

ОСОБЕННОСТИ ЛОКАЛЬНЫХ УСИЛЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРОВОДЯЩИМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ В НЕЛИНЕЙНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Щерба М.А., канд.техн.наук
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: m.shcherba@gmail.com

Исследованы особенности математического моделирования и анализа возмущений электрического поля (ЭП) в полиэтиленовой изоляции возле водных микровключений и триингов при учете ее нелинейных характеристик. Учитывалось, что миграционная поляризация изоляции в сильном ЭП на границе с водными микродефектами может вызывать накопление объемного заряда, достаточного для увеличения напряженности поля до значений, при которых диэлектрическая проницаемость и удельная проводимость изоляции изменяются на несколько порядков и являются функциями напряженности ЭП. Исследованы закономерности изменения максимальных значений напряженности низкочастотного синусоидального ЭП и плотности полного тока в полиэтиленовой изоляции от характерных размеров и формы ее водных включений и выполнено сравнение результатов с аналогичными расчетами в линейных диэлектриках. Библ. 13, рис. 2, табл. 2.

Ключевые слова: электрическое поле, изоляция, микровключение, усиление, напряженность, нелинейность, диэлектрическая проницаемость, плотность тока, проводимость.

Возмущение электрического поля (ЭП) микродефектами в диэлектриках может вызывать его большое локальное усиление. Так, возле острия водных микротриингов и в промежутках изоляции между близко расположенными проводящими микровключениями максимальная напряженность ЭП, ее градиент и плотность полных токов могут увеличиваться в десятки раз, что способствует возникновению в изоляции разрушающих пороговых электрофизических явлений, включая частичные и полные ее электрические пробой [1, 2, 4–13]. Закономерности усиления ЭП проводящими микровключениями разных форм, размеров и взаимных расположений в твердых диэлектриках обоснованы в работах [4–7, 13]. Эти закономерности получены при допущении, что диэлектрическая среда является линейной, т.е. что ее удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость остаются неизменными величинами, не зависящими от напряженности возмущенного (неоднородного) ЭП. Такие линейные свойства диэлектриков проявляются обычно в слабых электрических полях [1].

Современная считая полиэтиленовая (СПЭ) изоляция является неполярным твердым полимерным диэлектриком, большинство длинных молекул которого имеют сильные поперечные электрические (химические) связи, повышающие стойкость материала изоляции к электротермическим и механическим воздействиям [4]. Возмущение ЭП в такой полимерной изоляции вызывает в первую очередь быструю упругую электронную поляризацию ее молекул в течение времени, меньшем 10^{-15} с, при которой электроны смещаются относительно положительно заряженных ядер молекул, образуя связанные пары разноименных зарядов – упругие диполи.

Такая электронная поляризация полиэтиленовой изоляции происходит практически без потерь электроэнергии на ее нагрев. В то же время в полярной среде водных микровключений изоляции одновременно могут протекать электронная упругая и дипольно-релаксационная неупругая поляризация, вызывающая переориентацию диполей в направлении поля и определенные тепловые потери энергии электрического поля [1, 2].

Появление переменного электрического поля в СПЭ изоляции, содержащей различные проводящие микровключения, вызывает электрический ток, удельная плотность которого $J_{\text{полн}}$ является суммой плотностей токов смещения $J_{\text{см}}$ и проводимости $J_{\text{пр}}$ и записывается так [3]

$$J_{\text{полн}} = J_{\text{см}} + J_{\text{пр}} = \sigma E + \partial D / \partial t, \quad (1)$$

где σ – удельная объемная электропроводность материалов, E и D – векторы напряженности и смещения электрического поля.

Поскольку в полиэтилене электроны связаны ковалентной связью типа sp^3 -гибридизации, то они имеют низкую мобильность и при эксплуатационных температурах и напряженностях ЭП не вносят существенного вклада в его удельную электропроводность σ .

Удельная электропроводность полиэтилена носит в основном ионный характер и обусловлена передвижением собственных ионов материала и примесей (при низких температурах перемещаются

слабо закрепленные ионы, а при высоких – термически освобождаемые ионы решетки). Поэтому в слабых электрических полях (при напряженности $E < 20$ кВ/мм) плотность тока проводимости $J_{пр}$ линейно зависит от напряженности поля, а в сильных полях концентрация ионов в полиэтилене сильно возрастает, и при увеличении напряженности $E > 20$ кВ/мм ток проводимости начинает возрастать экспоненциально [2, 10].

Удельная электропроводность σ водных микровключений в СПЭ изоляции также зависит от концентрации в ней примесей и диссоциированных собственных ионов. Поэтому плотность тока в водных микровключениях также линейно зависит от напряженности слабых электрических полей и экспоненциально изменяется в сильном поле [2, 10]. Поэтому учет нелинейных свойств высоковольтной полимерной изоляции и ее водных микровключений позволяет уточнить закономерности возмущения в ней сильных электрических полей, вызывающих ее электродеградацию.

Целью работы является анализ особенностей возмущения сильных электрических полей в сшитой полиэтиленовой изоляции с проводящими микровключениями различных размеров и конфигураций при учете нелинейной зависимости ее удельной электропроводности от напряженности поля.

