

Расчет температурного режима кабельных линий (КЛ) 6–500 кВ в нормальном установившемся режиме работы показал, что трубы холодного водоснабжения из полиэтилена низкого давления (ПНД), применяемые сейчас для прокладки кабелей, для этих целей не годятся и должны быть заменены на термостойкие трубы [1].

В новой статье Михаил Викторович Дмитриев рассматривает процессы нагрева КЛ при коротких замыканиях, также влияющие на состояние ПНД-труб.

## КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ 6–500 кВ Тепловой расчет при коротком замыкании

Современный однофазный кабель 6–500 кВ имеет жилу (Ж), изоляцию (И), медный экран (Э) и полиэтиленовую оболочку (О). Такой кабель может размещаться как в открытом грунте (Г), так и в полиэтиленовой трубе.

При коротком замыкании (КЗ) в кабеле ток КЗ проходит по жиле и далее через место повреждения попадает в экран и его заземляющие устройства. Рассмотрим нагрев кабеля в его неповрежденной части, вызванный прохождением вдоль кабеля тока КЗ.

Согласно [2] за время КЗ допустим разогрев жилы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена до температуры 250 °С, а экрана – до 350 °С. Зная предельные температуры жилы и экрана, определим, как сильно могут разогреться изоляция кабеля и его оболочка, получающие тепло в процессе охлаждения жилы и экрана после отключения аварийного кабеля от сети.

Тепловой расчет кабеля в нормальном установившемся режиме работы описан в [1] и основан на тепловой схеме замещения, состоящей из нескольких тепловых сопротивлений (изоляция, грунт и проч.). Для рассмотрения переходных процессов нагрева и охлаждения кабеля тепловой схемы замещения недостаточно, и требуется введение понятия теплоемкости участков схемы (жилы, изоляции, грунта и проч.). Произведение теплового сопротивления участка схемы на его теплоемкость дает постоянную времени нагрева или охлаждения участка тепловой схемы. Покажем это, получив простое аналитическое выражение для закона изменения температуры.

### ЗАКОН ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Рассмотрим закономерности передачи тепла между разными частями кабеля на примере лишенной экрана и оболочки простой конструкции – жилы кабеля, разогретая за время прохождения тока КЗ, отдает тепло в изоляцию кабеля и в окружающий грунт, температуру которого на данном этапе будем полагать неизменной. Определим зависимость температуры жилы от времени  $T_{ж}(t)$ .

За малое время  $dt$  жила передаст в изоляцию и далее в грунт количество тепла:

$$dQ_{ж} = \frac{T_{ж} - T_{Г}}{R_{И}} \cdot dt,$$

где  $R_{И}$  – тепловое сопротивление изоляции;

$T_{Г}$  – температура грунта, которую можно принять равной 20 °С.

Отвод тепла  $dQ_{ж}$  от жилы через изоляцию в грунт приведет к тому, что жила остынет на температуру  $dT$ :

$$dQ_{ж} = -m_{И}c_{И} \cdot dT_{ж} = -C_{И} \cdot dT_{ж},$$

где  $m_{И}$  – масса изоляции;

$c_{И}$  – удельная теплоемкость материала изоляции (справочные данные);

$C_{И}$  – теплоемкость изоляции.

Два последних уравнения могут быть преобразованы к виду:

$$-\frac{dt}{\tau_{И}} = \frac{dT_{ж}}{T_{ж} - T_{Г}},$$

где  $\tau_{И} = R_{И}C_{И}$  – постоянная времени нагрева или охлаждения изоляции.

Проинтегрировав левую и правую часть, получим:

$$T_{ж} = T_{Г} + (T_{ж0} - T_{Г}) \cdot \exp(-t / \tau_{И}), \quad (1)$$

где  $t = 0$  – начало расчета, за которое принимается момент отключения поврежденного кабеля от сети и прекращение КЗ;

$T_{ж0}$  – начальная температура жилы в момент  $t = 0$ , равная 250 °С.

