

УДК 621.3.01:537.212

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ В СШИТОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ ВБЛИЗИ ВОДНЫХ МИКРОДЕФЕКТОВ ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ

М.А. Щерба, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

e-mail: m.shcherba@gmail.com

Исследованы электромеханические силы, возникающие на полюсах водных микровключений и у острий триингов в сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей в переменном электрическом поле. Методом конечных элементов проведены численные эксперименты по расчету электрического поля и механических напряжений в изоляции, возникающих под действием сил диэлектрофореза со стороны водных микродефектов. Установлены особенности изменения этих напряжений в зависимости от характера распространения дефектов в материал изоляции: конфигурации включений, количества и направлений прорастания ветвей триингов. Определены наиболее опасные совокупности дефектов, вызывающие наибольшие поверхностные силы. Такие силы могут превышать десятки МПа, сопоставимы с пределом механической прочности сшитого полиэтилена и могут приводить к его локальным разрушениям. Механическая усталость материала в сильном электрическом поле в присутствии воды может быть объяснением необратимого старения изоляции сверхвысоковольтных кабелей, которая наблюдается при их длительной эксплуатации. Библ. 11, рис. 7.

Ключевые слова: электрическое поле, СПЭ изоляция, водные микровключения, водные триинги, математическое моделирование, силы диэлектрофореза, механическое напряжение.

Сшитая полиэтиленовая (СПЭ) изоляция широко применяется в современном электроэнергетическом оборудовании. Кроме ряда преимуществ ее недостатком является необратимая деградация во внешнем сильном электрическом поле (ЭП), которая приводит к ухудшению диэлектрических свойств изоляции и со временем к частичным и полным пробоям с выходом электрооборудования из строя [3]. Основной причиной деградации СПЭ изоляции считается появление в ней проводящих микродефектов, которые в присутствии влаги становятся центрами образования тонких разветвленных водных структур – триингов [7, 9]. Такие микродефекты сильно возмущают ЭП в изоляции высоковольтных и сверхвысоковольтных кабелей с усилением поля в локальных микрообластях (у полюсов микровключений и острия ветвей триингов) [4]. В таком существенно неоднородном ЭП на водные нано- и субмикронные включения действуют электрические силы, в результате воздействия внешнего поля с зарядами, индуцированными на поверхности включений (силы диэлектрофореза) [2]. В результате такого воздействия в переменном поле водные микродефекты будут создавать пульсирующие поверхностные силы на материал твердого диэлектрика, вызывая механические напряжения в его структуре [5, 11]. Такие напряжения у полюсов вытянутых вдоль поля дефектов могут быть сопоставимы с пределом механической прочности СПЭ изоляции, а значит, со временем приводить к появлению субмикронных трещин. В трещины может втягиваться вода за счет сил диэлектрофореза и капиллярных эффектов. Таким образом, наибольшее количество воды скапливается в микрообластях сильных ЭП возле проводящих микродефектов, которые и становятся центрами триингообразования.

При исследовании локальных усилений поля в диэлектрике с проводящими микродефектами наиболее сложной задачей являются определение закономерностей таких усилений в зависимости от конфигурации дефектов и определение деградиционных механизмов материала. Согласно результатам последних исследований [3, 11] важно учитывать не только размеры отдельных микровключений, но и их форму, ориентацию относительно поля, а также наличие других микровключений на близких взаимных расстояниях и их взаимное расположение. Так, согласно современным требованиям к качеству СПЭ изоляции для кабелей на высокие и сверхвысокие напряжения регламентируются не только максимальные допустимые размеры микровключений, но и их предельная концентрация [3].

В работах [3, 5, 11] рассчитываются возникающие электромеханические силы для дефектов характерных конфигураций. Однако конфигурация водных включений и триингов в диэлектрике может меняться в процессе эксплуатации кабелей. Причем процесс развития дефектов имеет положительную обратную связь, т.е. становится все более интенсивным, ускоряясь по мере увеличения объемов деградированной изоляции. Так, вода, втягиваясь в микрообласть повышенной напряженности ЭП, образует "облако" близко расположенных включений, между которыми со временем появляются тонкие каналы. По мере их заполнения водой, микровключения в "облаке" объединяются в единую разветвленную проводящую структуру, которая, в свою очередь, еще больше усиливает ЭП, что приводит к возрастанию сил диэлектрофореза и втягиванию еще больше воды в эту область. Это увеличивает размеры дефектов, и такой процесс имеет лавинообразный характер с возрастающей скоростью.

