

А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ КООКСИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ

Виконано вимірювання в діапазоні частот 50 кГц – 20 МГц тангенсу кута діелектричних втрат зразків силового та радіочастотного коаксіального кабелів в початковому стані та після зволоження в умовах 100% вологості. Після старіння встановлено появу додаткових релаксаційних максимумів для суцільної термореактивної та термопластичної поліетиленової ізоляції, що обумовлена групуванням вільної води в кластери відповідної форми та фрактальної розмірності. Для кабелів зі спіненою термопластичною ізоляцією в початковому незістареному стані притаманно прояв релаксаційних втрат за рахунок наявності води, розташованої в повітряних включеннях. Встановлено додатний кореляційний зв'язок між шириною смуги релаксаційних максимумів та швидкістю зменшення опору ізоляції від прикладеної високої постійної напруги. Бібл. 10, рис. 7.

Ключові слова: водні тринги, зволоження кабелів, суцільна та спінена поліетиленова ізоляція, тангенс кута діелектричних втрат, кластери води, релаксаційні максимуми.

Выполнены измерения в диапазоне частот 50 кГц – 20 МГц тангенса угла диэлектрических потерь образцов силового и радиочастотного коаксиального кабелей в исходном состоянии и после увлажнения в условиях 100% влажности. После старения установлено появление дополнительных релаксационных максимумов для сплошной термореактивной и термопластичной полиэтиленовой изоляции, что обусловлено группированием свободной воды в кластеры соответствующей формы и фрактальной размерности. Для кабелей со вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляцией в не состаренном состоянии присуще проявление релаксационных потерь за счет наличия воды в газообразных включениях. Установлена положительная корреляция между шириной полосы релаксационных максимумов и скоростью уменьшения сопротивления изоляции от приложенного высокого постоянного напряжения. Библ. 10, рис. 7.

Ключевые слова: водные тринги, увлажнение кабелей, сплошная и вспененная полиэтиленовая изоляция, тангенс угла диэлектрических потерь, кластеры воды, релаксационные максимумы.

Введение. Наличие свободной влаги в силовых кабелях приводит к образованию древовидных структур, – водных трингов (рис. 1) [1-7], которые зарождаются в аморфной фазе полиэтилена, т.е. по границам зерен-кристаллитов (рис. 2), и являются одной из главных причин деструкции полимерной изоляции. Водные тринги – повреждения полимера размером от нескольких микрон (рис. 1, 2) до 1 мм, развивающиеся на технологических дефектах изоляции при совместном действии электрического поля и влаги, диффундирующей из окружающей среды. Вместе с влагой в изоляцию проникают агрессивные вещества. Они разрушают полимерные цепи, приводя к образованию микрополостей, заполненных влагой.

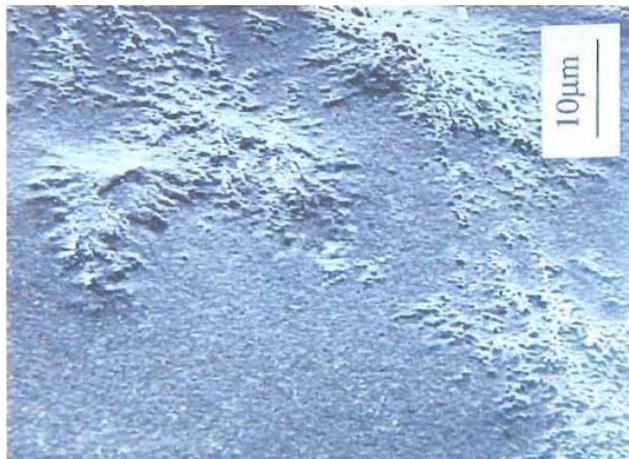


Рис. 1. Фотография зарождающихся водных трингов в сшитой полиэтиленовой изоляции силового кабеля, полученная с помощью силового электронного микроскопа [4]

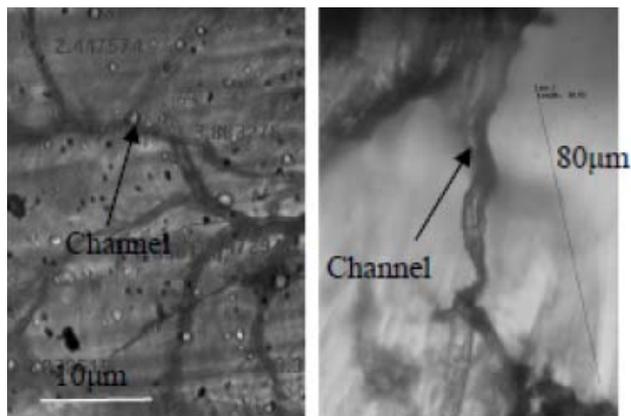


Рис. 2 [6]

