



DOI: 10.18721/JEST.240103
УДК: 621.315.2.016.2

В.В. Титков¹, А.Н. Лубков², П.Д. Тукеев¹

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током
высокого напряжения, Санкт-Петербург, Россия

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ТРЕХФАЗНОЙ КАБЕЛЬНОЙ ЛИНИИ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ДУГОВЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

В работе рассматривается тепловой режим кабельной линии, в которой существует однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), и проводится оценка масштаба разрушения кабельной конструкции, вызываемой повышением температуры в зоне повреждения. На основании модели закрытого дугового разряда была составлена система уравнений, описывающая тепловой режим кабельной линии в условиях существования ОЗЗ во времени. При помощи численного решения данной системы была получена картина теплового поля исследуемой кабельной линии во времени. На основании полученных данных были сделаны выводы относительно влияния таких параметров, как класс напряжения кабельной линии, на сценарий развития тепловых процессов, а также характерные пространственные и временные масштабы этих процессов. Сформулирован ряд рекомендаций, направленных на уменьшения вероятности развития существенно-го теплового повреждения кабельной конструкции в условиях возникновения ОЗЗ, способного привести к двухфазным КЗ и другим серьезным авариям.

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ; КАБЕЛЬ; КАБЕЛЬНАЯ ЛИНИЯ; ИЗОЛЯЦИЯ; ДУГОВОЙ РАЗРЯД; ОЗЗ; КЗ.

Ссылка при цитировании:

В.В. Титков, А.Н. Лубков, П.Д. Тукеев. Тепловые процессы в трехфазной кабельной линии в сети с изолированной нейтралью при однофазных дуговых замыканиях на землю // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 1. С. 27–37. DOI: 10.18721/JEST.240103.

V.V. Titkov¹, A.N. Lubkov², P.D. Tukeev¹

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – NIPT, St. Petersburg, Russia

THERMAL PROCESSES IN A THREE-PHASE CABLE LINE IN A GRID WITH ISOLATED NEUTRAL UNDER ONE-PHASE ARCING GROUND FAULT

The heating mode of a cable line under one-phase arcing ground fault is considered in this paper along with an assessment of the scale of cable insulation caused by a temperature increase in the fault location. Based on the enclosed arcing discharge model, we have constructed a system of equations describing the heating mode of a cable line during the evolution of one-phase arcing ground fault over time. We have obtained the time history of the temperature field of the considered cable line using finite-element analysis. Based on the obtained data, we were able to draw several conclusions about the influence of such parameters as the operating voltage on the behavior of the heating mode, along with typical time and

dimension scales of these processes. We have formulated a number of suggestions focused on decreasing the probability of the development of considerable thermal destruction of a cable line under one-phase arcing ground fault that could potentially cause two-phase fault.

HEATING MODE; CABLE; CABLE LINE; INSULATION; ARC DISCHARGE; BREAKDOWN; SINGLE-PHASE GROUND FAULT.

Citation:

V.V. Titkov, A.N. Lubkov, P.D. Tukeev. Thermal processes in a three-phase cable line in a grid with isolated neutral under one-phase arcing ground fault, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(01)(2018) 27–37, DOI: 10.18721/JEST.240103.

Введение

Доля кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в сетевом хозяйстве крупных городов продолжает увеличиваться [1] в силу потребности в высвобождении земельных площадей и роста потребляемой нагрузки. Пропускная способность кабельных линий высокого и сверхвысокого напряжений сильно зависит от температурного режима, на который влияет множество факторов: способ укладки кабелей, обустройство экранов и пр. [2]. Это приводит к тому, что главным фактором, определяющим пропускную способность кабельной линии 6–35 кВ, становится ее тепловой режим. Вопросы негативного влияния различного рода препятствий, таких, как пересечения кабельной линии с теплотрассами, автодорогами, ж/д путями и т.д., были рассмотрены в [3, 4]. Однако причиной возникновения локального максимума температуры также может служить однофазное замыкание на землю (ОЗЗ). В силовых высоковольтных кабельных линиях ток ОЗЗ определяется классом напряжения и емкостью кабельной линии на землю [5]. Особенность ОЗЗ в линиях с изолированной, а также с эффективно заземленной нейтралью заключается в том, что ток ОЗЗ в них ограничен величиной порядка десяти ампер и не вызывает срабатывания релейной защиты, вследствие чего ОЗЗ может существовать длительное время, измеряемое часами и сутками [6]. Вместе с тем тепловой режим кабеля в зоне прокола может привести к деструкции изоляции как аварийной, так и соседней фаз с последующим переходом однофазного короткого замыкания в двухфазное [7].

Таким образом, актуальность проблемы анализа теплового режима кабельных линий в условиях существования ОЗЗ в них очевидна.

Цели работы – исследовать изменение во времени теплового режим кабельной линии в условиях существования в ней ОЗЗ, попытаться оценить масштабы разрушения кабельной конструкции, вызванного повышением температуры в зоне повреждения, а также возможность диагностики ОЗЗ с малым током в процессе мониторинга КЛ оптоволоконными системами температурного контроля [8–12].

Материал и методика работы

В качестве объектов исследования выступают две типичные трехфазные кабельные линии (10 и 35 кВ) в сетях с изолированной нейтралью. Линия на 10 кВ выполнена однофазным кабелем марки ПвКаВнг(А)-LS 1×240мк/50-10 (рис. 1) с медным проводящим экраном, алюминиевой броней и изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 1 км. Эскиз сечения кабеля на 35 кВ приведен на рис. 3, г.

