

АЛГОРИТМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТЕРЬ В ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ

Петрова Е.В.¹, Гиришин С.С.¹, Горюнов В.Н.¹, Бубнов А.В.¹, Кузнецов Е.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (индекс, 644050, Омск, просп. Мира, 11), e-mail: stansg@mail.ru

Современное состояние электроэнергетики характеризуется стабильными темпами роста электропотребления. В этих условиях важно иметь возможность достоверно определять допустимую токовую нагрузку и уровень технологических потерь электрической энергии. Расчет потерь активной мощности является критерием для выбора мероприятий по их уменьшению. Оптимизация мероприятий и определение срока их окупаемости требует повышение точности расчета потерь и учета более широкого круга факторов. Успешно используемые в настоящее время практики нахождения потерь метода не в полной мере учитывают всю гамму факторов, влияющих на величину потерь. Одним из факторов, который, как правило, не учитывается вовсе либо учитывается частично, является температурная зависимость сопротивления. В статье исследуются вопросы расчета потерь электрической энергии в изолированных и неизолированных проводах воздушных линий с учетом температуры токопроводящих жил.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, температура провода, алгоритм, температурная зависимость, потери электроэнергии.

LOSSES PREDICTION ALGORITHM IN OVERHEAD LINESWIRES WITH A TEMPERATURE

Petrova E.V.¹, Girshin S.S.¹, Goryunov V.N.¹, Bubnov A.V.¹, Kuznetsov E.A.¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia (644050, Omsk, street Mira, 11), e-mail: stansg@mail.ru

The current state of the electric power industry is characterized by stable growth in electricity consumption. Under these conditions, it is important to be able to reliably determine the ampacity and the level of technological losses of electric energy. Calculation of active power losses is the criterion for the selection of measures to reduce them. Optimization of activities and determine payback period requires improving the accuracy of calculation of losses and accounting broader range of factors. Successfully used in the current practice of finding loss method does not fully take into account the whole range of factors that affect the magnitude of the losses. One of the factors which are generally not considered at all, or partially counted, is the temperature dependence of resistance. The article examines the problems of calculating electric power losses in insulated and uninsulated wires of overhead lines, taking into account the temperature of conductors.

Keywords: overhead power lines, conductor temperature, algorithm, the temperature dependence, loss of electricity

При определении технологических потерь электрической энергии в электрических сетях необходимо учитывать температуру провода [2, 4, 5]. На кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета создан комплекс программ Ом1, позволяющий определять температуру проводов и, с ее учетом, потери электрической энергии в воздушных линиях электропередачи по четырем методам расчета. Приведенный анализ показал целесообразность использования двух подходов, основанных на методах №1 (У) [3] и №4 [6]. Метод №1 (У) для расчета неизолированных проводов представляет усовершенствованную версию, отличающуюся от исходной (метод №1 [1]) использованием уравнений (1, 2).

$$I = \sqrt{\frac{\varepsilon C_0 [(273 + t_{np})^4 - (273 + t_g)^4] \pi d + \alpha_k (t_{np} - t_g) \pi d}{0,95 R_{20} (1 + 0,00403 (t_{np} - 20))}}, \quad (1)$$

$$t_{np} = a_2 I^4 + b_2 I^2 + c_2, \quad (2)$$

где t_{np} – температура провода, °С, t_g – температура воздуха, °С, d – диаметр провода, м, R_{20} – сопротивление провода при температуре 20°С, α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией, ε – степень черноты поверхности провода, C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), – мощность нагрева 1 м провода солнечным излучением, a_2, b_2, c_2 – коэффициенты аппроксимации.

Уравнения (1, 2) являются базовыми для разработанного алгоритма (метод №1(У), программа Ом1.1) расчета потерь, представленного на рисунке 1.