Электрическая прочность изоляции в области трингов существенно снижается, что повышает напряженность на неповрежденной части изоляции и ускоряет процесс роста тринга [5]. Старение в условиях эксплуатации или испытаний при повышенной температуре (90 °С) выражено гораздо слабее, чем при низких температурах (20 – 40 °С): водные тринги растут менее интенсивно. Динамика развития водных трингов и их тонкие свойства в значительной мере зависят от состава, морфологии полимерной изоляции, химической природы дефектов, на которых они зарождаются.

Постановка проблемы. Водные тринги количественно могут быть описаны в рамках концепции фрактальной размерности, т.е. величины, характеризующей геометрическое строение стохастических объектов [8, 9]. Современные представления в этой

области связаны с тем, что большинство стохастических природных структур обладают так называемой скейлинговой симметрией (масштабной инвариантностью): выглядят одинаково при различных увеличениях (рис. 3). С помощью алгоритма построения стохастических фракталов с использованием системы итерированных функций возможно моделирование сложной фрактальной структуры водных триингов в полимерной изоляции кабелей.

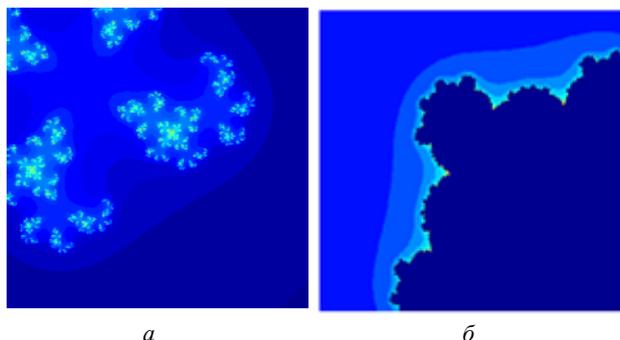


Рис. 3. Результаты построения классических фракталов Жюлиа (а) и Мальденброта (б) в среде Matlab

В соответствии с релаксационной теорией Диссадо – Хилла [10] за счет сил притяжения в жидкостях (воде) образуются области с локально-упорядоченной структурой – кластеры, структура, состав и значение энергии химических связей между молекулами в которых зависит от типа жидкости и твердой среды, в которой она находится. В каждой из жидкости существуют основные, типичные для нее, кластеры, которые и определяют ее строение.

В двухуровневой модели релаксация группы атомов или молекул (кластера) связана с переходами из одного минимума в другой для двух вариантов ориентации, соответствующих минимумам на потенциальной кривой (рис. 4).

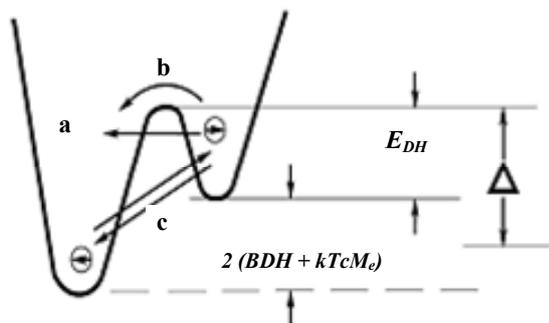


Рис. 4. Энергетическая схема двухуровневой системы: а – процесс, связанный с вращательными и колебательными внутримолекулярными колебаниями, б – внутрикластерный активационный релаксационный процесс, с – межкластерный процесс синхронного обмена молекулами

Разница в значениях энергии между этими двумя минимумами, т.е. высота барьера, который преодолевается при синхронном обмене молекулами между соседними кластерами, в явном виде записывается

$$\Delta\varphi = 2(B_{DH} + kT_c M_e),$$

где k – постоянная Больцмана, T_c – критическая характеристическая температура (температура фазового перехода, например, температура стеклования),

