

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ

И.Н.Кучерявая, канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Применительно к полимерной изоляции сверхвысоковольтного кабеля исследованы распределения объемной плотности электрической силы и связанных с ней механических напряжений в области отдельного водного микровключения и включения с каналом триинга. Получены качественные картины и количественные оценки относительно величины электрической силы и максимального значения напряжения по Мизесу для микровключения различного размера. Разработаны математическая модель и компьютерная методика, позволяющие проводить расчеты электрической силы и механических напряжений в полиэтилене с учетом наличия наполненных водой дефектов в его структуре, а также моделировать связанный с этим механизм разрушающего воздействия на неоднородный изоляционный материал. Библ. 12, рис. 5.

Ключевые слова: шито-полиэтиленовая изоляция, микровключение, канал триинга, механическое напряжение, напряжение по Мизесу, компьютерное моделирование.

Введение. В современных условиях на мировом кабельном рынке и повсеместно в энергосистемах на смену маслonaполненным кабелям пришли более надежные и безопасные силовые кабели со шитой полиэтиленовой (СПЭ) изоляцией. В Украине промышленное производство новых надежных высоковольтных и сверхвысоковольтных (до 330 кВ) кабелей с СПЭ изоляцией освоено на харьковском заводе "Южкабель" [5].

Наряду со многими эксплуатационными и экологическими достоинствами полиэтиленовая изоляция имеет существенный недостаток – в неоднородных электрических полях, возникающих в конструкциях кабелей, она особенно чувствительна к дефектам и повреждениям различного происхождения. Такие дефекты повышают локальную напряженность электрического поля, способствуют снижению электрической прочности изоляции и уменьшают ресурс работы кабелей.

Основной причиной деградации экструдированной полиэтиленовой изоляции силовых кабелей являются водные триинги – повреждения, развивающиеся на технологических дефектах изоляции (так называемых микровключениях), а также на молекулярных дефектах полимера при совместном действии электрического поля и влаги, проникающей из окружающей среды [7, 10]. Кроме того, с водой в изоляцию поступают агрессивные вещества, разрушающие полимерные связи, что приводит к образованию микрополостей, в которых накапливается вода. При эксплуатации кабелей в условиях влажной среды под действием электрического поля в местах микрополостей вдоль силовых линий электрического поля развиваются водные триинги в виде каналов древовидных структур. Электрическая прочность материала в области триингов снижается, напряженность электрического поля в их окрестности повышается, что ускоряет процесс роста триингов.

Хотя развитие триингов является в своей основе электрохимическим процессом, в его протекании определенную роль играют механические усилия и напряжения, возникающие в условиях действия электрической силы в диэлектрике. Наличие электрической силы и механических напряжений в СПЭ изоляции наряду с электрическим транспортом воды в неоднородном электрическом поле [6] объясняет разрушающее воздействие на изоляцию на уровне микродефектов.

Задача надежного функционирования силовых кабелей требует всестороннего изучения свойств кабелей, в том числе электрических и механических свойств изоляции в условиях возникновения и развития в ней дефектов.

В работе [10] проанализированы возможные механизмы старения полиэтиленовой изоляции кабелей. Среди них и механический фактор, проявляющийся в возникновении напряжений растяжения, сжатия и сдвига, усталости материала вследствие повторяющихся изгибов, растяжений, вибрации. Последствиями этого фактора являются образование трещин, их развитие, потеря адгезии материала, расслаивание на границах раздела сред на микроуровне, проникновение жидкости и газов.

Разрушающее воздействие на изоляцию электромеханических сил представляется следующей последовательностью явлений:

- механические силы возникают вследствие неравномерного распределения электрического поля в неоднородном материале изоляции;
- действие сил вызывает механические напряжения, наиболее сильные в непосредственной близости от дефектов в изоляции, где электрическое поле является резко неоднородным;
- наличие механических напряжений способствует разрушению полимерных цепей и образованию микропустот и водных триингов;
- более высокая концентрация сил на остриях триинга приводит к ускоренному его развитию.

В работе [12] экспериментальным путем показано, что при наличии механических напряжений вокруг острия триинга время инициации его дальнейшего развития значительно меньше, а скорость роста выше, чем без механических напряжений.

