

УДК 621.315.2 : 004.94

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

**И.Н. Кучерявая**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
rB.irinan@gmail.com

*Путем компьютерного моделирования исследованы электрическое поле, электрические силы и электромеханические напряжения в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с типичными дефектами на макроуровне – надрезом с наружной стороны кабеля и трещиной в изоляции вблизи жилы кабеля. Показаны концентрация и высокие значения этих величин, а также превышение предела прочности и возможность разрушения изоляции в зонах заостренных концов рассматриваемых дефектов и, как следствие, необходимость соблюдения бездефектности кабелей и их изоляции в процессе прокладки и эксплуатации. С практической точки зрения работа представляет интерес в связи с широким внедрением и достаточно продолжительной эксплуатацией силовых кабелей со сшитополетиленовой изоляцией в Украине и за рубежом. Библ. 15, рис. 4.*

**Ключевые слова:** полиэтиленовая изоляция, дефекты на макроуровне, электромеханические напряжения, эквивалентное напряжение, трехмерное компьютерное моделирование.

**Введение.** Широкое внедрение нового поколения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ изоляцией) на высокое и сверхвысокое напряжения (до 500 кВ) обуславливает необходимость обеспечения их гарантированной надежности и продолжительного ресурса эксплуатации. Надежность кабелей в процессе длительной эксплуатации (до 30 лет и более) во многом связана с бездефектностью элементов, в частности, с состоянием полиэтиленовой изоляции и интенсивностью ее старения [1, 9, 10, 12, 13]. Длительный срок работы кабелей достигается за счет многих факторов – соблюдения требований современной технологии производства, заводских характеристик, профессиональности прокладки и монтажа, условий окружающей среды и эксплуатации, уровня технического обслуживания.

Причины повреждения кабелей достаточно разнообразны. В зависимости от них дефекты структурных элементов кабелей подразделяются на следующие группы:

1) дефекты производства и проектирования (микровключения, загрязнения, трещины, неплотное прилегание элементов кабеля друг к другу, заниженное сечение жил кабеля и др.);  
2) дефекты прокладки, монтажа и связанные с ними механические повреждения (механические напряжения, приводящие к трещинообразованию; недопустимые изгибы, надрезы, вмятины, изломы; повреждения кабелей подземной прокладки при проведении земляных работ механизированным способом и др.);

3) эксплуатационные дефекты, среди которых дефекты, связанные:  
– с условиями окружающей среды (интенсивность проникновения влаги и, как следствие, уровень развития триингов; агрессивность среды, ее температура, тепловое сопротивление грунта для подземных кабелей и связанная с этим коррозия элементов и пр.);  
– с условиями функционирования в энергосистеме (среди них – длительность токовых перегрузок и перегрева; изменения напряжения в системе; превышение времени короткого замыкания).

Отметим, что первые две группы повреждений оказывают влияние на кабели в течение всего срока их эксплуатации. В условиях воздействия электрического поля при наличии дефектов в структуре, включая повреждения изоляции, происходят ее ускоренный износ и сокращение срока службы кабеля. Ухудшение качества полиэтиленовой изоляции на микроуровне связано, прежде всего, с дефектами изготовления – наличием посторонних включений, распространением микротрещин, развитием водных и электрических триингов в изоляции [1, 8, 12]. На макроуровне механизмы деградации изоляции вызываются ее механиче-



Рис. 1

скими повреждениями, потерей целостности и нарушением изоляционной поверхности, проявляются также в связи с интенсивным развитием микродефектов в процессе длительной эксплуатации кабелей.

На рис. 1 показаны эксплуатационные дефекты и дефекты прокладки силовых кабелей с СПЭ изоляцией, а также картина растрескивания изоляции вследствие перегрева в процессе эксплуатации [9] (рис. 1 а); глубокий надрез, более 50 %-ной толщины изоляции, образованный при установке, и развитый водный триинг на конце надреза [13] (рис. 1 б); дефект изоляции со стороны внешнего полупроводящего слоя [10] и трещины в полиэтиленовой изоляции у поверхности жилы [1] (рис. 1 в).

