

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ С ВОЗДУШНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ ЕДИНИЧНОГО ЧАСТИЧНОГО РАЗРЯДА

И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук,
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Выполнено компьютерное моделирование распределения электрического и температурного полей в полимерной изоляции силового кабеля с воздушным включением при возникновении единичного частичного разряда. Частичный разряд рассматривается как переходный процесс в неоднородном диэлектрике, сопровождающийся изменением электропроводности. Разработанная математическая модель реализована методом конечных элементов в пакете программ Comsol. Численным методом показано, что при протекании единичного частичного разряда температура воздушного включения радиусом 10 мкм кратковременно повышается на 2–4 °С. Библ. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: полиэтиленовая изоляция силового кабеля, воздушное включение, частичный разряд, компьютерное моделирование.

Важным критерием оценки качества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является электрическая прочность изоляции, гарантирующая надежность и длительность срока службы кабеля. Электрическая прочность изоляции кабелей на переменном и импульсном напряжениях определяется рядом факторов и, в первую очередь, разного рода макро- и микроразмерными дефектами в материале изоляции, в том числе посторонними включениями – микрополостями и трещинами, заполненными газом, термически и химически деструктурированными частицами материала, инородными частицами и другими дефектами, которые образуются на этапах изготовления изоляции, при транспортировании, прокладке, монтаже кабелей, из-за периодических сжатий и расширений изоляционного материала в режиме нагрузки. Наличие газа в микропустотах в структуре полиэтиленового материала объясняется проникновением водяного пара и летучих продуктов в материал изоляции в производственных процессах ее изготовления.

Дефекты различного характера в изоляционном материале могут достигать значительных размеров и быть первоначально от 1 до 20 мкм в диаметре. Характеризуются они повышенной проводимостью. Напряженность электрического поля внутри газовых включений или вблизи инородных частиц в несколько раз выше, чем в материале изоляции, и может превышать электрическую прочность материала. Это обуславливает возникновение частичных разрядов. Частичные разряды, появляющиеся в "слабых" местах изоляции, в местах резкого усиления напряженности поля, приводят к развитию дефектов и, как следствие, постепенному разрушению изоляции [3–5,8].

Наибольшую опасность представляют частичные разряды в воздушных (газовых) включениях, так как они возникают при меньших напряжениях, чем разряды в жидких и твердых включениях полиэтиленовой изоляции. Это обстоятельство 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 твердой и жидкой изоляцией.

Кроме электрического старения, полиэтиленовая изоляция подвержена тепловой деструкции. 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 нарастает. Вследствие локального повышения температуры ускоряются различные химические реакции, что приводит к постепенному изменению структуры и свойств материала, ухудшению изоляции в целом.

К основным причинам старения изоляции кабелей относятся как электрическое старение из-за частичных разрядов, протекающих в полостях изоляции при перенапряжениях и рабочем напряжении, так и тепловое старение материала. При старении изоляции снижается величина электрической прочности, увеличиваются диэлектрические потери и проводимость изоляции. Поэтому представляет интерес вопрос расчета напряженности электрического поля и распределения температуры в газовых

включениях полиэтиленовой изоляции. Кроме того, в настоящее время изучение электрических и тепловых процессов в изоляции при возникновении частичных разрядов актуально в связи с использованием кабелей с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения (до 500 кВ).

В ряде работ, например, [1,2,6,9–12] методом компьютерного моделирования изучаются физические процессы в полиэтиленовой изоляции силового кабеля. В [11] численно решена электротепловая задача в объеме диэлектрика с учетом изменения электропроводности материала в зависимости от температуры и электрического поля. Моделирование проведено в предположении, что изоляция является слабо проводящим материалом, как это подтверждается в [8]. В [10] исследованы распределения электрического поля в изоляции кабелей с газовым включением в зависимости от величины диэлектрической проницаемости, размеров и конфигурации включения. В [2] проведено численное исследование электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции кабеля также при наличии газового включения, показан характер действия диэлектрической силы и на этой основе представлен механизм разрушения диэлектрика. Авторами работы [1] предложена и реализована модель частичных разрядов в твердой изоляции кабелей на переменном напряжении. При моделировании электрического поля в изоляции со множеством газовых включений учтен стохастический характер возникновения частичных разрядов. В [9,12] численным путем исследованы условия протекания частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей и изменение температуры при этом в газовом включении изоляции. В [6] с помощью компьютерного моделирования проанализированы особенности растекания импульсного тока в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии воздушного включения и при возникновении в нем частичного разряда. Однако решены еще не все вопросы, связанные с пониманием электро- и теплофизических явлений в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей, сопровождающих частичные разряды.

