

КОМПЬЮТЕРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВЫРАВНИВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МУФТАХ КАБЕЛЕЙ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

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

Проведены компьютерные расчеты электрического поля в модели концевой муфты высоковольтного кабеля со шнито-полиэтиленовой изоляцией. Рассмотрены различные средства выравнивания поля в муфтах. Показано, что степень равномерности электрического поля в объеме муфты зависит от геометрических параметров трубки-регулятора, ее электрофизических свойств (электропроводности и диэлектрической проницаемости), от геометрической формы стресс-конуса и, соответственно, от расстояния его вершины до поверхности изоляции кабеля. Разработанные подходы к моделированию могут быть использованы для решения практической задачи выбора материалов для элементов кабельных муфт и оптимизации их конструкции.

Библ. 11, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: кабельные муфты, высоковольтный кабель, полиэтиленовая изоляция, трубка выравнивания поля, стресс-конус, компьютерное моделирование.

Введение. В последнее время в энергосистемах и на ответственных предприятиях Украины все шире используется передача электроэнергии с помощью высоковольтных кабелей с изоляцией из шнито-полиэтилена. На рис. 1 показан фрагмент проекта кабельной линии на напряжение 110 кВ для ОАО "Алчевский металлургический комбинат" [5]. Проектом предусмотрены переход воздушной линии 110 кВ в кабельную линию с полиэтиленовой изоляцией и применение с обеих сторон линии концевых муфт наружной установки типа OHVT-145C немецкой фирмы Tycso Electronics Raychem GmbH [4, 6] (рис. 1, справа).

Надежность работы кабельных линий в значительной степени определяется надежностью арматуры, и в том числе концевых муфт, которые предназначаются для присоединения кабелей к электроаппаратам или воздушным линиям электропередачи.

В свою очередь надежность эксплуатации кабельных муфт зависит от электрической прочности изоляции и степени равномерности распределения электрического поля в их объеме. Высокая электрическая прочность муфт достигается различными способами получения в них равномерного электрического поля.

Необходимость выравнивания электрического поля в активной области кабельных муфт связана со специальной подготовкой конца кабеля, так называемой концевой его разделкой, в результате

которой удаляется часть экрана кабеля. Напряженность поля при этом изменяется уже не только в радиальном направлении кабеля, но и вдоль его оси – появляется продольная составляющая поля. На срезе экрана резко увеличивается плотность силовых линий электрического поля, что может приводить к возникновению разрядных процессов в этой области и разрушению со временем изоляции.

Среди способов повышения равномерности электрического поля в арматуре силовых кабелей наиболее известны геометрический, рефракционный и импедансный способы.

Геометрический способ предполагает уменьшение напряженнос-

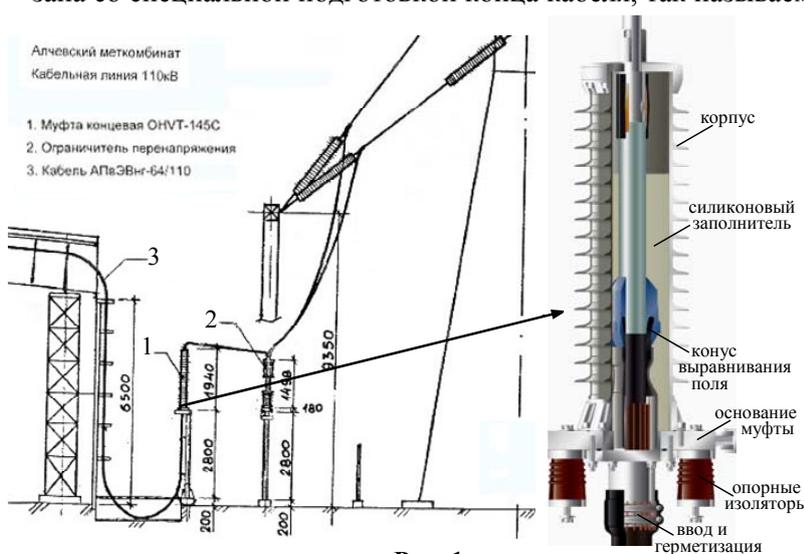


Рис. 1

ти поля в месте разделки кабеля путем использования дополнительных элементов специальной формы. При этом на место среза экрана кабеля накладывается так называемый стресс-конус, вдоль которого распределяется поле [10, 11].