Метод №4 обладает более широкими возможностями, чем метод №1(У). Он позволяет находить потери в изолированных и неизолированных проводах. Представленный на рисунке 2 алгоритм (метод №4, программа Ом1.2) соответствует произвольному изменению условий эксплуатации проводов и варианту, когда коэффициенты теплоотдачи теплового излучения и конвекции зависят от температуры наружной поверхности провода, т.е. $\alpha_k(t_{нар})$ и $\alpha_u(t_{нар})$. Нахождение температуры для изолированных проводов в этом случае может быть получено итерационным методом на основе уравнения:

$$t_{нар}^{[k+1]} = t_g + \frac{K_s + \Delta P_{20} (1 - 20\alpha) (1 + \alpha t_g)}{F_{ног} [1 - \alpha S_{из} \Delta P_{20} (1 - 20\alpha)] \cdot [\alpha_k(t_{нар}^{[k]}) + \alpha_u(t_{нар}^{[k]})] - \alpha \Delta P_{20} (1 - 20\alpha)} \quad (3)$$

где k – номер итерации; t_g – температура окружающей среды (воздуха), °С; $\Delta P_{20} = I^2 R_{20}$ – потеря активной мощности при температуре 20 °С, Вт/м; $F_{ног}$ – площадь поверхности проводника, м²; $t_{нар}$ – температура наружной поверхности изоляции провода, °С.

Коэффициент K_s определяется выражением:

$$K_s = P_s (1 - \alpha S_{из} \Delta P_{20} (1 - 20\alpha)), \quad (4)$$

где $S_{из} = (2\pi\lambda_{из})^{-1} \ln(r_2/r_1)$ – тепловое сопротивление изоляции; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции; P_s – мощность притока теплоты на единицу длины и в единицу времени солнечной радиацией.

