

УДК 621.3.01:537.212

М. А. Щерба, канд. техн. наук
Институт электродинамики НАН Украины, г. Киев

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КОНФИГУРАЦИИ ВОДНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

Выполнен анализ распределения плотности электрических токов в диэлектрической среде с проводящими микровключениями в зависимости от их конфигурации. Показано, что наличие водных триингов на поверхности включений, а также близкое расположение включений приводит к возрастанию в них плотности токов проводимости, иногда на три порядка и более. В результате неоднородного распределения индуцированных зарядов на поверхности включений в локальных областях диэлектрика могут возникать различные плотности токов смещения, что будет вызывать неоднородную диссипацию в нем электрической энергии, и соответственно его неоднородную электротепловую деградацию. Библиограф. 6, рис. 5.

Ключевые слова: электрическое поле, диэлектрик, водное микровключение, электрический ток, водные триинги.

Виконано аналіз розподілу густини електричних струмів в діелектричному середовищі з провідними микровключеннями в залежності від їхньої конфігурації. Показано, що наявність водних триінгів на поверхні включень, а також близьке розташування включень призводить до зростання у них густини струмів провідності, іноді на три порядки і більше. В результаті неоднорідного розподілу індукованих зарядів на поверхні включень в локальних областях діелектрика можуть виникати різні густини струмів зміщення, що буде викликати неоднорідну дисипацію у ньому електричної енергії, і відповідно його неоднорідну електротеплову деградацію. Бібл. 6, рис. 5.

Ключові слова: електричне поле, діелектрик, водне микровключення, електричний струм, водні триінги.

Постановка проблемы

Проводящие микровключения вызывают неоднородное усиление электрического поля (ЭП) в твердом диэлектрике интенсифицируя процессы деградации его микрообластей вблизи таких включений [2–4]. В переменном ЭП основными токами в диэлектрике являются токи смещения, а в проводящих включениях – токи проводимости. Изменение величины и направления внешнего поля вызывают изменение плотности токов проводимости во включениях [2–4]. Если их форма будет сложной, то плотности токов в различных областях включений могут существенно отличаться. В тоже время из-за неоднородного распределения индуцированных зарядов на поверхности проводящих включений в локальных областях диэлектрика могут возникать различные плотности токов смещения, что будет вызывать неоднородную диссипацию в нем электрической энергии, и соответственно его неоднородную электротепловую деградацию. Это подтверждает актуальность анализа неоднородности распределения токов в объеме изоляции.

В последние годы большое внимание уделяется анализу возмущений ЭП в шитой полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей: водными триингами – длинными тонкими трубками, заполненными проводящей жидкостью (водой и растворенными в ней веществами) [2–4], и совокупностью проводящих микровключений, расположенными на близких взаимных расстояниях [2]. Оба случая характеризуются увеличением максимальной напряженности поля E_{\max} , областей напряженных объемов V_n , возникновением больших электрических сил F и давлений P в локальных областях изоляции, что негативно сказывается на ее электрической и механической прочности [2, 3].

Из-за несимметричности молекул воды, они поляризуются во внешнем ЭП и могут дрейфовать в области сильного поля [2, 3]. Поэтому молекулы воды, появляющиеся в твердой пористой изоляции, со временем могут собираться в микрообластях возле острия проводящих триингов, ускоряя их развитие и соответственно ускоряя деградацию полимерной изоляции.

В работе [3] показано, что при близком взаимном расположении проводящих включений, наведенные на поверхности электрические заряды взаимодействуют не только с внешним электрическим полем, а и оказывают влияние друг на друга. Это проявляется в стекании зарядов в локальные области близко расположенных поверхностей и приводит к усилению ЭП в диэлектрическом промежутке между включениями.

Важно уточнить закономерности протекания токов проводимости и смещения в твердой изоляции с указанными проводящими микродефектами, сильно возмущающими ЭП.

Целью данной работы является установление закономерностей изменения электрических токов проводимости и смещения в кусочно-однородной структуре - твердом диэлектрике с проводящими микровключениями, разных размеров и конфигурации, сильно возмущающих внешнее электрическое поле.