M_e – единичный вектор продольной составляющей дипольного момента кластера

$$M_e = \tanh\left(\frac{B_{DH} + kT_c M_e}{kT}\right).$$

Степень структурной упорядоченности средне-статистического кластера минимального размера характеризуется параметром $0 \leq n_{DH} \leq 1$. При $n = 0$ кластеры не образуются и корреляция между процессами переориентации молекул отсутствует. При $n = 1$ кластеры имеют кристаллическую структуру, в которой процессы переориентации молекул полностью скоррелированы. Кластеры в свою очередь входят в состав межкластерных образований, степень структурной упорядоченности в которых определяется параметром $1 - m_{DH}$, причем $0 \leq m_{DH} \leq 1$. Крайние значения $m_{DH} = 0$ и $m_{DH} = 1$ соответствуют идеальной кристаллической решетке и жидкости с идеальным гидродинамическим течением.

Для кластерной модели Диссадо – Хилла дисперсия относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon^*(\omega)$ описывается уравнением

$$\frac{\varepsilon^*(\omega) - \varepsilon_{\infty DH}}{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty DH}} = \left(1 + \frac{i\omega}{\omega_p}\right)^{n-1} \frac{{}_2F_1\left[1-n, 1-m; 2-n; \left(1 + \frac{i\omega}{\omega_p}\right)^{-1}\right]}{{}_2F_1(1-n, 1-m; 2-n; 1)},$$

где $\varepsilon_{\infty DH}$ – высокочастотный предел области дисперсии, обусловленный вкладом поляризации быстрых видов поляризации (ионного и электронного смещения) и высокочастотного процесса релаксации, ${}_2F_1[\dots]$ – Гауссовские гипергеометрические функции.

Приведенное уравнение соответствует уравнению Дебая при $n = 0$, $m = 1$, $\omega_p = \tau_D^{-1}$. Максимум диэлектрических потерь ε'' наблюдается при $\omega = \omega_p$ только в случае $n = m$.

При каждом значении температуры существует распределение кластеров по форме и размерам, которым соответствует среднеквадратический квадрат

$$\left\langle \mu_c^2 \right\rangle.$$

Цель статьи – исследование особенностей проявления релаксационных потерь в высокочастотном диапазоне в полиэтиленовой изоляции при старении образцов силового и радиочастотного кабелей в условиях повышенной влажности.

Тестовые объекты. В качестве тестовых объектов использовались образцы кабелей коаксиальной конструкции.

1. Новый силовой кабель напряжением 35 кВ в однопольном исполнении с сечением алюминиевой жилы 95 мм² со сшитой (терморективной) полиэтиленовой изоляцией, полупроводящими экранами по жиле и изоляции, медным экраном. Конструктивная особенность – наличие полупроводящих гидрофильных водоблокирующих лент, обеспечивающих радиальную защиту кабеля от влаги.

2. Радиочастотный кабель РК-50 с двухслойной термопластичной полиэтиленовой изоляцией без дополнительной радиальной защиты от влаги. Кабель

в течение 5 лет находился в помещении, причем концы кабеля не были герметизированы защитными термоусаживающимися колпачками.

3. Новый радиочастотный кабель ЕН-4 (РК-75) с термопластичной вспененной полиэтиленовой изоляцией без дополнительной радиальной защиты от влаги.

4. Радиочастотный кабель RG-6 (РК-75) с термопластичной вспененной полиэтиленовой изоляцией с защитой от влаги в исходном (до эксплуатации) состоянии в виде гидрофобного желе после эксплуатации в течение 10 лет.

Динамика изменения релаксационных потерь в процессе увлажнения. Тестовые образцы нового силового кабеля и кабеля РК-50 подвергнуты старению в условиях повышенной влажности комнатной температуры в течение 1440 часов (2-х месяцев). В исходном состоянии и после старения выполнены измерения тангенса угла диэлектрических потерь в диапазоне частот 50 кГц – 20 МГц куметром ВМ 560 резонансным методом (рис. 5).

Для образцов радиочастотных кабелей ЕН-4 и RG-6 со вспененной изоляцией измеренные частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь представлены на рис. 6.