Дефекты полиэтиленовой изоляции на микро- и макроуровнях приводят к локальной концентрации электрического поля, снижению электрической прочности изоляции [5, 8, 12, 13]. В процессе эксплуатации кабелей дефекты способны развиваться, приводить к изменению свойств и структуры изоляции. Основными факторами развития дефектов в полиэтиленовом материале являются действие электрического поля, проникновение влаги, механические напряжения и воздействия, временной фактор.

Как сообщается в работе [4], чем выше класс напряжения кабеля, тем большее влияние на его качество (на электрическую прочность) оказывают дополнительные, кроме дефектности, факторы, среди которых неоднородная структура изоляции и уровень механических напряжений в ней. Только внутренние механические напряжения технологического происхождения могут снижать электрическую прочность изоляции на 20...25 % [4].

В [15] путем экспериментального исследования выявлено совместное влияние частоты приложенного напряжения и внутренних механических напряжений на рост и структуру триингов в сшитом-полиэтиленовом материале.

Электрические и механические процессы в неоднородной полиэтиленовой изоляции связаны между собой и способствуют ее деградации на микроуровне. С помощью дву- и трехмерного компьютерного моделирования это показано на примере изоляции с водными микровключениями простой формы (сферической, эллипсоидной) в работах [2, 14] и модельными триинговыми структурами – в статьях [2, 5].

*Целью настоящей работы* является компьютерное исследование распределения электрического поля и механических напряжений в полиэтиленовой изоляции высоковольтного кабеля (110 кВ), имеющей характерные макроуровневые дефекты эксплуатации и прокладки – надрез (растрескивание) поверхности и части объема изоляции (в соответствии с рис. 1 а, б), а также трещину в изоляции, исходящую от жилы кабеля (в соответствии с рис. 1 в внизу). Компьютерное моделирование выполняется в трехмерном случае в объеме кабеля с выбором в нем малого элемента – подобласти с дефектами (рис. 2 а). Электрическая и механическая задачи представляют собой единую мультифизическую задачу [6] и решаются последовательно численным путем. Механическая задача использует объемные электрические силы, действующие в полиэтиленовой изоляции и определяемые при решении электрической задачи. Расчеты проводятся в стандартной программе мультифизического моделирования Comsol [11], в которой реализуется метод конечных элементов.

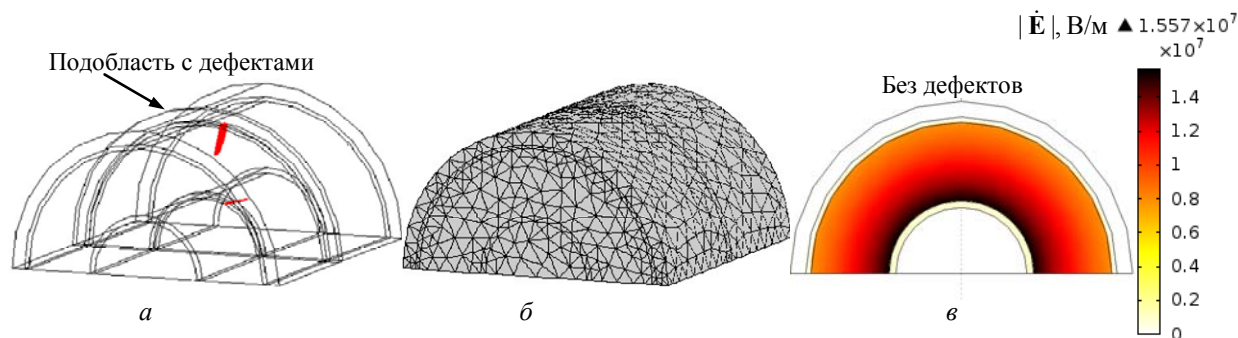


Рис. 2

В работе принят подход численного расчета электрических и механических процессов в достаточно большом объеме кабеля со встроенными в него дефектами. Возможен другой подход – расчет процессов в небольшой выделенной подобласти полиэтиленовой изоляции с дефектами при граничных условиях электрической задачи, определяемых с помощью аналитического выражения для напряженности поля из [7].