Основной материал

В работе исследовались изменение плотности токов проводимости и смещения при появлении в диэлектрике взаимно удаленных проводящих микровключений разных форм и конфигурации, близко расположенных микровключений и микровключений с триингами на поверхности.

Физико-математическая постановка задачи, как и в работах [2, 3], формулировалась в квазиэлектростатической постановке. Поскольку внешнее электрическое поле было гармоническим, то использовалась система дифференциальных уравнений Максвелла [1], записанная для комплексных амплитуд векторов ЭП и вводился скалярный электрический потенциал ϕ , расчетное уравнение для которого имеет вид:

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

Вектор полного тока \mathbf{J} был представлен в виде векторной суммы токов проводимости $\mathbf{J}_{\text{пр}}$ и токов смещения $\mathbf{J}_{\text{см}}$.

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

Уравнение (1) и (2) дополнялось условиями равенства потенциалов и нормальных компонент полного тока на границе сред проводник-диэлектрик. Расчеты проводились численным методом конечным элементов, реализованным в пакете прикладных программ Comsol Multiphysics.

Обоснование механизмов деградации твердого диэлектрика с водными включениями.

Теоретически деградацию полимерной изоляции в кабелях трехфазной сверхвысоковольтной линии электропередачи можно оценить по токам утечки высших гармоник, в первую очередь третьей [4]. Наличие высших гармоник объясняется появлением некоего нелинейного элемента в цепи, которым и представляется водное включение или триинг. Электрический ток $i_{\text{воды}}(t)$, протекающий в участке изоляции с дефектами можно рассчитать как:

$$i_{\text{воды}}(t) = \frac{1}{R^2} [k_{\text{воды}}^2 u_{\text{воды}}^3(t) - u_{\text{воды}}(t)] + \frac{u_{\text{воды}}(t)}{R_{\text{воды}}} + i_{\text{доп}}, \quad (3)$$

где $u_{\text{воды}}(t)$ и $R_{\text{воды}}$ – напряжение приложенное к участку изоляции с водными микродефектами и сопротивление такого участка;

R – сопротивление однородной изоляции;

$k_{\text{воды}}$ – расчетная константа.

Величину искомого тока $i_{\text{воды}}(t)$ можно рассчитывается по численному методу Эйлера.

Для расчета термических процессов в локальном участке изоляции с дефектами, связанных с протеканием электрических токов, как и в работе [5], можно использовать уравнение:

$$\rho C_V \frac{dT}{dt} + \operatorname{div}(k' \cdot \operatorname{grad} T) = \gamma E^2, \quad (4)$$

где ρ и C_V – плотность и теплоемкость материала;

k' – его теплопроводность.

В работах [2, 3] показано, что появление водных микровключений и триингов вызывает возникновение больших давлений \mathbf{P} их поверхности на структуру изоляции. Давление \mathbf{P} определяется кулоновским взаимодействием внешнего ЭП с зарядами, индуцированными на поверхности включений. Такое давление можно определить через тензор напряжений Максвелла согласно уравнению [5]:

$$P = \frac{1}{2} E(Dn) + \frac{1}{2} \varepsilon_0 \rho \frac{d\varepsilon}{d\rho} E^2 n. \quad (5)$$

Внешнее электрическое поле, изменяемое с частотой 50 Гц, взаимодействуя с зарядами, индуцированными на поверхности водных микровключений, будет стремиться вытягивать их вдоль поля [3]. При наличии в изоляции субмикронных пор вдоль поля они будут заполняться влагой, образуя водные микротриинги [2]. В таком случае максимальное давление P_{\max} на изоляцию будет возникать вблизи полюсов включений в направлении ЭП:

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (\varepsilon + \rho \frac{d\varepsilon}{d\rho}) E_{\max}^2. \quad (6)$$

В работе [5] показано, что для полиэтилена справедливо приближение $\rho \frac{d\varepsilon}{d\rho} \approx \varepsilon$. Тогда уравнение (6) может быть записано в виде:

$$P_{\max} = \varepsilon_0 \varepsilon E_{\max}^2. \quad (7)$$

В работе [2] в качестве одного из электрофизических механизмов появления и развития водных триингов исследуется явление диэлектрофореза – перемещения молекул и субмикронных капель воды в области повышенной напряженности поля E . Сила F , действующая на водные диполи, описывается уравнением:

$$F = (\alpha + \frac{m^2}{3kT}) E \frac{dE}{dx}, \quad (8)$$

где α – поляризуемость;
 m – дипольный момент молекулы воды;
 k – постоянная Больцмана.

