

УДК 621.315.687.2: 004.94

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ  
В КАБЕЛЬНОЙ МУФТЕ С ТРУБКЕЙ-РЕГУЛЯТОРОМ**

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

*Путем компьютерного моделирования исследовано распределение электрического поля в муфте силового кабеля со шито-полиэтиленовой изоляцией на среднее напряжение. В качестве средства выравнивания поля в муфте использована трубка-регулятор. Учтены зависимость электропроводности изоляции кабеля от напряженности электрического поля и размеры трубки в осевом направлении муфты. Проварены значения электропроводности и диэлектрической проницаемости материала трубки-регулятора. Рассмотрены возможные дефекты вследствие неровностей поверхности изоляции кабеля и образования воздушных пузырей при насадке трубки. Практическое значение результатов моделирования состоит в возможном их использовании при выборе длины трубки-регулятора и материала изготовления, а также для обеспечения электрической прочности изоляции кабеля при наличии дефектов на ее внешней границе. Библ. 12, рис. 4, табл. 1.*

**Ключевые слова:** кабельная муфта, трубка выравнивания поля, дефекты поверхности изоляции и установки трубки, компьютерное моделирование.

**Введение.** Применяемые в электрических сетях кабельные линии нераздельно связаны с кабельной арматурой, в том числе муфтами, которые служат для соединения строительных длин при прокладке кабелей и оконцевания кабелей в местах присоединения к источнику энергии или потребителю. Для оконцевания кабелей на открытом воздухе используются концевые муфты наружной установки [4].

Муфты предназначаются для обеспечения конструктивной, электрической и механической целостности кабелей. С точки зрения электрической надежности муфт кабелей на среднее напряжение важным их конструктивным элементом являются трубки выравнивания напряженности электрического поля. Такие выравнивающие трубки или трубки-регуляторы применяются с целью достижения надежного функционирования муфт путем снижения неравномерности распределения электрического поля в их объеме, предотвращения концентрации силовых линий поля в области среза экрана кабеля, защиты изоляции от пробоя. Выравнивание электрического поля необходимо для исключения частичных разрядов, возникновение которых возможно на месте среза экрана и других элементов кабеля в его разделке [12]. Разрядные процессы способны разрушать изоляцию и со временем приводить к выходу из строя муфты. Надежность кабельной муфты в эксплуатации определяется степенью выравнивания электрического поля в ее объеме и связана с электрической прочностью ее изоляции и изоляции кабеля.

Широкое распространение в качестве средств выравнивания поля в муфтах кабелей среднего напряжения получили термоусаживаемые трубки-регуляторы [4], изготавливаемые на основе полимеров со свойством изменять свои геометрические размеры и форму при нагревании (например, горячим воздухом или открытым пламенем), а при повторном нагревании возвращаться к первоначальной форме. Такие трубки усаживаются на концевые кабельные разделки и принимают их форму.

К основным причинам возникновения аварийных ситуаций и отказов в работе кабельных линий относятся [2, 8, 9] причины, связанные с качеством материалов и изготовления – дефектами и загрязнениями в изоляции кабелей и муфт, дефектами монтажа муфт, дефектами их конструкции. Вместе с тем, в процессе эксплуатации появляются воздействия и явления, среди которых – проникновение влаги, изменение свойств материалов и естественное их старение в условиях окружающей среды, что также содействует аварийности кабельных линий. В соответствии с информацией в [9] причины аварий кабельных систем, связанные с выходом из строя концевых муфт, составляют до 30% от всех остальных причин, при этом неполадки в работе кабелей приводят только к ~7% аварийных ситуаций. В связи с этим важными являются исследование и анализ физических процессов и, в частности, распределения электрического поля в кабельных муфтах с учетом условий работы и возможных дефектов в конструктивных элементах.

