

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАГРУЗКИ И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

В данной статье предметом исследования являются методы расчета потерь активной мощности в воздушных линиях электроэнергетики при учете температурной зависимости активных сопротивлений. Предложен и подробно обоснован аналитический подход, основанный на методе Феррари для расчета температуры провода и потерь активной мощности в условиях вынужденной конвекции. Особенностью подхода является универсальность, выражающаяся в том, что разработанная математическая модель позволяет с единых позиций рассматривать неизолированные и изолированные провода в воздушных линиях электропередачи. Приведены результаты расчета температуры и потерь активной мощности предложенным методом, методом наименьших квадратов и итерационным методом. Отмечена высокая точность совпадения результатов, полученных различными методами.

**Ключевые слова:** температура провода, уравнение теплового баланса, вынужденная конвекция, температурная зависимость сопротивления, потери активной мощности, воздушные линии электропередачи.

**Введение.** Спрос на электрическую энергию в мире постоянно растет. Согласно прогнозу, представленному в международном обзоре энергии World Energy Outlook 2020 рост электрической генерации с 2019 по 2040 год оценивается значением 1,9 процента в год. По этому сценарию доля электроэнергии в общем объеме потребления энергии должна возрасти с 19 % в 2018 году до 24 % в 2040 году. В качестве подтверждения в табл. 1, на рис. 1 и на рис. 2 представлена информация по производству электроэнергии [1, 2] в различных регионах и в целом в мире.

Постоянный рост производства электроэнергии связан с ростом населения, которое по данным World Energy Outlook 2022 возрастет к 2050 году на 2 миллиарда человек [3].

Исключение постоянному росту производства электроэнергии представляет 2020 год. Из-за кризиса, вызванного пандемией COVID-19, снижение производства в 2020 году привело к снижению спроса на электроэнергию. Как следует из рис. 2, это первый спад с 2011 года.

В условиях ежегодного роста спроса на электроэнергию необходимо строительство новых линий электропередачи и проведение исследований по изучению подходов для повышения пропускной способности уже существующих линий электропередачи. Однако внедрение новых линий ограничено по целому ряду аспектов:

- возможности постройки;
- высокой стоимости;
- временным затратам.

По этой причине очень важны проводимые исследования по изучению увеличения пропускной способности уже эксплуатируемых линий электропередачи. К таким исследованиям следует в первую очередь отнести вопросы замены старых проводников на высокотемпературные [4–6], проблемы теплового нагрева линий электропередачи и максимально допустимое провисание проводника [7, 8].

Чрезвычайно важным вопросом является расчет потерь электрической энергии. Расчет потерь электрической энергии в проводах воздушных линий при учете температурной зависимости активных сопротивлений предполагает использование уравнений теплового баланса.

Принимаемые при расчете допущения обуславливают использование при их решении аналитических [9–13] или численных методов [14–18].

Однако при вынужденной конвекции нелинейность уравнений вызвана исключительно лучистым теплообменом.

Закон Стефана–Больцмана показывает, что интенсивность этого теплообмена зависит от четвертых степеней температур. Из-за этого уравнение теплового баланса провода при вынужденной конвекции фактически становится алгебраическим уравнением четвертой степени. Уравнения такого типа поддаются прямому аналитическому решению.

Для случая вынужденной конвекции соотношение в уравнении теплового баланса воздушной линии электроэнергетической системы можно представить в виде [19]:

Производство электроэнергии

ТВт · час	ГОД										
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Северная Америка	5293,8	5243,5	5283,1	5314,2	5318,4	5331,1	5292,2	5452,5	5406,5	5259,7	5383,5
Юж. и Центр. Америка	1181,2	1231,4	1270,3	1289,8	1298,2	1305,2	1305,7	1319	1327,3	1302,5	1364,8
Европа	4019,3	4052,2	4021,4	3937,5	3981,4	4020,4	4060,2	4063,1	3993,4	3879	4032,5
Россия	1054,9	1069,3	1059,1	1064,2	1067,5	1091	1091,2	1109,2	1118,1	1085,4	1157,1
СНГ	1308,5	1330,4	1323,7	1337,9	1340,9	1369,3	1383	1416,4	1428,8	1400,7	1488
Ближний Восток	900,4	959,1	993,5	1064,5	1121,7	1147	1204,3	1204,2	1229,3	1243	1305,6
Африка	690,3	722,5	745,5	770,1	790,5	800,1	826,6	849,7	867,6	855,1	897,5
Азиатско-Тихоокеанский регион	8875,5	9278,3	9815	10335,8	10440,9	10951,1	11575,6	12372,4	12783,7	12949,3	13994,4
МИР	22268,9	22817,5	23452,4	24049,8	24292	24924,2	25647,7	26677,3	27036,6	26889,2	28466,3

