

ВЛИЯНИЕ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ ИЗОЛЯЦИИ ЖИЛ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КАБЕЛЯХ

Беспрозванных А.В., доц., к.т.н., Набока Б.Г., проф., д.т.н.
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21 кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"
 тел. (057) 707-60-10, E-mail: Bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua, Naboka@kpi.kharkov.ua

Речовини, які образуються при експлуатації кабелів, осідають на поверхні ізованих жил. Вони є предвісниками старіння самої ізоляції. Виявити ці приповерхневі прошарки можливо за результатами вимірювань тангенса кута діелектричних втрат. При цьому захисна полівінілхлоридна оболонка суттєво впливає на результати вимірювань. За рахунок тангенціальної складової напруженості електричного поля вдається виявити дисіпацію енергії приповерхневими прошарками. Різниця по $\text{tg}\delta$ становить майже порядок на частоті 10 кГц при реалізації складних схем обстеження з тангенційною складовою зондуючого електричного поля. Це є ознакою, що приповерхневі прошарки нерівномірно розподілені в осерді кабеля.

Вещества, образующиеся при эксплуатации кабелей, осаждаются на поверхности изолированных жил. Они являются предвестниками старения самой изоляции. Выявить приповерхностные слои возможно по результатам измерений тангенса угла диэлектрических потерь. При этом защитная поливинилхлоридная оболочка существенно влияет на результаты измерений. Диссипацию энергии приповерхностными слоями можно обнаружить за счет тангенциальной составляющей электрического поля. Разница по $\text{tg}\delta$ составляет порядок на частоте 10 кГц при реализации сложных схем обследования с тангенциальной составляющей зондирующего поля. Это есть свидетельство неравномерного распределения приповерхностных слоев в поперечном сечении кабеля.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации кабелей под действием электрического поля, температуры, влаги, радиации происходит старение изоляции. Продукты разложения изоляции, оболочки осаждаются на поверхности изолированных жил. Они являются первыми признаками процесса старения. Обнаружить легколетучие продукты, окисление изоляции можно по повышенному значению тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ изолированных жил кабеля [1–7].

На рисунке 1 приведена фотография сердечника кабеля КПВГ-2,5х27 со снятой защитной поливинилхлоридной (ПВХ) оболочкой. Кабель с сечением жилы 1,5 мм² правильной повивной скрутки с 27-ю жилами: внутренний центральный (I) повив состоит из трех жил, второй (II) - из 9, третий наружный (III) - из 15.

Видна різниця окраски поліетиленової ізоляції зовнішнього (А - III) і внутрішніх (В - I+II) повивів кабелю. Зовнішня – більш темна за рахунок довготривалого контакту з ПВХ оболочкою. На поверхні ізоляції - сліди пластифікатора, який мігрував з ПВХ оболочкі.



Рис. 1. Внешний вид отрезка кабеля КПВГ-27х2,5 после 20 лет эксплуатации

Напрашивается вопрос: можно ли заметить следы загрязнения на поверхности изолированных жил по результатам измерений тангенса угла диэлектрических потерь?

Цель статьи – анализ влияния рассеяния энергии приповерхностными слоями изоляции жил на потери в кабеле.

На рис. 2-3 приведены результаты измерений тангенса угла диэлектрических потерь внешнего (А) и внутренних (В) повивов для двух схем измерений.

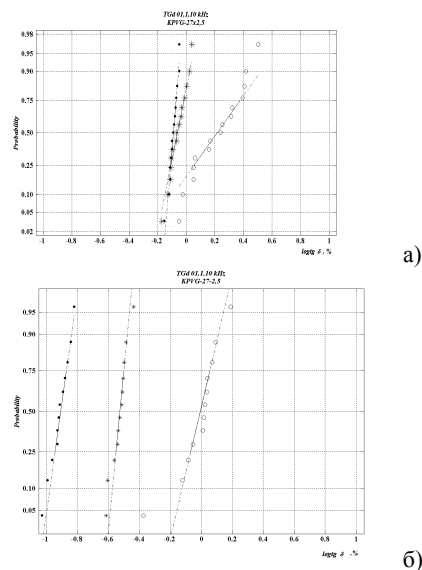


Рис. 2. Интегральные функции распределения $\text{tg}\delta$ изолированных жил внешнего (а) и внутренних (б) повивов для симметричной схемы измерений: каждая жила – против всех остальных

