

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СПЭ ИЗОЛЯЦИИ ВОЗЛЕ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ ОБЪЕДИНЕННЫХ ПРОВОДЯЩИМИ КАНАЛАМИ

Щерба М.А., к.т.н., доц.

КПИ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретическої електротехніки

Бугаенко А.О., студент

КПИ ім. Ігоря Сікорського, кафедра возобновляемых источников энергии

Введение. На сегодняшний день известно много работ, посвященных исследованию распределения электрического поля (ЭП) в сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции силовых кабелей, вблизи водных микровключений и микротриингов различных размеров, форм и взаимных расположений [2, 3, 8-11]. С развитием современных вычислительных методов и появлением их программных реализаций стало возможным решение недоступных ранее задач [1, 6]. Это обеспечит более глубокое понимание известных и поспособствует выявлению новых механизмов разрушения твердого диэлектрика в сильных ЭП.

Исследования механизмов пробоя твердого диэлектрика в сильном ЭП является сложной мультифизической задачей, состоящей из электрической, механической и тепловой задач с сильными взаимными связями [8]. Вблизи полюсов включений создаются области повышенной напряженности поля, в которые под действием диэлектрофореза втягиваются молекулы воды, образуя новые микро- и нановключения [2]. В диэлектрических промежутках между близко расположенными микровключений ЭП дополнительно усиливается, возникают электрические силы, направленные на сближение и слияния включений [10].

Так включения становятся центрами образования водных триингов – тонких разветвленных структур. Возле острия ветвей триингов возникают высокие давления, которые могут быть сопоставимыми и даже превышать механическую прочность материала и приводить к появлению в нем новых трещин [5]. Также, в таких тонких проводящих структурах возникают токи проводимости, а в близлежащем диэлектрике токи смещения высокой плотности, которые разогревают изоляцию, понижая ее электрическую и механическую прочность.

Поскольку конфигурация микровключений и микротриингов может быть различной и меняться по истечению времени, то для комплексной оценки текущего состояния и прогнозирования дальнейшего ресурса изоляции целесообразно определять уровни возникающих усилений ЭП, величины напряженных объемов, давлений и плотности токов в диэлектрике и выявлять факторы, оказывающие наибольшее влияние. Этому и была посвящена данная работа.

Целью данной работы являлось провести расчет и анализ распределения электрического поля, давления и плотности полного тока в СПЭ изоляции

вблизи водного микровключения с поверхностным микротриингом вида близко расположенных микровключений, соединённых проводящими каналами.

Постановка задачи. Согласно расчету распределения поля по сечению кабеля на напряжение 330 кВ на расстоянии до 5 мм от поверхности полупроводящего слоя в СПЭ изоляции средняя напряженность ЭП $E_{\text{ср}} \geq 10 \text{ кВ/мм}$. Моделировался слой изоляции толщиной 1 мм, к которому приложено синусоидальное напряжение 10 кВ частотой 50 Гц, как показано на рис. 1.

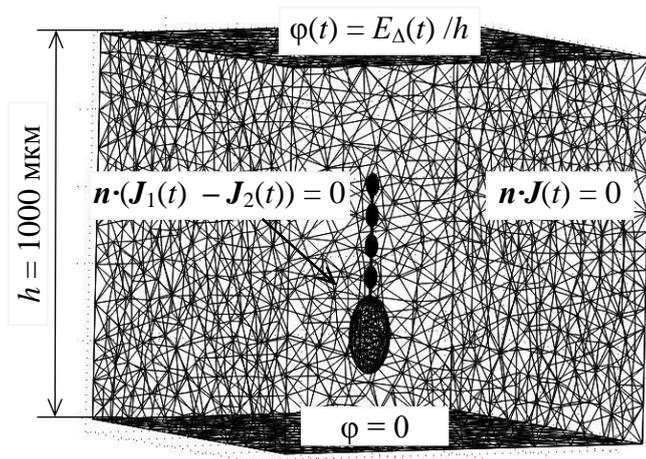


Рисунок 1 – Расчетный объем СПЭ изоляции с нанесенной конечноэлементной сеткой и граничными условиями

В слое предполагалось наличие водного микродефекта наиболее характерной формы: эллипсоидального микровключения с поверхностным микротриингом вида близко расположенных эллипсоидальных микровключений, соединённых проводящими каналами.

Диэлектрическая среда считалась кусочно-однородной, изотропной, линейной при напряженностях ЭП ниже 20 кВ/мм и нелинейной при напряженностях выше 20 кВ/мм. Приближенная функция для описания зависимости удельной электропроводности СПЭ $\sigma(E, T)$ от напряженности ЭП E и температуры T , как и в работе [4], имеет вид:

$$\sigma(E, T) = A \exp\left(-\frac{e_a q}{k_B T}\right) \frac{\text{sh}(B|E|)}{|E|}, \quad (1)$$

где A и B – расчетные константы, e_a – энергия активации, q – элементарный заряд, k_B – постоянная Больцмана.

