

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В ИЗОЛИРОВАННЫХ И НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДАХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ РЕЖИМНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Супруненко А.М.

Научный руководитель – д.т.н., проф. Фурсанов М.И.

Прохождение электрического тока по проводнику сопровождается выделением тепла в соответствии с законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R_t, \quad (1)$$

где I — сила тока; R_t — электрическое сопротивление проводника.

Для токов промышленной частоты это тепло можно считать равномерно выделяющимся по всему сечению проводника, т.е. можно допустить, что в проводнике имеются равномерно распределенные внутренние источники тепла плотностью:

$$q_{v,np} = \frac{I^2 \rho_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20))}{F^2}, \quad (2)$$

где F — площадь поперечного сечения токопроводящей жилы; ρ_{20} — удельное сопротивление проводника при температуре 20°C ; $\alpha = 0,004^\circ\text{C}^{-1}$ — температурный коэффициент активного сопротивления алюминиевых проводов; t_{np} — температура проводника, $^\circ\text{C}$.

Как следует из уравнений (1), (2), количество выделенного тепла, а, следовательно, потерь электрической энергии зависит от температуры проводника. Зависимости активного сопротивления провода и потерь активной мощности от температуры проводника можно также представить соотношениями:

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20));$$

$$P_t = I^2 R_t = I^2 R_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20)),$$

где R_t и R_{20} — активные сопротивления соответственно при температурах t и 20°C .

Неопределенность сопротивления, а также потерь активной мощности и энергии в зависимости от температуры провода по отношению к справочным данным (табл. 1) определяется уравнением:

$$\delta = \frac{R_{20} - R_{20} (1 + \alpha(t_{np} - 20))}{R_{20}} \cdot 100\% = \alpha(t_{np} - 20) \cdot 100\%.$$

Значительные величины неопределенности являются одной из причин целого ряда публикаций, направленных на целесообразность учета реальной температуры провода для совершенствования существующих методов расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электропередач [1 — 5].

В результате интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих тепловые процессы в проводнике с током, а также математических преобразований с использованием уравнений граничных условий, полученных решений и закона Фурье получены два вида соотношений для расчета потерь мощности и температуры применительно к изолированным и неизолированным проводам воздушных линий.

