

*А. Г. ГУРИН*, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
*Ю. Г. ГОНТАРЬ*, асп. НТУ «ХПИ»

### **РАЗРУШЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДИЭЛЕКТРИКА В КОНЦЕВЫХ КАБЕЛЬНЫХ МУФТАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

Рассмотрены вопросы разрушения поверхностного слоя полимерного диэлектрика кабеля в концевых муфтах под действием полного и срезанного импульсов грозового перенапряжения. Показано влияние ОПН на расширение спектра высокочастотных составляющих в импульсах перенапряжения, что может привести к проявлению «эффекта Воробьевых», когда вольт-секундные характеристики поверхностного и объемного пробоя сравнимы и вероятность перекрытия изоляции сравнима с вероятностью пробоя. Этот процесс ускоряет развитие водных трингов и растрескивание поверхностного слоя изоляции.

**Ключевые слова:** полимерная изоляция, концевая муфта, грозовые перенапряжения.

При эксплуатации кабельных линий нередко возникают электрические пробой кабельных муфт. Одной из вероятных причин пробоя является воздействие грозовых перенапряжений на наиболее уязвимые места линий – концевые муфты в местах среза металлических оболочек кабелей. Кроме того, при монтаже муфты производится разводка трех жил кабеля, что приводит к смятию изоляции, снижению толщины изоляции жил по отношению толщине изоляции между жилой и экраном. Это приводит к усилению электрического поля между жилой кабеля и выступающими кромками оболочки. В этих местах напряженность поля превышает допустимый уровень ударной ионизации изоляционного материала, что ведет к разрушению как поясной, так и фазной изоляции.

В [1, 2] описаны способы снижения напряженности поля на этих участках разделки кабеля.

В известных способах соединения электрических кабелей с рабочим напряжением от 1 кВ применяются различные методы понижения напряженности электрического поля в указанной области.

Широко применяется метод защиты от пробоя поясной изоляции и изоляции жил, при котором срезу оболочки каждого кабеля придать форму раструба, делая надрез оболочки в месте предполагаемого среза и обрывая ее по надрезу, при этом кромка оболочки отодвигается от жил кабеля. Однако данный метод не дает надежного результата, возникают новые неровности и заусеницы. Такой способ трудоемок,

© А. Г. Гуриц, Ю. Г. Гонтарь, 2013

требует применения специфического инструмента. Кроме того, при такой обработке существует большая вероятность повреждения поясной изоляции и изоляции жил инструментом.

Известен способ защиты от пробоя посредством муфты марки Scotchcast. При данном способе соединения кабеля зачищаются от поясной изоляции, полупроводящей бумаги, оболочки, брони и джутового покрова, на зачищенный участок поясной изоляции кабелей наматывается лента Scotch 23 с высокой диэлектрической прочностью и высоким удельным сопротивлением, поверх нее с заходом на оболочку намотана герметизирующая мастика Elastoseal, поверх мастики наматывается лента Scotch 23 с толщиной подмотки 4 мм.

На рис. 1, *а* показан механизм образования повышенной напряженности поля в собранной муфте, продольный разрез. Для упрощения штриховка изоляции не показана. Жила 1 в процессе разделки кабеля и монтажа муфты изогнута, изоляция 2 жилы продавлена оболочкой 3 и полупроводящей бумагой 4, скопление заряда на кромке оболочки образует повышенную напряженность поля, что показано распределением силовых линий 5. Проводящая поверхность 6 является корпусом муфты либо ее экранирующим элементом.

На рис. 1, *б* показано распределение силовых линий поля в корешке кабеля в смонтированной муфте Scotchcast, ее продольный разрез. Жилы кабеля 1 поверх фазной изоляции 2 стянуты плотной намоткой изолирующей ленты 3, поверх которой намотаны мастика Elastoseal 4 и второй слой изолирующей ленты 5. Полупроводящая бумага 6 оборвана по краю оболочки 7. Проводящая поверхность 8 является экраном муфты. Для упрощения чертежа штриховка изоляции и лент не показана. Между полупроводящей бумагой и жилой поле однородно, на срезе оболочки полупроводящей бумаги наблюдается увеличение плотности силовых линий.

Основным недостатком такого способа является отсутствие механизмов выравнивания эквипотенциальных полей, т.е. снижения напряженности поля. Кроме того, мастика Elastoseal имеет большую текучесть, что затрудняет ее намотку, а выдержать толщину намотки второго слоя ленты Scotch 23 в 4 мм не представляется возможным.

