

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ПЛОТНОСТИ ТОКА ВОЗЛЕ ВОДНЫХ  
ВКЛЮЧЕНИЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЕЙ  
С УЧЕТОМ ЕЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ**

**М.А. Щерба\***, канд.техн.наук, **А.Д. Подольцев**, докт.техн.наук

**Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.**

**e-mail: [m.shcherba@gmail.com](mailto:m.shcherba@gmail.com)**

*Разработана математическая модель и выполнен анализ неоднородного распределения электрического поля и плотности полного тока в микрообъемах сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей возле водных микровключений, вытянутых вдоль поля. Анализ проводился с учетом нелинейной зависимости удельной проводимости изоляции от напряженности электрического поля. Рассмотрен мультифизический характер процессов возможной деградации твердой полимерной изоляции сверхвысоковольтных кабелей при возникновении в ней проводящих эллипсоидальных включений и разветвленных водных дендритов. Исследования проводились с использованием результатов расчета макронеоднородного распределения напряженности электрического поля по сечению сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей. Библ. 17, рис. 4.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, полиэтиленовая изоляция, нелинейные свойства, неоднородность, микровключение, кабельная линия, математическое моделирование.

Применение в системах электроснабжения высоковольтных кабельных линий электропередачи (ЛЭП) вместо воздушных многократно повышает их надежность и безопасность, в частности уменьшает уровни электрического и магнитного полей в непосредственной близости [4, 13]. В настоящее время тенденции развития промышленных и городских систем электроснабжения промышленно развитых стран Европы, Америки и Азии основываются на применении в них высоковольтных кабелей со сшитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией. Высокие инновационные результаты в этом направлении имеет и украинский завод "Южкбель" (г. Харьков), который за последние годы выпустил и передал отечественным и зарубежным предприятиям более 1000 км силовых кабелей со СПЭ изоляцией на напряжения 110 кВ и выше. В Украине уже завершено строительство первой кабельной линии длиной 12,8 км, использующей кабели с такой изоляцией на напряжение 330 кВ для электроснабжения электросталеплавильного комплекса на участке Приднепровская ТЭС – подстанция 330/35/10 кВ "Печная" [1].

Применение высоковольтных кабелей со СПЭ изоляцией особенно актуально в мегаполисах и промышленно развитых регионах с высокой концентрацией населения и материальных ценностей, поэтому к изоляции таких кабелей предъявляют повышенные требования по надежности и долговечности. При этом надо учитывать, что в результате неоднородности распределения электрического поля (ЭП) в изоляции сверхвысоковольтных кабелей цилиндрического исполнения на напряжения до 500 кВ напряженность поля в радиальном направлении может изменяться в 3–4 раза и возле поверхности токопроводящих жил достигать значений более 20 кВ/мм. При электропитании мощных несимметричных потребителей, как дуговые сталеплавильные печи, индукционные и кондукционные электротермические установки или тяговые подстанции железнодорожного транспорта напряжение на изоляции фазных кабелей (и соответственно напряженность электрического поля в ее объеме) может повыситься в 1,5 раза и более [2]. Повышенное напряжение на изоляции кабелей возникает также при возникновении аварийных режимов в трехфазной кабельной линии, в частности при обрыве или коротком замыкании одной или нескольких фаз на землю. Так, в работе [5] на основании математического моделирования и анализа электромагнитных процессов трехфазной кабельной линии на 330 кВ было показано, что при возникновении в ней аварийных режимов напряжение на изоляции фазных кабелей может увеличиться более чем в 1,8 раза.

В настоящее время задачи исследования распределения ЭП в различных неоднородных средах электротехнических систем сложной конфигурации часто решают с применением программы Comsol Multiphysics и метода многомасштабного моделирования [3]. В работах [4, 14] было подтверждено, что многократное усиление электрического поля в изоляции кабелей возникает возле острых выступов на поверхности их токопроводящих жил и экранов или внутренних проводящих включений. В работах [6–8, 14] уточнено, что особо большое усиление поля может возникать в изоляции между полюсами проводящих включений, близко расположенных вдоль силовых линий внешнего

ЭП. В таких микрообъемах напряженность ЭП может превысить электрическую прочность СПЭ изоляции [9, 12]. Поэтому при возможном многократном локальном усилении ЭП в СПЭ изоляции кабелей важно исследовать закономерности взаимного влияния совокупности параметров поля и изоляции, а также условия изменения электрофизических механизмов ее деградации с определением наиболее приоритетных из них при данном уровне приложенного напряжения.

Экспериментальные результаты и теоретическая модель, приведенные в работах [9–12, 15–17], показали, что повышение напряженности сильного электрического поля может вызывать многократное нелинейное увеличение удельной электропроводности полиэтилена. В работе [7] обосновано, что учет нелинейной проводимости полиэтиленовой изоляции может существенно изменять характер распределения ЭП в ее локальных микрообъемах. Так как возле водных микровключений в локальных микрообъемах СПЭ изоляции высоковольтных кабелей могут возникать резко неоднородные электрические поля, то возникла потребность проведения дополнительных исследований для уточнения условий изменения плотности полного тока и целесообразности учета не только электромеханического, но и электротеплового механизма деградации микроструктуры изоляции.

Поэтому **целью данной работы** было исследование распределения сильного электрического поля и плотности токов в окрестности водных микровключений полимерной изоляции сверхвысоковольтных кабелей с учетом нелинейной зависимости ее удельной проводимости от напряженности поля.

**Макрораспределение ЭП в СПЭ изоляции кабелей.** Постановка задачи расчета макрораспределения напряженности ЭП в СПЭ изоляции сверхвысоковольтных кабелей проводилась при общепринятых допущениях к конструкции, материалам и параметрам их элементов.

Допускалось, что такие кабели на напряжения от 165 до 500 кВ имеют цилиндрическую конструкцию, поверхности их основных элементов (токопроводящей жилы, СПЭ изоляции, полупроводящих и экранирующих слоев) являются соосными (т.е. имеют общую ось вращения), материалы элементов – однородные, а параметры – линейные или нелинейные.

