

АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ И ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Представлены формулы для расчета длительно допустимых токов и потерь активной мощности для воздушных линий электропередачи в условиях естественной и вынужденной конвекции для изолированных и неизолированных проводников. Корректное определение максимальных токовых нагрузок играет важную роль в эффективном использовании нагрузочной способности линий электропередачи, а уточнение расчета потерь активной мощности является основой для повышения экономичности передачи энергии. Полученные результаты могут быть использованы при выборе мероприятий, направленных на увеличение пропускной способности воздушных линий и снижение потерь энергии.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, температура провода, уравнение теплового баланса, потери активной мощности, температурная зависимость сопротивления, длительно допустимый ток.

Введение. Согласно исследованиям [1], в разных сценариях развития энергетики (Accelerated, Net Zero, New Momentum) доля электроэнергии в общем потреблении энергии в 2050 году возрастет в 1,9–2,4 раза по сравнению с 2019 годом (рис. 1). Глобальный спрос на электроэнергию будет расти на 1,7–5 % в год до 2050 года [1]. В абсолютных значениях ожидается, что генерация электрической энергии по всем видам производства составит около 58 ПВтч (Accelerated), 64 ПВтч (Net Zero) и 50 ПВтч (New Momentum) (рис. 2) [1]. Это связано с огромным общим увеличением глобального спроса на электроэнергию, причем основная часть этого роста приходится на развивающиеся страны [2]. По указанным причинам возникает потребность увеличения пропускной способности линий электропередачи [3–10].

В России основополагающими документами для решения этой проблемы являются: распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года» [11]. Ключевым показателем эффективности работы электросетевого комплекса является уровень потерь электроэнергии в электрических сетях. Согласно [11], к 2024 году уровень потерь не должен превышать — 9,8 %, а к 2035 году — не более 7,3 %.

Точный расчет потерь активной мощности при передаче электроэнергии является необходимым условием для обеспечения экономичности данного процесса. В свою очередь, повышение точности расчета требует детального учета всего многообразия факторов, от которых зависит величина потерь [12].

Расчетные формулы. Поставленная задача повышения пропускной способности (токов в проводнике) естественно приводит к увеличению потерь, а следовательно, и к росту температуры. Максимально допустимая температура проводника ограничена двумя факторами:

- максимальным допустимым провисанием провода линии электропередачи;
- температурным пределом повреждения проводника.

Данный факт вступает в противоречие с желаемой необходимостью увеличения пропускной способности.

Следует отметить, что, кроме зависимости от нагрузки, значение температуры сложным образом зависит от погодных условий и свойств проводников линий электропередач. Достижение максимальной пропускной способности при допустимой температуре провода является важной задачей. Её решение базируется на знании солнечного излуче-

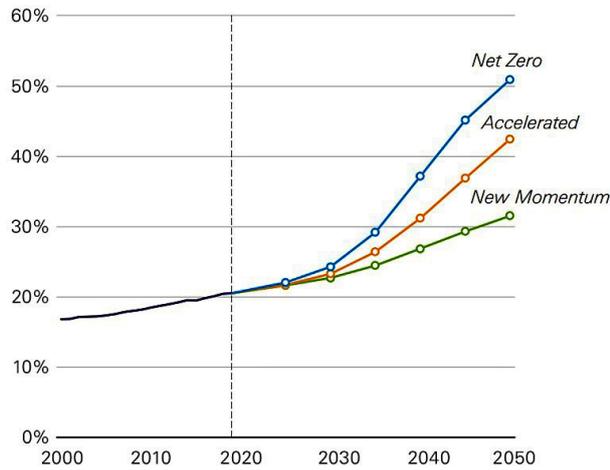


Рис. 1. Доля электроэнергии в общем потреблении энергии

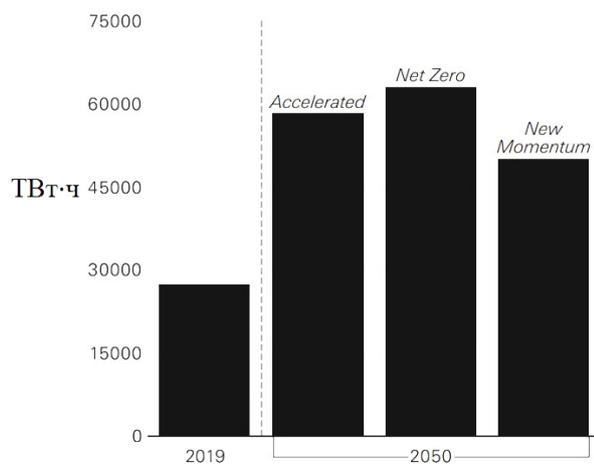


Рис. 2. Генерация по всем видам производства электрической энергии

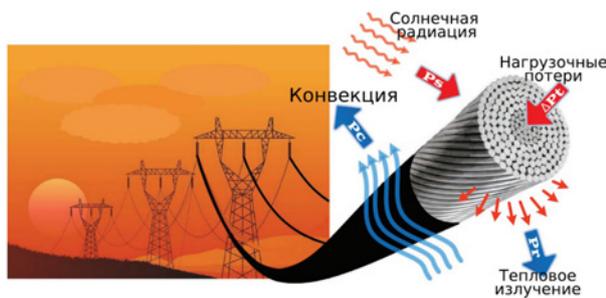


Рис. 3. Процессы передачи тепла от линии в окружающую среду [18]

ния, конвективного и радиационного охлаждения, а также физических свойств проводов линий электропередачи.

