

принимают их за независимые величины. В этом случае с учетом (5) вероятность перекрытия определяется как:

$$P = \int \int_{(D)} f_1(I_M) f_2(a) dI_M da = \int_0^{\infty} f_1(I_M) dI_M \int_0^{\infty} f_2(a) da = , \quad (6)$$
$$= \int_0^1 dP_I \int_0^1 dP_a = \int_0^1 P_I dP_a = \int_0^1 P_a dP_I$$

т. е. вероятность перекрытия линейной изоляции равна в соответствующем масштабе заштрихованной площади на рис. 4, которая ограничена видоизмененной кривой вероятности опасных параметров.

Выводы. Результаты выполненных исследований показывают, что вероятность перекрытия линейной изоляции можно рассчитать с достаточной точностью при использовании предложенной зависимости $1-P_a=f(1-P_I)$.

Список литературы: 1. Техника высоких напряжений: Учебное пособие для вузов / И.М. Богатенков, Г. М. Иманов, В. Е. Кизеветтер и др. ; под ред Г. С. Кучинского. – СПб : Изд. ПЭИПК 1998. - 700 с. 2. Базуткин В. В. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: Учебник для вузов / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь; Под общ. ред. В. П. Ларионова. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с. 3. Координация изоляции и перенапряжения в электрических высоковольтных сетях : учеб. пособ. / В. И. Гуль, В. И. Нижевский, И. В. Хоменко и др.; под ред. проф. В. И. Гуля. – Харьков : ЭДЭНА, 2009. – 270 с. 4. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений / Под научной редакцией Н.Н. Тиходеева. – 2-е изд. – СПб. : ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. – 355 с.

Bibliography (transliterated): 1. I.M. Bogatenkov, G. M. Imanov, V. E. Kizevetter *Tehnika vysokih naprjazhenij*: SPb. : PJeIPK 1998.. 2. Bazutkin V. V. V. P. Larionov, Ju. S. Pinal'; Pod obshh. *Tehnika vysokih naprjazhenij: Izoljacija i perenaprjazhenija v jelektricheskikh sistemah*:. - Moscow.: Jenergoatomizdat. 3. V. I. Gul', V. I. Nizhevskij, I. V. Homenko *Koordinacija izoljacji i perenaprjazhenija v jelektricheskikh vysokovol'nyh setjah*. Khar'kov : JeDJeNA, 2009. . 4. RD 153-34.3-35.125-99. Rukovodstvo po zashhite jelektricheskikh setej 6-1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenaprjazhenij / Pod nauchnoj redakciej N.N. Tihodeeva. – 2-e izd. – SPb. : PJeIPK Mintopjenergo RF, 1999. .

Поступила (received) 28.11.2014

УДК 551.594.221

А.А. ПЕТКОВ, д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ";
Н. В. ФЕДОРОВА, магистрант НТУ "ХПИ"

ОЦЕНКА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТЕРЖНЕВОГО МОЛНИЕОТВОДА

В статье получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта. Сравнение параметров зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и материалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов расчета.

Ключевые слова: разряд молнии, вероятность поражения, плотность распределения. поверхность грунта

Постановка проблемы. В условиях возрастающей в последнее время грозовой активности большое значение приобретает защита от прямого удара молнии как зданий и сооружений, возвышающихся над поверхностью грунта, так и объектов, расположенных на его поверхности: кабельные коммуникации, заземляющие спуски; металлоконструкции, соединенные с броней кабеля; различные вводы в подземные объекты, а также объекты, расположенные непосредственно под поверхностью грунта. Для оценки их молниезащищенности необходима информация о вероятности поражения поверхности грунта при наличии молниеотводов различного вида и, в частности, стержневых молниеотводов.