Изменение концентрации жидкости вследствие диэлектрофореза молекул воды в микрообласти сильного электрического поля изоляции можно описать уравнением, полученным в работе [5]:

$$\frac{c_2}{c_1} = \exp \left\{ \left(\alpha + \frac{m^2}{3kT} \right) (E^2 - E_0^2) \right\}. \quad (9)$$

Характерное время роста триинга τ_0 равняется [6]:

$$\tau_0 = \frac{4}{3} \frac{\eta}{\rho_0 \varepsilon_0 k_0 E_1^2}, \quad (10)$$

где η – вязкость полиэтилена;
 $k_0 = 0,079 \text{ м}^3/\text{кг}$ – расчетная константа.

Чем больше протяженность водных включений и триингов вдоль поля, тем большие значения будет принимать максимальная напряженность E_{\max} возмущенного ЭП, и тем больше будут увеличиваться плотности электрических токов J , давления P и результирующие электрические силы F , ускоряющие электромеханическую и термическую деградации твердого диэлектрика.

Результаты вычислений

Одинокое эллипсоидальное микровключение. Моделировались плотности электрического тока J , в сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляции силовых кабелей с проводящими (водными) микровключениями, в которой возникало внешнем гармоническом ЭП частотой 50 Гц, создаваемое напряжением 330 кВ между проводящими жилой и экраном. В модели исследовались плотности токов в слое изоляции толщиной до 1 мм, с дефектами размерами до 100 мкм. Учитывая, что общая толщина изоляции для кабелей на напряжения 330 кВ составляет 25-30 мм, то в ее слое толщиной до 1 мм распределение ЭП можно принимать однородным.

Проведенными расчетами было установлено, что в диэлектрике без включений протекают токи смещения с однородным распределением плотности по сечению $J_{\text{см}0} = 1,8 \text{ А/м}^2$. Токи проводимости в таком диэлектрике меньше токов смещения на 3 и более порядков. Но в водном микровключении токи проводимости зависят от его геометрических характеристик. В сферическом включении диаметром 50 мкм плотность тока проводимости равна $J_{\text{пр}} = 5,5 \text{ А/м}^2$. Токи смещения в таком включении на 3 порядка меньше.

Известно, что в удаленном микровключении распределение плотности тока проводимости $J_{пр}$ однородно по сечению. Необходимо было исследовать, сохраняется ли однородность токов в водных близко расположенных включениях.

На рис. 1 тонированные области соответствуют максимальной плотности электрического тока J (согласованной со шкалой, приведенной в A/m^2 справа на рис. 1а, б, в). На рис. 1а приведен ток смещения в диэлектрике возле поверхности микровключения, на рис. 1б – ток проводимости в микровключении, однородно распределенный по его сечению, на рис. 1в – суммарный ток в сечении кусочно-однородной среды.

Минимальная плотность тока смещения $J_{см0} = 1,8 A/m^2$ наблюдается в однородной изоляции на большом расстоянии от поверхности включения. По мере приближения к дефекту $J_{см}$ увеличивается по закону степенной функции и вблизи его поверхности принимает свое максимальное значение $J_{см max} = J_{пр}$, равное плотности тока проводимости в водном включении.

