

УДК 621.316.3

## РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА

Гиршин С.С., Горюнов В.Н., Бигун А.Я.

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

Рассмотрен новый подход к расчету нестационарных температурных режимов воздушных линий электропередачи, основанный на приближенном аналитическом решении дифференциального уравнения нагрева. Данное уравнение нелинейно, так как содержит четвертую степень абсолютной температуры провода. В предлагаемом подходе осуществляется понижение степени температуры до второй по методу наименьших квадратов в аналитической форме. Преобразованное уравнение имеет достаточно простое общее решение, определяемое четырьмя параметрами. Сравнительные расчеты показали, что значения температуры провода в любой момент времени, полученные предлагаемым методом и путем численного решения исходного уравнения, практически не отличаются друг от друга. Разработанный метод может быть использован при проверке допустимости теплового режима линии в условиях изменяющейся нагрузки, а также для расчета потерь энергии.

Ключевые слова: температура, линия электропередачи, потери энергии, стационарные и нестационарные тепловые режимы.

## CALCULATION OF UNSTEADY TEMPERATURE REGIMES OF OVERHEAD POWER LINES, TAKING INTO ACCOUNT THE NONLINEARITY OF HEAT TRANSFER PROCESSES

Girshin S.S., Goryunov V.N., Bigun A.Y.

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

A new approach to the calculation of time-dependent temperature regimes of overhead power lines, based on an approximate analytical solution of the differential equation of heat. This equation is nonlinear, as it contains the fourth power of the absolute temperature of the wire. The proposed approach is performed lowering the temperature to a second degree least squares in analytical form. Transformed equation is fairly simple general solution, defined by four parameters. Comparative calculations show that the temperature of the wire at any time by the inventive method and by numerical solutions of the original equation, practically do not differ from each other. The developed method can be used for validation of the thermal regime of the line in a changing load, as well as for the calculation of the energy loss.

Keywords: temperature, power line, loss of energy, stationary and non-stationary thermal conditions.

Тепловые расчеты элементов электрических сетей представляют собой практически важную задачу, поскольку температура определяет техническую допустимость того или иного электрического режима. Кроме того, учет температуры позволяет уточнить потери энергии.

Существует большое количество публикаций, посвященных тепловым расчетам линий электропередачи и связанным с этим задачам, например [1, 4, 6, 9]. В этих и других работах главным образом рассматриваются установившиеся температурные режимы. Это обусловлено тем, что допустимый ток определяется максимальным значением температуры, которое обычно достигается после завершения процесса нагрева.

Расчет потерь энергии с учетом температурной зависимости сопротивления базируется не на максимальном, а на среднем значении температуры. Чтобы точно вычислить среднюю

температуру, требуется учитывать не только стационарные, но и нестационарные тепловые режимы, на которые, как правило, приходится значительная доля времени.

Возможны ситуации, когда стационарные тепловые режимы линий вообще отсутствуют, например, при резкопеременных нагрузках. В этих случаях расчет нестационарных тепловых режимов необходим не только для вычисления средних температур и потерь энергии, но и для определения максимальной температуры с целью проверки нагрузочной способности линии.

Передача тепла от провода в окружающую среду осуществляется путем конвекции и излучения. Согласно закону Стефана – Больцмана, интенсивность теплового излучения тела (провода) пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры. Поэтому уравнение теплового баланса провода нелинейно. В случае проводов воздушных линий интенсивность теплопередачи излучением соизмерима с интенсивностью конвективного теплообмена. В связи с этим расчет стационарных тепловых режимов воздушных линий производится с учетом рассмотренной нелинейности [1, 4, 6, 9].

Вместе с тем расчет нестационарных тепловых режимов проводов производится, как правило, на основе простой экспоненциальной зависимости, соответствующей линейному дифференциальному уравнению первого порядка. Такой подход неизбежно приводит к погрешностям [7]. Кроме того, возникает неопределенность в оценке величины постоянной времени нагрева. Вместе с тем численное решение нелинейного дифференциального уравнения позволяет получить лишь частные результаты, что затрудняет их анализ и обобщение.

**1. Математическая модель.** Уравнение нагрева (охлаждения) неизолированного провода воздушной линии на открытом воздухе может быть записано в следующем виде:

$$\Delta P_0(1 + \alpha\Theta) = C \frac{d\Theta}{dt} + d_{np} \left[ \pi \alpha_{вын} (\Theta - \Theta_{окр}) + \pi \varepsilon_n C_0 (T^4 - T_{окр}^4) - A_s q_{солн} \right] \quad (1)$$

где  $\alpha_{вын}$  – 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 черного тела;  $\Theta$  и  $\Theta_{окр}$  – температуры соответственно провода и окружающей среды в °С;  $T$  и  $T_{окр}$  – то же в К (абсолютные температуры);  $A_s$  – поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения;  $q_{солн}$  – плотность потока солнечной радиации на провод;  $d_{np}$  – диаметр провода;  $\Delta P_0 = I^2 r_0$  – потери активной мощности в проводе на единицу длины при  $\Theta = 0$  °С;  $I$  – ток в проводе;  $r_0$  –

погонное активное сопротивление провода при  $\Theta = 0$  °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления;  $C$  – теплоемкость провода на единицу длины.

