

А.А.ЩЕРБА, член-корр. НАН Украины, А.Д.ПОДОЛЬЦЕВ, докт.техн.наук, (Институт электродинамики НАН Украины, Киев), В.М.ЗОЛОТАРЕВ, канд.техн.наук (ЗАО "Завод "Южкабель", Харьков)

## Импульсный ток в полиэтиленовой изоляции с воздушным включением при возникновении частичного разряда

*В работе исследуются импульсные (с характерным временем  $10^{-6}$  с) процессы распределения плотности тока в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии воздушного включения и при возникновении в нем частичного разряда. Результаты получены путем численного решения методом конечных элементов системы дифференциальных уравнений Максвелла для неоднородного диэлектрика, записанных в квазиэлектростатическом приближении. Изучены особенности растекания импульсного тока в объеме диэлектрика. Показано, что только часть от общего тока (25—30%), протекающего в объеме включения при возникновении в нем частичного разряда, замыкается через внешнюю цепь и фиксируется приборами, измеряющими уровень частичных разрядов в кабеле.*

*У роботі досліджуються імпульсні (з характерним часом  $10^{-6}$  с) процеси розподілу щільності струму в поліетиленовій ізоляції силового кабелю за наявності повітряного включення та при виникненні у ньому часткового розряду. Результати отримано шляхом чисельного розв'язку методом кінцевих елементів системи диференціальних рівнянь Максвелла для неоднорідного діелектрика, що записані у квазіелектростатичному наближенні. Досліджено особливості розтікання імпульсного струму в об'ємі діелектрика. Показано, що тільки частина від загального струму (25—30%), що протікає у об'ємі включення при виникненні у ньому часткового розряду, замикається через зовнішнє коло та фіксується пристроями, які вимірюють рівень часткових розрядів у кабелі.*

**Введение.** Силовые кабели являются важной составной частью передающих и распределительных электрических сетей, поскольку они позволяют доставлять энергию в те районы, которые недоступны для воздушных линий электропередачи. Наиболее привлекательной и ценной особенностью подземных кабельных линий электропередачи является присущая им высокая надежность эксплуатации из-за отсутствия внешних атмосферных воздействий (ветер, гололед, грозовые перенапряжения), отсутствие опор и хорошая электромагнитная совместимость с окружающей средой по сравнению с воздушными линиями.

В последние годы в электрических сетях Украины кабели с пластмассовой изоляцией активно замещают кабели с бумажной пропитанной и маслонаполненной изоляцией в классах среднего и высокого напряжения. Среди пластмассовых изолирующих материалов в силовых кабелях наиболее предпочтительным является сшитый полиэтилен (СПЭ) ввиду его хороших диэлектрических свойств — низкая величина диэлектрической проницаемости и фактора потерь, а также большого запаса термической стойкости. В настоящее время энергосистемы Украины ориентированы на применение в распределительных сетях именно таких кабелей с СПЭ-изоляцией. Предпосылками для этого является наряду с их высокими эксплуатационными показателями наличие отечественного производства, в частности, на ЗАО "Завод "Южкабель", г. Харьков.

Монолитная полимерная изоляция силового кабеля, в отличие от бумажной пропитанной изо-

ляции, является более чувствительной к разного рода дефектам, которые повышают локальную напряженность электрического поля, снижают пробивное напряжение и создают предпосылки для образования электрических и водных триингов. Известно, что старение и последующий пробой полимерной изоляции силовых кабелей происходит при длительном воздействии переменного напряжения в результате роста триингов, состоящих из наполненных газом микроканалов [4,9] с характерным диаметром порядка 1 мкм. Триинги начинают расти в местах с повышенной локальной напряженностью электрического поля — в местах микровыступов на поверхности электродов, проводящих и воздушных включений, микротрещин, полостей и т.д. Пробой изоляции кабеля происходит в случае перекрытия межэлектродного промежутка возникшей многоканальной структурой. Рост триингов является следствием разрушения диэлектрика под действием частичных разрядов, происходящих в его микроканалах. Таким образом, рост триингов и возникновение частичных разрядов являются взаимосвязанными процессами, потенциально приводящими к пробое изоляции. Динамика роста триингов и параметры частичных разрядов зависят от физико-химических свойств диэлектрика, частоты и величины прикладываемого напряжения, геометрии электродов и т.д.

