

УДК 621.315.2 : 004.94

И. Н. Кучерявая, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев, Украина, e-mail: rB-irina@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И ТЕПЛОВОГО ПОЛЕЙ В НЕОДНОРОДНОМ ПОЛИЭТИЛЕНОВОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ ПРИ ЧАСТИЧНОМ РАЗРЯДЕ

Частичный разряд в газовом включении полиэтиленовой изоляции моделируется как переходный процесс, при котором имеет место резкое изменение во времени величины электропроводности включения. Исследуется распределение электрического поля в объеме неоднородного полиэтиленового диэлектрика и температурное поле, связанное с электрическим. Рассматривается случай наличия на включении тонкого поверхностного слоя, по которому течет ток. Путем компьютерного моделирования получено, что для воздушного включения радиуса 10 мкм электрическое поле в окрестности включения в случае частичного разряда увеличивается в 2–3 раза, а температура в самом включении при каждом разряде кратковременно возрастает на ~2–4°С. Нагрев может оказаться более интенсивным при учете серии частичных разрядов, а неоднородность в распределении электрического поля совместно с действием разрядов – привести к разрушению изоляции на микроуровне. Библ. 5, рис. 5.

Ключевые слова: полимерная изоляция, воздушное включение с поверхностным слоем, частичный разряд, компьютерное моделирование.

Частковий розряд в газовому включенні поліетиленової ізоляції моделюється як перехідний процес, при якому відбувається різке зміння у часі електропровідності включення. Досліджується розподілення електричного поля в об'ємі неоднорідного поліетиленового діелектрика та пов'язане з ним теплове поле. Розглядається випадок присутності на включенні тонкого поверхневого шару, по якому протікає струм. Шляхом комп'ютерного моделювання показано, що для газового включення радіуса 10 мкм електричне поле в оточенні включення при частковому розряді збільшується у 2–3 рази, а температура в самому включенні при кожному розряді короткочасно підвищується на ~2–4°С. Нагрів може бути більш інтенсивним при врахуванні серії часткових розрядів, а неоднорідність

электрического поля разом с дією розрядів – призвести до руйнування ізоляції на мікрорівні. Бібл. 5 рис. 5.

Ключові слова: полімерна ізоляція, газове включення з поверхневим шаром, частковий розряд, комп'ютерне моделювання.

Введение

Частичные разряды относятся к основным причинам повреждения оборудования высокого напряжения. Объясняется это тем, что появление частичных разрядов является начальной стадией развития большинства дефектов в высоковольтной изоляции, в том числе различных неоднородностей, посторонних примесей и загрязнений, газовых полостей, зон увлажнения. Такие дефекты образуются в неоднородной структуре изоляции, как правило, в результате нарушения процесса ее изготовления и при эксплуатации оборудования (под влиянием механических воздействий, деформации, вибрации, т. п.). Под действием частичных разрядов (ЧР) начинается разрушение изоляции, размер дефектной области и интенсивность разрядов увеличиваются. Деграция изоляции ускоряется за счет термических процессов. Расширение дефектной области приводит к возрастанию напряженности поля в изоляционном промежутке и, когда зона с дефектом достигает больших размеров, становится возможным пробой изоляции. Развитие таких процессов проиллюстрировано на рис. 1 на примере полиэтиленовой изоляции кабеля, в которой из полости образуется древовидная структура – водный триинг. В ветвях триингов развиваются частичные разряды. Под действием электрического поля и разрядов триинги увеличиваются в размерах и количестве, тем самым увеличивая степень деграции полимерного материала [1, 3].

Наибольшую опасность представляют ЧР в газовых включениях, так как в этом случае они возникают при меньших напряжениях, чем в жидких компонентах и твердых инородных включениях в изоляции. Это связано с меньшей диэлектрической проницаемостью газового промежутка и, соответственно, с большей напряженностью электрического поля в нем, а также с малой электрической прочностью газа по сравнению с твердыми и жидкими составляющими изоляции.

Таким образом, к основным причинам старения изоляции относятся как электрическое старение из-за частичных разрядов, протекающих во включениях при перенапряжении и рабочем напряжении, так и тепловое старение материала.