Распределение электрического поля в изоляции вдоль оси кабелей принималось однородным, а его радиальная макронеоднородность оценивалась на основании расчета напряженности поля  $E_{\Delta}(t)$  на расстоянии  $\Delta$  от внутренней поверхности изоляции кабелей цилиндрической конструкции, который выполнялся согласно выражению [4]

$$E_{\Delta}(t) = \frac{U(t)}{(R_1 + \Delta) \ln(R_2/R_1)}, \quad (1)$$

где  $U(t)$  – напряжение между внутренней и внешней соосными поверхностями изоляции, а  $R_1$  и  $R_2$  – ее внешний и внутренний радиусы.

В сверхвысоковольтных кабелях обычно применяют алюминиевые или медные токопроводящие жилы сечением от 400 до 2500 мм<sup>2</sup> и слой СПЭ изоляции толщиной от 19 до 35 мм. Из (1) следует, что, если сечение жилы кабелей на 330 кВ равно 630 мм<sup>2</sup>, то возле внутренней поверхности СПЭ изоляции толщиной  $\Delta \leq 18,5$  мм напряженность поля превышает значение  $E \approx 20$  кВ/мм. При уменьшении сечения жилы до 400 мм<sup>2</sup> напряженность ЭП становится больше 23 кВ/мм. В СПЭ изоляции кабелей на напряжения 500 кВ напряженность поля может достигать значение 30 кВ/мм.

В дальнейшем при микроанализе неоднородного ЭП, возмущенного проводящими микровключениями в расчетном объеме СПЭ изоляции кабелей (т.е. при анализе ЭП на микроуровне), выбиралось среднее значение напряженности поля  $E \approx 20$  кВ/мм.

**Анализ ЭП в изоляции возле ее микродефектов.** Появление в СПЭ изоляции проводящих микровключений различных размеров, формы и взаимного расположения, а также зарождение в ней водных микротриингов являются основными причинами ее деградации [4, 6–12, 14–17]. Так, зависимость возмущений ЭП в СПЭ изоляции от дисперсности близко расположенных в ней водных микровключений рассмотрена в работе [9], степени разветвленности водных триингов – в [15], а силовые взаимодействия между близко расположенными водными микровключениями – в [7].

Внешнее низкочастотное гармоническое ЭП на полюсах выпуклых поверхностей проводящих включений наводит неравномерно распределенные заряды, которые, взаимодействуя с внешним полем и между собой, вызывают пульсирующие электрические давления и силы со стороны водных микровключений на микроструктуру изоляции [7, 14]. Если давления на острых полюсах водных микровключений превосходят механическую прочность полиэтилена [7], то в изоляции возникают дополнительные микротрещины, которые увеличивают область возмущенного электрического поля, а также размеры структурных дефектов изоляции.

**Нелинейные свойства СПЭ изоляции.** В твердой СПЭ изоляции внешнее гармоническое электрическое поле вызывает упругую электронную поляризацию, токи смещения и незначительные токи ионной проводимости, из-за чего возникает перемещение собственных ионов материала и примесей [9, 12]. При наличии в изоляции проводящих микровключений (в частности водных микровключений и трингов) в них возникают одновременно упругая электронная и неупругая дипольно-релаксационная поляризации, а также токи ионной проводимости, зависящие от концентрации в воде диссоциированных собственных ионов и примесей [10, 12]. Под воздействием внешнего ЭП в результате движения свободных зарядов и их дальнейшего закрепления на границе сшитый полиэтилен – вода может возникать также межфазная (миграционная) поляризация. В работах [11, 15] обосновано, что вследствие миграционной поляризации в микрообъемах полиэтилена возле острия ветвей водных трингов может накапливаться достаточно большой объемный заряд.

Если у произвольного нелинейного диэлектрика электропроводность  $\sigma(E)$  и диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon(E)$  являются известными функциями напряженности электрического поля  $E(t) = |\mathbf{E}(t)|$ , то уравнение для изменяющейся во времени плотности объемного заряда  $\rho(t)$  можно получить из закона сохранения полного заряда в виде

$$\operatorname{div} \mathbf{J}(t) + \partial \rho(t) / \partial t = 0. \quad (2)$$

Т.к.  $\mathbf{J} = \sigma(E) \mathbf{E}$ , а  $\mathbf{D} = \varepsilon(E) \mathbf{E}$ , получаем

$$\frac{\sigma(E)}{\varepsilon(E)} \operatorname{div} \mathbf{D}(t) + \mathbf{D}(t) \cdot \operatorname{grad} \frac{\sigma(E)}{\varepsilon(E)} + \frac{\partial \rho(E)}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

Применив равенство  $\operatorname{div} \mathbf{D} = \rho$  для дифференциального уравнения, описывающего характер изменения во времени плотности объемного заряда  $\rho(t)$ , можно получить выражение

$$\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} + \frac{\sigma(E)}{\varepsilon(E)} \rho(t) = -\varepsilon(E) \mathbf{E}(t) \cdot \operatorname{grad} \frac{\sigma(E)}{\varepsilon(E)}. \quad (4)$$

Отметим, что в случае линейной диэлектрической среды (когда ее удельная проводимость  $\sigma$  и относительная диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  остаются неизменными при всех возможных напряженностях ЭП) уравнение (4) упрощается и имеет известное аналитическое решение [9]

$$\frac{\partial \rho(t)}{\partial t} + \frac{\sigma}{\varepsilon} \rho(t) = 0, \quad \rho(t) = \rho_0 \exp(-t / \tau_m), \quad \tau_m = \varepsilon / \sigma, \quad (5, 6)$$

где  $\tau_m$  – время диэлектрической релаксации Максвелла, характеризующее время протекания переходного процесса перераспределения объемных зарядов в произвольной точке изоляции.

