



Thermal Processes in a Three-Phase Cable Line in a Grid with Isolated Neutral under One-Phase Arcing Ground Fault

Alexander N. LUBKOV¹, Vasily V. TITKOV², Paul D. TUKEEV²

¹ High Voltage Testing Laboratory “NIIPT”, Saint-Petersburg
Phone: +007-921-315-08-70; e-mail: lubkov_a@niipt.ru

² Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia;
Phone: +007 812 2972148; e-mail: titkov_vv@spbstu.ru, paultuka@yandex.ru

Abstract

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.

Keywords: Heating Mode; Cable; Cable Line; Insulation; Arc Discharge; Breakdown; Single-Phase Ground Fault

Термальные процессы в трехфазной кабельной линии в сетке с изолированной нейтралью при однофазном замыкании на землю

Александр Н. ЛУБКОВ, Василий В. ТИТКОВ, Пол Д. ТУКЕЕВ

1. Введение

В силовых высоковольтных кабельных линиях ток однофазного замыкания на землю (далее – ОЗЗ) определяется классом напряжения и емкостью кабельной линии на землю. Особенность ОЗЗ в линиях с изолированной, а также с эффективно заземленной нейтралью, заключается в том, что в этом случае ток ОЗЗ ограничен величиной порядка десяти Ампер и не вызывает срабатывание релейной защиты, вследствие чего ОЗЗ может существовать длительное время, измеряемое часами и сутками.

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[1]. В данной работе предпринимается попытка анализа теплового режима в зоне ОЗЗ и оценки масштаба деструкции кабельной конструкции, вызываемой повышением температуры в зоне повреждения.

2. Исследование и результаты

В качестве типичного примера рассмотрим трехфазную кабельную линию в сети с изолированной нейтралью, выполненную однофазным кабелем марки ПвКаВнг(А)-LS 1х240мк/50-10 (рис.1) на напряжение 10 кВ с медным проводящим экраном, алюминиевой броней и изоляцией из сшитого полиэтилена длиной 1 км.

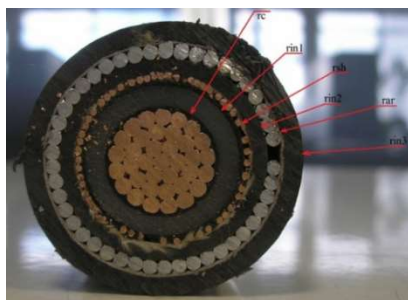


Рис. 1 Вид сечения кабеля ПвКаВнг(А)-LS

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 и $r_{in3} = 24,5$ мм – радиус сечения внешней оболочки. Толщинами полупроводящих слоев пренебрегаем ввиду их малых величин (доли мм).

Ранее в [1] тепловой режим в высоковольтной кабельной линии в зоне ОЗЗ длительностью 2 с с током 340 А был рассмотрен в рамках относительно простой модели. При этом масштаб и скорости термической деструкции кабельной системы вблизи замыкания приводят к быстрому развитию аварии. Вместе с тем режим ОЗЗ при токе замыкания, ограниченном десятками А, как было отмечено, может составлять десятки часов и термическое повреждение кабельной конструкции может иметь незначительный масштаб и существовать длительное время, сохраняя потенциальную опасность возникновения аварии. Задачей данной работы является оценка температурного режима кабельной линии вблизи зоны пробоя (прокола) полимерной изоляции одной из фаз и сценария развития для данного повреждения. При этом дополнительной задачей является оценка возможности диагностики ОЗЗ с малым током в процессе мониторинга КЛ оптоволоконными системами температурного контроля. В частности оценить возможность температурной деструкции встроенного в кабельную линию оптического канала.

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 [2-4].

