

На правах рукописи



Троценко Владислав Михайлович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ И ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА И ТЕМПЕРАТУРЫ
ПО ДЛИНЕ**

Специальность 2.4.3. Электроэнергетика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Омск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Горюнов Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор

**Официальные
оппоненты:** **Манусов Вадим Зиновьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор
политехнической школы федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего
образования «Югорский государственный университет»;

Сацук Евгений Иванович
доктор технических наук, доцент, начальник службы
внедрения противоаварийной и режимной автоматики
акционерного общества «Системный оператор Единой
энергетической системы».

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

Защита диссертации состоится «16» марта 2026 г. в 14:00 на заседании диссертационного
совета 24.2.350.04, созданного на базе ФГАОУ ВО «Омский государственный технический
университет» по адресу: 644050, г. Омск, проспект Мира, д. 11, Главный корпус, ауд. П-202.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 20__ г.

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



Гиршин Станислав Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение энергоэффективности, формирование и развитие энергетического кластера страны, является одним из приоритетных направлений в развитии экономики России. Для его последовательной реализации разработана и утверждена Энергетическая стратегия на период до 2035 года, Стратегия развития электросетевого комплекса РФ, а также другие постановления Правительства РФ. Большое внимание уделяется уменьшению потерь энергии и повышению пропускной способности линий электропередачи. Так, согласно годовому отчету ПАО «Россети», средние потери энергии за 2023 год составили 10,4 %, что говорит об актуальности темы исследования.

Стремительный рост численности населения, а также быстрые темпы развития различных отраслей промышленности, прямо или косвенно связанных с потреблением электроэнергии, приводят к увеличению потребления электроэнергии. С ростом потребления электроэнергии остро встает проблема пропускной способности линий. Чтобы решить эту проблему, на данный момент существуют такие мероприятия, как повышение номинального напряжения, увеличение сечения провода, замена воздушных линий на более современные марки проводов, например, на высокотемпературные марки и т. д. Однако все это требует значительных капиталовложений, к тому же требуется замена самих опор из-за растущей массы провода, а также появляется необходимость расширения просеки. Поэтому актуально более полно использовать пропускную способность уже существующих воздушных линий.

Степень разработанности темы исследования.

Исследования в данной области начаты довольно давно. Стоит отметить коллективы, которые занимаются исследованием вопросов повышения пропускной способности ЛЭП и расчетом потерь электроэнергии: АО «ЭНЕРГОСЕТЫПРОЕКТ», АО «Россети Научно-технический центр», Группа компаний «Оптэн», НИУ «МЭИ», Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», БУ ВО «Сургутский государственный университет», ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», Белорусский национальный технический университет, Азербайджанский научно-исследовательский институт энергетики и энергетического проектирования и другие организации, а также известные ученые: Баламетов А.Б., Бигун А.Я., Вихарев А.П., Войтов О.Н., Воротницкий В.Э., Герасименко А.А., Гиршин С.С., Голуб И.И., Горюнов В.Н., Железко Ю.С., Жилин Е.В., Зайцев Е.С., Зарудский Г.К., Идельчик В.И., Пузырев Е.В., Сацук Е.И., Халилов Э.Д., Шведов Г.В., Шепелев А.О., Щепотин А.С., Margita Fr., Pemachandra V., Sterc T., Szabó D., Yongdou L. и др. Что касается проблемы определения температурных режимов с учетом изменения тока по длине линии и определения температуры контактных соединений воздушных линий, то заметный вклад в них внесли следующие ученые: Воронин А.А., Гимадиев Р.Ш., Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Дементьев С.С., Игнатенко И.В., Львов М.Ю., Пантелеева Л.А., Солдатов А.И., Титков В.В., Chen X., De Paulis F., Feng Y., Gang L., Huang X. B., Jenssen R., Liang Z., Orlandi A., Oluwafemi Olumide T., Ramaswamy A., Ramirez-Martinez A., Stefano Q., Qi Y., Qiao K., Xinlan D., Yang X., Yingai J., Zhanfeng Y., Zhang T., Zhang X., Zhiwei J., Zhiyong L. и др.

Однако все используемые в настоящее время модели теплового режима линии основаны на допущении, что передача тепла внутри провода осуществляется только перпендикулярно его оси (радиальный тепловой поток). В действительности в линиях переменного тока величина электрического тока существенно меняется по длине, что приводит к передаче тепла также и вдоль оси провода (осевой поток тепла). В настоящей диссертационной работе предложена математическая модель температурного режима провода, учитывающая как радиальную, так и осевую передачу тепла. Анализ распределения температуры по длине линии позволяет не только уточнить потери энергии, но и оценить пропускную способность линии (максимум температуры) с учетом осевой передачи тепла.

Цель работы – повышение точности расчета потерь энергии и оценка пропускной способности линий электропередачи на основе учета изменения тока и температуры по длине.

При выполнении диссертации были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1. Анализ современного состояния проблемы повышения пропускной способности и снижения потерь электроэнергии с учетом тепловых процессов в электрических сетях;
2. Разработка алгоритма расчета годовых потерь энергии в воздушных линиях с учетом температурной зависимости активного сопротивления по суточным графикам нагрузки;
3. Разработка математической модели температурного режима провода воздушной линии с учетом осевой передачи тепла;
4. Моделирование и расчет распределения температуры по длине провода в задачах исследования пропускной способности линий электропередачи вблизи контактных соединений.

Объект исследования – электрические сети и входящие в их состав воздушные линии электропередачи различных типов.

Предмет исследования – методы расчета потерь энергии и пропускная способность воздушных линий электропередачи.

Научная новизна работы:

- разработана методика расчета годовых потерь энергии при ее передаче по воздушным линиям на основе графиков нагрузки с учетом тепловых процессов;
- разработана математическая модель температурного режима воздушной линии с учетом осевой передачи тепла;
- получено аналитическое и численное решение уравнения теплопроводности воздушной линии электропередачи;
- получены выражения для определения температур контактных соединений и дефектов воздушных линий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- разработана программа для ЭВМ, которая позволяет рассчитывать годовые потери энергии с учетом тепловых процессов в воздушных линиях электропередачи по суточным графикам нагрузки;
- получено распределение температуры в нестационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи;
- проведен сравнительный анализ потерь активной мощности в стационарном тепловом режиме с учетом и без учета осевой передачи тепла;
- проведено исследование пропускной способности линий по температуре контактных соединений на примере замкнутой сети;
- приведены общие рекомендации по повышению точности расчета потерь энергии и пропускной способности линий с учетом осевой передачи тепла для проводов различных типов.

Методология и методы исследования.

В процессе выполнения работы использовались: теория теплопередачи, методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, включая методы численного решения нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка, элементы теории электрических цепей. При разработке программы для ЭВМ применялся язык программирования Java. Математическое моделирование производилось в пакетно-прикладных программах для технических вычислений.

Положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика и программа определения годовых потерь энергии в воздушных линиях электропередачи с учетом тепловых процессов методом характерных суток;
2. Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине;
3. Методика расчета температуры провода в месте контактного соединения и при дефектах воздушных линий.

Степень достоверности подтверждается:

– сравнением расчетных температур контактных соединений и дефектов в задачах исследования пропускной способности воздушной линии, полученных по разработанной методике, с экспериментальными данными.

– хорошим совпадением результатов решения уравнения теплопроводности для неизолированного провода при изменении тока по длине точным (аналитическим) и численными методами (метод конечных разностей).

Теория основана на известных математических методах, таких как: методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений в частных производных, включая методы численного решения нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных в диссертационной работе исследований применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе Омского государственного технического университета (ФГАОУ ВО «ОмГТУ») при подготовке бакалавров (направления подготовки: «Электроснабжение», «Электроэнергетические системы и сети») и специалистов (специальность: «Тепло- и электрообеспечение специальных технических систем и объектов») Энергетического института.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Приведенные в диссертации исследования соответствуют паспорту научной специальности по направлению 2.4.3 «Электроэнергетика»:

П. 17. Исследования по транспорту электроэнергии переменным и постоянным током, включая проблемы повышения пропускной способности транспортных каналов, разработки и применения FACTS-устройств, накопителей энергии.

Личный вклад соискателя. В процессе написания диссертационной работы соискателю принадлежит разработка математических моделей, разработка методик решения уравнения теплопроводности неизолированного провода для осевой передачи тепла, анализ и обобщение результатов диссертационного исследования, разработка прикладных программ для ЭВМ, оценка достоверности результатов, полученных в ходе диссертационного исследования.

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 18 печатных работ, из них 9 статей в изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 7 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ в ФИПС и опубликовано 1 учебное пособие.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и 5 приложений. Содержит 116 страниц основного текста, 102 страницы в виде приложений, 36 рисунков и 38 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору технических наук, профессору Горюнову Владимиру Николаевичу и кандидату технических наук, доценту Гиршину Станиславу Сергеевичу, за помощь при подготовке диссертации, полученные рекомендации и замечания, а также помощь при редактировании окончательного текста диссертационной работы.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Методика и программа определения годовых потерь энергии в воздушных линиях электропередачи с учетом тепловых процессов методом характерных суток

Самым точным методом расчета потерь электроэнергии является метод оперативных расчетов. Он основывается на реальных данных сети, то есть, сведения о токовых нагрузках для каждого часа в элементах сети могут быть получены из записей в диспетчерских ведомостях, а также на основе показаний оперативных измерительных комплексов. Таким образом, он требует много исходных данных о состоянии электрической сети, и точность этих данных напрямую зависит от точности измерительных приборов учета и корректности телеметрии. Поэтому его чаще всего используют для анализа текущего состояния сети или оптимизации параметров сети.

