей среды; A_k и A_l – постоянные коэффициенты; k – показатель степени, зависящий от условий конвекции.

Охлаждение провода на открытом воздухе в основном происходит за счет вынужденной конвекции, в связи, с чем k принимает значение равное $k=1$, а нелинейность уравнения обуславливается наличием лучистого теплообмена.

Уравнение теплового баланса для стационарно режима имеет вид:

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta) = d_{np} \left[\pi \alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right], \quad (3.2)$$

где $\alpha_{вын}$ – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией; ε_n – коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела; Θ и $\Theta_{окр}$ – температуры соответственно провода и окружающей среды в °С; T и $T_{окр}$ – то же в К (абсолютные температуры); A_s – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения; $q_{солн}$ – плотность потока солнечной радиации на провод; d_{np} – диаметр провода; $\Delta P_0 = I^2 r_0$ – потери активной мощности в проводе на единицу длины при $\Theta = 0$ °С; I – ток в проводе; r_0 – погонное активное сопротивление провода при $\Theta = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления.

Чтобы записать уравнение теплового баланса провода в нестационарном режиме (3.3) необходимо ввести в правую часть производную температуры по времени, умноженную на теплоемкость провода – C . Вводимое слагаемое в (3.3) является мощностью расходуемой

на нагрев провода. Второе слагаемое в правой части (3.3) соответствует мощности теплообмена между проводом и окружающей средой. Эта мощность включает три составляющих: теплоотдачу конвекцией, теплообмен излучением и солнечную радиацию.

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta) = C \frac{d\Theta}{dt} + d_{np} \left[\pi \alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right]. \quad (3.3)$$

3.1. Аналитическое решение уравнения теплового баланса нестационарного теплового режима неизолированного провода

Уравнение теплового баланса (3.3) для нагрева (охлаждения) неизолированного провода воздушной линии на открытом воздухе запишем в следующем виде:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Delta P_0}{C} (1 + \alpha\Theta) - \frac{d_{np}}{C} \left[\pi\alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi\varepsilon_n C_0 (T^4 + T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right]. \quad (3.4)$$

При этом :

– Теплоёмкость на единицу длины равна:

$$C = C_{уд,Al} M_{Al} + C_{уд,ст} M_{ст}.$$

где $C_{уд,Al}$, $C_{уд,ст}$, – удельные массовые теплоемкости алюминия и стали; M_{Al} , $M_{ст}$ – масса алюминиевой и стальной части провода на единицу длины.

– Коэффициент вынужденной конвекции

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_v (P_{атм} V)^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}}.$$

– Плотность потока солнечной радиации.

$$q_{солн} = k_{зт} q_{s,np} \sin \phi_s + \pi q_{s,расс},$$

где $k_{зт}$ – коэффициент затенённости, $q_{s,np}$ – плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам. $q_{s,расс}$ – плотность потока рассеянной радиации, ϕ_s – угол между осью провода и направлением солнечных лучей.

Из формулы (3.4) видно, что для представления теплового потока квадратичной функцией температуры при вынужденной конвекции достаточно преобразовать только одну величину: T^4 . Распишем ее следующим образом:

$$T^4 = (T_{окр} + \Delta\Theta)^4 = \Delta\Theta^4 + 4T_{окр} \Delta\Theta^3 + 6T_{окр}^2 \Delta\Theta^2 + 4T_{окр}^3 \Delta\Theta + T_{окр}^4, \quad (3.5)$$

где $\Delta\Theta$ – разность температуры поверхности провода и температуры окружающей среды.

Обозначим «неквадратичную» составляющую (3.5) как функцию

$$F(\Delta\Theta) = \Delta\Theta^4 + 4T_{окр}\Delta\Theta^3. \quad (3.6)$$

Ниже произведено преобразование F по методу наименьших квадратов к функции H вида

$$H(\Delta\Theta) = M_2\Delta\Theta^2 + M_1\Delta\Theta + M_0. \quad (3.7)$$

Тогда верхняя граница диапазона преобразования для изолированных проводов в окончательном виде равна

$$\Delta\Theta_{\delta} = T_{дон} - T_{окр} - \delta. \quad (3.8)$$

Для неизолированных проводов

$$\Delta\Theta_{\delta} = T_{дон} - T_{окр}. \quad (3.9)$$

Здесь $\Delta\Theta_{\delta}$ – температурный диапазон, на котором производится преобразование; $T_{дон}$ – максимально допустимая температура провода.

Условие преобразования F к H имеет вид

$$\begin{aligned} \delta_{ск}^2 &= \frac{1}{\Delta\Theta_{\delta}} \int_0^{\Delta\Theta_{\delta}} (H - F)^2 d(\Delta\Theta) = \\ &= \frac{1}{\Delta\Theta_{\delta}} \int_0^{\Delta\Theta_{\delta}} (M_2\Delta\Theta^2 + M_1\Delta\Theta + M_0 - \Delta\Theta^4 - 4T_{окр}\Delta\Theta^3)^2 d(\Delta\Theta) \Rightarrow \min, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где $\delta_{ск}$ – среднеквадратичная разность функций H и F .

Минимум $\delta_{ск}$ определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial(\delta_{ск}^2)}{\partial M_2} = \frac{2}{\Delta\Theta_{\delta}} \int_0^{\Delta\Theta_{\delta}} \Delta\Theta^2 (M_2\Delta\Theta^2 + M_1\Delta\Theta + M_0 - \Delta\Theta^4 - 4T_{окр}\Delta\Theta^3) d(\Delta\Theta) = 0, \\ \frac{\partial(\delta_{ск}^2)}{\partial M_1} = \frac{2}{\Delta\Theta_{\delta}} \int_0^{\Delta\Theta_{\delta}} \Delta\Theta (M_2\Delta\Theta^2 + M_1\Delta\Theta + M_0 - \Delta\Theta^4 - 4T_{окр}\Delta\Theta^3) d(\Delta\Theta) = 0, \\ \frac{\partial(\delta_{ск}^2)}{\partial M_0} = \frac{2}{\Delta\Theta_{\delta}} \int_0^{\Delta\Theta_{\delta}} (M_2\Delta\Theta^2 + M_1\Delta\Theta + M_0 - \Delta\Theta^4 - 4T_{окр}\Delta\Theta^3) d(\Delta\Theta) = 0. \end{cases} \quad (3.11)$$

Произведя интегрирование и решив систему (3.11) относительно M_2 , M_1 и M_0 , получим следующие формулы для коэффициентов аппроксимации:

$$M_2 = \frac{12}{7} \Delta \Theta_\partial^2 + 6T_{окр} \Delta \Theta_\partial, \quad (3.12)$$

$$M_1 = -\frac{32}{35} \Delta \Theta_\partial^3 - \frac{12}{5} T_{окр} \Delta \Theta_\partial^2, \quad (3.13)$$

$$M_0 = \frac{3}{35} \Delta \Theta_\partial^4 + \frac{1}{5} T_{окр} \Delta \Theta_\partial^3. \quad (3.14)$$

Подставим (3.7) в (3.5)

$$T^4 = M_2 \Delta \Theta^2 + M_1 \Delta \Theta + M_0 + 6T_{окр}^2 \Delta \Theta^2 + 4T_{окр}^3 \Delta \Theta + T_{окр}^4 \quad (3.15)$$

Преобразуем (3.15)

$$\begin{aligned} T^4 &= (M_2 + 6T_{окр}^2)(\Theta - \Theta_{окр})^2 + (M_1 + 4T_{окр}^3)(\Theta - \Theta_{окр}) + M_0 + T_{окр}^4 = \\ &= (M_2 + 6T_{окр}^2)\Theta^2 + (M_1 + 4T_{окр}^3 - 2M_2\Theta_{окр} - 12T_{окр}^3\Theta_{окр})\Theta + \\ &+ (M_2 + 6T_{окр}^2)\Theta_{окр}^2 - (M_1 + 4T_{окр}^3)\Theta_{окр} + M_0 + T_{окр}^4. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Запишем (3.3) в следующем виде:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Delta P_0}{C} (1 + \alpha\Theta) - \frac{d_{np}}{C} \left[\pi\alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi\varepsilon_n C_0 (T^4 + T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right]. \quad (3.17)$$

Подставим (3.16) в (3.17)

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Delta P_0}{C} (1 + \alpha\Theta) - \frac{d_{np}}{C} \left[\pi\alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi\varepsilon_n C_0 \left((M_2 + 6T_{окр}^2)\Theta^2 + (M_1 + 4T_{окр}^3 - 2M_2\Theta_{окр} - 12T_{окр}^3\Theta_{окр})\Theta + (M_2 + 6T_{окр}^2)\Theta_{окр}^2 - (M_1 + 4T_{окр}^3)\Theta_{окр} + M_0 \right) - A_s q_{солн} \right]. \quad (3.18)$$

Обозначим $\Delta P_0 = I^2 R_0$.

$$A_1 = -\frac{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0}{C} (M_2 + 6T_{окр}^2), \quad (3.19)$$

$$A_2 = \frac{\Delta P_0 \alpha}{C} - \frac{\pi d_{np}}{C} \left[\alpha_{вын} + \varepsilon_n C_0 \left(M_1 + 4T_{окр}^3 - 2M_2 \Theta_{окр} - 12T_{окр}^2 \Theta_{окр} \right) \right], \quad (3.20)$$

$$A_3 = \frac{\Delta P_0}{C} + \frac{d_{np}}{C} \left[\begin{array}{l} \pi \alpha_{вын} \Theta_{окр} - \\ - \pi \varepsilon_n C_0 \left(M_0 + (M_2 + 6T_{окр}^2) \Theta_{окр}^2 - \right. \\ \left. - (M_1 + 4T_{окр}^3) \Theta_{окр} \right) + A_s q_{солн} \end{array} \right]. \quad (3.21)$$

Тогда (3.18) примет вид

$$\frac{d\Theta}{dt} = A_1 \Theta^2 + A_2 \Theta + A_3. \quad (3.22)$$

Дифференциальное уравнение (3.22) имеет аналитическое решение, вид которого зависит от типа корней алгебраического уравнения

$$A_1 \Theta^2 + A_2 \Theta + A_3 = 0. \quad (3.23)$$

Уравнение (3.23) описывает установившийся температурный режим провода. Следовательно, если этот режим существует, то корни уравнения – действительные. Будем также считать, что они различны. Все остальные случаи могут наблюдаться только в аварийных режимах.

Решим уравнение (3.22)

$$\int_0^t dt = \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{d\Theta}{A_1 \Theta^2 + A_2 \Theta + A_3}. \quad (3.24)$$

Интегрируя уравнение (3.24) получим

$$\frac{d\Theta}{A_1 \Theta^2 + A_2 \Theta + A_3} = dt. \quad (3.25)$$

Предположим, что правая часть уравнения (3.25) раскладывается на множители:

$$A_1 \Theta^2 + A_2 \Theta + A_3 = A_1 (\Theta - \Theta_1)(\Theta - \Theta_2). \quad (3.26)$$

Обозначим корни уравнения (3.26) примем, что $\Theta_1 > \Theta_2$.

$$\Theta_{1,2} = \frac{-A_2 \pm \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}. \quad (3.27)$$

Введем начальное условие: в момент времени $t=0$ $\Theta_{жс}=\Theta_0$, причем $\Theta_0 > \Theta_2$.

Разложим подынтегральное выражение (3.26) на элементарные дроби

$$\frac{1}{A_1\Theta^2 + A_2\Theta + A_3} = \frac{1}{A_1} \left(\frac{m_1}{\Theta - \Theta_1} + \frac{m_2}{\Theta - \Theta_2} \right) = \frac{1}{A_1} \frac{m_1\Theta - m_1\Theta_2 + m_2\Theta - m_2\Theta_1}{(\Theta - \Theta_1)(\Theta - \Theta_2)}; \quad (3.28)$$

$$m_1\Theta - m_1\Theta_2 + m_2\Theta - m_2\Theta_2 = 1; \quad (3.29)$$

$$\begin{cases} m_1 + m_2 = 0; \\ m_1\Theta_2 - m_2\Theta_1 = -1. \end{cases} \quad (3.30)$$

$$m_1 = \frac{1}{\Theta_1 - \Theta_2} = m_2. \quad (3.31)$$

С учетом (3.29), (3.30), (3.31) уравнение (3.28) примет вид

$$\frac{1}{A_1\Theta^2 + A_2\Theta + A_3} = \frac{1}{A_1(\Theta_1 - \Theta_2)} \left(\frac{1}{\Theta - \Theta_1} + \frac{1}{\Theta - \Theta_2} \right). \quad (3.32)$$

С учетом (3.32) проинтегрируем (3.24)

$$\int_0^t dt = \frac{1}{A_1(\Theta_1 - \Theta_2)} \left(\int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta - \Theta_1} - \int_{\Theta_0}^{\Theta} \frac{d\Theta}{\Theta - \Theta_2} \right). \quad (3.33)$$

Из (3.33) найдем t

$$t = \frac{1}{A_1(\Theta_1 - \Theta_2)} \ln \left[\frac{(\Theta - \Theta_1)(\Theta_0 - \Theta_2)}{(\Theta - \Theta_2)(\Theta_0 - \Theta_1)} \right]. \quad (3.34)$$

В уравнении (3.34) обозначим

$$T = \frac{1}{A_1(\Theta_2 - \Theta_1)}; \quad (3.35)$$

$$\Theta' = \frac{(\Theta_0 - \Theta_1)}{(\Theta_0 - \Theta_2)}. \quad (3.36)$$

Тогда с учетом (3.35) и (3.36) уравнение (3.34) примет следующий вид

$$-\frac{t}{T} = \ln \left(\frac{1}{\Theta'} \cdot \frac{\Theta - \Theta_1}{\Theta - \Theta_2} \right). \quad (3.37)$$

Выразим из (3.37) Θ'

$$\Theta' e^{\frac{-t}{T}} = \frac{\Theta - \Theta_1}{\Theta - \Theta_2}. \quad (3.38)$$

Величина $T > 0$, т.к. по формуле $A_1 < 0$, а $\Theta_2 \leq \Theta_1$.

Тогда

$$\frac{\Theta - \Theta_1}{\Theta - \Theta_2} = \frac{\Theta - \Theta_2}{\Theta - \Theta_2} - \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta - \Theta_2}. \quad (3.39)$$

Исходя из определения формулы (3.39) переопределим Θ'

$$\Theta' e^{\frac{-t}{T}} = 1 - \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\Theta - \Theta_2}. \quad (3.40)$$

Из (3.40)

$$\frac{\Theta - \Theta_2}{\Theta_1 - \Theta_2} = \frac{1}{1 - \Theta' e^{\frac{-t}{T}}}. \quad (3.41)$$

Тогда из уравнения (3.41) температура жилы в неустановившемся режиме равна:

$$\Theta(t) = \Theta_2 + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{1 - \Theta' e^{-t/T_n}}, \quad (3.42)$$

где введены обозначения

$$T_n = -\frac{1}{A_1(\Theta_1 - \Theta_2)}, \quad (3.43)$$

$$\Theta' = \frac{\Theta_0 - \Theta_1}{\Theta_0 - \Theta_2}. \quad (3.44)$$

Формула (3.44) описывает аperiodический процесс по форме кривой сходный с экспонентой. Однако, если простая экспоненциальная зависимость $(A + Be^{-t/T})$ задается тремя величинами (A, B, T) , то для задания функции вида

(3.44) требуется 4 величины ($\Theta_1, \Theta_2, \Theta_0, T$). Дополнительная четвертая величина определяет вклад нелинейного слагаемого.

Параметр T , как и постоянная времени в стандартной экспоненциальной функции, определяет временной масштаб (инерционность) процесса. Однако количественный смысл параметра T более сложен.

Также из (3.44) видно, что при $t \rightarrow \infty$, $\Theta_{жс} = \Theta_1$, т.е. Θ_1 представляет собой температуру жилы в установившемся режиме. Отсюда следует, что выражение под знаком логарифма положительно, если $\Theta_{жс} > \Theta_2$. Первоначально будем исходить из этого предположения. В противном случае решение справедливо.

Для определения потерь энергии за время τ требуется знать интеграл

$\int_0^{\tau} \Theta_{жс} dt$ или среднюю за τ температуру жилы $\Theta_{жс.ср}$. Она равна

$$\Theta_{жс.ср} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \Theta_{жс} dt = \Theta_2 + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{dt}{1 - \Theta' e^{-\frac{t}{T}}};$$

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{1 - \Theta' e^{-\frac{t}{T}}} = \int_0^{\tau} \frac{e^{-\frac{t}{T}} dt}{e^{-\frac{t}{T}} (1 - \Theta' e^{-\frac{t}{T}})} = -T \int_{z=1}^{z=e^{-\frac{\tau}{T}}} \frac{dz}{z(1 - \Theta' z)} = \frac{T}{\Theta'} \int_{z=1}^{z=e^{-\frac{\tau}{T}}} \frac{dz}{z \left(z - \frac{1}{\Theta'} \right)} =$$

$$= T \int_{z=1}^{z=e^{-\frac{\tau}{T}}} \left(\frac{dz}{z - \frac{1}{\Theta'}} - \frac{dz}{z} \right) =$$

3.45

$$= T \left[\ln \left(z - \frac{1}{\Theta'} \right) - \ln z \right] = T \left[\ln \left(e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{1}{\Theta'} \right) - \ln \left(e^{-\frac{\tau}{T}} \right) \right] = T \left[\ln \left(\frac{e^{-\frac{\tau}{T}} - \frac{1}{\Theta'}}{1 - \frac{1}{\Theta'}} \right) + \frac{\tau}{T} \right] =$$

$$= \tau + T \ln \left(\frac{1 - \Theta' e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - \Theta'} \right).$$

Если $\Theta_2 < \Theta_{ж.неуст.} < \Theta_1$, то по формуле $\Theta' < 0$, следовательно, выражение под последним логарифмом положительно.

$$\Theta_{ж,ср} = \Theta_2 + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{\tau} \tau + (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{T}{\tau} \ln \left(\frac{1 - \Theta' e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - \Theta'} \right) \quad (3.46)$$

Тогда (3.52), соответственно, с учетом (3.53) равна

$$\Theta_{ср} = \Theta_1 + (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{T}{\tau} \ln \left(\frac{1 - \Theta' e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - \Theta'} \right). \quad (3.47)$$

Тогда потери энергии за время τ в трехфазной линии длиной l

$$\Delta W = 3\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{ср}) \tau l, \quad (3.48)$$

где l – длина провода.

3.2. Математическая модель расчета температуры изолированного провода линии электропередачи во время изменении режимно- атмосферных факторов

Уравнение теплового баланса (3.3) для нагрева (охлаждения) изолированного провода воздушной линии на открытом воздухе может быть записано в следующем виде

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{жс}) = C_{экр} \frac{d\Theta_{жс}}{dt} + d_{пр} \left[\pi \alpha_{вын} (\Theta_{внеш} - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right], \quad (3.49)$$

где $\Theta_{жс}$ – температура токоведущей жилы; $C_{экр}$ – эквивалентная теплоемкость провода на единицу длины; $\Theta_{внеш}$ – температуры соответственно поверхности провода в °С; $T_{внеш}$ – тоже в К (абсолютные температуры).

Наличие у СИП изоляции позволяет принять его теплоемкость аналогично теплоемкости кабеля, проложенного в воздухе. Тогда [50]

$$C_{экр} = C_{жс} + k_{из} C_{из} + C_{об} k_{об}, \quad (3.50)$$

где

$$k_{из} = \frac{S_э + \sigma_{из}/4\pi}{S_э + S_{из}} - \frac{S_{из}}{S_{из} + S_э} + \frac{r_0^2}{R^2 - r_0^2}; \quad (3.51)$$

$$k_{об} = \frac{S_э}{S_э + S_{из}}; \quad (3.52)$$

$$C_{жс} = c_{жс} Q_{жс}, \quad (3.53)$$

где $C_{жс}$ – теплоемкость жилы, Дж/кг·°С; $C_{из}$ – теплоемкость изоляции, Дж/кг·°С; $C_{экр}$ – эквивалентная теплоемкость, которая не равна фактической теплоемкости провода, Дж/кг·°С; $S_э$ – тепловое сопротивление воздуха, °С·м/Вт; $S_{из}$ – тепловое сопротивление изоляции одножильного кабеля, °С·м/Вт; R – номинальный радиус провода с изоляцией, м; r_0 – номинальный радиус токоведущей жилы провода, м; $b_{из}$ – удельное тепловое сопротивление изоляции, °С · м/Вт; $c_{жс}$ – удельная объемная теплоемкость жилы, Дж/м³·°С; $c_{из}$ – удельная объемная теплоемкость изоляции, Дж/м³·°С; $Q_{жс}$ – сечение жилы, м²; $Q_{из}$ – сечение изоляции, м².

С учетом особенностей математической модели СИП, преобразуем формулу (3.50) и запишем ее в виде

$$C_{\text{экв}} = C_{\text{жс}} + k_{\text{из}} C_{\text{из}} . \quad (3.54)$$

Произведем расчет тепловых сопротивлений следующим образом:

Из определения электрического смещения и теплопроводности при постоянной времени значительно большей полупериода ($\varepsilon\varepsilon_0\rho_v \gg (1/2f)$) и примерно равной ($\varepsilon\varepsilon_0\rho_v \approx (1/2f)$) полупериоду справедливы такие выражения [50]:

$$\begin{cases} D = \varepsilon\varepsilon_0 E = -\varepsilon\varepsilon_0 dU / dr ; \\ q = -\lambda d\tau / dr , \end{cases} \quad (3.55)$$

где D – электрическое смещение, Кл/м²; q – поток тепла через единицу поверхности в единицу времени, Вт/м²; $\tau = T - T_{об}$ – превышение температуры в изоляции над температурой оболочки ($T_{об}$ – температура оболочки, К), E – напряженность электрического поля, В/м; U – напряжение в кабеле, В, λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала, ε_0 – электрическая постоянная, примерно равна $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Используя теорему Гаусса, мы сможем записать уравнения для электрического и теплого поля соответственно в виде

$$\oint_s D ds = Q ; \quad (3.56)$$

$$\oint_s q ds = Q_i , \quad (3.57)$$

где s – замкнутая поверхность, м², Q – заряд внутри поверхности S , Кл, Q_i – общее количество тепла, выделяющееся внутри объема, ограниченного поверхностью S , Дж/м³.

Из чего очевидно, что $D \cong q$, $\varepsilon\varepsilon_0 \cong \lambda$, $d\tau / dr \cong E$, $U \cong T$.

Если поле радиально, то на цилиндрической поверхности S значение q будет постоянными и может быть вынесено за знак интеграла. Отсюда:

$$-d\tau / dr = p_{\text{жс}} / (2\pi\lambda) , \quad (3.58)$$

где $p_{ж} = Q_i$ – потери энергии в жиле, Вт.

Тогда для теплового поля, из этой формулы при $\lambda = \text{const}$ следует, что

$$\tau_{ж} = \frac{p_{ж}}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right), \quad (3.59)$$

где τ – превышение температуры жилы над температурой оболочки, $^{\circ}\text{C}$.

