

## ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.687.2

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В КАБЕЛЬНЫХ МУФТАХ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ЕГО ВЫРАВНИВАНИЯ И ПРИ НАЛИЧИИ ДЕФЕКТОВ В ЭЛЕМЕНТАХ

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

*Рассмотрены основные способы выравнивания напряженности электрического поля в кабельных муфтах. Представлены и проанализированы результаты компьютерных расчетов электрического поля в концевой разделке силового кабеля с применением выравнивающих трубки и конуса при наложении на место среза экрана материала с высокой диэлектрической проницаемостью. Проведены расчеты поля для случаев различных форм среза экрана кабеля, наличия дефектов в структуре элементов муфты и на поверхности изоляции кабеля. Библ. 15, рис. 8, таблица.*

**Ключевые слова:** кабельные муфты, концевая разделка кабеля, выравнивание электрического поля, дефекты в изоляции, форма среза экрана, компьютерное моделирование.

**Введение.** Силовые кабели на высокое и сверхвысокое напряжение (до 110–500 кВ) получают все большее применение в энергосистемах больших городов, на промышленных и энергетических объектах. Для прокладки первой в мире кабельной линии со сшитополиэтиленовой изоляцией на напряжение 500 кВ на токийской гидроэлектростанции *Kazunogawa* длиной 2,3 км использовано ряд промежуточных соединений кабелей с помощью вертикальных и горизонтальных кабельных муфт [15]. Первая в Украине сверхвысоковольтная кабельная линия (на напряжение 330 кВ), действующая в Днепропетровске, имеет длину около 13 км и 14 соединительных муфт [6].

Муфты для кабелей высокого напряжения являются наиболее слабым звеном кабельных линий. От их качества и надежности работы зависит надежность работы всей кабельной линии.

По своему назначению кабельные муфты подразделяются на соединительные (рис. 1 а, [5]), концевые (рис. 2 а, б, [2, 8]) и ответвительные [7]. Соединительные муфты предназначены для соединения кабелей, а концевые кабельные – для присоединения кабелей к электроаппаратам наружной и внутренней установки или воздушным линиям электропередачи.

Описание конструкций, рекомендации по монтажу и эксплуатации соединительных и концевых кабельных муфт для кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110 кВ приведены в [8]. Современная кабельная арматура для основных типов разработанных кабелей описана в [2, 5, 7].