Отметим несколько нормативных документов для определения предельных токовых нагрузок по условиям сохранения механической прочности неизолированных проводов и допустимых габаритов воздушных линий [13–15]. За рубежом существуют два стандарта для определения тепловых характеристик воздушной линии электропередачи, а именно стандарт CIGRE 207 и стандарт IEEE 738 [13, 14], которые можно использовать для определения максимально допустимой нагрузки неизо-

лированного проводника. Стандарты IEEE и CIGRE согласованы в использовании концепции теплового баланса, в которой выделяющееся тепло уравновешивается процессом охлаждения [16]. Таким образом, в проводниках тепло не накапливается. Оба метода не имеют существенной разницы в своих результатах [17].

Процессы передачи тепла от линии в окружающую среду показаны на рис. 3 [18]. Теплоприток проводника обусловлен солнечной радиацией и нагрузочными потерями активной мощности, а отдача тепла осуществляется путем конвекции и тепловым излучением.

Уравнение теплового баланса, согласно CIGRE 207 [13, 19]:

$$P_j + P_m + P_s + P_i = P_c + P_r + P_w, \quad (1)$$

где P_j — омические потери мощности, Вт/м; P_m — потери мощности, обусловленные вихревыми токами P_v и гистерезисом материалов P_h , Вт/м; P_s — интенсивность солнечной радиации, Вт/м; P_i — потери мощности, обусловленные коронным разрядом, Вт/м; P_c — мощность, отдаваемая путем конвективного теплообмена, Вт/м; P_r — мощность, отдаваемая путем излучения, Вт/м; P_w — мощность, отдаваемая путем испарения, Вт/м.

Величинами P_h , P_r , P_w можно пренебречь при практических расчетах. Таким образом, уравнение (1) упрощается до:

$$\Delta P_t + P_s = P_c + P_r, \quad (2)$$

где $\Delta P_t = P_j + P_v$ — нагрузочные потери мощности, Вт/м.

Для вычисления P_s , P_c , P_r используются формулы [13]:

$$P_s = d_{np} \cdot A_s \cdot q_{солн}, \quad (3)$$

$$P_c = d_{np} \cdot \alpha_{кон} \cdot \pi (\theta_{внеш} - \theta_{окр}), \quad (4)$$

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

где d_{np} — диаметр провода, м; A_s — поглощательная способность провода для солнечной изоляции; $q_{солн}$ — суммарная солнечная радиация, Вт/м; $\alpha_{кон}$ — коэффициент теплоотдачи, для естественной конвекции используется $\alpha_{ест}$, для вынужденной конвекции используется $\alpha_{вын}$, Вт/(м²·К); $\theta_{внеш}$ — температура внешней поверхности провода, °C; $\theta_{окр}$ — температура окружающей среды, °C; ϵ_n — коэффициент черноты поверхности провода; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ — постоянная излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); $T_{внеш}$ — абсолютная температура внешней поверхности провода, К; $T_{окр}$ — абсолютная температура окружающей среды, К.

Чтобы определить ΔP_t , $q_{солн}$, $\alpha_{вын}$, $\alpha_{ест}$, θ_{np} , используются следующие формулы [20, с. 135–137]:

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= I^2 \cdot R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np}] = \Delta P'_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np}] = \\ &= \frac{\Delta P'_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{1 - \alpha \cdot \Delta P'_0 \cdot S_{из}} = \Delta P'_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}], \end{aligned} \quad (6)$$

$$q_{солн} = k_{зм} \cdot q_{s,np} \cdot \sin \varphi_s + \pi \cdot q_{s,расст}, \quad (7)$$

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_V (P \cdot V)^{0,6}}{(T_{окр} \cdot d_{np})^{0,4}} \quad (8)$$

$$\alpha_{ест} = 0,0749 \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\theta_{внеш} - \theta_{окр}}{d_{пр}}}, \quad (9)$$

$$\theta_{пр} = \theta_{внеш} + \Delta P_t \cdot S_{уз} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 \cdot S_{уз}}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{уз}}, \quad (10)$$