Рефракционный способ основан на применении материалов с высокой относительной диэлектрической проницаемостью, выше диэлектрической проницаемости основной изоляции. Выравнивающие трубки с таким свойством, изготовленные из полимерных и резиновых материалов, и специально разработанные мастики накладываются на место среза экрана.

Импедансным способом достигается выравнивание поля путем выбора подходящих материалов стресс-конуса, регулирующей трубки и мастик за счет содержания в них особых добавок. При компьютерном расчете электрического поля в кабельных муфтах импедансный способ реализуется с помощью варьирования свойств материала выравнивающего конуса и трубки-регулятора – их проводимости и диэлектрической проницаемости [1–3].

В работах [1–3, 9, 11] с использованием численных методов исследуется распределение электрического поля в зоне максимальных его значений в объеме кабельных муфт, учитываются свойства материалов средств выравнивания поля в изоляции кабеля [1–3], а также наличие дефектов в элементах муфт [9]. Показано, что конструирование муфт кабелей на высокое напряжение необходимо осуществлять с применением средств выравнивания напряженности поля.

Сравнение различных способов выравнивания электрического поля в кабельных муфтах также, как и вопрос влияния электрофизических свойств и формы выравнивающих средств на степень равномерности поля в изоляции кабеля, остается предметом изучения, важным с точки зрения разработки кабельной арматуры и особенно для силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжение, получивших в настоящее время широкое распространение.

В данной работе выполняется компьютерное моделирование электрического поля в случае применения описанных способов выравнивания электрического поля в концевой муфте наружной установки (рис. 1). Моделируется муфта силового кабеля на напряжение 110 кВ с полиэтиленовой изоляцией. Численное моделирование проводится с использованием метода конечных элементов, реализованного в программе Comsol [8].

Целью работы является компьютерное исследование влияния электрофизических свойств материала трубки-регулятора, ее размеров, а также формы стресс-конуса на эффективность выравнивания поля в муфте кабеля с полиэтиленовой изоляцией и таким путем определение основных подходов к оптимизации конструкции и выбору материалов элементов кабельных муфт.

Математическая модель. В модели приняты такие предположения и упрощения:

- конструкция кабельной муфты характеризуется симметрией относительно оси Oz , поэтому расчетная модель представлена как двумерная, осесимметричная (рис. 2, а);
- в модели не учитываются такие элементы кабеля, как полупроводящие слои по жиле и изоляции, внешняя оболочка;
- конус выравнивания напряженности электрического поля в муфте представляется упрощенно в виде одного рефлектора;
- изоляционные материалы кабеля и муфты изотропны, характеризуются постоянными значениями электропроводности и диэлектрической проницаемости (в общем случае эти характеристики зависят от напряженности электрического поля, а электропроводность – и от температуры [7]);
- электрическое поле медленно меняется во времени; задача рассматривается для квазистатического приближения при частоте $f = 50$ Гц.

Основное уравнение модели имеет вид

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

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

Величины σ , ε_r принимают различные значения в изоляционных элементах кабеля и муфты.

