

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МНОГОМАСШТАБНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ НА 330 кВ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ

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

Методом компьютерного моделирования найдены распределения электрического поля в сечении кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена на 330 кВ в аварийном режиме. Моделирование проведено в программе Comsol методом конечных элементов. Использован подход многомасштабного моделирования и концепция элементарной ячейки структуры. Расчеты и исследования выполнены для различной частоты приложенного напряжения и возможных значений электропроводности полупроводящих экранов. Библ. 10, рис. 3.

Ключевые слова: сверхвысоковольтный силовой кабель, сшитополиэтиленовая изоляция, полупроводящий слой, электрическое поле, многомасштабный подход, компьютерное моделирование.

Введение. В настоящее время в Украине производятся, а в электрических сетях используются силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на высокое и сверхвысокое напряжение – до 330 кВ. Так, в последнее время завод "Южкابل" наладил серийное производство таких кабелей с большим поперечным сечением жилы – до 2000 мм² на напряжение 220 и 330 кВ [8]. Первая в Украине кабельная линия с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 330 кВ разработана и проложена в Днепропетровске для металлургического завода "Днепросталь" с целью внешнего электропитания электроплавильного комплекса [3].

Надежность и срок службы кабельных линий зависят от технических характеристик кабелей, качества, тепло- и электрофизических свойств используемых материалов [4]. В кабелях со сшитополиэтиленовой изоляцией, рассчитанных на высокое и сверхвысокое напряжения используется экструдируемая трехслойная изоляционная структура, которая включает полиэтиленовую изоляцию, полупроводящий слой по жиле и полупроводящий экран по изоляции. Экранирующие слои предназначены для выравнивания скачка напряженности электрического поля между токопроводящей жилой и изоляцией, а также между изоляцией и металлическим экраном. Кроме того, полупроводящие слои накладываются для придания цилиндрической формы поверхности скрученной многопроволочной жилы и для уменьшения влияния эффекта "проволочности" (неровности поверхности жилы), т.е. для снижения напряженности электрического поля у поверхности жилы. Полупроводящие экраны предназначены также для выполнения своей функции в аварийных режимах работы кабелей, т.е. в условиях кратковременных бросков токов и перенапряжений с тем, чтобы не допустить преждевременное старение изоляции.

Для изготовления экранов кабелей используются различные полупроводящие композиционные материалы, значения электрических характеристик которых могут существенно различаться. Это связано с тем, что основным материалом для экранов служит полиэтилен, наполненный углеродной сажей. От содержания такого наполнителя в полупроводящей композиции зависит электропроводность материала. Как отмечено в работе [1], при увеличении объемной доли сажи в 2 раза, во столько же раз возрастает проводимость материала. В [1] также обоснованы электрические характеристики полупроводящих экранов силовых кабелей со сшитополиэтиленовой изоляцией на напряжение 110 кВ, исследовано влияние диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления композиционных материалов полупроводящих слоев на напряженность электрического поля, тангенс угла диэлектрических потерь и пропускную способность кабеля.

В [9] экспериментально измерена электропроводность материала полупроводящих экранов в зависимости от содержания углеродной сажи и от тепловых характеристик. Найдено, что для используемого в кабеле на 154 кВ материала экрана СВ/HDPE с 20% наполнением сажей электропроводность экрана снижается от 3,16 до 10⁻⁷ (Ом·м)⁻¹ в диапазоне температуры от 40 до 150⁰С [6, 9].

В работе [6] проведено детальное исследование распределения электрического поля на границе "полупроводящий слой–полиэтиленовая изоляция" в зависимости от толщины полупроводящего слоя, его электропроводности, а также с учетом неровности поверхности токопроводящей жилы.

В [10] исследованы аварийные режимы работы кабельных линий и электромагнитные процессы в них.

