

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В КАНАЛЕ ВОДНОГО ТРИИНГА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕГО КОНФИГУРАЦИИ

М.А. Щерба<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С.С. Розискулов<sup>2</sup>, асп., О.В. Васильева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – Национальный технический университет Украины "КПИ",  
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.  
m.shcherba@gmail.com

<sup>2</sup> – Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

<sup>3</sup> – ПАО "Завод "Южкабель",  
ул. Автогенная, 7, Харьков-99, 61099, Украина

*Исследованы закономерности распределения плотности электрического тока в канале неразветвленного водного триинга в зависимости от его формы. Установлены зависимости изменения плотности тока и ее максимального значения в зависимости от размерных параметров триинга, к которым относятся длина и диаметр триинга, угол наклона и кривизна его стенок при сужении, а также радиус закругления острия триинга. Библ. 9, рис. 4.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, диэлектрик, проводящее включение, водный триинг, плотность электрических токов.

Возникновение проводящих микровключений в твердом диэлектрике существенно возмущает внешнее электрическое поле (ЭП), вызывая его значительное усиление в локальных микрообластях возле включений [2, 3, 4]. Появление локальных областей повышенной напряженности поля  $E$  ускоряет все электрофизические процессы деградации, ухудшая изоляционные свойства диэлектрика, в том числе и процессы его электрического пробоя [3, 4].

В работах [1, 4, 6] отмечается, что основной причиной деградации твердых диэлектриков, в частности, сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции силовых кабелей считается возникновение проводящих водных микровключений и микротриингов. Экспериментальные исследования показали, что при зарождении водные триинги представляют собой тонкие неразветвленные длинные трубки, заполненные водой с растворенными в ней веществами. Со временем длина триингов и их радиус у основания увеличиваются, а затем образуются разветвленные триинговые структуры типа бант (*bow type*), куст или веер (*bush type*) [1], волокнистого (*fibrillar type*), древовидного (*tree-like type*) и внутреннего (*intrinsic type*) типа [8].

В переменном электрическом поле основными токами в диэлектрике являются токи смещения, а в проводящих включениях и триингах – токи проводимости [2, 4]. Если форма проводящих структур сложная, то плотности токов в их различных областях могут существенно отличаться. В то же время из-за неоднородного распределения индуцированных зарядов на поверхности таких структур плотности токов смещения в локальных областях диэлектрика также могут существенно отличаться, что будет вызывать неоднородную диссипацию в нем электрической энергии и его неоднородную электротепловую деградацию [4, 7].

Для анализа детерминированных и стохастических процессов деградации твердых диэлектриков при развитии водных триингов на поверхности проводящих включений важно исследовать закономерности изменения распределения плотности токов в канале триинга и близлежащем диэлектрике при изменении конфигурации триинга. Определение таких закономерностей также полезно для уточнения электрофизических механизмов развития водных микротриингов в СПЭ изоляции силовых кабелей, определения оптимальных режимов нанесения СПЭ изоляции на металлическую жилу кабелей и их эксплуатации [4, 5].

**Целью работы** является определение закономерностей распределения плотности электрических токов в каналах водных микротриингов в зависимости от их конфигурации.

В работе выполнялись исследования влияния параметров, определяющих конфигурацию триингов (их длины, диаметра, угла наклона и кривизны стенок триингов при сужении, а также радиуса закругления его острия) на распределение плотности электрических токов в триинге и в локальных зонах СПЭ изоляции возле триингов.

