

# Нагрев неизолированных проводов воздушных линий электропередачи

ФИГУРНОВ Е.П., ЖАРКОВ Ю.И., ПЕТРОВА Т.Е., КУУСК А.Б.

*Приведена уточненная методика определения коэффициента теплоотдачи конвекцией проводов, позволяющая распространить расчеты их нагревания на провода разной формы при разных скоростях ветра, в том числе характерных для условий образования гололеда. Приведены формулы для вычисления температуры провода в стационарном и переходном режимах и алгоритм функционирования максимальной термической защиты проводов.*

**Ключевые слова:** нагрев проводов, коэффициент теплоотдачи, допустимый ток, переходный процесс нагрева, защита проводов

Расчет нагрева проводов необходим для определения максимальных допустимых токов, температуры проводов, от которой, например, зависит стрела провеса, режимов профилактического подогрева или плавки образующегося на них гололеда. В этих случаях рассматриваются, как правило, стационарные процессы. В составе микропроцессорных терминалов, например БМРЗ-ФКС [1] и ЦЗАФ-3,3 [2], появились защиты от перегрева проводов (квазитепловые защиты), основанные на решении уравнения нагревания для переходного процесса.

Теория и практика расчетов нагревания проводов электрических сетей основаны, главным образом, на фундаментальной работе [3], в основе которой лежит теория теплообмена гладких труб круглого сечения в стационарном режиме [4]. Учет того обстоятельства, что витые провода электрических сетей имеют не круглое сечение, осуществляется подбором соответствующих коэффициентов, полученных на основе экспериментальных данных [5]. Обзор, анализ и критика ряда положений, принятых в этой и подобных методиках, а также практически важные новые предложения и разработки приведены в [6].

Дополнительно следует отметить, что рекомендуемые в [5] и широко применяемые в расчетах максимальных допустимых токов формулы для вычисления теплоотдачи с поверхности провода, использующие число Рейнольдса в степени 0,5, имеют область применения, ограниченную значениями этих чисел менее 1000 [4], т.е. пригодны лишь для малых скоростей ветра (например, для провода АС 150/24 – менее 1 м/с). Поэтому даже теоретически

*A refined procedure for determining the convection heat transfer coefficient for wires is presented. The proposed procedure allows wire heating calculations to be extended for wires of different shapes at different wind velocities, including those typical for icing formation conditions. Formulas for calculating the temperature of wire under steady-state and transient conditions of its operation are suggested. An algorithm for operation of wire overheating protection is presented.*

**Key words:** heating of wires, heat transfer coefficient, permissible current, heating transient, protection of wires

их нельзя использовать при скоростях ветра, установленных в [7] для условий возможного образования гололеда и, следовательно, для расчета режимов профилактического подогрева проводов и плавки на них гололеда, а также в тех случаях, если провода имеют форму сечения, геометрически не совпадающую с витыми.

Учитывая существующую протяженность воздушных линий электропередачи и контактной сети электрифицированных железных дорог, актуальной задачей является расширение области применения методов расчета нагрева проводов в стационарных режимах не только на условия, при которых возможно образование гололеда, но и на провода с формой сечения, отличающейся от витых проводов, а также на переходные процессы и условия защиты проводов от перегрузки.

Уравнение теплового баланса для единицы длины нагреваемого неизолированного провода на открытом воздухе, как известно, имеет вид

$$I^2 r dt + P_p dt = c m dq + a F q dt, \quad (1)$$

где  $I$  – ток провода, А;  $r$  – сопротивление единицы длины провода, Ом/м;  $t$  – текущее время, с;  $P_p$  – мощность солнечной радиации, приходящаяся на единицу длины провода, Вт/м;  $c$  – удельная теплоемкость материала провода, Вт·с/(кг·°С);  $m$  – масса единицы длины провода, кг/м;  $a$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $F$  – площадь поверхности единицы длины провода, численно равная его периметру  $\Pi$ , м<sup>2</sup>/м;  $q$  – превышение температуры провода  $t$  над температурой окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  ( $q = t - t_{\text{окр}}$ ), °С.

