

ДОПУСТИМЫЕ ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ ТРЁХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 КВ С БРОНЕЙ

М.Э. Высоцкий, аспирант

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

В статье рассматриваются вопросы допустимых токовых нагрузок трехжильных кабелей напряжением 10 кВ с различными типами брони – из алюминиевых и стальных проволок, а также стальных лент. Приведены формулы и методика расчета длительно допустимых токов согласно международным стандартам. Проведен сравнительный анализ результатов расчета с данными заводских каталогов для кабелей сечением от 50 до 400 мм². Показано, что внесение брони в конструкцию кабеля не оказывает существенного влияния на допустимую токовую нагрузку. Также установлено, что площадь сечения экранов слабо влияет на допустимый ток.

Ключевые слова: *кабели среднего напряжения, трехжильные кабели, допустимая токовая нагрузка, броня кабеля, проволочная броня, ленточная броня, сечение экрана.*

Введение. Трёхжильные кабели среднего напряжения находят широкое применение в электрических сетях, поскольку представляются более экономичными по сравнению с одножильными кабелями. При этом такие кабели изготавливаются в большом разнообразии конструкций, включая различные варианты брони – из алюминиевых и стальных проволок, а также стальных лент.

Широкая вариативность конструкций создает определенные сложности при расчете длительно допустимых токов нагрузки жил кабелей. Международные стандарты [1, 2] предписывают формулы и методики для расчета циркулирующих и вихревых токов в экранах, металлических оболочках и броне, а также тепловых сопротивлений элементов конструкции кабеля.

Целью данной работы является оценка влияния типа и параметров брони, а также сечения экранов на допустимую токовую нагрузку трехжильных кабелей 10 кВ на основе расчетов по стандартным методикам в сравнении с каталожными данными.

Основная часть. Выражения для расчета длительно допустимого тока нагрузки трехжильных кабелей 10 кВ базируются на уравнении теплового баланса с учетом джоулевых потерь в жилах, экранах и броне, а также тепловых сопротивлений слоев изоляции и защитных покровов [1]:

$$I = \left[\frac{\Delta\theta}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)} \right]^{0,5},$$

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

$\Delta\theta = \theta_{\text{доп}} - \theta_0$ – превышение температуры жилы кабеля над средней температурой окружающей среды, примем 75 °С;

R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м;

n – количество токопроводящих жил, равно 3;

T_1, T_2, T_3, T_4 – тепловое сопротивление изоляции, подушки, оболочки, окружающей среды, К · м/Вт;

λ_1, λ_2 – отношение потерь мощности в экране и броне соответственно к общим потерям в жилах кабеля.

Геометрические размеры кабеля рассчитываются с учетом диаметров и толщин отдельных элементов – жил, изоляции, экранов, заполнителя, брони, защитных оболочек. Диаметр трёхжильного кабеля запишем в виде:

$$d = 2 \cdot ((d_{\text{ж}} / 2 + \Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{экр}}) \cdot \frac{2\sqrt{3} + 3}{3} + t_f + \Delta_{\text{ал}} + \Delta_{\text{вн}} + \Delta_{\text{бр}} + \Delta_{\text{обол}}),$$

где $d_{\text{ж}}$ – диаметр жилы;

$\Delta_{\text{эж}}, \Delta_{\text{эи}}$ – толщина экрана по жиле и по изоляции (0,6 мм);

$\Delta_{\text{из}}$ – то же изоляции (3,4 мм);

$2\Delta_{\text{экр}}$ – то же экрана из медных проволок для сечений экрана 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; соответственно 1,1; 1,2; 1,4; 1,7; 2,0; 2,4; 2,7 мм [3];

t_f – толщина заполнителя между экранами и оболочкой, примем 2 мм;

$\Delta_{\text{ал}}$ – то же алюмополимерной ленты (толщина алюминиевой части 0,15 мм, толщина полимерной части 0,05 мм);

$\Delta_{\text{вн}}$ – то же внутренней оболочки (подушки) (2,0 мм);

$\Delta_{\text{бр}}$ – диаметр проволок брони 2,5 мм [3];

$\Delta_{\text{обол}}$ – то же наружного защитного покрытия 3,0; 3,2; 3,4; 3,6 мм при диаметре под оболочкой до 40; 40–50; 50–60; свыше 60 мм соответственно.

Для кабелей с соприкасающимися экранами из медных проволок циркуляционные и вихревые потери в экранах пренебрежимо малы ($\lambda_1 = 0$). Для трёхжильного кабеля со стальной проволочной броней (с жилами круглого сечения) доля потерь в броне:

$$\lambda_2 = 1,23 \frac{R_A}{R} \left(\frac{2c}{d_A} \right)^2 \frac{1}{\left(\frac{2,77R_A 10^6}{\omega} \right) + 1},$$

где R_A – сопротивление брони при максимальной температуре, Ом/м;

c – расстояние между осями жил и центром кабеля, мм;

d_A – средний диаметр брони, мм;

$\omega = 2\pi f$.

Для трёхжильного кабеля со стальной ленточной броней (с жилами круглого сечения) доля потерь в броне:

$$\lambda_2 = \frac{s^2 k^2 10^{-7}}{R d_A \delta} + \frac{2,25 s^2 k^2 \delta 10^{-8}}{R d_A},$$

где s – расстояние между центрами жила, мм;

δ – эквивалентная толщина брони кабеля, мм; $\delta = \frac{A}{\pi d_A}$;

$$k = \frac{1}{1 + \frac{d_A}{\mu \delta}};$$

μ – относительная магнитная проницаемость стальной ленты, примем равным 300;

A – площадь поперечного сечения брони кабеля, мм².

