

УДК 621.3.01:537.212

М.А. Щерба<sup>1</sup>, канд. техн. наук, С.С. Розискулов<sup>1</sup>, В.М. Золотарев<sup>2</sup>, докт. техн. наук, О.В. Васильева<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт электродинамики НАНУ, г.Киев, Украина, E-mail: m.shcherba@gmail.com<sup>2</sup> ПАО "Завод "Южкабель", г.Харьков, Украина

### ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ИЗ-ЗА СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ЕЕ ВОДНЫХ И ВОЗДУШНЫХ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

*Выполнен анализ силового воздействия внешнего неоднородного электрического поля на водные и воздушные микровключения в полимерной изоляции кабелей. Обосновано, что в результате такого воздействия возникают результирующие электрические силы, втягивающие водные включения в области сильных полей и выталкивающие воздушные включения в области слабых полей. Силы, действующие на водные включения, возрастают с уменьшением расстояния к жиле и могут быть более чем в 45 раз больше, чем силы, действующие на воздушные включения. Указанные силовые воздействия могут вызывать возникновение и развитие в изоляции водных трингов и газовых полостей. При длительной эксплуатации однофазных силовых кабелей цилиндрической конструкции в их изоляции возникает радиальная неоднородность плотности распределения водных и воздушных микровключений. Библ. 3, рис. 5.*

**Ключевые слова:** электрическое поле, напряженность, сила, полимерная изоляция, включения, деформация, перемещение.

*Виконано аналіз силового впливу зовнішнього неоднорідного електричного поля на водні і повітряні микровключення в полімерній ізоляції кабелів. Обґрунтовано, що в результаті такого впливу виникають результируючі електричні сили, що втягують водні включення в області сильних полів і виштовхують повітряні включення в області слабких полів. Сили, що діють на водні включення, зростають із зменшенням відстані до жили і можуть бути більші ніж в 45 разів більше, ніж сили, що діють на повітряні включення. Зазначені силові впливи можуть викликати утворення та розвиток в ізоляції водних трійнгів і газових порожнин. При тривалій експлуатації однофазних силових кабелів циліндричної конструкції в їх ізоляції виникає радіальна неоднорідність щільності розподілу водних і повітряних микровключень. Бібл. 3, рис. 5.*

**Ключові слова:** електричне поле, напруженість, сила, полімерна ізоляція, включення, деформація, переміщення.

#### Введение

Анализ электрофизических процессов в полимерной изоляции силовых кабелей, а также оценка силового воздействия в ней низкочастотного электрического поля (ЭП) на водные и воздушные микровключения существенно усложняются при необходимости учета неоднородности свойств изоляции и возникающих возмущений ЭП [1–3]. В работе [3] показано, что в результате взаимодействия неоднородного ЭП с зарядами, индуцированными на проводящих микровключениях в диэлектрике, возникают силы втягивания их в области сильных полей, если этому не препятствует структура изоляции.

Известно, что в радиальном направлении полимерной изоляции кабелей сверхвысокого напряжения (330 кВ) напряженность ЭП может изменяться в 2–4 раза (в зависимости от толщины изоляции и радиуса металлической токопроводящей жилы) [1]. Поэтому следует ожидать, что со временем длительной эксплуатации кабелей в их изоляции может возникнуть неоднородная плотность

таких включений. Поскольку на воздушных включениях в изоляции также индуцируются электрические заряды, то можно ожидать и их силовое взаимодействие с внешним ЭП. Отсутствие закономерностей силовых взаимодействий внешнего неоднородного низкочастотного ЭП с водными и воздушными микровключениями усложняет анализ детерминированных и стохастических электрофизических процессов деградации полимерной изоляции силовых кабелей на различные напряжения.

**Целью** работы было исследование силового воздействия неоднородного низкочастотного гармонического электрического поля на водные и воздушные микровключения в полимерной изоляции силовых кабелей цилиндрической конструкции, а также анализ электромеханических напряжений в изоляции с учетом возможного изменения формы ее включений.

#### Основной материал

**Физико-математическая постановка задачи** формулировалась в квазиэлектростатическом приближении для неферромагнитного, линейного и изотропного диэлектрика с водными и воздушными микровключениями, в котором возникает неоднородное, гармоническое электрическое поле частотой 50 Гц, что позволяет применить метод комплексных амплитуд, как и в работах [1, 3]. Расчеты проводились численным методом конечных элементов для скалярного электрического потенциала  $\phi$ , уравнением для которого является:

$$\operatorname{div} [ - (\gamma + i\omega\epsilon_0 \dot{\epsilon}) \operatorname{grad} \phi ] = 0, \quad (1)$$

где комплексная диэлектрическая проницаемость  $\dot{\epsilon}$  позволяет учитывать потери в диэлектрике при протекании токов смещения.