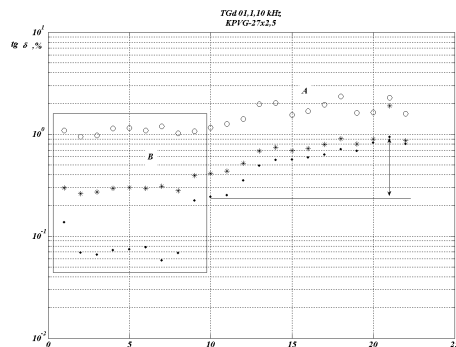


Рис. 3. Динамика изменений тангенса угла диэлектрических потерь от числа задействованных жил при измерении 27-жильного кабеля КПВГ

Для жил внутренних повивов разброс значений мал на всех трех частотах, что является свидетельством однородности изоляции в поперечном сечении. Загрязнений там нет. Для жил внешнего повива минимальное значение $\text{tg} \delta$ составляет 0,22%, максимальное - 0,94%, т.е. тангенс угла диэлектрических потерь отличается в 4,3 раза.

МОДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕКТ 1. ИЗОЛИРОВАННАЯ ЖИЛА С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ

Для выяснения причин разброса рассмотрим модельный объект – одиночную изолированную жилу (рис. 4а). Пусть на поверхности изоляции жилы образовался слой с повышенной проводимостью. Представим изолированную жилу с приповерхностным слоем схемой замещения (рис. 2б). Найдем диэлектрические потери в такой системе в зависимости от долевого содержания h_i / h слоя поверхностной проводимости и его удельного сопротивления ρ_i .

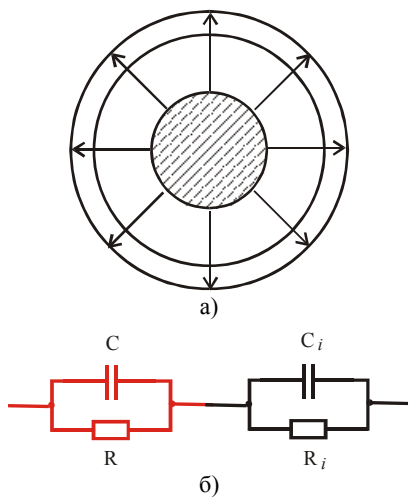


Рис. 4. Модель изолированной жилы с приповерхностным слоем повышенной проводимости (а) и ее схема замещения (б): R, C – параметры изоляции жилы; R_i, C_i – параметры слоя повышенной проводимости на поверхности изоляции

Изоляция и приповерхностный слой включаются последовательно при условии, что вектор электрического поля нормально падает на границу раздела. Тогда, переходя от параллельных схем замещения каждого слоя к последовательным, получим:

а) для изоляции жилы

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{R\omega C}; \quad C_s = C(1 + \text{tg} \delta^2); \quad R_s = \frac{\text{tg} \delta}{\omega C_s}; \quad (1)$$

б) для приповерхностного слоя (i)

$$\text{tg} \delta_i = \frac{1}{R_i \omega C_i}; \quad C_{is} = C_i(1 + \text{tg} \delta_i^2); \quad R_{is} = \frac{\text{tg} \delta_i}{\omega C_{is}}, \quad (2)$$

где индексы s означают последовательные схемы замещения компонентов.

Тогда общее активное последовательное сопротивление равно:

$$R_{os} = R_s + R_{is}, \quad (3)$$

а общая емкость –

$$\frac{1}{C_{os}} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{is}}. \quad (4)$$

Результирующий тангенс угла диэлектрических потерь равен:

$$\text{tg} \delta_{os} = R_{os} \omega C_{os}. \quad (5)$$

Таким образом, последовательность формул (1) – (5) описывает искомый тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta_{os}$ через параметры схемы замещения каждого слоя.