Поскольку на границе вода–полиэтилен значение удельной проводимости  $\sigma$  изменяется на 12 порядков (от  $10^{-2}$  до  $10^{-14}$  См/м), а величина диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  – менее, чем на 2 порядка (от 80 до 2,4), то в данной статье (как и в работе [15]) в качестве основного фактора, влияющего на характер распределения ЭП в СПЭ изоляции, было принято изменение ее удельной проводимости  $\sigma$ .

Учитывалось, что появление в изоляции объемного заряда  $\rho(t)$  дополнительно усиливает ЭП в ее близлежащих микрообъемах. Учет ионной проводимости полиэтилена проводился согласно публикациям [11, 12], т.е. при допущении о справедливости моделей Френкеля и Шотки, а перемещение ионов и вакансий в кристаллической решетке изоляции представлялось как движение заряженных частиц в периодических потенциальных ямах. В таком случае внешнее ЭП в направлении своих силовых линий уменьшало высоту потенциального энергетического барьера и увеличивало вероятность "прыжка" иона или вакансии в этом направлении, т.е. увеличивало проводимость изоляции.

На основании такого подхода в работе [15] было предложено учитывать зависимость удельной проводимости СПЭ изоляции от напряженности ЭП в виде следующего выражения:

$$\sigma(E) = \sigma_{const} \left( \frac{2kT}{aeE(t)} \right) \operatorname{sh} \left( \frac{aeE(t)}{2kT} \right), \quad (7)$$

где  $\sigma_{const} = 10^{-14}$  См/м – постоянная проводимость сшитого полиэтилена в слабом ЭП,  $e$  – заряд носителя,  $T$  – абсолютная температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана и  $a$  – расстояние между потенциальными энергетическими барьерами, которое для полиэтилена составляет порядка 2 нм.

В выражении (7) структура СПЭ изоляции принималась изотропной, а мгновенное значение удельной проводимости  $\sigma(E)$  в каждой ее точке было скалярной величиной, как и в работе [6].

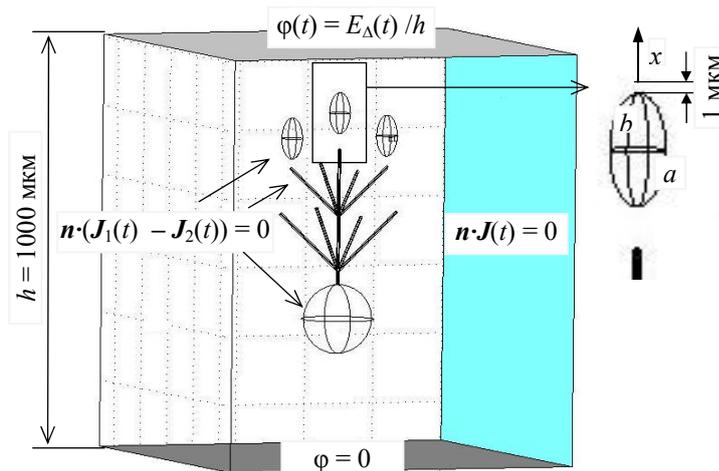


Рис. 1

лялось полусферой радиусом 1 мкм.

При напряженности электрического поля  $E_{cp} \leq 20$  кВ/мм допускалось, что СПЭ изоляция является изотропной, однородной и линейной средой, а при  $E_{cp} > 20$  кВ/мм – нелинейной. Эффектом запаздывания пренебрегалось, и фаза напряженности ЭП во всех точках среды считалась одинаковой.

Задача решалась в квазистатическом приближении, электрическое и магнитное поля считались независимыми. Из допущения о безвихревом характере ЭП был введен скалярный электрический потенциал  $\varphi(t)$ , при этом  $E(t) = -\text{grad } \varphi(t)$ .

Вектор плотности полного тока  $J_{\text{полн}}(t)$  в СПЭ изоляции состоял из суммы векторов тока проводимости  $J_{\text{пр}}(t)$  и тока смещения  $J_{\text{см}}(t)$  и определялся согласно выражению

$$J_{\text{полн}}(t) = J_{\text{пр}}(t) + J_{\text{см}}(t) = \sigma(E)E(t) + \varepsilon\varepsilon_0 \partial E(t) / \partial t. \quad (8)$$

Из непрерывности полного тока и уравнения (2) следует, что

$$\text{div } J_{\text{полн}}(t) = 0, \quad (9)$$

а из уравнений (8) и (9) было получено дифференциальное уравнение для расчета электрического потенциала  $\varphi(t)$  и соответственно ЭП в среде

$$\text{div} \left[ \sigma(E) \text{grad } \varphi(t) - \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \text{grad } \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0. \quad (10)$$

Уравнение (9) на верхней и нижней границах расчетной области (рис. 1) дополнялось условиями Дирихле, т.е. заданием значений потенциалов, найденных из решения задачи на макроуровне. На боковых границах расчетной области оно дополнялось условиями Неймана, т.е. равенством нулю производных потенциалов по нормали к поверхности, что соответствует отсутствию токов в этих направлениях. На границе раздела СПЭ изоляция – водное микровключение задавались условия равенства потенциалов и их производных по нормали к поверхности [6]

$$\varphi_1(t) = \varphi_2(t), \quad (\gamma_1 + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_1) \partial \varphi_1(t) / \partial n = (\gamma_2 + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_2) \partial \varphi_2(t) / \partial n, \quad (11)$$

т.е. равенства нормальных компонент плотности полного тока  $n \cdot (J_{\text{полн.1}}(t) - J_{\text{полн.2}}(t)) = 0$ .