**Физико-математическая задача** формулировалась в той же постановке, как и в работах [4, 6, 8]. Диэлектрическая среда считалась кусочно-однородной, линейной и изотропной в пределах расчетной области, но имеющей гетерогенное проводящее микровключение с водным микротриингом на поверхности. Внешнее электрическое поле было гармоническим, низкочастотным и его фаза во всех точках среды считалась одинаковой. Принималось квазиэлектростатическое допущение ( $\partial V/\partial t \approx 0$ ), которое позволяет не учитывать взаимную связь между электрическим и магнитным полями. Система уравнений Максвелла записывалась для комплексных амплитуд параметров электрического поля, как и в работах [4, 6, 8]. Учитывая безвихревой характер ЭП, вводился скалярный электрический потенциал  $\varphi$ , расчетное уравнение для которого в диэлектрике с проводящими структурами имеет вид [4, 6]

$$\operatorname{div} [-(\gamma + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}) \operatorname{grad} \varphi] = 0, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная;  $\dot{\varepsilon}$  – удельная диэлектрическая проницаемость среды;  $\gamma$  – удельная проводимость среды;  $\omega$  – угловая частота;  $i^2 = -1$ .

Вектор полного тока  $\dot{\mathbf{J}}$  представлен в виде векторной суммы токов проводимости  $\dot{\mathbf{J}}_{\text{пр}}$  в проводящем включении, водном триинге и токов смещения  $\dot{\mathbf{J}}_{\text{см}}$  в диэлектрике:

$$\dot{\mathbf{J}} = \dot{\mathbf{J}}_{\text{пр}} + \dot{\mathbf{J}}_{\text{см}} = -(\gamma + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}) \operatorname{grad} \varphi. \quad (2)$$

Уравнение (1) дополнялось условиями на границе раздела сред проводник-диэлектрик для тангенциальных и нормальных составляющих напряженности ЭП, электрических потенциалов и их производных по направлению нормали  $\mathbf{n}$  к поверхности границы:

$$\dot{E}_{1\tau} = \dot{E}_{2\tau}; \quad \varphi_1 = \varphi_2; \quad (3)$$

$$(\gamma_1 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_1) \dot{E}_{1n} = (\gamma_2 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_2) \dot{E}_{2n}; \quad (4)$$

$$(\gamma_1 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_1) \partial\varphi_1/\partial n = (\gamma_2 + i\omega\varepsilon_0 \dot{\varepsilon}_2) \partial\varphi_2/\partial n. \quad (5)$$

Для решения полевой задачи в расчетной области на ее верхней и нижней граничных поверхностях (перпендикулярных ЭП) задавались условия Дирихле – значение функций потенциала  $\varphi$  в направлении поля. На боковых поверхностях задавались условия Неймана – значение производных  $\partial\varphi/\partial n$ . Расчеты проводились численными методами, в частности методом конечных элементов, реализованным в пакете прикладных программ Comsol Multiphysic [9].

**Анализ полученных результатов.** Предполагалось, что в расчетной области твердой СПЭ изоляции кабеля на напряжение 330 кВ имеется водное микровключение сферической формы диаметром 50 мкм с водным неразветвленным триингом на поверхности, ориентированным в направлении внешнего ЭП. Длина триинга изменялась от 25 до 100 мкм, толщина основания – от 1 до 4 мкм, угол наклона стенок триинга – от 0 до 5,5 град., радиус закругления острия – от 2 до 0,15 мкм.

Изменение размерных параметров триинга проводилось таким образом, чтобы можно было выявить влияние каждого из них на характер распределения и максимальную величину плотности полного тока  $J$  в такой кусочно-однородной среде. При этом величина плотности полного тока  $J$  определялась как значение плотности тока проводимости  $J_{\text{пр}}$  в водном включении и канале триинга, а также значение плотности тока смещения  $J_{\text{см}}$  в СПЭ изоляции.

*Цилиндрический триинг.* Исследовалось распределение плотности полного тока  $J$  в канале водного триинга цилиндрической формы и близлежащем диэлектрике в зависимости от длины  $l$  и толщины  $d$  триинга (см. рис. 1).

