

Yu. Vasetskyi¹, I. Kondratenko², O. Pashchyn³, K. Dziuba⁴

1, 2, 4 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

3 – Institute of Electric Welding Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Malevich st, 11, Kyiv-150, 03150, Ukraine

Treatment of welded joints by a pulse electromagnetic field with strong skin-effect

The possibility of using of contactless induction method for the introduction of pulse current into aluminum sheet for processing welding seam is considered. Due to the effect of a magnetic pressure, mechanical stresses occur in the material and induced high-density currents flow. The necessary values of the inductor current, the distribution of magnetic pressure, and the induced current density of the sheet are estimated using the design model of a rectilinear current conductor of circular cross-section. It is found that with a strong skin-effect, the magnetic pressure reaches the yield point only under the condition of an ultrahigh current density of the current contour. The expediency of using of pulse electromagnetic field for seam treatment with high-density currents or combined method with the simultaneous use of high-density currents and electrodynamics methods of action on the seam is substantiated. References 9, figures 8.

Key words: electromagnetic field, pulse electric current, strong skin-effect, weld seam, metal tape.

Надійшла 27.11.2017

Received 27.11.2017

УДК 621.315.2 : 004.94

ВЛИЯНИЕ КОРРОЗИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО КАБЕЛЯ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина
e-mail: rb.irinan@gmail.com

На основе компьютерного моделирования исследовано электрическое поле в трехслойной изоляционной структуре высоковольтного кабеля с шито-полиэтиленовой изоляцией в случае коррозии металлических элементов – экрана и жилы. Рассмотрены варианты исполнения экрана в виде концентрических проволок и спиральной медной ленты. Электрические задачи решены в стандартной программе методом конечных элементов для осесимметричного представления кабеля и в поперечном его сечении. Показано влияние коррозии элементов кабеля на значение и характер изменения напряженности электрического поля в прилегающих полупроводящих слоях и основной изоляции. Библи. 15, рис. 5.

Ключевые слова: высоковольтный кабель, шито-полиэтиленовая изоляция, полупроводящие слои, коррозия жилы и экрана, компьютерное моделирование.

Введение. Ключевой проблемой эксплуатации современных кабельных систем является обеспечение их надежности и длительного срока службы. К факторам, способным снизить надежность силовых кабелей, относится ряд как внешних, так и внутренних факторов, в числе которых влияние окружающей среды, что приводит, в первую очередь, к загрязнению поверхности кабелей химическими продуктами, их проникновению совместно с влагой извне внутрь кабелей [8]. Неблагоприятные условия окружающей среды (например, атмосферные воздействия или для кабелей подземной прокладки агрессивность почвы) являются причиной эксплуатационных дефектов кабелей и прежде всего коррозии их металлических элементов – токопроводящей жилы и экрана для кабелей с изоляцией из шитого полиэтилена (СПЭ), а также связанных с этим повреждений прилегающих структурных элементов [1–4, 6, 11, 12].

Деградация кабелей может происходить по причине коррозии двух видов [1, 6]: естественной (из-за повышенного влагосодержания, микробиологической агрессивности почвы и др.) и промышленной коррозии (вследствие химического загрязнения окружающей среды при наличии растворимых солей – сульфатов, нитратов, хлоридов, которые увеличивают

электропроводность почвы, загрязнения промышленными стоками, нефтехимическими продуктами, из-за вытекания трансформаторного масла в местах расположения кабелей, контакта с удобрениями, а также высокого уровня блуждающих токов, генерирующихся вблизи промышленных предприятий и линий электрифицированного рельсового транспорта).

Классификация коррозии, например, медного экрана кабелей с СПЭ изоляцией приведена в [9]. Она включает незначительную (со светло-зелеными пятнами и легким разъеданием материала) и средней степени коррозию (с зелеными пятнами и поверхностными повреждениями), сильную коррозию (вплоть до глубокого разъедания металла и явным истончением проводников [3]) и очень большую коррозию с разрушением и отсутствием части проводников экрана [9, 10]. Кроме того, на микроуровне часто возникает патина на поверхности медного экрана кабелей, проложенных в грунте [4] (рис. 1 внизу слева).