Данное уравнение получено из уравнения теплового баланса провода в стационарном режиме [9] путем введения в правую часть производной температуры по времени, умноженной на теплоемкость. Это слагаемое представляет собой мощность, расходуемую на нагрев провода. Второе слагаемое в правой части (1) соответствует мощности теплообмена между проводом и окружающей средой. Эта мощность включает три составляющих: теплоотдачу конвекцией, теплообмен излучением и солнечную радиацию. Нелинейность вносится теплообменом излучением (второе слагаемое в квадратных скобках), мощность которого согласно закону Стефана – Больцмана пропорциональна абсолютной температуре поверхности охлаждающегося тела (провода) в четвертой степени.

В [9] рассмотрено преобразование нелинейного уравнения теплового баланса к квадратичному виду на основе метода наименьших квадратов. Аналогичным образом можно поступить и с дифференциальным уравнением нагрева. В результате уравнение (1) преобразуется к следующей приближенной форме:

$$\frac{d\Theta}{dt} = A_1\Theta^2 + A_2\Theta + A_3. \quad (2)$$

Коэффициенты  $A_1, A_2, A_3$  определяются по формулам

$$A_1 = -\frac{\pi d_{np} \varepsilon_n C_0}{C} (M_2 + 6T_{окр}^2), \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{\Delta P_0 \alpha}{C} - \frac{\pi d_{np}}{C} [\alpha_{вын} + \varepsilon_n C_0 (M_1 + 4T_{окр}^3 - 2M_2 \Theta_{окр} - 12T_{окр}^2 \Theta_{окр})], \quad (4)$$

$$A_3 = \frac{\Delta P_0}{C} + \frac{d_{np}}{C} \left[ \pi \alpha_{вын} \Theta_{окр} - \pi \varepsilon_n C_0 \begin{pmatrix} M_0 + (M_2 + 6T_{окр}^2) \Theta_{окр}^2 - \\ - (M_1 + 4T_{окр}^3) \Theta_{окр} \end{pmatrix} + A_s q_{солн} \right]. \quad (5)$$

В приведенные формулы входят коэффициенты  $M_1, M_2, M_0$ , которые получаются при преобразовании  $T^4$  методом наименьших квадратов к следующему выражению:

$$T^4 \approx M_2 (T - T_{окр})^2 + M_1 (T - T_{окр}) + M_0 + 6T_{окр}^2 (T - T_{окр})^2 + 4T_{окр}^3 (T - T_{окр}) + T_{окр}^4. \quad (6)$$

Формулы для коэффициентов  $M_1, M_2, M_0$  имеют вид [6]

$$M_2 = \frac{12}{7} \Delta \Theta_\delta^2 + 6T_{окр} \Delta \Theta_\delta, \quad (7)$$

$$M_1 = -\frac{32}{35}\Delta\Theta_\delta^3 - \frac{12}{5}T_{окр}\Delta\Theta_\delta^2, \quad (8)$$

$$M_0 = \frac{3}{35}\Delta\Theta_\delta^4 + \frac{1}{5}T_{окр}\Delta\Theta_\delta^3. \quad (9)$$

Здесь  $\Delta\Theta_\delta = \Theta_{дон} - \Theta_{окр}$  используется как диапазон температур, на котором производится преобразование;  $\Theta_{дон}$  – максимально допустимая температура провода.

Выражения (3)–(5) получаются при преобразовании (1) к (2) с учетом (6).

Уравнение (2) может иметь различные решения в зависимости от вида корней уравнения

$$A_1\Theta^2 + A_2\Theta + A_3 = 0. \quad (10)$$

Возможны следующие случаи: 1) корни действительные и разные; 2) корни действительные и одинаковые; 3) корни комплексно-сопряженные. Поскольку данное алгебраическое уравнение описывает установившийся режим, то оно имеет действительные корни всегда, когда этот режим существует. В [2] на упрощенном примере рассмотрены случаи, когда установившегося режима не существует. Показано, что такая ситуация может возникнуть только при большой перегрузке линии, фактически в аварийном режиме. Кроме того, в [2] рассмотрена линейная модель. Расчеты для нелинейного (квадратичного) уравнения показали, что решение формально существует даже при очень больших токах. Объясняется это тем, что нелинейные составляющие теплового потока от провода возрастают при увеличении температуры гораздо быстрее, чем линейные, что способствует стабилизации режима. Однако необходимо заметить, что приведенные выше выкладки справедливы только для ограниченного (допустимого) диапазона температур, и выход за его пределы приводит к быстрому возрастанию погрешностей и в конце концов к потере адекватности модели.

