

ISSN 1998-9903

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

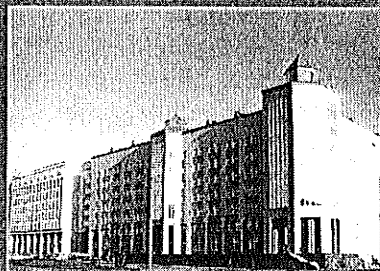
ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

9-10

2012



МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ ОДНОФАЗНОЙ ДУГИ В ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОБОЯ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДУГОВОГО КАНАЛА

А.И. ШИРКОВЕЦ*, Д.Ф. ГУБАЕВ**

*ООО «Болид», г. Новосибирск

**Казанский государственный энергетический университет

В статье представлены основные этапы дугового замыкания на землю в кабельной изоляции и проанализировано изменение нелинейного сопротивления канала пробоя в ходе развития разряда фазы сети на заземленную оболочку (экран). Для бумажно-пропитанной высоковольтной изоляции показан характер изменения сопротивления канала горения дуги, изменяющегося от 100 – 200 кОм до 10^1 – 10^3 Ом. С привлечением результатов аналитических и экспериментальных исследований разработана гипотеза развития дугового пробоя в монолитной полимерной изоляции кабеля, где горячая дуга стабилизирована испаряющимся материалом стенок канала. Графическая интерпретация развития пробоя отражает снижение сопротивления полимерной изоляции от исходных значений 10^{12} – 10^{13} Ом до единиц МОм и рост температуры в дуговом канале с переходом в фазу низкотемпературной плазмы. При введении допущения о постоянстве длины (высоты) дугового столба предложена математическая модель дуги в изоляции кабеля на основе дифференциального уравнения теплового баланса.

Ключевые слова: математическая модель, процесс пробоя, дуговое замыкание на землю, дуговой канал, силовой кабель, бумажно-пропитанная изоляция (БПИ), изоляция из сшитого полиэтилена (СПЭ), нелинейное сопротивление.

Введение

Характер горения дуги при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ), который влияет на уровни перенапряжений и время существования дуги, весьма сложен и зависит от места замыкания, характеристик электрической прочности изоляционного промежутка, чистоты изоляционной среды и наличия дефектов, моментов зажигания дуги и ряда других факторов. В кабеле с бумажно-пропитанной изоляцией дуга горит в замкнутом объеме изоляции и если в какой-то момент времени скорость восстановления её электрической прочности превышает скорость роста напряжения на поврежденном изоляционном промежутке, аварийный режим может самоликвидироваться. Это происходит в основном за счет подтекания кабельного масла и, соответственно, «заплывания» канала пробоя. Необходимым условием при этом является достаточная для «заплывания» канала длительность бестоковой паузы – десятки секунд и более. Отсутствие эффекта «самовосстановления» твердой изоляции из сшитого полиэтилена (СПЭ) и этилен-пропиленовой резины (ЭПР) обуславливает принципиально иной характер предпробойных явлений, а также процессов электрического пробоя и горения дуги.

Достоверных моделей пробоя и горения дуги в изоляции силовых кабелей до настоящего времени не разработано. В рамках решения задачи построения таких моделей следует пояснить недостатки существующих гипотез Петерсена (1916 г.) и

Петерса и Слепяна (1923 г.), которые сегодня используются и при анализе процессов дуговых замыканий на землю в кабельной изоляции.

Во-первых, на уровни перенапряжений и длительность бестоковых пауз существенное влияние оказывают не только первичные параметры контура нулевой последовательности (КНП), но отношение значений активной и реактивной составляющих тока замыкания (параметр I_R/I_C).

Во-вторых, значительное влияние на время между последовательными зажиганиями дуги в кабельной изоляции оказывает степень ее повреждения, которая от пробоя к пробую может существенно изменяться, характеризуя переход перемежающегося дугового замыкания в устойчивую фазу. По мере развития дугового ОЗЗ уровень перенапряжений с высокой вероятностью снижается до некоторого «граничного» уровня, при котором и будут происходить все последующие пробои. Из практики эксплуатации известно, что этот уровень не превышает обычно $(2,4 - 2,6)U_0$, где U_0 - фазное напряжение относительно земли. В процессе развития канала пробоя напряжение пробоя также снижается.

В-третьих, исход каждого последующего пробоя при неустойчивом горении дуги и исход дугового ОЗЗ в кабеле (муфте) в целом определяется целым рядом факторов, каждый из которых, за исключением первичных параметров КНП, является в общем случае случайной величиной. Поэтому модель дуги в идеальной постановке должна отражать вероятностный характер изменения ее ключевых параметров, например тока дуги, восстанавливающегося напряжения на дуге и скорости роста электрической прочности дугового промежутка после погасания дуги.

Ниже предлагается основанная на одном или нескольких параметрах изоляционного промежутка графическая интерпретация модели электрического пробоя и горения дуги ОЗЗ в различных типах изоляции силовых кабелей. Подобные модели относятся к классу интегральных, поскольку в этом случае при моделировании переходного процесса замыкания на землю можно оперировать одним параметром процесса, учитывая нелинейный характер его изменения во времени. К таким параметрам справедливо относят сопротивление дугового столба. При этом целесообразно сопоставлять значения сопротивления дуги (дугового канала) $R_{дуг}$ и сопротивления изоляции $R_{изол}$ на разных этапах пробоя, поскольку формирование канала пробоя сопровождается постепенным снижением $R_{изол}$ и его «переходом» в $R_{дуг}$.

Следует подчеркнуть, что вопрос выбора модели «столба» дуги и определения ее нелинейного сопротивления $R_{дуг}$ в циклах «зажигание-погасание», а также при устойчивом горении при замыкании фазы сети на «землю» пока не решен. Например, предлагается принимать сопротивление дуги постоянным, что противоречит физике процесса ее горения, и равным значению из диапазона $R_{дуг} = 0,5 - 10$ Ом. В частности, полученное в работе [1] на физической модели кабельной сети значение эквивалентного сопротивления дуги лежит в пределах 2,8–6,5 Ом и является обобщенным показателем, плотность распределения которого подчиняется нормальному закону с выборочным математическим ожиданием сопротивления дуги 4,28 Ом и выборочной эмпирической дисперсией 0,8 Ом². Однако сопротивление дуги должно изменяться в процессе развития дугового замыкания.