Данная работа посвящена изучению полученных численным методом распределений электрического поля и температуры в шито-полиэтиленовом изоляционном материале с воздушным включением сферической формы при возникновении в нем единичного частичного разряда. Условие частичного разряда в области включения моделируется резким изменением электропроводности по синусоидальному закону. Амплитуда изменения электропроводности выбирается на основе согласования с результатами работы [12]. Отметим, что в работе включением называется элемент изоляции, содержащий наполненную газом полость и участвующий в частичном разряде. Исследование проводится с помощью метода конечных элементов в программном пакете мультифизического моделирования Comsol [7].

Постановка задачи и ее решение. Область для исследования электротепловых процессов содержит фрагмент шито-полиэтиленовой изоляции (СПЭ)

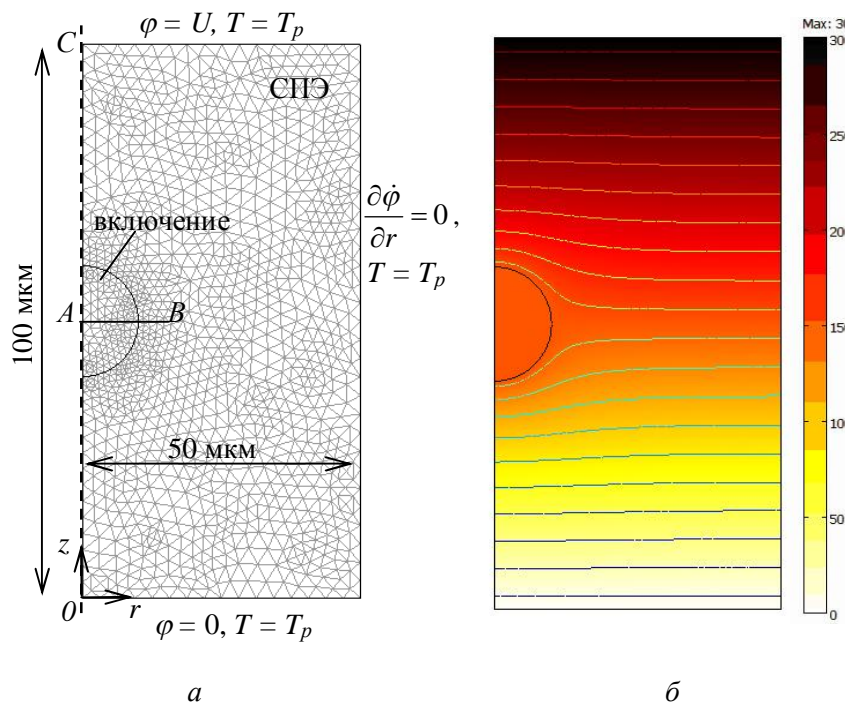


Рис. 1

со встроенным сферическим включением, заполненным воздухом, (рис. 1 а) и находится во внешнем переменном электрическом поле, которое изменяется во времени с частотой 50 Гц. Предполагается, что рассматриваемый фрагмент полиэтиленового материала изотропный, составляет вместе с включением гетерогенную среду и свободен от сторонних зарядов.