Расчетное уравнение дополнялось граничными условиями на границах раздела сред:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= \dot{\phi}_2, \\ (\gamma_1 + i\omega\epsilon_0 \dot{\epsilon}_1) \partial \dot{\epsilon} / \partial n &= (\gamma_2 + i\omega\epsilon_0 \dot{\epsilon}_2) \partial \dot{\phi}_2 / \partial n, \end{aligned}$$

и условиями Дирихле и Неймана на границах расчетной области. На верхней и нижней границе расчетной области задавались значения потенциалов (условия Дирихле), на боковых границах – равенство нулю производных потенциалов по нормали к поверхности (условия Неймана), что соответствует отсутствию токов в этих направлениях.

Электрические силы, действующие на включения со стороны ЭП, представлялись как поверхностные силы  $f_s$ , действующие на заряды, индуцированные на поверхности включений. Эти силы рассчитывались как разность тензоров напряжений Максвелла  $T_2$  на внешней поверхности  $S$  включения и  $T_1$  на его внутренней поверхности [3].

Расчетное уравнение для плотности поверхностных сил  $f_s$ :

$$f_s = (T_2 - T_1) n_1, \quad (2)$$

где  $n_1$  – вектор внешней нормали к поверхности  $S$ .

Среднее значение результирующей (интегральной) электрической силы  $F$ , с которой гармоническое ЭП действует на полный заряд, индуцированный на всей поверхности  $S$  включения:

$$F = \int_S n_1 T_2 dS. \quad (3)$$

Определение плотности электрических сил  $f_s$  (которая обуславливает давление) и интегральной силы  $F$  дает возможность оценить процессы механического действия включений на структуру твердых диэлектриков. Численные эксперименты были реализованы в пакете программ Comsol Multiphysics.

#### Результаты вычислений

Проведенный анализ показал, что на микровключения в неоднородном ЭП в диэлектрике действуют отличные от нуля интегральные электрические силы  $F$ . Учитывалось, что напряженность поля  $E$ , изменялась от 4 до 13 кВ/мм в радиальном направлении изоляции.

На рис. 1 показаны расчетные поверхностные силы  $f_s$  и интегральные силы  $F$ , действующие на сферические водное и воздушное включения диаметром 50 мкм в полимерной изоляции кабеля на напряжение 330 кВ. Тонированием показано распределение напряженности ЭП  $E$  согласно шкале, приведенной справа. Стрелками отражены величины и направление сил  $f_s$  и  $F$ .

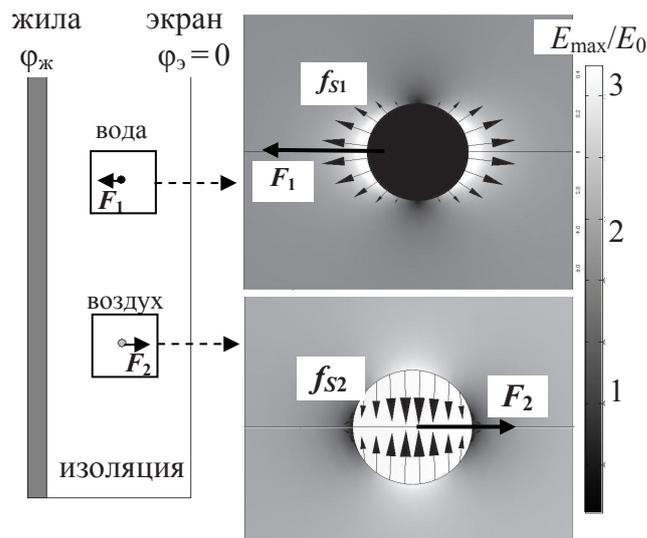


Рис. 1

Отметим, что для водного и воздушного включений наибольшие силы  $f_s$  возникают на разных полюсах и направлены в противоположных направлениях. Если внешняя среда допускает деформацию включений, то под действием таких сил, они могут приобрести форму эллипсоидов вращения вытянутых вдоль ЭП, если этому не препятствует структура изоляции.