В [11] наряду с расчетом электрического поля, сил и механических напряжений в области СПЭ изоляции, окружающей микровключение, отмечена важность учета механических напряжений, поскольку остаточные напряжения в изоляции после изготовления (после термической и механической обработки) могут составлять до 15 МПа и выше, а тангенциальная составляющая механического напряжения на поверхности микропустоты в зависимости от различных условий может достигать величины 12 МПа. При всем этом разрушающие напряжения при растяжении и изгибе полиэтилена, происходящие с изоляцией при размотке и прокладке кабелей, многократных изгибах на трассах, протяжке в трубах, узких канальных и траншейных сооружениях, достигают 17 МПа для полиэтилена низкой плотности и 40 МПа для полиэтилена высокой плотности. Хотя вклад в общее напряжение от механического напряжения на микроуровне может быть незначителен, в сумме с остаточным напряжением он может в отдельных случаях и при циклических нагрузках давать величину, близкую к разрушающему напряжению.

Целью данной работы является изучение путем компьютерного моделирования действия электрической силы и механических напряжений на полиэтиленовую изоляцию, содержащую дефекты в виде микровключений и включения с отдельным каналом триинга. Задачи работы состоят в выявлении численным путем возможных причин, моделировании и наглядном представлении механизма электромеханического разрушения изоляции на микроуровне. Моделирование проведено с помощью метода конечных элементов в программе Comsol [9].

Предварительные исследования относительно распределения электрического поля и электрической силы в изоляции с включением в виде эллипсоида выполнены в [2].

Постановка задачи и основные положения для решения. С целью изучения процесса формирования и развития триинга в полиэтиленовой изоляции используется его упрощенное представление. Выделяется малый объем изоляции в форме цилиндра, содержащий как отдельное включение, заполненное водой, так и такое включение с единичным микроканалом триинга, ориентированным вдоль поля (рис. 1, *a* и *b*, соответственно). Объем находится в переменном электрическом поле, изменяющемся гармонически с частотой ω . Физическая модель представлена как осесимметричная для двумерного случая в цилиндрической системе координат $r\theta z$ (рис. 1).

Предполагается, что объемные заряды в диэлектрике отсутствуют. Рассматривается квазистатический случай медленного изменения электрического поля во времени ($f = 50$ Гц).

Тогда электрическое поле $\mathbf{\dot{E}}$ в композиционной структуре описывается системой уравнений

$$\nabla \times \mathbf{\dot{E}} = 0 \text{ или } \mathbf{\dot{E}} = -\nabla \phi, \quad (1)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{\dot{E}} + j\omega \epsilon_0 \dot{\epsilon} \mathbf{\dot{E}}, \quad (2)$$

$$\nabla \mathbf{J} = 0, \quad (3)$$

где ϕ – комплексное значение электрического потенциала (напряжения), σ – электропроводность среды при постоянном токе, $\dot{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость материала, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума; \mathbf{J} – плотность полного тока, включающего токи проводимости и ток смещения; ω – угловая частота; j – мнимая единица; электропроводность σ и комплексная относительная диэлектрическая проницаемость $\dot{\epsilon}$ задаются выраже-

$$\text{ниями } \sigma = \begin{cases} \sigma_m & \text{во включении с триингом,} \\ \sigma_{стз} & \text{в изоляции,} \end{cases} \quad \dot{\epsilon} = \begin{cases} \dot{\epsilon}_m & \text{во включении с триингом,} \\ \dot{\epsilon}_{стз} & \text{в изоляции.} \end{cases}$$

Как следует из уравнений (1)–(3), электрический потенциал $\dot{\phi}$ удовлетворяет уравнению непрерывности полного тока вида

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \dot{\phi} + j\omega \varepsilon_0 \dot{\varepsilon} \nabla \dot{\phi}) = 0. \quad (4)$$

При решении полевой задачи использовались граничные условия: в направлении поля $\dot{\phi} = 0$ и $\dot{\phi} = U$, на других границах задавались осевая симметрия и условие Неймана – $\partial \dot{\phi} / \partial n = 0$. На границе раздела двух сред принято условие непрерывности: $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0$, \mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали.