Оценка сопротивления канала дуги в бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей в процессе развития дугового пробоя

Используя терминологию, используемую в работе [2], отметим, что дуга, горящая в кабельной изоляции, стабилизирована за счет испаряющегося материала стенок канала. Это значит, что до момента гашения происходит охлаждение дуги и изменение ее температурного профиля за счет поступающих в канал горения продуктов

испарения и разложения полимера или частиц целлюлозы и кабельного масла. Как правило, в процессе горения дуги растут испарение и унос вещества со стенок разрядного канала (канал в данном случае – в полимере или пропитанной бумажной изоляции кабеля) и в столб дуги поступают молекулярные комплексы материала канала.

Модель пробоя изоляции и горения дуги, основанную на нелинейном сопротивлении, которое меняется в ходе развития дугового замыкания в БПИ кабеля, представим в графическом виде. В рамках решения этой задачи отобразим на графиках процессы изменения сопротивлений изоляции, а также повторяющего его по форме напряжения пробоя.

Подчеркнем, что в настоящем исследовании сопротивление дуги отождествляется с электрическим сопротивлением канала дугового пробоя. Это допущение правомерно по следующим причинам:

- энергосодержание в канале дуги определяется не столько проводимостью дугового столба, сколько сопротивлением стенок дугового канала и взвешенных в нем частиц выгорающей целлюлозы и испаряющейся пропиточной массы, либо (для СПЭ-кабелей) – полиэтилена;

- мощность, выделяемая в канале пробоя, расходуется на излучение и, большей частью, на прогрев контактирующих с дугой изоляционных стенок и разрушение структуры изоляции;

- для расчетов мощности и энергии, выделяемой в горячей в закрытом канале дуге, следует использовать значения тока дуги и «эквивалентного» сопротивления дугового канала, либо напряжения на дуговом промежутке. Это напряжение, очевидно, приложено не к самому дуговому столбу, а ко всему каналу пробоя.

Оценки энергии дуги, полученные на основе анализа осциллограмм дуговых замыканий в кабеле [3, 4], дают значения в диапазоне 500–2000 Дж. В зависимости от переходного сопротивления в точке замыкания, электрической удаленности замыкания от шин центра питания, напряжение поврежденной фазы может меняться примерно в диапазоне $(0 - 0,2)U_0$. С этим связано вероятное повышение энергосодержания в зоне горения дуги.

Известные данные по сопротивлению изоляции кабелей с БПИ свидетельствуют, что определяющее влияние на $R_{\text{изол}}$ оказывают множество факторов, таких как длительность воздействия, уровень и частота переходных процессов при внутренних перенапряжениях; распределение температурного поля в изоляции; текущий уровень увлажненности и газосодержания; степень разрушения диэлектриков в составе БПИ за счет термоокислительной деструкции и др. Предпробойные процессы всегда соответствуют ослабленной изоляции кабеля, когда ее сопротивление снижено до сотен кОм или, реже, единиц МОм.

Очевидно, сопротивление канала пробоя имеет нелинейную зависимость во времени за счет роста размеров канала и изменения структуры изоляции на его границах. Опираясь на основные закономерности возникновения и развития повреждения в изоляции силового кабеля [5, 6], а также используя результаты собственных исследований [3, 4], выделим основные этапы процесса дугового пробоя в кабельной изоляции на основе пропитанной маслом бумаги.

На первом этапе, который представляет собой самоустраняющиеся неперiodические пробои изоляции («клевики») и может длиться от 1 часа до нескольких суток, что подтверждается экспериментальными исследованиями [2, 3], сопротивление канала пробоя меняется практически скачком: от некоторого значения, соответствующего ослабленной изоляции кабеля (из опыта эксплуатации известно, что

это 100-200 кОм), до значений 1,0-10 Ом, в зависимости от размера канала пробоя и вязкости подтекающего масла. При этом до достижения некоторых «критических» размеров канала пробоя возможно самоустранение ОЗЗ с соответствующим повышением сопротивления места пробоя до 10^4 - 10^5 Ом.

Однако рассматриваемый участок изоляции с самоустранившимся местом пробоя является потенциальным местом будущего неустранимого повреждения, которое рано или поздно приведет к отключению присоединения и необходимости ремонта или замены участка кабельной линии.

На втором этапе, представляющем собой последовательность непрерывных импульсных пробоев, самовосстановление изоляции невозможно: быстрая ионизация канала пробоя и формирование устойчивого пути разряда способствуют разложению подтекающего к месту пробоя масла и образованию газового (преимущественно H_2) «пузыря». За счет повышения давления при образовании газов происходит периодическое гашение дуги. На этом этапе имеет место экспоненциальное снижение сопротивления дуги, условно с 1,0-10 Ом до 10^{-1} - 10^{-3} Ом, что соответствует науглероженному каналу пробоя.

На третьем этапе наблюдается устойчивое горение дуги с током, искаженным высшими гармониками, импульсами и провалами. Форма огибающей тока дуги близка к синусоиде. Сопротивление дуги меняется слабо и фактически определяется высокой проводимостью науглероженного канала пробоя, которая в пределе может составлять 10^3 - 10^4 См. Канал дуги условно можно представить в виде полого металлического проводника круглого сечения с длиной, соответствующей расстоянию «жила-оболочка», и толщиной стенок, равной толщине «выгоревшего» слоя изоляции в радиальном канале горения дуги.

Исходя из изложенного механизма развития процесса дугового замыкания в БПИ силовых кабелей, процесс возникновения пробоя и последующего горения дуги адекватно описывается интегральной моделью на основе нелинейного сопротивления изоляции и загорающейся позднее дуги $R_{дуг}$, $R_{изол}$ (рис. 1). Здесь же приведен повторяющийся его характер изменения напряжения пробоя $U_{пр}$ изоляции.