где I — ток в проводе, А; R_0 — погонное активное сопротивление переменному току при температуре 0°C , Ом/м; α — температурный коэффициент электрического сопротивления, $1/^\circ\text{C}$; $\theta_{пр}$ — температура жилы провода, $^\circ\text{C}$; $\Delta P_0 = I_2 \cdot R_0$ — потери активной мощности, рассчитанные по сопротивлению, приведенному к 0°C , Вт/м; $S_{уз} = \frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \cdot \ln \frac{d_{пр}}{d_{ж}}$ — тепловое сопротивление изоляции, мК/Вт; $\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности изоляции Вт/(м·К); $d_{ж}$ — диаметр токопроводящей жилы провода, м; $\Delta P'_0 = \frac{\Delta P_0}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{уз}}$ — потери активной мощности при условии, что температура поверхности провода равна 0°C , Вт/м; $k_{зм}$ — коэффициент затененности; $q_{s,пр}$ — плотность прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам, Вт/м²; ϕ_s — угол между осью провода и направлением солнечных лучей, градус; $q_{s,расс}$ — плотность потока рассеянной солнечной радиации, Вт/м²; k_v — коэффициент, характеризующий угол атаки ветра; P — атмосферное давление, Па; V — скорость ветра, м/с.

Подставляя уравнения (3, 4, 5, 6) в уравнение (2), получим:

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] + d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн} &= \\ &= d_{пр} \cdot \alpha_{кон} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \\ &+ d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4). \end{aligned} \quad (11)$$

Перенесем $d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}$ в правую часть уравнения и вынесем $d_{пр}$ как общий множитель:

$$\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = d_{пр} \left[\alpha_{кон} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \quad (12)$$

Для случая вынужденной конвекции с помощью уравнений (8, 12) получим:

$$\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \quad (13)$$

Для нахождения $\theta_{внеш}$ преобразуем формулу (13):

$$d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) = \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] - d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}. \quad (14)$$

В результате деления левой и правой части на $d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi$ найдем:

$$\begin{aligned} \theta_{внеш} - \theta_{окр} &= \frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{пр} \cdot \alpha_{вын} \cdot \pi} - \\ &- \frac{\varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4)}{\alpha_{вын}} + \frac{A_s \cdot q_{солн}}{\alpha_{вын} \cdot \pi}. \end{aligned} \quad (15)$$

Определим $\theta_{внеш}$ за счет выноса общего множителя $\alpha_{вын} \cdot \pi$ и переноса $\theta_{окр}$ в правую часть уравнения:

$$\begin{aligned} \theta_{внеш} &= \theta_{окр} + \frac{1}{\alpha_{вын} \cdot \pi} \times \\ &\times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{пр}} - \right. \\ &\left. - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Соотношение (16) является базовым уравнением для нахождения $\theta_{внеш}$ итерационным способом.

Выведем выражение для длительно допустимого тока. Температура внешней поверхности провода и температура жилы принимаются предельно допустимыми. Подставляем уравнения (6) в уравнение (13):

$$\begin{aligned} I_{гон}^2 \cdot R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}] &= \\ &= d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр}) + \right. \\ &\left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (17)$$

Разделим на $R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}]$ и приведем левую часть к первой степени:

$$I_{гон} = \sqrt{\frac{d_{пр} \left[\alpha_{вын} \cdot \pi(\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр}) + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]}{R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{пр,гон}]}}. \quad (18)$$

Соотношение (18) является базовым уравнением для нахождения $I_{гон}$ итерационным способом.

Проведем аналогичные преобразования для естественной конвекции, используя уравнения (9, 12):

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] &= \\ &= d_{пр} \left[0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\theta_{внеш} - \theta_{окр}}{d_{пр}}} \cdot \pi(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \right. \\ &\left. + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Уравнение теплового баланса для естественной конвекции:

$$\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] = d_{пр} \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{пр}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot (\theta_{внеш} - \theta_{окр})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]. \quad (20)$$

Для нахождения $\theta_{внеш}$ преобразуем формулу (20):

$$\begin{aligned} \Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}] &= \\ &= \frac{d_{пр} \cdot \pi \cdot 0,0749 \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}}}{\sqrt[4]{d_{пр}}} \cdot (\theta_{внеш} - \theta_{окр})^{1,25} + \\ &+ d_{пр} \cdot \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - d_{пр} \cdot A_s \cdot q_{солн}. \end{aligned} \quad (21)$$

Путем несложных преобразований получим:

$$(\theta_{внеш} - \theta_{окр})^{1,25} = \frac{\sqrt[4]{d_{np}}}{\pi \cdot 0,0749} \times \sqrt{\frac{T_{окр}}{P}} \cdot \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] \quad (22)$$

Определим $\theta_{внеш}^{k+1}$ для этого приведем уравнение к первой степени и перенесем $\theta_{окр}$ в правую часть уравнения:

$$\theta_{внеш} = \theta_{окр} + \left(\frac{\sqrt[4]{d_{np}}}{\pi \cdot 0,0749} \cdot \sqrt{\frac{T_{окр}}{P}} \cdot \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}]}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] \right)^{0,8} \quad (23)$$

Проведем аналогичные преобразования и для нахождения длительно допустимого тока. Подставим уравнения (6) в уравнение (20):

$$I_{гон}^2 \cdot R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}] = d_{np} \cdot \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{np}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot (\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right] \quad (24)$$

Разделим уравнение на $R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}]$ и приведем левую часть уравнения к первой степени:

$$I_{гон} = \sqrt{\frac{d_{np} \cdot \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{np}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot (\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]}{R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}]} \quad (25)$$