В рамках используемой модели (рис.2) в анализируемом случае относительно небольшого тока дуги, будем предполагать отсутствие массообмена разрядного канала с окружающей средой, когда разряд существует в закрытой форме

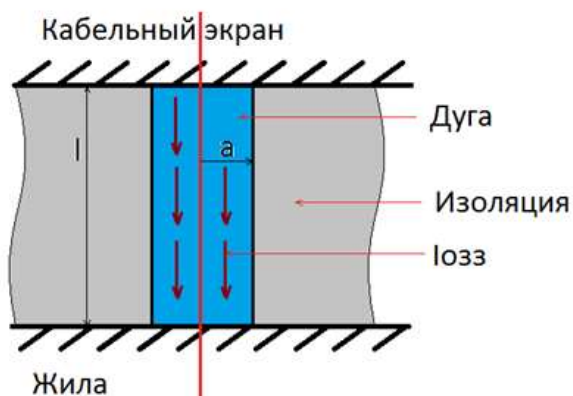


Рис. 2 - К описанию дугового разряда в канале пробоя изоляции

Поэтому давление газоразрядной плазмы P в канале равно давлению насыщенного пара материала стенки – полиэтилена P_w . Последняя оценивается на основе универсального закона Трутона

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

где ΔH – молярная теплота сублимации вещества (сшитого полиэтилена), 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

$$n = C_t \cdot \frac{e^{-\frac{\Delta H}{R_0 T}}}{k \cdot T}$$

Электропроводность плазмы найдем с помощью стандартной формулы

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

где σ_a , σ_i – сечения столкновения электрона с нейтралами и ионами соответственно

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

r_a – табличное значение размера нейтрального атома

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

где

$$b_0 = \frac{e_0^2}{12 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot k \cdot T}$$

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

$$\rho_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 \cdot k \cdot T}{n_e \cdot e_0^2}}$$

e_0 , $n_e = n \cdot (1-x)$ – заряд и концентрация электронов, степень ионизации x рассчитывается по хорошо известной формуле Саха в предположении водородной плазмы, т.к. наибольшую часть атомов, составляющих дуговой газ, образующийся в результате разложения полиэтилена (C_nH_2) представляет из себя водород.

Мощность тепловыделения в канале разряда при протекании тока I_{033} определяется падением напряжения вдоль канала разряда и приэлектродными падениями напряжения ΔU

$$\dot{Q} = \frac{l \cdot I_{033}^2}{\pi \cdot a^2 \cdot \gamma} + 2 \cdot \Delta U \cdot I_{033} \quad (1)$$

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 состояния среды вокруг разрядного канала, можно ожидать и периодическое погасание дуги в канале разряда, что является причиной хорошо известного явления дуговых перенапряжений [5]. При этом мощность тепловыделения, осредненная по относительно длинному промежутку времени (секунды и более), может быть существенно меньше предельного значения, определяемого формулой (1).