Следующим по точности для расчета потерь электроэнергии является метод характерных суток. Этот метод основан на моделировании типовых суточных графиков нагрузки для каждого типа потребителя. Затем этот суточный график масштабируется на месяц или год с учетом коэффициентов использования нагрузки. Он требует меньше исходных данных о состоянии электрической сети в отличие от метода оперативных расчетов и является более точным относительно метода средних нагрузок. Поэтому в дальнейшем при расчете годовых потерь энергии использовался этот метод. За суточные графики нагрузки были приняты типовые графики нагрузки энергосистемы в рабочие и выходные дни. Была учтена температурная зависимость активного сопротивления, которая позволяет существенно уточнить потери энергии.

Предложена формула для расчета годовых потерь энергии методом характерных суток с учетом температуры

$$\Delta W_{\text{год}} = \sum_{i=1}^{12} \Delta W_{\text{мес}_i} = \sum_{i=1}^{12} \left[\sum_{i=1}^{24} \Delta P_{i_{\text{раб.сут.}}} \cdot N_{\text{раб.}} + \sum_{i=1}^{24} \Delta P_{i_{\text{вых.сут.}}} \cdot N_{\text{вых.}} \right] \cdot L =$$

$$= \sum_{i=1}^{12} \left[\sum_{i=1}^{24} \left[3I_{i_{\text{раб.сут.}}}^2 \cdot r_0 \left(1 + \alpha \Theta_{\text{ср.}i_{\text{раб.сут.}}} \right) \right] \cdot N_{\text{раб.}} + \sum_{i=1}^{24} \left[3I_{i_{\text{вых.сут.}}}^2 \cdot r_0 \left(1 + \alpha \Theta_{\text{ср.}i_{\text{вых.сут.}}} \right) \right] \cdot N_{\text{вых.}} \right] \cdot L \quad (1)$$

где $\Delta P_{i_{\text{раб.сут.}}}$, $\Delta P_{i_{\text{вых.сут.}}}$, $I_{i_{\text{раб.сут.}}}$, $I_{i_{\text{вых.сут.}}}$, $\Theta_{\text{ср.}i_{\text{раб.сут.}}}$, $\Theta_{\text{ср.}i_{\text{вых.сут.}}}$ – потери активной мощности на единицу длины, токи и средние температуры провода для i -го часа рабочих суток (выходного дня); $N_{\text{раб.}}$ – количество рабочих дней в каждом месяце; $N_{\text{вых.}}$ – количество выходных дней в каждом месяце; L – длина линии.

Для расчета суточных потерь мощности за рабочие и выходные дни с учетом температуры за основу была принята математическая модель, разработанная в ОмГТУ на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий»

$$\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{ж}}) = C_{\text{эquiv}} \frac{d\Theta_{\text{ж}}}{dt} +$$

$$+ d_{\text{пр}} \left[\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_{\text{п}} C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right], \quad (2)$$

где ΔP_0 – потери активной мощности в проводе на единицу длины при 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления; $\Theta_{\text{ж}}$ – температура жилы; $C_{\text{эquiv}}$ – эквивалентная теплоемкость провода на единицу длины; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода; $\alpha_{\text{вын}}$ – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией; $\Theta_{\text{внеш}}$ и $\Theta_{\text{окр}}$ – температуры поверхности провода и окружающей среды в $^\circ\text{C}$; $T_{\text{внеш}}$ и $T_{\text{окр}}$ – тоже самое в К (абсолютные температуры); $\varepsilon_{\text{п}}$ – коэффициент черноты поверхности провода; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K}^4)$ – постоянная излучения абсолютно черного тела; A_s – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения; $q_{\text{солн}}$ – плотность потока солнечной радиации на провод.

Аналитическое решение уравнения (2)

$$\Theta_{1,2} = \frac{-A'_2 \pm \sqrt{A'^2_2 - 4A'_1A'_0}}{2A'_1} \quad (3)$$

где A'_1, A'_2, A'_0 – коэффициенты, полученные путем понижения степени температуры до второй на основе метода наименьших квадратов.

Тогда для i -го часа рабочих суток (выходного дня)

$$\Theta_{1_i} = \frac{-A'_{2_i} + \sqrt{A'^2_{2_i} - 4A'_{1_i}A'_{0_i}}}{2A'_{1_i}} \quad (4)$$

$$\Theta_{2_i} = \frac{-A'_{2_i} - \sqrt{A'^2_{2_i} - 4A'_{1_i}A'_{0_i}}}{2A'_{1_i}} \quad (5)$$

После всех преобразований получим температуру жилы, а также температуру на внешней поверхности провода в конце i -го часа рабочих суток (выходного дня)

$$\Theta_{ж_i} = \Theta_{2_i} + \frac{\Theta_{1_i} - \Theta_{2_i}}{1 - \left(\frac{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{1_i}}{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{2_i}} \right) e^{-\frac{60}{T_{П_i}}}}, \quad (6)$$

$$\Theta_{внеш_i} = \Theta_{ж_i} (1 - \alpha I_i^2 r_0 S_{из}) - I_i^2 r_0 S_{из}, \quad (7)$$

где $\Theta_{ж0_i}$ – температура жилы в начальный момент времени для i -го часа; $T_{П_i} = \frac{1}{A_{1_i}(\Theta_{2_i} - \Theta_{1_i})}$ –

постоянная времени для i -го часа, $S_{из}$ – тепловое сопротивление изоляции.

Так как ток нагрузки за сутки меняется, для того чтобы получить реальную температуру провода, следует воспользоваться численным методом (метод простых итераций), где для каждого графика нагрузки должны выполняться условия

$$\left| \Theta_{ж.пред_i} - \Theta_{ж_i} \right| < \varepsilon \quad (8)$$

$$\left| \Theta_{внеш.пред_i} - \Theta_{внеш_i} \right| < \varepsilon \quad (9)$$

где $\Theta_{ж.пред_i}$ – температура жилы i -го часа за предыдущие сутки; $\Theta_{ж_i}$ – температура жилы i -го часа за текущие сутки; $\Theta_{внеш.пред_i}$ – температура на внешней поверхности провода i -го часа за предыдущие сутки; $\Theta_{внеш_i}$ – температура на внешней поверхности провода i -го часа за текущие сутки; ε – точность (10^{-6}).

Средняя температура для i -го часа рабочих суток (выходного дня)

$$\Theta_{ср.i \text{ раб.сут. (вых.сут.)}} = \Theta_{1_i} + (\Theta_{1_i} - \Theta_{2_i}) \frac{T_{П_i}}{60} \ln \left(\frac{1 - \left(\frac{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{1_i}}{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{2_i}} \right) e^{-\frac{60}{T_{П_i}}}}{1 - \left(\frac{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{1_i}}{\Theta_{ж0_i} - \Theta_{2_i}} \right)} \right) \quad (10)$$

Для выполнения условий (8) и (9) каждого графика нагрузки была получена следующая последовательность решений (рисунок 1).

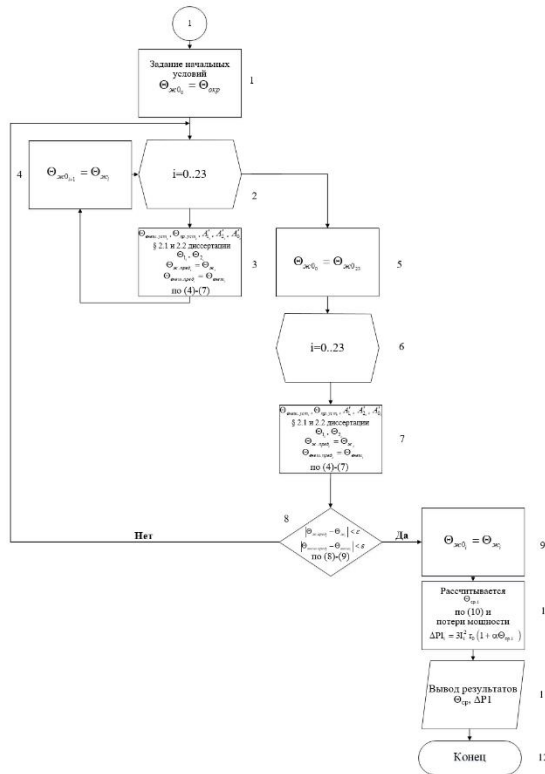


Рисунок 1 – Фрагмент блок схемы алгоритма расчета средней температуры провода и потерь мощности каждого часа для суточных графиков нагрузки

В дальнейшем использовано уравнение теплового баланса в установившемся тепловом режиме

$$\frac{\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{внеш}})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{\text{из}}} = d_{\text{пр}} \left[\pi \alpha_{\text{вын}} (\Theta_{\text{внеш}} - \Theta_{\text{окр}}) + \pi \varepsilon_{\text{п}} C_0 (T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4) - A_s q_{\text{солн}} \right] \quad (11)$$

Путем линеаризации уравнения (11) была получена упрощенная формула для расчета потерь мощности

$$\Delta P_{\text{упр}i} = \frac{3I_i^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{окр}i})}{1 - \frac{\alpha (\Theta_{\text{дон}} - \Theta_{\text{окр.ном}})}{1 + \alpha \Theta_{\text{дон}}} \left(\frac{I_i}{I_{\text{дон}}} \right)^2} \quad (12)$$

где I_i – ток нагрузки для i -го часа рабочих суток (выходного дня); $\Theta_{\text{окр}i}$ – температура окружающей среды для i -го часа рабочих суток (выходного дня); $\Theta_{\text{дон}}$ – допустимая температура провода; $\Theta_{\text{окр.ном}}$ – номинальная (нормированная) температура окружающей среды; $I_{\text{дон}}$ – допустимый ток.

