

Существует несколько основных способов прокладки кабельных линий 6–500 кВ: в грунте, в железобетонных лотках, в полиэтиленовых трубах, в кабельных тоннелях. В настоящее время многие кабели прокладываются в населенных пунктах и городах, где земляные работы сопряжены с рядом трудностей. Из-за этого в строительстве кабельных сетей все шире используется технология горизонтально направленного бурения, а фазы кабельной линии оказываются проложенными под землей в полиэтиленовых трубах.

Михаил Викторович Дмитриев в своем материале рассматривает плюсы и минусы такой прокладки, а также особенности полиэтиленовых труб из различных материалов.

КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ, ПРОЛОЖЕННЫЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБАХ

Тепловой расчет



Михаил Дмитриев,
к.т.н., главный специалист
производственно-
технического отдела
ПЦ «Севзапэнергосетьпроект»
ОАО «СевзапНТЦ»,
г. Санкт-Петербург

Согласно п. 6.11.4 Стандарта СТО «Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования» [1] при прокладке кабельных линий в трубах рекомендуется использовать полиэтиленовые трубы низкого давления, выполненные по ГОСТ 18599-2001 «Трубы напорные из полиэтилена» [2]. В настоящее время применение таких труб является массовым.

В соответствии с [2] полиэтиленовые трубы низкого давления (ПНД) предназначены для длительной эксплуатации в диапазоне температур от 0 до 40 °С, поскольку являются трубами холодного водоснабжения.

Вместе с тем температура поверхности кабеля, проложенного в трубе, в нормальном режиме работы сети длительно может составлять до 80 °С [3], а при коротких замыканиях в кабеле – до 200–300 °С. При таких температурах ПНД-труба может размягчиться и спаяться с проложенным в ней кабелем, потерять свою механическую прочность и продавиться грунтом, не обеспечивая защиту кабеля и исключая возможность его извлечения из трубы. Указанные случаи уже были зафиксированы, например, в Санкт-Петербурге. В Москве одна из компаний осуществляет монтаж кабелей в двух трубах, размещенных одна в другой: вначале методом горизонтально направленного бурения (ГНБ) в грунте протаскивают трубу большего диаметра, а затем в нее помещают трубу меньшего диаметра, куда уже затягивают сам кабель. Очевидно, что это усложняет строительство, ограничивает максимальную длину участка трассы, который может быть одновременно пройден методом ГНБ.

МЕТОДИКА ТЕПЛОВОГО РАСЧЕТА КАБЕЛЯ

Проведем тепловой расчет кабельной линии с целью определить длительно допустимый ток линии и температуры

поверхности кабелей в зависимости от ряда влияющих факторов, что позволит уточнить требования к полиэтиленовым трубам для прокладки кабелей и проверить возможность использования ПНД-труб.

Основное внимание сосредоточим на расчетах нормального режима работы кабельной линии, хотя аналогичные вычисления можно выполнить и для случая короткого замыкания в кабельной линии, когда ток КЗ проходит по жиле кабеля и через место повреждения изоляции попадает в экран, нагревая его до значительных температур, достигающих 200–300 °С.