Основными уравнениями математической модели, описывающими электротепловые процессы в области изоляции с воздушным включением, являются

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

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

где $\varphi(\mathbf{r}, t)$ – электрический потенциал; T – температура; σ – электропроводность среды; ε_r – диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; ρ , C , λ – соответственно плотность, теплоемкость и теплопроводность среды, Q – мощность теплового источника в единице объема, равная

$$Q = \begin{cases} \sigma_g |\mathbf{E}|^2, & \text{– во включении,} \\ 0, & \text{– в изоляции,} \end{cases} \quad (3)$$

где $\mathbf{E} = -\nabla \varphi$ – напряженность электрического поля, σ_g – электропроводность включения.

Как показывает выражение (3), в качестве источника нагрева во включении учитывается джоулево тепло. Диэлектрические потери в изоляции малы и в расчет не принимаются.

Параметры σ , ε_r , ρ , C , λ имеют различные значения в области включения и в основной изоляции, т.е.

$$\sigma, \varepsilon_r, \rho, C, \lambda = \begin{cases} \sigma_g, \varepsilon_{r_g}, \rho_g, C_g, \lambda_g & \text{– во включении,} \\ \sigma_{снз}, \varepsilon_{r_{снз}}, \rho_{снз}, C_{снз}, \lambda_{снз} & \text{– в изоляции.} \end{cases}$$

Величина электропроводности воздушного включения задается следующим образом:

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

Здесь τ – длительность изменения электропроводности и соответственно длительность разрядного импульса; σ_a – электропроводность воздуха во включении, σ_{\max} – значение электропроводности, задаваемое в соответствии с данными теплового расчета в [12] для включения определенного размера. Отметим, что изменяющаяся во времени электропроводность характеризует разрядный процесс в воздушном включении.

Двумерная расчетная модель, принятая для исследования, представлена как осесимметричная в цилиндрической системе координат rOz (рис. 1, а). Для описания переходного процесса прохождения частичного разряда задачи (1), (2) рассматриваются как нестационарные при определенном значении переменного напряжения ($\varphi = U$), в случае достижения которого предполагается возникновение частичного разряда.

При решении электрической задачи использовались граничные условия в направлении поля: на нижней границе – $\varphi = 0$, 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 на всех границах, кроме осевой симметрии, выбиралась температура, равная рабочей температуре изоляции $T = T_p$ (рис. 1, а).

Как предложено в работе [6], в качестве начального распределения потенциала (в момент времени $t = 0$) выбиралось распределение, найденное из предварительного решения электростатической задачи следующего вида:

$$\nabla \cdot [-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \varphi_0] = 0.$$

Задачи (1) и (2) с соответствующими начальными условиями $\varphi_{t=0} = \varphi_0$, $T_{t=0} = T_p$ являются связанными. Величина мощности потерь Q в (2) определялась в каждый момент времени на основании решения электрической задачи (1).

Решение задач выполнялось методом конечных элементов в программе Comsol при задании малого временного шага интегрирования.

Результаты компьютерного моделирования. Размеры расчетной области, ее разбиение на конечные элементы и граничные условия задач показаны на рис. 1, а. Радиус включения составляет $R_g = 10$ мкм. На верхней границе задавалось фиксированное значение электрического потенциала $\varphi = 300$ В, что при выбранных размерах соответствует среднему значению электрического поля $E_{cp} = 3$ кВ/мм. Длительность частичного разряда $\tau = 1$ мкс. Значение электропроводности $\sigma_{\max} = 1,6$ См/м

обеспечивает согласование со значениями температуры, полученными в [12]. Электрофизические характеристики сред приведены в таблице.

Величина	Значение для	
	СПЭ изоляции	включения
σ , См/м	10^{-12}	10^{-12}
ε_r	2,3	1
ρ , кг/м ³	930	1,2
λ , Вт/(м·К)	0,276	0,024
C , Дж/(кг·К)	2210	1000

Распределение электрического потенциала в расчетной области в начальный момент времени в оттенках серого и в виде изолиний показано на рис. 1, б.