Полученные уравнения (16, 23), а также (18, 25) используем для нахождения соответственно $\theta_{внеш}$ и $I_{гон}$ итерационным способом.

$$\theta_{внеш}^{[k+1]} = \theta_{окр} + \frac{1}{\alpha_{вын} \cdot \pi} \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}^{[k]}]}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] \quad (26)$$

$$\theta_{внеш}^{[k+1]} = \theta_{окр} + \left(\frac{\sqrt[4]{d_{np}}}{\pi \cdot 0,0749} \cdot \sqrt{\frac{T_{окр}}{P}} \cdot \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}^{[k]}]}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] \right)^{0,8} \quad (27)$$

$$I_{гон}^{[k+1]} = \sqrt{\frac{\alpha_{вын} \cdot \pi (\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр}) + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн}}{R_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}]} \quad (28)$$

$$I_{гон}^{[k+1]} = \sqrt{\frac{d_{np} \cdot \left[\frac{\pi \cdot 0,0749}{\sqrt[4]{d_{np}}} \cdot \sqrt{\frac{P}{T_{окр}}} \cdot (\theta_{внеш,гон} - \theta_{окр})^{1,25} + \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш,гон}^4 - T_{окр}^4) - A_s \cdot q_{солн} \right]}{R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}]} \quad (29)$$

где k — номер итерации; $\theta_{внеш,гон} = \theta_{np,гон} - I_{гон}^2 \cdot R_0 \cdot S_{из} \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{np,гон}]$ — предельно допустимая температура внешней поверхности провода, °C. Потери электрической энергии определяются методом средних нагрузок [21]:

$$\Delta W = \Delta P_t \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3^2 \cdot t, \quad (30)$$

где k_1 — коэффициент потерь в арматуре; k_2 — коэффициент различия графиков активной и реактивной мощности; k_3 — коэффициент формы графика суммарной нагрузки; t — продолжительность интервала, ч.

Согласно представленным формулам, разработаны и зарегистрированы программы расчета [22, 23]. Алгоритм программы [23] представлен на рис. 4–6. В настоящее время проходит регистрация программы на языке программирования Java, объединяющей программы, представленные в [22, 23].

Пример расчета. Произведем пример расчета температуры провода и потерь активной мощности в проводе АССР-405-Т16 в случае вынужденной конвекции.

Исходные данные:

$\theta_{окр} = -20$ °C; $R_{25} = 1,369 \cdot 10^{-4}$ Ом/м; $P = 100\,000$ Па; $V = 1$ м/с; $k_v = 1$; $\alpha = 0,0043$ 1/°C;

Вынужденная конвекция: допустимый ток и потери энергии

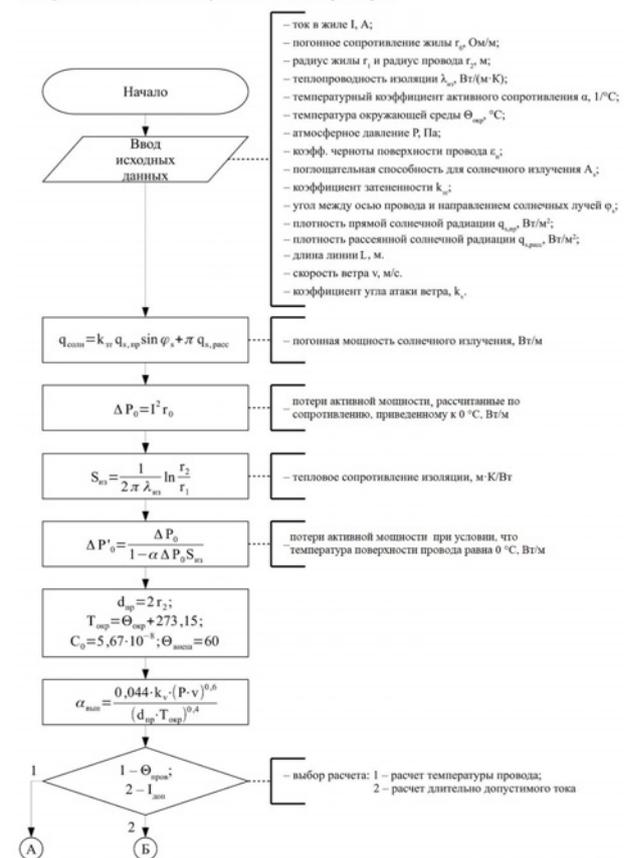


Рис. 4. Алгоритм расчета (часть 1)