Изучение электрофизических и тепловых процессов при возникновении частичных разрядов с целью максимального снижения их интенсивности в полимерных материалах актуально в связи с широким использованием современных силовых кабелей и самонесущих проводов для воздушных линий электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена, а также в связи с созданием нового электроэнергетического оборудования на основе силового кабеля со сшитого-полиэтиленовой изоляцией [2], в том числе высоковольтных трансформаторов Dryformer, высоковольтных турбо- и гидрогенераторов Powerformer, ветроэлектрических генераторов Windformer. Их обмотки выполняются высоковольтным кабелем с изоляцией из сшитого полиэтилена. Актуальность подтверждается и тем, что, к примеру, для кабелей с полиэтиленовой изоляцией, рассчитанных на высокое и сверхвысокое напряжения (до 500 кВ), надежность и качество (принимая во внимание целостность изоляционной системы) должны быть предельно высокими.

Постановка задачи и цель работы

Целью настоящей работы является разработка математической модели и проведение компьютерного исследования электротепловых процессов в полиэтиленовой изоляции с включением сферической формы при возникновении в нем частичного разряда. Ограниченный объем полиэтиленовой изоляции представляется как гетерогенная среда, испытывающая действие внешнего переменного электрического поля. Электропроводность среды во включении задается изменяющейся во времени, и характеризует разрядный процесс.

Распределения связанных электрического и теплового полей в неоднородной изоляции определяются путем совместного решения уравнений:

$$\nabla \cdot [-\sigma \nabla \varphi - \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t}] = 0, \quad (1)$$

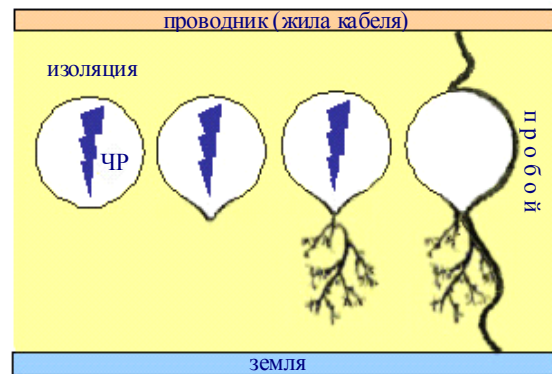


Рис. 1

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q, \quad (2)$$

где $\varphi(\mathbf{r}, t)$ – электрический потенциал – искомая функция времени t и координаты $\mathbf{r}(x, y)$ из-за неоднородности материала;

T – температура;

σ – электропроводность среды;

ϵ_r – диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение), ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума;

ρ , C , λ – соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность среды;

Q – мощность теплового источника в единице объема, равная

$$Q = \begin{cases} \sigma_e |\mathbf{E}|^2 & \text{во включении,} \\ 0 & \text{в изоляции,} \end{cases}$$

где $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ – напряженность электрического поля;

σ_e – электропроводность среды во включении, задаваемая как

$$\sigma_e(t) = \begin{cases} \sigma_a + \sigma_{\max} \sin^n(\pi t / \tau) & \text{при } t < \tau, \\ \sigma_a & \text{при } t \geq \tau. \end{cases}$$

Здесь τ – длительность разрядного импульса ($\tau = 1$ мкс);

σ_a – электропроводность воздуха во включении; $n = 9$;

σ_{\max} – значение электропроводности, задаваемое в соответствии с данными теплового расчета в [5] для включения определенного размера.

При решении электрической задачи (1) использовались граничные условия в направлении поля: на нижней границе (рис. 2) – $\varphi = 0$, на верхней границе – $\varphi = U$ (процесс рассматривался при фиксированном значении напряжения), на других границах задавалась осевая симметрия и условие Неймана: $\partial \varphi / \partial n = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали). Для тепловой задачи (2) на всех границах, кроме осевой симметрии, выбиралась температура, равная рабочей температуре изоляции $T = T_p$. Расчетная модель представлена как осесимметричная, для двумерного случая, в цилиндрической системе координат.