В месте соединения водных микровключения и триинга сечение проводника резко уменьшается. Это вызывает резкое (скачкообразное) увеличение плотности тока проводимости  $J_{\text{пр}}$ . По мере прохождения вдоль триинга ток проводимости  $J_{\text{пр}}$  частично вытекает через

стенки триинга в изоляцию, образуя в ней токи смещения  $J_{см}$ , в результате чего ток  $J_{пр}$  уменьшается. Поэтому максимальная плотность полного тока  $J_{max} = J_{пр,max}$  наблюдается у основания триинга, а у его острия величины тока проводимости  $J_{пр}$  и тока смещения  $J_{см}$  практически равны.

Длина  $l$  триинга изменялась от 25 до 100 мкм, его диаметр  $d$  и радиус закругления острия  $2r_{закр} = d$  изменялись от 4 до 1 мкм, а угол наклона стенок триинга  $\alpha = 0$  град. С ростом длины  $l$  триинга (рис 1 а) от 25 до 100 мкм наблюдалось повышение значения максимальной плотности тока  $J_{max}$  от 48 до 326 А/м<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с результатами работы [7]. Из рис. 1 а видно, что для всех длин  $l$  наклон кривых  $J_{пр}$  одинаковый, то есть степень уменьшения  $J_{пр}$  вдоль канала триинга не зависит от его длины  $l$ .

При уменьшении диаметра  $d$  триинга от 4 до 1 мкм максимальная плотность тока  $J_{max}$  увеличивается от 41 до 453 А/м<sup>2</sup> (см. рис. 1 б), что также согласуется с результатами, приведенными в работе [7].

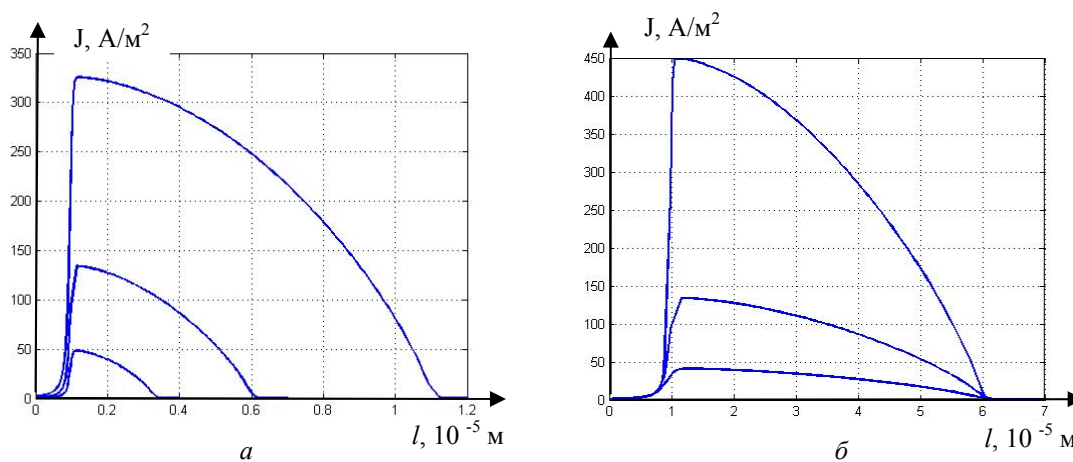


Рис. 1

Несмотря на существенное различие  $J_{max}$  у основания триинга, у его острия плотности тока принимают практически одинаковые значения. Результаты, приведенные на рис. 1 б, подтверждают, что степень уменьшения плотности тока  $J_{пр}$  вдоль канала триинга зависит от величины его диаметра  $d$ . Чем меньше диаметр триинга, тем интенсивнее происходит стекание тока проводимости в диэлектрик и тем больше градиент распределения тока по длине микротриинга.

Такой эффект объясняется тем, что при уменьшении диаметра  $d$  триинга уменьшается отношение площади его поверхности к объему:

$$\frac{V}{S} = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \frac{4}{\pi d^2} = \frac{2}{3} d.$$

Отметим, что уменьшение диаметра триинга  $d$  в  $k$  раз увеличивает  $J_{max}$  больше, чем увеличение его длины  $l$  также в  $k$  раз. То есть диаметр триинга как размерный параметр влияет на максимальную плотность тока  $J_{max}$  сильнее, чем длина триинга  $l$ .