На рис. 2 приведены графики распределения плотности индуцированного заряда  $\sigma$  на поверхности включений. Координата  $x$  на оси абсцисс соответствует координате на поверхности включения как показано на рис. 2. Наибольшая плотность индуцированного заряда на водном включении  $\sigma_{\text{мах воды}} = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> почти на порядок больше, чем на воздушном –  $\sigma_{\text{мах воздуха}} = 0,3 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>. Полный одноименный заряд, индуцированный на поверхности водного включения, равен  $Q_{+/- \text{ воды}} = 5 \cdot 10^{-13}$  Кл, а на поверхности воздушного включения –  $Q_{+/- \text{ воздуха}} = 2 \cdot 10^{-13}$  Кл. Полученные результаты подтверждают, что давления и силы воздействия водных включений на изоляцию больше, чем воздушных. Причем по мере приближения всех включений к жиле величины давлений и сил возрастают.

На рис. 3а показана зависимость величины  $F$  от расстояния  $l$  между сферическими водным и воздушным включениями и жилой. Полученные зависимости аппроксимированы полиномами первой степени для воздушного и второго степени для водного включения. На рис. 3б показаны зависимости силы  $F$  от формы включений, а именно от соотношения полуосей эллипсоидов вращения  $a/b$ . Расчеты показали, что при вытягивании водного включения вдоль поля сила  $F$  может возрастать в 40 раз, в то же время как при вытягивании воздушного включения поперек поля сила  $F$  может возрастать лишь в 2 раза.