**Описание физических задач.** Электрическая задача и задача структурной механики рассматриваются в трехмерной постановке в декартовой системе координат. Расчетная область электрической задачи включает элементы – основную изоляцию кабеля, полупроводящие слои и медный экран. В области жилы и наружной оболочки кабеля электрическая задача не решается. Механическая задача решается только в области основной изоляции кабеля.

*Электрическая задача* формулируется относительно электрического потенциала  $\phi$ , который определяется из решения дифференциального уравнения  $\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0$ , где  $\epsilon_0$  и  $\epsilon_r$  – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость среды (комплексная величина в общем случае);  $\sigma$  – электропроводность соответствующей среды;  $\omega = 314 \text{ Гц}^{-1}$  – угловая частота; точкой наверху обозначаются комплексные величины.

В модели пренебрегается влиянием объемного электрического заряда, инжектируемого с поверхности жилы и медного экрана в изоляцию. Задаются различные значения электрических параметров  $\epsilon_r$  и  $\sigma$  в различных элементах кабеля.

Задаются граничные условия: на поверхности жилы –  $\phi = U_m$  ( $U_m$  – амплитудное значение фазного напряжения); на поверхности медного экрана – потенциал  $\phi = 0$ ; на остальных границах – условие электрической изоляции  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$  ( $\mathbf{n}$  – единичный вектор внешней нормали,  $\mathbf{J}$  – плотность полного тока).

После определения распределения потенциала  $\phi$  напряженность электрического поля рассчитывается как  $\mathbf{E} = -\nabla\phi$ .

*Задача структурной механики* решается в предположении отсутствия внешних силовых нагрузок и давления в полиэтиленовом материале с учетом силы, действующей со стороны электрического поля.

Основным уравнением задачи является уравнение механического равновесия  $\nabla\sigma_M + \mathbf{F}_e = 0$ , где  $\sigma_M$  – тензор механических напряжений;  $\mathbf{F}_e$  – объемная электрическая сила (средняя за период), действующая в диэлектрической среде в предположении отсутствия объемных зарядов и определяемая согласно [3] выражением  $\mathbf{F} = \frac{\epsilon_0}{2} \nabla(\epsilon - 1) |\mathbf{E}|^2$ .

В качестве граничных условий на нижней плоской поверхности (рис. 2 а) выбирается условие симметрии, на остальных внешних границах задается условие свободных поверхностей при сделанном предположении, что они не испытывают внешних силовых нагрузок.

**Расчетная модель и результаты компьютерного моделирования.** Моделирование выполняется для кабеля с СПЭ изоляцией на напряжение 110 кВ. С учетом симметрии область исследования содержит половину объема кабеля по поперечному сечению (рис. 2 а). Это значит, что рассматриваемые макроуровневые дефекты имеют место и в другой симметричной половине объема кабеля. Такое предположение допустимо, поскольку, как будет показано ниже, увеличение электрического поля происходит лишь в локальных областях вблизи дефектов.

Исследуемый одножильный кабель имеет сечение жилы 500 мм<sup>2</sup> (диаметр жилы 25,2 мм), толщину изоляции 16 мм, сечение экрана из медных лент 35 мм<sup>2</sup> (толщину экрана 4 мм). Толщина полупроводящих слоев – 1 мм.

Значения электропроводности изоляции  $\sigma_1 = 10^{-15}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>, электропроводности полупроводящих слоев  $\sigma_2 = 10^{-7}$  (Ом·м)<sup>-1</sup>. Диэлектрическая проницаемость материалов  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2,3$ , частота – 50 Гц. Механические свойства полиэтилена: модуль Юнга  $E_{\text{упр}} = 700$  МПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,46$ . Плотность полиэтилена  $\rho = 930$  кг/м<sup>3</sup>. В результате решения механической задачи рассчитывается распределение эквивалентных напряжений, определяемых как среднее механическое напряжение, исходя из энергии упругой деформации в каждой точке [6]. Как правило, на основании сравнения эквивалентных напряжений с пределом прочности материала делается заключение о его механически нагруженном состоянии.