Рис. 1

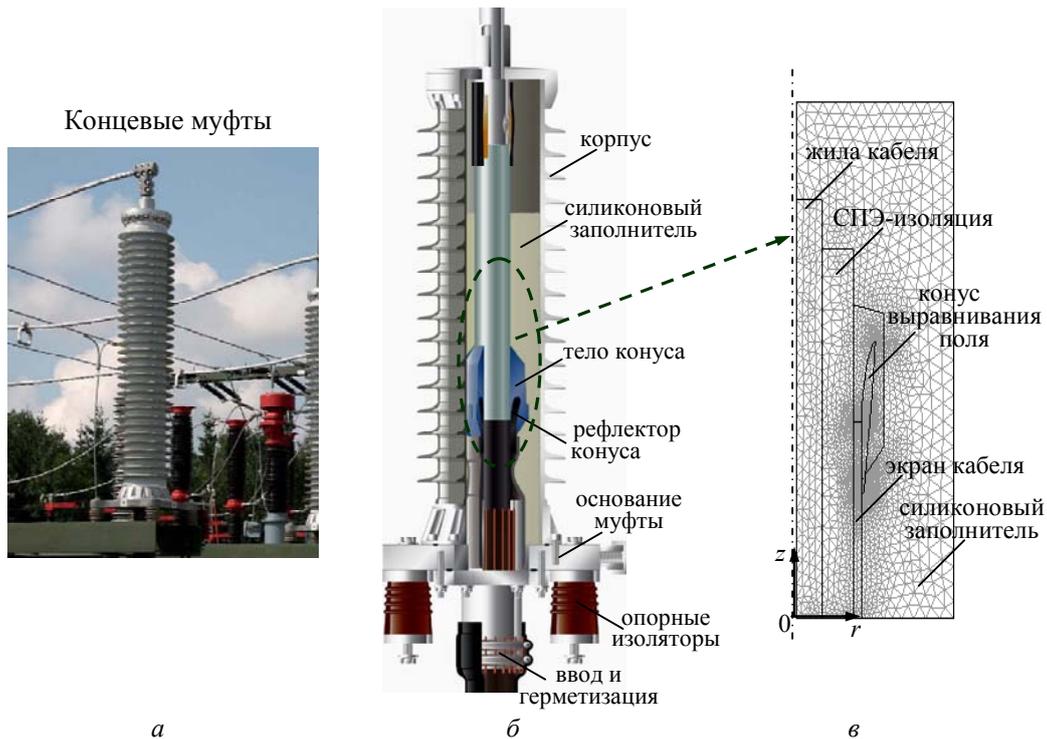


Рис. 2

Надежность кабельных муфт в эксплуатации определяется электрической прочностью изоляции, степенью равномерности распределения электрического поля в них. Расчету электрического поля и выработке рекомендаций по снижению неравномерности распределения поля в муфтах силовых кабелей посвящены, например, работы [1, 3, 14]. Причины разрушения изоляции и возникновения разрядов в кабельных муфтах изучаются в [4, 12]. В монографии [9] представлены исследования электрофизических механизмов развития водных триингов и разрушения полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей на микроуровне, что может являться основой для изучения электрических и тепловых процессов в местах среза полупроводящих слоев и медного экрана кабеля при разделке его конца для соединения с использованием муфт (рис. 1 б – разделка кабеля).

Важность изучения электрических процессов в концевой разделке кабеля обусловлена тем, что в зоне среза экрана происходит концентрация напряженности электрического поля и при достаточном уровне поля могут возникать разрядные процессы, приводящие к разрушению изоляции. Часть экрана кабеля удаляется как при концевой заделке кабеля, так и при соединении кабелей. Срез экрана приводит к изменению электрического поля в продольном сечении кабеля. Место среза является областью резкого повышения плотности силовых линий поля. В случае же непрерывного экрана кабеля по всей длине жилы, электрическое поле однородно в продольном сечении и напряженность поля изменяется только в радиальном направлении. Форма среза экрана, даже незначительные его неровности и надрезы способны приводить к разрушению изоляции и электрическому пробую.

Для определенных марок муфт в зависимости от их конструктивного исполнения и используемых материалов устанавливаются размеры разделки кабеля, а изоляция муфт выполняется из различных материалов [7]. Электрическое поле в изоляции муфты может значительно отличаться от поля в изоляции кабеля. С точки зрения электрической прочности, немаловажным вопросом является изучение распределения электрического поля на границе раздела двух изоляционных материалов, отличающихся значениями диэлектрической проницаемости. Наличие неровностей границы раздела сред и дефекты в изоляционных материалах способствуют снижению электрической прочности муфты.

Высокая электрическая прочность кабельных муфт достигается надлежащим регулированием электрического поля в изоляции.

