

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ СПЭ ИЗОЛЯЦИИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТОКА ВБЛИЗИ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

Щерба М.А., ст. преподаватель

НТУУ «КПИ», кафедра теоретической электротехники

Лысенко С.А., студент

НТУУ «КПИ», кафедра возобновляемых источников энергии

Введение. В последние годы теория расчета сильных электрических полей в диэлектрических средах получила новый толчок к развитию. Это связано с широким применением в качестве изоляционного материала на высокие и сверхвысокие напряжения сшитого полиэтилена (СПЭ) [6]. На протяжении последних 40 лет шла борьба за повышение электрической прочности и долговечности СПЭ изоляции. В фундаментальных работах [2, 3, 6] было обосновано, что основной причиной ее деградации и впоследствии пробоя является образование и развитие водных микровключений и микротрещин.

Научное сообщество существенно продвинулось в понимании механизмов трингообразования и влияния на этот процесс различных параметров. Так проводились исследования [2, 3] по:

- определению конфигурации водных включений и трингов, микротрещин и структурных неоднородностей сшитого полиэтилена;
- расчетам распределения электрических, механических и температурных полей в СПЭ изоляции;
- влиянию на развитие трингов влаги, частоты и амплитуды приложенного синусоидального электрического поля (ЭП), температуры;

С развитием современных вычислительных и экспериментальных возможностей перед исследователями появляются новые задачи, направленные на уточнения описанных и определение новых электрофизических процессов в диэлектрике с водными трингами. Одной из таких задач является учет нелинейных свойств СПЭ изоляции в сильных электрических полях. В работах [1, 4, 5] показано, что в локальных областях диэлектрика при достижении пороговых значений напряженности поля E его удельная проводимость σ и относительная диэлектрическая проницаемость ϵ становятся функциями от E .

Учет зависимости электрических характеристик СПЭ изоляции от напряженности ЭП позволяет уточнить характер усиления электрического поля, а также изменения плотности полного тока в диэлектрике вблизи проводящих микродефектов, что и стало **целью данной работы**.

Явления поляризации и проводимости в сшитом полиэтилене можно представить перемещением носителей зарядов (главным образом ионов) в периодических потенциальных ямах [2, 3]. Под действием сильного ЭП высота потенциального барьера в направлении поля уменьшается, что приводит к увеличению вероятности "прыжка" носителей заряда в направлении поля. Математически это можно описать увеличением удельной проводимости $\sigma(E)$ и

относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(E)$ с ростом напряженности ЭП.

Поскольку на границе вода - сшитый полиэтилен величина удельной проводимости σ изменяется на 12 порядков (от 10^{-2} до 10^{-14} См/м), а величина диэлектрической проницаемости ε – менее, чем на 2 порядка (от 80 до 2,4), то в данной статье (как и в работах [1, 4, 5]) при расчете распределения ЭП учитывается только изменение σ , а изменением ε пренебрегается.

На основании экспериментальных данных [1] и разработанной по ним теоретической модели [5] выражение для описания зависимости $\sigma(E)$ имеет вид:

$$\sigma(E, T) = \frac{\exp(a+b/T)}{E(T)} \operatorname{sh}\left(\frac{kE(T)}{T}\right), \quad (1)$$

где a и b – расчетные постоянные, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

Окончательное аппроксимационное выражение для $\sigma(E)$, которое с точностью более 98 % сходится с экспериментальными данными имеет вид [1]:

$$\sigma(E, T) = \frac{\exp(2,79 - 6698/T + 1,24 \cdot 10^{-7} \cdot E(T))}{E(T)}. \quad (2)$$

Постановка задачи. В данной работе рассматривался слой СПЭ изоляции толщиной 1 мм вблизи токопроводящей жилы кабеля 330 кВ. К слою приложено синусоидальное напряжение частотой 50 Гц и амплитудой 10 кВ. В слое есть гетерогенные водные включения имеющие форму эллипсоидов вращения с полуосями от 15 до 50 мкм, (см. рис. 1). Диэлектрическая среда считалась однородной, изотропной, с проводимостью изменяющейся согласно уравнению (2). Задача решалась в квазистатическом допущении: $\partial \mathbf{B} / \partial t = 0$. Вводился скалярный электрический потенциал φ согласно уравнению $\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi$.