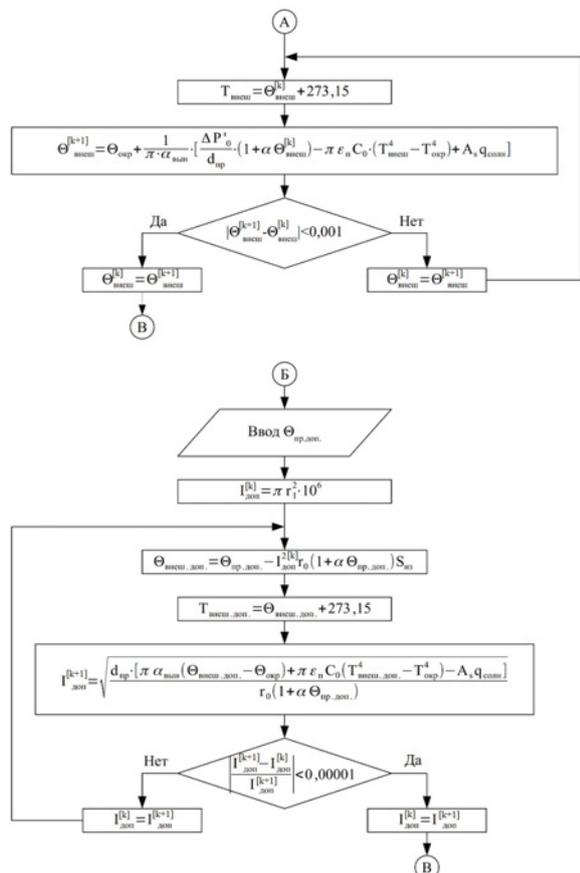


Рис. 5. Алгоритм расчета (часть 2)

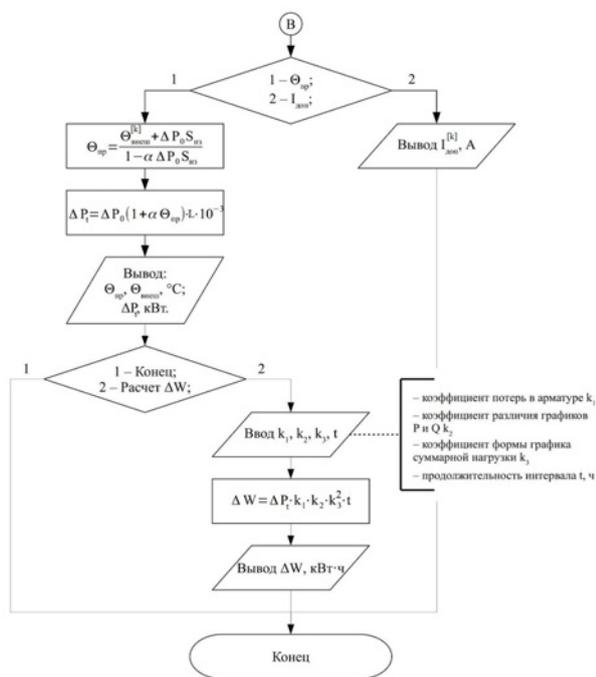


Рис. 6. Алгоритм расчета (часть 3)

$d_{np} = 0,0201$ м; $q_{s,np} = 500$ Вт/м²; $q_{s,расс} = 100$ Вт/м²; $k_{зм} = 0,7$; $\varphi_s = 45^\circ$; $\varepsilon_n = 0,6$; $A_s = 0,6$; $I = 1370$ А.
Используя приведенные выше уравнения:

$$R_0 = \frac{R_{25}}{1 + \alpha \cdot 25} = \frac{1,369 \cdot 10^{-4}}{1 + 0,0043 \cdot 25} = 1,236 \cdot 10^{-4} \text{ Ом/м}, \quad (31)$$

$$q_{солн} = k_{зм} \cdot q_{s,np} \cdot \sin \varphi_s + \pi \cdot q_{s,расс} = 0,7 \cdot 500 \cdot \sin(45) + \pi \cdot 100 = 561,487 \text{ Вт/м}, \quad (32)$$

$$\Delta P_0 = I_2 \cdot R_0 = 1370^2 \cdot 1,236 \cdot 10^{-4} = 232,007 \text{ Вт/м}, \quad (33)$$

$$S_{уз} = \frac{1}{2\pi\lambda_{уз}} \cdot \ln \frac{d_{np}}{d_{ж}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \ln \frac{0,0201}{0,0201} = 0 \text{ м}\cdot\text{К/Вт}, \quad (34)$$

$$\Delta P'_0 = \frac{\Delta P_0}{1 - \alpha \cdot \Delta P_0 \cdot S_{уз}} = \frac{232,007}{1 - 0,0043 \cdot 232,007 \cdot 0} = 232,007 \text{ Вт/м}, \quad (35)$$

$$T_{окр} = \theta_{окр} + 273,15 = 253,15 \text{ К}, \quad (36)$$

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_V (P \cdot V)^{0,6}}{(T_{окр} \cdot d_{np})^{0,4}} = 0,044 \frac{1 \cdot (100000 \cdot 1)^{0,6}}{(253,15 \cdot 0,0201)^{0,4}} = 22,952 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}. \quad (37)$$

