

УДК 621.3.01:537.212

ОСОБЕННОСТИ ВОЗМУЩЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗВЕТВЛЕННЫМИ ВОДНЫМИ ТРИИНГАМИ МЕЖДУ МИКРОВКЛЮЧЕНИЯМИ В СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ

М.А. Щерба, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: m.shcherba@gmail.com

Выполнены математическое моделирование и анализ процессов развития водного триинга между водными микровключениями в сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции кабелей сверхвысокого напряжения и его влияние на возмущение электрического поля в диэлектрике. Рассмотрены включения, объединённые триингом с переменным поперечным сечением так называемой конфигурации «нити жемчуга». Проведен сравнительный анализ неоднородного распределения электрического поля, напряжённых объёмов, плотностей токов и электро-механических сил в изоляции в зависимости от количества проводящих ветвей триинга. Определены области наибольших возмущений поля, вызванных указанными микродефектами в диэлектрике, которые способствуют процессам деградации материала и сокращают ресурс СПЭ. Библ. 14, рис. 3.

Ключевые слова: электрическое поле, сшитый полиэтилен, водные микровключения, водный триинг, математическое моделирование, электрический ток, напряжённый объём.

Математическое моделирование и анализ возмущений электрического поля в диэлектрических материалах различными дефектами в настоящее время являются мощным средством для исследования деградационных процессов и оценки ресурса изоляции [2, 3, 7]. Сшитый полиэтилен (СПЭ) является одним из наиболее широко используемых изоляционных материалов на высокие и сверхвысокие напряжения из-за ряда его преимуществ. Однако главным его недостатком является необратимая деградация в сильных электрических полях по истечению времени [3, 8]. Во многих работах главной причиной деградации СПЭ отмечалось появление различных микровключений и образования на их поверхности водных триингов – тонких разветвленных структур [3, 10, 13, 14]. Такие триинги со временем увеличиваются в размерах, их ветви удлиняются и ветвятся, то есть проникают во все большие объёмы изоляции, уменьшая ее электрическую прочность. В конечном итоге наличие больших разветвленных триингов в диэлектрике приводит к его частичным и полным пробоям.

Для повышения используемых напряжений и продления срока службы изоляции основным решением является улучшение чистоты материала, то есть минимизация как размеров отдельных включений, так и их общей плотности (количества в единице объёма) [3, 11, 12]. Однако очевидно, что полностью избавиться от всех включений невозможно, поэтому возникает необходимость определить наиболее опасные конфигурации включений для разработки рекомендаций по их минимизации в процессе промышленного производства кабельной продукции.

Для этого необходимо рассчитать и проанализировать неоднородное распределение электрического поля (ЭП) вблизи микровключений, определить области диэлектрика с наибольшими напряженностями поля (напряжённые объёмы), распределение плотности токов и сил, возникающих в изоляции. Из-за сложной конфигурации микровключений и необходимости трехмерного расчета ЭП провести подобные исследования ранее было невозможно [6, 9]. Однако с развитием численных методов и современных программных продуктов появилась возможность решать подобные задачи [7], в частности, задачи по расчету существенно неоднородных распределений электрических полей в диэлектрических средах с проводящими микродефектами сложной конфигурации.

В результате проведения экспериментальных исследований, в частности, в работе [8] было показано, что форма ветвей триинга отличается от цилиндрической, и состоит из микровключений, объединённых проводящими каналами, так называемая конфигурация «нити

жемчуга». Распределение ЭП и электромеханических сил давления жидкости в изоляции возле такого триинга может существенно отличаться от распределения вблизи цилиндрических ветвей. Кроме того, при изменении поперечного сечения проводящих дефектов возрастают плотности токов проводимости в узких областях и соответственно растут токи смещения в близлежащих участках СПЭ изоляции. Высокие плотности токов приводят к нагреванию диэлектрика и уменьшению его электрической и механической прочности, то есть к усилению процессов деградации изоляции [3, 10].

Цель работы провести расчёт и сравнительный анализ изменений напряженности электрического поля, напряженных объемов, плотности токов и электромеханических сил в СПЭ изоляции сверхвысоковольтных кабелей вблизи водных микровключений, соединенных водными триингами конфигурации "нити жемчуга", в зависимости от количества их ветвей.