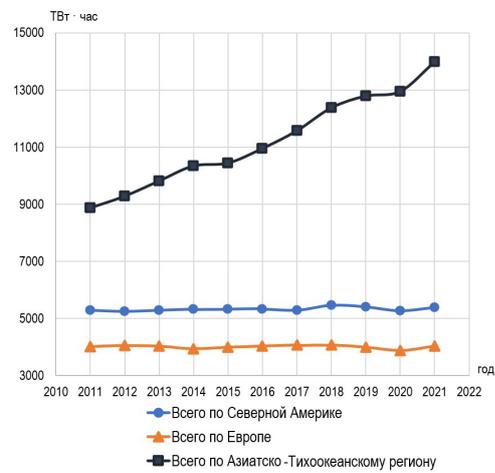
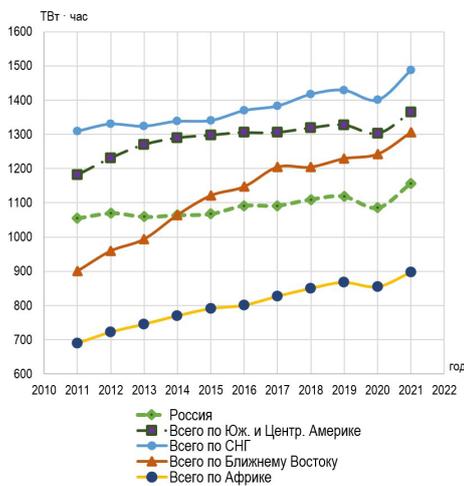


Рис. 1. Графики темпа роста генерации электрической энергии по регионам мира

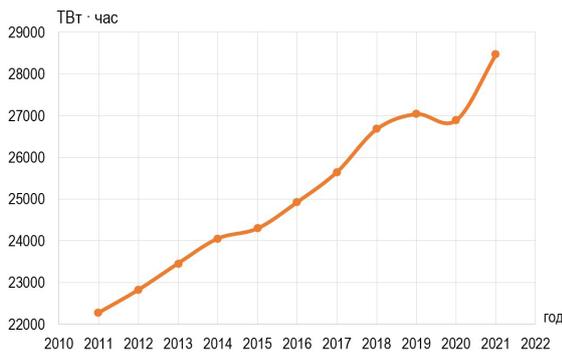


Рис. 2. График темпа роста генерации электрической энергии в мире за 2011–2021 гг.

$$\Delta P_0(1 + \alpha\theta_{внеш}) = d_{np}(1 - \alpha\Delta P_0 S_{из}) \times \left[ \begin{matrix} \pi\alpha_{вын}(\theta_{внеш} - \theta_{окр}) + \\ + \pi\varepsilon_n C_0(T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \end{matrix} \right] \quad (1)$$

где  $\Delta P_0$  — потери активной мощности на единицу длины, вычисленные при сопротивлении, приведённом к 0 °С;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления;  $\theta_{внеш}$  и  $\theta_{окр}$  — температуры поверхности провода и окружающей среды в °С;  $d_{np}$  —

диаметр провода;  $S_{из}$  — тепловое сопротивление изоляции на единицу длины провода;  $\alpha_{вын}$  — коэффициент теплоотдачи, вынужденной конвекцией;  $\varepsilon_n$  — коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) — постоянная излучения абсолютно чёрного тела;  $T_{внеш}$  и  $T_{окр}$  — абсолютные температуры поверхности провода и окружающей среды;  $A_s$  — поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения;  $q_{солн}$  — плотность потока солнечной радиации на провод.