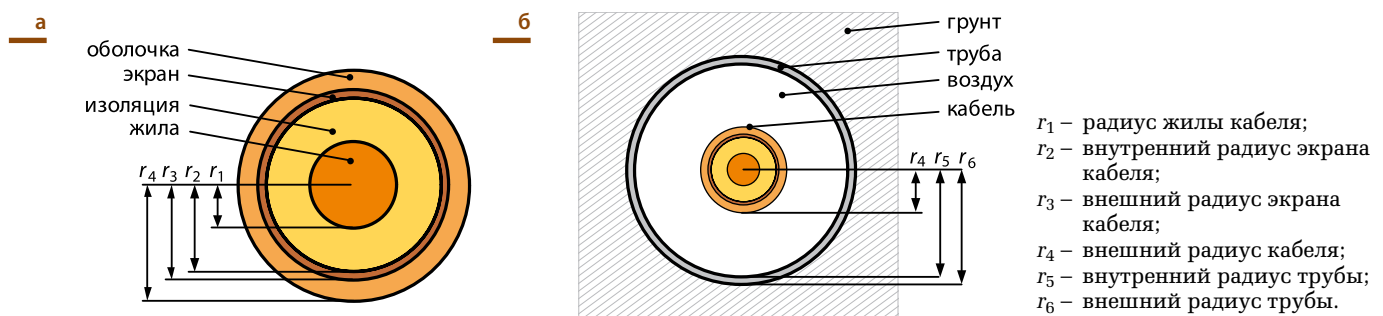
Методика теплового расчета описана в ГОСТ Р МЭК [4]. По мнению автора, система обозначений переменных, заимствованная из МЭК, является неудобной. Поэтому в рамках статьи используем систему обозначений, введенную в [5].

На рис. 1 схематично показана конструкция силового однофазного кабеля (рис. 1а) и один из способов его прокладки – в полиэтиленовой трубе, размещенной в грунте (рис. 1б). При проведении оценочных расчетов допустимо считать, что кабель расположен в средней части трубы (на самом деле кабель всегда располагается на дне трубы).

Тепловой расчет кабеля основан на решении уравнения теплового баланса: выделяющаяся в кабеле активная мощность переходит в тепло, которое нагревает кабель и окружающий его грунт.

При рассмотрении этого уравнения и его составляющих будем полагать, что тепло отводится от кабеля только в радиальном направлении, а отвода тепла вдоль оси кабеля и трубы, в которой он проложен, не происходит (такой отвод был бы возможен только для очень короткого кабеля). Следовательно, уравнение и все его составляющие не зависят от длины кабельной линии и могут быть даны в расчете на 1 метр его длины.

• **Рис. 1.** Силовой однофазный кабель, проложенный в полиэтиленовой трубе в грунте
а) конструкция и параметры кабеля; б) способ прокладки и параметры трубы



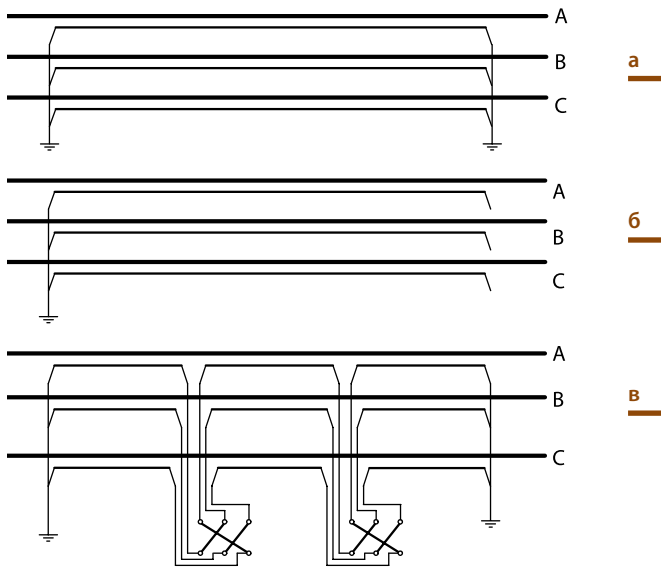
Основные схемы заземления экранов кабельных линий с однофазными кабелями 6–500 кВ:

а – заземление с двух сторон;

б – заземление с одной стороны;

в – транспозиция экранов

Рис. 2 •



Тепловыделение

Основными источниками тепловыделения в кабеле являются потери в жиле $P_{\text{Ж}}$ и потери в экране $P_{\text{Э}}$:

$$P_{\text{Ж}} = I_{\text{Ж}}^2 R_{\text{Ж}},$$

$$P_{\text{Э}} = I_{\text{Э}}^2 R_{\text{Э}},$$

где $I_{\text{Ж}}$ и $I_{\text{Э}}$ – токи в жиле и экране кабеля;