Анализ публикаций. Согласно нормативному документу [1], одним из видов зоны защиты (ЗЗ) стержневого молниеотвода является коническая форма, которая характеризуется высотой конуса и радиусом ЗЗ на поверхности грунта. Радиус ЗЗ определяется в зависимости от надежности защиты и высоты молниеотвода. Надежность защиты представлена дискретным рядом {0,9; 0,99; 0,999} и предписывается всей поверхности грунта, находящейся в ЗЗ вне зависимости от расстояния от оси стержневого молниеотвода. Однако теоретические основы электрогеометрического метода построения ЗЗ молниеотводов [2], дают основания предполагать, что предписанные значения надежности ЗЗ являются некими обобщающими оценками и существует определенная зависимость вероятности поражения точек поверхности

© А.А. Петков, Н. В. Федорова. 2014

грунта от расстояния до оси стержневого молниеотвода. Этот факт подтверждают экспериментальные данные, представленные в работах [3-5]. В работах исследовались электрические разряды в неоднородном поле, создаваемом в системе «стержень-плоскость» при наличии стержня-объекта. Длина разрядных промежутков составляла 0,78 м, и 1,26 м и 3 м.

Полученные в работах экспериментальные данные могут быть использованы для оценки изменения вероятности поражения плоскости длинным электрическим разрядом при наличии стержня.

Цель работы. Разработка методики оценки вероятности поражения разрядом молнии поверхности грунта в районе расположения стержневых объектов.

Результаты исследований. На рис.1 показана одна из схем проведенных испытаний [3, 4], результаты которых позволяют дать оценку вероятности поражения плоскости длинной искрой при наличии стержневого объекта.

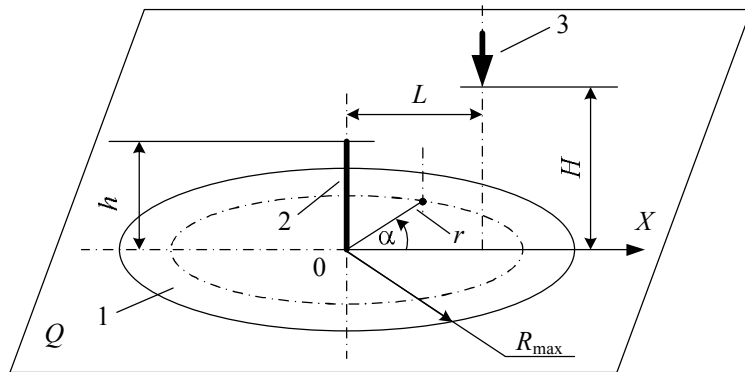


Рис. 1 – Схема проведения испытаний

На рисунке обозначено: 1 – зона заземленной плоскости Q , в которой вероятность ее поражения длинной искрой зависит от наличия стержневого объекта 2; 3 – потенциальный электрод, с которого развивается разряд длинной искры на стержень-объект 2 либо плоскость Q .

Испытания были организованы следующим образом. Первоначально потенциальный электрод 3 устанавливался на расстоянии H от плоскости соосно со стержнем-объектом 2. Проводилась серия разрядов N (с использованием генератора импульсов напряжения) и фиксировалось количество поражений стержня-объекта n . Вероятность поражения стержня-объекта определялась по соотношению $q = n / N$. Да-

лее потенциальный электрод смещался вдоль оси OX на величину L , проводилась новая серия разрядов и определялась вероятность поражения стержня при данном значении L .

На рис. 2 показано [5] изменение вероятности поражения стержня в зависимости от величины смещения потенциального электрода L для варианта $H = 3$ м, $h = 0,3$ м. Обработка экспериментальных данных показывает, что радиус зоны, в которой вероятность поражения плоскости длинной искрой зависит от наличия стержневого объекта 2 (рис. 2), и составляет [5]: для варианта $H = 3$ м, $h = 0,3$ м – $R_{\max} = 1,7$ м; для варианта $H = 3$ м, $h = 0,15$ м – $R_{\max} = 1,3$ м. Величина R_{\max} равна минимальному смещению потенциального электрода L , при котором уже не наблюдаются разряды на стержневой объект 2 (рис. 2).

