

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

РАЗРУШЕНИЕ УВЛАЖНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса развития поверхностного разряда по сухой и увлажненной поверхности полимерной изоляции для системы электродов «игла-плоскость» при воздействии импульсов перенапряжения положительной полярности. Показано влияние увлажнения поверхности изоляции на зону разрушения поверхности, обострение фронта воздействующих импульсов напряжения в слое увлажнения, создание условий для роста водных дендритов в местах формирования поверхностного разряда.

Ключевые слова: поверхностный разряд, увлажненная поверхность, высоковольтные импульсы перенапряжений.

Расширение производства изоляционных конструкций с полимерной изоляцией и, в первую очередь, кабельной продукции, сопровождается интенсивным изучением процессов старения этого типа изоляции в процессе эксплуатации, физики возникновения водных и электрических триингов, влияния различных факторов на электрическую прочность поверхностного слоя [3]. Исследования группой ученых Томского политехнического института под названием «Закономерности пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульсного напряжения» [4, 5] показало, что разряд по поверхности полимерной изоляции разделок кабеля в местах соединения и концевых муфтах, сопровождается внедрением воды в толщу полимерной изоляции, способствуя образованию водных триингов и каналов с различной степенью зауглероживания и заполнения водой. Эти явления возможны также при нарушении адгезии между основной твердой изоляцией и полупроводящим слоем, которые окружают токоведущую жилу. Наличие воды на поверхности изоляции и в порах играет роль поверхностно-активной среды, т.к. при наложении электрического поля с высокой напряженностью поверхностное натяжение на границе «полиэтилен-вода» резко падает, и из-за резкого перепада диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{\text{воды}} = 80$, $\epsilon_{\text{ПЭ}} = 2,1$) возникают силы, которые приводят к разрушению полимерной изоляции.

© А. Г. Гурин, Ю. Г. Гонтарь, 2014

Под действием этих сил в полимерах происходят процессы кавитационного типа, распространяющиеся как трещины от водяных включений. Вода проникает в образовавшуюся трещину и процесс продолжает развиваться дальше со скоростью, зависящей от многих физико-химических факторов.

Полученные экспериментальные данные по влиянию сильных электрических полей показывают, что в этих условиях возможно усиленное поглощение влаги полимерным материалом, увеличение диэлектрических потерь, увеличение площади разрушения поверхности диэлектрика [6].

В работе проводились исследования влияния расположения игольчатого электрода непосредственно на поверхности изоляции и расстояния 2 мм от поверхности, когда контакт с поверхностью происходил через слой воды. Амплитуда контролируемого импульса напряжения составляла до 4 кВ при подаче одиночных стандартных импульсов перенапряжения положительной полярности.

Экспериментальная установка. Принципиальная схема установки для формирования фронта импульса грозового перенапряжения показана на рис. 1.

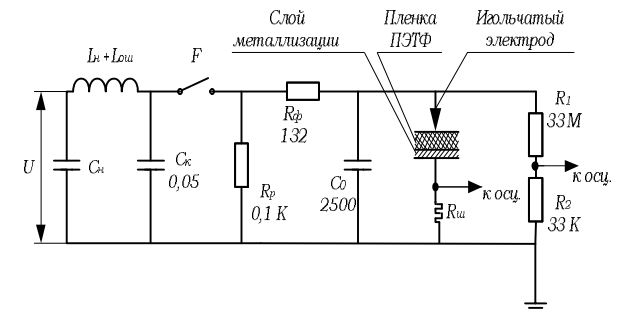


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки:
 U – зарядное напряжение, кВ; C_n – накопительная емкость, Ф;
 L_n , $L_{ош}$ – индуктивность C_n и ошиновки, Гн; R_p , R_f – разрядное и формирующее сопротивление; C_0 – формирующая емкость;
 $R_{ш}$, R_1 , R_2 – сопротивление шунта и плеч делителя напряжения

Система испытательных электродов представляла собой игольчатый электрод, расположенный на поверхности металлизированной пленки ПЭТФ толщиной 10 мкм. Слой металлизации является вторым электродом. Толщина слоя металлизации до 8-10

мкм. Напряжение на разрядном промежутке регистрировалось с помощью омического делителя R_1, R_2 , а ток омическим шунтом $R_{ш}$.