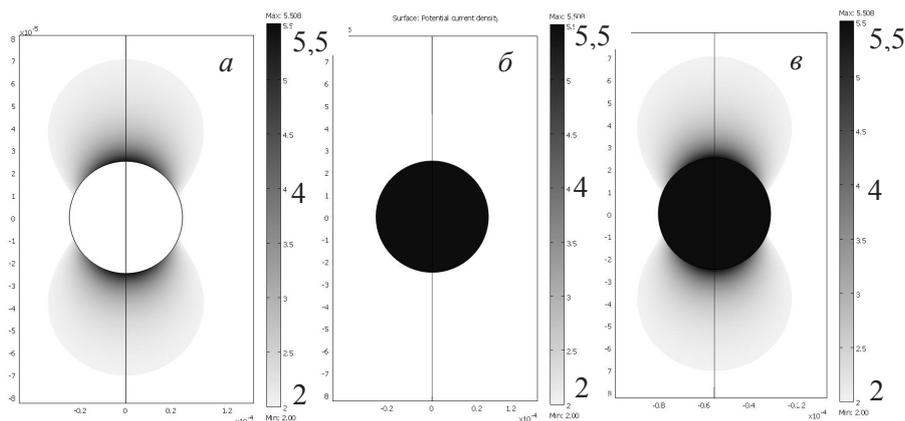


Рис. 1

Исследовалась зависимость плотности полного тока J от формы эллипсоидального микродефекта. Форма эллипсоида вращения однозначно определяется двумя его размерными параметрами – его полуосями a и b , соответственно поперек и вдоль направления поля.

На графике, приведенном на рис. 2, показана зависимость максимальной плотности полного тока J_{max} от соотношения полуосей эллипсоида b/a , которая имеет вид степенной функции. Чем меньше отношение b/a , то есть чем сильнее эллипсоид вытянут вдоль ЭП, тем большее J_{max} наблюдается в системе, причем увеличение J_{max} может быть в десятки раз.

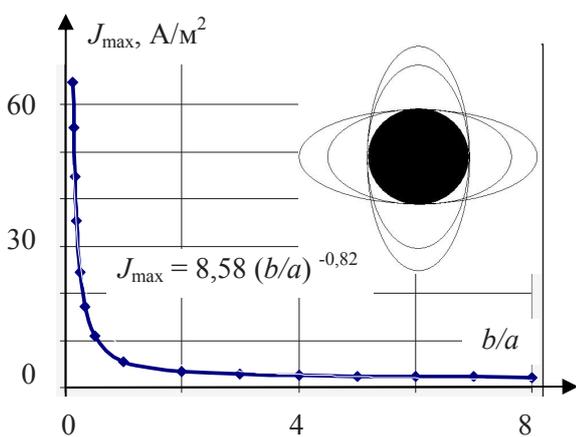


Рис. 2

Рассмотрим три типа включений: a – эллипсоид, вытянутый вдоль ЭП, b – сферу и v – эллипсоид, вытянутый поперек поля. В каждом из трех случаев будут разными не только J_{max} , но и градиенты плотности полного тока $grad J$. Чем меньше $grad J$ в изоляции, тем более плавно происходит уменьшение J на расстоянии l от поверхности включения. Начиная с некоторого l_1 наибольший ток будет наблюдаться не для включения a , а для включения b , а начиная с некоего l_2 – для включения v .

Эллипсоидальное включение с неразветвленным триингом на поверхности. Моделировалось распределение плотности электрического тока J в проводящем эллипсоидальном микровключении с триингом на поверхности.

На рис. 3 показано распределение плотности токов a – проводимости $J_{пр}$ внутри проводящего дефекта и b – смещения $J_{см}$ в диэлектрике. Отметим увеличение более чем в 1000 раз $J_{пр}$ при появлении дендрита на поверхности включения. Если в одиночном сферическом микровключении наблюдается $J_{пр} = 5,5 A/m^2$, то при появлении дендрита в его основании $J_{пр} = 7000 A/m^2$, что приводит к значительному увеличению плотности протекающих токов, разогреву изоляции и способствует в ней разрушительным электрофизическим процессам.

Максимальное $J_{пр}$ наблюдается у основания дендрита (см. рис. 3 а и в). Это связано с существенным различием в площадях поперечного сечения включения и дендрита. По мере прохождения вдоль дендрита ток частично вытекает через стенки в изоляцию, что приводит к уменьшению $J_{пр}$ (см. рис. 3 в).