Из (3.59) следует что тепловое сопротивление кабеля равно

$$S_{из} = \frac{1}{2\pi\lambda} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right). \quad (3.60)$$

Тогда тепловое сопротивление изоляции для одножильного кабеля на единицу длины, по формуле (3.15) можно представить в следующем виде

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln\left(\frac{R}{r_0}\right). \quad (3.61)$$

Формула для вычисления теплового сопротивления воздуха в именованных единицах $[\text{K}/\text{Вт}\cdot\text{м}^2]$ получена нами аналитически с учетом особенностей математической модели СИП и простых физических соображений

$$S_{в} = \frac{\Theta_{внеш} - \Theta_{окр}}{\Delta P}, \text{ при } \Theta_{окр} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.62)$$

где ΔP – тепловыделение в СИП, Вт; $\Theta_{внеш}$ – температура внешней поверхности изоляции, $^{\circ}\text{C}$; $\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

Допустим, что температуры $\Theta_{внеш}$, $\Theta_{ж}$ имеют линейную взаимосвязь. Тогда

$$и' \quad (3.63)$$

С учетом (3.63) может быть записана система (3.64) для неустановившегося режима

$$\begin{cases} \Theta_{внеш.уст} = k_2 \Theta_{ж} - b_2; \\ \Theta_{внеш.0} = k_2 \Theta_{ж0} - b_2, \end{cases} \quad (3.64)$$

где $\Theta_{внеш.уст}$ – температура внешней поверхности изоляции в установившемся режиме, $^{\circ}\text{C}$; $\Theta_{внеш.0}$ – температура внешней поверхности изоляции в неустановившемся режиме (при начальном времени $t=0$ с), $^{\circ}\text{C}$; $\Theta_{ж0}$ – температура жилы в начальный момент времени $t=0$ с, $^{\circ}\text{C}$.

Решение системы уравнений (3.64) позволит нам получить формулы для нелинейных коэффициентов k_2 и b_2

$$k_2 = \frac{\Theta_{\text{внеш.уст}} - \Theta_{\text{внеш}0}}{\Theta_{\text{ж}} - \Theta_{\text{ж}0}}; \quad (3.65)$$

$$b_2 = k_2 \Theta_{\text{ж}} - \Theta_{\text{внеш.уст}}; \quad (3.66)$$

$$\Theta_{\text{ж}} = \Theta_{\text{внеш}} + \Delta P \cdot S_{\text{из}}. \quad (3.67)$$

В [49] рассмотрено преобразование уравнения теплового баланса путем понижения степени температуры до второй на основе метода наименьших квадратов

$$\begin{aligned} T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4 \approx M_2 (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}})^2 + M_1 (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + M_0 + \\ + 6T_{\text{окр}}^2 (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}})^2 + 4T_{\text{окр}}^3 (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}). \end{aligned} \quad (3.68)$$

Для коэффициентов аппроксимации M_1 , M_2 , M_0 получены следующие формулы

$$M_2 = \frac{12}{7} \Delta \Theta_{\text{д}}^2 + 6T_{\text{окр}} \Delta \Theta_{\text{д}}; \quad (3.69)$$

$$M_1 = -\frac{32}{35} \Delta \Theta_{\text{д}}^3 - \frac{12}{5} T_{\text{окр}} \Delta \Theta_{\text{д}}^2; \quad (3.70)$$

$$M_0 = \frac{3}{35} \Delta \Theta_{\text{д}}^4 + \frac{1}{5} T_{\text{окр}} \Delta \Theta. \quad (3.71)$$

Здесь $\Delta \Theta_{\text{д}} = \Theta_{\text{доп}} - \Theta_{\text{окр}}$ используется как диапазон температур, на котором производится преобразование; $\Theta_{\text{доп}}$ – максимально допустимая температура провода, $^{\circ}\text{C}$.

Дифференциальное уравнение нагрева (3.49) приводится к приближенной (квадратичной) форме

$$\frac{d\Theta_{\text{ж}}}{dt} = A_1 \Theta_{\text{ж}}^2 + A_2 \Theta_{\text{ж}} + A_3. \quad (3.72)$$

Подставив (3.63) и (3.68) в (3.49), получим следующие расчетные выражения для коэффициентов A_1 , A_2 , A_3

$$A_1 = -\frac{\pi d_{\text{пр}} \varepsilon_{\text{п}} C_0 k^2}{C_{\text{экв}}} (M_2 + 6T_{\text{окр}}^2); \quad (3.73)$$

$$A_2 = \frac{\Delta P_0 \alpha}{C_{\text{экв}}} - \frac{\pi d_{\text{пр}} k}{C_{\text{экв}}} \left[\alpha_{\text{вын}} + \varepsilon_{\text{п}} C_0 (M_1 + 4T_{\text{окр}}^3 - 2(b + \Theta_{\text{окр}})(M_2 + 6T_{\text{окр}}^2)) \right]; \quad (3.74)$$

$$A_3 = \frac{\Delta P_0}{C_{\text{экв}}} + \frac{\pi d_{\text{пр}}}{C_{\text{экв}}} (b + \Theta_{\text{окр}}) \left[\alpha_{\text{вын}} + \varepsilon_{\text{п}} C_0 (M_1 + 4T_{\text{окр}}^3) \right] - \frac{\pi d_{\text{пр}} \varepsilon_{\text{п}} C_0}{C_{\text{экв}}} \left[(M_2 + 6T_{\text{окр}}^2)(b + \Theta_{\text{окр}})^2 + M_0 \right] + \frac{d_{\text{пр}} A_s q_{\text{сопл}}}{C_{\text{экв}}}. \quad (3.75)$$

Дифференциальное уравнение (3.72) имеет аналитическое решение, вид которого зависит от типа корней алгебраического уравнения

$$A_1 \Theta_{\text{ж}}^2 + A_2 \Theta_{\text{ж}} + A_3 = 0. \quad (3.76)$$

Корни уравнения (3.76) должны быть действительными и разными, если имеет случай получения комплексно-сопряженных корней, или корни действительные и одинаковые (пограничная ситуация) исключаются из рассмотрения.

Таким образом, корни уравнения (3.76) можно записать в виде выражения (3.77):

$$\Theta_{1,2} = \frac{-A_2 \mp \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}. \quad (3.77)$$

Причем $\Theta_1 = \frac{-A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}$ на много больше

$\Theta_2 = \frac{-A_2 + \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}$, при этом температура Θ_2 имеет сильно отрицательные значения, которые находятся обычно меньше не только температуры окружающей среды, но и абсолютного нуля.

Тогда уравнение (3.49) имеет представленное ниже решение:

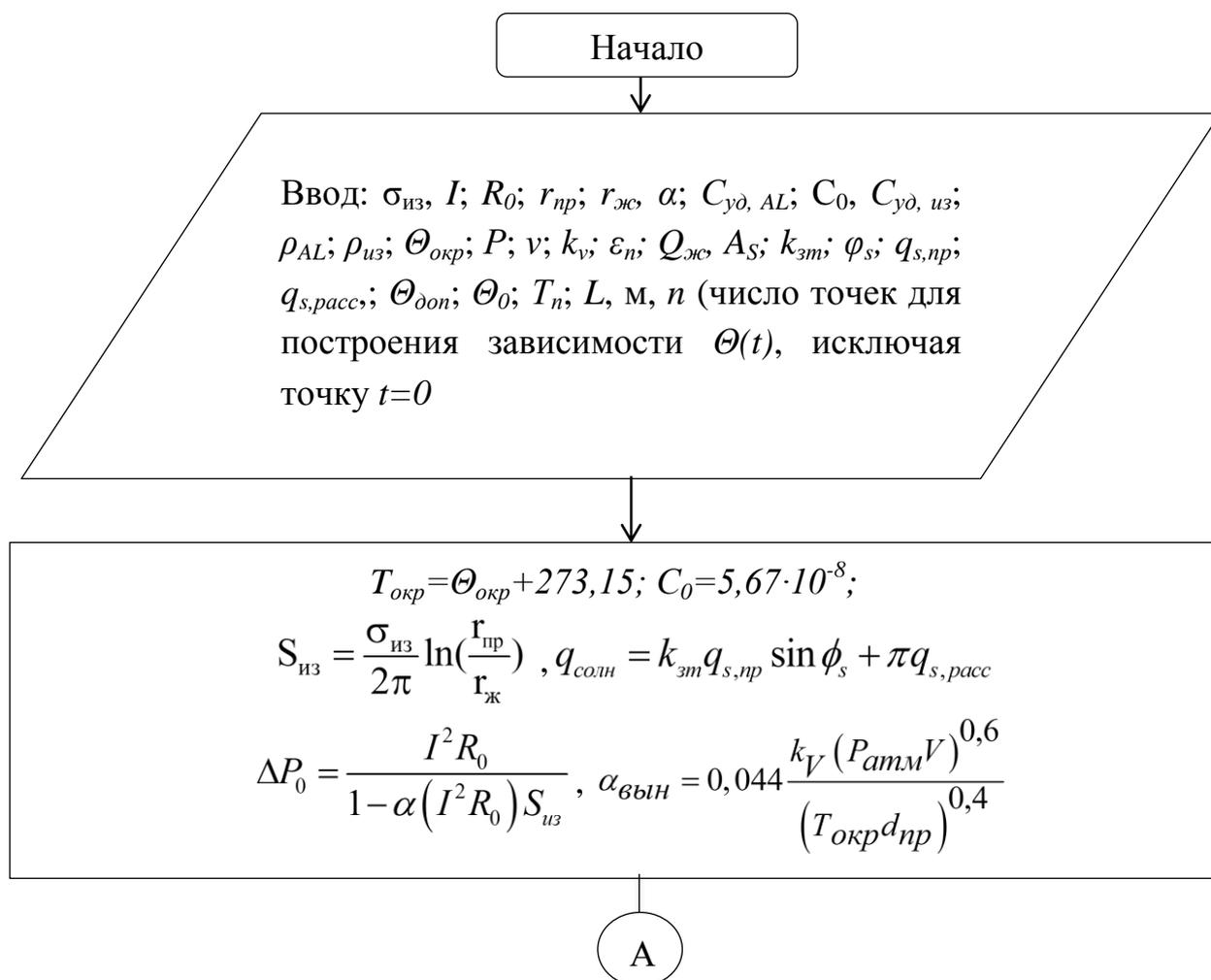
$$\Theta_{ж.неуст} = \Theta_2 + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{1 - \Theta' e^{-\frac{t}{T}}} . \quad (3.78)$$

Средняя температура за некоторое время τ получается путем интегрирования (3.78):

$$\Theta_{ж.ср} = \Theta_1 + (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{T}{\tau} \ln \left(\frac{1 - \Theta' e^{-\frac{\tau}{T}}}{1 - \Theta'} \right) . \quad (3.79)$$

3.3. Алгоритм расчета потерь электрической энергии в изолированных проводах с учетом температуры при нестационарном режиме

Согласно проведенным исследованиям предлагается к рассмотрению алгоритм (рисунок 3.1) расчета потерь энергии в самонесущих изолированных проводах (СИП) воздушных линиях электропередачи с учетом режимно-климатических факторов. Разработанный алгоритм позволяет рассчитывать потери электрической энергии во всех одножильных самонесущих проводах (СИП-3, SAX), а также в проводах с четырехпроводной системой (СИП-1, СИП-2, СИП-4), при условии, что токоведущие жилы находятся на расстоянии, при котором не учитывается тепловой поток соседних фаз. Практическое применение представленного алгоритма рассмотрено в разделе 4.



А

$$\Delta\Theta_{\delta} = \Theta_{\text{дон}} - \Theta_{\text{окр}};$$

$$A_2 = \varepsilon_n C_0 \left(\frac{12}{7} \Delta\Theta_{\delta}^2 + 6\Delta\Theta_{\delta} + 6T_{\text{окр}}^2 \right)$$

$$A_1 = \alpha_{\text{вын}} + 4\varepsilon_n C_0 \left(T_{\text{окр}}^3 - \frac{8}{35} \Delta\Theta_{\delta}^3 - \frac{3}{5} T_{\text{окр}} \Delta\Theta_{\delta}^2 \right) - \frac{\alpha \cdot \Delta P_0}{\pi d_{\text{пр}}}$$

$$A_0 = \frac{\varepsilon_n C_0 \Delta\Theta_{\delta}^3}{5} \left(\frac{3}{7} \Delta\Theta_{\delta} + T_{\text{окр}} \right) - \frac{\Delta P_0 (1 + \alpha\Theta_{\text{окр}})}{\pi d_{\text{пр}}} - \frac{A_3 q_{\text{солн}}}{\pi}$$

$$\Theta_{\text{внеш}} = \Theta_{\text{окр}} + \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_2 A_0} - A_1}{2A_2}$$

$$S_{\text{г}} = \frac{\Theta_{\text{экв}}}{\Delta P_0 (1 + \alpha\Theta_{\text{внеш}})}$$

$$C_{\text{жс}} = C_{\text{удAL}} Q_{\text{жс}} \rho_{\text{AL}}; k_{\text{из}} = \frac{S_{\text{в}} + \sigma_{\text{из}}/4\pi}{S_{\text{в}} + S_{\text{из}}} - \frac{S_{\text{из}}}{S_{\text{из}} + S_{\text{в}}} + \frac{r_{\text{ж}}^2}{r_{\text{пр}}^2 - r_{\text{ж}}^2}$$

$$C_{\text{из}} = C_{\text{уиз}} \rho_{\text{из}} \pi (r_{\text{пр}} - r_{\text{ж}}) C_{\text{экв}} = C_{\text{ж}} + k_{\text{из}} C_{\text{из}}$$

$$\Theta_{\text{жс}} = \Theta_{\text{внеш}} + S_{\text{из}} \Delta P_0; k_2 = \frac{\Theta_{\text{внеш.уст}} - \Theta_{\text{внеш}0}}{\Theta_{\text{ж}} - \Theta_{\text{ж}0}}$$

$$b_2 = k_2 \Theta_{\text{ж}} - \Theta_{\text{внеш.уст.}}$$

$$M_1 = -\frac{32}{35} \Delta\Theta_{\delta}^3 - \frac{12}{5} T_{\text{окр}} \Delta\Theta_{\delta}^2; M_2 = \frac{12}{7} \Delta\Theta_{\delta}^2 + 6T_{\text{окр}} \Delta\Theta_{\delta}$$

$$M_0 = \frac{3}{35} \Delta\Theta_{\delta}^4 + \frac{1}{5} T_{\text{окр}} \Delta\Theta_{\delta}^3$$

Б

Б

$$A_1 = -\frac{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0 k^2}{C_{\text{экв}}} (M_2 + 6T_{\text{окр}}^2);$$

$$A_2 = \frac{\Delta P_0 \alpha}{C_{\text{экв}}} - \frac{\pi d_{np} k}{C_{\text{экв}}} \left[\alpha_{\text{вын}} + \varepsilon_n C_0 (M_1 + 4T_{\text{окр}}^3 - 2(b + \Theta_{\text{окр}})(M_2 + 6T_{\text{окр}}^2)) \right]$$

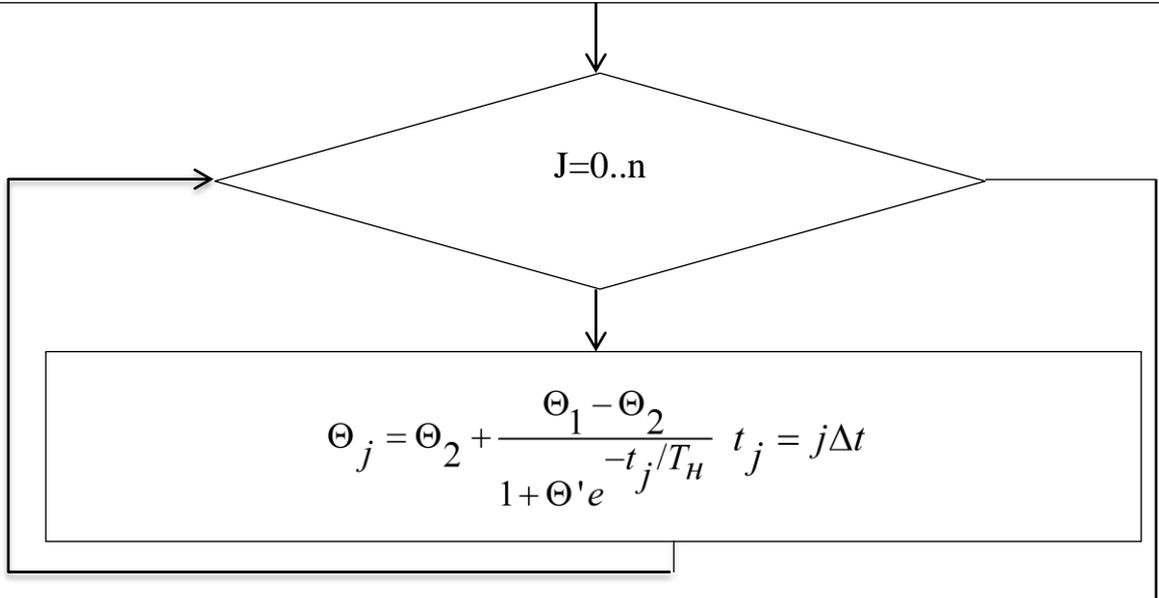
$$A_3 = \frac{\Delta P_0}{C'_{\text{экв}}} + \frac{\pi d_{np} (b + \Theta_{\text{окр}})}{C'_{\text{экв}}} (\alpha_{\text{вын}} + \varepsilon_n C_0 [M_1 + 4T_{\text{окр}}^3]) -$$

$$-\frac{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0}{C'_{\text{экв}}} \left([M_2 + 6T_{\text{окр}}^2] [b + \Theta_{\text{окр}}] + M_0 \right) + \frac{d_{np} A_s q_{\text{солн}}}{C'_{\text{экв}}}$$

$$\Theta_1 = \frac{-A_2 - \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}; \quad \Theta_2 = \frac{-A_2 + \sqrt{A_2^2 - 4A_1 A_3}}{2A_1}$$

$$T_H = -\frac{1}{A_1 (\Theta_1 - \Theta_2)}; \quad \Theta' = \frac{\Theta_0 - \Theta_1}{\Theta_0 - \Theta_2} \quad T_H = T_H / 60$$

Шаг расчета $\Delta T = T_H / n$



$$\Theta_{cp} = \Theta_1 + (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{T_H}{T_n} \ln \left(\frac{1 - \Theta' e^{-T_n / T_H}}{1 - \Theta'} \right)$$

Б

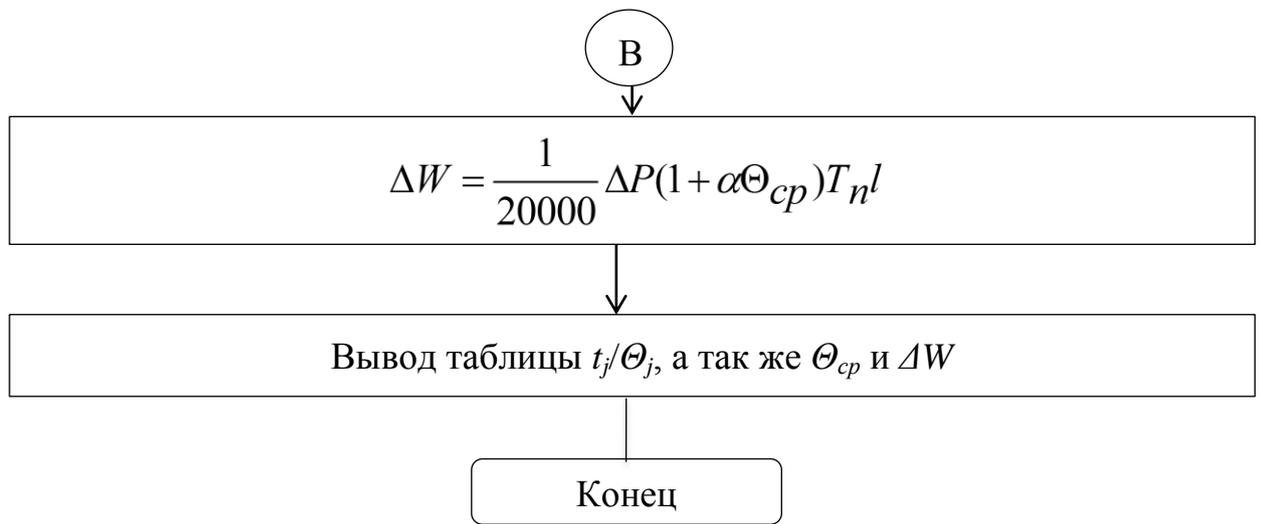
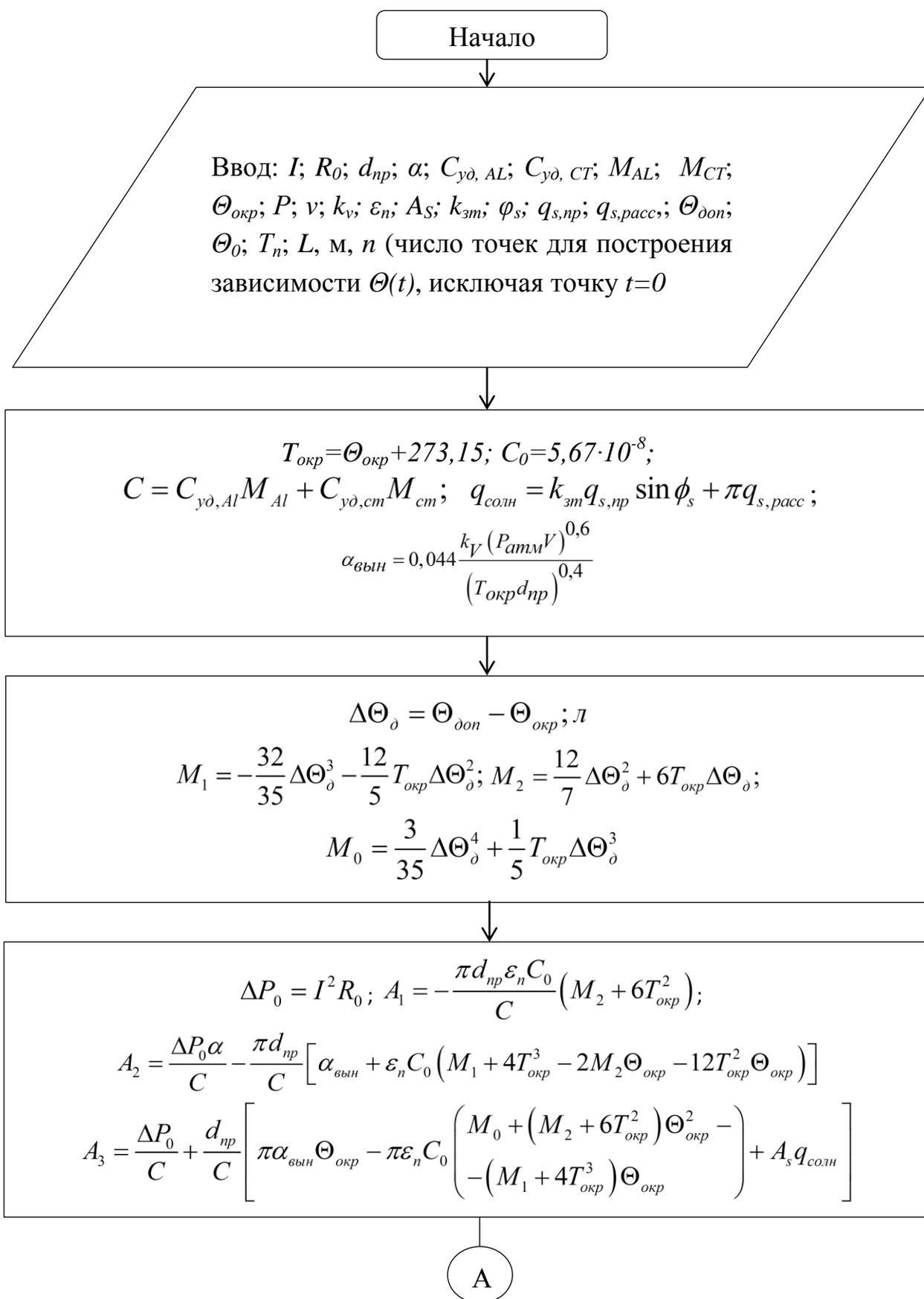


Рисунок 3.1 – Алгоритм расчета потерь электрической энергии в изолированных проводах с учетом температуры при нестационарном режиме

3.4. Алгоритм расчета потерь электрической энергии в неизолированных проводах с учетом температуры при нестационарном режиме