$R_{\text{Ж}}$ и $R_{\text{Э}}$ – активные сопротивления жилы и экрана, которые зависят от температуры и могут быть найдены как:

$$R_{\text{Ж}} = \frac{\rho_{\text{Ж}}}{F_{\text{Ж}}} (1 + \alpha_{\text{Ж}}(T_{\text{Ж}} - T_{20})),$$

$$R_{\text{Э}} = \frac{\rho_{\text{Э}}}{F_{\text{Э}}} (1 + \alpha_{\text{Э}}(T_{\text{Э}} - T_{20})),$$

где $\rho_{\text{Ж}}$ и $\rho_{\text{Э}}$ – удельные активные сопротивления материала жилы и экрана при температуре $T_{20} = 20^\circ\text{C}$ (для меди это $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м);

$\alpha_{\text{Ж}}$ и $\alpha_{\text{Э}}$ – температурные коэффициенты сопротивления материала жилы и экрана (для меди это 0,0039);

$F_{\text{Ж}}$ и $F_{\text{Э}}$ – сечение жилы и экрана;

$T_{\text{Ж}}$ и $T_{\text{Э}}$ – температура жилы и экрана.

Также потери в экране могут быть выражены через относительные потери $P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}$, определенные, например, по методике [5]:

$$P_{\text{Э}} = P_{\text{Ж}} \cdot (P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}) = I_{\text{Ж}}^2 R_{\text{Ж}} \cdot (P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}),$$

где $P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}} > 0$ в случае простого заземления экранов с двух сторон кабеля (рис. 2а);

$P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}} = 0$ в случае заземления экранов с одной стороны (рис. 2б) или в случае их транспозиции (рис. 2в).

Дополнительным источником тепловыделения в кабеле являются потери в диэлектрике:

$$P_{\text{И}} = \left(\frac{U_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \omega C_{\text{И}} \cdot \text{tg} \delta_{\text{И}}, \quad C_{\text{И}} = \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)},$$

где $C_{\text{И}}$ – емкость изоляции между жилой и экраном кабеля;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжение сети;

$\text{tg} \delta_{\text{И}}$ – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции (для сшитого полиэтилена это 0,001);

ϵ – диэлектрическая постоянная изоляции кабеля (для сшитого полиэтилена это 2,4);

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая постоянная вакуума;

$\omega = 314$ рад/с – круговая частота.

• **Таблица 1.** Коэффициент поверхностного эффекта K_{Π} для медной жилы сечением $F_{Ж}$

$F_{Ж}, \text{мм}^2$	150	200	250	300	400	600	750	1000	1250	1500
$K_{\Pi}, \text{о.е.}$	1,006	1,012	1,018	1,026	1,040	1,068	1,145	1,239	1,335	1,439

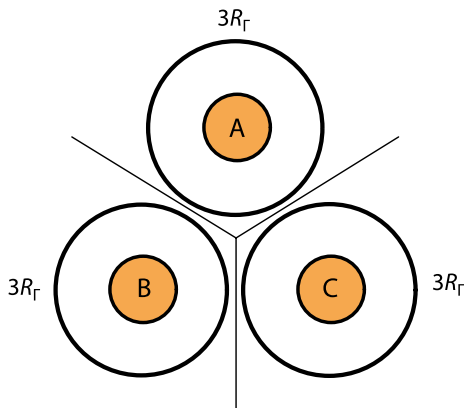
• **Таблица 2.** Длительно допустимый ток $I_{Д90}$ по (3) трехфазной группы однофазных кабелей 110 кВ с медной жилой 1000 мм² и экраном 240 мм², отвечающий температуре жилы 90 °С, а также возникающая при этом температура поверхности кабеля $T_{К}$ по (2), в зависимости от основных влияющих факторов

