

ДЕФЕКТЫ ПОЛУПРОВОДЯЩЕГО СЛОЯ ПО ЖИЛЕ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

Кучерявая И.Н., докт.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.
E-mail: rb.irinan@gmail.com

На основе многомасштабного моделирования проводится исследование электрического поля в шнито-полиэтиленовой изоляции силового кабеля с дефектами полупроводящего слоя по жиле на макро- и микроуровнях. Исследуемые макродефекты – неровность поверхности и выпуклость слоя в изоляцию, сквозной канал в слое; микродефекты – пористая микроструктура полупроводящего слоя. Электрическая задача для макродефектов связывается с задачей для микродефектов, решаемой в соответствующей зоне слоя. Путем численного моделирования показано усиление электрического поля в полиэтиленовой изоляции в местах расположения дефектов прилегающего полупроводящего слоя вплоть до превышения предела диэлектрической прочности материала. С этих позиций дано объяснение деградации изоляции в локальных областях, в результате которой возможно возникновение и развитие трешингов. Библи. 11, рис. 5.

Ключевые слова: шнито-полиэтиленовая изоляция, полупроводящий слой по жиле, технологические и эксплуатационные дефекты, пористая структура, трехмерные модели, многомасштабное моделирование.

Введение. В настоящее время во всем мире наблюдается значительный рост использования кабельных линий на высокое и сверхвысокое напряжение (выше 110 кВ), в основном при организации глубоких вводов в центральные районы крупных городов [6]. Такие кабельные объекты проектируются на основе кабелей с изоляцией из шнитого полиэтилена (СПЭ), структура которых показана на рис. 1, а.

Кабели с СПЭ изоляцией выпускаются с многопроволочной алюминиевой или медной жилой. Поскольку неровность поверхности токопроводящей жилы приводит к повышению напряженности электрического поля в зонах отдельных проводников, для устранения такого влияния проволочности, с целью сглаживания неровности поверхности токопроводящей жилы и исключения возможности возникновения частичных разрядов, жила покрывается полупроводящим слоем. Полупроводящий слой служит для выравнивания скачка напряженности поля между жилой и изоляцией и, тем самым, для увеличения длительности срока службы кабеля.

В силу отмеченного значительное внимание исследователей в области кабельной техники уделяется изучению свойств и качества полупроводящего слоя по жиле. Результаты экспериментального анализа качества структуры и ряда дефектов полупроводящего слоя представлены, например, в работах [7–10]. Влияние электрических характеристик (диэлектрической проницаемости и электропроводности) полупроводящего слоя на распределение электрического поля в основной изоляции кабеля изучается в статьях [1, 2]. Компьютерное моделирование и исследование ряда макроуровневых дефектов полупроводящего слоя на границе с полиэтиленовой изоляцией проводятся в работе [11].

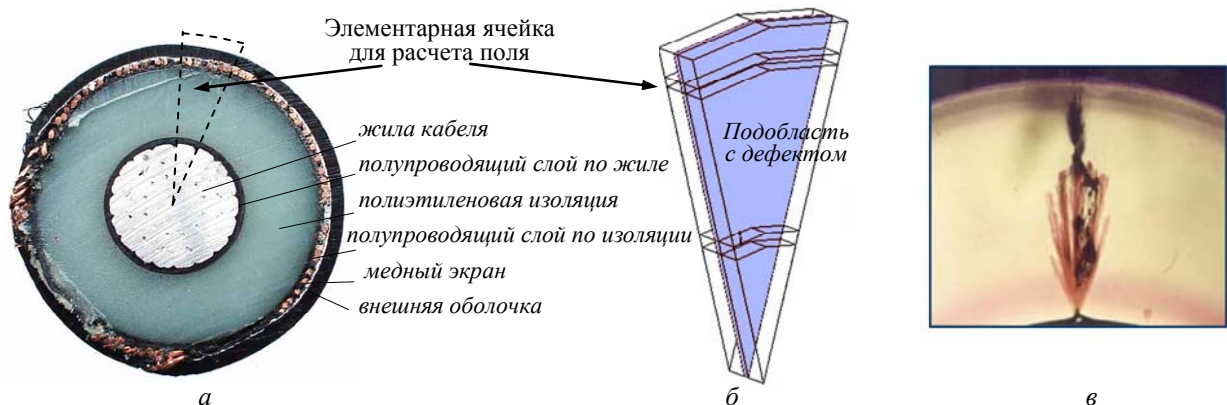


Рис. 1

Основным механизмом старения полиэтиленовой изоляции силовых кабелей является распространение в присутствии воды и под воздействием сильного электрического поля водных и электрических триингов в местах расположения в изоляции дефектов и загрязнений [7, 8]. Развитие триингов приводит к ухудшению свойств изоляции и, прежде всего, к снижению ее электрической прочности, со временем создает условия для пробоя изоляции, что представляет опасность выхода кабеля из строя.