Накопление пространственного заряда вследствие межфазной поляризации. В работах [8, 9, 11] обосновано, что под воздействием внешнего ЭП в микрообъемах полиэтилена возле острия ветвей водных триингов может накапливаться достаточно большой объемный заряд (ОЗ). Такой ОЗ образуется в результате межфазной (миграционной) поляризации, которая возникает на границе сред, имеющих разные электрические свойства. Такая поляризация вызывает потери электрической энергии внешнего ЭП и обусловлена движением свободных зарядов (электронов или ионов) и их дальнейшим закреплением на поверхностях с различными значениями проводимости и диэлектрической проницаемости, в частности, на границе сшитый полиэтилен – вода.

Согласно работы [11], в сильном ЭП для удельной плотности объемного заряда $q(t)$ в диэлектриках с проводящими включениями (т.е. с пространственно неоднородными диэлектрической проницаемостью ε и удельной проводимостью σ) из уравнений Максвелла и закона сохранения полного тока можно получить линейное дифференциальное уравнение первого порядка в виде

$$q(t) = \sigma E_0 \cdot \nabla(\varepsilon / \sigma) \cos \omega t - (\varepsilon / \sigma) \partial q(t) / \partial t, \quad (2)$$

а для гармонического поля с амплитудным значением E_0 , используя метод интегрирующего множителя, в качестве решения дифференциального уравнения (2) можно получить уравнение

$$q(t) = \nabla(\varepsilon / \sigma) \frac{\varepsilon E_0}{1 + \omega^2 (\varepsilon / \sigma)^2} \left[(\sigma / \varepsilon) \cos \omega t + \omega \sin \omega t - (\sigma / \varepsilon) e^{-\frac{\sigma}{\varepsilon} t} \right]. \quad (3)$$

На границе вода – полиэтилен удельная объемная проводимость среды σ может уменьшаться на 12 порядков – от 10^{-2} до 10^{-14} (См/м), а относительная диэлектрическая проницаемость ε – в 33 раза (от 80 до 2,4) [10], поэтому основное влияние на величину градиента отношения ε/σ и величину накопленного пространственного заряда q в уравнении (3) оказывает изменение величины проводимости σ .

Возникновение объемного заряда на границе диэлектрик – водное микровключение дополнительно усиливает возмущение ЭП в объеме СПЭ изоляции. При таком усилении величина напряженности ЭП может достигать пороговых значений, при которых допущение о линейности параметров изоляции для всех расчетных значений напряженности ЭП будет давать неточный результат.

Анализ нелинейности электрических характеристик диэлектрика. Ранее указывалось, что удельная проводимость полиэтилена имеет преимущественно ионный характер, определяемый внутренним нарушением его структуры точечными дефектами кристаллической решетки или примесями, которые можно описать моделями Френкеля и Шотки. Согласно модели Френкеля ионы, получив достаточную энергию, покидают нормальные положения в решетке и попадают в пространство между закрепленными ионами, т.е. между узлами [1, 2, 10]. При тепловом возбуждении межузельные ионы, преодолевая потенциальные барьеры, "перепрыгивают" из одного межузельного равновесного положения в другое, реализуя протекание электрического тока. Согласно модели Шотки дефекты образуются в результате удаления равного числа анионов и катионов из "нормальных" узлов решетки [1, 2, 10]. Ионы из соседних "нормальных" узлов перемещаются в незанятые (дефектные) узлы, и такие последовательные перемещения ионов также реализуют протекание электрического тока.

Таким образом, перемещение ионов и вакансий в полиэтиленовой изоляции под действием электрического поля можно представить как движение заряженных частиц в периодических потенци-

альных ямах. При наличии ЭП высота потенциального энергетического барьера в направлении поля уменьшается и вероятность "прыжка" иона или вакансии в этом направлении увеличивается.

Используя результаты работ [8, 11] относительно учета изменения вероятности "прыжка" носителя электрического заряда в приложенном сильном электрическом поле для удельной проводимости $\sigma(E)$ твердого диэлектрика, можно записать

$$\sigma(E) = \sigma_{const} \left(\frac{2kT}{eEa} \right) \text{sh} \left(\frac{eEa}{2kT} \right), \quad (4)$$

где $\sigma_{const} = 10^{-14}$ См/м – постоянная проводимость сшитого полиэтилена в слабом ЭП, e – заряд носителя, T – температура, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, a – расстояние между потенциальными энергетическими ямами, которое для полиэтилена составляет порядка 2 нм [8].

На рис. 1 показана зависимость проводимости $\sigma(E)$ полиэтилена от напряженности внешнего поля E при трех температурах слоя изоляции $t = 27, 80$ и 100°C , используя уравнение (4). Как видно из рис. 1, с ростом напряженности E выше значения 20 кВ/м проводимость $\sigma(E)$ начинает экспоненциально возрастать.