Исследуем отдельные составляющие выражения (1).

Для удобства дальнейшего рассмотрения разделим обе части уравнения на произведение выражений  $C = (1 - \alpha\Delta P_0 S_{из})$  и  $M = (\pi d_{np} \varepsilon_n C_0)$ .

Рассмотрим левую часть уравнения (1):

$$\begin{aligned} \frac{(1 - \alpha\Delta P_0 S_{из})}{CM} &= \frac{\Delta P_0 + \alpha\Delta P_0 \theta_{внеш}}{CM} = \\ &= \frac{\Delta P_0 + \alpha\Delta P_0(T_{внеш} - 273,15)}{CM} = \\ &= \frac{\Delta P_0}{CM} + \frac{\alpha\Delta P_0 T_{внеш}}{CM} - \frac{273,15\alpha\Delta P_0}{CM} = \\ &= \frac{\Delta P_0(1 - 273,15\alpha)}{CM} + \frac{\alpha\Delta P_0 T_{внеш}}{CM}. \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим составляющие правой части. Для первой составляющей получим:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi \alpha_{вын} (\theta_{внеш} - \theta_{окр})}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = \frac{(T_{внеш} - T_{окр}) \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} = \frac{T_{внеш} \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} - \frac{T_{окр} \alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0}. \quad (3)$$

Вторую составляющую с учетом вычислений  $C$  и  $M$  представим следующим образом:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi \varepsilon_n C_0 (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4)}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = T_{внеш}^4 - T_{окр}^4. \quad (4)$$

Третья составляющая преобразуется к виду:

$$\frac{d_{np}(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) (-A_s q_{соан})}{(1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz}) \pi d_{np} \varepsilon_n C_0} = -\frac{A_s q_{соан}}{\pi \varepsilon_n C_0}. \quad (5)$$

После проведенных исследований уравнение (1) может быть представлено в виде:

$$T_{внеш}^4 + A_1 T_{внеш} + A_0 = 0, \quad (6)$$

где

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\varepsilon_n C_0} - \frac{\alpha \Delta P_0}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz})}; \quad (7)$$

$$A_0 = \frac{\Delta P_0 (273,15 \alpha - 1)}{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{uz})} - \frac{A_s q_{соан}}{\pi \varepsilon_n C_0} - \frac{\alpha_{вын} T_{окр}}{\varepsilon_n C_0} - T_{окр}^4. \quad (8)$$

Для решения уравнения четвертой степени, у которого отсутствует неизвестное третьей степени, удобно использовать аналитический метод Феррари.

Решение основано на введении вспомогательного параметра  $\beta$ , с помощью которого уравнение вида:

$$x^4 + px^2 + qx + r = 0 \quad (9)$$

при  $p = 0$  преобразуется следующим образом [20]:

$$(x^2 + \beta^2) - [2\beta x^2 - qx + (\beta^2 - r)] = 0. \quad (10)$$

Возвращаясь к уравнению с переменной  $T_{внеш}$  и учитывая, что  $q = A_1$ ,  $r = A_0$ , имеем:

$$(T_{внеш} + \beta)^2 - [(2\beta T_{внеш}^2 - A_1 T_{внеш} + (\beta^2 - A_0))] = 0. \quad (11)$$

Дополнительно значение параметра  $\beta$  должно удовлетворять требованию, при котором слагаемое в квадратных скобках соответствовало бы полному квадрату. Данное требование реализуется при равенстве дискриминанта нулю.

$$A_1^2 - 4 \cdot 2\beta(\beta^2 - A_0) = A_1^2 - 8\beta^3 - 8\beta A_0 = \beta^3 + A_0 \beta - \frac{A_1^2}{8} = 0. \quad (12)$$

Для решения получившегося относительно  $\beta$  кубического уравнения используем формулу Кардано.