Конечно-элементное разбиение расчетной области показано на рис. 2 б. В малой области расположения дефектов (рис. 2 а) использовалось максимально возможное сгущение расчетной сетки с тем, чтобы наиболее корректно рассчитать поле в зоне дефектов, особенно на их заостренных концах.

Картина распределения напряженности поля в изоляции без дефектов с цветовой линейкой значений на рис. 2 в представлена для дальнейшего сравнения с полученными результатами в области рассматриваемых структурных дефектов на макроуровне – надреза изоляции со стороны внешнего полупроводящего слоя (рис. 3) и трещины в изоляции вблизи жилы кабеля (рис. 4). Надрез в соответствии с рис. 1 б и трещина в изоляции представляются достаточно объемными, их толщина по длине кабеля задается равной 2 мм.

Напряженность электрического поля в изоляции без дефектов может быть вычислена не только численно (как на рис. 2 в), но и аналитически по выражению, приведенному, например, в [7].

На рис. 3 показано распределение электрического поля (рис. 3 а), объемной электрической силы (рис. 3 б) и эквивалентного напряжения (рис. 3 в) в области надреза изоляции. Как видно, максимальные значения этих величин концентрируются на конце надреза. В рассматриваемом случае надрез находится в зоне изоляции, в которой при отсутствии дефектов

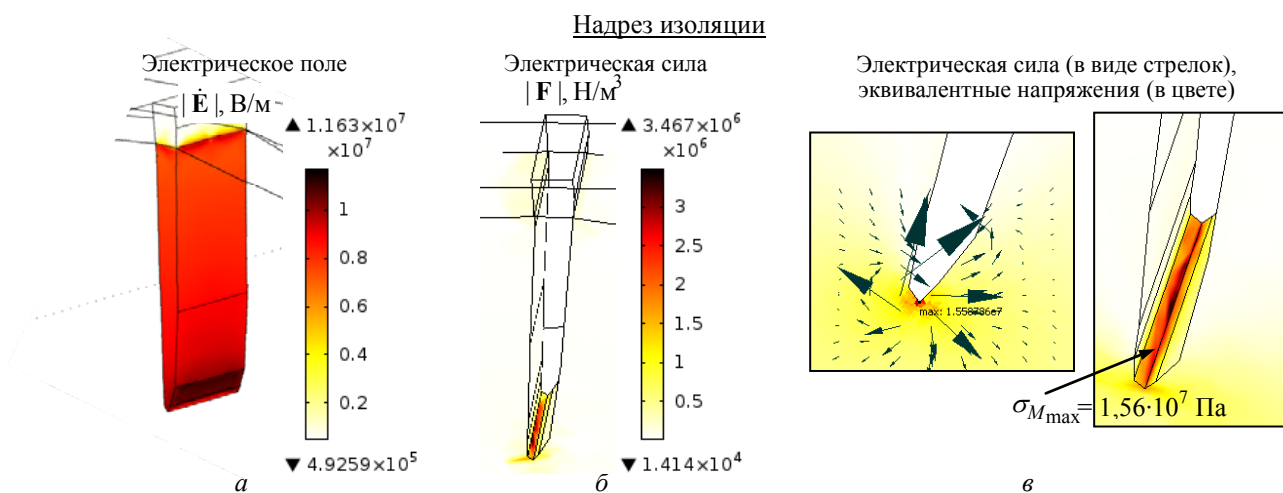
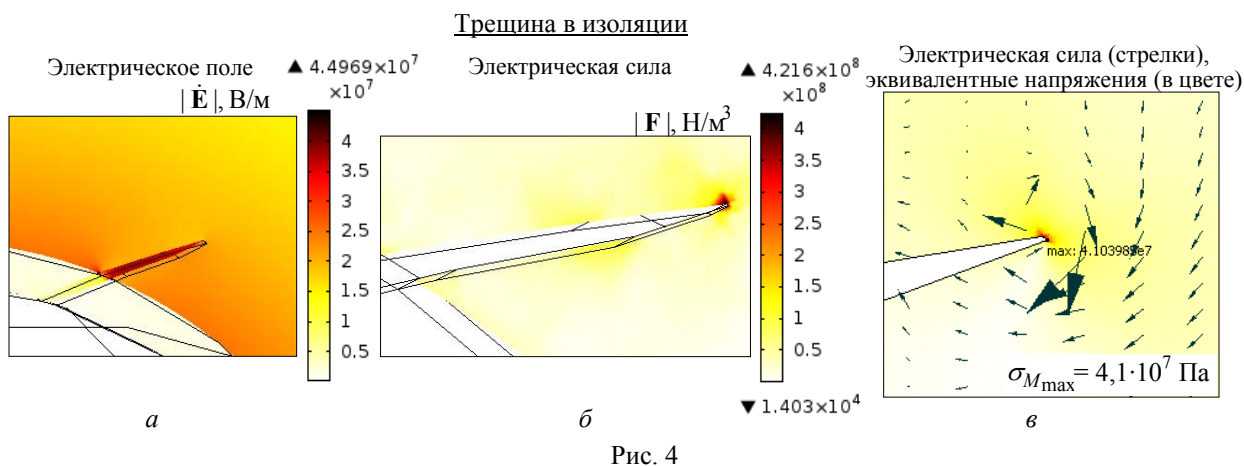