Известен способ защиты от пробоя муфты посредством регулирования распределения силовых линий поля, использованный в муфте марки Raychem типа GUSJ12 производства Tyco Electronics, при котором кабели зачищаются от джута, брони, оболочки и полупроводящей бумаги, причем полупроводящая бумага обрывается по ниточному бандажу на расстоянии 5 мм от среза оболочки, корешок кабеля обматывается лентой с высокой диэлектрической проницаемостью.

Корешок кабеля в смонтированной муфте показан на рис. 1, в, где 1 – жила, 2 – фазная изоляция, 3 – полупроводящая бумага, 4 – оболочка, 5 – экран, 6 – лента. Для упрощения штриховка диэлектриков не показана. Как видно из чертежа, поле 7 имеет высокую неоднородность.

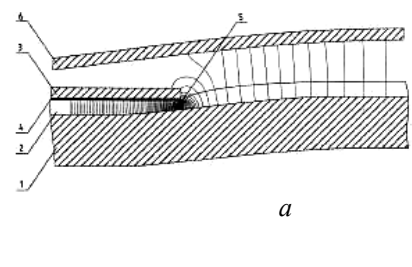
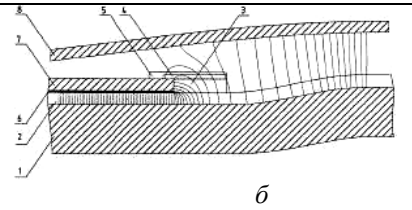
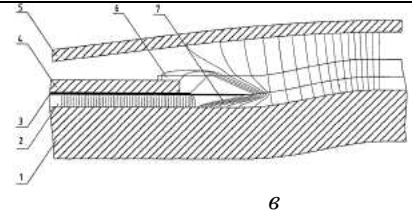
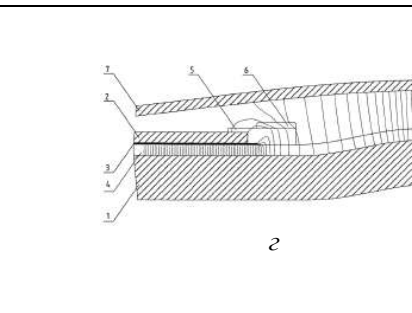
 <p style="text-align: center;">а</p>	<p>1 – жила; 2 – фазная изоляция; 3 – оболочка; 4 – полупроводящая бумага; 5 – распределение силовых линий; 6 – проводящая поверхность (корпус муфты либо ее экранирующий элемент).</p>
 <p style="text-align: center;">б</p>	<p>1 – жила кабеля; 2 – фазная изоляция; 3, 5 – изолирующая лента; 4 – мастика Elastoseal; 6 – полупроводящая бумага; 7 – оболочка; 8 – проводящая поверхность (экран муфты).</p>
 <p style="text-align: center;">в</p>	<p>1 – жила; 2 – фазная изоляция; 3 – полупроводящая бумага; 4 – оболочка; 5 – экран; 6 – лента; 7 – силовые линии поля.</p>
 <p style="text-align: center;">г</p>	<p>1 – жила кабеля; 2 – оболочка; 3 – полупроводящая бумага; 4 – фазная изоляция; 5 – лента с высоким сопротивлением и высокой диэлектрической прочностью с заходом на оболочку на 10 мм; 6 – виток ленты с высокой электрической прочностью; 7 – проводящая поверхность (корпус муфты либо ее экранирующий элемент).</p>

Рис. 1 – Распределение силовых линий поля в зоне разделки кабеля концевой муфты

Недостатком данного способа является большой расход дорогостоящей ленты при высокой результирующей неоднородности поля. Кроме того, показанное на рисунке расположение ленты является

схематическим, не достижимым на практике, практически же намотать ленту с таким прилеганием к полупроводящей бумаге невозможно, в результате форма силовых линий между жилой и кромкой полупроводящей бумаги аналогична показанной на рис. 1, б и, таким образом, применение ленты не дает положительного результата.

На рис. 1, г показан корешок силового кабеля, соединенного посредством муфты, дан продольный разрез. Жилы кабеля 1 зачищены от оболочки 2 и полупроводящей бумаги 3, полупроводящая бумага выступает за край оболочки на 3 мм, жилы поверх фазной изоляции 4 обмотаны лентой 5 с высоким сопротивлением и высокой диэлектрической прочностью с заходом на оболочку на 10 мм, на край подмотки наложен виток ленты 6 с высокой диэлектрической постоянной.