В диэлектрической среде при отсутствии объемных зарядов действует объемная электрическая сила (средняя за период), величина которой находится на основании выражения [4]

$$\mathbf{F} = \frac{\varepsilon_0}{2} \nabla (\varepsilon - 1) |\dot{\mathbf{E}}|^2. \quad (5)$$

Здесь $|\dot{\mathbf{E}}| = \sqrt{(\text{Re}(\dot{E}_r))^2 + (\text{Im}(\dot{E}_r))^2 + (\text{Re}(\dot{E}_z))^2 + (\text{Im}(\dot{E}_z))^2}$, где \dot{E}_r, \dot{E}_z – составляющие вектора поля $\dot{\mathbf{E}}$; Re и Im – обозначают действительную и мнимую части комплексных величин. Действие электрической силы \mathbf{F} в области изоляции вызывает механические напряжения.

Основным уравнением для расчета механических напряжений в материале изоляции является дифференциальное уравнение механического равновесия, записанное в общем случае для тензора напряжений $\hat{\sigma}$ в предположении, что действует только внутренняя объемная сила \mathbf{F} , а внешние силовые нагрузки и давление в материале отсутствуют [1]

$$\nabla \hat{\sigma} + \mathbf{F} = 0. \quad (6)$$

Зависимость между тензором напряжений $\hat{\sigma}$ и тензором деформаций $\hat{\varepsilon}$ выражается следующим образом [3, 8]:

$$\hat{\sigma} = D(\hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon}_0) + \hat{\sigma}_0. \quad (7)$$

Здесь $\hat{\varepsilon}_0$ и $\hat{\sigma}_0$ – начальные деформации и напряжения, для рассматриваемого случая равные нулю;

тензоры деформации и механического напряжения $\hat{\sigma}$ равны соответственно $\hat{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_r \\ \varepsilon_\varphi \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{rz} \end{bmatrix}$, $\hat{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_r \\ \sigma_\varphi \\ \sigma_z \\ \sigma_{rz} \end{bmatrix}$, где

$\varepsilon_r = \partial u / \partial r$, $\varepsilon_\varphi = u / r$, $\varepsilon_z = \partial w / \partial z$; $\varepsilon_{rz} = 0,5(\partial u / \partial z + \partial w / \partial r)$ – сдвиговая деформация; u и w – составляющие вектора смещения по координатам r и z ; σ_r , σ_φ , σ_z – компоненты нормального напряжения, σ_{rz} – сдвиговое напряжение, соответственно.

Матрица упругих постоянных D в (7) формируется из элементов, выражения для которых включают модуль Юнга E и коэффициент Пуассона ν материала [8].

Определение напряженно-деформированного состояния применительно к рассматриваемой задаче проводилось в области полиэтиленовой изоляции, исключая область дефектов. Давление в материале не учитывалось, а действие объемных сил определялось формулой (5).

Решение проводилось с использованием модуля программы Comsol из раздела Structural mechanics module для статического случая задачи теории упругости [8, 9].

Уравнение (6) с учетом (7) дополнялось граничными условиями: на оси Oz – условие симметрии, на внешних границах – условие свободных поверхностей в предположении, что границы свободны от внешних силовых нагрузок.

Математическая модель, включающая (4)–(7) и описанные граничные условия, а также разработанная на ее основе компьютерная методика позволяют рассчитывать электрическое поле, силы, механические напряжения и эквивалентные механические напряжения (напряжения по Мизесу) в области дефекта в изоляции. Отметим, что в общем случае напряжения по Мизесу используются для оценки прочности материалов и являются более удобными для представления, чем тензор (или вектор) механического напряжения. При их рассмотрении учитывается только та часть потенциальной энергии, которая отвечает за изменение формы.

Результаты компьютерного моделирования. Моделирование проводилось в программе Comsol при мелком сгущении сетки вокруг триинга. Полуширина водного включения выбиралась

равной $a = 10$ мкм. Высота его h варьировалась. Толщина канала триинга $\Delta = 3$ мкм. На границе выделенной расчетной области в направлении поля задавалось условие $U = 2100$ В, что соответствует среднему значению электрического поля в изоляции $E_{cp} = 7$ кВ/мм. Параметры СПЭ – $\sigma_{спэ} = 10^{-15}$ См/м, $\epsilon_{спэ} = 2,3$, упругопластические свойства: модуль Юнга $E = 700$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,46$. Для включения и триинга принимались значения: $\sigma_m = 5 \cdot 10^{-2}$ См/м, $\epsilon_m = 5$.

