

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

Омский государственный технический университет, г. Омск

Вследствие растущего спроса на электроэнергию и износа существующей инфраструктуры, воздушные линии электропередачи во многих случаях вынужденно работают на пределе своих тепловых возможностей. Это стимулирует инженеров все чаще обращать внимание на учет погодных факторов, влияющих на температуру проводников, используя соответствующие математические модели. Тем самым обеспечивается возможность оперативно реагировать на изменения в тепловом режиме проводников.

В данной статье на основе уравнений теплового баланса произведен вывод аналитических выражений для расчета температуры изолированных и неизолированных проводов воздушных линий электропередачи. Представленная математическая модель подтверждена сравнением с методом конечных элементов, реализованным в программном комплексе Ansys. Исследование также включало в себя комплексное изучение того, как температура окружающей среды, скорость ветра и атмосферное давление влияют на тепловое состояние проводника.

Ключевые слова: активное сопротивление, потери мощности, линия электропередачи, метеорологические факторы, температурный режим, изоляция, метод конечных элементов, пропускная способность.

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



© Криволапов В. А., Гиршин С. С., Петрова Е. В.,
Деев В. А., Троценко В. М., Горюнов В. Н., Николаев М. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

INVESTIGATION OF THE ENVIRONMENTAL IMPACT ON THE CAPACITY OF OVERHEAD POWER LINES

V. A. Krivolapov, S. S. Girshin, E. V. Petrova,
V. A. Deev, V. M. Trotsenko, V. N. Goryunov, M. Yu. Nikolayev

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

Due to the growing demand for electricity and the deterioration of existing infrastructure, overhead power lines in many cases are forced to operate at the limit of their thermal capabilities. This encourages engineers to increasingly pay attention to the consideration of weather factors affecting the temperature of conductors, using appropriate mathematical models. This makes it possible to quickly respond to changes in the thermal regime of the conductors.

In this article, based on the equations of thermal balance, analytical expressions are derived for calculating the temperature of insulated and non-insulated wires of overhead power lines. The presented mathematical model is confirmed by comparison with the finite element method implemented in the Ansys software package. The study also included a comprehensive study of how ambient temperature, wind speed and atmospheric pressure affect the thermal state of the conductor.

Keywords: active resistance, power losses, power transmission line, meteorological factors, temperature regime, insulation, finite element method, throughput capacity.

For citation: Krivolapov V. A., Girshin S. S., Petrova E. V., Deev V. A., Trotsenko V. M., Goryunov V. N., Nikolayev M. Yu. Investigation of the environmental impact on the capacity of overhead power lines. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 82–88. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-82-88. EDN: LQPNMNN.



© Krivolapov V. A., Girshin S. S., Petrova E. V., Deev V. A., Trotsenko V. M., Goryunov V. N., Nikolayev M. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Несмотря на то, что в мире до сих проживает приблизительно 750 млн человек без доступа к электричеству [1], мировой спрос на электроэнергию неуклонно растет, что обусловлено такими факторами, как рост численности населения и благосостояния граждан, а также более активное применение различного электрооборудования в повседневной жизни [2].

Согласно долгосрочному прогнозу [3], к 2042 г. потребление электроэнергии в энергосистемах Российской Федерации достигнет 1449,72 млрд кВт·ч, а пиковое потребление электроэнергии возрастет до 208,24 млн кВт·ч. Этот рост позволяет электроэнергетической отрасли расширить свою роль в качестве значимого поставщика энергетических услуг во всех секторах экономики, особенно в секторах строительства и транспорта [4].

В то же время этот рост окажет серьезное влияние на существующую инфраструктуру электрических сетей, особенно учитывая высокий процент износа имеющегося оборудования в России [5]. Если данная проблема не будет решена своевременно, она может стать серьезным препятствием для экономического роста Российской Федерации.

В Распоряжении Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [6] для решения этой задачи указывается на необходимость сокращения потерь электроэнергии в электросетях до 7,3 % и обновления инфраструктуры электросетей.