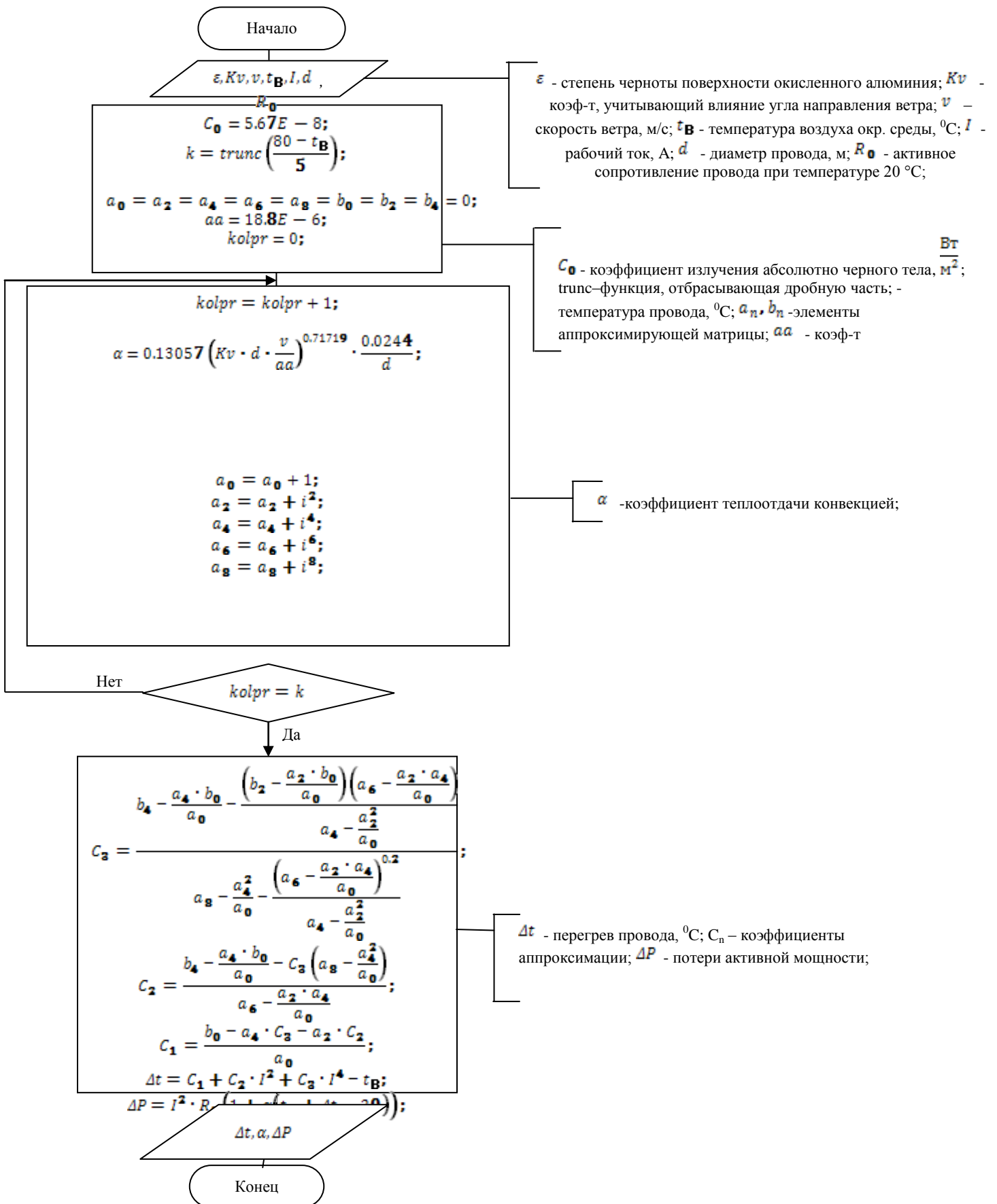


Рис. 1. Алгоритм расчета программы Ом1.1

Начало

$d, t_{\text{B}}, l, \delta, \varepsilon, R_{\text{a}}, K_{\text{v}}, v$

$lim = 1000; g = 9.80665;$
 $C_{\text{a}} = 0.000000057; \quad \alpha = 0.00403;$
 $C_{\text{p}} = 1005; \quad Y_{\text{a}} = 0.0244;$
 $n_{\text{a}} = 0.0000172; \quad P_{\text{a}} = 100000;$
 $R_{\text{d}} = 287.05;$

$$T_{\text{B}} = t_{\text{B}} + 273;$$
$$T = t + 273;$$
$$\alpha_{\text{л}} = \varepsilon \cdot C_{\text{a}} \cdot \frac{T^4 - T_{\text{B}}^4}{\Delta t};$$
$$Gr = \frac{\frac{1}{T_{\text{B}}} \cdot \Delta t \cdot d^3 \cdot g}{\left(\frac{n_{\text{a}} \sqrt{\frac{T_{\text{B}}}{273.15}}}{\frac{P_{\text{a}}}{[(R)_{\text{d}} \cdot T_{\text{B}}]}} \right)^2};$$

$$Nu = 0.54 \cdot \sqrt[4]{Gr} \cdot \sqrt[4]{n_{\text{a}} \cdot \frac{T_{\text{B}}}{273.15} \cdot \frac{C_{\text{p}}}{Y_{\text{a}}}};$$

$$\alpha_{\text{к}} = Nu \cdot Y_{\text{a}} \cdot \sqrt{\frac{T_{\text{B}}}{273.15}} \cdot \frac{1}{d};$$
$$ban = ban + 1;$$

