

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

Особливості підвищення швидкості наростання струмів у навантаженні напівпровідникових електро-розрядних установок

Досліджено особливості зміни середньої швидкості наростання струму в навантаженні при коливальному й аперіодичному розряді накопичувального конденсатора електророзрядної установки. Визначено закономірності зміни середньої швидкості наростання розрядних струмів у навантаженні при примусовому обмеженні їхньої тривалості й зміні ємності розрядного кола. Доведено, що збільшення ємності конденсатора зменшує тривалість наростання розрядного струму від нуля до будь-якого фіксованого значення, меншого за максимальне значення струму. Базуючись на цьому, запропоновано метод підвищення швидкості наростання імпульсних струмів у навантаженні, заснований на збільшенні ємності конденсатора, що розряджається, і примусовому перериванні струму в навантаженні при досягненні заданого фіксованого значення (або тривалості) струму. Бібл. 17, рис. 5, табл. 3.

Ключові слова: перехідний процес, розрядний струм, ємність конденсатора, швидкість наростання струму.

N.I. Suprunovska¹, A.A. Shcherba², S.S. Roziskulov³, Yu.V. Peretiatko⁴

1,2,3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

4 – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Peremohy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

Features of rate of current raise in the load of semi-conductor electro-discharge installations

The features of the change in the average rate of current rise in the load during oscillatory and aperiodic discharge of a reservoir capacitor of electric discharge installations are studied. The regularities of the change in the average rate of discharge currents rise in the load at forced limitation of currents durations and a change in the capacitance of the discharge circuit are determined. It is proved that increasing the capacity of the capacitor reduces the duration of the rise of the discharge current from zero to any fixed value less than the maximum value of the current. Based on this, it is proposed the method for increasing the rate of rise of pulsed currents in the load, which is founded on increasing the capacity of the discharged capacitor and forced interrupting the current in the load when a specified fixed value (or duration) of the current is reached. References 17, figures 5, tables 3.

Key words: transient, discharge current, capacitor capacitance, rate of current rise.

Надійшла 26.05.2017

Received 26.05.2017

УДК 621.315.2 : 004.94

ВЛИЯНИЕ МИКРОДЕФЕКТОВ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

И.Н. Кучерявая, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

rB.irinan@gmail.com

Путем дву- и трехмерного компьютерного моделирования исследовано электрическое поле в полиэтиленовой изоляции с характерными микроразмерными включениями – упрощенными ветвями водного триинга, а также органическими и неорганическими, одиночными и множественными загрязнениями. Показано усиление электрического поля вблизи инородных включений и влияние их друг на друга. Для одиночных включений численным путем и по аналитической формуле рассчитан коэффициент усиления поля. Выявлено, что характер распределения поля в изоляции зависит от электрических свойств, формы и взаимного расположения микровключений. Результаты работы позволяют расширить знания о причинах деструкции полиэтиленового материала, широко используемого в качестве материала изоляции современных высоковольтных кабелей. Библ. 15, рис. 5, табл. 2.

Ключевые слова: полиэтиленовая изоляция, водный триинг, инородные микровключения, электрическое поле, компьютерное моделирование.

Введение. В настоящее время наиболее распространенным материалом для изготовления изоляции силовых кабелей всех классов напряжения является сшитый полиэтилен

(СПЭ). Надежность кабелей в процессе длительной эксплуатации (до 40 лет и более) во многом связана с состоянием и интенсивностью старения полимерной изоляции. Находясь под воздействием сильного электрического поля и внешних факторов, изоляция постепенно утрачивает свои электроизоляционные свойства, может испытывать пробой и со временем приводить к выходу из строя кабеля. В связи с широким внедрением кабелей на высокое и сверхвысокое напряжение, для которых рабочая напряженность электрического поля наибольшая – 10 кВ/мм (табл. 1 [9]), задача достижения высокой надежности кабельной изоляции становится все более актуальной.

