

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ПО БАЗОВОМУ И ПРИБЛИЖЕННОМУ УРАВНЕНИЯМ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Горюнов В.Н., Гиршин С.С., Кузнецов Е.А., Петрова Е.В.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, пр-т Мира, 11), e-mail: kuznetsov_e_a@mail.ru

В настоящее время необходимо учитывать температуру проводов для более точного определения их активных сопротивлений и потерь активной мощности, а также для контроля пропускной способности линий электропередачи. Дан вывод упрощенного решения уравнения теплового баланса для температуры провода для случая естественной конвекции. Упрощенное уравнение было получено путем аппроксимации исходного уравнения по методу наименьших квадратов. Проведено исследование достоверности расчета температуры и потерь активной мощности для неизолированного провода выбранной марки. Показана приемлемая для практического применения точность расчета температуры неизолированного провода, рассчитанной по упрощенной методике, по сравнению с исходным уравнением и стандартом CIGRE. Таким образом, для нахождения температуры провода теперь не требуются специальные компьютерные программы, есть возможность решения обратных задач, нет затруднений при анализе результатов.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи, температура провода, уравнение теплового баланса, температурная зависимость, потери электроэнергии.

THE ANALYSIS OF TEMPERATURE CALCULATION ERROR AND POWER LOSSES IN CONSIDERING BASIC AND APPROXIMATE HEAT BALANCE EQUATIONS OF OVERHEAD POWER LINES

Gorunov V.N., Girshin S.S., Kuznecov E.A., Petrova E.V.

Federal State Educational Government-financed Institution of Higher Professional Education «Omsk State Technical University», Omsk, Russian Federation (644050, Omsk, pr-t Mira, 11), e-mail: kuznetsov_e_a@mail.ru

It is now necessary to take into account the temperature wires for a more accurate determination of their resistances and active power losses, as well as to control capacity of transmission lines. The simplified solution of the heat balance equation was derived for wire temperature in the case of natural convection. The simplified equation was obtained by fitting the original equation by the least squares method. Study of the temperature calculation reliability and active power losses was carried out for the selected mark of bare wire. Acceptable for the practical application of the bare overhead conductors temperature calculation accuracy is shown in the paper and temperature is calculated according to the simplified method compared with the original equation and CIGRE standard. To find the temperature no longer need a special computer program, there is a possibility of solving inverse problems, there is no difficulty in analyzing the results.

Keywords: overhead power lines, conductor temperature, heat balance equation, temperature dependence, loss of electricity.

При расчете потерь электрической энергии все чаще обосновывается необходимость учета температурной зависимости активных сопротивлений [1–7]. Такой подход предполагает вычисления значений температур элементов электрической сети на основе использования уравнения теплового баланса. С целью упрощения базового уравнения в условиях вынужденной конвекции в работе [5] использовался метод наименьших квадратов. В данной работе метод применяется в условиях естественной конвекции и изложены результаты проверки полученных соотношений.

Уравнение теплового баланса может быть представлено в следующем виде [5]:

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

где $T_{внеш}$ и $T_{окр}$ – абсолютные температуры внешней поверхности провода и окружающей среды; $\alpha_{кон}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, причем для случая вынужденной конвекции берется коэффициент вынужденной конвекции $\alpha_{вын}$, а для случая естественной конвекции – коэффициент естественной конвекции $\alpha_к$; α – температурный коэффициент сопротивления; ε_n – коэффициент черноты поверхности провода для инфракрасного излучения; $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная излучения абсолютно черного тела; $\Theta_{внеш}$ – температура поверхности провода в °С; A_s – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения; $q_{солн}$ – плотность потока солнечной радиации на провод; $d_{пр}$ – диаметр провода; $\Delta P'_0$ – потери активной мощности в проводе на единицу длины при $\Theta_{внеш} = 0$ °С, равные [5]:

$$\Delta P'_0 = \frac{I^2 r_0}{1 - \alpha I^2 r_0 S_{из}}, \quad (2)$$

где I – ток в проводе; r_0 – погонное активное сопротивление при °С; $S_{из}$ – погонное тепловое сопротивление изоляции.

