

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>

УДК 621.315.2

Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения

М. Э. Высоцкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. На длительно допустимые токи нагрузки силовых кабелей влияет большое количество факторов, включая условия окружающей среды, способ прокладки, а также геометрические, тепловые и электрические характеристики конструкции кабеля. В каталогах производителей силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена не уточняются значения длительно допустимых токов нагрузки, которые бы учитывали площадь поперечного сечения экрана, наличие алюмополимерной ленты и брони из алюминиевых проволок. Эти компоненты могут оказывать значительное воздействие на допустимую нагрузку из-за индуцированных в них токов при двустороннем заземлении, что ведет к дополнительному нагреву кабеля. Целью данной работы является анализ влияния вышеупомянутых факторов на длительно допустимые токи нагрузки. В работе представлены формулы для расчета длительно допустимого тока нагрузки, которые учитывают особенности конструкции рассматриваемых кабелей. Расчеты показали, что допустимая нагрузка при увеличении площади поперечного сечения экрана из номинального ряда на одну ступень может уменьшаться на 6 %. Введение алюмополимерной ленты в конструкцию кабеля изменяет допустимую нагрузку не более чем на 2 %, наличие брони может привести к уменьшению допустимой нагрузки до 18 % и ее увеличению до 13 % в зависимости от сечения жилы и экрана, способа и условий прокладки. Полученные результаты расчетов отличаются от данных из каталогов до 25 %. Погрешности указывают на необходимость расчета длительно допустимой токовой нагрузки кабелей, отличающихся своей конструкцией.

Ключевые слова: кабельные линии, площадь поперечного сечения, алюмополимерная лента, броня из алюминиевых проволок, экран из медных проволок

Для цитирования: Высоцкий, М. Э. Длительно допустимые токи нагрузки одножильных кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена различного конструктивного исполнения / М. Э. Высоцкий // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 4. С. 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314>

Адрес для переписки

Высоцкий Максим Эдуардович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 33 661-76-75
vysotskiymmm@yandex.by

Address for correspondence

Vysotski Maksim E.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 33 661-76-75
vysotskiymmm@yandex.by

Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs

M. E. Vysotski¹⁾

¹⁾Belarussian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. There is a large number of factors that affect the long-term permissible load currents of power cables, including environmental conditions, the method of laying, as well as the geometric, thermal and electrical characteristics of the cable structure. The catalogs of manufacturers of power cables with cross-linked polyethylene insulation do not specify the long-term permissible load currents, which would take into account the cross-sectional area of the screen, the presence of aluminum polymer tape and armor made of aluminum wires. These components can have a significant impact on the permissible load due to the currents induced in them during two-way grounding, which leads to additional heating of the cable. The purpose of this study is to analyze the influence of the above-mentioned factors on the long-term permissible load currents. The paper presents formulas for calculating the long-term permissible load current, which take into account the design features of the cables under consideration. The calculations have shown that the permissible load can decrease by 6 % with an increase in the cross-sectional area of the screen from the nominal row by one step. The introduction of an aluminum polymer tape into the cable structure changes the permissible load by no more than 2 %. The presence of armor can lead to a decrease in the permissible load by up to 18 % and its increase by up to 13 %, depending on the section of the core and screen, the method and conditions of laying. The calculation results obtained differ from the catalog data by up to 25%. While the obtained errors indicate the need to form coefficients for a more accurate determination of the long-term permissible cable currents.

Keywords: cable lines, cross-sectional area, aluminum polymer tape, aluminum wire armor, copper wire screen

For citation: Vysotski M. E. (2024) Long-Term Permissible Load Currents of Single-Core Cables with a Voltage of 10 kV with Cross-Linked Polyethylene Insulation of Various Designs. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (4), 300–314. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-4-300-314> (in Russian)

Введение

В исследованиях [1, 2] доказана эффективность применения силовых кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Значения длительно допустимых токов нагрузки силовых электрических кабелей определяют надежность и безопасность эксплуатации электрических сетей. Исследования, проведенные в [3–5], подчеркивают значительное влияние таких параметров, как тепловое сопротивление грунта, глубина укладки кабеля в землю, интенсивность солнечного излучения, расстояние между кабелями, а также материал и площадь поперечного сечения токоведущих жил на значения длительно допустимых токов нагрузки.