Как установлено, например, в [1, 9, 13], в процессе старения (деградации) сшитого полиэтилена снижаются его эксплуатационные характеристики. Основной причиной этого является наличие неоднородностей в изоляции, свойственных самому полиэтиленовому материалу в исходном состоянии, а также возникающих при изготовлении кабелей. Неоднородность структуры изоляции обусловлена не только наличием микроразмерных посторонних включений, полостей и загрязнений вследствие несовершенства исходного сырья и процесса технологической обработки, но и условиями эксплуатации. Электрические, тепловые, механические воздействия, проникновение влаги и в целом длительность срока службы влияют на электрические свойства изоляции. Неоднородности изоляции способны со временем прогрессировать. Так, в местах их расположения, где напряженность электрического поля увеличена, зарождаются и развиваются водные и электрические триинги, приводящие к деградации и снижению электрической прочности изоляции [1, 4, 7]. Кроме того, в области триингообразования, в которой имеются микропустоты, заполненные водой, возникают механические напряжения, способствующие дальнейшему развитию триинговых структур [1, 12].

Условиями образования и распространения водных триингов в полиэтиленовой изоляции являются наличие неоднородностей, молекул воды и действие электрического поля. Развиваются триинги вдоль силовых линий электрического поля путем разрушения полимерных связей в изоляционном материале и образования микрополостей, наполненных влагой. В работе [13] приведена модель структуры водного триинга, ветви которого состоят из цепочки эллипсоидных микровключений, соединенных цилиндрическими микроканалами-трещинами (рис. 1 а). Подобная модель использована в статье [12] для объяснения потенциального механизма распространения водных триингов в изоляции за счет действия электрической силы и механических напряжений, в том числе механической усталости материала на концах триинговых микроканалов. Электрическая и механическая задачи решены в [12] в двумерной (осесимметричной) постановке.

Основные требования относительно чистоты полиэтиленовой изоляции силовых кабелей различных классов напряжения приведены в табл. 1. Как видно, к кабелям высокого напряжения предъявляются наиболее высокие требования к качеству полиэтиленовой изоляции.

Экспериментальному изучению микродефектов в сшитом-полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей посвящены работы [1, 2, 4, 8, 13]. Изучение включает обнаружение, определение размеров, распознавание природы неоднородностей-дефектов в изоляции, исследование ее структуры (морфологии), внутренних механических напряжений, локальной электрической

прочности. Применены методы видеомикроскопии, микроэксперимента и длительные испытания на ускоренное старение образцов изоляционных материалов.

Таблица 1

Параметры	Напряжение кабелей		
	низкое (6–36 кВ)	среднее (36–161 кВ)	высокое (>161 кВ)
Средняя напряженность электрического поля, кВ/мм	2	6	10
Недопустимый размер загрязнений в СПЭ изоляции, мкм	200–500	100–200	70–100
Размер контролируемых загрязнений в СПЭ изоляции, мкм	100–200	70–100	50–70

В статьях [1, 2, 4, 8] выявлен ряд инородных включений в полиэтиленовой изоляции, среди которых частицы термически модифицированного полиэтилена, множественные сажевые включения, металлические (стальные) частицы, бумажное / хлопковое волокно, загрязнения нефтью. К примеру, частицы термически модифицированного полиэтилена образуются при неполном расплавлении гранул полиэтилена вследствие нарушения условий экструдирования изоляции [2, 4]. Такие дефекты довольно широко распространены. Их наличие в изоляции приводит к увеличению напряженности электрического поля и ее ускоренному старению [2]. Природные бумажное и хлопковое волокна используются в технических целях и для изготовления рабочей одежды. В процессе производства силовых кабелей частицы таких волокон сравнительно часто попадают в материал изоляции с пылью в воздухе [4]. Возможность проникновения нефти в полиэтиленовую изоляцию при эксплуатации кабеля в нефтяной скважине показана в статье [2]. Сажевые включения попадают в основную изоляцию из полупроводящих экранов. Сажа используется как наполнитель для электропроводящих композиций экранов (доля сажи в них составляет до 30–40 %) с целью придания им необходимой проводимости. Свойства сажи определяются размерами и свойствами составляющих частиц, что объясняет многообразие ее разновидностей. Изучению электрических свойств углеродной сажи посвящены работы [10, 14].