Выразим параметры схем замещения каждого слоя через известные толщины h , относительные диэлектрические проницаемости ϵ и удельные сопротивления ρ :

а) для изоляции кабеля

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h}; \quad R = \rho \frac{h}{S}; \quad (6)$$

б) для полупроводящего покрытия по изоляции

$$C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 S_i}{h_i}; \quad R_i = \rho_i \frac{h_i}{S_i}, \quad (7)$$

где для площадей S указанных слоев можно записать:

$$S = 2\pi(r + h/2); \quad S_i = 2\pi(r + h + h_i/2). \quad (8)$$

Если электрическое поле скользит вдоль изоляции и приповерхностного слоя, то есть к нормальной составляющей добавляется и тангенциальная, то слои включаются параллельно. Найдем результирующий тангенс угла диэлектрических потерь по параллельной схеме замещения $\text{tg} \delta_{op}$ слоев изоляции и приповерхностного слоя (см. формулы 1 – 2, 6 – 7):

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{R\omega C}, \quad \text{tg} \delta_i = \frac{1}{R_i \omega C_i} \quad (9)$$

- тангенсы углов диэлектрических потерь изоляции и приповерхностного слоя;

$$\frac{1}{R_{op}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_i} \quad (10)$$

- общее активное параллельное сопротивление;

$$C_{op} = C + C_i \quad (11)$$

- общая емкость;

$$\text{tg} \delta_{op} = 1 / (R_{op} \omega C_{op}) \quad (12)$$

- результирующий тангенс угла диэлектрических потерь.

Численные оценки по (1) – (12) выполним для жилы сечением 2,5 мм² с толщиной полиэтиленовой изоляции, равной радиусу жилы.

Пусть удельное электрическое сопротивление приповерхностного слоя меняется от $\rho_i = 10^2$ до 10^{14} Ом·м.

Расчет произведем для двух частот: 100 Гц и 10 кГц. Значения $\text{tg} \delta$ изоляции положим равными 0,1% и 0,005% соответственно. Эти значения получены на основании измерений изоляции жилы кабеля КПВГ с помощью накладных электродов.

Результаты расчетов по (5) и (12) представлены на рис. 4.

Из зависимостей рис. 5 следует ряд выводов.

Во-первых, при нормальном падении вектора электрического поля к приповерхностному слою (согласно рис. 4а) заметить появление последнего можно только в случаях, когда его удельное сопротивление находится в интервале $\rho_i = 10^7 \div 10^9$ (для частоты 100 Гц) и $\rho_i = 10^5 \div 10^7$ Ом·м (для частоты 10 кГц). При больших значениях ρ_i рассеяние энергии в приповерхностном слое уменьшается в результате уменьшения потерь на проводимость. При меньших значениях - из-за уменьшения падения напряжения на приповерхностном слое.

Во-вторых, заметить по приращению $\text{tg} \delta$ появление слоев повышенной приповерхностной проводимости из-за окисления полимера можно только на

определенном этапе процесса старения, а именно, когда ρ_i окажется в интервале 10^7 (для частоты 100 Гц) или 10^5 Ом·м (для частоты 10 кГц). При последующем старении будет наблюдаться снижение $\text{tg}\delta$, хотя проводимость поверхностного слоя будет продолжать нарастать. В этих случаях тангенс угла диэлектрических потерь возрастает, практически, в 10 раз, при относительной толщине слоя всего 1,1% от толщины изоляции жилы.

В-третьих, приповерхностные слои наиболее отчетливо проявляются на частоте 10 кГц, т.е. следует ожидать более высокую чувствительность измерений на этой частоте: (сравни рис. 5а и 5б).

Таким образом, загрязняющие приповерхностные слои можно выявить по результатам измерений тангенса угла диэлектрических потерь.

Однако в кабеле КПВГ внешний повив изолированных жил находится в тесном контакте с защитной ПВХ оболочкой (нет разделительных элементов). Очевидно, в процессе измерений зондирующее электрическое поле будет проникать и в защитную оболочку. Результаты измерений будут отражать и потери энергии в самой полимерной оболочке.

2. ИЗОЛИРОВАННАЯ ЖИЛА С ПРИПОВЕРХНОСТНЫМ СЛОЕМ И ЗАЩИТНОЙ ПВХ ОБОЛОЧКОЙ

Для трехэлементного объекта: изолированная жила, приповерхностный слой и защитная оболочка результирующий $\text{tg}\delta$ определяется на основании (1-12) с учетом оболочки.