В производственных каталогах на силовые кабели [6–8] приводятся значения токовых нагрузок на одножильные кабели, учитывающие класс напряжения, материал и площадь поперечного сечения жил, способ и условия прокладки (треугольником или в плоскости; в земле или в воздухе). Однако на тепловой режим работы кабеля влияют также площадь поперечного сечения экрана и наличие защитных металлических слоев в конструк-

ции кабеля, например алюмополимерной ленты для поперечной герметизации и проволочной брони из алюминия. Кабели, оснащенные защитными металлическими слоями, имеют из-за этого измененные геометрические характеристики. При двустороннем заземлении отмеченных слоев в них индуцируются токи, что в конечном итоге способствует повышению температуры нагрева жилы. Это предполагает возможность снижения допустимой нагрузки. Недогрузка кабельной линии может указывать на целесообразность использования кабеля с меньшей площадью поперечного сечения жилы, в то время как перегрузка может привести к сокращению срока службы кабеля и повышению риска возникновения аварийных ситуаций.

Цель данной работы заключается в оценке степени влияния площади поперечного сечения экрана, наличия алюмополимерной ленты и проволочной брони из алюминия на значения длительно допустимых токов. Для достижения поставленной цели предполагается выполнить расчет длительно допустимых токов для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена и наружной полимерной оболочкой на напряжение 10 кВ с сечением токоведущих жил S от 50 до 1000 мм² и сечением медного экрана S_s от 16 до 240 мм². То есть необходимо выявить зависимость между конструктивными особенностями кабелей и их способностью выдерживать определенные уровни нагрузки без риска для долговечности и безопасности эксплуатации.

Определение длительно допустимого тока нагрузки

В соответствии с [9] допустимое значение токовой нагрузки для одножильных кабелей, проложенных в почве, высыхание которой не происходит, или кабелей, проложенных в воздухе, без учета диэлектрических потерь (для изоляции из сшитого полиэтилена учет диэлектрических потерь ведут при фазном напряжении от 63,5 кВ) определяется по формуле

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

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, °С; $\theta_{\text{доп}} = 90$ °С – для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена; температуру окружающей среды θ_0 примем для прокладки в земле 15 °С, в воздухе 25 °С [10]; R – сопротивление жилы кабеля переменному току на единицу длины кабеля при максимальной рабочей температуре, Ом/м; T_1 – тепловое сопротивление изоляции между жилой и экраном, К·м/Вт; T_2 – то же подушки (внутренней оболочки) между экраном и броней (для бронированных кабелей), К·м/Вт; T_3 – то же наружного защитного покрытия (наружной оболочки), К·м/Вт; T_4 – то же между поверхностью

кабеля и окружающей средой, $K \cdot \text{м/Вт}$; λ_1 – отношение потерь мощности в экране к общим потерям в жилах кабеля; λ_2 – то же в броне к общим потерям в жилах кабеля.

Геометрические и электрические параметры кабелей 10 кВ. Диаметр кабеля d в общем случае можно записать в виде формулы [11]

$$d = d_{\text{ж}} + 2(\Delta_{\text{эж}} + \Delta_{\text{из}} + \Delta_{\text{эи}} + \Delta_{\text{разд}} + \Delta_{\text{экр}} + \Delta_{\text{ал}} + \Delta_{\text{вн}} + \Delta_{\text{бр}} + \Delta_{\text{обол}}), \quad (1)$$

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); $\Delta_{\text{разд}}$ – то же разделительного слоя (0,2 мм); $2\Delta_{\text{экр}}$ – то же экрана из медных проволок для сечений экрана 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240 соответственно 1,1; 1,2; 1,4; 1,7; 2,0; 2,4; 2,7; 3,0; 4,0; 5,0 мм [12]; $\Delta_{\text{ал}}$ – 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 для кабелей с диаметром под броней 25–35 мм; 35–60 мм соответственно 2,0; 2,5 мм [12]; $\Delta_{\text{обол}}$ – 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.

При этом если в кабеле отсутствует алюмополимерная лента, то в формуле (1) опускается $\Delta_{\text{ал}}$, если отсутствует броня, то опускается $\Delta_{\text{вн}} + \Delta_{\text{бр}}$.

Площадь поперечного сечения алюмополимерной ленты

$$S_{\text{л}} = \pi(r_{2\text{л}}^2 - r_{1\text{л}}^2) / 2,$$

где $r_{2\text{л}}$ – наружный радиус алюминиевой части алюмополимерной ленты;

$r_{1\text{л}}$ – внутренний радиус алюминиевой части алюмополимерной ленты;

Площадь поперечного сечения брони из алюминиевых проволок

$$S_{\text{бр}} = Ns_{\text{бр}},$$

где $N = \left[\frac{\pi(D_{\text{бр}} + \Delta_{\text{бр}})}{F\Delta_{\text{бр}}} \right]$ – количество проволок брони [13]; $D_{\text{бр}} = d - 2(\Delta_{\text{обол}} + \Delta_{\text{бр}})$ – диаметр кабеля под броней; F – коэффициент укладки, примем 1,048;

$s_{\text{бр}} = \frac{\pi \cdot \Delta_{\text{бр}}^2}{4}$ – площадь одной проволоки брони.