На рис. 1 обозначено: $r_c = 9,75$ мм – радиус сечения жилы; $r_{in1} = 13,75$ мм – радиус сечения внутренней изоляции; $r_{sh} = 16$ мм – радиус сечения медного экрана; $r_{in2} = 18,5$ мм – радиус сечения внешней изоляции; $r_{ar} = 20,5$ мм – радиус сечения брони; $r_{in3} = 24,5$ мм – радиус сечения внешней оболочки. Толщинами полупроводящих слоев пренебрегаем ввиду их малости.

Использовали численно-аналитическое моделирование с помощью программных пакетов Mathcad и Comsol.

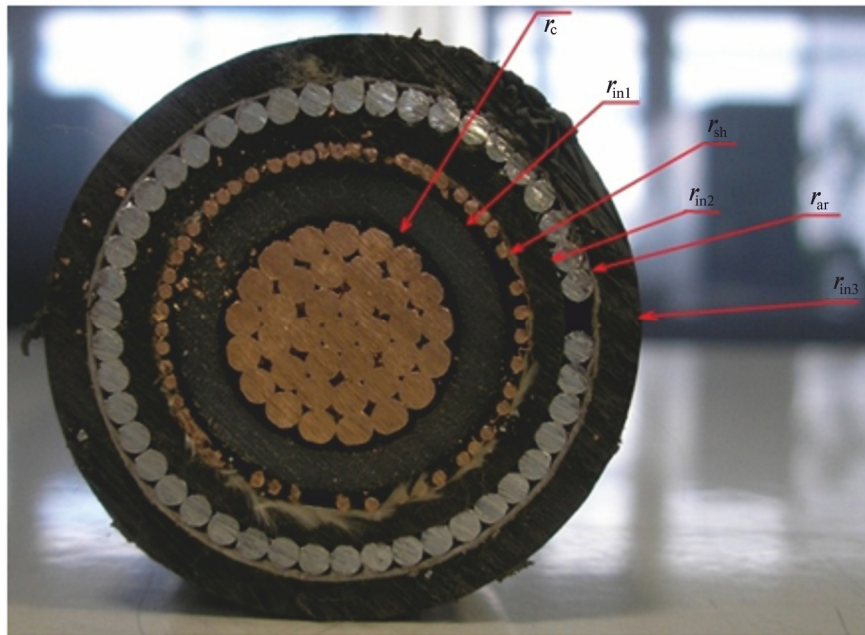


Рис. 1. Вид сечения кабеля ПвКаВнг(А)-LS
Fig. 1. View of cable ПвКаВнг(А)-LS cross-section

Расчетное исследование

Ранее в [7] тепловой режим в высоковольтной кабельной линии в зоне ОЗЗ длительностью 2 секунды с током 340 А был рассмотрен в рамках относительно простой модели. При этом масштаб и скорости термической деструкции кабельной системы вблизи замыкания оказались приводящими к быстрому развитию аварии. Вместе с тем, как было отмечено, режим ОЗЗ при токе замыкания, ограниченном десятками ампер, может длиться десятки часов, но термическое повреждение кабельной конструкции при этом может иметь незначительный масштаб и существовать длительное время, сохраняя, однако, потенциальную опасность возникновения аварии.

Если величина тока ОЗЗ определяется параметрами сети, в частности зарядной емкостью линии, то на тепловыделение, кроме величины тока, существенное влияние оказывает электрическое сопротивление канала разряда. Для оценки электросопротивления разрядного канала необходимо оценить параметры дуговой плазмы. С этой целью воспользуемся моделью закрытого дугового разряда [13–15].

В рамках используемой модели (рис. 2) в анализируемом случае относительно не-

большого тока дуги будем предполагать отсутствие массообмена разрядного канала с окружающей средой, т.е. существование разряда в закрытой форме.

В этом случае давление P газоразрядной плазмы в канале равно давлению P_w насыщенного пара материала стенки – полиэтилена. Последнее оценивается на основе универсального закона Трутона:

$$P_w = C_t \exp\left(-\frac{\Delta H}{R_0 T}\right),$$

где ΔH – молярная теплота сублимации вещества (сшитый полиэтилен), для оценки которой используем энергию разрыва связи «углерод – углерод» в расчете на 1 моль вещества, равная $2,625 \cdot 10^5$ Дж/моль; R_0 – универсальная газовая постоянная; T – температура; $C_t = 3,63 \cdot 10^9$ Па – постоянная Трутона. Считая плазму идеальным газом, давление которого при низкой степени ионизации приблизительно оценивается по стандартной формуле $P = nkT$ (k – постоянная Больцмана), из уравнения $P = P_w$ найдем концентрацию частиц в газе в канале разряда:

$$n = C_t \frac{e^{-\frac{\Delta H}{R_0 T}}}{kT}.$$

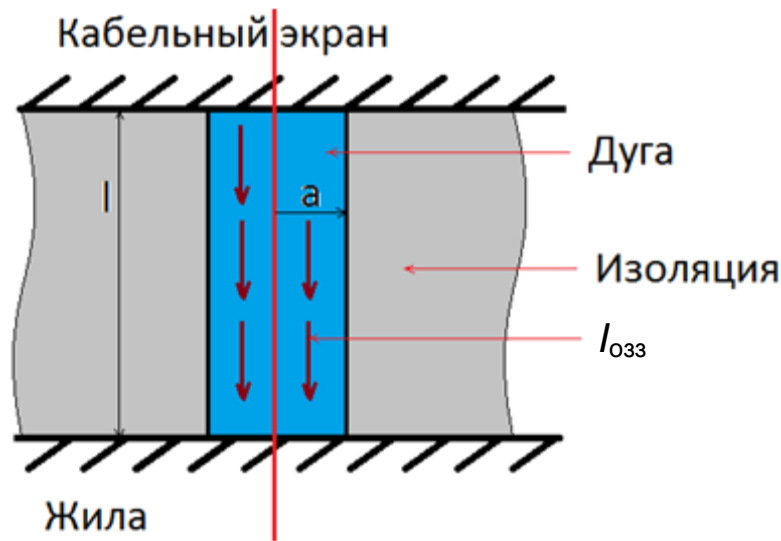


Рис. 2. К описанию дугового разряда в канале пробоя изоляции
 Fig. 2. To the description of arc discharge in the insulation breakdown channel

Электропроводность плазмы найдем с помощью стандартной формулы

$$\gamma = \frac{x e_0^2}{\sqrt{3kT} ((1-x)\sigma_a + \sigma_i)},$$

где σ_a, σ_i – сечения столкновения электро-на соответственно с нейтрами и ионами;

$$\sigma_a = \pi r_a^2;$$

r_a – табличное значение размера нейтрального атома;

$$\sigma_i = 6\pi b_0^2 \ln(\Lambda);$$

$$b_0 = \frac{e_0^2}{12\pi\epsilon_0 kT};$$

$$\Lambda = \frac{\rho_D}{b_0};$$

$$\rho_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 kT}{n_e e_0^2}};$$

$e_0, n_e = n(1-x)$ – заряд и концентрация электронов; степень ионизации x рассчитывается по формуле Саха в предположении водородной плазмы, т.к. наибольшая часть атомов, составляющих дуговой газ, образующийся в результате разложения полиэтилена (C_2H_4), – это водород.

Мощность тепловыделения в канале разряда при протекании тока $I_{\text{ОЗЗ}}$ определяется падением напряжения вдоль канала разряда и приэлектродными падениями напряжения ΔU :

$$\dot{Q} = \frac{I_{\text{ОЗЗ}}^2}{\pi a^2 \gamma} + 2\Delta U I_{\text{ОЗЗ}}, \quad (1)$$

где a и l радиус и длина разрядного канала (рис. 2).

Наиболее интенсивное тепловыделение имеет место при непрерывном протекании тока промышленной частоты по разрядному каналу. Однако, учитывая нестабильное механическое состояние среды вокруг разрядного канала, можно ожидать и периодическое погасание дуги в канале, что является причиной хорошо известного явления дуговых перенапряжений [16]. При этом мощность тепловыделения, осредненная по относительно длинному промежутку времени (секунды и более), может быть существенно меньше предельного значения, выражаемого формулой (1).

Первичная оценка образования и скорости распространения зоны повреждения изоляции и проводящих элементов конструкции кабеля, возникающей вблизи



канала пробоя, может быть выполнена в результате решения нестационарной задачи теплопроводности. Трудность решения обусловлена главным образом геометрическими особенностями расчетной области – весьма малым по сравнению с характерными размерами конструкции КЛ размером источника тепловыделения (канал разряда радиусом $a = 0,1-0,5$ мм). Конфигурация теплового поля линии с дефектом в виде пробоя отличается от плоской, имеющей место в однородных КЛ большой длины. Это существенно затрудняет применение метода конечных элементов, широко используемого при расчете тепловых режимов кабельных линий. Размер ограниченной расчетной области определялся в численных экспериментах исходя из того, чтобы при увеличении расчетной области по отношению к принятой решение изменялось не более чем на 1 %.

Схематичное изображение расчетной области и граничных условий представлено на рис. 3. Здесь α -коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности грунта принят равным $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, температура окружающей среды $T_{\text{окр}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура грунта $T_{\text{гр}} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. На прочих границах принято условие равенства теплового потока нулю. Ось z совпадает с осью отрезка кабеля.

Из (1) следует, что при заданном токе ОЗЗ мощность тепловыделения, наряду с геометрическими параметрами разрядного канала, определяется его температурой. При этом ток дуги определяется не сопротивлением канала разряда, а емкостным сопротивлением кабеля, которое, как следует из оценок, существенно выше первого. Примеры рассчитанных с помощью (1) зависимостей $\dot{Q}(T)$ для канала радиусом $0,1$ мм при различных толщинах изоляции и токах разряда показаны на рис. 4.

Область горения дуги моделируется поверхностью сферы радиусом $0,002$ м, к

которой приложен тепловой поток, причем радиус выбран равным половине толщины изоляции между жилой и экраном кабеля.

Тепловой поток из области дуги определяется формулой

$$q_d = \frac{\dot{Q}}{4\pi r_d^2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где \dot{Q} находится из (1); $a = 0,1$ мм; $l_k = 4$ мм – радиус и длина плазменного канала дуги, равная толщине изоляции; $I_{\text{ОЗЗ}}$ – ток ОЗЗ; γ – проводимость плазменного канала дуги; $\Delta U = 20 \text{ В}$ – катодное падение напряжение для медного электрода; r_d – радиус сферы, к поверхности которой приложен поток q_d .