На рис. 2 показаны полученные расчетным путем распределения электрического поля в области с воздушным включением (в оттенках серого) и расположение силовых линий электрического поля

до протекания частичного разряда (рис. 2, а) и в случае частичного разряда (рис. 2, б). Как видно из рис. 2, а, до появления частичного разряда электрическое поле концентрируется в области включения.

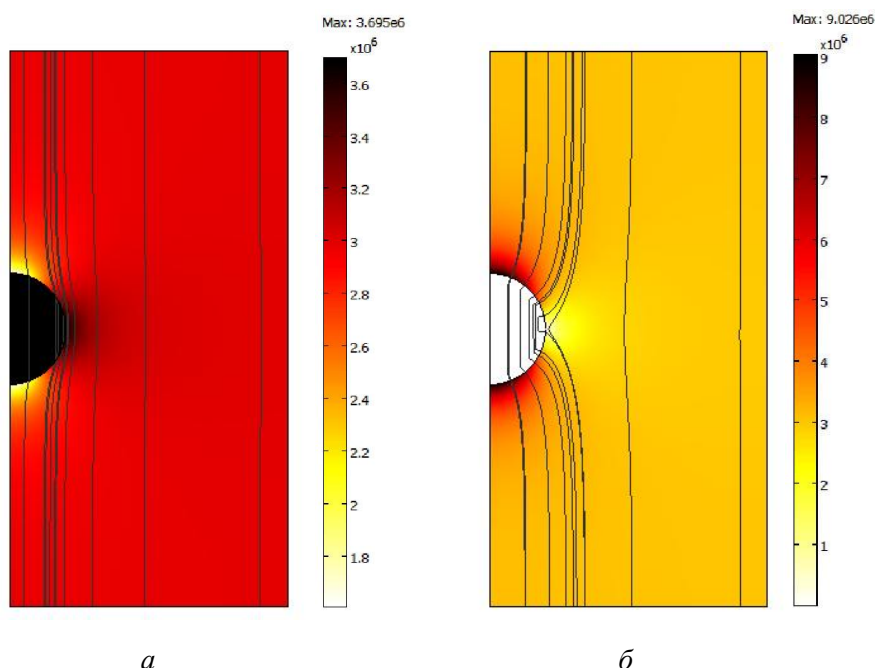


Рис. 2

Именно включение является местом пониженной электрической прочности. Напряженность электрического поля внутри включения и вблизи него значительно выше, чем в основной изоляции, что и обуславливает возникновение частичных разрядов. В области, прилегающей к включению, наблюдается повышение плотности силовых линий электрического поля. Неравномерность в распределении электрического поля увеличивается в случае возникновения частичного разряда (рис. 2, б), поле во включении при увеличении электропроводности отсутствует (рис. 2, б, рис. 3, б и в).

Характеристики области до частичного разряда и после его возникновения ($t = 0,5\tau$) показаны на рис. 3. Представлено изменение электрического потенциала (рис. 3, а) и электрического поля (рис. 3, б) вдоль оси симметрии OC расчетной области, показанной на рис. 1, а. Характер изменения электрического поля по радиусу включения (вдоль отрезка AB) показан на рис. 3, в. Здесь кривые 1 соответствуют случаю до возникновения частичного разряда, кривые 2 – при частичном разряде. Как показано на рис. 3, б, на вершинах включения, ориентированных по полю, имеют место высокие значения напряженности электрического поля. В этих зонах происходят ускоренные процессы старения изоляции, образуются микротрещины, увеличивающие дефект материала в объеме. Характер действия сил в этих зонах исследован в статье [2].

Изменения во времени напряженности электрического поля и приращения температуры на различном расстоянии r от центра включения радиусом R_0 показаны на рис. 4, а и б, соответственно. Значения величин представлены для точек внутри включения при $r < R_0$ и на расстоянии до двух радиусов включения R_0 . Видно, что характер изменения температуры связан с изменением поля в области включения. Наибольшее изменение температуры происходит в центре включения в момент нарастания электропроводности (при $t = 0,1\tau$).