Результаты компьютерного моделирования

Распределение электрического поля (в цвете) и расположение силовых линий электрического поля до частичного разряда и в случае возникновения частичного разряда представлены на рис. 2 а и б, соответственно. На рис. 3 показаны изменения приращения температуры вдоль отрезка AB (см. рис. 2 б) в моменты времени: 1 – $t = 5 \cdot 10^{-8}$ с; 2 – $t = 3 \cdot 10^{-7}$ с; 3 – $t = 0,5\tau = 5 \cdot 10^{-7}$ с; 4 – $t = 7 \cdot 10^{-7}$ с; 5 – $t = \tau = 10^{-6}$ с; 6 – $t = 1,2 \cdot 10^{-6}$ с. На вставках справа даны распределения температуры (в цвете) и вектора теплового потока (стрелками) в газовом включении в отсутствие частичного разряда, когда $\Delta T_{\max} = 4,04$ °С, и в конце его протекания при $\Delta T_{\max} = 0,87$ °С.

Как показали компьютерные расчеты, каждый частичный разряд оказывает воздействие на диэлектрик повышением температуры в локальной области. Поскольку разряды, как правило, возникают на каждом полупериоде синусоидального напряжения, с течением времени их действие

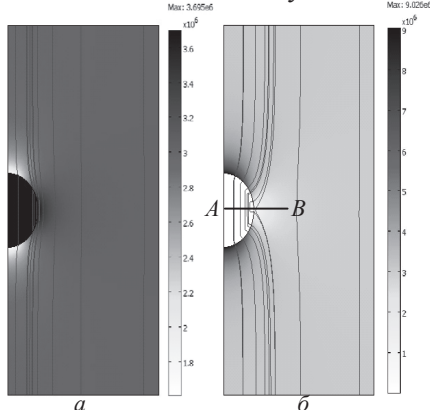


Рис. 2

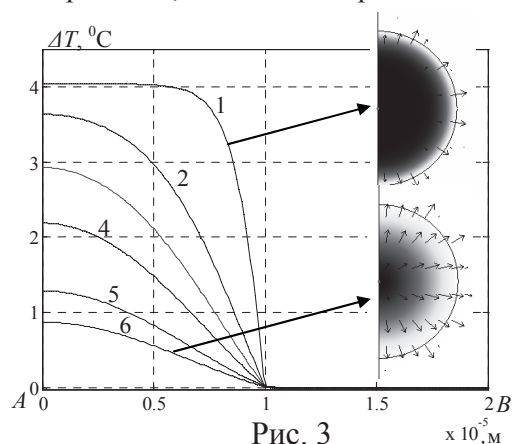


Рис. 3

нарастает. Вследствие локального повышения температуры ускоряются различные химические изоляции в целом. Кроме того, при учете серии частичных разрядов превышение температуры в реакции, что приводит к постепенному изменению структуры и свойств материала, ухудшению локальной микрообласти может оказаться более значительным, чем 2–4 °С, как это имеет место при единичном разряде.

Разработана модель учета поверхностной проводимости воздушного включения. Такая проводимость обусловлена наличием загрязнений и влаги, которые присутствуют в определенном количестве в материале изоляции. К примеру, содержание влаги обнаруживает заметную проводимость, зависящую от толщины слоя, где концентрируется влага. Кроме того, прикладываемое напряжение вызывает накопление поверхностных зарядов, что также связано с явлением поверхностной проводимости. Отметим, что электропроводность поверхностного слоя может быть значительно больше по величине, чем электропроводность среды внутри включения. Следствием отмеченного является протекание поверхностного тока через поверхностный слой [4].

В модели воздушного включения радиусом r с поверхностным слоем задаются толщина слоя d_s и его электропроводность σ_s (см. вставка рис. 4).

На рис. 4 показана зависимость плотности поверхностного тока $J_{s \max}$ от толщины поверхностного слоя включения d_s при $\sigma_s = 10^{-8} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ и $t = 1$ мкс.

Характер распределения плотности поверхностного тока J_s вдоль поверхности включения – по дуге ABC (показана на вставке справа) при электропроводности $\sigma_s = 10^{-8} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, толщине слоя $d_s = 2$ мкм и в момент времени $t = 1$ мкс показан на рис. 5. Как видно, ток течет по поверхности слоя, имея максимальное значение в точке B , отмеченной на вставке.

Выводы

На основе численных экспериментов показано, что для воздушного включения радиуса 10 мкм электрическое поле в окрестности включения в случае частичного разряда увеличивается в 2–3 раза, температура в самом включении при каждом разряде кратковременно возрастает на ~2–4 °С и затем снижается до первоначального значения. При этом во время частичного разряда электрическое поле в воздушном включении резко уменьшается, а материал основной изоляции в окрестности включения за столь малое время практически не нагревается. С учетом кумулятивного эффекта при протекании серии частичных разрядов, нагрев может оказаться более интенсивным, а неоднородность в распределении электрического поля совместно с действием разрядов – привести к разрушению изоляции на микроуровне.