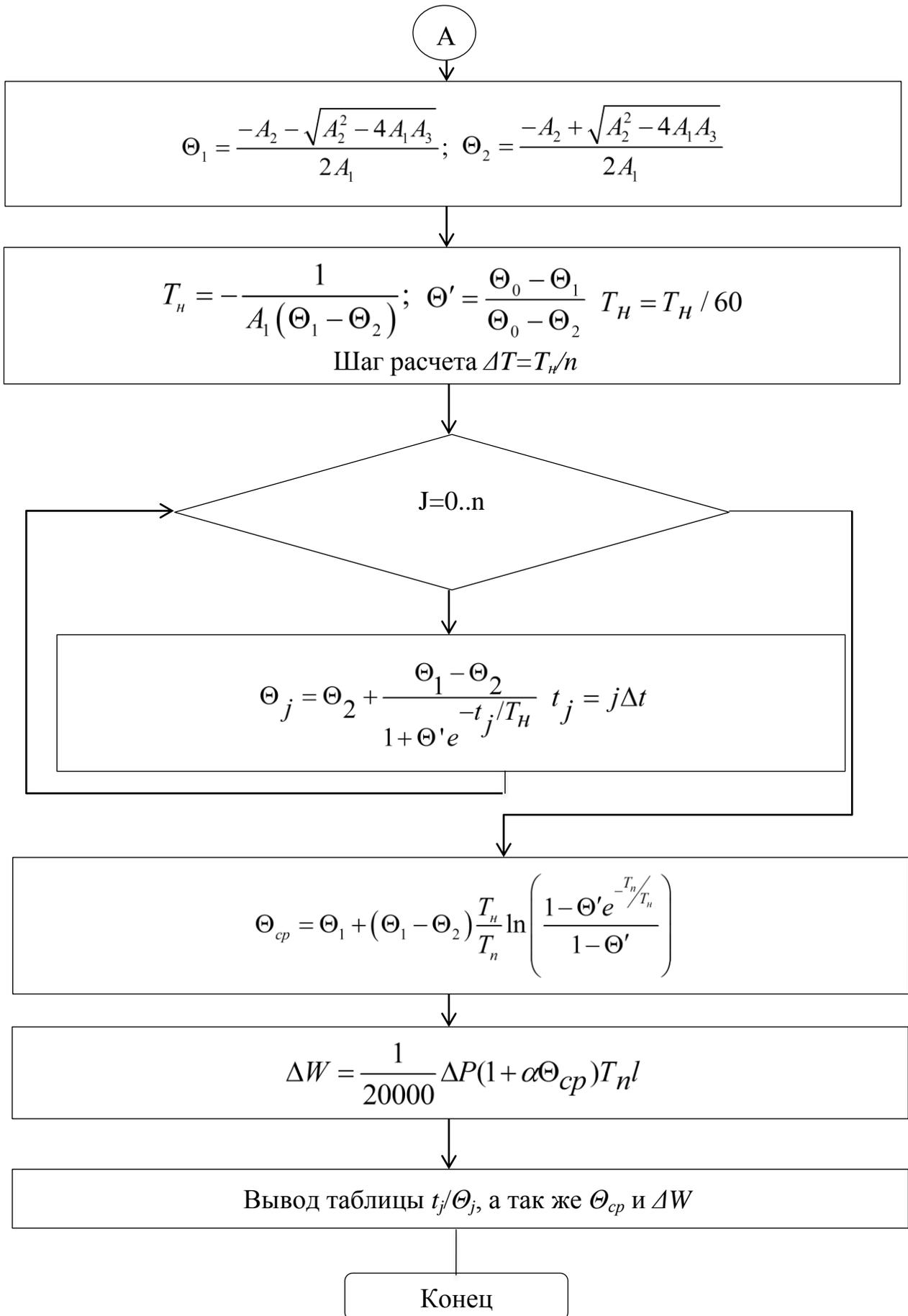


Рисунок 3.2 – Алгоритм расчета потерь электрической энергии в неизолированных проводах при нестационарных тепловых режимах работы

Соответствующая алгоритму программа расчета потерь реализована в программном комплексе Delphi (рисунок 3.3). Для работы «T-wire1» для расчета нестационарных температурных режимов изолированных проводов воздушных линий электропередачи на компьютере пользователя необходимы следующие аппаратные и программные средства:

1. ОС: Windows 95/98/2000/2003/XP/Vista/7.
2. Тип ЭВМ: IBM PC-совмест. ПК.
3. Частота процессора не ниже 1 ГГц.
4. Оперативная память 32 Мб.
5. Наличие не менее 10 Мб свободного места на диске.
6. MS Excel 2007 и выше.

Условия применения должны соответствовать современным требованиям, предъявляемым к эксплуатации программного обеспечения. Программа требует установленного пакета Microsoft Excel 2007 или выше и может быть запущена с любого носителя.

The screenshot shows the 'T-wire 1' application window with two tabs: 'Данные для расчета' (Data for calculation) and 'Расчет' (Calculation). The 'Данные для расчета' tab is active and contains several input fields organized into sections:

- Параметры провода (Conductor parameters):**
 - Погонное активное сопротивление при 20°C: [input] Ом.
 - Диаметр провода: [input] м.
 - Допустимая температура провода: [input] °C.
 - Длина линии: [input] м.
 - Масса 1 метра алюминиевой части провода: [input] кг/м.
 - Масса 1 метра стальной части провода: [input] кг/м.
 - Температура провода в момент времени t=0: [input] °C.
- Параметры сети (Network parameters):**
 - Ток нагрузки: [input] А.
- Временные параметры расчета нестационарных температурных режимов проводов ЛЭП (Calculation time parameters for non-stationary temperature regimes of power line conductors):**
 - Расчетный период: [input] мин.
- Погодные условия (Weather conditions):**
 - Температура окружающей среды: [input] °C.
 - Атмосферное давление: [input] Па.
 - Скорость ветра: [input] м/с.
 - Коэффициент угла атаки ветра: [input].

T-wire 1

Данные для расчета **Расчет**

Дополнительные параметры расчета

Температурный коэффициент сопротивления
 0,0043 1/°C Иначе 1/°C

Удельная теплоемкость алюминия
 922 Дж/(кг*°C) Иначе Дж/(кг*°C)

Удельная теплоемкость стали
 452 Дж/(кг*°C) Иначе Дж/(кг*°C)

Степень черноты поверхности провода
 0.6 Иначе

Коэффициент затененности участков ЛЭП
 0.9 Иначе

Плотность потока солнечной радиации
Прямой Вт/м2
Рассеянной Вт/м2

Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения
 0.6 Иначе

Угол между осью провода и направлением солнечных лучей

Средняя температура °C Потери энергии кВт*час

Сохранение результата расчета

Расчет

Рисунок 3.3 – Программа расчета и потерь электрической энергии в неизолированном проводе

3.5. Выводы

1. Произведено решение уравнения теплового баланса в нестационарном тепловом режиме аналитическим методом, для чего было произведено понижение степени температуры, используя метод наименьших квадратов.
2. Разработана математическая модель для определения потерь энергии и температуры в нестационарном режиме работы неизолированных проводов воздушных линий.
3. Разработана математическая модель для расчета потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах при изменении климатически и режимных факторов.
4. Создан алгоритм расчета температуры и потерь электрической энергии за период теплового переходного процесса при изменении режимных и атмосферных факторов в самонесущих изолированных проводах.
5. Создан алгоритм расчета потерь электроэнергии и температуры в нестационарном тепловом режиме работы неизолированных проводов воздушных линий электропередачи.
6. На основе алгоритмов создана программа в программном комплексе Delphi для определения температуры и потерь энергии в неизолированных проводах.

ГЛАВА 4. ИСЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЖИМЕ

4.1. Сравнение аналитического и численного решений дифференциального уравнения нестационарного теплового режима работы провода

Проведено сравнение результатов расчета теплового процесса разработанным методом и численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка. Условия расчета представлены в таблице 4.1 [57]. Параметры окружающей среды выбирались произвольно.

Таблица 4.1 – Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе АС-240/32

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °C ⁻¹
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_{\text{п}}$	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6
Температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}$	10 °C
Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$	100000 Па
Скорость ветра V	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра k_v	0,75
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s, \text{пр}}$	500 Вт/м ²
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s, \text{расс}}$	100 Вт/м ²
Коэффициент, учитывающий затененность участков линии $k_{\text{зм}}$	0,9
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей φ_s	45°
Ток нагрузки I	600 А
Диаметр провода $d_{\text{пр}}$	0,0216 м
Погонное активное сопротивление при 0 °C r_0	0,0001114 Ом/м

Допустимая температура провода $\Theta_{доп}$	70 °С
Температура провода в момент времени $t=0$ Θ_0	10 °С
Удельная теплоемкость алюминия $C_{уд,Al}$	922 Дж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость стали $C_{уд,ст}$	452 Дж/(кг·°С)
Погонная масса алюминия M_{Al}	0,673 кг/м
Погонная масса стали $M_{ст}$	0,248 кг/м
Длина линии l	50000 м
Расчетный период T_n	60 мин

Несовпадения результатов расчета разработанным аналитическим методом и численным методом Рунге-Кутты определяются выражениями:

$$\delta = ((\Theta_{чс} - \Theta_{ан}) / \Theta_{чс}) 100\% \quad (4.1)$$

$$\varepsilon = \Theta_{чс} - \Theta_{ан} \quad (4.2)$$

Результаты расчетов температуры провода, полученные разработанным аналитическим методом $\Theta_{ан}$ и численным методом Рунге-Кутты $\Theta_{чс}$, представлены в таблице 4.2 и на рисунках 4.1, 4.2, 4.3. Представленные результаты показывают, что предложенный аналитический метод по точности практически не отличается от эталонного численного метода, и разность значений температуры составляет около сотых долей градуса. В масштабе рисунка 1 графики не различаются.

Средняя температура и потери энергии за расчетный период, вычисленные по формулам (3.71), (3.72), равны: $\Theta_{ж,ср} = 45,39$ °С; $\Delta W = 7189,7$ кВт·час.

Таблица 4.2 – Сравнение результатов расчета

t, мин	$\Theta_{ан}(t)$, °С	$\Theta_{чс}(t)$, °С	δ , %	ε (°С)
0	10	10	0,0000	0
2	17,48	17,48	0,0000	0
4	23,69	23,69	0,0000	0
6	28,83	28,83	0,0000	0
8	33,08	33,07	-0,0302	-0,01
10	36,58	36,57	-0,0273	-0,01
12	39,46	39,45	-0,0253	-0,01

16	43,77	43,77	0,0000	0
20	46,68	46,68	0,0000	0
24	48,63	48,63	0,0000	0
28	49,93	49,94	0,0200	0,01
32	50,81	50,82	0,0197	0,01
36	51,4	51,4	0,0000	0
40	51,79	51,8	0,0193	0,01
44	52,05	52,06	0,0192	0,01
48	52,22	52,23	0,0191	0,01
52	52,34	52,35	0,0191	0,01
56	52,42	52,43	0,0191	0,01
60	52,47	52,48	0,0191	0,01

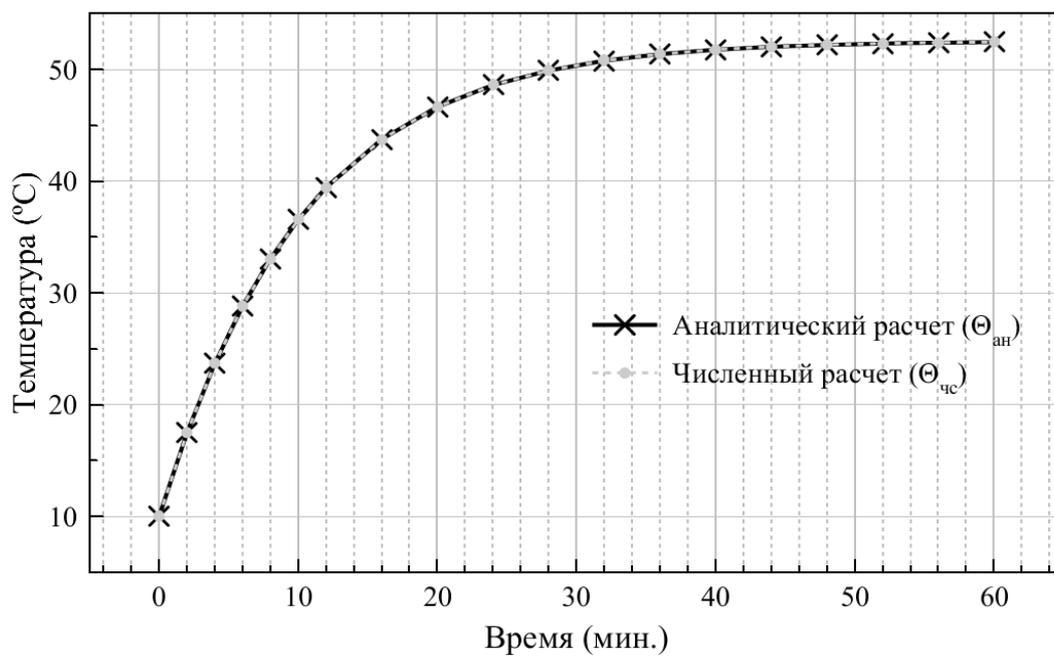


Рисунок 4.1 – Результаты расчета теплового процесса в проводе АС-240/32

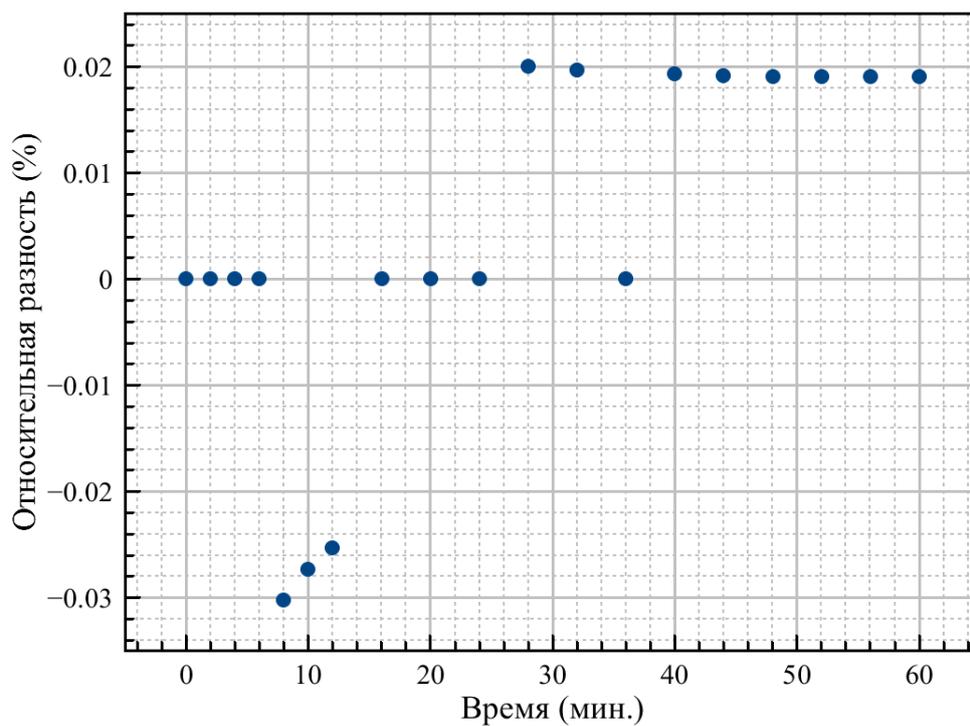


Рисунок 4.2 – Относительная разность температур, полученных аналитическим и числовым методом

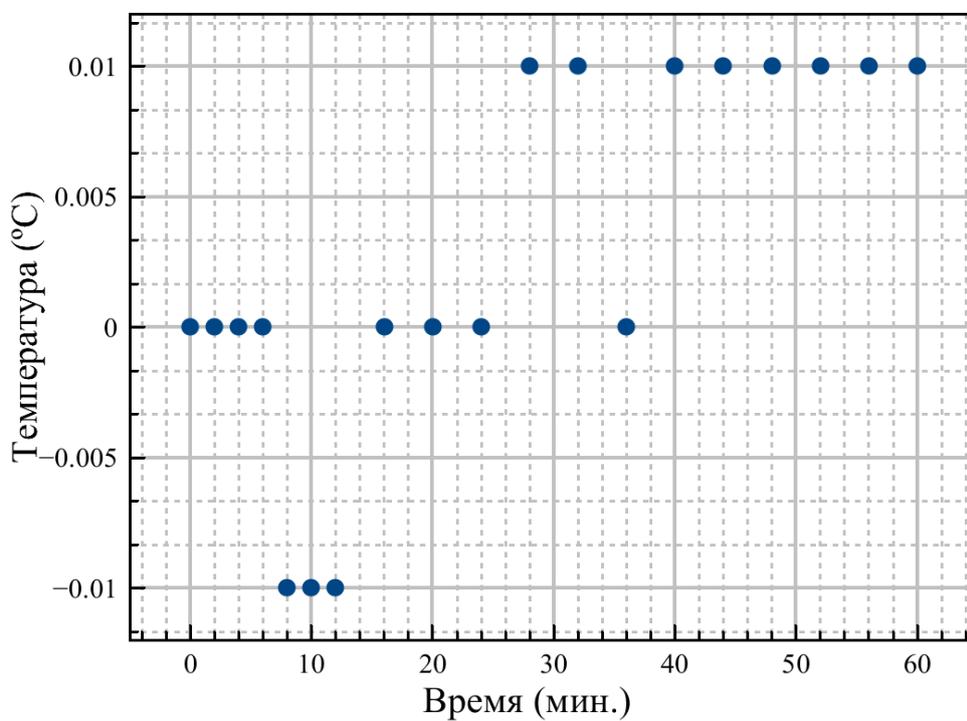


Рисунок 4.3 – Абсолютная разность температур, полученных аналитическим и числовым методом

4.2. Сравнение аналитического решения дифференциального уравнения теплового режима в нестационарном тепловом режиме провода с экспериментальными данными

Разработанный подход к анализу нестационарных тепловых режимов воздушных линий электропередачи реализован в виде алгоритма и программы расчета. Для подтверждения достоверности проведенных теоретических исследований и апробации созданной программы расчета использовались результаты экспериментальных исследований, представленных в работе [86]. Численное моделирование было проведено для провода марки ACSR Lynx 175 мм². Параметры провода и условия проведения численного эксперимента представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе ACSR Lynx 175 мм²

Наименование и обозначение параметра	Числовое значение
Ток нагрузки I	519 А
Диаметр провода d_{np}	0,01953 м
Погонное активное сопротивление при 0°С r_0	0,0001440 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °С ⁻¹
Удельная теплоемкость алюминия $C_{уд,Al}$	922 Дж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость стали $C_{уд,cm}$	452 Дж/(кг·°С)
Погонная масса алюминия M_{Al}	0,497 кг/м
Погонная масса стали M_{cm}	0,3276 кг/м
Степень черноты поверхности провода ε_n	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Коэффициент угла атаки ветра k_v	1
Допустимая температура провода $\Theta_{дон}$	75 °С
Расчетный период T_n	60 мин
Длина линии l	50000 м

Экспериментальные исследования в [86] проводились в аэродинамической трубе. По этой причине влияние солнечной радиации не учитывалось. Отрезок проводника ACSR Lynx 175 мм² длиной 1,5 метра находился в аэродинамической трубе и был подключен к понижающему

трансформатору с коэффициентом трансформации 128:1. Обмотка высшего напряжения трансформатора была подключена к источнику напряжения 230 В и частотой 50 Гц. Измерение температуры осуществлялось с помощью термопар. Микронометр FC0510. Особенностью условий эксперимента было изменение тока в проводнике. Характер изменения тока во времени представлен на рисунке 4.4 [86].

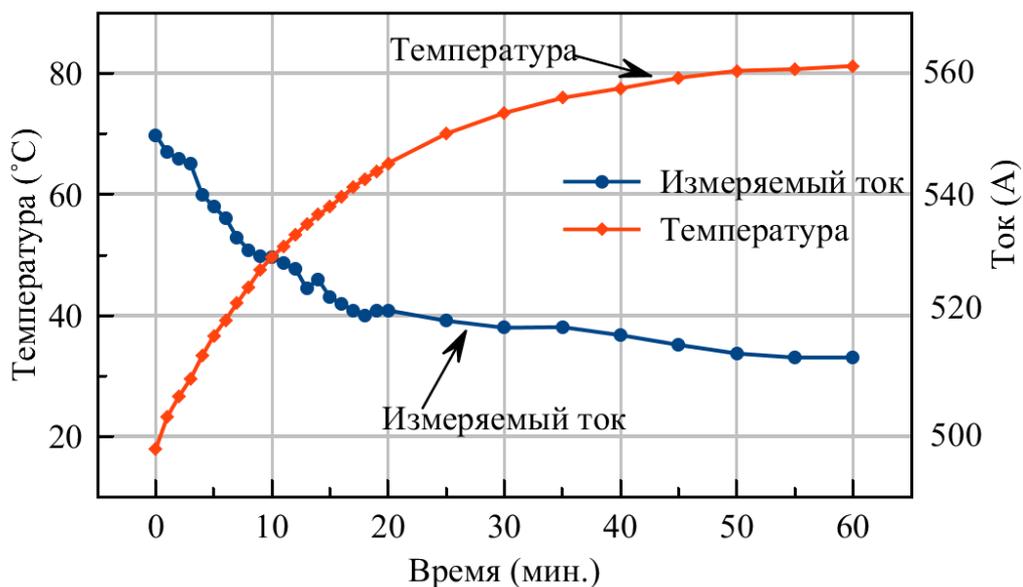


Рисунок 4.4 – Зависимость тока в проводе от изменения температуры

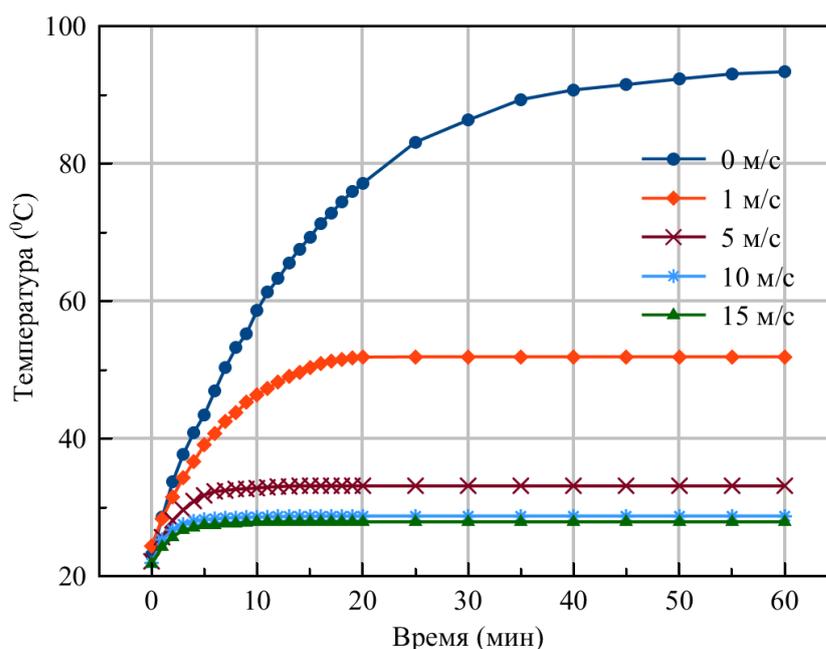


Рисунок 4.5 – Нагрев проводника при разных скоростях ветра (эксперимент)

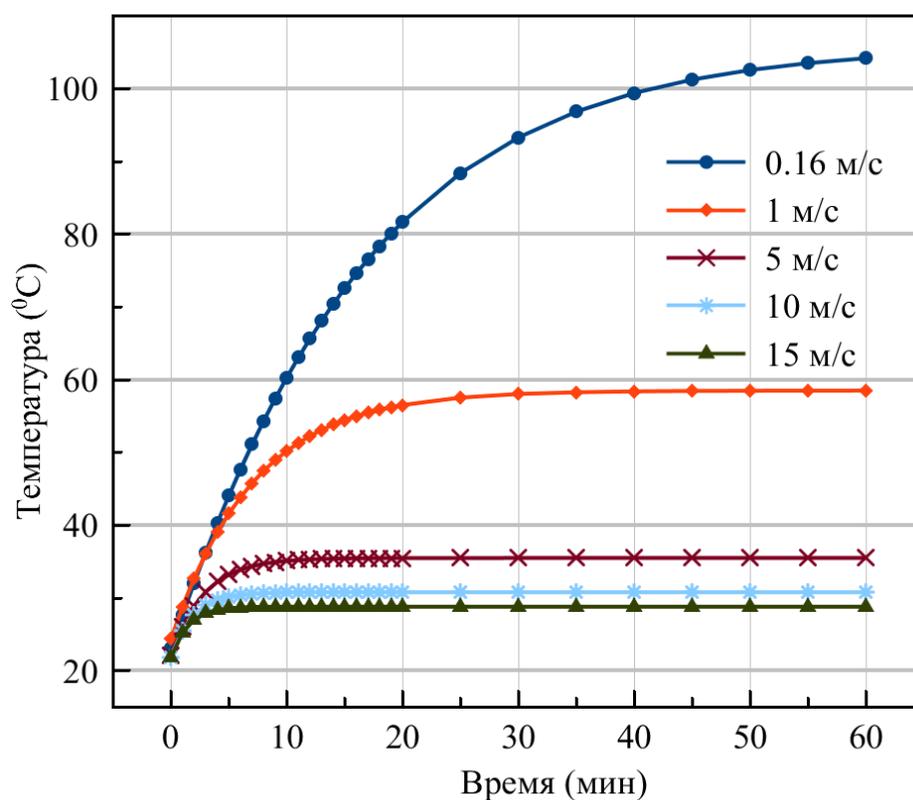


Рисунок 4.6 – Нагрев проводника при разных скоростях ветра (расчет)

Уменьшение тока объясняется увеличением сопротивления проводника при прохождении по нему тока вследствие температурной зависимости. Напряжение на проводник подается от понижающего трансформатора. В процессе эксперимента оно не меняется. В зависимости от скорости ветра величина тока в эксперименте изменялась от 550 А до 513–525 А. Условия численного моделирования приблизительно соответствовали условиям экспериментальных исследований. Величина тока в проводнике при расчетах принималась равной 550 А. Отличие от эксперимента – величина тока при численном моделировании оставалась постоянной и равнялась 550 А. Результаты расчета температуры проводника при различных скоростях ветра представлены на рисунке 4.5. На рисунке 4.6 представлены графики изменения температуры в эксперименте. Анализ зависимостей на рисунках 4.5 и 4.6 позволяет говорить о качественном совпадении результатов расчета и эксперимента. Для проведения количественной оценки на рисунках 4.7 – 4.14. представлена более подробная информация. Особое внимание уделено исследованию изменению температуры в течении 20 минут после включения

тока. Погрешности численного моделирования по отношению к эксперименту определялись по формулам:

$$\delta = \frac{\Theta_{пр.расч.} - \Theta_{пр.экс.}}{\Theta_{пр.экс.}} \cdot 100\% \quad (4.3)$$

$$\Delta\Theta = \Theta_{пр.расч.} - \Theta_{пр.экс.}, \quad (4.4)$$

где $\Delta\Theta_{пр.расч.}$, °С – температура провода по результатам расчета; $\Delta\Theta_{пр.экс.}$, °С – температура провода по экспериментальным данным [86].