Расчетный интервал времени  $\Delta t$  дискретизировался, а уравнение (10) решалось методом конечных элементов для всех моментов времени  $t_i$  с учетом нелинейной зависимости, определяемой согласно выражению (6). В каждой точке расчетного объема СПЭ изоляции определялись значения  $\varphi(t_i)$ ,  $E(t_i)$ ,  $J_{\text{пр}}(t_i)$ ,  $J_{\text{см}}(t_i)$  и  $J_{\text{полн}}(t_i)$ . Расчет начинался с нулевых начальных условий, т.е. при  $t=0$ , когда к изоляции прикладывалось напряжение  $U(t=0)=\Delta\varphi(t=0)=0$  и величины  $\varphi(t=0)=0$ ,  $E(t=0)=0$  и  $J_{\text{полн}}(t=0)=0$ . С момента времени  $t=0$  начинался переходный процесс до достижения установившегося режима при  $U(t)=U_m \sin(314 t)$  кВ.

На рис. 2 показано изменение величин  $\sigma(E)$  и  $E(t)$  в течение 10 периодов колебания напряжения  $U(t)=20 \sin(314 t)$  кВ в точке на расстоянии  $x=1$  мкм (рис. 1) от полюса эллипсоидального включения с полуосями  $a=c=12,5$  мкм,  $b=50$  мкм. Расстояние  $x$  определялось вдоль силовых линий ЭП.

Изменение амплитудных значений  $\sigma_m(E)$  на рис. 2, а отражало переходный процесс длительностью в 5 периодов колебаний (т.е. от момента времени  $t=-0$  до  $t=0,1$  с).

### Постановка задачи расчета ЭП.

Расчетная область СПЭ изоляции показана на рис. 1. Она имеет форму куба со стороной 1 мм, к верхней и нижней границе которого прикладывалось синусоидальное напряжение 20 кВ, изменяющееся с частотой 50 Гц. В СПЭ изоляции предполагалось наличие водных микровключений типа эллипсоидов вращения и одно сферическое включение, на полюсе которого вдоль ЭП образовались разветвленные микротриинги.

При расчете распределения ЭП полюсы эллипсоидов изменялись от 3 до 25 мкм, а радиус сферы равнялся 25 мкм. Водные триинги представлялись в виде цилиндрических ветвей длиной от 10 до 50 мкм и радиусом 1 мкм, окончание которых округ-

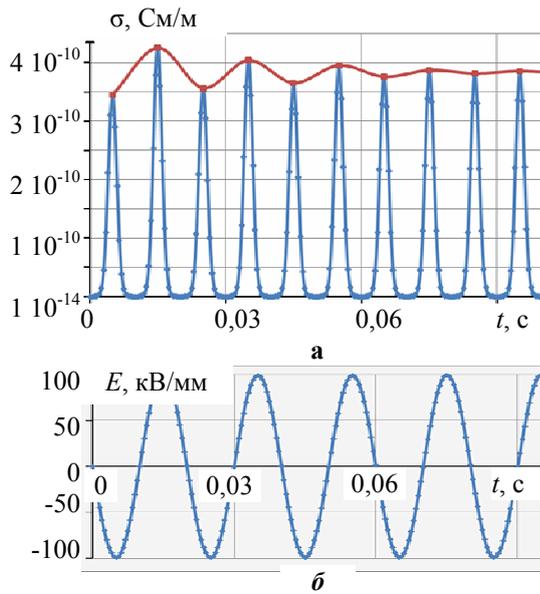


Рис. 2

При линейной постановке задачи, когда зависимостью  $\sigma(E)$  пренебрегают и допускают, что  $\sigma = 10^{-14}$  См/м при всех напряженностях ЭП, описанный выше переходный процесс затухает очень быстро – его длительность  $\tau$  становится меньше одного периода колебания приложенного синусоидального напряжения  $U(t)$  (т.е.  $\tau < T$ ).

Нелинейные свойства СПЭ изоляции во время длительности одного периода колебаний проявляются в разной степени – наибольшее изменение  $\sigma(E)$  проявляется на отрезках времени, на которых напряженность ЭП  $\approx E_m(t)$ , а когда  $E(t) \leq 20$  кВ/мм, значение проводимости  $\sigma(E) \approx \sigma_{\text{const}}$  и линейный и нелинейный расчеты дают близкие результаты.

**Результаты численного эксперимента.** В работе анализировалось изменение амплитудных значений напряженности ЭП  $E_{m \text{ уст}}$  и плотности полного тока в диэлектрике  $J_{m \text{ полн уст}}$  вблизи полюсов микровключений в установившемся режиме колебаний, когда длительность переходного процесса  $\tau$  для каждой расчетной задачи определялась отдельно. Для сокращения обозначений был опущен индекс "уст.", подразумевая что все амплитудные значения  $E_m$  и  $J_{m \text{ полн}}$  определены в установившемся режиме и неизменны на протяжении всех последующих периодов колебаний.

Отметим, что мгновенные значения плотности тока проводимости  $J_{\text{пр}}(t)$  в каждой точке среды определялись мгновенными значениями  $\sigma_m(E)$  и  $E(t)$ , а мгновенные значения плотности тока смещения  $J_{\text{см}}(t)$  – производной вектора индукции  $D(t)$  по времени. Поэтому максимумы токов  $J_{\text{пр}}(t)$  и  $J_{\text{см}}(t)$  возникали в разные моменты времени и были взаимно сдвинуты приблизительно на четверть периода внешнего напряжения. Мгновенное значение вектора плотности полного тока  $J_{\text{полн}}(t)$  в каждой точке расчетной области определялось векторной суммой мгновенных значений  $J_{\text{пр}}(t)$  и  $J_{\text{см}}(t)$ . Поэтому моменты времени, при которых полный ток достигал амплитудных значений  $J_{m \text{ полн}}$ , были сдвинуты на определенный интервал относительно моментов времени, при которых достигала амплитудных значений  $E_m$  напряженность электрического поля.