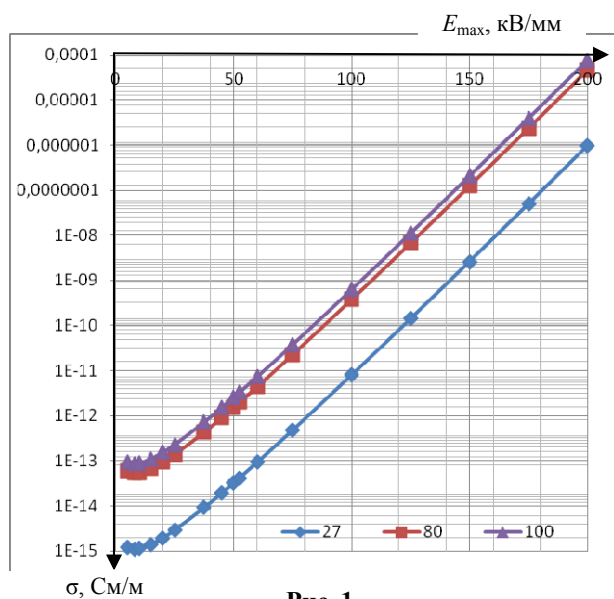


Рис. 1

имеющей гетерогенные проводящие микровключения различной конфигурации. Внешнее ЭП принималось гармоническим, низкочастотным с одинаковой фазой во всех точках среды, и его взаимной связью с магнитным полем пренебрегалось.

С учетом функциональных зависимостей удельной проводимости $\sigma(E)$ и диэлектрической проницаемости $\varepsilon(E)$ полиэтилена от величины напряженности E электрического поля закон сохранения полного тока имеет вид

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot [\sigma(\mathbf{E})\mathbf{E} + \partial\mathbf{D}/\partial t] = 0. \quad (6)$$

Учитывая, что вектор электрического смещения $\mathbf{D} = \varepsilon_0\varepsilon\mathbf{E}$, то каждое из двух слагаемых уравнения (6) можно расписать таким образом:

$$\nabla \cdot \sigma(\mathbf{E})\mathbf{E} = \mathbf{E} \cdot \nabla\sigma(\mathbf{E}) + \sigma(\mathbf{E})\nabla \cdot \mathbf{E}, \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \frac{\partial\mathbf{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \nabla \cdot \varepsilon_0\varepsilon(\mathbf{E})\mathbf{E} = \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{E} \cdot \nabla\varepsilon(\mathbf{E}) + \varepsilon(\mathbf{E})\nabla \cdot \mathbf{E}]. \quad (8)$$

После подстановки уравнений (7) и (8) и выражения для скалярного электрического потенциала φ ($\mathbf{E} = -\nabla\varphi$) в уравнение (6) получим выражение

$$\mathbf{E} \cdot \nabla\sigma(\mathbf{E}) + \sigma(\mathbf{E})\nabla \cdot \mathbf{E} + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} [\mathbf{E} \cdot \nabla\varepsilon(\mathbf{E}) + \varepsilon(\mathbf{E})\nabla \cdot \mathbf{E}] = \nabla\varphi \cdot \nabla\sigma(\mathbf{E}) + \sigma(\mathbf{E})\Delta\varphi + \varepsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} [\nabla\varphi \cdot \nabla\varepsilon(\mathbf{E}) + \varepsilon(\mathbf{E})\Delta\varphi]. \quad (9)$$

Используя значения $\sigma(E)$ и $\varepsilon(E)$ из уравнений (4) и (5), обозначив $A = ea(2kT)^{-1}$ – расчетная константа при постоянной температуре изоляции, выражение (9) преобразовывается в уравнение

Что касается диэлектрической проницаемости ε , то поляризация полиэтилена также является проявлением указанных выше "прыжков" только на более короткие расстояния (в соседние потенциальные ямы), по сравнению с процессами проводимости ("прыжков" на дальние расстояния). Тогда, согласно результатам работ [8, 11], уравнение зависимости диэлектрической проницаемости ε полиэтилена от напряженности поля E можно представить в виде

$$\varepsilon(E) = \varepsilon_{const} \left(\frac{2kT}{eEa} \right) \text{sh} \left(\frac{eEa}{2kT} \right), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{const} = 2,4$ – постоянная диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена в слабом ЭП.

Физико-математическая постановка задачи. При расчете неоднородного распределения электрического поля в СПЭ изоляции высоковольтных кабелей, как и в работах [4–7], диэлектрическая среда считалась кусочно-однородной,

$$\sigma_{const} [\nabla\varphi \cdot \nabla \frac{\sinh A|\nabla\varphi|}{A|\nabla\varphi|} + \frac{\sinh A|\nabla\varphi|}{A|\nabla\varphi|} \Delta\varphi] + \varepsilon_0 \varepsilon_{const} \frac{\partial}{\partial t} [\nabla\varphi \cdot \nabla \frac{\sinh A|\nabla\varphi|}{A|\nabla\varphi|} + \frac{\sinh A|\nabla\varphi|}{A|\nabla\varphi|} \Delta\varphi] = 0. \quad (10)$$

Уравнение (10) в дальнейшем решается численными методами, в частности, методом Ньютона-Рафсона, реализованным в пакете программ Comsol Multiphysics. Расчетная область разбивалась сеткой тетраэдров. Для решения краевой задачи уравнение (10) дополнялось условиями на границе раздела сред проводник – диэлектрик для электрических потенциалов φ и их производных по направлению нормали n к поверхности границы

$$\varphi_1 = \varphi_2, \quad (\sigma_1 + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_1) \partial\varphi_1/\partial n = (\sigma_2 + i\omega\varepsilon_0\varepsilon_2) \partial\varphi_2/\partial n. \quad (11, 12)$$

Для получения единственного решения уравнения (10) на верхней и нижней границах расчетной области дополнительно задавались условия Дирихле (значения потенциалов), а на боковых поверхностях – условия Неймана (равенство нулю производной потенциала по нормали к поверхности, что соответствует отсутствию токов в этих направлениях).