В статье [4] выделяются три основных вида микродефектов в полиэтиленовой изоляции: проводящие (углеродные или металлические) включения, непроводящие включения и полости. В работе [8] изучаемые загрязнения в сшитой-полиэтиленовой изоляции высоковольтных кабелей подразделяются на две группы: органические и неорганические загрязнения. Неорганические загрязнения, главным образом металлические частицы, проникают в изоляцию с полупроводящих слоев. Органические частицы образуются в изоляции из отслоений гранул полиэтилена – исходного сырья для изготовления изоляции, а также при превышении температуры во время экструзии / сшивания изоляции. Органические загрязнения имеют слабую адгезию с основным материалом и образуют дополнительные полости-пустоты в изоляции, что снижает ее электрическую прочность [8]. Согласно данным [8], относительная диэлектрическая проницаемость органических частиц не превышает 4. К органическим загрязнениям относятся также частицы окисленного полиэтилена, образуемые в процессе производства изоляции. Их электропроводность и диэлектрическая проницаемость возрастают с увеличением степени окисления [7]. Присутствие таких частиц в полиэтилене непосредственно влияет на процессы триингообразования в материале [7].

Целью настоящей работы являются исследование распределения электрического поля в полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых кабелей с характерными инородными микровключениями, выявление влияния множественных микронеоднородностей, в том числе модельных ветвей триинговых структур, на максимальное значение напряженности электрического поля в объеме изоляции и соответственно на ее электрическую прочность. Задачи в работе решаются численно методом конечных элементов в программе Comsol [6] в двумерной постановке (в цилиндрической системе координат) для одиночных включений и в

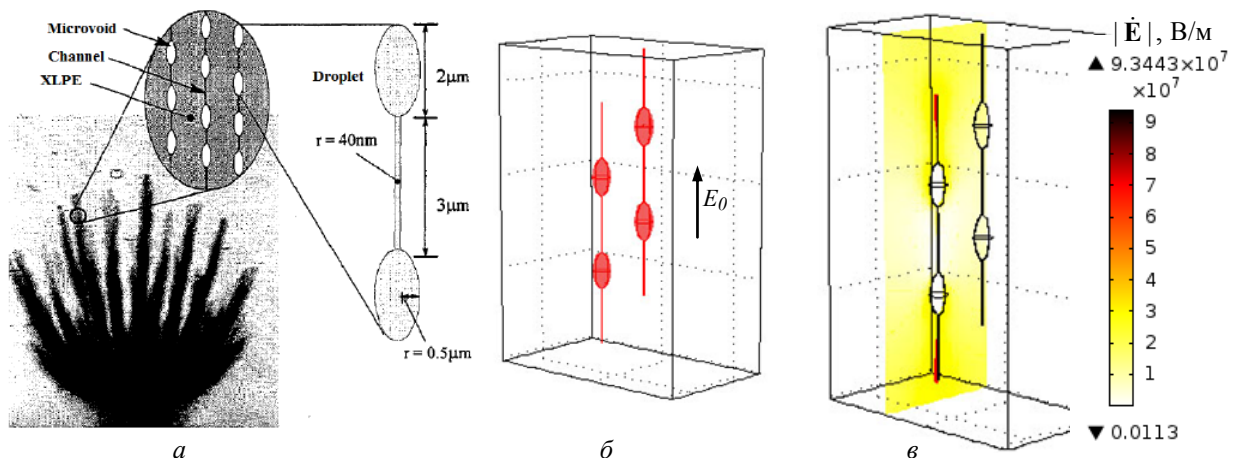


Рис. 1

трехмерных областях выделенного микрообъема изоляции для множественных включений и упрощенных ветвей триинга.

Подходы и модель для исследования. Основные положения и предположения модели следующие. Объем полиэтиленовой изоляции с включениями находится в переменном электрическом поле, изменяющемся по гармоническому закону. Поле рассчитывается в квазиэлектростатическом приближении (при частоте 50 Гц) в пренебрежении объемными электрическими зарядами на основании уравнения относительно электрического потенциала $\dot{\phi}$:

$$\nabla \cdot (\sigma + j\omega\varepsilon_0\dot{\varepsilon}_r)\nabla\dot{\phi} = 0, \quad (1)$$

где ε_0 и $\dot{\varepsilon}_r$ – 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.