Физико-математическая постановка задачи. Средняя напряженность ЭП в СПЭ изоляции кабеля 330 кВ на расстоянии меньше 5 мм от полупроводящего слоя составляет $E_{cp} \geq 10$ кВ/мм. Моделировался слой изоляции толщиной 0,6 мм, к которому приложено синусоидальное напряжение 6 кВ частотой 50 Гц (см. рис. 1), т.е. $E_{cp} = 10$ кВ/мм.

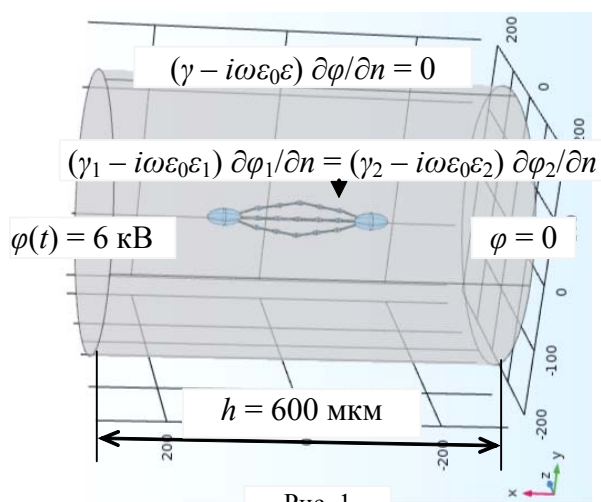


Рис. 1

В диэлектрике моделировались два микровключения сфероидной формы с соотношением полуосей 25:12,5:12,5 мкм, которые являются характерными СПЭ изоляции. Включения соединены одной, двумя или тремя ветвями триинга типа "нити жемчуга". Каждая его ветвь состоит из пяти водных сфероидных микровключений с полуосями 6:3:3 мкм, соединенных шестью водными цилиндрическими каналами с радиусами 1 мкм и длиной около 25 мкм. Изменение количества ветвей триинга моделирует ситуацию втягивания капель воды под действием сил диэлектрофореза в промежутки между включениями, их объединения тонкими водными каналами в единую проводящую структуру.

Материал СПЭ изоляции считался кусочно-однородным, изотропным и линейным. Задача описывалась в квазистатическом приближении системой уравнений Максвелла согласно методу комплексных амплитуд [1]. Расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала ϕ , как в [4, 5], записывалось в виде

$$\operatorname{div}(\gamma - i\omega\varepsilon_0\varepsilon) \cdot \operatorname{grad}\phi = 0, \quad (1)$$

где γ , ε – электрическая проводимость и диэлектрическая проницаемость сред.

Для получения единственного решения уравнение (1) дополнялось условиями Дирихле и Неймана для потенциалов и их нормальных производных на границах расчётной области и на границе раздела сред вода–СПЭ изоляция, как показано на рис. 1.

Области напряженного объема V_H , в которых напряженность поля на 20 % и более больше чем E_{cp} определялись согласно уравнению

$$V_H = \int_V f(E) dV, \quad (2)$$

где $f(E) = 1$ при $E \geq E_{cp}$ и $f(E) = 0$ при $E < E_{cp}$; V – расчетный объем СПЭ изоляции.

Вектор плотности полного тока $\dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}}$ рассчитывался как сумма векторов плотности тока проводимости $\dot{\mathbf{J}}_{\text{пр}}$ в водных микродефектах и тока смещения $\dot{\mathbf{J}}_{\text{см}}$ в диэлектрике:

$$\dot{\mathbf{J}}_{\text{полн}} = \dot{\mathbf{J}}_{\text{пр}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{см}} = (\gamma - i\omega\varepsilon\varepsilon_0) \cdot \operatorname{grad}\phi. \quad (3)$$

Для расчета электромеханических давлений \dot{f} на границе раздела проводник–диэлектрик и сил \dot{F} со стороны водных микродефектов на СПЭ изоляцию под действием внешнего ЭП использовался тензор напряжений Максвелла \dot{T} [1]:

$$\dot{f} = \mathbf{n} \cdot \dot{T} = \mathbf{n} \cdot [\dot{E} \cdot \mathbf{D}^*] = \mathbf{n} \cdot [\varepsilon \varepsilon_0 (\text{grad} \phi) \cdot (\text{grad} \phi)^*], \quad (4)$$

$$\dot{F} = \oint_S \dot{E} \cdot \mathbf{D}^* dS = \varepsilon \varepsilon_0 \oint_S (\text{grad} \phi) \cdot (\text{grad} \phi)^* dS. \quad (5)$$

Распределение скалярного электрического потенциала ϕ в расчетной области находилось с помощью численного метода конечных элементов в программном пакете COMSOL Multiphysics [8].