Вектор плотности полного тока $J_{полн}$, представленный в виде суммы векторов токов проводимости $J_{пр}$ и токов смещения $J_{см}$ в диэлектрике и проводящих микродефектах, определялся как

$$J_{полн} = J_{пр} + J_{см} = \sigma(E)E + \frac{\partial D}{\partial t} = -\sigma(E)\nabla\varphi - \frac{\partial\varepsilon(E)}{\partial t} \nabla\varphi - \varepsilon(E) \frac{\partial\nabla\varphi}{\partial t}. \quad (13)$$

Результаты численного эксперимента. Поскольку ранее показано, что в сильном ЭП на изменение его напряженности E и удельной плотности полного тока J_{max} в СПЭ изоляции в основном оказывает влияние изменение ее удельной объемной проводимости σ , то для упрощения расчетов учитывалась только нелинейная функциональная зависимость $\sigma(E)$ и обратное влияние значений σ на величину E . При этом допускалось, что относительная диэлектрическая проницаемость изоляции $\varepsilon \approx const$ для всех расчетных значений E .

Для уточнения интенсивности деградационных процессов СПЭ изоляции с учетом функциональной зависимости удельной проводимости σ от напряженности E были решены задачи:

- определения типа конфигураций микровключений, при которых напряженность ЭП усиливается настолько, что требует использования нелинейной зависимости $\sigma(E)$;
- нахождение минимальных значений напряженности поля E , при превышении которых необходимо учитывать зависимость проводимости σ и плотности полного тока $J_{полн}$ от величины E ;
- определения значений удельной проводимости σ , при превышении которых максимальная напряженность поля E_{max} в полиэтилене возле микровключений начинает изменять свои значения, причем, поскольку изменение величины E_{max} вызывает новое изменение величины $\sigma(E)$, то нужно было решать взаимосвязанную задачу.

Напряженность ЭП в однородной СПЭ изоляции кабелей на напряжения до 330 кВ может превышать 13 кВ/мм [4]. Она зависит от напряжения эксплуатации кабеля, диаметра его токопроводящей жилы, толщины изоляции и объемной однородности материала, из которого она выполнена.

В настоящей работе проводилось исследование неоднородного электрического поля в локальном объеме СПЭ изоляции размерами $200 \times 200 \times 200$ мкм³, в котором среднее значение напряженности ЭП составляло не менее 5 кВ/мм. Принималось допущение, что в изоляции возможно возникновение совокупности взаимно удаленных и близко расположенных водных микровключений различных форм, размеров и взаимного расположения. Допускалось возникновение четырех наиболее характерных форм и взаимного расположения микровключений: удаленной водной микросферы, эллипсоида и сферы с микротриингом на поверхности, а также двух близко расположенных водных микросфер. Близко расположенными принимались сферы, диаметр которых был больше, чем расстояния между ними.

Диаметр водного сферического микровключения принимался равным $D = 50$ мкм. Водное включение типа эллипсоид вращения было вытянуто вдоль силовых линий ЭП таким образом, что две его равные между собой полуоси $2a = 2b = 5$ мкм, а третья полуось вдоль поля $2c = 50$ мкм. Анализировалось также распределение ЭП в СПЭ изоляции возле сферического включения диаметром $D = 50$ мкм с цилиндрическим водным триингом на его поверхности, который имел длину $l = 50$ мкм и радиус $r_1 = 1$ мкм, его вершина была сферически округлена также радиусом $r_2 = 1$ мкм. Два проводящих близко расположенных сферических микровключения имели диаметры $D = 50$ мкм, а расстояние между их полюсами вдоль силовых линий ЭП было равным $l = 1$ мкм.

Определялись максимальные значения напряженности электрического поля E_{max} и плотности полного тока J_{max} в микрообъеме СПЭ изоляции возле полюсов проводящих водных микровключений и острия водных триингов при изменении удельной объемной проводимости полиэтилена $\sigma(E)$ на 10

порядков от 10^{-14} См/м до 10^{-4} См/м. Полученные расчетные результаты приведены в табл. 1.

Согласно данным табл. 1 для каждой конфигурации микровключений величина плотности полного тока J_{\max} в СПЭ изоляции изменяла свое значение, начиная со значения удельной проводимости изоляции, равной $\sigma(E) = 1 \cdot 10^{-9}$ См/м. Согласно теоретическим расчетам и экспериментальным измерениям в работах [8, 11], а также расчетам согласно уравнению (4), такая удельная проводимость полиэтилена наблюдается при напряженности электрического поля $E = 140$ кВ/мм, то есть при его усилении в 28 раз.