Изучение роста триингов стало особенно актуальным в последнее время в связи с использованием кабелей с полимерной изоляцией на напряжение до 110 кВ. С помощью электронно-оптических и электронных измерительных установок

были определены параметры частичных разрядов и пространственно-временные характеристики роста дендритов [6,7,11,16]. Однако несмотря на интенсивные исследования, количественная теория, описывающая рост трингов под действием частичных разрядов, до сих пор не разработана из-за трудностей, обусловленных большим числом взаимосвязанных физико-химических процессов, приводящих к разрушению диэлектрика, и сложным стохастическим характером роста трингов.

В последние годы были предложены различные математические модели, позволяющие описать стохастически ветвящийся характер роста дендритов, например, в [1,3,10,12,15,17,18]. Наиболее интересные результаты были получены на основе модели пробоя диэлектриков [1,3,15,17,18] и модели разрядных лавин [10,12]. В модели пробоя диэлектриков рост каналов определяется напряженностью электрического поля. Вероятность роста каналов принимается пропорциональной степени локальной напряженности поля. Распределение электрического поля рассчитывается на основе уравнения Лапласа. Потенциал тринга принимается равным потенциалу электрода или задается падение напряжения вдоль каналов. С помощью различных модификаций модели пробоя диэлектриков проведено моделирование формирования различных типов трингов (в виде дерева или куста) [18,3], изучено влияние барьеров и включений с различной диэлектрической проницаемостью [3], проводимостью [1] и прочностью [17] на рост каналов. В модели разрядных лавин [10,12] рассматривается накопление разрушений в материале диэлектрика под действием электронных лавин. Рост каналов описывается с помощью случайных флуктуаций локального электрического поля. Задавая различные диапазоны флуктуации, в рамках этой модели также удалось описать рост различных типов трингов.

К недостаткам перечисленных моделей роста трингов следует отнести то, что в них не учитываются частичные разряды во включениях и каналах тринга и, следовательно, не описывается реальная динамика распределения зарядов и полей в диэлектрике. Вместе с тем существующие модели частичных разрядов (например, [8,19]) не рассматривают сам процесс роста трингов и не могут быть использованы для количественного описания пробоя изоляции. Поэтому представляется актуальным создание комплексной модели, описывающей как рост трингов под действием частичных разрядов, так и возникновение частичных разрядов в существующих каналах.

Существует и другой аспект этой проблемы, связанный с тем, что в последнее время для диагностики состояния силовых кабелей все более широко используется метод измерения уровня частичных разрядов (ЧР) в изоляции. В настоящее время делаются попытки распознавания величины и вида дефекта в изоляции по измеренным харак-

теристикам ЧР (например, [5,13,14]). С точки зрения развития общей теории электрофизических процессов в полимерной изоляции и ее практического использования важно получить любую дополнительную информацию о характере протекания токов и движения зарядов в диэлектрике при возникновении частичных разрядов.

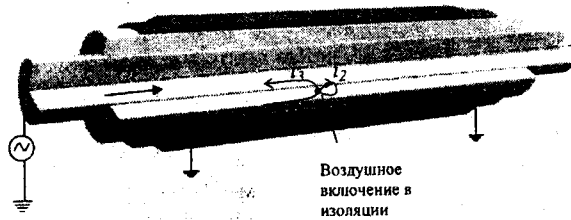
Целью настоящей работы является построение электрофизической модели импульсных процессов в полимерном диэлектрике с воздушным включением при возникновении в его объеме частичного разряда, численная реализация этой модели методом конечных элементов и анализ на ее основе процессов растекания импульсного тока в объеме изоляции. В основу реализованного подхода положен численный расчет двумерного импульсного электрического поля в изоляции кабеля, выполненный на основе метода конечных элементов с помощью пакета программ COMSOL [20].