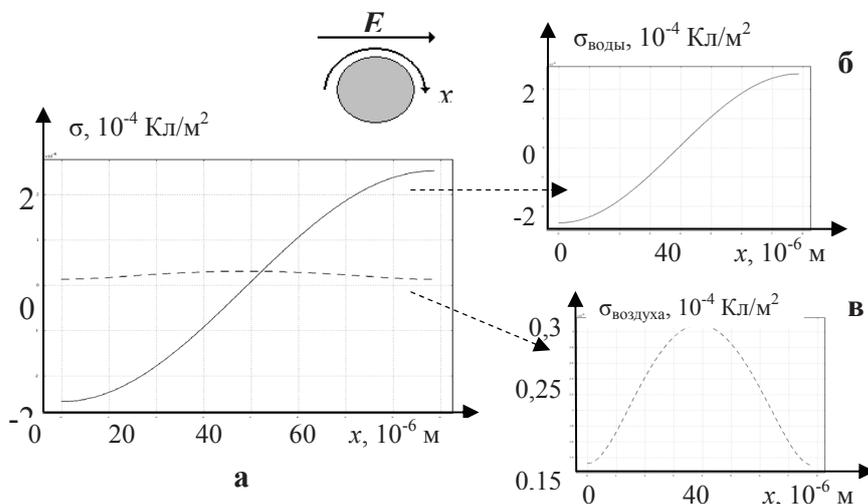


Рис. 2

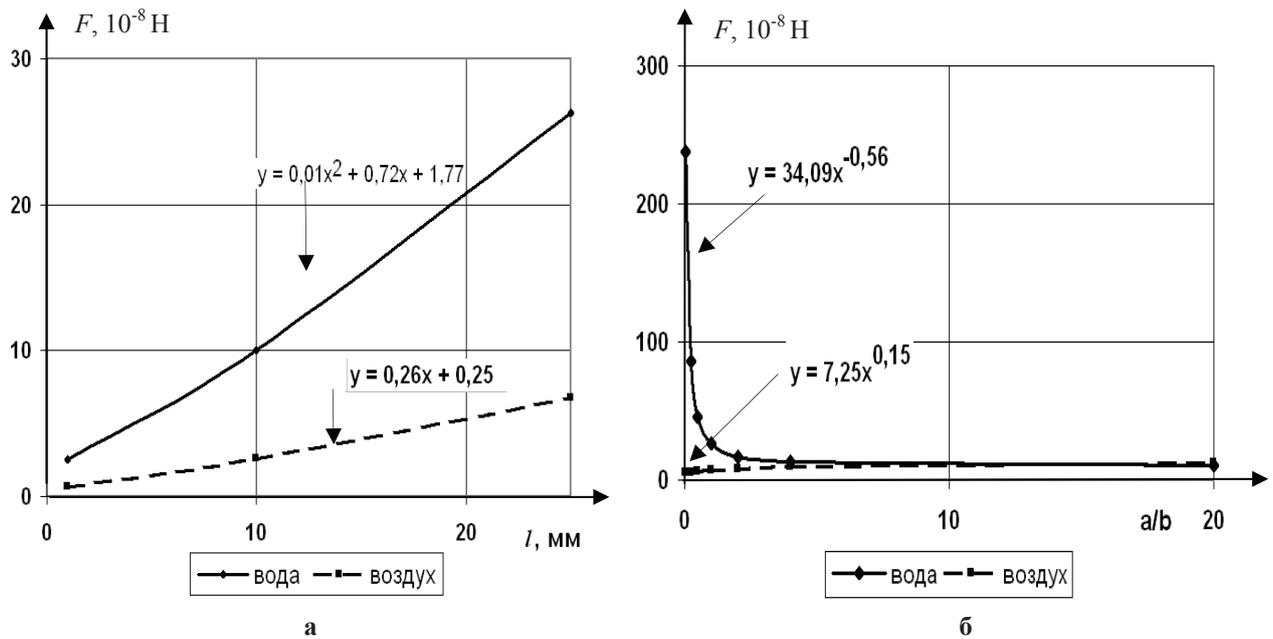


Рис. 3

На рис. 4 приведены графики зависимости силы  $F$ , действующей на водное включение, в зависимости от расстояния  $l$  между включением и жилой. Пунктиром показано воздействие сферического включения, а сплошной линией – воздействие включение, которое вытягивается вдоль поля, по мере уменьшения  $l$ . Можно заключить, что если в диэлектрике возможно одновременное перемещение и деформация водных включений, то их воздействия на диэлектрик усиливается более чем в два раза.

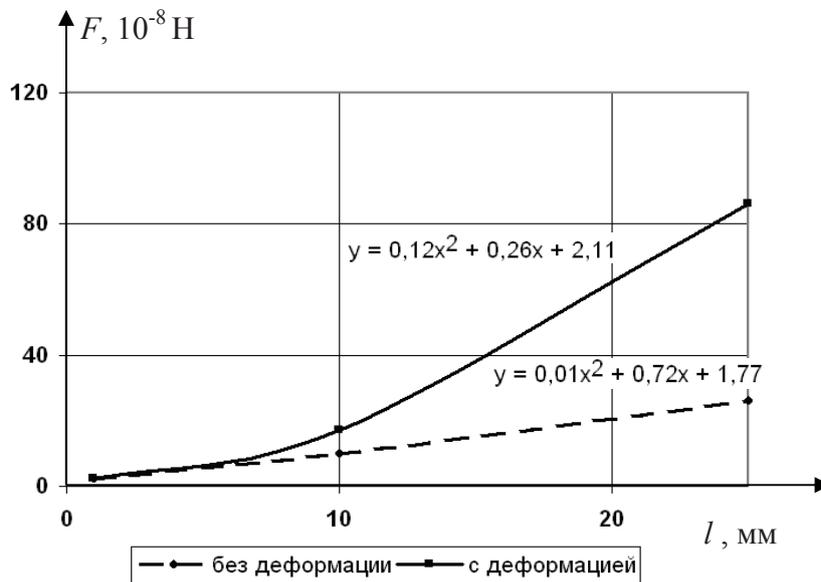


Рис. 4

В процессе эксплуатации кабелей сверхвысокого напряжения действие сил притягивания водных включений в области сильных полей и выталкивания воздушных включений в области слабых полей может вызывать возникновение и развитие в изоляции водных триингов и газовых полостей. При длительной эксплуатации однофазных силовых кабелей цилиндрической конструкции в их изоляции возникает радиальная неоднородность плотности распределения водных и воздушных микровключений, то есть повышенная концентрация водных включений возле жилы кабеля и повышенная концентрация воздушных включений возле экрана. Электрические свойства таких включений, а именно их проводимости  $\gamma_{\text{воды}}$ ,  $\gamma_{\text{воздуха}}$  и диэлектрические проницаемости  $\epsilon_{\text{воды}}$ ,  $\epsilon_{\text{воздуха}}$  сильно отличаются.

В тоже время воздействие электрического, теплового и электромеханического полей вызывает неоднородную деградацию полимерной изоляции. Указанные факторы в совокупности с неоднородным распределением включений приводят к неоднородности электрофизических свойств диэлектрика по слоям материала и его проводимость  $\gamma$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  становится функцией пространственных координат.