Таблица 1

	$\sigma(E)$, См/м	Сфера		Две сферы		Эллипсоид		Сфера с триингом	
		E_{\max} , кВ/мм	J_{\max} , А/м	E_{\max} , кВ/мм	J_{\max} , А/м	E_{\max} , кВ/мм	J_{\max} , А/м	E_{\max} , кВ/мм	J_{\max} , А/м
1	$1 \cdot 10^{-14}$	15	0,097	150	0,96	247	1,58	232	1,48
2	$1 \cdot 10^{-9}$	15	0,098	150	0,97	247	1,6	232	1,5
3	$1 \cdot 10^{-8}$	15	0,18	150	1,77	247	2,93	232	3,3
4	$1 \cdot 10^{-7}$	15	1,52	150	15	247	24,5	230,5	27,9
5	$5 \cdot 10^{-7}$	15	7,56	150	75,3	247	123,5	226	136
6	$1 \cdot 10^{-6}$	15	15,1	150	150	247	245,5	220	265
7	$5 \cdot 10^{-6}$	15	75,5	150	745	243	1205	183,6	1119
8	$1 \cdot 10^{-5}$	15	150,9	149	1490	237	2350	154	1855
9	$5 \cdot 10^{-5}$	14,9	748,5	143	7129	200	9937	76,9	4640
10	$1 \cdot 10^{-4}$	14,8	1482,1	135	13513	168	16636	53,7	6460

Из табл. 1 видно, что минимальное значение проводимости $\sigma(E)$, при котором начинает изменяться величина E_{\max} в диэлектрике, зависит от формы, характерных размеров и взаимного расположения проводящих микровключений. Возле сферы E_{\max} начинает уменьшаться при значении $\sigma(E) = 5 \cdot 10^{-5}$ См/м, возле двух близко расположенных сфер – при $\sigma(E) = 1 \cdot 10^{-5}$ См/м, возле эллипсоида – при $\sigma(E) = 5 \cdot 10^{-6}$ См/м и возле сферы с триингом на поверхности – при $\sigma(E) = 1 \cdot 10^{-7}$ См/м. Такие значения проводимостей σ ха-

рактерны при напряженностях E в СПЭ изоляции, равных 233, 220, 214 и 181 кВ/мм соответственно.

Таким образом, в зависимости от формы, характерных размеров и взаимного расположения водных микровключений удельная проводимость СПЭ изоляции может быть неизменной или функцией напряженности электрического поля. Причем, если значение проводимости $\sigma(E)$ находится в пределах от 10^{-9} См/м до 10^{-7} См/м, наблюдается существенное повышение максимальной плотности полного тока J в изоляции при неизменно высоком значении максимальной напряженности поля E_{\max} .

На рис. 2 показаны закономерности уменьшения напряженности E_{\max} (рис. 2, а) и увеличения плотности тока J_{\max} (рис. 2, б) при увеличении проводимости $\sigma(E)$ полиэтилена (табл. 1).

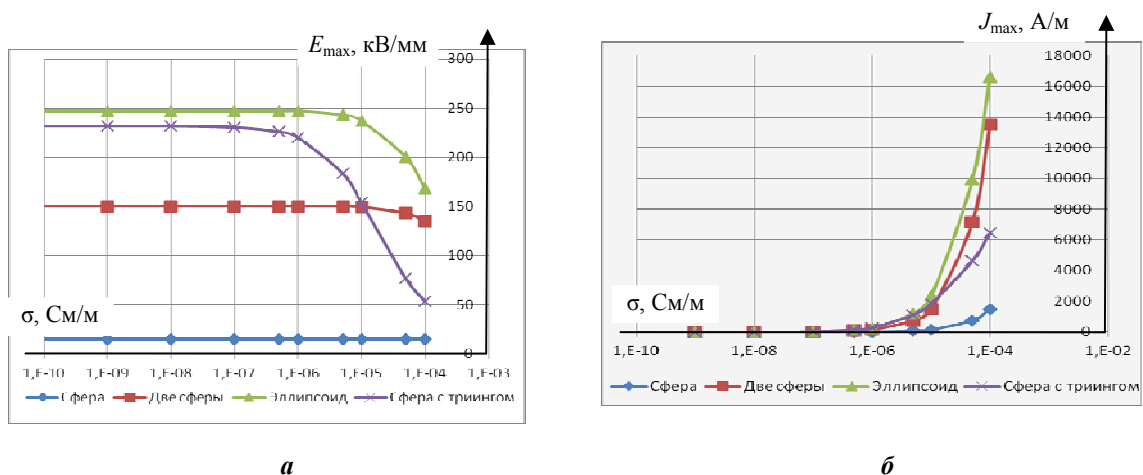


Рис. 2

Видно, что зависимость плотности полного тока J_{\max} в СПЭ изоляции от величины напряженности поля E соответствует закону степенной функции, что согласуется с результатами работ [8–11]. В частности, в работе [10] на основе "прыжковой модели" носителей заряда удельная проводимость σ изоляции при напряженности $E < 20$ кВ/мм считалась пропорциональной E (в соответствии с диффе-

рещиальным законом $\sigma(E)$, а при $E > 20$ кВ/мм - изменяющейся по экспоненциальному закону.