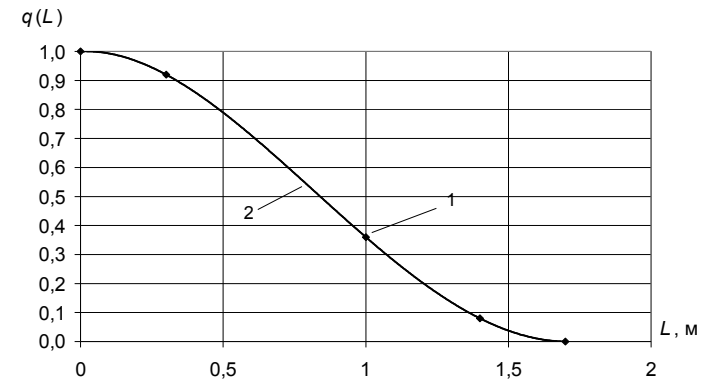


Рис. 2 – Зависимость вероятности поражения стержня от величины смещения потенциального электрода.

1 – экспериментальные данные; 2 – аппроксимирующая кривая

Учитывая, что при разряде возможны только два несовместимых события: поражение стержня или поражение плоскости, то данные вероятности поражения стержня позволяют определить точки эмпирической функции распределения поражения плоскости F_e при смещении потенциального электрода в виде:

$$F_e(L_k) = \sum_{i=1}^k \frac{1 - q(L_i)}{\sum_{j=1}^m [1 - q(L_j)]}, \quad (1)$$

где k – номер экспериментальной точки; m – количество экспериментальных точек.

Теоретическая функция распределения $F_t(L)$ может быть получена путем аппроксимации данных, определенных по (1) и для варианта $H = 3$ м, $h = 0,3$ м имеет вид

$$F_t(L) = 0,327L^2. \quad (2)$$

Тогда плотность распределения поражения плоскости при смещении потенциального электрода по радиусу равна

$$g(L) = \frac{dF_t(L)}{dL} = 0,654L. \quad (3)$$

Для оценки поражения плоскости разрядом длинной искры в районе размещения стержневого объекта рассмотрим следующую задачу. Пусть разряд длинной искры может равно вероятно инициироваться из любой точки пространства, расположенной на высоте H над плоскостью в пределах круга с радиусом R_{\max} (рис. 2). Известно, что разряд может поразить либо стержневой объект, либо плоскость. Требуется определить вероятность того, что в результате разряда из точки с координатами (r, α, H) будет поражена плоскость Q . Исходя из постановки задачи, с учетом соотношения (3) вероятность поражения элементарной площадки плоскости Q имеет вид [6]

$$p = g(r, \alpha) dr d\alpha = 0,654r dr d\alpha. \quad (4)$$

Тогда вероятность поражения плоскости при инициировании разряда в пределах круга радиусом r определится как

$$P(r) = F(r) - F(0) = \frac{\int_0^r \int_0^{2\pi} g(r, \alpha) dr d\alpha}{\int_0^{R_{\max}} \int_0^{2\pi} g(r, \alpha) dr d\alpha} = \left(\frac{r}{R_{\max}} \right)^2. \quad (5)$$

Соотношение (5) определяет вероятность поражения всей плоскости Q и может служить верхней оценкой вероятности поражения части плоскости – круга радиусом r .

Для определения адекватности принятой оценки произведем ее сравнение с зоной защиты стержневого молниеотвода на уровне грунта, определяемой по материалам действующего нормативного документа [1]. Согласно [1] надежность защиты стержневого молниеотвода P_3 равна $P_3 = 1 - P_{\text{ППМ}}$, где $P_{\text{ППМ}}$ – вероятность прямого поражения молнией защищаемого объекта. Эту вероятность можно отнести и час-

ти плоскости грунта, находящейся в зоне защиты конической формы, которая является кругом с радиусом $r_0 = kh_M$, где h_M – высота стержневого молниеотвода, k – коэффициент, зависящий от высоты молниеотвода и надежности защиты.

