

## ПАРАМЕТРЫ ЧАСТИЧНЫХ ЕМКОСТЕЙ КАК ИНДИКАТОР СОСТОЯНИЯ КОНТРОЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ АЭС

Набока Б.Г., д.т.н., проф., Беспрозванных А.В., к.т.н., доц., Штангей А.С.  
Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. ЭИКТ

*Представлені результати вимірювань в лабораторних умовах параметрів часткових ємностей зразків контрольних кабелів з екранованими парами, що були в експлуатації в гермозонах, чистих зонах та на складах енергоблоків АЕС. Знайдені відмінності відносних значень часткових ємностей та тангенсів кутів діелектричних втрат, які пропонуються використовувати як індикатори зістареності кабелів.*

*Представлены результаты измерений в лабораторных условиях параметров частичных емкостей образцов контрольных кабелей с экранированными парами, находившихся в гермозонах, чистых зонах и хранившихся на складах энергоблоков АЭС. Обнаружены различия соотношений величин частичных емкостей и тангенсов углов диэлектрических потерь, которые предлагается использовать как индикатор состаренных изделий.*

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка технического состояния контрольных кабелей АЭС выполняется путем их обследования в эксплуатационных и лабораторных условиях [1-6].

Основным электрическим параметром, по которому оценивается качество кабелей в эксплуатационных условиях, является сопротивление изоляции  $R_{gge}$ , измеряемое между двумя жилами, соединенными вместе, и экраном. Кабель не отключают от гермопроходок, а по величине  $R_{gge}$ , измеренной на постоянном напряжении, нельзя выделить вклад собственно кабеля и гермопроходки по отдельности.

Измерения на переменном напряжении - емкости  $C$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  - в принципе позволяют оценить качество изоляции самого кабеля, ведь емкость последнего значительно выше емкости коротких участков с пониженным сопротивлением в гермопроходках. Измерения  $C$  и  $\text{tg}\delta$  выполняются значительно быстрее, что дает возможность обследовать детали конструкции кабелей. Удалось заметить процессы старения изоляции различных конструкций [7 - 10]. Так, в [7] было замечено появление корреляционной связи между  $\text{tg}\delta$  изоляции соседних жил витой пары кабеля, извлеченного именно с гермозоны. В [8] - показана возможность выделения характеристик фазной и поясной изоляции трехфазного кабеля. В [10] - представлен способ нахождения характеристик отдельных компонент изоляции 8-жильного кабеля локальной сети. Оказалось, что вариации температуры сильнее отразились на величине  $\text{tg}\delta$  малых частичных емкостей, а радиационное старение изоляции, наоборот, - на величине  $\text{tg}\delta$  больших частичных емкостей. Первые связаны с поверхностными загрязнениями изолированных жил, а вторые - с изоляцией самих жил.

Целью настоящей работы является анализ параметров частичных емкостей образцов кабелей, длительно эксплуатировавшихся в разных условиях, для выявления электрического индикатора состаренных изделий.

Кабели содержат комбинированную изоляцию: радиационно сшитый полиэтилен (ПЭ) - вокруг каждой жилы и полиамидную пленку (ПИ) - вокруг каж-

дой пары жил, скрученных вместе. Старение отдельных компонент изоляции идет с разной скоростью: пленка ПИ значительно более радиационностойкая и теплостойкая, чем ПЭ. Это может приводить к изменению соотношения частичных емкостей.

На соотношение частичных емкостей может повлиять также усадка ПЭ изоляции, ее увлажнение, защемление воды в микрокапилляре между соприкасающимися изолированными жилами витой пары. Все эти процессы связаны со старением конструкции и ухудшением ее технических характеристик.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на образцах-свидетелях - отрезках контрольных кабелей, расположенных в зонах наибольшей интенсивности внешних воздействующих факторов (ВВФ) блоков АЭС - в гермозонах.

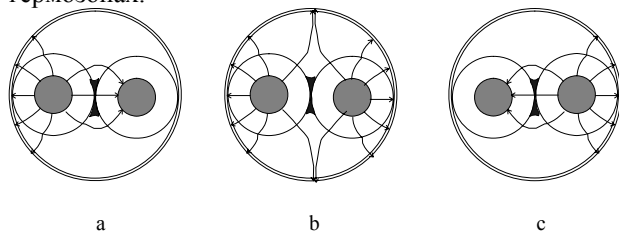


Рис. 1 - Схемы опытов а, б и с по обследованию экранированных витых пар кабелей методом совокупных измерений: а) - поле создается, в основном, в изоляции одной жилы (левой); б) - поле создается в изоляции обеих жил; с) - поле создается, в основном, в изоляции другой жилы (правой). В опытах а и с слой загрязнения, заземленный между изолированными жилами, попадает в область зондирующего поля, в схеме б - нет

Для сравнения использовались образцы-свидетели, извлеченные из областей умеренного уровня ВВФ, а также хранившиеся на складе. Кабели 7- и 12-парные. Длины отрезков 1,5 - 2,5 м. Для каждой пары проводились измерения по трем схемам (рис.1) на трех частотах 0,1, 1 и 10 кГц.

Параметры частичных емкостей находились по формулам:

$$\begin{aligned}
 C_1 &= (C_a + C_b - C_c) / 2 \\
 C_2 &= (C_a - C_b + C_c) / 2 \\
 C_3 &= (C_a + C_b + C_c) / 2 \\
 \text{tg}\delta_1 &= \text{tg}\delta_a \cdot \frac{C_1 + C_2}{2C_1} + \text{tg}\delta_b \cdot \frac{C_1 + C_3}{2C_1} - \text{tg}\delta_c \cdot \frac{C_2 + C_3}{2C_1} \\
 \text{tg}\delta_2 &= \text{tg}\delta_a \cdot \frac{C_1 + C_2}{2C_2} - \text{tg}\delta_b \cdot \frac{C_1 + C_3}{2C_2} + \text{tg}\delta_c \cdot \frac{C_2 + C_3}{2C_2} \\
 \text{tg}\delta_3 &= -\text{tg}\delta_a \cdot \frac{C_1 + C_2}{2C_3} + \text{tg}\delta_b \cdot \frac{C_1 + C_3}{2C_3} + \text{tg}\delta_c \cdot \frac{C_2 + C_3}{2C_3}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где индекс 1 относится к параметрам изоляции относительно экрана первой жилы, индекс 2 – второй жилы, а индекс 3 – к параметрам изоляции между жилами.

Обследование образцов проводилось в исходном состоянии (после отбора с энергоблоков), а также после дополнительного ускоренного старения: а) радиационного - путем облучения образцов потоком электронов со средней энергией 8 МэВ до поглощенной дозы 30 Мрад; б) теплового – путем выдержки при температуре 150°С в течение 10 час.

#### АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ОБСЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СТАРЕНИЯ

Приведение результатов измерений к сопоставимым условиям, не зависящим от длины образцов (которая в случае эксплуатационных условий может быть неизвестной), от температуры (которая может быть разной даже в пределах одной трассы), от локальных деформаций (которыми могут подвергаться кабели в местах изгибов) осуществлялось путем вычисления относительных величин для емкостей и для tgδ:

$$C_{1,2} / C_3 = (C_1 + C_2) / 2C_3, \tag{3}$$

$$\text{tg}\delta_{1,2} / \text{tg}\delta_3 = (\text{tg}\delta_1 + \text{tg}\delta_2) / 2\text{tg}\delta_3, \tag{4}$$

Первый параметр - отношение средней величины  $C_{1,2}$  емкостей  $C_1, C_2$  к емкости  $C_3$ . Емкости  $C_1, C_2$  проводов относительно экрана – величины одного порядка (для одного и того же образца), а емкость  $C_3$  между ними – в 4 – 5 раз меньше. Аналогично введен параметр для tgδ.

На рис.2 приведены интегральные функции распределения (ИФР) параметра  $C_{1,2}/C_3$  для образцов кабелей РАЭС, а на рис.3 – для ЗАЭС. Параметр  $C_{1,2}/C_3$  для образцов из гермозоны (№№ 1 и I) выше, чем для образцов из чистой зоны или со склада (№№ 2,3 и II, III). Это не противоречит гипотезе о более интенсивном старении именно кабелей гермозоны. Против ожидания еще большими оказались значения параметра  $C_{1,2}/C_3$  для образца №4 РАЭС, хранившегося на складе.

Это может быть следствием более интенсивного старения этих образцов в условиях естественного хранения в неотапливаемом помещении. Образцы типа 4 были изготовлены позднее и имеют некоторые конструктивные отличия - внешнюю оболочку из ПВХ-пластика черного цвета. Именно для них замечена сильная корреляционная связь между tgδ изоляции соседних жил, что рассматривается как признак старения [7].

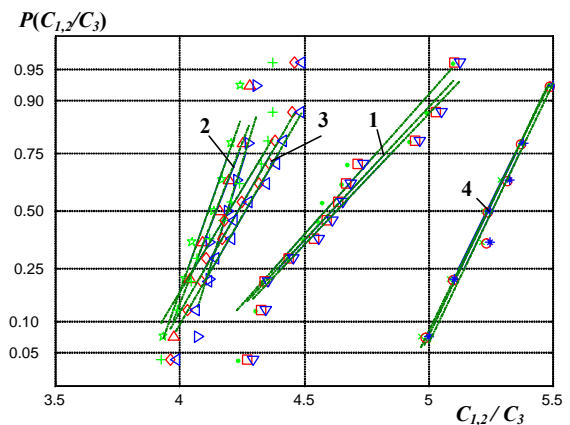


Рис. 2 – ИФР отношений частных емкостей  $C_{1,2}/C_3$  для образцов РАЭС: 1 – с гермозоны; 2,3 – с чистой зоны (кабели КПЭТИ); 4 – со склада (кабель КПЭТИнг)

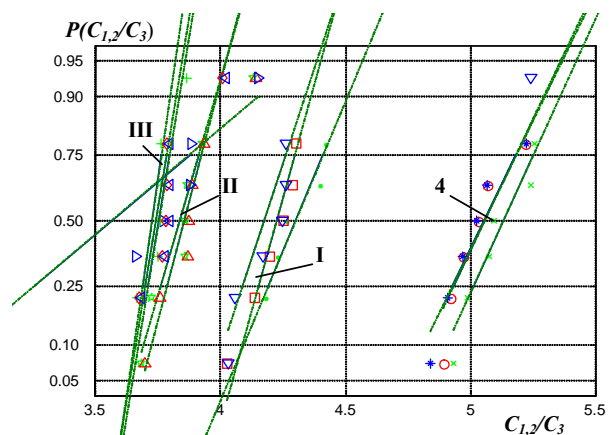


Рис.3. ИФР отношений частных емкостей  $C_{1,2}/C_3$  для образцов ЗАЭС: I – с гермозоны; II – с чистой зоны; III – со склада (все – типа КПЭТИ); 4 – со шлейфа (КПЭТИнг)

На рис.4 приведены интегральные функции распределения тангенсов углов диэлектрических потерь элементов витых пар: 1 – 4 - для промежутков "жила-экран" ( $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ ); 1' - 4' - для промежутков "жила-жила"  $\text{tg}\delta_3$ . Значения  $\text{tg}\delta_3$  близки для образцов типа 1 – 3, но значительно более высокие – для образца 4. Значения  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$  различаются значимо: на уровне 50% интегральной вероятности они располагаются в следующем порядке: 4,1,3 и 2.

Из рис.4 видно, что для более состаренных образцов характерны повышенные значения  $\text{tg}\delta_3$ , т.е. меньшие отношения  $\text{tg}\delta_{1,2}/\text{tg}\delta_3$ . Это результат влияния низкомолекулярных продуктов, заземленных между соприкасающимися изолированными жилами. Они ощущаются по легкому отлипу, подобному лакокрасочному покрытию, и могут представлять собой продукты разложения радиационно сшитого ПЭ, увлажняемые в результате гигроскопического поглощения атмосферной влаги. Величины tgδ указанных частных емкостей находятся по (2) с большей погрешностью, чем частичные емкости из формул (1), т.к. в (2) не только слагаемые, но и коэффициенты при них – приближенные числа.