Описание расчетного случая	$P_{\text{Э}} / P_{\text{Ж}}, \text{о.е.}$	Удельное тепловое сопротивление грунта ρ_{Γ}					
		$\rho_{\Gamma} = 1 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$		$\rho_{\Gamma} = 2 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$		$\rho_{\Gamma} = 3 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$	
		$I_{Д90}, \text{А}$	$T_{К}, \text{°С}$	$I_{Д90}, \text{А}$	$T_{К}, \text{°С}$	$I_{Д90}, \text{А}$	$T_{К}, \text{°С}$
I. Фазы проложены в грунте сомкнутым треугольником:							
– экраны транспонированы и т.п. (рис. 2б, 2в)	0	1108 (1,0)	77,2	819 (1,0)	82,9	678 (1,0)	85,1
– экраны заземлены с двух сторон (рис. 2а)	1,3	804 (0,73)	81,8	584 (0,71)	85,7	480 (0,71)	87,0
II. Фазы проложены в грунте треугольником на расстоянии 225 мм друг от друга:							
– экраны транспонированы и т.п. (рис. 2б, 2в)	0	1108 (1,0)	77,2	819 (1,0)	82,9	678 (1,0)	85,1
– экраны заземлены с двух сторон (рис. 2а)	3,1	625 (0,56)	83,9	450 (0,55)	86,8	369 (0,54)	87,8
III. Фазы проложены в грунте в полиэтиленовых трубах диаметром 225 мм:							
– экраны транспонированы и т.п. (рис. 2б, 2в)	0	841 (1,0)	82,6	703 (1,0)	84,8	615 (1,0)	86,0
– экраны заземлены с двух сторон (рис. 2а)	3,1	463 (0,55)	86,6	383 (0,54)	87,7	334 (0,54)	88,2

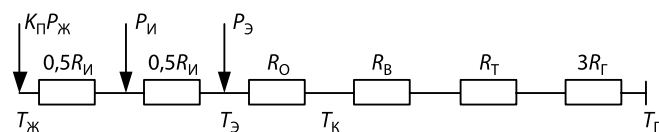
Примечание.

В скобках даны относительные значения допустимых токов $I_{Д90}$ (за 1 о.е. принят ток для схем, приведенных на рис. 2б и 2в).

• **Рис. 3.** Определение теплового сопротивления грунта



• **Рис. 4.** Расчетная схема теплового баланса кабельной линии



$T_{К}$ – температура поверхности однофазного кабеля;
 T_{Γ} – температура грунта (обычно принимается равной 20 °С);
 K_{Π} – коэффициент, учитывающий рост потерь в жиле кабеля за счет поверхностного эффекта (для медной жилы указан в табл.1).

Теплопоглощение

Выделяющееся тепло через изоляцию I кабеля, оболочку O , воздух B в трубе и саму трубу T уходит в окружающий грунт Γ , встречая на своем пути тепловое сопротивление этих слоев:

$$R_{И} = \frac{\rho_{И}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right), R_{O} = \frac{\rho_{O}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right), R_{B} = \frac{\rho_{B}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right),$$

$$R_{T} = \frac{\rho_{T}}{2\pi} \ln\left(\frac{r_6}{r_5}\right), R_{\Gamma} = \frac{\rho_{\Gamma}}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{r_6}\right),$$

где $\rho_{И}, \rho_{O}, \rho_{B}, \rho_{T}, \rho_{\Gamma}$ – соответствующие удельные тепловые сопротивления;

h – глубина, на которой проложен кабель.

В трехфазных сетях прокладывают трехфазные группы однофазных кабелей, что для каждой из фаз ухудшает условия отвода тепла в грунт. Это можно учесть, считая для каждой из фаз тепловое сопротивление грунта в три раза большим, чем оно было бы при наличии только одной фазы кабеля (рис. 3).

Уравнение теплового баланса

Итоговая тепловая схема для расчета температуры одной фазы трехфазной кабельной линии дана на рис. 4. Влияние двух других фаз учтено заменой R_{Γ} на $3R_{\Gamma}$.