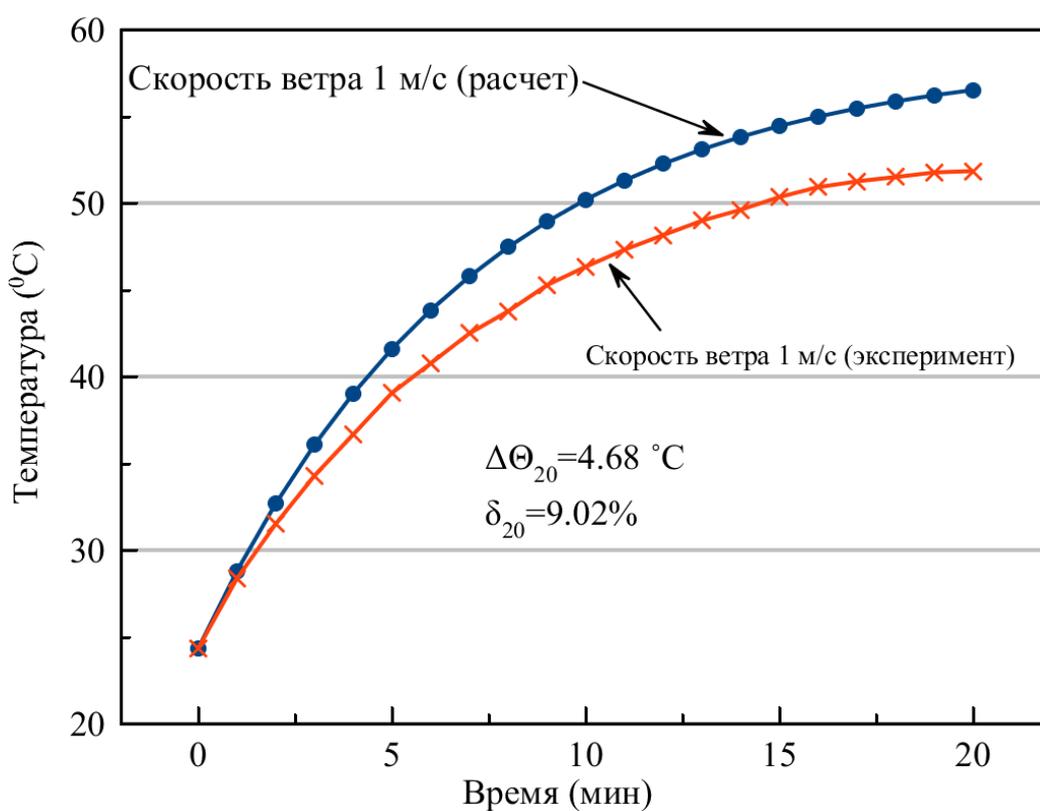


Рисунок 4.7 – Охлаждение провода под действием ветра 1 м/с

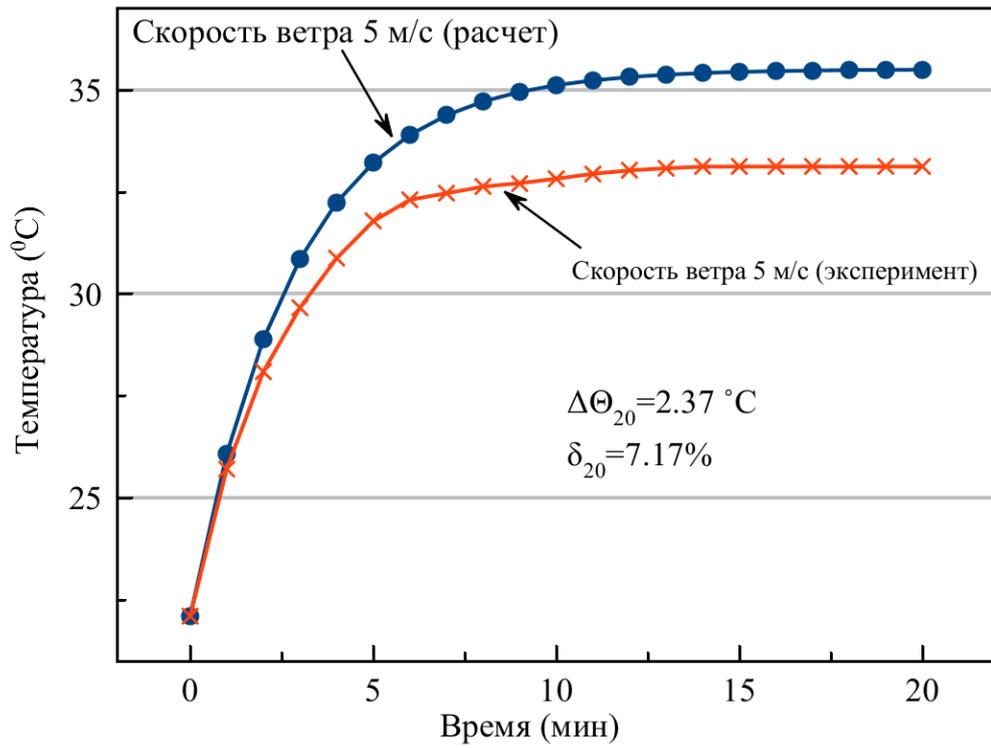


Рисунок 4.8 – Охлаждение провода под действием ветра 5 м/с

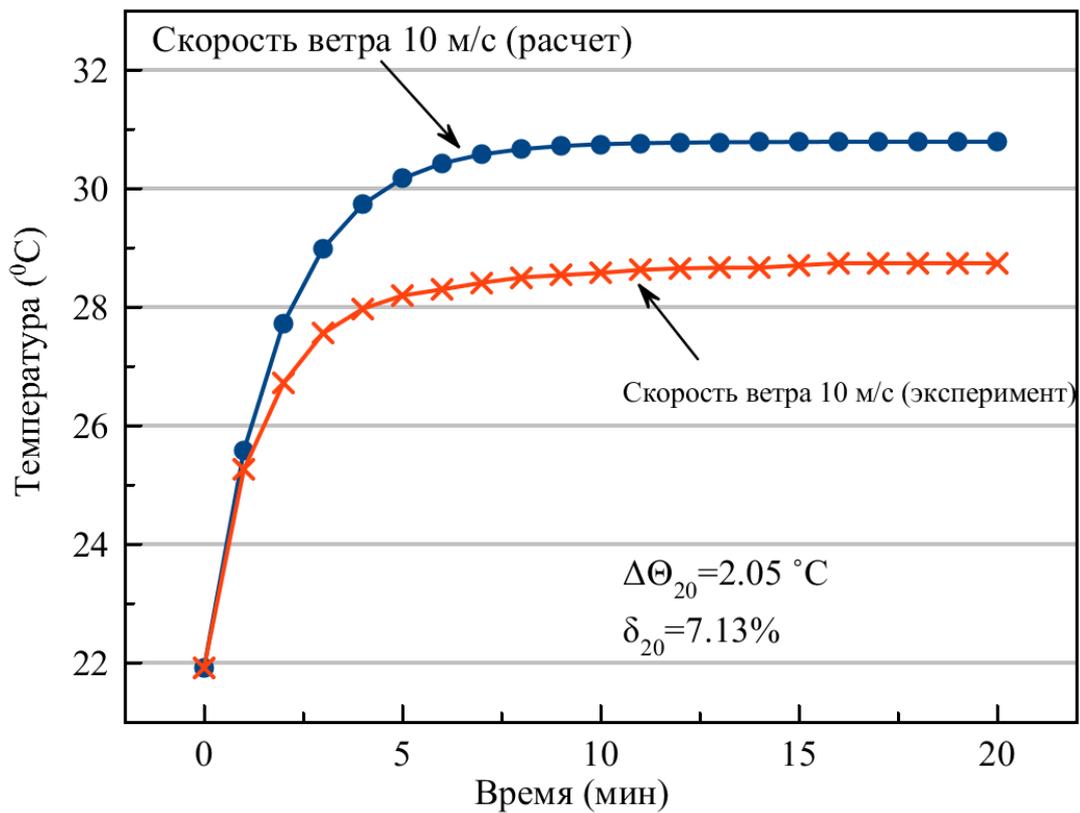


Рисунок 4.9 – Охлаждение провода под действием ветра 10 м/с

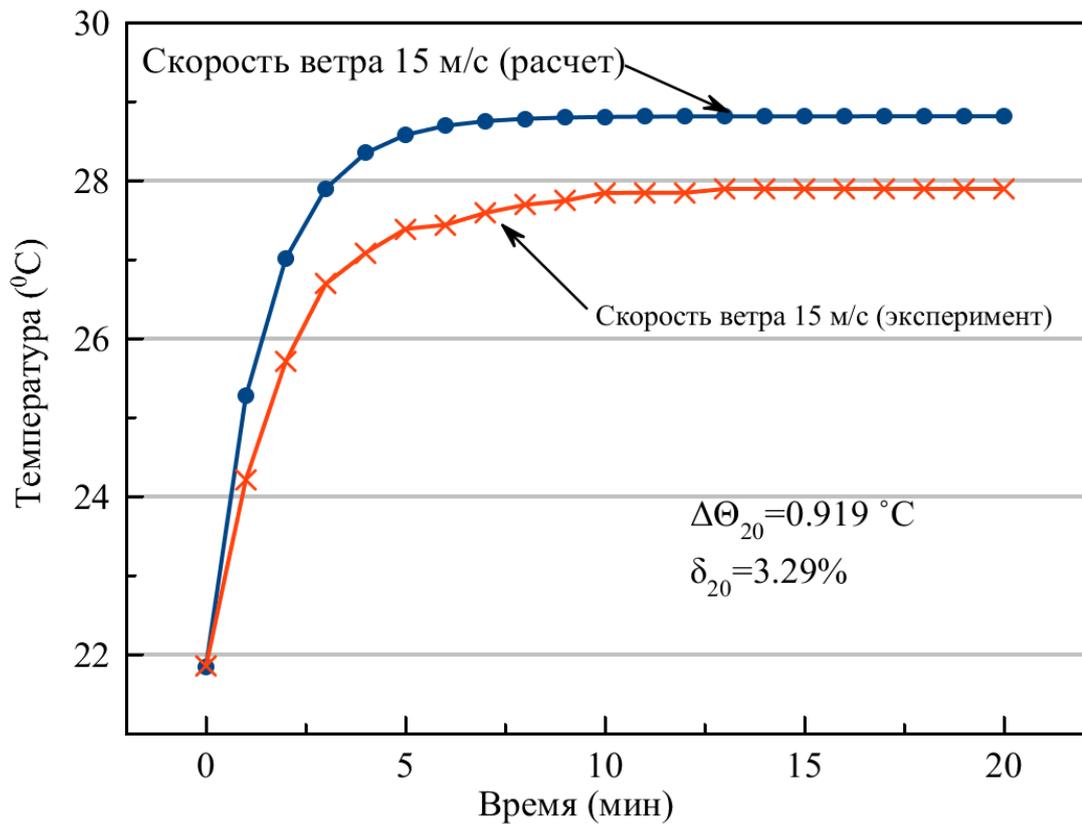


Рисунок 4.10 – Охлаждение провода под действием ветра 15 м/с

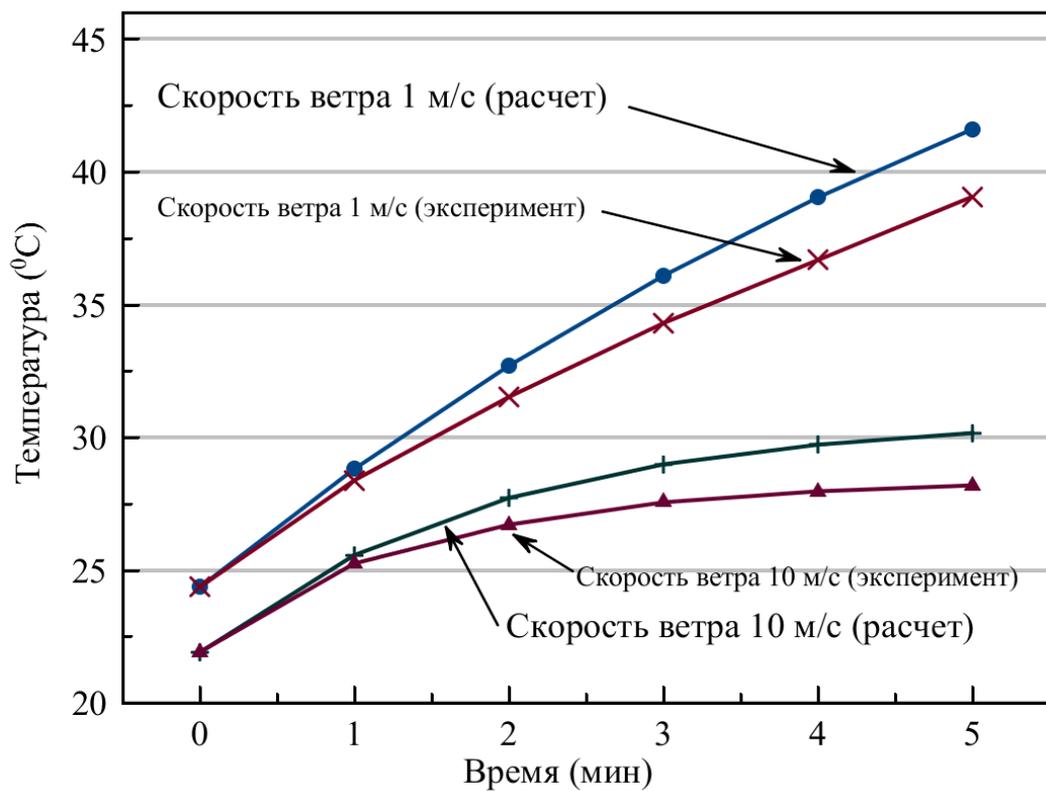


Рисунок 4.11 – Охлаждение провода под действием ветра 1 м/с и 10 м/с

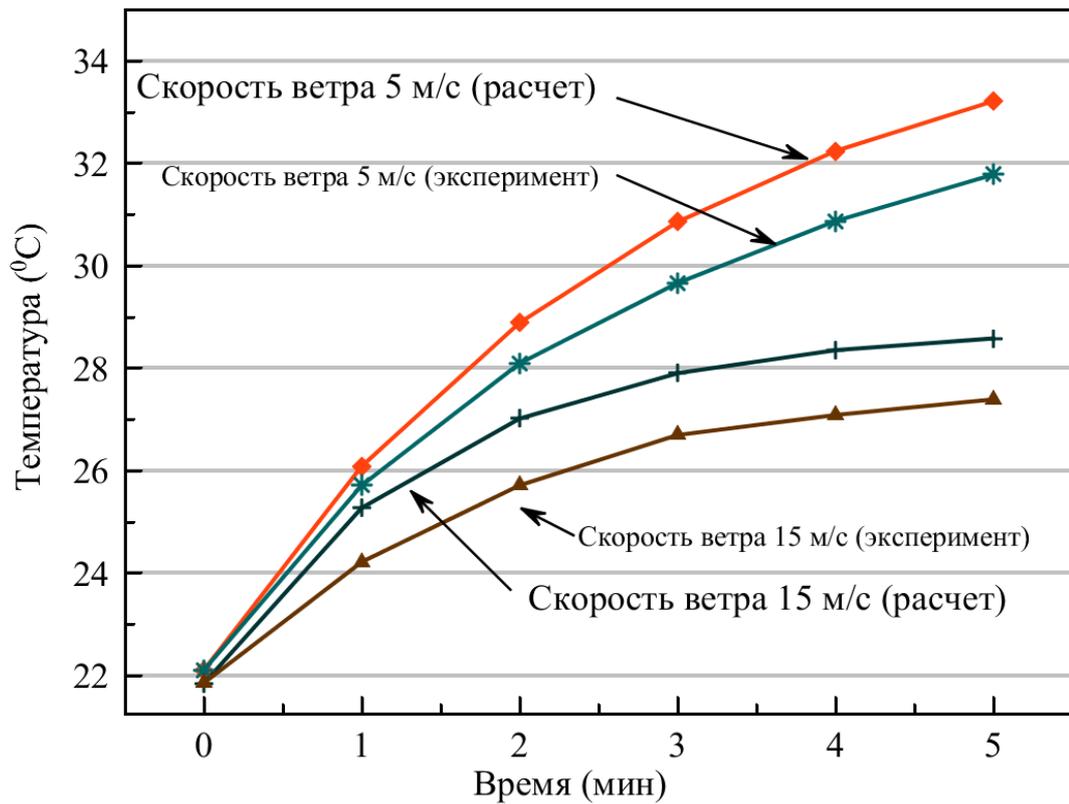


Рисунок 4.12 – Охлаждение провода под действием ветра 5 м/с и 15 м/с в интервале времени от 0 до 5 минут

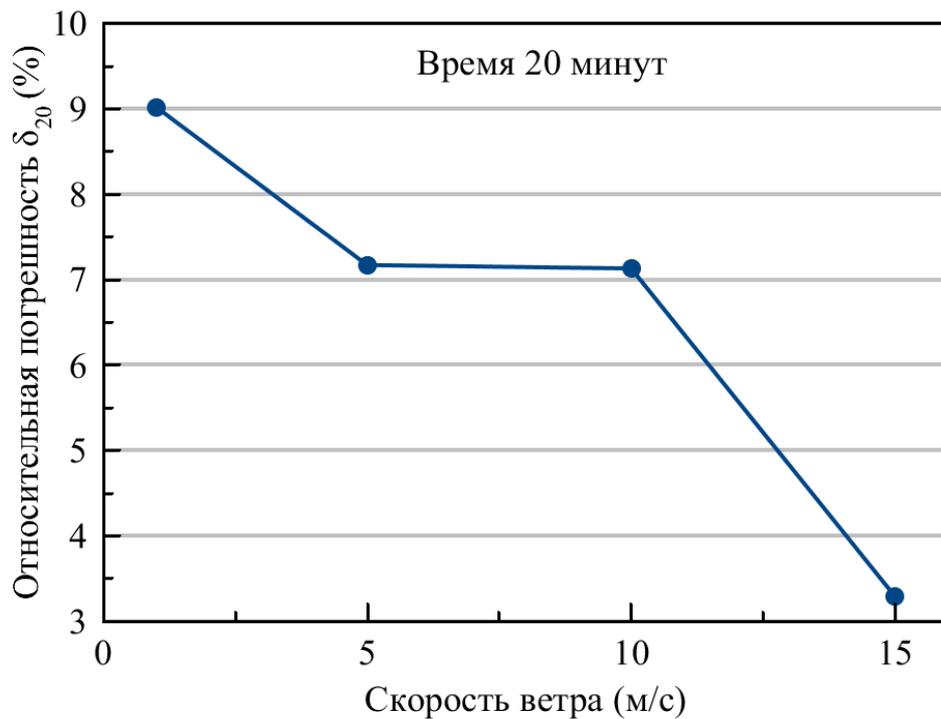


Рисунок 4.13 – Относительная погрешность температуры при 20 минутах для различных скоростей ветра.