В то же время в работах [3, 4] показано, что к дополнительным усилениям поля приводят лишь группы дефектов, ориентированные вдоль его силовых линий. А близко расположенные включения, перпендикулярные ЭП, наоборот, его ослабляют. Результаты экспериментальных исследований работы [11] демонстрируют замедление и даже полную остановку роста триинга при его разветвлении перпендикулярно полю. Эти исследования дают возможность предположить, что различия в конфигурации микродефектов оказывают существенное влияние на электрофизические процессы, возникающие в СПЭ изоляции, и этот вопрос требует дополнительных исследований.

Поэтому целью данной работы является расчет электромеханических сил, возникающих на полюсах водных микровключений и у остриев триингов в сшитой полиэтиленовой изоляции сверхвысоковольтных кабелей в переменном электрическом поле, а также установление особенности изменения этих сил в зависимости от характера распространения дефектов в материал изоляции.

Физико-математическая постановка задачи. Рассчитывалось распределение ЭП в твердом диэлектрике (сшитой полиэтиленовой изоляции) кабеля на напряжение до 330 кВ. Напряженность ЭП в СПЭ изоляции вблизи токопроводящей жилы таких кабелей равняется 10–13 кВ/мм [3]. Моделирование поля проводилось в микрообласти диэлектрика цилиндрической формы высотой 200 мкм и диаметром 150 мкм, к которой приложено синусоидальное напряжение 2 кВ частотой 50 Гц (см. рис. 1), т.е. средняя напряженность поля равнялась $E_{cp} = 10$ кВ/мм. Учитывалось наличие в изоляции водных микровключений эллипсоидальной формы с различным соотношением полуосей, а также водных триингов с различным количеством и длиной ветвей. Такая конфигурация дефектов является характерной для СПЭ изоляции, где размеры дефектов варьируются от нескольких микрон до 50 мкм – предельно допустимого значения согласно существующим требованиям.

Среды считались однородными, изотропными и линейными при $E_{cp} < 20$ кВ/мм. При $E_{cp} \geq 20$ кВ/мм учитывалась зависимость удельной электропроводности СПЭ изоляции $\sigma(E)$ от напряженности ЭП E согласно экспериментальным и теоретическим данным в [6, 10]. Согласно разработанной в этих работах модели зависимость $\sigma(E)$ представлялась следующим выражением:

$$\sigma(E) = \sigma_{const} \left(\frac{2kT}{aeE(t)} \right) \operatorname{sh} \left(\frac{aeE(t)}{2kT} \right), \quad (1)$$

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

Учитывая, что ЭП низкочастотное, задача

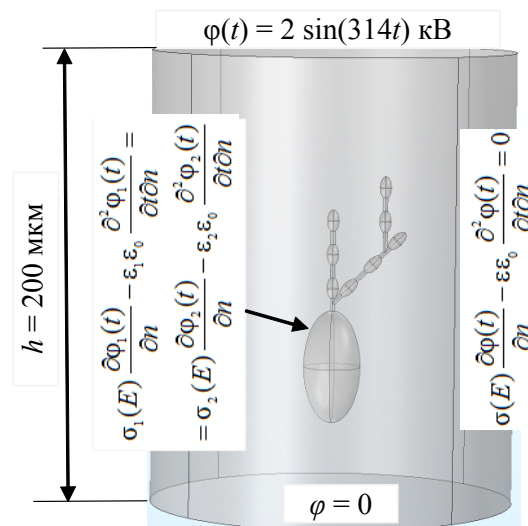


Рис. 1

формулювалась в квазістатическому приближенні згідно системи рівнянь Максвелла [1].

Розрахункове рівняння для скалярного електричного потенціалу $\varphi(t)$ ($\mathbf{E}(t) = -\text{grad } \varphi(t)$), як і в [2, 4], записувалося в вигляді

$$\text{div} \left[\sigma(E) \text{grad } \varphi(t) - \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \text{grad } \varphi(t)}{\partial t} \right] = 0, \quad (2)$$

де $\sigma(E)$, ε – відповідно електрична провідність і діелектрична проникність серед.