Сопротивление провода при температуре  $t$



Такие же результаты при  $l=0,5\Pi$  получены по данным испытаний нагревания и охлаждения витых и фасонных проводов на аэродинамическом стенде [9]. На рис. 2 приведены опытные точки зависимости  $\lg Nu_l = f(\lg Re_l)$ , полученные при испытаниях витых проводов М 120, А 185 (ГОСТ 839–80), ПБСМ 95, ПБСМ 70 (ГОСТ 4775–91), ПБСА 50/70 и контактных фасонных проводов МФ 100 и МФ 85 (ГОСТ 2584–86) в диапазоне чисел Рейнольдса свыше  $10^3$ . При доверительном интервале 0,95 и выборочном коэффициенте корреляции 0,995 опытные данные аппроксимируются в указанном диапазоне зависимостью  $\lg Nu_l = \lg b + a \lg Re_l$  при тех же значениях  $a = 0,59$ ,  $b = 0,288$  (сплошная линия). Это доказывает, что выражение (3) при условии  $l=0,5\Pi$  может быть обоснованно использовано не только для круглых, но и для витых и фасонных проводов.

Для примера на этом же рис. 2 показаны зависимости:  $Nu_l = 0,525 Re_l^{0,5}$ , используемая в [5], и  $Nu_l = 0,525 Re_l^{0,2} + 0,23 Re_l^{0,61}$ , рекомендуемая в международном стандарте [10]. Вычисления по [10] и по формуле (3) дают достаточно близкие результаты, но для практического использования выражение (3) удобнее. Зависимость по [5] при увеличении числа Рейнольдса не согласуется ни с опытными данными, ни с международным стандартом.

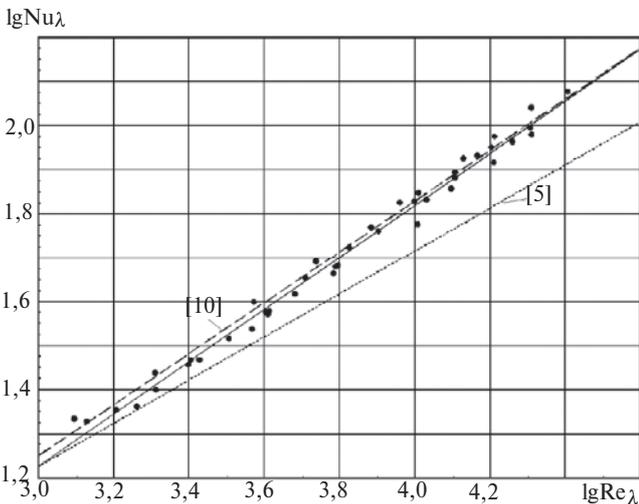


Рис. 2. Опытные данные и аппроксимация зависимости  $\lg Nu_l = f(\lg Re_l)$  для витых и фасонных проводов

Подставляя (2) в (3) при  $l=0,5\Pi=0,5\rho D_\Sigma$ , имея в виду, что в диапазоне температур окружающей среды от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$  в соответствии с известными справочными данными отношение  $l/n^a$  при установленных значениях коэффициентов  $a$  от температуры практически не зависит, и используя

для эквивалентного диаметра  $D_{\Sigma(\text{мм})}$  размерность мм, получим формулы для определения  $a_K$ , равно пригодные для круглых, витых и фасонных проводов:

$$a_K = 4,02 \frac{V^{0,44}}{\Pi^{0,56}} = 2,12 \frac{V^{0,44}}{D_\Sigma^{0,56}} = 102 \frac{V^{0,44}}{D_{\Sigma(\text{мм})}^{0,56}},$$

$$[10 \text{ } \Re Re_l \text{ } \times 10^3];$$

$$a_K = 6,82 \frac{V^{0,59}}{\Pi^{0,41}} = 4,26 \frac{V^{0,59}}{D_\Sigma^{0,41}} = 83,3 \frac{V^{0,59}}{D_{\Sigma(\text{мм})}^{0,41}},$$

$$[10^3 \text{ } \Re Re_l \text{ } \times 10^5];$$

$$\Re_l = \frac{0,5\Pi V}{\nu} = \frac{36364\Pi V}{[1 + 0,0016(t + t_{\text{окр}})]^2} =$$

$$= \frac{114 D_{\Sigma(\text{мм})} V}{[1 + 0,0016(t + t_{\text{окр}})]^2},$$

Для вычисления периметра проводов  $\Pi$  рекомендуются полученные из геометрических соотношений формулы, м:

для круглых проводов

$$\Pi = \rho D_{(\text{мм})} 10^{-3};$$

для витых проводов, скрученных из нескольких или многих проволок,

$$\Pi = 0,5\rho d(n+2)10^{-3}, \quad n = \frac{\frac{\pi D_{(\text{мм})}}{e} - \frac{\pi \phi}{e}}{d} - 1;$$

для контактных фасонных и контактных фасонных овальных проводов (ГОСТ 2584–86)

$$\Pi = K_{\text{из}} \frac{\pi}{e} M + \frac{A - 5,32}{0,819} + \frac{2\rho R}{180} \arcsin \frac{A}{2R} 10^{-3} \text{ »}$$

$$\text{» } 1,63 K_{\text{из}} (A + H) 10^{-3},$$

где  $D_{(\text{мм})}$  – расчетный (справочный) диаметр провода, мм;  $d$  – диаметр проволок наружного повива витого провода, мм;  $n$  – число проволок в наружном повиве витого провода, определяемое по справочным данным или по приведенной формуле с округлением в меньшую сторону;  $A, R, H$  – стандартные (справочные) размеры поперечного сечения фасонного контактного провода, мм;  $K_{\text{из}}$  – коэффициент, учитывающий износ контактного провода, принимаемый для контактной сети переменного тока равным 1, а для постоянного тока – 0,97;  $M$  – слагаемое, принимаемое для фасонного контактного провода равным 13,07 мм, а для овального провода – 15,07 мм.

Следует особо подчеркнуть ошибочность распространенной практики вычислять периметр витых проводов как для проводов круглого сечения с расчетным по ГОСТ диаметром. Например, для ви-

того провода АС 120/19 (ГОСТ 839–80) с расчетным диаметром 15,2 мм периметр, вычисленный как для круглого провода, равен  $\rho \cdot 15,2 = 47,75$  мм. Действительный же периметр составляет 67,87 мм, т.е. на 42% больше, причем в формулах для  $a_k$  это различие в общем случае нельзя компенсировать каким-либо постоянным коэффициентом.

Значение коэффициента  $k_V$ , учитывающего направление ветра относительно оси гладкого цилиндра, принимают согласно [4, 8] равным 1 при поперечном (угол атаки ветра свыше  $80-90^\circ$ ) и 0,5, 0,55 при продольном (угол атаки ветра менее  $30^\circ$ ) обдуве. Вместе с тем, в [11] отмечено, что при изменении положения цилиндрической и других форм сечения стержней относительно направления обтекающего потока коэффициент теплоотдачи конвекцией изменяется только в пределах  $\pm 15\%$ . Примерно такие же данные были получены в упомянутых испытаниях [9] витых и фасонных проводов при их продольном обдуве потоком воздуха со скоростью от 1 до 10 м/с, при которой коэффициент теплоотдачи снижался по сравнению с поперечным обдувом не более чем на 20, 30% (наименьшее значение  $k_V = 0,7$ ). Уточнение значения  $k_V$  при продольном обдувании проводов разной формы требует, по-видимому, дальнейших исследований.

При определении значения тока профилактического подогрева в условиях возможного образования гололеда следует учитывать наличие мороси или переохлажденного дождя, при которых провод покрывается тонкой пленкой стекающей воды. Условия теплоотдачи в окружающую среду интенсифицируются, поскольку кроме теплообмена в этом случае имеет место еще и массообмен. Из-за усиливающегося охлаждения провода для поддержания его температуры на уровне, при котором гололед не образуется, требуется дополнительная мощность (большее значение тока подогрева). Значение коэффициента  $k_d$  в соответствии с [12]:

$$k_d = \frac{h_{в.в} - h_{окр}}{c_p(t_{п.в} - t_{окр})},$$

где  $h_{в.в}$ ,  $h_{окр}$  – энтальпия влажного воздуха при температуре пленки воды и окружающего воздуха соответственно, кДж/кг;  $c_p$  – изобарная теплоемкость влажного воздуха, кДж/(кг·°C);  $t_{п.в}$  – температура пленки воды, °C.