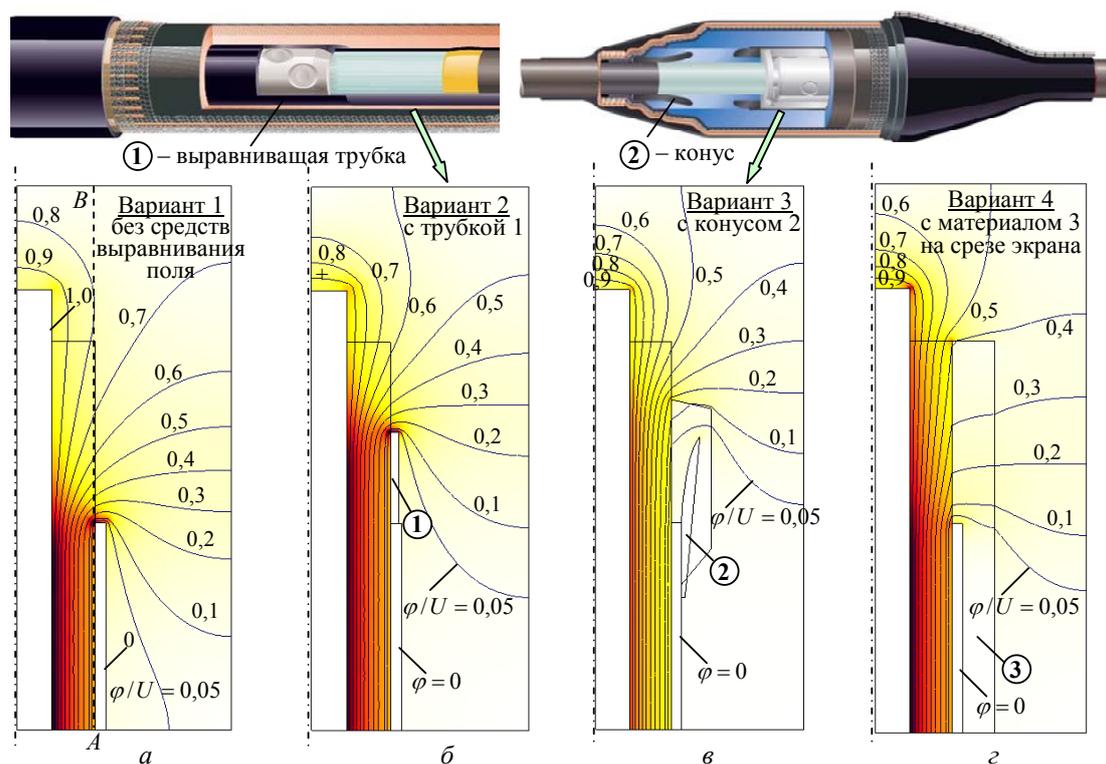


Рис. 3

Известны различные способы выравнивания электрического поля в кабельной арматуре. К двум основным из них относятся геометрический и рефракционный способы. Оба направлены на уменьшение значений продольной (тангенциальной) составляющей поля и тем самым на достижение более равномерного распределения напряженности электрического поля в объеме кабельной муфты.

Геометрический способ предполагает уменьшение напряженности электрического поля в месте разделки кабеля за счет использования дополнительных элементов специальной формы – так называемого стресс-конуса (рис. 2 б и 3 в), который накладывается на место среза экрана кабеля. Например, муфты для высоковольтных кабелей (110 кВ) [8] имеют выравнивающие конусы из силиконовой резины, что обеспечивает их эластичность и простоту установки на кабель без специальных инструментов.

Рефракционный способ выравнивания поля основан на применении материалов с высокой относительной диэлектрической проницаемостью. На место среза экрана кабеля накладывается материал с высокой диэлектрической проницаемостью, на порядок превышающей диэлектрическую проницаемость основной изоляции. Для этой цели используются трубки выравнивания напряженности электрического поля и специально разработанные мастики [5, 7] (см. рис. 3 б, г).

Отметим, что, как правило, вся арматура для кабелей на напряжение выше 1 кВ имеет систему выравнивания поля, которая выполняется в виде тех или иных дополнительных элементов в зависимости от выбранного способа регулирования поля.

В данной работе выполняются компьютерное моделирование и исследование распределения электрического поля в концевой разделке кабеля при различных способах выравнивания напряженности электрического поля, при изменении формы среза экрана и при наличии дефектов на поверхности основной изоляции, в изоляции муфты и в конусе выравнивания поля. Изучение проводится на примере разделки силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 110 кВ.

**Модель для исследования.** Предположения для построения математической модели следующие:

– конструкция кабельной муфты характеризуется симметрией относительно оси  $Oz$ , поэтому модель представлена как осесимметричная, для двумерного случая в цилиндриче-

ской системе координат; исследуется 1/2 часть области кабельной разделки (рис. 2 в);

– изоляционные материалы кабеля и муфты изотропны, характеризуются постоянными значениями электропроводности и диэлектрической проницаемости (хотя в общем случае эти характеристики зависят от напряженности электрического поля, а электропроводность и от температуры [10, 13]); сторонние заряды в материалах отсутствуют;

– электрическое поле медленно меняется во времени; задача рассматривается для квазистатического приближения при частоте  $f = 50$  Гц.

Основным уравнением модели является дифференциальное уравнение:

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

где  $\phi$  – комплексное значение электрического потенциала (напряжение);  $\sigma$  – 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.

Параметры  $\sigma$ ,  $\varepsilon_r$  имеют различные значения в изоляционных материалах кабеля и муфты, а также в области дефектов – посторонних включений в элементах.

Напряженность электрического поля находится из соотношения

$$\vec{E} = -\nabla \phi. \quad (2)$$

Граничные условия задачи такие. На поверхности токонесущей жилы кабеля задается фазное напряжение кабеля. На поверхности заземленных элементов – условие нулевого потенциала. На внутренних границах раздела сред выбирается условие непрерывности, а на внешних границах расчетной области, кроме оси симметрии, – условие электрической изоляции.

