

Е.С. МОСКВИТИН, ассистент, НТУ «ХПИ»

КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ СТАРЕНИЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ С БУМАЖНО-ПРОПИТАННОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗОЛЯЦИОННЫХ ПРОМЕЖУТКОВ

Выполнен анализ результатов прямых и совокупных измерений параметров изоляционных промежутков силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией. Для кабеля напряжением 6 кВ наблюдается значительная **разница** уровня тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от схемы обследования. Это является признаком того, что поясная изоляция в большей мере **старее** относительно фазной.

Виконано аналіз результатів прямих та сукупних вимірювань параметрів ізоляційних проміжків силових кабелів з паперово-просякнутою ізоляцією. Для кабелю напругою 6 кВ спостерігається значна різниця рівня тангенсу кута діелектричних втрат в залежності від схеми обстеження. Це є ознакою того, що поясна ізоляція в більший мірі зістарена відносно фазної.

The analysis of results of direct and cumulative measurements of parameters of insulation intervals of power cables with the paper-impregnated insulation is executed. For a cable the voltage 6 kV observes significant distinctions of a level of a tangent of a corner of dielectric losses depending on the circuit of inspection: It is an attribute of the greater degree ageing zone insulation in comparison with phase.

Старение изоляции кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией обусловлено термоокислительными процессами и деструкцией целлюлозы, увлажнением изоляции, стеканием пропиточного состава, старением пропитывающего состава, образованием воздушных пор из-за стекания вязкой пропитки, образованием воскообразных отложений под действием частичных разрядов в масляных прослойках и воздушных включениях между слоями бумаги.

Следует учитывать также различие процессов старения низковольтных и высоковольтных кабелей. При высоком напряжении начинают проявляться *пороговые явления*:

а) накопление объемных зарядов в толще состаренного диэлектрика, приводящее к перераспределению напряженности электрического поля и образованию дендритов;

б) неполные пробои ослабленных участков изоляции – частичные разряды.

Общими признаками медленных процессов старения изоляции кабелей, которые могут наблюдаться при контроле в эксплуатационных условиях, являются: снижение сопротивления изоляции (или рост токов утечки при испытаниях постоянным напряжением); рост емкости и тан-

генса угла диэлектрических потерь; рост коэффициента абсорбции; рост уровня частичных разрядов; появление локальных неоднородностей [1-2].

Контролируя эти характеристики в эксплуатации, можно оценить степень старения кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией (БПИ).

Силовые кабели имеют два вида изоляции – фазную (вокруг каждой жилы по отдельности) и поясную (вокруг трех жил вместе). Изоляция выполняется путем обмотки жил лентами кабельной бумаги. После этого следует вакуумная сушка бухт кабеля, а затем – вакуумная пропитка масляно-канифольными составами. После пропитки бухта кабеля выдерживается в пропиточной ванне до остывания, а затем направляется на пресс для нанесения защитной (алюминиевой) оболочки.

В исходном состоянии свойства фазной и поясной изоляции должны быть *идентичными*. В процессе старения кабелей появляются различия, вызванные деструкцией целлюлозы и миграцией низкомолекулярных полярных продуктов ее разложения (воды, фуранов) в более холодную часть кабеля – к оболочке, в поясную изоляцию. В результате свойства поясной изоляции со временем ухудшаются: растет тангенс угла диэлектрических потерь, падает сопротивление изоляции, уменьшается механическая прочность кабельных бумаг [3,4].

Цель статьи: *наблюдение изменений диэлектрических характеристик изоляционных промежутков трехфазных силовых кабелей напряжением 1 и 6 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией в процессе теплового старения.*

1. Схема замещения 3-х фазного кабеля показана на рис.1. Она содержит 6 звеньев, отражающих свойства изоляции жил на оболочку (емкости C_1, C_2, C_3) и между собой (емкости C_4, C_5, C_6). Параллельно каждой из емкостей включены резисторы, отражающие диэлектрические потери в изоляции, если измерения выполняются на переменном напряжении или утечки – если на постоянном напряжении. Параметры частичных емкостей могут быть найдены методом *прямых* измерений с использованием приборов с тремя клеммами либо методом *совокупных* измерений с использованием приборов с двумя клеммами [5 -6].

2. Прямые измерения.