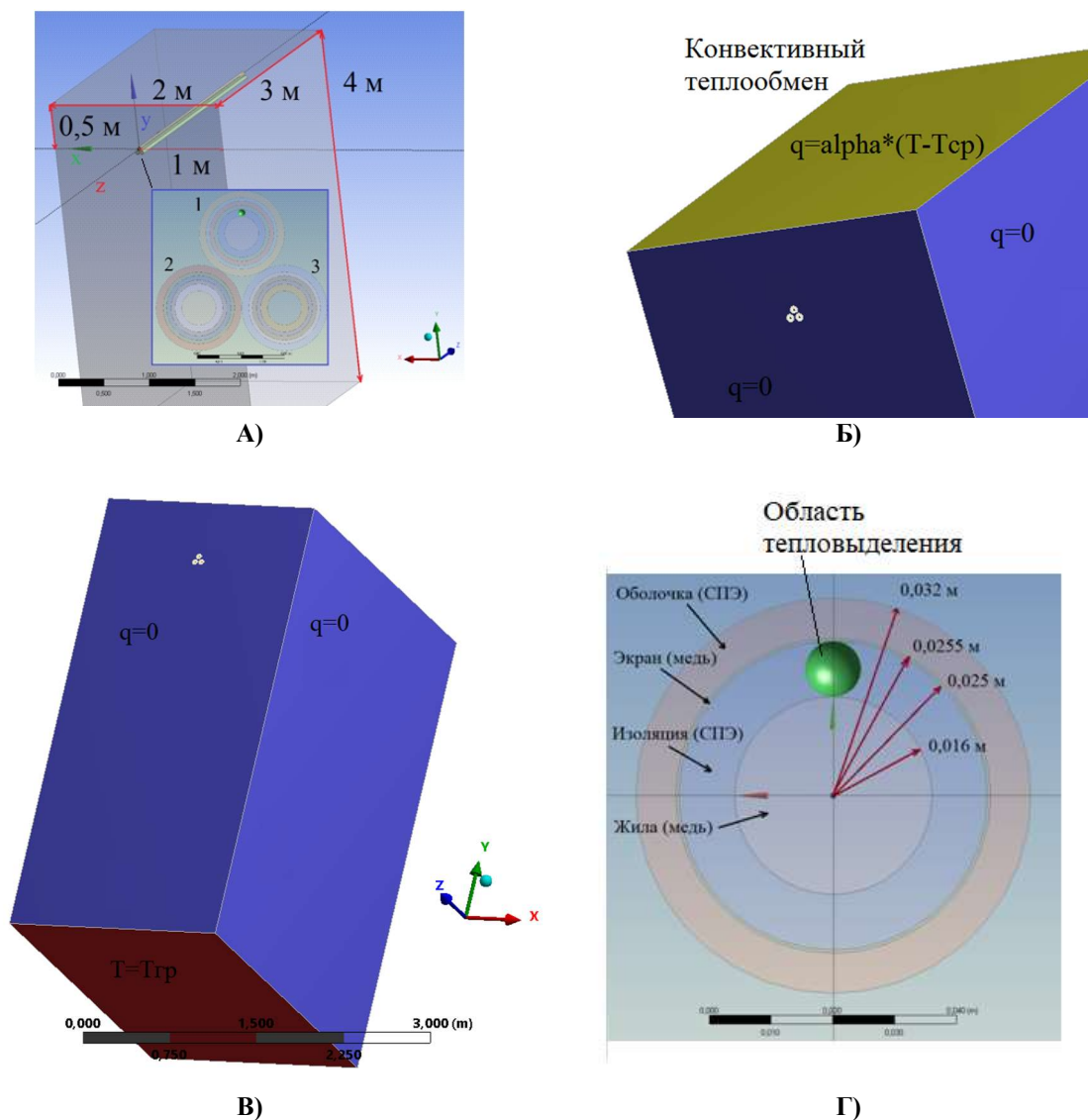


Рис.3 Расчетная область и граничные условия:
 а) Общий вид и размеры расчетной области; б-г) Граничные условия
 1 – Фаза с ОЗЗ; 2, 3 – здоровые фазы.

Первичная оценка образования и скорости распространения зоны повреждения изоляции и проводящих элементов конструкции кабеля, возникающий вблизи канала пробоя, может быть выполнена в результате решения нестационарной задачи теплопроводности. Трудность решения данной проблемы обусловлена главным образом геометрическими особенностями расчетной области – весьма малым по сравнению с характерными размерами конструкции КЛ размером источника тепловыделения (канала 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 применяемого при расчете тепловых режимов кабельных линий. Размер ограниченной расчетной области определялся в численных экспериментах по критерию не более чем 1% изменения решения при увеличении расчетной области по отношению к принятой.

Схематичное изображение расчетной области и граничных условий представлено на рис. 3. где α –коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности грунта, принимаемый равным $5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, температура окружающей среды $T_{\text{окр}} = 22^\circ\text{C}$, а температура грунта $T_{\text{гр.}} = 10^\circ\text{C}$. На прочих границах принимается 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 рассчитанной с помощью (1) зависимость $\dot{Q}(T)$ для канала радиусом 0.1 мм при различных толщинах изоляции и токах разряда показаны на рис. 4.