На рис. 1 показано распределение поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ (в оттенках серого цвета) и электрического потенциала (контурными линиями) для случая: а) сферического включения и б) включения с фрагментом триинга. Указаны максимальные значения поля, имеющие место на полюсах включения и на конце триинга. Значения напряженности электрического поля в области включения незначительны. Острие триинга характеризуется наибольшим значением поля.

С тем, чтобы изучить влияние формы включения на величину поля и механических напряжений, включение сокращалось и увеличивалось вдоль аксиального направления при условии неизменности его ширины. В предельном случае включение удлинялось до формы иглы, при этом радиус кривизны на полюсе включения уменьшался. Схематически это показано на вставке справа к рис. 2. На самом рис. 2 показано изменение максимального значения напряженности электрического поля в окрестности микро-включения в зависимости от его размеров (отношения длины к ширине h/a , при $a = \text{const}$). На вставке справа указаны также параметры h и a .

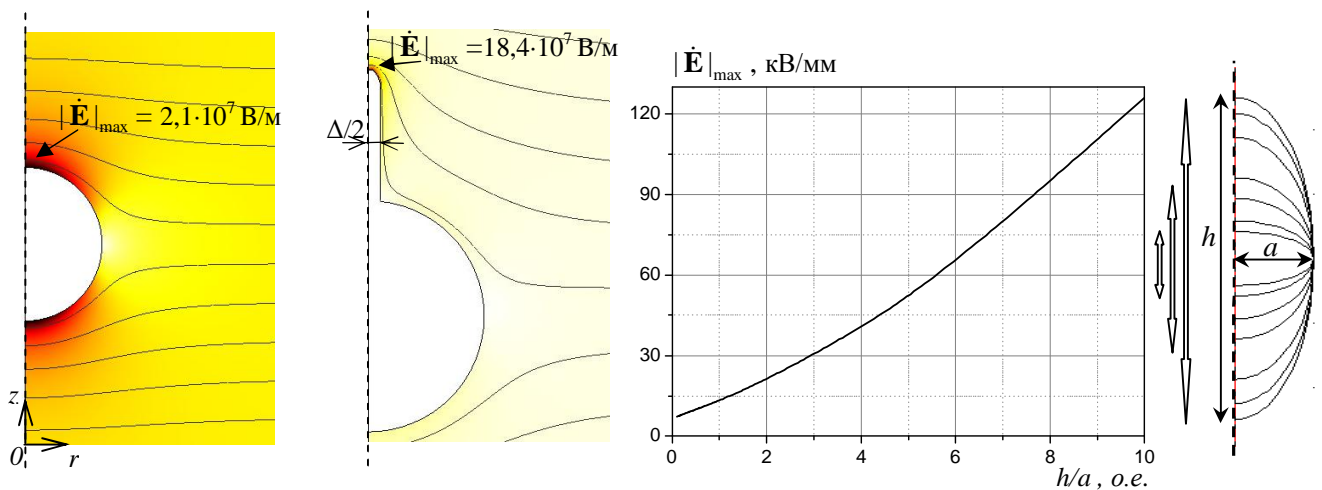


Рис. 1

Рис. 2

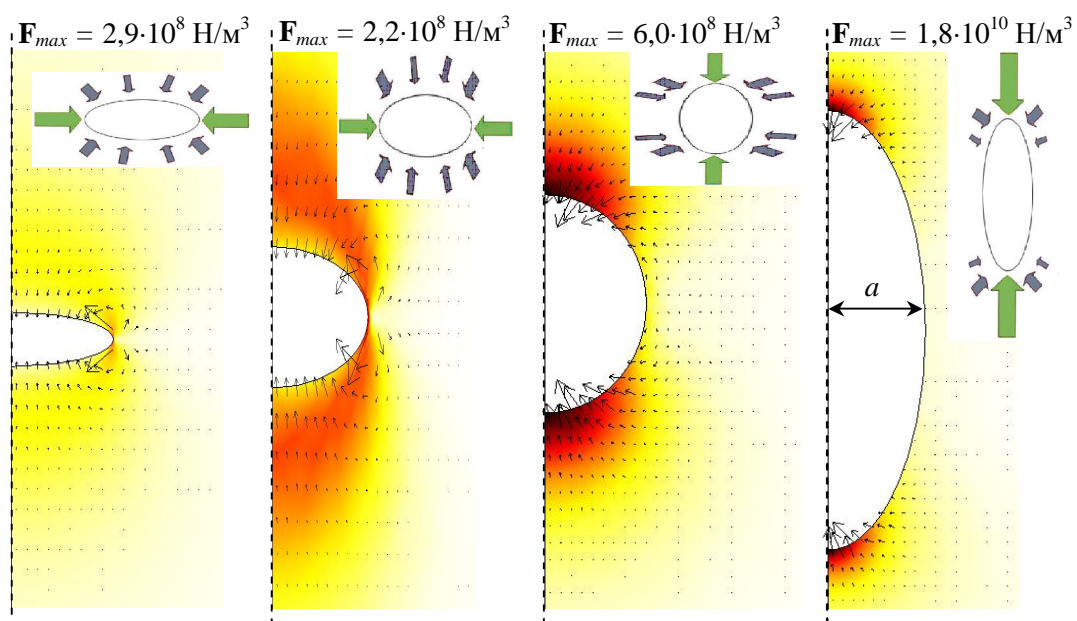


Рис. 3

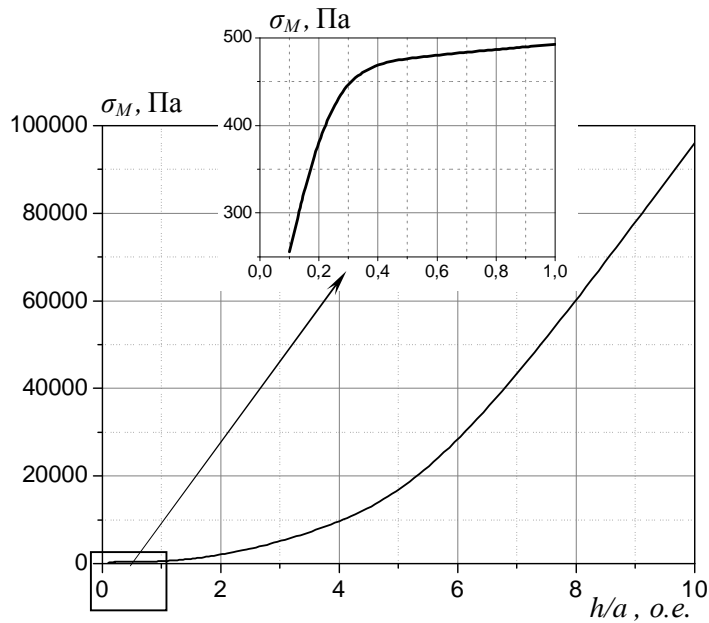


Рис. 4

фрагмент графика при изменении отношения h/a от 0,1 до 1,0.

Действие электрической силы \mathbf{F} связано с накоплением упругой энергии, которая при определенных условиях может преобразовываться в работу разрыва молекулярных связей и приводить к локальной деформации и разрушению на микроуровне полиэтиленовой изоляции. Направленное сжимающее действие этой силы на дефекты в изоляции (рис. 3) показывает возможность растрескивания поверхностей включения и триингового канала, а также дальнейшее увеличение их объема.

На рис. 5 дано распределение величины напряжения по Мизесу σ_M (в оттенках серого цвета) и электрической силы \mathbf{F} (стрелками) в изоляции в окрестности: сферического включения (рис. 5, а) и включения с фрагментом триинга (рис. 5, б). На вставке справа рис. 5, б показана в увеличенном виде картина распределения величин на острие триинга. Как видно, наличие каналов триинга увеличивает значение действующей силы и эквивалентного механического напряжения на несколько порядков. Это объясняет механизм развития триинговых структур вследствие разрушения диэлектрика преимущественно на полюсах удлиненных включений и на концах триинговых микроканалов.

Для случая, когда рассматриваемый объем изоляции испытывает всестороннее давление, исследо-