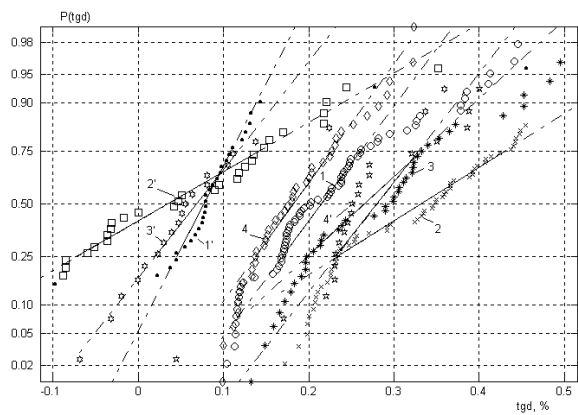


Рис.4. ИФР тангенсов углов диэлектрических потерь: 1 – 4 для  $\text{tg}\delta_1$  и  $\text{tg}\delta_2$ ; 1' - 4' для  $\text{tg}\delta_3$

### ВЫВОДЫ

Для образцов контрольных кабелей КПЭТИ, извлеченных после (15-17)-летней эксплуатации из гермозоны АЭС, чистой зоны и со склада, и подвергнутых дополнительно ускоренному старению, наблюдается значимое отличие параметров частичных емкостей: для кабелей из гермозоны  $C_{1,2}/C_3$  выше, а  $\text{tg}\delta_{1,2}/\text{tg}\delta_3$  – ниже, чем для однотипных остальных кабелей.

Для образцов кабелей КПЭТИнг (№4), хранившихся на складе, наблюдаются более значимые указанные признаки старения. По-видимому, это связано с неблагоприятными условиями хранения.

Безразмерные параметры  $C_{1,2}/C_3$  и  $\text{tg}\delta_{1,2}/\text{tg}\delta_3$  связаны с соотношением характеристик разных участков одного и того же изделия. Их изменения в процессе естественного и ускоренного старения отражают изменения и в свойствах компонент изоляции кабелей (окисление и увлажнение ПЭ, усадка ПЭ, появление на поверхности ПЭ низкомолекулярных продуктов его деструкции, изменение поверхностных свойств изоляции и как следствие – увеличение гигроскопического поглощения паров воды диэлектрическими клиньями в зоне контакта изолированных жил, пр.). Более качественными следует считать изделия, для которых (помимо стабильности основных электрических показателей, определенных в ТУ) характерна также меньшая вариация и указанных относительных параметров.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Положение по определению технического состояния и управлению старением кабелей на АС. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2002. – 102 с.
- [2] Мониторинг технического состояния и оценка остаточного срока службы силовых кабелей среднего и низкого напряжения с полиэтиленовой изоляцией. – М.: РОСЭНЕРГОАТОМ. – 2000. – 24 с.
- [3] Методические указания по определению технического состояния и остаточного срока службы кабелей систем безопасности, контроля и измерений на атомных станциях. - Лыткарино: НИИП МинатомРФ . – 1998 г. – 35 стр.
- [4] Кабели типа КПЭТИ(нг). Программа проведения работ по определению возможности продления срока эксплуатации. ЭАСУ 16-505-883.002 ПМ, 1998 г.
- [5] Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety: In-containment instrumentation and control cables. Vol/ 1–2. -: IAEA. 2000.
- [6] Assessment of cable aging using condition monitoring techniques./ ICONE-8, Proc. Int. Conf. Nucl. Eng., 8th (2000), 3 79 – 89.
- [7] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Признак старения диэлектрика – близость характеристик изоляции соседних жил./Труды Третьей Международной Конференции "Электрическая изоляция-2002". Санкт-Петербург, 2002. С.240 – 242.
- [8] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Рудаков С.В. Контроль параметров изоляции трехфазных кабелей методом косвенных измерений.// Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", №7. – 2002 г. – С.103 – 108.
- [9] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Гладченко В.Я. Медленные процессы в твердой изоляции и оптимальная температура полимеризации.// Электричество. №5. 2003 г.
- [10] Набока Б.Г., Беспрозванных А.В., Штангей А.С., Чертков Г.Н., Крикунов В.В. Наблюдение процессов старения изоляции многожильных кабелей по параметрам частичных емкостей. // Надежность и долговечность машин и сооружений. - №2(23). – 2004 г. – С.93 – 98.

Поступила 16.03.2005