Математическая модель

Повышение токовых нагрузок на воздушные линии электропередачи неизбежно приводит к повышению температуры проводников, тем самым накладывая ограничения на пропускную способность линий. Для обеспечения надежной работы и безопасной эксплуатации проводов в различных условиях производители устанавливают конкретные рекомендации относительно верхних пределов рабочей температуры. Чтобы достичь максимально возможной пропускной способности, оставаясь в пределах допустимых температур провода, необходимо учитывать множество факторов. Сюда входят не только присущие самому проводнику свойства, такие как составляющие его материалы, площадь поперечного сечения и электрическое сопротивление, но и скорость ветра, атмосферное давление, солнечная радиация и температура окружающей среды. Старение проводников, расширение металлов под воздействием тепла, быстрые колебания погодных условий и множество других влияющих факторов значительно усложняют математические модели, используемые для прогнозирования и анализа пропускной способности линий. В результате эти сложности вносят уровень неопределенности, который снижает точность моделей.

Для оценки максимальных токовых нагрузок используются следующие математические модели: IEEE 738 [7], CIGRE 601 [8] и стандарт ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.55.143-2013 [9].

Определение предельной пропускной способности может быть реализовано либо путем расчета длительно допустимого тока, либо непосредственно определением температуры проводника и контролем этого значения ниже допустимого [10].

На территории Российской Федерации широкое распространение в сетях до 35 кВ получили провода с изолирующим слоем [11]. Но перечисленные выше методы предназначены только для расчетов неизолированных проводников. Следовательно, это ограничение подчеркивает необходимость дополнительных исследований для создания соответствующих методов, адаптированных к уникальным требованиям изолированных проводов.

Перечисленные выше стандарты поддерживают концепцию теплового баланса, которая предполагает, что тепло, поглощаемое проводником, компенсируется теплом, рассеянным в процессе охлаждения.

Численно тепловой баланс выражается следующей формулой:

$$P_s + P_j = P_c + P_r \quad (1)$$

где P_s — интенсивность солнечной радиации, Вт/м; P_j — нагрузочные потери мощности, Вт/м; P_c — мощность, отдаваемая путем конвективного теплопередачи, Вт/м; P_r — мощность, отдаваемая путем излучения, Вт/м.

Конвективные потери тепла проводника зависят от разницы температур между проводником и окружающей средой, а также от скорости и направления ветра. При скорости ветра свыше 0,2–0,6 м/с конвекцию следует принимать вынужденной.

Составляющие теплового баланса можно расписать согласно [8] и [12]:

$$P_s + d_{np} \cdot A_s \cdot q_{\text{солн}} \quad (2)$$

$$P_j = \frac{\Delta P_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot T_{\text{внеш}} - 273,15 \cdot \alpha_0]}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{u_3}}, \quad (3)$$

$$P_c = d_{np} \cdot \alpha_{\text{вын}} \cdot \pi \cdot [T_{\text{внеш}} - T_{\text{окр}}], \quad (4)$$

$$P_r = d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot [T_{\text{внеш}}^4 - T_{\text{окр}}^4], \quad (5)$$

где d_{np} — диаметр провода, м; A_s — поглощающая способность провода для солнечного излучения; $q_{\text{солн}}$ — плотность потока солнечной радиации на провод, Вт/м²; ΔP_0 — потери активной мощности, рассчитанные по сопротивлению, приведенному к 0 °C, Вт/м; α_0 — температурный коэффициент электрического сопротивления при 0 °C, 1/°C; $T_{\text{внеш}}$ — абсолютная температура внешней поверхности провода, °C.

ности провода, К; S_{uz} — тепловое сопротивление изоляции, м·К/Вт; $\alpha_{вын}$ — коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции, Вт/(м²·К); $T_{окр}$ — абсолютная температура окружающей среды, К; ε — коэффициент излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴).