Используем выражение для коэффициента теплоотдачи естественной конвекцией, полученное в [4]:

$$\alpha_к = 0,0749 \sqrt{\frac{P_a}{T_{окр}}} \cdot \sqrt[4]{\frac{T_{внеш} - T_{окр}}{d_{пр}}}, \quad (3)$$

где P_a – атмосферное давление.

Подставив (3) в (1), имеем:

$$\Delta P'_0(1 + \alpha \Theta_{внеш}) = A_к (T_{внеш} - T_{окр})^{5/4} + A_л (T_{внеш}^4 - T_{окр}^4) - d_{пр} A_s q_{солн}, \quad (4)$$

где:

$$A_к = 0,0749 \pi d_{пр}^{3/4} \sqrt{\frac{P_a}{T_{окр}}}, \quad (5)$$

$$A_л = \pi d_{пр} \varepsilon_n C_0. \quad (6)$$

Расписав в (4) $T_{внеш}^4$ по формуле:

$$T_{внеш}^4 = (T_{окр} + \Delta \Theta)^4 = \Delta \Theta^4 + 4 T_{окр} \Delta \Theta^3 + 6 T_{окр}^2 \Delta \Theta^2 + 4 T_{окр}^3 \Delta \Theta + T_{окр}^4, \quad (7)$$

и применив метод наименьших квадратов, после преобразований получим уравнение:

$$A_2 (\Theta_{внеш} - \Theta_{окр})^2 + A_1 (\Theta_{внеш} - \Theta_{окр}) + A_0 = 0, \quad (8)$$

где $\Theta_{окр}$ – температура окружающей среды в °С.

В (8) введены следующие обозначения:

$$A_2 = 6A_l \left(\frac{2}{7} \Delta\Theta_\delta^2 + T_{окр} \Delta\Theta_\delta + T_{окр}^2 \right) + \frac{200}{663} A_k \Delta\Theta_\delta^{-3/4}, \quad (9)$$

$$A_1 = 4A_l \left(T_{окр}^3 - \frac{8}{35} \Delta\Theta_\delta^3 - \frac{3}{5} T_{окр} \Delta\Theta_\delta^2 \right) + \frac{160}{221} A_k \Delta\Theta_\delta^{1/4} - \alpha \Delta P'_0, \quad (10)$$

$$A_0 = \frac{A_l \Delta\Theta_\delta^3}{5} \left(\frac{3}{7} \Delta\Theta_\delta + T_{окр} \right) - \frac{4}{221} A_k \Delta\Theta_\delta^{5/4} - A_s d_{пр} q_{солн} - \Delta P'_0 (1 + \alpha \Theta_{окр}). \quad (11)$$

Уравнение (8) представляет собой уравнение теплового баланса провода, приведенное к квадратичному виду. Его решение имеет вид:

$$\Theta_{внеш} = \Theta_{окр} + \frac{\sqrt{A_1^2 - 4A_0A_2} - A_1}{2A_2}. \quad (12)$$

Второй корень уравнения является посторонним, поскольку может давать $\Theta_{внеш} < \Theta_{окр}$, что противоречит физическому смыслу решаемой задачи.

Потери активной мощности на единицу длины провода равны:

$$\Delta P = \Delta P'_0 (1 + \alpha \Theta_{внеш}). \quad (13)$$

Температура токоведущей жилы:

$$\Theta = \Theta_{внеш} + S_{из} \Delta P. \quad (14)$$

Верхнюю границу диапазона преобразования для неизолированных проводов зададим соотношением:

$$\Delta\Theta_\delta = \Theta_{доп} - \Theta_{окр}, \quad (15)$$

где $\Theta_{доп}$ – допустимая температура токоведущей жилы.

Для проверки достоверности расчетов приведем результаты сравнительных расчетов температуры, вычисленной по приближенному уравнению (12) и исходному уравнению (1), а также по международному методу CIGRE [8], созданному на основе стандарта расчета линий электропередачи, разработанного Международным Советом по большим электроэнергетическим системам. Расчет потерь активной мощности производился по формуле (13).

Вычисление по уравнению (1) производилось на основе использования метода последовательных приближений при условии вынужденной конвекции.

Для провода марки 429-AL1/56-ST1 исходные данные (за исключением тока и скорости ветра) приведены в таблице 1 [9], а результаты расчетов – в таблице 2.