Также отметим, что независимо от значений параметров  $d$  и  $l$  максимальная плотность тока  $J_{max}$  всегда наблюдается у основания триинга, а изменение  $J$  вдоль  $l$  является монотонно убывающей функцией.

*Триинги, имеющие форму вытянутого эллипсоида или конуса.* В работе исследовалось влияние формы триинга на характер распределения плотности полного тока  $J$ . Принималось, что длина  $l$  триингов вдоль ЭП может быть равной 50 мкм, а их максимальный диаметр – 2 мкм. На графике рис. 2 а показано распределение  $J$  в канале водных триингов следующих форм:

- цилиндрической трубки с закругленным острием;
- половины эллипсоида вращения, сильно вытянутого вдоль направления ЭП, т.е. при  $a \gg b$ , где  $a$  и  $b$  – полуоси эллипсоида вдоль и поперек ЭП соответственно;
- сужающейся трубки (конуса) с закругленным острием.

Сужение канала триинга в случае его эллипсоидальной формы замедляет падение плотности тока  $J$  вдоль длины  $l$  (кривая 2 на рис. 2 а) по сравнению с цилиндрическим триингом (кривая 1 на рис. 2 а). А для триинга формы конуса изменение  $J$  вдоль  $l$  перестает быть монотонно убывающей функцией (кривая 3 на рис. 2 а). Плотность полного тока вдоль канала триинга возрастает, достигает своего максимального значения и только потом убывает. Таким образом,  $J_{\max}$  наблюдается уже не у основания триинга, а примерно в его середине.

На рис. 2 б показано распределение плотности тока  $J$  вдоль каналов триинга формы конусов с разными углами  $\alpha$  наклона стенок. Чем больше угол  $\alpha$ , тем быстрее уменьшается площадь  $S$  перпендикулярного к ЭП сечения триинга и, как видно из рис. 2 б, быстрее изменяется плотность тока  $J$  (растет  $dJ/dl$ ) и увеличивается ее максимальное значение  $J_{\max}$  от 156 до 360 А/м<sup>2</sup>.

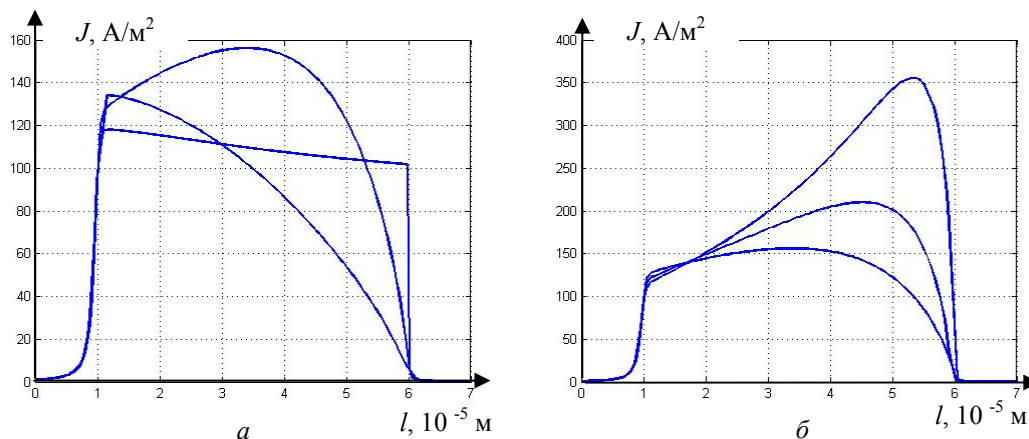


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что зависимости  $J$  от координаты  $l$  имеют максимум, причем чем больше  $\alpha$ , тем дальше от основания триинга вдоль его длины  $l$  смещается точка  $J_{\max}$ .