Коррозия токопроводящей жилы кабелей с СПЭ изоляцией изучается экспериментальными методами в работе [11]. Показана связь коррозии алюминиевого материала жилы (отмечена 1 на рис. 1) с деградацией внутреннего полупроводящего слоя кабелей (2 на рис. 1), возникновением в нем макроскопических трещин и пустот, каналов, перекрывающих весь слой по толщине, в целом пористостью его микроструктуры, загрязнением продуктами коррозии слоя вплоть до границы с полиэтиленовой изоляцией (3 на рис. 1). Кроме того в [11] экспериментально выявлены случаи потери адгезии полупроводящего слоя с проводниками жилы, а также повреждения изоляции, обусловленные просачиванием продуктов коррозии, загрязнений и влаги как от жилы, так и извне внутрь кабеля. Изучение электрического поля в СПЭ изоляции в случае ряда перечисленных дефектов полупроводящего слоя проводится методом компьютерного моделирования в [2], а при изменении структуры изоляции вследствие воздействия на нее коррозионных продуктов жилы – в статье [13].

В работе [4] отмечается, что значительная коррозия медного экрана способна воздействовать на изоляцию кабеля через локальный нагрев и эрозию прилегающего внешнего полупроводящего слоя (отмечен 4 на рис. 1). Согласно объяснению и картинкам, приведенным в [4], эрозия достигает основной полиэтиленовой изоляции кабеля, в ее локальных областях происходят концентрация электрического поля, дополнительный локальный нагрев, возникают водные и электрические триинги, опасность пробоя изоляции и аварийности кабеля в дальнейшем.

Коррозия медного экрана и алюминиевой многопроволочной жилы кабеля показана на рис. 1 внизу [4, 9–11, 15].

На процесс коррозии влияют длительность эксплуатации кабелей, степень и частота воздействий коррозионно-агрессивной окружающей среды. Доля повреждений кабельных ли-



Рис. 1

ний от коррозии металлических элементов значительна – она составляет 4–11 % от общего числа повреждений [1, 15]. В связи с этим проблема коррозии, защита от нее и изучение различных повреждений составляющих элементов кабелей актуальны и особенно для энергосетей на основе современных кабелей с СПЭ изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжения.

Целью данной работы является исследование воздействия коррозионных явлений в высоковольтном кабеле с СПЭ изоляцией на распределение электрического поля в ее трехслойной структуре (основной полиэтиленовой изоляции и окружающих ее полупроводящих слоях). Рассматриваются характерные повреждения медного экрана, выполненного в виде концентрических проволок, и геликоидального (спирального) экрана, а также коррозия жилы, проявляющаяся как достаточно глубокое разъедание алюминиевого материала жилы на контакте с внутренним полупроводящим слоем. Исследование проводится с помощью численного моделирования в программе Comsol [7] для моделей поперечного сечения кабеля и осесимметричного его представления. В последнем случае – с целью изучения электрического поля при коррозии, распространившейся вдоль определенной длины кабеля.

Математическая модель и подходы к выбору расчетных областей. Для исследования предполагается воздействие гармонического поля (изменяющегося с частотой 50 Гц), описывающегося с помощью скалярного потенциала ϕ . Электрический потенциал удовлетворяет уравнению

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon_0\hat{\varepsilon}_r)\nabla\phi = 0,$$

где ε_0 и $\hat{\varepsilon}_r$ – соответственно абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума и относительная диэлектрическая проницаемость среды (комплексная величина в общем случае); σ – электропроводность соответствующей среды; $\omega = 314 \text{ Гц}^{-1}$ – угловая частота; точкой сверху обозначаются комплексные величины.

Уравнение дополняется приведенными далее граничными условиями, которые задаются для двумерных расчетных моделей двух видов: модели поперечного сечения кабеля в декартовой системе координат (рис. 2, 3) и осесимметричной модели кабеля в цилиндрической системе координат для представления кабеля в продольном направлении (рис. 4, 5). Для модели поперечного сечения кабеля с экраном в виде концентрических проволок расчетная область включает окружающую среду – воздух (рис. 2 а), размеры которой более чем в 3 раза превышают диаметр кабеля.

В качестве граничных условий для двух моделей задаются: условия нулевого электрического потенциала $\phi = 0$ – на поверхности металлического экрана; потенциал $\phi = U_m$ (U_m – амплитудное значение фазного напряжения) – на поверхности жилы; условие электрической изоляции $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ – на внешних границах расчетных областей; условие непрерывности $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_1 - \mathbf{J}_2) = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали, \mathbf{J} – плотность полного тока) – на внутренних границах остальных элементов областей расчета.