Слой металлизации при пробое пленки разрушался в месте пробоя. По площади слоя де металлизации электрода можно было судить об энергии импульса в местах пробоя, а также о направлении распространения импульса напряжения вдоль сухой и смоченной водой поверхности.

Схема позволяла формировать импульс напряжения, близкий к стандартному импульсу грозового перенапряжения. Фронт импульса формируется путем разряда емкости C_k на C_0 , а спад импульса цепочкой $C_n L_n$. С целью увеличения напряжения сквозного пробоя пленки импульс напряжения имел положительную полярность.

При указанных параметрах схемы в соответствии с выводами в [7] форма импульса напряжения на объекте испытаний:

$$U_0 = U \frac{R_p C_k}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right), \quad (1)$$

а амплитуда импульса определяется как:

$$U_m = U \frac{R_p C_k}{T_1 - T_2} (1 - \alpha) \alpha^{\frac{\alpha}{1-\alpha}}, \quad (2)$$

Где $\alpha = \frac{T_2}{T_1}$; $T_1 = R_p C_k = 5 \cdot 10^{-6}$ с; $T_2 = R_{\phi} \frac{C_0 \cdot C_k}{C_0 + C_k} = 0,34 \cdot 10^{-6}$ с;

Время достижения максимального значения испытательного напряжения

$$\tau_m = \frac{T_1 T_2 \ln \frac{T_1}{T_2}}{T_1 - T_2} = 0,99 \cdot 10^{-6}, \text{ с} \quad (3)$$

I вариант. Острийный электрод расположен непосредственно на сухой поверхности диэлектрика. При приложении к промежутку импульса напряжения, близкого по форме и параметрам к индуктированному полному импульсу грозового перенапряжения, пробой или перекрытие происходит на фронте импульса [9].

Вероятность перекрытия и внедрение разряда в диэлектрик сравнимы между собой. Запоздывание одного и другого видов разряда, неоднородность электрического поля приводят к расширению зоны

ионизации и появлению пробоев на некотором расстоянии от места контакта острейного электрода.

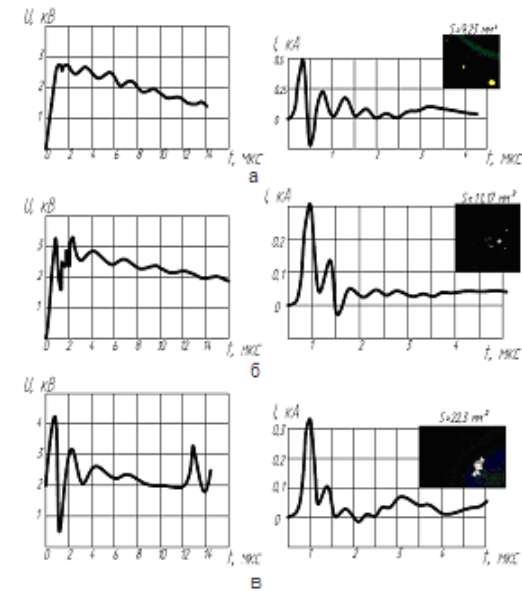


Рис. 2 – Форма импульсов напряжения и тока, приложенных к системе электродов «игла-плоскость» и вид деметаллизации плоского электрода: а – поверхность изоляционного слоя сухая; б – поверхность покрыта слоем воды; в – игольчатый электрод над смоченной изоляционной поверхностью, $\delta = 2$ мм