Рівняння (2) доповнювалося умовами на границях розрахункової області, представленої на рис. 1: на верхній і нижній границях – заданням значень потенціалів $\varphi(t)$, а на бокових границях – рівністю нулю похідних потенціалів $\varphi(t)$ по нормалі \mathbf{n} к поверхності. На границі розділа "вода–СПЭ ізоляція" задавалися умови

$$\sigma_1(E) \frac{\partial \varphi_1(t)}{\partial n} - \varepsilon_1 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_1(t)}{\partial t \partial n} = \sigma_2(E) \frac{\partial \varphi_2(t)}{\partial n} - \varepsilon_2 \varepsilon_0 \frac{\partial^2 \varphi_2(t)}{\partial t \partial n}, \quad (3)$$

т.е. рівність нормальних компонентів густоти повного струму: $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{J}_{\text{полн.1}}(t) - \mathbf{J}_{\text{полн.2}}(t)) = 0$.

Розрахунковий інтервал часу Δt дискретизувався, і рівняння (2) розв'язувалося методом кінцевих елементів для всіх моментів t_i з урахуванням нелінійної залежності, визначеної згідно виразу (1). Аналізувалися діючі значення розрахованих часових функцій. Розв'язок реалізовано в пакеті Comsol Multiphysics [8].

Для розрахунку електромеханічних поверхневих сил $\mathbf{f}_s(t)$, що виникають на границі розділа "провідник–діелектрик" під дією зовнішнього ЕП, використовувався тензор напружень Максвелла $\hat{T}(t)$ [1]:

$$\mathbf{f}_s(t) = \hat{T}(t) \cdot \mathbf{n} = \left[\frac{1}{2} (\mathbf{D}(t) \cdot \mathbf{E}(t)) \hat{I} - \mathbf{D}(t) \otimes \mathbf{E}(t) \right] \cdot \mathbf{n}, \quad (4)$$

де \hat{I} – одиничний тензор; \otimes – дїадне (тензорне) добутковий; $\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$.

Результати чисельного експерименту. На розробленій математическій моделі проводилося розрахунок електричних сил \mathbf{f}_s (максимальних значень за період) з боку різних мікровключень і триінгів на СПЭ ізоляцію. На першому етапі розглядалися окремі "мелкі" мікровключення на близьких взаємних відстанях, орієнтовані вздовж ЕП і під кутом к нему, що знаходяться в полі "великого" також еліпсоїдального мікровключення (рис. 2). Така конфігурація моделює етап деградації СПЭ ізоляції, при якому вода втягується в області сильних полів і накопичується в вигляді групи ("хмара") близько розташованих включень (етап перед утворенням гілок триінга).

В якості прикладу моделювалися дві трійки включень (включення № 2, 3 і 4 орієнтовані вздовж ЕП, а включення № 5, 6 і 7 під кутом 45° к нему), кожне з яких мало форму еліпсоїда обертання з піввісьми $2,5 \times 2,5 \times 5$ мкм. Відстання між полюсами включень становило 5 мкм, а відстань цих трійок включень від "великого" еліпсоїда № 1 з піввісьми $1,25 \times 12,5 \times 25$ мкм становило 5 мкм.

Результати чисельного експерименту по розрахунку виникаючих сил \mathbf{f}_s показані на рис. 2, де вектори демонструють їх локалізацію, напрямлення і величину. Найбільші значення сил \mathbf{f}_s приймають (одиниці МПа) на полюсах мікровключень.

Розподіл скалярної величини $f_s = |\mathbf{f}_s|$ по поверхності груп включень № 2, 3, 4 і № 5, 6, 7 показані на графіках рис. 3. На рис. 3 а сплошні, пунктирні і точкові лінії відповідають включенням № 2, 3 і 4, а на рис. 3 б – включенням № 5, 6