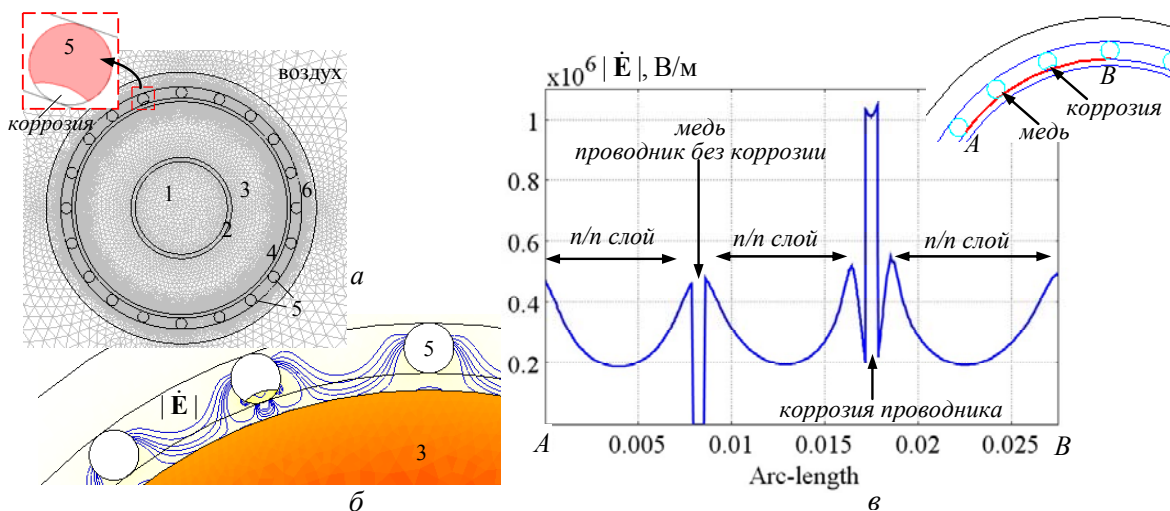


Рис. 2

Напряженность электрического поля определяется по результатам решения описанной задачи как $\vec{E} = -\nabla\phi$.

Расчетная область, содержащая поперечное сечение кабеля, выбирается для случая металлического экрана в виде концентрических проволок (рис. 1 вверху слева) в предположении, что коррозия экрана распространяется на значительную длину в продольном направлении кабеля. Отметим, что исполнение экрана кабеля с СПЭ изоляцией может быть различно [4, 5, 12, 14], например, в виде гофрированной трубки (рис. 1 вверху справа, [5]) или геликоидальной ленты (рис. 4, [12]). Для таких случаев в предположении незначительной по длине кабеля коррозии металлических элементов используется осесимметричная модель в цилиндрической системе координат.

Результаты численных расчетов. Моделирование проводится для одножильного кабеля с СПЭ изоляцией на напряжение 110 кВ. Размеры его элементов следующие. Жила (отмечена 1 на рис. 1, 2) имеет диаметр 25,2 мм; толщина изоляции (3) – 16 мм; сечение медного экрана (5) – 35 мм² (его толщина – 4 мм); толщина полупроводящих слоев (2, 4) составляет 1 мм.

Значения электрофизических параметров элементов кабеля задавались согласно [14]. Электропроводность основной изоляции $\sigma_3 = 10^{-15} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, полупроводящих слоев $\sigma_{2,4} = 10^{-7} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$, диэлектрическая проницаемость материалов $\epsilon_3 = \epsilon_{2,4} = \epsilon_6 = 2,3$. Оболочка кабеля (6 на рис. 1 и 2) имеет электропроводность $\sigma_6 = 10^{-10} \text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$.

Поскольку коррозия через образование трещин и разъедание металла приводит к потере контакта металлических элементов с прилегающими полупроводящими слоями [3, 9, 11, 12], коррозионные зоны моделируются в виде небольших подобластей, заполненных воздухом и расположенных вблизи полупроводящих слоев.