При названных выше причинах и недостатках материалов, используемых в конструкции муфт, одним из факторов влияния на снижение электрической прочности изоляции является возникновение частичных разрядов [3] и, в частности, разрядов на границе внешнего полупроводящего слоя кабеля [12].

Частичные разряды возникают также в неоднородной изоляции, в местах дефектов с повышенной напряженностью электрического поля и, соответственно, с пониженной электрической прочностью. Локальный пробой и последующее разрушение изоляции кабеля происходят при локализации в малом объеме диэлектрика электрического поля, напряженность которого превосходит критическое значение и электрическую прочность диэлектрика [3].

С точки зрения электрической прочности (наряду с наличием дефектов-неоднородностей в изоляционных материалах) слабым местом кабельных муфт является граница раздела двух материалов, отличающихся диэлектрической проницаемостью. Для муфт современных кабелей с полиэтиленовой изоляцией – это внешняя ее поверхность, граничащая с изоляцией муфты и средствами выравнивания электрического поля, например, с трубкой-регулятором. Поверхность изоляции кабеля может иметь повреждения – шероховатости, неровности в виде выступов и впадин вследствие некачественной механической обработки при разделке конца кабеля. Наплывы, морщины и воздушные пузыри могут появляться при усаживании трубки выравнивания напряженности поля на изоляцию кабеля и срез медного экрана. Исследование электрофизических процессов в окрестности таких нежелательных дефектов важно для выявления факторов влияния на электрическую прочность изоляции за счет изменения ее стойкости к частичным разрядам.

На основе изложенного *цель работы* – исследование методом компьютерного моделирования электрического поля в концевой кабельной муфте с трубкой выравнивания напряженности поля при учете размеров трубки и электрических свойств ее материала, а также анализ влияния различных дефектов изоляции и недостатков установки выравнивающей трубки на изменение электрического поля в изоляции силового кабеля.

Рассматривается муфта для одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на среднее напряжение. Для расчетов базовой модели задается номинальное напряжение кабеля 10 кВ. Компьютерное моделирование проводится с использованием метода конечных элементов в профессиональной программе Comsol [7]. При расчете электрического поля учитывается зависимость электропроводности изоляции кабеля от величины напряженности поля.

Предварительные исследования распределения электрического поля в кабельной муфте с трубкой выравнивания напряженности поля при учете ее расположения в концевой разделке силового кабеля и наличия выравнивающей мастики проведены в статье [10].

**Моделирование электрического поля.** Основные положения и принятые допущения математической и расчетной моделей следующие:

- модель строится в двумерном приближении и представляется осесимметричной, т.к. конструкция кабельной муфты характеризуется симметрией относительно оси  $Oz$ , (рис. 1, а, б);
- электрическое поле медленно меняется во времени; задача рассматривается для квазистати-