Средние потери активной мощности по упрощенной формуле

$$\Delta P2' = \frac{3I_{\text{ср.кв.}}^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{\text{окр.ср.}})}{1 - \frac{\alpha (\Theta_{\text{дон}} - \Theta_{\text{окр.ном}})}{1 + \alpha \Theta_{\text{дон}}} \left(\frac{I_0}{I_{\text{дон}}} \right)^2} \quad (13)$$

где $I_{\text{ср.кв.}}$ – среднеквадратичный ток за сутки; $\Theta_{\text{окр.ср.}}$ – среднесуточная температура окружающей среды.

На примере провода марки SAX-50 для Омской области было произведено сравнение упрощенной формулы для расчета потерь мощности (12) и (13) с формулой (1). Исходные данные расчета приведены в таблице 1. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0	0,000663 Ом/м
Диаметр токопроводящей жилы провода $d_{ж}$	0,008 м
Температурный коэффициент сопротивления α	0,0043 °С ⁻¹
Диаметр провода $d_{пр}$	0,0127 м
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_{п}$	0,8
Допустимая температура токоведущей жилы $\Theta_{доп}$	90 °С
Допустимый ток $I_{доп}$	343,1 А
Удельная теплоемкость жилы, $C_{ж}$	920 Дж/кг · °С
Удельная теплоемкость изоляции жилы, $C_{из}$	3750 Дж/кг · °С
Плотность алюминия, $\rho_{ал}$	2700 кг/м ³
Плотность сшитого полиэтилена, $\rho_{сп}$	950 кг/м ³
Коэффициент $k_{зт}$, учитывающий затененность участков	0,7
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей φ_s	$\pi/4$
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,9
Коэффициент угла атаки ветра k_v	0,5
Коэффициент теплопроводности изоляции, $\lambda_{из}$	0,4 Вт/(м·°С)
Тепловое сопротивление изоляции $S_{из}$	0,184 (°С·м)/Вт
Номинальная температура окружающей среды $\Theta_{окр.ном}$	-20,7 °С
Длина линии L	1 м

Допустимый ток здесь определялся путем численного решения уравнения теплового баланса (2). Все погодные условия были взяты из научно-прикладного справочника по климату СССР (17 выпуск, Тюменская и Омская обл.). Значения k_{max} и $I_{нагр}$ для графиков нагрузок были рассчитаны из методики, которая была разработана АО «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ».

Таблица 2 – Потери активной мощности для одного рабочего дня в январе (Омская обл.), определение относительной погрешности $\epsilon_{\Delta P2}$ в сравнении с упрощенной формулой

Часы	Коэффициент максимума нагрузок рабочего дня в январе, выраженный в долях от годового максимума нагрузок $k_{max,раб}=1$ о.е.						
	$I_{нагр}, А$	$\Theta_{окр}, ^\circ С$	$\Theta_{внеш}, ^\circ С$	$\Theta_{ж}, ^\circ С$	$\Theta_{ср}, ^\circ С$	$\Delta P1, кВТ/км$	$\Delta P2, кВТ/км$
0	260,8	-20,4	23,294	32,738	35,865	0,156	0,154
1	216,2	-20,5	7,773	13,807	17,043	0,1	0,098
2	209,6	-20,6	5,72	11,339	11,755	0,092	0,091
3	203,5	-20,7	3,9	9,145	9,514	0,086	0,085
4	203,5	-20,6	4,004	9,251	9,236	0,086	0,085
5	209,6	-20,7	6,157	11,786	11,358	0,092	0,091
6	222,3	-20,9	9,756	16,202	11,416	0,105	0,105
7	254,2	-20,1	21,025	29,919	27,473	0,144	0,145
8	298,5	-19,7	38,757	52,051	47,963	0,214	0,219
9	323,9	-19,4	52,295	68,872	65,77	0,268	0,276
10	317,7	-18,9	51,305	67,165	67,606	0,259	0,262
11	298,5	-18,3	43,761	57,3	59,155	0,222	0,221
12	285,8	-17,8	39,292	51,454	52,54	0,199	0,197

13	292,3	-18,2	41,841	54,71	54,115	0,21	0,209
14	305,0	-18,6	48,025	62,412	61	0,234	0,234
15	305,0	-19	45,814	60,087	60,434	0,233	0,233
16	298,5	-19,2	40,447	53,825	54,88	0,219	0,22
17	330,4	-19,5	55,053	72,512	68,91	0,281	0,292
18	343,1	-19,7	62,8	82,227	80,382	0,315	0,327
19	336,9	-19,8	60,493	79,037	79,721	0,303	0,309
20	330,4	-19,9	57,949	75,584	76,316	0,288	0,292
21	317,7	-20	51,777	67,663	69,241	0,261	0,26
22	305,0	-20,1	44,448	58,651	60,338	0,233	0,232
23	292,3	-20,3	37,595	50,264	51,808	0,208	0,207
I _{срkv} , А	285,5				ΔP _{ср} , Вт/км	0,2	0,202
					ΔP2', кВт/км	0,195	
					ε, %	0,77	
					ε _{ΔP2'} , %	2,77	
Потери энергии за рабочие сутки в январе, кВт·ч					ΔW _{раб.сут}	4,808	

По результатам сравнения был сделан следующий вывод: в нестационарном тепловом режиме для провода марки SAX-50 расчет по упрощенной формуле (12) для зимнего и летнего графика нагрузки возможен, так как допустимая погрешность не превышает 5 %. Но данный вывод справедлив лишь для системных графиков нагрузки. Поэтому рекомендуется использовать точный метод (2), а упрощенный (12) следует применять только в случае, когда нет достоверных данных по эквивалентной теплоемкости провода, что для самонесущего изолированного провода существенно. Методика (13) по сравнению с точным методом (2) тоже дает небольшую погрешность 2,77 %, поэтому ее рекомендуется применять при нехватке информации для точного метода.

Был разработан алгоритм программы, который позволяет по току нагрузки в рабочие и выходные дни для любого типа воздушных линий рассчитать неустановившиеся тепловые режимы, а соответственно и годовые потери энергии. Получено свидетельство о государственной регистрации программы в ФИПС № 2024687736 от 20.11.2024. Программа не требует установки, то есть является переносной версией, совместимость: с ОС Windows 10 и выше.

Входящий в формулы (1)-(13) ток требует более точного определения с учетом его изменения по длине линии, из-за влияния токов смещения на ток в конце линии, а также температурной зависимости активного сопротивления линии. Анализ влияния этих факторов на потери рассмотрен ниже.

2. Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине

В ходе диссертационного исследования было получено уравнение теплопроводности неизолированного провода для осевой передачи тепла

$$\lambda F \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + I^2(x) r_0 (1 + \alpha \Theta) + \frac{\partial Q_{\text{солн}}}{\partial x} =$$

$$= 2\pi r \alpha_m (\Theta - \Theta_{\text{окр}}) + 2\pi r \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{\text{окр}}^4) + C_n \frac{\partial \Theta}{\partial t}, \quad (14)$$

где λ – коэффициент теплопроводности провода; F и r – сечение и радиус провода; Θ и $\Theta_{\text{окр}}$ – температуры провода и окружающей среды, °С; I – сила электрического тока; r_0 – погонное активное сопротивление провода при 0 °С; α – температурный коэффициент сопротивления; α_m

– коэффициент теплоотдачи; ε_n – степень черноты поверхности провода; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела; T и $T_{окр}$ – абсолютные температуры провода и окружающей среды, C_n – погонная теплоемкость провода (теплоемкость на единицу длины); t – время.

Предложено аналитическое решение уравнения теплопроводности для установившегося режима провода при одинаковом токе на всех участках линии с учетом температурной зависимости активного сопротивления

$$\Theta(x) = C_1 e^{-\frac{L-x}{L_T}} + C_2 e^{-x/L_T} + \Theta_\delta, \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_\delta - (\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_\delta) e^{-L/L_T}}{1 - e^{-2L/L_T}}, \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_\delta - (\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_\delta) e^{-L/L_T}}{1 - e^{-2L/L_T}}. \quad (17)$$

где L_T – тепловой масштаб длины; Θ_δ – температура неограниченно длинного провода; $\Theta_{\varepsilon 1}$ и $\Theta_{\varepsilon 2}$ – граничные условия в форме температур в начале и в конце линии; L – длина линии.

Тепловой масштаб длины – это расстояние, при перемещении на которое вдоль линии к ее середине разность температуры в данной точке и температуры неограниченно длинного провода уменьшается в e раз при условии $L \gg L_T$.