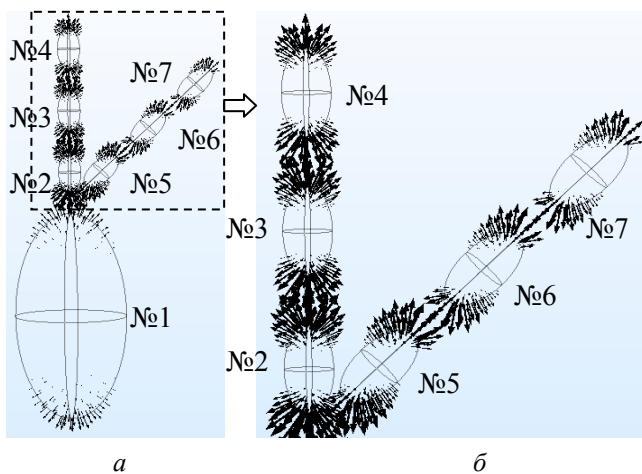


Рис. 2

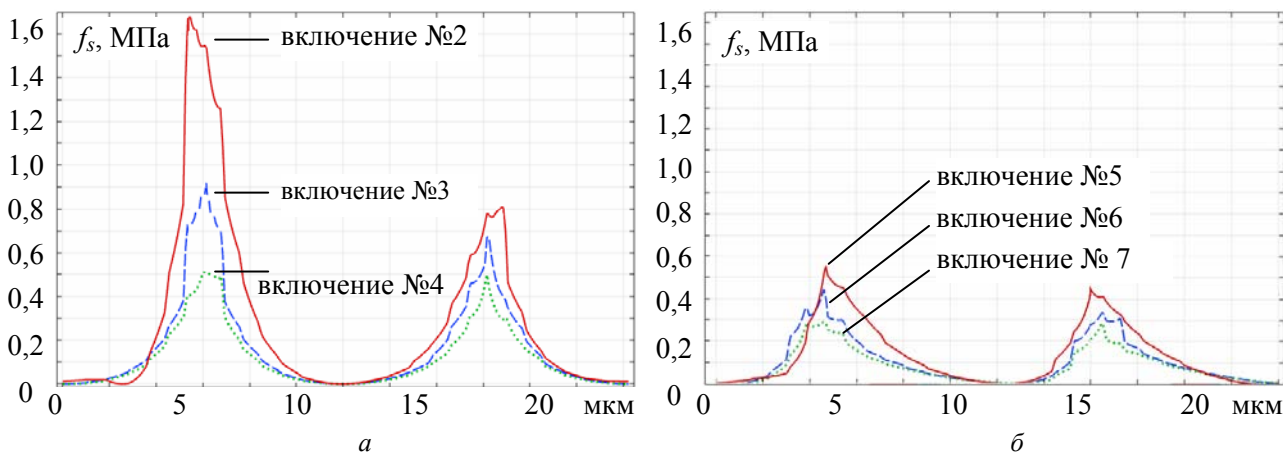


Рис. 3

и 7. Максимальная сила $f_{s \max 2} = 1,7$ МПа наблюдается у полюса включения № 2, наиболее близкого к полюсу "крупного" включения № 1. У полюса включения № 5 $f_{s \max 5} = 0,55$ МПа.

Отметим, что, попадая в возмущенное поле вблизи включения № 1, у полюсов включений № 2, 3, 5 и 6 дополнительно возрастает напряженность ЭП и, как следствие, сила f_s . Так, если включение № 1 отсутствует, то величина $f_{s \max}$ у полюсов тройки включений вдоль поля составляет порядка $f_{s \max} = 0,5$ МПа, а у включений под 45° к нему – $f_{s \max} = 0,3$ МПа. При наличии включения № 1 за счет дополнительных возмущений величины $f_{s \max}$ у полюсов включений № 2, 3, 5 и 6 возрастают до значений $f_{s \max 2} = 1,7$ МПа, $f_{s \max 3} = 0,9$ МПа, $f_{s \max 5} = 0,55$ МПа и $f_{s \max 6} = 0,45$ МПа соответственно. Также влияние "крупного" включения отражено в несимметричности распределения сил у полюсов (большая высота пиков слева, чем справа на графиках рис. 3 а и б).

На втором этапе исследований рассматривалось объединение "мелких" микровключений между собой и соединение их с "крупным" включением тонкими водными каналами. Такая ситуация моделирует образование водного триинга на поверхности включения № 1. Форма, размеры и взаимные расстояния включений остались неизменными, а каналы триинга имели диаметр 2 мкм и длину 5 мкм.