Сопrotивление жилы переменному току [9]

$$R = R'(1 + y_s + y_p),$$

где y_s – коэффициент поверхностного эффекта; y_p – то же эффекта близости; R' – сопротивление постоянному току при максимальной рабочей температуре

$$R' = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta_{sc} - 20)],$$

где R_{20} – сопротивление переменному току при температуре 20 °С, Ом/м (удельное электрическое сопротивление жилы и экрана для меди $1,7241 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, для алюминия $2,8264 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, алюминиевой части алюмополимерной ленты и брони из алюминиевых проволок $2,84 \cdot 10^{-8}$ Ом·м); α_{20} – температурный коэффициент для меди 0,00393 1/°С, для алюминия 0,00403 1/°С; θ_{sc} – максимальная рабочая температура (жилы 90 °С, экрана и защитных слоев 80 °С), °С.

Потери в экране трех одножильных кабелей, расположенных треугольником, экраны которых заземлены с двух сторон [9]:

$$\lambda_1 = \frac{R_s}{R} \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{X}\right)^2}, \quad (2)$$

где R_s – сопротивление экрана Ом/м; X – реактивное сопротивление оболочки или экрана на единицу длины кабеля, Ом/м, вычисляемое по формуле [9]

$$X = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2s}{d_s}\right), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$, 1/с; s – расстояние между осями жил в данной электрической секции, мм; d_s – средний диаметр экрана, мм.

Потери в экранах трех одножильных кабелей, расположенных в одной плоскости, экраны которых заземлены с двух сторон [9]:

– для внешнего кабеля с наибольшими потерями

$$\lambda_{11} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} + \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]; \quad (4)$$

– для внешнего кабеля с наименьшими потерями

$$\lambda_{12} = \frac{R_s}{R} \left[\frac{0,75P^2}{R_s^2 + P^2} + \frac{0,25Q^2}{R_s^2 + Q^2} - \frac{2R_s PQX_m}{\sqrt{3}(R_s^2 + P^2)(R_s^2 + Q^2)} \right]; \quad (5)$$

– для среднего кабеля

$$\lambda_{1m} = \frac{R_s}{R} \frac{Q^2}{R_s^2 + Q^2}, \quad (6)$$

где $P = X + X_m$;

$$Q = X - \frac{X_m}{3},$$

X_m – взаимное реактивное сопротивление на единицу длины кабеля между оболочкой наружного кабеля и жилами двух других при расположении кабелей в одной плоскости, Ом/м, вычисляемое по формуле

$$X_m = 2\omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln(2).$$

Для прокладки в земле в формуле (1) вместо λ_1 используется λ_{1m} , для прокладки в воздухе λ_{11} . Это обусловлено тем, что в земле средний кабель будет наиболее нагретым из-за влияния кабелей по бокам. В воздухе же это влияние гораздо слабее и наиболее нагретым будет кабель с большими потерями в экране.

Для кабелей с немагнитной броней или защитным усиливающим покрытием потери рассчитывают совместно с потерями в экране. При этом сопротивление экрана заменяют параллельной комбинацией сопротивлений экрана и защитного усиливающего покрытия кабеля [9, 14]

$$R_e = \frac{R_s R_A}{R_s + R_A},$$

где R_A – сопротивление защитного усиливающего покрытия (алюмополимерной ленты или проволочной брони из алюминия), Ом/м; R_e – эквивалентные сопротивления экрана и защитных металлических покрытий (ЗМП), соединенные параллельно, Ом/м.

Среднее значение диаметра экрана и защитного покрытия заменяют на средний диаметр d' , вычисляемый по формуле [9, 14]:

$$d' = \sqrt{\frac{d^2 + d_2^2}{2}},$$

где d' – средний диаметр экрана и ЗМС, мм; d_2 – то же ЗМС, мм.

Для кабелей с защитными металлическими покрытиями вычисленные значения доли потерь по выражениям (3)–(6) представляют сумму потерь в экране (и алюмополимерной ленте) λ_1 и броне λ_2 . В кабелях с броней при расчете длительно допустимого тока (1) требуется определить, какая часть из всех потерь будет приходиться на экран. Запишем долю потерь мощности в экране λ_s (или же λ_1 в формуле (1)), выраженную через значения доли суммарных потерь и сопротивления:

$$\lambda_s = (\lambda_1 + \lambda_2) \frac{R_e}{R_s}.$$

Расчет тепловых сопротивлений элементов кабеля и окружающей среды. Запишем формулы для расчета тепловых сопротивлений в соответ-

ствии с [15] с учетом уже принятых обозначений. Тепловое сопротивление между жилой и оболочкой

$$T_1 = \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{2t_1}{d_{ж}} \right),$$

где ρ_T – удельное тепловое сопротивление материала (3,5 К·м/Вт для полиэтиленовой изоляции); $t_1 = \Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи}$ – толщина изоляции между жилой и экраном, мм.