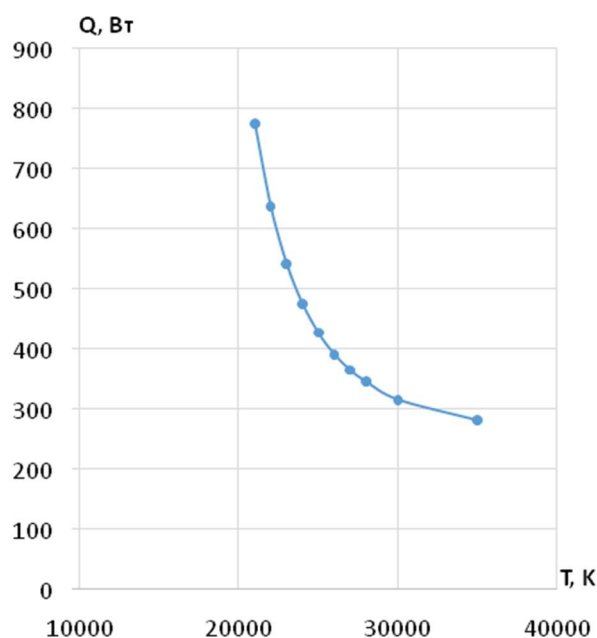


Рис.4а. –Зависимость мощности тепловыделения в дуге в 4 мм слое изоляции при токе 5.8 А от ее температуры в кабеле 10 кВ

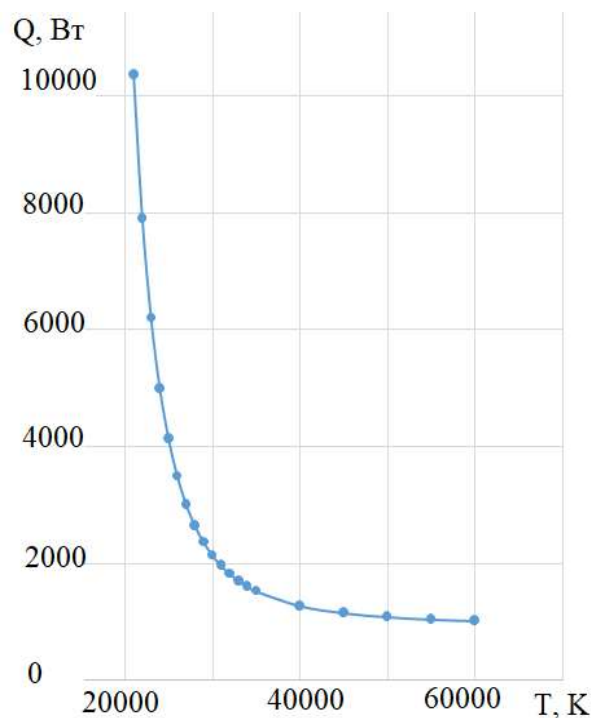


Рис.4б. –Зависимость мощности тепловыделения в дуге в 9 мм слое изоляции при токе 16.4 А от ее температуры в кабеле 35 кВ

Область горения дуги моделируется поверхностью сферы радиусом 0,002 м, к которой приложен тепловой поток, причем радиус выбран как половина толщины изоляции между жилой и экраном кабеля.

Тепловой поток из области дуги находится по формуле:

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

где \dot{Q} находится из (1), $a = 0,1$ мм, $l_k = 4$ мм – радиус и длина плазменного канала дуги, равная толщине изоляции, I_{O33} – ток ОЗЗ, γ – проводимость плазменного канала дуги, $\Delta U = 20$ В – катодное падение напряжения для медного электрода, r_d – радиус сферы, к поверхности которой приложен поток q_d .

Тепловыделения в жилах и экранах фазных кабелей взяты для величин токов в 600 А для кабеля 10 кВ и 900 А для 35 кВ. Данные значения токов были взяты как рабочие значения, при которых температуры в жилах не поднимаются выше 70 °С.

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:

$$I_{O33} = \sqrt{3} \cdot 3 \cdot C_3 \cdot U = 5,8 \text{ А}$$

где C_3 – емкость одного фазного кабеля, $U = 10$ кВ – рабочее напряжение линии. Емкость одной фазы рассматриваемой линии – это емкость системы «жила-экран»,

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

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

Числовые характеристики физических свойств материалов, использованные в тепловом расчете приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры материалов

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

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 кривых 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 [6]. В то же время в описанном режиме ОЗЗ с током не более 10 А, характерным для кабельных линий на напряжение 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.