Таким образом, случай комплексно-сопряженных корней может быть исключен из рассмотрения. Второй случай (корни действительные и одинаковые) представляет собой пограничную ситуацию, в связи с чем его также можно исключить.

Обозначим корни уравнения (10) следующим образом:

$$\Theta_{1,2} = \frac{-A_2 \mp \sqrt{A_2^2 - 4A_1A_3}}{2A_1}, \quad (11)$$

причем  $\Theta_1 > \Theta_2$ .

Тогда уравнение (2) имеет следующее решение:

$$\Theta(t) = \Theta_2 + \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{1 - \Theta' e^{-t/T_n}}, \quad (12)$$

где введены обозначения

$$T_n = -\frac{1}{A_1(\Theta_1 - \Theta_2)}, \quad (13)$$

$$\Theta' = \frac{\Theta_0 - \Theta_1}{\Theta_0 - \Theta_2}. \quad (14)$$

Здесь  $\Theta_0$  – температура провода в момент времени  $t=0$  (начальное условие). Решение (12) справедливо только в случае  $\Theta_0 > \Theta_2$ . Расчеты показали, что это условие выполняется (температура  $\Theta_2$  имеет сильно отрицательные значения, обычно меньше не только температуры окружающей среды, но и абсолютного нуля).

Формула (12) описывает апериодический процесс, по форме сходный с обычной экспонентой. Однако если стандартная экспоненциальная функция  $(A+Be^{-t/T})$  задается тремя величинами ( $A, B, T$ ), то для задания функции вида (12) требуется 4 величины ( $\Theta_1, \Theta_2, \Theta_0, T_n$ ). Дополнительная четвертая величина определяет вклад нелинейного слагаемого.

Параметр  $T_n$ , как и постоянная времени в стандартной экспоненциальной функции, определяет временной масштаб (инерционность) процесса. Однако количественный смысл параметра  $T_n$  более сложен.

Средняя температура за некоторое время  $T_n$  получается путем интегрирования (12):

$$\Theta_{cp} = \Theta_1 + (\Theta_1 - \Theta_2) \frac{T_n}{T_n} \ln \left( \frac{1 - \Theta' e^{-T_n/T_n}}{1 - \Theta'} \right). \quad (15)$$

Тогда потери энергии за время  $T_n$  в трехфазной линии длиной  $l$

$$\Delta W = 3\Delta P_0 (1 + \alpha \Theta_{cp}) T_n l. \quad (16)$$

**2. Анализ результатов.** Ниже приведены результаты расчета теплового процесса в проводе АС-240/32 разработанным методом и методом Рунге – Кутты четвертого порядка. Расчетные условия приведены в (табл. 1). Параметры провода приняты согласно [1, 3, 10] (справочное значение сопротивления, приведенное к 20 °С, пересчитано для температуры 0 °С). В качестве параметров окружающей среды использована примерная совокупность возможных (реалистичных) значений. Коэффициент теплоотдачи и плотность потока солнечной радиации рассчитывались по следующим формулам [5, 8]:

$$\alpha_{вын} = 0,044 \frac{k_V (P_{атм} V)^{0,6}}{(T_{окр} d_{np})^{0,4}}, \quad (17)$$

$$q_{солн} = k_{зм} q_{s,np} \sin \varphi_s + \pi q_{s,расc}. \quad (18)$$

Таблица 1

Условия, принятые при расчете теплового процесса в проводе АС-240/32

Наименование и обозначение параметра	Численное значение
Ток нагрузки $I$	600 А
Диаметр провода $d_{np}$	0,0216 м
Погонное активное сопротивление при 0°C $r_0$	0,0001114 Ом/м
Температурный коэффициент сопротивления $\alpha$	0,0043 °C <sup>-1</sup>
Удельная теплоемкость алюминия $C_{уд,Al}$	922 Дж/(кг·°C)
Удельная теплоемкость стали $C_{уд,cm}$	452 Дж/(кг·°C)
Погонная масса алюминия $M_{Al}$	0,673 кг/м
Погонная масса стали $M_{cm}$	0,248 кг/м
Степень черноты поверхности провода $\varepsilon_n$	0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения $A_s$	0,6
Температура окружающей среды $\Theta_{окр}$	10 °C
Атмосферное давление $P_{атм}$	100000 Па
Скорость ветра $V$	1 м/с
Коэффициент угла атаки ветра $k_V$	0,75
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s,np}$	500 Вт/м <sup>2</sup>
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s,расс}$	100 Вт/м <sup>2</sup>
Коэффициент, учитывающий затененность участков линии $k_{эм}$	0,9
Угол между осью провода и направлением солнечных лучей $\varphi_s$	45°
Допустимая температура провода $\Theta_{дон}$	70 °C
Температура провода в момент времени $t=0$ $\Theta_0$	10 °C
Расчетный период $T_n$	60 мин
Длина линии $l$	50000 м