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

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

где ρ_T – для ПВХ пластика 6 К·м/Вт; $D_s = d_c + 2(\Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи} + \Delta_{разд} + \Delta_{экр})$ – наружный диаметр медного экрана, мм.

Тепловое сопротивление наружного защитного покрытия

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

где $\rho_T = 3,5$ К·м/Вт – для полиэтилена; $D_a = d_c + 2(\Delta_{эж} + \Delta_{из} + \Delta_{эи} + \Delta_{разд} + \Delta_{экр} + \Delta_{разд} + \Delta_{вн} + \Delta_{бр})$ – диаметр кабеля под оболочкой, мм.

Тепловое сопротивление окружающей среды:

– грунта для трех кабелей с разными потерями в экране, расположенных в горизонтальной плоскости, равноудаленных друг от друга:

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) + \left(\frac{1 + 0,5(\lambda_{11} + \lambda_{12})}{1 + \lambda_{1m}} \right) \cdot \ln \left(1 + \left(\frac{2L}{s_1} \right)^2 \right) \right],$$

где $\rho_T = 1,2$ К·м/Вт – принимаем для грунта; $u = \frac{2L}{d}$; $L = 700$ мм – расстояние от поверхности земли до оси кабеля; s_1 – межосевое расстояние между соседними кабелями, мм;

– грунта для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную с неметаллическими оболочками, имеющих экран из медных проволок:

$$T_4 = \frac{\rho_T}{2\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) + 2 \ln(u) \right];$$

– грунта для трех однофазных кабелей, расположенных треугольником вплотную с алюмополимерной лентой и (или) броней (при этом T_3 нужно умножить на коэффициент 1,6):

$$T_4 = \frac{1,5 \cdot \rho_T}{\pi} \left[\ln(u + \sqrt{u^2 + 1}) - 0,630 \right];$$

– воздуха для кабелей, защищенных от прямого солнечного излучения:

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

где $h = \frac{Z}{(D_e)^g} + E$; h – коэффициент теплового рассеяния, где используются константы Z , E , g , значения которых для прокладки треугольником составляют 0,96; 1,25; 0,20 и для прокладки в вертикальной плоскости с расстоянием между кабелями в свету, равным диаметру кабеля 1,31; 2,00; 0,20 соответственно; $\Delta\theta_s$ – превышение температуры поверхности кабеля над температурой окружающей среды; $(\Delta\theta_s)^{1/4}$ определим методом последовательных приближений.

Определим коэффициент K_A

$$K_A = \frac{\pi D_e h}{1 + \lambda_1 + \lambda_2} [T_1 + T_2(1 + \lambda_1) + T_3(1 + \lambda_1 + \lambda_2)].$$

Затем проведем расчет по формуле

$$(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} = \left[\frac{\Delta\theta}{1 + K_A \cdot (\Delta\theta_s)_n^{1/4}} \right].$$

Устанавливая начальное значение $(\Delta\theta_s)_n^{1/4} = 2$ и повторяя вычисления до достижения $(\Delta\theta_s)_{n+1}^{1/4} - (\Delta\theta_s)_n^{1/4} \leq 0,001$ (достаточными оказываются четыре итерации). Здесь $\Delta\theta = 90 - 25 = 65$ °C – допустимое превышение температуры жилы над температурой окружающей среды.

Влияние сечения медного экрана, наличия брони и алюмополимерной ленты на длительно допустимый ток нагрузки кабеля

Исходя из сложности расчетов длительно допустимых токов, которые включают в себя множество переменных, промежуточных вычислений и логических операций, целесообразно использование программного обеспечения для табличных расчетов, такого как Microsoft Excel. Это обеспечит высокую точность расчета, облегчит процесс управления данными и позволит одновременно проводить вычисления для всех сечений жил и экранов кабелей.

В табл. 1–4 представлены результаты расчетов длительно допустимых токов кабелей с алюминиевыми жилами и медными экранами.