Уравнение (1) и выражение (2), дополненные описанными граничными условиями, составляют математическую модель для решения электрической задачи в области концевой разделки кабеля с различными средствами выравнивания электрического поля (рис. 2 в). Реализация модели проводится в программе Comsol [11] с использованием метода конечных элементов.

**Результаты компьютерного моделирования.** Моделирование электрического поля в концевой разделке кабеля выполняется с целью определения степени равномерности распределения напряженности поля и выявления зон с наибольшими значениями поля, определяющими электрическую прочность всей муфты.

Расчеты проводятся для силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на напряжение 110 кВ с сечением жилы  $500 \text{ мм}^2$  (диаметром жилы 26 мм), толщиной изоляции 16 мм, сечением экрана из медных лент  $35 \text{ мм}^2$  (толщиной экрана 4 мм).

Задаваемые значения диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r$  и электропроводности  $\sigma$  материалов элементов кабеля и муфты приведены в таблице [7, 12]. Результаты компьютерных расчетов представлены на рис. 3–8. Соединительные муфты, показанные на рис. 3 и 5, приведены и описаны в каталогах [2, 5].

Элементы	Значения параметров	
	$\varepsilon_r$	$\sigma$ , См/м
Изоляция из сшитого полиэтилена	2,3	$10^{-15}$
Заполнитель из силикона	2,8	$10^{-15}$
Выравнивающая трубка	30	$2 \cdot 10^{-3}$
Стресс-конус, рефлектор конуса	2,5	$2 \cdot 10^{-4}$
Тело конуса	22	0
Дефекты в заполнителе и в конусе – воздушные включения	1	$10^{-18}$
Загрязнение на поверхности изоляции от корпуса муфты из фарфора	4,7	$10^{-15}$

На рис. 3 даны распределения электрического поля (в оттенках цвета) и изолинии потенциала, соответствующие указанным значениям отношения  $\phi/U$ , в области концевой разделки кабеля для ряда случаев:

- без дополнительных средств выравнивания электрического поля (рис. 3 а);
- с трубкой выравни-

вания напряженности электрического поля 1 (рис. 3 б);

– с конусом выравнивания поля (рис. 3 в);

– с наложением на место среза экрана кабеля материала с высокой диэлектрической проницаемостью –  $\epsilon = 30$  (рис. 3 г).

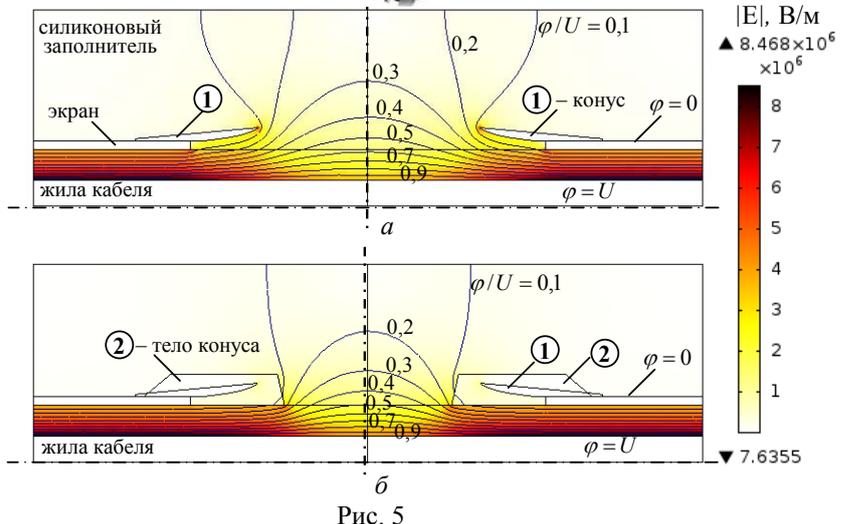
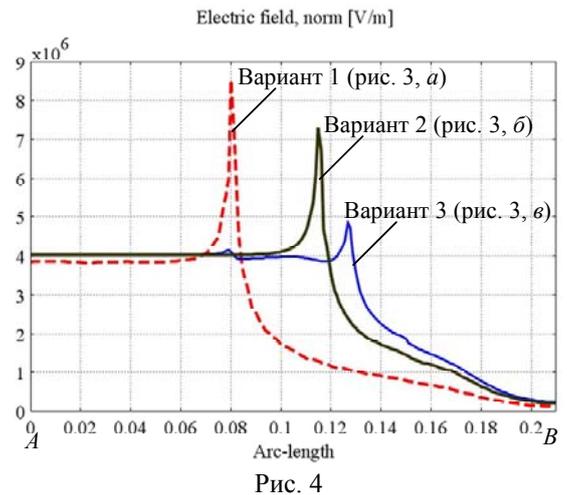
Так, рис. 3 б и г представляют рефракционный способ выравнивания электрического поля, а рис. 3 в – геометрический способ регулирования поля.