Рис. 3



напряженность поля согласно рис. 2 *в* составляет  $|\dot{E}| \sim 0,75\text{--}8$  кВ/мм, и согласно данным рис. 3 *а* увеличивается более чем в 1,5 раза. Распределение на конце надреза векторной величины силы  $\mathbf{F}$  (рис. 3 *в* справа) показывает сложный характер ее действия – в целом круговой сжимающий эффект, а вблизи конца надреза – наличие значительных сил всестороннего растягивания. С учетом того, что предел прочности полиэтилена составляет  $(1\text{--}2)\cdot 10^7$  Па, полученный характер действия электрической силы и максимальное значение эквивалентного напряжения  $\sigma_{M_{\max}} = 1,56\cdot 10^7$  Па свидетельствуют о возможном растрескивании изоляции на конце надреза и распространении его вглубь изоляции.

Распределения электрического поля, объемной электрической силы и эквивалентного напряжения вблизи и непосредственно на острие трещины в изоляции представлены на рис. 4. Электрическое поле для этого случая увеличивается почти в 2,9 раза (в сравнении с данными рис. 2 *в*). Наибольшие значения электрической силы  $|\mathbf{F}|$  концентрируются на самом конце трещины (рис. 4 *б*). Согласно рис. 4 *в* действие силы в этой зоне имеет характер кругового сжатия, а эквивалентное напряжение равно  $\sigma_{M_{\max}} = 4,1\cdot 10^7$  Па, что превышает предел прочности материала и объясняет его вероятное локальное разрушение, начиная от острия трещины.

Вследствие высокой напряженности электрического поля в зонах на конце надреза и трещины возможно зарождение и развитие триинговых структур, что подтверждается рис. 1 *б*.

Отметим, что в дополнение к трехмерному случаю решения электрической и механической задач в полиэтиленовой изоляции с дефектами, задачи решались в двумерной постановке. При этом расхождение результатов расчетов относительно максимальных значений величин составляло до 25...35 %, а описанные выше закономерности в их распределении не изменялись.

**Выводы.** Исследован характер распределения электрического поля, электрической силы и механического напряжения в полиэтиленовой изоляции высоковольтного кабеля с учетом наличия характерных дефектов – надреза изоляции со стороны наружного полупроводящего слоя и трещины в изоляции вблизи жилы кабеля.

Расчетным путем выявлено, что ослабленные зоны изоляции с высокой напряженностью электрического поля, большими значениями электрической силы и эквивалентного напряжения, превышающего предел прочности полиэтиленового материала, имеют место на заостренных концах рассматриваемых дефектов. Такие дефекты влияют на распределение поля в изоляции на макроуровне, способны приводить к снижению ее электрической прочности и разрушению как на микро-, так и на макроуровне.