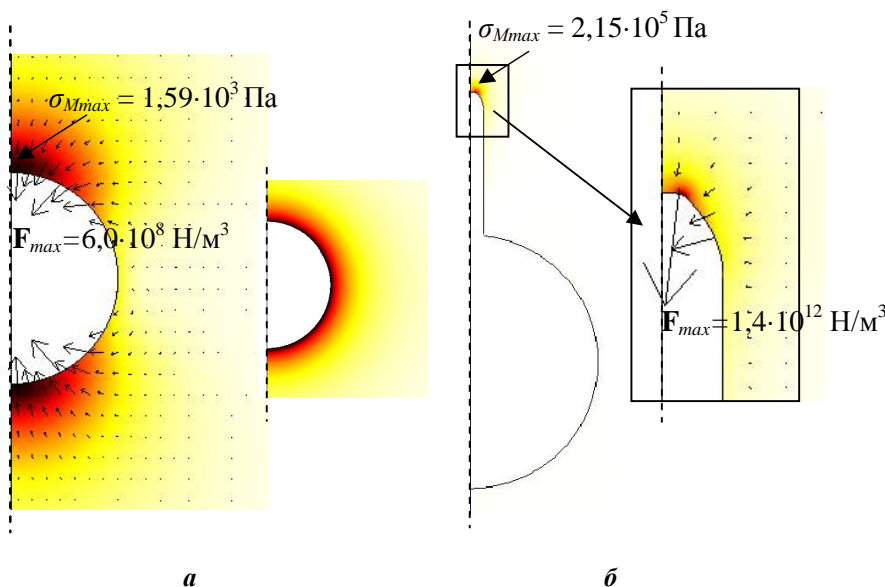


Рис. 5

вался вопрос о распределении механических напряжений в области с микродефектом. Расчетным путем получено, что вокруг включения концентрируются более высокие механические напряжения, величина которых может на 38–40% превосходить напряжение в основном объеме изоляции. На вставке к рис. 5, а показана типичная картина распределения напряжения в области с микровключением в таком случае.

Таким образом, при значениях остаточных механических напряжений до 15 МПа и выше [11] и в

случае наличия внешних давлений в материале электромеханические напряжения в зоне дефектов и особенно в области триинговых структур (рис. 5, б) могут в сумме давать высокое локальное напряжение, которое при циклических нагрузках может достигать величины разрушающего напряжения. В таком случае в результате суммарного воздействия механические напряжения приведут к такой локальной деградации полиэтиленовой изоляции на микроуровне, которая в дальнейшем будет способствовать сокращению ресурса работы кабеля.

Заключение. Разработаны математическая модель и компьютерная методика расчета методом конечных элементов неоднородного электрического поля, электрических сил и механических напряжений в области микродефектов различной формы и с фрагментом триинга в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей. На такой основе проведен количественный анализ электромеханических напряжений в области микродефектов двух типов: включения в форме эллипсоида и включения с отдельным каналом триинга.

Результаты компьютерных расчетов показывают, что зона с повышенным значением электрического поля, сил и механических напряжений локализована на полюсах микровключений вытянутой эллипсоидной формы и на острие триинга с характерным размером до 0,3–0,5 мкм. При этом сила, действующая в этой зоне триинга, почти на три порядка превышает среднюю силу, действующую в окрестности основной его части. Такое воздействие способствует распространению триинга в объеме изоляции и, как следствие, ускоренному старению полиэтиленовой изоляции.

1. *Гачкевич А.Р.* Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазиустановившихся электромагнитных полей. – К.: Наукова думка, 1992. – 192 с.
2. *Кучерявая И.Н.* Компьютерный анализ электрического поля и сил в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии дефекта. // Праці ІЕД НАНУ. – 2010. – Вип. 25. – С. 126–132.
3. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Теоретическая физика. Том VII. Теория упругости. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
4. *Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
5. *Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей из сшитого полиэтилена на напряжение 220 кВ и 330 кВ* // Институт электродинамики НАН Украины, ЗАО "Южкabelь", НЭК "Укрэнерго". – Харьков: Майдан, 2011. – 42 с.
6. *Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М.* Электрический транспорт воды в неоднородном электрическом поле полимерной изоляции высоковольтных кабелей // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 5. – С. 5–9.
7. *Boggs S., Densley J., Kuang J.* Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE. // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – № 2.– Pp. 310–315.
8. *Comsol Multiphysics 3.5 a.* Structural mechanics module. User's guide. – Comsol. – 442 p.
9. *Comsol Multiphysics, version 3.5 a* – www.comsol.com
10. *Densley J.* Ageing mechanisms and diagnostics for power cable. An overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17. – No. 1. – Pp. 14–22.
11. *Marcolongo P.* Modeling electromechanical phenomena contributing to cable deterioration // Thesis for the degree of Master of Science in Engineering – Materials Science and Engineering. – University of Puda, Italy, 2008. – 58 p.
12. *Zheng X.Q., Chen G., Davies A.E., Sutton S.J., Swingler S.G.* Mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Mexico. – 2002. – Pp. 955–958.