Усиление слабого ЭП лишь увеличивает вероятность движения в направлении поля носителей электрических зарядов между соседними потенциальными "ямами" в полиэтилене. В то же время при напряженности ЭП $E > 20$ кВ/мм энергия носителей зарядов при их перемещении между потенциальными ямами становится сопоставимой с величиной энергии kT (где k – постоянная Больцмана, а T – абсолютная температура, энергия активации полиэтилена 0,98 эВ), что нелинейно увеличивает вероятность носителей зарядов непопадания в потенциальную яму. В этом случае возникает функциональная зависимость проводимости среды σ от напряженности поля E и экспоненциальное увеличение плотности полного тока $J_{\text{полн}}$ в изоляции от значения проводимости $\sigma(E)$ (рис. 2, б).

Сравнение результатов линейной и нелинейной моделей. Результаты анализа локальных возмущений внешнего ЭП средней напряженностью $E_{\text{ср}}=5$ кВ/мм показали, что в СПЭ изоляции возле сферических водных микровключений возникает увеличение напряженности ЭП до $E_{\text{max}}=15$ кВ/мм, что ниже нелинейного порога и не приводит к появлению нелинейной функциональной зависимости $\sigma(E)$. В остальных трех случаях в СПЭ изоляции:

1) между двумя близко расположенными вдоль ЭП водяными сферическими включениями максимальное значение напряженности поля $E_{\text{max}} = 150$ кВ/мм;

2) возле вершины водяного триинга на проводящем сферическом включении $E_{\text{max}} = 207$ кВ/мм;

3) возле полюса водяного вытянутого вдоль ЭП эллипсоидального включения $E_{\text{max}} = 226$ кВ/мм.

Анализ значений табл. 1 и рис. 2, показывает, что появление в СПЭ изоляции водных микровключений, указанных в пунктах 1) – 3), может увеличить исходную напряженность ЭП $E_{\text{ср}}= 5$ кВ/мм до значений, в 7–11 раз превышающих пороговую напряженность $E_{\text{пор}} \approx 20$ кВ/мм, и приводит к необходимости учета нелинейной зависимости удельной проводимости изоляции σ от значений E . Необходимость учета нелинейной зависимости $\sigma(E)$ обосновывается тем, что при увеличении значений E_{max} в 30–45 раз удельная проводимость СПЭ изоляции σ принимает соответственно значения $2,6 \cdot 10^{-9}$ См/м, $4,4 \cdot 10^{-5}$ См/м и $2,66 \cdot 10^{-4}$ См/м, т.е. изменяется на пять порядков и более.

Из табл. 1 и рис. 2 также видно, что поскольку разные формы и конфигурации проводящих микровключений (соответственно сферы, две близко расположенные сферы, сферы с триингом на поверхности и эллипсоиды) в разной степени увеличивают значение E_{max} в СПЭ изоляции, то для каждого из таких включений существует свое значение исходной напряженности $E_{\text{ср}}$ внешнего ЭП, при которой возникает необходимость учета нелинейной зависимости $\sigma(E)$. В общем случае такая необходимость определяется напряженностью $E_{\text{ср}}$ внешнего ЭП в изоляции, а также электрическими характеристиками, формой, размерами и взаимным расположением ее включений [5–7, 13].

Сравнение результатов расчета значений максимальной напряженности E_{max} и плотности полного тока J_{max} в СПЭ изоляции с различными водными включениями (типа двух близко расположенных сфер, эллипсоида и сферы с триингом на поверхности) без учета и с учетом нелинейной зависимости удельной проводимости σ от напряженности поля E приведены в табл. 2.

Таблица 2

Две сферы				Эллипсоид				Сфера с триингом			
$\sigma = 1 \cdot 10^{-14}$ См/м		$\sigma(E) = 2,6 \cdot 10^{-9}$ См/м		$\sigma = 1 \cdot 10^{-14}$ См/м		$\sigma(E) = 2,1 \cdot 10^{-5}$ См/м		$\sigma = 1 \cdot 10^{-14}$ См/м		$\sigma(E) = 2,3 \cdot 10^{-6}$ См/м	
E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м	E_{max} , кВ/мм	J_{max} , А/м
150	0,96	150	1,02	247	1,58	226	4750	232	1,48	207	572

Из табл. 2 видно, что учет нелинейной зависимости $\sigma(E)$ при наличии в СПЭ изоляции водных эллипсоидальных микровключений и сферы с триингом на поверхности позволяет уточнить величину E_{max} на 9 % и 12 %, а также учесть увеличение удельной плотности полного тока J_{max} на 2 – 3 порядка, что гораздо важнее. В то же время для выбранной толщины изоляционного промежутка между двумя водными микросферами учет нелинейной зависимости $\sigma(E)$ мало изменяет значения E_{max} и J_{max} . Это связано с тем, что напряженность ЭП в изоляции была выбрана 5 кВ/мм (как для кабелей на средние напряжения до 35 кВ), но в кабелях на сверхвысокие напряжения (например, на 330 кВ) ее значение возле токопроводящей жилы может достигать и 13 кВ/мм [4]. Тогда значение E_{max} в слое изоляции между выбранными сферическими включениями достигнет значений 300 кВ/мм, что приведет к большим изменениям величин $\sigma(E)$ и J_{max} (причем последней на несколько порядков).