**Математическое описание импульсных электрических процессов в диэлектрике, содержащем воздушное включение.** Для разработки математической модели будем рассматривать следующий физический процесс.

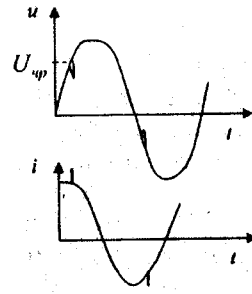
1. Силовой кабель содержит изоляцию из сшитого полиэтилена, в объеме которой существуют воздушные включения, возникшие, например, при случайных отклонениях в технологическом процессе экструдирования изоляции. Рассмотрим одно из этих включений (выделенное включение) для последующего анализа происходящих в нем электроразрядных процессов (рис. 1).

2. Кабель находится под переменным напряжением 330 кВ 50 Гц. При нарастании напряжения по гармоническому закону величина электрического поля в изоляции кабеля и в объеме включения также нарастает. При определенном значении этого напряжения величина поля во включении достигает величины возникновения частичного разряда  $E_{чр}$ , которая для случая воздуха при атмосферном давлении может быть принята равной  $E_{чр} \approx 3$  кВ/мм. При пробое воздушного промежутка в объеме включения протекает импульсный ток. В простейшем приближении этот процесс может моделироваться как результат кратковременного увеличения электропроводности воздуха, например, [2].

3. Электрический ток, протекающий в объеме включения, имеет импульсный характер — длительность импульса составляет 1 мкс. Этот электрический ток проводимости замыкается частично в виде токов смещения (емкостных токов) по объему изоляции, прилегающему к включению, — ток  $i_2$  на рис. 1 *a*, и частично по пути — изоляционный промежуток между включением и электродами (жилы и экрана), жила кабеля, земля и экран кабеля — ток  $i_3$  на рис. 1, *a* (на рис. 1, *б* показаны наблюдаемые кратковременные импульсы тока и напряжения при частичном разряде в изоляции



а Рис. 1



б

кабеля). При этом полный ток, протекающий через включение в результате возникшего частичного разряда, равен сумме этих токов —  $i_1 = i_2 + i_3$ . На практике измеряется величина тока  $i_3$ , хотя для прогнозирования состояния кабеля необходимо оценивать величину тока  $i_1$ , непосредственно отражающего процессы во включении. Следовательно, количественный анализ отношения  $k_f = i_3 / i_1$  представляет практический интерес. Расчету значения этого коэффициента посвящена настоящая работа. В качестве расчетной области рассмотрим элемент объема изоляции, содержащий воздушное включение (рис. 2). Полагаем, что полимерная изоляция, окружающая включение, характеризуется постоянными значениями диэлектрической проницаемости  $\epsilon_0 \epsilon_r$  и электропроводности  $\sigma$ . Воздушная среда во включении характеризуется диэлектрической проницаемостью вакуума  $\epsilon_0$  и изменяющейся во времени электропроводностью, характеризующей разрядный процесс. Распределение изменяющегося во времени электрического поля в такой среде с изменяющимися во времени параметрами описывается следующими дифференциальными уравнениями, полученными из системы уравнений Максвелла в приближении квазиэлектростатического поля,

$$\nabla \cdot (\sigma \mathbf{E} + \partial \mathbf{D} / \partial t) = 0, \quad (1a)$$

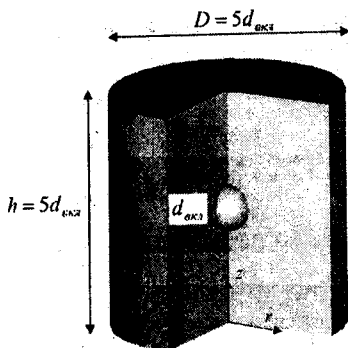


Рис. 2

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \Rightarrow \mathbf{E} = -\nabla \varphi, \quad (1б)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}. \quad (1в)$$

Здесь уравнение (1а) отражает тот факт, что дивергенция плотности полного тока в неоднородном диэлектрике (включает плотность тока проводимости и тока смещения) равна нулю. Из второго уравнения (1б) следует, что напряженность электрического поля является потенциальным вектором, характеризующимся скалярным электрическим потенциалом  $\varphi$ , а третье уравнение (1в) является уравнением состояния для линейного изотропного диэлектрика.