Согласно подходу Кардано, решение кубического уравнения вида:

$$x^3 + Sx + k = 0 \quad (13)$$

можно находить по формуле:

$$x = \sqrt[3]{-\frac{k}{2} + \sqrt{\frac{k^2}{4} - \frac{S^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{k}{2} - \sqrt{\frac{k^2}{4} - \frac{S^3}{27}}}. \quad (14)$$

Преобразуем эту формулу для уравнения относительно параметра  $\beta$ , учитывая, что  $k = -A_1^2/8$ ;  $S = A_0$  по аналогии получим:

$$\beta = \sqrt[3]{-\left(-\frac{A_1^2}{8}\right) + \sqrt{\left(-\frac{A_1^2}{8}\right)^2 - \frac{A_0^3}{4}}} + \sqrt[3]{-\left(-\frac{A_1^2}{8}\right) - \sqrt{\left(-\frac{A_1^2}{8}\right)^2 - \frac{A_0^3}{4}}}. \quad (15)$$

После проведенных преобразований получим уравнение:

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

Найденные значения  $\beta$  позволяют решение уравнения четвертой степени свести к уравнению [20]:

$$\left(x^2 + \frac{p}{2} + \beta\right)^2 - 2\beta\left(x - \frac{q}{4\beta}\right) = 0. \quad (17)$$

С учетом условий  $p = 0$ ,  $q = A_1$ , по аналогии для уравнения (11) получим:

$$(T_{внеш}^2 + \beta)^2 - 2\beta\left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0. \quad (18)$$

Запишем его иначе:

$$(T_{внеш}^2 + \beta) = 2\beta\left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right). \quad (19)$$

Это уравнение эквивалентно двум уравнениям:

$$T_{внеш}^2 + \beta = \pm \sqrt{2\beta}\left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right). \quad (20)$$

Представим их более подробно:

$$T_{внеш}^2 + \beta + \sqrt{2\beta}\left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0; \quad (21)$$

$$T_{внеш}^2 + \beta - \sqrt{2\beta}\left(T_{внеш} - \frac{A_1}{4\beta}\right) = 0. \quad (22)$$

Преобразуем полученные уравнения к более удобному для анализа виду:

$$T_{внеш}^2 + \beta + \sqrt{2\beta}T_{внеш} - \sqrt{2\beta}\frac{A_1}{4\beta} = 0; \quad (23)$$



$$T_{внеш}^2 + \beta - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \sqrt{2\beta} \frac{A_1}{4\beta} = 0. \quad (24)$$

После сокращений имеем:

$$T_{внеш}^2 + \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta - \frac{A_1}{2\sqrt{2\beta}} = 0; \quad (25)$$

$$T_{внеш}^2 - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta + \frac{A_1}{2\sqrt{2\beta}} = 0 \quad (26)$$

ИЛИ

$$T_{внеш}^2 + \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta - \frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} = 0; \quad (27)$$

$$T_{внеш}^2 - \sqrt{2\beta}T_{внеш} + \beta + \frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} = 0. \quad (28)$$

По формулам для квадратичного уравнения находим:

$$T_{внеш,1,2} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} \pm \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}; \quad (29)$$

$$T_{внеш,3,4} = \sqrt{\frac{\beta}{2}} \pm \sqrt{-\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (30)$$

Проанализируем получившиеся четыре решения. Допустим,  $\alpha = 0$ . Это допущение означает отсутствие температурной зависимости сопротивления. Анализируя формулы (7) и (8) при  $\alpha = 0$ , получаем, что  $A_1 > 0$ , и  $A_0 < 0$ .

Выполнение условий  $A_1 > 0$  и  $A_0 < 0$  не является исключительной прерогативой соотношения  $\alpha = 0$ . Положительное значение  $A_1$  и отрицательное значение  $A_0$  имеет место и при отличии от нуля температурного коэффициента сопротивления при нормальных режимах работы воздушных линий электроэнергетических систем.

При  $A_1 > 0$ , и  $A_0 < 0$  из уравнения (16) следует, что  $\beta$  — действительное положительное число.

Приведенное выше обоснование  $A_1 > 0$  и  $\beta > 0$  означает комплексно-сопряжённые корни из уравнения (30). Поэтому они не подходят.