Используя геометрическое подобие системы стержень-круг (рис. 1), можно сопоставить значения коэффициента k , приведенные в [1] и рассчитанные исходя из (5) при $P(r) = P_{\text{ППМ}}$. На рис. 3 показано изменение коэффициента k для различных значений вероятности поражения круга, соосного со стержнем высотой до 30 м. Как видно из рисунка, при малых вероятностях поражения плоскости (больших значениях надежности зоны защиты стержневого молниеотвода), расчет дает меньшее значение радиуса зоны защиты на поверхности грунта по сравнению с нормативным документом. При малых значениях надежности – расширяет зону защиты на поверхности грунта.

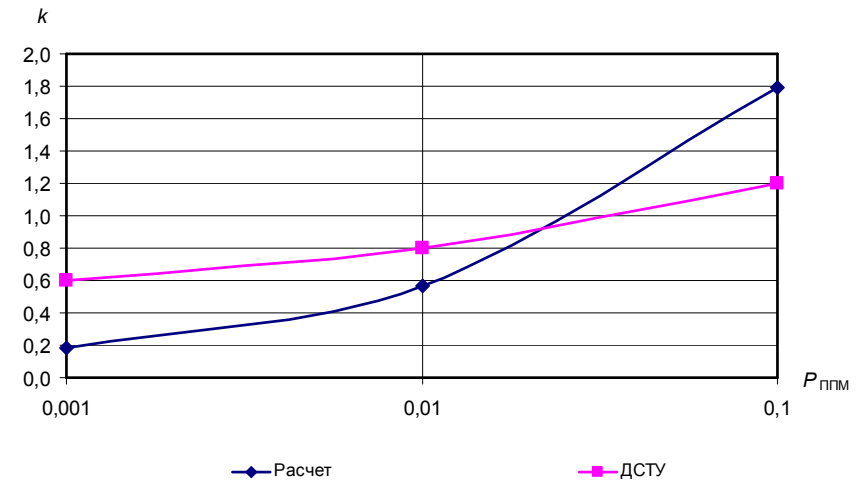


Рис. 3 – Изменение коэффициента связи высоты стержня и радиуса круга

Выводы

1. Получены аналитические соотношения для определения вероятности поражения грунта длинной искрой в районе расположения стержневого объекта.
2. Сравнение зоны защиты стержневого молниеотвода на поверхности грунта рассчитанное по предложенным соотношениям и мате-

риалам действующего нормативного документа показало корреляцию результатов.

Материалы статьи могут быть использованы для усовершенствования методов расчета зоны защиты стержневых молниеотводов.

Список литературы: 1. Улаштування блискавкозахисту будівель споруд (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Чинний від 2008–01–01]. – К. : Мінореґіонбуд України, 2008. – 63 с. 2. Ларионов В.П. Основы молниезащиты / Ларионов В.П. : под ред. И.М. Бортника. – М. : Знак, 1999. – 104 с. 3. Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / [Баранов М.И., Доценко В.И., Зиньковский В.М. и др.] // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПІ", – 2013. – №27. – С. 11 – 20. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/3817>. 4. Влияние конфигурации системы электродов на распределение точек поражения плоскости длинной искрой / [Г.М. Кольушко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др.] // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Техніка та електрофізика високих напруг. – Харків : НТУ "ХПІ", – 2013. – №60. – С. 57 – 70. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/5668>. 5. Петков А.А. Экспериментальные исследования поражения стержневого молниеотвода / А.А. Петков // Физические и компьютерные технологии: труды 19-й Международной научно-технической конференции (Харьков, 25 – 26 июня 2014г.). – Харьков : ГП ХМЗ "ФЭД", – 2014. – С. 146 – 149. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/8747>. 6. Венцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Венцель, Л.А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000.— 480 с. – ISBN 5-06-003830-0.

