

С.В.ЛАКТИОНОВ, аспирант, НТУ «ХПИ»

**ПОРОГОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ**

Виконано розрахунки напруги початку часткових розрядів в кабелях високої напруги зі зшитою поліетиленою ізоляцією. Встановлені рівні випробувальної напруги, при яких активізуються повітряні порожнини максимально можливого розміру.

Выполнены расчеты напряжения начала частичных разрядов в кабелях высокого напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена. Установлены уровни испытательных напряжений, при которых активизируются воздушные полости максимально допустимого размера.

Полимерная изоляция на основе сшитого полиэтилена чувствительна к посторонним микровключениям, пустотам, выступам на электропроводящих экранах, расслаиваниям изоляции и другим дефектам, которые повышают локальную напряженность электрического поля и создают предпосылки для возникновения частичных разрядов (ЧР). Под действием ЧР в полимерной изоляции развиваются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя. Развитие дендритов приводит к быстрой деградации изоляции и, в конечном итоге, к преждевременному пробоему кабеля [1 – 4]. В кабелях высокого напряжения средняя напряженность электрического поля в 3 раза выше, чем в кабелях среднего напряжения. Поэтому требования к однородности изоляции в таких кабелях более высокие (Таблица 1).

Таблица 1- Требования к однородности изоляции кабелей

| Параметр  | Кабели среднего напряжения 6 – 35 кВ | Кабели высокого напряжения 35 – 200 кВ |
|---|--------------------------------------|--|
| Средняя напряженность электрического поля, E, кВ/мм   | 2                                    | 6                                      |
| Размер недопустимых примесей, мкм   | > 200                                | >100                                   |
| Примеси, подлежащие контролю, мкм   | 100 – 200                            | 70 - 100                               |
| Максимально допустимая концентрация примесей, подлежащих контролю, шт/ кг   | 3                                    | 10                                     |
| Максимальный размер воздушной полости в толще изоляции в соответствии со стандартом S-94-649-2004 (ANSI/ ICE, США), мкм | 76                                   | 51                                     |

Цель статьи – установить усредненные пороговые значения испытательных напряжений в изоляции на основе сшитого полиэтилена

кабелей высокого напряжения, при которых активизируются ЧР в воздушных полостях, меньших максимально допустимого размера.

ЧР принято характеризовать рядом параметров: напряжение начала ЧР –  $U_{нчр}$ ; кажущаяся амплитуда ЧР -  $q_{чр}$ ; частота импульсов ЧР -  $n_{чр}$ ; фазовые характеристики ЧР. Характеристики частичных разрядов зависят от типа, размера и местоположения дефекта, изоляционного материала, приложенного напряжения, температуры кабеля, а также изменяются с течением времени.

Напряжение начала ЧР связано с толщиной  $x$  воздушного включения (рис.1).

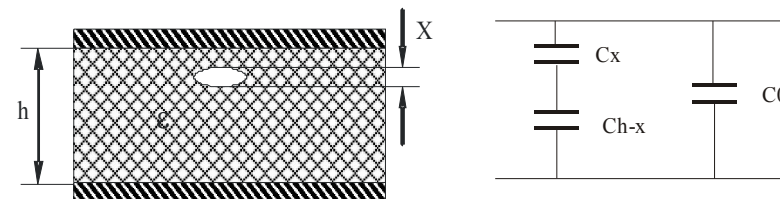


Рис. 1 - Модель для расчета напряжения начала ЧР:  $x$  – толщина воздушного включения в изоляции;  $h$  – толщина изоляции;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.  $C_x$  – емкость включения;  $C_{h-x}$  – емкость части изоляции напротив включения;  $C_0$  – емкость остальной части изоляции.

Для качественной изоляции  $x \ll h$ . Найдем, какая часть  $U_x$  внешнего напряжения  $U$  приходится на включение. Емкость включения [5]:

$$C_x = \epsilon_0 S_x / x. \tag{1}$$

Емкость сплошного слоя диэлектрика, расположенного напротив включения

$$C_{h-x} = \epsilon \epsilon_0 S_x / (h-x), \tag{2}$$

где  $\epsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $S_x$  - площадь включения, м<sup>2</sup>. Тогда из емкостной схемы замещения находим  $U_x$ :

$$U_x = U \frac{1/(\omega C_x)}{1/(\omega C_x) + 1/(\omega C_{h-x})} = U \frac{\epsilon x}{h + (\epsilon - 1)x} \tag{3}$$

При  $x \rightarrow 0$  напряжение на включении стремится к нулю  $U_x \rightarrow 0$ , (т.к. ее собственная емкость неограниченно возрастает), при  $x \rightarrow h$  все внешнее напряжение приходится на включение  $U_x \rightarrow U$  (т.к. она занимает весь изоляционный промежуток).