Для расчета теплоемкости провода на единицу длины использовано очевидное выражение:

$$C = C_{уд,Al}M_{Al} + C_{уд,cm}M_{cm} \quad (19)$$

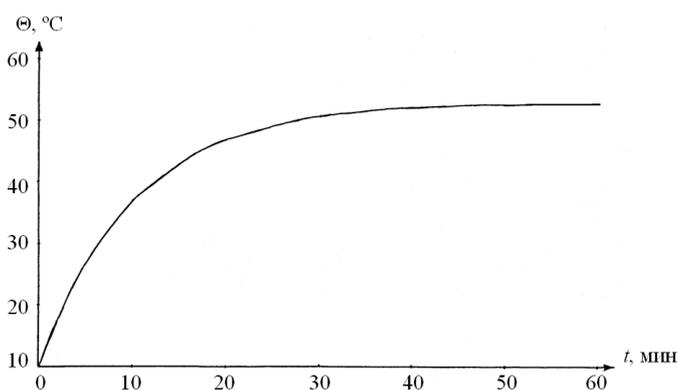
Зависимости температуры провода от времени, полученные аналитическим и численным методом, представлены в виде таблицы (табл. 2) и рисунка. Расхождение результатов не превышает 0,01 °С; в масштабе рисунка графики не различаются.

Таблица 2

Результаты расчета теплового процесса аналитическим ( $\Theta_{ан}$ ) и численным ( $\Theta_{чис}$ ) методом

$t$ , мин	0	2	4	6	8	10	12	16	20	24
$\Theta_{ан}(t)$ , °С	10	17,48	23,69	28,83	33,08	36,58	39,46	43,77	46,68	48,63
$\Theta_{чис}(t)$ , °С	10	17,48	23,69	28,83	33,07	36,57	39,45	43,77	46,68	48,63

$t$ , мин	28	32	36	40	44	48	52	56	60
$\Theta_{ан}(t)$ , °С	49,93	50,81	51,4	51,79	52,05	52,22	52,34	52,42	52,47
$\Theta_{чис}(t)$ , °С	49,94	50,82	51,4	51,8	52,06	52,23	52,35	52,43	52,48



Результаты расчета теплового процесса в проводе АС-240/32

Средняя температура и потери энергии за расчетный период, вычисленные по формулам (15), (16), равны:  $\Theta_{ср} = 45,39$  °С;  $\Delta W = 7189,7$  кВт·час.

Таким образом, видно, что разработанный аналитический метод по точности практически не отличается от численного и может быть рекомендован для практического использования.

### Список литературы

1. Бургсдорф, В. В. Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов / В. В. Бургсдорф, Л. Г. Никитина // Электричество. – 1989. – № 11. – С. 1–8.
2. Гиршин, С. С. Расчет и анализ потерь активной мощности в элементах сети на основе аналитических выражений с учетом температурной зависимости сопротивлений / С. С.

- Гиршин, Е. В. Петрова, В. И. Суриков // Омский научный вестник. – 2013. – № 1. – С. 152–156.
3. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
4. Никифоров, Е. П. Предельно допустимые токовые нагрузки на провода действующих ВЛ с учетом нагрева проводов солнечной радиацией / Е. П. Никифоров // Электрические станции. – 2006. – № 7. – С. 56–59.
5. Особенности моделирования электрических и тепловых режимов распределительных сетей в задачах расчета потерь электроэнергии / С. С. Гиршин [и др.] // Энергетика и энергосбережение: межвуз. тематический сб. науч. трудов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – С. 154–162.
6. Поспелов, Г. Е. Влияние температуры проводов на потери электроэнергии в активных сопротивлениях проводов воздушных линий электропередачи / Г. Е. Поспелов, В.В. Ершевич // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 81–83.
7. Сацук, Е. О. Программно-технические средства мониторинга воздушных линий электропередачи и управления энергосистемой в экстремальных погодных условиях: дисс. ... д-ра техн. наук / Е. О. Сацук. – Новочеркасск, 2011. – 314 с.
8. Совершенствование расчетов потерь в воздушных линиях электроэнергетических систем по результатам численного моделирования в условиях вариации нагрузки / Е.В. Петрова [и др.] // Омский научный вестник. – 2012. – № 3. – С. 242–248.
9. 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.
10. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1 / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. – М. : Изд-во МЭИ, 1995. – 440 с.

#### **Рецензенты:**

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;

Кандаев В.А., д.т.н., профессор кафедры «Инфокоммуникационные системы и информационная безопасность» ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.