Необходимо также убрать из рассмотрения корень из уравнения (29), равный действительному отрицательному числу:

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} - \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (31)$$

Следовательно, температура внешней поверхности изолированного провода в большей степени соответствует формуле:

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} + \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}}. \quad (32)$$

Данное уравнение позволяет аналитически найти потери и температуру в изолированных и не изолированных проводах соответственно по уравнению:

$$\theta_{np} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 S_{уз}}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз}} = \theta_{внеш} + \Delta P S_{уз}; \quad (33)$$

$$\Delta P = \frac{\Delta P_0 (1 - \theta_{внеш})}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз}} = \Delta P_0 (1 + \alpha \theta_{np}); \quad (34)$$

Таблица 2

Исходные данные для расчёта температуры провода SAX-50

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Диаметр провода $d_{np}$	0,0127 м
Погонное активное сопротивление при 0 °С $r_0$	0,000663 Ом/м
Плотность потока солнечной радиации $q_{солн}$	526,291 Вт/м <sup>2</sup>
Абсолютная температура окружающей среды $T_{окр}$	273,15 К
Тепловое сопротивление изоляции на единицу длины $S_{из}$	0,193566 м <sup>2</sup> °С/Вт
Коэффициент теплоотдачи, вынужденной конвекцией $\alpha_{вын}$	13,3764
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	0,0043 °С <sup>-1</sup>
Степень черноты поверхности провода $\epsilon_n$	0,8
Ток в проводе $I$	200 А
Постоянная излучения абсолютно чёрного тела $C_0$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
Температура окружающей среды $\theta_{окр}$	0 °С
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения $A_s$	0,9
Скорость ветра $V$	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра $k_v$	0,5

**Расчёт параметров проводов воздушной линии электроэнергетических систем.** Применим полученные формулы для расчёта потерь и температуры в изолированном проводе SAX-50.

Исходные значения для расчёта представим в табл. 2.

Найдём потери активной мощности на единицу длины  $\Delta P_0$  для активного сопротивления  $r_0$  при 0 °С, а также другие необходимые величины:

$$\Delta P_0 = I^2 r_0 = 200^2 \cdot 0,00063 = 26,52 \text{ Вт/м}. \quad (35)$$

Коэффициенты  $A_1$  и  $A_0$  по формулам (7) и (8) соответственно будут равны:

$$A_1 = \frac{\alpha_{вын}}{\epsilon_n C_0} - \frac{\alpha \Delta P_0}{\pi d_{np} \epsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз})} = \frac{13,3764}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - \frac{0,0043 \cdot 26,52}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566)} = 2,3046 \cdot 10^8 \text{ К}^3. \quad (36)$$

$$A_0 = \frac{\Delta P_0 (273,15 \alpha - 1)}{\pi d_{np} \epsilon_n C_0 (1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз})} - \frac{A_s q_{солн}}{\pi \epsilon_n C_0} - \frac{\alpha_{вын} T_{окр}}{\epsilon_n C_0} - T_{окр}^4 = \frac{26,52(273,15 \cdot 0,0043 - 1)}{\pi \cdot 0,0127 \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566)} - \frac{0,9 \cdot 526,291}{\pi \cdot 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - \frac{13,3764 \cdot 273,15}{0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}} - 273,15^4 = -8,6826 \cdot 10^{10} \text{ К}^4. \quad (37)$$

Из формулы (16) найдём параметр  $\beta$ :

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{A_1^2}{16} + \sqrt{\frac{A_1^4}{256} - \frac{A_0^3}{27}}} =$$

Результаты сравнения потерь и температуры в проводе SAX-50 различными методами

	Метод Феррари	Метод наименьших квадратов	Итерационный метод
Температура провода $\theta_{np}$ , °C	$\theta_{np,\phi} = 60,41$	$\theta_{np,u} = 60,37$	$\theta_{np,u} = 60,4$
Потери активной мощности $\Delta P$ при $\theta_{np}$ , кВт/км	$\Delta P_{\phi} = 33,41$	$\Delta P_u = 33,4$	$\Delta P_u = 33,41$
Абсолютная погрешность расчёта температуры $\Delta\theta_{np}$ , °C	$\theta_{np,\phi} - \theta_{np,u} = 0,01$	$\theta_{np,u} - \theta_{np,u} = -0,03$	0
Относительная погрешность расчёта потерь %	$\frac{\Delta P_{\phi} - \Delta P_u}{\Delta P_u} \times 100\% = 0$	$\frac{\Delta P_u - \Delta P_u}{\Delta P_u} \times 100\% = -0,03$	0

$$= \sqrt[3]{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^2}{16} + \sqrt{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^4}{256} + \frac{(8,6826 \cdot 10^8)^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^2}{16} - \sqrt{\frac{(2,3046 \cdot 10^8)^4}{256} - \frac{(8,6826 \cdot 10^8)^3}{27}}} = 72139,2 \text{ K}^2. \quad (38)$$