Bibliography (transliterated): 1. Ulashtuvannya bliskavkozahistu budivell sporud (IEC 62305:2006, NEQ): DSTU B V.2.5-38:2008. – [Chinniy vid 2008–01–01]. – K. : Minoregionbud UkraYini, 2008. – 63 s. 2. Larionov V.P. *Osnovni molniezaschityi*. Moscow: Znak, 1999. 3. Baranov M.I., Dotsenko V.I., Zinkovskiy V.M. *Eksperymentalnye issledovaniya porazheniya zazemlennoy ploskosti i razmeshchennykh na ney ob'ektov elektricheskimi razryadom v dlinnom proezhnutke*. *Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unversitetu "Harkivskiy politehnlchniy Instytut"*. *Zbrlnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnlka ta elektroflzika visokih naprug*. No. 27. 2013. 11 – 20. Print 4. G.M. Koliushko, P.N. Melnikov, O.S. Nedzelskiy *Vliyanie konfiguratsii sistemyi elektrodov na raspredelenie tochek porazheniya ploskosti dlinooy iskroy*. *Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unversitetu "Harkivskiy politehnlchniy Instytut"*. *Zbrlnik naukovih prats. Tematichniy vipusk: Tehnlka ta elektroflzika visokih naprug*. No. 60. 2013. 57 – 70. Print 5. Petkov A.A. *Eksperymentalnye issledovaniya porazheniya stержnevoogo molnieotvoda* *Fizicheskie i kompyuternye tehnologii: trudy 19-y Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii (Harkov, 25 – 26 iyunya 2014g.)*. Kharkov : GP HMZ "FED", 2014. 146 – 149. Print.

Поступила (received) 05.11.2014

УДК 621.315

Э. Д. ШУМИЛОВА, к.т.н., доцент, Донбасский государственный педагогический университет

Ю. Н. ШУМИЛОВ, д.т.н., проф., ГП «Научно-исследовательский институт высоких напряжений»

МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ПЛЁНОЧНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Работа посвящена изучению электрической прочности и закономерностям разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в среде криогенных жидкостей при напряжённости электрического поля близких к рабочим. Показано, что основным разрушающим фактором МПИ являются частичные разряды ЧР в полостях, заполненных криогенной жидкостью. Воздействие ЧР в зависимости от материала приводит к растрекиванию плёнок, либо к образованию на поверхности науглероженных проводящих побегов. Даны рекомендации по выбору МПИ для криогенных устройств.

Ключевые слова: многослойная полимерная плёночная изоляция, криогенные жидкости, электрическая прочность, частичные разряды, разрушение плёночной изоляции

Криогеника – раздел физики низких температур, изучающий изменение свойств различных веществ в условиях крайне низких (криогенных) температур. Наибольшее количество работ по изучению свойств материалов при криогенных температурах посвящено чистым металлам и их сплавам после открытия явления в них сверхпроводимости [1-2]. Применение сверхпроводящих токопроводов в электро-техническом оборудовании позволит создавать различные энергетические устройства, такие как трансформаторы, токоограничители, индуктивные накопители, кабели и так далее. Их применение может значительно улучшить ситуацию в существующих энергосистемах и сетях, увеличить их устойчивость, надёжность и пропускную способность [3]. К сожалению очень мало работ по изучению свойств диэлектрических материалов при криогенных температурах.

Целью настоящей работы явилось изучение электрической прочности и закономерностей разрушения многослойной полимерной плёночной изоляции МПИ в криогенных жидкостях при напряжённости электрического поля близких к рабочим частотой 50 Гц.

Полимерная плёночная изоляция обладает высокой электрической и механической прочностью, гибкостью, технологичностью нанесения на токопроводящие элементы электрооборудования. Однако

© Э.Д. Шумилова, Ю. Н. Шумилов. 2014