Определить долю энергии импульса напряжения в основном и дополнительном канале пробоя можно исходя из объема зоны разрушения металлизации плоского электрода. Связь между энергией разрушения и энергией разрушения и энергией, подводимой к разрядному промежутку, можно представить как:

$$W = m(\alpha + \chi) = \gamma \cdot S \cdot \Delta_m \cdot (\alpha + \chi); \quad (4)$$

где W – энергия деметаллизации, Дж;

m – масса вещества деметаллизации, кг;

α – удельная теплота плавления металла, Дж/кг;

χ – удельная теплота выпаривания, Дж/кг;

γ – удельный вес материала металлизации, для алюминия $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³;

S – площадь зоны деметаллизации, m^2 ;

Δ_m – толщина слоя металлизации, м.

II вариант. Поверхность диэлектрика увлажнена слоем технической воды, острый электрод касается поверхности диэлектрика. В этом случае зона пробоев расширяется вокруг основного канала разряда (рис. 2б), что, видимо, связано с влиянием влаги на обострение импульса напряжения и дополнительным фактором усиления тангенциальной составляющей электрического поля и электростатических сил, способствующих внедрению разрядного тока в диэлектрик.

III вариант (рис. 2в) имитирует пробой диэлектрика в случае увлажненной поверхности, когда игольчатый электрод расположен на некотором расстоянии от нее. Это самый неблагоприятный случай, когда развитию разряда способствует наличие усиления поля в воздушном зазоре за счет обострения импульса напряжения, его пробой и дальнейший пробой увлажненного диэлектрика импульсом с круглым фронтом. При эксперименте воздушный зазор составлял до 2 мм.

Изменение количества энергии импульса при пробое для трех вариантов эксперимента приведены в таблице.

Таблица – Энергия пробоя разрядного промежутка при увлажненной поверхности диэлектрика

№ п/п	Тип разрядного промежутка	Площадь деметаллизации и электрода, mm^2	Масса металлического покрытия, разрушенного разрядом, кг	Энергия разрушения W_p , Дж	Отношение энергии разрушения к запасенной энергии $W_p / W_{зап}$
1	Острие – диэлектрик – плоскость металлического электрода	9,23	$2,49 \cdot 10^{-7}$	2,81	0,2
2	Острие – слой воды – диэлектрик – плоскость электрода	11,17	$3,01 \cdot 10^{-7}$	3,4	0,25
3	Острие – воздушный промежуток – слой воды – диэлектрик – металлический слой плоского электрода	22,3	$6,01 \cdot 10^{-7}$	6,78	0,5

Выводы: 1. Наличие влаги и воздушных включений в зоне повышенной напряженности электрического поля приводит к увеличению доли энергии импульсов перенапряжения, расходуемой на разрушение зоны поверхностного слоя диэлектрика.

2. Присутствие влаги и воздушных включений способствует обострению воздействующих импульсов напряжения и созданию условий внедрения поверхностного разряда вглубь диэлектрика.

3. Воздушные или газовые включения между электродами способствуют усилению неравномерности электрического поля у острейшего электрода, ускоряя процесс ионизации и разрушения диэлектрика.

4. Предложенный метод определения энергии разрушения диэлектрика при пробое путем определения массы слоя металлизации электрода может быть использован для качественной оценки исследуемых процессов.