Путем подстановки уравнений 2–5 в уравнение теплового баланса получим:

$$\frac{\Delta P_0 \cdot [1 + \alpha_0 \cdot T_{внеш} - 273,15 \cdot \alpha_0]}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}} + d_{np} \cdot A_s \cdot q_{сомн} = d_{np} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi \cdot [T_{внеш} - T_{окр}] + d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0 \cdot [T_{внеш}^4 - T_{окр}^4]. \quad (6)$$

Разделим обе части уравнения на $d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0$:

$$\frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} + \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0 \cdot T_{внеш}}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} + \frac{A_s \cdot q_{сомн}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} = \frac{\alpha_{вын} \cdot [T_{внеш} - T_{окр}]}{\varepsilon \cdot C_0} + T_{внеш}^4 - T_{окр}^4. \quad (7)$$

Перенесем все переменные в одну сторону уравнения и вынесем общий коэффициент $T_{внеш}$:

$$T_{внеш}^4 + \left[\frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} \right] \cdot T_{внеш} + \left[-T_{окр}^4 - \frac{A_s \cdot q_{сомн}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} - \frac{\alpha_{вын} \cdot T_{окр}}{\varepsilon \cdot C_0} \right] = 0. \quad (8)$$

Приведем выражение к уравнению четвертой степени, используя вспомогательные коэффициенты A_1 и A_0 :

$$T_{внеш}^4 + A_1 \cdot T_{внеш} + A_0 = 0, \quad (9)$$

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot \alpha_0}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]}, \quad (10)$$

$$A_0 = -T_{окр}^4 - \frac{A_s \cdot q_{сомн}}{\pi \cdot \varepsilon \cdot C_0} - \frac{\Delta P_0 \cdot [1 - 273,15 \cdot \alpha_0]}{[1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}] \cdot [d_{np} \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot C_0]} - \frac{\alpha_{вын} \cdot T_{окр}}{\varepsilon \cdot C_0}. \quad (11)$$

Решить данное уравнение можно методом Феррари [13, с. 239], используя вспомогательный параметр β :

$$[T_{внеш}^2 + \beta]^2 - [2 \cdot \beta \cdot T_{внеш}^2 - A_1 \cdot T_{внеш} + \beta^2 - A_0] = 0. \quad (12)$$

Коэффициент β должен быть подобран так, чтобы выполнялось следующее равенство:

$$A_1^2 - 8 \cdot \beta \cdot [\beta^2 - A_0] = -8 \cdot \beta^3 + 8 \cdot \beta \cdot A_0 + A_1^2 = \beta^3 - A_0 \cdot \beta - \frac{A_1^2}{8} = 0. \quad (13)$$

С помощью формулы Кардано [13, с. 235] найдем корни кубического уравнения:

$$\beta = \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8} \right] + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8} \right]^2 + \frac{1}{27} \cdot [-A_0]^3}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[-\frac{A_1^2}{8} \right]^2 + \frac{1}{27} \cdot [-A_0]^3}} = \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} - \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}}. \quad (14)$$

Корни уравнения четвертой степени с найденным вспомогательным коэффициентом β :

$$\begin{cases} T_{внеш}^2 - \sqrt{2 \cdot \beta} \cdot T_{внеш} + \left[\beta + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}} \right] = 0 \\ T_{внеш}^2 + \sqrt{2 \cdot \beta} \cdot T_{внеш} + \left[\beta - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}} \right] = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

С помощью дискриминанта найдем корни квадратных уравнений:

$$T_{внеш_{1,2}} = \frac{\sqrt{2 \cdot \beta} \pm \sqrt{2 \cdot \beta - 4 \cdot \left[\beta + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}} \right]}}{2} = \frac{\sqrt{\beta} \pm \sqrt{-\frac{\beta}{2} - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}}{2} \quad (16)$$

$$T_{внеш_{3,4}} = \frac{-\sqrt{2 \cdot \beta} \pm \sqrt{2 \cdot \beta - 4 \cdot \left[\beta - \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}} \right]}}{2} = -\frac{\sqrt{\beta} \pm \sqrt{-\frac{\beta}{2} + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}}{2}. \quad (17)$$

