

## ВЛИЯНИЕ ТОКОВОЙ НАГРУЗКИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ 10 КВ

Касьянов А. Н., Нешатаев В. Б.

Научный руководитель – профессор Герасименко А. А.

*Сибирский федеральный университет*

**1. Необходимость учёта режимно-атмосферных факторов при расчёте потерь электрической энергии в распределительных сетях.** Потери электроэнергии (ЭЭ) являются важнейшей интегральной характеристикой параметров режимов распределительных электрических сетей (РЭС) и существенно зависят от совокупности режимных и атмосферных факторов.

Потери ЭЭ в сети с  $m$  ветвями (воздушные (ВЛ) и кабельные линии (КЛ)) при неизменных в период  $T$  составе и конфигурации схемы РЭС представляются в виде

$$\Delta W = 3 \sum_{j=1}^m \int_0^T I_j^2(t) R_j(t) dt \quad (1)$$

и определяются наряду с током  $I(t)$ , изменяющимся в указанном промежутке времени, также активным сопротивлением  $R(t)$ , значение которого в каждый момент времени  $t$  зависит от фактической температуры жилы (провода)  $t_{ж.}$ :

$$R_{t_{ж.}} = r_{t_{ж.}} \cdot l = r_0 [1 + \alpha(t_{ж.} - 20^\circ)] \cdot l, \quad (2)$$

где  $r_0 = \rho / F$  – активное сопротивление жилы (провода) на единицу длины при температуре  $t_{ж.} = 20^\circ \text{C}$ , принимаемое в качестве нормативного, Ом/м;  $\alpha$  – температурный коэффициент электрического сопротивления, равный для алюминия  $0,00403 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ , для меди  $0,00393 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ ;  $l$  – длина линии, м.

Провода ВЛ расположены в открытой местности, и их тепловой режим зависит от протекающего тока и действующих атмосферных факторов: температуры воздуха, скорости ветра, солнечной радиации, атмосферного давления, количества осадков. Существует методика и алгоритм расчёта температуры проводов ВЛ с учётом нагревания током нагрузки (а также солнечной радиацией), температуры воздуха и скорости ветра. Такой учёт, выполненный на основе уравнения теплового баланса, позволяет увеличить точность расчёта потерь ЭЭ в ВЛ, которая в значительной мере определяется точностью учёта изменения активных сопротивлений проводов.

Исследование влияния режимных и атмосферных факторов на активное сопротивление КЛ является более сложным и определяется следующими характеристиками: маркой кабеля, числом и типом жил, видом изоляции, условиями прокладки. Часть такого исследования, выполненная для силовых кабелей напряжением 6, 10 кВ, представлена ниже.

**2. Тепловой баланс трёхжильных кабелей.** При протекании тока за счёт нагревания жил в кабеле выделяется количество теплоты, пропорциональное значению тока  $I^2$  и активному сопротивлению  $r_{t_{ж.}}$ , зависящему от температуры жилы кабеля, Вт/м

$$Q_1 = 3I^2 r_{t_{ж.}} = 3I^2 r_0 [1 + \alpha(t_{ж.} - 20^\circ)]. \quad (3)$$

Через некоторый промежуток времени, после включения кабеля под нагрузку, в нём устанавливается тепловое равновесие: выделяемое в единицу времени количество теплоты  $Q_1$  равно количеству теплоты  $Q_2$ , отдаваемой кабелем в окружающую среду. Установившемуся состоянию равновесия соответствует определённое превышение температуры кабеля над температурой окружающей среды.

Количество тепла, отдаваемое кабелем в окружающую среду, можно выразить соотношением, Вт/м:

$$Q_2 = \frac{\Delta t}{\sum S} = \frac{t_{ж.} - t_{ср.}}{S_{из.} + S_{п.} + S_{ср.}}, \quad (4)$$

где  $\Delta t$  – превышение температуры (дополнительное нагревание, перегрев) токопроводящей жилы над температурой окружающей среды  $t_{ср.}$ , °C;  $\sum S$  – общее тепловое сопротивление кабеля, состоящее из тепловых сопротивлений элементов кабеля (изоляции  $S_{из.}$  и защитного покрова  $S_{п.}$ ) и окружающей среды  $S_{ср.}$ , °C·м/Вт.