Результаты работы содействуют более полному пониманию причин деградации полиэтиленовой изоляции и показывают важность недопущения в ней дефектов при прокладке и эксплуатации силовых кабелей.

1. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей // Кабель-news. – 2008. – № 10. – С. 58–60.
2. Кучерявая И.Н. Компьютерный анализ электромеханических напряжений в полиэтиленовой изоляции силового кабеля при наличии микровключений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 10–16
3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1982. – 621 с.
4. Мещанов Г.И., Шувалов М.Ю., Каменский М.К., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л. Кабели на напряжение 10–500 кВ: состояние и перспективы развития (анализ, прогноз, исследования) // Кабели и провода. – 2008. – № 5 (312). – С. 32–38.
5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизические процессы в области включения в полиэтиленовой изоляции силового кабеля (трехмерное моделирование и эксперимент) // Техн. электродинамика. – 2015. – № 3. – С. 3–9.
6. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2015. – 305 с.
7. Уиди Б. Кабельные линии высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 232 с.
8. 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.
9. Buchholz V. Finding the root cause of power cable failures. – [http://www.electricenergyonline.com/show\\_article.php?article=186](http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=186)
10. Cable condition assessment. – <http://www.powertechlabs.com/testing/cables-accessories/>
11. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
12. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
13. Mashikian M. S., Szatkowski A. Medium voltage cable defects revealed by off-line partial discharge testing at power frequency // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2006. – Vol. 22, No. 4. – P. 24–32.
14. Wang Z., Marcolongo P., Lemberg J.A., Panganiban B., Evans J.W., Ritchie R.O., Wright P.K. Mechanical fatigue as a mechanism of water tree propagation in TR-XLPE // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2012. – Vol. 19, No. 1. – P. 321–329.
15. Zheng X., Chen G., Davies A.E., Sutton S.J. The influence of survival mechanical stress and voltage frequency on electrical tree in XLPE // 2002 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – Mexico, 20–24 Oct. 2002. – P. 955–958.

УДК 621.315.2 : 004.94

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

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

#### **Дослідження експлуатаційних дефектів силових кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену**

*Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено електричне поле, електричні сили та електромеханічні напружки в поліетиленовій ізоляції силових кабелів з характерними дефектами на макрорівні – надрізом із зовнішнього боку кабеля та тріщиною в ізоляції поблизу жили кабеля. Показано концентрацію і високі значення цих величин, а також перевищення межі міцності та можливість руйнування ізоляції в зонах загострених кінців розглянутих дефектів і, як наслідок, необхідність дотримання бездефектності кабелів та їх ізоляції в процесі прокладання та експлуатації. З практичної точки зору робота виявляє інтерес у зв'язку з широким впровадженням і досить тривалою експлуатацією в Україні та за кордоном силових кабелів зі зшитого-поліетиленовою ізоляцією. Бібл. 15, рис. 4.*

**Ключові слова:** поліетиленова ізоляція, дефекти на макрорівні, електромеханічні напружки, еквівалентна напружка, тривимірне комп'ютерне моделювання.

**I.M. Kucheriava**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

#### **The study of operating defects in XLPE insulated power cables**

*The electric field, electric force and electromechanical stress in the polyethylene insulation of power cables with typical defects at macro-level (with deep gash from the outer side of cable and crack in the insulation near the cable conductor) are studied by computer modeling. As shown, the concentration and maximum values of electric intensity, electric force and equivalent tensile stress as well as the exceeding of ultimate strength take place on the pointed end of the defects. Therefore the exclusion of defects in cable insulation is needed in the course of installation and operation of power cables. The results of the work are of practical importance in view of wide application and long-term service of XLPE (cross-linked polyethylene) insulated power cables in Ukraine and all over the world. References 15, figures 4.*

**Key words:** polyethylene insulation, macro-sized defects, electromechanical stress, equivalent tensile stress, three-dimensional computer modeling.

Надійшла 02.12.2016

Received 02.12.2016