Данные рис. 3 показывают следующее. Для случая нерегулируемого электрического поля (рис. 3 а) в месте среза экрана высоковольтного кабеля наблюдается повышенная плотность линий равного потенциала, и высокий уровень напряженности электрического поля в этой зоне создает условия для возможного разрушения изоляции. Применение выравнивающей трубки (рис. 3 б) позволяет сгладить скачки напряженности поля в месте среза экрана кабеля. За счет применения средств выравнивания электрического поля (рис. 3 б–г) изолинии потенциала перераспределяются, достигается более равномерное их распределение на все большей площади СПЭ-изоляции и таким образом на срезе экрана напряженность электрического поля может быть снижена до уровня, обеспечивающего надежную длительную работу кабельной муфты.

Тенденция уменьшения уровня поля в ослабленных зонах изоляции для трех вариантов конструкции кабельной муфты показана на рис. 4. Здесь дано изменение напряженности электрического поля вдоль границы "полиэтиленовая изоляция – медный экран кабеля" (вдоль линии АВ на рис. 3 а) для трех вариантов конструкции кабельной муфты, соответствующих рис. 3.

На рис. 5 представлены распределения электрического поля в соединительной муфте с конусами выравнивания напряженности электрического поля, которые имеют только рефлектор (рис. 5 а), и с конусами, которые состоят из рефлектора и тела (рис. 5 б). Как видно, при наличии тела конуса обеспечивается значительно более однородное распределение поля в изоляции кабеля и в большем ее объеме.

Как показано на рис. 3 а, место среза экрана кабеля является зоной ослабления изоляции. Форма среза в значительной степени определяет уровень напряженности электрического поля на конце экрана, о чем свидетельствуют расчетные данные рис. 6, где показаны распределения электрического поля (в оттенках цвета) и изолинии потенциала, соответствующие приведенным значениям отношения  $\varphi/U$ , в области экрана кабеля с закруглением на конце (рис. 6 а) и с заостренным концом экрана (рис. 6 б). Характер изменения электрического поля вдоль указанной здесь линии CD для двух рассчитанных случаев приведен на рис. 6 в. Как видно, в случае за-