Проводящая поверхность 7 является корпусом муфты либо ее экранирующим элементом. Изгиб жилы начинается дальше среза оболочки, т.к. жилы зафиксированы между собой плотной намоткой изолирующей ленты. Наибольшая напряженность поля создается в непосредственной близости от края полупроводящей бумаги, однако наличие диэлектрика с диэлектрической постоянной, превышающей проницаемость материала изоляции жил и заливаемого в муфту компаунда снижает ее ниже уровня, при котором происходит пробой диэлектрических компонентов муфты. Силовые линии электрического поля распределены следующим образом: между полупроводящей бумагой и жилой поле однородно, вокруг намотки ленты с высокой диэлектрической постоянной силовые линии поля искривлены таким образом, что в месте обрыва бумаги создано снижение напряженности. Данный эффект обусловлен преломлением силовых линий на границе раздела диэлектриков.

Особенности конструкции, монтажа и эксплуатации кабельных муфт для кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ рассмотрены в [3].

Рассмотрение различных вариантов разделки кабеля в концевой муфте не позволяет полностью решить задачу выравнивания напряженности электрического поля. Слой изоляции между краем разделки экрана и жилой кабеля остается одним из напряженных мест с точки зрения вероятности развития водных дендритов и пробоя кабеля. Воздействие на этот узел кабельной линии грозовых перенапряжений и особенно их высокочастотных составляющих ускоряет этот процесс.

**Форма и спектральный состав воздействующих грозовых перенапряжений на внутреннюю изоляцию кабельной разделки концевой муфты**

На рис. 2 приведена форма стандартного импульса грозового перенапряжения.

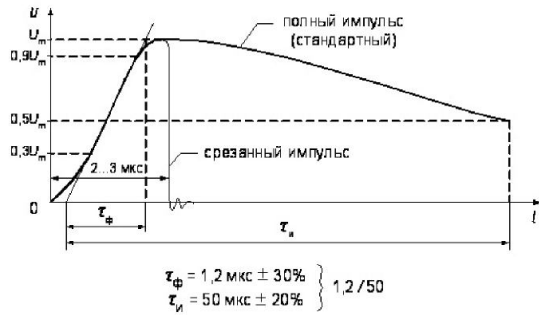


Рис. 2 – Форма полного и срезанного импульса грозового перенапряжения

Определение частотного спектра полного импульса грозового перенапряжения приведена в [4], где комплексная функция частоты (амплитуда импульса)  $F(\omega)$  представлена в виде

$$F(\omega) = a(\omega) + jb(\omega) \quad (1)$$

Выражения  $a(\omega)$  и  $b(\omega)$  определяется формулами:

$$a(\omega) = \frac{U_{\tau_1}}{1 + (\omega\tau_1)^2} \left[ 1 + e^{-T_c/\tau_1} (\omega\tau_1 \sin \omega T_c - \cos \omega T_c) \right] - \frac{U_{\tau_2}}{1 + (\omega\tau_2)^2} \left[ 1 + e^{-T_c/\tau_2} (\omega\tau_2 \sin \omega T_c - \cos \omega T_c) \right] \quad (2)$$

$$b(\omega) = \frac{U_{\tau_1}}{1 + (\omega\tau_1)^2} \left[ \omega\tau_1 + e^{-T_c/\tau_1} (\omega\tau_1 \cos \omega T_c + \sin \omega T_c) \right] - \frac{U_{\tau_2}}{1 + (\omega\tau_2)^2} \left[ \omega\tau_2 + e^{-T_c/\tau_2} (\omega\tau_2 \cos \omega T_c + \sin \omega T_c) \right] \quad (3)$$

где  $T_c$  – момент среза импульса, мкс;

$\tau_1, \tau_2$  – длительность и время фронта импульса.

Для полного импульса можно положить  $T_c = \infty$  и тогда

$$R(j\omega) = U \left\{ \frac{\tau_1}{1 + (\omega\tau_1)^2} - \frac{\tau_2}{1 + (\omega\tau_2)^2} - j \left[ \frac{\omega\tau_1^2}{1 + (\omega\tau_1)^2} - \frac{\omega\tau_2^2}{1 + (\omega\tau_2)^2} \right] \right\} \quad (4)$$

Для нормального грозового импульса 1,5/50 мкс имеем  $\tau_1 = 69$  мкс и  $\tau_2 = 0,4$  мкс. На рис. 3 приведены спектры нормальных грозовых импульсов, срезанных при  $T_c = 40; 0,5; 0,1$  мкс. Из этого рисунка ясно, что с уменьшением фронта импульса появляются составляющие более высокой частоты.