Искомым решением является один единственный корень. Путем многократных практических расчетов выведено, что 1-й, 2-й и 4-й корень находится в области либо отрицательных, либо комплексных чисел. Таким образом, единственно верным является третий корень:

$$T_{внеш} = -\frac{\sqrt{\beta}}{2} + \sqrt{-\frac{\beta}{2} + \frac{A_1}{\sqrt{8 \cdot \beta}}}. \quad (18)$$

Уравнение, связывающее температуру поверхности провода и температуру жилы провода [12]:

$$\theta_{np} = \frac{T_{внеш} - 273,15 + \Delta P_0 \cdot S_{uz}}{1 - \alpha_0 \cdot \Delta P_0 \cdot S_{uz}}, \quad (19)$$

где θ_{np} — температура жилы провода, °С.

Сравнительный анализ

Выполним сравнительный анализ предложенной математической модели с методом конечных элементов для трехмерного объекта в программном обеспечении Ansys Fluid Flow (CFX).

Таблица 1. Параметры, принятые при проведении расчетов
Table 1. Parameters accepted for calculations

Наименование и обозначение параметров	СИП-3 1×35-20
Сечение проводника S , мм^2	35
Погонное сопротивление провода при 20°C R_{20} , $\text{Ом}/\text{км}$	0,77
Диаметр жилы провода d_1 , мм	6,7
Внешний диаметр провода d_2 , мм	11,5
Коэффициент теплопроводности жилы $\lambda_{ж}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	237
Коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda_{из}$, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	0,4
Температурный коэффициент сопротивления при 20°C α_{20} , $^\circ\text{C}^{-1}$	0,00403
Коэффициент излучения ϵ	0,8
Температура воздуха θ_b , $^\circ\text{C}$	25
Атмосферное давление P_{atm} , kPa	101,325
Скорость ветра v , $\text{м}/\text{с}$	1
Коэффициент угла атаки ветра k_v	1
Удельная теплоемкость жилы $C_{ж}$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	903
Удельная теплоемкость изоляции $C_{из}$, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	2300
Плотность жилы $\rho_{ж}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	2702
Плотность изоляции $\rho_{из}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	940

Модель включает в себя процессы теплообмена за счет конвекции и излучения, а также учитывает генерацию тепла внутри проводника из-за прохождения электрического тока. Модель также учитывает изменения сопротивления при изменении температуры жилы с учетом температурного коэффициента сопротивления. Для описания движения воздушных масс выбрана модель турбулентности Shear Stress Transport. Границные условия включают скорость ветра 1 м/с и температуру окружающего воздуха 25°C , солнечное излучение в данном исследовании не учитывалось. Для моделирования радиационных процессов применялся метод Monte-Carlo. Технические характеристики, используемые при расчете, представлены в табл. 1. Для упрощения расчетов не рассматривается многопроволочная структура проводника. Результаты трехмерного моделирования методом конечных элементов пред-

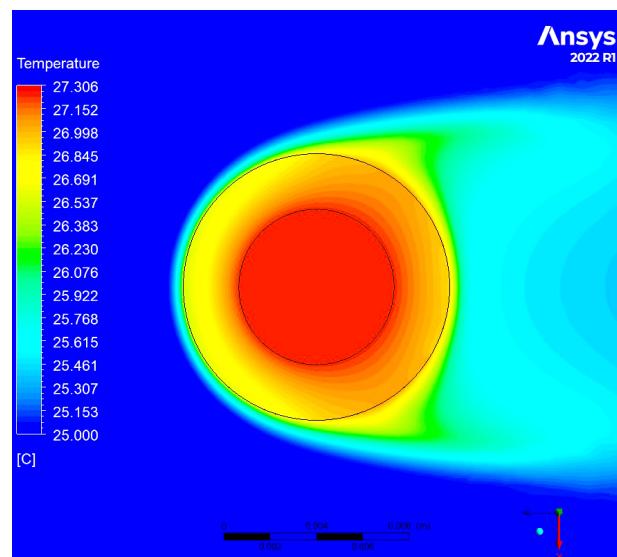


Рис. 1. Распределение температуры внутри проводника и окружающей его среды при силе тока 50 А
Fig. 1. Temperature distribution inside the conductor and its surroundings at a 50 A current strength