Расчет значений  $E_m$  и  $J_{m \text{ полн}}$  выполнялся в локальных микрообластях СПЭ изоляции на различных расстояниях  $x$  от полюса центрального эллипсоидального проводящего микровключения (рис. 1), вытянутого вдоль силовых линий ЭП. Форма эллипсоида варьировалась изменением соотношения длин его полуосей поперек и вдоль поля (т.е. соотношения  $a = c/b < 1$ ). Распределения значений  $E_m$  и  $J_{m \text{ полн}}$  в расчетной области приводились в относительных единицах в виде коэффициента усиления электрического поля  $k_E = E_m / E_{m \text{ ср}}$  и коэффициента увеличения плотности полного тока  $k_J = J_{m \text{ полн}} / J_{m \text{ полн ср}}$ . Эти коэффициенты определялись как отношение амплитудных значений  $E_m$  и  $J_{m \text{ полн}}$  в расчетных точках изоляции к амплитудным значениям  $E_{m \text{ ср}}$  и  $J_{m \text{ полн ср}}$ , усредненным по всем точкам однородного диэлектрика без включений.

На рис. 3 а, б и в показаны результаты расчета максимальных значений  $\sigma_m(E)$ ,  $k_E$  и  $k_J$  в изоляции в зависимости от расстояния  $x$  (рис. 1) до полюса указанного микровключения при соотношении его полуосей 1/2, 1/4 и 1/8 и средней напряженности  $E_{m \text{ ср}} \approx 20$  кВ/мм невозмущенного ЭП.

При  $t > 0,1$  с значение  $\sigma_m(E)$  достигало установившегося значения  $\sigma_{m \text{ уст.}} = 3,85 \cdot 10^{-10}$  См/м. Значение  $E(t)$  в направлении ЭП (рис. 2, б) в той же точке определялось приложенным напряжением  $U(t)$  и зависело также от величины  $\sigma(E)$ , поскольку рост проводимости полиэтилена приводил к уменьшению в нем напряженности ЭП.

Анализируя в увеличенном масштабе временную зависимость амплитуды напряженности  $E_m(t)$ , можно также заметить переходный процесс и стремление  $E_m(t)$  к своему установившемуся значению  $E_{m \text{ уст}} \approx 100$  кВ/мм. Рассчитанное значение  $E_{m \text{ уст}}$  говорит об усилении ЭП у полюса водного микровключения в 5 раз (по отношению к значению  $E_{m \text{ ср}} = 20$  кВ/мм).

В процессе расчетов для разных конфигураций микровключения было отмечено, что при увеличении кривизны полюсов и удлинении или обострении ветвей триингов вследствие роста максимальной напряженности ЭП и  $\sigma(E)$  (т.е. степени нелинейности задачи) длительность  $\tau$  указанного переходного процесса возрастала.

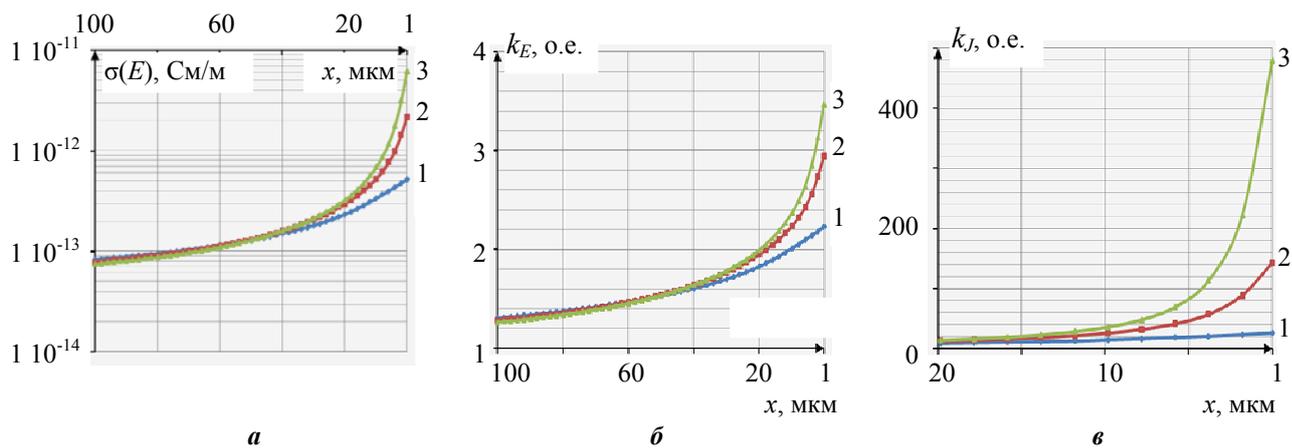


Рис. 3

На значительном удалении от проводящих микровключений (т.е. на расстояниях, гораздо больших чем размеры включений) электрическое поле в СПЭ изоляции практически не возмущалось, поэтому его напряженность  $E(t)=E_{cp}(t)$ , а удельная проводимость изоляции была неизменной и равнялась  $\sigma = 10^{-14}$  См/м. Но по мере приближения к полюсу проводящего включения (т.е. при уменьшении расстояния  $x$  вдоль силовых линий поля на рис. 1) амплитуда напряженности поля  $E_m$  возрастала, что вызывало увеличение амплитудных значений проводимости изоляции  $\sigma_m(E)$  и соответственно рост амплитудных значений плотности полного тока  $J_m$  полн. Причем, чем больше включение было вытянуто вдоль ЭП, тем интенсивнее проявлялись указанные процессы.

Анализ полученных результатов показал, что с учетом зависимости  $\sigma_m(E)$  уменьшение в четыре раза соотношения  $a = c/b$  эллипсоидального проводящего включения в СПЭ изоляции увеличивает максимальное значение ее удельной проводимости  $\sigma_m(E)$  в 12 раз (от  $5 \cdot 10^{-13}$  до  $6 \cdot 10^{-12}$  См/м). При этом коэффициент  $k_E$  принимает наибольшие значения 2,2–3,5, а коэффициент  $k_J$  – значения 26–480.

В работе проведено сравнение результатов расчета характеристик возмущенного ЭП в СПЭ изоляции без учета зависимости ее удельной проводимости от напряженности поля (т.е. при линейной постановке задачи) и с ее учетом (т.е. при нелинейной постановке задачи).

