

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ ТРИИНГОВ НА ПЛОТНОСТИ ТОКОВ И ДАВЛЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

М.А. Щерба\*, канд.техн.наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина, e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)

*Выполнен анализ локальных усилений низкочастотного электрического поля (ЭП) в нелинейной полиэтиленовой (ПЭ) изоляции с водными триингами (ВТ), имеющими утолщения типа эллипсоидов вращения и цилиндрические участки различной проводимости. Определено влияние нелинейной удельной электрической проводимости ПЭ изоляции, а также ее амплитудно- и частотно-зависимой диэлектрической проницаемости на распределение ЭП и такие мультифизические механизмы деградации изоляции, как напряженные объемы, удельный полный ток и электромеханические давления при разной проводимости триингов. Библ. 11, рис. 2.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, изоляция, нелинейность, водные триинги, полный ток, давление, деградация.

**Вступление.** Анализ распределения ЭП в неоднородной полиэтиленовой изоляции в работах [3–11] показывает, что включения типа ВТ могут вызывать локальные усиления поля, при которых ее электрические параметры становятся нелинейными. При усилении ЭП в микрообъемах изоляции сверхвысоковольтных кабелей [3] могут возникать электромеханические и тепловые воздействия, вызывающие ее необратимую деградацию. Если напряженность ЭП настолько большая, что электрические характеристики ПЭ изоляции становятся нелинейными и частотно зависимыми [5, 6], то возникает необходимость учета их влияния как на распределение ЭП и удельных полных токов, так и на величину пульсирующих электромеханических давлений на структуру твердой ПЭ изоляции и электрофизические механизмы ее деградации [7, 9].

**Целью работы** является определение закономерностей изменения максимальных значений напряженности электрического поля, давления и плотности полного тока при изменении электропроводности водных триингов.

Распределение ЭП моделировалось в расчетной области ПЭ изоляции формы куба со сторонами 1 мм, к которой прикладывалось синусоидальное напряжение 10 кВ с частотой 50 Гц (рис. 1, а).

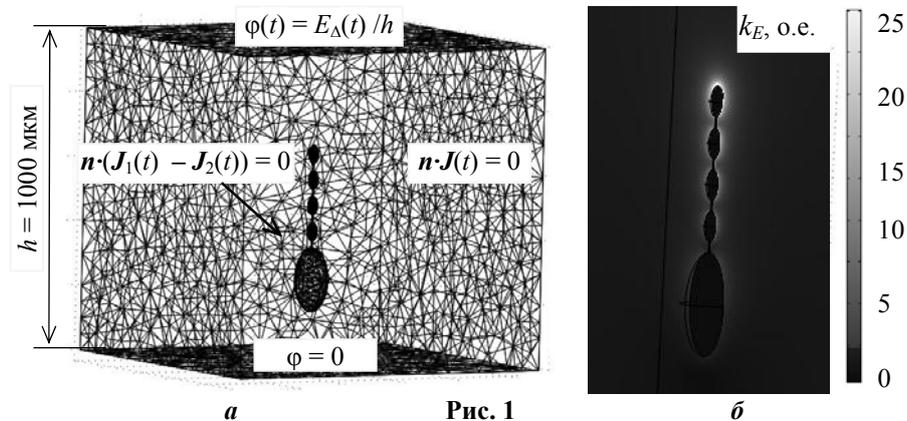


Рис. 1

**Постановка задачи.** В качестве примера водного микродефекта рассматривались близко расположенные эллипсоиды вращения с полуосями от 25 мкм до 5 мкм, соединенные цилиндрическими каналами ВТ радиусом 1 мкм и удельной проводимостью  $\sigma$ , изменяющейся от  $10^{-14}$  См/м до  $10^{-2}$  См/м. ПЭ изоляция считалась кусочно-однородной, изотропной, линейной – при напряженностях ЭП  $E < 20$  кВ/мм и нелинейной – при  $E \geq 20$  кВ/мм. Зависимость проводимости изоляции  $\sigma(E, T)$  от напряженности ЭП и температуры задавалась приближенной формулой, как и в работе [6]. Взаимосвязь векторов электромагнитного поля описывалась системой уравнений Максвелла [1], и задача формулировалась в квазистатическом приближении.

Также учитывалось, что, согласно работе [10], диэлектрическую проницаемость ПЭ изоляции надо считать комплексной функцией  $\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega)$ , мнимая часть которой отвечает диэлектрическим потерям. По нелинейным частотным и амплитудным зависимостям функции  $\epsilon(\omega)$  оценивают наличие и степень разветвленности ВТ. По степени развития ВТ различают 4 типа диэлектрических откликов: 1 – для ПЭ изоляции новых кабелей, в которой ВТ нет, ее  $\epsilon' \approx 2,3$  и  $\epsilon'' \approx 10^{-4}$ , они не зависят от частоты ЭП и диэлектрические потери являются низкими; 2 – когда ВТ в изоляции имеют малые размеры, и ее  $\epsilon$  зависит от величины напряженности  $E$ ,

что проявляется в увеличении  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  при повышении приложенного напряжения, но зависимости их от частоты ЭП еще нет; 3 – когда ВТ достаточно развиты, что проявляется в значительном увеличении токов утечки и заметной зависимости от частоты значений  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$ ; 4 – когда ВТ сильно развиты и протяженны, токи утечки большие, а значения  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  имеют ярко выраженные нелинейные частотные и амплитудные зависимости.