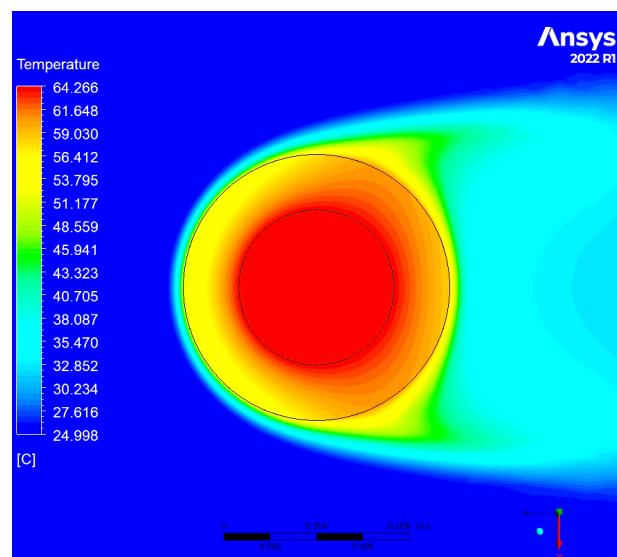


Рис. 2. Распределение температуры внутри проводника и окружающей его среды при силе тока 200 А
Fig. 2. Temperature distribution inside the conductor and its surroundings at a 200 A current strength

Таблица 2. Результаты расчетов температуры жилы методом конечных элементов и представленной математической модели

Table 2. Calculation results of core temperature by finite element method and by presented mathematical model

Сила тока, А	Температура жилы, $^\circ\text{C}$		Абсолютная погрешность $\Delta = \theta_{мм} - \theta_{мкз}$, $^\circ\text{C}$	Относительная погрешность $\delta = \Delta / \theta_{мкз} \cdot 100\%$, %
	Представленная математическая модель $\theta_{мм}$	Метод конечных элементов $\theta_{мкз}$		
50	27,154	27,306	-0,152	-0,557
75	29,893	29,968	-0,075	-0,250
100	33,812	33,999	-0,187	-0,550
125	39,004	39,150	-0,146	-0,373
150	45,591	45,887	-0,296	-0,645
175	53,734	54,048	-0,314	-0,581
200	63,639	64,266	-0,627	-0,976

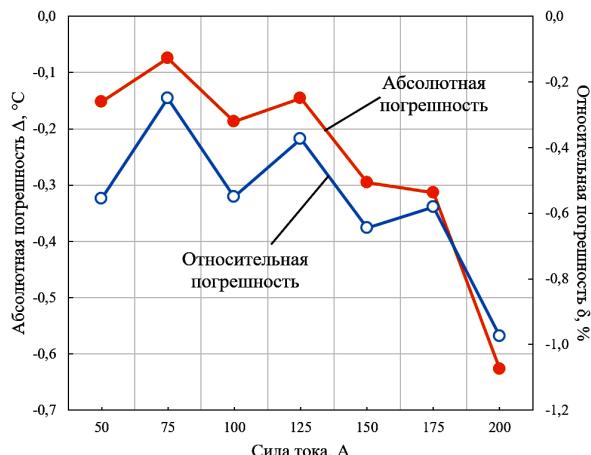


Рис. 3. Сравнительный анализ метода конечных элементов и представленной математической модели при изменении силы тока

Fig. 3. Comparative analysis of the finite element method and the presented mathematical model at changing the current intensity

