

## ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2 : 004.94

### ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МИКРОВКЛЮЧЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

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

*Представлен и реализован один из подходов к моделированию электрического поля в полиэтиленовой изоляции с периодически расположенными водными микровключениями. Рассчитана напряженность электрического поля в ряде трехмерных элементарных ячеек полиэтилена с одинаковыми включениями. За счет изменения размеров элементарных ячеек моделируется различная объемная концентрация микровключений в полиэтиленовой изоляции. Показано, что характер распределения и максимальные значения напряженности электрического поля в материале зависят от объемной фракции микровключений и близости их взаимного расположения в направлении приложенного поля. Библ. 10, рис. 5.*

**Ключевые слова:** полиэтиленовая изоляция, водные микровключения, объемная концентрация, элементарная ячейка, компьютерное моделирование.

**Введение.** К современным тенденциям в области развития кабельно-проводниковой техники относится преимущественное использование в системах передачи электроэнергии силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией на высокое и сверхвысокое напряжения (до 500 кВ), а также применение защищенных проводов с полиэтиленовой изоляцией для воздушных линий электропередачи [7, 10]. Надежность и ресурс электротехнических устройств во многом определяются качеством изоляции и зависят от ряда факторов, среди которых структурная неоднородность изоляции вследствие наличия дефектов, например, в виде микроразмерных включений и пустот, а также доступ влаги при изготовлении и эксплуатации [2, 6].

Деградация полиэтиленовой изоляции на начальных этапах проявляется в распространении микрополостей, заполненных водой, вплоть до образования разветвленных структур – водных триингов [6, 9]. Это связано с большой концентрацией микровключений в полиэтиленовом материале и обусловлено воздействием электрического поля. Так, согласно данным работы [8] полиэтиленовая изоляция из-за технологических условий изготовления изначально содержит в объеме  $1 \text{ мм}^3$  примерно  $10^6$  микровключений с размерами несколько микрометров. С учетом этого исследование закономерностей распределения электрического поля в неоднородном полиэтиленовом материале является актуальной задачей, решение которой направляется на выявление механизмов деградации гетерогенных диэлектриков в сильном электрическом поле и имеет важные практические приложения, связанные с обеспечением электрической прочности, надежности и длительного срока службы изоляции высоковольтных устройств.

В монографии [4] представлены исследования электрофизических процессов, которые приводят к разрушению полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей на микроуровне. В [1] обобщены подходы к дву- и трехмерному моделированию электрического поля в неоднородной полиэтиленовой изоляции, изучены закономерности распределения поля при упорядоченном и случайном пространственном расположении микровключений в заданном объеме, рассмотрены варианты различной концентрации включений в области определенного объема.