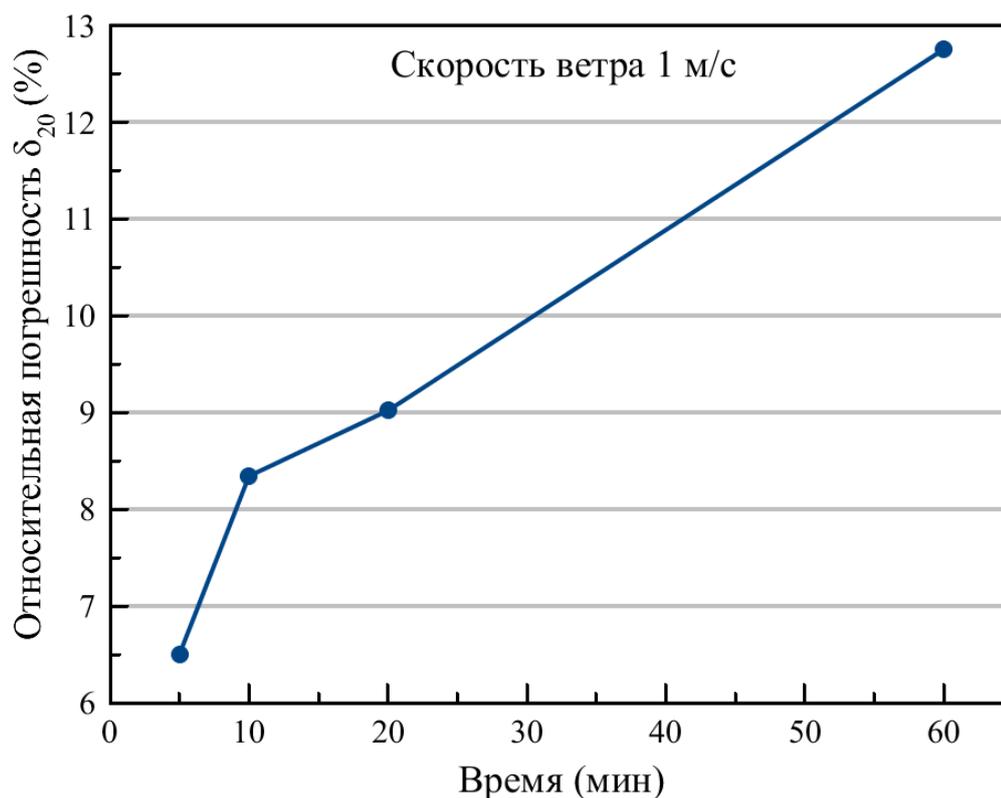


Рисунок 4.14 – Относительная погрешность при скорости ветра 1 м/с

Индекс 20 в формулах $\Delta\Theta_{20}= 4,6$ °С и $\delta_{20}= 5,96$ % (рисунок 4.7) указывает время в минутах, для которого сравнивались экспериментальные и расчетные значения. Характер изменения δ_{20} и $\Delta\Theta_{20}$ при увеличении скорости ветра представлен на рисунке 4.13.

Анализ проведенных исследований показал, что в целом наблюдается удовлетворительное совпадение результатов. Главная причина отличия экспериментальных значений от расчетных – постоянство значений тока при расчетах. Проведенный в [86] эксперимент показал, что разность температур проводника при постоянстве тока и при его уменьшении достигала 6 °С.

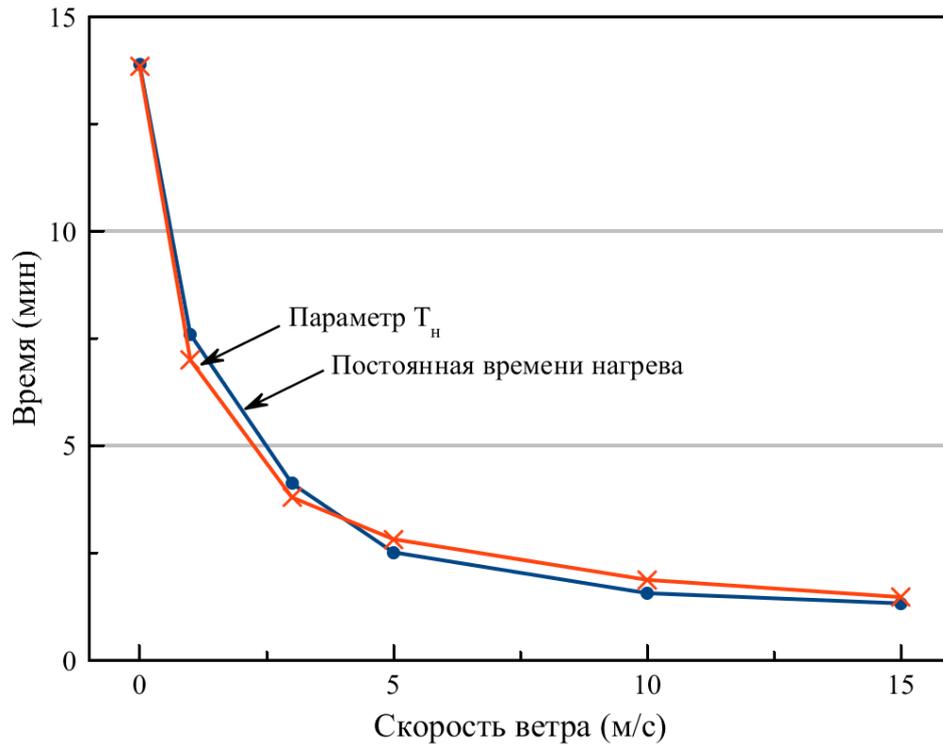


Рисунок 4.15 – Сравнение параметра T_n с постоянной времени нагрева

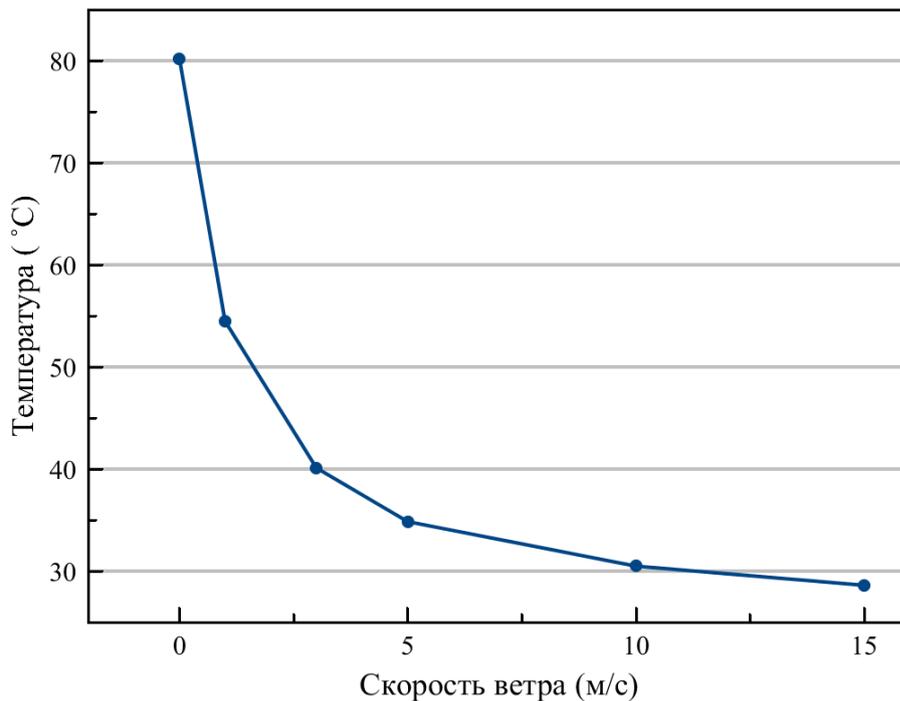


Рисунок 4.16 Зависимость средней температуры от скорости ветра

Эксперимент проводился при начальном токе 500 А и скорости ветра равной 0 м/с. С увеличением скорости ветра разность температур уменьшается. По этой причине наилучшее совпадение условий эксперимента и расчета должно быть при скорости ветра 15 м/с. Действительно, при

скорости ветра 15 м/с проводник нагревался до 28 °С (рисунок 4.5, рисунок 4.10). Изменения сопротивления проводника и тока были минимальными. Минимальными являются и погрешности, обусловленные неучетом уменьшения тока при расчетах. Проведенный анализ показал (рисунок 4.10), что при скорости ветра 15 м/с абсолютная и относительная погрешности соответственно составляют $\Delta\Theta_{20}=0,919$ °С и $\delta_{20}=3,29$ %. При скорости ветра 1 м/с (рисунок 4.13, рисунок 4.14) относительная погрешность достигает 12,75 %, а разность температур составляет 6,62 °С. Большое значение погрешности при скорости ветра 1 м/с является следствием высокой температуры провода ($\Theta=90$ °С) и значительным уменьшением тока.

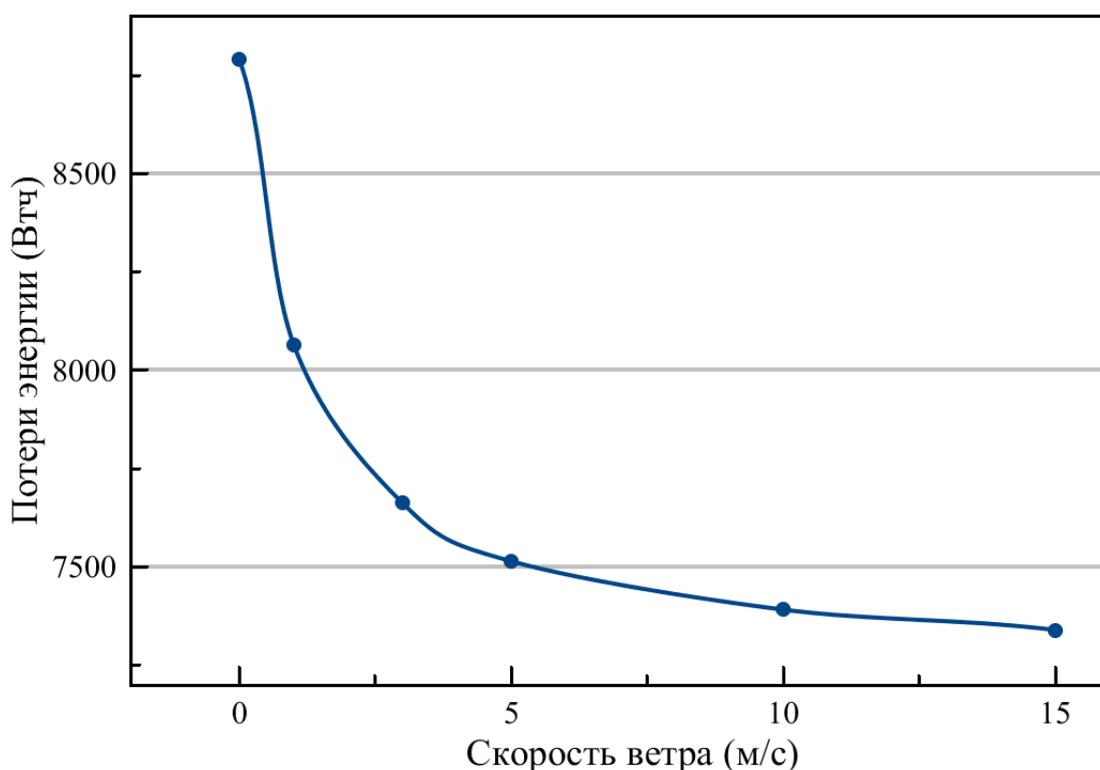


Рисунок 4.16 – Зависимость средних потерь энергии от скорости ветра при длине линии 50000 метров

4.3. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи

Численное моделирование было проведено для провода марки ACSR Lynx 175 мм². Параметры провода и условия проведения численного эксперимента представлены в таблице 4.4 [10].

Таблица 4.4 – Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе ACSR lynx 175 мм²

Наименование и обозначение параметра	Числовое значение
Диаметр провода $d_{пр}$	0,01953 м
Погонное активное сопротивление при 0°C r_0	0,0001440 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °C ⁻¹
Удельная теплоемкость алюминия $C_{уд,Al}$	922 Дж/(кг·°C)
Удельная теплоемкость стали $C_{уд,ст}$	452 Дж/(кг·°C)
Погонная масса алюминия M_{Al}	0,497 кг/м
Погонная масса стали $M_{ст}$	0,3276 кг/м
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_{п}$	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Коэффициент угла атаки ветра k_v	1
Допустимая температура провода $\Theta_{доп}$	75 °C
Расчетный период $T_{п}$	60 мин

При проведении численного эксперимента были получены данные, приведенные в таблице 4.5. Наиболее интересными результатами являются графики достижения стационарного режима при изменении, какого либо параметра. Из проведенного численного исследования видно, что параметр T_n при изменении одного из параметров, влияющего на температуру провода, остается постоянным при условии, что остальные параметры не изменяются. Помимо возможности определения конечной температуры переходного температурного режима предложенная модель позволяет вывести среднюю температуру за время нагрева или охлаждения провода. На рисунке 4.17 приведена кривая нагрева и охлаждения провода для интервала времени 60 минут и скорости ветра 0,2 м/с. Ток изменяется мгновенно от 0 А до 200 А, от 200 А до 500 А и от 500 А до 0 А. На практике ток изменяется постоянно.

Данное изменение может происходить в большом диапазоне. Последнее обстоятельство свидетельствует о необходимости использования динамической тепловой модели проводов [10].

Таблица 4.5 – Результаты численного эксперимента

№	Скорость ветра (м/с)	Солнечное излучение (Вт/м ²)		Сила тока (А)	Параметр T _n (мин)	Температура стационарного режима (°С)	Начальная температура провода (°С)	Средняя температура за переходной процесс (°С)
		Прямая	Рассеянная					
1	0,2	0		0→200	14,233	23,642	15	21,701
2	0,2	0		200→519	14,233	80	23,642	70,109
3	0,2	0		519→0	14,233	15	80	29,371
4	5	0		0→200	2,799	16,64	15	16,566
5	5	0		200→519	2,799	26,478	16,64	26,477
6	5	0		519→0	2,799	15	26,478	15,509
7	15	0		0→200	1,462	15,868	15	15,847
8	15	0		200→519	1,462	20,978	15,868	20,853
9	15	0		519→0	1,462	15	20,978	15,137
10	0,2→5	0		519	2,799	26,478	80	26,255
11	5→15	0		519	1,462	20,978	26,478	21,112
12	15→0,2	0		519	14,233	80	20,978	66,117
13	0,2→15	0		519	1,462	20,978	80	22,408
14	0,2	500	100	0	13,737	25,09	15	22,891
15	0,2	250	50	0	13,979	20,065	15	18,954

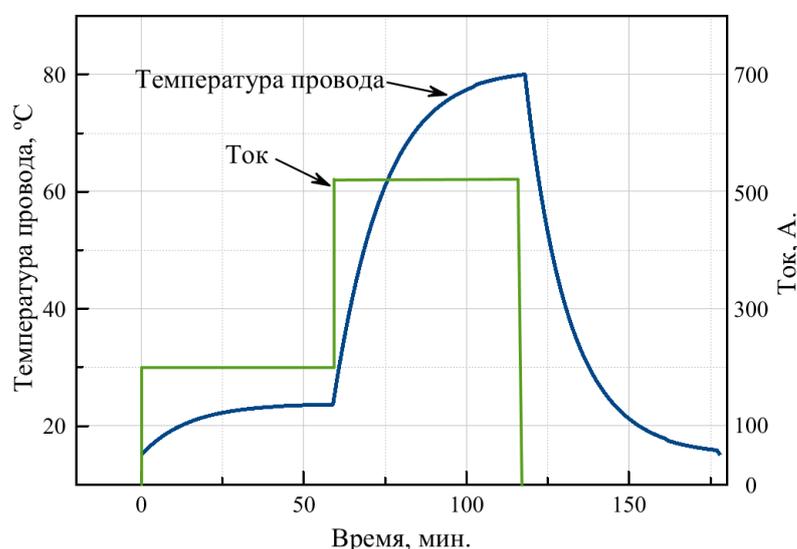


Рисунок 4.17 – Изменение температуры провода ACSR Lynx от тока нагрузки.

На рисунках 4,18 – 4,23 представлено влияние погодных факторов на максимальный ток линии и средние потери энергии за время переходного процесса. Рассмотрим более подробно влияние климатических факторов на

допустимый ток. Анализ начнем с температуры окружающей среды. Данный параметр в течение суток может изменяться в больших диапазонах.

Влияние температуры окружающей среды (рисунок 4.18) на токовые нагрузки проводов будем рассматривать при условии, что температура провода не превышает $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а скорость ветра $0,2\text{ м/с}$. Интенсивность солнечной радиации устанавливается равной 0 Вт/м^2 .

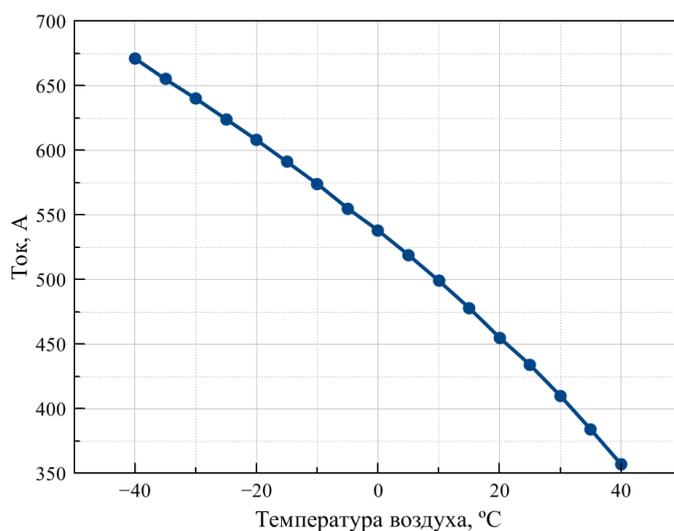


Рисунок 4.18 – Связь между допустимой токовой нагрузкой и температурой окружающей среды

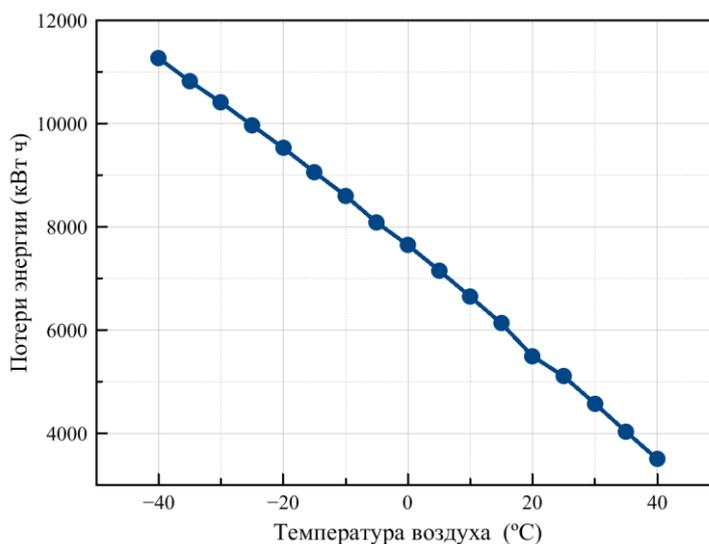


Рисунок 4.19 – Зависимость средних потерь энергии от температуры окружающей среды

Из рисунка 4.18 видна необходимость уменьшения тока, если другие параметры остаются неизменными. Основываясь на полученной зависимости тока от температуры воздуха, можно увидеть, что при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

ток превышает в 1,5 раза ток при 20 °С. Температура 20 °С принята в качестве базовой. При температуре 40 °С ток меньше базового на 95 А. Таким образом, улучшение пропускной способности линий электропередачи и ее надежности возможно при учете фактической температуры окружающей среды.

На рисунке 4.19 представлена зависимость потерь электрической энергии от температуры окружающей среды. В начальный момент времени температура провода была равна температуре окружающей среды 15 °С. В дальнейшем ток изменялся до максимального значения. Максимальный ток принимался таким образом, чтобы температура провода не превышала 70 °С. Расчетное время составляло 60 минут, а длина линии принималась 50 км. Скорость ветра равна 0,2 м/с, солнечное излучение не учитывается. Из рисунка 4.19 видно, что с увеличением температуры окружающей среды потери уменьшаются. Это происходит по причине того, что при увеличении температуры окружающей среды ток, протекающий через провод, должен быть уменьшен, чтобы температура провода не превышала 70 °С. При температуре –40 °С ток значительно выше тока при +40 °С. При расчете средних потерь энергии учитывается квадрат тока. Поэтому график имеет такой же вид, что предельно допустимый ток.

Для расчета максимальной токовой нагрузки в ПУЭ предлагается использовать коэффициенты, которые соответствуют определенной температуре. Температуры, указанные в ПУЭ, находятся в диапазоне от –5 °С до +50°С (таблица 4.6). Дискретизация происходит с шагом 5°С. Недостаток такого изменения заключается в том, что в реальном времени невозможно оценить допустимый ток из-за того, что в действительности температура окружающей среды не принимает целые значения. Минимальная температура в ПУЭ ограничивается –5°С, хотя на территории Сибирского, Уральского и Дальневосточного федеральных округов средняя температура зимних месяцев составляет –9 °С и ниже. Данный факт также не в пользу использования коэффициентов, предлагаемых ПУЭ при расчетах

допустимого тока и температуры провода. При температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ разность токов составляет 103,3 А, что составляет 17,76 %, т.е. происходит недогруз линий. Это объясняется тем, что при уменьшении температуры улучшаются условия охлаждения. В пределах температур от $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ разности составляют не более 4 %. При температуре $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ разность составляет 25 А или 9,59 %. Проведенный анализ показал, что предлагаемый метод расчета предпочтительней при расчете допустимого тока в реальном режиме, так как в исходных данных температуры могут принимать любые значения. Также в пользу разработанного метода говорит то, что есть возможность производить решение при отрицательных температурах в широких пределах [10].

Таблица 4.6 – Связь между допустимой токовой нагрузкой и температурой окружающей среды

№	Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	Поправочные коэффициенты на токи по ПУЭ	Ток, рассчитанный с коэффициентами ПУЭ, А	Ток, рассчитанный по предложенной модели, А	Разность токов, А	Разность, %
1	-40	1,24	478,64	581,973	103,333	17,75563
2	-35	1,24	478,64	569,346	90,706	15,93161
3	-30	1,24	478,64	556,456	77,816	13,98421
4	-25	1,24	478,64	543,267	64,627	11,89599
5	-20	1,24	478,64	529,742	51,102	9,646583
6	-15	1,24	478,64	515,837	37,197	7,210999
7	-10	1,24	478,64	501,505	22,865	4,559277
8	-5	1,24	478,64	486,691	8,051	1,654232
9	0	1,2	463,2	471,334	8,134	1,72574
10	5	1,17	451,62	455,361	3,741	0,821546
11	10	1,13	436,18	438,687	2,507	0,571478
12	15	1,09	420,74	421,213	0,473	0,112295
13	20	1,04	401,44	401,813	0,373	0,092829
14	25	1	386	386	0	0
15	30	0,95	366,7	362,591	-4,109	-1,13323
16	35	0,9	347,4	340,319	-7,081	-2,08069
17	40	0,85	328,1	316,179	-11,921	-3,77033
18	45	0,8	308,8	289,677	-19,123	-6,60149
19	50	0,74	285,64	260,64	-25	-9,59177

Важным фактором, влияющим на пропускную способность линий является солнечная радиация. При поглощении солнечной радиации происходит дополнительный нагрев провода. Предельно допустимый ток определяется при условии, что температура провода не превышает $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра – 0,2 м/с, температура окружающей среды – $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Соотношение интенсивности освещения и токовой нагрузки проводов

приведено на рисунке 4.20. При изменении солнечной радиации на 500 Вт/м изменение тока составляет 43 А. Данная особенность позволяет в зимний период при вечернем максимуме потребления увеличивать нагрузку на линии. При увеличении нагрева провода солнечным излучением происходит снижение максимального тока. Данный факт влечет снижение и потерь энергии (рисунок 4.21), пропорциональных квадрату тока.