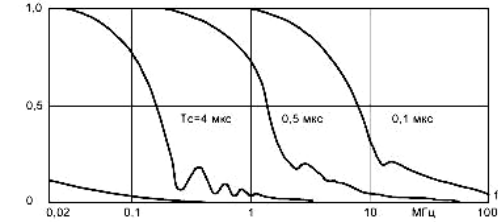


Рис. 3 – Спектры нормальных грозовых импульсов при различном времени до среза  $T_c$

При установке ограничителей перенапряжений на кабельной линии (рис. 4), которая соединяет воздушную линию с подстанцией, кабельная линия подвержена грозовым перенапряжениям со стороны воздушной линии. ОПН в начале кабельной линии ограничивает перенапряжение до 4 раз при времени срабатывания до 25 пс.

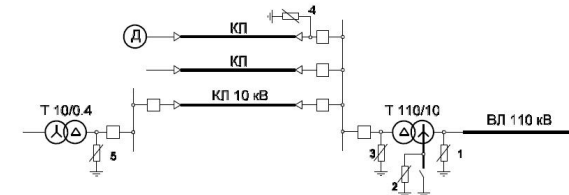
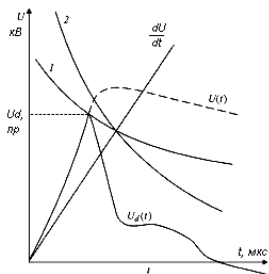


Рис. 4 – Схема электроснабжения предприятия с ОПН

В этом случае, в результате отражений импульса напряжения в кабеле, перенапряжения на другом конце кабеля выше, но не достигают уровня опасного для кабеля, а представляют опасность для стационарного оборудования (в первую очередь, трансформаторов и концевых муфт). Резкий срез перенапряжения с помощью ОПН вызывает расширение спектра частот импульса до 4–6 МГц и усиливает вероятность не только перекрытия, но и пробоя концевых муфт.

Наличие крутого фронта грозового импульса (меньше 1,2 мкс) приводит к такому состоянию контакта «экран–жила», когда вольт–секундные характеристики развития скользящего разряда по поверхности изоляции жилы и пробоя изоляции кабеля сравнимы и возможна равная вероятность этих процессов и самого разряда. Возникает т.н. «эффект Воробьевых», когда электрическая прочность изоляции, смоченной влагой или пропитывающим гелем, становится выше, чем прочность основного слоя диэлектрика. Этот эффект был открыт группой ученых ТПИ А. А. Воробьевым и Г. А. Воробьевым и назван «эффектом Воробьевых» [5].



$U(t)$  – импульс воздействующего напряжения;  
 $U_{dis}$  – напряжение, при котором наступает пробой твердого диэлектрика;  
 $U_d(t)$  – напряжение на диэлектрике в процессе разряда в нем;  
 $I$  и  $2$  – вольт-секундные характеристики соответственно твердого (ТД) и жидкого (ЖД) диэлектриков;  
 $A_c$  – критическая крутизна напряжения на фронте импульса напряжения, выше которой проявляется «эффект Воробьевых»

Рис. 5 – Проявление «эффекта Воробьевых» при воздействии импульса перенапряжения на слой жидкого и твердого диэлектрика.

Принцип действия этого эффекта показан на рис. 5, где точка пересечения вольт-секундных характеристик определяет критическую крутизну импульса напряжения, при котором наблюдается этот эффект.

В [5] внедрение поверхностного разряда вглубь изоляции жилы объясняется тем, что при большой концентрации энергии на микровыступах поверхности металлического экрана муфты происходит взрыв этого объема, который сопровождается выбросом порции плазмы. Проникая вглубь твердого диэлектрика, она вызывает его испарение и появление микротрещин, которые в процессе эксплуатации муфты прорастают вглубь, вызывая его пробой [6].