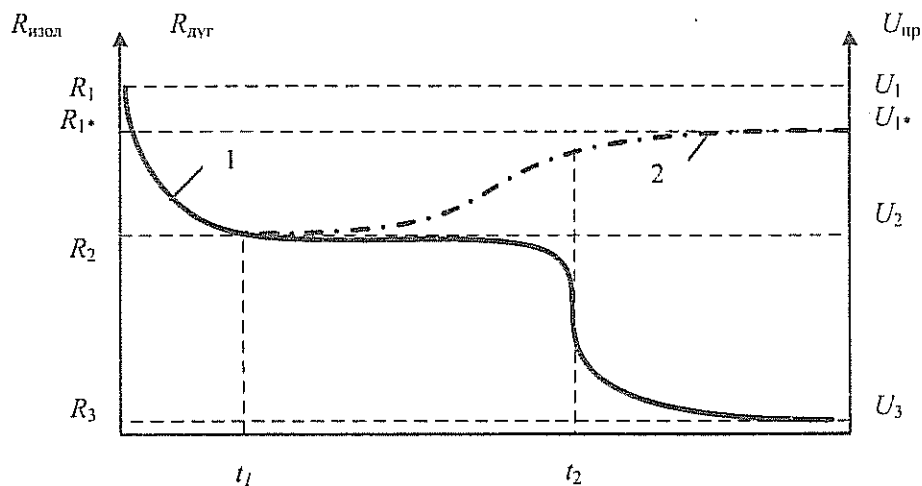


Рис. 1. Качественный характер изменения сопротивления дуги (канала горения дуги) и напряжения пробоя БПИ силового кабеля в процессе развития дугового замыкания на землю: 1 – процесс развития неустранившегося дугового замыкания; 2 – самовосстановление изоляции

Поясним представленные на рис. 1 процессы.

На интервале $(0 - t_1)$, соответствующем возникновению единичных «клевок» на землю (*первый этап*), происходит экспоненциальное снижение сопротивления изоляции (строго говоря, это еще не сопротивление дуги) от $R_1 = 100 \div 200$ кОм до $R_2 = 1,0 \div 10$ Ом. При этом падает и напряжение пробоя от $U_1 = nU_0$ (где $n \gg 1$) до $U_2 = (0,8-0,9)U_0$. Такие значения подтверждены результатами анализа осциллограмм, полученных при пятилетней регистрации переходных процессов в сетях 6-10 кВ. Кроме того, проведенные эксперименты [3] показали, что основная часть пробоев происходит не в максимум напряжения на поврежденной фазе (15% пробоев), а до его прохождения (34% пробоев) либо на спаде полуволны напряжения (51 % пробоев).

На интервале $(t_1 - t_2)$ (*второй этап*) определяется возможность дальнейшего развития процесса замыкания. С подтвержденной экспериментально вероятностью 0,80 – 0,85 происходит «заплывание» канала пробоя подтекающим кабельным маслом и кривая 1 переходит в кривую 2, напряжение пробоя восстанавливается до значений $U_{1*} = (2 - 4)U_0$, а сопротивление $R_{1*} = 10^4 - 10^5$ Ом. Однако с вероятностью 0,15 – 0,2 все же имеет место развитие процесса пробоя с дальнейшим развитием канала. При этом начальный рост напряжения повторных пробоев связан с повышением газовыделения в канале пробоя (переход к кривой 2), а спад – с постепенным расширением этого канала вследствие разрушения изоляции и его науглероживанием (кривая 1 при $t > t_1$).

В момент времени t_2 (*начало третьего этапа*) происходит мощный импульсный пробой с последующим снижением напряжения $U_{пр}$ до значений $U_3 = (0,1 - 0,7)U_0$. Рост количества пробоев ведет к все большему уменьшению $U_{пр}$. Далее, в течение единиц секунд или минут, происходит развитие (расширение) канала горения и переход последовательных импульсных пробоев в режим непрерывного горения дуги, сопротивление дуги при этом достигает минимальных значений $R_3 = 10^{-1} \div 10^{-3}$ Ом.

Количественные значения сопротивления дуги $R_{дуг}$ можно оценить на основе динамической ВАХ дуги, построенной для некоторого интервала времени ее горения. Согласно полученным нами экспериментальным данным [3, 4], $R_{дуг}$ можно принять равным его значению в интервале $10^{-1}-10^{-3}$ Ом, в зависимости от стадии ее горения и «сценария» развития пробоя изоляции (при учёте возможности самоустранения ОЗЗ).

В ряде экспериментов при проведенных нами искусственных дуговых ОЗЗ в действующей электрической сети Кемеровской ТЭЦ были рассмотрены результаты радиального пробоя «секторная жила–заземленная оболочка» (рис. 2). Оценка размеров канала пробоя в данном случае дала следующие результаты: длина канала горения дуги около 3,5 – 4,0 мм (при толщине изоляции жила-оболочка 2,95 мм), диаметр канала – от 2,0 мм в основании у жилы до 3–4 мм в точке выхода дуги. В зависимости от мощности дуги и длительности ее горения размеры возникшего изначально канала пробоя могут значительно увеличиться.

При разложении масла и науглероживании пропитанной бумаги под действием горячей дуги выделяются в основном H_2 , коррозионно-активные CO и CO_2 , а на стенках канала пробоя активно осаждаются сажа, асфальтены и твердый X-воск, что подтвердилось химическим анализом образцов пробитого кабеля.

Аналитическое исследование процесса развития дугового пробоя в полимерной изоляции силовых кабелей

На основании аналитических положений, изложенных в работах [7, 8], с привлечением результатов собственных экспериментальных исследований по созданию искусственных дуговых ОЗЗ в однофазном кабеле с СПЭ-изоляцией, включенном на время эксперимента в действующую сеть напряжением 6 кВ, была предложена

обобщенная модель (гипотеза) развития дугового пробоя в монолитной полимерной изоляции. Исходя из особенностей изоляционного материала - СПЭ или ЭПР [9], в рамках предлагаемой гипотезы выделяются четыре основных этапа дугового пробоя кабельной полимерной изоляции.