Граничные условия следующие. На поверхности жилы кабеля задается значение фазного напряжения $\dot{\varphi} = \dot{U}$. На поверхности заземленных элементов – условие нулевого потенциала $\dot{\varphi} = 0$. На внут-

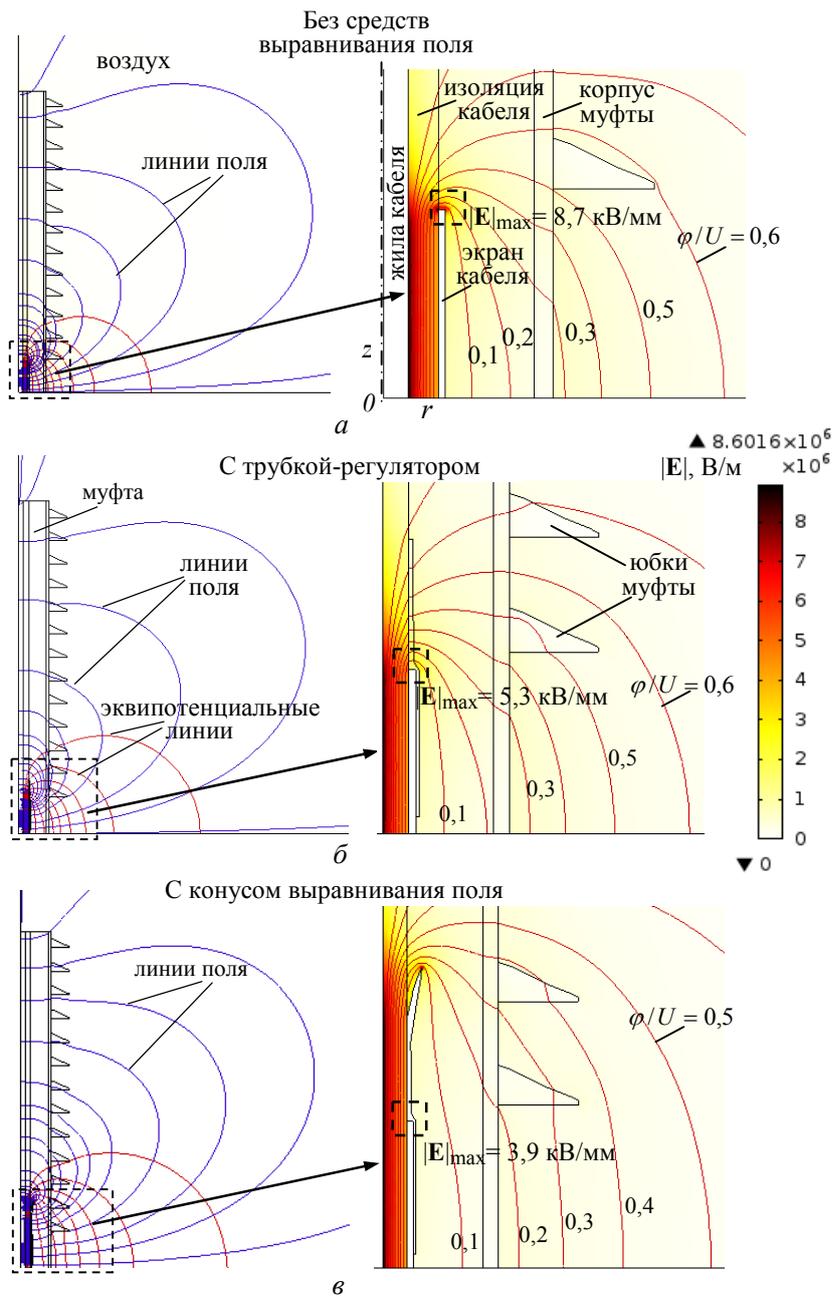


Рис. 2

Таблица 1

Элементы расчетной области	Значения параметров	
	ϵ_r	σ , См/м
Полиэтиленовая изоляция кабеля	2,3	10^{-15}
Выравнивающая трубка	4 (var)	10^{-7} (var)
Стресс конус	2,5	$2 \cdot 10^{-4}$
Заполнитель из силикона	3,0	10^{-15}
Корпус муфты	4,4	10^{-15}
Воздух	1	10^{-18}

ренных границах раздела сред выбирается условие непрерывности, а на внешних границах расчетной области, кроме оси симметрии – условие электрической изоляции.