При $L \gg L_T$ формулы (15)-(17) преобразуются приближенному выражению

$$\Theta(x) \approx (\Theta_{\varepsilon 2} - \Theta_\delta) e^{-\frac{L-x}{L_T}} + (\Theta_{\varepsilon 1} - \Theta_\delta) e^{-x/L_T} + \Theta_\delta. \quad (18)$$

Параметр Θ_δ определяется по формуле

$$\Theta_\delta = \frac{I^2 r_0 + 2\pi r a_{mn} \Theta_{окр}}{2\pi r a_{mn} - I^2 r_0 \alpha}, \quad (19)$$

где $a_{mn} = \frac{I_{доп}^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{доп})}{2\pi r (\Theta_{доп} - \Theta_{окр})}$ – коэффициент теплопередачи, полученный в режиме максимально допустимого тока $I_{доп}$, при котором провод нагревается до максимально допустимой температуры $\Theta_{доп}$ (при отсутствии осевой передачи тепла).

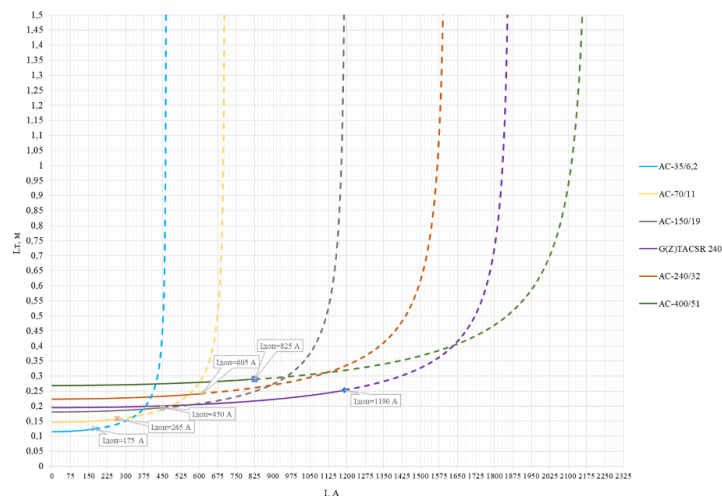


Рисунок 2 – Зависимости теплового масштаба длины от тока нагрузки

Было установлено (рисунок 2), что граничные условия в начале и в конце линии оказывают влияние на ее температуру лишь в пределах нескольких метров. При этом степень этого влияния несколько возрастает с увеличением тока вследствие температурной зависимости тепловыделения, но остается малой вплоть до токов аварийного уровня. Поэтому расчеты теплового режима линии не требуют задания граничных условий с высокой точностью.

В дальнейшем была разработана методика расчета температуры провода методом конечных разностей при изменении тока по длине линии. Она основывается на решении уравнения теплопроводности с применением неявной конечно-разностной схемы. Шаблон четырехточечной неявной конечно-разностной схемы представлен на рисунке 3.

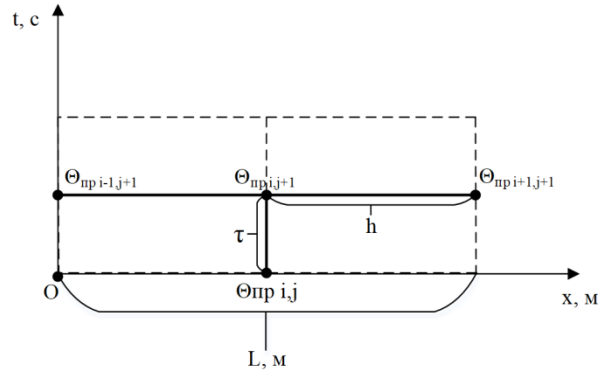


Рисунок 3 – Шаблон четырехточечной неявной конечно-разностной схемы

Здесь i, j – узлы конечно-разностной схемы по координате x и расчетному времени t . Пространственный шаг задан в следующем виде

– по оси Ox

$$h = \frac{L}{N}; \quad (20)$$

– по времени

$$\tau = \frac{t}{J}, \quad (21)$$

где L – длина провода; N – число отрезков при разбиении по координате x ; t – расчетное время; J – число отрезков при разбиении по расчетному времени t .

Активная мощность, как и ток, изменяются по длине линии и определяются следующим образом

$$\frac{\partial P_{nom}}{\partial x} = \frac{I_{i+1}^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{пр i+1,j}) + I_i^2 r_0 (1 + \alpha \Theta_{пр i,j})}{2} \quad (22)$$

Решая уравнение теплопроводности (14) с учетом неявной конечно-разностной схемы, получим формулу для температуры на следующем временном слое

$$\Theta_{пр i,j+1} = \alpha_i \Theta_{пр i+1,j+1} + \beta_i, \quad (23)$$

где $\alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C\alpha_{i-1}}$, $\beta_i = \frac{C\beta_{i-1} - Y_i}{B_i - C\alpha_{i-1}}$ – прогоночные коэффициенты для i -го узла конечно-разностной схемы (КРС).

Члены прогоночных коэффициентов α_i и β_i , входящих в уравнение (23)

$$\begin{cases} A_i = \frac{\lambda F}{h^2} + \frac{I_{i+1}^2 r_0 \alpha}{2}; \\ B_i = \frac{2\lambda F}{h^2} + \frac{c\rho F}{\tau} + 2\pi r a_m - \frac{I_i^2 r_0 \alpha}{2}; \\ C = \frac{\lambda F}{h^2}; \\ Y_i = -\frac{c\rho F}{\tau} \Theta_{np,i,j} - 2\pi r a_m \Theta_{окр} - \frac{I_{i+1}^2 r_0 + I_i^2 r_0}{2}; \end{cases} \quad (24)$$

В начале расчета α_{i-1} и β_{i-1} определяются по следующим граничным условиям: $\alpha_1 = 0$, $\beta_1 = \Theta_{c1}$.

В формулах (23) и (24), α – это температурный коэффициент сопротивления провода, в отличие от коэффициента α_i , который является одним из прогоночных коэффициентов для i -го узла конечно-разностной схемы.

После задания граничных условий и всех преобразований была получена последовательность решений (Приведена в настоящей диссертации).

Наличие у линий емкостной проводимости приводит к тому, что ток в линии непрерывно изменяется по длине. Это приводит к возникновению осевых градиентов температуры не только вблизи границ, но и на всех внутренних участках линии. На рисунке 4а приведены результаты численного решения уравнения теплопроводности (23) методом конечных разностей для линии АС-240/32 напряжением 220 кВ и длиной 75 км при граничных условиях $\Theta_{c1} = \Theta_{c2} = +30$ °С и температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = -20$ °С. Изменение тока задано функцией

$$\dot{I}(x) = \dot{I}_2 \operatorname{ch}(\gamma x) + \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}Z_c} \operatorname{sh}(\gamma x), \quad (25)$$

где \dot{I}_2, \dot{U}_2 – ток и напряжение в конце линии; $\gamma = 0,0001345 + j0,001074$ 1/км – коэффициент распространения электромагнитной волны; $Z_c = 406,78 - j50,935$ Ом – волновое сопротивление.

Нагрузки в конце линии $P = 240$ МВт, $Q = 175$ МВАр. Ток возрастает от 839,6 А в начале линии до 855,6 А в конце.

На этом же рисунке 4а приведена зависимость $\Theta_{d, var}(x)$, а также результаты аналитического решения (15) для среднеквадратичного тока, равного 848,1 А. Среднеквадратичный ток был рассчитан путем интегрирования (25)

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L I^2(x) dx}. \quad (26)$$

Причиной изменения тока по длине линии может быть также подключение промежуточных нагрузок. При большом числе таких подключений для линии может быть использована модель равномерно распределенной нагрузки. На рисунке 4б приведен пример численного решения уравнения теплопроводности для линии СИП-2 3х95+1х95 длиной 200 м и напряжением 380 В при граничных условиях $\Theta_{c1} = \Theta_{c2} = -20$ °С и температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = -20$ °С. За счет присоединения промежуточных электроприемников ток возрастает от 20 А в конце линии до 390 А в начале. Среднеквадратичный ток равен 231,16 А. Поскольку коэффициент теплопроводности изоляции на 2-3 порядка меньше коэффициента теплопроводности алюминия, то при расчете было принято допущение, что изоляция не участвует в передаче тепла вдоль линии.

В таблице 5 представлены результаты расчета максимальной температуры Θ_{max} и потерь активной мощности в линии ΔP для случаев, соответствующих рисункам 4а и 4б.

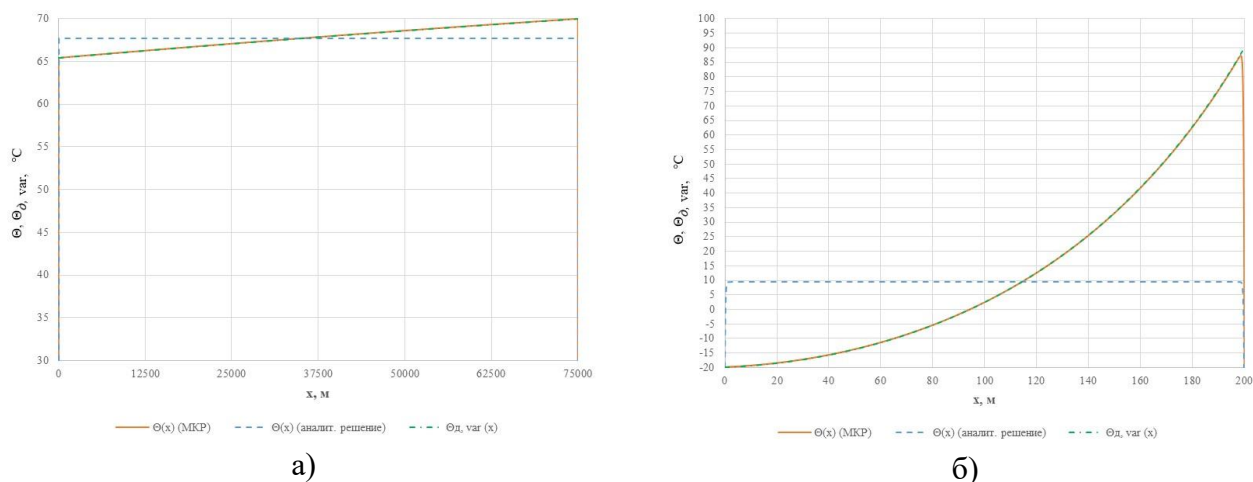


Рисунок 4 – Распределение температуры провода по длине линии:
 а) АС-240/32 б) СИП-2 3x95+1x95