В настоящей работе применительно к кабельной линии на 330 кВ подземной прокладки, описанной в [3], исследуется распределение электрического поля в сечении кабеля и характер его изменения у поверхности изоляции в аварийном режиме в зависимости от электропроводности полупроводящего слоя и частоты приложенного напряжения. Аварийный режим (возникающий, например, вследствие коммутационных явлений в нагрузке) моделируется путем задания высокочастотного и затухающего во времени напряжения на жиле кабеля согласно данным расчетных и экспериментальных исследований [10–12]. Составляющая, соответствующая источнику питания 50 Гц, при исследовании опускается. Появление высокочастотного напряжения на жиле кабеля может приводить к негативному влиянию на полимерную изоляцию, к ее ускоренному старению.

Целью работы является выяснение вопроса, насколько полно выполняет свою роль полупроводящий слой по жиле в аварийном режиме в зависимости от своих электрических характеристик – выравнивает ли он напряженность поля на поверхности изоляции кабеля в случае приложенного высокочастотного напряжения, способствует ли он сохранению изоляции и поддержанию длительного срока ее использования.

В работе применяется подход многомасштабного моделирования [5]. В рассматриваемом случае осуществляется переход от высокого уровня – подземной кабельной линии протяженностью порядка несколько километров – к рассмотрению сечения отдельного кабеля в линии с характерным размером $\sim 0,1$ м, далее выделяется элементарная ячейка в структуре сечения кабеля, для которой и решается электрическая задача на микроуровне. Схема применения многомасштабного моделирования показана на рис. 1. Отметим, что, к примеру, тепловая задача на макроуровне – для подземной кабельной линии с кабелями на напряжение 330 кВ, имеющими шито-полиэтиленовую изоляцию, решена в работе [2].

Постановка и решение задачи. Будем исследовать электрическое поле сверхвысоковольтного силового кабеля с изоляцией из шитого полиэтилена в аварийном режиме. В таком случае на токопроводящей жиле задавалась высокочастотная составляющая напряжения, которая варьировалась в широком диапазоне значений. Полагалось, что силовой кабель находится во внешнем переменном электрическом поле, изменяемом во времени с частотой f .

Сечение кабеля, показанное на рис. 1, можно разбить на ряд эквивалентных секторов с учетом неровности поверхности многопроволочной жилы. Один из таких секторов составляет элементарную ячейку структуры (рис. 1) [5]. Учитывая периодичность структуры поперечного сечения кабеля, достаточно определить распределение электрического поля в таком секторе. Тогда картина поля во всем сечении кабеля воспроизводится путем периодического повторения по угловой координате распределения поля в элементарной ячейке. В силу сказанного в качестве расчетной области выбрана элементарная ячейка, показанная внизу на рис. 1, а также на рис. 2.

Задача рассматривалась в двумерной постановке в декартовой системе координат.

Основным уравнением модели, определяющим электрическое поле в кабеле, являлось уравнение

$$\nabla \cdot [-\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi] = 0, \quad (1)$$

где $\varphi(\mathbf{r}, t)$ – электрический потенциал; σ – электропроводность среды; ε_r – диэлектрическая проницаемость