УДК 621.315.2 : 004.94

КОМП'ЮТЕРНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ В ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ЗА НАЯВНОСТІ МІКРОВКЛЮЧЕНЬ

І.М. Кучерява, канд.техн.наук

**Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

Стосовно до полімерної ізоляції надвисоковольтного кабеля досліджено розподіли об'ємної густини електричної сили та зв'язаних з нею механічних напружень в області окремого водного микровключення і включення з каналом тріінга. Отримано якісні картини і кількісні оцінки щодо величини електричної сили і максимального значення напруження за Мізесом для микровключення різного розміру. Розроблено математичну модель та комп'ютерну методику, що дозволяють проводити розрахунки електричної сили і механічних напружень в по-

літєлені з урахуванням наповнених водою дефектів в його структурі, а також моделювати зв'язаний з цим механізм руйнування на мікрорівні неоднорідного ізоляційного матеріалу. Бібл. 12, рис. 5.

Ключові слова: зшити-поліетиленова ізоляція, мікрровключення, канал трірінга, механічне напруження, напруження за Мізесом, комп'ютерне моделювання.

COMPUTER ANALYSIS OF ELECTROMECHANICAL STRESS IN POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLE AT AVAILABLE MICRO-INCLUSION

I.M. Kucheriava

**Institute of Electrodynamics, National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

As applied to polymer insulation of extra-high voltage power cable, the distributions of volume electric force and connected with the force mechanical stress in the zone of separate water microinclusion and inclusion with treeing channel are studied. The qualitative patterns and quantitative estimations for the values of electric force and maximum von Mises stress are obtained for microinclusions of different sizes. The mathematical model and computer program are developed to determine electric force and mechanical stress in polyethylene taking into account structural defects filled with water as well as to simulate the mechanism of destructive action on inhomogeneous insulating material. References 12, figures 5.

Key words: cross-linked polyethylene insulation, micro-sized inclusion, treeing channel, mechanical stress, von Mises stress, computer modeling.

1. *Hachkevich A.R.* Thermomechanics of electroconducting bodies under the action of quasi-steady-state electromagnetic fields. – Kyiv: Naukova Dumka, 1992. – 192 p. (Rus)
2. *Kucheriava I.N.* Computer analysis of electric field and forces in polyethylene insulation of power cable with defect // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – Vol. 25. – Pp. 126–132. (Rus)
3. *Landau L.D., Livshits E.M.* Theoretical physics. Volume VII. Theory of elasticity. – Moskva: Nauka, 1987. – 248 p. (Rus)
4. *Landau L.D., Livshits E.M.* Electrodynamics of continuous media. – Moskva: Nauka, 1982. – 621 p. (Rus)
5. *Instructions for choice, laying, mounting, testing and operation of the power cable with cross-linked polyethylene insulation for voltage of 220 kV and 330 kV* // Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, ZAO "Yuzhkabel", NEK "Ukrenergo". – Kharkiv: Maidan, 2011. – 42 p. (Rus)
6. *Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriava I.N., Zolotarev V.M.* Electric transport of water in inhomogeneous electric field of polymer insulation of high-voltage cables // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2010. – No. 5. – Pp. 5–9. (Rus)
7. *Boggs S., Densley J., Kuang J.* Mechanism for impulse conversion of water trees to electrical trees in XLPE // IEEE Trans. on Power Delivery. – 1998. – Vol. 13. – № 2. – Pp. 310–315.
8. *Cmsol Multiphysics 3.5 a.* Structural mechanics module. User's guide. – Cmsol. – 442 p.
9. *Cmsol Multiphysics, version 3.5 a* – www.cmsol.com
10. *Densley J.* Ageing mechanisms and diagnostics for power cable. An overview // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2001. – Vol. 17. – No. 1. – Pp. 14–22.
11. *Marcolongo P.* Modeling electromechanical phenomena contributing to cable deterioration. // Thesis for the degree of Master of Science in Engineering – Materials Science and Engineering. – University of Puda, Italy, 2008. – 58 p.
12. *Zheng X.Q., Chen G., Davies A.E., Sutton S.J., Swingler S.G.* Mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE. // 2002 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Mexico. – 2002. – Pp. 955–958.

Надійшла 19.03.2012

Received 19.03.2012