Тепловыделения в жилах и экранах фазных кабелей приняты для величин токов 600 А в кабеле 10 кВ и 900 А в кабеле 35 кВ . Такие значения токов были приняты как рабочие значения, при которых температуры в жилах не поднимаются выше $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Учитывая наличие проводящих экранов и алюминиевой брони, можно пренебречь межфазными емкостями и принять емкость линии равной утроенной емкости одной фазы. Таким образом, величина тока ОЗЗ

$$I_{\text{ОЗЗ}} = \sqrt{3} \omega C_3 U = 5,8 \text{ А},$$

где C_3 – емкость одного фазного кабеля; $U = 10 \text{ кВ}$ – рабочее напряжение линии. Емкость одной фазы рассматриваемой линии – это емкость системы «жила – экран»:

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{XLPE}L_{\text{каб}}}{\ln\left(\frac{r_{\text{in1}}}{r_c}\right)} = 0,356 \text{ мкФ},$$

где $\epsilon_{XLPE} = 2,3$ – относительная диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $L_{\text{каб}} = 1000 \text{ м}$ – длина рассматриваемой кабельной линии.

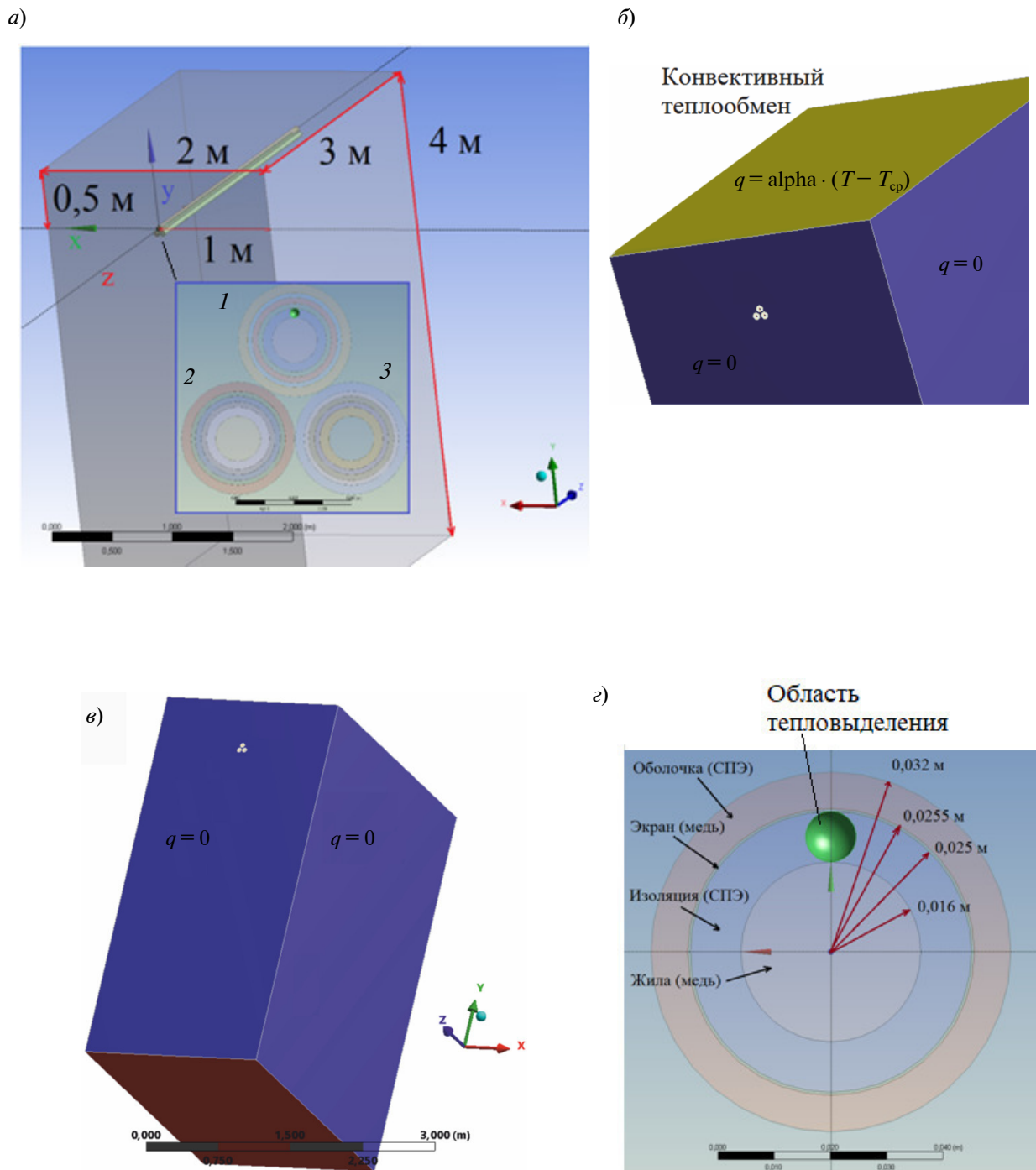


Рис. 3. Расчетная область (1 – фаза с ОЗЗ; 2, 3 – здоровые фазы) и граничные условия:
а – общий вид и размеры расчетной области; б–г – граничные условия

Fig. 3. Calculation field (1 – phase with single-phase ground fault; 2, 3 – normal phases)
and boundary conditions: а – general view and dimensions of calculation field; б–г – normal phases