С помощью рис. 4 несложно написать уравнения теплового баланса (по аналогии с законом Ома для электрической цепи).

Выражение с температурой жилы:

$$T_{Ж} - T_{\Gamma} = K_{\Pi}P_{Ж}(R_{И} + R_{O} + R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}) + P_{И}(0,5R_{И} + R_{O} + R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}) + P_{\text{Э}}(R_{O} + R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}). \tag{1}$$

Выражение с температурой поверхности кабеля:

$$T_{К} - T_{\Gamma} = K_{\Pi}P_{Ж}(R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}) + P_{И}(R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}) + P_{\text{Э}}(R_{B} + R_{T} + 3R_{\Gamma}). \tag{2}$$

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Определение допустимого тока кабеля по предельной температуре жилы 90 °С

Для изоляции из сшитого полиэтилена, которая наиболее часто применяется для современных однофазных кабелей 6–500 кВ, длительно допустимая температура не должна превосходить 90 °С. Приняв температуру жилы кабеля $T_{ж} = 90$ °С, из уравнения теплового баланса (1) найдем длительно допустимый ток кабеля:

$$I_{д90} = \sqrt{\frac{T_{ж} - T_{г} - P_{и}(0,5R_{и} + R_{о} + R_{в} + R_{г} + 3R_{г})}{K_{п}R_{ж}(R_{и} + R_{о} + R_{в} + R_{г} + 3R_{г}) + R_{ж}(P_{э} / P_{ж})(R_{о} + R_{в} + R_{г} + 3R_{г})}} \quad (3)$$

Пример расчета. Пусть трехфазная группа однофазных кабелей 110 кВ с медными жилой 1000 мм² и экраном 240 мм² проложена в расположенных сомкнутым треугольником трубах диаметром 225 мм с толщиной стенки 10 мм.

Удельные тепловые сопротивления изоляции и оболочки кабеля приняты $\rho_{и} = 3,5$ и $\rho_{о} = 3,5$ К·м/Вт.

Результаты расчетов допустимого тока (3) сведены в табл. 2 в зависимости от основных влияющих факторов: схемы соединения и заземления экранов (наличия потерь в экранах), а также удельного теплового сопротивления грунта, которое на практике меняется в широком диапазоне значений $\rho_{г} = 1\text{--}3$ К·м/Вт.

В случаях I, II труба отсутствует, фазы кабеля проложены в открытом грунте вплотную друг к другу (I) или на расстоянии 225 мм (II). При этом при вычислениях по (3) удельные тепловые сопротивления $\rho_{в}$ и $\rho_{г}$ приняты такими же, как $\rho_{г}$, что как раз и означает отсутствие воздуха V и полиэтиленовой трубы T .

В случае III фазы кабеля проложены в трубах, расположенных сомкнутым треугольником, расстояние между осями фаз составляет 225 мм. Удельные тепловые сопротивления воздуха и трубы приняты $\rho_{в} = 10$ и $\rho_{г} = 3$ К·м/Вт.

Удельное тепловое сопротивление железобетонного лотка составляет около 2 К·м/Вт, что близко к свойствам грунта. Поэтому выводы, которые можно будет сделать на основе анализа случая I из табл. 2, в полной мере относятся не только к прокладке кабеля в грунте, но и к прокладке кабеля в железобетонных лотках.

Результаты расчетов по (3) неплохо совпадают, например, с каталогом фирмы АВВ, где в случае прокладки кабелей 1000/240 мм² с транспонированными экранами сомкнутым треугольником в грунте допустимые токи при тепловом сопротивлении грунта 1, 2 и 3 К·м/Вт составляют соответственно 1095, 810, 668 А.