В качестве граничных условий задачи (1) задаются: условия нулевого электрического потенциала – $\dot{\phi} = 0$ и равенства потенциала приложенному напряжению U – $\dot{\phi} = U$ на границах расчетных областей, ориентированных вдоль поля. Напряжение U выбирается так, чтобы среднее значение напряженности поля в области составляло $E_0 = 4 \text{ кВ/мм}$. На остальных границах устанавливается условие электрической изоляции $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J} = 0$ (\mathbf{n} – единичный вектор внешней нормали, \mathbf{J} – плотность полного тока). Напряженность электрического поля рассчитывается как $\dot{\mathbf{E}} = -\nabla\dot{\phi}$.

В случае одиночных микродефектов в изоляции выполняется численное решение электрической задачи (1) в двумерной постановке при осесимметричном представлении включений.

Для одиночных непроводящих сферических включений относительно максимального значения напряженности поля $E = |\dot{\mathbf{E}}|_{\max}$ определяется коэффициент усиления электрического поля k :

$$E = k \cdot E_0, \quad \text{где} \quad k = \frac{3\varepsilon_2}{2\varepsilon_1 + \varepsilon_2}, \quad (2)$$

ε_1 и ε_2 – диэлектрическая проницаемость основного материала и включения соответственно (рис. 2).

Рассматриваемый в работе коэффициент k используется при исследовании электрического поля в неоднородных диэлектриках, например, в [11], и показывает увеличение максимального значения поля в (или вблизи) включения в диэлектрике.

В соответствии с выражением (2) можно заметить следующее:

- максимальное поле имеет место в направлении действия электрического поля;
- при увеличении диэлектрической проницаемости включения ε_2 коэффициент усиления поля k увеличивается, а в случае увеличения проницаемости основного материала ε_1 значение коэффициента k уменьшается;
- усиление электрического поля не зависит от радиуса сферического включения.

В общем случае форма, размеры микровключений, их взаимное расположение и концентрация оказывают влияние на распределение и максимальное значение электрического поля

в изоляции на микроуровне [8, 12, 15]. В связи с этим в работе рассматриваются различные множественные включения заданной концентрации и изучается как их взаимное влияние, так и влияние на уровень поля в неоднородном микрообъеме полиэтиленовой изоляции. Для этого проводится трехмерное компьютерное моделирование совокупности различных посторонних включений сферической формы и модельных ветвей триингов в соответствии с моделью из [13], показанной на рис. 1 а. Расчетная модель с фрагментами упрощенных ветвей водного триинга показана на рис. 1 б.

Одиночное включение
в диэлектрике

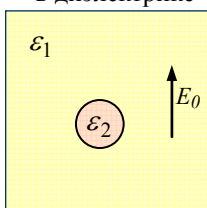


Рис. 2

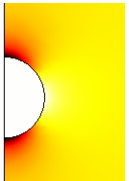
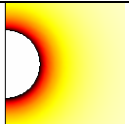
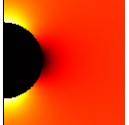
Результаты компьютерного моделирования. Данные для расчетов представлены на рис. 1 а [13] и в табл. 2 [5, 8, 10, 12, 14]. В табл. 2 для различных характерных одиночных включений в полиэтиленовой изоляции показаны максимальные значения напряженности электрического поля вблизи или внутри включений $|\dot{E}|_{\max}$, значения коэффициента усиления поля k , рассчитанные по формуле (2) и численно как $|\dot{E}|_{\max} / E_0$, а также типичные картины электрического поля в окрестности рассматриваемых включений. Для проводящих включений и дефектов, обладающих заметной электропроводностью, значения коэффициента усиления поля k не рассчитывались. Для остальных микродефектов в табл. 2 показана хорошая сходимости численных результатов с аналитической формулой (2). Наибольшие значения поля $|\dot{E}|_{\max}$ характерны для случая металлической частицы в изоляции и частиц с достаточно большой электропроводностью – включений сажи и бумажного волокна. Для них значения $|\dot{E}|_{\max}$ превышают среднюю напряженность электрического поля 10 кВ/мм, установленную для кабелей высокого напряжения (табл. 1). Отметим, что для одиночных сферических проводящих загрязнений в изоляции в соответствии с аналитическими выражениями для составляющих напряженности электрического поля [3] значения $|\dot{E}|_{\max} \leq 3E_0$, что подтверждает правильность численных расчетов.