Физическая модель для расчетов кабеля с экраном в виде концентрических медных проволок с коррозией в одной из них показана на рис. 2 а. Распределение электрического поля $|\vec{E}|$ (в цвете и изолиниями) в части полупроводящего слоя и изоляции показано на рис. 2 б, а изменение напряженности поля $|\vec{E}|$ вдоль отмеченной на вставке линии АВ, проходящей через медные проводники с коррозией и без нее, – на рис. 2 в. Показана концентрация изолиний вблизи коррозионной зоны проводника вплоть до линии уровня поля 3,9 кВ/мм, тогда как при отсутствии повреждений экрана поле во внешнем полупроводящем слое не превышает 0,51 кВ/мм.

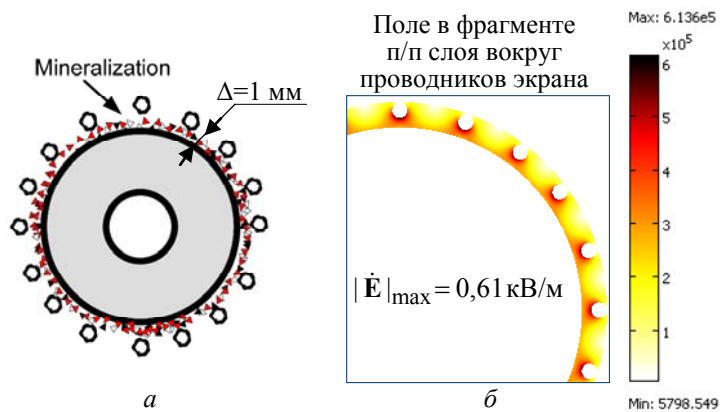


Рис. 3

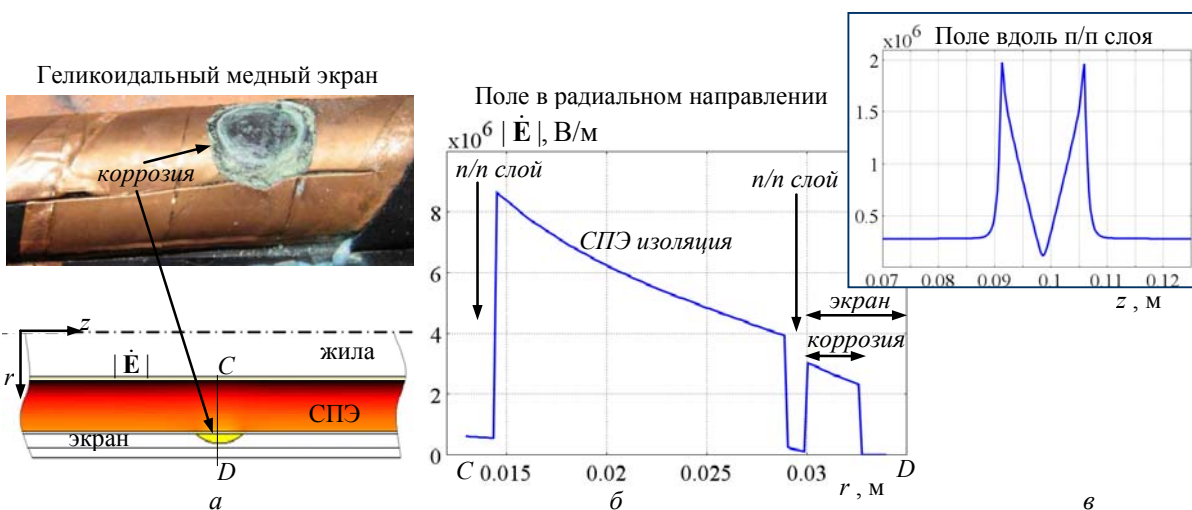


Рис. 4

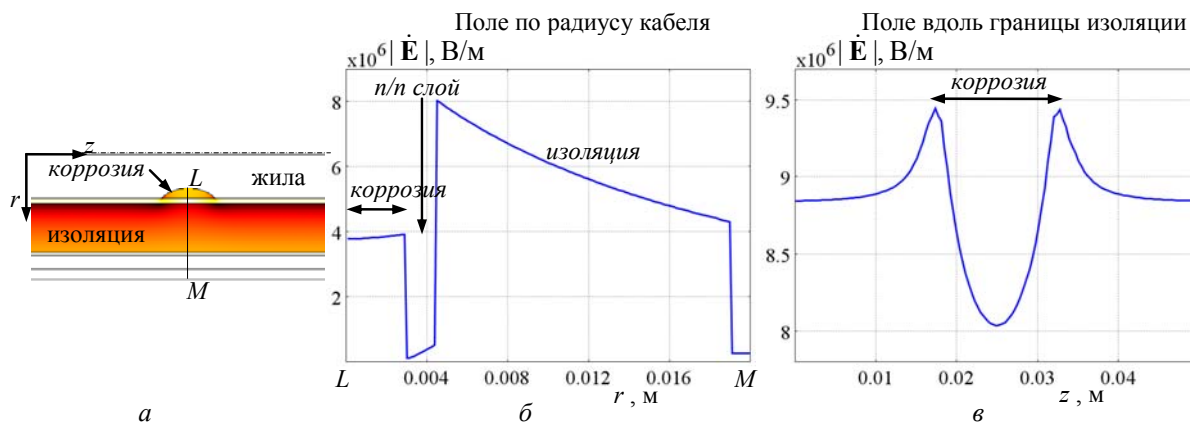


Рис. 5

В работе [9] представлена модель коррозии и так называемой минерализации металлического экрана кабеля (рис. 3 а). Под минерализацией в такой модели подразумевается разрушение материала с образованием мелких частей, которые группируются вблизи полупроводящего слоя и ослабляют контакт с ним. Расчеты выполнены при размере зоны отсутствия контакта – $\Delta = 1$ мм. Для такого случая на рис. 3 б показано (цветом) распределение поля в фрагменте слоя вокруг группы проводников экрана.

Данные рис. 4 относятся к моделированию коррозии геликоидального экрана кабеля [12]. Осесимметричная модель и распределение поля $|\dot{E}|$ в кабеле с коррозией экрана показаны на рис. 4 а, внизу. График изменения поля $|\dot{E}|$ в радиальном направлении (вдоль линии CD) приведен на рис. 4 б, а поле в продольном направлении кабеля вдоль границы внешнего полупроводящего слоя с экраном – на рис. 4 в. Видно значительное (более чем в 6 раз) увеличение поля на границе полупроводящего слоя. При этом на внешней границе основной изоляции напряженность поля в зоне коррозии экрана увеличивается лишь в 1,14 раза.