После решения дифференциального уравнения (1) с приведенными граничными условиями напряженность электрического поля определяется как $\vec{E} = -\nabla\phi$.

Результаты компьютерных расчетов. Моделирование электрического поля в кабельной муфте направлено на определение степени неравномерности его распределения в случае применения различных способов выравнивания поля – геометрического, рефракционного и импедансного, а также вычисление максимального значения поля в зоне среза экрана.

Расчеты выполняются для силового кабеля с полиэтиленовой изоляцией на напряжение 110 кВ с сечением жилы 500 мм² (диаметром жилы 26 мм), толщиной изоляции 16 мм, сечением экрана из медных лент 35мм² (толщиной экрана 4 мм).

Используемые в расчетах значения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и удельной электропроводности σ материалов элементов кабеля и муфты представлены в табл. 1 [1, 3, 9].

Выбраны размеры расчетной области задачи, до трех раз превышающие длину муфты (ее размер по оси Oz).

Результаты численного моделирования показаны на рис. 2–5. Элементы конструкции муфты и силового кабеля, учитываемые в расчетах, указаны на рис. 2. Заметим, что трубка, как и конус выравнивания поля, насаживается на срез медного экрана и охватывает экран и изоляцию кабеля. Рассматриваемый рефлектор конуса имеет удлиненную