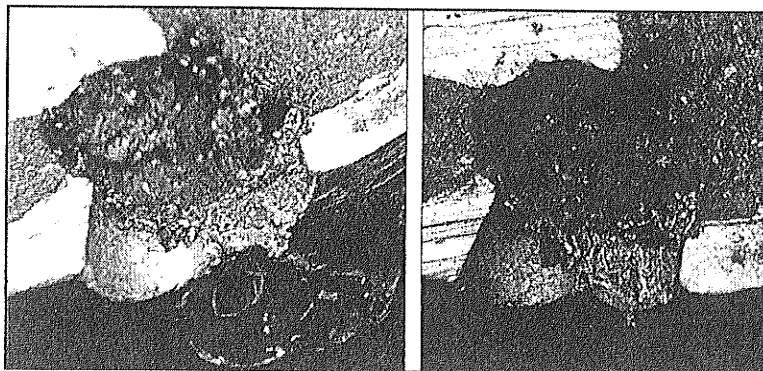


Рис. 2. Результат горения заземляющей дуги в кабеле с вязкой пропиткой (б) в опытах дуговых замыканий в действующей электрической сети 6 кВ

Первый этап пробоя представляет собой комбинацию предпробойных состояний в близко расположенных, но не связанных очагах развития ЧР и характеризуется последовательным объединением внутренних дефектов (побочных каналов электрических трингов) с повышением интенсивности ЧР. Происходит *формирование направления канала* радиального пробоя в среде «токопроводящая жила - металлический экран кабеля». На основе результатов исследований параметров ЧР, характеризующих ухудшенное и предаварийное состояния изоляции кабеля с СПЭ-изоляцией, показано, что уровни кажущегося заряда при этом превышают 10500 пКл, а напряжение возникновения ЧР меньше либо равно U_0 [10]. Нагрев изоляции в точках включений и дефектов пока незначительный и редко превышает 90°C – допустимую рабочую температуру СПЭ и ЭПР.

Длительность протекания 1-го этапа, в зависимости от условий эксплуатации конкретной КЛ (амплитудно-частотных характеристик воздействующих внутренних перенапряжений, степени развития микродефектов и газовых включений в основной изоляции, токов нагрузки), варьируется в очень широком диапазоне – от нескольких лет до единиц часов и минут.

Второй этап развития пробоя в кабельной СПЭ-или ЭПР-изоляции может быть связан с возникновением сети микродуг (скользящих разрядов) по стенкам формирующегося канала пробоя, который представляет собой потенциальный путь разряда в виде центрального расширяющегося канала электрического тринга, в газовой среде которого имеются как продукты ЧР (C_2H_2 , C_2H_4 , H_2), так и, вполне вероятно, взвешенные частицы проводящих углеродных соединений. Этот этап связан с быстрой ионизацией газовой смеси в формирующемся и прорастающем сквозь толщу изоляции канале пробоя, представляющем собой, условно говоря, «микротрубку»-тринг диаметром единицы микрон. Активные фазы роста тринга связаны, в том числе, с воздействием высокочастотных перенапряжений при дуговых замыканиях и коммутациях фидеров с СПЭ-кабелями вакуумными выключателями [11] и характеризуются также постепенным снижением напряжения возникновения ЧР на разных участках канала. По мере протекания этих процессов, за счёт роста механических напряжений в стенках канала пробоя может происходить их растрескивание (СПЭ-термореактивный полимер), что несколько снижает скорость

развития канала пробоя исключительно в радиальном направлении «жила - экран» и приводит к его расширению. Если в канал пробоя – главный канал триинга – по мере его продвижения к противоположному электроду (в зависимости от того, откуда происходит развитие канала пробоя: от жилы или от металлического экрана) включаются водные триинги, влага в них переходит в газообразную фазу, поскольку температура внутри включений достигает 100-120 °С.

Вероятная *длительность второго этапа* развития пробоя СПЭ-и ЭПР-изоляции составляет от единиц минут до нескольких суток или месяцев. При этом повышение длительности развития второго этапа пробоя за счет роста диэлектрических потерь и интенсивных микроударов приводит, вероятно, к локальным перегревам изоляции до температуры 140–160 °С с малозаметным снижением электрической прочности изоляционного промежутка (не более, чем на 5-10%). Следует отметить, что выявить формирующийся канал пробоя можно путем испытаний СПЭ-кабеля повышенным напряжением сверхнизкой частоты либо с помощью измерения и локализации ЧР [12]. Последний метод является более перспективным и активно внедряется в энергосистемах, он позволяет в ряде случаев дать рекомендации по срокам вывода КЛ в ремонт.

На третьем этапе происходит дальнейшее усиление разрядных процессов в главном канале триинга и вероятное объединение близлежащих побочных ветвей в направлении пробоя. В упрощенной постановке канал пробоя можно представить в виде цилиндра с некоторым переменным сечением и высотой, равной толщине изоляции кабеля [13]. В этом цилиндрическом канале разряд развивается по двум механизмам.

Первый механизм, более интенсивный, характеризуется формированием сети поверхностных дуговых (скользящих) разрядов, которые вытягиваются по стенкам развитого цилиндрического канала триинга в высоту по одной или нескольким линиям, в зависимости от степени наибольшего локального разрушения полимера с образованием частично проводящих углеродных соединений. Этот механизм обеспечивает достаточную для начала развития объемного разряда ионизацию в канале. Нагрев СПЭ или ЭПР-изоляции, вызванный скользящими разрядами по стенкам канала, приводит к местному перегреву изоляции и развитию локального теплового пробоя.

Второй механизм обусловлен объемным разрядом в полости цилиндрического канала, заполненного газовой смесью. Для этого механизма справедливы закономерности пробоя газового промежутка с неоднородным полем. Степень неоднородности этого поля зависит от таких факторов, как текущее напряжение возникновения ЧР, равномерность их распределения по объему канала, проводимость и плотность газовой смеси в разных частях канала и т.д. Вполне вероятным в этом процессе является возникновение неустойчивых локальных коронных разрядов с начальным напряжением в диапазоне $(0,1-0,9)U_0$, особенно в непосредственной близости от электродов.

Чем больше коэффициент неоднородности поля, примерно равный отношению радиусов кривизны жилы и экрана кабеля, тем выше пробивное напряжение относительно начального. Это означает, что при условии необратимости полного пробоя изоляции (а это условие в твердой полимерной изоляции всегда выполняется, поскольку в ней не восстанавливается электрическая прочность даже при частичных – не по всей толщине – пробоях) его вероятность существенно повышается при увеличении напряженности поля $E_{пр}$ за счет «внешних» факторов. К таким факторам

можно отнести коммутации КЛ с поврежденной изоляцией вакуумным выключателем, возникновение дуговых ОЗЗ в других точках сети и т.д.

Вероятная длительность третьего этапа – единицы и доли секунд.