На рис. 5 показано распределение напряженности поля $|\dot{E}|$ в сечении кабеля с коррозией жилы (рис. 5 а), изменение $|\dot{E}|$ в радиальном направлении r кабеля – по линии LM (рис. 5 б) и в продольном направлении z – вдоль границы "изоляция – полупроводящий слой по жиле" (рис. 5 в). Повышение напряженности электрического поля на границе основной изоляции вблизи жилы, где значения поля наибольшие, может приводить к снижению прочности изоляции и деградиационным процессам [8].

Заключение. Проведено численное исследование распределения электрического поля в СПЭ изоляции высоковольтного кабеля в случае коррозии металлического экрана в виде концентрических проволок и спиральной медной ленты, а также проводников жилы кабеля.

Расчетным путем показано изменение конфигурации электрического поля и увеличение его напряженности (в рассматриваемом случае до шести раз) в прилегающих полупроводящих слоях и незначительное изменение поля в основной изоляции (до $\sim 1,1$ раза). Полученные результаты дополняют экспериментальные данные и теоретические представления (например, в [3, 4, 11]) относительно того, что с течением времени разрядные процессы на границе металлического экрана, эрозия полупроводящего слоя, локальные изменения поля в изоляции приводят к ее ускоренному старению и возможному пробое. В целом обосновывается важность защиты кабелей с СПЭ изоляцией от коррозии с учетом условий их эксплуатации.

1. Баринов В., Соловьев Н. Защита от коррозии кабельных линий 6-10-35-110 кВ. *Кабель-news*. 2012. № 1. http://www.ruscable.ru/article/Zashhita_ot_korrozii_kabelnykh_linij_6_10_35_110_kV/
2. Кучерявая И. Н. Дефекты полупроводящего слоя по жиле и их влияние на распределение электрического поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 1. С. 17-22.
3. Abdolall K., Halldorson G. L., Green D. Condition assessment and failure modes of solid dielectric cables in perspective. *IEEE Trans. on Power Delivery*. 2002. Vol. 17, No. 1. P. 18–24.
4. Bertini G.J. Neutral Corrosion-significance, causes & mitigation – Novinium, Inc., 2012. 12 p. https://www.novinium.com/wp-content/uploads/2015/05/Neutral_Corrosion-Significance-Causes-itigation.pdf