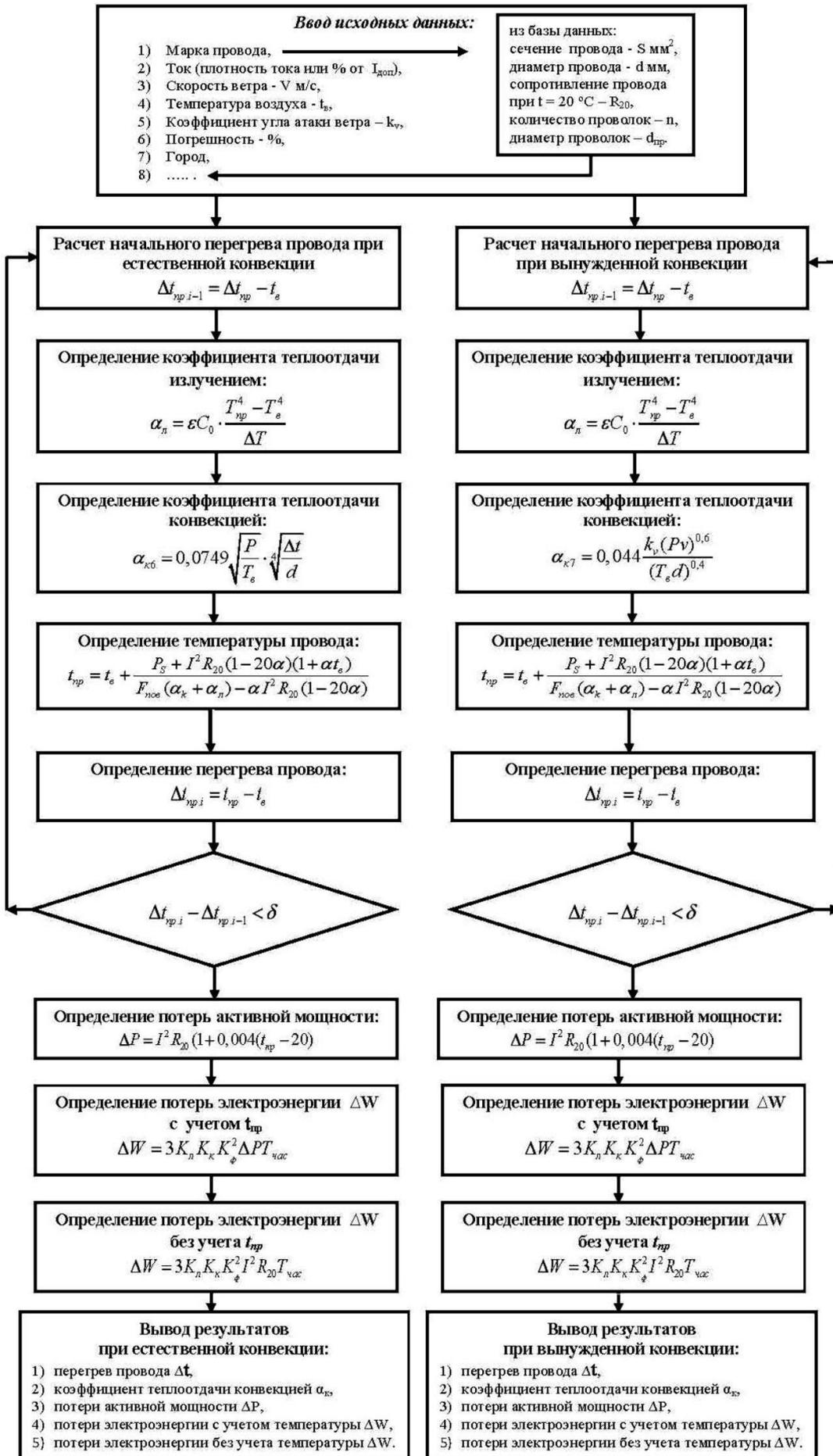


Рисунок 1. Алгоритм расчета параметров провода по методу № 4

Таблица 1. - Диапазон неопределенности потерь активной мощности, найденный без учета изменения температуры провода

Марка провода	Температура эксплуатации, С	Диапазон неопределенности потерь, %
АС	от -50 до + 90	56
СИП-1	от -50 до + 70	48
СИП-2	от -50 до + 90	56
СИП-3	от -50 до + 90	56
СИП-4	от -50 до + 90	56
Высокотемпературные провода повышенной пропускной способности		
TACSR/НАСIN	от -50 до +210	104
TACSR/ACS	от -50 до +150	80
GTACSR	от -50 до +150	80
ACCR	от -50 до +210	104

Первый вариант реализуется при допущении, что коэффициент теплопередачи излучением a_u является линейной функцией температуры, а коэффициент теплопередачи конвекцией a_k от температуры не зависит. В этом случае приближенное нахождение потерь электрической энергии сводится к необходимости решения квадратного уравнения относительно температуры провода.

Второй вариант соответствует произвольному изменению условий эксплуатации проводов воздушных линий и предположению, что коэффициенты теплового излучения и конвекции зависят от температуры наружной поверхности провода, т.е. $a_k(t_{нар})$ и $a_u(t_{нар})$. Нахождение температуры для изолированных проводов в этом случае может быть получено итерационным методом на основе уравнения:

$$t_{нар}^{[k+1]} = t_B + \frac{K_S + \Delta P_{20} k_\alpha (1 + \alpha t_B)}{F_{нов} (1 - \alpha - S_{уз} \Delta P_{20} k_\alpha) (\alpha_k(t_{нар}^{[k]})) - \alpha \Delta P_{20} k_\alpha}, \tag{3}$$

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

Коэффициент K_S определяется выражением:

$$K_S = P_S (1 - \alpha \cdot S_{уз} \cdot \Delta P_{20} \cdot k_\alpha),$$

где $S_{уз} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{уз}} \ln \frac{r_2}{r_1}$ — тепловое сопротивление изоляции [6]; $\lambda_{уз}$ — коэффициент теплопроводности изоляции; P_S — мощность притока теплоты на единицу длины и в единицу времени солнечной радиацией.

Для неизолированных проводов $S_{уз} = 0$, а $t_{нар}$ равняется температуре провода $t_{пр}$. Указанные условия позволяют упростить уравнение (3), которое для неизолированных проводов принимает вид:

$$t_{нар}^{[k+1]} = t_B + \frac{P_S + \Delta P_{20} k_\alpha (1 + \alpha t_B)}{F_{нов} (\alpha_k(t_{нар}^{[k]}) + \alpha_u(t_{пр}^{[k]})) - \alpha \Delta P_{20} k_\alpha}, \tag{4}$$

Наиболее высокая точность определения α_u на практике реализуется по закону Стефана — Больцмана, согласно соотношению [6]:

$$\alpha_u = \varepsilon C_0 \frac{T_{нар}^4 - T_в^4}{\Delta t_{нар}} = 4,56 \cdot 10^{-8} \frac{T_{нар}^4 - T_в^4}{\Delta t_{нар}}, \quad (5)$$

где $T_{нар}$ — абсолютная температура поверхности изоляции, К; $T_в$ — абсолютная температура воздуха, К; $\Delta t_{нар} = t_{нар} - t_в$; ε — коэффициент черноты поверхности провода; $C_0 = 5,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² К⁴) — постоянная излучения абсолютно черного тела.