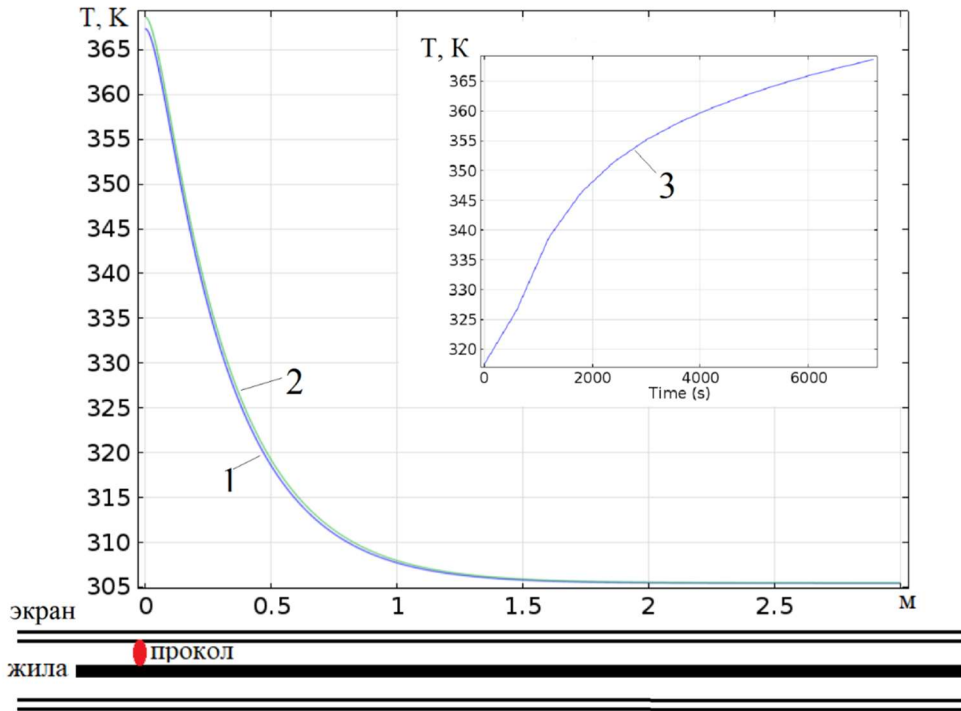


Рис.5 Распределение вдоль внешней поверхности 10 кВ кабеля при $t=6600$ с (1), $t=7200$ с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)

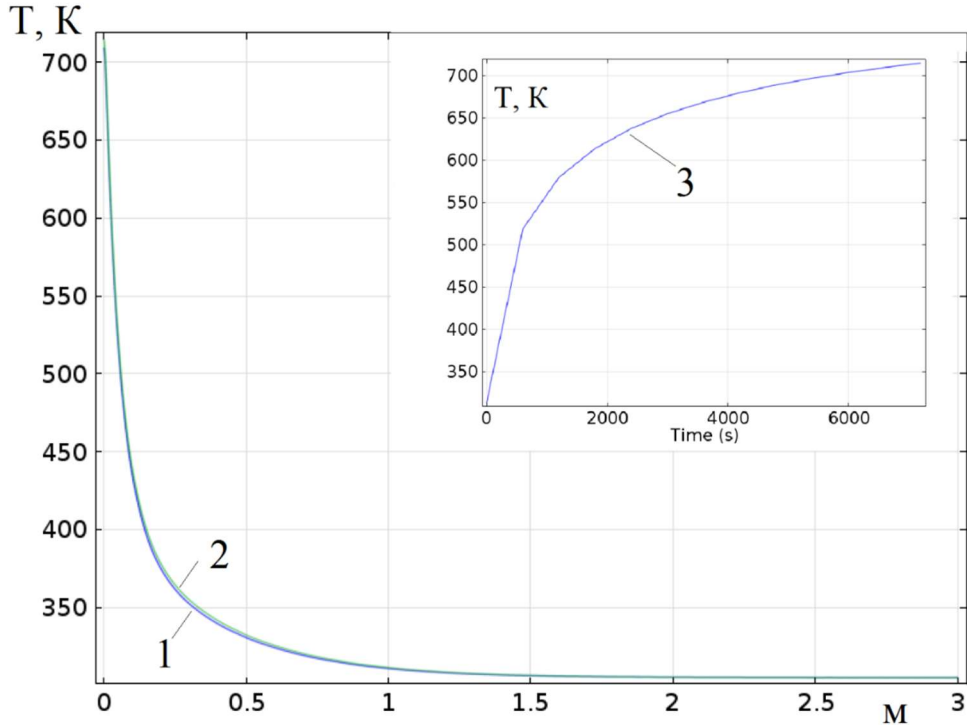


Рис.6 Распределение вдоль внешней поверхности 35 кВ кабеля при $t=6600$ с (1), $t=7200$ с (2); зависимость температуры оболочки над проколом от времени (3)