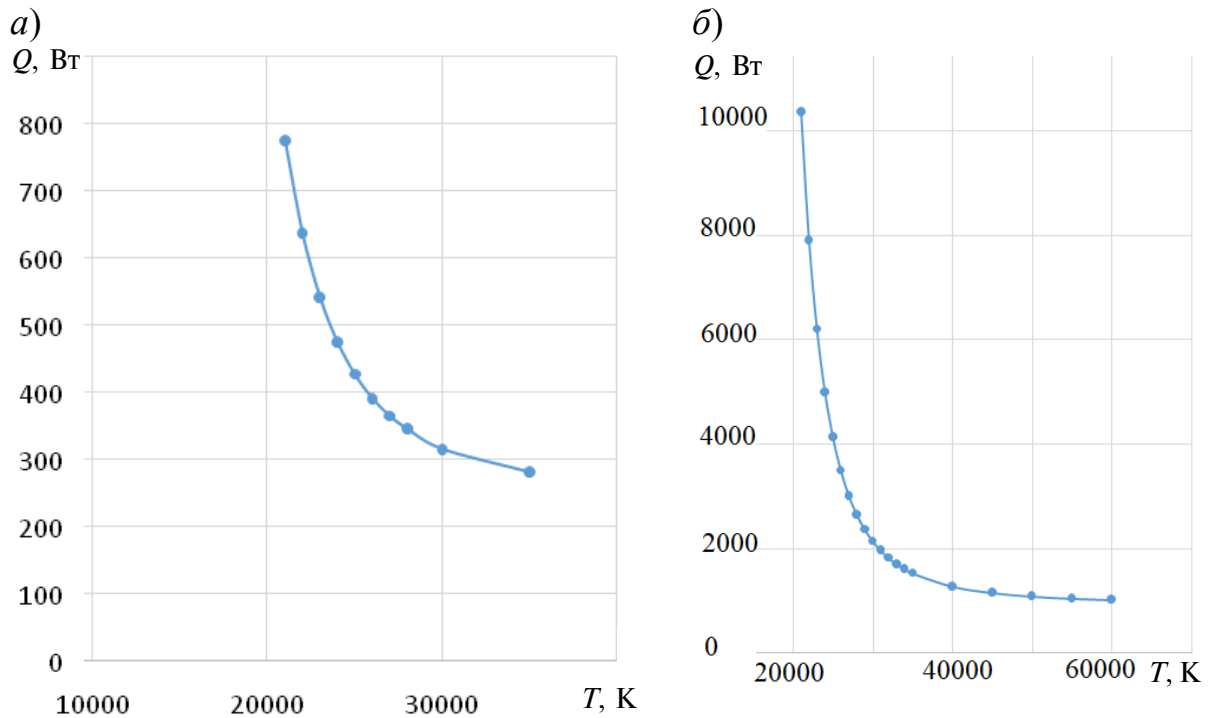


Рис. 4. Зависимости мощности тепловыделения в дуге от температуры в кабеле:
a – в слое изоляции 4 мм при токе 5,8 А (кабель 10 кВ);
б – в слое изоляции 9 мм при токе 16,4 А (кабель 35 кВ)
 Fig. 4. The dependence of heat generation power of the arc from its temperature in cable:
a – within of insulation 4 mm at current of 5.8 A (cable 10 kV);
б – within of insulation 9 mm at current of 16.4 A (cable 35 kV)

Числовые характеристики физических свойств материалов, использованные в тепловом расчете приведены в таблице.

Параметры материалов
Material parameters

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж·кг/К	Теплопроводность, Вт/м·К
Сшитый полиэтилен	930	2350	0,32
Грунт	2000	850	1
Медь	8700	385	400
Алюминий	2700	900	238

Результаты расчетов и их обсуждение

Распределения температуры на поверхности внешней изоляции кабельной линии с ОЗЗ на линии, параллельной оси кабеля, и зависимость от времени температуры оболочки кабеля над проколом приведены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что при достаточно длительном (часы) действии маломасштабного дугового разряда с небольшим током температура внешней оболочки поврежденной фазы в районе пробоя достигнет величины, позволяющей уверенно отличить локальный максимум температуры, вызванный пробоем изоляции между жилой и экраном, от другого локального максимума температуры, который может быть вызван пролегающей рядом теплотрассой или другой кабельной линией [4]. В то же время в описанном режиме ОЗЗ с током не более 10 А, характерном для кабельных линий класса 10 кВ, нельзя ожидать заметной термической деструкции изоляционной системы кабеля, поскольку характерная температура начала такого процесса составляет величину порядка 500 К. Поэтому можно предполагать, что данный дефект изоляции при умеренных токах ОЗЗ может существовать длительное время, не вызывая масштабных повреждений.