Значение  $t_{п.в}$  принимают равным 1,2 °C;  $c_p = 1,011$  кДж/(кг·°C). Значения энтальпии  $h = h_{в.в}$  и  $h = h_{окр}$ , соответствующие температурам  $t = t_{п.в}$  и  $t = t_{окр}$ , на основании [4] находятся по формуле

$$h = c_p t + \frac{0,622j p_s}{p - j p_s} (2501 + 1,97t) \text{ кДж/кг,}$$

где  $p$  – атмосферное давление, принимаемое равным 99,308 кПа (745 мм рт. ст.);  $p_s$  – парциальное давление насыщенных паров воды при соответствующей температуре ( $t = t_{п.в}$ ,  $t = t_{окр}$ ) влажного воздуха (справочное значение), кПа;  $j$  – относительная влажность, принимаемая равной 1,0 при вычислении  $h_{в.в}$  и 0,9 при вычислении  $h_{окр}$ .

При дожде и мороси в зависимости от температуры окружающей среды можно принимать следующие значения  $p_s$  и коэффициента  $k_d$ :

$t_{окр}$ , °C	2,0	0	-2,5	-5,0	-7,5	-10
$p_s$ , кПа	0,7060	0,6112	0,4965	0,4020	0,3238	0,2599
$k_d$	1	2,25	1,90	1,75	1,65	1,62

При отсутствии осадков  $k_d = 1$ .

Составляющую коэффициента теплоотдачи излучением  $a_l$  вычисляют по формуле:

$$a_l = \frac{5,67e \frac{\sigma}{\epsilon} (273 + t_{окр})^4}{t - t_{окр}} - \frac{e \frac{\sigma}{\epsilon} (273 + t_{окр})^4}{100 \frac{\sigma}{\epsilon}} \left( 1 + 0,008t \right) (1 + 0,0045t_{окр}),$$

где  $e$  – степень черноты провода (интегральный коэффициент теплового излучения).

Приближенная формула обеспечивает достаточную точность в диапазоне температур от  $-20$  °C до  $+160$  °C.

Степень черноты провода зависит от состояния его поверхности. Обычно считают, что поверхность окислена и загрязнена, при этом значение  $e$  принимают равным для медных и сталемедных проводов 0,8, для алюминиевых и сталеалюминиевых проводов 0,6, для стальных оцинкованных проводов – 0,3. При мороси и дожде  $e = 0,95$ .

Степень возрастания температуры провода за счет мощности солнечной радиации  $P_p$  зависит от многих факторов, учесть которые достаточно точно, а тем более отслеживать те из них, которые в течение суток меняются, крайне затруднительно. Приращение температуры за счет солнечной радиации не превышает 10% длительно допустимой температуры провода. Поэтому максимальные допустимые токи и наибольшие стрелы провеса проводов следует определять для условий наибольшего влияния солнечной радиации.

Наибольшее значение мощности солнечной радиации, поглощаемой проводом, можно определить как

$$P_p = EA_p D_s = \frac{EA_p F}{\rho},$$

где  $E$  – интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $A_p$  – коэффициент поглощения солнечного излучения.

Верхнее рабочее значение  $E$  в соответствии с ГОСТ 15150—69 принимается равным  $1125 \text{ Вт/м}^2$ . Это значение соответствует маю, июню, июлю от 10 до 16 ч при чистой атмосфере на широте  $45^\circ$  с.ш. [6]. Возможно также принимать значение  $E$  по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология». Значение коэффициента поглощения  $A_p$  принимают равным коэффициенту излучения (степени черноты)  $\epsilon$  проводов [4].

В расчетах режимов профилактического подогрева проводов и плавки на них гололеда влияние солнечной радиации в пасмурные дни, а также в темное время суток не учитывают ( $P_p = 0$ ).

Выражение (1) можно привести к виду:

$$dq/dt = B - Aq; \quad (4)$$

$$A = aF/cm; \quad B = (I^2 r + P_p)/cm. \quad (5)$$

Площадь поверхности единицы длины провода  $F$  численно равна его периметру  $\Pi$  ( $F = \Pi$ ).

Если в (1) учесть температурную зависимость сопротивления  $r$ , то

$$A = \frac{aF - I^2 r_{20} b_r}{cm}; \quad (6)$$

$$B = \frac{I^2 r_{20} [1 + b_r (t_{\text{окр}} - 20)] + P_p}{cm}.$$

Для определения максимального допустимого тока  $I_{\text{доп}}$  в установившемся режиме нагрева в уравнении (4) принимается  $dq/dt = 0$ ,  $q = t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}$ , где  $t_{\text{доп}}$  — наибольшая длительно допустимая температура провода. В этом случае

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{(t_{\text{доп}} - t_{\text{окр}}) aF - P_p}{r_{20} [1 + b_r (t_{\text{доп}} - 20)]}}.$$

Значение  $I_{\text{доп}}$  ограничивается известными значениями температуры  $t_{\text{доп}}$ , при которых не происходит механическое разупрочнение провода или недопустимое увеличение стрелы его провеса и нарушение нормативных габаритов до других проводов, конструкций и земли.