Отметим, что при сложной конфигурации водных микровключений и микротрингов плотности тока в их различных областях могут существенно отличаться. Причем из-за неоднородного распределения индуцированных зарядов на поверхности таких проводящих структур удельные плотности полного тока в локальных областях диэлектрика также могут существенно отличаться, что будет вызывать неоднородную диссипацию электрической энергии и соответственно неоднородную деградацию твердой полимерной изоляции.

Выводы. 1. Вследствие миграционной поляризации на границе раздела твердая полимерная изоляция–водный микродефект накапливается пространственный заряд, который дополнительно усиливает внешнее электрическое поле в локальных микрообъемах изоляции возле проводящих (в частности, водных) микровключений.

При оценке условий электродеградации твердой полимерной изоляции в ее микрообъемах, в которых максимальная напряженность поля превышает пороговое значение (для СПЭ изоляции $E_{\text{пор}} \approx 20$ кВ/мм), а также расчете значений удельной проводимости изоляции σ необходимо учитывать ее нелинейную функциональную зависимость от напряженности внешнего электрического поля и электрических характеристик, формы, размеров и взаимного расположения ее микровключений.

2. Учет нелинейных характеристик $\sigma(E)$ и $\varepsilon(E)$ полиэтиленовой изоляции особенно важен при анализе возмущения электрического поля E и плотности полного тока J в твердой изоляции возле поверхности вытянутых вдоль поля ее проводящих микровключений типа эллипсоидов, близко расположенных включений и включений с водными трингами на поверхности.

Сравнение расчетных значений максимальной напряженности E_{max} и максимальной плотности тока J_{max} в изоляции с учетом зависимости $\sigma(E)$ и без ее учета показало, что:

- при увеличении напряженности поля в СПЭ изоляции до значений $E = 140$ кВ/мм ее удельная проводимость растет от 10^{-14} См/м до 10^{-9} См/м, а величины E_{max} и J_{max} остаются неизменными;

- увеличение напряженности до $E = 140$ кВ/мм и проводимости более $\sigma(E) = 10^{-9}$ См/м приводит к увеличению плотности полного тока в изоляции при неизменной максимальной напряженности поля E_{max} (причем с ростом напряженности поля E значение J_{max} сначала увеличивается линейно, а начиная с порогового значения $E_{\text{пор}} \approx 20$ кВ/мм – согласно экспоненциальному закону);

- значение удельной проводимости СПЭ изоляции $\sigma(E)$, достаточное для уменьшения напряженности E_{max} , лежит в пределах $10^{-7} - 10^{-5}$ См/м и зависит от напряженности внешнего поля и электрических характеристик, формы, размеров и взаимного расположения микровключений (для сферы с трингом на поверхности такое значение проводимости равно 10^{-7} См/м, вытянутого вдоль поля эллипсоида – $5 \cdot 10^{-6}$ См/м, двух близко расположенных сфер – 10^{-5} См/м).

3. При возмущении электрического поля в СПЭ изоляции таким образом, что его напряженности в локальных микрообъемах составляют значения $E = 140 - 180$ кВ/мм, а величина удельной проводимости изоляции $\sigma(E)$ лежит в пределах от 10^{-9} до 10^{-7} См/м, то в ней возможно повышение максимальной плотности полного тока J_{max} на два-три порядка и более при неизменном значении максимальной напряженности поля.

1. Воробьев А.А., Воробьев Г.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков. – М.: Высш. шк., 1966. – 224 с.

2. Иоффе А.Ф., Синельников К.Д., Гохберг Б.М. Высоковольтная поляризация в диэлектриках // Журн. Рус. физ.-хим. общ. Ч. Физическая. – 1926. – Т. 58. – Вып. 2. – С. 105–114.

3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Наука, 1980. – 560 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.: Наш формат, 2013. – 550 с.

5. Щерба М.А. Закономерности распределения электрического поля в диэлектрической среде при изменении размеров и формы проводящих включений // Техн. электродинамика. – 2012. – № 2. – С. 19–21.

6. Щерба М.А. Силовое взаимодействие между близко расположенными проводящими микровключениями в диэлектрической среде во внешнем электрическом поле // Техн. электродинамика. – 2012. – № 3. – С. 11–14.

7. Щерба М.А., Розискулов С.С., Васильева О.В. Зависимость возмущений электрического поля в диэлектрике от дисперсности близко расположенных водных микровключений // Техн. электродинамика. – 2014. – № 4. – С. 17–19.

8. Boggs S.A. A rational consideration of space charge // Electrical Insulation Magazine, IEEE. – 2004. – 20(4). – Pp. 22-27.

9. Kurihara T., Okamoto T., Kim M.H., Hosumi N., Tsuji T., Uchida K. Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded/XLPE Cables Diagnosis // IEEE Transactions on Dielectrics And Electrical Insulation. – 2014. – Vol. 21.1. – Pp. 321–330.

10. Odwyer J.J. The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. – 317 p.

11. Thomas A. and Saha T.K. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model / Proc. of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2006, Missouri, USA. – Pp. 369–372.