*Цилиндрический триинг с конусным сужением его острия.* Водный триинг в твердом диэлектрике не всегда сужается начиная со своего основания. В зависимости от конфигурации микротрещин, микропор и других дефектов диэлектрика сужение триинга может начинаться с произвольной точки вдоль его длины  $l$ .

На рис. 3 показано распределение плотности полного тока  $J$  вдоль канала триингов длиной 50 мкм и диаметром 2 мкм, которые имели форму цилиндра и конуса, соединенных основаниями.

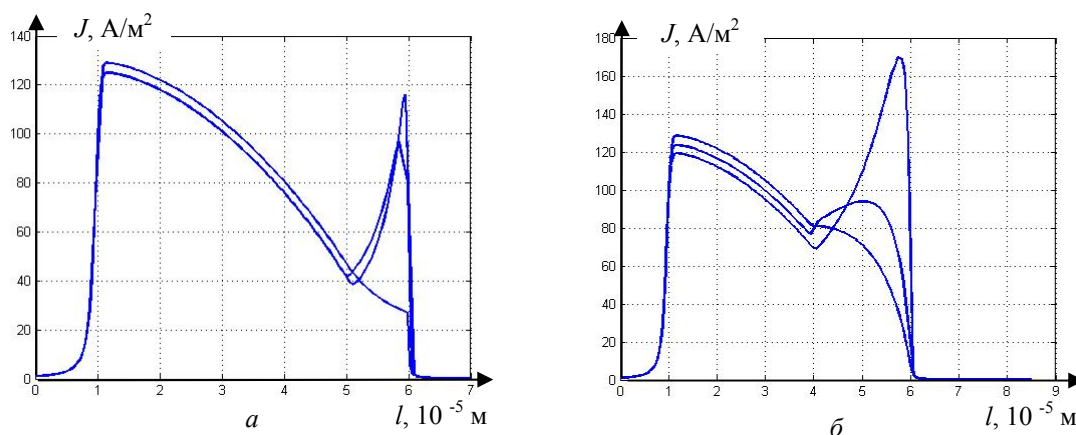


Рис. 3

На рис. 3 а представлены зависимости плотности тока  $J$  по длине микротриинга, состоящего из соединенных цилиндра длиной 40 мкм и конуса длиной 10 мкм, а на рис. 3 б – цилиндра длиной 30 мкм и конуса длиной 20 мкм. Таким образом, длина  $l$  каждого триинга вдоль ЭП была одинаковой и равнялась 50 мкм, изменялось лишь место начала сужения его

канала. Радиус закругления острия триинга  $r_{\text{закр}}$  изменялся от 1 до 0,65 мкм, а угол  $\alpha$  наклона стенок канала при сужении – от 1 до 5,5 град.

При длине  $l_k$  конуса 10 мкм максимальная плотность тока  $J_{\text{max}}$  так же, как и в случае цилиндрического триинга, наблюдалась у его основания и принимала значение  $126 \text{ А/м}^2$  (см. рис. 3 а). При длине  $l_k$  конуса 20 мкм и плавном сужении канала триинга (т.е. при малых углах  $\alpha$ ) максимальная плотность тока  $J_{\text{max}}$  наблюдалась у основания триинга (см. рис. 3 б), а при резком сужении канала триинга (т.е. при больших углах  $\alpha$ ) она достигалась у конусной части триинга на расстоянии  $l_1$  от основания. Отметим, что функция распределения плотности полного тока  $J$  вдоль длины  $l$  триинга имеет два экстремума: минимум в точке перехода цилиндра в конус и максимум, зависящий от размерных параметров триинга.