Распределение сил f_s вблизи дефектов такой конфигурации показано на рис. 4. Распределения величины f_s по поверхности всех шести "мелких" включений показаны на графиках рис. 5, где сплошная, пунктирная и точечная линии соответствуют включениям № 4, 3, 2 (рис. 5 а) и № 7, 8, 9 (рис. 5 б).

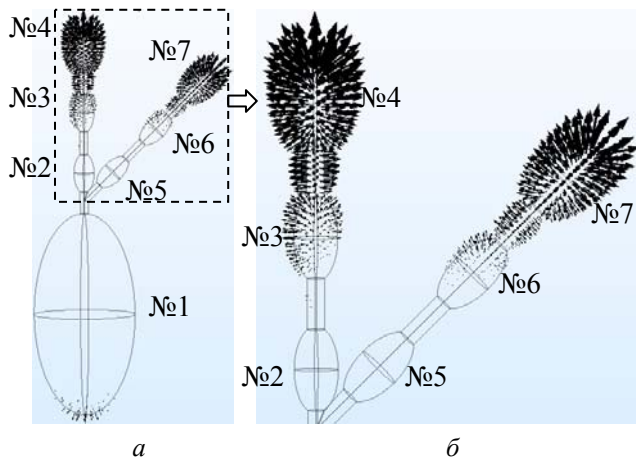


Рис. 4

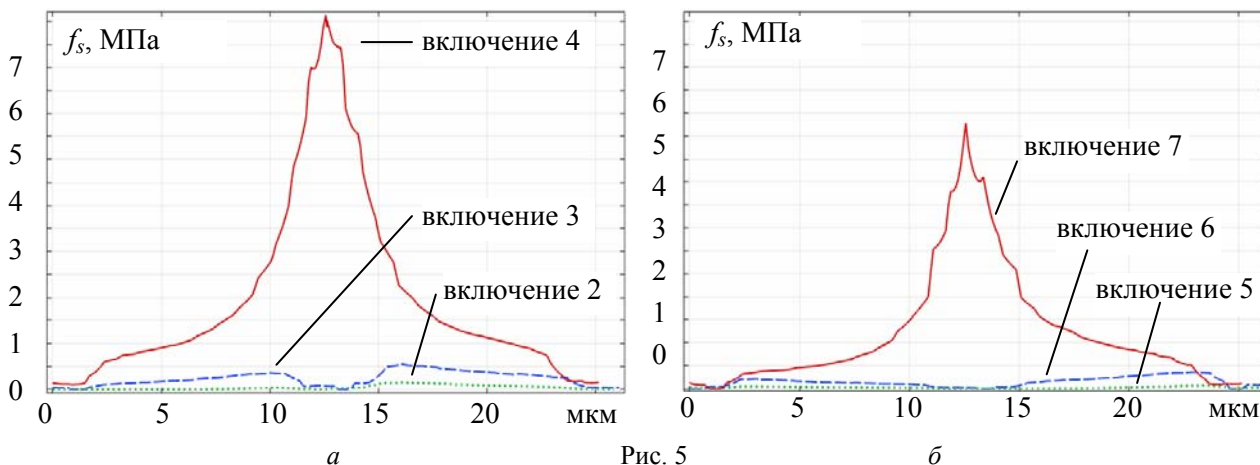


Рис. 5

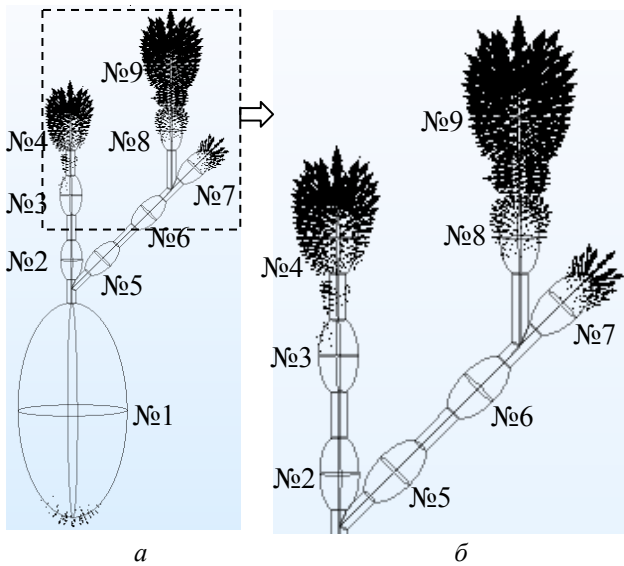


Рис. 6

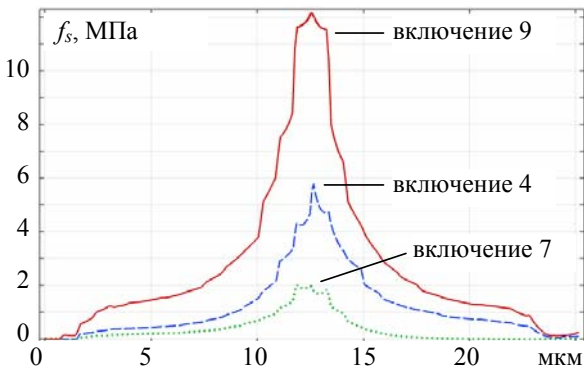


Рис. 7

Ветвление триинга приводит к дальнейшему увеличению максимальных сил в СПЭ изоляции. Так, $f_{s \max}$ наблюдается у полюса включения № 9 и равняется $f_{s \max 9} = 11,5$ МПа, что больше максимальных сил в первом и втором численных экспериментах в 6,8 раза и в 1,4 раза соответственно. Распределения величины f_s у полюсов крайних включений ветвей триинга показано на рис. 7, где сплошная, пунктирная и точечная линии соответствуют включениям № 4, 7 и 9.

Выводы. 1. В процессе образования и развития водного триинга в СПЭ изоляции сверхвысоковольтных кабелей возрастают механические напряжения, возникающие в результате действия электромеханических поверхностных сил f_s со стороны водных микродефектов. Каждый новый этап (втягивание водных микровключений в область сильного поля, их объединение водными каналами в единый триинг, увеличение количества его ветвей) увеличивает величину максимальной силы $f_{s \max}$ у полюсов включений. Для рассматриваемой конфигурации дефектов $f_{s \max}$ возросло от 1,7 МПа для отдельных включений до 8,15 МПа при образовании триинга и 11,5 МПа при его ветвлении.