На рис. 6 представлены результаты расчета результирующего $\text{tg}\delta$ изолированной жилы с приповерхностным слоем толщиной 100 мкм и защитной ПВХ оболочкой разной толщины. Видно, что приповерхностные слои можно заметить только в случае относительной доли оболочки менее 0,1% от толщины изоляции. При более высоких значениях наблюдается маскировка загрязняющих слоев высокопотерной защитной оболочкой.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В реальной конструкции кабеля (см. рис.1) защитная оболочка контактирует с изолированными жилами внешнего повива (А) не по всей поверхности, а частично. Естественно, доля энергии, накопленной в оболочке кабеля, будет меньше, чем в модельном объекте. Найдем доли энергии, накапливаемой в изоляции, приповерхностных слоях и оболочке для 27-жильного кабеля при разных схемах обследования.

Примем толщину приповерхностного слоя постоянной для всех жил и равной 10 мкм. Сечение жилы $2,5 \text{ мм}^2$. Толщина ПВХ оболочки $\Delta=0,6 \text{ мм}$. Относительные диэлектрические проницаемости: изоляции $\epsilon=2,1$; приповерхностного слоя $\epsilon_i=2*2,1$; ПВХ оболочки $\epsilon_2=4,1$ на частоте 10 кГц. Ограничимся случаями, когда потенциальными являются жилы с 1-й по 13-ю включительно, а далее будем к ним добавлять еще по одной жиле. Выбор схемы обследования отражается, прежде всего, на области пространства, где возникает зондирующее электрическое поле (рис. 7).

Если для рис. 7а, где 13 жил потенциальные, 14 – нулевые, поменять полярности всех жил: 14 жил станут потенциальными, 13 – нулевыми, поле в центральной части кабеля будет занимать ту же самую область и не изменится по величине (рис. 8).

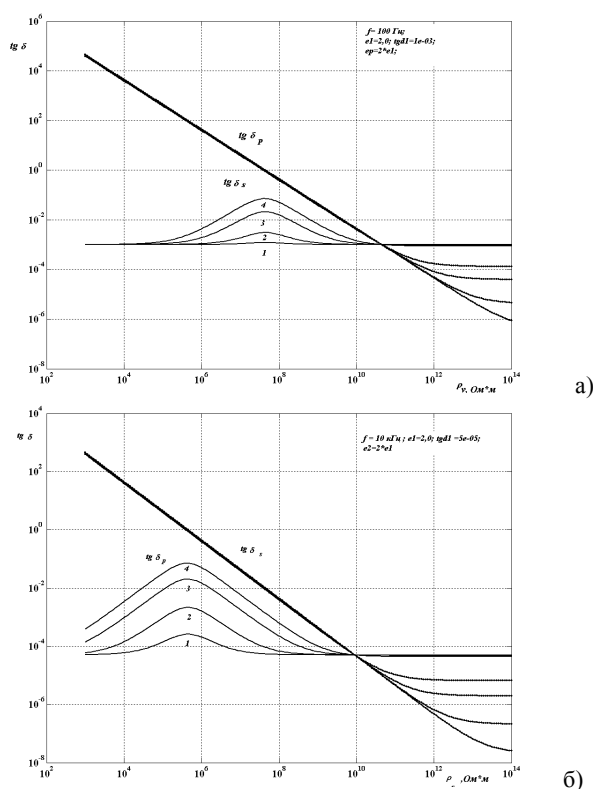


Рис. 5. Зависимости тангенса угла потерь изоляции жилы от объемного удельного электрического сопротивления приповерхностного слоя на частотах 100 Гц (а) и 10 кГц (б). Относительная толщина слоя h_i/h составляет: 1 – 0,11; 2 – 1,1%; 3 – 11%; 4 – 45%