Если напряжение на включении достигает уровня пробивного напряжения

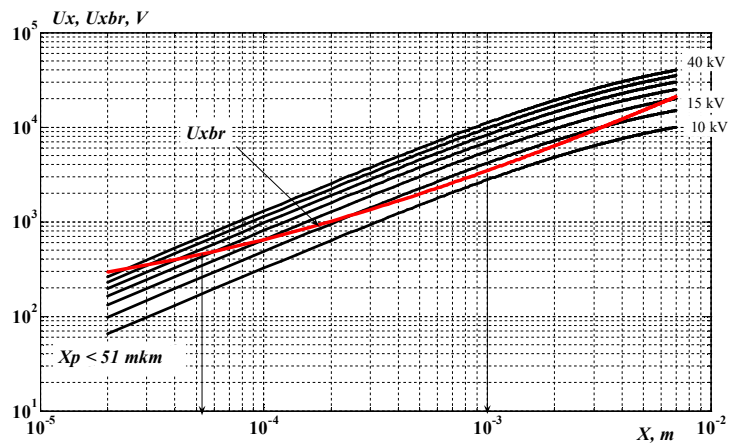
$$U_x \geq U_{xbr}, \quad (4)$$

то включение пробьется. Так как при этом пробивается только часть  $x$  изоляционного промежутка  $h$ , то разряд называют частичным. Соответствующее напряжение на электродах, при котором начинает выполняться условие (4), и есть так называемое напряжение начала ЧР -  $U_{нчр}$  [9 - 11].

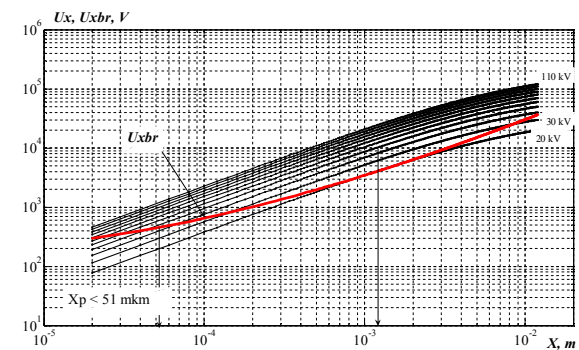
В таблице 2 приведены результаты расчета напряжений начала частичных разрядов в полиэтиленовой сшитой изоляции ( $\epsilon = 2,3$ ) в зависимости от ее толщины, соответствующей кабелям разного класса напряжения. Там же приведены размеры включений, которые зажигаются при касании кривых  $U_x$  и  $U_{xbr}$ .

Таблица 2 - Минимально возможные значения напряжения начала частичных разрядов и толщина активизируемых включений в толще сшитой полиэтиленовой изоляции силовых кабелей высокого напряжения

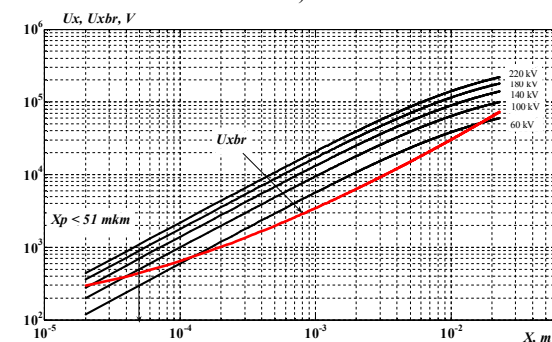
| Линейное/<br>Фазное<br>напряжение<br>кабеля, кВ | Толщина<br>изоляции,<br>$h$ , мм | Напряжение<br>начала ЧР<br>$U_{нчр}$ , кВ | Размер<br>активизируемых<br>воздушных<br>включений<br>$X$ , мкм |
|---|----------------------------------|---|---|
| 35/20   | 7                                | 12,5                                      | 1000  |
| 110/64  | 12                               | 19,8                                      | 1400  |
| 220/127   | 23                               | 35,3                                      | 1900  |
| 330/190   | 26                               | 53  | 2100  |