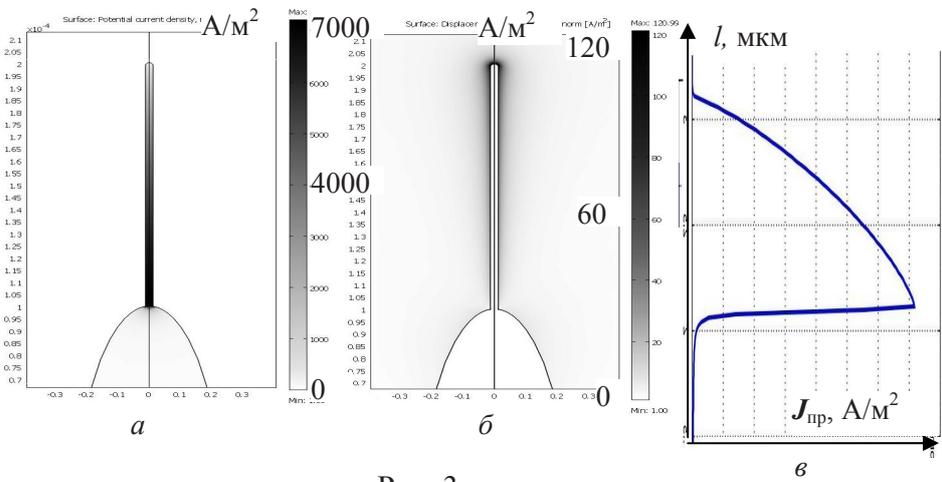


Рис. 3

Два близко расположенных включения. Моделировались плотности электрического тока J в двух сферических водных микровключениях диаметрами 50 мкм, расстояние между которыми меньше их характерных размеров.

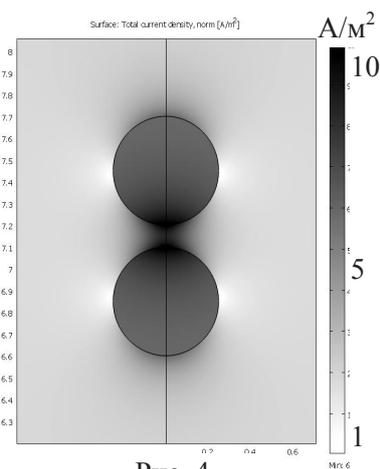


Рис. 4

На рис. 4 показано распределение полного тока J в диэлектрике и внутри двух проводящих включений. Тонированные области отвечают областям наибольшего J , согласно шкале приведенной на рисунке справа.

На рис. 5 приведены графики распределения плотности тока: а – проводимости $J_{пр}$, б – смещения $J_{см}$, и в – полного тока J вдоль линии, соединяющей центры двух близко расположенных проводящих включений в диэлектрике.

За счет взаимодействия между собой зарядов, индуцированных внешним ЭП на поверхностях проводящих включений, наблюдаются следующие закономерности:

– распределение плотности тока проводимости в каждом из включений становится неоднородным, в отличие от одиночных включений, при этом областями повышенной плотности тока проводимости становятся области разных микровключений, наиболее близко расположенные друг к

другу;

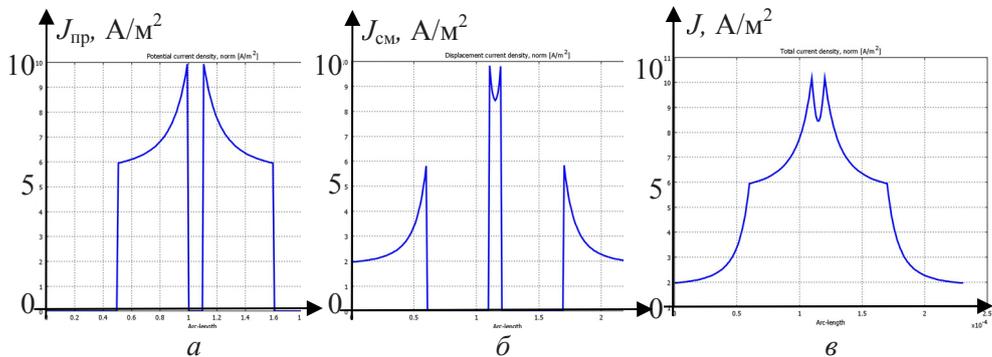


Рис. 5

– наблюдается увеличение плотности тока смещения в диэлектрическом промежутке между включениями, причем плотность тока смещения может превышать плотность тока проводимости в некоторых областях включения, что также не наблюдалось в СПЭ изоляции возле одиночного включения.