2. Область наибольших поверхностных сил меняет свою локализацию при развитии дефектов в изоляции. В случае отдельных "мелких" включений в поле одного "крупного" наибольшие силы возникают у наиболее близких к нему полюсов "мелких" включений (у полюсов внутренних включений группы). При объединении дефектов в единый триинг наибольшие силы возникают у полюсов внешних включений. А при дальнейшем ветвлении триинга у острия наиболее длинной его ветви, направленной вдоль поля.

3. Возникающие силы сопоставимы с пределом механической прочности СПЭ изоляции и могут приводить к появлению микротрещин материала, которые со временем будут заполняться водой. Механическая усталость шитого полиэтилена в сильном электрическом поле в присутствии воды может быть объяснением необратимого старения изоляции сверх-

Анализируя результаты моделирования, можно заключить, что максимальная сила возникает уже возле полюса включения № 4, а не возле включения № 2, как в предыдущем случае, и равняется $f_{s \max 4} = 8,15$ МПа. Полученные значения в 4,8 раза выше, чем максимальная сила у не объединённых включений. Также существенно возрастает сила у полюса включения № 7 – $f_{s \max 7} = 5,75$ МПа. Такой объединённый микродефект возмущает ЭП как единая проводящая структура, где максимальные напряженности и силы возникают у полюсов крайних включений, в то время как силы у поверхности внутренних включений № 2, 3, 5 и 6 остаются на уровне 0,45 – 0,50 МПа (пунктирная и точечная линии на рис. 5).

И на третьем этапе исследований рассматривалось возможное развитие триинга, связанное с увеличением количества его ветвей при втягивании новых микровключений в область сильного ЭП. Моделировалась ситуация появления дополнительной третьей ветви, состоящей из двух водных микровключений и соединяющих их каналов, как показано на рис. 6. Анализируя длины и распределение векторов, можно заключить, что наибольшие силы f_s возникают у полюсов крайних включений № 4, 7 и 9.

высоковольтных кабелей, которая наблюдается при их длительной эксплуатации.