В каждом из случаев I, II, III даны допустимые токи для кабеля без потерь в экранах (рис. 2б, 2в) и с потерями (рис. 2а), а также эти же токи в относительных единицах (за 1 о.е. принят ток для кабеля без потерь в экранах). Такие относительные значения допустимых токов по сути представляют собой коэффициент использования пропускной способности кабеля, который здесь вычисляется с учетом всех тепловых характеристик трассы, а в [5] упрощенно оценивался без них как:

$$K_{и} = \frac{1}{\sqrt{1 + P_{э} / P_{ж}}}$$

Из табл. 2 видно, что простое двустороннее заземление экранов заметно снижает допустимый ток кабеля:

- на 27–29% (снижение от 1,0 о.е. до 0,71 – 0,73) в случае I;
- на 44–46% в случае II;
- на 45–46% в случае III.

Следовательно, можно сделать вывод, что при прокладке фаз кабельной линии на расстоянии друг от друга (II, III) заземление экранов с двух сторон недопустимо, обязательно требуется или их одностороннее заземление, или их транспозиция. В частности, эти мероприятия нужны при прокладке фаз кабеля в трубах (III).

Также видно, что прокладка фаз кабельной линии в трубах (III) несколько снижает допустимый ток по сравнению с прокладкой в открытом грунте (I):

- при $\rho_{г} = 1$ К·м/Вт – на 24% (с 1108 до 841 А);
- при $\rho_{г} = 2$ К·м/Вт – на 14% (с 819 до 703 А);
- при $\rho_{г} = 3$ К·м/Вт – на 9% (с 678 до 615 А).

Анализ расчетов табл. 2 позволяет сделать вывод, что основной причиной снижения пропускной способности линий с однофазными кабелями 6–500 кВ является вовсе не их прокладка в поли-

- **Таблица 3.** Длительно допустимый ток трехфазной группы однофазных кабелей 110 кВ с медной жилой 1000 мм² и экраном 240 мм² в зависимости от основных влияющих факторов. Приняты меры борьбы с токами в экранах (транспозиция экранов или их одностороннее заземление)

Описание способа прокладки кабеля	Формула	Удельное тепловое сопротивление грунта ρ_T		
		$\rho_T = 1 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$	$\rho_T = 2 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$	$\rho_T = 3 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$
В грунте или в лотке (критерий 90 °С)	3	1108 (1,0)	819 (1,0)	678 (1,0)
В термостойкой трубе (критерий 90 °С)	3	841 (0,76)	703 (0,86)	615 (0,91)
В ПНД трубе (критерий 40 °С)	4	468 (0,42)	380 (0,46)	327 (0,48)

Примечание. В скобках даны относительные значения допустимых токов $I_{Д90}$, $I_{Д40}$ (за 1 о.е. принят ток для случая прокладки в грунте или лотке).

- **Таблица 4.** Существующие на рынке полиэтиленовые трубы и возможность их использования для прокладки однофазных кабелей 6–500 кВ

Тип трубы	ПНД	РЕХ	РВ	ProTectorFlex
Материал	Обычный полиэтилен	Сшитый полиэтилен для тепловых труб	Полибутен для тепловых труб	Полимерная композиция высокой термостойкости
Назначение	Холодная вода	Горячая вода	Горячая вода	Кабели 6–500 кВ
Возможность использования для кабелей 6–500 кВ	Нет	Да	Да	Да

этиленовых трубах, а отсутствие мероприятий по борьбе с токами и потерями в экранах – одностороннего заземления экранов или транспозиции экранов. При прокладке кабелей в трубах схемы заземления экранов рис. 2б и рис. 2в оказываются незаменимы.

Определение допустимого тока кабеля по предельной температуре поверхности кабеля 40 °С

В табл. 2 представлены результаты расчетов температуры на поверхности фазы кабеля по (2), куда подставлен предельно допустимый ток по (3). Как видно, температура поверхности кабеля достигает 80 °С и даже более.

Для упрощения расчетов температура поверхности кабеля определялась для случая, когда кабель размещен в середине трубы и не касается ее стенок (рис. 3). На практике кабель лежит на дне трубы и передает ей температуру своей поверхности. Для ПНД труб, применяемых для прокладки кабеля и рассчитанных на 40 °С, такая высокая температура недопустима.

