

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

РАЗРУШЕНИЕ УВЛАЖНЕННОГО ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ГРОВОЗЫХ 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.

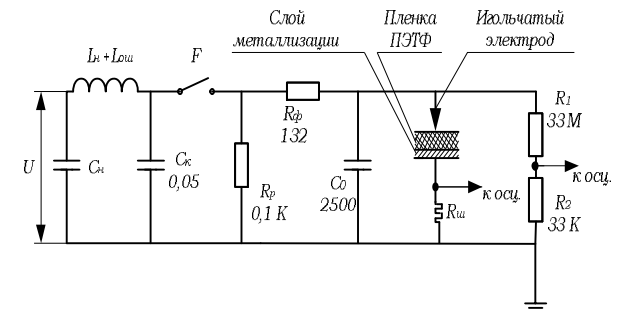


Рис. 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки:
 U – зарядное напряжение, кВ; C_n – накопительная емкость, Ф;
 $L_n, L_{ош}$ – индуктивность C_n и ошиновки, Гн; R_p, R_f – разрядное и формирующее сопротивление; C_0 – формирующая емкость;
 $R_{ш}, R_1, R_2$ – сопротивление шунта и плеч делителя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

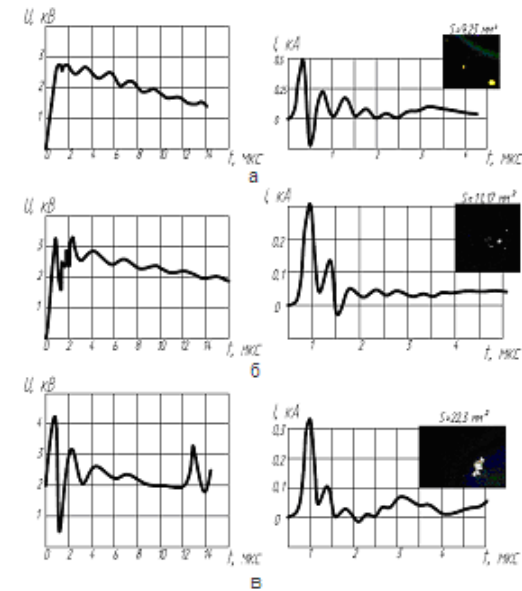


Рис. 2 – Форма импульсов напряжения и тока, приложенных к системе электродов «игла-плоскость» и вид деметаллизации плоского электрода: а – поверхность изоляционного слоя сухая; б – поверхность покрыта слоем воды; в – игольчатый электрод над смоченной изоляционной поверхностью, δ = 2 мм

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' probuja tverdogo dijelektrika na granice razdela s zhidkim dijelektrikom pri dejstvii impul'sa naprjazhenija. Diplom № 107. – М.: 1999. – Registracionnyj № 122. - Prioritet 14 dekabnja 1961 g. 5. Vorob'ev G. A. Jeffekt 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 «Jelektrotehnicieskie 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. Nesselov N. S. *Jelektricheskij probuj tverdijh 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

УДК 551.594.221

А.О. КУКСОВ, бакалавр, НТУ «ХПИ»;
О.О. ПЕТКОВ, докт. техн. наук, с.н.с., НТУ "ХПИ"

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛУЧЕННЯ РОЗРЯДУ ДОВГОЇ ІСКРИ В ТОЧКИ ПЛОЩИНИ В НЕОДНОРІДНОМУ ПОЛІ

У статті запропонована двокрокова імітаційна модель влучення розряду довгої іскри в площину. Підтверджено адекватність розробленої моделі. Наведено результати чисельного імітаційного моделювання імовірнісного процесу влучення довгої іскри в площину. Здійснено порівняння результатів моделювання щільності розподілу точок ураження з даними експерименту.

Ключові слова: чисельне моделювання, електричний розряд, щільність розподілу

Постановка проблеми. В результаті стрімкого розвитку електротехніки та електроенергетики, оснащення високочутливою електронікою різного обладнання та зростання його ціни все більш гостро постає питання надійності захисту встановленого обладнання від ураження блискавкою, яка являє собою багатоступінчатий розряд довгої іскри в атмосфері. Одним з аспектів забезпечення надійності роботи заглибленого обладнання, розташованого безпосередньо під поверхнею ґрунту (обладнання складів, комунікацій і т.п.), є вивчення закономірностей розподілу точок ураження фінальним розрядом блискавки. Для визначення розподілу ймовірностей влучення довгої іскри в площину в лабораторних умовах, необхідні значні витрати ресурсів. Останнім часом, з розвитком комп'ютерної техніки, все більше уваги приділяють розрахунковими моделями, які потребують менше часових і матеріальних ресурсів, а також дають можливість імітувати широкий діапазон зміни параметрів розряду довгої іскри.

Аналіз публікацій. Розробка моделей ураження об'єктів блискавкою, необхідна для дослідження надійності систем блискавкозахисту, але, в силу складності процесу, в теперішній час немає моделі, яка в повному об'ємі достовірно описувала б розподіл точок ураження площини довгою іскрою. Даному напрямку присвячена низка досліджень.

В [1] досліджувався розподіл точок ураження площини розрядом довгої іскри в розрядному проміжку довжиною 5 м.

© А. О. Кусков, О. О. Петков, 2014