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. 4-е изд. Москва: Физматлит. 2003. 560 с.
2. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2015. 304 с.
3. Шидловский А.К., Щерба А.А., Золотарев В.М., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Кабели с полимерной изоляцией на сверхвысокие напряжения. Киев: Институт электродинамики НАН Украины, 2013. 550 с.
4. Щерба М.А. Особенности локального усиления электрического поля проводящими включениями в нелинейной полимерной изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2015. № 2. С. 16–23.
5. Щерба М.А. Влияние электропроводности водных триингов на плотности токов и давлений, возникающие в полиэтиленовой изоляции. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 14–16.
6. Boggs S.A. Semi-empirical high-field conduction model for polyethylene and implications thereof. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995. Vol 2.1. P. 97–106.
7. Burkes K.W., Makram E.B., Hadidi R. Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*. 2015. Vol. 2(2). P. 53–62.
8. Comsol Inc. Burlington, MA. <https://www.comsol.com>, 2017.
9. Kurihara T., Okamoto T., Hozumi N., Miyajima K., Uchida K. Evaluation of relationship between residual charge signal and AC breakdown strength of water-tree degraded XLPE cables removed from service using. *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2017. Vol. 24(1). P. 656–665.
10. Tokoro T., Nagao M. and Kosaki M. High Field Dielectric Properties and ac Dissipation Current Waveforms of Polyethylene Film. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. 1992. Vol. 27. No. 3. P. 482–487.
11. Wang W., Tao W., Ma Z., Liu J. The mechanism of water tree growth in XLPE cables based on the finite element method. *IEEE Intern. Conf on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Chengdu (China). 2016. P. 1–4.

УДК 621.3.01:537.212

М.А. Щерба, канд. техн. наук

Институт электродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03057, Україна

Розрахунок електромеханічних сил у зшитій поліетиленовій ізоляції кабелів біля водних мікрodefектів при їх поширенні

Досліджено електромеханічні сили, що виникають на полюсах водних мікрodefектів і біля вістря триінгів в зшитій поліетиленовій ізоляції надвисоковольтних кабелів у змінному електричному полі. Методом кінцевих елементів проведено чисельні експерименти з розрахунку механічних напружень у ізоляції, які виникають під дією сил діелектрофорезу з боку водних мікрodefектів. Встановлено особливості зміни цих напружень в залежності від характеру поширення дефектів у матеріал ізоляції: конфігурації включень, кількості і напрямків проростання гілок триінгів. Визначено найбільш небезпечні сукупності дефектів, які викликають найбільші поверхневі сили. Такі сили можуть перевищувати десятки МПа, є співставними з межею механічної міцності зшитого поліетилену і можуть призводити до локальних руйнувань матеріалу. Механічна втома матеріалу в сильному електричному полі в присутності води може бути поясненням незворотного старіння ізоляції надвисоковольтних кабелів, яка спостерігається при їх тривалій експлуатації. Бібл. 11, рис. 7.

Ключові слова: електричне поле, ЗПЕ ізоляція, водні мікрodefекти, водні триінги, математичне моделювання, сили діелектрофорезу, механічне напруження.

M.A. Shcherba

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

Calculation of electromechanical forces in XLPE cable insulation near water micro-defects during their distribution

Electromechanical forces arising at the poles of water micro-inclusions and at the tips of trees in cross-linked polyethylene insulation of ultra-high-voltage cables in an alternating electric field are studied. The finite element method was used to carry out the numerical experiments on the calculation of electrical field and mechanical stresses in the insulation arising under the action of dielectrophoresis forces as the result of influence of electric field on the water microdefects. The features of the change in these stresses are determined depending on the nature of the distribution of the defects in the insulation material: the configuration of inclusions, the number of the branches of the trees and directions of its germination. The most dangerous configurations of defects that cause the greatest local stresses are determined. These stresses can exceed tens of MPa and they are comparable to the ultimate mechanical stress limit for cross-linked polyethylene and therefore they can lead to local destruction of the material. Mechanical fatigue of the material in a strong electric field in the presence of moisture can be a reason of the irreversible aging of the insulation of ultrahigh-voltage cables, which is observed during their long-term operation. References 11, figures 7.

Key words: electric field, XLPE insulation, water micro-inclusions, water trees, mathematical modeling, dielectrophoresis forces, mechanical stress.

Надійшла 26.01.2018

Received 26.01.2018