Таблица 1

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей треугольником в земле

Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when underground cable laying in a trefoil

$S, \text{ мм}^2$	$S_s, \text{ мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	182	182	182							
70	218	218	218	218						
95	258	258	258	257	257					
120	293	293	292	292	292	291				
150		331	330	330	329	328	327			
185		371	370	369	368	366	365	363		
240		427	426	424	422	420	418	415	414	
300		482	480	478	475	471	468	465	463	460
400			560	556	551	546	541	535	532	527
500			630	625	618	610	603	596	590	583
630			710	703	693	681	672	662	654	644
800			800	790	776	761	748	735	723	710
1000			892	878	860	840	823	805	791	772

Таблица 2

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей в плоскости в земле

Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when underground cable laying in a flat

$S, \text{ мм}^2$	$S_s, \text{ мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	189	189	188							
70	227	226	226	225						
95	268	267	266	264	263					
120	305	303	301	299	296	294				
150		341	339	335	331	328	326			
185		381	378	373	368	363	361	359		
240		437	432	425	417	411	407	404	404	
300		491	483	474	463	454	449	445	445	448
400			557	542	527	514	506	501	500	503
500			619	599	580	563	552	546	544	548
630			687	662	636	614	600	592	590	593
800			761	727	694	667	651	640	637	640
1000			832	791	750	717	697	684	679	683

Таблица 3

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей треугольником в воздухе
 Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when overhead cable laying in a trefoil

$S, \text{мм}^2$	$S_s, \text{мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	198	198	199							
70	243	243	244	244						
95	293	293	293	294	295					
120	338	338	339	339	340	340				
150		388	389	389	389	389	389			
185		443	443	443	442	442	442	441		
240		521	521	520	519	518	517	515	518	
300		599	599	597	595	593	590	588	590	590
400			717	714	710	705	700	696	696	694
500			824	819	812	805	798	791	789	785
630			950	943	933	920	910	899	894	887
800			1097	1086	1071	1054	1039	1024	1015	1003
1000			1252	1236	1215	1192	1172	1150	1137	1116

Таблица 4

Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения медного экрана при прокладке кабелей в плоскости в воздухе
 Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the copper shield when overhead cable laying in a flat

$S, \text{мм}^2$	$S_s, \text{мм}^2$									
	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
50	223	222	222							
70	273	272	272	271						
95	329	327	326	324	322					
120	380	377	375	372	368	366				
150		431	428	423	418	414	412			
185		490	484	478	470	464	461	460		
240		572	564	554	543	533	528	526	530	
300		654	642	627	611	598	591	587	592	602
400			756	733	709	690	678	672	677	689
500			855	824	792	766	751	743	747	761
630			967	925	883	846	827	816	820	836
800			1089	1033	978	935	910	896	900	918
1000			1213	1141	1073	1020	989	972	975	992

При прокладке кабелей в воздухе длительно допустимые токи нагрузки возрастают по сравнению с прокладкой в земле в связи с тем, что тепловое сопротивление T_4 между поверхностью кабеля и окружающей средой выше в земле, чем в воздухе, несмотря на то что температура воздуха принимается на $10\text{ }^\circ\text{C}$ выше.

Увеличение площади поперечного сечения экрана приводит к снижению максимально допустимого тока нагрузки из-за возрастания индуцированного в экране тока, повышения в связи с этим потерь мощности и, как следствие, температуры жилы, несмотря на снижение активного сопротивления. Вместе с тем при расположении кабелей в плоскости допустимый ток в зависимости от сечения экрана имеет минимально возможное значение, что отмечено серым цветом в табл. 2 и 4. С дальнейшим увеличением сечения экрана максимально допустимый ток начинает расти. Это обусловлено повышением теплового сопротивления окружающей среды вместе с размером сечения экрана из-за использования медных проволок большего диаметра, что приводит к увеличению наружного диаметра кабеля. Максимум произведения $(1 + \lambda_1) \cdot T_4$ определяет минимально возможное значение тока.

Для кабелей с сечениями жил 50 и 70 мм^2 влияние сечения экрана на длительно допустимый ток относительно незначительное. С ростом сечения жилы влияние сечения экрана становится более существенным. Для кабеля с сечением жилы 1000 мм^2 при разных сечениях экрана наибольший допустимый ток кабеля больше наименьшего на: 16% – при прокладке треугольником в земле; 23% – в плоскости в земле; 12% – треугольником в воздухе; 25% – в плоскости в воздухе. Допустимая нагрузка при изменении площади поперечного сечения экрана из номинального ряда на одну ступень для жилы 1000 мм^2 отличается до 6% .

Построим графики зависимости длительно допустимого тока при различных сечениях экрана для жил кабелей сечением 240 и 1000 мм^2 (рис. 1, 2).

Результаты расчетов (рис. 1, 2) указывают на сложную зависимость длительно допустимого тока от площади поперечного сечения экрана при внесении защитных металлических слоев. Кабели с этими слоями могут иметь как более высокие, так и более низкие значения длительно допустимого тока по сравнению с кабелями без них. Для прокладки в земле в плоскости кабель с сечением жилы 1000 мм^2 и экрана 185 мм^2 без защитных покрытий имеет длительно допустимый ток 679 А , а с броней 718 А (рис. 2а). При внесении брони в кабель в формуле (1) появляется T_2 , равное $0,027\text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$. За счет увеличения диаметра кабеля под оболочкой T_3 уменьшается с $0,068$ до $0,058\text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$. За счет увеличения наружного диаметра кабеля T_4 уменьшается с $2,01$ до $1,82\text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$. Суммарная доля потерь в среднем кабеле без брони $\lambda_1 = 0,92$, а с броней $\lambda_1 + \lambda_2 = 0,99$. Несмотря на уменьшение активного сопротивления R_e в два раза (площадь поперечного сечения брони для данного кабеля равна 315 мм^2), доля потерь изменилось не столь значительно, поскольку она зависит еще и от индуктивности.