$ban > lim$

Да

Нет

Нет

$check < \delta$

Да

В

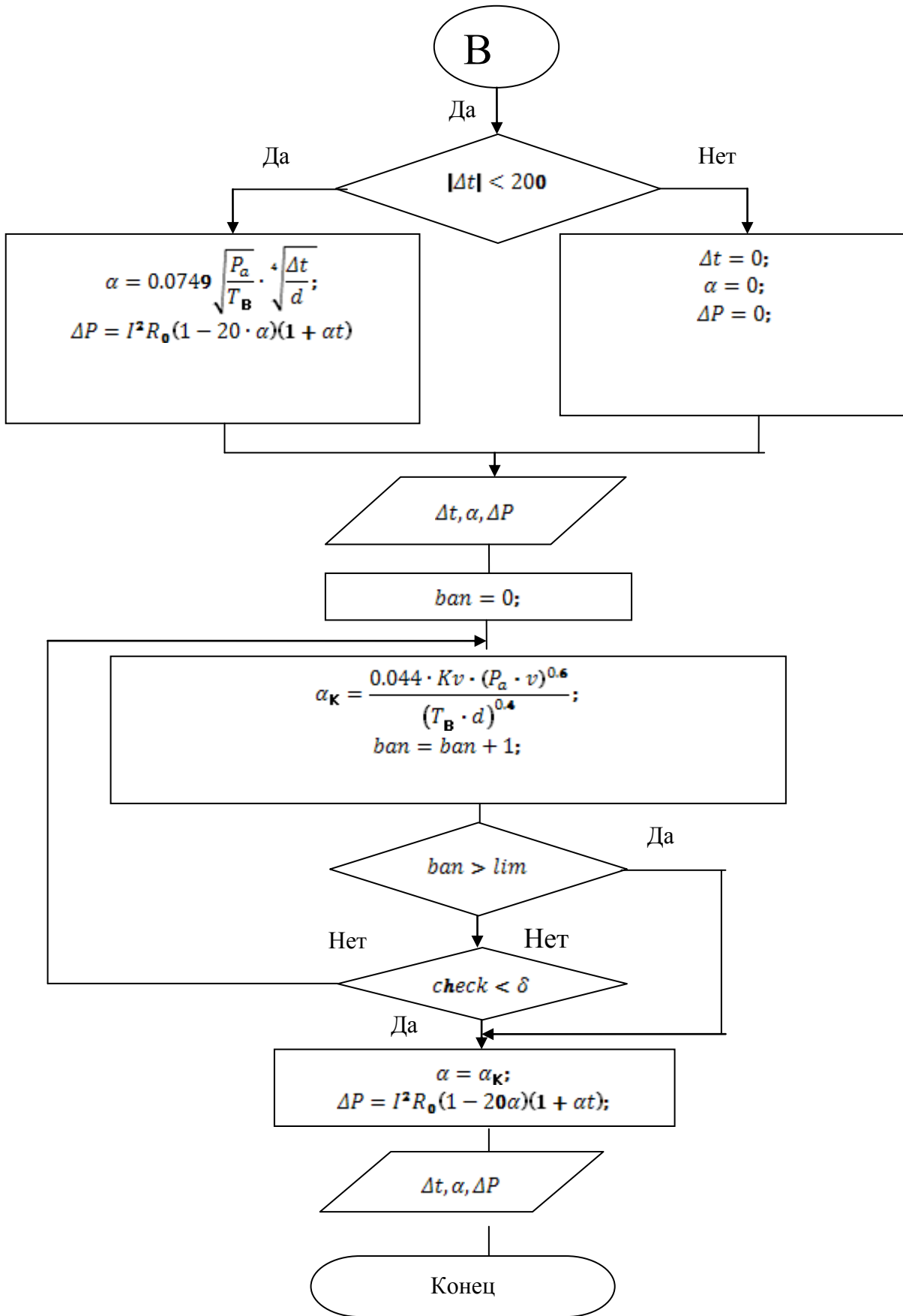


Рис. 2. Алгоритм расчета программой Ом1.2

Выражение (3) для неизолированных проводов ($S_{из} = 0$) упрощается и, соответственно, преобразуется к уравнению:

$$t_{np}^{[k+1]} = t_g + \frac{P_s + \Delta P_{20}(1 - 20\alpha)(1 + \alpha t_g)}{F_{нов}[\alpha_k(t_{np}^{[k]}) + \alpha_u(t_{np}^{[k]})] - \alpha \Delta P_{20}(1 - 20\alpha)} \quad (5)$$

Наиболее высокая точность определения α_u реализована по закону Стефана-Больцмана:

$$\alpha_u = \varepsilon_n C_0 \frac{T_{внеш}^4 - T_g^4}{\Delta t_{нар}} = 4,56 \cdot 10^{-8} \frac{T_{внеш}^4 - T_g^4}{\Delta t_{нар}}, \quad (6)$$

где $T_{внеш}$ – абсолютная температура поверхности изоляции, К; T_g – абсолютная температура воздуха, К; $\Delta t_{нар} = T_{внеш} - T_g$, К.

Исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена и критериев Нуссельта и Прандтля, выведено уравнение коэффициента теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекциях для изолированных и неизолированных проводов с учетом атмосферного давления:

$$\alpha_{k6} = 0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_g}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{d}}, \quad \alpha_{k7} = 0,044 \frac{k_v \cdot (P \cdot v)^{0,6}}{(T_g d)^{0,4}} \quad (7)$$

где P – атмосферное давление, Па; k_v – коэффициент угла атаки ветра; v – скорость ветра.

Достоверность расчетов по входящим в состав комплекса Ом1 программ Ом1.1 и Ом1.2 проведена на основании сравнения с расчетами, основанными на стандартах CIGRE, IEEE и МКЭ [7]. Численное моделирование было проведено для провода марки 429-AL1/56-ST1 A/.

Условия численного эксперимента: провод 429-AL1/56-ST1 A (диаметр $d = 28,6 \cdot 10^{-3}$ м, $R_{20} = 0,0674$ Ом/м); токовая нагрузка 600 А; температурный коэффициент электрического сопротивления $\alpha = 0,00403$ град⁻¹; степень черноты поверхности провода $\varepsilon = 0,5$; поправочный коэффициент на угол атаки ветра $k_v = 0,1$; температура воздуха $t_g = 40^\circ\text{C}$; скорость ветра 2 м/с; солнечная радиация 980 Вт/м²; высота над уровнем моря 300 м; Расчеты по методу №4 проводились с предположением наличия вынужденной конвекции.