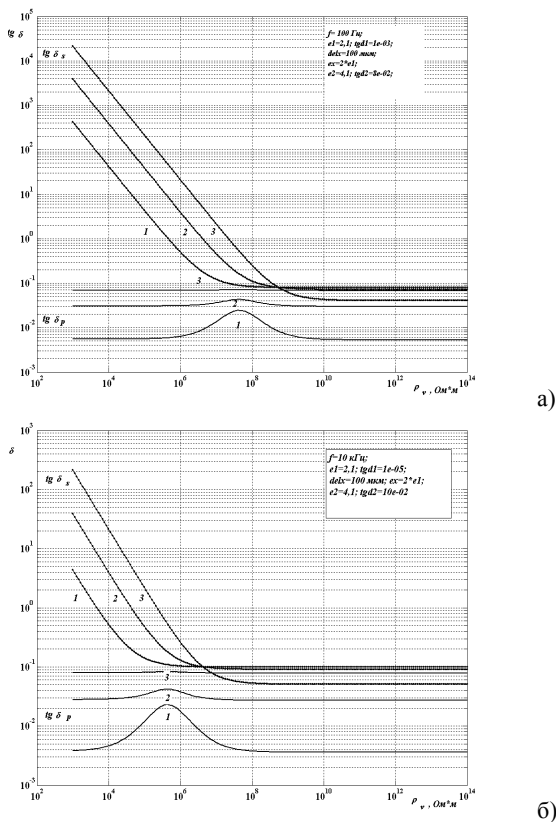
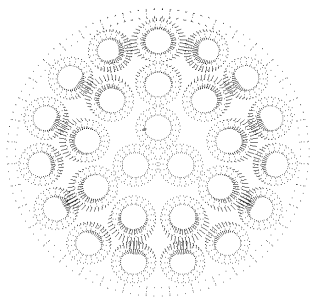
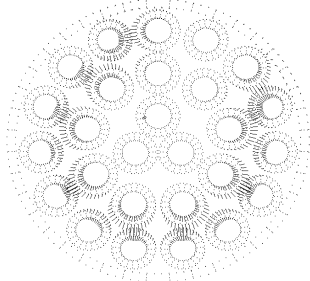


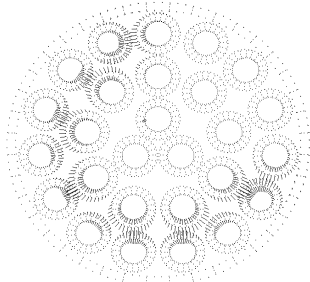
Рис. 6. Результирующий тангенс угла диэлектрических потерь изоляции, приповерхностного загрязнения и ПВХ оболочки при разных долевых содержаниях последней. Толщина ПВХ оболочки составляет от толщины изоляции: 1 – 0,1% ($\Delta=1 \text{ мкм}$); 2 – 1% (10 мкм); 3 – 10% (100 мкм)



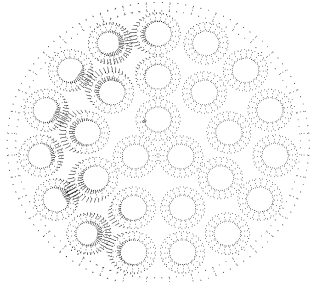
а) 13 потенциальных жил – против 14 нулевых жил



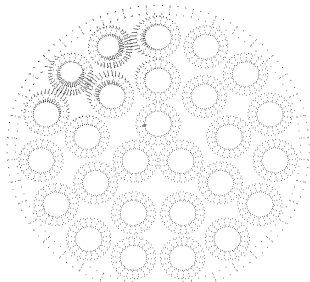
б) 15 потенциальных жил – против 12 нулевых жил



в) 17 потенциальных жил – против 14 нулевых жил



г) 21 потенциальная жила – против 6 нулевых жил



д) 25 потенциальных жил – против 2-х нулевых жил

Рис. 7. Картины силовых линий электрического поля при обследовании многожильного кабеля по разным схемам

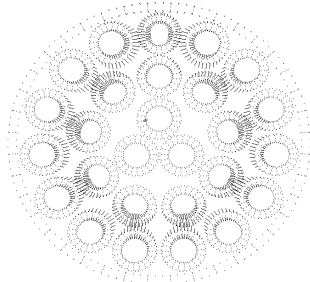


Рис. 8. То же, что и на рис. 6а, только 13 нулевых жил – против 14 потенциальных жил

С увеличением числа потенциальных жил растет объем пространства, охваченного полем до тех пор, пока соседние жилы с одинаковым потенциалом не начнут экранировать друг друга (рис. 9).