Температуру окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  следует принимать как верхнее рабочее значение по ГОСТ 15150—69 (как правило, это  $40^\circ \text{C}$ ). Принятые значения  $t_{\text{доп}}$  и  $t_{\text{окр}}$  используются для вычисления  $a_L$ . Значение коэффициента теплоотдачи  $a_K$  следует определять при скорости ветра 0,6 или 1,0 м/с при продольном направлении ветра и  $k_d = 1$ .

Значение  $I_{\text{доп}}$  при метеорологических условиях, характерных для образования гололеда, вычисляют для  $t_{\text{окр}} = 0$ ,  $P_p = 0$  и продольного направления ветра со скоростью 0,6 или 1,0 м/с.

Приведенную формулу можно использовать для определения требуемого значения тока профилактического подогрева провода в условиях возможного образования гололеда при заданных значениях  $t_{\text{окр}}$  и  $V$ . Для этого следует принять  $t_{\text{доп}} = 1, 2^\circ \text{C}$ , а при вычислении коэффициента теплоотдачи учесть  $k_d$ .

Для определения установившейся температуры провода при заданных значениях  $I$  и температуры окружающей среды, например для вычисления наибольшей стрелы провеса, принимаем  $dq/dt = 0$  и из (4) и (5) получаем:

$$t = \frac{B}{A} + t_{\text{окр}} = \frac{I^2 r + P_p}{aF} + t_{\text{окр}} =$$

$$= \frac{I^2 r_{20} [1 + b_r (t_{\text{окр}} - 20)] + P_p}{aF - I^2 r_{20} b_r} + t_{\text{окр}}.$$

Поскольку эта зависимость является нелинейной, то вычисление значения  $t$  осуществляют методом последовательных приближений, задаваясь на каждом шаге температурой и вычисляя для нее значения  $r$  и  $a_L$  или только  $a_L$  (для последнего равенства).

Для описания переходного процесса следует проинтегрировать дифференциальное уравнение (4). Поскольку это уравнение является нелинейным, то для его решения шкалу времени следует разбить на чередующиеся интервалы времени  $Dt$  (шаги интегрирования), в пределах каждого из которых параметры  $A$  и  $B$  уравнения (4), а также значение  $t_{\text{окр}}$  считаются неизменяющимися. В этом случае на отрезке времени  $Dt$  уравнение (4) становится линейным с разделяющимися переменными и известным решением для конца каждого из интервалов:

$$q = \frac{B}{A} (1 - e^{-ADt}) + q_{\text{на}} e^{-ADt},$$

где  $q_{\text{на}}$  — перегрев провода в конце предыдущего интервала.

Чем меньше длительность интервалов  $Dt$ , тем выше точность приближенного интегрирования. В данном случае достаточную точность получим при  $Dt$  по крайней мере в 10 раз меньшей, чем постоянная времени  $1/A$  переходного процесса ( $ADt \ll 0,1$ ). При использовании современной вычислительной техники удобно принять значения  $Dt$  для всех интервалов одинаковыми. В микропроцессорном устройстве [2] принято  $Dt = 1$  с. Для сравнения укажем, что наименьшее значение постоянной времени для проводов высоковольтных сетей превышает 1 мин. При  $ADt \ll 0,1$  имеем  $e^{-ADt} \approx 1 - ADt$ . Полагая  $t = q + t_{\text{окр}}$ , получаем выражение для вычисления

температуры провода в конце  $n$ -го интервала времени:

$$t_{(n)} = t_{(n-1)} + [B_{(n-1)} - (t_{(n-1)} - t_{\text{окр}(n-1)})A_{(n-1)}]Dt \quad (7)$$

где  $t_{(n-1)}$ ,  $t_{\text{окр}(n-1)}$  – температура провода и окружающей среды в конце предыдущего  $(n-1)$  интервала времени;  $A_{(n-1)}$ ,  $B_{(n-1)}$  – параметры, вычисляемые по (5) или (6) при температуре  $t_{(n-1)}$ .