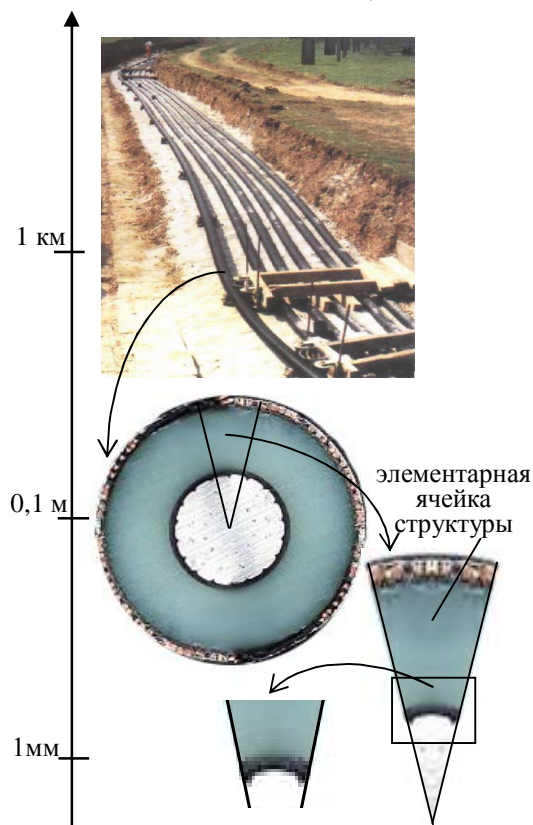


Рис. 1

материала (относительное значение), $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума. Отметим, что электрические параметры среды принимали различные значения в зависимости от рассматриваемого материала – материала либо полиэтиленовой изоляции, либо полупроводящих слоев.

Расчетная область задачи показана на рис. 2. Здесь же указаны граничные условия. На поверхности кабеля потенциал полагался равным нулю: $\varphi = 0$. На боковых границах задавалось условие Неймана $\partial\varphi/\partial n = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали). На поверхности жилы устанавливалась зависимость от времени вида:

$$\varphi = U(t) = U_{\max} \sin(\omega t) \exp(-t/\tau), \quad (2)$$

где U_{\max} – напряжение, которое для кабеля 330 кВ равно $U_{\max} = k \cdot 330000\sqrt{2}/\sqrt{3}$, k – коэффициент, с помощью которого возможен учет изменения напряжения в аварийном режиме (использованная зависимость $U(t)$ показана на рис. 2 справа внизу), $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, τ – время, определяющее затухание напряжения, зависящее от параметров кабельной линии.

Напряженность электрического поля определялась по результатам решения задачи (1) с приведенными граничными условиями как $\mathbf{E} = -\nabla\varphi$.

Поставленная задача решалась в пакете программ Comsol [7] методом конечных элементов. Сеточное разбиение расчетной области на треугольные элементы показано на рис. 2. Особый интерес для исследования распределения электрического поля представляет собой подобласть, показанная на рис. 2 справа сверху. Здесь же показана ее конечно-элементная сетка.

Результаты компьютерных расчетов. Исследовался силовой кабель на напряжение 330 кВ, у которого согласно [3] наружный диаметр кабеля составляет 105 мм, диаметр жилы – 34,8 мм, площадь сечения жилы – 800 мм², площадь сечения экрана – 150 мм², толщина изоляции – 23,5 мм, толщина наружной оболочки – 6 мм, внутренний радиус внешнего экрана – 42,8 мм, толщина полупроводящего экрана – 1,9 мм.