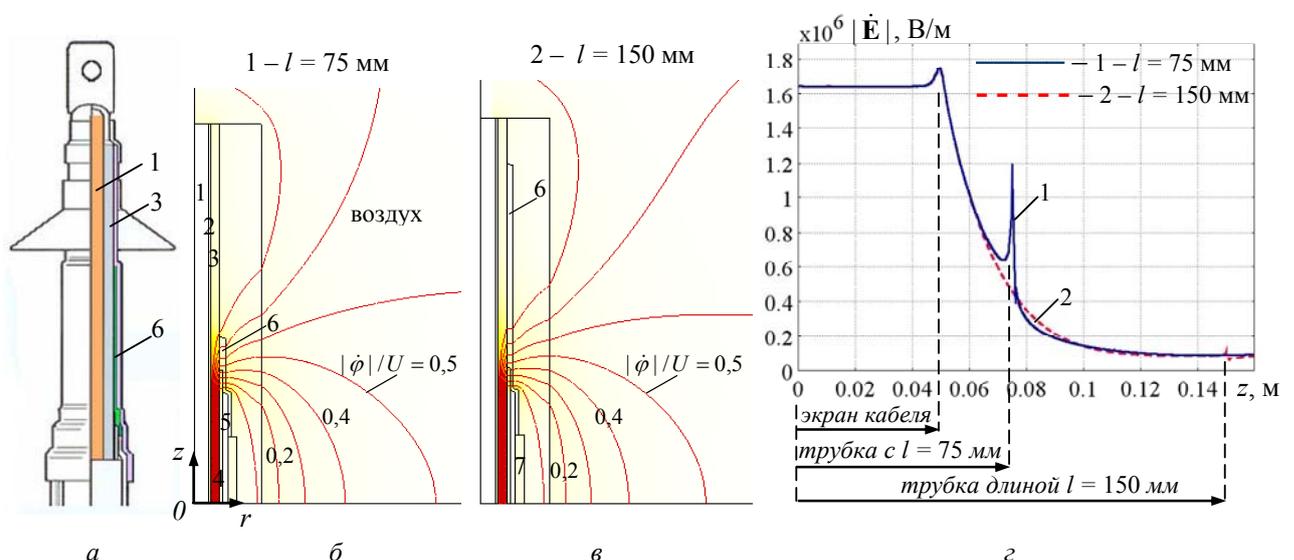


Рис. 1

ческого приближения при частоте  $f = 50$  Гц;

– окружающей средой для рассматриваемой муфты наружной установки является воздух;  
– учитываются такие конструктивные элементы кабеля, как полупроводящие слои по жиле и изоляции, внешняя оболочка, хотя оболочка и внутренний полупроводящий слой слабо влияют на распределение электрического поля в активной области муфты;

– изоляционные материалы кабеля и муфты изотропны, характеризуются постоянными значениями диэлектрической проницаемости; электропроводность полиэтиленовой изоляции силового кабеля в модели зависит от напряженности электрического поля и, в общем случае, от температуры [6, 11];

– варьируются значения диэлектрической проницаемости и электропроводности материала трубки-регулятора с целью выявления их влияния на распределение напряженности электрического поля в объеме муфты;

– рассматриваемые дефекты, связанные с обработкой поверхности изоляции кабеля при разделке и установкой выравнивающей трубки, представляются как имеющие одинаковую форму по всей угловой (азимутальной) координате, т.е. одну и ту же форму во всех осевых сечениях муфты.

Основным уравнением математической модели является дифференциальное уравнение вида

$$\nabla \cdot [(\sigma \nabla \dot{\phi} + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \dot{\phi})] = 0, \quad (1)$$

где  $\dot{\phi}$  – комплексное значение электрического потенциала;  $\sigma$  – электропроводность соответствующего материала;  $j$  – мнимая единица;  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $\varepsilon_r$  – комплексная диэлектрическая проницаемость материала (относительное значение);  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Задаются граничные условия:  $\dot{\phi} = U$  ( $U$  – фазное напряжение) – на поверхности жилы кабеля;  $\dot{\phi} = 0$  – на поверхности медного экрана; условие электрической изоляции – на внешних границах, кроме оси симметрии; условие непрерывности – на внутренних границах.

Уравнение (1), дополненное приведенными граничными условиями, решается численно в программе Comsol. Напряженность электрического поля рассчитывается как  $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla \dot{\phi}$ .

Для учета нелинейности электропроводности полиэтиленовой изоляции в модели определяется ее эффективное значение в зависимости от напряженности поля согласно выражению [11]

$$\sigma = \sigma(|\dot{\mathbf{E}}|, T) = a \cdot \exp\left(-\frac{A_E \cdot q_e}{k_B \cdot T}\right) \frac{\sinh(b \cdot 10^{-7} |\dot{\mathbf{E}}|)}{|\dot{\mathbf{E}}|}.$$

Здесь  $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд электрона;  $k_B = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана;  $a = 3,2781$  и  $b = 2,7756$  – экспериментально определенные константы;  $A_E = 0,56$  эВ – энергия активации;  $T$  – температура, полагаемая равной  $20^\circ\text{C}$ .