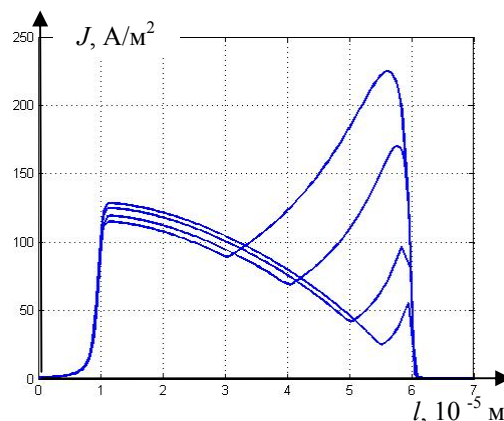


Рис. 4

На рис. 4 представлена зависимость распределения плотности полного тока  $J$  от длины конусной части триинга  $l_k$  при неизменных угле  $\alpha$  наклона стенок канала и радиусе закругления острия триинга  $r_{\text{закр}}$ . Максимальная плотность тока  $J_{\text{max}}$  изменялась от  $126$  до  $170 \text{ А/м}^2$  и наблюдалась в разных участках триинга.

Таким образом, в зависимости от длины  $l_k$  сужающейся части канала триинга, а также от угла наклона его стенок  $\alpha$  и радиуса закругления острия  $r_{\text{закр}}$  область максимальной плотности тока  $J_{\text{max}}$  смещалась вдоль длины  $l$  триинга, и значение  $J_{\text{max}}$  изменяло свою величину.

В областях диэлектрика возле микротриинга наблюдалась наибольшая диссипация электрической энергии, способствующая его локальной деградации. Появление микропор и микротрещин в разных областях диэлектрика может привести к развитию водных триингов различной конфигурации: удлиненных или разветвленных около острия, утолщенных или разветвленных около основания, а также разветвленных на промежуточном участке длины своего канала. Развитие таких разветвленных микротриингов будет способствовать увеличению интенсивности процессов деградации твердого диэлектрика.

**Выводы.** 1. Исследованы закономерности распределения плотности электрического тока в неразветвленном канале водного триинга в зависимости от его конфигурации. Определена степень влияния на указанное распределение таких параметров триинга, как его длина и диаметр, угол наклона и кривизна стенок канала триинга при его сужении, а также радиус закругления острия триинга.

2. Уменьшение толщины триинга и увеличение его длины могут более чем в 5-7 раз увеличивать в нем плотность электрического тока (при этом его максимальное значение всегда наблюдается у основания триинга).

Увеличение угла наклона стенок канала триинга и уменьшение радиуса закругления его острия могут более чем в 6 раз увеличивать плотность электрического тока в триингах формы конусов или цилиндров и конусов, соединенных основаниями. Причем в зависимости от указанных размерных параметров область максимальной плотности тока может смещаться от основания триинга вдоль длины его канала и вплоть до острия триинга.

3. Функция распределения плотности электрического тока вдоль длины водного триинга в диэлектрике в зависимости от его конфигурации имеет следующий вид:

- монотонно убывающая в триингах цилиндрической формы;
- слабоизменяющаяся (равномерная) в триингах формы вытянутых полуэллипсоидов;
- монотонно возрастающая в триингах формы конусов с большими углом наклона стенок канала и радиусом закругления острия;
- убывающая, а затем возрастающая в триингах формы цилиндров и конусов, объединенных основаниями.

4. Максимальная плотность тока в канале водного триинга наблюдается:

- у основания триингов цилиндрической и эллипсоидальной формы;
- вдоль длины триингов формы конуса или цилиндра с конусным сужением при малых углах наклона стенок канала и радиусах закругления острия;
- у острия триингов формы конуса или цилиндра с конусным сужением при больших углах наклона стенок канала и радиусах закругления острия.

В диэлектрике возле частей триинга с максимальной плотностью тока проводимости наблюдаются наибольшие плотности тока смещения, что способствует разогреву диэлектрика и его неоднородной деградации.

Появление микропор и микротрещин в разных областях диэлектрика может привести к развитию водных триингов различной конфигурации: удлинённых или разветвлённых около острия, утолщённых или разветвлённых около основания, а также разветвлённых на промежуточном участке длины своего канала.