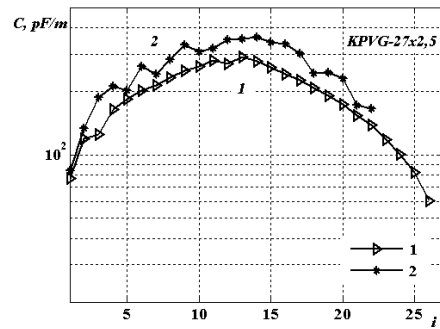


Рис. 9. Зависимости емкости отрезка кабеля КПВГ-27х2,5 от числа задействованных жил: 1 – расчетная; 2 – экспериментальная. Нумерация жил – из центра против часовой стрелки - наружу кабеля. Измеряется емкость i параллельно включенных жил относительно (27- i) остальных

Как видно из табл. 1, емкость опыта начинает сильно уменьшаться по мере увеличения числа потенциальных жил - от 312 пФ/м до 65 пФ/м. В то же время долевые содержания энергии, накопленной в изоляции жил и в приповерхностных слоях изменяются мало: η – от 0,56 до 0,51; η_i – от 0,07 до 0,055. В ПВХ оболочке – сильнее: η_2 – от 0,017 до 0,081, т.е. в 4, 8 раза.

Таблица 1
Емкость опыта и долевые содержания энергии, накопленной в изоляции жил, приповерхностных слоях и оболочке при разных схемах обследования 27 – жильного кабеля КПВГ

Схема обследования:	Совокупная емкость, пФ/м	Доля энергии, накопленной в изоляции всех жил η	Доля энергии, накопленной в приповерхностном слое η_i	Доля энергии, накопленной в ПВХ оболочке η_2
13 жил – против (27-13) = 14 жил	312	0,56	0,0695	0,017
15 жил – против (27 – 15) = 12 жил	279	0,56	0,069	0,023
17 жил – против (27 – 17) = 10 жил	249	0,56	0,069	0,028
19 жил – против (27 – 19) = 8 жил	204	0,55	0,065	0,041
21 жила – против (27 – 21) = 6 жил	164	0,54	0,065	0,053
23 жилы – против (27 – 23) = 4 жил	126	0,522	0,061	0,053
25 жил – против (27 – 25) = 2 жилы	87,8	0,52	0,059	0,074
26 жил – против (27 – 26) = 1 жилы	64,7	0,51	0,055	0,081

Разброс расчетных значений доли энергии определяет разброс значений тангенса угла диэлектрических потерь ПВХ оболочки. Он также равен 4,80%.

Данные расчета хорошо согласуются с результатами измерений, представленными на рис. 2а и 3: разброс $\text{tg}\delta$ для изолированных жил внешнего повива (А)

составляет 4,3%. Различие связано с упрощенной моделью расчета.

Таким образом, ПВХ оболочка оказывает сильное влияние на результаты измерений $\operatorname{tg} \delta$ изолированных жил внешнего повива. Диссипация энергии в приповерхностных слоях не проявляется на фоне потерь в оболочке.

Однако, заметить загрязнения можно, выполняя измерения всех изоляционных промежутков между жилами в кабеле. Для 27-жильного кабеля число промежутков составляет $(27 \times 26) / 2 = 351$. Общее число опытов для 27 жил будет равно:

$$M = n + (n-1) + (n-2) + \dots + 2 = ((n+2)/2) * (n-1) = ((27+2)/2) * (27-1) = 377.$$

На рис. 10 представлены результаты измерений $\operatorname{tg} \delta$ для 377 опытов, которые включают:

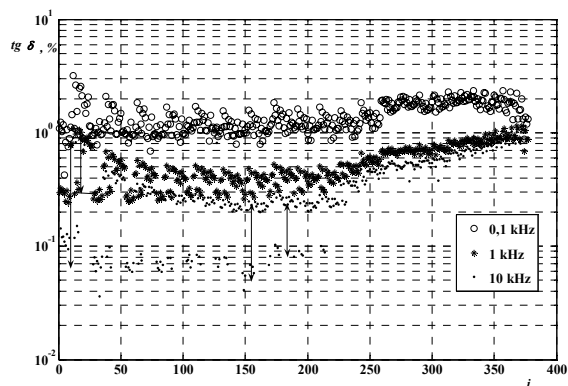


Рис. 10. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь отрезка кабеля КПВГ-27х2,5 от числа опытов: i меняется от 1 до 377. Отчетливо проявляется различие по $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 10 кГц

1) обследования собственно характеристик изоляции каждой из жил по схеме "жила – против всех остальных": 1- s ; 2- s ; ... n - s . (s обозначает все остальные жилы, кроме выбранной; $s = n-1$). Таких опытов – 27.