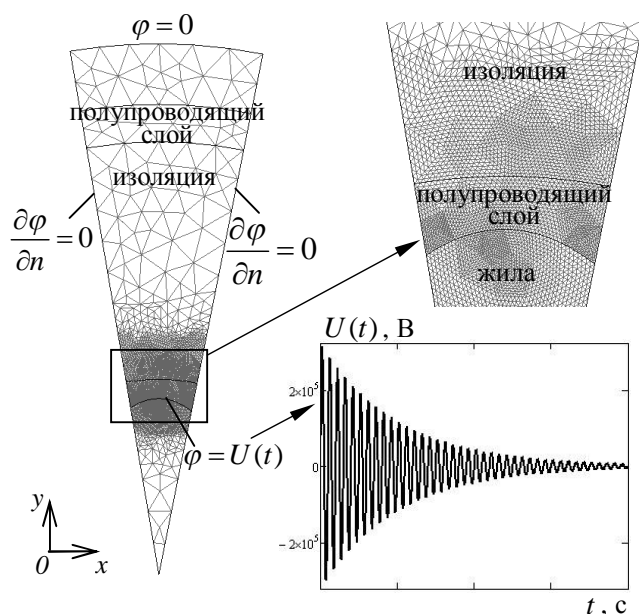


Рис. 2

го потенциала (в виде изолиний) и распределение электрического поля $|\mathbf{E}|_{\max}$ (в оттенках серого цвета) в области полупроводящего слоя и в изоляции вблизи этого слоя в зависимости от частоты изменения напряжения f и электропроводности слоя: на рис. 3, *a* – для $\sigma_2 = 10^{-5}$ (Ом·м)⁻¹; на рис. 3, *б* – для $\sigma_2 = 10^{-7}$ (Ом·м)⁻¹; на рис. 3, *в* – для $\sigma_2 = 10^{-9}$ (Ом·м)⁻¹. Как видно, при значениях $\sigma_2 < 10^{-5}$ (Ом·м)⁻¹ полупроводящий слой не выполняет в полном объеме свои функции, т.е. не сглаживает напряженность электрического поля у поверхности изоляции из сшитого полиэтилена. Это значит, что вследствие локального повышения напряженности электрического поля в изоляции возможны процессы возникновения и развития трингов, и, как результат, ускоренное ее старение.

В численных расчетах принимались значения электрических параметров: для полиэтиленовой изоляции $\sigma_1 = 10^{-10}$ (Ом·м)⁻¹, $\varepsilon_1 = 2,3$, для полупроводящего слоя $\sigma_2 = \text{var}$, $\varepsilon_2 = 2,3$. Частота изменения напряжения полагалась равной $f = 50, 10^3, 10^5, 10^6$ Гц.

Поскольку процесс рассматривается во времени, когда напряжение на жиле изменяется по закону (2), а максимальное значение поля достигается в момент времени $0,25T$ (T – период изменения напряжения), все картины распределения электрического поля соответствуют этому значению времени.

На рис. 3 показаны полученные расчетным путем изменения электрического

Картины электрического поля на рис. 3 показывают также, что для частоты напряжения $f = 50$ Гц полупроводящий слой имеет удовлетворительные экранирующие свойства при электропроводности $\sigma_2 \geq 10^{-7}$ (Ом·м) $^{-1}$, а для $f = 10^3$ Гц – при $\sigma_2 \geq 10^{-5}$ (Ом·м) $^{-1}$. При $\sigma_2 \leq 10^{-9}$ (Ом·м) $^{-1}$ слой теряет свои экранирующие свойства. Для частоты $f = 10^5$ Гц полупроводящий слой сглаживает электрическое поле при $\sigma_2 > 10^{-4}$ (Ом·м) $^{-1}$.