Из (1) видно, что в процессе передачи тепла от жилы через изоляцию в грунт температура жилы изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени  $\tau_{И} = R_{И} \cdot C_{И}$ . Этот вывод можно распространить и на всю конструкцию КЛ:

- скорость прогрева оболочки кабеля за счет тепла экрана будет определяться постоянной времени оболочки  $\tau_{О} = R_{О} \cdot C_{О}$ ;
- скорость прогрева изоляции за счет тепла жилы и экрана будет определяться постоянной времени изоляции  $\tau_{И} = R_{И} \cdot C_{И}$ ;
- скорость отвода тепла от кабеля в грунт будет определяться постоянной времени грунта  $\tau_{Г} = R_{Г} \cdot C_{Г}$  (здесь полагаем, что температура грунта вблизи от кабеля может изменяться).

Для вычисления постоянных времени оболочки, изоляции, грунта необходимо знать их тепловое сопротивление и теплоемкость.

### Тепловое сопротивление

Проходящее за время  $t$  через поверхность площадью  $S$  количество теплоты может быть найдено как:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta l} \cdot S \cdot t,$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (величина, обратная удельному тепловому сопротивлению  $\rho$  из [1]);

$\Delta T$  – разность температур между двумя точками, расстояние между которыми по направлению наибольшего изменения температуры равно  $\Delta l$ ;

$\Delta T / \Delta l$  – градиент температур.

Преобразовав, получим приведенное в [1] уравнение теплового баланса, которое используется для составления тепловой схемы замещения кабеля:

$$\Delta T = \frac{Q}{t} \cdot \frac{\Delta l}{\lambda S} = P \cdot R,$$

где  $P = Q / t$  – мощность теплового потока;

$R = \Delta l / (\lambda S) = \rho \cdot \Delta l / S$  – тепловое сопротивление.

Определим тепловое сопротивление  $R$  тонкостенного цилиндра радиуса  $r$  с толщиной стенки  $dr$  из материала с удельным тепловым сопротивлением  $\rho$ . Если такой цилиндр имеет длину  $l$  м, то площадь его боковой поверхности составит  $S = 2\pi r \cdot l = 2\pi r$ . Тогда тепловое сопротивление цилиндра будет:

$$R = \rho \cdot \frac{\Delta l}{S} = \rho \cdot \frac{dr}{2\pi r}.$$

Используем, как и в [1], следующую систему обозначений:  $r_1$  – радиус жилы (он же внутренний радиус изоляции);



**Михаил Дмитриев,**  
к.т.н., заместитель генерального  
директора по научной работе

ПКБ «РосЭнергоМонтаж»

г. Санкт-Петербург

$r_2$  – внутренний радиус экрана (он же внешний радиус изоляции);

$r_3$  – внешний радиус экрана (он же внутренний радиус оболочки);

$r_4$  – радиус кабеля (он же внешний радиус оболочки).

Если рассматриваемый выше цилиндр имеет заметную толщину (например, это изоляция кабеля или его оболочки), то получим приведенные в [1] формулы:

$$\begin{aligned} R_{\text{И}} &= \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho_{\text{И}} dr}{2\pi r} = \frac{\rho_{\text{И}}}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}, \\ R_{\text{О}} &= \int_{r_3}^{r_4} \frac{\rho_{\text{О}} dr}{2\pi r} = \frac{\rho_{\text{О}}}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_4}{r_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

Если вычисляется тепловое сопротивление грунта, то допустимо считать, что:

$$R_{\text{Г}} = \frac{\rho_{\text{Г}}}{2\pi} \cdot \ln \frac{2h}{r_4},$$

где  $h$  – глубина заложения кабеля под землей.

### Теплоемкость

Теплоемкость элемента кабеля (жилы, изоляции и т.п.) может быть найдена с помощью выражения:

$$C = c \cdot m, \quad (3)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала элемента (справочные данные);

$m = \gamma \cdot V$  – масса элемента;

$\gamma$  – удельная плотность материала элемента (справочные данные);

$V = F \cdot L_{\text{К}}$  – объем элемента;

$F$  – поперечное сечение;

$L_{\text{К}}$  – длина участка кабеля, которую можно принять за 1 метр.

Для жилы и экрана  $F$  – это их сечение, указанное в маркировке кабеля. Для изоляции кабеля  $F_{\text{И}} = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2)$ , для оболочки  $F_{\text{О}} = \pi \cdot (r_4^2 - r_3^2)$ .

### Постоянные времени нагрева/охлаждения

Постоянные времени  $\tau = RC$  нагрева/охлаждения различных элементов кабеля зависят от удельного теплового сопротивления материалов  $\rho$ , их плотности  $\gamma$  и удельной теплоемкости  $c$ , а также от геометрических характеристик  $r_1, r_2, r_3, r_4$ .

В табл. 1 даны оценки постоянных времени  $\tau$ , полученные для рассмотренной в [1] кабельной линии 110 кВ 1000/240 мм<sup>2</sup>. Для линий другого класса напряжения, сечения жилы и экрана постоянные времени кардинально не изменятся.

Как видно, из всех элементов кабельной линии наиболее быстрого прогрева следует ожидать для полиэтиленовой оболочки. Для изоляции прогрев происходит значительно медленнее, а грунт – совсем инерционен.

Учитывая большое различие постоянных времени, процессы, происходящие в кабельной линии при КЗ и после его отключения, можно условно разделить на четыре этапа:

1. Быстрый нагрев жилы и экрана током КЗ вплоть до температур 250 и 350 °С соответственно (за время  $t_{\text{К}}$ , которое, как правило, менее 1 с).
2. Прогрев оболочки кабеля за счет тепла от экрана (постоянная  $\tau_{\text{О}} = 5$  мин).
3. Прогрев изоляции кабеля за счет совместного воздействия тепла и от экрана, и от жилы кабеля (постоянная  $\tau_{\text{И}} = 45$  мин).
4. Охлаждение кабельной линии грунтом (постоянная  $\tau_{\text{Г}} =$  часы).

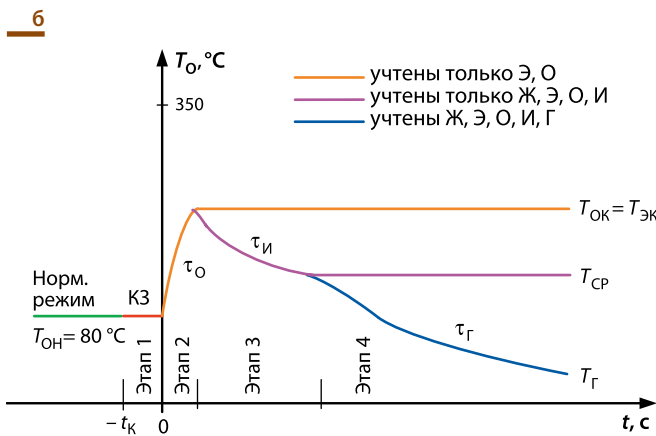
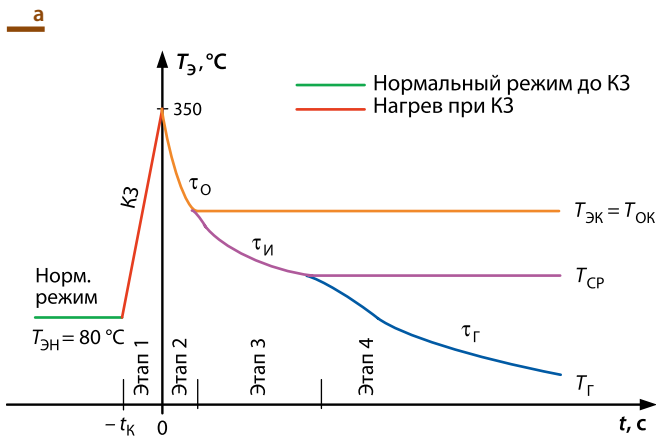
Перечисленные этапы отражены на рис. 1 на примере экрана (Э) и оболочки (О) кабеля. До КЗ начальные температуры экрана и оболочки одинаковы и составляют  $T_{\text{ЭН}} = T_{\text{ОН}} = 80$  °С. При КЗ экран быстро нагревается до температуры 350 °С (таково условие выбора сечения экрана [3]), а оболочка кабеля нагреться не успевает. После короткого замыкания экран начинает остывать, отдавая свое тепло, прежде всего, оболочке кабеля (оранжевая кривая). Если не учитывать жилу, изоляцию, грунт, то тогда температуры экрана и оболочки выровняются на уровне конечной температуры  $T_{\text{ЭК}} = T_{\text{ОК}} < 350$  °С.

Если учитывать, что часть тепла от экрана отдается еще и в изоляцию кабеля, которая также нагревается и от жилы, то тогда температура экрана, оболочки, жилы и изоляции

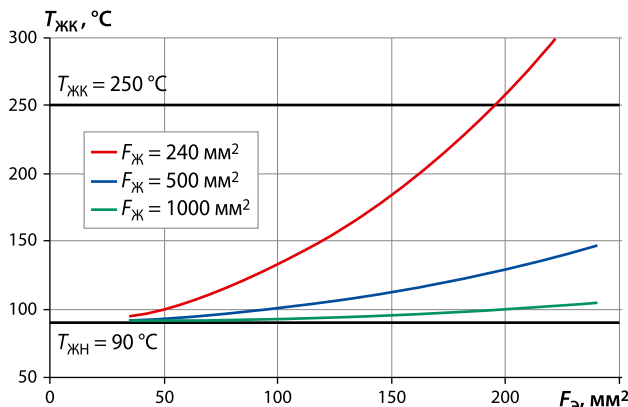
• **Таблица 1.** Оценка постоянных времени нагрева/охлаждения элементов кабельной линии

Элемент кабельной линии	Справочные данные по материалам			Расчет
	$\rho$	$\gamma$	$c$	$\tau / 60$
	К · м/Вт	кг/м <sup>3</sup>	Дж/(кг · К)	Мин.
Жила	0	8890	380	0
Изоляция	3,5	930	3760	45 мин
Экран	0	8890	380	0
Оболочка	3,5	930	3760	5 мин
Грунт	1–3	1800	8,35	>10 час

• **Рис. 1.** Температура экрана (а) и оболочки (б) до короткого замыкания и после него



• **Рис. 2.** Температура жилы в момент отключения короткого замыкания (конец 1-го этапа)



с течением времени установится на уровне средней температуры  $T_{CP}$  (красная кривая). С учетом же охлаждающего эффекта грунта, температура экрана, изоляции и других элементов кабеля будет снижаться от  $T_{CP}$  до температуры грунта  $T_{Г}$  (синяя кривая).

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КАБЕЛЯ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ**

Сечение экрана кабеля согласно [3] выбирается таким образом, чтобы при КЗ температура экрана не превысила 350 °С. Поскольку сечение жилы, как правило, в разы больше сечения экрана, то ток КЗ нагревает жилу кабеля значительно меньше, и предельная для жилы температура в 250 °С почти никогда не достигается.

Пусть за время КЗ экран кабеля разогрелся до предельной температуры в 350 °С. Проведем оценки:

- конечной температуры жилы  $T_{ЖК}$  на 1-м этапе (разогрев жилы током короткого замыкания);
- конечной температуры экрана и оболочки  $T_{ЭК} = T_{ОК}$  на 2-м этапе (разогрев оболочки теплом экрана);
- средней температуры  $T_{CP}$  кабельной линии на 3-м этапе (разогрев оболочки и изоляции теплом экрана и жилы).

Согласно [3] при КЗ нагрев жилы и экрана зависит, в том числе, от коэффициента аperiodической составляющей тока. Однако будем упрощенно полагать  $K_A = 1$ . Все оценки выполним на примере кабеля 110 кВ с изоляцией толщиной  $r_2 - r_1 = 15$  мм и полиэтиленовой оболочкой толщиной  $r_4 - r_3 = 5$  мм, варьируя сечение медных жилы  $F_{Ж}$  и экрана  $F_{Э}$ .

**Температура жилы**

За время КЗ в жиле выделяется тепло  $Q_{Ж} = I_K^2 R_{Ж} t_K$  (без учета  $K_A$  из [3]), которое идет на нагрев жилы  $Q_{Ж} = C_{Ж} \cdot (T_{ЖК} - T_{ЖН})$ , где  $T_{ЖН}$  и  $T_{ЖК}$  – соответственно начальная и конечная температуры жилы. Тогда получим:

$$T_{ЖК} = \frac{Q_{Ж}}{C_{Ж}} + T_{ЖН} \tag{4}$$

Для расчета по формуле (4) требуется знать входящую в  $Q_{Ж}$  величину  $I_K^2 t_K$ . Ее несложно найти по формулам из [3], заложив в них заданное сечение экрана  $F_{Э}$ , начальную и конечную температуру экрана (80 и 350 °С). Кроме того, в (4) требуется активное сопротивление жилы  $R_{Ж}$ , которое можно найти по формулам из [3] на основе заданного сечения жилы  $F_{Ж}$  и ее материала (здесь – медь).

Еще для расчета по (4) нужна начальная температура жилы до КЗ  $T_{ЖН}$ , которая принимается равной 90 °С (предельное значение для изоляции из сшитого полиэтилена), и теплоемкость жилы  $C_{Ж}$ , вычисляемая по формуле (3) с учетом данных из табл. 1.

Обобщающие зависимости конечной температуры жилы от сечений жилы и экрана приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что для большинства кабельных линий температура жилы в конце КЗ не превосходит 150 °С. Лишь для кабелей с близкими друг другу сечениями жилы и экрана (например, 240/185 мм<sup>2</sup>) температура жилы может достигать заявленных для сшитого полиэтилена предельных значений 250 °С. Единственный случай, когда температура жилы превосходит 250 °С – это кабель 240/240 мм<sup>2</sup>, что не должно удивлять, ведь у экрана такое же сечение как и у жилы, а он, как было положено при получении рис. 2, разогрет до 350 °С.

Итак, при КЗ для большинства кабельных линий экран разогревается до своей предельной температуры гораздо раньше, чем жила до своей. Поэтому декларируемые замечательные термостойкие свойства полиэтиленовой изоляции при КЗ не могут быть использованы сполна из-за наличия в конструкции кабеля медного проволочного экрана. Напомним, что экран играет отрицательную роль и в нормальном режиме работы кабеля, когда в нем наводятся напряжения и токи, вызывающие паразитные потери мощности, перегрев кабеля и недоиспользование его пропускной способности.

**Температура экрана и оболочки**

С учетом приведенных в табл. 1 постоянных времени очевидно, что нагрев оболочки происходит, главным образом, за счет тепла от экрана кабеля.

За время КЗ в экране выделяется тепло  $Q_{\text{Э}} = I_{\text{К}}^2 R_{\text{Э}} t_{\text{К}}$  (без учета коэффициента  $K_{\text{А}}$  из [3]), которое идет на нагрев экрана и его оболочки  $Q_{\text{Э}} = (C_{\text{Э}} + C_{\text{О}}) \cdot (T_{\text{ОК}} - T_{\text{ОН}})$ , где  $T_{\text{ОН}}$  и  $T_{\text{ОК}}$  – соответственно начальная и конечная температуры оболочки. Тогда получим:

$$T_{\text{ОК}} = \frac{Q_{\text{Э}}}{C_{\text{Э}} + C_{\text{О}}} + T_{\text{ОН}}. \quad (5)$$

Приняв, что до КЗ температура экрана и оболочки была  $T_{\text{ОН}} = 80^\circ\text{C}$  (по [1] такая температура характерна при наличии у жилы температуры  $90^\circ\text{C}$ , отвечающей предельному значению для изоляции из сшитого полиэтилена), и воспользовавшись данными  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$  по медному экрану и полиэтиленовой оболочке (табл. 1), получим обобщающие зависимости, приведенные на рис. 3.

Видно, что после КЗ температура оболочки, разогретой раскаленным до  $350^\circ\text{C}$  экраном, приближается к температуре  $135^\circ\text{C}$ , т.е. температуре плавления ПНД-труб.

Производители кабельных линий декларируют для жилы и экрана различные предельные температуры при КЗ ( $250$  и  $350^\circ\text{C}$  соответственно), что не может не вызвать вопросов, ведь жила и экран примыкают к одной и той же изоляции из сшитого полиэтилена и должны иметь идентичные предельные температуры. Однако такому расхождению температур жилы и экрана можно дать следующее объяснение. Во-первых, жила изначально не может быть нагрета выше  $150^\circ\text{C}$  (рис. 2), и эта температура сохраняется у жилы достаточно долго, так как постоянная времени изоляции  $\tau_{\text{и}}$  велика (табл. 1). Во-вторых, экран, хотя изначально и нагрет до  $350^\circ\text{C}$ , но быстро (с постоянной времени  $\tau_{\text{э}}$ ) отдает тепло оболочке кабеля, в результате чего температура и самого экрана, и оболочки, и примыкающей к экрану изоляции становится не более  $135^\circ\text{C}$  (рис. 3). Таким образом, после КЗ и изоляция вблизи жилы, и изоляция вблизи от экрана достаточно быстро приобретут близкую друг к другу температуру не более  $135\text{--}150^\circ\text{C}$ .

#### Средняя температура кабеля

За время КЗ в жиле и экране выделяется соответственно тепло  $Q_{\text{Ж}} = I_{\text{К}}^2 R_{\text{Ж}} t_{\text{К}}$  и  $Q_{\text{Э}} = I_{\text{К}}^2 R_{\text{Э}} t_{\text{К}}$  (без учета коэффициента  $K_{\text{А}}$  из [3]), которое идет на прогрев всего кабеля до некоторой средней температуры, которая будет:

$$T_{\text{СР}} = \frac{Q_{\text{Ж}} + Q_{\text{Э}}}{C_{\text{Ж}} + C_{\text{И}} + C_{\text{Э}} + C_{\text{О}}} + T_{\text{Н}}. \quad (6)$$

Приняв, что до КЗ средняя температура кабеля была  $T_{\text{Н}} = 90^\circ\text{C}$  и воспользовавшись данными по параметрам  $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $\epsilon$  элементов кабеля (см. табл. 1), получим обобщающие зависимости, приведенные на рис. 4.

Сравнение рис. 3 и рис. 4, как и следовало ожидать, показывает, что средняя температура прогретого кабеля  $T_{\text{СР}}$  меньше той пиковой температуры оболочки  $T_{\text{О}}$ , которая достигается практически сразу же после отключения КЗ.

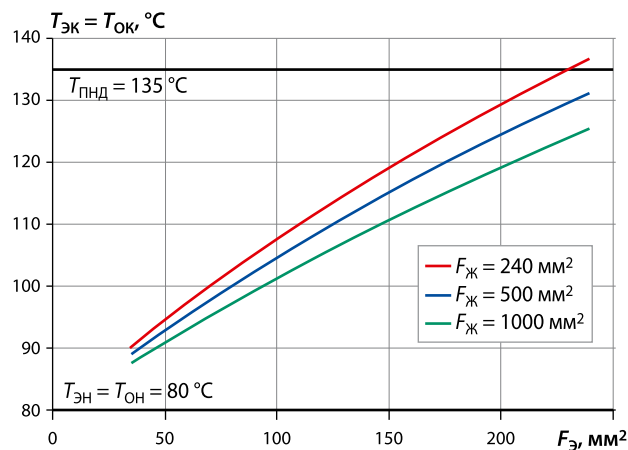
Для наиболее востребованных в нашей стране кабельных линий типа 240/50, 500/95, 1000/240 мм<sup>2</sup> после равномерного прогрева кабелем теплом, выделившимся в жиле и экране во время КЗ, средняя температура не превосходит  $105^\circ\text{C}$  (рис. 4). Это достаточно любопытное совпадение с п. 4.1.5 Стандарта [2], где говорится «Для кабелей классов напряжения от 110 до 500 кВ максимально допустимая температура нагрева токопроводящих жил кабелей в режиме перегрузки не более  $105^\circ\text{C}$ . Суммарная продолжительность работы кабелей в режиме перегрузки должна быть рассчитана для каждой КЛ с учетом требований завода-изготовителя и не превышать 100 часов за год и 1000 часов за срок службы». Иными словами, КЗ в кабеле, его прогрев до средней температуры и затем долгое остывание можно классифицировать как своеобразную перегрузку кабеля, которая ограничена и по времени (кабель остынет быстрее чем за 100 часов), и по числу раз (вряд ли за срок службы КЗ в кабеле будет более  $1000/100 = 10$  раз).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время при прокладке кабельных линий 6–500 кВ зачастую применяют трубы холодного водоснабжения из полиэтилена низкого давления. Как было показано в [1], такие трубы рассчитаны на работу при температурах до  $40^\circ\text{C}$ , что меньше температуры  $75\text{--}85^\circ\text{C}$ , которая может возникать

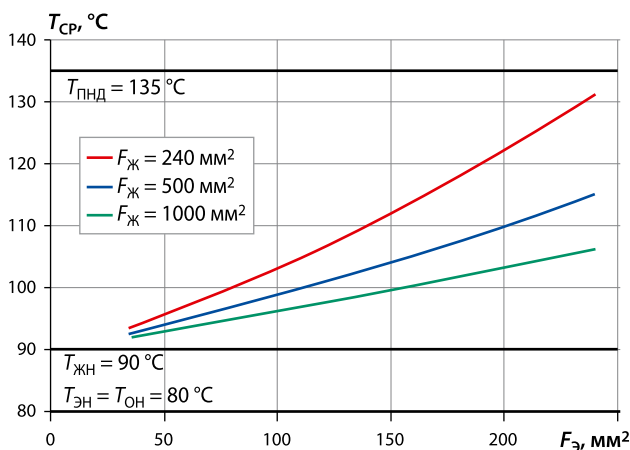
Температура экрана и оболочки кабеля после прогрева оболочки теплом от экрана (конец 2-го этапа)

Рис. 3 •



Средняя температура кабеля после его прогрева теплом от жилы и экрана (конец 3-го этапа)

Рис. 4 •



на поверхности кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в нормальном режиме работы.

Еще одним заслуживающим внимания вопросом являются воздействия на ПНД-трубы при КЗ в кабельных линиях. Показано, что после отключения КЗ оболочка ряда кабелей может быть разогрета до температуры, приближающейся к температуре плавления ПНД-трубы  $135^\circ\text{C}$ .

С учетом аperiodической составляющей тока КЗ [3], которая в настоящее время не учитывается при проектировании кабельных линий, можно ожидать возникновения на оболочке кабеля температур, при которых ПНД-труба размягчится и сплывется с проложенным в ней кабелем или деформируется.

Полномасштабные экспериментальные исследования свойств ПНД-труб, которые оказываются в нехарактерном для них диапазоне температур, не проводились ни в нормальном режиме работы, ни при КЗ. По этой причине неизвестно, как поведет себя ПНД-труба по мере эксплуатации кабельной линии в течение 30 лет и более. До получения результатов таких исследований ПНД-труб их использование не рекомендуется.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриев М.В. Кабельные линии, проложенные в полиэтиленовых трубах. Тепловой расчет // Новости ЭлектроТехники. 2013. № 4(82). С. 58–62.
2. СТО 56947007-29.060.20.072-2011. Силовые кабельные линии напряжением 110–500 кВ. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2011.
3. Дмитриев М.В. Выбор сечения экрана однофазных кабелей 6–500 кВ. Учет аperiodической составляющей тока // Новости ЭлектроТехники. 2014. № 4(88). С. 34–37.