Глобальная солнечная радиация рассчитывалась по следующей формуле:

$$q_{солн} = k_{зм} q_{s,np} \sin \varphi_s + \pi q_{s,расс} , \quad (16)$$

где $q_{s,np}$ – плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам; $q_{s,расс}$ – плотность потока рассеянной солнечной радиации, осредненная по всем направлениям; $k_{зм}$ – понижающий коэффициент, учитывающий затененность участков провода (коэффициент затененности); φ_s – угол между осью провода и направлением солнечных лучей.

Расчет прямой и рассеянной составляющих солнечной радиации для исходного уравнения (1) проводился с учетом высокогорной местности, для которой можно приближенно принять соотношение прямой и рассеянной составляющих солнечной радиации 1/11. С учетом этого из [9] возьмем значение прямой составляющей $q_{s,np} = 900$ Вт/м², а рассеянной $q_{s,расс} = 80$ Вт/м². Коэффициент затененности принят $k_{зм}=0,6$, а угол между осью провода и направлением солнечных лучей $\varphi_s = \pi/4$.

Для удобства анализа введены обозначения:

$\Delta\Theta_{np}^{ucx}$, $\Delta\Theta_{np}^{cigre}$ – абсолютные погрешности расчета температуры провода приближенным методом;

$\Delta\Theta_{ucx}^{cigre}$ – абсолютная погрешность расчета температуры провода по исходному уравнению (1);

$\delta(\Delta P_{ucx})$, $\delta(\Delta P_{cigre})$ – относительная погрешность расчета потерь мощности по приближенному уравнению (12) по сравнению с расчетами по исходному уравнению (1) и зарубежному методу CIGRE;

$\delta(\Delta P_{ucx}^{cigre})$ – относительная погрешность расчета потерь мощности по исходному уравнению (1) по сравнению с методом CIGRE.

Погрешности определялись по следующим формулам:

$$\Delta\Theta_{np}^{ucx} = \Theta_{np}^{annp} - \Theta_{np}^{ucx} , \quad (17)$$

$$\Delta\Theta_{np}^{cigre} = \Theta_{np}^{annp} - \Theta_{np}^{cigre} , \quad (18)$$

$$\Delta\Theta_{ucx}^{cigre} = \Theta_{np}^{ucx} - \Theta_{np}^{cigre} , \quad (19)$$

$$\delta(\Delta P_{ucx}) = \frac{\Delta P_{annp} - \Delta P_{ucx}}{\Delta P_{ucx}} \cdot 100 , \quad (20)$$

$$\delta(\Delta P_{cigre}) = \frac{\Delta P_{annp} - \Delta P_{cigre}}{\Delta P_{cigre}} \cdot 100 , \quad (21)$$

$$\delta(\Delta P_{ucx}^{cigre}) = \frac{\Delta P_{ucx} - \Delta P_{cigre}}{\Delta P_{cigre}} \cdot 100, \quad (22)$$

где Θ_{np}^{annp} – значение температуры провода по приближенному уравнению (12), °С; Θ_{np}^{ucx} – температура провода по исходному уравнению (1), °С; Θ_{np}^{cigre} – температура провода по методу CIGRE, °С; ΔP_{annp} – активные потери мощности, рассчитанные с помощью приближенного метода, Вт/м; ΔP_{ucx} – активные потери мощности, рассчитанные с помощью исходного метода, Вт/м; ΔP_{cigre} – активные потери мощности, рассчитанные с помощью метода CIGRE, Вт/м.

Таблица 1

Исходные данные для решения уравнений теплового баланса

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Погонное активное сопротивление при 0 °С r_0	0,0000624 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления α	0,00403 °С ⁻¹
Диаметр провода d_{np}	0,0286 м
Коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией при первом варианте расчета $\alpha_{вын}$	6,1557 Вт/(м ² ·К)
Коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией при втором варианте расчета $\alpha_{вын}$	9,3303 Вт/(м ² ·К)
Степень черноты поверхности провода ε_n	0,5
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,5
Температура окружающей среды $\Theta_{окр}$	40 °С
Суммарная солнечная радиация $q_{солн}$	632,9 Вт/м ²
Допустимая температура токоведущей жилы $\Theta_{дон}$	90 °С
Атмосферное давление на высоте 1600 м, кПа	81,3

При этих данных по формуле (15) получаем $\Delta\Theta_{\partial} = 50$ °С.