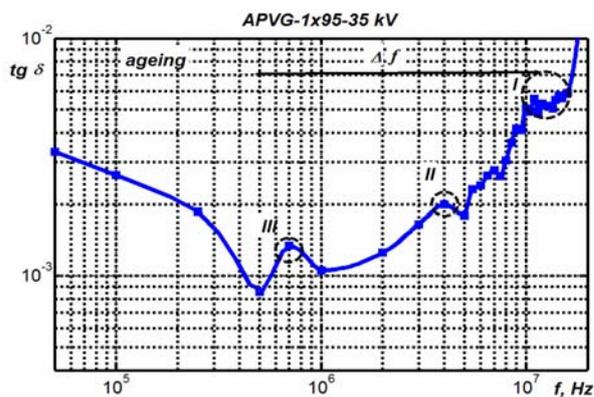
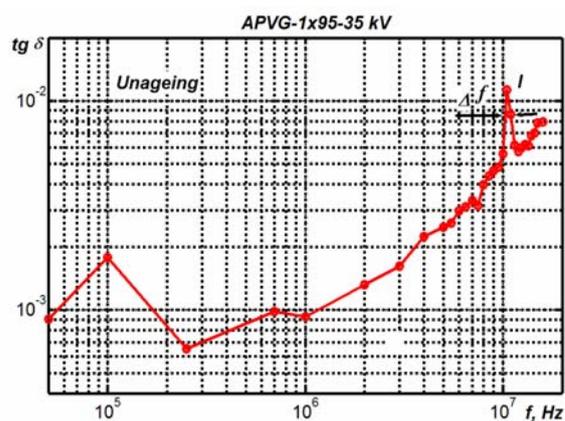
Анализ частотных зависимостей показывает, что имеет место проявления общих закономерностей релаксационных потерь в кабелях. Так, для силового кабеля с терморезактивной и радиочастотного кабеля РК-50 с термопластичной полиэтиленовой изоляцией (рис. 5) как в исходном состоянии, так и после старения характер частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь – идентичен.

В исходном состоянии проявляется релаксационный максимум I, ширина которого Δf косвенно связана с количеством влаги в изоляции: в новом силовом кабеле количество остаточной свободной влаги значительно меньше, чем в кабеле РК-50, который длительное время находился в естественных условиях. После старения на частотных зависимостях появляются дополнительные релаксационные максимумы II и III, связанные с переориентацией полярных молекул воды в образовавшихся новых кластерах разной формы и размеров.

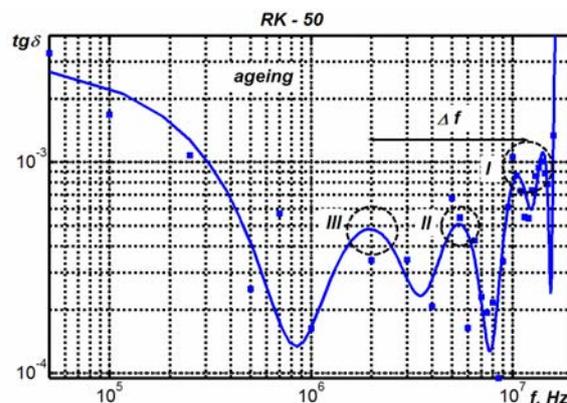
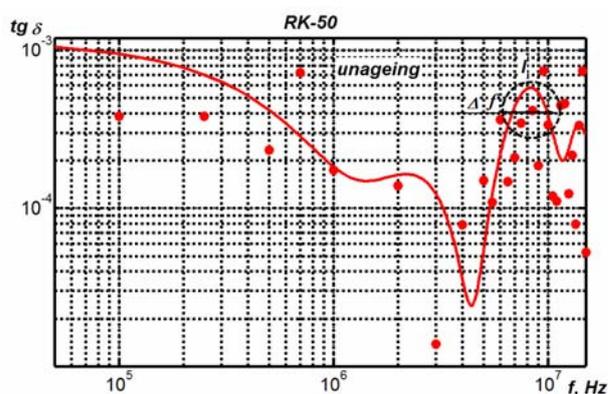
В новом кабеле ЕН-4 (см. рис. 6,а) имеет место три характерных релаксационных максимума, связанные с проявлением дипольной поляризации воды в кластерах разной формы и размера. В структуре вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляции существуют газообразные включения, которые заполняются водой, как в исходном состоянии, так и в процессе эксплуатации (см. рис. 6,б).

Корреляция между шириной спектра дипольных максимумов и сопротивлением изоляции.

На рис. 7 представлены результаты измерений сопротивления изоляции образцов силового кабеля (кривые 1 и 1') и радиочастотного РК-50 (кривые 2 и 2') в зависимости от приложенного постоянного напряжения: кривые 1 и 2 – исходное состояние, кривые 1' и 2' – после увлажнения.