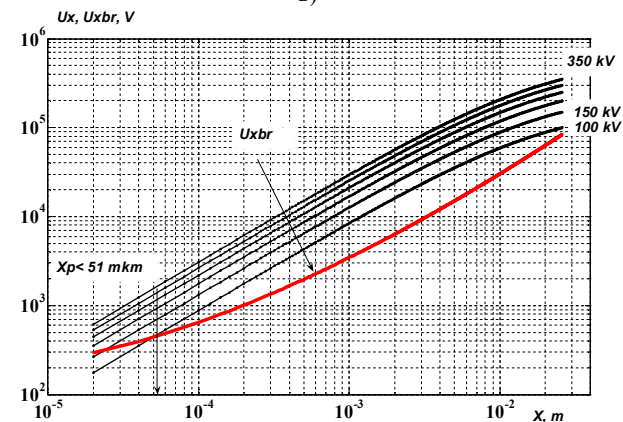
а)



б)



в)



г)

Рис.2 - Зависимости от толщины ( $x$ ) воздушного включения его пробивного напряжения ( $U_{xbr}$ ) и расчетных напряжений на включениях при толщинах изоляции: а - 7 мм; б - 12 мм; в - 23 мм; г - 26 мм

Как видно из результатов расчета, при напряжении начала ЧР активизируются грубые включения миллиметрового размера, которых не должно быть в толще твердой сшитой полиэтиленовой изоляции.

На рис.2 приведены зависимости от толщины ( $x$ ) воздушного включения его пробивного напряжения ( $U_{xbr}$ ) и расчетных напряжений на включениях в толще изоляции силовых кабелей высокого напряжения.

Воздушные полости размером от 100 до 51 мкм активизируются при подаче испытательного напряжения в диапазоне: 20 – 25 кВ при толщине изоляции 7 мм (кабель напряжением 35 кВ); 35 – 45 кВ при толщине изоляции 12 мм (кабель напряжением 110 кВ); 60 – 80 кВ при толщине изоляции 23 мм (кабель напряжением 220 кВ) и 70 – 110 кВ при толщине изоляции 26 мм (кабель напряжением 330 кВ) соответственно.

При более высоких испытательных напряжениях будут загораться полости размером меньше, чем 51 мкм, т.е. те, которые не представляют опасности для работы кабелей высокого напряжения.

Таким образом, усредненные значения пороговых испытательных напряжений, соответствующих активизации полостей размером, меньше 50 мкм, составляют: **25 кВ** (кабели на 35 кВ); **45 кВ** (кабели на 110 кВ); **80 кВ** (кабели на 220 кВ); **110 кВ** (кабели на 330 кВ).

Значения пороговых уровней испытательных напряжений могут быть рекомендованы при освоении выпуска кабелей высокого напряжения с изоляцией на основе сшитого полиэтилена для выявления включений, представляющих опасность для изоляции.

Список литературы: 1. Кабели на напряжение 10 -500 кВ: состояние и перспективы развития / Г.И Мецанов, М.Ю. Шувалов, М.К. Каменский и др. // Кабели и провода. – 2008. – №5 (312). – С.32 – 38. 2. Пешков И.Б. Электрохимическое старение полимерной экструдированной изоляции силовых кабелей: исследования, испытания, диагностика, оценка ресурса / И.Б.Пешков, М.Ю.Шувалов // Изв. Акад. наук России. Энергетика. – 2008. – №1. – С.70 – 88. 3. Щерба А.А. Анализ процессов электрического старения полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых электрокабелей / А.А. Щерба, М.М.Резинкина // Технічна електродинаміка. – Тем. вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – Київ. – 2006. – Ч.1. – С.106 – 111. 4. Набока Б.Г. Твердая тонкослойная изоляция: контроль технологии изготовления и диагностика качества / Набока Б.Г. – Х.: Основа, 1996. – 180 с. 5. Божко И.В. О напряженности электрического поля начала частичных разрядов в твердой изоляции / И.В. Божко, И.С Петухов, А.П. Рацелкин // Технічна електродинаміка. – Київ. – 2001. – № 5. – С. 18 – 23. 6. Early detection of electrical tree through advanced PD measurement inference techniques / A. Cavallini, M. Conti, G. C. Montanari and all // IJCABLE: Versailles, France. – June 2003. – P. 612 – 616. 7. Advanced PD inference in on-field measurements. Part 2: Identification of defects in solid insulation / A. Cavallini, M. Conti, A. Contin and all // IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. – June 2003. – Vol. 10. - № 3. – P. 528 – 538. 8. Набока Б.Г. Методика измерения дифференциальных амплитудных спектров импульсов частичных разрядов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // Электричество. – М. – 1990. – № 11.– С. 71 – 74. 9. Набока Б.Г. Диагностика высоковольтной изоляции с помощью многоканальных анализаторов / Б.Г. Набока, А.В. Беспрозванных, В.Я. Гладченко // Электричество. – М. – 1991. – № 5.– С. 5 – 9.

Надійшла в редколегію 03.09.2010