Исходя из критериальных уравнений конвективного теплообмена и критериев Нуссельта, Прандтля, Рейнтгольца в [7 — 8] выведены уравнения коэффициентов теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекциях ($\alpha_{к6}$ и $\alpha_{к7}$ соответственно):

$$\alpha_{к6} = 0,0749 \sqrt{\frac{P}{T_в}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta t}{d}}, \quad \alpha_{к7} = 0,044 \frac{k_v(P_v)^{0,6}}{(T_в d)^{0,4}}. \quad (6)$$

где P — атмосферное давление, Па; d — диаметр провода, м²; k_v — коэффициент, учитывающий влияние угла направления ветра к оси провода, v — скорость ветра, м/с.

Уравнения (6) отличаются от известных выражений тем, что позволяют проводить анализ температуры провода и потерь мощности в неизолированных и изолированных проводах с учетом атмосферного давления.

Полученные уравнения (3) — (6) легли в основу алгоритма расчета потерь мощности и температуры изолированных и неизолированных проводов воздушных линий (рис. 1).

Представленный алгоритм ориентирован, в первую очередь, на неизолированные провода традиционного исполнения, нашедшие наиболее широкое распространение (провода марки АС). Разработанный алгоритм может использоваться также для расчета потерь и температуры современных неизолированных высокотемпературных проводов, область применения которых растёт. Для изолированных самонесущих проводов (СИП) расчеты могут быть проведены путем замены в алгоритме уравнения (4) на уравнение (3), но без учета взаимного влияния отдельных жил друг на друга. Такой учет на основе численного расчета тепловых полей отдельных токопроводящих в указанном комплексе программ не используется. Также требуется ввести дополнительные данные, касающиеся описания параметров изоляции (толщина, коэффициент теплопроводности и др.).

Для упрощения и оптимизации программного комплекса была создана редактируемая база данных, включающая в себя марки проводов, их характеристики и параметры. Структура комплекса позволяет изменять и дополнять базу при необходимости расчета проводов воздушных линий, имеющих особенности по сравнению с указанными базовыми типами проводов. Это позволяет уменьшить количество вводимых входных параметров расчета и снижает вероятность допущения ошибки при их вводе. Работа с программой максимально автоматизирована, включая подготовку, ввод исходной информации и обработку результатов расчета.

Для подтверждения достоверности теоретических результатов проведенных исследований и апробации разработанного алгоритма на подстанции «Московка» 110/10 кВ г. Омска был проведен ряд экспериментальных исследований. Объектом исследования являлись неизолированные провода ВЛЭП марки АС- 240/39. Измерение температуры проводилось тепловизионным комплексом NEC 7700TH с приборной погрешностью 2 %. Изменение скорости и направления ветра осуществлялось анемометром TESTO 416, характеризующегося приборной погрешностью 1,5 %. Проведенный анализ показал превышения реальной температуры над расчетной. При этом погрешность расчета по созданной математической модели не превышает 10%, а разность экспериментальной и расчетной значений температур — 3°C.

Литература

1. Воротницкий, В. Э. Оценка погрешностей расчета потерь электроэнергии в ВЛ из-за неучёта метеоусловий / В.Э. Воротницкий, О. В. Туркина // Электрические станции. — 2008. - № 10. - С. 42-49.
2. Левченко, И. И. Нагрузочная способность воздушных линий электропередачи в экстремальных погодных условиях / И. И. Левченко, Е. И. Сацук // Электричество. — 2008. — № 4. - С. 2-8.
3. Герасименко, А. А. Учет схемно-режимных и атмосферных факторов при расчете технологических потерь электроэнергии в распределительных сетях / А. А. Герасименко, Г. С. Тимофеев, А. В. Тихонович // Журнал Сибирского Федерального Университета. Серия: Техника и Технология. - 2008. - № 1(2). - С. 188-206.
4. Зарудский, Г. К. Уточнение выражений для расчета температуры проводов воздушных линий электропередачи сверхвысокого напряжения / Г. К. Зарудский, С. Ю. Сыромятников // Вестник МЭИ.
5. IEEE Standard for calculating the currenttemperature of bare overhead conductors. IEEE Std 738-2006. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. — 2006.
6. Пешков, И. Б. Основы кабельной техники / под ред. И. Б. Пешкова. — М. : Издательский центр «Академия», 2006. — 432 с.
7. Вывод уравнения для коэффициента теплоотдачи вынужденной конвекцией в самонесущих изолированных проводах / А. А. Бубенчиков [и др.] // Энергоэффективность : Материалы Междунар. научн-практ. конф. — Омск. Изд-во ОмГТУ, 2010. — С. 20-24.
8. Математическая модель расчета потерь мощности в изолированных проводах с учетом температуры / С. С. Гир- шин [и др.] // Омский научный вестник. — 2009. — № 3(83). — С. 176 — 179.
9. Разработка комплекса программ сравнения методов расчета потерь электрической энергии в воздушных линиях электроэнергетических систем с учетом режимных и климатических факторов / В. Н. Горюнов [и др.] // Энергетика и энергосбережение : межвуз. темат. сб. науч. тр. — Омск. : Изд-во ОмГТУ, 2011. — С. 201—210.