В работе [10] сообщается, что в процессе изучения находившихся в эксплуатации от 2 до 22 лет кабелей с СПЭ изоляцией наиболее часто наблюдались триинги, зародившиеся на полупроводящем слое по жиле. Один из таких случаев представлен на рис. 1, в [10]. К причинам триингообразования на полупроводящем слое, получившим объяснение в [9, 10] с помощью растровой электронной микроскопии, относятся просачивание влаги в элементы кабеля вплоть до жилы, коррозия проводников жилы, проникновение продуктов коррозии в полупроводящий слой, микроразмерные трещины и пустоты в нем, пористость структуры слоя с высокой плотностью микропор и загрязнения на границе с полиэтиленовой изоляцией, а также сквозные каналы в полупроводящем слое. Экспериментальным путем в статье [10] обнаружена строгая взаимосвязь между коррозией алюминиевой жилы и образованием микроразмерных трещин и пустот в полупроводящем слое по жиле кабеля достаточно длительного срока службы. Как объясняется в [10], пористые каналы в полупроводящем слое образуются вследствие электрохимических реакций между алюминиевой жилой и полупроводящим слоем под действием механических напряжений из-за коррозии и проникновения воды. Кроме того, пористость слоя способствует распространению загрязнений от металлической жилы к поверхности СПЭ изоляции и, как следствие, возможности возникновения и развития триингов.

В связи с важностью проблемы достижения надежности и длительной эксплуатации высоковольтных кабелей, высокими требованиями к качеству их изоляционной структуры актуальным является тщательное изучение причин деградации полиэтиленовой изоляции кабелей, в том числе, связанных с технологическими и эксплуатационными дефектами полупроводящего слоя по жиле.

Цель настоящей работы состоит в исследовании с помощью компьютерного моделирования влияния микро- и макроскопических дефектов полупроводящего слоя по жиле на распределение электрического поля в полиэтиленовой изоляции силового кабеля и, тем самым, объяснение причин образования в ней триинговых структур, а также микро- и макроуровневой деградации на границе между полупроводящим слоем и изоляцией.

Компьютерное моделирование выполняется в трехмерном случае с использованием положений многомасштабного моделирования [3] при выборе расчетной области и связывании задач для макродефектов полупроводящего слоя с микродефектами в соответствующей зоне слоя. Численные расчеты проводятся в программе Comsol [5] с использованием метода конечных элементов.

Исследуемые в работе дефекты являются достаточно распространенными, наблюдались для ряда силовых кабелей и представлены, например, в работах [8–10]. Значительное искажение полупроводящего слоя по жиле (рис. 2, а [8]) и сквозной канал в нем (рис. 3, а [10]) относятся к дефектам технологического происхождения. Пористая структура полупроводящего слоя в микрометровом диапазоне (рис. 4, а [10]) может быть отнесена к эксплуатационным дефектам.

Модель для исследования и ее положения. Исследуется электрическое поле в изоляционной структуре (основной изоляции и полупроводящем слое по жиле) высоковольтного кабеля с СПЭ изоляцией, сечение которого показано на рис. 1, а. Рассматривается один из ряда одинаковых секторов сечения, который представляет собой элементарную ячейку периодической структуры [3] (рис. 1, б). В предположении, что рассматриваемые дефекты имеют некоторую протяженность (0,5 мм) по длине кабеля, в таком трехмерном секторе – элементарной ячейке выделяется тонкая подобласть указанной толщины с дефектами полупроводящего слоя (подобласть показана цветом на рис. 1, б).