Результаты численного эксперимента. Распределение ЭП, области напряженных объемов V_n электрических токов и электромеханические силы в СПЭ изоляции вблизи включений, объединенных триингом с одной, двумя и тремя ветвями конфигурации "нити жемчуга", показаны на рис. 2.

Тонированные области на рис. 2 *а*, *б* и *в* соответствуют областям V_n , величина напряженности поля E в которых определяется согласно шкале справа. Величина E представлена в относительных единицах в виде коэффициента усиления поля $k_E = E/E_{\text{ср}}$, который равняется отношению E в расчётных точках к его среднему значению $E_{\text{ср}}$ во всей расчетной области. Стрелки демонстрируют направление электромеханических давлений f в изоляции, длина и толщина стрелок пропорциональна величине давления. На рис. 2 *г*, *д* и *е* показано распределение плотности полного тока $J_{\text{полн}}$, величина которого определяется согласно шкале справа.

При объединении микровключений триингом, независимо от количества его ветвей, результирующий микродефект ведет себя как единая проводящая структура, возле которой максимальная напряженность ЭП наблюдается возле полюсов крайних включений. У полюсов микровключений поле усиливается в 10 и более раз. Это означает, что если средняя напряженность ЭП у жилы сверхвысоковольтного кабеля порядка 10 кВ/мм, то возле полюсов включений $E_{\text{max}} \geq 100$ кВ/мм, что превышает диэлектрическую прочность СПЭ изоляции (40–80 кВ/мм) и может привести к ее локальным пробоям.

Увеличение количества ветвей триинга практически не изменяет величину E_{max} , но приводит к росту напряженного объема V_n (увеличение тонированных областей на рис. 2 *а*, *б* и *в*), который характеризует стохастические механизмы деградации изоляции и показывает