Список литературы: 1. Франц В. Пробой диэлектриков / В. Франц. – М.: Изд-во иностр. лит. – 1961. – 200 с. 2. Strigel R. Elektrische Stoßfestigkeit / R. Strigel. – Berlin: Springer. – 1955. – 280 p. 3. 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. 4. Воробьев А.А., Воробьев П.А., Чепиков А.Т. Российская академия естественных наук. Научное открытие: Закономерность пробоя твердого диэлектрика на границе раздела с жидким диэлектриком при действии импульса напряжения. Диплом № 107. – М.: 1999. – Регистрационный № 122. – Приоритет 14 декабря 1961 г. 5. Воробьев Г. А. Эффект внедрения разряда в твердый диэлектрик, погруженный в изолирующую жидкость – Г. А. Воробьев // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т.75, вып. 4. – С. 125–127. 6. Белоусов Ф. А. Влияние электрического поля по диффузии воды в полимерной изоляции : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.09.02 «Электротехнические материалы и изделия» / Белоусов Федор Анатольевич ; Санкт-Петербургский гос. техн. ун-т. – Санкт-Петербург, 2000. 7. Бржезицкий В. О., Исакова А. В., Рудаков В. В. та ін. Техніка і електрофізика високих напруг: Навч посібник / За ред. В. О. Бржезицького та В. М. Михайлова. – Харків: НТУ „ХПІ” – Торнадо, 2005. – 930 с. 8. Гурин А. Г. Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозových перенапряжений / А. Г. Гурин, Ю. Г. Гонтарь // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ" : Энергетика: надійність та енергоефективність №59 - Вестник НТУ "ХПИ", 2013. - ISSN 2224-034959 - Вестник НТУ "ХПИ", 2013. 9. Воробьев Г. А. Электрический пробой твердых диэлектриков / Г. А. Воробьев, С. Г. Еханин, Н. С. Несмелов // Физика твердого тела. – № 6. – 2005. – с. 1048–1052. 10. John Grainger, William Stevenson Jr. Power System Analysis. – McGraw-Hill Education (India), 2003. – 785 pp.

Bibliography (transliterated): 1. Franc V. Proboj dijelektrikov. Moscow: Izd-vo inostr. lit. 1961. 2. Strigel R. Elektrische Stoßfestigkeit. Berlin: Springer. – 1955. 3. Shidlovskij A. K. Shherba A. A. Zolotarev V. M. Podol'cev A. D., Kucherjavaja I. N. Kabeli s polimernoj izoljaciej na sverhvyssokie naprjazhenija, Kyev: In-t jelektrodinamiki NAN Ukrainy. 2013. 4.

Vorob'ev A.A., Vorob'ev P.A., Chepikov A.T. Rossijskaja akademija estestvennyh nauk. Nauchnoe otkrytie: Zakonomernost' proboja tverdogo dijelektrika na granice razdela s zhidkim dijelektrikom pri dejstvii impul'sa naprjazhenija. Diplom № 107. – M.: 1999. – Registracionnyj № 122. - Prioritet 14 dekabnja 1961 g. 5. Vorob'ev G. A. Jefferkt vnedrenija razrjada v tverdij dijelektrik, pogruzhennyj v izolirujushhuju zhidkost' *Pis'ma v ZhTF*. 2005. Vol.75, No. 4. 125–127. Print. 6. Belousov F. A. Vlijanie jelektricheskogo polja po diffuziju vody v polimernoj izoljacii : avtoref. dis. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk : spec. 05.09.02 «Jelektrotehnicheskie materialy i izdelija» / Belousov Fedor Anatol'evich ; Sankt-Peterburgskij gos. tehn. un-t. – Sankt-Peterburg, 2000. 7. Brzhezic'kij V. O., Isakova A. V., Rudakov V. V. *Tehnika i elektrofizika visokih naprug: Navch posibnik* Harkiv: NTU „HPI” – Tornado, 2005. 8. Gurin A. G. Gontar' Ju. G. Razrushenie poverhnostnogo sloja dijelektrika v koncevnyh kabel'nyh muftah pod dejstviem grozovyh perenaprjazhenij *Sbornik nauchnyh trudov "Vestnik NTU "HPI" : Energetika: nadijnist' ta energoefektivnist'* No 59. 2013. 9. Vorob'ev G. A. Ehanin, S. G. Nesmelov N. S. *Jelektricheskij proboj tverdych dijelektrikov* Fizika tverdogo tela. No 6. 2005. 1048–1052. Print 10. John Grainger, William Stevenson Jr. *Power System Analysis*. McGraw-Hill Education (India), 2003.

Надійшла (received) 24.03.2014