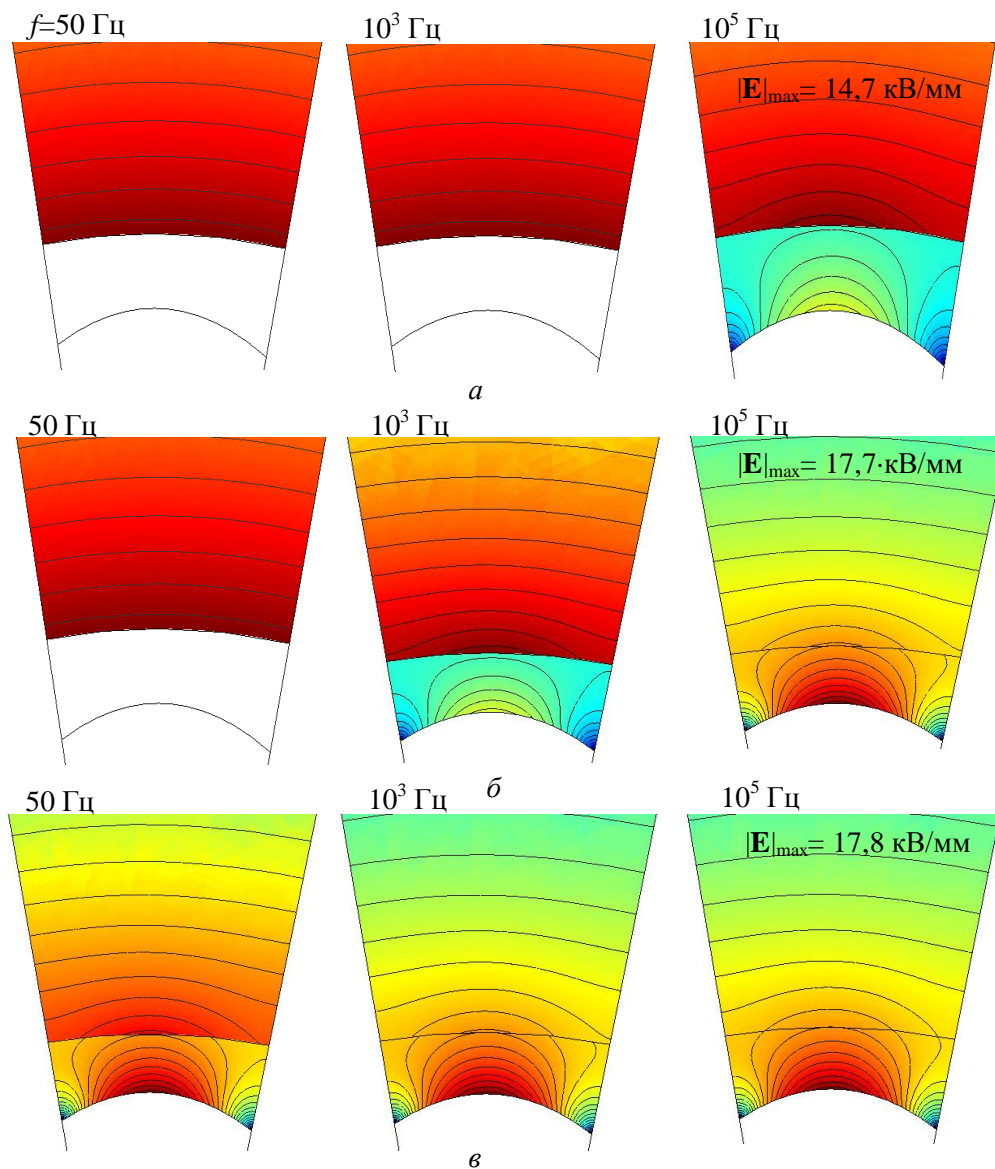


Рис. 3

На рис. 4 для сравнения показаны распределения электрического поля в рассматриваемой области для частоты $f = 10^6$ Гц при электропроводности полупроводящего слоя $\sigma_2 = 10^{-4}$ (Ом·м) $^{-1}$ (рис. 4, а) и $\sigma_2 = 10^{-3}$ (Ом·м) $^{-1}$ (рис. 4, б). Данные рис. 3, 4 свидетельствуют, что лишь, начиная со значения 10^{-3} (Ом·м) $^{-1}$ и выше, полупроводящий слой сглаживает поле в изоляции кабеля в диапазоне частоты f от 50 до 10^6 Гц.

Представленные выше результаты расчетов получены с точки зрения распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции кабеля на 330 кВ в аварийном режиме при рассмотрении материалов полупроводящего слоя по жиле, имеющих различную электропроводность.

Заметим, что в аварийных режимах при возникновении короткого замыкания температура кабеля может повышаться до критической температуры 130⁰С, а с ростом температуры электропроводность по-

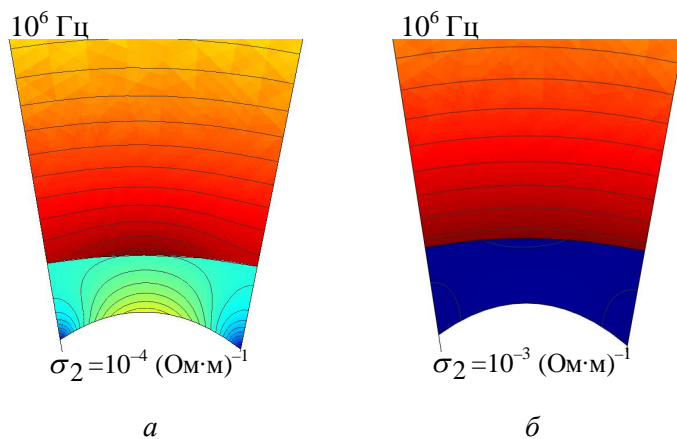


Рис. 4

Для исследования применен метод многомасштабного моделирования с выделением элементарной ячейки структуры.