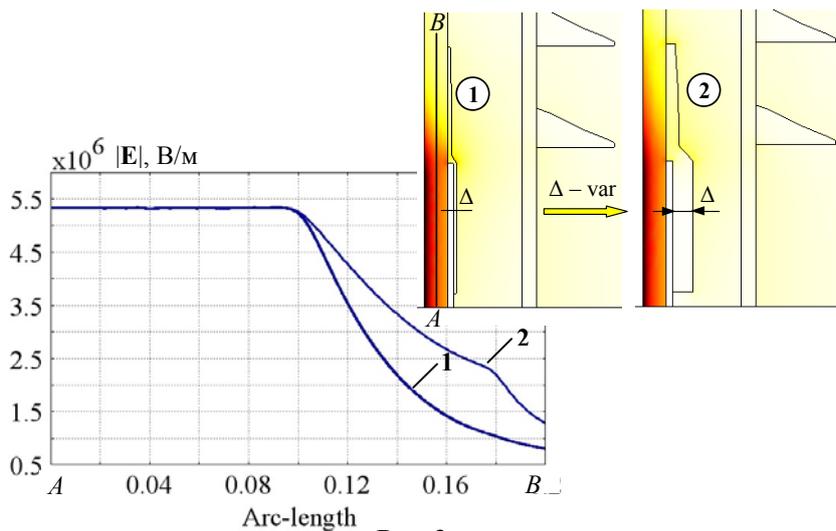


Рис. 3

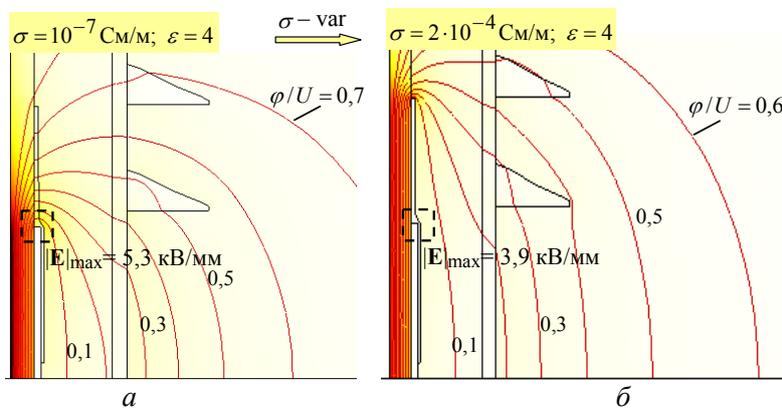


Рис. 4

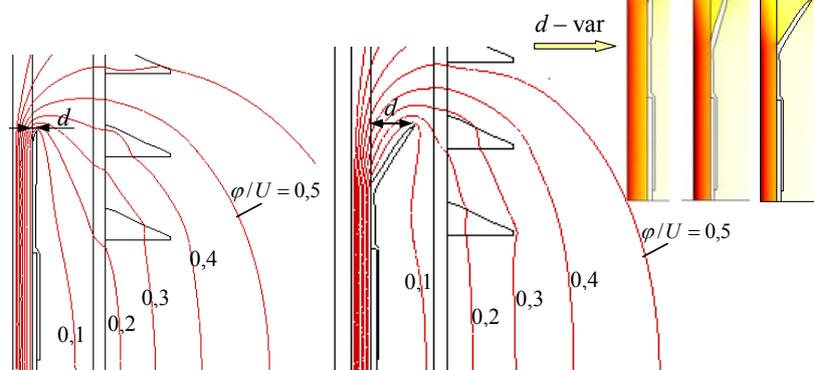


Рис. 5

форму, и в области экрана кабеля по виду напоминает трубку.

Электрофизические характеристики конуса отличаются от свойств выравнивающей трубки и приведены в табл. 1.

Данные рис. 2 показывают распределение линий электрического поля и эквипотенциальных линий в расчетной области (слева) и в ее части с увеличением (справа) для случаев: без использования средств выравнивания поля – рис. 2, а; с трубкой-регулятором (рефракционный способ выравнивания поля) – рис. 2, б; со стресс-конусом (геометрический способ) – рис. 2, в. Здесь, как и далее на рис. 4 и 5, указаны значения отношения φ/U , соответствующие приведенным изолиниям электрического потенциала. Заметим также, что на рис. 2, а–в слева показано одинаковое число линий поля и линий равного потенциала, соответствующих одним и тем же значениям $\varphi/U = 0,1 \dots 0,8$.

На рис. 2 показана тенденция уменьшения уровня поля $|\dot{E}|$ в ослабленной зоне изоляции вблизи среза экрана. Для случая нерегулируемого электрического поля (рис. 2, а) в этой зоне наблюдается повышенная плотность линий равного потенциала, и высокий уровень напряженности электрического поля $|\dot{E}|_{\max} = 8,7$ кВ/мм создает условия для возможного разрушения изоляции. Применение средств

выравнивания электрического поля (рис. 2, б–в) способствует перераспределению изолиний потенциала. Для этих случаев достигается все более равномерное распределение эквипотенциальных линий на все большей площади полиэтиленовой изоляции, на срезе экрана напряженность электрического поля снижается.

Картины поля для трех конструкций муфты, показанные справа на рис. 2, свидетельствуют также о все более равномерном распределении поля в изоляции кабеля при заданных параметрах, приведенных в табл. 1. В рассматриваемом случае для электропроводности трубки-регулятора $\sigma = 10^{-7}$ См/м = const расчетные данные в табл. 2 позволяют утверждать о малом влиянии диэлектрической проницаемости трубки ϵ_r на максимальное значение поля $|\dot{E}|_{\max}$ в зоне конца экрана. При изменении ϵ_r от 4 до 100 $|\dot{E}|_{\max}$ уменьшается всего на 10%.

На рис. 3 показано изменение поля вдоль указанной линии AB , проходящей через середину изоляции кабеля, для случаев применения трубки-регулятора различной толщины Δ ($1 - \Delta = 1$ мм; $2 - \Delta = 14$ мм) и прочих равных условиях. На вставке дано соответствующее распределение электрического поля в изоляции кабеля. Как видно, в случае более толстой трубки поле распространяется равномерно на несколько большей площади полиэтиленовой изоляции кабеля. Как показали компьютерные расчеты, при изменении Δ от 2 до 17 мм $|\dot{E}|_{\max}$ изменяется не более чем на 8%.

