

УДК 621.316

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК НА ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ДЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА****DETERMINATION OF PERMISSIBLE CURRENT LOAD ON OVERHEAD LINE WIRES FOR RAIL TRANSPORT ROLLING STOCK**

В.Н. Коршун

Научный руководитель – М.А. Короткевич, д.т.н., профессор  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь

karatkevich@bntu.by

V.N. Korshun

Supervisor – M. Korotkevich, Doctor of technical sciences, Professor  
Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

***Аннотация:** проведены расчеты сопротивления медной жилы переменному току. Определены тепловые сопротивления и длительно допустимые токи нагрузки на переменном и постоянном напряжении для проводов воздушных линий для подвижного состава рельсового транспорта. Выявлены некоторые особенности, которые необходимо учитывать при определении токовой нагрузки.*

***Abstract:** calculations of the resistance of a copper wire to an alternating current were carried out. Thermal resistances and long-term permissible load currents at alternating and direct voltage for wires of overhead lines for rolling stock of rail transport are determined. Some features that must be taken into account when determining the current load have been revealed.*

***Ключевые слова:** провода, жила, сечение, изоляция, сопротивление, токовая нагрузка.*

***Key words:** wire, core, section, insulation, resistance, current load.*

**Введение**

Максимальное значение тока, при котором температура жил достигает предельно допустимых значений, но не приводит к выходу провода из строя, называется максимальной допустимой длительной токовой нагрузкой.

Изолированные медные провода типа ППСРМ и ППСРМ на напряжение 660 В переменного тока частотой до 400 Гц или 1000 В постоянного тока, предназначены для присоединения к подвижным токоприемникам, монтажа с ограниченной подвижностью и для фиксированного монтажа при отсутствии воздействия смазочных масел и дизельного топлива [2].

**Основная часть**

Для подвижного состава рельсового транспорта широкое применение нашли провода типа ППСРМ и ППСРН. Провода должны быть устойчивы к вертикальным колебаниям, вибрациям, изгибам и изгибам с одновременным закручиванием. Провода стойки к воздействию дождя, динамическому воздействию пыли, выпадению инея и воздействию озона. Провода типа ППСРН не

распространяют горение. В ходе эксплуатации провода не должны подвергаться прямому воздействию солнечного излучения.

Расшифровка марки провода ППСРМ [1]:

ППС – провода для подвижного состава рельсового транспорта и троллейбусов;

Р – изоляция медных проводов изготовлена из резины;

М – оболочка из маслостойкой резины.

Расшифровка марки провода ППСРН:

Н – оболочка из маслостойкой резины, не распространяющей горение.

Сопротивление жилы переменному току  $R$ , Ом/м, на единицу длины при ее максимальной рабочей температуре определяется по формуле:

$$R = R' \cdot (1 + y_s + y_p), \quad (1)$$

где  $R'$  - сопротивление жилы постоянному току при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

$y_s$  - коэффициент поверхностного эффекта;

$y_p$  - коэффициент эффекта близости.

Сопротивление жилы постоянному току  $R'$ , Ом/м, на единицу длины при ее максимальной рабочей температуре  $\Theta$  определяют следующим образом:

$$R' = R_o \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta - 20)], \quad (2)$$

где  $R_o$  - сопротивление жилы постоянному току при 20 °С, Ом/м;

$\alpha_{20}$  - температурный коэффициент при 20 °С;

$\Theta$  - максимальная рабочая температура в градусах Цельсия (определяется типом используемой изоляции), установленная в стандарте или технических условиях на провод конкретного типа.

Коэффициент поверхностного эффекта  $y_s$  определяют по формуле:

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}, \quad (3)$$

где  $x_s^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R'} \cdot 10^{-7} \cdot k_s$ ,

$f$  - частота, Гц.

Коэффициент эффекта близости определяют по формуле:

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot 2,9, \quad (4)$$

где  $x_p^2 = \frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R'} \cdot 10^{-7} \cdot k_p$ ,

$d_c$  - диаметр жилы, мм;

$s$  - расстояние между осями жил, мм.

Однако, эти коэффициенты учитываются для двухжильных и двух одножильных кабелей и проводов. В данном случае рассматривается только один одножильный провод, а значит, влияние данных коэффициентов не учитывается ( $y_p = 0$ ).

Таблица 1 – Расчётные сопротивления жилы переменному току

Материал жилы	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Сопротивление жилы постоянному току $R'$ , Ом/м·10 <sup>-5</sup> ,	Коэффициент поверхностного эффекта $y_s$	Значение $x_p$	Коэффициент эффекта близости $y_p$	Сопротивление жилы переменному току $R$ , Ом/м·10 <sup>-5</sup> ,
Медь	240	8,313	0,012	1,229	0	8,411

Тепловое сопротивление между одной жилой и оболочкой  $T_1$  определяется по формуле:

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_c} \right], \tag{5}$$

где  $\rho_T$  - удельное тепловое сопротивление изоляции, К·м/Вт;

$d_c$  - диаметр жилы, мм;

$t_1$  - толщина изоляции между жилой и оболочкой, мм.

Тепловое сопротивление между оболочкой и броней  $T_2$  рассчитывается только для кабеля. В данной случае  $T_2 = 0$ .

Тепловое сопротивление наружных защитных покрытий  $T_3$  наложенных концентрическими слоями, определяют по формуле:

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{2 \cdot t_3}{D'_a} \right], \tag{6}$$

где  $t_3$  - толщина защитного покрытия, мм;

$D'_a$  - наружный диаметр брони, мм.

За защитное покрытие примем оболочку из холодостойкой ПВХ пластика номинальной толщиной 3 мм.

Тепловое сопротивление среды  $T_4$ , окружающий провод, находящийся в воздухе и подверженный солнечному излучению определяется по формуле:

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_e^* \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}}, \tag{7}$$

где  $h = \frac{Z}{(D_e^*)^g} + E$ ;

$D_e^*$  - наружный диаметр провода, м;

$h$  - коэффициент теплового рассеяния, полученный по вышеприведенной формуле, где используются константы  $Z$ ,  $E$  и  $g$  из таблиц или по графику расчета внешнего сопротивления кабелей, проложенных на воздухе,  $Вт / м^2 \cdot К^{5/4}$ .

$\Delta\theta_s$  - превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды, К.

Таблица 2 – Расчётные тепловые сопротивления  $T_1, T_2, T_3$

Материал жилы	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Номинальное напряжение, В	$T_1$ , К·м/Вт	$T_2$ , К·м/Вт	$T_3$ , К·м/Вт
Медь	240	660	0,193	0	0,12

Расчет  $\Delta\theta_s$  производят следующим образом:

- 1) определяют значение  $K_A$  по следующей формуле:
- 2)

$$K_A = \frac{\pi \cdot D_e^* \cdot h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} \cdot \left[ \frac{T_1}{n} + T_2 \cdot (1 + \lambda_1) + T_3 \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \right], \tag{8}$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  - соответственно, отношение общих потерь в металлических оболочках и отношение общих потерь в броне к общим потерям в жилах (или потерь в одной оболочке или броне к потерям в одной жиле). Значения отношения потерь принимаем равными 0, т.к. данные величины рассчитываются для кабеля;

$n$  - число жил в проводе;

2) находят линию на графике по значению  $K_A$  в качестве ординаты, а затем находят точку на данной линии для соответствующего значения  $\Delta\theta + \Delta\theta_d + \Delta\theta_{ds} = const$ .

Если пренебречь диэлектрическими потерями,  $\Delta\theta_d = 0$ . С учетом того, что провода типа ППСРН и ППСРМ не должны подвергаться солнечному излучению, то  $\Delta\theta_{ds} = 0$ .

Таблица 3 – Расчётное тепловое сопротивление  $T_4$ .

Материал жилы	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Номинальное напряжение, В	Коэффициент теплового рассеяния	Значение $K_A$	Значение $\Delta\theta_s^{1/4}$	$T_4$ , К·м/Вт
Медь	240	660	5,454	0,198	2,28	0,691

Формула для определения допустимой токовой нагрузки на кабель на переменном напряжении, подверженный прямому солнечному излучению выглядит следующим образом:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - W_d \cdot [0,5 \cdot T_1 + n \cdot (T_2 + T_3 + T_4^*)] - \sigma \cdot D_e^* \cdot H \cdot T_4^*}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (9)$$

где  $\Delta\theta$  – допустимое превышение температуры жилы над температурой окружающей среды, °C ;

$\sigma$  – коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью кабеля;

$T_4^*$  – тепловое сопротивление окружающей среды при прокладке кабеля на воздухе с поправкой на солнечное излучение, К·м/Вт, в данном случае равно 0, т.к. не учитываем прямое влияние солнечного излучения.

С учетом всех особенностей рассмотренного провода, формула (9) примет вид:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (10)$$

Для кабеля на постоянном напряжении до 5 кВ допустимое значение номинальной токовой нагрузки получают по следующей упрощенной формуле по отношению к формуле для переменного напряжения:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta - \sigma \cdot D_e^* \cdot H \cdot T_4^*}{R' \cdot T_1 + n \cdot R' \cdot T_2 + n \cdot R' \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (11)$$

Для проводов типа ППСРН и ППСРМ формула (11) будет выглядеть следующим образом:

$$I = \left[ \frac{\Delta\theta}{R' \cdot T_1 + n \cdot R' \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5} \quad (12)$$

Таблица 4 – Длительно допустимые токи нагрузки

Материал жилы	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Количество жил, шт	Допустимые токи нагрузки I, А	
			на переменном напряжении	на постоянном напряжении до 5 кВ
Медь	240	1	688,247	692,292

### **Заключение**

Определены длительно допустимые токи нагрузки на одножильные провода воздушных линий для подвижного состава рельсового транспорта, а именно, для проводов типа ППСРН и ППСРМ с одной токопроводящей медной жилой сечением  $240 \text{ мм}^2$ , напряжением 660 В, толщиной изоляции из резины номинальной толщиной 2,4 мм, оболочкой из холодостойкой ПВХ пластика номинальной толщиной 3 мм, расположенный в воздухе без прямого воздействия солнечного излучения.

### **Литература**

1. Кабели и провода. Каталог продукции. Четвертое издание – Россия, г. Кольчугино: ОАО «Электрокабель» Кольчугинский завод. – 164 с.
2. Каталог кабельной продукции. Россия: Холдинг Кабельный Альянс. - 478 с.