Выводы

1. Установлены закономерности изменения плотности токов смещения в твердом диэлектрике и токов проводимости в водных микровключениях от их конфигурации. Выявлено, что плотность

полного тока возрастает по закону степенной функции при вытягивании эллипсоидального включения вдоль поля. Показано, что форма проводящего включения влияет не только на значение максимальной плотности тока J_{\max} , но и на градиент распределения плотности тока $\text{grad } J$ во всем сечении изоляции вблизи проводящего включения

2. Определено, что при появлении на поверхности одиночного проводящего микровключения водного триинга плотность тока проводимости внутри него возрастает более чем на три порядка, что может существенно влиять на диэлектрические свойства изоляции.

3. Выявлено, что при близком расположении двух проводящих микровключений вдоль электрического поля в них возникает неоднородное распределение плотности тока проводимости, при этом областями повышенной плотности тока проводимости становятся области разных микровключений, наиболее близко расположенные друг к другу.

Показано также увеличение плотности тока смещения в диэлектрическом промежутке между включениями, причем ее значение может превышать плотность тока проводимости в некоторых областях. При этом выявлено нелинейное увеличение плотности полного тока при уменьшении взаимного расстояния между включениями.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 с.
2. 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.
3. Щерба М.А. Моделирование усиления электрического поля и развития водных дендритов в изоляции высоковольтного электроэнергетического оборудования // Техн. электродинаміка. Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність” – 2012. – Ч.3. – С. 160-167.
4. Lima F.N., Oliveira J.C., Andrade D.A., Silva R., Finazzi A.P., Carvalho B.C. "Modeling water tree phenomenon for insulated cable loss current estimation" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. – 2008. - PP. 1-6.
5. Matsuba H., Kawai E. Water Tree Mechanism in Electrical Insulation, IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 1976. - vol.95. – PP. 660 – 670.

The influence of water micro-inclusions dimensional parameters and configuration on electric currents density distribution in the dielectric

M. A. Shcherba

Institute of electrodynamics of NASU,
pr. Peremogy, 56, Kiev-57, 03680. E-mail: m.shcherba@gmail.com

The analysis of the electric currents density distribution in the dielectric medium with conducting micro-inclusions depending on their configuration has been made. It is shown that the presence of water treeing on the surface of inclusions, as well as close location of inclusions result in the conduction currents density increasing sometimes three orders of magnitude or more in these inclusions. As a result of induced charges inhomogeneous distribution on the surface of these inclusions the different displacement currents density may be generated in the local regions of dielectric, what will cause non-uniform electrical energy dissipation in it, and respectively its non-uniform electro-thermal degradation. Ref. 6, fig. 5.

Keywords: electric field, dielectric, water micro-inclusion, electric current, water treeing.

1. Landau L.D., Livshits E.M. Electrodynamics of continuums. – Moskva: Nauka, 1980. – 560 p.
2. Shidlovskiy A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheriavaya I.N. The ultra-high voltage polymer-insulated cables. – Kiev: Institut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2013. – 550 p.
3. Shcherba M.A. Simulation of electric field amplification and development of water treeing in insulation of high-voltage equipment // Tehnichna elektrodynamika. Tem. vyp. “Sylova elektronika ta energoefektyvnict” – 2012. – Part 3. – PP. 160–167. УДК 621.398:654.93:504.064.3:574

4. *Lima F.N., Oliveira J.C., Andrade D.A., Silva R., Finazzi A.P., Carvalho B.C.* "Modeling water tree phenomenon for insulated cable loss current estimation" Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. – 2008. – P.P. 1–6.

5. *Matsuba H., Kawai E.* Water Tree Mechanism in Electrical Insulation, IEEE Transactions on power apparatus and systems. – 1976. - vol.95. – PP. 660 – 670 p.