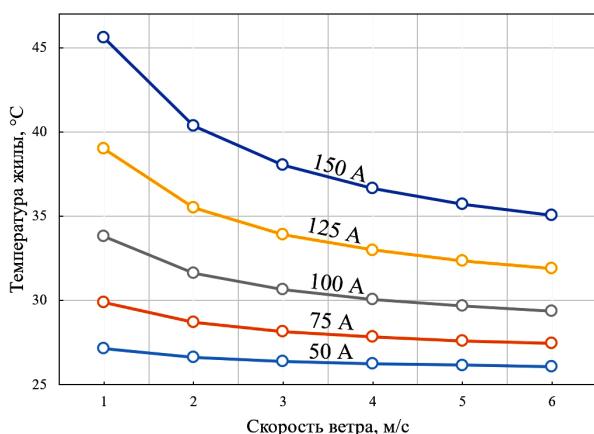


Рис. 4. Зависимость температуры жилы провода от скорости ветра при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А

Fig. 4. Wire core temperature dependence on wind speed at current strengths of 50, 75, 100, 125, 150 A

ставлены на рис. 1 и рис. 2. В табл. 2 отображен сравнительный анализ представленной математической модели с методом конечных элементов. На рис. 3 изображена абсолютная и относительная погрешность между представленной математической моделью и методом конечных элементов. Можно наблюдать высокую степень соответствия с представленной математической моделью. Погрешность расчета можно минимизировать, увеличивая плотность ячеек сетки.

Компьютерное моделирование, в отличие от существующих математических моделей, позволяет отобразить градиент температуры внутри проводника. Однако ввиду высокой теплопроводности металлов и небольших диаметров проводников данная величина имеет небольшие отклонения.

Хотя компьютерное моделирование предлагает множество очевидных преимуществ, важно отметить, что в сфере практики проектирования численные методы, как правило, являются основными используемыми инструментами.

Представленный метод дополнительно сравнивался с методами IEEE 738 и CIGRE 601 для случая

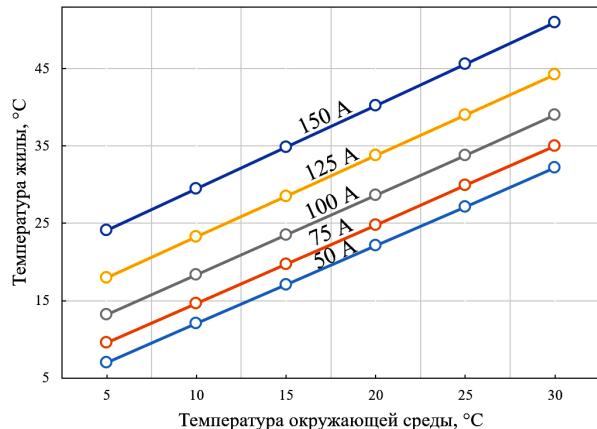


Рис. 5. Зависимость температуры жилы провода от температуры окружающей среды при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А

Fig. 5. Wire core temperature dependence on surrounding temperature at current strengths of 50, 75, 100, 125, 150 A

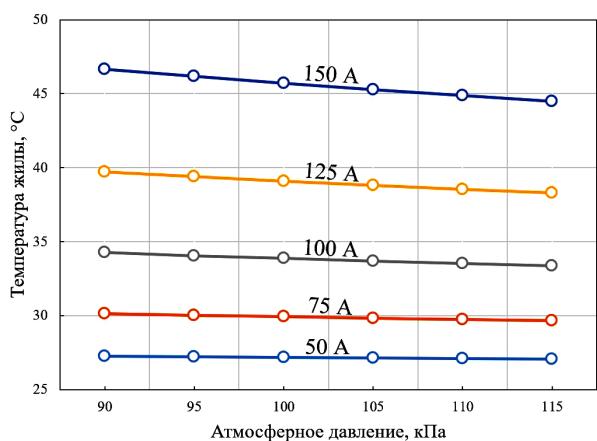


Рис. 6. Зависимость температуры жилы провода от атмосферного давления при силе тока 50, 75, 100, 125, 150 А

Fig. 6. Wire core temperature dependence on atmospheric pressure at current strength of 50, 75, 100, 125, 150 A

неизолированных проводов; погрешность между полученными значениями была минимальна.