При введении эффективной электропроводности материала предполагается, что синусоидальная составляющая плотности тока на частоте 50 Гц связана с синусоидальной величиной электрического потенциала соотношением  $\dot{\mathbf{J}} = \sigma(|\dot{\mathbf{E}}|)\dot{\mathbf{E}}$ . В таком случае уравнение (1) в первом приближении определяет первую гармонику потенциала в диэлектрике с нелинейными свойствами. Фактически изменение электрического потенциала и плотности тока заменяется эквивалентными синусоидами. Аналогичный подход применялся в [1] при расчете нелинейных цепей и, в частности, при анализе феррорезонанса, когда учет несинусоидальности кривых тока, напряжения и магнитного потока представляет значительные трудности.

**Результаты компьютерного моделирования.** Значения относительной проницаемости  $\varepsilon_r$  и удельной электропроводности  $\sigma$  материалов элементов кабеля и муфты, используемые в расчетах, приведены в таблице.

Расчет базового варианта муфты проводится для кабеля на напряжение 10 кВ с сечением жилы  $120 \text{ мм}^2$  (диаметром жилы 6,2 мм), толщиной изоляции 4 мм, сечением экрана из медных лент  $16 \text{ мм}^2$  (толщиной экрана 2,3 мм); внешний диаметр исследуемого кабеля составляет 33 мм [5].

Основные элементы муфты и кабеля, учитываемые в расчетах, показаны на рис. 1, а–в, а также отмечены на рис. 4, б. Их обозначения такие: 1 – жила кабеля; 2 – полупроводящий слой по жиле (внутренний полупроводящий слой); 3 – полиэтиленовая изоляция кабеля; 4 – полупроводящий слой

по изоляции (внешний полупроводящий слой); 5 – медный экран; 6 – трубка-регулятор длиной  $l$ ; 7 – оболочка кабеля.

Общий вид рассматриваемой муфты представлен рис. 1, а. Показаны распределение электрического поля и эквипотенциальных линий в муфте при длине трубки выравнивания поля  $l = 75$  мм (рис. 1, б) и  $l = 150$  мм (рис. 1, в). Для обоих случаев на рис. 1, г

приведено изменение электрического поля  $|\dot{E}|$  по длине изоляции кабеля на границе с внешним полупроводящим слоем. На рис. 1, б–в, так же как и далее на рис. 3, а–б, указаны значения отношения  $|\dot{\phi}|/U$ , соответствующие построенным изолиниям электрического потенциала.

Как видно из рис. 1, длина трубки-регулятора влияет на характер распределения электрического поля и значение напряженности поля в изоляции кабеля на уровне трубки и в окрестности. При короткой длине трубки ( $l = 75$  мм) электрическое поле на ее конце возрастает до  $|\dot{E}| = 1,2$  кВ/мм, тогда как при использовании более длинной трубки выравнивания поля ( $l = 150$  мм) оно несколько перераспределяется по высоте муфты и его дополнительное увеличение очень незначительно ( $|\dot{E}| = 0,17$  кВ/мм при  $z = 0,15$  м, рис. 1, г). Наибольшее значение напряженности электрического поля ( $|\dot{E}|_{\max} \approx 1,75$  кВ/мм) сохраняется в зоне среза медного экрана кабеля, где концентрируются силовые линии поля. Это ослабленная зона изоляции с более низкой электрической прочностью. С учетом этого интересен вопрос о влиянии номинального напряжения кабеля на уровень поля в такой зоне кабельной муфты.