Температуру внешней поверхности провода находим по формуле (32):

$$T_{внеш} = -\sqrt{\frac{\beta}{2}} + \sqrt{\frac{A_1}{\sqrt{8\beta}} - \frac{\beta}{2}} = -\sqrt{\frac{72139,2}{2}} + \sqrt{\frac{2,3046 \cdot 10^8}{\sqrt{8 \cdot 72139,2}} - \frac{72139,2}{2}} = 327,09 \text{ K}; \quad (39)$$

$$\theta_{внеш} = 327,09 - 273,15 = 53,94 \text{ °C}. \quad (40)$$

Следовательно, температура токоведущей части, согласно уравнению (33), будет равна:

$$\theta_{np} = \frac{\theta_{внеш} + \Delta P_0 S_{уз}}{1 - \alpha \Delta P_0 S_{уз}} = \frac{53,94 + 26,52 \cdot 0,193566}{1 - 0,0043 \cdot 26,52 \cdot 0,193566} = 60,41 \text{ °C}. \quad (41)$$

Полученные данные сравним с результатами потерь и температуры, полученными на основе решения уравнения теплового баланса методом наименьших квадратов [21] и итерационным методом (табл. 3).

Представленные в табл. 3 обозначения  $\theta_{np,\phi}$ ,  $\theta_{np,u}$  и  $\theta_{np,u}$  относятся к расчетам температуры соответственно в методе Феррари, методе наименьших квадратов и итерационном методе. Аналогично обозначения  $\Delta P_{\phi}$ ,  $\Delta P_u$  и  $\Delta P_u$  представляют значения потерь активной мощности определенные соответственно по методу Феррари, методу наименьших квадратов и итерационному методу.

Исходя из данных табл. 3 по значениям температуры и значениям потерь активной мощности видно, что указанные значения, найденные различными методами с высокой степенью точности, совпадают. Погрешность расчета по потерям активной мощности либо отсутствует (сравнение с итерационным методом), либо очень маленькая (0,03 % при сравнении с методом наименьших квадратов). Таким образом, рассмотренный метод обеспечивает высокую точность, позволяет с единых позиций проводить исследование неизолированных и изолированных проводов с учетом погодных условий

и нагрузки обогащает теоретическую базу для разработки технологии Smart Grid.

#### Библиографический список

1. World Energy Outlook 2020 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
2. Statistical Review of World Energy 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
3. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (дата обращения: 17.05.2023).
4. Kühnel C., Bardl R., Stengel D. [et al.]. Investigations on the mechanical and electrical behaviour of HTLS conductors by accelerated ageing tests // CIRED. 2017. Vol. 2017. P. 273–277. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0200.
5. Albizu I., Fernández E., Alberdi R. [et al.]. Adaptive Static Line Rating for Systems With HTLS Conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 2849–2855. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855805.
6. Nuchprayoon S., Chaichana A. Cost evaluation of current uprating of overhead transmission lines using ACSR and HTLS conductors // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977606.
7. Michiorri A., Nguyen H., Alessandrini S. [et al.]. Forecasting for dynamic line rating // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 52. P. 1713–1730. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134.
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. 2019. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epr.2018.11.003.
9. Воротницкий В. Э., Туркина О. В. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеословий // Электрические станции. 2008. № 10. С. 42–49.
10. Зарудский Г. К., Сыромятников С. Ю. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения // Вестник МЭИ. 2008. № 2. С. 37–42.
11. Girshin S. S., Bigun A. Ya., Kropotin O. V. [et al.]. Comparison approximate analytical solution of the nonlinear differential equation of heating with numerical // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052006.
12. Shepelev A. O., Petrova E. V., Sidorov O. A. Consideration of active resistances temperature dependency of power transformers when calculating power losses in grids // Proceedings – 2018

International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728811.