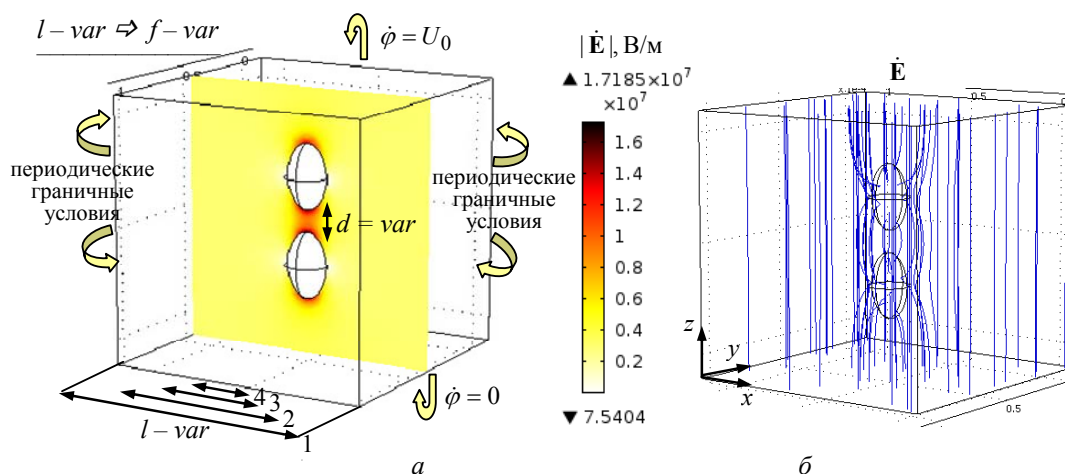


Рис. 1

Целью данной работы, которая представляет собой продолжение исследования статьи [1], является изучение на основе трехмерного компьютерного моделирования распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции с водными микровключениями при учете их объемной концентрации в материале. Задание различных фракций включений проводится путем изменения размеров расчетных областей. Выбором периодических граничных условий предусматривается регулярное (периодическое) расположение микровключений в объеме изоляции. Используется понятие элементарной ячейки, как базового элемента периодической структуры [3]. С помощью параллельного переноса такого минимального элемента объема по координатным направлениям может быть реконструирована вся структура материала.

В связи с тем, что во внешнем электрическом поле диэлектрики поляризуются (дипольные электрические моменты элементов объема становятся отличными от нуля), в работе определяется степень электрической поляризации полиэтиленовой изоляции в зависимости от концентрации и взаимного расположения включений. Моделирование проводится с использованием метода конечных элементов в программе Comsol [5].

**Модель для исследования, положения и данные для расчетов.** Модель для расчета электрического поля в квазистатическом приближении детально описана в работе [1] и позволяет определить напряженность электрического поля  $\dot{E} = -\nabla\phi$ , где  $\phi$  – комплексный электрический потенциал.

Предполагается, что полиэтиленовая изоляция является изотропной диэлектрической средой. Поляризованность пропорциональна напряженности поля, вектор поляризации  $\dot{P} = \chi\dot{E}$ ,  $\chi$  – абсолютная диэлектрическая восприимчивость среды и для данного случая величина, значения которой не зависят от направления. Поляризованность рассчитывается средствами программы Comsol.

Размер расчетных областей выбирается из условия задания различных значений объемной концентрации двух одинаковых эллипсоидных включений (с размерами полуосей 10, 10, 15 мкм), ориентированных вдоль приложенного поля.

Физическая модель для расчета в виде элементарной ячейки периодической среды показана на рис. 1 а. Концентрация включений варьируется путем изменения размера  $l$  расчетной области по оси  $Ox$ .

Граничные условия задачи приведены на рис. 1 а. На боковых поверхностях элементарных ячеек задаются периодические граничные условия, что определяет одинаковое распределение электрического потенциала и его нормальной производной на противоположных границах. На гранях расчетных областей, ориентированных вдоль поля, выбираются условия нулевого электрического потенциала  $\phi = 0$  и  $\phi = U_0$ , где  $U_0$  – приложенное напряжение, задаваемое так, чтобы среднее значение напряженности поля в области составляло 3 кВ/мм для всех рассматриваемых вариантов.

На первом этапе исследования изменяется размер элементарной ячейки  $l$  и тем самым изменяется концентрация включений  $f$  в пределах 0,7...16 %. На втором этапе при заданной объемной фракции включений ( $f = 0,012$ ) изменяется их взаимное расположение путем варьирования расстояния между ними:  $d = 1,5...20,0$  мкм (рис. 1 а).

Электропроводность полиэтилена задается равной  $\sigma = 10^{-15}$  См/м. Для водных включений устанавливается электропроводность  $\sigma = 10^{-2}$  См/м. Диэлектрическая проницаемость полиэтилена  $\varepsilon = 2,3$ ; для включений выбирается значение  $\varepsilon = 80$ .

В ходе расчетов определяются максимальные значения напряженности электрического поля  $|\dot{\mathbf{E}}|_{\max}$  и поляризованности  $|\dot{\mathbf{P}}|_{\max}$ . Выбор количества элементов сеточного разбиения расчетных областей осуществляется согласно следующему условию: рассчитанное значение напряженности поля, усредненное по всему объему  $V$  каждой элементарной ячейки полиэтиленовой изоляции,

$$\langle |\dot{E}_z| \rangle = \frac{1}{V} \int_V |\dot{E}_z(\mathbf{r})| d\mathbf{r} = 3 \text{ кВ/мм} \pm 2\%,$$

где  $\mathbf{r}$  – пространственная координата в пределах элементарной ячейки.

Отметим, что расчет электрического поля с неоднородной изоляцией с аналогичным расположением включений простой формы может проводиться с использованием двумерных осесимметричных моделей, например, как в [1, 4]. Однако такие модели не позволяют определить распределение поля во всем окружающем объеме и, в частности, в плоскостях на различном расстоянии от включений (в пределах расчетной области).