Измеряемая ветвь электрической цепи объекта контроля, например, между клеммами 1 и 2, подключается к прибору, а *все остальные* клеммы объекта – к экранирующей цепи прибора (Э) – рис.2. Тогда будут измеряться параметры комплексного сопротивления Z_{12} , а мешающие токи цепей Z_1 и Z_2 – отведутся на землю.

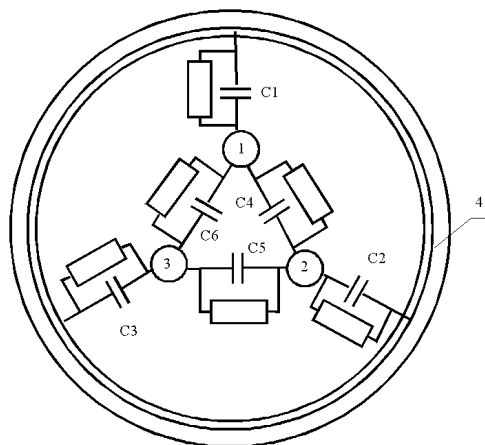


Рис.1 – Схема замещения трехфазного кабеля с фазной и поясной изоляцией: 1, 2, 3 - жилы кабеля; 4 - оболочка. Сопротивления, подключенные параллельно частичным емкостям, отражают потери энергии в компонентах изоляции кабеля

При измерениях на переменном напряжении используются 5-ти клеммные приборы, измерительные цепи которых выполнены разделеными – две токовые (I , I') и две потенциальные (U , U'), что позволяет исключить влияние на результаты измерений соединительных проводов.

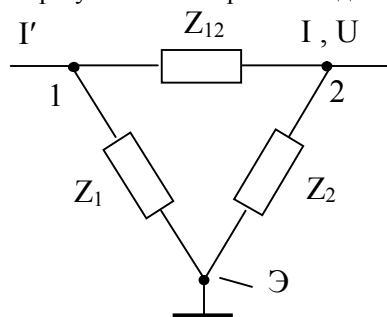


Рис.2 – Треугольник импедансов (полных сопротивлений) выделенной ветви 1-2 объекта контроля: Z_{12} – измеряемый импеданс; Z_1 , Z_2 – шунтирующие импедансы. Токовые I' , I и потенциальные U' , U зажимы прибора замыкаются на узлах измеряемой ветви

3. Совокупные измерения.

Метод совокупных измерений более универсален, чем метод непосредственных измерений частичных емкостей. Но параметры контролируемой цепи находятся не непосредственно в ходе измерений, а в результате решения системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Метод может быть реализован как с помощью приборов с тремя клемма-

ми (в этом случае экранирующая клемма не используется), так и с помощью приборов с двумя клеммами [5,6].

Между кабелем и измерителем (И) помещается двухпозиционный коммутатор (К) – рис.3. Каждая из клемм 1 – 4 объекта контроля подключается либо к одному, либо к другому входу измерителя иммитанса. Определим состояние ключей коммутатора *матрицей коммутации* AK , элементы которой равны «1», если клемма объекта подключена, например, к левой клемме прибора и «0», если - к правой:

Матрица содержит 4 строки (по числу клемм объекта контроля) и $2^4 = 16$ столбцов (по числу всех возможных вариантов состояния ключей коммутатора). Первый и последний столбец соответствуют вырожденным случаям: 0000 – когда все полюса объекта подсоединены к одной клемме, и

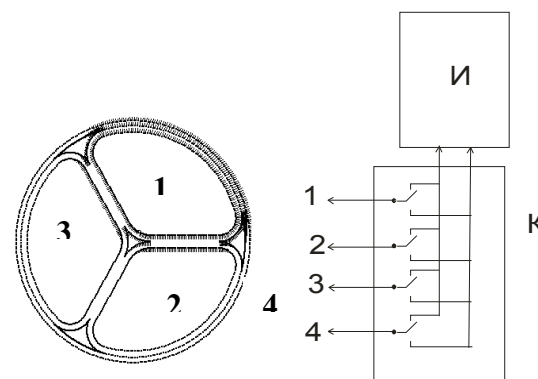


Рис.3 – Схема обследования трехфазного кабеля с бумажно-пропитанной изоляцией методом совокупных измерений: И – измеритель иммитанса; К – двухпозиционный коммутатор

1111 – к другой клемме измерителя. Эти опыты могут использоваться для оценки паразитной емкости коммутатора и соединительных проводов. Остальные опыты – их всего $N_e = 2^4 - 2 = 14$ – делятся на две группы. Первые 7 опытов назовем *основными* (столбцы 2 - 8), а остальные – *инверсными* (столбцы 9 - 15), т.к. они соответствуют перемене полярности подключения к прибору всех полюсов.

Для нахождения параметров 6 ветвей схемы замещения рис.1 достаточно выполнить 6 опытов из указанных 7 основных, например, 2 - 7. Можно также выполнить все 7 опытов: 2 - 8. Тогда СЛАУ будет переопределенной – в ней число уравнений больше числа неизвестных [6].

$$AK = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (1).$$

Неизвестные частичные емкости найдутся по результатам совокупных измерений из системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) [6]:

$$AC * Cx = Ce, \quad (2)$$

где Ce – матрица-столбец результатов измерений; Cx – матрица-столбец неизвестных частичных емкостей (C_{12} , C_{13} , C_{23} , C_{14} , C_{24} , C_{34}); AC – матрица “участия” частичных емкостей в образовании общей емкости данного опыта. Элемент a_{ij} матрицы AC равен 1, если разность кодов полюсов i и j отлична от нуля, и равен 0 в противном случае:

В опыте 2 (первая клемма потенциальная «1», все остальные – нулевые) измеряются емкости, включенные параллельно: $C_{12} + C_{13} + C_{14}$. В опыте 3 (вторая клемма потенциальная «1», все остальные – нулевые) измеряются следующие емкости, включенные параллельно: $C_{12} + C_{23} + C_{24}$. Частичные емкости, участвующие в образовании результирующей емкости опыта, находятся путем перемножения строки матрицы AC на столбец матрицы Cx .

$$AC = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ \hline \end{array} \quad Cx = \begin{array}{|c|} \hline C_{12} \\ \hline C_{13} \\ \hline C_{23} \\ \hline C_{14} \\ \hline C_{24} \\ \hline C_{34} \\ \hline \end{array}$$

Система, аналогичная (2), составляется и для нахождения $\text{tg} \delta$ частичных емкостей [6].

$$ATG * TGx = TGe, \quad (3)$$

где TGe – матрица-столбец измеренных значений $\text{tg} \delta$ (результат совокупного действия ряда частичных емкостей с потерями, включенных параллельно); TGx – матрица-столбец истинных значений $\text{tg} \delta$ частичных емкостей с потерями (цель расчета).

Здесь ATG – матрица коэффициентов, подобная по структуре матрице AC , но содержащая вместо единичных коэффициентов – дроби, в числителе которых частичные емкости C_{ij} , найденные в результате ре-

шения (2), а в знаменателе – суммы частичных емкостей, участвующих в данном опыте. Коэффициенты матрицы ATG определяют долевые вклады реальных частичных емкостей (с потерями энергии) в суммарных потерях данного опыта.

При реализации всех 7 основных опытов системы (2), (3) становятся переопределенными (число опытов больше числа неизвестных) и для нахождения решений используем метод наименьших квадратов [6]:

$$AC' * AC * Cx = AC' * Ce$$

$$(AC' * AC)^{-1} * AC' * AC * Cx = (AC' * AC)^{-1} * AC' * Ce. \quad (4)$$

$$Cx = (AC' * AC)^{-1} * AC' * Ce$$

Здесь штрих ' – означает транспонирование, степень $^{-1}$ – нахождение обратной матрицы, знак * – матричное умножение.

Аналогично находятся неизвестные значения тангенсов углов потерь частичных емкостей (цель исследований):

$$TGx = (ATG' * ATG)^{-1} * ATG' * TGe. \quad (5)$$

Если реализовать только **6 опытов** – (2–7 столбцы матрицы AK), то получим СЛАУ 6-го порядка с матрицей AC вида:

1	1	0	1	0	0
1	0	1	0	1	0
0	1	1	1	1	0
0	1	1	0	0	1
1	0	1	1	0	1
1	0	1	1	0	1
1	1	0	0	1	1

Соответствующая обратная матрица AC^{-1} равна:

$$0,5 * \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ \hline 0 & -1 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ \hline -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Тогда искомые частичные емкости найдутся путем перемножения строк обратной матрицы на столбец экспериментальных данных. Например, первая неизвестная C_{12} найдется путем перемножения первой строки матрицы AC^{-1} на столбец результатов измерений:

$$C_{12} = 0,5 \cdot (C_1 + C_2 - C_3 + 0 \cdot C_4 + 0 \cdot C_5 + 0 \cdot C_6), \quad (6)$$

где $C_1 - C_6$ - экспериментальные результаты совокупных измерений, последовательность которых задана столбцами 2 - 7 матрицы коммутации (1).

Аналогично выглядит формула для $\text{tg}\delta_{12}$:

$$\text{tg}\delta_{12} = 0,5 \cdot \left(\frac{C_{12}}{C_{s1}} \text{tg}\delta_1 + \frac{C_{13}}{C_{s1}} \text{tg}\delta_2 - \frac{C_{23}}{C_{s1}} \text{tg}\delta_3 + 0 \cdot \text{tg}\delta_4 + 0 \cdot \text{tg}\delta_5 + 0 \cdot \text{tg}\delta_6 \right), \quad (7)$$

где $C_{s1} = C_{12} + C_{13} + C_{23}$ - совокупная емкость опыта, соответствующего первой строке матрицы AC .

Заметим, что формулой (7) можно воспользоваться только после того, как будут найдены частичные емкости C_{12}, C_{13}, C_{23} .

Формулы для параметров остальных частичных емкостей получаются по аналогии с (6) и (7).

Таким образом, решения СЛАУ (2) и (3) на практике сводятся к формулам вида (6) и (7), представляющих собой линейные комбинации результатов измерений, взятых с определенными весовыми коэффициентами. Расчет по ним не представляет особых сложностей.

4. Пример представления результатов обследования трехфазного кабеля – дан на рис.4.

Для каждого образца выделены по **четыре области** значений частичных емкостей.

Области **первого типа** (обозначены как A1 и B1 для сравниваемых кабелей) – соответствуют емкостям C_{12}, C_{13} и C_{23} – истинным емкостям между фазами кабелей. Это – области свойств *фазной* изоляции. Для кабеля 1 кВ (ААШВ-3х150-1) эти емкости почти в 2 раза больше, чем для кабеля 6 кВ (ААШВ-3х95-6). Сказывается меньшая толщина фазной изоляции кабеля 1 кВ. По величине тангенса угла диэлектрических потерь фазные изоляции сравниваемых кабелей близки по качеству.

Области **второго типа** (обозначены как A2 и B2 для сравниваемых кабелей) – соответствуют емкостям C_{14}, C_{24} и C_{34} – истинным емкостям между фазами и оболочками кабелей. Это – области свойств фазной и *поясной* изоляции. Для кабеля 6 кВ $\text{tg}\delta$ здесь существенно больше, чем для 1 кВ кабеля. Значит, причиной тому является худшее качество поясной изоляции кабеля 6 кВ. Это подтверждается результатами механических измерений числа двойных перегибов, которое для поясной изоляции оказалось существенно меньше [3].

Области **третьего** (A3 и B3) и **четвертого** (A4 и B4) типов соответствуют результатам *совокупных* измерений фазной и поясной изоляции. Даже по совокупным измерениям видно худшее качество изоляции кабеля 6 кВ: точки A3 и A4 лежат выше точек B3 и B4.

При разных схемах обследования зондирующее электрическое поле сосредотачивается в разных участках кабеля. Емкости промежутков при этом оказываются *разными*, а $\text{tg}\delta$ должен быть практически *одинаков*

(признак однородности изоляции при ее нормальном состоянии) [6]. Емкости изоляционных промежутков при разных схемах обследования варьируются от 90 до 1000 пФ. (Большие значения относятся к совокупным схемам обследования, меньшие – к индивидуальным).

Заметим, что для высоковольтного кабеля наблюдаются значительные различия уровня $\text{tg}\delta$ в зависимости от схемы обследования: области A1 – A4 находятся на разных уровнях. Это уже само по себе свидетельствует о большей степени состаренности этого кабеля.

Для низковольтного кабеля уровень $\text{tg}\delta$ оказался одинаков во всех областях B1 – B4. Следовательно, изоляция кабеля не состарена, возможно, из-за малой нагрузки в процессе эксплуатации.

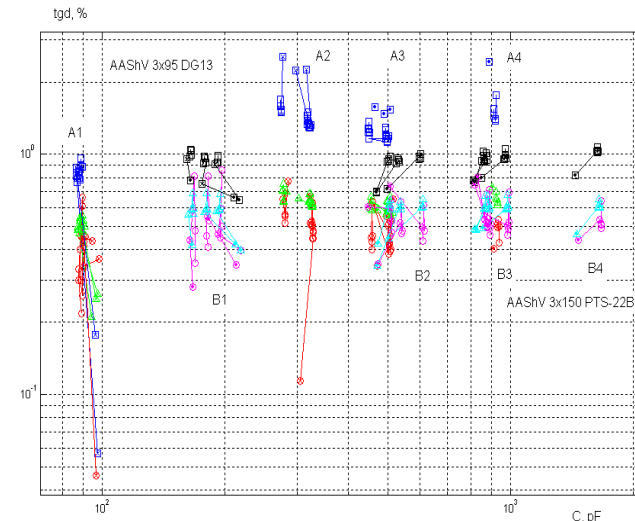


Рис.4 – Параметры частичных емкостей сравниваемых кабелей:

A1 – A4 – для образца 6 кВ кабеля ААШВ-3х95-6 ДГ13;

B1 – B4 – для образца 1 кВ кабеля ААШВ-3х150-1 ПТС-22Б.
Длины образцов – по 1,3 м. Измерения при частотах 0,1; 1 и 10 кГц

5. Контроль характеристик изоляционных промежутков образцов кабелей АСБ-3х90+1х35 – 1 кВ в процессе дополнительного теплового старения.

Тепловое старение бумажно-пропитанной изоляции описывается известным соотношением *Аррениуса*:

$$\tau = A \cdot e^{\frac{W}{kT}}, \quad (8)$$

где τ - ресурс; W_a - энергия активации процесса термоокислительного старения, Дж; k - постоянная Больцмана, Дж/К; T - абсолютная температура; A - эмпирический коэффициент.

Обычно при увеличении температуры на $\Delta T_{1/2} = 8 - 10$ °С ресурс уменьшается в 2 раза (правило Монтзингера). Значению параметра $\Delta T_{1/2} = 10$ °С соответствует энергия активации $W \approx 1$ эВ (рис.5):

$$\tau_2 = A \cdot e^{\frac{W_a}{k(T+\Delta T_{1/2})}} = \frac{1}{2} A \cdot e^{\frac{W_a}{kT}}; \quad \ln 2 = \frac{W_a}{kT} - \frac{W_a}{k(T+\Delta T_{1/2})};$$

$$\frac{W_a}{k} \cdot \frac{\Delta T_{1/2}}{T \cdot (T + \Delta T_{1/2})} = \ln 2;$$

$$W_a = k \ln 2 \cdot \frac{T \cdot (T + \Delta T_{1/2})}{\Delta T_{1/2}} \approx$$

$$1,38 \cdot 10^{-23} \cdot \ln 2 \cdot \frac{(273+100) \cdot (273+100+(8-10))}{(8-10)} \approx 1,97 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} \approx 1 \text{ эВ}.$$

Если температура эксплуатации БПИ составляет в нормальных условиях 65 °С, то, выполняя ускоренные испытания при температуре 105 °С, получим ускорение процессов старения в $2^{(105-65)/10} = 2^4 = 16$ раз. Три недели ускоренного старения эквивалентны в этом случае году эксплуатации в нормальных условиях. С помощью подобных соотношений оценивают длительность ускоренного старения образцов БПИ при оценке ее остаточного ресурса.

Альтернативный подход заключается в имитации стандартной процедуры подтверждения базового ресурса БМИ, равного 25 годам. При типовых испытаниях кабели должны выдержать 250 циклов нагрева до 105 °С. Отсюда 25 циклов эквивалентны эксплуатации в течение 2,5 года.

Оценка технического состояния образцов кабелей с БМИ выполнялась в исходном состоянии (после 20 летней эксплуатации в нормальных условиях) и после дополнительного ускоренного старения, эквивалентного 2,5 – 5 годам нормальной эксплуатации.

На рис.6 – 7 приведены результаты измерений диэлектрических параметров кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ в исходном состоянии и в процессе теплового старения на трех частотах: 100 Гц, 1 кГц и 10 кГц.

При однородной фазной и поясной изоляции, межфазном пространстве величина $\text{tg}\delta$ не должна зависеть от схемы включения кабеля, что подтверждается для образца II.

Для образца I наблюдаются значительно более высокие уровни $\text{tg}\delta$ по сравнению с образцом II. Кроме того, в областях межфазного пространства (1-3, 2-4) уровень $\text{tg}\delta$ выше, чем в остальных областях (фазной и поясной

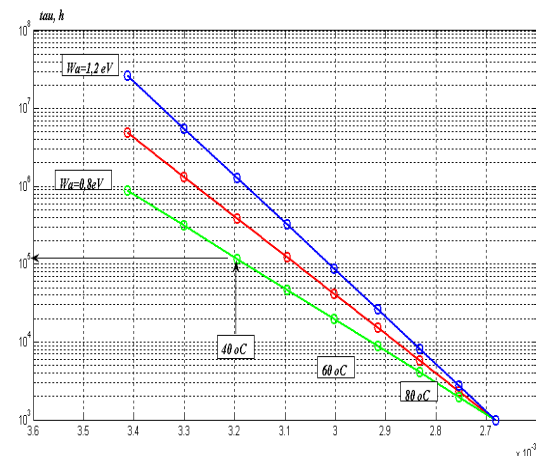


Рис.5 – Зависимости ресурса от температуры в масштабе закона Аррениуса (по горизонтали – шкала обратных температур; по вертикали – логарифмическая шкала). Показано три зависимости при энергиях активации $W_a = 0,8$ эВ (нижняя линия), 1 эВ (средняя линия); 1,2 эВ (верхняя линия)

изоляции). Похоже, что влага сосредоточена и в толще изоляции, и в межфазном пространстве образца I. После 1-й недели термостарения при 105 °С (рис.7, область 2) произошла подсушка образца. И, как результат, тангенс угла диэлектрических потерь уменьшился. После 5-ти недель старения при 105 °С и двух суток при 206 °С (рис.7, область 3) наблюдается значимое увеличение $\text{tg}\delta$ на частоте 10 кГц: потери возросли более чем в 4 раза (сравни границы области 2 и 3), что обусловлено процессами старения БПИ. Критерием значимости отличия $\text{tg}\delta$ в процессе теплового старения может быть параметр Тьюки T_k . Он равен сумме двух чисел: $T_k = M + K$, где M - число элементов первой выборки, превосходящих наибольший из элементов второй выборки; K - число элементов второй выборки, меньших наименьшего элемента первой выборки. Если $T_k > 7$, то при доверительной вероятности $P_d = 95\%$ выборки отличаются значимо.

Для сравниваемых выборок по $\text{tg}\delta$ до и после теплового старения это подтверждается для частот 10 кГц и 100 Гц (см. рис. 7).

В правом углу рис.6 приведена фотография фазной изоляции кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ после цикла теплового старения. Кабельная бумага потемнела, при разматывании с жилы ломается.

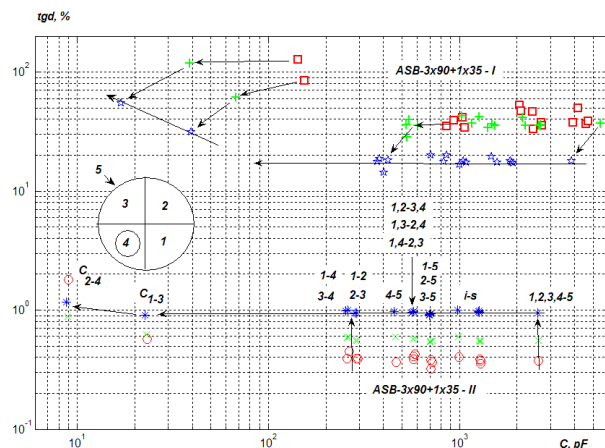


Рис.6 – Параметры образцов кабеля АСБ в исходном состоянии (перед ускоренным старением): *I* – образец, отобранный с края бухты (увлажненный); *II* – образец, отобранный на расстоянии 2,5 м от края бухты. Длина образцов – по 2,5 м

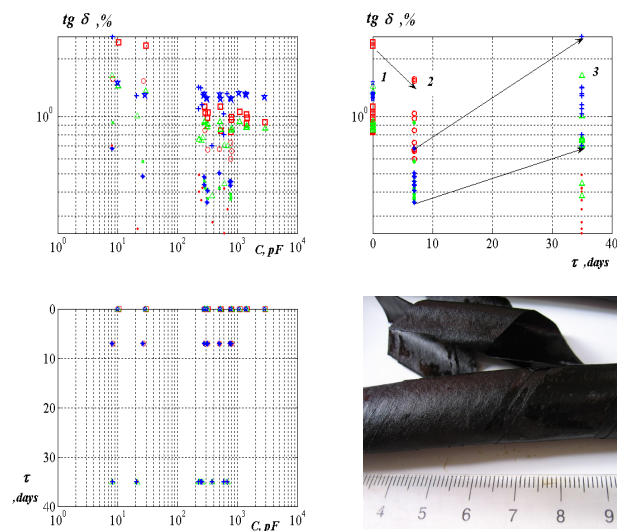


Рис.7 – Диаграмма параметров изоляционных промежутков образца кабеля АСБ-3х90+1х50 в исходном состоянии (1), после 1-й недели термостарения при 105 °С (2) и после 5-ти недель старения при 105 °С и двух суток при 206 °С (3)

Тепловое старение кабеля АСБ-3х90+1х50 1 кВ привело к уменьшению $\text{tg}\delta$ на частоте 100 Гц и росту тангенса угла диэлектрических потерь

на частоте 10 кГц. Снижение потерь на частоте 100 Гц свидетельствует о подсушке образцов в термостате; увеличение $\text{tg}\delta$ на частоте 10 кГц – об окислении кабельных бумаг. Уровень тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 10 кГц свыше 2% свидетельствует о состоянии изоляции, при котором может произойти тепловой пробой кабеля в эксплуатации.

Выводы.

1. Оперативный контроль результатов обследований силовых кабелей методом совокупных измерений затруднен: пока не закончится последнее измерение и не выполнена математическая обработка, трудно оценивать качество результатов. Поэтому оперативный анализ процессов старения при обследовании кабелей методом совокупных измерений следует выполнять без математической обработки.

2. Корректное ускоренное тепловое старение должно выполняться при температурах, соответствующих условиям адекватности процессов старения при нормальной рабочей температуре, т.е. практически одинаковых энергиях активации.

3. При однородной фазной и поясной изоляции, межфазном пространстве силовых кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией величина $\text{tg}\delta$ не зависит от схемы обследования кабеля.

4. Наблюдаемые различия уровня $\text{tg}\delta$ в зависимости от схемы обследования – признак старения кабелей.

5. Диэлектрическая спектроскопия силовых кабелей, т.е. измерения потерь на разных частотах, позволяет идентифицировать как процессы увлажнения – сушки, так и непосредственного окисления бумажно-пропитанной изоляции в процессе старения. Первые проявляются на нижней границе звукового диапазона, вторые – на верхней.

Список литературы: 1. Привалов И.Н. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий номинальным напряжением 6 – 35 кВ / И.Н. Привалов // Электротехнический рынок. – 2008. – №2. 2. Канишкин В. А. Кабели 10 кВ с бумажно-пропитанной изоляцией. Неразрушающий метод диагностики / В. А. Канишкин, С. А. Коцур, И. Н.Привалов / Новости электротехники. – 2005. – № 5 (35). 3. Москвитин Е.С. Оценка технического состояния высоковольтных кабелей с бумажно-масляной изоляцией по числу двойных перегибов / Е.С.Москвитин // Вестн. НТУ «ХПИ». – 2006. – №34. – С.34 – 40. 4. Беспрозванных А.В. / Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке/ А.В. Беспрозванных, Б.Г. Набока, Е.С. Москвитин // Электричество – 2010. – №1 – С.48 – 54. 5. Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных // Технічна електродинаміка. – № 3. – 2008. – С. 30 – 37. 6. Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений / А.В. Беспрозванных //Электротехника и электромеханика. – 2007. – №1. – С.62-66.

Поступила в редакцию 27.12.2010