Картины поля в последнем столбце табл. 2 показывают, что электрическое поле концентрируется в нефтяных включениях–каплях, для которых диэлектрическая проницаемость ниже проницаемости изоляции, тогда как внутри других рассматриваемых дефектов поле практически не проникает, а внутри металлической частицы электрическое поле равно нулю. Наибольшие значения напряженности поля для непроводящих включений с диэлектрической проницаемостью выше, чем у полиэтилена, (например, органических загрязнений) и для включений с достаточно большой электропроводностью (сажи) локализуются в областях вокруг включений, ориентированных вдоль поля.

Результаты расчетов электрического поля в объеме изоляции с двумя модельными ветвями водного триинга (рис. 1 а, б) представлены на рис. 1 в и 3.

На рис. 1 в дано распределение поля $|\dot{E}|$ в сечении расчетной области, проходящем через центр одной из ветвей триинга, показаны наибольшая концентрация и значения поля на концах тонких цилиндрических каналов (рис. 1 в).

Таблица 2

Материал	ε	$\sigma, (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$	$ \dot{E} _{\max}, \text{кВ/мм}$	Значение коэффициента k		Распределение электрического поля $ \dot{E} $
				формула (2)	расчет	
<i>Основной материал изоляции</i>						
Сшитый полиэтилен	2,3	10^{-15}	4	–	–	–
<i>Посторонние одиночные включения</i>						
Термически модифицированный полиэтилен / распространенные органические загрязнения	4,0	10^{-13}	5,62	1,395	1,405	
Оксидированный полиэтилен	2,9	10^{-15}	4,65	1,16	1,163	
Бумажное волокно	2,0	10^{-3}	11,98	–	–	
Сажа	7,0	10	11,9	–	–	
Металл (сталь)	1	$7,1 \cdot 10^6$	11,91	–	–	
Нефть	2,1	10^{-12}	4,128	0,94	1,032	

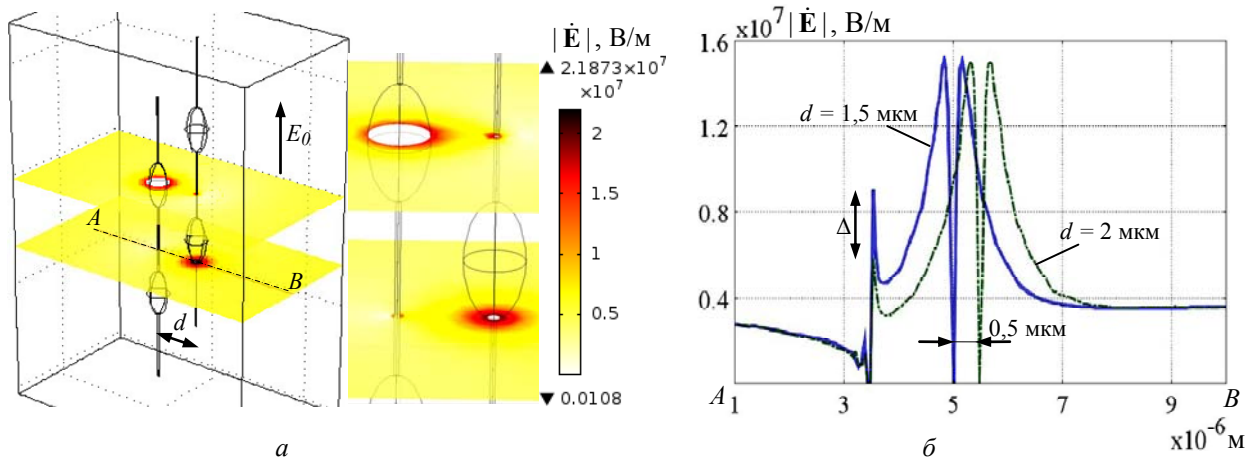


Рис. 3

Рис. 3 а представляет картины напряженности поля $|\dot{E}|$ в двух характерных сечениях расчетной области с упрощенными ветвями триинга и в увеличенном виде – в отдельном фрагменте сечений. На рис. 3 б показано изменение поля вдоль линии AB при различном расстоянии между ветвями: $d = 1,5$ мкм (сплошной линией) и $d = 2$ мкм (пунктирной линией). Вследствие взаимного влияния ветвей при их сближении имеет место увеличение поля на величину Δ на внутренней стороне цилиндрического канала, наиболее близко расположенной к эллипсоидному включению другой ветви. Заметим, что линия AB , отмеченная на рис. 3 а, проходит через зону контакта такого включения с каналом, где напряженность поля достаточно большая.