Температура по радиусу включения изменяется во времени, что показано на рис. 5. Здесь представлены кривые для моментов 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 представлены распределения

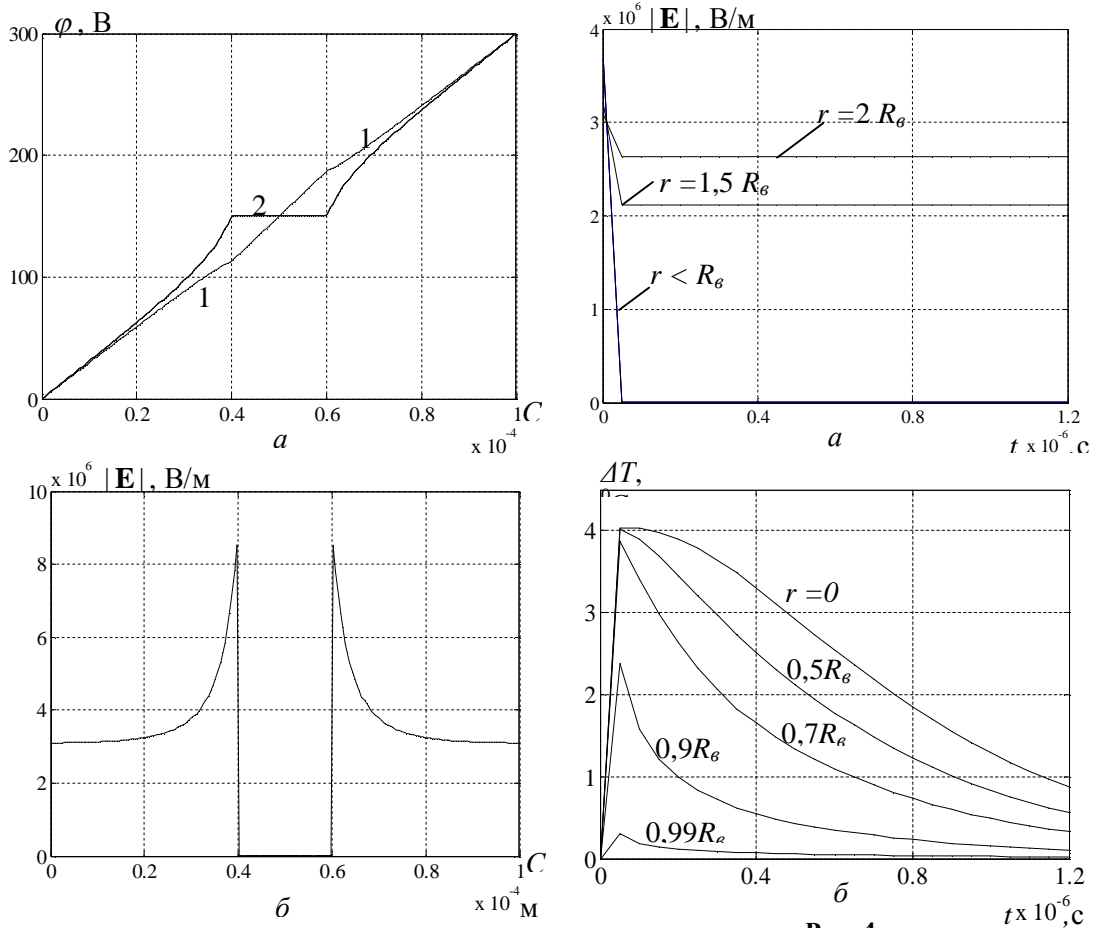


Рис. 4

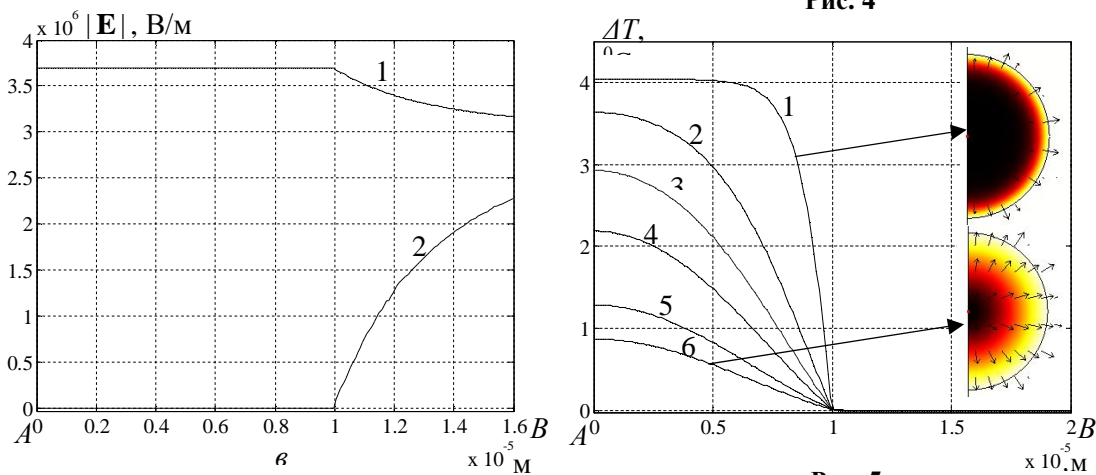


Рис. 5

Рис. 3

температуры (в оттенках серого) и векторы теплового потока в области воздушного включения в момент возникновения частичного разряда (что соответствует приращению температуры $\Delta T_{\max} = 4,04 \text{ } ^\circ\text{C}$) и после разряда ($\Delta T_{\max} = 0,87 \text{ } ^\circ\text{C}$). Такое повышение температуры не столь велико, чтобы оказать существенное влияние на изменение свойств материала и радикальное ослабление его изоляционных свойств. Вместе с тем, можно говорить о тепловом старении локальной области изоляции, при котором могут ускоряться химические реакции, изменяться структура материала на микроуровне. К тому же, температура может изменить интенсивность и напряжение частичных разрядов путем видоизменения конфигурации включения, а также изменения давления газа в нем и проводимости.

Заключение.

В работе для исследования распределения электрического и теплового полей в неоднородной полимерной изоляции силовых кабелей разработана математическая модель, которая воспроизводит

возникновение единичного частичного разряда в воздушном включении в изоляции. Модель реализована на компьютере с использованием метода конечных элементов в программе Comsol. На основе расчетных исследований показана неоднородность распределения электрического поля и температуры в полимерной изоляции кабелей, обусловленная наличием в ней газового включения и возникновением частичного разряда. Для воздушного включения радиуса 10 мкм электрическое поле в окрестности включения в случае частичного разряда увеличивается в 2–3 раза (рис. 2, б), температура в самом включении при частичном разряде кратковременно возрастает на $\sim 2\text{--}4^\circ\text{C}$ и затем снижается до первоначального значения (рис. 4, б и рис. 5). При этом во время частичного разряда электрическое поле в воздушном включении отсутствует (рис. 2, б), а материал основной изоляции в окрестности включения за столь малое время практически не нагревается (рис. 5). Такой нагрев может оказаться более интенсивным при учете серии частичных разрядов.

1. Куперитох А.Л., Стамателатос С.П., Агорис Д.П. Моделирование частичных разрядов в твердых диэлектриках на переменном напряжении // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32. – Вып. 15. – С. 74–81.
2. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефекта // Праці ІЕД НАН України. – 2010. – Вип. 25. – С. 126–132.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. – Ленингр. отделение, 1979. – 224 с.
4. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В.Костенко. – М.: Высш. школа, 1973. – 528 с.
5. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / Под ред. В.П.Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.
6. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Золотарев В.М. Импульсный ток в полиэтиленовой изоляции с воздушным включением при возникновении частичного разряда // Техн. електродинаміка. – 2009. – № 2. – С. 7–12.
7. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>
8. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – Published by Peter Peregrinus for the IEE. – 1992. – 601 p.
9. Nouar A., Guibadj M., Lefkaier I.K., Boubakeur A. Numerical study of partial discharges apparition in XLPE insulation of high voltage cables // Proc. of IEEE Power Tech Conference. – June 23th–26th, 2003, Bologna, Italy. – 7 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Powertech/papers/420.pdf>
10. O.H.N., Blackburn T.R., Phung B.T., Zang H., Khawaja R.H. Investigation of electric field distribution in power cables with voids // Proc. of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. – June, 2006. – P. 637–640.
11. Olson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field // 5th European Thermal-Sciences Conference. – The Netherlands, 18–22 May, 2008. – 8 p.
12. 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>