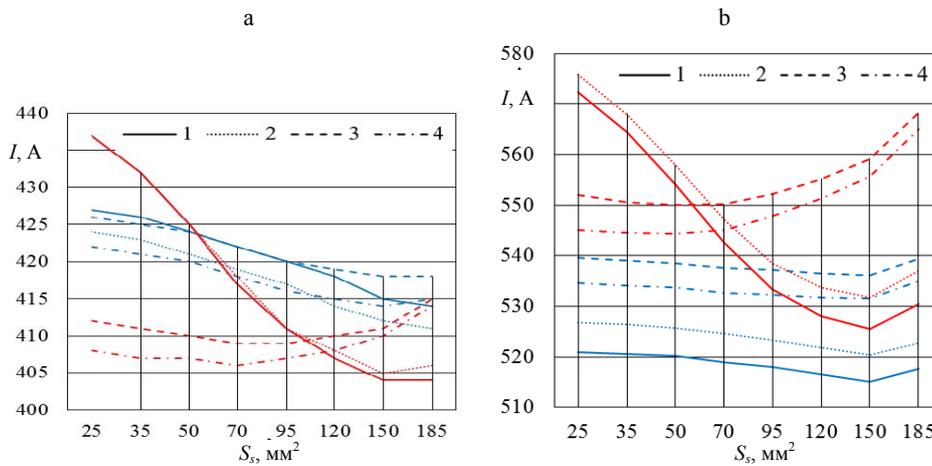


Рис. 1. Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения экрана для жилы площадью поперечного сечения 240 мм² для прокладки: а – в земле, б – в воздухе; 1 – без защитных металлических покрытий, 2 – с алюмополимерной лентой, 3 – с броней, 4 – с броней и алюмополимерной лентой; красный – прокладка в плоскости, синий – прокладка треугольником

Fig. 1. Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the screen for a core with a cross-sectional area of 240 mm² for laying: а – underground, б – overhead; 1 – without protective metal coatings; 2 – with aluminum polymer tape; 3 – with armor; 4 – with armor and aluminum polymer tape; red – the gasket is in the plane, blue – the gasket is in a trefoil

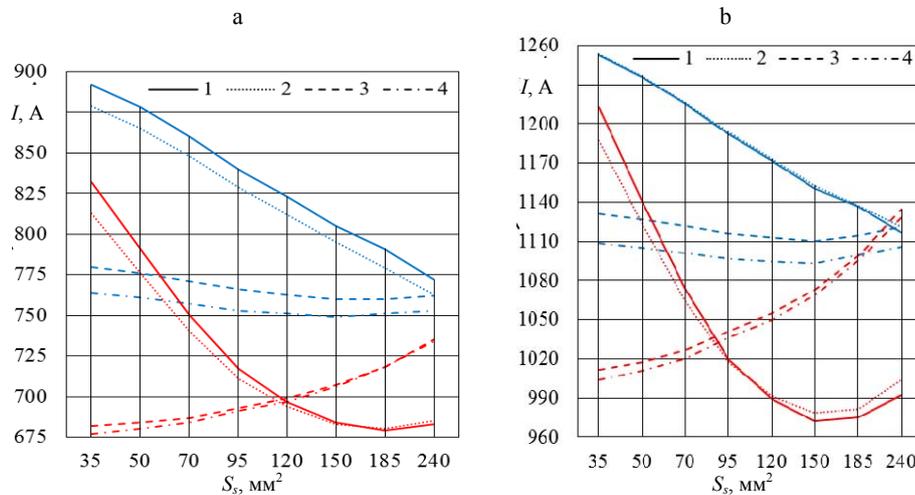


Рис. 2. Длительно допустимые токи нагрузки в зависимости от площади поперечного сечения экрана для жилы площадью поперечного сечения 1000 мм² для прокладки: а – в земле, б – в воздухе; 1 – без защитных металлических покрытий, 2 – с алюмополимерной лентой, 3 – с броней, 4 – с броней и алюмополимерной лентой; красный – прокладка в плоскости, синий – прокладка треугольником

Fig. 2. Long-term permissible load currents depending on the cross-sectional area of the screen for a core with a cross-sectional area of 1000 mm² for laying: а – underground; б – overhead; 1 – without protective metal coatings; 2 – with aluminum polymer tape; 3 – with armor; 4 – with armor and aluminum polymer tape; red – the gasket is in the plane; blue – the gasket is in a trefoil