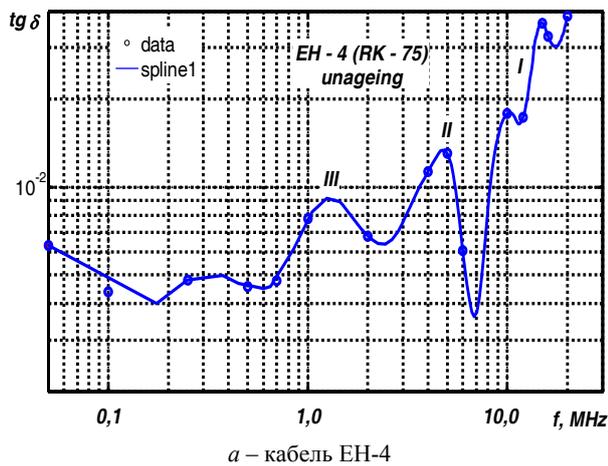


а – силовой кабель с терморезактивной полиэтиленовой изоляцией (верхний рисунок – исходное состояние, нижний – после увлажнения)

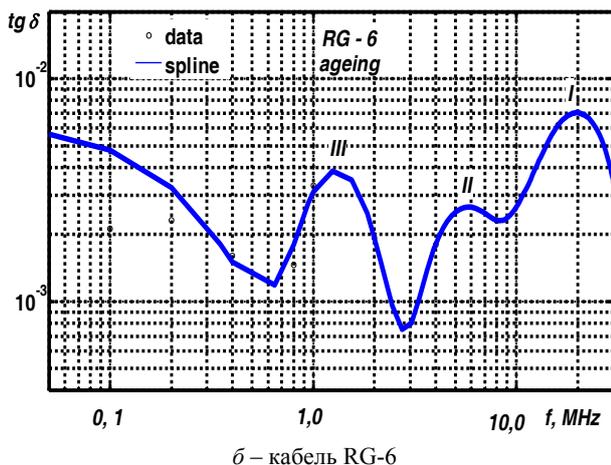


б – радиочастотный кабель с термопластичной полиэтиленовой изоляцией (верхний рисунок – исходное состояние, нижний – после увлажнения)

Рис. 5. Динамика изменений тангенса угла диэлектрических потерь в образцах кабелей в процессе увлажнения



а – кабель EH-4



б – кабель RG-6

Рис. 6. Частотная зависимость тангенса угла диэлектрических потерь радиочастотных кабелей со вспененной термопластичной полиэтиленовой изоляцией

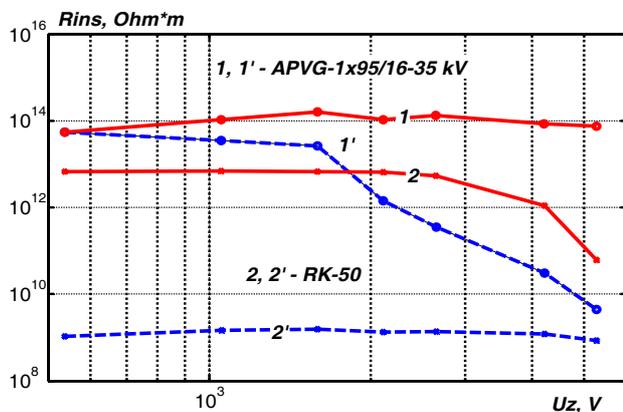


Рис. 7

В исходном состоянии сопротивление изоляции силового кабеля слабо зависит от приложенного напряжения (рис. 7, кривая 1). Ширина спектра Δf релаксационного максимума I (рис. 5,а, верхний рисунок) – мала. Для радиочастотного кабеля РК-50 в исходном состоянии ширина спектра Δf релаксационного максимума I (рис. 5,б, верхний рисунок) – значима (около 6 МГц), что и обуславливает уменьшение сопротивления изоляции в 10 раз при увеличении напряжения в 10 раз (с 500 до 5000 В) (рис. 7, кривая 2).

После старения для силового кабеля (рис. 7, кривая 1') наблюдается сильно выраженная зависимость сопротивления изоляции от приложенного напряже-

ния: при увеличении напряжения в 10 раз сопротивление изоляции уменьшилось в 10000 раз. Ширина полосы спектра Δf релаксационных максимумов I – III (рис. 5,а, нижний рисунок) – возросла практически в 20 раз.