Распространение теплоты от жил кабеля через изоляцию, оболочку и защитные покрытия происходит за счёт теплопроводности этих материалов.

### 3. Тепловые сопротивления элементов кабеля и окружающей среды.

Тепловое сопротивление изоляции трёхжильных кабелей вычисляется по формулам:

а) кабели с поясной изоляцией с круглой жилой

$$S_{из.} = \frac{\sigma_{из.}}{2\pi \cdot 3} G; G = (0,85 + 0,2n) \ln[(8,3 - 2,2n)m + 1]; n = \frac{\Delta_1}{\Delta}; m = \frac{\Delta + \Delta_1}{2r}; \quad (5)$$

б) кабели с секторными жилами

$$S_{из.} = 1,1 \frac{\sigma_{из.}}{2\pi} \ln \frac{R}{R_{ск.}}; R = R_{ск.} + \Delta + \Delta_1, \quad (6)$$

где  $\sigma_{из.}$  – удельное тепловое сопротивление изоляции, °C·м/Вт;  $G$  – геометрический коэффициент;  $\Delta$  и  $\Delta_1$  – толщина жильной и поясной изоляции, мм;  $r$  – радиус жилы, мм;  $R$  – радиус по изоляции, мм;  $R_{ск.}$  – радиус сектора, мм.

Тепловое сопротивление защитных покрытий вычисляется также, как тепловое сопротивление изоляции:

$$S_{п.} = \frac{\sigma_{п.}}{2\pi} \ln \frac{R_{п2}}{R_{п1}}, \quad (7)$$

где  $\sigma_{п.}$  – удельное тепловое сопротивление защитного покрова, °C·м/Вт;  $R_{п1}$  и  $R_{п2}$  – внутренний и внешний радиусы защитного покрова, мм.

Тепловое сопротивление окружающей среды при прокладке в грунте:

$$S_{ср.} = S_з. = \frac{\sigma_з.}{2\pi} \ln \frac{4L}{D}, \quad (8)$$

где  $\sigma_з.$  – удельное тепловое сопротивление грунта, °C·м/Вт;  $L$  – глубина прокладки, см;  $D$  – наружный диаметр кабеля, см.

Тепловое сопротивление при прокладке в воздухе:

$$S_{ср.} = S_в. = \frac{1}{\pi D \alpha_т.}, \quad (9)$$

где  $D$  – наружный диаметр кабеля, м;  $\alpha_т.$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности кабеля в окружающую среду, Вт/(м<sup>2</sup>·°C).

Коэффициент  $\alpha_т.$  равен сумме коэффициентов конвективной теплоотдачи  $\alpha_к$  и теплопередачи излучением  $\alpha_и.$ . Для кабелей диаметром более 5 мм, проложенных при обычной температуре воздуха в пространстве, размер которого значительно больше диаметра кабеля, коэффициент  $\alpha_т.$  может быть вычислен по формуле

$$\alpha_т. = 4,5 \cdot 4 \sqrt{\frac{\Delta t_{п.}}{D}} + \varepsilon_{п.} + \sigma \cdot \Theta; \Theta \approx T_{ср.}^3 (4 + 6 \Delta t_{п.} / T_{ср.}), \quad (10)$$

где  $T_{\text{ср.}}$  – температура окружающей среды, К;  $\Delta t_{\text{п.}}$  – разность температур поверхности кабеля и окружающей среды, К;  $\varepsilon_{\text{п.}}$  – коэффициент излучения поверхности кабеля;  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $D$  – наружный диаметр кабеля, см.

Значение  $\varepsilon_{\text{п.}}$  при наличии защитных покровов составляет примерно 0,8, для стальной брони 0,5–0,6, а для алюминиевой оболочки 0,2–0,3.

Значение  $\Delta t_{\text{п.}}$  обычно составляет около 20 °С.