После подстановки (1б) и (1в) в (1а) получим следующее дифференциальное уравнение для электрического потенциала  $\varphi(\mathbf{r}, t)$ :

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \varphi - \epsilon_0 \epsilon_r \nabla \partial \varphi / \partial t) = 0. \quad (2)$$

В качестве начального значения  $\varphi|_{t=0} = \varphi_0$  используется решение вспомогательной электростатической задачи вида

$$\nabla \cdot (-\epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi_0) = 0$$

при следующих граничных условиях: на нижней границе  $\varphi_0 = 0$ , на верхней границе  $\varphi_0 = U_0$ , а на боковых границах принимается условие электрической изоляции —  $\partial \varphi_0 / \partial n = 0$ . То есть предполагается, что при достижении на границе расчетной области критического значения  $U_0$  возникает частичный разряд в области воздушного включения, процессы в котором моделируются изменяющейся электропроводностью  $\sigma_{\text{вкл}}(t)$ . При этом значение  $\sigma$  в (2) определяется как

$$\sigma(x, y) = \begin{cases} \sigma_1 & \text{в изоляции} \\ \sigma_{\text{вкл}}(t) & \text{во включении,} \end{cases}$$

$$\varepsilon_r(x,y) = \begin{cases} \varepsilon_1 & \text{в изоляции} \\ \varepsilon_2 & \text{во включении.} \end{cases}$$

В качестве граничных условий на боковых границах расчетной области нормальная компонента плотности полного тока полагается равной нулю.

Для решения нестационарной полевой задачи (2) с указанными начальными и граничными условиями и электростатической полевой задачи (3) в работе использовался численный метод конечных элементов, реализованный в пакете COMSOL [20]. Далее приведены результаты расчетов и их анализ.

**Анализ результатов расчета.** Рассматривается случай, когда воздушное включение, расположенное в объеме полиэтиленовой изоляции силового кабеля, имеет сферическую форму диаметром  $d_{\text{вкл}} = 200$  мкм. Основные геометрические размеры расчетной области показаны на рис. 2. Учитывая простую форму включения и наличие осевой симметрии, расчет поля выполнялся в двумерной постановке в цилиндрической системе координат в плоскости  $rOz$ .

Электрические параметры двух сред принимались равными:  $\varepsilon_1 = 2,4$ ,  $\sigma_1 = 10^{-12}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>,  $\varepsilon_2 = 1$ ,

$$\sigma_{\text{вкл}}(t) = \begin{cases} \sigma_2 + \sigma_{\text{max}} \sin(\pi t / \tau), & t \leq \tau \\ 0, & t > \tau, \end{cases}$$

где  $\sigma_2 = 10^{-12}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>,  $\sigma_{\text{max}} = 10^{-6}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>,  $\tau = 1$  мкс — длительность разрядного импульса. Величина потенциала на верхней границе задавалась как  $U_0 = E_0 / h$ , где  $E_0 = 2,4$  кВ/мм — средняя напряженность поля в диэлектрике, при которой во включении напряженность поля становится равной 3 кВ/мм — напряженности пробоя воздушного промежутка.

После расчета пространственно-временного распределения электрического потенциала  $\varphi(t)$ , величина плотности полного тока определяется как

$$\mathbf{J}_{\text{tot}}(t) = -\sigma \nabla \varphi - \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \partial \varphi / \partial t.$$