13. Kuznetsov E. A., Goryunov V. N., Girshin S. S. [et al.]. Influence of insulation on thermal behavior of overhead line conductors // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2019. V. 8, no. 1. P. 109–113. DOI: 10.18178/ijmerr.8.1.109-113.

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

15. Левченко И. И., Сацук Е. И. Нагрузочная способность и мониторинг воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях // Электричество. 2008. № 4. С. 2–8.

16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical Model of Electric Energy Losses Calculating in Crosslinked Four-Wire Polyethylene Insulated (XLPE) Aerial Bundled Cables // ELEKTRO 2016: proceeding of 11th International Conference. 2016. P. 294–299. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084.

17. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A. [et al.]. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation // Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Vol. 95, no. 6. P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2019.06.14.

18. Bigun A. Y., Sidorov O. A., Osipov D. S. [et al.]. Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. P. 1–11. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012016.

19. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Ляшков А. А. [и др.]. Аналитическое решение уравнения теплового баланса провода воздушной линии в условиях вынужденной конвекции // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 218.

20. Курош А. Г. Курс высшей алгебры: Москва: Наука, 1968. 431 с.

21. Гиршин С. С. Приближенное решение уравнения теплового баланса проводов воздушных линий при теплоотдаче естественной конвекцией // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1–1. С. 217.

**ПЕТРОВА Елена Владимировна**, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

Адрес для переписки: evpetrova2000@yandex.ru

#### Для цитирования

Петрова Е. В. Аналитический метод расчета потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом изменения нагрузки и погодных условий // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 101–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108.

Статья поступила в редакцию 22.04.2023 г.

© Е. В. Петрова

# ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING LOSSES IN OVERHEAD LINES OF ELECTRIC POWER SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT CHANGES IN LOAD AND WEATHER CONDITIONS

In this article, the subject of research is methods for calculating active power losses in electric power overhead lines, taking into account the temperature dependence of active resistances. An analytical approach based on the Ferrari method for calculating the wire temperature and active power losses under conditions of forced convection is proposed and substantiated in detail. The peculiarity of the approach is universality, which is expressed in the fact that the developed mathematical model allows us to consider non-insulated and insulated wires on power transmission lines from a single position. The results of calculating the temperature and active power losses by the proposed method, the least squares method and the iterative method are presented. The high accuracy of the coincidence of the results obtained by various methods is noted.

**Keywords:** wire temperature, heat balance equation, forced convection, temperature dependence of resistance, loss of active power, overhead power lines.

## References

1. World Energy Outlook 2020 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a72d8abf-de08-4385-8711-b8a062d6124a/WEO2020.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
2. Statistical Review of World Energy 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
3. World Energy Outlook 2022 // International energy agency. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf> (accessed: 17.05.2023). (In Engl.).
4. Kühnel C., Bardl R., Stengel D. [et al.]. Investigations on the mechanical and electrical behavior of HTLS conductors by accelerated ageing tests // CIREN. 2017. Vol. 2017. P. 273–277. DOI: 10.1049/oap-cired.2017.0200. (In Engl.).
5. Albizu I., Fernández E., Alberdi R. [et al.]. Adaptive Static Line Rating for Systems With HTLS Conductors // IEEE Transactions on Power Delivery. 2018. Vol. 33, no. 6. P. 2849–2855. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2855805. (In Engl.).
6. Nuchprayoon S., Chaichana A. Cost evaluation of current uprating of overhead transmission lines using ACSR and HTLS conductors // 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/EEEIC.2017.7977606. (In Engl.).
7. Michiorri A., Nguyen H., Alessandrini S. [et al.]. Forecasting for dynamic line rating // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 52. P. 1713–1730. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.134. (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. 2019. Vol. 167. P. 213–221. DOI: 10.1016/j.epr.2018.11.003. (In Engl.).
9. Vorotnitskiy V. E., Turkina O. V. Otsenka pogreshnostey rascheta poter' elektroenergii v VL iz-za neucheta meteoulovij [Estimation of errors in calculating electricity losses in overhead lines due to non-accounting of weather conditions] // Elektricheskiye stantsii. *Electric Stations*. 2008. No. 10. P. 42–49. (In Russ.).
10. Zarudskiy G. K., Syromyatnikov S. Yu. Utochneniye vyrazheniy dlya rascheta temperatury provodov vozdushnykh liniy elektroperedachi sverkhvysokogo napryazheniya [More precise expressions for temperature calculation of EHV electrical transmission overhead lines] // Vestnik MEI. *Bulletin of MPEI*. 2008. No. 2. P. 37–42. (In Russ.).
11. Girshin S. S., Bigun A. Ya., Kropotin O. V. [et al.]. Comparison approximate analytical solution of the nonlinear differential equation of heating with numerical // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/5/052006. (In Engl.).
12. Shepelev A. O., Petrova E. V., Sidorov O. A. Consideration of active resistances temperature dependency of power transformers when calculating power losses in grids // Proceedings – 2018 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2018. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM.2018.8728811. (In Engl.).
13. Kuznetsov E. A., Goryunov V. N., Girshin S. S. [et al.]. Influence of insulation on thermal behavior of overhead line conductors // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2019. Vol. 8, no. 1. P. 109–113. DOI: 10.18178/ijmerr.8.1.109-113. (In Engl.).
14. Gerasimenko A. A., Shul'gin I. V., Timofeyev G. S. Kompleksnyy uchet rezhimno-atmosfernykh faktorov v raschete aktivnogo soprotivleniya i poter' elektroenergii v LEP [Comprehensive accounting of regime-atmospheric factors