Исследовано взаимное влияние разнородных микровключений в полиэтиленовой изоляции – нити бумажного волокна и близкорасположенного органического включения в соответствии с микрофотографией полиэтиленовой изоляции, показанной вверху на рис. 4 а [8]. Для такого случая распределение напряженности электрического поля $|\dot{E}|$ в центральном сечении расчетной области и в отдельном его фрагменте представлено на рис. 4 а. На рис. 4 б показано изменение поля вдоль линии AB , соединяющей включения, при различном расстоянии между ними: для $d = 2$ мкм – сплошной линией и для $d = 0,3$ мкм – пунктирной линией. При более близком расположении нити волокна, моделируемого в виде удлиненного цилиндра, к сферическому органическому включению отмечено увеличение напряженности поля на Δ_1 и Δ_2 соответственно на внешней и внутренней сторонах волокна. Тем самым показано проявление взаимного влияния включений, а также более высокие значения поля вблизи включений с достаточно заметными проводящими свойствами. Согласно табл. 2 к таким включениям, кроме бумажного волокна, относятся сажевые загрязнения, для которых $\sigma = 10$ (Ом·м)⁻¹.

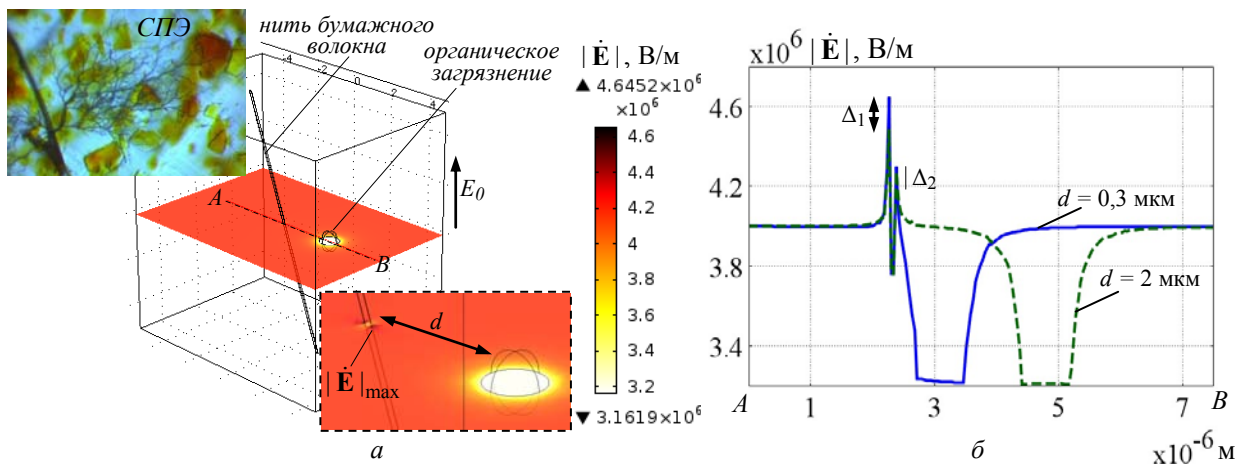


Рис. 4

Сравнение случаев множественных диэлектрических загрязнений и включений с выраженными проводящими свойствами показано на рис. 5. Рассчитаны случаи одинаковых сферических включений различного происхождения с концентрацией $f = 4,77\%$ в одинаковом микрообъеме полиэтиленовой изоляции (рис. 5 а). Распределения электрического поля в двух отдельных сечениях объема изоляции с органическими и сажевыми включениями представлены на рис. 5 б и в соответственно. Как видно, для сажевых включений, обладающих более проводящими свойствами, максимальное значение поля выше и составляет $|\dot{E}|_{\max} \approx 18,7$ кВ/мм. Для множественных сажевых включений это значение более чем в 1,5 раза превышает максимальное поле вблизи одиночного включения сажи ($|\dot{E}|_{\max} = 11,9$ кВ/мм, табл. 2). На рис. 5 б, в показаны также взаимное влияние включений друг на друга и локализация поля не только на их вершинах, ориентированных вдоль поля, но и в зонах между близкорасположенными включениями.