**Результаты компьютерного моделирования.** Характерное распределение электрического поля в центральном сечении расчетной области при объемной концентрации включений  $f = 0,0073$  показано на рис. 1, а. Здесь отображено взаимное влияние включений, а также увеличение напряженности поля на их вершинах, ориентированных вдоль приложенного напряжения. Силовые линии электрического поля в области для такого случая построены на рис. 1, б.

Рис. 2 показывает распределение электрического поля на одной из боковых граней расчетных областей (представляющей собой серединную поверхность между периодически расположенными группами включений) при различной объемной концентрации включений:  $f = 0,0073$  (рис. 2 а);  $f = 0,012$  (рис. 2 б);  $f = 0,031$  (рис. 2 в);  $f = 0,16$  (рис. 2 г). Здесь указаны максимальные значения напряженности электрического поля  $|\dot{\mathbf{E}}|$  и электрической поляри-

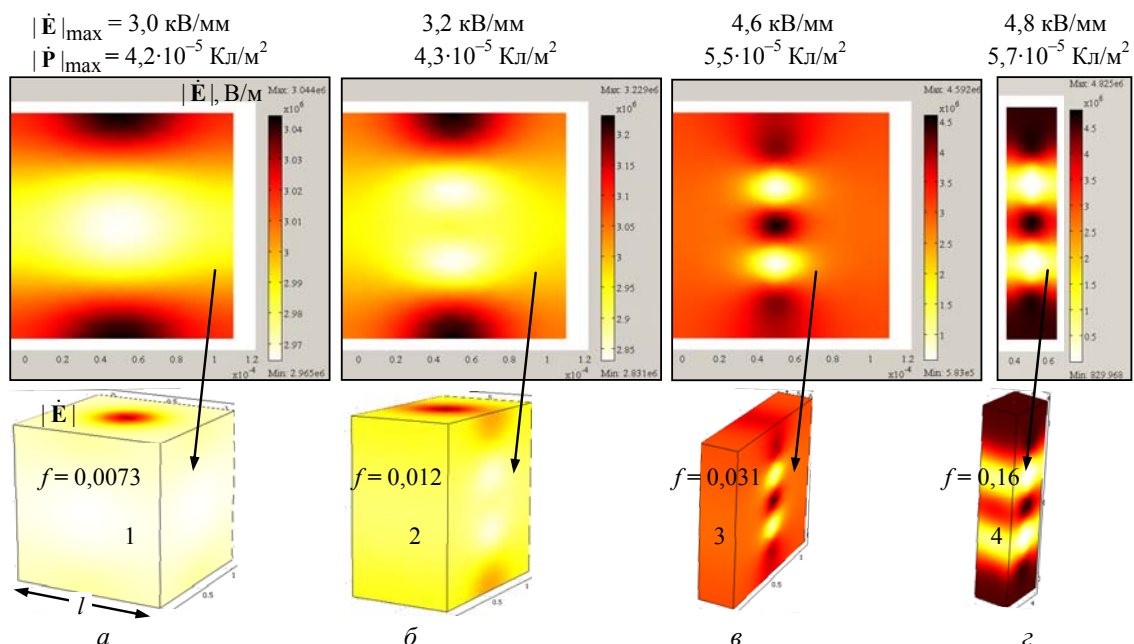


Рис. 2

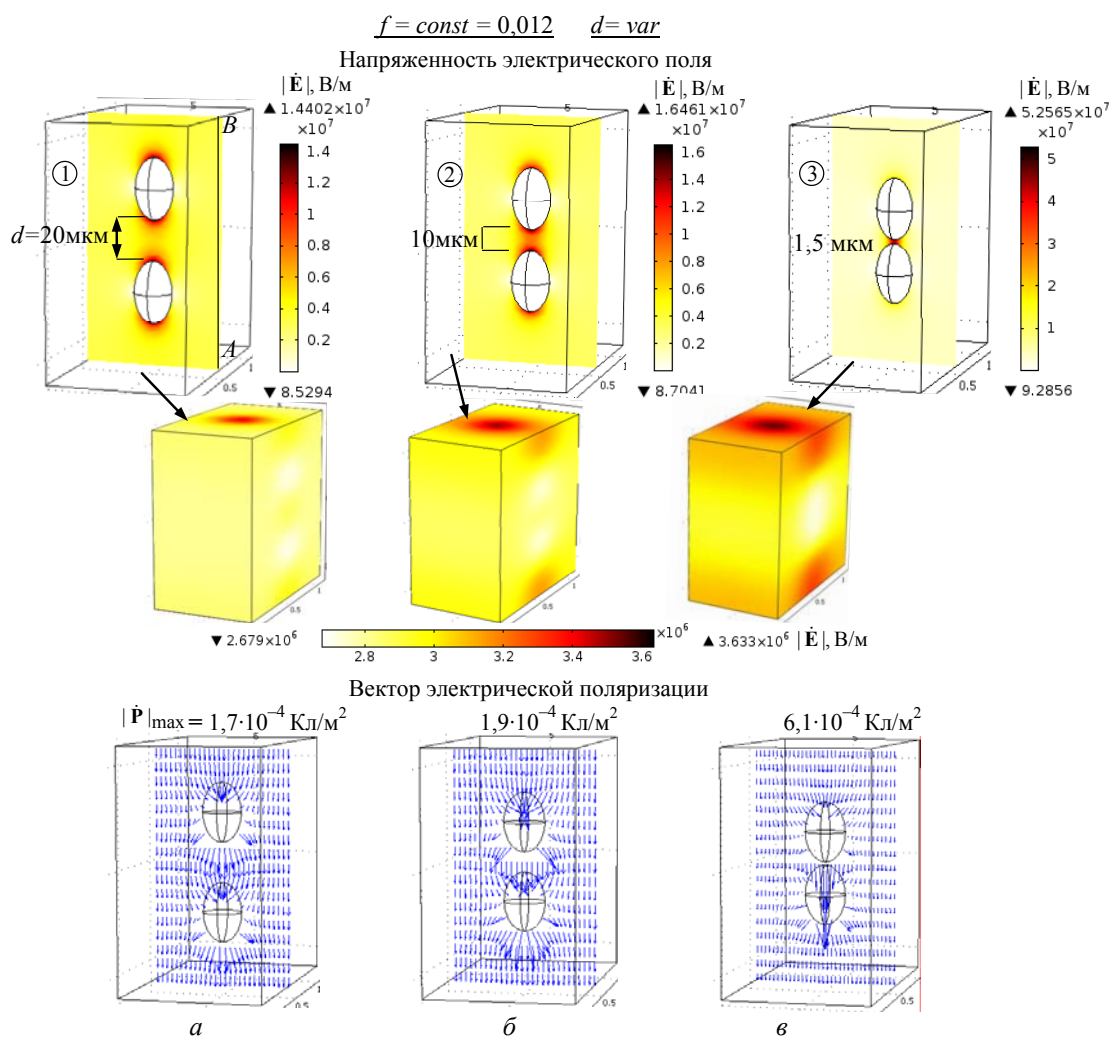


Рис. 3

зованности  $|\dot{\mathbf{P}}|$  на боковых гранях. Как видно, по центру между регулярно расположенными включениями поле распределяется по-разному в зависимости от их концентрации. При увеличении объемной фракции до  $f = 0,16$  и тем самым при сближении групп включений в направлении оси  $Ox$ , поперечно ориентированной по отношению к приложенному полю, напряженность поля и поляризованность увеличиваются соответственно до  $|\dot{\mathbf{E}}|_{\text{max}} = 4,8$  кВ/мм и  $|\dot{\mathbf{P}}|_{\text{max}} = 5,7 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>. Эти результаты отражают "эффект близости" микровключений в полиэтилене.