На рис. 5 показаны аппроксимационные зависимости проводимости  $\gamma(l)$  (рис. 5а) и диэлектрической проницаемости  $\epsilon(l)$  (рис. 5б) полимерной изоляции кабеля на 330 кВ как функций расстояния  $l$  до поверхности токопроводящей жилы кабеля. Таким образом, неоднородность электрофизических свойств диэлектрика приводит к перераспределению в нем напряженности ЭП.

Если напряженность электрического поля в радиально однородном диэлектрике определяется из уравнения [1]:

$$\hat{A}(r) = \frac{U}{r \cdot \nu},$$

то учет неоднородности  $\gamma(l)$  и  $\epsilon(l)$  приведет к более сложному уравнению:

$$E(r) = \frac{U}{r(\gamma(r) - j\omega\epsilon_0\epsilon(r)) \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\gamma(r) - j\omega\epsilon_0\epsilon(r)) dr}{(\omega\epsilon_0\epsilon(r))^2 + \gamma^2(r) r}}$$

Закономерности изменения напряженности ЭП  $E$  в зависимости от расстояния  $l$  с учетом различного характера неоднородности  $\gamma(l)$  и  $\epsilon(l)$  показаны на рис. 5в. Как видно из графика,  $E$  в таком случае может существенно возрасти.

С учетом неоднородности  $\gamma(l)$  и  $\epsilon(l)$  картина распределения силовых взаимодействий в изоляции также изменяется. Если напряженность электромеханического поля в радиально однородном диэлектрике определяется уравнением [1]:

$$P(r) = \epsilon_0\epsilon \left( \frac{U}{r \cdot \nu} \right)^2,$$

то учет  $\gamma(l)$  и  $\epsilon(l)$  также приведет к усложнению уравнения:

$$P(r) = \frac{\epsilon_0\epsilon(r)U^2}{\left( r(\gamma(r) - j\omega\epsilon_0\epsilon(r)) \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{(\gamma(r) - j\omega\epsilon_0\epsilon(r)) dr}{(\omega\epsilon_0\epsilon(r))^2 + \gamma^2(r) r} \right)^2}$$

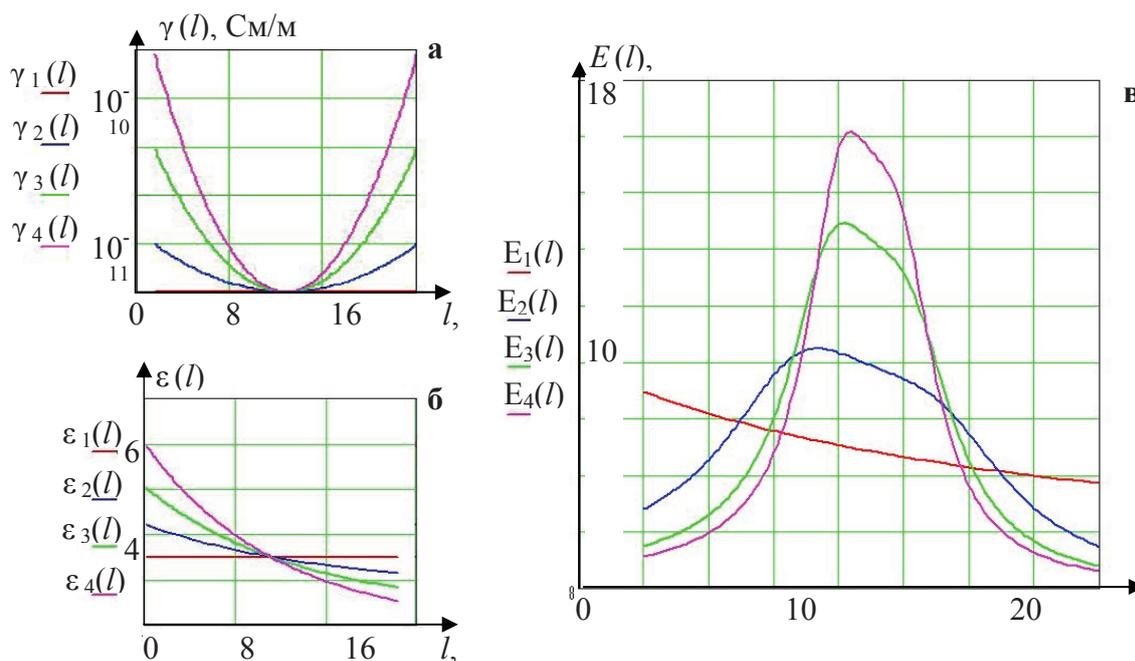


Рис. 5

Таким образом, при длительной эксплуатации сверхвысоковольтных кабелей неоднородность распределения силовых взаимодействий в их изоляции может вызывать радиальную неоднородность распределения водных и воздушных микровключений. Это приводит к перераспределению напряженности электрического и электромеханического полей, что в свою очередь, ускоряет протекание деградационных процессов полимерной изоляции силовых кабелей.