Для кабеля РК-50 ширина спектра Δf релаксационных максимумов I – III (см. рис. 5,б, нижний рисунок) – возросла только в 6 раз, и, как результат, сопротивление изоляции после увлажнения практически не зависит от напряжения. Для напряжения 5 кВ сопротивление изоляции после старения уменьшилось в 100 раз относительно исходного состояния. Очевидно, что в термопластичной полиэтиленовой изоляции формируются кластеры воды с близкими фрактальными размерами.

Выводы.

Таким образом, экспериментально нашло подтверждение существования в полимерной изоляции кабелей свободной воды в виде областей с локально-упорядоченной структурой – кластеров.

В диапазоне проведенных измерений 50 кГц – 20 МГц установлено, что в сплошной полиэтиленовой изоляции на частотных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь проявляется один релаксационный максимум на частоте 10 МГц в исходном состоянии и появляются дополнительные пики в спектре частот 500 кГц – 5 МГц после увлажнения. Для терморезактивной (сшитой) полиэтиленовой изоляции характерна большая ширина Δf спектра частот, в котором наблюдаются релаксационные потери. Очевидно, что ширина каждого из релаксационных максимумов связана с характерным фрактальным размером кластера.

Важно, что в увлажненной сплошной и вспененной полиэтиленовой изоляции проявляются индивидуальные, типичные только для воды, кластеры, обнаруживаемые по высокочастотным релаксационным дипольным максимумам тангенса угла диэлектрических потерь.

Наблюдается положительная корреляция между шириной полосы Δf релаксационных максимумов и скоростью уменьшения сопротивления изоляции от приложенного высокого постоянного напряжения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Bellet J., Matey G., Rose L., Rose V., Filippini J., Poggi Y., Raharimalala V. Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers // IEEE Trans. Elect. Insul. – 1987. – vol.EI-22. – no.2. – pp. 211-217. doi: 10.1109/tei.1987.298884.
2. Ciuprina F., Teissèdre G., Filippini J.C. Polyethylene crosslinking and water treeing // Polymer. – 2001. – vol.42. – no.18. – pp. 7841-7846. doi: 10.1016/s0032-3861(01)00264-6.
3. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory // IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul. – 2002. – vol.9. – no.4. – pp. 483-497. doi: 10.1109/tdei.2002.1024425.
4. Kato T., Yamaguchi T., Komori F., Kawahara T., Hidaka T., Suzuoki Y. Influence of structural change by AC voltage prestressing on electrical-tree inception voltage of LDPE with water-tree degradation // 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Montreal, Canada: IEEE. – 2012. – pp. 847-850. doi: 10.1109/ceidp.2012.6378913.

5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М. Электрический транспорт полярных молекул воды в неоднородном электрическом поле полимерной изоляции высоковольтных кабелей // *Технічна електродинаміка*. – 2010. – №5. – С. 3-9.
6. Priya S., Mubashira Anjum A. Analysis of water trees and characterization techniques in XLPE cables // *Indian Journal of Science and Technology*. – 2014. – vol.7(S7). – pp. 127-135.
7. Шувалов М. Ю., Маврин М. А. Теоретическое и экспериментальное исследование водных трингов типа «бант» // *Кабели и провода*. – 2002. – №1. – С. 44-50.
8. Mandelbrot B.B. *Fractals: form, chance and dimension*. – San Francisco: Freeman, 1977.
9. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions // *Journal of Applied Physics*. – 1989. – vol.66. – no.6. – pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
10. Dissado L.A., Hill R.M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy // *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 1983. – vol.390. – no.1798. – pp. 131-180. doi: 10.1098/rspa.1983.0125.