Зависимость максимального значения напряженности электрического поля на границе изоляции кабеля на уровне среза медного экрана от напряжения кабеля  $U_0$  показана на рис. 2. Здесь пунктирной линией отмечены допустимые максимальные рабочие напряженности поля  $E_{\max}^*$  для кабелей на номинальное напряжение от 10 до 30 кВ, приведенные в [4]. Видно, что для муфт кабелей на напряжение от 20 кВ и выше, значения напряженности поля в зоне среза экрана превышают допустимые рабочие напряженности поля. Это значит, что изоляция кабеля в этой зоне подвергается ускоренному старению.

Последние научно-технические разработки в области материаловедения и электротехники позволяют создавать новые материалы, и в том числе полимерные композиции, с заранее заданными электрофизическими свойствами. В связи с этим для базового варианта муфты кабеля 10 кВ (данные таблицы) на рис. 3 приведены распределения электрического поля и эквипотенциальных линий вблизи трубки длиной  $l = 75$  мм при различных значениях ее электропроводности:  $\sigma_{mp} = 10^{-8}$  См/м (рис. 3, а),  $\sigma_{mp} = 10^{-5}$  См/м (рис. 3, б). Изменение электрического поля  $|\dot{E}|$  вдоль границы "изоляция кабеля – внешний полупроводящий слой" для этих вариантов представлено на рис. 3, в. Показано, что

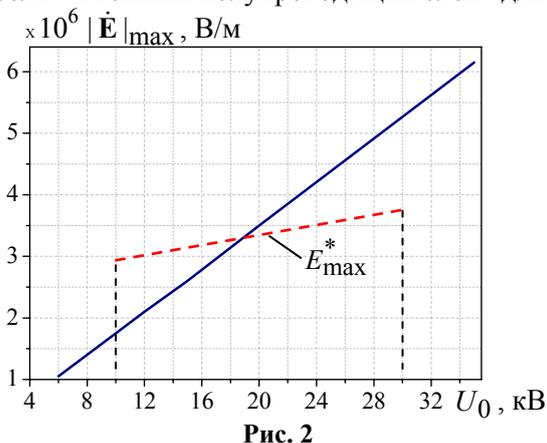


Рис. 2

с увеличением электропроводящих свойств материала трубки-регулятора при  $\sigma_{mp} = 10^{-5}$  См/м в области ее конца резко возрастает напряженность поля – до  $\sim 2,8$  кВ/мм. Отметим, что допустимая максимальная рабочая напряженность электрического поля в полиэтиленовой изоляции составляет 2,7 кВ/мм [4]. При уменьшении электропроводности (при  $\sigma_{mp} = 10^{-8}$  См/м) начинает увеличиваться поле в зоне среза внешнего полупроводящего слоя изоляции кабеля. Так, оптимальным, с точки зрения более равномерного распределения электрического поля по длине изоляции кабеля, является значение элек-

Элементы расчетной области	Значения параметров	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ , См/м
Полиэтиленовая изоляция кабеля	2,3	$10^{-15}$
Внутренний полупроводящий слой кабеля	2,3	$10^{-7}$
Внешний полупроводящий слой кабеля	2,3	$10^{-7}$
Оболочка кабеля	2,2	$10^{-14}$
Изоляция муфты – наполнитель из силикона	3,0	$10^{-15}$
Выравнивающая трубка	4 (var)	$10^{-7}$ (var)
Воздух	1	$10^{-18}$