Таблица 5 – Максимальные температуры и потери активной мощности в линиях

Марка провода	Аналитическое решение при среднеквадратичном токе		Метод конечных разностей		По зависимости $\Theta_{\partial, var}(x)$	
	$\Theta_{max}, ^\circ C$	$\Delta P, кВт$	$\Theta_{max}, ^\circ C$	$\Delta P, кВт$	$\Theta_{max}, ^\circ C$	$\Delta P, кВт$
АС-240/32	67,8	22540	70	22540	70	22540
СИП-2 3x95+1x95	9,4	10,03	87,3	11,15	89,8	11,16

Расчеты на основе аналитического решения при среднеквадратичном токе предполагают, что осевые потоки тепла в линии, за исключением ее границ, отсутствуют. Причиной этого является равномерное распределение тепловыделения. Однако тот же результат (без учета границ линии) может быть получен и для реального распределения тепловыделения, но при бесконечно большой теплопроводности.

Из таблицы 5 видно, что для линии АС-240/32 при изменении тока, обусловленном влиянием емкости линии, потери мощности при расчете всеми тремя способами получились одинаковыми. Это объясняется сравнительно небольшим изменением тока по длине. То есть, в данном случае, потери мощности с учетом температурной зависимости активного сопротивления можно рассчитывать через среднеквадратичный ток. Максимальные температуры различаются, но не очень существенно.

В линии с равномерно распределенной нагрузкой при большом изменении тока по длине аналитическое решение, метод конечных разностей и расчет по зависимости $\Theta_{\partial, var}(x)$ дают существенно разные результаты. Особенно большие погрешности (по сравнению с методом конечных разностей) дает аналитическое решение: абсолютная погрешность по максимальной температуре составляет 77,9 °С, а относительная погрешность по потерям равна 10 %. Аналогичные погрешности расчета по зависимости $\Theta_{\partial, var}(x)$ значительно меньше: 2,5 °С и 0,1 %.

В дальнейшем была проведена тепловая оценка повышенных токов с учетом времени для провода АС-240/32 и высокотемпературного провода G(Z)TACSR 240 напряжением 220 кВ, при различных длинах 1 м, 10 м, 100 м, 10 км с граничными условиями $\Theta_0 = \Theta_{\partial 1} = \Theta_{\partial 2} = -20 ^\circ C$ и температуре окружающей среды $\Theta_{окр} = -20 ^\circ C$. Исходные данные для расчета приведены в таблице 6. Здесь повышенный ток был рассчитан исходя из уравнения (19). Результаты приведены на рисунках 5 и 6.

Таблица 6 – Исходные данные для расчета

Наименование и обозначение параметра	AC-240/32	G(Z)TACSR 240
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0 , Ом/км	0,1094	0,1101
Сечение токоведущей части провода F , мм ²	240	248,4
Радиус металлической части провода r , мм	10,8	10,3
Допустимый ток $I_{доп}$, А	605	1190
Ток, при котором $\Theta_d = +\infty$, кА	1,5812	1,872
Допустимая температура $\Theta_{доп}$, °С	70	210

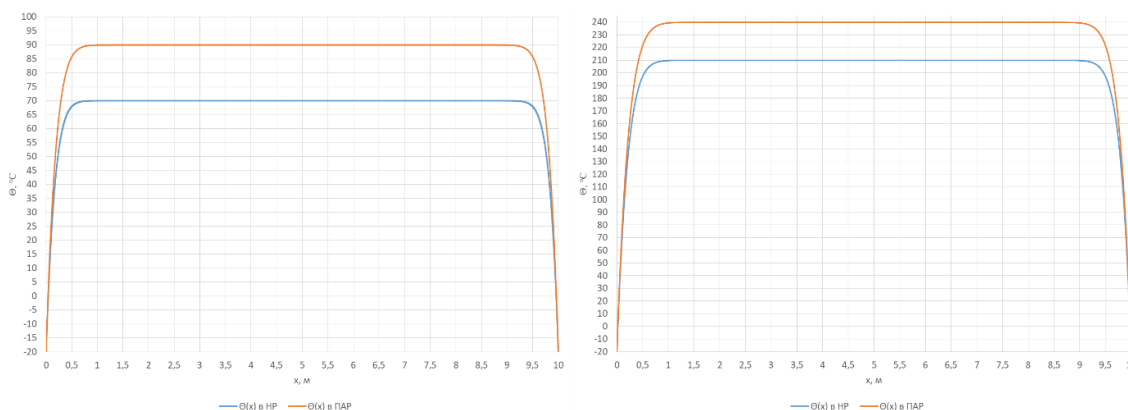


Рисунок 5 – Распределение температуры по длине линии (10 м) в разных режимах для провода:
 а) AC-240/32 для $t = 431$ с (НР), $t = 554$ с (ПАР), $I_{доп}=1198$ А;
 б) G(Z)TACSR 240 для $t = 674$ с (НР), $t = 792$ с (ПАР), $I_{доп}=1592$ А;

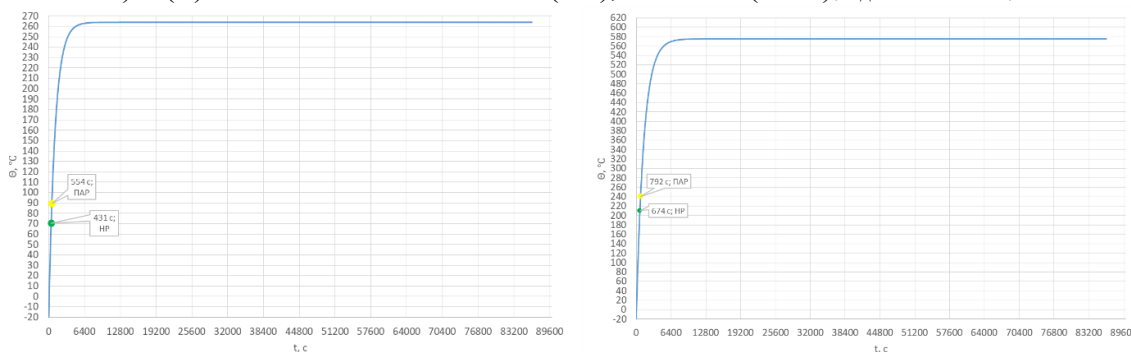


Рисунок 6 – Зависимость $\Theta(t)$ для AC-240/32 (G(Z)TACSR 240) при $I_{доп}=1198$ А (1592 А) и длине линии $L=10$ м, температура взята при $x = 9,6$ м (НР), $x = 9,5$ м (ПАР)

Практическая ценность математической модели заключается в определении режима провода воздушных линий разных сечений с течением времени, а также максимальных температур в различных режимах по среднеквадратичному току, как доказано ранее. Сравнительный анализ потерь активной мощности в стационарном тепловом режиме с учетом и без учета осевой передачи тепла показал небольшие расхождения результатов, где максимальная относительная погрешность составила 4,05 %. Отсюда можно сделать следующий вывод, что учет осевой передачи тепла уточняет потери активной мощности, что позволяет с большей точностью ввести мероприятия по уменьшению этих потерь.

Исследования осевой передачи тепла показали, что потери энергии можно определять по среднеквадратичному по длине току. В свою очередь этот ток равен току в продольной ветви схемы замещения линии. Токи в продольных ветвях схем замещения определяются путем расчета установившегося режима электрической сети (с учетом температуры).

Ниже в качестве примера была рассмотрена кольцевая сеть (рисунок 7), где были определены годовые потери энергии за рабочие и выходные дни на основе расчета

установившегося режима простой замкнутой сети. Исходные данные представлены в таблице 3. В качестве графиков нагрузок воздушных линий были использованы типовые графики нагрузки энергосистемы за рабочие и выходные дни. Рассчитаны они были по методике, предложенной АО «ЭНЕРГОСЕТЬПРОЕКТ». Все остальные исходные данные для определения годовых потерь энергии приведены в Приложении Д настоящей диссертации. Полученные результаты показаны в таблице 4.