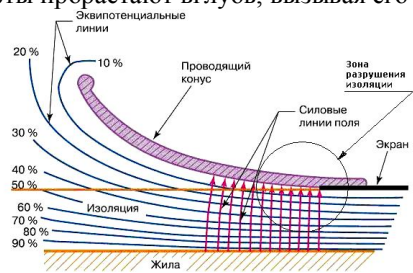


Рис. 6 – Модель электродов концевой муфты кабеля

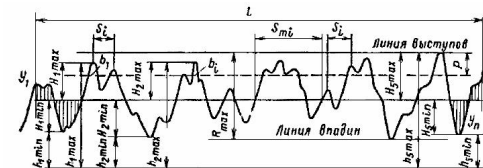


Рис. 7 –Профиль поверхности проводящего конуса при обработке поверхности по 5 классу шероховатости

На рис. 6 показана зона изоляционной поверхности муфты, в которой возникают процессы электроимпульсного разрушения диэлектрика. Т. к. применяемые методы механической обработки поверхности проводящего конуса не превышают 5 класса шероховатости, то можно принять, что для этого класса среднее арифметическое значение отклонений профиля микровыступов в пределах базовой длины составляет 3–5 мкм, а высота неровностей профиля по 10 точкам от 10 до 20 мкм. Напряженность поля на вершинах микровыступов высотой  $1 \div 10$  мкм, что соответствует 5 классу чистоты поверхности, создает напряженность поля на вершинах микроострий более чем в 100 раз выше, что является достаточным для появления автоэлектронной эмиссии с катода и образования пламенного разряда.

**Выводы:** 1. Грозовые перенапряжения ускоряют процесс разрушения изоляционной поверхности кабеля за счет высокочастотных составляющих, способных создавать условия проявления «эффекта Воробьевых», что может служить причиной создания условий для развития водных трингов.

2. Установка ОПН на кабельных вставках подстанций повышает скорость среза импульса перенапряжения, повышая спектр высокочастотных составляющих.

3. С целью снижения условий возникновения пламенного разряда на шероховатой поверхности конуса и выравнивающих элементов муфты необходимо применять как конструктивные, так и технологические мероприятия, способствующие снижению напряженности поля в этой зоне.

**Список литературы:** 1. Шувалов М. Ю. Развитие водных трингов в экструдированной кабельной изоляции как электрический эффект Ребиндера / М. Ю. Шувалов, Ю. В. Образцов, В. Л. Овсиенко, П. Ю. Удовицкий, А. С. Мнека // Кабели и провода. – 2006. – №4(299). – С. 14-19. 2. Шидловский А. К. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, В. М. Золотарев, А. Д. Подольцев, И. Н. Кучерявая. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины. – 2013. – 550 с. 3. Шидловский А. К. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из

сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ / А. К. Шидловский, В. М. Золотарев. – Х.: Майдан. – 2007. – 62 с. 4. Рябов Б. М. Измерение высоких импульсных напряжений / Б. М. Рябов. – Л.: Энергоатомиздат. – 1983. – 124 с. 5. Месяц Г. А. О природе «эффекта Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков / Месяц Г. А. // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.31, вып. 24. – С. 51–59. 6. Гонтарь Ю. Г. Влияние напряженности электрического поля на разрушение поверхностного слоя изоляционной конструкции / Ю. Г. Гонтарь, Д. В. Лавинский // Электротехника и электромеханика. – 2013. – №4. – С. 40-43.

*Надійшла до редколегії 11.11.2013*

УДК 621.315.687.24

**Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозových перенапряжений / А. Г. Гурии, Ю. Г. Гонтарь // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 53 - 61. – Бібліогр.: 6 назв.**

Розглянуті питання руйнування поверхневого шару полімерного діелектрика кабелю в кінцевих муфтах під дією повного та зрізаного імпульсів грозової перенапруги. Показано вплив ОПН на розширення спектру високочастотних складових в імпульсах перенапруги, що може призвести до прояву «ефекту Воробьейвих», коли вольт-секундні характеристики поверхневого та об'ємного пробоя порівняні та вірогідність перекриття ізоляції порівняна з вірогідністю пробоя. Цей процес пришвидшує розвиток водних тріаннів та розтріскування поверхневого шару ізоляції.

**Ключові слова:** полімерна ізоляція, кінцева муфта, грозові перенапруги.

Questions of destruction of a blanket of polymeric dielectric of a cable in trailer couplings under the influence of the full and cut-off impulses of a storm overstrain are considered. Impact of limiters of an overstrain on expansion of a range of high-frequency components in overstrain impulses that can lead to manifestation of “Vorobyev’s effect” when volt-second characteristics of superficial and volume breakdown are comparable is had and probability of overlapping of isolation is comparable with probability of breakdown. This process accelerates development water treeing and cracking of blanket of isolation.

**Key words:** polymeric isolation, trailer coupling, a storm overstrain.