Влияние метеофакторов

Рассмотрим детальнее влияние метеофакторов по отдельности.

Наличие ветра способствует охлаждению проводника, что приводит к снижению его температуры за счет вынужденной конвекции, причем этот эффект становится все более выраженным по мере увеличения скорости воздушного потока. На рис. 4 представлено влияние скорости ветра на температуру жилы проводника при различных значениях силы тока. В то же время учет скорости ветра вдоль всей линии представляется сложной задачей из-за сложной траектории движения воздушных масс [14].

Температура окружающей среды также оказывает значительное влияние на тепловое состояние проводников. По мере повышения температуры воздуха проводник способен рассеивать меньше тепла посредством конвекции и излучения, что приводит к повышению его температуры [15]. На рис. 5 отображено влияние температуры окружающей

среды на температуру жилы проводника при вариации силы тока. На рисунке можно увидеть, что изменение температуры имеет линейный характер, что делает этот фактор более точным для расчетов в отличие от влияния ветра.

Атмосферное давление оказывает менее выраженное влияние на тепловое состояние проводников по сравнению с температурой окружающей среды и ветром. Уменьшение атмосферного давления приводит к снижению эффективности теплообмена, что, в свою очередь, повышает температуру проводника. На рис. 6 отображена связь между температурой окружающей среды и температурой жилы проводника при некоторых значениях силы тока.

Заключение

Исследование, представленное в этой статье, подчеркивает растущую важность учета погодных факторов при эксплуатации воздушных линий электропередачи, особенно в условиях растущего потребления электроэнергии и устаревания инфраструктуры электросетевого комплекса. Поскольку тепловые нагрузки на линии электропередачи достигают предельных значений, способность точно оценивать тепловые состояния проводов становится необходимой для обеспечения надежности и в то же время повышения эффективности энергосистемы.

Математическая модель, полученная в этом исследовании, предлагает упрощенный, но эффективный подход к расчету температуры как изолированных, так и неизолированных проводников в различных условиях окружающей среды. Проведенный анализ подтверждает, что представленная модель не только обладает высоким уровнем точности, но и практична для внедрения в инженерные процессы.

Следует учитывать, что компьютерное моделирование, математические модели и даже датчики измерения температуры обладают определенным уровнем погрешности. Эта присущая неопределенность должна быть тщательно рассмотрена и учтена определенным запасом прочности в любом практическом применении.