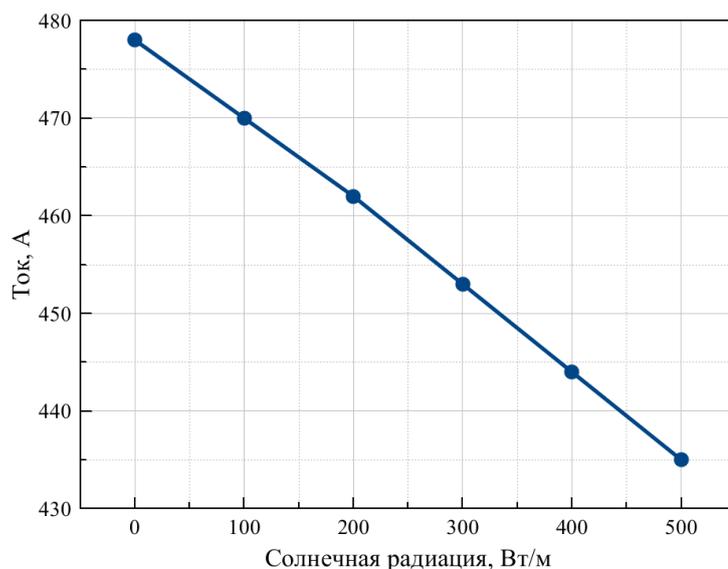


Рисунок 4.20 – Взаимосвязь между допустимой токовой нагрузкой и солнечным излучением

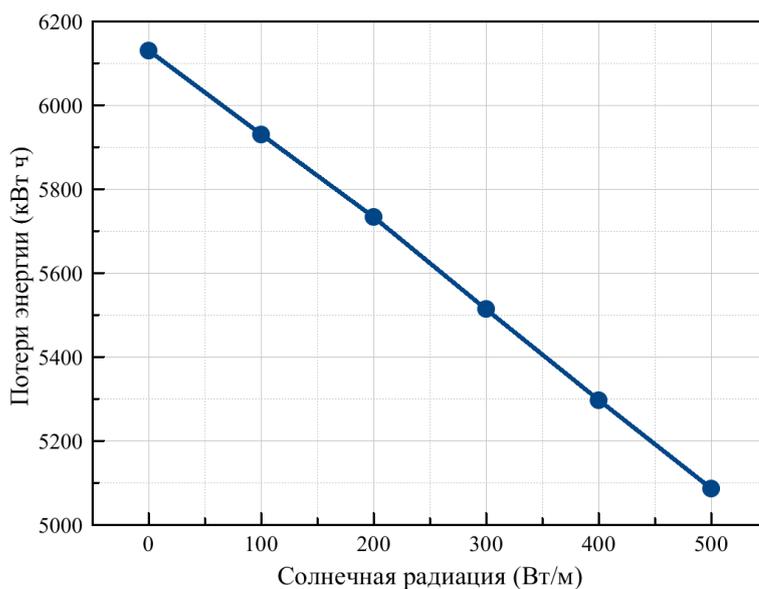


Рисунок 4.21 – Зависимость средних потерь энергии от солнечного излучения

Одним из важных параметров окружающей среды при расчете допустимого тока и температуры провода является скорость ветра. Ветер наравне с температурой окружающей среды вносит значительный вклад в охлаждение провода. Зависимость изменения токовой нагрузки от скорости ветра приведена на рисунке 4.22. Минимальная скорость ветра при расчете принималась равной 0,2 м/с, так как около провода всегда присутствует движение воздушных масс. Данное значение скорости ветра квалифицируется как штиль. Из приведенной зависимости видно, что увеличение скорости ветра приводит к росту допустимого тока. Данный факт объясняется тем, что с увеличением скорости ветра улучшаются условия охлаждения, что в свою очередь дает возможность дополнительно догрузить воздушную линию электропередачи. На рисунке 4.22 ветер изменяется от 0,2 м/с (штиль) до 17,1 м/с (крепкий ветер), так как в большинстве случаев скорость ветра в течение года изменяется в данном диапазоне. При увеличении скорости ветра от 0,2 м/с до 17,1 м/с ток увеличивается в 3,14 раз. Увеличение тока приводит к увеличению потерь электрической энергии (рисунок 4.23).

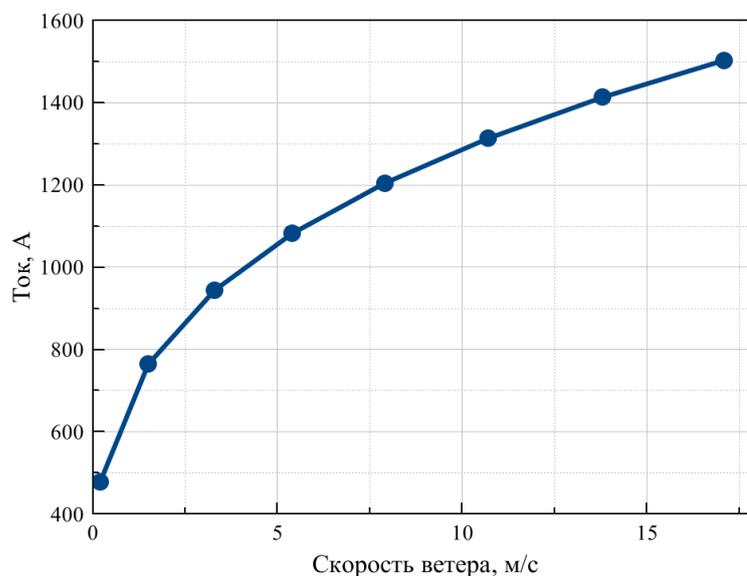


Рисунок 4.22 – Взаимосвязь между скоростью ветра и допустимой токовой нагрузкой

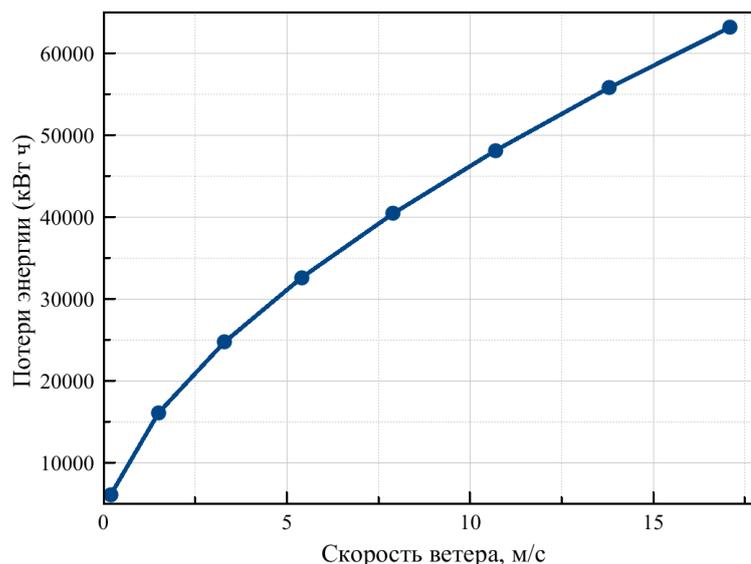


Рисунок 4.23 – Зависимость средних потерь от скорости ветра

Разность максимальных значений тока при отсутствии солнечного излучения и при 500 Вт/м^2 составляет 8,99 %, средних потерь электрической энергии – 17,02 %. При изменении температуры провода от -40°C до $+40^\circ\text{C}$ разность токов – 46,8 %, средних потерь – 68,9 %. При изменении ветра от штиля до крепкого разность тока 68,2 % средних потерь – 90,3 %. Из представленных данных видно, что в наименьшей степени на пропускную способность линий влияет солнечная радиация. Следующим по значимости параметром является температура окружающей среды. Наибольшее влияние оказывает ветер. Таким образом, при определении возможностей по передаче дополнительной энергии через существующие линии следует учитывать температуру окружающей среды и ветер.

4.4. Расчет температуры в нестационарном режиме с использованием программного комплекса ANSYS

Объектом исследования является изолированный провод SAX–50 (рисунок 4.24). Провод имеет токоведущую часть из нескольких алюминиевых проволок, изоляция выполнена из сшитого полиэтилена. Данный тип проводов позволяет уменьшить габариты воздушной линии.

Технические характеристики провода SAX–50:

– Максимально допустимая температура проводов при эксплуатации не должна превышать: +90 °С.

– Гарантийный срок эксплуатации: 4 года с момента ввода проводов в эксплуатацию.

– Срок службы проводов не менее 45 лет.

– Прокладка — по воздуху на опорах ЛЭП в соответствии с правилами устройства электроустановок и правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей.

– Временное сопротивление разрыву - 160–195 МПа.

Расчетные условия представлены в таблица 4.7.



Рисунок 4.24. Структура провода SAX–50

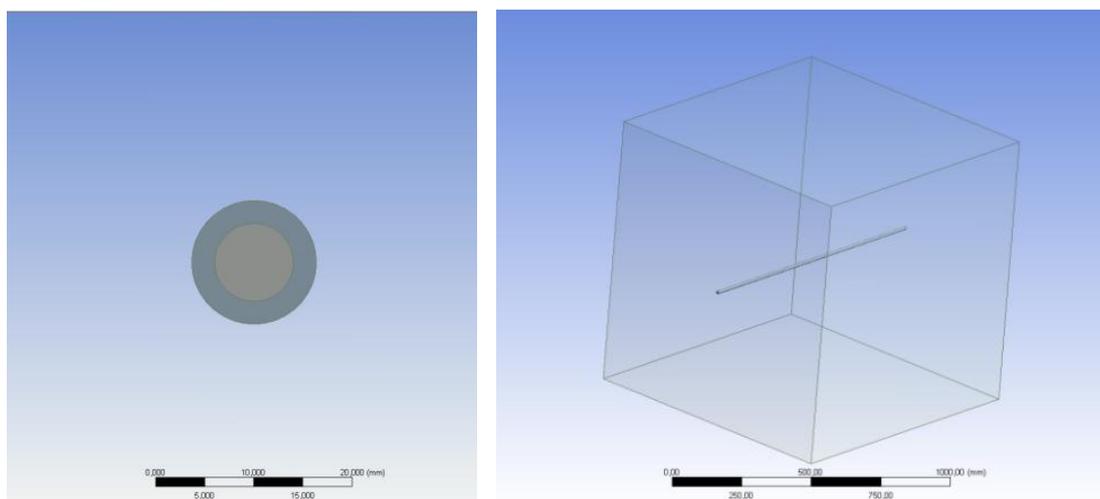


Рисунок 4.25. Геометрическая модель

Таблица 4.7 – Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе SAX-50

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_{\text{п}}$	0,8
Температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}}$	0 °С
Атмосферное давление $P_{\text{атм}}$	100000 Па
Скорость ветра V	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра k_v	1
Ток нагрузки I	240 А
Радиус провода R	0,00635 м
Радиус токоведущей жилы r	0,004 м
Погонное активное сопротивление при 0°С r_0	0,000663 Ом/м
Допустимая температура провода $\Theta_{\text{доп}}$	90 °С
Температура провода в момент времени $t=0$ Θ_0	0 °С
Удельное тепловое сопротивление изоляции, $B_{\text{из}}$	2,67, °С·м/Вт
Удельная теплоемкость жилы $C_{\text{ж}}$	920, Дж/кг·°С
Удельная теплоемкость изоляции жилы $C_{\text{из}}$	3750, Дж/кг·°С
Плотность алюминия $\rho_{\text{ал}}$	2700, кг/м ³
Плотность сшитого полиэтилена $\rho_{\text{сп}}$	920, кг/м ³
Расчетный период $T_{\text{п}}$	50 мин

Для численного моделирования явлений теплопередачи, происходящей между изолированным проводом SAX-50 и окружающей средой, используем программное обеспечение ANSYS Fluent. Анализ явлений теплопередачи проводился с использованием 3D модели провода (рисунок 4.25). Модель учитывает теплообмен конвекцией и излучением. Модель также учитывает внутренние источники энергии в проводе. Построение расчетной сетки

производится утилитой ANSYS Mesh (рисунок 4.26). Размеры сетки уменьшаются вблизи смоделированной поверхности. Для адекватного воспроизведения конвективного переноса между поверхностью провода и окружающей средой учитывается вязкость окружающей среды. Ламинарный режим для описания потока жидкости использовался из-за небольших значений числа Рейнольдса. Вязкость и плотность воздуха рассчитываются для температуры в каждой элементарной ячейке. Для учета радиации при численном эксперименте использовалась model Discrete Ordinates (DO). Схождение считается достижимым, когда разница между двумя последовательными итерациями меньше 10^{-2} для компоненты температуры и 10^{-7} для полученной энергии. Граничные условия: известны скорость и температура окружающего воздуха $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, солнечное излучение не учитывалось.

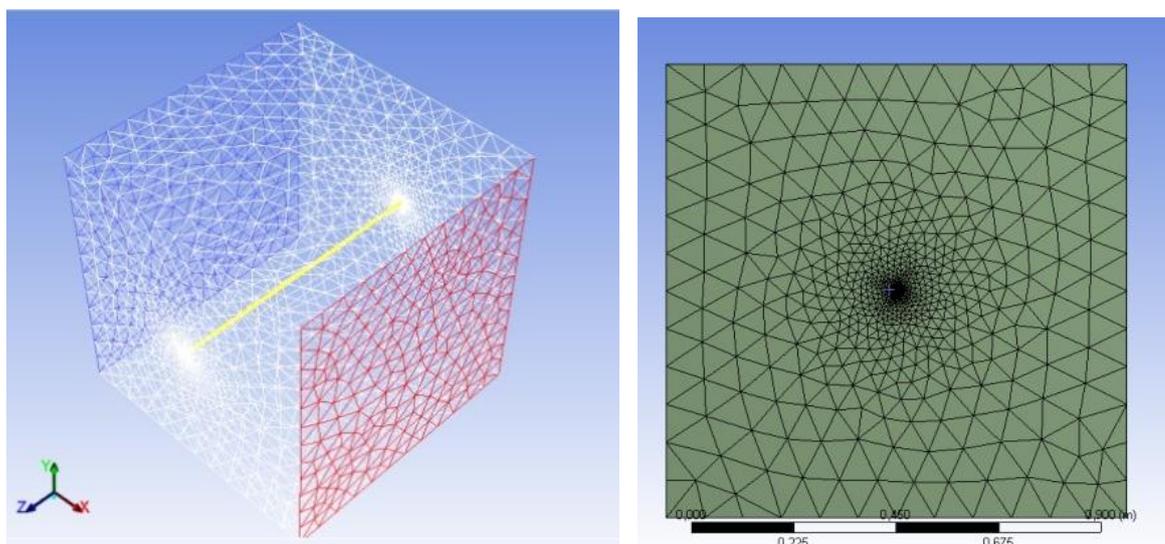
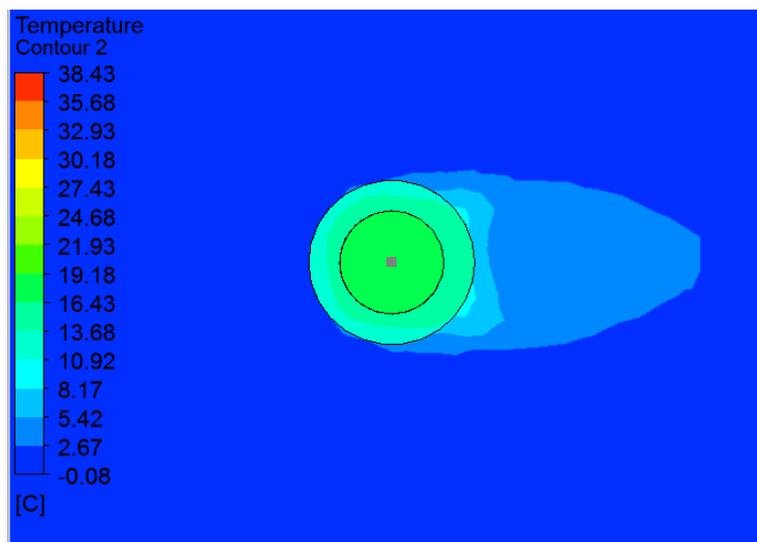
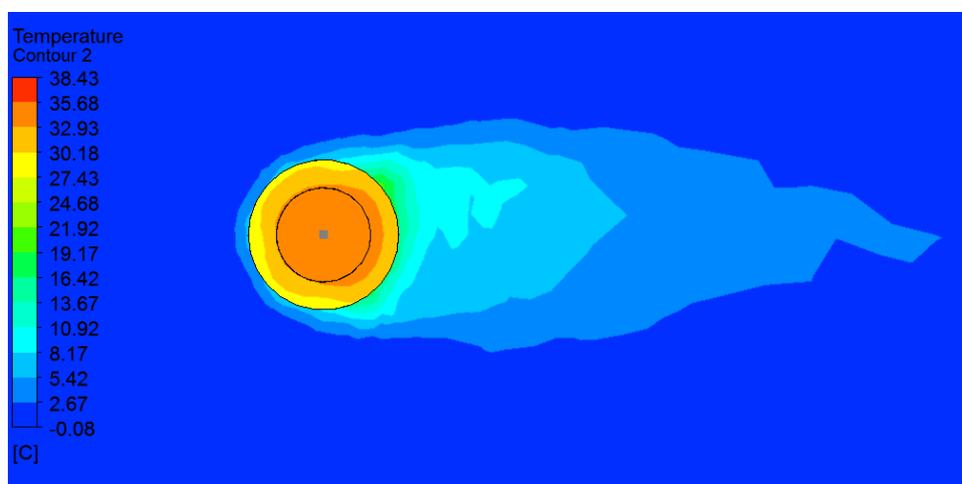


Рисунок 4.26 – Сгенерированная сетка конечных элементов



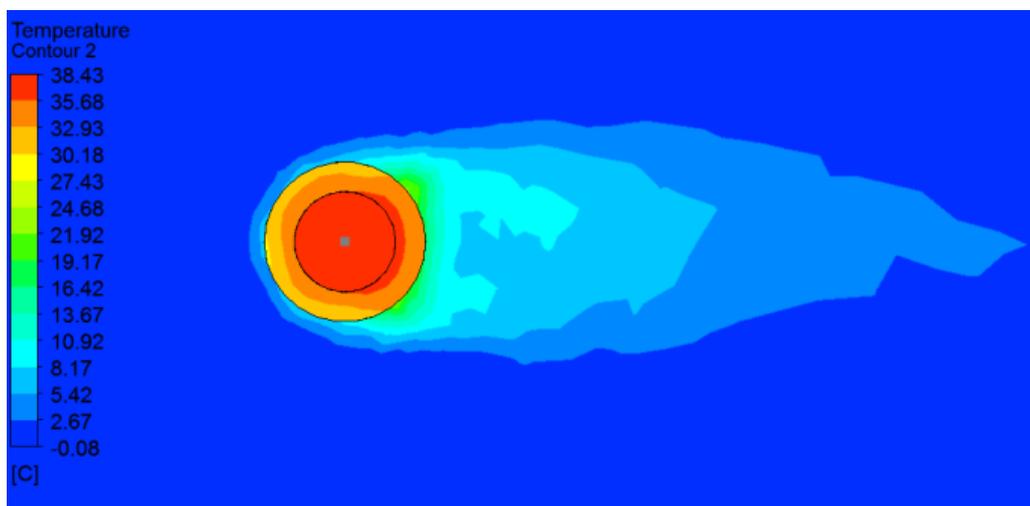
а)



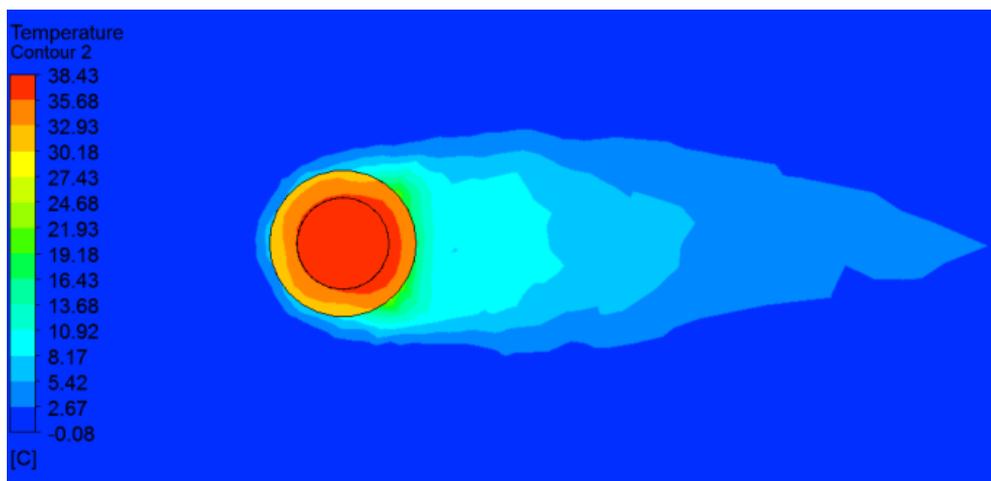
б)

Рисунок 4.27 – Распределение температур в проводнике и окружающей среде

а) $t = 300$ с. б) $t = 1200$ с.



а)



б)

Рисунок 4.28 – Распределение температур в проводнике и окружающей среде

а) $t = 2100$ с. б) $t = 3000$ с.

Результаты численного эксперимента по расчету температуры представлены на рисунках 4.27, 4.28. Из представленных рисунков видно, что тепловые процессы как в проводе, так и в изоляции имеют инерционный характер. С течением времени подветренная сторона изоляции нагревается сильнее, чем наветренная сторона.

Результаты сравнения температуры провода, полученные разработанным аналитическим методом Θ_{an} и методом конечных элементов $\Theta_{кэ}$, представлены в таблице 4.8 и на рисунке 4.29, 4.30, 4.31. При аналитическом расчете температурный коэффициент сопротивления α не учитывался, так как при численном эксперименте в ANSYS не учитывалось изменение тепловыделения при увеличении температуры токопроводящей жилы провода.

Таблица 4.8 – Сравнение результатов расчета

t, мин	$\Theta_{ан}(t), \text{ }^\circ\text{C}$	$\Theta_{кэ}(t), \text{ }^\circ\text{C}$	$\delta, \text{ }^\circ\text{C}$	$\epsilon, \%$
0	0	0	0	0
5	16,772	16,5	0,272	1,622
10	26,26	26,68	0,42	1,599
15	31,59	32,35	0,76	2,406
20	34,57	35,24	0,67	1,938
25	36,23	36,64	0,41	1,132
30	37,16	37,29	0,13	0,35
35	37,67	37,61	0,06	0,159
40	37,96	37,84	0,12	0,316
45	38,12	38,00	0,12	0,315
50	38,21	38,12	0,09	0,236

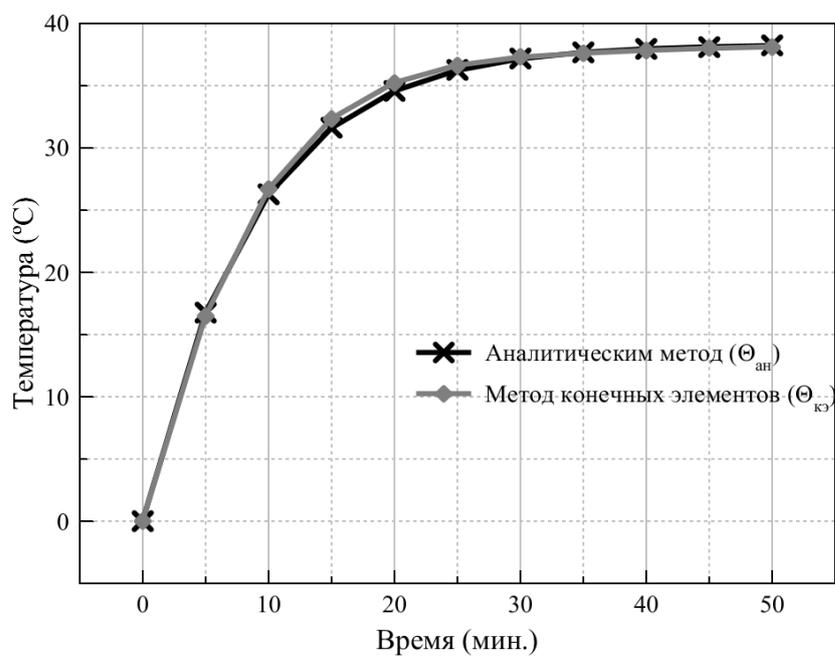


Рисунок 4.29 – Результаты расчета теплового процесса в проводе SAX-50

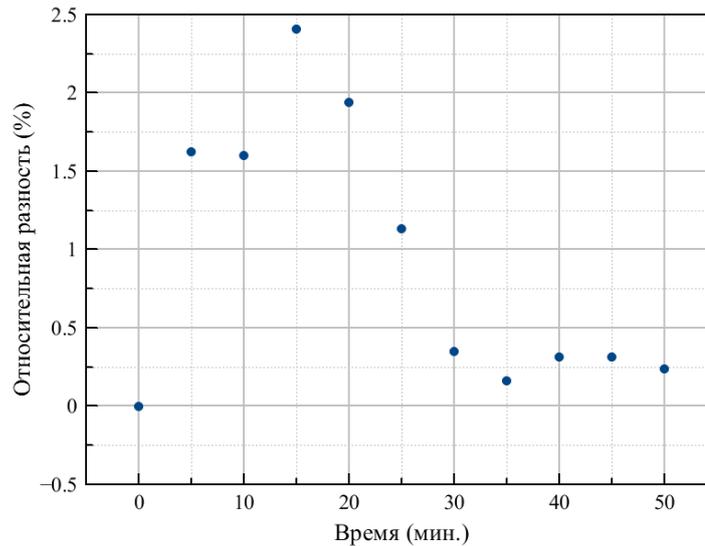


Рисунок 4.30 – Относительная разность температур, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов

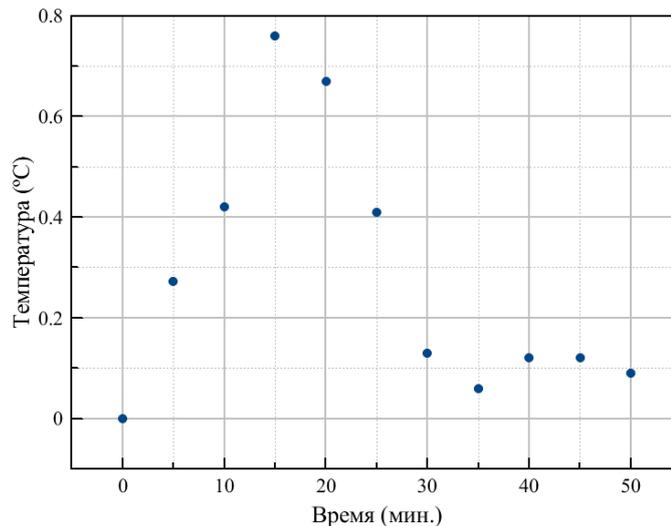


Рисунок 4.31 – Абсолютная разность температур, полученных аналитическим методом и методом конечных элементов

Из полученных результатов видно, что максимальная разность температур 0,76 °С или 2,406 %. Средняя температура и потери энергии за расчетный период равны: $\Theta_{ж,ср} = 32,81$ °С; $\Delta W = 5728,32$ кВт·час для длины линии 50 км.