Расчетное уравнение для скалярного электрического потенциала  $\varphi$  с учетом зависимости  $\sigma(E)$  имеет вид

$$\operatorname{div} \left[ \sigma(E) \cdot \operatorname{grad} \varphi(t) - \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \operatorname{grad} \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0. \quad (1)$$

Для получения единственного решения уравнение (1) дополнялось граничными условиями на границах расчетной области и на границе раздела водный микродефект-ПЭ изоляция. Расчет проводился с использованием численного метода конечных элементов, реализованного в пакете программ Comsol Multiphysics.

Для расчета силовых взаимодействий водных микродефектов с внешним ЭП и материалом диэлектрика использовался электрический тензор напряжений Максвелла  $T$  [1]

$$F = \iiint f dV = \iint T_{ij} ds = \iint E_i D_j ds. \quad (2)$$

Вектор плотности полного тока  $J_{\text{полн}}$  рассчитывался как сумма векторов тока проводимости  $J_{\text{пр}}$  в водных микродефектах и тока смещения  $J_{\text{см}}$  в СПЭ изоляции

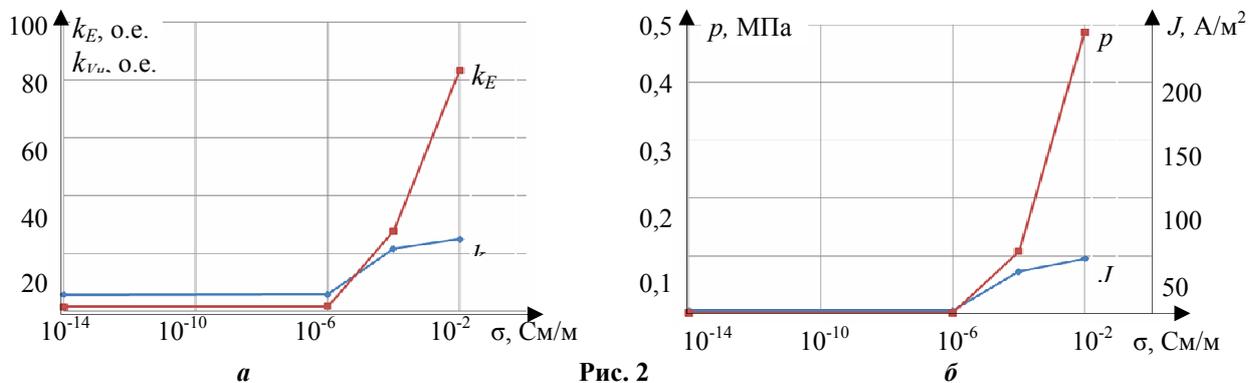
$$J_{\text{полн}}(t) = J_{\text{пр}}(t) + J_{\text{см}}(t) = \sigma(E)E(t) + \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial E(t)}{\partial t}. \quad (3)$$

Величины напряженности ЭП  $E$  и напряженного объема изоляции  $V_n$  приводились в относительных единицах в виде коэффициента усиления электрического поля  $k_E = E/E_{\text{ср}}$  и коэффициента напряженного объема  $k_{V_n} = V_n/V$ , т.е. отнесенные к средней напряженности  $E_{\text{ср}}$  и объему водных микродефектов  $V$  соответственно.

**Обсуждение полученных результатов.** Подтверждено, что изменение электропроводности микровключений в ПЭ изоляции оказывает сильное влияние на распределение ЭП и величины возникающих напряженных объемов, плотностей зарядов на полюсах проводящих включений, полных токов в изоляции, а также электромеханических давлений на ее структуру.

На рис. 1, б приведены результаты расчета распределения напряженности ЭП  $k_E$  в ПЭ изоляции, которые показывают, что появление в ПЭ изоляции микротрещин и полостей, где могут возникать водные триинги, усиливает электрофизические механизмы ее деградации, описанные в работе [9]. В сильных ЭП близко расположенные ВТ и микровключения будут объединяться в одну проводящую структуру, которая будет сильнее возмущать ЭП и усиливать электрофизические механизмы необратимой деградации твердой изоляции.

На рис. 2, а и б показаны изменения величин  $k_E$ ,  $k_{V_n}$ , максимального давления  $p$  на полюсе микровключения и максимальной плотности тока  $J$  в каналах водных триингов при изменении проводимости триинга.



**Выводы.** Возникновение и развитие в полиэтиленовой изоляции кабелей электроэнергетического назначения водных микровключений и триингов (в том числе имеющих утолщения типа эллипсоидов вращения и цилиндрические участки различной проводимости) вызывает усиление таких мультифизических механизмов ее деградации, как напряженные объемы, плотность зарядов на полюсах микровключений и триингов, удельный полный ток в изоляции и пульсирующие электромеханические давления на структуру изоляции.