#### Выводы

1. Рассчитаны силы притягивания водных включений в области сильных полей (возле жилы кабеля) и выталкивания воздушных включений в области слабых полей (возле экрана). Силы представлены аппроксимационными функциями.

2. Силы воздействия поля на водные включения в четыре и более раз превышают силы воздействия на воздушные включения. Эти силы тем больше, чем ближе включения расположены к токопроводящей жиле. На полюса водного включения силы действуют вдоль поля, и на полюса воздушного включения - поперек поля.

3. Возникающие силы увеличиваются при вытягивании водного включения вдоль поля и воздушного включения поперек поля. При вытягивании включений вдоль поля силы, действующие на водное включение, могут в 45 раз и более превышать силы, действующие на воздушное включение. Для вытянутых поперек поля включений такие силы примерно равно.

4. В процессе эксплуатации кабелей сверхвысокого напряжения действие неоднородных сил может вызывать возникновение и развитие в изоляции водных трингов и газовых полостей, а при их длительной эксплуатации – может возникать радиальная неоднородность плотности распределения водных и воздушных микровключений. Это в свою очередь приводит к перераспределению напряженности электрического и электромеханического полей и может изменять скорости протекания деградационных процессов слоев изоляции.

#### Список литературы

1. 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.

2. Щерба А. А., Розискулов С. С. Переходные электромагнитные процессы в неоднородной электрической изоляции силовых высоковольтных коаксиальных кабелей с твердой полимерной изоляцией при ее диагностике методом измерения тока релаксации // Техн. электродинамика. Тем. вып.. "Силовая электроника та енергоефективність". – 2012. – Ч. 1. – С. 64–70.

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

#### THE ELECTRO-MECHANICAL STRESS INCLUSIONS IN THE POLYMER INSULATION OF CABLES BECAUSE OF FORCE INTERACTION OF ELECTRIC FIELD AND WATER AND AIR MICRO-INCLUSIONS IN THE INSULATION

Shcherba M.A.<sup>1</sup>, Roziskulov S.S.<sup>1</sup>, Zolotariov V.M.<sup>2</sup>, Vasilieva O.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of electrodynamics of NAS of Ukraine,

E-mail: m.shcherba@gmail.com

<sup>2</sup> PSC "Zavod "Yuzhkabel"

*The analysis of an external non-uniform electric field power impact on water and air micro-inclusions in the polymer cable insulation has been made. It is proved that resulting electrical forces arise as a consequence of such impact. These forces suck up the water inclusions in the strong field area and push out the air inclusions in the weak field area. The forces acting on the water inclusions increase with decreasing of distance to the conductor and they can be more than 45 times greater than the forces acting on the air inclusions. These force impacts can cause the appearance and growth of water treeing and gas cavities in insulation. At continuous operation of single-phase power cables with cylindrical construction the radial nonuniformity of distribution density of water and air micro-inclusions occurs in the cable insulation. Ref. 3, fig. 5.*

**Keywords:** electric field, density, force, polymer insulation, inclusions, deformation, displacement.

1. Shidlovskiy A. K., Shcherba A. A., Zolotarev V. M., Podoltsev A. D., Kucheriavaya I. N. The ultra-high voltage polymer-insulated cables. – К.: In-te of electrodynamics of NAS of Ukraine. – 2013. – 550 p.

2. *Shcherba A. A., Roziskulov S. S.* Transient electromagnetic processes in an inhomogeneous electric insulation of power high voltage coaxial cables with solid polymeric insulation for its diagnosis by measuring the relaxation current // *Tekhn. elektrodinamika. Topics issue "Silova elektronika ta energoefektivnist"*. – 2012. – P 1. – P. 64–70.

3. *Shcherba M. A.* The force interaction between closely spaced conductive microinclusions in the dielectric medium in an external electric field // *Tech. elektrodsinamika*. – 2012. – № 3. – P. 11–12.