Вектор плотности полного тока $\mathbf{J}_{\text{полн}}$ представлен в виде суммы векторов токов проводимости $\mathbf{J}_{\text{пр}}$ и смещения $\mathbf{J}_{\text{см}}$, и определяется из уравнения (3):

$$\mathbf{J}_{\text{полн}} = \mathbf{J}_{\text{пр}} + \mathbf{J}_{\text{см}} = \sigma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -\sigma(E) \nabla \varphi - \varepsilon \frac{\partial \nabla \varphi}{\partial t}. \quad (3)$$

Из уравнений Максвелла и уравнения (2) расчетное уравнение для распределения потенциал φ по объему слоя изоляции имеет вид [4]:

$$\operatorname{div} \left[\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0. \quad (4)$$

Для получения единственного решения, уравнение (4) на верхней и нижней границах расчетной области дополнялось условиями Дирихле (заданием значений потенциалов), а на боковых границах – условиями Неймана (равенством нулю производных потенциалов по нормали к поверхности). На границе раздела СПЭ изоляция – водное микровключение задавались условия равенства потенциалов и нормальных компонент плотности тока [4, 6, 7]:

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t), \quad (5) \quad (\mathbf{J}_{1 \text{ полн}} - \mathbf{J}_{2 \text{ полн}}) \mathbf{n} = 0. \quad (6)$$

Расчетный интервал времени Δt дискретизировался, и уравнение (4) решалось методом конечных элементов для всех моментов времени t_i с учетом нелинейной зависимости, определяемой согласно выражению (2).

Результаты исследований. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 1, где показано распределение напряженности ЭП E и плотности полного тока $J_{\text{полн}}$ в СПЭ изоляции возле группы близко расположенных водных микровключений.

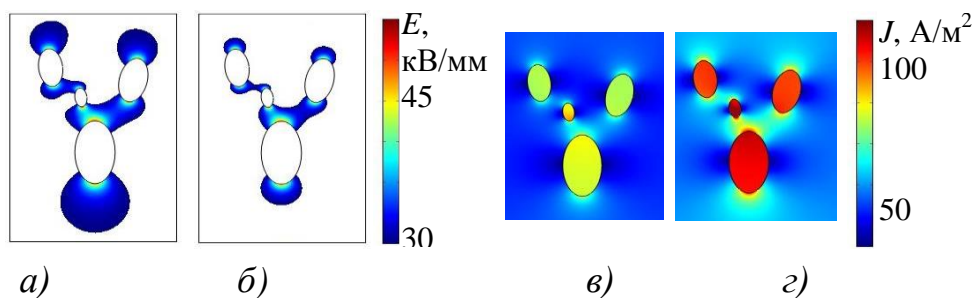


Рисунок 1 – Распределение напряженности ЭП и плотности полного тока в СПЭ изоляции возле водных микровключений

Величины E и $J_{\text{полн}}$ в каждой точке среды определяется согласно шкале на рис. 1 справа. Анализируя полученные результаты и сравнивая их с результатами при линейных свойствах изоляции при $\sigma = \text{const}$ [7] можно сделать следующие **выводы**:

Учет нелинейной зависимости удельной проводимости сшитой полиэтиленовой изоляции от напряженности электрического поля позволяет уточнить характер распределения в ней напряженности поля и плотности полного тока. Проведенные расчеты позволили выявить многократное увеличение плотности тока вблизи полюсов проводящих микровключений (в 900 раз), при уменьшении напряженности поля (в 12 раз). Это может приводить к локальным перегревам, ухудшению электрической и механической прочности изоляции и соответственно к ее деградации в сильном электрическом поле.

Перечень ссылок

1. *Boggs, S.A.* Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof. *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE Transactions on 2.1 (1995): 97–106.
2. *Dissado L.A. and Fothergill J.C.* Electrical degradation and breakdown in polymers // IEE Materials and Devices Series 9, 1992. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK. – 601 p.
3. *O'Dwyer J.J.* The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973.
4. *Shcherba M.A.* The Analysis of Solid Dielectrics Nonlinear Conductivity Influence on a Low-Frequency Electric Field Distribution in them // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), 2015, Lviv, Ukraine, pp. 185 – 187.
5. *Tokoro T., Nagao M. and Kosaki M.* High Field Dielectric Properties and ac Dissipation Current Waveforms of Polyethylene Film, *IEEE Trans EI*, Vol. 27, No. 3, pp. 482-487, June 1992
6. *Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Наш формат, 2013. – 550 с.
7. *Щерба М.А.* Возмущение электрического поля проводящими включениями в диэлектриках. – К.: Наш Формат, 2013. – 223 с.