**4. Алгоритм расчёта дополнительного нагревания жил.** Дополнительное нагревание жилы (добавку температуры  $\Delta t$ ) по отношению к температуре окружающей среды можно определить методом последовательных приближений.

1) Рассчитываются тепловые сопротивления элементов кабеля (5)–(7) и окружающей среды (8)–(10).

2) Принимается начальное значение перегрева.

3) Вычисляется активное сопротивление жилы (2).

4) Рассчитывается количество тепла, выделяемое (3) и отдаваемое (4) кабелем в единицу времени.

5) Определяется допустимый небаланс теплоты по отношению к среднему значению с допустимой погрешностью  $\xi$ :

$$\Delta Q = |Q_1 - Q_2|; Q_{\text{ср.}} = \frac{Q_1 + Q_2}{2}; \delta Q = \frac{\Delta Q}{Q_{\text{ср.}}} 100\% \leq \xi. \quad (11)$$

6) Если небаланс тепла превышает допустимое значение  $\xi$ , принимаемое равным 2–3 %, уточняется значение перегрева через среднее значение теплоты

$$\Delta t = Q_{\text{ср.}} \cdot \Sigma S, \quad (12)$$

повторяются циклы расчётов по пунктам 2)–6).

**5. Пример.** Рассчитать сопротивление жилы кабеля АСБГУ 10–3×185, проложенного в лотке ( $t_{\text{ср.}} = t_{\text{в.}} = 0^\circ\text{С}$ ), при токовых нагрузках  $I = 100 \text{ А}$  ( $j = 0,54 \text{ А}/\text{мм}^2$ ),  $I = 200 \text{ А}$  ( $j = 1,08 \text{ А}/\text{мм}^2$ ) с допустимой погрешностью  $\xi = 2,0 \%$ .

*Основные характеристики кабеля АСБГУ 10–3×185 (по справочнику).*

А – алюминиевая жила.

С – свинцовая оболочка.

БГ – тип защитного покрова: Б – броня из стальных лент, Г – без наружного покрова.

У – усовершенствованный.

Тип жилы – секторная.

Вид изоляции – бумажная, пропитанная маслосиликоновым составом.

$\sigma_{\text{из.}} = 6,0 \text{ }^\circ\text{С} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ ;  $\sigma_{\text{п.}} = 3,0 \text{ }^\circ\text{С} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ .

Расчётный диаметр жилы  $2r = 17,64 \text{ мм}$ .

Толщина фазной изоляции  $\Delta = 2,75 \text{ мм}$ , поясной изоляции  $\Delta_1 = 1,25 \text{ мм}$ .

Наружный диаметр кабеля  $D = 52,5 \text{ мм}$ .

Номинальная толщина свинцовой оболочки  $\Delta_0 = 1,56 \text{ мм}$ .

Минимальная толщина подушки  $\Delta_{\text{п.}} = 1,50 \text{ мм}$ .

Число и толщина стальных лент  $2 \times 0,5 \text{ мм}$  ( $\Delta_{\text{б.}} = 1,0 \text{ мм}$ ).

Определим радиус сектора при условии равенства площади сечения секторной жилы и эквивалентной круглой жилы:

$$S_{кр.} = \pi r^2; S_{ск.} = \frac{\pi R_{ск.}^2}{360} \beta; S_{кр.} = S_{ск.}; \pi r^2 = \frac{\pi R_{ск.}^2}{3}; R_{ск.} = \sqrt{3r^2} = \sqrt{3 \cdot 8,82^2} = 15,28 \text{ мм},$$

где  $\beta = 120^\circ$  – угол секторной жилы трёхжильного кабеля.

Тогда радиус по изоляции, внутренний и внешний радиусы защитного покрова:

$$R = R_{ск.} + \Delta + \Delta_1 = 15,28 + 2,75 + 1,25 = 19,28 \text{ мм};$$

$$R_{п1} = R_{ск.} + \Delta + \Delta_1 + \Delta_o. + \Delta_{п.} = 15,28 + 2,75 + 1,25 + 1,56 + 1,50 = 22,34 \text{ мм};$$

$$R_{п2} = R_{ск.} + \Delta + \Delta_1 + \Delta_o. + \Delta_{п.} + \Delta_б. = 15,28 + 2,75 + 1,25 + 1,56 + 1,50 + 1,0 = 23,34 \text{ мм}.$$

Представим первую итерацию расчёта при  $I = 200 \text{ А}$ .

1) По формулам (6), (7), (9), (10) рассчитаем тепловые сопротивления.

$$\sum S = S_{из.} + S_{п.} + S_{ср.} = 0,244 + 0,0209 + 0,530 = 0,795 \text{ }^\circ\text{С} \cdot \text{м}/\text{Вт}.$$

2) Примем начальное значение перегрева

$$\Delta t^{(1)} = 15,0^\circ \text{С}, t_{ж.}^{(1)} = t_{ср.} + \Delta t^{(1)} = 0 + 15,0 = 15,0^\circ \text{С}.$$

3) Найдём активное сопротивление жилы (2)

$$r_{t_{ж.}}^{(1)} = r_0 [1 + \alpha(t_{ж.}^{(1)} - 20^\circ)] = \frac{31}{185} \cdot 10^{-3} [1 + 0,00403(15,0 - 20)] = 0,165 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/\text{м}.$$

4) Количество тепла, выделяемое (3) и отдаваемое (4) кабелем за 1 секунду

$$Q_1^{(1)} = 3I^2 r_{t_{ж.}}^{(1)} = 3 \cdot 200^2 \cdot 0,165 \cdot 10^{-3} = 19,80 \text{ Вт}/\text{м}; Q_2^{(1)} = \frac{\Delta t^{(1)}}{\sum S} = \frac{15,0}{0,795} = 18,87 \text{ Вт}/\text{м}.$$

5) Небаланс тепла (11)

$$\delta Q^{(1)} = \frac{\Delta Q^{(1)}}{Q_{ср.}^{(1)}} 100\% = \frac{0,93}{19,34} 100 = 4,81\% > \xi.$$

6) Уточнение перегрева жилы

$$\Delta t^{(2)} = Q_{ср.}^{(1)} \sum S = 19,34 \cdot 0,795 = 15,4^\circ \text{С}.$$

Результаты расчёта на следующих итерациях обобщены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты расчёта перегрева и сопротивления жилы при  $I = 200 \text{ А}$

№ итерации	$\Delta t$ , °С	$t_{ж.}$ , °С	$r_{t_{ж.}} \cdot 10^{-3}$ , Ом/м	$Q_1$ , Вт/м	$Q_2$ , Вт/м	$\Delta Q$ , Вт/м	$Q_{ср.}$ , Вт/м	$\delta Q$ , %
1	15,0	15,0	0,165	19,80	18,87	0,93	19,34	4,81
2	15,4	15,4	0,165	19,80	19,37	0,43	19,58	2,20
3	15,6	15,6	0,165	19,80	19,62	0,18	19,71	0,91

При  $I = 100 \text{ А}$   $t_{ж.} = 3,8^\circ \text{С}$ ,  $r_{t_{ж.}} = 0,157 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}/\text{м}$  (5 итераций при  $\Delta t^{(1)} = 5,0^\circ \text{С}$ ).

Изменение сопротивления относительно нормативного составляет:

$$\text{а) при } I = 100 \text{ А } \delta r = (r_{t_{ж.}} - r_0) \cdot 100 / r_0 = (0,157 - 0,168) \cdot 100 / 0,168 = -6,55\%.$$

$$\text{б) при } I = 200 \text{ А } \delta r = (r_{t_{ж.}} - r_0) \cdot 100 / r_0 = (0,165 - 0,168) \cdot 100 / 0,168 = -1,78\%.$$

Неучёт перегрева при  $j = 1,08 \text{ А}/\text{мм}^2$  существенно занижает потери ЭЭ.

**6. Выводы.** 1. Алгоритм учёта токовой нагрузки и температуры окружающей среды позволяет уточнить активное сопротивление кабелей 6, 10 кВ и увеличить точность расчёта потерь ЭЭ в них. 2. Данное исследование требует продолжения для других групп КЛ, различающихся маркой, конструкцией и условиями прокладки.