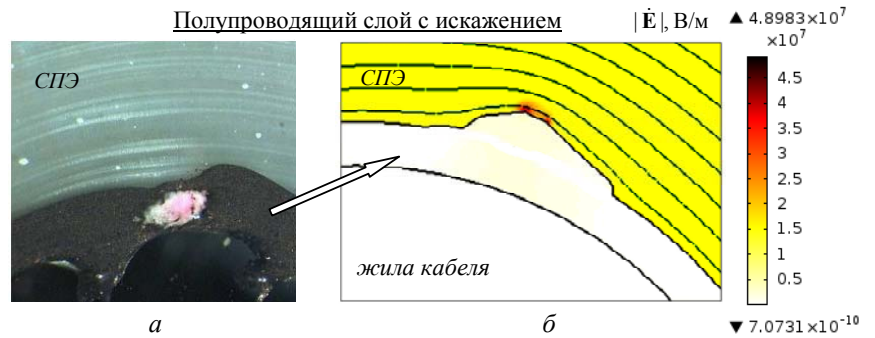
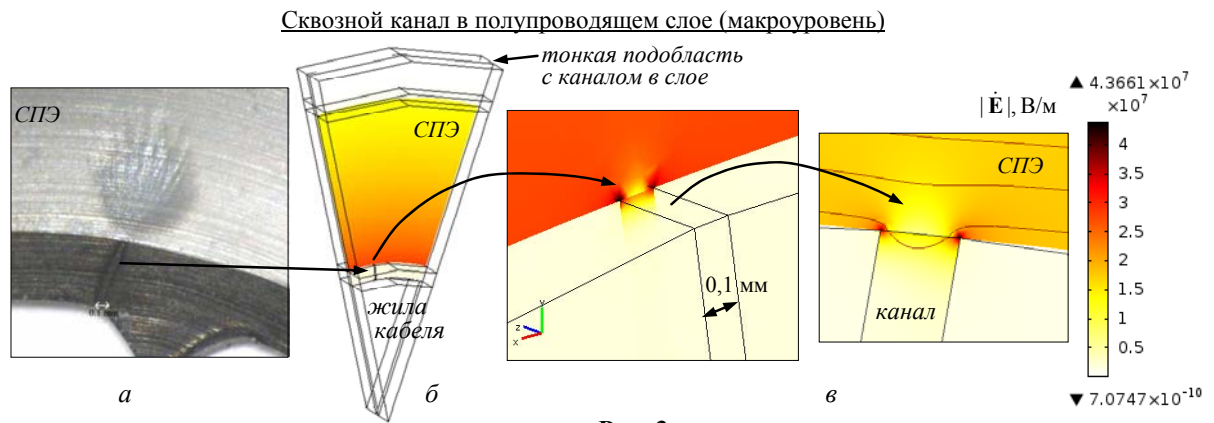


Рис. 2



Исследование электрического поля в элементарной ячейке с дефектами означает, что моделируемые дефекты кабеля имеют место во всех секторах его сечения. Такое предположение может быть принято, поскольку увеличение электрического поля происходит лишь в локальных областях вблизи дефектов и не оказывает влияния на распределение поля в соседних секторах.

Элементарная ячейка кабеля считается макроуровневым объемом многомасштабной модели. На этом уровне исследуется электрическое поле в изоляционной структуре с макродефектами полупроводящего слоя по жиле, а именно, с искажением слоя, выступающего в изоляцию (рис. 2, а), и сквозным каналом, как показано на рис. 3, а. Микроуровень включает микроразмерную область на конце сквозного канала, на границе между полупроводящим слоем и изоляцией (рис. 4, а). Связь между двумя уровнями осуществляется по максимальному значению напряженности электрического поля в зоне сквозного канала полупроводящего слоя, которое передается с макро- на микроуровень.

Отметим, что сквозной канал (рис. 3, а) представляется тонким воздушным промежутком в полупроводящем слое, а пористость слоя (рис. 4, а) – в виде структуры с высокой плотностью микровключений, заполненных воздухом, хотя в общем случае можно было бы рассматривать поры, заполненные водой, моделируя ситуацию глубокого просачивания влаги в кабель.

Предположения электрической задачи, решаемой как на микро-, так и макроуровнях, следующие. Изоляция кабеля находится под действием переменного электрического поля, медленно изменяющегося во времени по гармоническому закону. В силу этого поле рассчитывается в квазиэлектростатическом приближении в частотной области (при частоте 50 Гц). Объемные электрические заряды, инжектируемые в изоляцию с поверхности жилы и медного экрана, во внимание не принимаются. Предполагается, что полиэтиленовый материал является изотропным, а электрические свойства изоляции и воздушной среды в канале и включениях – постоянными величинами.

Расчетная область задачи на макроуровне содержит элементы кабеля, входящие в элементарную ячейку, а именно основную изоляцию кабеля и полупроводящие слои. Наличие жилы и медного экрана учитывается в граничных условиях, описанных ниже. В области наружной оболочки кабеля электрическая задача также не решается.