Четвертый этап пробоя является завершающим и не обязательно рассматривается отдельно от третьего. За счет возрастающей степени ионизации и резкого роста интенсивности разрядных процессов в канале происходит лавинообразное повышение температуры в течение единиц миллисекунд до нескольких сот $^{\circ}\text{C}$ и, при дальнейшем прогреве границ канала пробоя до $800\text{--}1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в центре канала температура в 2–4 раза выше) – зажигание столба дуги. В процессе горения дуги в канале полимерной изоляции ее температура может достигать $1000\text{--}5000\text{ K}$ [2]. Это низкотемпературная плазма. В то же время, что очевидно, электрическая прочность $E_{\text{пр}}$ поврежденного участка изоляции падает до нуля. Исследования ВНИИ КП подтвердили еще одну интересную особенность пробоя монолитных полимеров в составе кабеля: независимо от того, с какого электрода (жила или экран) происходит развитие главного стримера в канале пробоя, примерно за доли миллисекунд до полного пробоя СПЭ-кабеля с противоположного электрода развивается встречный стример.

Четвертый этап пробоя можно также рассматривать как два последовательных процесса, имеющих разный порядок времени протекания: а) процесс зажигания столба дуги, б) процесс ее горения. Как и всякий тепловой процесс, они обладают некоторой инерционностью, т.е. некоторыми значениями постоянной времени. Надо отметить, что время от зажигания столба дуги в развитом канале пробоя до попытки ее гашения при первом переходе высокочастотного тока через нуль составляет обычно не более 100–200 мкс и слабо зависит от типа изоляции кабеля, что подтверждается результатами осциллографирования токов замыкания на землю.

Общая длительность горения дуги $t_{\text{дуг}}$ в СПЭ- или ЭПР-изоляции определяется не физическими свойствами изоляции, а параметрами макрообъекта – электрической сети, в которой эксплуатируется рассматриваемая КЛ. Из опыта эксплуатации известно, что $t_{\text{дуг}} \leq 1$ мин соответствует времени перехода однофазного замыкания в междуфазное КЗ с его отключением [12]. С другой стороны, если каждое ОЗЗ в конкретной сети подлежит отключению, $t_{\text{дуг}} \leq 0,5 \div 0,6$ с определяется временем срабатывания релейных защит от ОЗЗ (выдержка обычно не более 0,4–0,5 с) и полным временем отключения выключателя поврежденной линии (для современных вакуумных аппаратов – не более 0,1 с). Следует отметить, что выдержки времени срабатывания релейных защит от ОЗЗ как для секций центра питания, так и для прилегающей сети (РП и ТП нижнего уровня) при организации селективной системы защиты от ОЗЗ могут отличаться, как правило, в пределах 0,2 – 2,0 с. При этом длительность горения дуги в кабеле, отождествляемая со временем существования ОЗЗ, соответственно изменяется.

Отметим, что из-за отсутствия эффекта самовосстановления электрической прочности монолитных полимеров любые замыкания в кабелях с СПЭ- или ЭПР-изоляцией целесообразно отключать с минимальной выдержкой времени.

В целом процесс развития пробоя в полимерах является довольно сложным с точки зрения описания физико-химических процессов, происходящих в изоляции, но можно утверждать, что главную роль в нем (по крайней мере, в области силовых кабелей) играет деградация изоляции под воздействием электрических и водных триингов. Этот вопрос частично изложен в отечественных трудах М.Ю. Шувалова и Ю.В. Образцова (ВНИИ КП), С.М. Лебедева (Томский НИИ ВН), В.А. Канискина (СПбГПУ), а также зарубежных исследователей (*L. Dissado, J. Fothergill, J. Bostrom, A. Boggs, V. Bernstein, G. Bahder, G. Montanari* и др.).

Графическая интерпретация модели развития пробоя и процесса горения дуги в полимерной изоляции силовых кабелей

Графически процесс пробоя полимерной кабельной изоляции показан на рис. 3. Характерные кривые изменения во времени электрической прочности изоляции $E_{пр}$ и сопротивления изоляции $R_{изол}$ (синий цвет, ось ординат слева на рис. 3) представляют собой показательные функции, асимптотически приближающиеся к осям абсцисс и ординат. Иной характер носят кривые изменения температуры (красный цвет, ось ординат справа на рис. 3): они отражают близкую к экспоненциальной зависимость нагрева изоляции в процессе развития пробоя.

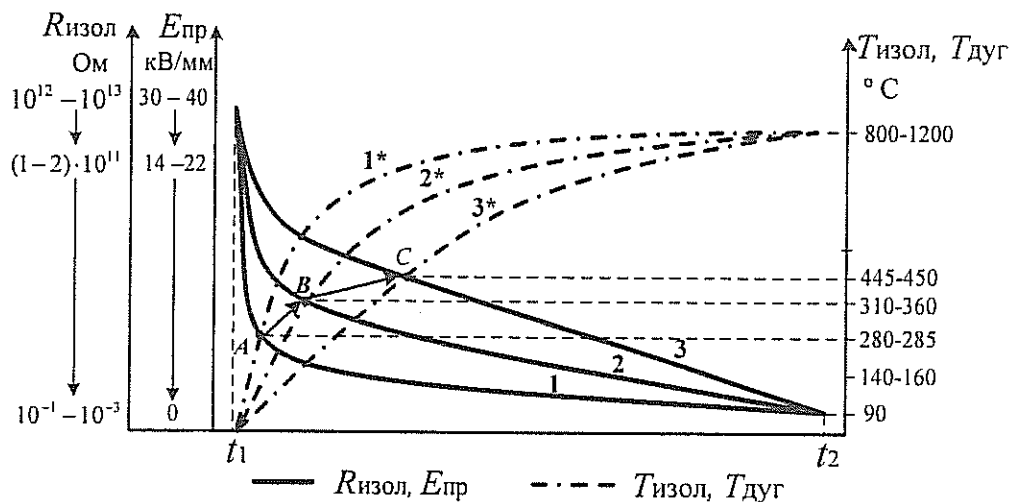


Рис. 3. Качественный характер развития процессов пробоя кабельной СПЭ- и ЭПР-изоляции во времени ($R_{изол}$, $E_{пр}$, $T_{изол}$ и $T_{дуг}$) при различной скорости развития канала пробоя и соответствующем уровне действующего напряжения 50 Гц

Для $R_{изол}$ и $E_{пр}$ на соответствующих осях ординат (слева на рис.3) приведены численные значения, соответствующие основным состояниям СПЭ- и ЭПР-изоляции и не соотношенные с графиками:

– новая неповрежденная изоляции кабеля: $R_{изол} = 10^{12} \div 10^{13}$ Ом, $E_{пр50 Гц} = 30 \div 40$ кВ/мм; исходные значения $R_{изол}$ в пределах 1,0–10 ТОм были получены экспериментально в ходе диагностических обследований кабелей 10 кВ с СПЭ-изоляцией; заданная исходная электрическая прочность $E_{пр}$ кабельной СПЭ- и ЭПР-изоляции соответствует техническим требованиям, предъявляемым к сшиваемым композициям полиэтилена [9];

– ослабленная изоляция кабеля, в которой идет интенсивное развитие предпробойных процессов: $R_{изол} = 10^8 \div 10^9$ Ом, $E_{пр50 Гц} = 14 \div 22$ кВ/мм; данные подтверждены результатами ресурсных испытаний кабелей с оценкой «остаточной» электрической прочности согласно CENELEC HD 620 S1:1996;

– пробитая изоляция кабеля, не способная к самовосстановлению: $R_{изол} \equiv R_{дуг} = 10^{-1} \div 10^{-3}$ Ом, $E_{пр50 Гц} = 0$.

Для наглядности в той же временной области приведены графики роста температуры изоляции $T_{изол}$ до пробоя примерно при 480 °С с переходом к температуре дугового столба низкотемпературной плазмы ($T_{дуг} \cong 3000 \div 4000$ °С по центральной оси). Приведенные значения температур, соответствующие различной степени повреждения изоляции в диапазоне 90–480 °С, были получены в ходе проведенных

нами лабораторных испытаний разрушения образцов СПЭ-изоляции в малообъемных термических печах.

Подчеркнем, что кривые на рис. 3, представленные относительно различных осей ординат (красные и синие), *не следует* соотносить между собой: например, рост температуры вовсе не означает, что напряжение пробоя при этом увеличивается, и наоборот.

На основе экспериментальных исследований, результаты которых изложены в IEEE 400-2001 [14], можно сопоставить приведенные кривые изменения $R_{\text{изол}}$, $E_{\text{пр}}$ и $T_{\text{изол}}$ ($T_{\text{дуг}}$) со скоростью развития каналов пробоя $V_{\text{пр}}$ полимерной СПЭ- и ЭПР-изоляции при известных кратностях напряжения U_0 промышленной частоты K_U .

Именно для того, чтобы указать на жесткую зависимость изменения рассматриваемых параметров процесса от $V_{\text{пр}}$, представлены кривые с различным уровнем «изгиба». Графики 1 и 1* соответствуют $V_{\text{пр}} = 175 \div 611$ мм/ч при $K_U = 4U_0$; 2 и 2* – $V_{\text{пр}} = 2,2 \div 5,9$ мм/ч при $K_U = 3U_0$; 3 и 3* – $V_{\text{пр}} = 1,7 \div 2,4$ мм/ч при $K_U = 2U_0$. Поэтому интервал времени t_1-t_2 для различных кривых, представленных на рис.3, существенно отличается и определяется толщиной изоляции кабеля.

При воздействии высокочастотных перенапряжений уровнем $(2-4)U_0$ скорость развития канала пробоя будет увеличиваться, что косвенно подтверждается в работе [15]. Поэтому возможен переход «рабочей точки» с одной кривой на другую, как показано на рис. 3 (A → B → C). Например, по заключениям испытательного центра КЕМА (Нидерланды), повышение частоты приложенного напряжения от 50 до 500 Гц приводит к ускорению степени разрушения изоляции примерно в 6 – 8 раз. С некоторыми допущениями (линейная аппроксимация тренда по «коэффициенту ускорения» деградации изоляции некорректна) можно распространить приведенный вывод и на более высокие частоты воздействующего напряжения, характерные для переходных процессов при дуговых замыканиях на землю (условно от 500 Гц до 50 кГц) и коммутациях вакуумных выключателей (условно от 100 кГц до 10 МГц). Следует ожидать, что при воздействии перенапряжений с такими частотами «коэффициент ускорения» деградации СПЭ-изоляции возрастет не менее чем до 10 – 12 (относительно скорости роста электрических трингов при воздействии напряжения промышленной частоты). Анализ зарубежных публикаций, в частности [16], также свидетельствует о принципиальном снижении времени выдержки кабеля с твердой полимерной изоляцией до пробоя при повышении частоты приложенного напряжения.

Средняя напряженность поля в СПЭ-кабеле, которая (при рассмотрении в поперечном сечении) экспоненциально снижается от максимума на жиле к некоторому малому значению на экране, составляет для кабелей 6-10 кВ всего 2-3 кВ/мм [17]. Локальная напряженность поля, провоцирующего прорастание электрических трингов, может на один-два порядка превышать среднюю напряженность поля в СПЭ-изоляции, достигая нескольких сот кВ/мм [11]. Воздействие высокочастотных импульсов напряжения с такими градиентами поля, бесспорно, приводит к изменению структуры СПЭ за счет критического роста механических напряжений и возникновению внутри изоляции новых микрополостей – точек локализации ЧР. Однако скорость развития трингов в нормальном режиме эксплуатации кабеля все же должна быть существенно меньше приведенных выше значений в единицы мм/ч, соответствующих испытаниям повышенным напряжением 0,1 Гц.

Наши экспериментальные исследования также подтверждают тезис о негативном влиянии на СПЭ- и ЭПР-изоляцию высших гармоник и высокочастотных перенапряжений.

На рис. 4 показана фотография канала пробоя в СПЭ-изоляции для кабеля, находившегося в эксплуатации не более 1,5 лет в сети с частотно-регулируемым электроприводом и частыми коммутациями вакуумным выключателем. В ходе лабораторных испытаний повышенным напряжением выяснилось, что $E_{пр}$ изоляции кабеля с момента ввода в эксплуатацию снизилась, относительно исходной, в 2,0-2,8 раза (данные для разных участков кабеля).

Измерение геометрических параметров канала пробоя СПЭ-изоляции в приведенном случае (рис. 4) показало, что диаметр канала в данном опыте варьировался от 0,5–1,0 мм до 2–3 мм, пробой развивался в строго радиальном направлении. Химический анализ продуктов, осажженных на стенках канала пробоя СПЭ-изоляции в процессе кратковременного горения возникшей дуги, показал: в образовавшихся при разряде газах присутствовали органические углеводородные соединения (оранжево-красный выхлоп пламени), а также CO_2 и водные пары; на стенках канала разряда сформировался неоднородный слой воскоподобного вещества, смешанного с сажей.