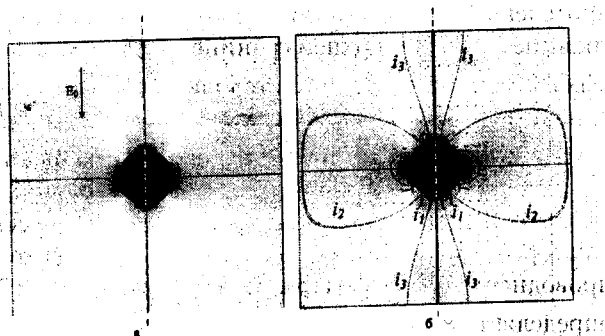


Рис. 3

На рис. 3, а показано распределение напряженности электрического поля  $E = -\nabla \varphi$  в диэлектрике с воздушным включением до возникновения частичного разряда, полученное в результате решения полевой задачи (3). В области воздушного включения существует повышенное поле, равное при принятых значениях параметров  $E_{\text{max}} = 1,23E_0$ , где  $E_0$  — среднее значение поля в диэлектрике. В результате пробоя воздушного промежутка в объеме включения протекает импульсный электрический ток проводимости  $i_1$  (рис. 3, б), где с помощью стрелок и силовых линий показано распределение плотности тока частичного разряда в момент времени  $t = 0,5\tau$ . При этом часть этого тока в виде токов смещения замыкается по прилегающей области диэлектрика в виде обратных токов (токи  $i_2$  на рис. 3, б), а другая часть, также токи смещения, замыкается через верхнюю и нижнюю границу расчетной области (токи  $i_3$  на рис. 3, б) и далее через внешнюю электрическую цепь кабеля. Отметим, что токи  $i_2$  практически невозможно измерить, и именно токи  $i_3$  от всех включений, расположенных по всей длине кабеля и в которых в данный момент времени произошел частичный разряд, измеряются аппаратурой, фиксирующей токи частичных разрядов силового кабеля.

Характер распределения  $z$ -составляющей плотности полного импульсного тока  $\mathbf{J}_{\text{tot}}$  в объеме включения и прилегающей области диэлектрика вдоль указанной линии  $Oz$  и в различные моменты времени показан на рис. 4. Плотность тока во включении распределена равномерно, а в прилегающем диэлектрике наблюдается спад тока по закону, близкому к экспоненциальному — значительное затухание плотности происходит на характерном расстоянии порядка  $0,5d_{\text{вкл}}$ . Максимальное значение плотности тока достигается в момент достижения максимума величины электропроводности включения  $t = 0,5\tau$ .

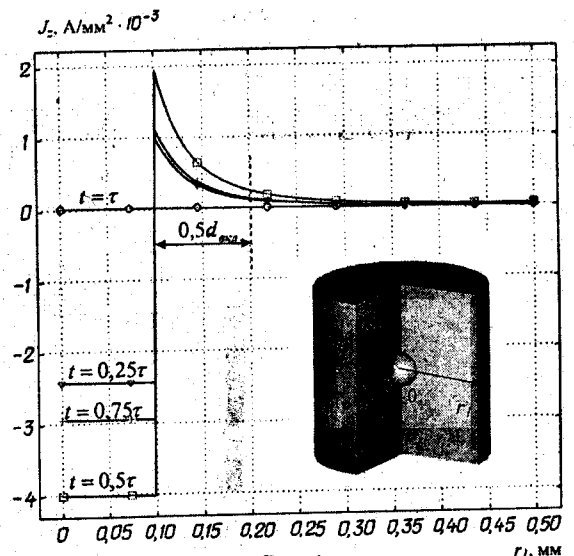


Рис. 4

На рис. 5 показано растекание плотности полного импульсного тока вдали от воздушного включения на границе расчетной области (вдоль указанной линии  $0r_2$ ) и в различные моменты времени. Импульсный ток "вытекает" из объема, содержащего включение с частичным разрядом, через круговую область с радиусом  $2d_{\text{вкл}}$ .