Значительное влияние на значение длительно допустимого тока оказывают тепловое сопротивление окружающей среды и доля потерь в экране и броне кабеля. Допустимая нагрузка у кабеля с броней получилась выше за счет уменьшения T_4 и малого увеличения доли потерь. Для кабеля с тем же сечением жилы и сечением экрана 35 мм² при внесении брони T_4 уменьшается с 2,08 до 1,92 К·м/Вт. Доля потерь в среднем кабеле при внесении брони увеличивается с 0,25 до 1,04, что и уменьшает значение допустимой нагрузки.

Длительно допустимый ток кабеля при внесении алюмополимерной ленты изменяется не более чем на 2 %. Внесение же брони в кабель при сечении жилы 240 и 1000 мм² при прокладке в плоскости в земле показывает уменьшение длительно допустимого тока соответственно до 6 % и 18 %. При прокладке в воздухе показывает увеличение до 13 %.

При одинаковых условиях окружающей среды и глубине прокладки кабеля сравним полученные по расчетам значения длительно допустимых токов I со значениями, приведенными в каталоге [4], $I_{\text{кат}}$ (табл. 5).

Сопоставление данных, приведенных в табл. 5, показывают, что длительно допустимые токи нагрузки, представленные в каталоге, занимают промежуточное положение между показателями, полученными в результате расчетов (за исключением случаев прокладки кабелей в воздухе в плоскости). Расчетные значения отличаются от каталожных до 25 %, что указывает на недостаточную точность представленных длительно допустимых токов в каталоге.

Таблица 5

**Сравнение длительно допустимых токов нагрузки,
полученных по расчетам, с данными каталога**
**Comparison of long-term permissible load currents obtained
by calculations with catalog data**

S , мм ²	Условия прокладки	В земле		В воздухе	
	Способ прокладки	Треугольником	В плоскости	Треугольником	В плоскости
95	$I_{\text{кат}}$	253	263	300	349
	I	262–257	270–263	316–293	340–322
	$I_{\text{кат}}/I$	0,96–0,98	0,97–1	0,95–1,02	1,03–1,08
240	$I_{\text{кат}}$	422	426	531	607
	I	427–411	437–404	538–518	573–530
	$I_{\text{кат}}/I$	0,99–1,03	0,97–1,05	0,98–1,03	1,06–1,14
1000	$I_{\text{кат}}$	845	800	1180	1220
	I	892–753	832–680	1253–1093	1213–972
	$I_{\text{кат}}/I$	0,95–1,12	0,96–1,18	1,08–0,94	1,01–1,25

Для повышения точности расчетов при определении длительно допустимых токов кабелей стоит учитывать влияние таких факторов, как наличие и тип брони кабеля, а также площадь поперечного сечения экрана. Принимая во внимание эти параметры, можно получить более корректные и надежные значения допустимых токовых нагрузок, что позволит обеспечить их безопасную и эффективную эксплуатацию в различных условиях применения. Увеличение трудоемкости в выборе площади поперечного

сечения жилы из-за большого количества марок кабелей может быть снижено за счет автоматизации с использованием специализированного программного обеспечения.

ВЫВОДЫ

1. Приведены выражения и выполнены расчеты значений длительно допустимых токов нагрузки кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена с алюминиевой жилой и медным экраном при наличии поперечной герметизации из алюмополимерной ленты, а также проводочной брони из алюминия.

2. Различия в допустимой нагрузке при различных сечениях экрана для одинакового сечения жилы достигают 25 %. Внесение алюмополимерной ленты в конструкцию кабеля изменяет допустимую нагрузку не более чем на 2 %. Введение брони может приводить как к уменьшению (до 18 %), так и увеличению (до 13 %) допустимого тока нагрузки, что зависит от площади поперечного сечения жилы и экрана, способа и условий его прокладки. Расчетные значения длительно допустимых токов различаются с данными каталога до 25 %.

3. Имеет смысл выполнять определение длительно допустимых токов нагрузки индивидуально для каждого типа кабеля, отличающегося своей конструкцией.