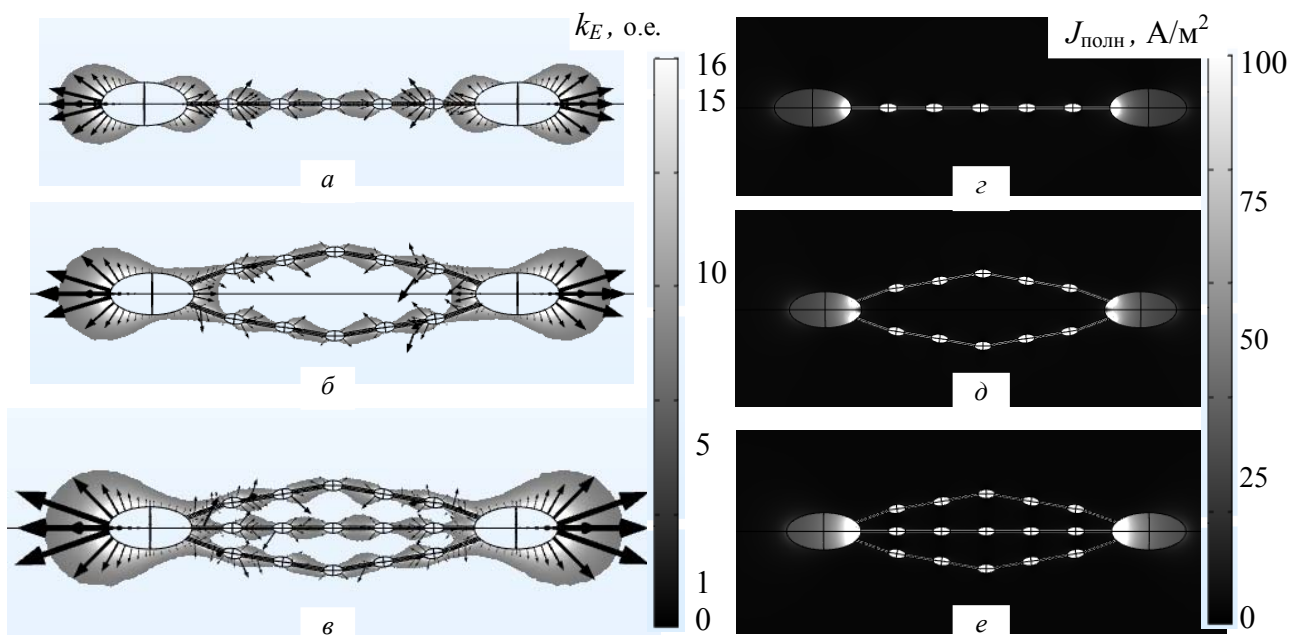


Рис. 2

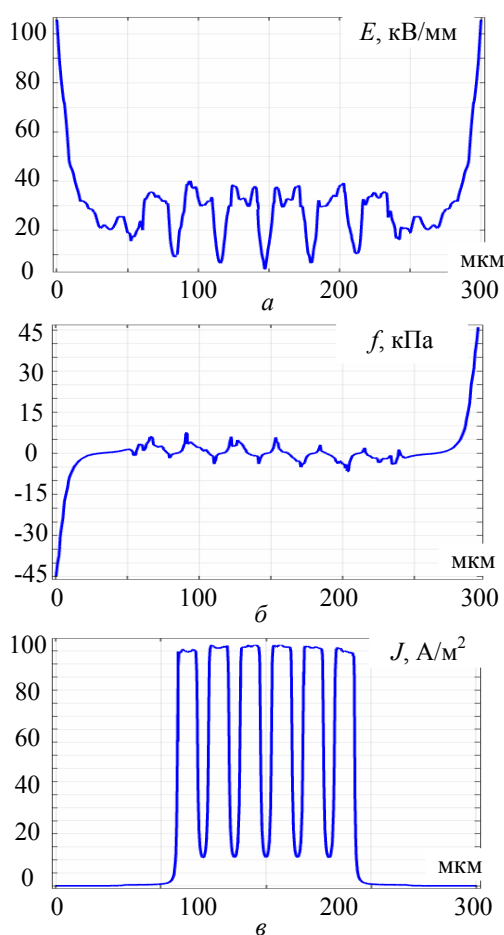


Рис. 3

увеличение вероятности пробоя в одной из ее участков. При увеличении количества ветвей от одной до трех величина V_n увеличивается на 25 и 150 % по сравнению с двумя отдельными включениями, не соединенными между собой.

Наибольшие плотности полного $J_{\text{полн}}$ наблюдаются в каналах триинга (наиболее светлые области рис. 2 *г*, *д* и *е*), причем $J_{\text{полн}}$ возрастает с увеличением количества ветвей триинга. Вследствие этого в каналах триинга и соседних областях диэлектрика наблюдается увеличение температуры, что снижает электрическую и механическую прочность СПЭ изоляции и способствует ее деградации.

На рис. 3 показано распределение напряженности ЭП E , плотности тока $J_{\text{полн}}$ и давлений f для двух микровключений, соединенных триингом с тремя ветвями. Распределение E (рис. 3 *а*) и давления f (рис. 3 *б*) показано вдоль линии на границе раздела вода–СПЭ, наибольшие значения $E_{\text{max}} = 104$ кВ/мм и $f_{\text{max}} = 46$ кПа наблюдаются на полюсах крайних микровключений. В то же время на полюсах каждого из пяти включений, составляющих канал центрального триинга, ЭП достигает 40 кВ/мм, а давление – 8 кПа.

Распределение плотности тока $J_{\text{полн}}$ вдоль линии на границе раздела вода–СПЭ по форме кривой совпадает с кривой напряженности E (рис. 3 *а*). Поэтому на рис. 3 *в* показано распределение $J_{\text{полн}}$ не на границе сред, а внутри водного микродефекта вдоль линии, проходящей через центры микровключений и центральный канал триинга. Максимальная плотность тока $J_{\text{полн max}} = 96$ А/м² наблюдается в каждом из пяти включений, составляющих канал триинга. За счет малого поперечного сечения в каналах триинга плотность тока в нем на два порядка больше, чем в крайних включениях, в которых $J_{\text{полн}} = 2$ А/м². В результате растут плотности токов в соседних областях СПЭ изоляции.

Выводы. Проведены математическое моделирование и сравнительный анализ изменений значений напряженности электрического поля, напряженных объемов, плотностей тока и электромеханических сил, возникающих в сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции сверхвысоковольтных кабелей вблизи водных микровключений, соединенных водными триингами конфигурации "нить жемчуга" с одной, двумя и тремя ветвями.