Основное уравнение модели – уравнение для электрического потенциала ϕ

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\nabla\phi = 0, \quad (1)$$

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

В качестве граничных условий задачи на макроуровне задаются: $\phi = U_m$ (U_m – амплитудное значение фазного напряжения) – на поверхности жилы; потенциал $\phi = 0$ – на внешней поверхности медного экрана; условие электрической изоляции $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали, \mathbf{J} – плотность полного тока, включая ток проводимости и ток смещения) – на боковых границах объемной элементарной ячейки, показанной на рис. 1, б.

Граничные условия электрической задачи (1), решаемой на микроуровне, следующие. На границах расчетной области, ориентированных вдоль поля (рис. 4, б), выбираются нулевой потенциал $\phi = 0$ и потенциал $\phi = U$, где U – приложенное напряжение, задаваемое так, чтобы среднее значе-

ние напряженности поля в области было равно максимальному значению поля, численно рассчитанному на макроуровне (на рис. 3, в).

Напряженность электрического поля определяется как $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\phi$.

Результаты компьютерного моделирования. Моделирование проводится для одножильного кабеля с СПЭ изоляцией марки АпвЭгаП 1х500/95 на напряжение 110 кВ, который имеет сечение алюминиевой жилы 500 мм^2 (диаметр жилы 25,2 мм), толщину изоляции 16 мм, сечение экрана из медных лент 35 мм^2 (толщину экрана 4 мм). Толщина полупроводящих слоев составляет 1 мм. Задаются значения электропроводности основной изоляции $\sigma_1 = 10^{-15} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, электропроводности полупроводящих слоев $\sigma_2 = 10^{-7} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$, диэлектрической проницаемости материалов $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2,3$.

На рис. 2, а показана картина искажения полупроводящего слоя по жиле [8]. Распределение электрического поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ и эквипотенциальные линии вблизи такого дефекта показаны на рис. 2, б. В локальных зонах заострений поверхности дефекта поле в изоляции достигает значения $|\dot{\mathbf{E}}|_{\text{max}} \approx 49 \text{ кВ/мм}$, тогда как без дефекта полупроводящего слоя – $|\dot{\mathbf{E}}|_{\text{max}} = 15,23 \text{ кВ/мм}$ согласно предварительному расчету. В рассматриваемом случае искажения полупроводящего слоя с негладкой поверхностью и выпуклостью в основную изоляцию увеличивает напряженность поля примерно в 3,2 раза и дает значение, превышающее диэлектрическую прочность полиэтиленового материала в соответствии с данными в [4].

На рис. 3, а показан сквозной канал шириной 0,1 мм в полупроводящем слое по жиле с водным триингом на конце [10]. Распределение электрического поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ в элементарной ячейке представлено на рис. 3, б, а поле $|\dot{\mathbf{E}}|$ и эквипотенциальные линии в окрестности канала – на рис. 3, в. Как видно, высокое значение напряженности поля концентрируется в углах канала слоя на границе с полиэтиленовой изоляцией. Заметно также искажение эквипотенциальных линий вблизи дефекта. Значение $|\dot{\mathbf{E}}|_{\text{max}} = 43,7 \text{ кВ/мм}$, полученное на макроуровне, используется на микроуровне с микроразмерной областью перехода между полупроводящим слоем и изоляцией (рис. 4, а, б) с помощью соответствующего граничного условия. Считается, что переход от макро- к микроуровню рассматривается в зоне дефекта – зоне конца сквозного канала в слое.

Рис. 4, а показывает границу между пористым полупроводящим слоем (с высокой плотностью пустот) и полиэтиленовой изоляцией [10]. Принятая для расчетов трехмерная модель с размерами $10 \times 10 \times 10 \text{ мкм}$ приведена на рис. 4, б. На рис. 4, в представлены распределения электрического поля $|\dot{\mathbf{E}}|$ в одном из сечений полупроводящего слоя (вверху), на границе между слоем и изоляцией (в центре), в изоляции на расстоянии 2 мкм от границы (внизу). На вставках показаны характерные картины поля вблизи микроступней. Указаны также максимальные значения напряженности поля в слое и изоляции. Показано, что наличие воздушных пустот в полупроводящем слое увеличивает в нем напряженность электрического поля так же, как и в зоне перехода со СПЭ изоляцией.