При таких обследованиях вектор зондирующего электрического поля падает нормально на границу раздела изоляция – приповерхностный слой.

2) сложные схемы зондирования с экранированием областей, расположенных между одноименно заряженными жилами:

1,2-($s-1$); 1,3-($s-1$); ... 1, n -($s-1$); - таких опытов – 26;
1,2,3-($s-2$); 1,2,4-($s-2$); ... 1,2, n -($s-2$); - таких опытов – 25; ... 1,2,3,...($n-2$) – n ; - таких опытов – 2.

При реализации сложных схем возникают как нормальные, так и тангенциальные составляющие зондирующего электрического поля на границе раздела.

Это схемы с плавающим электродом – шупом, который зондирует, как изоляцию, так и приповерхностные слои. Для таких схем наблюдается сильное, на порядок, различие по $\operatorname{tg} \delta$ на частоте 10 кГц (см. рис. 10).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, за счет тангенциальной составляющей напряженности электрического поля, возникающей на поверхности изоляции жил, увеличивается вклад приповерхностных слоев с повышенными потерями на общий тангенс угла потерь конструкции. Удастся выявить диссипацию энергии слоями загрязнения на фоне потерь в ПВХ оболочке. Причем, наиболее существенны потери на частоте 10 кГц – верхней границе звукового диапазона.

Однако доля энергии, накопленной в приповерхностных слоях, почти постоянна для разных схем обследования. Поэтому наблюдаемые экспериментально различия в величине $\operatorname{tg} \delta$ при разных схемах обследования связаны, по-видимому, в большей мере с неравномерным распределением по сечению кабеля веществ, рассеивающих энергию, а не с изменением структуры зондирующего поля.

Приповерхностные слои не являются стабильными и устойчивыми образованиями.

Поведение и свойства загрязнений определяются внешними воздействующими факторами. Со временем может происходить миграция легколетучих составляющих из приповерхностных слоев и кабеля в целом. Под действием температуры и электрического поля конденсированная влага с поверхности изолированных жил может испаряться [2–4]. Радиация может приводить к дополнительной шивке изоляции [5]. В результате диссипация энергии приповерхностными слоями уменьшается, что приводит к уменьшению измеряемого тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$. Это необходимо учитывать при оценке технического состояния кабелей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Беспрозванных А.В. Анализ матрицы коммутации при восстановлении частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь многожильных кабелей методом совокупных измерений. - *Электротехника і електромеханіка*. 2007, № 1 - С. 62 - 66.
- [2] Беспрозванных А.В. Сравнительный анализ поперечной структуры незаполненных и заполненных телефонных кабелей по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. - *Электротехника і електромеханіка*. 2007, № 5 - С. 61 - 65.
- [3] Беспрозванных А.В. Гигроскопическое увлажнение телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой. - *Электротехника і електромеханіка*. 2005, №4. - С. 40 - 44.
- [4] Беспрозванных А.В. Старение телекоммуникационных кабелей в процессе эксплуатации в условиях повышенной влажности // *Вестник НТУ "ХПИ"*. Харьков: НТУ "ХПИ", 2006, N28. - С. 3-6.
- [5] Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения. - *Электротехника і електромеханіка*. 2006, №3. - С. 82 - 86.
- [6] Беспрозванных А.В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей АЭС методом совокупных измерений // Тезисы докладов на X Международной конференции "Безопасность АЭС и подготовка кадров – 2007" (1 - 4 октября 2007 г., Обнинск, РФ).
- [7] Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Методика оценки технического состояния кабелей по параметрам межфазного пространства // Труды четвертой Международной научно-технической конференции "Электрическая изоляция-2006", 16-19 мая 2006 г., Санкт-Петербург, Из-во Политехнического ун-та, С. 190 -192. - 2006.

Поступила 17.04.2008