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

Рассмотрим случай ОЗЗ в кабеле на 35 кВ. Сечение кабеля представлено на рис.3. Для рассматриваемого 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. 4б

Распределения температуры на поверхности внешней изоляции кабельной линии с ОЗЗ вдоль образующей оболочки кабеля и зависимость от времени температуры оболочки кабеля над проколом м приведены на рис. 6. Видно, что область расплавления полимерных компонент конструкции кабеля вблизи прокола составляет величину порядка 7 см. В то же время размер области возмущения температурного поля по длине кабеля, вызванного током ОЗЗ, составляет величину порядка 2 м. Время, предшествующее началу процесса термической деструкции изоляции с момента возникновения дуги прокола, составляет величину порядка 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, выполненные здесь оценки для 35 кВ кабеля. Тем не менее, очевидно, в случае относительно длинных КЛ с большой зарядной мощностью целесообразны меры, например, эффективное заземление нейтрали, ограничивающие ток ОЗЗ величиной 10 А. 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 [1]

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, достаточного для идентификации данного дефекта системами оптоволоконного контроля температуры кабельной линии.
- Следует избегать возможностей появления токов ОЗЗ, превышающих 10-15 А, поскольку в этом случае неизбежно появление области расплава изоляции с пространственным масштабом в несколько десятков сантиметров. При этом возникает вероятность деструкции изоляции «здоровых» фаз и перехода однофазного замыкания в междуфазное.
- Предупреждение аварии междуфазного замыкания достигается при отказе часто применяемого стесненного расположения фаз кабельной линии треугольником.

Литература

1. Кожевников А.Г. Системы электропередачи на базе СПЭ-кабелей - эффективность применения. Новости электротехники, 43(1), 2007, с. 24–29.
2. Лавров Ю. Кабели 6–35 кВ с пластмассовой изоляцией - факторы эксплуатационной надежности. Новости электротехники, 42(6), 2006, с. 32–36.

3. Беляков В.В., А.В. Малышев, Н.В. Кривошеев, В.К. Маршнер. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени. *Электро*, 5, 2008, 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*, 6, 2014, pp. 75–83.
5. Дмитриев М.В. Заземление нейтрали в кабельных сетях 6–35 кВ. *Сети России*, 38(5), 2016, 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., Ю.П. Гусев. Электродуговые процессы при однофазных замыканиях в пофазно-экранированных кабелях. *Наука и образование, МГТУ им. Н.Э. Баумана*, №5, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.7463/0513.0598819>
8. Ларин Ю.Т., Ю.В. Смирнов, М.Л. Гринштейн. Применение системы температурного мониторинга с помощью оптического кабеля для контроля распределения температуры вдоль электрического силового кабеля. *Кабел-нюз*, №8, 2009, с. 48–53.
9. Мокански В. Силовой кабель высокого напряжения с волоконно-оптическим модулем. *Кабели и провода*, №2, 2009, с. 14–17.
10. Удовиченко О.В. Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция Линии электропередачи 2008, Новосибирск, 2008, с. 301–304.
11. Якунин А.В. Мониторинг теплового режима эксплуатации кабельных линий 110–500 кВ. Сборник докладов конференции «Линии электропередачи 2010: Проектирование, строительство, опыт эксплуатации и НТП», 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 Int. Conference on Insulated Power Cables (JiCable'03). Paris, 2003.
13. Адамьян Ю.Э. и др. *Электроэнергетика. Основы высоковольтных электротехнологий*. СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2006, 120 с.
14. Карпова И.М., В.В. Титков. Компьютерные модели электромагнитных технологии Karпова I.M., Titkov V.V. *Kompyuternyye modeli elektromagnitnykh tekhnologiy*. 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*, т.8, 2000, с. 95-109.
16. Халилов Ф.Х., В.Г. Гольдштейн (ред.). Ограничители перенапряжений для защиты изоляции электрооборудования и линий сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения от грозовых и внутренних перенапряжений. Энергоатомиздат, 2010, 263 с.