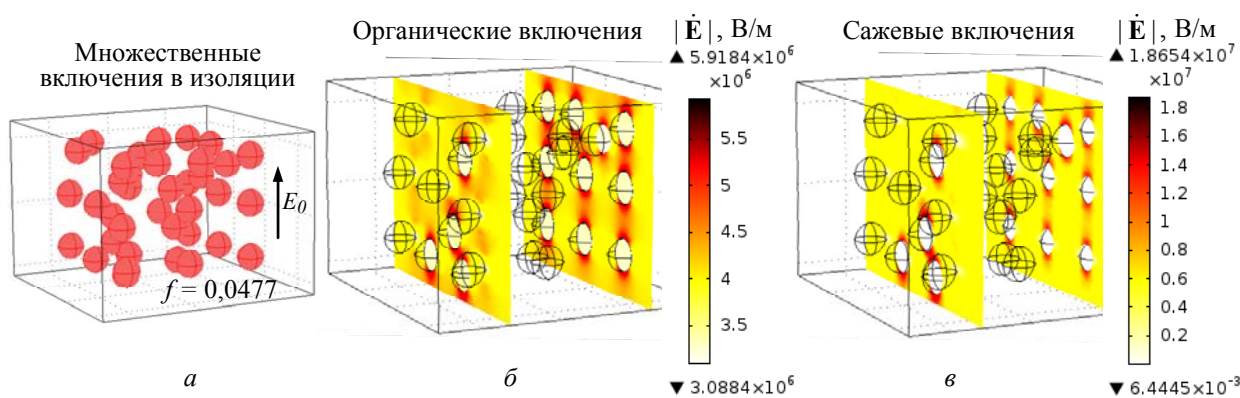


Рис. 5

Заключение. Проведено компьютерное моделирование электрического поля в полиэтиленовой изоляции с различными характерными инородными одиночными и множественными микровключениями, а также модельными ветвями водного триинга. Показана зависимость характера распределения электрического поля в изоляции от электрических свойств материала, формы и взаимного расположения включений.

С позиции выявленного взаимного влияния включений и высоких значений электрического поля, превышающих установленную среднюю напряженность поля, а для металлических частиц и диэлектрическую прочность полиэтилена, объясняется возможность деструктивных процессов в неоднородной изоляции.

Подтверждена необходимость максимально возможной чистоты полиэтиленовой изоляции, в том числе путем тщательного контроля концентрации загрязнений в процессе производства высоковольтных кабелей и соблюдения надлежащих условий эксплуатации.

1. Гук Д.А., Каменский М.К., Макаров Л.Е., Образцов Ю.В., Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю. Новый высоковольтный испытательный центр ОАО "ВНИИКП". Опыт испытаний и исследований силовых кабелей, арматуры и материалов для их производства // Кабели и провода. – 2014. – № 5 (348). – С. 35–42.
2. Ковригин Л.А. Технологические и эксплуатационные дефекты в изоляции кабелей // Кабель-news. – 2008. – № 10. – С. 58–60.
3. Тэнзеску Ф., Крамарюк Р. Электростатика в технике. – М.: Энергия, 1980. – 296 с.
4. Шувалов М.Ю., Ромашкин А.В., Овсиенко В.Л. Анализ дефектов в изоляции силовых высоковольтных кабелей методами видеомикроскопии и микроэксперимента // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 49–57.
5. Электротехнический справочник (в трех томах). Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, В.А. Лабунцова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
6. Comsol multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
7. Doedens E.H., Johansson A.B., Jarvid M., Nilsson S., Bengtsson K.M., Kjellqvist J. Effects of inclusions of oxidized particles in XLPE on treeing phenomena // IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.