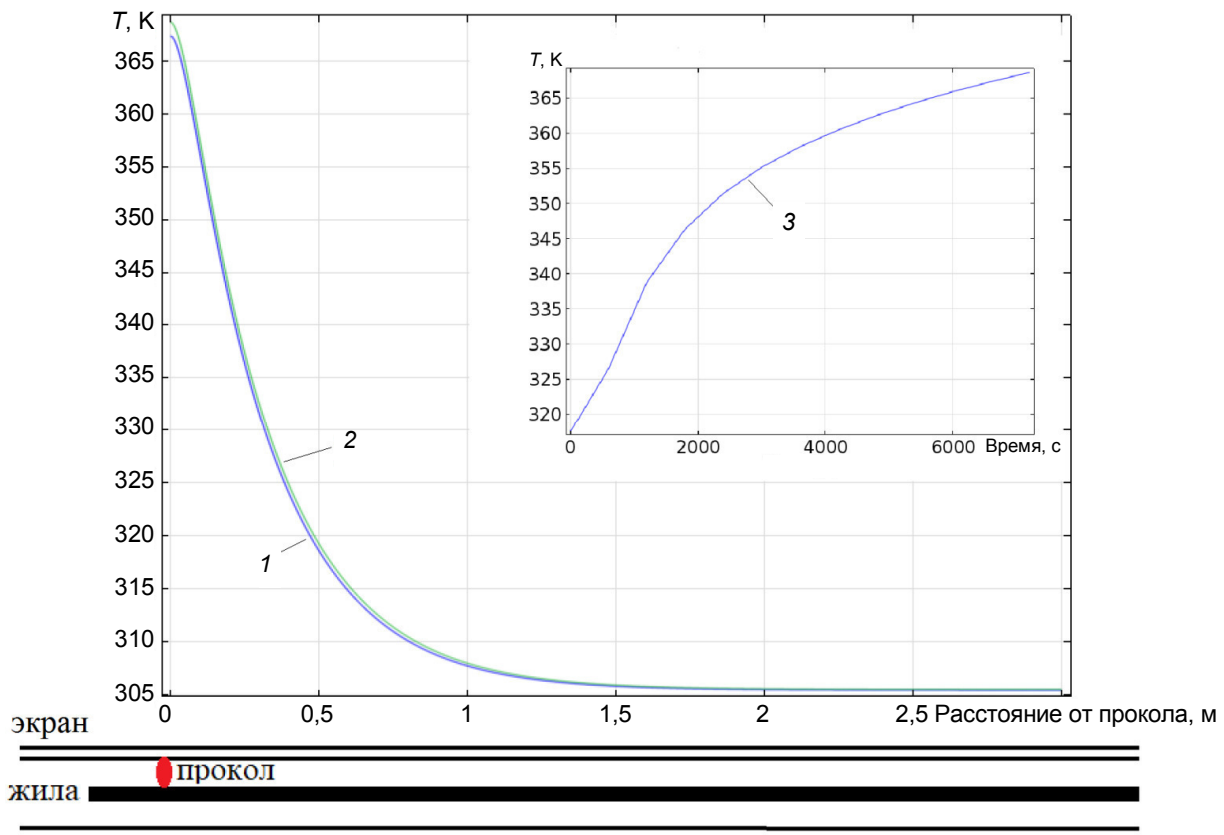


Рис. 5. Распределение температуры вдоль внешней поверхности 10 кВ кабеля при $t = 6600$ с (1) и $t = 7200$ с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)
 Fig. 5. Temperature distribution along the outer surface of 10 kV cable at $t = 6600$ s (1) and $t = 7200$ s (2); the dependence of outer shell surface temperature from time (3)

Больших значений токов ОЗЗ можно ожидать в кабельных линиях более высокого класса напряжения в сети с изолированной нейтралью.

Рассмотрим случай ОЗЗ в кабеле класса 35 кВ. Сечение кабеля представлено на рис. 3. Для такого кабеля длиной 1 км ток ОЗЗ составит 16,4 А. Рассчитанная с помощью (1) зависимость $\dot{Q}(T)$ для канала радиусом 0,1 мм при толщине изоляции 9 мм показан на рис. 4, б.

Распределения температуры на поверхности внешней изоляции кабельной линии с ОЗЗ вдоль образующей оболочки кабеля и зависимость от времени температуры оболочки кабеля над проколом приведены на рис. 6.

Из рис. 6 видно, что область расплавления полимерных компонент конструкции кабеля вблизи прокола составляет величину порядка 7 см. В то же время размер по длине кабеля области возмущения температурного поля, вызванного током ОЗЗ, состав-

ляет около 2 м. Время, предшествующее началу процесса термической деструкции изоляции от момента возникновения дуги прокола, составляет примерно 7,5 мин.

Комментируя результаты рассмотренных выше расчетных примеров, следует отметить, что появление зоны расплава изоляции вблизи канала разряда может привести к периодическому погасанию дуги и заметному снижению тепловыделения. При этом масштаб зоны повреждения может оказаться существенно меньше, чем показывают, например, приведенные здесь оценки для кабеля 35 кВ. Тем не менее, очевидно, что в случае относительно длинных КЛ с большой зарядной мощностью целесообразно принимать меры, ограничивающие ток ОЗЗ величиной 10 А, например эффективное заземление нейтрали. В этом случае фазы кабеля можно располагать стесненно, к примеру компактным треугольником. При этом ОЗЗ не приведет к масштабным разрушениям и переходу аварии в режим замыкания двух фаз кабельной линии.