Появление между водными микровключениями триингов и увеличение их проводимости вызывает наибольшее увеличение максимальной напряженности электрического поля в ПЭ изоляции и ее общего напряженного объема. При достижении удельной электропроводности разветвленных триингов значений, характерных для воды  $\sigma_w = 0,01$  См/м, максимальная напряженность ЭП возрастает в 4,4 раза, а напряженный объем – в 55,5 раз по сравнению с соответствующими параметрами изоляции при наличии в ней взаимно удаленных водных микровключений аналогичных форм и размеров. При этом максимальное пульсирующее давление полюса водного включения на структуру изоляции может достигнуть значений 0,5 МПа, а плотности тока в триинге – 245 А/м², которые являются недопустимыми для долгосрочной эксплуатации ПЭ изоляции.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. Теоретическая физика. Том II. – М.: Физматлит, 2006. – 534 с.

2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 305 с.
3. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжении 330 кВ // Техн. электродинамика. – 2013. – № 1. – С. 9–16.
4. Щерба М.А. Особенности локальных усиленных электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции // Техн. электродинамика. – 2015. – № 2. – С. 16–23.
5. 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. электродинамика. – 2016. – № 1. – С. 11–18.
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1995. – Vol. 2.1. – Pp. 97–106.
7. Champion J.V., Dodd S.J., Stevens G.C. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins // Appl. Phys. – 1994. – Vol. 21. – Pp. 1020–1030.
8. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory // IEEE Trans. on DEI. – 2002. – Vol. 9. – Pp. 483–497.
9. 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 Dielectrics and Electrical Insulation. – 1998. – Vol. 5.5. – Pp. 754–760.
10. Rezikina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // Environmentalist. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.
11. Werelius P., Thärning P., Eriksson R., Holmgren B. and Gäfvert U. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2001. – Vol. 8.1. – Pp. 27–42.

УДК 621.3.01:537.212

## ВПЛИВ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОСТІ ВОДНИХ ТРИЇНГІВ НА ВИНИКАЮЧІ ГУСТИНИ СТРУМІВ І ТИСКИ В ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ ІЗОЛЯЦІЇ

**М.А. Щерба**, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)**

*Виконано аналіз локальних підсилень низькочастотного електричного поля (ЕП) в нелінійній поліетиленовій (ПЕ) ізоляції з водними триїнгами (ВТ), що мають потовщення типу еліпсоїдів обертання і циліндричні ділянки різної провідності. Визначено вплив нелінійної питомої електричної провідності ПЕ ізоляції, а також її амплітудно- і частотно-залежної діелектричної проникності на розподіл ЕП і такі мультифізичні механізми деградації ізоляції, як напружені об'єми, питомий повний струм та електромеханічні тиски при різній провідності триїнгів. Бібл. 11, рис. 2.*

**Ключові слова:** електричне поле, ізоляція, нелінійність, водні триїнги, повний струм, тиск, деградація.

## INFLUENCE OF WATER TREES CONDUCTIVITY ON CURRENTS DENSITY AND PRESSURES EMERGING IN POLYETHYLENE INSULATION

**M.A. Shcherba**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine. e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)**

*The analysis of the local amplification of low-frequency electric field (EF) in nonlinear polyethylene (PE) insulation with water trees (WT), which have thickening of spheroids type and cylindrical areas with different conductivity has been made. The influence of specific non-linear electrical conductivity of PE insulation, as well as its amplitude- and frequency-dependent dielectric permittivity on the EF distribution and such multi-physical degradation mechanisms of insulation as tensed volumes, total current density and electromechanical pressures at different trees conductivity has been determined. References 11, figures 2.*

**Keywords:** electric field, insulation, nonlinearity, water trees, total current, pressure, degradation.

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. The Classical Theory of Fields. Vol. II. – Moskva: Fizmatlit, 2006. – 534 p. (Rus)
2. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2015. – 305 p. (Rus)
3. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Electromagnetic Processes in 330 KV Cable Line With Polyethylene Insulation // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2013. – No 1. – Pp. 9–15. (Rus)
4. Shcherba M.A. The features of the local electric field amplifications by conducting inclusions in nonlinear polymer insulation // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 2. – Pp. 16–23. (Rus)
5. Shcherba M.A., Podoltsev A.D. Electric field and current density distribution near water inclusions of polymer insulation of high-voltage cables in view of its nonlinear properties // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 1. – Pp. 11–18. (Rus)
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1995. – Vol. 2.1. – Pp. 97–106.
7. Champion J.V., Dodd S.J., Stevens G.C. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins // Appl. Phys. – 1994. – Vol. 21. – Pp. 1020–1030.
8. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory // IEEE Trans. on DEI. – 2002. – Vol. 9. – Pp. 483–497.
9. 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 Dielectrics and Electrical Insulation. – 1998. – Vol. 5.5. – Pp. 754–760.
10. Rezikina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // Environmentalist. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.
11. Werelius P., Thärning P., Eriksson R., Holmgren B. and Gäfvert U. Dielectric spectroscopy for diagnosis of water tree deterioration in XLPE cables // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2001. – Vol. 8.1. – Pp. 27–42.

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 25.03.2016