Первое приближение $\theta_{внеш}^{[k]} = 60^\circ \text{C}$.
Цикл 1:

$$T_{внеш} = \theta_{внеш}^{[k]} + 273,15 = 60 + 273,15 = 333,15 \text{ К}, \quad (38)$$

$$\theta_{внеш}^{[k+1]} = \theta_{окр} + \frac{1}{\alpha_{вын} \cdot \pi} \times \left[\frac{\Delta P'_0 \cdot [1 + \alpha \cdot \theta_{внеш}^{[k]}}{d_{np}} - \pi \cdot \varepsilon_n \cdot C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) + A_s \cdot q_{солн} \right] = 60 + \frac{1}{22,952 \cdot \pi} \times \left[\frac{232,007 \cdot [1 + 0,0043 \cdot 60]}{0,0201} - \pi \cdot 0,6 \cdot C_0 (333,15^4 - 253,15^4) + 0,6 \cdot 561,487 \right] = 173,983^\circ \text{C}. \quad (39)$$

Проверка $|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 173,983 - 60 = 113,983 > 0,001$.

Цикл 2:

$$T_{внеш} = 447,133 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 211,495^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 37,511 > 0,001.$$

Цикл 3:

$$T_{внеш} = 484,645 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 214,802^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 3,307 > 0,001.$$

Цикл 4:

$$T_{внеш} = 487,952 \text{ К}; \theta_{внеш}^{[k+1]} = 214,825^\circ \text{C};$$

$$|\theta_{внеш}^{[k+1]} - \theta_{внеш}^{[k]}| = 0,023 > 0,001.$$

Цикл 5:

$$T_{\text{внеш}} = 487,975 \text{ К}; \theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} = 214,825 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$|\theta_{\text{внеш}}^{[k+1]} - \theta_{\text{внеш}}^{[k]}| = 4 \cdot 10^{-6} < 0,001.$$

$$\begin{aligned} \theta_{\text{пр}} &= \frac{\theta_{\text{внеш}} + \Delta P_0 \cdot S_{\text{из}}}{1 - \alpha \cdot \Delta P_t \cdot S_{\text{из}}} = \\ &= \frac{214,825 + 232,007 \cdot 0}{1 - 0,0043 \cdot 232,007 \cdot 0} = 214,825 \text{ }^\circ\text{C}, \end{aligned} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_t &= \Delta P_0 [1 + \alpha \cdot \theta_{\text{пр}}] = \\ &= 232,007 \cdot [1 + 0,0043 \cdot 214,825] = \\ &= 446,322 \text{ Вт/м}. \end{aligned} \quad (41)$$

Достоверность вычислений с использованием программного комплекса [22, 23] и стандарта ОАО «ФСК ЕЭС» [15] представлена в [20, с. 141]. Достоверность расчетов была также подтверждена [24, 25] в результате сравнения с вычислениями, основанными на стандартах CIGRE 207, IEEE 738.

Результаты применения разработанных программ представлены на рис. 7, 8 при указанных выше условиях.

Заключение. Получены уравнения для нахождения длительно допустимых токов и потерь активной мощности проводов воздушных линий, отличающихся от известных тем, что они позволяют с единых позиций проводить расчеты неизолированных и изолированных проводов в условиях естественной и вынужденной конвекции при учете температуры токопроводящих жил и температуры поверхности провода. Внедрение полученных результатов в проектную расчетную и эксплуатационную практику воздушных линий электроэнергетических систем обеспечивает расширение возможностей по разработке мер на повышение качества обоснования

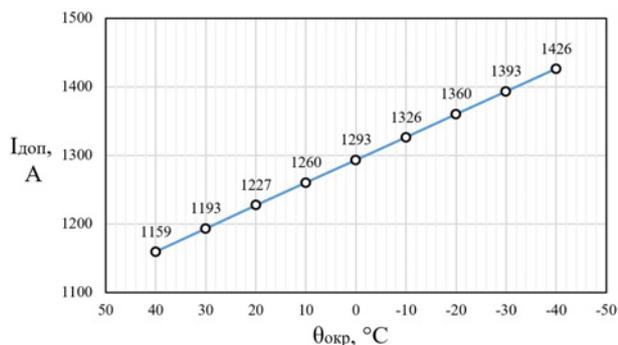


Рис. 7. Длительно допустимый ток провода АССР-405-Т16

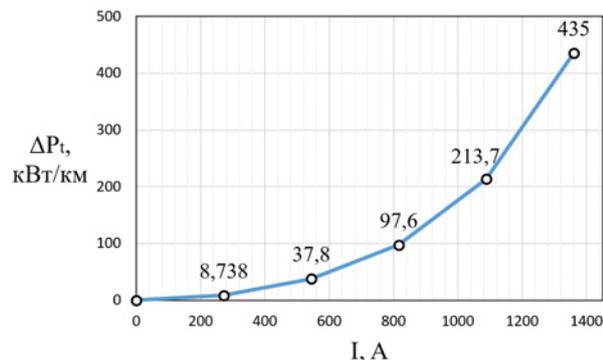


Рис. 8. Потери активной мощности провода АССР-405-Т16

нормативов и выбора мероприятий по уменьшению потерь, на уменьшение затрат на транспортировку электрической энергии за счет уменьшения потерь, на модернизацию существующих программных средств по расчету потерь электрической энергии с меньшим, чем ранее количеством допущений, на повышении эффективности внедрения новых типов проводов.