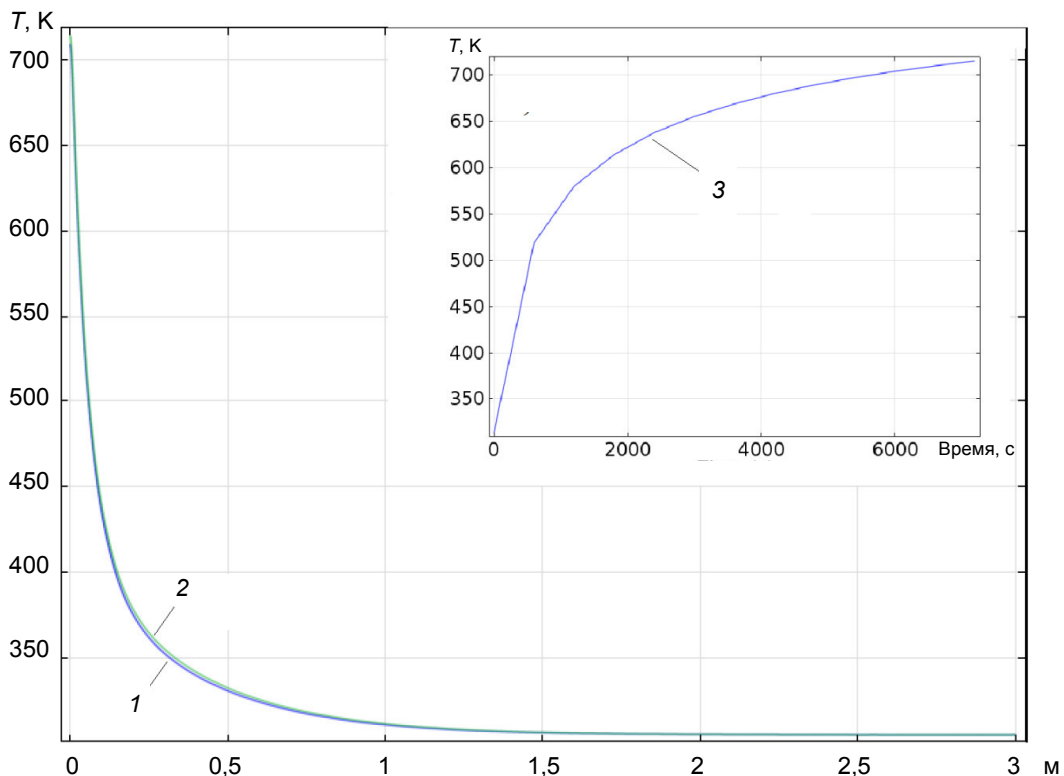


Рис. 6. Распределение температуры вдоль внешней поверхности 35 кВ кабеля при $t = 6600$ с (1) и $t = 7200$ с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)
 Fig. 6. Temperature distribution along the outer surface of 35 kV cable at $t = 6600$ s (1) and $t = 7200$ s (2): the dependence of outer shell surface temperature from time (3)

Заключение

Однофазное замыкание на землю в кабельных линиях, выполненных однофазными кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена, при токе замыкания, ограниченном 10 А, не приводит к быстрым разрушительным последствиям.

Длительное действие маломасштабного дугового разряда в изоляции кабеля приводит к возмущению его температурного поля, достаточному для идентификации данного дефекта системами оптоволоконного контроля температуры кабельной линии.

Следует избегать возможности появления токов ОЗЗ, превышающих 10–15 А, поскольку в этом случае неизбежно появление области расплава изоляции масштаба нескольких десятков сантиметров. При этом возникает вероятность деструкции изоляции «здоровых» фаз и перехода однофазного замыкания в междуфазное.

Предупреждение аварии междуфазного замыкания достигается отказом от часто применяемого стесненного расположения фаз кабельной линии треугольником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников А.Г. Системы электропередачи на базе СПЭ-кабелей. Эффективность применения // Новости электротехники. 2007. № 1. С. 24–29.
2. Лавров Ю.А. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией // Новости электротехники. 2007. № 1. С. 32–36.

3. Беляков В.В., Малышев А.В., Кривошеев Н.В., Маршнер Вольфганг К. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени // ЭЛЕКТРО. 2008. № 5. С. 38–40.

4. **Titkov V.V. [et al.]**. The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks // *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 6. С. 75–83.

5. **Дмитриев М.В.** Заземление нейтрали в кабельных сетях 6–35 кВ // *Сети России*. 2016. № 5 (38). С. 76–81.

6. **Дмитриев М.В.** Заземление экранов однофазных силовых кабелей 6–500 кВ. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. 154 с.

7. **Антонов А.А., Гусев Ю.П.** Электродуговые процессы при однофазных замыканиях в пофазно-экранированных кабелях // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2013. № 5.

8. **Ларин Ю.Т., Смирнов Ю.В., Гринштейн М.Л.** Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля // *Кабель-news*. 2009. № 8. С. 48–53.

9. **Мокански В.** Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем // *Кабели и провода*. 2009. № 2. С. 14–17.

10. **Удовиченко О.В.** Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // *Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы III российской научн.-практ. конф.*

с международным участием. Новосибирск, 2008. С. 301–304.

11. **Якунин А.В.** Мониторинг теплового режима эксплуатации кабельных линий 110–500 кВ // *Линии электропередачи 2010: проектирование, строительство опыт эксплуатации и научно-технический прогресс: материалы IV российской научн.-практ. конф. с международным участием*. Новосибирск, 2010. С. 306–310.

12. **Anders G.J., Braun J.-M., Downes John A., Fujimoto N., Luton M.-H., Rizzetto S.** Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook // *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.

13. **Адамьян Ю.А. [и др.]**. Электроэнергетика. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. О.В. Махровой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 120 с.