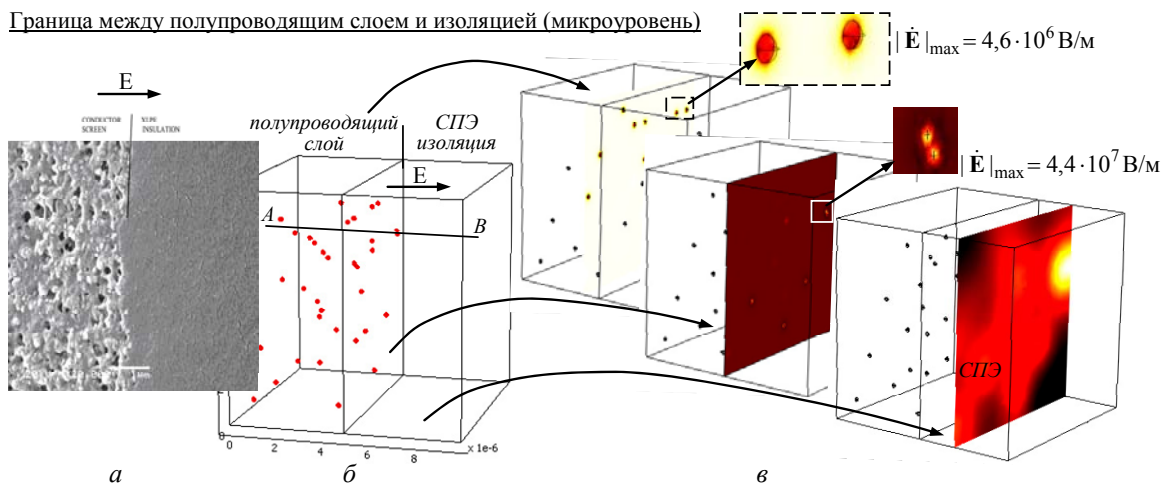


Рис. 4

Для сравнения на рис. 5 приведено изменение электрического поля $|\vec{E}|$ вдоль линии AB , отмеченной на рис. 4, б и проходящей через одну из пор-включений в полупроводящем слое, для случаев, когда полупроводящий слой имеет дефекты (сквозной канал на макроуровне и пористость на микроуровне) и не имеет таких дефектов. В последнем случае для задания граничного условия задачи, как описано выше, используется максимальное значение напряженности поля в изоляционной структуре кабеля без дефектов, равное 15,23 кВ/мм. Таким образом, дефекты полупроводящего слоя на макроуровне и микроуровнях непосредственно влияют на распределение поля в локальных зонах основной изоляции кабеля.

Заключение. Исследован характер распределения электрического поля на границе между полупроводящим слоем по жиле и полиэтиленовой изоляцией высоковольтного кабеля с учетом наличия характерных макродефектов слоя – его негладкой поверхности, выпуклостью в изоляцию, сквозным каналом, а также микродефектов – пористостью микроструктуры полупроводящего слоя. Применено многомасштабное моделирование для связи между микро- и макроуровневыми моделями расчета электрического поля.

Расчетным путем показано, что рассматриваемые дефекты изменяют конфигурацию электрического поля и эквипотенциальных линий в полиэтиленовой изоляции. Они способны приводить к снижению электрической прочности и деградации изоляции в локальных областях, а со временем и к развитию тринговых структур.

Результаты работы объясняют причины ускоренного старения полиэтиленовой изоляции силовых кабелей с дефектами полупроводящего слоя по жиле, что должно учитываться при конструировании, разработке технологических процессов изготовления и эксплуатации кабелей со СПЭ изоляцией.

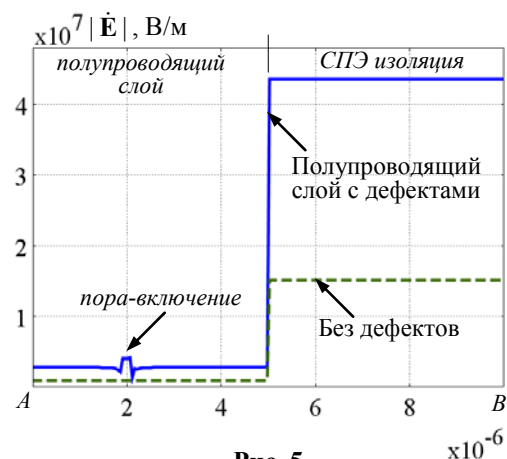


Рис. 5

1. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией. *Электротехніка і електромеханіка*. 2010. № 3. С. 44–47.

2. Кучерявая И.Н. Применение метода многомасштабного моделирования для исследования электрического поля в изоляции силового кабеля на 330 кВ в аварийном режиме. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 4. С. 13–18.

3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. 256 с.

4. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials / CRC Handbook of Chemistry and Physics. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2015. Pp. 15-44 – 15-49.

5. Comsol multiphysics modeling and simulation software <http://www.comsol.com/>

6. *Electrical power cable engineering*. CRC Press: 2011. 460 p.

7. 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

8. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. Proc. of JiCable 2007. Paper No. C.5.1.5, 2007. 6 p. http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf

9. Hvidsten S., Jager K.-M., Smedberg A., Faremo H., Nilsson U.H., Kvande S., Selsjord M., Kalkner W. Initiation site analysis of vented water trees growing from the conductor screen of service and laboratory aged XLPE cable insulation. *JiCable 2007*. Paper No. C.7.1.9, 2007. 5 p.

10. 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. Pp. 155–161.

11. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. № 2. Pp. 19–24.

ДЕФЕКТИ НАПІВПРОВІДНОГО ШАРУ ПО ЖИЛІ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ПОЛІЕТИЛЕНОВІЙ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ

Кучерява І.М., докт.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: rb.irinan@gmail.com

На основі багатомасштабного моделювання проводиться дослідження електричного поля в зшито-поліетиленовій ізоляції силового кабелю з дефектами напівпровідного шару по жилі на макро- та мікрорівнях. Досліджувані макродефекти – нерівність поверхні та випуклість шару в ізоляцію, наскрізний канал у шарі; мікродефекти – пориста мікроструктура напівпровідного шару. Електрична задача для макродефектів зв'язується із задачею для мікродефектів, що розв'язується у відповідній зоні шару. Шляхом чисельного моделювання показано посилення електричного поля в поліетиленовій ізоляції в місцях розташування дефектів прилеглого напівпровідного шару аж до перевищення межі діелектричної міцності матеріалу. З цих позицій дано пояснення деградації ізоляції в локальних областях, у разі якої можливе виникнення та розвиток трийнів. Бібл. 11, рис. 5.

Ключові слова: зшито-поліетиленова ізоляція, напівпровідний шар по жилі, технологічні та експлуатаційні дефекти, пориста структура, тривимірні моделі, багатомасштабне моделювання.

DEFECTS OF CONDUCTOR SCREEN AND THEIR INFLUENCE ON ELECTRIC FIELD DISTRIBUTION IN POLYETHYLENE INSULATION OF POWER CABLE

Kucheriava I.M.

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine. E-mail: rb.irinan@gmail.com

The electric field distributions in the cross-linked polyethylene (XLPE) insulation of power cable with defects in the conductor screen at macro- and microlevels are studied using multiscale modeling. The surface roughness, protrusion of the screen into the insulation and bridging channel in the conductor screen as macro-sized defects as well as the porous structure of the screen as micro-sized defect are modeled and examined. The electric problem for macrodefects is coupled with the problem for microdefects solved in the appropriate region of the screen. The considerable electric field enhancement near the defects is revealed by numerical simulation. From such view point, the degradation of the insulation in its local regions with the potential formation and growth of water trees is explained.

References 11, figures 5.

Key words: XLPE insulated power cable, conductor screen, manufacturing and operational defects, porous structure, three-dimensional models, multiscale modeling.

1. Bezprozvannykh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Grounding of electrophysical characteristics of semiconducting screens of high-voltage power cables with cross-linked insulation. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2010. No 3. Pp. 44–47. (Rus)
2. Kucheriava I.M. Application of multiscale modeling for study of electric field in insulation of 330 kV power cable at emergency operation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2012. No 4. Pp. 13–18. (Rus)
3. Podoltsev O.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. Kiev: Institut Elektrodynamiki Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2011. 256 p. (Rus)
4. Berger L.I. Dielectric strength of insulating materials. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2015. Pp. 15-44 – 15-49.
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software <http://www.comsol.com/>
6. *Electrical power cable engineering*. CRC Press: 2011. 460 p.
7. 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
8. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R. Long-life XLPE insulated power cable. *Proc. of JiCable 2007*. Paper No. C.5.1.5, 2007. 6 p. http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf
9. Hvidsten S., Jager K.-M., Smedberg A., Faremo H., Nilsson U.H., Kvande S., Selsjord M., Kalkner W. Initiation site analysis of vented water trees growing from the conductor screen of service and laboratory aged XLPE cable insulation. *JiCable 2007*. Paper No. C.7.1.9, 2007. 5 p.
10. 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. Pp. 155–161.
11. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2017. No 2. Pp. 19–24.

Надійшла 19.06.2017
Остаточний варіант 22.06.2017