Таблица 2

ϵ_r	4	10	20	30	40	50	60	70	90	100
$ \dot{E} _{\max}$	5,3	5,28	5,25	5,19	5,12	5,04	4,9	4,83	4,82	4,77

Свойства материала регулирующей трубки влияют на рас-

пределение электрического поля и потенциала в объеме муфты. Высокое значение диэлектрической проницаемости и изменение электропроводности достигаются путем, например, введения в базовый полимерный материал дополнительных включений-наполнителей.

Данные рис. 4 показывают зависимость степени равномерности поля от электропроводности материала трубки-регулятора. С увеличением ее электропроводности до $\sigma = 2 \cdot 10^{-4}$ См/м напряженность электрического поля распределяется на большей площади полиэтиленовой изоляции кабеля (на длине, соответствующей длине трубки). При этом уменьшается максимальное значение напряженности поля $|\dot{E}|_{\max}$ в зоне среза экрана; в муфте перераспределяются линии равного потенциала.

Согласно рис. 5, форма стресс-конуса и расстояние d от его вершины до поверхности изоляции кабеля также влияют на распределение напряженности поля и электрического потенциала в объеме муфты. При изменении расстояния d от 4 мм до 35 мм максимальное значение поля в окрестности среза экрана не изменяется – $|\dot{E}|_{\max} = 3,9$ кВ/мм.

Заключение. Путем компьютерного моделирования показано, что равномерность распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции кабеля зависит от способа выравнивания поля, геометрических параметров и электрофизических свойств элементов кабельной муфты. Выявлено, что в рассматриваемом случае наиболее эффективным является применение стресс-конуса.

Разработаны программные средства и подходы к оптимизации конструкции элементов муфт, а также к численным расчетам с целью обеспечения допустимых значений напряженности электрического поля и высокой надежности работы кабельных муфт.

1. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д. Математическое моделирование электрического поля в муфтах силовых кабелей // Силовая электроника. – 2010. – № 2. – С. 4–6.
2. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Ковалев Г.Г., Коровкин Н.В. Численное моделирование электрического поля в усиливающей изоляции кабельной муфты // Кабели и провода. – 2013. – № 4(341). – С. 9–14.
3. Грешняков Г.В., Дубицкий С.Д., Коровкин Н.В. К вопросу о конструировании кабельных муфт высокого напряжения // Силовая электроника. – 2014. – № 1. – С. 76–79.
4. Кабельная арматура. Каталог 2007/2008. – Energy Devision. Tyco Electronics Raychem GmbH. – 127 с. – http://raychem.kz/te/catalogs/rus/osnovnoj_katalog_Kabel%27naja_armatura_SN.pdf
5. Руководство по выбору, прокладке, монтажу, испытаниям и эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение от 45 до 150 кВ. – ПАО "Завод "Южкабель", 2014. – 88 с. – <http://www.yuzhcable.com.ua/download/re150.pdf>
6. Руководящий технический материал по сооружению, испытаниям и эксплуатации кабельных линий с использованием кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 64/110 кВ: [научно-методич. издание] / Под ред. А.К. Шидловского, В.М. Золотарева. – Харьков: Майдан, 2007. – 62 с.
7. 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. – Pp. 489–492. <http://eprints.soton.ac.uk/264767/1/CEIDP2007-000221.pdf>
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. <http://www.comsol.com/>
9. 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. – 8 p. http://www.ijareeie.com/upload/2014/january/1A_Defect.pdf
10. Peschke E., von Olshausen R. Cable systems for high and extra-high voltage: development, manufacture, testing, installation and operation of cables and their accessories. – Berlin: Publicis MCD Verlag, 1999. – 296 p.
11. 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. – Pp. 1–8. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.399.3121&rep=rep1&type=pdf>

КОМП'ЮТЕРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОСОБІВ ВИРІВНЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В МУФТАХ КАБЕЛІВ З ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Кучерява І.М., докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна, E-mail: rb.irinan@gmail.com