14. **Карпова И.М., Титков В.В.** Компьютерные модели электромагнитных технологий. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 1999. 226 с.

15. **Титков В.В., Филатов В.В.** Абляционно-газодинамическая модель мощной электрической дуги в закрытом объеме // *Плазменные установки и процессы*. 2000. Т. 8. С. 95–109.

16. Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозных и внутренних перенапряжений / Под ред. Ф.Х. Халилова, В.Г. Гольдштейна. М.: Энергоатомиздат, 2010. 263 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ТИТКОВ Василий Васильевич — доктор технических наук профессор заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: titkovprof@yandex.ru

ЛУБКОВ Александр Николаевич — руководитель лаборатории Научно-исследовательского института по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения
E-mail: lubkoff@pisem.net

ТУКЕЕВ Павел Дмитриевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: paultuk@yandex.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 12.02.2018

REFERENCES

[1] **Kozhevnikov A.G.** Sistemy elektroperedachi na baze SPE-kabelei. Effektivnost' primeneniia. *Novosti elektrotekhniki*. 2007. № 1. С. 24–29. (rus.)

[2] **Lavrov Iu.A.** Kabeli 6–35 kV s plastmassovoi izoliatsiei. *Novosti elektrotekhniki*. 2007. № 1. С. 32–36. (rus.)

[3] **Beliakov V.V., Malyshev A.V., Krivosheev N.V., Marshner Vol'fgang K.** Monitoring silovykh ka-

bel'nykh linii s adaptatsiei k usloviyam okruzhaiushchei sredy v rezhime real'nogo vremeni. *ELEKTRO*. 2008. № 5. С. 38–40. (rus.)

[4] **Titkov V.V. [et al.]**. The capacity limitations of power transmission cable lines in the structure of civil and industry engineering networks. *Magazine of Civil Engineering*. 2014. № 6. С. 75–83. (rus.)



- [5] **Dmitriev M.V.** Zazemlenie neutrali v kabel'nykh setiakh 6–35 kV. *Seti Rossii*. 2016. № 5 (38). S. 76–81. (rus.)
- [6] **Dmitriev M.V.** Zazemlenie ekranov odnofaznykh silovykh kabelei 6–500 kV. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2010. 154 s. (rus.)
- [7] **Antonov A.A., Gusev Iu.P.** Elektrodugovyye protsessy pri odnofaznykh zamykaniyakh v pofazno-ekranirovannykh kabeliakh. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*. 2013. № 5. (rus.)
- [8] **Larin Iu.T., Smirnov Iu.V., Grinshtein M.L.** Primenenie sistemy temperaturnogo monitoringa s pomoshch'iu opticheskogo kabelia dlia kontrolya raspredeleniya temperatury vdol' elektricheskogo silovogo kabelia. *Kabel'-news*. 2009. № 8. S. 48–53. (rus.)
- [9] **Mokanski V.** Silovoi kabel' vysokogo napriazheniya so vstroennym volokonno-opticheskim modulem. *Kabeli i provoda*. 2009. № 2. S. 14–17. (rus.)
- [10] **Udovichenko O.V.** Temperaturnyi monitoring kabel'nykh linii vysokogo napriazheniya na osnove kabelei s izoliatsiei iz sshitogo polietilena. *Linii elektroperedachi 2008: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy III rossiiskoi nauchn.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2008. S. 301–304. (rus.)
- [11] **Iakunin A.V.** Monitoring teplovogo rezhima ekspluatatsii kabel'nykh linii 110–500 kV. *Linii elektroperedachi 2010: proektirovanie, stroitel'stvo opyt ekspluatatsii i nauchno-tekhnicheskii progress: materialy IV rossiiskoi nauchn.-prakt. konf. s mezhdunarodnym uchastiem*. Novosibirsk, 2010. S. 306–310. (rus.)
- [12] **Anders G.J., Braun J.-M., Downes John A., Fujimoto N., Luton M.-H., Rizzetto S.** Real Time Monitoring of Power Cables by Fibre Optic Technologies. Tests, Applications and Outlook. *6th International Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03)*. Paris, 2003.
- [13] **Adam'ian Iu.A. [i dr.]**. Elektroenergetika. Vysokovol'tnye elektrotekhnologii / Pod red. O.V. Makhrovoi. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2006. 120 s. (rus.)
- [14] **Karpova I.M., Titkov V.V.** Komp'uternye modeli elektromagnitnykh tekhnologii. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 1999. 226 s. (rus.)
- [15] **Titkov V.V., Filatov V.V.** Abliatsionno-gazodinamicheskaya model' moshchnoi elektricheskoi dugi v zakrytom ob'eme. *Plazmennyye ustanovki i protsessy*. 2000. T. 8. S. 95–109. (rus.)
- [16] Ogranichiteli perenapriazhenii dlia zashchity izoliatsii elektrooborudovaniia i linii setei srednego, vysokogo i sverkhvysokogo napriazheniya ot grozovykh i vnutrennikh perenapriazhenii / Pod red. F.Kh. Khalilova, V.G. Gol'shteina. M.: Energoatomizdat, 2010. 263 s. (rus.)

AUTHORS

TITKOV Vasilii V. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: titkovprof@yandex.ru

LUBKOV Aleksandr N. – NIIPT.

E-mail: lubkoff@pisem.net

TUKEEV Pavel D. – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university

E-mail: paultuk@yandex.ru

Received: 12.02.2018