При линейной постановке задачи расчета распределения ЭП в СПЭ изоляции возле проводящего эллипсоидального микровключения с соотношением полуосей 1/8 увеличение напряженности поля без учета соответствующего изменения ее электропроводности (т.е. при допущении, что  $\sigma = \text{const} = 10^{-14}$  См/м) приводит к тому, что коэффициенты  $k_E$  и  $k_J$  также не будут зависеть от значений  $E_m$  ср и  $\sigma_m(E)$  – они будут определяться лишь геометрическими характеристиками проводящих микровключений, а также свойствами изоляции и ее включений. При таком допущении в СПЭ изоляции у полюса проводящего эллипсоидального микровключения указанной формы и ориентации рассчитанные значения коэффициентов:  $k_{E, \text{лин}}=43$  и  $k_{J, \text{лин}}=15$ . Учет зависимости  $\sigma_m(E)$  в СПЭ изоляции (т.е. при нелинейной постановке задачи) приводит к тому, что возле аналогичного микровключения коэффициент  $k_E$  уменьшается в 12 раз и одновременно коэффициент  $k_J$  увеличивается в 32 раза по сравнению с линейным случаем.

На рис. 4 а, б и в показаны результаты численного расчета изменения величин  $\sigma_m(E)$ ,  $k_E$  и  $k_J$  в СПЭ изоляции в направлении  $x$  к полюсу эллипсоидального микровключения с соотношением полуосей 1/8 при разных значениях  $E_m$ , изменяющихся от 10 до 100 кВ/мм. Кривая 1 соответствует напряженности  $E_m$  ср=10 кВ/мм (характерное значения напряженности ЭП в СПЭ изоляции возле токопроводящей жилы сечением  $S \approx 2000$  мм<sup>2</sup> кабеля на 330 кВ), кривые 2, 3 и 4 – соответствуют напряженностям  $E_m$  ср = 20, 50 и 100 кВ/мм. При изменении  $E_m$  ср от 10 до 100 кВ/мм в СПЭ изоляции возле полюса проводящего эллипсоидального микровключения с соотношением полуосей 1/8 максимальная проводимость изоляции  $\sigma_m(E)$  увеличивалась от  $10^{-14}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  См/м, т.е. на 8 порядков. При этом в микрообластях наибольшего увеличения напряженности поля значение коэффициента  $k_E$  уменьшалось от 4,4 до 1,8, а значение коэффициента  $k_J$  увеличивалось от 190 до 13500.

Сравнивая рассчитанные максимальные значения коэффициентов  $k_E$  и  $k_J$  с максимальными значениями, рассчитанными при линейной постановке задачи ( $k_{E, \text{лин}}=43$  и  $k_{J, \text{лин}}=15$ ), можно сделать вывод, что учет зависимости  $\sigma_m(E)$  в СПЭ изоляции приводит к уменьшению значения коэффициента  $k_E$  в 10 раз и одновременному увеличению значения коэффициента  $k_J$  в 900 раз.

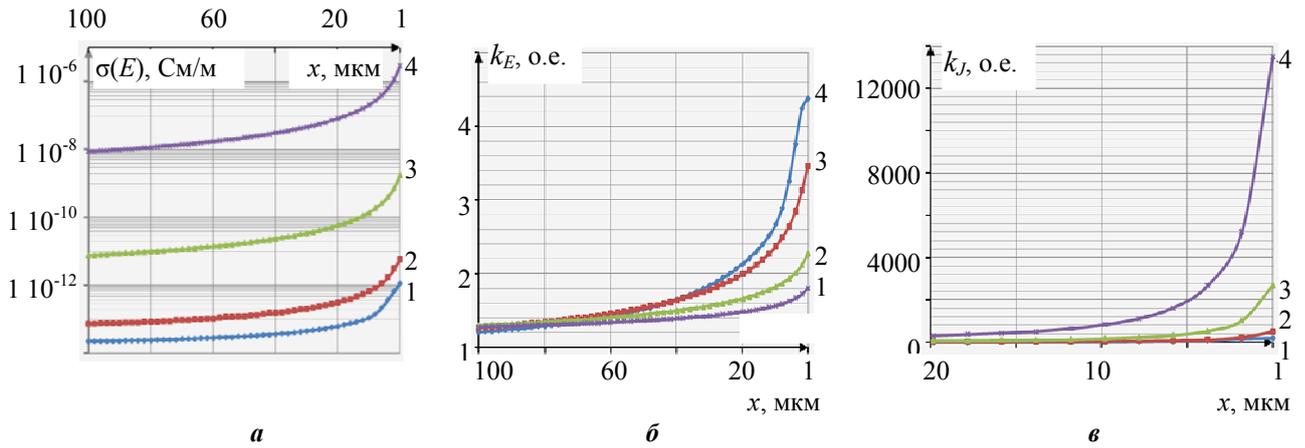


Рис. 4

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что при анализе процессов возмущения электрического поля проводящими микровключениями СПЭ изоляции в ее локальных микрообъемах возможно такое усиление электрических полей, которое вызывает необходимость учета зависимости удельной электропроводности изоляции от напряженности поля. Такой подход позволяет более корректно анализировать электрофизические процессы деградации СПЭ изоляции силовых сверхвысоковольтных кабелей, в частности, более точно учитывать многократное увеличение плотности полного тока, перегрев, а также ухудшение ее электрических и механических свойств в локальных микрообъемах возле проводящих включений. В частности, повышение температуры более 120 С может уменьшить значение напряженности электрического пробоя СПЭ изоляции  $E_{пр}$  в 2–4 раза. Поэтому локальные усиления ЭП возле полюсов проводящих вытянутых микровключений и водных триингов могут превышать электрическую прочность локальных микрообъемов изоляции и способствовать возникновению в них пробоев, водных и электрических триингов, что ускоряет старение изоляции.