Объединение включений триингами увеличивает напряженность поля в диэлектрике в 10 и более раз, увеличивает давление жидкости на изоляцию в 8 и более раз и плотность тока в водном дефекте на два порядка. Неравномерное распределение плотности тока вызывает локальный нагрев изоляции, снижая ее электрическую и механическую прочность. Увеличение количества ветвей триинга увеличивает напряженный объем СПЭ изоляции, характеризующий стохастические механизмы деградации изоляции. Указанные процессы способствуют деградации диэлектрика в сильном электрическом поле и из-за положительной обратной связи будут усиливаться при длительной эксплуатации изоляции.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука. – 1980. – 560 с.
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 304 с.
3. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2013. – 550 с.

4. Щерба М.А. Особенности локального усиления электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции // Техн. электродинамика. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
5. Щерба М.А. Влияние электропроводности водных триингов на плотности токов и давления, возникающие в полиэтиленовой изоляции // Техн. электродинамика. – 2016. – № 4. – С.14–16.
6. Burkes K.W., Makram E.B., Hadidi R. Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry // IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. – 2015. – Vol. 2(2). – P. 53–62.
7. <https://www.comsol.com/>, "Comsol Inc." Burlington, MA, 2017.
8. Hvidsten S., Ildstad E., Sletbak J., Faremo H.A.F.H. Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods // IEEE Trans. on DEI. – 2008. – No. 5(5). – P. 754–760.
9. Kurihara T., Okamoto T., Kim M.H. Measurement of residual charge using pulse voltages for water tree degraded XLPE cables diagnosis // IEEE Trans. on DEI. – 2014. – No. 21(1). – P. 321–330.
10. Muhamad N.A., Sanniyati C.N., Arief Y.Z., Adzis Z. Water tree in polymeric cables: a review // Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2016. – No. 12(1).
11. Tao W., Song S., Zhang Y., Hao W. Study on the electric-field characteristics of water tree region on the dry or wet condition in XLPE cables // High Voltage Engineering and Application. – 2016. – P. 1–4.
12. Saniyyati C.N., Arief Y.Z., Ahmad M.H., Piah M.A.M. Investigation on propensity difference of water tree occurrences in polymeric insulating materials // IEEE Intern. Conf. on Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO). – 2014. – P. 413–417.
13. Wang W., Tao W., Ma Z., Liu J. The mechanism of water tree growth in XLPE cables based on the finite element method // High Voltage Engineering and Application. – 2016. – P. 1–4.
14. Zhou K., Li K., Yang M., Huang M. Insight into the influence of mechanical orientation on water tree propagation according to abnormal water tree shapes (2016, July) // IEEE Intern. Conf. In Dielectrics (ICD). – 2016. – Vol. 2. – P. 836–839.

УДК 621.3.01:537.212

М.А. Щерба, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Особливості збурення електричного поля розгалуженим водним триінгом між мікрровключеннями в зшитій поліетиленовій ізоляції кабелів

Виконано математичне моделювання та аналіз процесів розвитку водного триінгу між водними мікрровключеннями в зшитій поліетиленовій (ЗПЕ) ізоляції кабелів надвисокої напруги і його вплив на збурення електричного поля в діелектрику. Розглядалися включення, об'єднані триінгом зі змінним поперечним перерізом, так званої конфігурації «нитка перлин». Проведено порівняльний аналіз неоднорідного розподілу електричного поля, напружених об'ємів, густини струмів і електромеханічних сил в ізоляції залежно від кількості провідних гілок триінгу. Визначено місця найбільших збурень поля, спричинених зазначеними мікродефектами в діелектрику, які сприяють процесам деградації матеріалу і скорочують ресурс ЗПЕ. Бібл. 14, рис. 3.

Ключові слова: електричне поле, зшитий поліетилен, водні мікрровключення, водний триінг, математичне моделювання, електричний струм, напружений об'єм.

M.A. Shcherba

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Features of electric field disturbances by branched water tree between micro-inclusions in XLPE insulation of cables

The mathematical modeling and analysis of a water tree development processes between water micro-inclusions in cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of extra high voltage cables and its effect on the electric field disturbances in the dielectric were done. The inclusions, connected by tree with variable cross-section of the so-called "string of pearls" configuration were discovered. A comparative analysis of inhomogeneous distribution of electric field, stressed volumes, currents density and electromechanical forces in insulation depending on the number of conductive tree branches was performed. The areas of the greatest field disturbances, caused by those micro-defects in the dielectric, which contribute degradation processes and reduce a resource of XLPE material were determined. References 14, figures 3.

Key words: electric field, cross-linked polyethylene, water micro-inclusions, water tree, mathematical modeling, electrical current, stressed volume.

Надійшла 06.06.2017

Received 06.06.2017