ЛИТЕРАТУРА

1. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 1 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 5. С. 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432.
2. Короткевич, М. А. Эффективность применения кабелей напряжением 6–110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Ч. 2 / М. А. Короткевич, С. И. Подгайский, А. В. Голомуздов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 6. С. 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522.
3. De Leon, F. Major Factors Affecting Cable Ampacity / F. de Leon // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal, QC, Canada, 2006. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1708875>.
4. Factors Affecting Current Ratings for Underground and Air Cable / S. H. Alwan [et al.] // International Journal of Energy and Power Engineering. 2016. Vol. 10, No 11. P. 1422–1428.
5. Metwally, I. A. Factors Influencing Ampacity and Temperature of Underground Power Cables / I. A. Metwally, A. H. Al-Badi, A. S. Al Farsi // Electrical Engineering. 2013. Vol. 95. P. 383–392. <https://doi.org/10.1007/s00202-012-0271-5>.
6. Каталог кабельно-проводниковой продукции. Витебск: Производственное объединение «Энергокомплект», 2023. 194 с.
7. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена низкое и среднее напряжение до 35 кВ. М.: Завод «Москабель», 2023. 48 с.
8. Кабели силовые с изоляцией из сшитого полиэтилена на среднее напряжение. Каталог продукции. М.: ТД «Ункомтех», 2019. 40 с.
9. 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>.
10. Силовые кабельные линии напряжением 6–110 кВ. Нормы проектирования по прокладке кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена пероксидной сшивки: ТКП 611–2017. Минск: Мин-во энергетики Республики Беларусь, 2017. 103 с.
11. Подгайский, С. И. Силовые электрические кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / С. И. Подгайский; Белорусский национальный технический университет. Минск, 2022. 154 с.

12. IEC 60502-2:2014. Power Cables with Extruded Insulation and their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). [Electronic Resource]. Mode of access: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.
13. Thue, W. A. *Electrical Power Cable Engineering* / W. A. Thue. Third Ed. CRC Press, 2011. 463 p.
14. Ларина, Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии / Э. Т. Ларина. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1996. 448 с.
15. 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>.

Поступила 12.03.2024 Подписана в печать 20.05.2024 Опубликована онлайн 31.07.2024

REFERENCES

1. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kV with XLPE Insulation. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (5), 417–432. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-5-417-432 (in Russian).
2. Korotkevich M. A., Podgaiskiy S. I., Golomuzdov A. V. (2017) The Efficacy of the Cables of 6–110 kW with XLPE Insulation. Part 2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 60 (6), 505–522. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-6-505-522 (in Russian).
3. De Leon F. (2006). Major Factors Affecting Cable Ampacity. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. Montreal, QC, Canada. <https://doi.org/10.1109/PES.2006.1708875>.
4. Alwan S. H., Jasni J., Ab Kadir M. Z. A., Aziz N. (2016) Factors Affecting Current Ratings for Underground and Air Cables. *International Journal of Energy and Power Engineering*, 10 (11), 1422–1428.
5. Metwally I. A., Al-Bad, A. H., Al Farsi A. S. (2012). Factors Influencing Ampacity and Temperature of Underground Power Cables. *Electrical Engineering*, 95 (4), 383–392. <https://doi.org/10.1007/s00202-012-0271-5>.
6. *Catalog of Cable and Wire Products*. Vitebsk, Production Association “Energokomplekt”, 2023. 194 (in Russian).
7. *Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation: Low and Medium Voltage up to 35 kV*. Moscow, Moskabel' Plant, 2023. 48 (in Russian).
8. *Power Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation for Medium Voltage. Production Catalog*. Moscow, TH “Unkomtech”, 2019. 40 (in Russian).
9. 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*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/164f72dc-b67a-496b-af43-97e28a944a7b/iec-60287-1-1-2023>.
10. ТКР 611-2017. *Power Cable Lines with a Voltage of 6-110 kV. Design Standards for Laying Cables with Insulation Made of Cross-Linked Polyethylene Peroxide Crosslinking*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2017. 103 (in Russian).
11. Podgaiskiy S. I. (2022) *Power Electric Cables with Cross-Linked Polyethylene Insulation* [Dissertation]. Minsk, Belarusian National Technical University. 154 (in Russian).
12. IEC 60502-2:2014. *Power Cables with Extruded Insulation and Their Accessories for Rated Voltages from 1 kV ($U_m = 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV). – Part 2: Cables for Rated Voltages from 6 kV ($U_m = 7,2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV)*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/822b961a-7509-42d8-907a-9fbbb79baad9/iec-60502-2-2014>.
13. Thue W. A. (2011) *Electrical Power Cable Engineering*. Third Ed. Boca Raton, CRC Press. 463. <https://doi.org/10.1201/b11507>.
14. Larina E. T. (1996) *Power Cables and High-Voltage Cable Lines*. 2nd ed. Moscow, Energoatomizdat Publ. 448 (in Russian).
15. IEC 60287-2-1:2023. *Calculation of the Current Rating. – Part 2–1: Thermal Resistance – Calculation of Thermal Resistance*. Available at: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/9a2a6795-afb1-4194-97ae-9eef8d36e808/iec-60287-2-1-2023>.

Received: 12 March 2024

Accepted: 20 May 2024

Published online: 31 July 2024