По результатам расчетов показано, что с ростом частоты приложенного напряжения (от 50 Гц до 10^5 Гц) полупроводящий слой на жиле при неизменном значении его электропроводности теряет свойства сглаживания электрического поля в основной изоляции кабеля. Аналогичный эффект возникает при уменьшении электропроводности полупроводящего слоя (и при неизменной частоте). Наличие неоднородного поля в изоляции способствует ее ускоренному старению.

Из проведенных исследований следует, что для получения высокого ресурса работы основной изоляции кабеля в аварийном режиме работы, когда на его жиле появляется высокочастотная составляющая напряжения, рекомендуемая величина электропроводности полупроводящего слоя по жиле должна составлять не менее 10^{-3} (Ом·м)⁻¹.

лупроводящего слоя резко уменьшается [6,9]. Учет зависимости электропроводности от температуры необходим для каждого конкретного случая, чтобы гарантировать экранирующий эффект полупроводящего слоя и длительный срок службы изоляции.

Заключение. В работе с использованием численного метода конечных элементов исследовано распределение электрического поля в сечении 330 кВ кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в аварийном режиме для различных значений частоты приложенного напряжения и при различной электропроводности полупроводящего слоя на жиле – в диапазоне 10^{-9} – 10^{-4} (Ом·м)⁻¹.

1. Безprozванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией // *Электротехника і Електромеханіка*. – 2003. – № 3. – С. 44–47.

2. Кучерявая И.Н. Компьютерное моделирование теплового состояния подземной кабельной линии на напряжение 330 кВ // *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. Зб. наук. праць. – 2011. – Вип. 30. – С. 29–34.

3. Лях В.В., Молчанов В.М., Судаков И.В., Павличенко В.П. Кабельная линия напряжением 330 кВ – новый этап развития электрических сетей Украины // *Электрические сети и системы*. – 2009. – № 3. – С. 16–21.

4. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Слизов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // *Кабели и провода*. – 2005. – № 1. – С. 9–14.

5. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. – Изд-во Института электродинамики НАН Украины. – Киев, 2011. – 256 с.

6. Шидловский А.К., Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Антонец Ю.А., Василец Л.Г. Неоднородность распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с учетом поверхностных и объемных дефектов // *Техн. електродинаміка. Тем. випуск "Силова електроніка та енергоефективність"*. – 2006. – Част. 1. – С. 96–105.

7. *Comsol Multiphysics 3.3* – <http://www.comsol.com>

8. http://www.yuzhcable.com.ua/download/xlpe220_330.pdf

9. Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H. Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable // *Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005. – ISEIM'2005, 5–9 June 2005. – Vol. 3. – Pp. 616–619.*

10. Boyara M. Transient overvoltages in cable systems. – Part 2. Experiments on fast transients in cable systems // *Master of Science Thesis. – Chalmers University of Technology. Department of electric power engineering. – Goteborg, Sweden, 2007. – 137 p.*

11. Gustavsen B., Mahseredjian J. Simulation of internal overvoltages on transmission lines by an extended method of characteristics approach // *IEEE Trans on Power Delivery*. – June, 2007. – Vol. 22. – Pp. 1736–1742.

12. Paap G.C. Overvoltages in power transformers caused by no-load switching // *IEEE Trans. on Power Delivery*. – January, 1995. – Vol. 10. – № 1. – Pp. 301–307.