На рис. 3 при различном расстоянии  $d$  между микровключениями и для заданной объемной концентрации  $f = 0,012$  в полутонах показано распределение электрического поля  $|\dot{\mathbf{E}}|$  в элементарной ячейке с двумя включениями: в центральном сечении области – на верхних картинах и на боковых гранях области – на картинах посередине. Вектор электрической поляризации (а значит, и сонаправленный с ним вектор напряженности электрического поля) в центральном сечении области представлен в виде пропорциональных стрелок на трех нижних картинах. Максимальные значения поляризованности в расчетной области для случаев расположения включений на расстоянии  $d = 20,0$ ;  $10,0$  и  $1,5$  мкм соответственно равны  $|\dot{\mathbf{P}}|_{\text{max}} = 1,66 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> (рис. 3 а);  $1,94 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> (рис. 3 б) и  $6,05 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup> (рис. 3 в). Из картин поля на границах области видно, что электрическое поле перераспределяется в объеме и рассредоточивается в направлении приложенного поля тем более, чем более близко друг к другу расположены включения; поле все более равномерно распределяется на нижней и верхней гранях элементарной ячейки. Картины векторного поля внизу рис. 3 показывают также, что при более близком расположении включений векторы напряженности электриче-

ского поля и поляризации все более ориентируются в одном направлении – по приложенному полю. Для наиболее близко расположенных включений значения напряженности поля и соответственно поляризованность в объеме элементарной ячейки максимальны (рис. 3 в).

Для случая одинаковой концентрации включений  $f = 0,012$  на рис. 4 показаны графики изменения напряженности электрического поля  $|\dot{\mathbf{E}}|$  вдоль линии  $AB$ , отмеченной на рис. 3 а, для трех вариантов взаимного расположения включений – при расстоянии между ними: 1 –  $d = 20$  мкм; 2 –  $d = 10$  мкм; 3 –  $d = 1,5$  мкм. Они дополняют результаты рис. 3 и подтверждают, что при уменьшении расстояния между включениями электрическое поле в объеме стремится концентрироваться на поверхностях, расположенных в направлении поля (на верхней и нижней гранях элементарной ячейки на рис. 3). Некоторая неровность кривых на рис. 4 объясняется недостаточно мелким конечно-элементным разбиением трехмерных расчетных областей, показанных на рис. 3.

Зависимости от расстояния между включениями  $d$  максимальных значений напряженности электрического поля  $|\dot{\mathbf{E}}|_{\max}$  и поляризованности  $|\dot{\mathbf{P}}|_{\max}$  в элементарной ячейке при  $f = 0,012$  представлены на рис. 5.

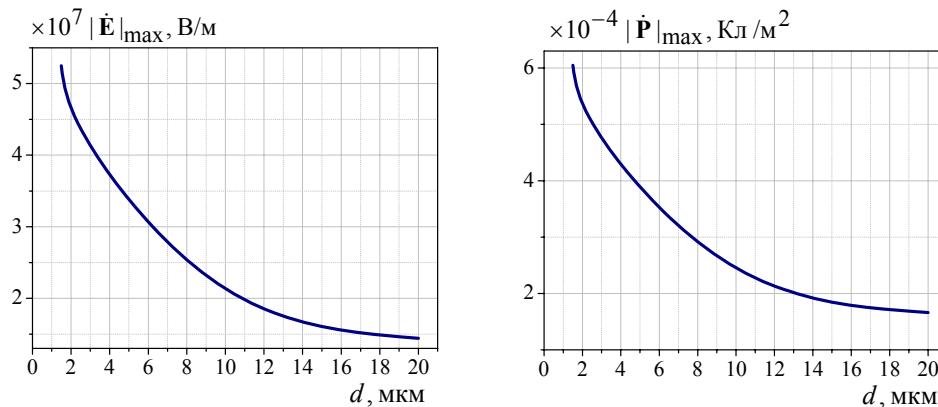


Рис. 5

**Заключение.** Проведено трехмерное компьютерное моделирование электрического поля в объеме элементарных ячеек полиэтиленовой изоляции с периодическим расположением двух водных микровключений в виде эллипсоидов. Путем изменения размеров элементарных ячеек рассмотрены случаи различной объемной концентрации включений в изоляции – от 0,7 до 16%.

Выявлены особенности распределения электрического поля в неоднородной изоляции в зависимости от объемной фракции включений и близости их взаимного расположения в направлении приложенного поля:

- количественный и качественный характер распределения электрического поля между периодически расположенными микровключениями (как и на рис. 2 в плоскости, посередине между ними) зависит от объемной концентрации включений в полиэтилене;

- в случае одинаковой объемной фракции включений при более близком их взаимном расположении (в направлении приложенного напряжения) напряженность электрического поля и поляризованность более сосредотачиваются на граничных поверхностях элементарной ячейки, ориентированных по полю (рис. 3, 4), и имеют бóльшие значения в объеме ячейки (рис. 3, 5).