Квазитепловые блоки защиты от перегрева проводов, входящие в состав устройств [1, 2] и осуществляющие численное интегрирование уравнения (1), не имеют в настоящее время датчиков скорости ветра и температуры окружающей среды. В алгоритме их функционирования предполагается, что такие параметры, как коэффициент теплоотдачи  $a$ , удельная теплоемкость  $c$  и температура окружающей среды  $t_{\text{окр}}$ , являются постоянными и неизменными. Не учитывается и солнечная радиация ( $P_p = 0$ ). Поэтому блоки настроены на один метеорологический режим, для которого принимают минимальную скорость ветра и максимальную температуру окружающей среды. В дальнейшем, очевидно, указанные факторы должны учитываться более полно.

Квазитепловая защита в настоящее время функционирует в качестве термической отсечки. Ее срабатывание происходит без выдержки времени при достижении вычисляемой температурой провода значения уставки, которую принимают близкой (с учетом коэффициента запаса) к нормированному значению длительно допустимой температуры провода или наибольшую по условиям изменения геометрических параметров линии, например, стрелы провеса. В первом случае провод может без какого-либо ущерба для механической прочности некоторое время работать и при температуре выше длительно допустимой с ограничением этого времени в зависимости от того, насколько его температура превышает длительно допустимую [13]. Если такое время в зависимости от температуры учитывается защитой автоматически, то она будет реализовывать функцию уже не термической отсечки, а максимальной термической защиты. Такая защита, в частности, крайне необходима при плавке гололеда в повторно-кратковременном режиме.

Как известно, прочность провода зависит не только от его температуры, но и от длительности ее воздействия. Для проводов из разных материалов удовлетворительное соответствие опытным данным дает математическая модель длительной статистической прочности, описываемая уравнением Ларсона—Миллера:

$$\frac{1}{t_p} = \exp\left\{\frac{C_2}{e}\right\} - \frac{C_1}{273 + t} \quad (8)$$

где  $t_p$  – время до разрушения металла, с;  $t$  – температура провода, °C;  $C_1$ ,  $C_2$  – постоянные величины, зависящие от конструкции, свойств, напряжения металла и т.п.

Значения  $C_1$  и  $C_2$  вычислены на основании данных, приведенных в [13], для допустимых значений длительности работы при нормированных температурах и сведены в таблицу.

Тип проводов	Коэффициенты термической стойкости	
	$C_1$	$C_2$
Медные контактные (ГОСТ 2584–86)	10100	20,40
Низколегированные контактные (ГОСТ 2584–86)	12130	24,59
Бронзовые (ГОСТ 2584–86), сталемедные биметаллические контактные	12700	25,41
Медные многопроволочные (ГОСТ 2584–86)	11500	23,84
Сталемедные биметаллические многопроволочные (ГОСТ 4775–91, ТУ-31-32552178-005-00)	16600	35,15
Алюминиевые и сталеалюминиевые многопроволочные, в том числе биметаллические (ГОСТ 2584–86)	20800	50,28

При неизменной температуре, превышающей длительно допустимую, разрушения провода не произойдет, если время существования этой температуры  $t$  отвечает условию  $t < k_3 t_p$ , где  $k_3$  – коэффициент запаса ( $k_3 < 1$ ). Отсюда следует условие срабатывания защиты от перегрева провода:  $t / t_p > k_3$ . Если текущее время защитой квантуется на интервалы длительностью  $Dt_n$ , то при неизменной температуре условие срабатывания

$$\frac{1}{t_p} \sum_{n=1}^x Dt_n > k_3,$$

где  $x$  – минимальное число интервалов  $Dt_n$ , при котором удовлетворяется условие срабатывания защиты.

Если температура во времени изменяется, то для каждого  $n$ -го интервала после вычисления температуры следует определять значение  $t_p = t_{pn}$  по формуле (8). В этом случае условие срабатывания защиты при одинаковых интервалах времени  $Dt_n = Dt$

$$Dt \sum_{n=1}^x \frac{1}{t_{pn}} > k_3.$$

Это выражение и определяет алгоритм функционирования максимальной термической защиты. При функционировании такой защиты в каждом из интервалов времени  $Dt$  вычисляют по формуле (7) значение температуры  $t_{(n)}$ . Если эта температура

превышает значение длительно допустимой температуры  $t_{доп}$ , то для каждого интервала времени по формуле (8) следует вычислять значение  $1/t_p = 1/t_{pn}$  при  $t = t_{(n)}$ . Значения  $1/t_{pn}$  для следующих друг за другом интервалов времени  $\Delta t$  суммируются до тех пор, пока не выполнится условие (9). Как только это условие будет соблюдено – защита должна отключать линию.