Задача формулировалась в квазистатическом приближении и из системы уравнений Максвелла [7], расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала ϕ имеет вид:

$$\operatorname{div} \left[\sigma(E) \operatorname{grad} \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0. \quad (2)$$

Расчет распределение скалярного электрического потенциала φ в расчетном объеме СПЭ изоляции проводился с использованием численного метода конечных элементов, реализованного в пакете программ Comsol Multiphysics [1].

Для получения единственного решения уравнения (2) на верхней и нижней границах расчетной области (см. рис. 1) задавались условия Дирихле (значения электрических потенциалов), а на боковых поверхностях - условия Неймана (равенство нулю производной потенциалов по нормали к поверхности). На границе раздела вода-СПЭ изоляции (т.е. на границе включение-среда) задавались условия для потенциалов и их производных по направлению нормали к поверхности раздела сред.

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):

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

Величина напряженного объема диэлектрика V_n , (объема в котором напряженность ЭП ниже пробойного, но выше допустимого значения $E_{\text{доп}}$) как и в работе [9] для трехмерной расчетной области определялась как:

$$V_n = \int_V f(E) dV, \quad f = \begin{cases} 1, & \text{при } E \geq E_{\text{доп}}. \\ 0, & \text{при } E < E_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (4)$$

где V – расчетный объем диэлектрика, $f(E)$ – определяющая функция.

Электрическую силу F , действующую на проводящее включение со стороны ЭП можно представить как результат действия только сил, приложенных к поверхности включения. Для расчета поверхностных сил F и давлений p со стороны водных микродефектов на материал диэлектрика использовался электрический тензор напряжений Максвелла T [9], согласно уравнению:

$$\mathbf{F} = \iiint f dV = \iint T ds. \quad (6)$$

Компонент тензора T вычислялись как произведение компонент напряженности ЭП и электрического смещения $T_{ij} = E_i \cdot D_j$.