Близкая к 80 °С температура поверхности кабеля, лежащего на дне трубы, получена также и в работе [3], авторы которой выполняли тепловой расчет при помощи специального программного обеспечения.

Определим длительно допустимый ток кабельной линии, исходя из условия, что температура поверхности кабеля не превысит 40 °С. Приняв температуру поверхности кабеля $T_K = 40$ °С, из уравнения (2) найдем этот ток:

$$I_{Д40} = \sqrt{\frac{T_K - T_T - P_{И}(R_B + R_T + 3R_T)}{K_{П}R_{Ж}(R_B + R_T + 3R_T) + R_{Ж}(P_{Э} / P_{Ж})(R_B + R_T + 3R_T)}} \quad (4)$$

Считая, что для кабельной линии, проложенной в трубах, меры по борьбе с паразитными токами в экранах являются обязательными, расчеты по (4) проведены при условии отсутствия потерь в экранах, а их результаты даны в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что обеспечение требований ГОСТ к условиям эксплуатации ПНД труб (критерий 40 °С) приводит к снижению пропускной способности кабельной линии на 52–58% по сравнению со случаем прокладки фаз в открытом грунте. Тогда как применение термостойких труб, допускающих длительное воздействие температуры 80 °С, которая имеется на поверхности кабеля при температуре жилы 90 °С, давало бы снижение пропускной способности лишь на 9–24%.

Следовательно, для прокладки кабельных линий 6–500 кВ с однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена возможность применения ПНД-труб следует переосмыслить. В кабельном строительстве требуется использование таких труб, которые, в отличие от ПНД, допускают длительное воздействие температуры не менее 80 °С.

ТЕРМОСТОЙКИЕ ТРУБЫ ДЛЯ ПРОКЛАДКИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

В настоящее время на рынке уже имеются термостойкие трубы, которые могли бы заменить ПНД в кабельном строительстве. В качестве примера в табл. 4 приведены некоторые из них.

Трубы ProTectorFlex, РЕХ, РВ не будут размягчаться и сплываться с кабелями, не потеряют механической прочности не только в нормальном установившемся режиме работы сети, но и при коротких замыканиях в кабеле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- К снижению пропускной способности кабельных линий с однофазными кабелями 6–500 кВ приводят паразитные токи и потери мощности в экранах, а также прокладка фаз в полиэтиленовых трубах.
- Основной причиной снижения пропускной способности кабельных линий 6–500 кВ является отсутствие мероприятий по борьбе с токами в экранах – заземления экранов с одной стороны или транспозиции экранов.
- Прокладка кабельных линий в трубах не является основной причиной снижения их пропускной способности.
- Применяемые в настоящее время для прокладки кабельных линий 6–500 кВ полиэтиленовые трубы низкого давления (ПНД) не годятся для этих целей, так как являются трубами холодного водоснабжения и рассчитаны на длительную работу в температурном диапазоне от 0 до 40 °С, что существенно меньше тех температур, которые могут возникать на поверхности кабеля.
- Следует приостановить применение ПНД-труб для прокладки кабельных линий с однофазными кабелями 6–500 кВ и рассмотреть применение для этих целей труб типа ProTectorFlex, РЕХ, РВ или иных, которые будут удовлетворять требованиям по температуре, гибкости, механической прочности и проч.

ЛИТЕРАТУРА

- СТО 56947007-29.060.20.071-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Условия создания. Нормы и требования. Москва, ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
- ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия.
- Титков В.В., Дудкин С.М. Влияние способов прокладки на температурный режим кабельных линий 6–10 кВ и выше // Новости ЭлектроТехники. 2012. № 3(75).
- ГОСТ Р МЭК 60287-1-1-2009. Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки.
- Дмитриев М.В. Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 152 с.