Достоверность вычислений по разработанным программам подтверждается сравнением со стандартами CIGRE 207 и IEEE 738.

Библиографический список

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения: 27.03.2023).
2. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://ru.usembassy.gov/wp-content/uploads/sites/138/WorldEnergyOutlook20221.pdf> (дата обращения: 27.03.2023).
3. Masaud T. M., El-Saadany E. F. Optimal Wind DG Integration for Security Risk-Based Line Overload Enhancement: A Two Stage Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11939–11947. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965157.
4. Воротицкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта. Часть 1 // Библиотека электротехника. 2021. № 4-5. DOI: 10.34831/EP.2021.268.4.001.
5. Воротицкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: Сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта. Часть 2. // Библиотека электротехника. 2021. № 11-12. DOI: 10.34831/EP.2021.275.11.001.
6. Воротицкий В. Э., Могиленко А. В. Снижение потерь электроэнергии в распределительных электрических сетях: сравнительный анализ зарубежного и отечественного опыта: моногр. Москва: Инфра-Инженерия, 2023. 308 с. ISBN 978-5-9729-1388-6.
7. Dève H. E. Importance of materials in composite conductors // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 172. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.epr.2019.03.022.
8. Fan F., Bell K., Infield D. Transient-state real-time thermal rating forecasting for overhead lines by an enhanced analytical method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epr.2018.11.003.
9. Bedialauneta M. T., Albizu I., Fernandez E. [et al.]. Uncertainties in the Testing of the Coefficient of Thermal Expansion of Overhead Conductors // Energies. 2020. Vol. 13, no. 2. P. 1–13. DOI: 10.3390/en13020411.
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. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136.
11. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
12. Varygina A. O., Savina N. V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112085.
13. Iglesias J., Watt G., Douglass D. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // CIGRE. 2014. 95 p.
14. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858.

15. 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.

16. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.

17. Hathout I., Callery K., Trac J. [et al.]. Impact of Thermal Stresses on the End of Life of Overhead Transmission Conductors // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586574.

18. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // *IET Renewable Power Generation*. 2022. Vol. 17, no. 5. P. 1092–1105. DOI: 10.1049/rpg2.12663.

19. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N. [et al.]. Identification of the Heat Equation Parameters for Estimation of a Bare Overhead Conductor's Temperature by the Differential Evolution Algorithm // *Energies*. 2018. Vol. 11. P. 1–17. DOI: 10.3390/en11082061.

20. 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.

21. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. Москва: ЭНАС, 2016. 456 с. ISBN 978-5-93196-958-9.

22. Петрова Е. В. Расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий энергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // *Реестр программ для ЭВМ*. № 2019619360 от 16.07.2019.

23. Петрова Е. В. Определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // *Реестр программ для ЭВМ*. № 2019660200 от 02.08.2019.

24. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A Mathematical Model of Steady-State Thermal Regime of Insulated Overhead Line Conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.

25. Gómez F. Á., María J. M., Puertas D. G. [et al.]. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in

electrical power lines // *World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS)*. 2011. P. 149–153.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

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

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapov_vladislav@mail.ru

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

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

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 10.04.2023 г.

© Е. В. Петрова, С. С. Гиршин,

В. А. Криволапов,

В. Н. Горюнов, В. М. Троценко

THE ANALYSIS OF CONTINUOUS ADMISSIBLE CURRENTS AND ACTIVE POWER LOSSES IN OVERHEAD POWER LINES TAKING INTO ACCOUNT CLIMATIC FACTORS

Formulas for calculating continuous admissible currents and active power losses for overhead power transmission lines under conditions of natural and forced convection for insulated and non-insulated conductors are presented. The correct determination of maximum current loads plays an important role in the efficient use of the load capacity of power transmission lines, and the refinement of the calculation of active power losses is the basis for increasing the efficiency of energy transmission. The results obtained can be used in the selection of measures aimed at increasing the capacity of overhead lines and reducing energy losses.

Keywords: overhead power lines, wire temperature, heat balance equation, active power losses, temperature dependence of resistance, continuous admissible current.

References

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (accessed: 27.03.2023). (In Engl.).

2. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://ru.usembassy.gov/wp-content/uploads/sites/138/WorldEnergyOutlook20221.pdf> (accessed: 27.03.2023). (In Engl.).

3. Masaud T. M., El-Saadany E. F. Optimal Wind DG Integration for Security Risk-Based Line Overload Enhancement: A Two Stage Approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 11939–11947. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2965157. (In Engl.).

4. Vorotnitskiy V. E., Mogilenko A. V. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta. Chast' 1 [Reduction of electricity losses in distribution networks: Comparative analysis of foreign and domestic experience. Part 1] // Bibliotekha elektrotekhnika. *Electrician's Library*. 2021. No. 4-5. DOI: 10.34831/EP.2021.268.4.001. (In Russ.).

5. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta. Chast' 2 [Reduction of electricity losses in distribution networks: Comparative analysis of foreign and domestic experience. Part 2] // Bibliotekha elektrotekhnika. *Electrician's Library*. 2021. No. 11-12. DOI: 10.34831/EP.2021.275.11.001. (In Russ.).

6. Vorotnitskiy V. E., Mogilenko A. V. Snizheniye poter' elektroenergii v raspredelitel'nykh elektricheskikh setyakh: Sravnitel'nyy analiz zarubezhnogo i otechestvennogo opyta

[Reducing electricity losses in electricity distribution grids: a comparative analysis of foreign and domestic experience]. Moscow, 2023. 308 p. ISBN 978-5-9729-1388-6. (In Russ.).

7. Dève H. E. Importance of materials in composite conductors // Electric Power Systems Research. 2019. Vol. 172. P. 290–295. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.03.022. (In Engl.).

8. Fan F., Bell K., Infield D. Transient-state real-time thermal rating forecasting for overhead lines by an enhanced analytical method // Electric Power Systems Research. 2018. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.11.003. (In Engl.).

9. Bedialauneta M. T., Albizu I., Fernandez E. [et al.]. Uncertainties in the Testing of the Coefficient of Thermal Expansion of Overhead Conductors // Energies. 2020. Vol. 13, no. 2. P. 1–13. DOI: 10.3390/en13020411. (In Engl.).

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. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136. (In Engl.).

11. 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 «Consultant Plus» System. (In Russ.).

12. Varygina A. O., Savina N. V. Specification of the Method for Calculating the Long-Term Permissible Current of Overhead Line Conductors // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2020. P. 1–8. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112085. (In Engl.).

13. Iglesias J., Watt G., Douglass D. Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines // CIGRE. 2014. 95 p. (In Engl.).

14. IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors // IEEE. 2013. DOI: 10.1109/IEEESTD.2013.6692858. (In Engl.).

15. STO 56947007-29.240.55.143-2013. Metodika rascheta predel'nykh tokovykh nagruzok po usloviyam sokhraneniya mekhanicheskoy prochnosti provodov i dopustimyykh gabaritov vozdushnykh liniy: 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 «FGC UES»]. Moscow, 2013. 42 p. (In Russ.).

16. Karimi S., Musilek P., Knight A. M. Dynamic thermal rating of transmission lines: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 91. P. 600–612. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001. (In Engl.).

17. Hathout I., Callery K., Trac J. [et al.]. Impact of Thermal Stresses on the End of Life of Overhead Transmission Conductors // 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/PESGM.2018.8586574. (In Engl.).

18. Morteza A., Sadipour M., Fard R. S. [et al.]. A dagging-based deep learning framework for transmission line flexibility assessment // IET Renewable Power Generation. 2022. Vol. 17, no. 5. P. 1092–1105. DOI: 10.1049/rpg2.12663. (In Engl.).

19. Sarajlić M., Pihler J., Sarajlić N. [et al.]. Identification of the Heat Equation Parameters for Estimation of a Bare Overhead Conductor's Temperature by the Differential Evolution Algorithm // Energies. 2018. Vol. 11. P. 1–17. DOI: 10.3390/en11082061. (In Engl.).

20. Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnyye poteri aktivnoy moshchnosti v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh liniy elektroperedachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines] // Izvestiya Transsiba. *Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). P. 134–145. (In Russ.).

21. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov [Electricity losses. Reactive power. Electricity quality: a guide for practical calculations]. Moscow, 2016. 456 p. ISBN 978-5-93196-958-9. (In Russ.).

22. Petrova E. V. Raschet poter' elektricheskoy energii i dopustimyykh znacheniy toka v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh vozdushnykh liniy elektroenergeticheskikh sistem v usloviyakh estestvennoy konveksii s uchetom pogodnykh faktorov: svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM [Calculation of electric energy losses and allowable current values in high-temperature and self-supporting insulated conductors of overhead lines of electric power systems under conditions of natural convection with regard to weather factors: egestion certificate of a computer programme]. No. 2019619360. (In Russ.).

23. Petrova E. V. Opredeleniye poter' elektricheskoy energii i dopustimyykh znacheniy toka v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh vozdushnykh liniy s uchetom pogodnykh izmeneniy: svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM [Determination of power losses and current

carrying capacities of high-temperature and self-supporting insulated overhead line conductors, taking weather-related changes into account: registration certificate of a computer programme]. No. 2019660200. (In Russ.).

24. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A Mathematical Model of Steady-State Thermal Regime of Insulated Overhead Line Conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). 2016. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481. (In Engl.).

25. Gómez F. Á., María J. M., Puertas D. G. [et al.]. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines // World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS). 2011. P. 149–153. (In Engl.).

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

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

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: krivolapov_vladislav@mail.ru

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: vladimirkoryunov2016@yandex.ru

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

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

For citations

Petrova E. V., Girshin, S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92.

Received April 10, 2023.

© E. V. Petrova, S. S. Girshin, V. A. Krivolapov,

V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko