

УДК 621.311

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВЫХ НАГРУЗОК
НА ОДНОЖИЛЬНЫЕ СИЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КАБЕЛИ
DETERMINATION OF LONG-TERM PERMISSIBLE CURRENT LOADS
ON SINGLE-CORE POWER ELECTRICAL CABLES**

Т.В. Арсенович

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

T. Arsenovich

Supervisor – M. Korotkevich, doctor of technical sciences, professor
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** проведены расчёты сопротивления медных и алюминиевых жил переменному току. Оценены потери мощности в экранах и броне (стальной проволочной и немагнитной). Определены тепловые сопротивления и длительно допустимые токи нагрузки. Кабели больших сечений лучше выбирать по экономической плотности тока, а малых по допустимой плотности тока.*

***Abstract:** calculations of the resistance of copper and aluminum conductors to alternating current have been carried out. Power losses in screens and armor (steel wire and non-magnetic) are estimated. Thermal resistance and long-term permissible load currents have been determined. It is better to choose cables of large cross-sections according to the economic current density, and small ones according to the permissible current density.*

***Ключевые слова:** кабели, изоляция, сшитый полиэтилен, сопротивление, потери мощности.*

***Keywords:** cables, insulation, XLPE insulated, resistance, power loss.*

Введение

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена с начала двухтысячных годов внедряются в Республике Беларусь. Это относится к одножильным кабелям среднего (6-35 кВ) и высокого (110 кВ) напряжения. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена приходят на замену кабелям с бумажно-масляной изоляцией.

Основные преимущества одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена:

- низкая повреждаемость;
- возможность прокладки на трассах с неограниченной разностью уровней;
- высокая механическая прочность на разрыв и сжатие;
- высокая пропускная способность;
- возможность прокладки на сложных трассах;
- соединительные и концевые муфты технологичны и экологически безопасны;
- возможность прокладки при низких температурах без предварительного подогрева;

- экологическая безопасность кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. Отсутствуют масло, битум и свинец, что обеспечивает минимальное влияние на окружающую среду.

Основная часть

Сопротивление жилы переменному току R , Ом/м:

$$R = R' \cdot (1 + y_s + y_p), \tag{1}$$

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

y_s – коэффициент поверхностного эффекта;

y_p – коэффициент эффекта близости;

R' – сопротивление жилы постоянному току, Ом/м [1].

Коэффициент поверхностного эффекта y_s :

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}, \tag{2}$$

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

f – частота, Гц.

Коэффициент эффекта близости y_p :

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} + 0,27} \right], \tag{3}$$

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.

Таблица 1 – Расчётные сопротивления жилы переменному току

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Сопротивление жилы постоянному току R' , Ом/м · 10 ⁻³	Коэффициент поверхностного эффекта y_s	Коэффициент эффекта близости y_p	R , Ом/м · 10 ⁻³	
					горизонтальное расположение	треугольное расположение
Медь	120	0,1951	0,0022	0,0014	0,1958	0,1958
Алюминий	120	0,3244	0,0008	0,0005	0,3248	0,3248

Потери в экране λ_1 складываются из потерь, обусловленных вихревыми токами λ_1' и циркулирующими токами λ_1'' :

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda_1''. \tag{4}$$

Для трёх одножильных кабелей, расположенных треугольником, коэффициент потерь:

$$\lambda_1' = \frac{R_{\text{экр}}}{R} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{экр}}}{X}\right)^2}, \tag{5}$$

где $R_{\text{экр}}$ – сопротивление экрана, Ом/м [1];

X – реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м [1];

$\lambda_1'' = 0$, т.е. потери, обусловленные вихревыми токами, не учитываются.

Таблица 2 – Расчётные потери в экране

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение кабеля, кВ	R, Ом/м · 10 ⁻³	Бронированный кабель	λ_1	
					горизонтальное расположение	треугольное расположение
Медь	120	35	0,1958	Нет	0,2331	0,0570
				Да	0,1554	0,0380
Алюминий	120	35	0,3248	Нет	0,1573	0,0385
				Да	0,1049	0,0257

Расчёт потерь мощности в стальной проволоочной броне одножильных кабелей при соединении оболочки и брони на обоих концах производим в следующем порядке:

- эквивалентное сопротивление параллельных оболочки и брони R_{Σ} , Ом/м:

$$R_{\Sigma} = \frac{R_{\text{экp}} \cdot R_{\text{бр}}}{R_{\text{экp}} + R_{\text{бр}}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{экp}}$ – сопротивление экрана на единицу длины кабеля при максимальной температуре, Ом/м;

$R_{\text{бр}}$ – сопротивление брони переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре, принимаем $\tau_{\text{бр}} = 65^{\circ}\text{C}$, Ом/м.

Сопротивление брони $R_{\text{бр}}$ переменному току на единицу длины при максимальной рабочей температуре:

$$R_{\text{бр}} = R_{\text{бр}0} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_{\text{бр}} - 20)], \quad (7)$$

где $R_{\text{бр}0}$ – сопротивление брони при 20 °С, Ом/м;

α_{20} – температурный коэффициент сопротивления при 20 °С.

- индуктивность элементов цепи на фазу:

Значения коэффициентов B_1, B_2 , Ом/м:

$$B_1 = \omega \cdot (H_s + H_1 + H_3), \quad (8)$$

$$B_2 = \omega \cdot H_2, \quad (9)$$

где H_1, H_2, H_3 – компоненты индуктивности, Гн/м [1].

Потери в броне:

$$\lambda_2 = \frac{R_{\Sigma}}{2R_{\text{ж}}} \left(\frac{B_2^2 + B_1^2 + R_{\Sigma} B_2}{(R_{\Sigma} + B_2)^2 + B_1^2} \right). \quad (10)$$

Таблица 3 – Результаты расчёта относительных потерь мощности в стальной проволочной и немагнитной броне одножильных кабелей

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение кабеля, кВ	Броня	λ_2	
				горизонтальное расположение	треугольное расположение
Медь	120	35	Немагнитная	0,2320	0,0387
			Стальная проволочная	1,0127	1,0116
Алюминий	120	35	Немагнитная	0,3844	0,0961
			Стальная проволочная	1,3723	1,3709

Тепловое сопротивление между одной жилой и оболочкой T_1 :

$$T_1 = \frac{\sigma_{и}}{2\pi} \ln\left[1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_{ж}}\right], \quad (11)$$

где $\sigma_{и}$ – удельное тепловое сопротивление изоляции, °С·м/Вт;

$d_{ж}$ – диаметр жилы, мм;

t_1 – толщина изоляции между жилой и оболочкой, мм.

Тепловое сопротивление между оболочкой и броней T_2 :

$$T_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{под} \cdot \ln\left[1 + \frac{2 \cdot t_2}{d_{экр.нар.}}\right], \quad (12)$$

где $\sigma_{под}$ – удельное сопротивление подушки, °С · м/Вт;

t_2 – толщина подушки, мм;

$d_{экр.нар.}$ - наружный диаметр оболочки, мм.

Тепловое сопротивление наружных защитных покрытий T_3 :

$$T_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{покр} \cdot \ln\left[1 + \frac{2 \cdot t_3}{d_{бр.нар.}}\right], \quad (13)$$

где $\sigma_{покр}$ – удельное тепловое сопротивление наружного защитного покрытия, °С · м/Вт;

t_3 – толщина защитного покрытия, мм;

$d_{бр.нар.}$ – наружный диаметр брони, мм.

Тепловое сопротивление T_4 среды, окружающей кабель, проложенный на воздухе и защищенный от прямого солнечного излучения:

$$T_4 = \frac{1}{\pi \cdot D_k^* \cdot h \cdot (\Delta\theta_s)^{1/4}}, \quad (14)$$

где D_k^* – наружный диаметр кабеля, м;

$\Delta\theta_s$ – превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды, К;

h – коэффициент теплового рассеяния.

Изолированные одиночные кабели, проложенные в земле:

$$T_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{зем} \cdot \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}), \quad (15)$$

где $\sigma_{зем}$ – удельное тепловое сопротивление земли, К·м/Вт;

$$u = \frac{2 \cdot L}{D_k};$$

L – расстояние от поверхности земли до оси кабеля, мм;
 D_к наружный диаметр кабеля, мм.

Таблица 4 – Расчётные тепловые сопротивления T₁, T₂, T₃

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение, кВ	T ₁ , °С · м/Вт	T ₂ , °С · м/Вт	T ₃ , °С · м/Вт		
					нет брони	немагнитная броня	стальная проволочная броня
Медь	120	35	0,4822	0,0541	0,0922	0,0843	0,0765
Алюминий	120	35	0,4822	0,0541	0,0922	0,0843	0,0765

Таблица 5 – Расчётные тепловые сопротивления T₄

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение, кВ	Броня	T ₄ на воздухе, °С · м/Вт		T ₄ на воздухе по старой методике °С · м/Вт	T ₄ в земле °С · м/Вт
				Горизонтальное расположение	Треугольное расположение		
1	2	3	4	5	6	7	8
Медь	120	35	нет	0,6125	0,6179	0,2374	0,9184
			немагнитная	0,5895	0,6086	0,2203	1,3498
			стальная проволочная	0,5665	0,5674	0,2035	1,3202

Допустимая токовая нагрузка кабелей на переменное напряжение:

$$\Delta\theta = \left(I^2 \cdot R + \frac{1}{2} \cdot W_d \right) \cdot T_1 + [I^2 \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) + W_d] \cdot n \cdot T_2 + [I^2 \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d] \cdot n \cdot (T_3 + T_4), \quad (16)$$

где I – ток, проходящий по одной жиле, А;

n – число несущих нагрузку жил в кабеле;

Δθ – превышение температуры жилы над температурой окружающей среды, К;

Из формулы (16) получаем допустимое значение токовой нагрузки:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{R \cdot T_1 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1) \cdot T_2 + n \cdot R \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (T_3 + T_4)} \right]^{0,5}. \quad (17)$$

Таблица 6 – Длительно допустимые токи нагрузки

Материал жилы	Сечение жилы, мм ²	Номинальное напряжение кабеля, кВ	Броня	I в земле, А		I на воздухе, А	
				Горизонтальное расположение	Треугольное расположение	Горизонтальное расположение	Треугольное расположение
Медь	120	35	нет	494,288	510,211	530,950	548,055
			немагнитная	430,254	490,885	462,167	527,295
			стальная проволочная	338,611	348,199	363,726	374,026
Алюминий	120	35	нет	389,291	397,593	418,165	427,084
			немагнитная	355,505	388,727	381,874	417,560
			стальная проволочная	301,840	309,462	324,228	332,416

Заключение

Определены длительно допустимые токи нагрузок на одножильные силовые электрические кабели напряжением 35 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с учётом места прокладки (в земле, в воздухе), расположения (горизонтальное, треугольное) кабеля, материала жилы, сечения токопроводящих жил (120 мм²).

Основываясь на результатах расчёта, установлено, что длительно допустимые токовые нагрузки у кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в 1,1-1,4 раза больше аналогичных нагрузок для кабелей с бумажно-масляной изоляцией.

Для кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена с алюминиевыми жилами сечением 120 мм² и номинальным напряжением 35 кВ максимальная передаваемая мощность в 1,35 раза больше, чем у кабельных линий с бумажно-масляной изоляцией. Кабели больших сечений лучше выбирать по экономической плотности тока, а малых по допустимой плотности тока.

Литература

1. Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 1-1. Уравнения для расчёта номинальной токовой нагрузки (100 %-ный коэффициент нагрузки) и расчёт потерь. Общие положения : ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. – М.: Стандартинформ, 2009. – 25 с.
2. Кабели электрические. Вычисление номинальной токовой нагрузки. Часть 2-1. Тепловое сопротивление. Расчёт теплового сопротивления. Общие положения : ГОСТ Р МЭК 60287-2-1-2009. – М.: Стандартинформ, 2009. – 31 с.
3. Кабели и провода. Каталог продукции. – Витебск : ПО «Энергокомплект», 2019. – 135 с.
4. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение. Каталог продукции. – М. : ТД «Ункомтех», 2017. – 40 с.