Застосування методу багатомасштабного моделювання для дослідження електричного поля в ізоляції силового кабеля на 330 кВ в аварійному режимі

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

Методом комп'ютерного моделювання знайдено розподіли електричного поля в перерізі кабеля з ізоляцією із зшитого поліетилену на 330 кВ в аварійному режимі. Моделювання проведено в програмі Comsol методом кінцевих елементів. Використано підхід багатомасштабного моделювання і концепція елементарного об'єму структури. Розрахунки і дослідження виконано для різної частоти прикладеної напруги і можливих значень електропровідності напівпровідних екранів. Бібл. 10, рис. 3.

Ключові слова: надвисоковольтний силовий кабель, ізоляція зі зшитого поліетилену, напівпровідний шар, електричне поле, багатомасштабний підхід, комп'ютерне моделювання.

Application of multiscale modeling for study of electric field in insulation of 330 kV power cable at emergency operation

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

The distributions of electric field in the cross-section of 330 kV cable with cross-linked polyethylene insulation in emergency operation are obtained by computer modeling. The modeling is carried out using Comsol and finite-element method. The approach of multi-scale modeling and concept of elementary unit of structure are used. The computations and investigation are realized for different frequency of applied voltage and possible values of conductivity of semiconductive layers. References 10, figures 3.

Key words: extra-high voltage power cable, cross-linked polyethylene insulation, semiconductive shield, electric field, multiscale approach, computer modeling.

1. *Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S.* Basing of electrophysical characteristics of semiconductive screen of high-voltage power cables with cross-linked insulation // *Elektrotehnika i Elektromekhanika.* – 2003. – № 3. – Pp. 44–47. (Rus)
2. *Kucheriavaia I.N.* Computer modeling of thermal state of underground 330 kV cable line // *Pratsi Instytutu Elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2011. – Vol. 30. – Pp. 29–34. (Rus)
3. *Liakh V.V., Molchanov V.M., Sudakov I.V., Pavlichenko V.P.* 330 kV cable line – new stage for development of electric lines in Ukraine // *Elektricheskie seti i sistemy.* – 2009. – № 3. – Pp. 16–21. (Rus)
4. *Obraztsov Yu.V., Frik A.A., Slivov A.A.* Middle-voltage power cables with cross-linked polyethylene insulation. Factors of quality // *Kabeli i provoda.* – 2005. – № 1. – Pp. 9–14. (Rus)
5. *Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N.* Multiscale modeling in electrical engineering. – *Izdatelstvo Institutu Elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – Kyiv, 2011. – 256 p. (Rus)
6. *Shidlovskii A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N., Zolotarev V.M., Karpushenko V.P., Antonets Yu.A., Vasilets L.G.* Inhomogeneous distribution of electric field in polyethylene insulation of power cables taking into account surface and space defects // *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk “Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist”.* – 2006. – Vol.1. – Pp. 96–105. (Rus)
7. *Comsol Multiphysics 3.3* – <http://www.comsol.com>
8. http://www.yuzhcable.com.ua/download/xlpe220_330.pdf
9. *Lee K.-Y., Nam J.-C., Park D.-H., Park D.-H.* Electrical and thermal properties of semiconductive shield for 154 kV power cable // *Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials, 2005.* – ISEIM'2005, 5–9 June 2005. – Vol. 3. – Pp. 616–619.
10. *Boyara M.* Transient overvoltages in cable systems. – Part 2. Experiments on fast transients in cable systems // *Master of Science Thesis.* – Chalmers University of Technology. Department of electric power engineering. – Goteborg, Sweden, 2007. – 137 p.
11. *Gustavsen B., Mahseredjian J.* Simulation of internal overvoltages on transmission lines by an extended method of characteristics approach // *IEEE Trans on Power Delivery.* – June, 2007. – Vol. 22. – Pp.1736–1742.
12. *Paap G.C.* Overvoltages in power transformers caused by no-load switching // *IEEE Trans. on Power Delivery.* – January, 1995. – Vol. 10. – No. 1. – Pp. 301–307.

Надійшла 16.12.2011

Received 16.12.2011