4.5. Уточнение потерь электрической энергии

Разработанный подход анализа нестационарных тепловых режимов воздушных линий электропередачи реализован в виде алгоритма и программы расчета. Для подтверждения достоверности проведенных теоретических исследований и апробации созданной программы расчета использовались результаты экспериментальных исследований, представленных в работе [86]. Численное моделирование было проведено для провода марки ACSR Lynx 175 мм². Параметры провода и условия проведения численного эксперимента представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе ACSR Lynx 175 мм²

Наименование и обозначение параметра	Числовое значение
Ток нагрузки I	519 А
Диаметр провода d_{np}	0,01953 м
Погонное активное сопротивление при 0°С r_0	0,0001440 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °С ⁻¹
Удельная теплоемкость алюминия $C_{vd,Al}$	922 Дж/(кг·°С)
Удельная теплоемкость стали $C_{vd,cm}$	452 Дж/(кг·°С)
Погонная масса алюминия M_{Al}	0,497 кг/м
Погонная масса стали M_{cm}	0,3276 кг/м
Степень черноты поверхности провода ε_n	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Коэффициент угла атаки ветра k_V	1
Допустимая температура провода $\Theta_{дон}$	75 °С
Расчетный период T_n	60 мин
Длина линии l	1000 м

К достоинствам разработанного подхода относятся возможности анализа потерь электрической энергии за время переходного процесса. В таблице 4.10 представлены расчеты потерь электрической энергии за сутки, а также на рисунке 4.32 представлено изменение температуры провода от тока нагрузки. При расчете сделаны следующие допущения: ток нагрузки изменяется каждый час, в начальный момент времени температура провода

равна температуре окружающей среды и равна 0 °С, скорость ветра, направление ветра и температура окружающей среды остаются постоянными.

Из результатов таблицы 4.10 видно, что потери электрической энергии рассчитанные при 20 °С ($\Delta P_{20}=1070,64$ кВт), выше, чем потери полученные с использованием разработанного метода (ΔP_{cp} , кВт=1033,77). Это происходит по причине того, что разработанный метод производит расчет потерь электрической энергии по средней температуре за переходной процесс. В таблице 4.10 представлены результаты расчета потерь мощности при условии, что сопротивление определено при температуре окружающей среды 0 °С. По полученным результатам видно, что учет климатических факторов и инерционности тепловых процессов, протекающих в линии, позволяют уточнить результаты потерь. На 1000 метров линии неучет нестационарных тепловых процессов приводит к увеличению значения потерь на 41,03 кВт.

Таблица 4.10 – Потери электрической энергии за сутки

Часы суток	Ток, А	ΔP_{20} , кВт	ΔP_0 , кВт	ΔP_{cp} , кВт	ϵ_1^* , кВт	ϵ_2^* , кВт	δ_1^* , %	δ_2^* , %
0	309,32	45,24	41,33	42,78	2,46	1,45	5,44	3,51
1	278,18	36,59	33,43	34,52	2,07	1,09	5,66	3,26
2	297,39	41,81	38,21	39,58	2,23	1,37	5,33	3,59
3	303,62	43,59	39,82	41,33	2,26	1,51	5,18	3,79
4	276,11	36,04	32,93	33,99	2,05	1,06	5,69	3,22
5	278,18	36,59	33,43	34,49	2,1	1,06	5,74	3,17
6	223,69	23,66	21,62	22,08	1,58	0,46	6,68	2,13
7	127,67	7,71	7,04	7,10	0,61	0,06	7,91	0,85
8	333,72	52,66	48,11	50,12	2,54	2,01	4,82	4,18
9	456,2	98,4	89,91	97,49	0,91	7,58	0,92	8,43
10	252,23	30,08	27,48	28,39	1,69	0,91	5,62	3,31
11	194,11	17,81	16,28	16,54	1,27	0,26	7,13	1,6
12	175,94	14,64	13,37	13,54	1,1	0,17	7,51	1,27
13	164	12,72	11,62	11,75	0,97	0,13	7,63	1,12
14	139,61	9,22	8,42	8,49	0,73	0,07	7,92	0,83
15	209,16	20,68	18,9	19,21	1,47	0,31	7,11	1,64
16	254,31	30,58	27,94	28,65	1,93	0,71	6,31	2,54
17	288,05	39,23	35,84	37,04	2,19	1,2	5,58	3,35
18	306,73	44,48	40,64	42,20	2,28	1,56	5,13	3,84
19	337,35	53,81	49,16	51,44	2,37	2,28	4,4	4,64
20	403,26	76,89	70,25	74,91	1,98	4,66	2,58	6,63

Продолжение таблицы 4.10

21	519	127,35	116,36	129,43	2,08	13,07	1,63	11,23
22	445,82	93,97	85,86	93,49	0,48	7,63	0,51	8,89
23	403,26	76,89	70,25	75,21	1,68	4,96	2,18	7,06
Итого		1070,64	978,2	1033,77	41,03	55,57	3,83	5,68

* - относительная и абсолютная разности взяты по модулю.

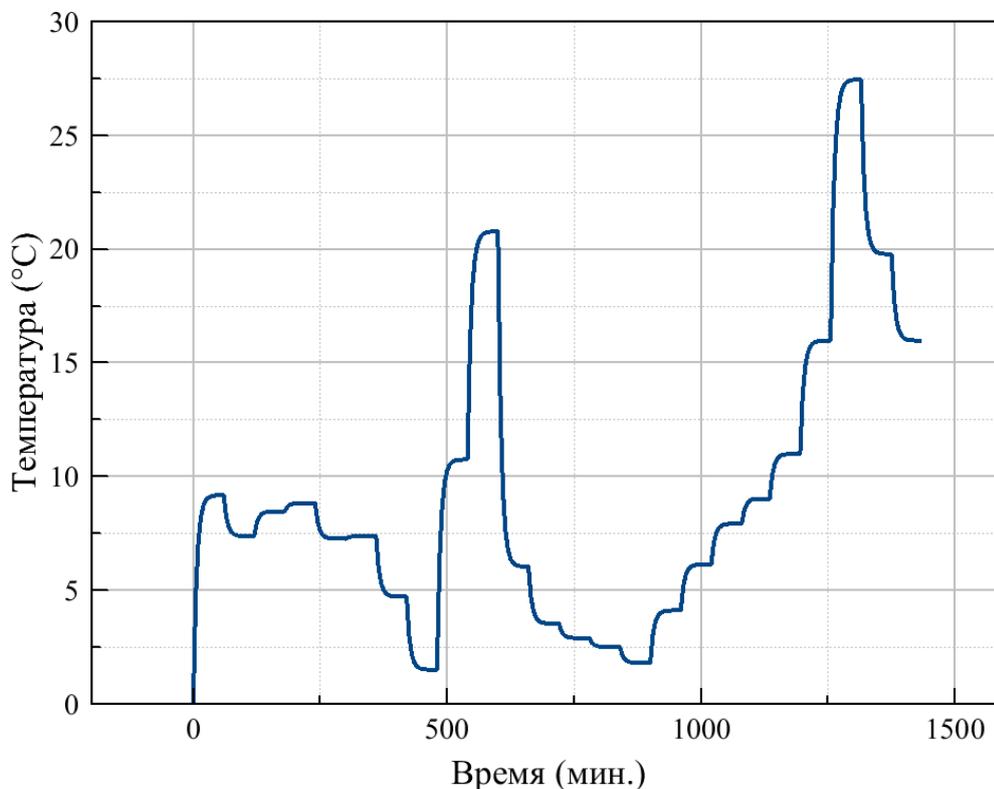


Рисунок 4.32 – Изменение температуры провода в течение суток

Тепловые расчеты линий электропередачи имеют важное значение. Температура проводов влияет на потери электрической энергии, пропускную способность электрических сетей и значения стрелы провеса проводов. В свою очередь, она зависит от тока, протекающего по проводнику, и погодных условий. Электрические сети, как правило, работают при изменении тока, ветра и других условий. В таких условиях для повышения эффективности использования существующих сетей необходим учет нестационарных тепловых режимов. Учет нестационарных тепловых режимов необходим также для достоверного определения максимальной температуры провода с целью прогнозирования нагрузочной способности линии. Адекватность разработанной математической модели подтвердилась посредством сравнения результатов моделирования (температуры и параметра T_H) с

экспериментальными значениями. Было произведено сравнение результатов расчета потерь электрической энергии разработанным методом со стандартными способами. Разность потерь при активном сопротивлении взятом при 0 °С составило $\varepsilon_1 = 55,57$ кВт и $\delta_2 = 5,68$ %, при 20 °С составило $\varepsilon_1 = 41,03$ кВт и $\delta_2 = 3,83$ %.

4.6. Вывод

1. Проведено сравнение полученных результатов предлагаемым методом решения уравнения теплового баланса в нестационарном режиме работы неизолированного провода с экспериментальными данными при переходном тепловом процессе. Максимальная разность не превышает 5 °С.

2. Выявлены влияния климатических факторов на потери электрической энергии и температуру проводников в динамическом процессе.

3. Разработанная математическая модель расчета потерь электрической энергии в самонесущих изолированных проводах, основанная на решении уравнения теплового баланса в нестационарном тепловом режиме работы, повторяет результаты определения температуры провода, полученные при моделировании в программном комплексе ANSYS. Максимальная разность результатов составляет менее 2,5 %.

4. Произведено сравнение допустимой токовой нагрузки, получаемой с использованием поправочных коэффициентов на токи по ПУЭ, и нагрузки, получаемой с использованием предложенного метода. Максимальная разность в отрицательном диапазоне температур составляет 103,333 А.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен обзор существующих методов расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи в стационарном и динамическом режиме. Выявлено, что для уточнения потерь электрической энергии предпочтительно использовать модели, основанные на решении уравнения теплового баланса в нестационарном тепловом режиме.

2. Разработана математическая модель решения уравнения теплового баланса в нестационарном режиме аналитическим методом на основе метода наименьших квадратов. Разность результатов, полученных предлагаемым методом и численным методом Рунге–Кутты 4-го порядка, составляет 0,01 °С или 0,03 %

3. Найдены выражения для нахождения средней температуры и потерь электрической энергии в проводах воздушных линий за время теплового переходного процесса происходящего в результате изменения климатических и режимных факторов.

4. Разработаны алгоритмы и программа определения потерь электрической энергии, основанные на использовании аналитического решения уравнения теплового баланса в динамическом режиме с необходимой на практике точностью, простоте подготовки исходных данных и анализе результатов расчета.

5. Выявлено влияние климатических факторов на потери электрической энергии и температуру проводников в динамическом процессе. Разность максимальных значений тока при отсутствии солнечного излучения и при 500 Вт/м² составляет 8,99 %, средних потерь электрической энергии – 17,02 %. При изменении температуры провода от –40 °С до +40 °С разность токов – 46,8 %, средних потерь – 68,9 %. При изменении ветра от штиля до крепкого разность значений тока составляет 68,2 %, средних потерь – 90,3 %. На основании этих данных сделан вывод, что наибольшее влияние на пропускную способность и потери электрической энергии в линиях

оказывает ветер. Следующим по значимости параметром является температура окружающей среды. Наименьшую степень влияния на пропускную способность линий имеет солнечная радиация.

6. Выявлена необходимость уточнения поправочных коэффициентов на токи по ПУЭ при определении связи между допустимой токовой нагрузкой и температурой окружающей среды в отрицательном диапазоне температур.

7. Определение достоверности разработанных математических моделей, алгоритмов и программных продуктов производилась сравнением полученных результатов с экспериментальными значениями и результатами, полученными с использованием программного комплекса ANSYS.

Библиографический список

1. Алгоритм учета температуры неизолированного провода при снижении потерь энергии путем компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова [и др.] // Современные технологии в энергетике / Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 7–4
2. Алгоритм расчета потерь в неизолированных проводах линий электропередачи с учетом температуры токопроводящих жил / Н. В. Кириченко [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : материалы V Всерос. науч. – техн. конф. с междунар. участием : в 3-х кн. Кн. 2. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 306 – 308.
3. Анализ выражений для коэффициентов теплоотдачи конвекцией используемых при тепловых расчетах воздушных линий / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергоэффективность : матер. междунар. науч.-практ. конф. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 2–8.
4. Анализ преимуществ усовершенствованного метода расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электропередач с учетом режимных и климатических факторов / Н. В. Кириченко [и др.] // Современные технологии и управление в энергетике и промышленности : сб. науч. тр. – Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2012. – С. 23–31.
5. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции / С. С. Гиршин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. –2015, № 1, – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18506> (дата обращения 20.12.2017).
6. 9 Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. - 2009. – №3(83). – С. 171–175.

7. Болгарский А.В. и др. Термодинамика и теплопередача. М.: Высш. школа, 1975. – 495 с.
8. Бубенчиков, А. А. Уточнение формул расчета токов при анализе температуры проводов воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь электрической энергии / А. А. Бубенчиков // Омское время – взгляд в будущее Материалы регион. молодежи научн-техн. конф. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – Кн 2. – С. 97–101.
9. 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
10. Влияние режимных и климатических факторов на потери энергии при нестационарных тепловых режимах линий электропередачи / А. Я. Бигун [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5. – № 1. С. 8–17.
11. Воротницкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий / В. Э. Воротницкий, О. В. Туркина // Электрические станции. – 2008. – № 10. – С.42–49.
12. Воротницкий, В. Э., Программа расчета потерь мощности и электроэнергии в распределительных сетях 6 - 10 кВ./ В. Э. Воротницкий, С. 3 Л. Заслонов, М. А Калинкина // Электрические станции. – 1999. – № 8. – С. 38-40.
13. Высокотемпературные провода [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.essp.ru/production/catalog/partners/CROSSY/provoda%20lumpi.php/>
(дата обращения: 04.03.2013).
14. Вырва, А. А. Уточнение формул для анализа температуры проводов ВЛ в задачах расчета потерь электрической энергии / А. А. Вырва, В. Н.

Горюнов, С. С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2010. – № 1(87). – С. 120–126.

15. Герасименко, А. А. Комплексный учет режимно-атмосферных факторов в расчете активного сопротивления и потерь электроэнергии в ЛЭП / А. А. Герасименко, Г. С. Тимофеев, И. В. Шульгин // Оптимизация режимов работы электрических систем / Красноярск, 2008. – С. 232–245

16. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Герасименко, И. В. Шульгин, Г. С. Тимофеев // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технология. – 2008. – № 6. – С. 19–21.

17. Герасименко, А. А. Комплексный учет режимно-атмосферных факторов в расчете активного сопротивления и потерь электроэнергии в ЛЭП / А. А. Герасименко, И. В. Шульгин, Г. С. Тимофеев // Межвуз. сб. науч. тр. Оптимизация режимов работы электрических систем". – Красноярск. – 2008 г. – С. 188-206

18. Гиршин, С. С. Расчет нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена / С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, А. Я. Бигун // Современные проблемы науки и образования. –2014, № 5, – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15258> (дата обращения 20.12.2017).

19. Железко, Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 180 с

20. Железко, Ю. С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко // – М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003. – 280 с.

21. Журавлев, В. Тарифное регулирование на пороге перемен. Всероссийское совещание регулирующих органов. / В. Журавлев // Новости ЭлектроТехники. – 2010. – № 5. – С. 26–29.
22. Зарудский, Г. К. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г. К. Зарудский, С. Ю. Сыромятников // Вестник МЭИ. Электроэнергетика. – 2008. – № 2. – С. 37–42
23. Засыпкин, А. С. Нагрев проводов вл электрическим током при плавке гололёда в повторно-кратковременном режиме / Засыпкин А. С., Засыпкин А. С. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2014. – № – 4. С. 75–83.
24. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям: Утв. приказом Минэнерго РФ от 30.12.2008, №326. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://kuzenergo.com/normativy_poter_elektroenergii (дата обращения: 04.03.2015).
25. Исследование достоверности расчетов температуры проводников воздушных линий электропередачи комплексом программ Ом1 / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 291–296.
26. Исследование преимуществ усовершенствованного метода расчета потерь в воздушных линиях электропередачи при вариации токов нагрузки и погодных условий [Текст] / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2012. – № 2(110). – С. 223–228.
27. Колосов, С. В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С. В. Колосов // Энергетик. – 2011. – № 1. – С. 18–22.

28. Коррекция технологических потерь электрической энергии ВЛ 35 кВ электрических сетей ООО "Роснефть-Юганскнефтегаз" на основе учета климатических и режимных условий [Текст] / В. А. Бурчевский [и др.] // Омский научный вестник. – 2010. – № 1(87). – С. 127–132.
29. Латыпов, И. С. Снижение потерь активной мощности в проводах воздушной линии электропередачи напряжением 6-35 кВ / И. С. Латыпов, В. В. Сушков // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – Т. 3. – № 1. – С. 110-113.
30. Левченко, И. И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. – 2008. – № 4. – С. 2-8
31. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – №3(83). – С. 176–179
32. Математическая модель установившегося теплового режима изолированного провода воздушной линии / С. С. Гиршин [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность – 2015. – № 1. – С. 168 – 172
33. Методика расчета потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводов на основе расчета тепловых полей методом конечных элементов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Современные технологии и управление в энергетике и промышленности : сб. науч. тр. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – С. 123–128.
34. Методы математического моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studopedia.org/1-63084.html> (дата обращения: 04.06.2017).
35. Методы повышения пропускной способности линий электроэнергетических систем / А. Я. Бигун [и др.] // Актуальные вопросы

энергетики/: межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – С. 126–130.

36. Моделирование нагрева проводов воздушных линий электропередачи с учетом режимных и атмосферных факторов / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергоэффективность : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Омск. Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 39–44.

37. Моделирование нагрева проводов воздушных линий электропередачи с учетом режимных и атмосферных факторов / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергоэффективность : материалы Междунар. науч.-практ. конф., – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. – С. 79–84.

38. Определение потерь электрической энергии в четырехпроводной системе самонесущих изолированных проводах на базе метода конечных элементов / А. А. Бубенчиков [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин/ Восьмая междунар. научн.-техн. конф. : Тез. докл. – Омск, 2012. – С.92–96

39. Оценка влияния метеорологических условий на активное сопротивление проводов воздушных линий электропередачи / Г. К. Зарудский [и др.] // Вестник МЭИ. – 2014. – № 3. – С. 35–39.

40. Оценка погрешности расчета потерь энергии в проводах повышенной пропускной способности при вариации погодных условий и нагрузки / Е. В. Петрова [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! : материалы V Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием : в 3-х кн. Кн. 2. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 199–201

41. Оценка экономической эффективности мероприятий по увеличению пропускной способности воздушных линий электропередач / А. Я. Бигун [и др.] // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность– 2015. – №1. – С. 141–145.

42. Петрова, Е. В. Современные типы высокотемпературных проводов воздушных линий электроэнергетических систем повышенной пропускной способности / Е. В. Петрова // Энергетика и энергосбережение. – 2011. – С. 220–225.
43. Повышение точности расчета температуры и потерь энергии в проводах повышенной пропускной способности при вариации погодных условий и нагрузки / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 275–280.
44. Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов / А. В. Дед [и др.] // Омский научный вестник. – 2010. – N 1(87). – С. 114–119.
45. Портал энерго [Электронный ресурс].– Режим доступа: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/621> (дата обращения: 04.03.2016).
46. Порядок расчета и обоснования нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям. Утв. приказом Минпромэнерго России от 4 октября 2005 г, № 267 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/530146> (дата обращения: 04.03.2013)
47. Постановление Правительства РФ от 15.04.2014 № 321 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70544238/> (дата обращения: 04.01.2017)
48. Потери электроэнергии в электрических сетях, зависящие от погодных условий / Ю. С. Железко [и др.] // Электрические станции. – 2004. – №11. – С. 42–48.
49. Приближенное решение уравнения теплового баланса проводов воздушных линий при теплоотдаче естественной конвекцией [Электронный

ресурс].– Режим доступа : <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=18505> (дата обращения: 15.05.2016).

50. Привезенцев, В. А. Основы кабельной техники / В. А. Привезенцев, И. И. Гроднев, С. Д. Холодный, И. Б. Рязанов: Под ред. В. А. Привезенцева. – М.: Энергия, 1975. – 120 – 146 с.

51. Приказ Минпромэнерго РФ от 03.02.2005 №21 «Об утверждении методики расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:<http://www.zakonprost.ru/content/base/78095> (дата обращения: 04.03.2013).

52. Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 326 "Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://base.garant.ru/195516/> (дата обращения: 04.01.2017).

53. Провод неизолированный из термостойкого алюминиевого сплава с сердечником из стальной проволоки плакированной алюминием (Провод АСПТ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://ner.ru/shop/provod/provod-aspt/> (дата обращения: 04.03.2013).

54. Программный комплекс расчета компенсирующих устройств / А. Я. Бигун [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин – 2014. –№ 1. – С. 216–218.

55. Разработка комплекса программ сравнения методов расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом режимных и климатических фактов / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергетика и энергоснабжение : межвуз. темат. сб. науч. тр. – Осмк : – 2011. – С. 201–211.

56. Распоряжение Правительства РФ от 3 апреля 2013 г. № 511-р «Стратегию развития электросетевого комплекса Российской Федерации»

[Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70253672/> (дата обращения:
04.01.2017).

57. Расчет динамических процессов нагрева воздушных линий электропередачи на основе квадратичной модели теплообмена / С. С. Гиршин [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – №1. – Т. 3. – С. 60–67.

58. Расчет погрешностей определения потерь электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 191–197.

59. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных проводах воздушных линий электропередачи при вариации нагрузки / О. А. Филатов [и др.] // Динамика систем, механизмов и машин/ Восьмая междунар. научн.-техн. конф.: Тез. докл. – Омск, 2012. – С. 202 – 205.