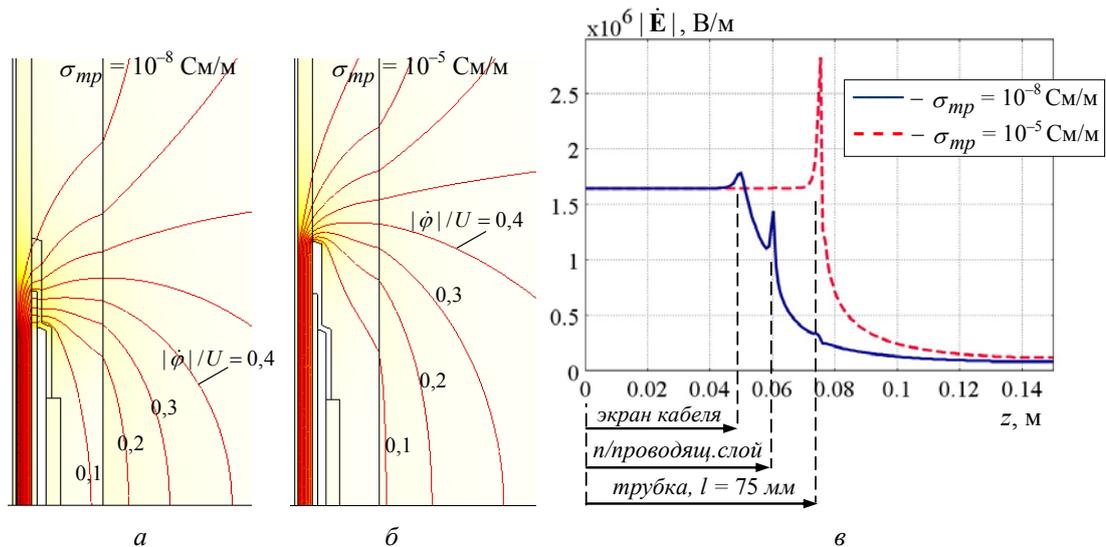


Рис. 3

тропроводности трубки-регулятора  $\sigma_{тр} = 10^{-7}$  СМ/М, что и принято для базового расчетного варианта.

Изменение диэлектрической проницаемости трубки выравнивания напряженности поля  $\epsilon_{тр}$  от 4 до 40 изменяет поле в области ее конца, однако поле на уровне среза экрана кабеля остается максимальным и имеет одинаковое значение  $|\dot{E}|_{\max} \approx 1,75$  кВ/мм. Для длинной трубки-регулятора (длинной  $l=150$  мм) поле на ее конце с увеличением  $\epsilon_{тр}$  не изменяется. Зона среза экрана остается критической точкой кабельной муфты для обоих вариантов –  $l=75$  и  $150$  мм.

Рис. 4 представляет рассматриваемые дефекты в элементах муфты и кабеля (слева), распределение электрического поля и эквипотенциальных линий вблизи дефектов (в центре), а также изменение электрического поля вдоль внешней границы изоляции кабеля (справа) при наличии:

- двух воздушных пузырей под трубкой выравнивания поля (рис. 4, а), что возможно из-за неплотного ее прижатия при насадке на конец кабеля;
- выступов в изоляции кабеля под трубкой (рис. 4, б);
- неровностей-впадин в изоляции, заполненных воздухом под трубкой (рис. 4, в).

Два последних дефекта могут появляться из-за некачественной механической обработки поверхности изоляции при разделке кабеля.

Расчеты применительно к данным рис. 4 выполнены при длине трубки-регулятора 75 мм и электропроводности  $\sigma_{тр} = 10^{-7}$  СМ/М. Результаты показывают, что в области расположения дефектов под трубкой поле искажается и наиболее опасными являются впадины в полиэтиленовой изоляции, заполненные воздухом, где напряженность электрического поля превышает поле на уровне среза экрана и достигает  $|\dot{E}|_{\max} \approx 1,93$  кВ/мм.