12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50 – 54.

13. Shcherba M.A. Dependences of electric field amplification during water tree branching in solid dielectrics // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 46 – 49.

УДК 621.3.01:537.212

ОСОБЛИВОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ПІДСИЛЕНЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ПРОВІДНИМИ ВКЛЮЧЕННЯМИ В НЕЛІНІЙНІЙ ПОЛІМЕРНІЙ ІЗОЛЯЦІЇ

М.А.Щерба, канд.техн.наук

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

E-mail: m.shcherba@gmail.com

Досліджено особливості математичного моделювання та аналізу збурень електричного поля (ЕП) в поліетиленовій ізоляції біля водних мікрровключень і трійнгів при врахуванні її нелінійних характеристик. Враховувалося, що міграційна поляризація ізоляції в сильному ЕП на границі з водними мікрodefектами може викликати накопичення об'ємного заряду, достатнього для збільшення напруженості поля до значень, при яких діелектрична проникність і питомі провідності ізоляції змінюються на декілька порядків і є функціями напруженості ЕП. Досліджено закономірності зміни максимальних значень напруженості низькочастотного синусоїдального ЕП і густини повного струму в поліетиленовій ізоляції від характерних розмірів і форми її водних включень і виконано порівняння результатів з аналогічними розрахунками в лінійних діелектриках.

Бібл. 13, рис. 2, табл. 2.

Ключові слова: електричне поле, ізоляція, мікрровключення, підсилення, напруженість, нелінійність, діелектрична проникність, густина струму, провідність.

THE FEATURES OF THE LOCAL ELECTRIC FIELD AMPLIFICATIONS BY CONDUCTING INCLUSIONS IN NONLINEAR POLYMER INSULATION

M.A.Shcherba

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: m.shcherba@gmail.com

The features of the mathematical modeling and analysis of the electric field (EF) distortion in the polyethylene insulation near the water micro-inclusions and micro-treeing taking into account its non-linear characteristics were studied. It was taken into consideration that the insulation interlayer polarization in a strong EF on the boundary with water micro-defects can cause volume charge accumulation that is sufficient for increase the field strength to values under which the dielectric permittivity and specific conductivity of insulation change in several orders, and they are the functions of EF strength. The regularities of changes of the maximal value of low-frequency sinusoidal EF strength and the total current density in polyethylene insulation depending on the characteristic sizes and shapes of its water inclusions have been studied as well as the results were compared with similar calculations in linear dielectrics. References 13, figures 2, tables 2.

Key words: electric field, insulation, micro-inclusion, amplification, strength, nonlinearity, dielectric permittivity, current density, conductivity.

1. Vorobev A.A., Vorobev G.A. Electrical breakdown and destruction of solid dielectrics. – Moskva: Vysshaya shkola, 1966. – 224 p. (Rus)

2. Ioffe A.F., Sinelnikov K.D., Gokhberg B.M. High-voltage polarization in dielectrics // Jurnal Russkogo fiziko-khimicheskogo obshchestva. Chast Fizicheskaya. – 1926. – Vol. 58. – Issue 2. – Pp. 105–114. (Rus)

3. Landau L.D., Lifshits E.M. Electrodynamics of continua. – Moskva: Nauka, 1980. – 560 p. (Rus)

4. Shydlovskii A.K., Shcherba A.A., Zolotarev V.M., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Cables with polymer insulation on extra high-voltage. – Kyiv: Nash format, 2013. – 550 p. (Rus)

5. Shcherba M.A. Patterns of the electric field distribution in a dielectric medium at changing of sizes and shapes of the conducting inclusions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 2. – Pp. 19–21. (Rus)

6. Shcherba M.A. The force interaction between close placed conducting micro-inclusions in dielectric medium under the external electric field // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – № 3. – Pp. 11–13. (Rus)

7. Shcherba M.A., Roziskulov S.S., Vasileva O.V. Dependence of electric field disturbances in dielectrics on the dispersions of closely spaced water micro-inclusions // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2014. – № 4. – Pp. 17–19. (Rus)

8. Boggs S.A. A rational consideration of space charge // Electrical Insulation Magazine. IEEE. – 2004. – 20(4). – Pp. 22–27.

9. Kurihara T., Okamoto T., Kim M.H., Hosumi N., Tsuji T., Uchida K. Measurement of Residual Charge using Pulse Voltages for Water Tree Degraded. XLPE Cables Diagnosis // IEEE Transactions on Dielectrics And Electrical Insulation. – 2014. – Vol. 21.1. – Pp. 321–330.

10. O'Dwyer J.J. The Theory of Electrical Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics. – Oxford: Clarendon Press, 1973. – 317 p.

11. Thomas A. and Saha T.K. A theoretical investigation for the development of a water tree dielectric response model // Proc. of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2006, Missouri, USA. – Pp. 369–372.

12. Shcherba A.A., Suprunovska N.I. Study features of transients in the circuits of semiconductor discharge pulses generators with nonlinear electro-spark load // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 50 – 54.

13. Shcherba M.A. Dependences of electric field amplification during water tree branching in solid dielectrics // Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, Kyiv, Ukraine. – Pp. 46 – 49.

Надійшла 15.10.2014