60. Расчет температуры и потерь энергии в проводах повышенной пропускной способности при вариации погодных условий и нагрузки / Е. В. Петрова [и др.] // Современные технологии в энергетике/ Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. – С. 282–289.

61. Расчет режима электрической сети с двухсторонним питанием с учетом температурной зависимости сопротивлений воздушных линий / С. С. Гиршин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. –2014, № 5, – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/119-15262> (дата обращения 20.12.2017).

62. Расчёт установившейся температуры провода воздушной линии электропередачи / А. С. Засыпкин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2015. – № 2. – С. 58–63.

63. Совершенствование расчетов потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем по результатам численного моделирования в условиях вариации нагрузки / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – № 1(107). – 2012. – С. 242–248.
64. Упрощение уравнений теплового баланса воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь энергии [Текст] / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – N 1(117). – С. 148–151.
65. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов / В. Н. Горюнов [и др.] // ОмГТУ, 2010. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 08.04.10, № 198-B2010
66. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 284–291
67. Учет температуры проводов при выборе устройств компенсации реактивной мощности в линиях электропередачи с высокотемпературными и самонесущими изолированными проводами / Е. В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – №4(148). – 2016. – С. 99–105
68. Учет температуры проводов повышенной пропускной способности при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / С.С. Гиршин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. –2015, № 1, – Режим доступа: <http://www.science-education.ru/121-18497> (дата обращения 20.12.2017).
69. Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/shareholders_and_investors/disclosure_of_information/annual_reports/ (дата обращения:05.01.2017).

70. Шведов, Г. В. Оценка влияния метеоусловий на годовые нагрузочные потери электроэнергии в проводах воздушных линий / Г. В. Шведов, А. Н. Азаров // Электричество. – 2016. – № 2. – С. 11–18.
71. Энергетической стратегии России на период до 2030 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/node/1920> (дата обращения: 05.01.2017).
72. Adomah, K. ; Mizuno, Y. ; Naito, K. “Examination of CIGRE Method of assessing transmission line conductor’s temperature”, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, p. 741-747, 2001.
73. Albizu, E. Fernandez, A. J. Mazon, M. Bedialauneta, and K. Sagastabeitia, "Overhead conductor monitoring system for the evaluation of the low sag behaviour," in Proc. 2011 IEEE PowerTech Conf., pp. 1-6.
74. M. Bockarjova and G. Andersson, “Transmission line conductor temperature impact on state estimation accuracy,” in Proc. IEEE Power Tech Conf., Jul. 1–5, 2007, pp. 701–706.
75. Beryozkina, S.; Sauhats, A.; Banga, A.; Jakusevics, I. "Testing thermal rating methods for the overhead high voltage line", Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on, On page(s): 215 – 220.
76. Cecchi, V.; Leger, A. St.; Miu, K.; Nwankpa, C. O. "Incorporating Temperature Variations Into Transmission-Line Models", Power Delivery, IEEE Transactions on, On page(s): 2189 - 2196 Volume: 26, Issue: 4, Oct. 2011.
77. Cecchi, V.; Knudson, M.; Miu, K. "System Impacts of Temperature-Dependent Transmission Line Models", Power Delivery, IEEE Transactions on, On page(s): 2300 - 2308 Volume: 28, Issue: 4, Oct. 2013.
78. Cigr'e Working Group 22.12, Thermal behaviour of overhead conductors, Cigr'e Brochure 207, August 2002.

79. Cunningham, J (NIE/Loughborough University) and Colandairaj, J (NIE), "Methodology for Applying Real-time Ratings to Wood Pole Supported Overhead Lines" 44th International Universities Power Engineering Conference, 2009.
80. Girshin S. S., Gorjunov V. N., Bigun A. Y., Petrova E. V. , Kuznetsov E. A., "Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model," 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russia, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819013.
81. Girshin S. S., Goryunov V. N., Kuznetsov E. A., Bigun A. Y., Petrova E. V., Bubenchikov A. A., "Comparative analysis of insulation-covered and bare conductors of overhead lines with variation of load currents considering weather conditions," 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics), Omsk, Russia, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/Dynamics.2016.7819012.
82. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A., Petrova E. V., Bigun A. Y., "A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors," 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Florence, 2016, pp. 1-5. doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.
83. Holbert K. E., Heydt G. T., "Prospects for dynamic transmission circuit ratings," in Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems (ISCAS 2001), vol. 2, pp. 205–208.
84. Huu-Minh, Lilien J.-L., Schell P., "Dynamic line rating and ampacity forecasting as the keys to optimise power line assets with the integration of res. The European project Twenties Demonstration inside Central Western Europe", 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIRED, 2013, pp.1-4.
85. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-1906).

86. J. Fu, S. Abbott, B. Fox, D.J. Morrow, S. Abdelkader, "Wind cooling effect on dynamic overhead line ratings," in Proc. 2010 UPEC Conf., pp. 1-6.
87. Kamboj, S.; Dahiya, R. "Evaluation of DTLR of power distribution line from sag measured using GPS", Energy, Automation, and Signal (ICEAS), 2011 International Conference on, On page(s): 1 – 6.
88. Krontiris T., Wasserrab A., Balzer G., "Weather-based loading of overhead lines-Consideration of conductor's heat capacity," in Proc. 2010 MEPS Conf., pp. 1-8.
89. Lawry D.C., Daconti J.R., "Overhead line thermal rating calculation based on conductor replica method", IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 880-85, Dallas-USA, 2003.
90. Oleinikova, I.; Mutule, A.; Grebesh, E.; Lvovs, A. "Line parameter estimation based on PMU application in the power grid", Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2015 IEEE 5th International Conference on, On page(s): 453 – 457.
91. Roberts D., Taylor P., Michiorri A., "Dynamic thermal rating for increasing network capacity and delaying network reinforcements" , SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar , pp.1 -4.
92. Ren L., Jiang X., Shenh G., Bo W., "Design and calculation method for dynamic increasing transmission line capacity," WSEAS Transactions on Circuits and Systems, vol. 7, issue 5, pp.348-357, May 2008.
93. Raniga J.K., Rayadu R.K., "Dynamic rating of transmission lines - a New Zeland experience", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000.
94. Seppa T.O., "Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings" , IEEE Transactions on Power Delivery , vol. 10 , no. 3 , pp.1460 -1470 , 1995 .

95. Yang Y., Harley R. G., Divan D., Habetler T. G., "Thermal modeling and real time overload capacity prediction of overhead power lines" , Proc. IEEE SDEMPED , pp.1 -7 , 2009 .
96. Youssef M., "A new method for temperature measurement of overhead conductors," in Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2001. IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE, 2001, pp. 966-969 vol.2.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Свидетельство ОФЭРНИО № 22509 от 17 января 2017 г. «Программа «T-wire – расчет нестационарных температурных режимов неизолированных проводов воздушных линий электропередачи»



Термограммы, полученные в программном комплексе ANSYS при объемном тепловыделении рассчитанном при 0 °С

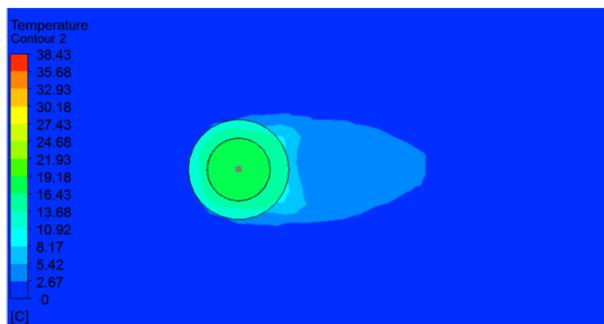


Рисунок П2.1 – Распределение температуры по сечению при $t = 300$ с.

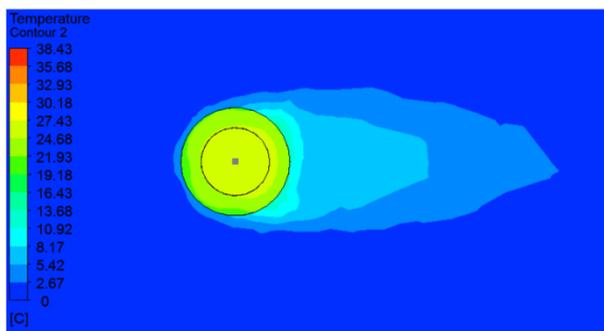


Рисунок П2.2 – Распределение температуры по сечению при $t = 600$ с.

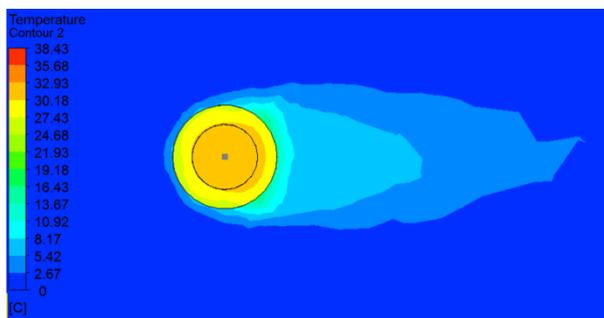


Рисунок П2.3 – Распределение температуры по сечению при $t = 900$ с.

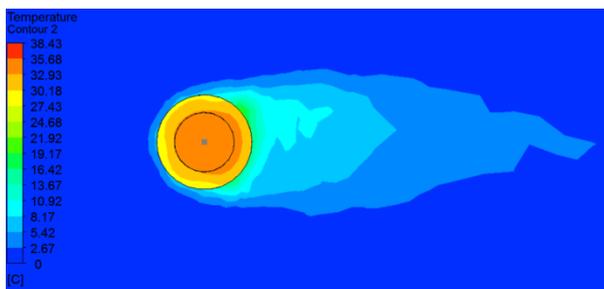


Рисунок П2.4 – Распределение температуры по сечению при $t = 1200$ с.

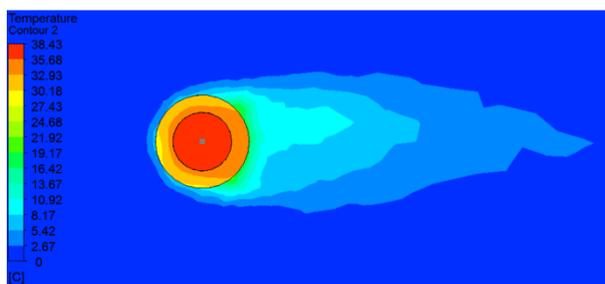


Рисунок П2.5 – Распределение температуры по сечению при $t = 1500$ с.

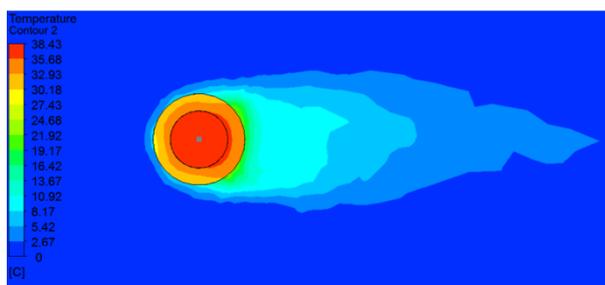


Рисунок П2.6 – Распределение температуры по сечению при $t = 1800$ с.

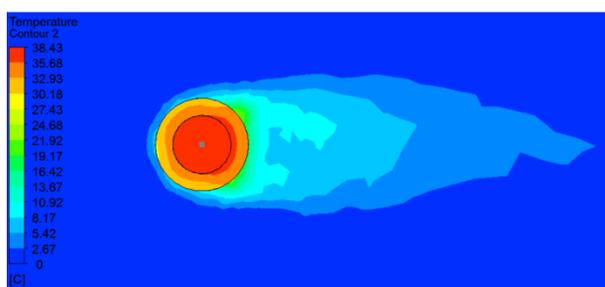


Рисунок П2.7 – Распределение температуры по сечению при $t = 2100$ с.

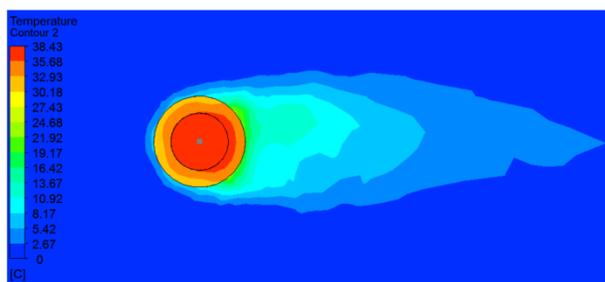


Рисунок П2.8 – Распределение температуры по сечению при $t = 2400$ с.

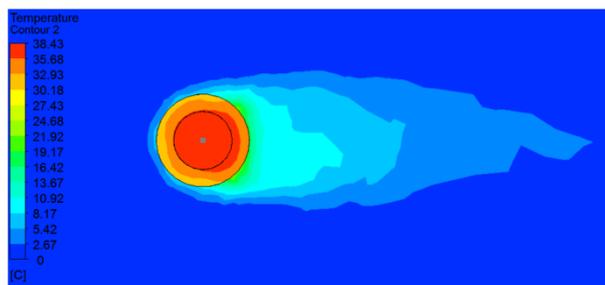


Рисунок П2.9 – Распределение температуры по сечению при $t = 2700$ с.

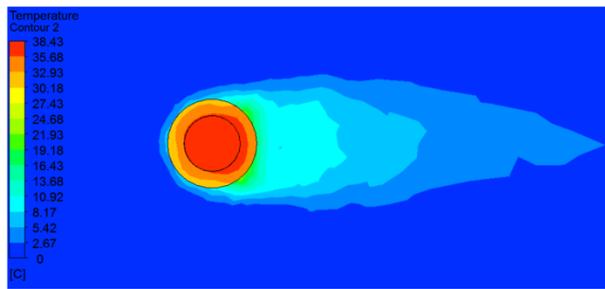


Рисунок П2.10 – Распределение температуры по сечению при $t = 3000$ с.

Термограммы, полученные в программном комплексе ANSYS при объемном тепловыделении, рассчитанном при 45,545 °С

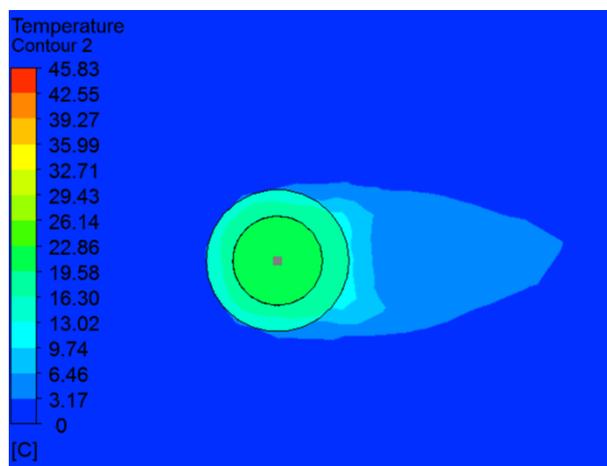


Рисунок ПЗ.1 – Распределение температуры по сечению при $t = 300$ с.

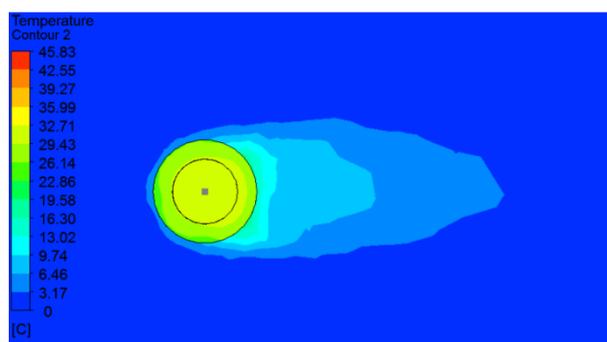


Рисунок ПЗ.2 – Распределение температуры по сечению при $t = 600$ с.

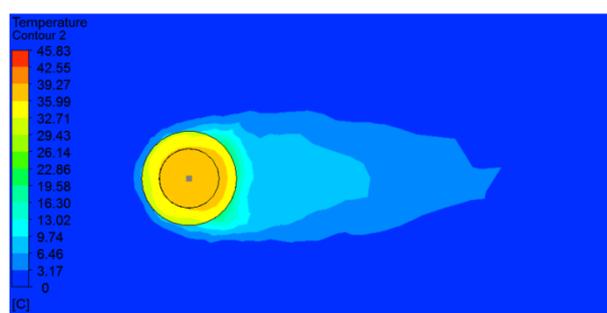


Рисунок ПЗ.3 – Распределение температуры по сечению при $t = 900$ с.

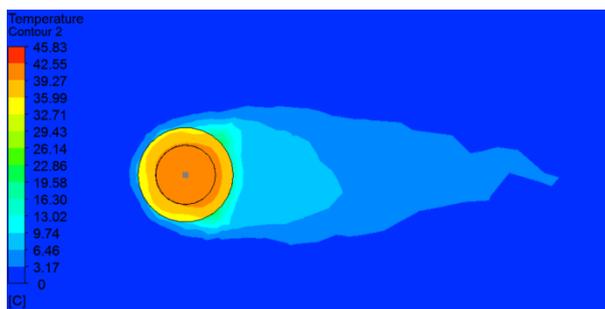


Рисунок ПЗ.4 – Распределение температуры по сечению при $t = 1200$ с.

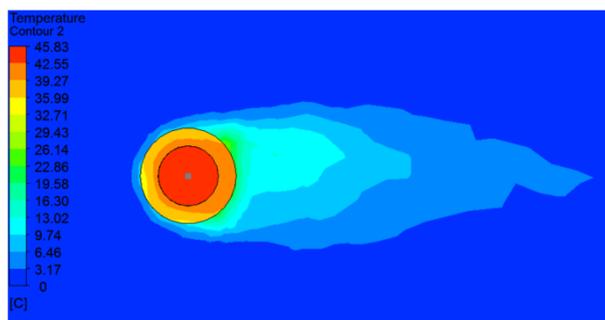


Рисунок ПЗ.5 – Распределение температуры по сечению при $t = 1500$ с.

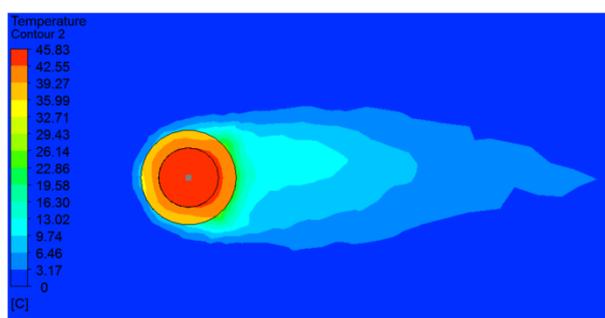


Рисунок ПЗ.6 – Распределение температуры по сечению при $t = 1800$ с.

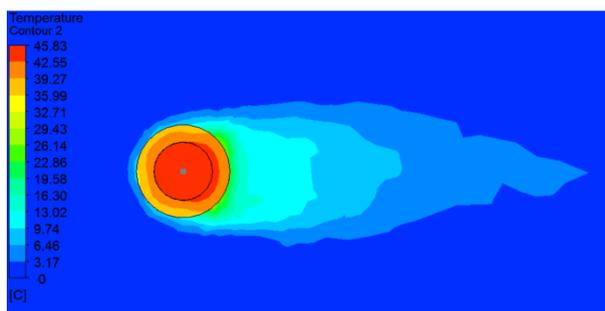


Рисунок ПЗ.7 – Распределение температуры по сечению при $t = 2100$ с.

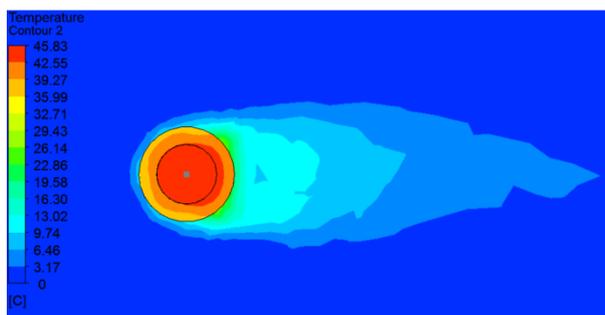


Рисунок ПЗ.8 – Распределение температуры по сечению при $t = 2400$ с.

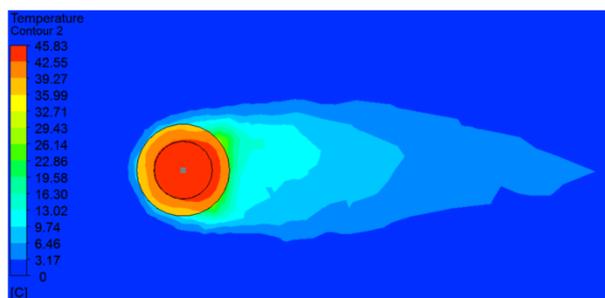


Рисунок ПЗ.9 – Распределение температуры по сечению при $t = 2700$ с.

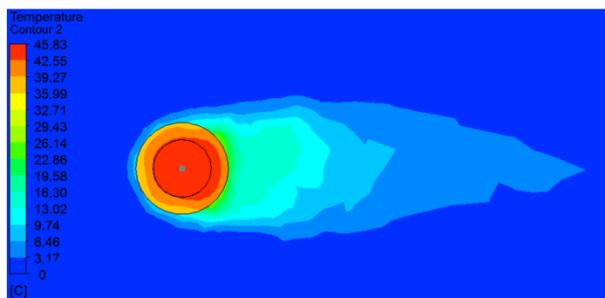


Рисунок ПЗ.10 – Распределение температуры по сечению при $t = 3000$ с.

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора по
техническим вопросам – главный
инженер филиала ПАО «МРСК
Сибири» – « Омскэнерго »

 С.В. Капитонов

« 13 » 13 2018 г.



АКТ

**о внедрении результатов
диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий»
Бигуна Александра Ярославовича**

Комиссия в составе начальника диспетчерской службы Центра Управления Сетями Матвиенко П.Н., начальника службы режимов ЦУС Волкова А.А. составила настоящий акт о том, что в филиале ПАО «МРСК Сибири» – Омскэнерго» используются следующие результаты диссертационной работы Бигуна А.Я.:

- 1) Выражения для определения средней температуры и потерь электрической энергии за время теплового переходного процесса, происходящего в результате изменения климатических и режимных факторов.
- 2) Программа по расчету нестационарных температурных режимов неизолированных проводов воздушных линий электропередачи, позволяющая рассчитывать как изменение температуры, так и потери электрической энергии за время теплового переходного процесса.

Полученные автором результаты позволяют повысить точность определения потерь электрической энергии, определять действительную загрузку воздушных линий электропередачи в соответствии с режимными и климатическими факторами.

Начальник
Диспетчерской Службы ЦУС

П.Н. Матвиенко

Начальник службы
электрических режимов ЦУС

А.А. Волков



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе
Омского государственного
технического университета

А.В. Мышлявцев

03 2018 г.

АКТ

использования в учебном процессе
материалов диссертационной работы
старшего преподавателя кафедры
«Электроснабжение промышленных предприятий»
Омского государственного технического университета
Бигуна Александра Ярославовича

Результаты, полученные в кандидатской диссертации старшего преподавателя А.Я. Бигуна:

- обзор существующих методов расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи при нестационарном тепловом режиме работы;
- разработанный приближенный аналитический методы решения дифференциального уравнения теплового баланса нестационарного теплового режима для неизолированного и изолированного провода методом наименьших квадратов;
- выражения для нахождения средней температуры и потерь электрической энергии за время теплового переходного процесса происходящего в результате изменения климатических и режимных факторов;
- алгоритмы и программа определения потерь электрической энергии, основанные на использовании аналитического решения уравнения теплового баланса в динамическом режиме при необходимой на практике точностью, простоте подготовки исходных данных и анализе результатов расчета;

используются в лекционных курсе «Электрические сети и системы», а также в научно – исследовательской работе студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 13.05.01 «Тепло- и электрообеспечение специальных технических систем и объектов», 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение промышленных
предприятий», д.т.н., профессор

В.Н. Горюнов