УДК 621.315.2 : 004.94

Комп'ютерне моделювання електротеплових процесів у полімерній ізоляції кабеля з повітряним включенням при виникненні одиничного часткового розряду

І.М.Кучерява, канд.техн.наук,
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Виконано комп'ютерне моделювання розподілу електричного та температурного полів у полімерній ізоляції силового кабеля з повітряним включенням при виникненні одиничного часткового розряду. Частковий розряд розглядається як перехідний процес у неоднорідному діелектрику, що супроводжується зміною електропровідності. Розроблена математична модель реалізована методом кінцевих елементів у пакеті програм Comsol. Чисельним методом показано, що при протіканні одиничного часткового розряду температура повітряного включення радіуса 10 мкм короткочасно підвищується на $2\text{--}4^\circ\text{C}$. Бібл. 12, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: поліетиленова ізоляція силового кабеля, повітряне включення, частковий розряд, комп'ютерне моделювання.

Computer modeling of electrothermal processes in polyethylene insulation of cable with air inclusion at single partial discharge

I.M.Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Computer modeling of electric and thermal fields in the polyethylene insulation of power cable containing air inclusion is carried out for the case of initiating of single partial discharge. The discharge is considered as transient process in heterogeneous dielectric characterized by changing conductivity. The mathematical model is realized by finite-element method in Comsol. As shown by means of numerical simulation, during single partial discharge the temperature of air inclusion with 10 μm radius momentarily increases by 2–4 $^{\circ}\text{C}$. References 12, table 1, figures 5.

Key words: polyethylene insulation of power cable, air inclusion, single partial discharge, computer modeling.

1. Kupershtokh A.L., Stamatelatos S.P., Agoris D.P. Modeling of partial discharge in solid dielectrics at alternating voltage // Pisma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. – 2006. – Vol. 32. – Is. 15. – P. 74–81.
2. Kucheriava I.N. Computer analysis of electric field and forces in polyethylene insulation of power cable with defect // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Nacionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – Is. 25. – P. 126–132.
3. Kuchinskii G.S. Partial discharges in high-voltage constructions. – Leningrad: Energiia. – Leningradskoe ot-delenie, 1979. – 224 c.
4. High-voltage engineering / Ed. by M.V.Kostenko. – Moskva: Vysshaya shkola, 1973. – 528 p.
5. High-voltage engineering: theoretical and practical applications / Ed. by V.P.Larionova. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 555 p.
6. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Zolotarev V.M. Pulse current in polyethylene insulation with air inclusion at initiation of partial discharge // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – № 2. – P. 7–12.
7. Comsol Multiphysics. – <http://www.comsol.com>
8. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – Published by Peter Peregrinus for the IEE. – 1992. – 601 p.
9. Nouar A., Guibadj M., Lefkaier I.K., Boubakeur A. Numerical study of partial discharges apparition in XLPE insulation of high voltage cables // Proc. of IEEE Power Tech Conference. – June 23th–26th, 2003, Bologna, Italy. – 7 p. – <http://www.labplan.ufsc.br/congressos/Powertech/papers/420.pdf>
10. O.H.N., Blackburn T.R., Phung B.T., Zang H., Khawaja R.H. Investigation of electric field distribution in power cables with voids // Proc. of the 8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. – June, 2006. – P. 637–640.
11. Olson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field // 5th European Thermal-Sciences Conference. – The Netherlands, 18–22 May, 2008. – 8 p.
12. 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>

Надійшла 17.05.2011
Received 17.05.2011