in the calculation of active resistance and power losses in power lines] // Optimizatsiya rezhimov raboty elektricheskikh system. *Optimization of Operating Modes of Electrical Systems*. Krasnoyarsk, 2008. P. 188–206. (In Russ.).

15. Levchenko I. I., Satsuk E. I. Nagruzochnaya sposobnost' i monitoring vozduzhnykh liniy elektroperedachi v ekstremal'nykh pogodnykh usloviyakh [Loading capacity and monitoring of overhead power transmission lines under extreme weather conditions] // *Elektrichestvo. Electricity*. 2008. No. 4. P. 2–8. (In Russ.).

16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical Model of Electric Energy Losses Calculating in Crosslinked Four-Wire Polyethylene Insulated (XLPE) Aerial Bundled Cables // *ELEKTRO 2016: proceeding of 11th International Conference*. 2016. P. 294–299. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084. (In Engl.).

17. Kropotin O., Tkachenko V., Shepelev A. [et al.]. Mathematical model of XLPE insulated cable power line with underground installation // *Przeglad Elektrotechniczny*. 2019. Vol. 95, no. 6. P. 77–80. DOI: 10.15199/48.2019.06.14. (In Engl.).

18. Bigun A. Y., Sidorov O. A., Osipov D. S. [et al.]. Mode and climatic factors effect on energy losses in transient heat modes of transmission lines // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 944. P. 1–11. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012016. (In Engl.).

19. Petrova E. V., Girshin S. S., Lyashkov A. A. [et al.]. Analiticheskoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provoda vozduzhnoy linii v usloviyakh vyzhdennoy konveksii [The analytical decision of the equation of thermal balance of the wire of the air-line in the conditions of compelled convection] //

*Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education*. 2013. No. 1–1. P. 218. (In Russ.).

20. Kurosh A. G. Kurs vysshey algebry [Higher Algebra course]. Moscow, 1968. 431 p. (In Russ.).

21. Girshin S. S. Priblizhennoye resheniye uravneniya teplovogo balansa provodov vozduzhnykh liniy pri teplootdache estestvennoy konveksii [The approached decision of the equation of thermal balance of wires of air-lines at the heat transferrational convection] // *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya. Modern Problems of Science and Education*. 2015. No. 1–1. P. 217. (In Russ.).

---

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

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

Correspondence address: [evpetrova2000@yandex.ru](mailto:evpetrova2000@yandex.ru)

#### For citations

Petrova E. V. Analytical method for calculating losses in overhead lines of electric power systems taking into account changes in load and weather conditions // *Omsk Scientific Bulletin. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 3 (187). P. 101–108. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-101-108.

Received April 24, 2023.

© E. V. Petrova