В качестве интегральных характеристик процесса в работе рассматривались изменяющиеся во времени токи, протекающие по сечению вклю-

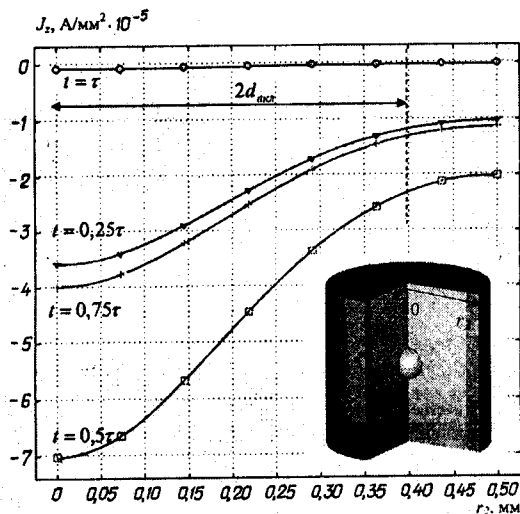


Рис. 5

чения (ток  $i_1$  — полный ток во включении), по сечению прилегающего к нему диэлектрика (ток  $i_2$  — обратный ток) и по сечению расчетной области (ток  $i_3$  — ток, замыкающийся через внешнюю цепь), вычисляемые на основании следующих выражений:

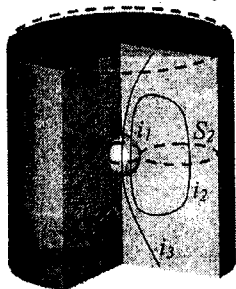
$$i_1(t) = \int_{S_1} J_z dS, \quad i_2(t) = \int_{S_2} J_z dS, \quad i_3(t) = \int_{S_3} J_z dS,$$

где обозначение сечений показано на рис. 6, а.

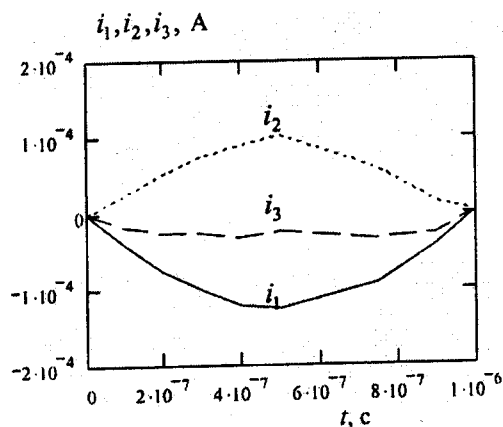
На рис. 6, б показаны зависимости изменения во времени этих токов, из которых следует, что максимум значений рассматриваемых токов достигается в момент времени  $t = 0,5\tau$ , а величина тока, замыкающегося через внешнюю цепь (ток  $i_3$ ), составляет лишь малую часть от полного тока включения.

Для более детального анализа соотношения между токами  $i_1$  и  $i_3$  на рис. 6, в показано изменение во времени их отношения. Видно, что величина  $i_3$  составляет в среднем 25–30% от полного тока во включении — тока  $i_1$ .

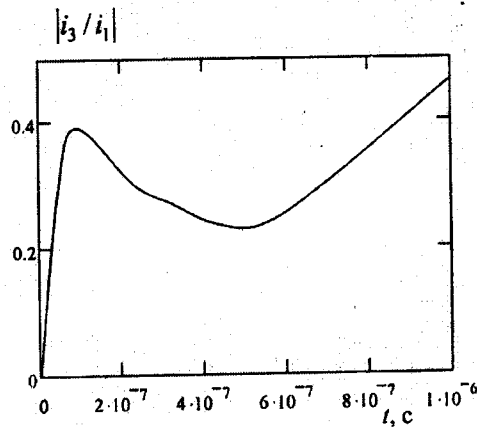
Таким образом, измеряя ток от частичных разрядов во внешней цепи кабеля, можно оценить величину тока, протекающего непосредственно в объеме всех включений, генерирующих в данный момент времени разрядный ток. Величина такого тока будет иметь в 3–4 раза большее значение.



а



б



в

Рис. 6

В качестве энергетической характеристики процесса в работе рассматривалась величина полной энергии, выделяемой в воздушном включении за время протекания разрядного тока, вычисляемая как

$$W_{\text{вкл}} = \int_0^{\tau} \int_V |\mathbf{J}|^2 / \sigma dV dt,$$

где  $V$  — объем включения.