Для трёхжильных кабелей с экструдированной изоляцией с соприкасающимися экранами на каждой жиле выполненные из металлических проволок (экран не обеспечивает изотерму) тепловое сопротивление изоляции:

$$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G + 0,031(\rho_f - \rho_i) \exp\left(0,67 \frac{t_1}{d_c}\right),$$

где ρ_i – удельное тепловое сопротивление изоляции;

ρ_f – удельное тепловое сопротивление заполнителя;

t_1 – толщина между жилой и наружной оболочкой (для небронированных кабелей);

t – толщина изоляции между жилами.

$$t_1 = \Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{экр}} + t_f;$$

$$t = 2(\Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{экр}}).$$

Тепловое сопротивление между медным экраном и броней (только для бронированных кабелей):

$$T_2 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{2\Delta_{\text{вн}}}{D_s}\right),$$

где ρ_T – удельное тепловое сопротивление материала (ПВХ пластиката);

$$D_s = 2 \cdot \left((d_{\text{ж}} / 2 + \Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{экр}}) \cdot \frac{2\sqrt{3} + 3}{3} + t_f \right) - \text{диаметр заполнителя, мм.}$$

Для небронированных кабелей $T_2 = 0$.

Удельное тепловое сопротивление оболочки:

$$T_3 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \Delta_{\text{обол}}}{D_a} \right).$$

Удельное тепловое сопротивление грунта:

$$T_4 = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln(2u),$$

где ρ_s – удельное тепловое сопротивление грунта окружающего кабель, примем равным 1,2 К · м/Вт;

$u = \frac{2L}{d}$, где $L = 700$ мм – расстояние от поверхности земли до оси кабеля.

Для оценки влияния типа брони и сечения экрана проведены расчеты допустимых токов для кабелей с площадью поперечного сечения жил от 50 до 400 мм² и сечением экранов от 16 до 120 мм² с различными вариантами брони. Результаты расчетов в сравнении с каталожными данными [4] представлены на рисунке 1.

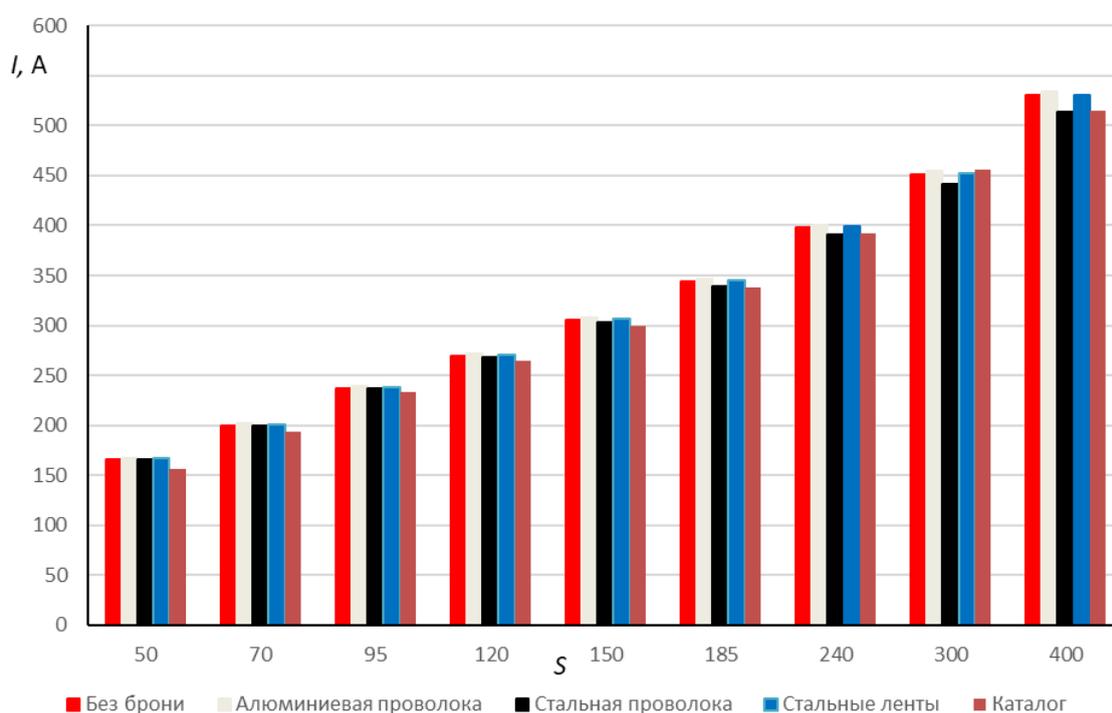


Рисунок 1. – Длительно допустимые токи для трёхжильных бронированных кабелей

Как видно, наличие и тип брони не оказывают существенного влияния на допустимую токовую нагрузку – отклонение от значений для небронированного кабеля не превышает 5%. Также расчеты показали, что при изменении сечения экрана допустимый ток меняется менее чем на 1%.

Выводы. Для трехжильных кабелей 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена наличие и тип брони (алюминиевая, стальная проволочная, стальная ленточная), а также

площадь сечения медных проволочных экранов в диапазоне от 16 до 120 мм² не оказывают существенного влияния на длительно допустимый ток нагрузки. Отклонение значений тока относительно небронированного кабеля не превышает 5%, а влияние сечения экрана еще менее значимо (менее 1%). Это позволяет использовать упрощенную методику теплового расчета токовой нагрузки без детального учета конструкции брони и экранов.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEC 60287-1-1:2023. Electric cables – Calculation of the current rating. Part 1–1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses General [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
2. IEC 60287-2-1:2023. Calculation of the Current Rating. Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.
3. IEC 60502-2:2014. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV). [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.
4. Каталог кабельно-проводниковой продукции. – Витебск : Производственное объединение «Энергокомплект», 2019. – 194 с.