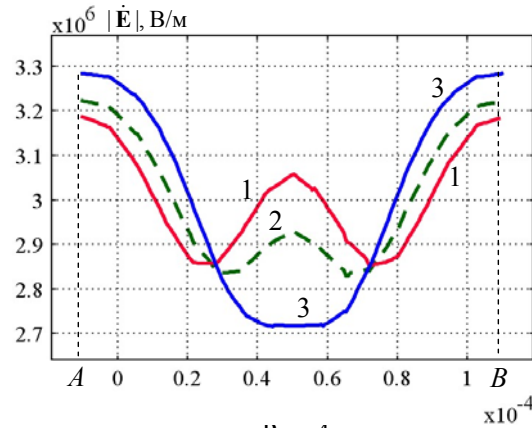


Рис. 4

Результаты работы дополняют знания об особенностях распределения электрического поля в микронеоднородной полиэтиленовой изоляции электротехнических устройств, в частности, в зависимости от объемного содержания в ней водных микровключений. Результаты могут представлять практический интерес в связи с присутствием изоляции распространением водных триингов, приводящих к ее деградации и снижению электрической прочности.

1. Кучерявая И.Н. Подходы к моделированию электрического поля в полиэтиленовой изоляции с микровключениями // Пр. Ин-ту электродинамики НАН Украины. Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ. – 2016. – Вип. 44. – С. 115–122.
2. Образцов Ю.В., Фрик А.А., Сливов А.А. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества // Кабели и провода. – 2005. – № 1 (290). – С. 9–13.
3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 2011. – 256 с.
4. 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.
5. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
6. Dissado L.A., Fothergill J.C. Electrical degradation and breakdown in polymers. – London: Peter Peregrinus Ltd. for IEE, 1992. – 601 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](http://www.cdfi.gatech.edu/publications/3-HV-Issues-7_with-Copyright.pdf)
8. Kageyama S., Ono M., Chabata S. Microvoids in crosslinked polyethylene insulated cables // IEEE Trans. on Power Apparatus Systems. – 1975. – Vol. 94, No. 4. – P. 1258–1263.
9. Peshkov Iz. B., Shuvalov M. Yu., Ovsienko V.L. Water treeing in extruded cable insulation as Reh binder electrical effect // Journal of Information Technology and Applications. – 2015. – No. 5. – Pp. 55–60.
10. Technical information handbook. Wire and cable. – Anixter, 2013. – 315 p. – <https://www.anixter.com/content/dam/Anixter/Guide/11H0001X00-Anixter-WC-Technical-Handbook-EN-US.pdf>

УДК 621.315.2 : 004.94

**І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

#### **Вплив концентрації микровключень на розподіл електричного поля в поліетиленовій ізоляції**

*Описано та реалізовано один із підходів до моделювання електричного поля в поліетиленовій ізоляції з періодично розташованими водними микровключеннями. Розраховано напруженість електричного поля в ряді тривимірних елементарних комірок поліетилену з однаковими включеннями. За рахунок зміння розмірів комірок моделюється різна об'ємна концентрація микровключень у поліетиленовій ізоляції. Показано, що характер розподілу та максимальні значення напруженості електричного поля в матеріалі залежать від об'ємної фракції микровключень та близькості їхнього взаємного розташування в напрямку прикладеного поля. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** поліетиленова ізоляція, водні микровключення, об'ємна концентрація, елементарна комірка, комп'ютерне моделювання.

#### **I.M. Kucheriava**

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

#### **The effect of microvoid concentration on electric field distribution in polyethylene insulation**

*The approach to electric field modeling in polyethylene insulation with periodically located water-filled micro-sized voids is presented and realized. The electric intensity in a number of three-dimensional elementary cells of the polyethylene with the same microvoids is determined. The different microvoid concentrations in the insulation are modeled by the change of the cells in dimensions. As shown, the distribution and the maximum value of electric intensity in the material depend on both volume fraction of microvoids and void-to-void distance in the applied field direction. References 10, figures 5.*

**Key words:** polyethylene insulation, water microvoids, volume concentration, elementary cell, computer modeling.

Надійшла 09.06.2016

Received 09.06.2016