5. Buchholz V. Finding the root cause of power cable failures. – http://www.electricenergyonline.com/show_article.php?article=186
6. Chindris M., Lingvay I., Homan C., Lingvay C. Corrosion – key factor of durability and safety in the operation of the distribution power networks // *19th Internat. Conf. on Electricity Distribution*. – Vienna, 21-24 May 2007. Papers 489. 4 p. – https://www.researchgate.net/publication/295333185_Corrosion_-_key_factor_of_durability_and_safety_in_the_operation_of_the_distribution_power_networks
7. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
8. Densley J. Ageing mechanisms and diagnostics for power cables – an overview. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2001. Vol. 17, No. 1. P. 14–22.
9. Hernandez-Mejia J. C. Characterization of real power cable defects by diagnostic measurements. *Thesis for the Degree Doctor of Philosophy*. Georgia Institute of Technology, 2008. – 292 p.
10. Hernandez-Mejia J. C., Perkel J. Metallic shield assessment. Chapter 11. – University System of Georgia, Institute of Technology NEETRAC – National Electric Energy Testing, Research and Application Center. Cable Diagnostic Focused Initiative. Georgia Tech Research Corporation, February 2016. 45 p.
11. Hvidsten S., Kvande S., Ryen A., Larsen P.B. Severe degradation of the conductor screen of service and laboratory aged medium voltage XLPE insulated cables. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2009. Vol. 16, No 1. P. 155–161.
12. Isus D., Martinez J. D., Madina V., Santa Coloma P. Corrosion behaviour of submarine power cables in sea-water environment. *8th Internat. Conf. on Insulated Power Cables. – Jicable '11*. 19–23 June 2011, Versailles, France. – Paper A.6.6. – 4 p.
13. Kucheriava I. M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Technichna Elektrodynamika*. 2017. № 2. P. 19–24.
14. Marcolongo P. Modeling electromechanical phenomena contributing to cable deterioration. *Thesis for the degree of Master of Science in Engineering – Materials Science and Engineering*. – University of California, Berkeley, 2008. 58 p.
15. Williams F. D. Cable accessory failure analysis. *A Research Center in the School of Electrical and Computer Engineering at the Georgia Institute of Technology*. 2010. 59 p.

УДК 621.315.2 : 004.94

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Вплив корозійних явищ на розподіл електричного поля в ізоляції високовольтного кабеля

На основі комп'ютерного моделювання досліджено електричне поле у тришаровій ізоляційній структурі високовольтного кабеля зі зшито-поліетиленовою ізоляцією у випадку корозії металевих елементів – екрана та жили. Розглянуто варіанти виконання екрана у вигляді концентричних провідників і спіральної мідної стрічки. Електричні задачі розв'язано в стандартній програмі методом кінцевих елементів для вісесиметричного представлення кабеля та у його поперечному перерізі. Показано вплив корозії елементів кабеля на значення і характер змінення напруженості електричного поля у прилеглих напівпровідних шарах та в основній ізоляції. Бібл. 15, рис. 5.

Ключові слова: високовольтний кабель, зшито-поліетиленова ізоляція, напівпровідні шари, корозія жили та екрана, комп'ютерне моделювання.

I.M. Kucheriava

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

Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

The action of corrosion on electric field distribution in high-voltage cable insulation

The electric field distributions in three-layer insulating structure of high-voltage power cable insulated with cross-linked polyethylene (XLPE) are studied by computer modeling under condition of the corrosion of the aluminum conductor and copper shield /neutral of the cable. The different shield configurations such as concentric neutrals, helioidal copper tape and longitudinally corrugated metallic shield are considered. The electric field problems are solved using standard software and finite-element method for both axially symmetric model of the cable and its cross-section. The action of the corroded metallic cable components on the values and patterns of electric intensity in the adjoining conductor shield and insulation shield and in main insulation is shown. References 15, figures 5.

Key words: high-voltage cable, cross-linked polyethylene insulation, conductor shield and insulation shield, corrosion of conductor and metallic shield /neutral, computer modeling.

Надійшла 17.11.2017

Received 17.11.2017