**Заключение.**

Путем компьютерного моделирования с учетом нелинейной электропроводности поли-

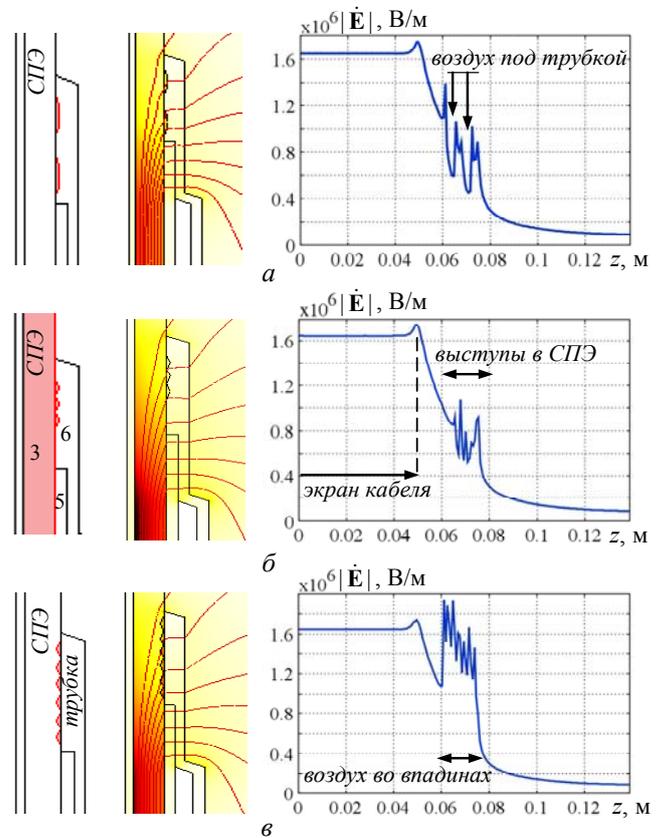


Рис. 4

этиленовой изоляции кабеля показано, что длина выравнивающей трубки и значение диэлектрической проницаемости ее материала слабо влияют на распределение электрического поля в активной области муфты. Для более длинной трубки-регулятора (заданной длины 150 мм) характерно более равномерное распределение поля в изоляции кабеля (рис. 1, з).

При выбранных условиях с увеличением электропроводности материала трубки-регулятора возрастает напряженность поля в зоне ее конца выше поля на срезе медного экрана силового кабеля. При ослаблении электропроводящих свойств материала трубки поле возрастает на срезе внешнего полупроводящего покрытия изоляции кабеля (рис. 3, в).

Наличие неровностей и выступов на поверхности изоляции кабеля приводит к снижению электрической прочности границы изоляции. Наиболее опасными, с точки зрения увеличения напряженности электрического поля, являются дефекты под трубкой-регулятором в виде впадин, заполненных воздухом (рис. 4, в).

Результаты могут быть полезны при проектировании муфт с трубкой-регулятором для кабелей среднего напряжения, в частности при выборе длины выравнивающей трубки и свойств ее материала, а также для обеспечения допустимых значений напряженности электрического поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля.

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Кабельные муфты "Прогресс". Современные решения для кабельных сетей // Кабель-news. – 2009. – № 11. – С. 34–36.
3. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
4. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ. Т. 3. – М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с.
5. Силовые кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. – ЗАТ Завод "Южкабель". – Харьков, Украина. – 56 с.
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1995. – Vol. 2. – Is. 1. – Pp. 97–106.
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
8. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
9. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p. – [http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7\\_with-Copyright.pdf](http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7_with-Copyright.pdf)
10. Kucheriava I.M. Electric field distribution in medium-voltage XLPE cable termination taking into account outer semiconducting layer // Технічна електродинаміка. – 2016. – № 3. – С. 12–17.
11. Olsson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field // Proc. of the 5-th European Thermal-Sciences Conference. – The Netherlands, 18–22 May, 2008. – 8 p. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.491.3890&rep=rep1&type=pdf> (accessed 28.03.2016)
12. Strobl R., Haverkamp W., Malin G., Fitzgerald F. Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories // Proc. of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 843–848.