Список источников / References

1. World Energy Investment 2024. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2024> (accessed: 16.09.2024).
2. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023> (accessed: 16.09.2024).
3. Генеральная схема размещения объектов электроэнергетики до 2042 года: утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 30 декабря 2024 г. № 4153-р // Собрание законодательства Российской Федерации. 2025. № 2, ст. 75. С. 634 – 725. (In Russ.).
- General'naya skhema razmeshcheniya ob'yektov elektroenergetiki do 2042 goda: utv. rasporyazheniem Pravitel'stva Ros. Federatsii ot 30 dekabrya 2024 g. № 4153-r [The general layout of electric power facilities until 2042: approved by the decree of the Government of the Russian Federation. No. 4153-r of the Russian Federation dated December 30, 2024] // Sobraniye zakonodatel'stva Rossiyskoy Federatsii [Collection of legislation of the Russian Federation]. 2025. No. 2, art. 75. P. 634 – 725. (In Russ.).
4. Global Energy Outlook 2024: Peaks or Plateaus? Resources for the Future. URL: <https://www.rff.org/publications/reports/global-energy-outlook-2024/> (accessed: 16.09.2024).
5. Средний показатель износа электросетевой инфраструктуры «Россети» может превысить 60 % к 2025 году // Энергетика и промышленность России. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/2875181.htm> (дата обращения: 16.09.2024).
- Sredniy pokazatel' iznosa elektrosetevoy infrastruktury 'Rosseti' mozhet prevyshit' 60 % k 2025 godu [The average depreciation rate of ROSSETI's power grid infrastructure may exceed 60 % at 2025]. Energetika i Promyshlennost' Rossii. Energy and Industry in Russia. URL: <https://www.eprussia.ru/news/base/2021/2875181.htm> (accessed: 16.09.2024). (In Russ.).
6. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 9.06.2020 г. № 1523-р. Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс».
- Ob utverzhdenii Energeticheskoy strategii Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda: rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 9 iyunya 2020 g. № 1523-r [On approval of the energy strategy of the Russian Federation until 2035: Decree of the Government of the Russian Federation of 9 June 2020 No. 1523-r]. Available at ConsultantPlus. (In Russ.).
7. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE. 2013. P. 1 – 72. DOI: 10.1109/IEEEESTD.2013.6692858.
8. Guide for thermal rating calculations of overhead lines. CIGRE. 2014. 95 p.
9. СТО 56947007-29.240.55.143 – 2013. Методика расчета предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности проводов и допустимых габаритов воздушных линий: Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС». Введ. 2013 – 02 – 13. Москва: ОАО «ФСК ЕЭС», 2013. 42 с.
- STO 56947007-29.240.55.143 – 2013. Metodika rascheta predel'nykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimykh gabaritov vozduzhnykh linii: Standart organizatsii OAO «FSK EES» [STO 56947007-29.240.55.143 – 2013. Calculation methodology for current limit loads on conditions of mechanical strength of wires and permissible dimensions of overhead lines: Standard of the organization JSC «Federal Grid Company of Unified Energy System»]. Moscow, 2013. 42 p. (In Russ.).
10. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic rating management of overhead transmission lines operating under multiple weather conditions. Energies. 2021. Vol. 14, no. 4. DOI: 10.3390/en14041136.
11. ГОСТ 31946 – 2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. Введ. 12 – 03 – 2012. Москва: Стандартинформ, 2013. 20 с.
- GOST 31946 – 2012. Provoda samonesushchiye izolirovannyye i zashchishchennyye dlya vozduzhnykh linii elektroperedachi. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Insulated and protected wires for overhead power lines. General specifications]. Moscow, 2012. 20 p. (In Russ.).
12. Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи // Известия Транссиба. 2019. № 3 (39). С. 134 – 145. EDN: LDQZUC. (In Russ.).
- Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnye poteri aktivnoy moshchnosti v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannyykh provodakh linii elektroperedachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines]. Izvestiya Transsib. Journal of Transsib Railway Studies. 2019. No. 3 (39). P. 134 – 145. EDN: LDQZUC. (In Russ.).
13. Курош А. Г. Курс высшей алгебры: Москва: Наука, 1968. 431 с.
- Kurosh A. G. Kurs vysshey algebry [Higher mathematics course]. Moscow, 1968. 431 p. (In Russ.).

14. Liu Z., Deng H., Peng R. [et al.]. An equivalent heat transfer model instead of wind speed measuring for dynamic thermal rating of transmission lines. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 18. DOI: 10.3390/en13184679.

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

Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. Analiz dlitel'no dopustimykh tokov i poter' aktivnoy moshchnosti v vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi s uchetom klimaticheskikh faktorov [The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB. (In Russ.).

AuthorID (SCOPUS): 57193405906
ResearcherID: Y-9077-2018

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 20.04.2025; принята к публикации 06.05.2025.

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Postgraduate of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

Correspondence address: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

GIRSHIN Stanislav Sergeyevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

DEEV Vladislav Aleksandrovich, Master's Student of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: vlad_deev@inbox.ru

TROTSENKO Vladislav Mikhaylovich, Senior Lecturer of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

GORYUNOV Vladimir Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

NIKOLAEV Mikhail Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1649-8920

AuthorID (SCOPUS): 57193405906

ResearcherID: Y-9077-2018

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 20.04.2025; accepted for publication 06.05.2025.

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

Адрес для переписки: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

ДЕЕВ Владислав Александрович, магистрант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: vlad_deev@inbox.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

НИКОЛАЕВ Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1649-8920