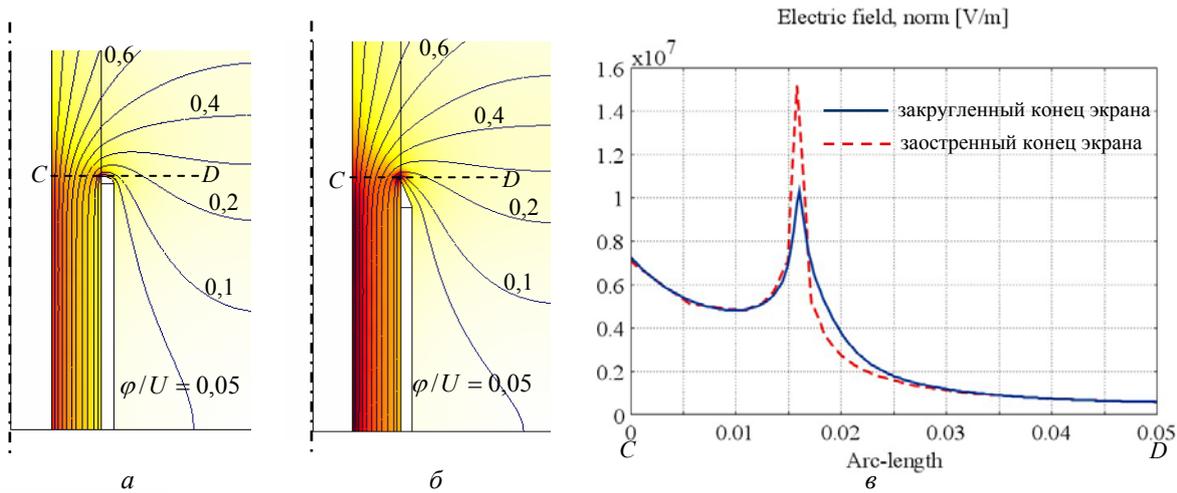


Рис. 6

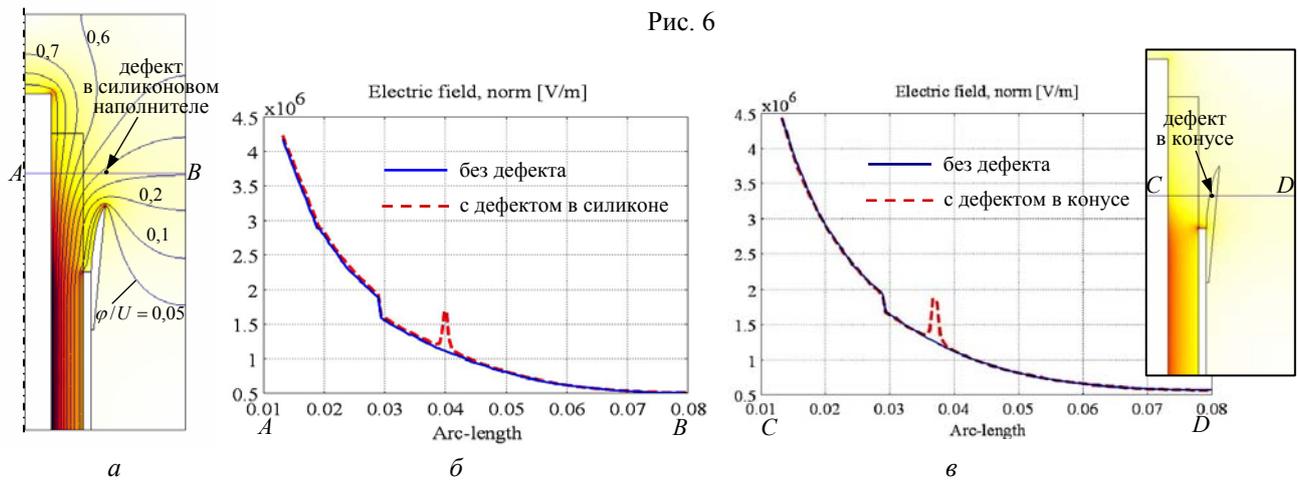


Рис. 7

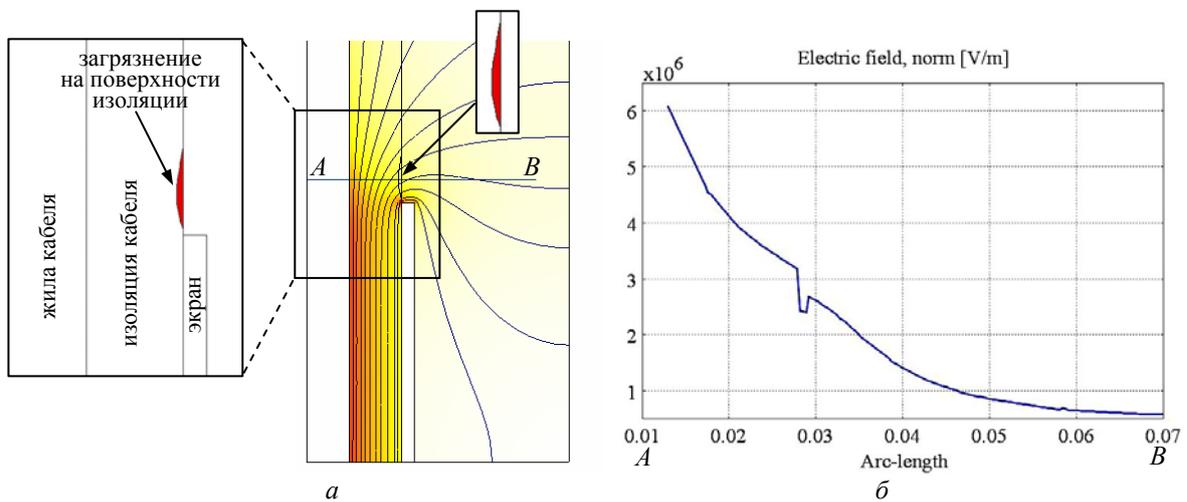


Рис. 8

остренного конца экрана уровень поля повышается приблизительно в 1,5 раза.