Результаты исследований. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 2

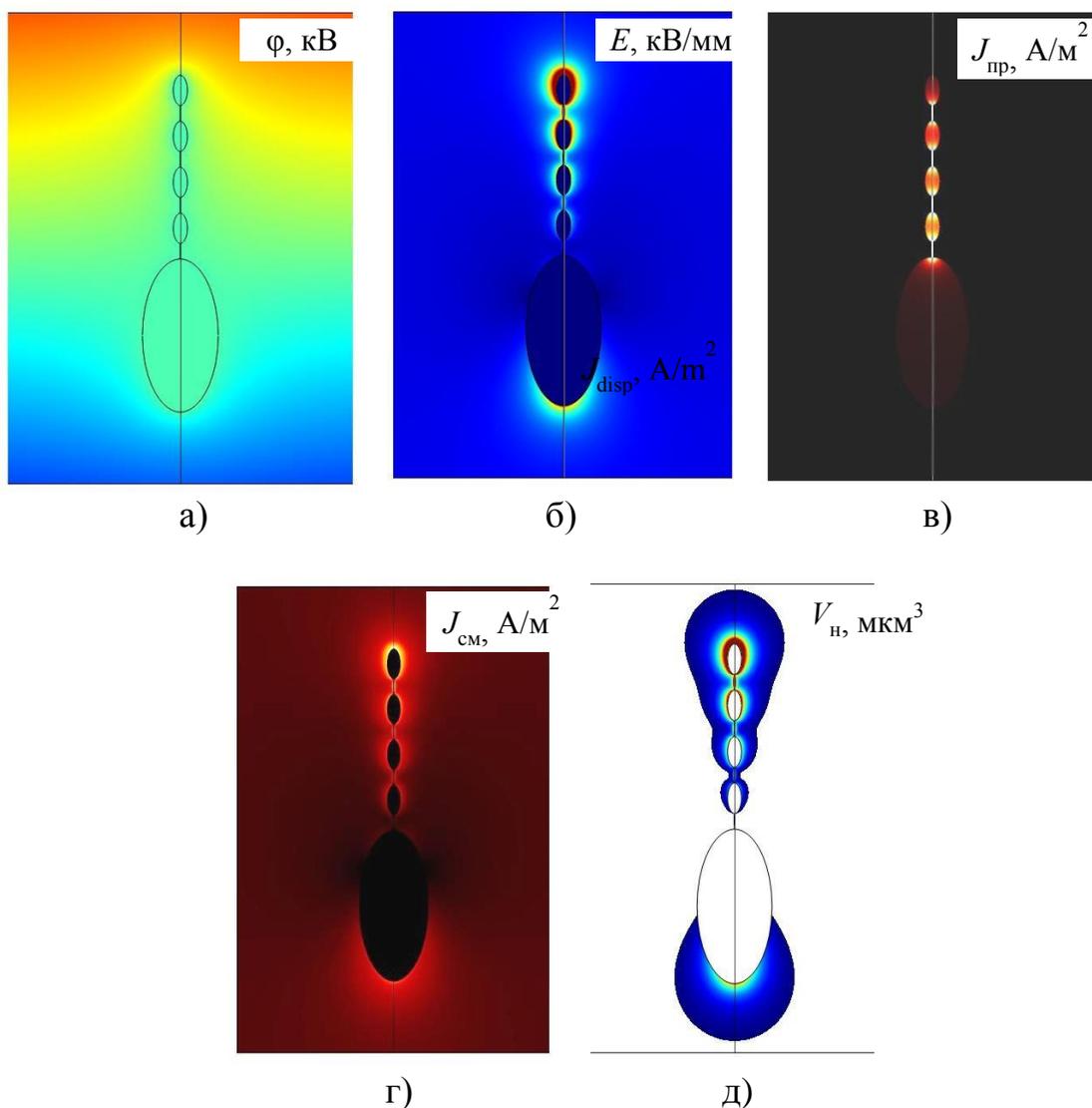


Рисунок 2 – Распределение напряженности ЭП и плотности полного тока в СПЭ изоляции возле водных микровключений

На рис. 2 показано распределение потенциала φ , напряженности ЭП E , плотности токов проводимости $J_{\text{пр}}$, плотности токов смещения $J_{\text{см}}$ и области напряженного объема $V_{\text{н}}$, в которых ЭП усилилось на 50% и более. Наибольшая плотность токов проводимости наблюдается в заполненных водой каналах, соединяющих включения в триинге (рис. 2, в). Наибольшая напряженность поля (рис. 2, б) и наибольшая плотность токов смещения (рис. 2, г) – вблизи острия триинга. Прорастания триинга на поверхности микровключения существенно увеличивает величину напряженного объема изоляции (рис. 2, д).

При появлении между близко расположенными микровключениями трещин в диэлектрике и по мере их заполнения водой, образуется проводящий канал, объединяющий все включения в одну проводящую структуру, которая сильнее возмущает ЭП в СПЭ изоляции.

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие **выводы**:

Исследованы мультифизические процессы возмущения электрического поля, увеличения плотности полного тока и рост давлений в локальных

областях сшитой полиэтиленовой изоляции водным микровключением с поверхностным микротриингом вида близко расположенных микровключений, соединённых проводящими каналами.

Формирование тонких проводящих каналов в диэлектрике между близко расположенными микровключениями приводит к значительному усилению поля, искажению механических и тепловых полей, что интенсифицирует процессы деградации твердого диэлектрика под действием влаги.

Перечень ссылок

1. *Comsol Multiphysics*, version 5.2 a – www.comsol.com
2. *Dissado L.A.* Understanding Electrical Trees in Solids: From Experiment to Theory // IEEE Trans. on DEI, Vol. 9, pp. 483-497, 2002.
3. *Hvidsten S., Ildstad E., Sletbak J. and Faremo H.A.* Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 5(5), 754-760, 1998.
4. *Kurihara T., Okamoto T., Kim M.H., Hozumi N., Tsuji T. & Uchida K.* Measurement of residual charge using pulse voltages for water tree degraded XLPE cables diagnosis // Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 21(1), 321-330. 2014.
5. *Shimizu N. and Tanaka H.* Effect of Liquid Impregnation on Electrical Tree Initiation in XLPE, IEEE Trans. DEI, vol. 8, pp. 239-243 2001.
6. *Teixeira E.L.* Time-domain finite-difference and finite-element methods for Maxwell equations in complex media. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 56(8), 2150-2166, 2008.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля. Теоретическая физика. Том II. – М.: Физматлит, 2006. – 534 с.
8. *Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н.* Мультифизическое моделирование в электротехнике – К.: Ин-т электродинамики НАНУ, 2015. – 305 с.
9. *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.
10. *Щерба М.А.* Особенности локальных усиления электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции // Техн. електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
11. *Щерба М.А., Подольцев А.Д.* Распределение электрического поля и плотности тока возле водных включений полимерной изоляции высоковольтных кабелей с учетом ее нелинейных свойств // Техн. електродинаміка. – 2016. – № 1. – С. 11–18.