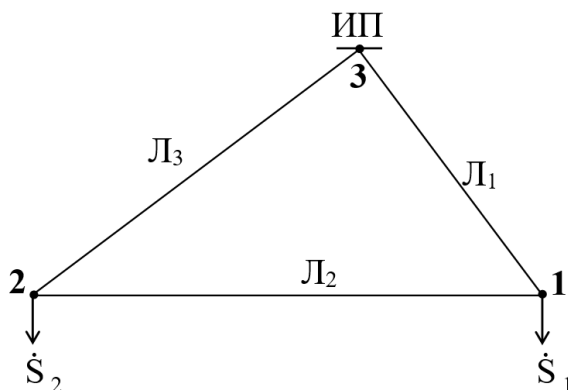


Рисунок 7 – Кольцевая питающая сеть с 3 линиями

Таблица 3 – Исходные данные для расчета тока в линиях

Параметры	Л ₁	Л ₂	Л ₃
Длина линии, км	30	50	40
Коэффициент угла атаки ветра, k_v , о.е.	0,705	0,75	0,795
Марка провода	АС-150/24		
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0 , Ом/км	0,188		
Погонное реактивное сопротивление x_0 , Ом/км	0,415		
Погонная емкостная проводимость линии b_0 , См/км	$2,74 \cdot 10^{-6}$		
Диаметр провода $d_{пр}$, м	0,015		
Температурный коэффициент сопротивления провода α , °С ⁻¹	0,0043		
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s , о.е.	0,6		
Коэффициент черноты поверхности провода, $\epsilon_{п}$, о.е.	0,6		
Постоянная излучения абсолютно черного тела C_0 , Вт/(м ² ·К ⁴)	$5,67 \cdot 10^{-8}$		
Средний угол между осью провода и направлением солнечных лучей Φ , °	45		
Среднее значение прямой солнечной радиации $q_{s,пр}$, Вт/м ²	138		
Рассеянная солнечная радиация $q_{s,расс}$, Вт/м ²	74		
Среднесуточное атмосферное давление $P_{атм}$, Па	101000		
Среднесуточная скорость ветра V , м/с	3		
Среднесуточная температура окружающей среды $\Theta_{окр}$, °С	-19,7		

Допустимая температура $\Theta_{\text{доп}}$, °C	90
Коэффициент затененности, $k_{\text{зт}}$	0,7
Активные мощности первого и второго потребителя P_1/P_2 , МВт	120/80
Коэффициент мощности потребителей, $\cos(\varphi)$, о.е.	0,894

Таблица 4 – Годовые потери электроэнергии в линиях с учетом температурной зависимости активного сопротивления

Воздушная линия	Годовые потери $\Delta W_{\text{год}}$, млн кВт·ч
Л ₁ , I = 619 А	29,43
Л ₂ , I = 34 А	0,13
Л ₃ , I = 44 А	0,18
Сумма	29,74

3. Методика расчета температуры провода в месте контактного соединения и при дефектах линий электропередач

В дальнейшем был проведен расчет распределения температуры по длине провода в задачах исследования пропускной способности линий электропередачи вблизи контактных соединений.

Пусть n линий большой длины соединяются в точке А (рисунок 8). Под большой длиной линии здесь понимается линия, с длиной, которая намного больше теплового масштаба длины L_T .

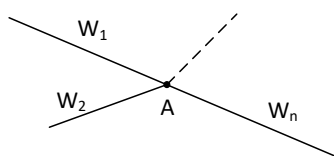


Рисунок 8 – Контактное соединение участков линий неограниченной длины

Применили формулу (18) для рисунка 8, отсчитывая координату от точки А и заменив Θ_{c1} на температуру Θ_A в точке контакта получили

$$\Theta_i(x_i) = (\Theta_A - \Theta_{oi}) e^{-x/L_{Ti}} + \Theta_{oi}. \quad (27)$$

Первое слагаемое из формулы (18) здесь не учитывалось, так как в дальнейшем формула (27) будет использоваться только вблизи контакта при малых значениях x .

По закону Фурье тепловой поток в линии вблизи точки А (при $x_i = 0$), направленный от этой точки в линию

$$Q_i = -\lambda_i F_i \frac{\partial \Theta_i}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\lambda_i F_i}{L_{Ti}} (\Theta_A - \Theta_{oi}) = \beta_i (\Theta_A - \Theta_{oi}). \quad (28)$$

где β_i – параметр осевой теплопередачи.

По физическому смыслу параметр β представляет собой количество теплоты, передаваемой в линию из точки контакта в единицу времени при единичной разности температуры точки контакта и температуры линии на большом удалении от контакта.

Сумма потоков тепла, исходящих из точки контакта, равна тепловыделению в этой точке

$$\sum_{i=1}^n \beta_i (\Theta_A - \Theta_{oi}) = \Delta P_{\text{конт}} = I^2 R_{\text{конт}}, \quad (29)$$

Решая уравнение (29) относительно Θ_A , получаем следующую формулу для температуры контактного соединения линий (рисунок 8)

$$\Theta_A = \frac{I^2 R_{\text{конт}} + \sum_{i=1}^n \beta_i \Theta_{di}}{\sum_{i=1}^n \beta_i}. \quad (30)$$

где $R_{\text{конт}}$ – сопротивление контакта, которое в данном случае считается сосредоточенным в точке А.

В дальнейшем было рассмотрено контактное соединение внутри одной линии, где формула для превышения температуры контакта над температурой провода вдали от контактного соединения при плотности тока j

$$\Delta\Theta_A = j^2 k \rho \frac{L_T L F_{\text{эл}}}{2 \lambda F}. \quad (31)$$

Проведена оценка величины $\Delta\Theta_A$ при допустимом превышении сопротивления участка линии с контактным соединением над сопротивлением такого же участка без контактного соединения, которое составляет 20% ($k = 0,2$). Приняли длину этого участка $L = 0,5$ м. Предположили, что по линии протекает максимально допустимый по нагреву ток. Тогда плотность тока может составлять около 3 А/мм^2 (в зависимости от типа и сечения линии, а также от условий охлаждения эта величина может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону). Для теплового масштаба длины примем типовое значение $L_T = 0,2$ м. Рассмотрим провод с алюминиевой токоведущей частью ($\rho = 28 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $\lambda = 237 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$), принимая для простоты $F_{\text{эл}} = F$. Тогда по формуле (31) получается следующий результат $\Delta\Theta_A = 10,6^\circ\text{С}$.

Полученное превышение температуры является существенным. Поэтому контактные сопротивления, даже находясь в допустимых пределах, могут заметно ограничивать пропускную способность линии.

Рассмотрен случай для линии с двумя малыми 1-2, 2-3 и двумя участками большой длины 0-1, 3-4, позволяющий учесть распределенные дефекты и размеры зажимов (рисунок 9).

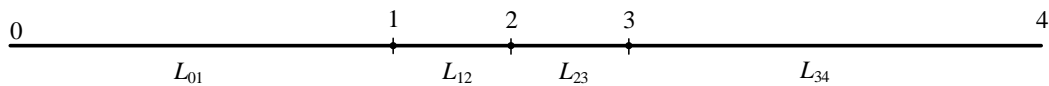


Рисунок 9 – Контактное соединение линии с двумя малыми и двумя участками большой длины

Балансовые выражения осевых потоков тепла для схемы на рисунке 9 имеют вид

$$\begin{cases} Q_{10} + Q_{12} = \Delta P_{\text{конт},1}, \\ Q_{21} + Q_{23} = \Delta P_{\text{конт},2}, \\ Q_{32} + Q_{34} = \Delta P_{\text{конт},3}, \end{cases} \quad (32)$$

где Q_{ij} – тепловой поток на участке i, j вблизи точки i , направленный внутрь участка; $\Delta P_{\text{конт},i}$ – потери мощности в точке контакта i .

Выполнив дифференцирование и подставив результат в (32), получим систему линейных уравнений относительно температур $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ в точках 1, 2, 3. Эта система имеет следующее решение

$$\Theta_2 = \frac{a_1 \Delta P_{\text{конт},1} + \Delta P_{\text{конт},2} + a_3 \Delta P_{\text{конт},3}}{\beta_{\text{экв}}} + \frac{a'_1 \beta_{12} \Theta_{\delta,01} + a''_1 \beta_{12} \Theta_{\delta,12} + a'_3 \beta_{23} \Theta_{\delta,34} + a''_3 \beta_{23} \Theta_{\delta,23}}{\beta_{\text{экв}}}, \quad (33)$$

$$\Theta_1 = a_1 \Theta_2 + a'_0 \Theta_{\delta,01} + a'_2 \Theta_{\delta,12} + a_0 \frac{\Delta P_{\text{конт},1}}{\beta_{01} + \beta_{12}}, \quad (34)$$

$$\Theta_3 = a_3 \Theta_2 + a'_4 \Theta_{\delta,34} + a''_2 \Theta_{\delta,23} + a_4 \frac{\Delta P_{\text{конт},3}}{\beta_{23} + \beta_{34}}. \quad (35)$$

Здесь β_{ij} – параметры осевой теплопередачи соответствующих участков; $\beta_{\text{экв}}$ – некоторый эквивалентный параметр осевой теплопередачи, равный

$$\beta_{\text{экв}} = \beta_{12} \frac{1 - \delta_{02} e^{-2L_{12}/L_{T,12}}}{1 + \delta_{02} e^{-2L_{12}/L_{T,12}}} + \beta_{23} \frac{1 - \delta_{24} e^{-2L_{23}/L_{T,23}}}{1 + \delta_{24} e^{-2L_{23}/L_{T,23}}}, \quad (36)$$

где $\delta_{02} = \frac{\beta_{12} - \beta_{01}}{\beta_{12} + \beta_{01}}$, $\delta_{24} = \frac{\beta_{23} - \beta_{34}}{\beta_{23} + \beta_{34}}$ – коэффициенты, характеризующие неоднородность участков соответственно 0-1-2 и 2-3-4.

Остальные коэффициенты, входящие в формулы (33)-(35), приведены в настоящей диссертации.