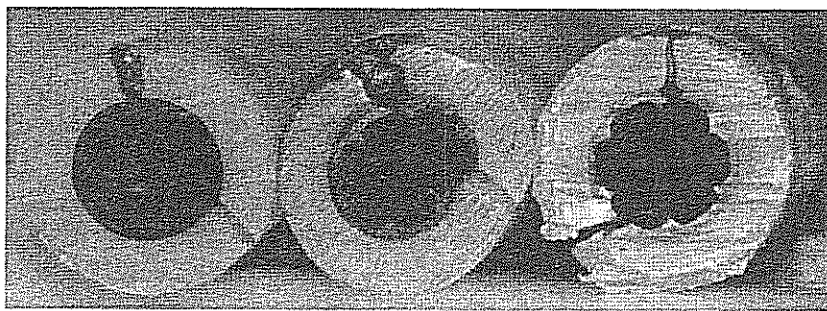


Рис. 4. Радиальные пробои образца кабеля напряжением 10 кВ с СПЭ-изоляцией при кратковременном (до 1 минуты) приложении испытательного напряжения 35 – 50 кВ частотой 50 Гц

Математическая модель дуги при однофазном пробое кабельной изоляции

Следует подчеркнуть, что при построении модели дуги в кабеле обоснованным является использование уравнения теплового баланса для канала дуги и экспоненциальной зависимости удельной проводимости дуги от удельного теплосодержания в ее канале. Основываясь на общей форме такого уравнения, предложенного в работе [18], введем допущения, позволяющие адаптировать его для случая постоянства длины дуги ($l=const$). При рассмотрении горения дуги в изоляции силового кабеля, с учетом изложенных ниже положений, это представляется вполне корректным.

Во-первых, наибольшая возможная длина дуги l при ее преимущественном развитии в радиальном направлении полагается равной либо толщине основной изоляции кабеля (кратчайшему расстоянию между электродами жила-оболочка), которая заведомо известна, либо превышает ее в несколько раз. Длина дуги в полимерной изоляции кабеля однофазного исполнения с СПЭ или ЭПР-изоляцией практически всегда соответствует толщине изоляции, равной, например, 3,0–4,0 мм для кабелей 6-10 кВ; 5,5 мм для кабелей 20 кВ; 8,5–9,0 мм для кабелей 35 кВ. В кабелях же с БПИ длина дуги может примерно в 3–5 раз превышать толщину изоляции «жила-оболочка» и достигать (в зависимости от номинального напряжения кабеля) значений 15–40 мм и более. Это объясняется тем, что пробой комбинированной бумажно-масляной изоляции происходит по некоторой криволинейной траектории.

выстраивающейся за счет объединения точек ЧР по масляным прослойкам и деструктурированным участкам целлюлозы.

Во-вторых, горение дуги, вплоть до момента устранения дугового замыкания с отключением поврежденного элемента сети, происходит, как правило, в закрытом объеме, что неизбежно приводит к расширению канала и появлению ударных давлений в зоне локально ослабленной оболочки кабеля.

С учетом принятых допущений модель дуги, стабилизированной за счет испаряющегося материала стенок канала, с изменяющимся поперечным сечением S при неизменной длине $l=const$, можно описать уравнением

$$\frac{1}{g} \frac{dg}{dt} = \frac{P_0}{Q_0} \frac{\sqrt{4\pi}}{\sqrt{S}} \left(\frac{UI}{P_0 l \sqrt{4\pi S}} - 1 \right) + \frac{1}{S} \frac{dS}{dt} \left(1 - \ln \frac{gl}{\sigma_0 S} \right), \quad (1)$$

где g – проводимость канала пробоя; U – напряжение на изоляционном промежутке; I – ток дуги. При известных законах изменения сопротивления $R_{дуг}$ и напряжения пробоя $U_{пр}$ на разных этапах развития замыкания, можно, например, получить набор решений для тока дуги.

Отметим, что уравнение (1) содержит три неизвестных параметра. Это P_0 – теплоотвод от единицы поверхности дуги за счет осевой конвекции и прямой теплопередачи, Вт/м²; Q_0 – количество тепла, при выносе которого из единицы объема столба (или подводе к столбу) удельная проводимость дуги изменяется в $e = 2,7$ раза, Дж/м³; коэффициент σ_0 , имеющий размерность погонной проводимости, См/м.

Параметры P_0 , Q_0 , σ_0 модели дуги (1) с изменяющимся поперечным сечением можно определить с привлечением характерных осциллограмм тока дуги и напряжения на поврежденной фазе при ее горении, полученным при экспериментальных исследованиях горения дуги в кабельной сети. Зависимость $S(t)$ удобно задать аналитически, исходя из положений, изложенных выше при обосновании параметров дугового замыкания в изоляции кабеля и построении интегральных моделей пробоя. В общем виде изменение сечения канал пробоя во времени можно выразить законом

$$S(t) = A \cdot e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа изоляции и степени ее деградации к моменту пробоя (определяется с учетом результатов диагностических обследований); τ – постоянная времени горения дуги, которая определяется по результатам анализа реальных осциллограмм дуговых замыканий в кабельных сетях и не превышает обычно единиц миллисекунд. Задача несколько облегчается тем, что предельные линейные размеры каналов дугового пробоя кабельной изоляции известны. Следует отметить, что функцию $S(t)$ можно задавать на основании изменения температуры дугового столба, решая соответствующее дифференциальное уравнение.

В рамках развития математических моделей дугового замыкания в кабельной изоляции задача получения адекватных результатов расчета и сопоставления их с экспериментальными данными требует дальнейшего решения.

Выводы

1. Показано, что для построения достоверных моделей пробоя и горения дуги в изоляции силовых кабелей основных положений «классических» и используемых до настоящего времени теорий развития дугового замыкания на землю недостаточно. Анализ процесса дугового замыкания на расчетной модели можно проводить на основе ряда параметров изоляционного промежутка, в частности его нелинейного сопротивления. Последнее, с некоторыми допущениями, отождествляется с сопротивлением дугового канала.