1. Кри С., Шувалов М.Ю., Овсиенко В.Л., Колосков Д.В. Электрическая прочность и развитие водных триингов в образцах миниатюрных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена с различным содержанием добавки, препятствующей развитию триингов // Кабели и провода. – 2011. – № 6. – С. 3–7.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
3. Техніка і електрофізика високих напруг / За ред. В.О. Бржезицького та В.М. Михайлова. – Харків: НТУ "ХПІ". – Торнадо, 2005. – 930 с.
4. 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.
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Золотарев В.В. Стационарные и переходные процессы в электромеханической системе нанесения полимерной изоляции на жилу сверхвысоковольтных кабелей // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 2. – С. 101–102.
6. Щерба М.А. Влияние характерных размеров проводящих включений на возмущения электрического поля в диэлектрической среде // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2011. – № 30. – С. 134–139.
7. Щерба М.А. Влияние размерных параметров и конфигурации водных микровключений на распределение плотности электрических токов в диэлектрике // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – Спец. вып. – № 8 (114). – Т. 1. – С. 22–28.
8. Sarathi R., Nandini A., Toshikatsu T. Understanding treeing phenomena and space charge effect in gamma-irradiated XLPE cable insulation // Electrical Engineering. – 2011. – Vol. 93, Issue 4. – P. 199–207.
9. Comsol Multiphysics - <http://www.comsol.com/>

УДК 537.876.23

**М.А. Щерба<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **С.С. Розискулов<sup>2</sup>**, асп., **О.В. Васильева<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> – Національний технічний університет України "КПІ",

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

<sup>2</sup> – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

<sup>3</sup> – ВАТ "Завод "Южкабель",

вул. Автогенна, 7, Харків-99, 61099, Україна

#### **Закономірності розподілу густини електричного струму в каналі водного триінга залежно від його конфігурації**

*Досліджувалися закономірності розподілу густини електричного струму в каналі нерозгалуженого водного триінга залежно від його форми. Завдання вирішувалося засобами математичного моделювання, зокрема чисельним методом скінченних елементів. Встановлювалися залежності зміни густини струму та її максимального значення залежно від розмірних параметрів триінга, до яких віднесено довжину і діаметр триінга, кут нахилу і кривизну його стінок при звуженні, а також радіус закруглення вістря триінга. Так, уздовж каналу триінга спостерігається як зростання, так і зменшення густини струму (монотонне й ні), а її максимальне значення досягається біля основи, біля вістря або уздовж довжини триінга. У діелектрику біля областей триінга з максимальною густиною струму провідності спостерігаються найбільші густини струму зміщення, що може призводити до розігрівання діелектрика і його неоднорідної деградації, а також впливати на характер видовження або розгалуження триінга. Бібл. 9, рис. 4.*

**Ключові слова:** електричне поле, діелектрик, провідне включення, водний триінг, густина електричних струмів.

**M.A. Shcherba<sup>1</sup>**, S.S. Rozyskulov<sup>2</sup>, O.V. Vasyleva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> – National Technical University of Ukraine "Kiev Polytechnic Institute", Peremogy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

<sup>2</sup> – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

3 – Plant "Yuzhkabel",

Avtogenna str., 7, Kharkov-99, 61099, Ukraine

**Patterns of distribution of electric current density in the channel of water tree depending on its configuration**

*We studied the patterns of distribution of electric current density in the channel unbranched tree water depending on its shape. The task was solved by means of mathematical modeling, including numerical method of finite elements. The dependences of change of current density and its maximum value depending on the dimensional parameters tree are determined. These parameters included: length and diameter tree, slope and curvature of its narrowing walls and rounding tip radius of tree. So along the canal tree observed both growth and reduce current density (monotonous and not), and its maximum value is achieved at the base, near the tip and along the length of tree. In dielectric areas near the tree with a maximum density of conduction current we observe the largest displacement current density, which can lead to dielectric heating and its heterogeneous degradation and influence the nature of elongation or branching of tree. References 9, figures 4.*

**Key words:** electric field, dielectric, conducting inclusion, water tree, electric current density.

Надійшла 21.11.2013

Received 21.11.2013