На основе вышесказанного, провели сравнение результатов расчета с экспериментальными данными¹. В научной статье¹ опубликованы результаты физического эксперимента и численного расчета распределения температуры в четырех последовательных участках поврежденной воздушной линии, выполненной проводом марки ACSR-330/30. На участке ОА расположен медный зажим. По условиям эксперимента и расчетов температура окружающей среды $\Theta_{\text{окр}} = 23,9$ °С, коэффициент теплоотдачи $\alpha_m = 12,22$ Вт/(м²·°С), степени черноты провода и зажима $\varepsilon_n = 0,8$ и $\varepsilon_3 = 0,3$, сила электрического тока $I = 165$ А. Коэффициенты теплопроводности для алюминия и меди приняты равными соответственно 237 и 401 Вт/(м·°С). В расчетах, результаты которых приведены ниже, учтена температурная зависимость активных сопротивлений провода и зажима.

Поскольку модель на рисунке 9 предполагает наличие только двух коротких участков, то она может быть применена для рассматриваемого случая лишь приближенно. Самым простым вариантом адаптации предложенной модели к условиям эксперимента является замена коротких участков ОА и СД на длинные. Однако такая замена не вполне обоснована, поскольку участок ОА принципиально содержит контактное сопротивление, которое не может быть распределено на длину больше зажима. Поэтому ниже в качестве коротких участков приняты участки ОА и АВ. Таким образом, точке 1 на рисунке 9 соответствует точка О, точке 2 соответствует точка А, а точке 3 – точка В. Результаты сравнения представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение расчетных температур с данными эксперимента¹

	$\Theta_1, \text{°C}$	$\Theta_2, \text{°C}$	$\Theta_3, \text{°C}$	$\Theta_{\text{max}}, \text{°C}$
Расчет	92	102,4	146,8	168,6
Данные эксперимента ¹	93	115-120	150-155	170

1 Jin, Y. Analysis of overhead transmission lines fusing failure due to poor contact between conductors and clamps / Y. Jin, M. Quan, Sh. Yan, Yu. Yan, M. Cui, Y. Liu. – DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104858 // Engineering Failure Analysis. – 2020. – no. 118. – P. 104858.

Из таблицы 7 видно, что полученное значение максимальной температуры хорошо соответствует экспериментальным данным, погрешность составила 0,82 %. При этом максимум наблюдается практически в той же точке, что и в эксперименте (0,343 м).

Распределение температуры по длине также в целом соответствует данным эксперимента, однако расчетные температуры в промежуточных точках получились существенно заниженными (экспериментальные температуры в точках 2 и 3 приведены в виде интервалов, поскольку на исходной термограмме¹ в этих точках кривая имеет большой наклон, что с учетом толщины линии не дает возможности определить температуры с большей точностью).

Наибольшее различие температур наблюдается в точке 2, погрешность здесь составила 14,6 %. Вероятно, оно связано с тем, что контактное сопротивление концентрируется к этой точке сильнее, чем это принято в допущении 2 (на участке 12 половина сопротивления R_{0A} сосредоточена в точке 1, а половина распределена по длине). Расхождение температуры в точке 3 объяснить труднее, поскольку все контактное сопротивление согласно допущению 5 (избыточная часть сопротивления R_{BC} считается сосредоточенной в точке 3) уже сконцентрировано в этой точке. По-видимому, здесь сказываются локальные геометрические особенности поврежденных повивов, влияющие на радиальную передачу тепла.

Анализ результатов позволяет сделать следующий общий вывод: чем сильнее выражен распределенный дефект линии, тем меньшее влияние на температуру оказывают соседние участки. Однако для сосредоточенного дефекта такой вывод уже не будет справедливым.

С практической точки зрения важным является не только само максимальное значение температуры при наличии дефектов, но и положение точки максимума. Как показано выше, предложенная модель позволяет определить это положение также с высокой точностью.

Описана методика расчета температуры провода в месте контактного соединения на основе расчета установившегося режима простой замкнутой сети. По приведенной выше модели (рисунок 8), для расчета температуры провода в месте контактного соединения линии, была проведена оценка пропускной способности с учетом осевой передачи тепла вышеизложенной сети (рисунок 7), в один из апрельских дней 2024 года для города Омска. Допустимый ток равен среднеквадратичному току и определялся здесь таким образом, чтобы температура за каждый час в месте контактного соединения линии не превышала допустимую.

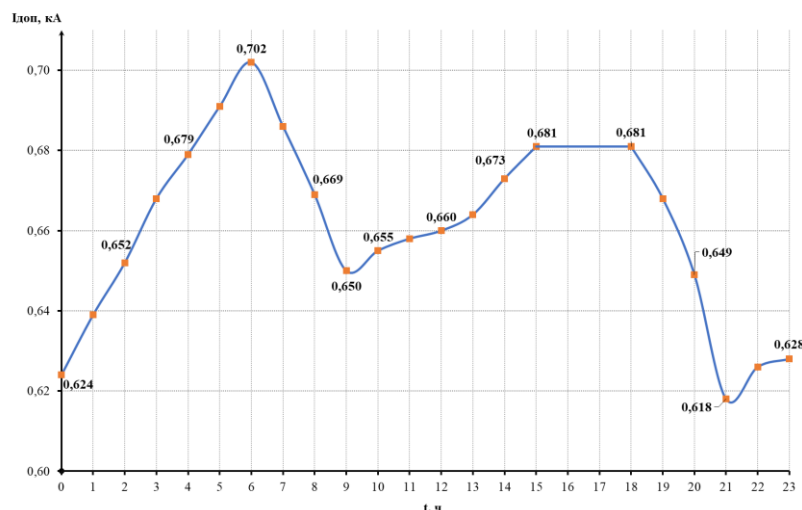


Рисунок 10 – График суточной пропускной способности линии Л₁ в нормальном режиме ($I_{доп} = f(t)$)

По рисунку 10 можно сказать, что переходное контактное соединение существенно ограничивает пропускную способность линии даже при допустимой температуре провода. Это делает актуальными задачи расчета температуры контактных соединений линий электропередачи и уточнения допустимых токов с учетом влияния переходных сопротивлений контактов.

Заключение

В соответствии с научными задачами в диссертационной работе были получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ современного состояния проблемы повышения пропускной способности воздушных линий и снижения потерь электроэнергии с учетом тепловых процессов в электрических сетях.

2. Разработана методика расчета годовых потерь энергии при ее передаче по воздушным линиям на основе графиков нагрузки с учетом тепловых процессов. На основе представленной методики был разработан алгоритм программы, который позволяет по току нагрузки в рабочие и выходные дни для любого типа воздушных линий рассчитать неустановившиеся тепловые режимы, а соответственно и годовые потери энергии. В дальнейшем было получено свидетельство о государственной регистрации программы в ФИПС № 2024687736 от 20.11.2024.

3. Разработана математическая модель температурного режима провода воздушной линии с учетом осевой передачи тепла.

3.1. Предложено аналитическое решение уравнения теплопроводности для установившегося режима провода при одинаковом токе на всех участках линии с учетом температурной зависимости активного сопротивления.

3.2. Установлено, что граничные условия в начале и в конце линии оказывают влияние на ее температуру лишь в пределах нескольких метров. При этом степень этого влияния несколько возрастает с увеличением тока вследствие температурной зависимости тепловыделения, но остается малой вплоть до токов аварийного уровня. Поэтому расчеты теплового режима линии не требуют задания граничных условий с высокой точностью.

3.3. Показана методика и алгоритмы расчета температуры провода методом конечных разностей при изменении тока по длине линии. Данная методика основывается на решении уравнения теплопроводности методом конечных разностей с применением неявной конечно-разностной схемы. Показана достоверность полученных результатов при сравнении аналитического метода с методом конечных разностей.

3.4. Показано, что в линии с равномерно распределенной нагрузкой при большом изменении тока по длине аналитическое решение, метод конечных разностей и расчет по зависимости $\Theta_{0, \text{var}}(x)$ дают существенно разные результаты. Так, абсолютная погрешность аналитического решения (по сравнению с методом конечных разностей) по максимальной температуре составляет 77,9 °С, а относительная погрешность по потерям равна 10 %, аналогичные погрешности расчета температуры неограниченно длинного провода как функции длины составляют 2,5 °С и 0,1 %. Следовательно, несмотря на высокую теплопроводность металла, модель с нулевой теплопроводностью по оси провода дает более точные результаты, чем модель с бесконечно большой теплопроводностью. Полученные результаты позволяют уточнить суммарные потери активной мощности, а также оценить пропускную способность линии по максимально допустимой температуре.

3.5. Рассмотрено распределение температуры с повышенными токами в нестационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи. Проведен сравнительный анализ потерь активной мощности в стационарном тепловом режиме с учетом и без учета осевой передачи тепла. Сравнение показало, что учет осевой передачи тепла уточняет потери активной мощности, что позволяет с большей точностью ввести мероприятия по уменьшению этих потерь.

3.6. Было проведено моделирование и получено распределение температуры по длине провода в задачах исследования пропускной способности линий электропередачи вблизи контактных соединений. Приведенные аналитические формулы позволяют оценить пропускную способность линий с учетом контактных сопротивлений при уменьшенном количестве исходных данных по сравнению с численными трехмерными моделями. Расчеты, выполненные для простого контактного соединения без дефектов, показали, что даже нормально допустимое контактное сопротивление может существенно ограничивать пропускную способность линий, повышая температуру провода примерно на 10 °С.