2. Произведена оценка сопротивления канала дуги в бумажно-пропитанной изоляции силовых кабелей в процессе развития дугового пробоя, выделены основные этапы этого процесса. На основе экспериментальных и расчетных исследований [2 – 6] проанализирован характер изменения сопротивления канала горения дуги и напряжения пробоя БПИ силового кабеля при возникновении и развитии замыкания на землю.

3. С привлечением некоторых закономерностей трингообразования, в частности, для используемых при производстве кабелей полимерных диэлектриков предложена гипотеза развития дугового пробоя в монолитной СПЭ- и ЭПР-изоляции силовых кабелей, содержащая ряд последовательных стадий формирования канала пробоя.

4. Представлена графическая интерпретация модели развития пробоя и процесса горения дуги в полимерной изоляции силовых кабелей. На основе анализа зарубежной нормативной документации и аналитических исследований показана связь параметров дугового пробоя со скоростью роста канала пробоя, которая зависит как от физических свойств изоляции, так и от частотных характеристик внутренних перенапряжений в сети.

5. В рамках развития моделей горения заземляющей дуги в закрытом объеме кабельной изоляции предложено дифференциальное уравнение теплового баланса. Решение этого уравнения для дугового столба переменного сечения и постоянной длины предполагается выполнять с использованием зарегистрированных в действующей электрической сети осциллограмм тока дуги и напряжения на поврежденной фазе при замыканиях на землю.

Summary

The paper presents main stages of arcing ground fault in cable insulation. The change of nonlinear resistance for the breakdown channel during the process of single phase discharging into a grounded cable sheath (i.e. cable screen) is analyzed. For mass-impregnated paper insulation, the character of arcing channel resistance changing in the range from 100-200 k Ω to $10^1 - 10^3 \Omega$ is shown. With the involvement of analytical and experimental studies results the hypothesis of arc breakdown in a monolith-polymer cable insulation (where burning arc are stabilized by the evaporating material of channel walls) was developed. Graphical interpretation of the breakdown development represents a decrease of polymer insulation resistance from $10^{12} - 10^{13} \Omega$ to several m Ω and an increase of temperature in the arcing channel with further transition into the phase of low-temperature plasma. With the assumption of a constant length (height) of the arc column the mathematical model of arcing in cable insulation based on the differential equation of thermal balance is proposed.

Keywords: mathematical model, breakdown process, arcing ground fault, arc channel, power cable, mass-impregnated paper insulation, cross-linked polyethylene (XLPE) insulation, nonlinear resistance.

Литература

1. Солдатов В.Ф., Кобазев В.П., Чупайленко А.А. Оценка сопротивления дуги при однофазном замыкании на землю// Электрические станции. 1996. №8. С. 47-48.
2. Niemeyer L. Evaporation Dominated High Current Arcs in Narrow Channels // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. 1978, Vol. PAS-97, Iss.3, pp. 950-958.
3. Сарин Л.И., Ильиных М.В., Ширковец А.И. и др. Анализ результатов мониторинга процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ с дугогасящими реакторами и резисторами в нейтрали// Энергоэксперт. 2008. № 1. С.56-64.

4. A. Shirkovets, A. Vasilyeva, A. Telegin, L. Sarin. Transient Processes at Single Phase-to-Ground Faults in Companioned Grounded Networks.// PQ2012 8th International Conference. 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability (June 16-18, 2012 Tartu, Estonia). Conference Proceedings. – pp. 215-221. [Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали].
5. Hiroyasu Ohnishi, Humihiro Uraho, Seiki Hasergana, Tadachi Morita, Masatoshi Nakajima. Measurement of arc resistance and dielectric breakdown voltage at intermittent grounding of 6.6 kV distribution CVT cable //IEEE Trans. on Power Delivery, vol.3, No.1, January 1988.
6. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М.: Энергия, 1971. 152 с.
7. Блайт Э.Р., Блур Д. Электрические свойства полимеров. Пер. с англ. М.: Физматлит, 2008. – 376 с. [Tony Blythe, David Bloor. Electrical Properties of Polymers. Second Edition. Cambridge Univ.Press. 2005].
8. Ушаков В.Я. Электрическое старение и ресурс монолитной полимерной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1988. 152 с.
9. Кабели и провода. Основы кабельной техники/ А.И. Балашов, М.А. Босв, А.С. Воронцов и др. / под ред. И.Б. Пешкова. М.: Энергоатомиздат, 2009. – 470 с.
10. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования/ В.П. Вдовико. Новосибирск: Наука, 2007. 155 с.
11. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: монография/ К.П. Каломская, Ю.А. Лавров, О.И. Лаптев. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2008. 343 с.
12. Ширковец А.И. Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена // Энергетик. 2011. №10. С. 32-36.
13. Jiang G., J. Kuang, and S.A. Boggs. Tree Channel Formation in Solid Dielectrics – Low Variance Observations and Mechanism of Formation. / Annual Report of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 1999. – pp. 609-612.
14. IEEE 400-2001: 2004 Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems/ Руководство по полевым испытаниям и измерениям экранированных силовых кабельных систем.
15. G. Chen, C.H. Tham. Electrical Treeing Characteristics in XLPE Power Cable Insulation in Frequency Range between 20 and 500 Hz.// IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16 No. 1; February 2009. – pp.179-188.
16. Bahder, G.; Garrity, T.; Sosnowski, M.; Eaton, R. and Katz, C. Physical Model of Electric Aging and Breakdown of Extruded Polymeric Insulated Power Cables.// IEEE Trans. on PAS. – 1982. - Vol. 101. – pp. 1378-1388.
17. Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю. и др. Кабели на напряжение 10-500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования)// Кабели и провода. 2008. №5. С. 32-38.
18. Воронин А.А. Повышение эффективности контактно-дугогасительных систем сильноточных коммутационных аппаратов с удлиняющейся дугой: автореф. дис. ...канд. техн. наук. 05.09.01 / А.А. Воронин; Самарский гос. техн. ун-т. Самара, 2009. 19 с.

Поступила в редакцию

11 октября 2012 г.

Ширковец Андрей Игоревич – ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «Болид», г. Новосибирск. Тел.: 8 (383) 246-10-03; 8 (913) 4587880. E-mail: nio_bolid@ngs.ru.

Губаев Дамир Фатыхович – канд. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8 (843) 519-42-42, 8 (843) 519-42-41.