Приведенные в таблице 1 обозначения расшифровываются следующим образом: CIGRE – метод, основанный на стандарте расчета линий электропередач, разработанный Международным Советом по большим электроэнергетическим системам; IEEE – метод, основанный на стандарте расчета линий электропередач, разработанный Институтом инженеров электротехники и электроники; МКЭ – метод расчета температуры проводника, основанный на современном численном методе – методе конечных элементов.

Результаты сравнения приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты сравнения

Метод	Без учета солнечной радиации				С учетом солнечной радиации				
	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{CIGRE}, \%$	$\Delta t_{IEEE}, \%$	$\Delta t_{МКЭ}, \%$	$t_{np}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{CIGRE}, \%$	$\Delta t_{IEEE}, \%$	$\Delta t_{МКЭ}, \%$	$\Delta t_i, \%$
CIGRE	–	–	–	–	55,70	0,00	4,50	3,15	3,57
IEEE	–	–	–	–	53,30	4,31	0,00	1,30	0,89
МКЭ	–	–	–	–	54,00	3,05	1,31	0,00	0,41
№1(У)	47,40	14,90	11,10	12,20	51,50	7,54	3,38	4,63	4,24
№4	49,40	11,30	7,32	8,52	54,40	2,33	2,06	0,74	1,15

Наряду с величинами температуры провода, в таблицах представлены значения отклонений температур, определяемые по формулам:

$$\Delta t_{CIGRE} = \frac{t_{np,i} - t_{np,CIGRE}}{t_{np,CIGRE}} 100\%, \quad \Delta t_{IEEE} = \frac{t_{np,i} - t_{np,IEEE}}{t_{np,IEEE}} 100\%, \quad (8)$$

$$\Delta t_{МКЭ} = \frac{t_{np,i} - t_{np,МКЭ}}{t_{np,МКЭ}} 100\%, \quad \Delta t_i = \frac{t_{np,i} - t_{cp}}{t_{cp}} 100\%. \quad (9)$$

где $t_{np,CIGRE}$ – значение температуры провода, найденное по методу CIGRE; $t_{np,IEEE}$ – значение температуры провода, найденное по методу IEEE; $t_{np,МКЭ}$ – значение температуры провода, найденное по методу МКЭ; $t_{np,i}$ – значение температуры провода, определяемое соответствующим методом, Δt_i – отклонение от среднего значения температуры для i-го метода.

Вывод: результаты расчетов по всем методам с учетом солнечной радиации близки друг к другу, что свидетельствует о возможности практического применения всех методов.

Список литературы

1. Воротницкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий[Текст] / В.Э. Воротницкий, О. В. Туркина // Электрическиестанции. – 2008. - № 10. – С. 42-49.

2. Гиршин, С. С., Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / С.С. Гиршин, А. А. Бубенчиков, В.Н. Горюнов [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. - № 3(83). – С. 171-175.Электротехника. – 1992. - № 12. – С. 54-58.
3. Дед, А. В. Повышение точности расчета технологических потерь электрической энергии в ВЛ на основе учета режимных и климатических факторов [Текст]/ А.В. Дед, В.Н. Горюнов, С.С. Гиршин // Омский научный вестник. – 2010. - № 1(87). – С. 114-119. Е.В. Петрова [и др.]. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012.
4. Инструкция по организации в Министерстве энергетики РФ работы по расчету и обоснованию нормативов технологических потерь электроэнергии при её передаче по электрическим сетям. Утв. Приказом Минэнерго РФ № 326 от 30.12.2008. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kuzenergo.com/normativy_poter_elektroenergii (дата обращения: 20.01.2013).
- 5.Петрова, Е. В. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности[Текст] / Е. В. Петрова, С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, Д. Е. Христин //Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. - № 1. – С. 284-291.
6. Петрова, Е. В. Математические модели для анализа потерь мощности в проводах воздушных линий с учетом температуры токопроводящих жил [Текст]/ Е. В. Петрова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2011. - № 2. – С. 306-309.
7. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines, F. Alvarez Gomez, J. M. Garcia De Maria, D. Garcia Puertas, A. Bairi, R. GranizoArrabe, World Scientific and Engineering Academy and Society, p 143-153, USA 2011.

Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г.Омск;

Черемисин В.Т., д.т.н., профессор, директор Научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте (НИИЭ ОмГУПС), заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.