Наличие в элементах муфт дефектов в виде посторонних включений также приводит к изменению электрического поля в окружающих их областях. Для изучения характера изменения поля вблизи дефектов рассмотрены сферические воздушные включения с радиусом 0,5 мм в изоляционном силиконовом материале муфты (рис. 7 а–б) и в выравнивающем конусе (рис. 7 в), также рассмотрен элемент загрязнения поверхности изоляции кабеля (рис. 8), например, от фарфорового корпуса муфты с диэлектрической проницаемостью выше проницаемости изоляции (см. таблицу).

На рис. 7 показано распределение электрического поля (в оттенках цвета) и изолинии

потенциала, соответствующие приведенным значениям отношения  $\varphi/U$ , в области с конусом выравнивания поля (рис. 7 а) и изменение электрического поля вдоль отмеченной линии  $AB$ , проходящей через дефект в силиконовом наполнителе (рис. 7 б) и вдоль линии  $CD$ , пересекающей дефект в конусе (рис. 7 в).

Рис. 8 представляет распределение электрического поля (в оттенках цвета) и изолинии электрического потенциала в области с посторонним включением на поверхности изоляции (рис. 8 а), а также изменение электрического поля вдоль отмеченной здесь линии  $AB$  (рис. 8 б).

Данные рис. 7 и 8 показывают неоднородность изменения напряженности электрического поля вдоль линий, проходящих через рассмотренные дефекты.

**Заключение.** Таким образом, на основе компьютерного моделирования выявлены зоны концентрации электрического поля в кабельных муфтах, к которым относятся места среза экрана кабеля, зоны окончания трубки и конуса выравнивания поля вблизи изоляции силового кабеля. Неровности и заостренность среза экрана могут быть причиной разрушения и пробоя изоляции в области их расположения.

Наличие дефектов в элементах муфт приводит к возмущению электрического поля в их окрестности и ослаблению изоляции.

Конструкционные элементы муфт для кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение, средства выравнивания напряженности электрического поля должны выбираться на основе предварительного компьютерного расчета распределения электрического поля в объеме проектируемой кабельной муфты.

1. *Ветлугаев С.С., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Фурсов П.В.* Электрическое поле в соединительных муфтах с эластомерной изоляцией на напряжение 110 кВ // Кабели и провода. – 2004. – № 1 (284). – С. 15–18.
2. *Высоковольтная кабельная арматура.* Каталог 2012. – Tyco Electronics Raychem GmbH, Ottonbrunn / Munich, Germany. – 32 с. – [http://www.elsila.ru/files/Katalog\\_vysokovolt\\_kabeln\\_armatury\\_do\\_110kV.pdf](http://www.elsila.ru/files/Katalog_vysokovolt_kabeln_armatury_do_110kV.pdf)
3. *Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д.* Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей // Силовая электроника. – 2010. – № 2. – С. 4–6.
4. *Гурин А.Г., Гонтарь Ю.Г.* Разрушение поверхностного слоя диэлектрика в концевых кабельных муфтах под действием грозовых перенапряжений // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – № 59 (1032). – С. 53–61.
5. *Кабельная арматура.* Каталог 2007/2008. – Energy Devison. Tyco Electronics Raychem GmbH. – 127 p. – [http://raychem.kz/te/catalogs/rus/osnovnoj\\_katalog\\_Kabel%27naja\\_armatura\\_SN.pdf](http://raychem.kz/te/catalogs/rus/osnovnoj_katalog_Kabel%27naja_armatura_SN.pdf)
6. *Лях В.В., Молчанов В.М., Сантоцкий В.Г., Квицинский А.А.* Кабельная линия напряжением 330 кВ: некоторые аспекты проектирования // Промэлектро. – 2009. – № 6. – С. 27–33.
7. *Макаров Е.Ф.* Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Под ред. И.Т. Горюнова, А.А. Любимова. – Т. 3. – М.: Папирус-Про, 2004. – 688 с.
8. *Руководящий технический материал* по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ: [Науч.-методич. издание] / Под ред. А.К. Шидловского, В.М. Золотарева. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.
9. *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.
10. *Choo W., Chen G.* Electric field determination in dc polymeric power cable in the presence of space charge // 2007 Annual Report IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. – 2007. – P. 489–492. – <http://eprints.soton.ac.uk/264767/1/CEIDP2007-000221.pdf>
11. *Comsol multiphysics modeling and simulation software* – <http://www.comsol.com/>
12. *Li N., Deng G., Kong B.* Defect morphological characteristic of cold-shrinkable cable terminal and its partial discharge analysis based on finite element method // Internat. Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2014. – Vol. 3, Is. 1. – [http://www.ijareeie.com/upload/2014/january/1A\\_Defect.pdf](http://www.ijareeie.com/upload/2014/january/1A_Defect.pdf)
13. *Olsson C.O.* Modelling of thermal behaviour of polymer insulation at high electric dc field // 5-th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008. – 8 p. – [http://www.eurotherm2008.tue.nl/proceedings\\_eurotherm2008/papers/conduction/con\\_6.pdf](http://www.eurotherm2008.tue.nl/proceedings_eurotherm2008/papers/conduction/con_6.pdf)
14. *Raicevic N., Aleksic S.* Electric field regulation at the cable accessories using one new numerical approach electric field regulation at the cable accessories using one new numerical approach // Acta Electrotechnica et Informatica – 2007. – No. 1, Vol. 7. – P. 1–8. – <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.399.3121&rep=rep1&type=pdf>
15. *Suzuki A., Nakamura S., Matsuda M., Tanaka H.* Installation of the world's first 500 kV XLPE cable with intermediate joints // Furukawa Review. – 2000. – No. 19. – P. 115–122.