УДК 621.315.687.2: 004.94

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В КАБЕЛЬНІЙ МУФТІ З ТРУБКОЮ-РЕГУЛЯТОРОМ

Кучерява І.М., докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. E-mail: [rb.irinan@gmail.com](mailto:rb.irinan@gmail.com)

Шляхом комп'ютерного моделювання досліджено розподіл електричного поля в муфті силового кабелю зі зшитого-поліетиленовою ізоляцією на середню напругу. Для вирівнювання поля в муфті використано трубку-регулятор. Враховано залежність електропровідності ізоляції кабелю від напруженості електричного поля і розміри трубки в осьовому напрямку муфти. Проварійовано значення електропровідності та діелектричної проникності матеріалу трубки-регулятора. Розглянуто можливі дефекти внаслідок нерівностей поверхні ізоляції кабелю та утворення повітряних проміжків при насадці трубки. Практичне значення результатів моделювання можливе при їхньому застосуванні для вибору довжини трубки-регулятора і матеріалу виготовлення,

а також забезпечення електричної міцності ізоляції кабеля при наявності дефектів на її зовнішній границі. Бібл. 12, рис. 4, табл. 1.

**Ключові слова:** кабельна муфта, трубка вирівнювання поля, дефекти поверхні ізоляції та установки трубки, комп'ютерне моделювання.

## MODELING OF ELECTRIC FIELD IN CABLE TERMINATION WITH STRESS CONTROL TUBE

**Kucheriava I.M.**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,**

**pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

**E-mail:** [rb.irinan@gmail.com](mailto:rb.irinan@gmail.com)

*The electric field distribution in the end termination of medium-voltage cross-linked polyethylene insulated power cable is studied by computer modeling. The stress control tube is used in the cable termination to reduce field nonuniformity. The dependence of conductivity of the cable insulation on electric intensity and the tube length in axial direction are taken into account. The conductivity and dielectric permittivity of tube material are varied. The possible defects owing to insulation surface roughness and air bubbles under stress control tube are considered. The practical relevance of attained results is associated with selection of the length and material of field-grading tube and with ensuring of electric strength of cable insulation at availability of defects on its external surface.* References 12, figures 4, table 1.

**Key words:** cable termination, stress control tube, defects of insulation surface, improper tube shrinkage, computer modeling.

1. Zeveke G.V., Ionkin P.A., Netushil A.V., Strakhov S.V. Foundations of the circuit theory. – Moskva: Energoatomizdat, 1989. – 528 p. (Rus)
2. "Progress" cable terminations. Advanced designs for cable networks // Kabel-news. – 2009. – No 11. – Pp. 34–36. (Rus)
3. Kuchinskii G.S. Partial discharges in high-voltage constructions. – Leningrad: Energiia, 1979. – 224 p. (Rus)
4. Makarov E.F. The handbook on 0.4–35 kV and 110–1150 kV power networks. Vol. 3. – Moskva: Papirus-Pro, 2004. – 688 p. (Rus)
5. Medium- and high-voltage power cables with cross-linked polyethylene insulation. – PJSC Zavod "Yuzhkabel". – Kharkov, Ukraine. – 56 p. (Rus)
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – 1995. – Vol. 2. – Is. 1. – Pp. 97–106.
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
8. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 p.
9. Hampton N. HV and EHV cable system aging and testing issues. Chapter 3. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. – Georgia Tech Research Corporation, February 2016. – 19 p. – [http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7\\_with-Copyright.pdf](http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7_with-Copyright.pdf)
10. Kucheriava I.M. Electric field distribution in medium-voltage XLPE cable termination taking into account outer semiconducting layer // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2016. – No 3. – Pp. 12–17.
11. Olsson C.O. Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field // Proc. of the 5-th European Thermal-Sciences Conference. – The Netherlands, 18–22 May, 2008. – 8 p. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.491.3890&rep=rep1&type=pdf> (accessed 28.03.2016)
12. Strobl R., Haverkamp W., Malin G., Fitzgerald F. Evolution of stress control systems in medium voltage cable accessories // Proc. of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE/PES. – 2001. – Vol. 2. – Pp. 843–848.

Надійшла 29.03.2016

Остаточний варіант 04.07.2016