3.7. Расчеты, выполненные для более сложного случая при наличии неоднородностей и распределенных дефектов, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными. При этом наиболее точно определена именно максимальная температура. Необходимо заметить, что указанный максимум температуры определяется не столько осевыми, сколько радиальными потоками тепла в проводе. Это связано с тем, что в данном случае максимальный нагрев наблюдается в области распределенного дефекта, который, уменьшая эффективное сечение провода, по сути, блокирует осевую теплопередачу. В остальных же случаях, особенно при сравнении максимальной температуры с данными, относительная погрешность составила 0,82 %, то есть представленное аналитическое решение обладает высокой точностью. С практической точки зрения, важным является не только само максимальное значение температуры при наличии дефектов, но и положение точки максимума (0,343 м). Как показано выше, предложенная модель позволяет определить это положение также с высокой точностью.

Описана методика расчета температуры провода в месте контактного соединения на основе расчета установившегося режима простой замкнутой сети. Получено распределение тока в воздушной линии за летние сутки 2024 года. Из полученных результатов видно, что переходное контактное соединение существенно ограничивает пропускную способность линии даже при допустимой температуре провода. Это делает актуальными задачи расчета температуры контактных соединений линий электропередачи и уточнения допустимых токов с учетом влияния переходных сопротивлений контактов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и приравненных к ним:

1. **Троценко, В. М.** Исследование влияния окружающей среды на пропускную способность воздушных линий электропередачи / В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. А. Деев, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов, М. Ю. Николаев. – DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-82-88 // Омский научный вестник. – 2025. – № 2(194). – С. 82–88.

2. **Троценко, В. М.** Анализ потерь в защищенных и неизолированных проводах в стационарных режимах с учетом погодных условий / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, К. В. Хацевский, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко. – DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109 // Омский научный вестник. – 2024. – № 3(191). – С. 99–109.

3. **Троценко, В. М.** Моделирование и расчет распределения температуры по длине провода в задачах исследования пропускной способности линий электропередачи вблизи контактных соединений / В. М. Троценко, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. Н. Горюнов, Д. Г. Сафонов. – DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-117-124 // Омский научный вестник. – 2024. – № 3(191). – С. 117–124.

4. **Троценко, В. М.** Повышение пропускной способности электрических сетей на основе интеграции метеорологических данных / М. Я. Клецель, Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко. – DOI: 10.25206/1813-8225-2024-192-67-75 // Омский научный вестник. – 2024. – № 4 (192). – С. 67–75.

5. **Троценко, В. М.** Потери электрической энергии в электрических сетях / Г. Ю. Киселёв, В. М. Троценко, Е. В. Петрова, В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, В. Н. Горюнов. – DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85 // Омский научный вестник. – 2023. – № 1(185). – С. 80–85.

6. **Троценко, В. М.** Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов, В. М. Троценко. – DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92 // Омский научный вестник. – 2023. – № 4(188). – С. 84–92.

7. **Троценко, В. М.** Анализ температуры и сравнение потерь активной мощности в нестационарном и стационарном тепловом режиме воздушных линий электропередачи / В. М.

Троценко. – DOI: 10.25206/1813- 8225-2023-188-93-99 // Омский научный вестник. – 2023. – № 4(188). – С. 93–99.

8. **Троценко, В. М.** Математическая модель теплового режима воздушной линии электропередачи с учетом изменения температуры по длине / В. М. Троценко, С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, О. А. Сидоров, Е. В. Румянцева, Е. П. Жиленко, В. Н. Горюнов. – DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-519-531 // iPolytech Journal. – 2022. – 26(3). – С. 519-531.

9. **Троценко, В. М.** Упрощенная формула для нагрузочных потерь активной мощности в линиях электропередачи с учетом температуры / С. С. Гиршин, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов, О. В. Кропотин, А. О. Шепелев, В. А. Ткаченко. – DOI: 10.25206/1813-8225- 2018-162-41-49 // Омский научный вестник. – 2018. – № 6(162). – С. 41–49.

Публикации в материалах конференций, входящих в библиографическую базу Scopus:

10. **Trotsenko, V. M.** Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature / S. S. Girshin, O. V. Kropotin, V. M. Trotsenko, A. O. Shepelev, E. V. Petrova, V. N. Goryunov. – DOI: 10.15199/48.2019.07.10 // Przegląd Elektrotechniczny. – 2019. – Vol. 95, no. 7. – P. 42–46.

11. **Trotsenko, V. M.** Effect of solar radiation on power losses and capacity of insulated and non-insulated wires of overhead power LINES / S. S. Girshin, I. A. Sorokin, A. N. Smerdin, A. AY. Bigun, E. V. Petrova, V. M. Trotsenko, V. N. Goryunov, G. S. Smorodin. – DOI: 10.15199/48.2020.06.11// Przegląd Elektrotechniczny. – 2020. – Vol. 96, no. 6. – P. 59–63.

12. **Trotsenko, V. M.** Loss of energy in electrical networks with capacitor banks under optimal reactive power control / S.S. Girshin, A.AY. Bigun, N.A. Mel'nikov, E.V. Petrova, V.M. Trotsenko, D.S. Osipov, V.N. Goryunov. – DOI: 10.15199/48.2021.09.23 // Przegląd Elektrotechniczny. – 2021. – Vol. 97, no. 9. – P. 110–114.

13. **Trotsenko, V. M.** Optimal selection of static capacitors battery and compensation factor depending on the network resistance / S.S. Girshin, O.V. Kropotin, M.O. Anisimov, A.AY. Bigun, E.V. Petrova, V.M. Trotsenko, V.N. Goryunov. – DOI: 10.15199/48.2022.06.20 / Przegląd Elektrotechniczny. – 2022. – Vol. 98, no. 6. – P. 104–108.

Другие работы автора:

14. **Троценко, В. М.** Алгоритм расчета длительно допустимых токов в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом температуры проводников / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, Е. Е. Муравьева, В. М. Троценко, В. Н. Горюнов // Актуальные вопросы энергетики : материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (Омск, 25-26 мая 2023 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – С. 60–66.

15. **Троценко, В. М.** Оценка влияния ветра на нагрев изолированного провода воздушных линий электропередачи / А. Я. Бигун, С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, А. О. Шепелев, В. А. Ткаченко, В. М. Троценко // Динамика систем, механизмов и машин : материалы XIV IEEE Международной научно-технической конференции (Омск, 10-12 нояб. 2020 г.) / Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – Т. 8. – № 3. – С. 23–30.

Свидетельства об официальной регистрации программы для ЭВМ:

16. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024687736 Российская Федерация. Расчет годовых потерь энергии при ее передаче по воздушным линиям на основе графиков нагрузки с учетом тепловых процессов : № 2024686335 : заявл. 06.11.2024 : опубл. (зарег.) : 20.11.2024 / **В. М. Троценко**, С. С. Гиршин, В. А. Криволапов, Е. В. Петрова, В. А. Деев ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

17. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024660800 Российская Федерация. Расчет температуры, потерь мощности, максимально допустимых токов для задач прогнозирования пропускной способности линий электропередачи с традиционными и защищенными проводами : № 2024619562 : заявл. 03.05.2024 : опубл. (зарег.) : 13.05.2024 / В. А. Криволапов, Е. В. Петрова, **В. М. Троценко**, В. А. Деев, Д. В. Федорчук ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019618752 Российская Федерация. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях вынужденной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил : № 2019617518 : заявл. 26.06.2019 : опубл. (зарег.) : 04.07.2019 / С. С. Гиршин, В. А. Ткаченко, Е. В. Петрова, **В. М. Троценко**, Г. С. Смородин ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

19. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019619358 Российская Федерация. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях естественной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил : № 2019617827 : заявл. 27.06.2019 : опубл. (зарег.) : 16.07.2019 / С. С. Гиршин, Е. В. Петрова, В. А. Ткаченко, **В. М. Троценко**, Г. С. Смородин ; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

20. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019667361 Российская Федерация. Аналитический расчет суточного изменения температуры изолированного провода, потерь мощности и энергии с учётом суточного изменения нагрузочного тока и температуры окружающей среды : № 2019666452 : заявл. 13.12.2019 : опубл. (зарег.) : 23.12.2019 / **В. М. Троценко**, Е. Ю. Шепелева, Г. С. Смородин, А. Я. Бигун, В. А. Ткаченко, С. С. Гиршин; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

21. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019667504 Российская Федерация. Аналитический расчет нагрева провода, потерь мощности и энергии марки АС с учётом конструктивных особенностей : № 2019666443: заявл. 13.12.2019 : опубл. (зарег.) : 24.12.2019 / **В. М. Троценко**, Е. Ю. Шепелева, Г. С. Смородин, А. Я. Бигун, В. А. Ткаченко, С. С. Гиршин; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

22. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019667635 Российская Федерация. Аналитический расчет нагрева изолированного провода (СИП, SAХ), потерь мощности и энергии : № 2019666459 : заявл. 13.12.2019 : опубл. (зарег.) : 26.12.2019 / **В. М. Троценко**, Е. Ю. Шепелева, Г. С. Смородин, А. Я. Бигун, П. П. Трубин, С. С. Гиршин; заявитель Ом. гос. техн. ун-т. – 1 с.

Монографии и учебные пособия:

23. Гиршин С. С. Увеличение пропускной способности воздушных линий электропередачи на основе учета метеофакторов: учебное пособие / С. С. Гиршин, В. А. Деев, Е. В. Петрова, М. Ю. Николаев, **В. М. Троценко**, В. А. Криволапов, В. Н. Горюнов. Омск: ОмГТУ, 2025. – 109 с.