УДК 621.315.687.2

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

**Електричне поле в кабельних муфтах при різних способах його вирівнювання та за наявності дефектів в елементах**

*Розглянуто основні способи вирівнювання напруженості електричного поля в кабельних муфтах. Представлено і проаналізовано результати комп'ютерних розрахунків електричного поля в кінцевому обробленні силового кабеля із застосуванням вирівнювальних трубки та конуса, при накладенні на місце зрізу екрана матеріалу з високою діелектричною проникністю. Проведено розрахунки поля для випадків різних форм зрізу екрана кабеля, за наявності дефектів у структурі елементів муфти і на поверхні ізоляції кабеля. Бібл. 15, рис. 8, таблиця.*

**Ключові слова:** кабельні муфти, кінцеве оброблення кабеля, вирівнювання електричного поля, дефекти в ізоляції, форма зрізу екрана, комп'ютерне моделювання.

**I.M. Kucheriava**

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

**Electric field in cable boxes at various methods of its grading and availability of defects in elements**

*The main methods for electric intensity grading in cable boxes are examined. The computed results on electric field distribution in power cable termination with stress control tube and stress cone as well as at covering the zone of screen cutting by the material having high permittivity are presented and analyzed. The computations of electric field are carried out for different profiles of screen cutting, the defects in the elements of cable boxes and on cable insulation surface. References 15, figures 8, table.*

**Key words:** cable boxes, cable termination, electric field grading, defects in insulation, profile of screen cutting, computer modeling.

Надійшла 30.07.2015

Received 30.07.2015

УДК 621.3.01

## **УЧЕТ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ СРЕДЫ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ ОТ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМ ГАРМОНИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

**И.С. Петухов**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина  
e-mail: igor\_petu@mail.ru

*Нелинейные свойства среды приводят к искажению синусоидальной формы магнитной индукции, напряженности переменного магнитного поля и вихревых токов в толще ферромагнетика. Известно, что в высоконагруженных магнитных системах содержание высших гармоник в питающем токе и магнитной индукции может достигать значительных величин, которые необходимо учитывать. Для учета несинусоидального характера переменного электромагнитного поля применен метод конечных элементов с представлением временных зависимостей тригонометрическим полиномом. Проведено сравнение численных результатов данного подхода с подходом, использующим метод комплексных амплитуд, реализованный в пакете COMSOL, в котором нелинейность учитывается путем установления соответствия амплитуд эквивалентных синусоид магнитной индукции и напряженности поля. Сравнение результатов проводилось по интегральному и локальному тепловыделению при синусоидальном токе и синусоидальном напряжении, возбуждающих поле. Получены относительные значения погрешностей метода комплексных амплитуд. Библ. 12, рис. 6.*

**Ключевые слова:** ферромагнитная среда, поверхностный эффект, метод конечных элементов, временные гармоники, точность моделирования.

**Введение.** Анализ переменного магнитного поля в ферромагнитной среде в большинстве случаев связан с учетом нелинейности характеристики намагничивания и искажением вследствие этого временных зависимостей характеристик поля и токов. Если напряжение синусоидально, то высшие временные гармоники появляются в питающем токе, а также в на-