Таблица 2

Результаты решения уравнений теплового баланса

I, A		600	650
Скорость ветра, м/с		0,2	0,4
Расчет по приближенному уравнению (12)	$\Theta_{np}^{annp}, ^\circ C$	81,8	86,0
	$\Delta P_{annp}, \text{Вт/м}$	29,86	35,49
Расчет по исходному уравнению (1) для вынужденной конвекции	$\Theta_{np}^{ucx}, ^\circ C$	77,5	76,0
	$\Delta P_{ucx}, \text{Вт/м}$	29,47	34,42
Расчет по методу CIGRE	$\Theta_{np}^{cigre}, ^\circ C$	78,8	74,0
	$\Delta P_{cigre}, \text{Вт/м}$	29,59	34,21
	$\Delta\Theta_{np}^{ucx}, ^\circ C$	4,3	10,0

Погрешности	$\Delta\Theta_{np}^{cigre}, ^\circ\text{C}$	3,0	12,0
	$\Delta\Theta_{ucx}^{cigre}, ^\circ\text{C}$	1,3	2,0
	$\delta(\Delta P_{ucx}), \%$	1,32	3,11
	$\delta(\Delta P_{cigre}), \%$	0,91	3,74
	$\delta(\Delta P_{ucx}^{cigre}), \%$	-0,41	0,61

Как следует из таблицы 2, несоответствие температуры, найденной для скорости ветра 0,2 м/с по приближенному уравнению для естественной конвекции, по сравнению с исходным уравнением для вынужденной и методом CIGRE, не превышает 5°C. Необходимо отметить, что приближенное уравнение достаточно точно определяет температуру провода при низкой скорости ветра, когда конвекцию можно считать естественной. В то же время при скорости ветра 0,4 м/с наблюдаются более существенные отличия: погрешности нахождения температуры провода по приближенному методу больше 10 °С. Этот факт обусловлен не погрешностями аппроксимации, а тем, что данный метод не учитывает скорость ветра; при расчете по исходному уравнению для вынужденной конвекции, то есть с учетом скорости ветра, погрешность относительно метода CIGRE снижается до 2 °С. Что касается определения потерь активной мощности, то, как следует из таблицы 2, для этой цели предлагаемый приближенный метод может быть реализован с высокой точностью. Исходное уравнение показывает высокую точность по сравнению с зарубежным методом CIGRE: относительная погрешность потерь активной мощности не превышает 1 %.

Список литературы

1. Анализ распределения температуры по сечению самонесущих изолированных проводов / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – № 3. – С. 171-175.
2. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2009. – № 3. – С. 176-179.
3. Расчет погрешностей определения электрической энергии в проводах повышенной пропускной способности из-за неучета атмосферных и режимных факторов / Е.В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 2. – С. 191-197.
4. Совершенствование методов расчета потерь электроэнергии в линиях электропередачи на основе математических моделей, учитывающих температуру проводов / С. С. Гиршин, В. Н. Горюнов, А. А. Бубенчиков, Е. В. Петрова, В. Л. Юша / Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 30.09.09, № 609-B2009.

5. Упрощение уравнений теплового баланса воздушных линий электропередачи в задачах расчета потерь энергии / С. С. Гиршин [и др.] // Омский научный вестник. – 2013. – № 1. – С. 148-151.
6. Уточнение метода расчета температуры провода при постоянной нагрузке с учетом климатических факторов / С. С. Гиршин [и др.]; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ 08.04.2010, № 198-В2010.
7. Учет температурной зависимости сопротивления неизолированного провода при выборе мероприятий по снижению потерь энергии на примере компенсации реактивной мощности / Е. В. Петрова [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 1. – С. 284-291.
8. Thermal behaviour of overhead conductors / Cigr'e Working Group 22.12 // Cigr'e Brochure 207, August 2002.
9. Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines/ F. Alvarez Gomez [et al] // World Scientific and Engineering Academy and Society: 10th WSEAS International Conference (Playa Meloneras, Gran Canaria, Canary Islands Spain, March, 24-26, 2011). – WSEAS Press, 2011. – P. 143-153.

Рецензенты:

Харламов В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и общая электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск;

Сидоров О.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.