Список литературы

1. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
2. Федоренко Г.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Карпушенко В.П., Грубой О.П., Гримуд Г.И. Перспективы создания в Украине высоковольтного электроэнергетического оборудования на основе современной кабельной технологии. // Гидроэнергетика Украины. – 2007. – № 3. – С. 10–18.
3. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.

4. Ilias H.A., Chen G., Lewin P.L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2011. – Vol. 44. – 15 p. – <http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/24/245202/>

5. Seghir T., Nouar A., Lefkaier K., Mahi D. Study by simulation of the effect of temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable. // Proc. of IEEE Power Tech Conference. – Bologna, Italy. – 23–26 June, 2003. – Vol. 2. – 4 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/PowerTech/papers/169.pdf>

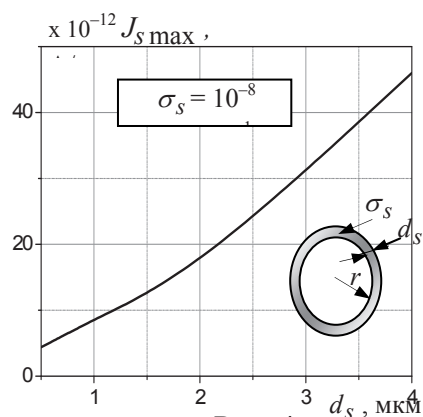


Рис. 4

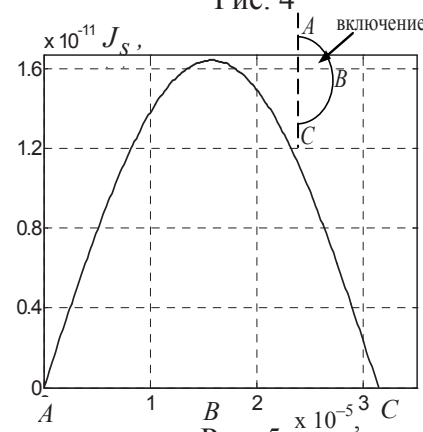


Рис. 5

DISTRIBUTION OF ELECTRIC AND THERMAL FIELDS IN HETEROGENEOUS DIELECTRIC PARTIAL DISCHARGE

I. M. Kucheryava

Institute of Electrodynamics of National Academy of Science of Ukraine

A partial discharge in gas inclusion of polyethylene insulation is simulated as transient process with varying in time electrical conductivity of the inclusion. The problems for computation of electrical and thermal fields are solved simultaneously. The availability of the thin surface layer in inclusion with passing current is simulated. By computer modeling it is revealed that at the origin of partial discharge, the electric field strength near the inclusion is increased 2–3 times and temperature in the inclusion at each discharge is raised by $\sim 2\text{--}4^{\circ}\text{C}$ during short time. Taking into account the cumulative effect of series of running partial discharges, such heating can be higher, and the heterogeneity in electric field distribution along with discharges can lead to insulation degradation on microlevel. References 5, figures 5/

Key words: polyethylene insulation, gas inclusion with surface layer, partial discharge, computer modeling.

1. *Kuchinskii G.S.* Partial discharge in high-voltage constructions. – Leningrad: Energiia, 1979. – 224 p.
2. *Fedorenko G.M., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Karpuchenko V.P., Gruboj O.P., Grimud G.I.* Possibilities of creating in Ukraine of high-voltage electroenergy equipment on the basis of modern cable technology. // *Gidroenergetika Ukraini.* – 2007. – № 3. – p. 10–18.
3. *Dissado L.A., Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
4. *Illias H.A., Chen G., Lewin P.L.* The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2011. – Vol. 44. – 15 p. – <http://iopscience.iop.org/0022-3727/44/24/245202/>
5. *Seghir T., Nouar A., Lefkaier K., Mahi D.* Study by simulation of the effect of temperature on the appearance of partial discharges in gaseous cavities contained in the insulator of high voltage cable. // *Proc. of IEEE Power Tech Conference.* – Bologna, Italy. – 23–26 June, 2003. – Vol. 2. – 4 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/PowerTech/papers/169.pdf>