**Выводы.** 1. Уточненная методика определения коэффициента теплоотдачи конвекцией, использующая не диаметр, а периметр сечения проводов, позволяет обоснованно расширить область расчета нагрева на провода разной формы при разных скоростях ветра, в том числе характерных для условий возможного образования гололеда.

2. При расчетах нагрева проводов в условиях переохлажденных мороси или дождя коэффициент теплоотдачи конвекцией следует определять с учетом как теплообмена, так и массообмена.

3. Релейная защита с воздействующим значением в виде вычисляемой температуры провода должна учитывать текущее изменение тока, скорости ветра и температуры окружающей среды. Текущая температура провода может быть вычислена методом итерации с квантованием времени на интервалы, длительность которых должна быть, по крайней мере, в 10 раз меньше наименьшего значения постоянной времени процесса нагрева.

4. Предлагаемый алгоритм функционирования максимальной термической защиты проводов может обеспечить допустимое превышение их температуры в зависимости от времени ее существования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Цифровые** устройства релейной защиты / НТИ МЕХАНОТРОНИКА. Каталог продукции: www.mtrele.ru
2. **Цифровая** защита и автоматика / НИИЭФА-ЭНЕРГО. Каталог продукции: pfenergo@mail.wpus.net
3. **Бургсдорф В.В.** Сооружение и эксплуатация линий электропередачи в сильно гололедных районах. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1947.
4. **Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др.** Теплотехника: Учебник для вузов/ Под ред. В.Н. Луканина. 4-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2003.
5. **Бургсдорф В.В., Никитина Л.Г.** Определение допустимых токов нагрузки воздушных линий электропередачи по нагреву их проводов. – Электричество, 1989, № 11.
6. **Сацук Е.И.** Электротепловые и механические процессы в воздушных линиях электропередачи. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010.
7. **Правила** устройства электроустановок (все действующие разделы ПУЭ-6 и ПУЭ-7), 9-й вып. – Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2008.
8. **Справочник** по теплообменникам, т. 1/Перевод с англ. под ред. Б.С. Петухова и В.К. Шикова. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
9. **Петрова Т.Е.** Расчет нагрева проводов контактной сети. – Вестник ВНИИЖТ, 1987, № 3.
10. **МЭК 1597 FE 1995–05.** Overhead electrical conductors – Calculation methods for stranded bare conductors.
11. **Куталадзе С.С., Боришанский В.М.** Справочник по теплотеплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1959.
12. **Богданов С.Н., Бучко Н.А., Гуйго Э.И.** Теоретические основы хладотехники. Теплообмен/Под ред. Э.И. Гуйго. – М.: Агроиздат, 1986.
13. **Правила** устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог (ЦЭ-868). – М.: Транспорт, 2002.

[06.12.12]

*А в т о р ы : Фигурнов Евгений Петрович окончил в 1949 г. факультет «Электрический транспорт» Московского электромеханического института инженеров железнодорожного транспорта. В 1969 г. защитил докторскую диссертацию «Теория, методы расчета и оптимизация полупроводниковых функциональных устройств релейной защиты электро тяговых сетей» в Московском институте инженеров железнодорожного транспорта. Профессор кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» Ростовского государственного университета путей сообщения» (РГУПС).*

*Жарков Юрий Иванович окончил энергетический факультет Ростовского института инженеров железнодорожного транспорта (РИИЖТ) в 1965 г. В 1992 г. защитил докторскую диссертацию «Повышение технического совершенства и надежности функционирования систем автоматического управления устройствами тягового электроснабжения». Заведующий кафедрой «Автоматизированные системы электроснабжения» РГУПС.*

*Петрова Татьяна Евгеньевна окончила энергетический факультет РИИЖТ в 1972 г. В 1989 г. защитила кандидатскую диссертацию «Условия работы и защита проводов контактной сети от токовых перегрузок при интенсивной технологии перевозок» во ВНИИЖТ. Доцент кафедры «Информатика» РГУПС.*

*Кууск Анатолий Борисович окончил энергетический факультет РИИЖТ в 1971 г. Доцент кафедры «Энергетика на железнодорожном транспорте» РГУПС.*