С повышением температуры уменьшается также и механическая прочность СПЭ изоляции высоковольтных кабелей. Электрические заряды, наводимые внешним гармоническим ЭП на полюсах выпуклых водных микровключений и взаимодействующие с внешним ЭП и между собой, создают неоднородные пульсирующие давления  $p$  на структуру изоляции. При таком электросиловом воздействии проводящих микровключений важно учитывать, что они являются жидкими и способными формировать пульсирующие давления на структуру твердой изоляции без изменения своей формы и перемещений, в отличие от твердых включений. Наибольшие давления возникают на острых выпуклостях водного включения, ориентированных вдоль ЭП. В работе [14] показано, что в СПЭ изоляции с водными микровключениями различных размеров и конфигураций может возникать давление от 0,01 до 10 МПа. Давление  $p_m \approx 10$  МПа, которое может возникать в СПЭ изоляции возле острия микротриинга, сопоставимо с ее механической прочностью, которая при разных условиях эксплуатации изменяется от 9,8 до 16,7 МПа [4]. С повышением температуры выше 120°C критическое напряжение СПЭ изоляции может уменьшаться в несколько раз, что может вызывать появление микротрещин и заполнение их проводящей жидкостью, реализуя таким образом механизм возникновения и развития водных триингов.

Отметим, что при возникновении в СПЭ изоляции водных микровключений другой геометрии, в частности сфер с микротриингами, на их полюсах описанные выше закономерности сохраняются: увеличение длины и/или уменьшение диаметра триинга вызывает многократное усиление ЭП в микрообъемах СПЭ изоляции у его острия [4, 6–8, 14], причем усиление может быть настолько большим, что необходимо учитывать увеличение значений  $\sigma_m(E)$  и коэффициента  $k_J$  и уменьшение значений коэффициента  $k_E$ . В результате более сильными могут становиться другие электрофизические процессы деградации высоковольтной твердой полимерной изоляции.

Таким образом, учет зависимости удельной электропроводности  $\sigma_m(E)$  электроизоляции от напряженности электрического поля позволяет учесть многократное увеличение удельной плотности полного тока в ее локальных микрообъемах, которое может вызывать локальный перегрев и ухудшение их электрической и механической прочности.

**Заключение.** 1. Исследованы особенности возмущения и локального усиления электрического поля в микрообъемах сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей возле водных микровключений, вытянутых вдоль поля. Анализ проводился с учетом результатов расчета мак-

ронеоднородного распределения напряженности поля по сечению изоляции кабеля и микронеоднородного его распределения возле водных микровключений, а также с учетом нелинейной зависимости удельной проводимости изоляции от напряженности поля.

2. Проводимые ранее расчеты электрического поля, возмущенного проводящими микровключениями в изоляции при допущении о ее линейности, приводят к тому, что коэффициенты усиления поля  $k_E$  и увеличения плотности полного тока  $k_J$  остаются неизменными при изменении напряженности внешнего поля, поскольку значения указанных коэффициентов в такой изоляции зависят лишь от конфигурации включений, а также свойств изоляции и включений. Показано, что такое допущение дает завышенные значения коэффициента усиления поля  $k_E$  и заниженные значения коэффициента увеличения полного тока  $k_J$  в изоляции.

3. Обосновано, что при изменении конфигурации проводящих микровключений в изоляции может возникать такое возмущение внешнего электрического поля, при котором задачу расчета его распределения следует решать с учетом взаимной зависимости удельной проводимости изоляции и напряженности поля. Данный подход позволяет более точно определять коэффициенты усиления поля  $k_E$  и плотности полного тока  $k_J$  в локальных микрообластях изоляции. Показано, что при уменьшении соотношения полуосей эллипсоидального водного включения (его вытягивании вдоль поля) при усилении ЭП возле полюсов включения всего в 1,6 раз (т.е. при изменении  $k_E$  от 2,2 до 3,5) удельная плотность полного тока увеличивается более чем в 18 раз (т.е.  $k_J$  изменялся от 26 до 480).

4. При увеличении напряженности внешнего электрического поля от 10 до 100 кВ/мм и неизменной конфигурации включений в СПЭ изоляции ее удельная проводимость изменяется от  $10^{-14}$  до  $3 \cdot 10^{-6}$  См/м (т.е. увеличивается на 8 порядков), значение коэффициента  $k_E$  уменьшается в 2,4 раза (от 4,4 до 1,8), а значение коэффициента  $k_J$  увеличивается в 71 раз (от 190 до 13500). При аналогичных условиях изменения внешнего поля в линейной изоляции  $k_E=40$ , а  $k_J=15$  при всех значениях напряженности поля. Таким образом, учет зависимости электропроводности изоляции от напряженности поля выявляет многократное увеличение плотности полного тока в микрообъемах наибольшего усиления поля, что приводит к локальному повышению в них температуры и снижению электрической и механической прочностей.

1. Лях В.В., Молчанов В.М., Сантацкий В.Г., Квицинский А.А. Кабельная линия напряжением 330 кВ: Некоторые аспекты проектирования // Промэлектро. – 2009. – № 6. – С. 27–33.

2. Мельников Н.А. Электрические сети и системы. – М.: Энергия, 1975. – 464 с.

3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. – 256 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. – 352 с.

5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Электромагнитные процессы в кабельной линии с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ // Техн. электродинамика. – 2013. – № 1. – С. 9–16.

6. Щерба М.А. Особенности локальных усилений электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции // Техн. электродинамика. – 2015. – № 2. – С. 16–23.

7. Щерба М.А. Силовое взаимодействие между близко расположенными проводящими микровключениями в диэлектрической среде во внешнем электрическом поле // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 11–12.

8. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Зависимость возмущения электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений // Техн. электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 17–19.

9. Dissado L.A. and Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers // IEE Materials and Devices Series 9. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK, 1992. – 601 p.

10. Kato, T., Onozawa, R., Miyake, H., Tanaka, Y., & Takada, T. Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress / Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2014 International Symposium on. – 2014. – Pp. 370–373.

11. Li Y., Kawai J., Ebinuma Y., Fujiwara Y., Ohki Y., Tanaka Y., Takada T. Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. Dielectrics and Electrical Insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1997. – Vol. 4. – No 1. – Pp. 52–57.

12. O'Dwyer J.J. The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. – 317 p.

13. Rezinkina M., Bydianskaya E., Shcherba A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // Environmentalist. – 2007. – Vol. 27. – No 4. – Pp. 417–422.

14. Shcherba M.A. Dependences of electric field amplification during water tree branching in solid dielectrics / Proc. of IEEE Intern. Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2014). – Kyiv, Ukraine. – Pp. 46–49.

15. Thomas A.J. and Saha T.K. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model / IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena. Kansas City. – 2006. – Pp. 368–378.

16. Tleis N. Power Systems Modelling and Fault Analysis. – Elsevier, 2008. – 367 p.

17. Wedepohl L.M. and Wilcox D.J. Transient Analysis of Underground Power Transmission System; System-Model and Wave Propagation Characteristics // Proceedings of the institution of electrical engineers. – 1973. – Vol. 120. – No 2. – Pp. 252–259.

## РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ І ГУСТИНИ СТРУМУ БІЛЯ ВОДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ НЕЛІНІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

О.Д. Подольцев, докт.техн.наук, 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)

*Розроблено математичну модель і виконано аналіз неоднорідного розподілу електричного поля і густини повного струму в мікрооб'ємах зшитой поліетиленової ізоляції надвисоковольтних кабелів біля водних мікрровключень, витягнутих уздовж поля. Аналіз проводився з урахуванням нелінійної залежності питомої провідності ізоляції від напруженості електричного поля. Розглянуто мультифізичний характер процесів можливої деградації твердої полімерної ізоляції надвисоковольтних кабелів при виникненні в ній провідних еліпсоїдальних включень і розгалужених водних дендритів. Дослідження проводилися з використанням результатів розрахунку макронеоднорідного розподілу напруженості електричного поля по перерізу зшитой поліетиленової ізоляції надвисоковольтних кабелів. Бібл. 17, рис. 4.*

**Ключові слова:** електричне поле, поліетиленова ізоляція, нелінійні властивості, неоднорідність, мікрровключення, кабельна лінія, математичне моделювання.

## ELECTRIC FIELD AND CURRENT DENSITY DISTRIBUTION NEAR WATER INCLUSIONS OF POLYMER INSULATION OF HIGH-VOLTAGE CABLES IN VIEW OF ITS NONLINEAR PROPERTIES

O.D. Podoltsev, 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 mathematical model and the analysis of inhomogeneous electric field and total current density distribution in micro-volumes of crosslinked polyethylene (XLPE) insulation on ultrahigh voltage near water micro-inclusions extracted along the field have been made. The analysis was made considering a nonlinear conductivity dependence on the electric field. The multi-physical character of possible degradation processes of solid polymer insulation of ultra high voltage cables in the appearance of conducting ellipsoidal inclusions and branched water dendrites has been specified. The studies were made with taking into account the calculation results of electric field macro-inhomogeneity distribution along the cross-section of XLPE insulation of ultra high voltage cables. References 17, figures 4.*

**Key words:** electric field, polyethylene insulation, non-linear properties, inhomogeneity, micro-inclusions.

1. Liakh V.V., Molchanov V.M., Santatsky V.G., Kvitsinsky A.A. Cable line of voltage 330 kV: Some aspects of designing // Promlektro. – 2009. – No 6. – Pp. 27–33. (Rus)
2. Melnikov N.A. Electrical networks and systems. – Moskva: Energiia, 1975. – 464 p.
3. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2011. – 256 p. (Rus)
4. Shydlovskiy A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Cables with polymeric insulation on ultrahigh voltage. – Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2013. – 352 p. (Rus)
5. 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)
6. 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)
7. Shcherba M.A. The Force Interaction Between Close Placed Conducting Micro-inclusions in Dielectric Medium Under the External Electric Field // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 3. – Pp. 11–12. (Rus)
8. Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Vasilyeva O.V. Dependence of Electric Field Disturbances in Dielectrics on the Dispersion of Closely Spaced Water Micro-inclusions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – No 4. – Pp. 17–19. (Rus)
9. Dissado L.A. and Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers // IEE Materials and Devices Series 9. – Peter Peregrinus. Ltd., London, UK, 1992. – 601 p.
10. Kato, T., Onozawa, R., Miyake, H., Tanaka, Y., & Takada, T. Characteristics of space charge behavior and conduction current in xlpe and annealed polyethylene under high DC stress / Electrical Insulating Materials (ISEIM), Proceedings of 2014 International Symposium on. – 2014. – Pp. 370–373.
11. Li Y., Kawai J., Ebinuma Y., Fujiwara Y., Ohki Y., Tanaka Y., Takada T. Space charge behavior under ac voltage in water-treed PE observed by the PEA method. Dielectrics and Electrical Insulation // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1997. – Vol. 4. – No 1. – Pp. 52–57.
12. O'Dwyer J.J. The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. – 317 p.
13. Rezinkina, M., Bydianskaya, E., Shcherba, A. Alteration of brain electrical activity by electromagnetic field // Environmentalist. – 2007. – Vol. 27. – No. 4. – Pp. 417–422.
14. Shcherba M.A. Dependences of electric field amplification during water tree branching in solid dielectrics / Proc. of IEEE Intern. Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014. – Kyiv, Ukraine. – Pp. 46–49.
15. Thomas A.J. and Saha T.K. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model / IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. – Phenomena. Kansas City, 2006. – Pp. 368–378.
16. Tleis N. Power Systems Modeling and Fault Analysis. – Elsevier, 2008. – 367 p.
17. Wedepohl L.M. and Wilcox D.J. Transient Analysis of Underground Power Transmission System; System-Model and Wave Propagation Characteristics // Proceedings of the institution of electrical engineers. – 1973. – Vol. 120. – No 2. – Pp. 252–259.

Надійшла 10.08.2015

Остаточний варіант 15.10.2015