По результатам численного расчета для исследуемого случая получено значение  $W_{\text{вкл}} = 2 \cdot 10^{-8}$  Дж. С ростом размера включения эта величина при прочих равных условиях будет изменяться пропорционально  $d_{\text{вкл}}^3$ . Энергия  $W_{\text{вкл}}$  воздействует на поверхность включения, вызывая нагрев и разрушение поверхностных слоев диэлектрика. Учитывая, что поверхность включения пропорциональна  $d_{\text{вкл}}^2$ , можно заключить, что с ростом размеров воздушного включения разрушение его поверхности будет происходить более интенсивно. Хотя критическая величина выделяемой энергии во включении не известна, экспериментально было установлено, что наличие в полимерной изоляции включений диаметром более 50 мкм приводит к ее быстрому старению и последующему пробою.

**Выводы.** В работе разработана новая математическая модель для анализа импульсных процессов в полимерной изоляции силового кабеля при наличии воздушного включения в случае возникновения в нем частичного разряда. Для численной реализации модели на компьютере предложено использовать метод конечных элементов и вычислительные возможности пакета COMSOL. Результаты проведенных компьютерных исследований показали, что разрядный ток, возникающий в воздушном включении, частично замыкается в виде обратных токов по объему прилегающего диэлектрика и частично через внешнюю цепь. Величина тока, замыкающегося через внешнюю цепь, составляет 25–30% от полного разрядного тока включения.

1. Карнов Д.И., Лопатин В.В., Носков М.Д. // Электричество. — 1995. — № 7. — С. 59–61.
2. Кац М.А., Киншт Н.В. К анализу переходных процессов в несовершенном диэлектрике с нелинейной неоднородностью // Электричество. — 2006. — № 11. — С. 65–68.
3. Кухта В.Р., Лопатин В.В., Носков М.Д. // ЖТФ. — 1995. — Т. 65. — Вып. 2. — С. 63–75.
4. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. — Л.: Энергия. — 1979.
5. Резинкина М.М., Резинкин О.Л., Носенко М.И. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита. // ЖТФ. — 2001. — Т. 71. — Вып. 3. С. 69–71.
6. Champion J.V., Dodd S.J. // Journal Phys. D. — 1996. — Vol. 29. — Pp. 862–868.
7. Champion J.V., Dodd S.J., Alison J.M. // Journal Phys. D. — 1996. — Vol. 29. — Pp. 2689–2695.
8. Champion J.V., Dodd S.J. // J. Phys. D. — 1998. — Vol. 31. — Pp. 2305–2314.
9. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical Degradation and Breakdown in Polymers. — London: Peregrinus. — 1992.
10. Dissado L.A., Sweeney P.J. // Phys. Rev. B. — 1993. — Vol. 48. — Pp. 16261–16268.
11. Ehara Y., Naoe M., Urano K. et al. // IEEE Trans. Dielectrics El. — 1998. — Vol. 5. — Pp. 728–733.
12. Fothergill J.C., Dissado L.A., Sweeney P.J. // IEEE Trans. Dielectrics El. — 1994. — Vol. 1. — Pp. 474–486.
13. Hoof M., Patch R. // 9<sup>th</sup> Intern. Symposium on High Voltage Engineering. — 1995. — Vol. 5. — P. 5606.
14. Kreuger F.H., Gulski E., Krivda A. // IEEE Trans. on Electr. Insulation. — 1993. — Vol. 28. — № 6. — Pp. 917–931.
15. Niemeyer L., Pictronerio I., Wiesmann H.J. // Phys. Rev. Lett. — 1984. — Vol. 52. — Pp. 1033–1036.
16. Suwarno, Suzuoki Y., Komori F. et al. // J. Phys. D. — 1996. — Vol. 29. — Pp. 2922–2931.
17. Sweeney P.J., Dissado L.A., Cooper J.M. // J. Phys. D. — 1992. — Vol. 25. — Pp. 113–119.
18. Wiesmann H.J., Zeller H.R. // J. Appl. Phys. — 1986. — Vol. 60. — Pp. 1770–1773.
19. Wu K., Suzuoki Y., Muzutani T. et al. // J. Phys. D. — 2000. — Vol. 33. — Pp. 1197–1201.
20. comsol.www.com

Надійшла 22.07.2008