- nomena. – Montreal, October 2012. – Annual Report. – P. 597–600. – <http://publications.lib.chalmers.se/publication/165212-effects-of-inclusions-of-oxidized-particles-in-xlpe-on-treeing-phenomena>
8. *Doedens E.H.* Organic contaminants in crosslinked polyethylene for demanding high voltage applications // Diploma Work in the Master programme of Electric Power Engineering. – 2012. – Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. – Report No 83/2012. – 86 p.
 9. *Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H., Ramachadran R.* Long-life XLPE insulated power cable. – JiCable 2007. – http://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf
 10. *Hotta M., Hayashi M., Lanagan M.T., Agrawal D.K., Nagata K.* Complex permittivity of graphite, carbon black and coal powders in the ranges of X-band frequencies (8.2 to 12.4 GHz) and between 1 and 10 GHz // ISIJ International. – 2011. – Vol. 51, No 11. – P. 1766–1772.
 11. *Kim C., Duan J., Huang X., Kim S., Jiang P., Kim H., Hyon S.* Numerical analysis on water treeing deterioration of XLPE cable insulation using combination of FEM and Taguchi method // European Transactions on Electrical Power. – 2010. – No 20. – P. 747–759.
 12. *Kucheriava I.M.* Coupled electrical and mechanical processes in polyethylene insulation with water tree having branches of complex structure // *Technichna Elektrodynamika*. – 2016. – № 5. – P. 5–10.
 13. *Mejia J.C.H.* Characterization of real power cable defects by diagnostic measurements // Thesis for the Degree Doctor of Philosophy. – Georgia Institute of Technology, December 2008. – 267 p.
 14. *Sanchez-Gonzalez J., Macias-Garcia A., Alexandre-Franco M.F., Gomez-Serrano V.* Electrical conductivity of carbon blacks under compression // *Carbon (Elsevier)* – 2005. – Vol. 43. – P. 741–747.
 15. *Shcherba M., Zolotarev V., Belyanin R.* The comparison of electric field perturbations by water inclusions in linear and nonlinear XLPE insulation // Proc. of the 16th Internat. Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). – 2015. – C. 188–191.

УДК 621.315.2 : 004.94

І.М. Кучерява, докт. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Вплив мікродефектів у поліетиленовій ізоляції силових кабелів на розподіл в ній електричного поля

Шляхом дво- та тривимірного комп'ютерного моделювання досліджується електричне поле в поліетиленовій ізоляції з характерними мікророзмірними включеннями – спрощеними гілками водного триїнга, а також органічними, неорганічними, одиночними та численними забрудненнями. Показано посилення електричного поля поблизу сторонніх включень і їх вплив один на одне. Для одиночних включень за чисельними розрахунками та аналітичною формулою розраховано коефіцієнт посилення поля. Виявлено, що характер розподілу поля в ізоляції залежить від електричних властивостей, форми та взаємного розташування мікрівключень. Результати роботи дають змогу розширити знання про причини деструкції поліетиленового матеріалу, що широко використовується для виготовлення ізоляції сучасних високовольтних кабелів. Бібл. 15, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: поліетиленова ізоляція, водний триїнг, сторонні мікрівключення, електричне поле, комп'ютерне моделювання.

I.M. Kucheriava

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

Peremohy, 56, Kyiv-57, Ukraine

The influence of micro-sized defects in polyethylene insulation of power cables on electric field distribution

The electric field distribution in the polyethylene insulation with typical micro-sized inclusions (such as simplified water tree branches, organic and inorganic, single and numerous contaminants) is studied by two- and three-dimensional computer modeling. The local field enhancement near the inclusions and their effect on each other are shown. The field enhancement factor is determined for various single contaminants both by numerical computation and by analytical expression. As revealed, the field distribution in the insulation depends on the electrical properties, shape and relative position of micro-inclusions. The results of the work should help to extend the knowing about the causes of polyethylene destruction as applied to insulation of up-to-date high-voltage power cables. References 15, figures 5, tables 2.

Key words: polyethylene insulation, water treeing, micro-inclusions, contaminants, electric field, computer modeling.

Надійшла 14.02.2017

Received 14.02.2017