REFERENCES

1. De Bellet J., Matey G., Rose L., Rose V., Filippini J., Poggi Y., Raharimalala V. Some aspects of the relationship between water treeing, morphology, and microstructure of polymers. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 1987, vol.EI-22, no.2, pp. 211-217. doi: 10.1109/tei.1987.298884.
2. Ciuprina F., Teissède G., Filippini J.C. Polyethylene crosslinking and water treeing. *Polymer*, 2001, vol.42, no.18, pp. 7841-7846. doi: 10.1016/s0032-3861(01)00264-6.
3. Dissado L.A. Understanding electrical trees in solids: from experiment to theory. *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, 2002, vol.9, no.4, pp. 483-497. doi: 10.1109/tdei.2002.1024425.
4. Kato T., Yamaguchi T., Komori F., Kawahara T., Hidaka T., Suzuoki Y. Influence of structural change by AC voltage prestressing on electrical-tree inception voltage of LDPE with water-tree degradation. *2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Montreal, Canada: IEEE, 2012, pp. 847-850. doi: 10.1109/ceidp.2012.6378913.
5. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N., Zolotarev V.M. Electric transport of polar water molecules in an inhomogeneous electric field of polymer insulation high-voltage cables. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodynamics*, 2010, no.5, pp. 3-9. (Rus).
6. Priya S., Mubashira Anjum A. Analysis of water trees and characterization techniques in XLPE cables. *Indian Journal of Science and Technology*, 2014, vol.7(S7), pp. 127-135.
7. Shuvalov M.Y., Mavrin M.A. Theoretical and experimental research water treeing type of «bow». *Kabeli i provoda – Cables and wires*, 2002, no.1, pp. 44-50. (Rus)
8. Mandelbrot B.B. *Fractals: form, chance and dimension*. – San Francisco: Freeman, 1977.
9. Dissado L.A., Hill, R.M. The fractal nature of the cluster model dielectric response functions. *Journal of Applied Physics*, 1989, vol.66, no.6, pp. 2511-2524. doi: 10.1063/1.344264.
10. Dissado L.A., Hill R.M. A cluster approach to the structure of imperfect materials and their relaxation spectroscopy. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1983, vol.390, no.1798, pp. 131-180. doi: 10.1098/rspa.1983.0125.

Поступила (received) 28.12.2015

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Кессаев Александр Геннадиевич¹, аспирант,
¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,
тел/phone +38 057 7076010,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, A.G. Kyessayev¹
¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Relaxations losses in polyethylene insulation of coaxial cable structure during aging in high humidity conditions.

Introduction. The presence of free moisture in power cables leading to the formation of tree structures - water treeing, which originate in the amorphous phase polyethylene and are a major cause of degradation of the polymer insulation. They represent the damage of the polymer size from several microns to 1 mm, developing technology for insulation defects under the combined action of the electric field and the moisture diffusing from the environment. Water treeing destroys the polymer chain, resulting in the formation of microcavities filled with moisture. The dynamics of water treeing and subtle properties largely depend on the composition, morphology of the polymer insulation, chemical nature of the defect, in which they originate. Due to the force of gravity in the water formed typical only for her region with locally ordered structure - clusters, which cause loss of relaxation. **Purpose.** Features presence of relaxation losses in high-frequency range in polyethylene insulation during aging in high humidity conditions of samples power and RF cables. **Methodology.** Samples of the power cable for the voltage of 35 kV with a cross-linked polyethylene insulation radial water-blocking protection from moisture and radio-frequency coaxial cable with thermoplastic insulation for 1440 hours in a humidity of 100%. The dielectric loss tangent measured resonance method before and after aging. **Originality.** Experimentally found evidence of the existence in the polymer cable insulation free water in the form of areas with locally ordered structure - clusters. It is found that the solid polyethylene insulation in the frequency dependence of dielectric loss tangent maximum relaxation shown one at 10 MHz in the initial state, and there are two additional frequency range 500 kHz - 5 MHz after moistening. For cross-linked polyethylene insulation characteristic of large width Δf of the frequency spectrum in which the observed relaxation losses. It is obvious that the width of each of the relaxation maxima is associated with characteristic fractal cluster size. It is important that the hydrated solid and foamed polyethylene insulation to show individuality, typical only for water clusters which are detected by high-frequency dipole relaxation peaks dielectric loss tangent. There is a positive correlation between the bandwidth Δf of relaxation maxima and the rate of decrease of insulation resistance by applying a high DC voltage. **Practical value.** Establishing a correlation between the bandwidth of relaxation maxima and the rate of decrease in the insulation resistance test objects in the laboratory makes it possible to diagnose the presence of free moisture in the power and RF cables by measuring the insulation resistance in exploitation. References 10, figures 7.

Key words: water treeing, moisturizing cables, solid and foamed polyethylene insulation, dielectric loss tangent, water clusters, relaxation peaks.