Проведено комп'ютерні розрахунки електричного поля в моделі кінцевої муфти високовольтного кабелю зі зшито-поліетиленовою ізоляцією. Розглянуто різні способи вирівнювання поля в муфтах. Показано, що ступінь рівномірності електричного поля в об'ємі муфти залежить від геометричних параметрів трубки-регулятора, її електрофізичних властивостей (електропровідності та діелектричної проникності), геометричної форми стрес-конуса і, відповідно, від відстані його вершини до поверхні ізоляції кабелю. Розроблені підходи до моделювання можуть бути використані для вирішення практичної задачі вибору матеріалів для елементів кабельних муфт і оптимізації їхньої конструкції. Бібл. 11, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: кабельні муфти, високовольтний кабель, поліетиленова ізоляція, трубка вирівнювання поля, стрес-конус, комп'ютерне моделювання.

COMPUTER STUDY OF THE WAYS FOR ELECTRIC FIELD GRADING IN SEALING ENDS OF POLYETHYLENE-INSULATED CABLES

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

The electric field in sealing ends of high-voltage power cables with cross-linked polyethylene insulation is computed by simplified model. The different ways for field grading in the cable sealing end are considered. As shown, the degree of electric field uniformity in the cable box depends on geometric parameters of field-grading tube, its electrophysical properties (conductivity and dielectric permittivity), on stress cone shape as well as on the distance of cone top to cable insulation surface. The developed approaches to computer modeling can be used to select the materials for cable box elements and to optimize their construction.

References 11, figures 5, tables 2.

Key words: cable sealing end, high-voltage cable, polyethylene insulation, field-grading tube, stress control cone, computer modeling.

1. Greshniakov G.V., Dubitskii S.D. Mathematical modeling of electric field in cable boxes // Silovaya Elektronika. – 2010. – No 2. – Pp. 4–6. (Rus)
2. Greshniakov G.V., Dubitskii S.D., Kovalev G.G., Korovkin N.V. Numerical simulation of electric field in strengthening insulation of cable box // Kabeli i Provoda. – 2013. – No 4(341). – Pp. 9–14. (Rus)
3. Greshniakov G.V., Dubitskii S.D., Korovkin N.V. On design of high-voltage cable boxes // Silovaya Elektronika. – 2014. – No 1. – Pp. 76–79. (Rus)
4. Cable accessories. Catalogue 2007/2008. – Energy Division. Tyco Electronics Raychem GmbH. – 127 p. Available at: http://raychem.kz/te/catalogs/rus/osnovnoj_katalog_Kabel%27naja_armatura_SN.pdf (accessed 05.12.15) (Rus)
5. Work manual on choice, laying, mounting, testing and operation of power cable with cross-linked polyethylene insulation for voltage from 45 to 150 kV. – PAO "Zavod Yuzhkabel". – 2014. – 88 p. Available at: <http://www.yuzhcable.com.ua/download/re150.pdf> (accessed 02.12.15) (Rus)
6. Technical guide on installation, testing and operation of cable lines using 64/110 kV cross-linked polyethylene insulated power cables. – Kharkov: Maidan, 2007. – 62 p. (Rus)
7. 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. – Pp. 489–492. Available at: <http://eprints.soton.ac.uk/264767/1/CEIDP2007-000221.pdf> (accessed 04.12.15)
8. Comsol multiphysics modeling and simulation software. Available at: <http://www.comsol.com/> (accessed 03.12.15)
9. 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. – 8 p. Available at: http://www.ijareeie.com/upload/2014/january/1A_Defect.pdf (accessed 04.12.15)
10. Peschke E., von Olshausen R. Cable systems for high and extra-high voltage: development, manufacture, testing, installation and operation of cables and their accessories. – Berlin: Publicis MCD Verlag, 1999. – 296 p.
11. Raicevic N., Aleksic S. Electric field regulation at the cable accessories using one new numerical approach // Acta Electrotechnica et Informatica. – 2007. – No 1. – Vol. 7. – Pp. 1–8. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.399.3121&rep=rep1&type=pdf> (accessed 04.12.15)

Надійшла 20.11.2015

Остаточний варіант 08.12.2015