

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОПЕРЕЧНОЙ СТРУКТУРЫ НЕЗАПОЛНЕННЫХ И ЗАПОЛНЕННЫХ ТЕЛЕФОННЫХ КАБЕЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЕМКОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

Беспрозванных А.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"

тел. (057) 707-60-10, E-mail: Bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

Виконано аналіз результатів прямих вимірювань електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат незаповнених та заповнених гідрофобним желе телефонних кабелів з поліетиленовою ізоляцією. Встановлено, що заповнення осердя призводить до збільшення робочої ємності пар на 10%. Гідрофобний заповнювач нерівномірно розподіляється в поперечній структурі кабеля, про що свідчить більший розброс тангенса кута діелектричних втрат заповнених кабелів.

Выполнен анализ результатов прямых измерений электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь незаполненных и заполненных гидрофобным желе телефонных кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Установлено, что заполнение сердечника приводит к увеличению рабочей емкости пар на 10%. Гидрофобное заполнение неравномерно распределяется в поперечной структуре кабеля, о чем свидетельствует больший разброс тангенса угла диэлектрических потерь заполненных кабелей.

ВВЕДЕНИЕ

Существующие конструкции телефонных кабелей имеют в сердечнике значительный свободный объем. Так, в кабеле с полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой защитной оболочкой ТПП 50×4×0,4 свободный объем составляет 100 см³ на один погонный метр длины. При изготовлении кабелей, транспортировке и хранении, прокладке и эксплуатации в этом объеме может накапливаться гигроскопически связанная вода [1-5]. Наиболее эффективным решением проблемы влагозащиты кабелей является заполнение сердечника гидрофобным желе. Желе вводится в сердечник кабеля, проходящего через герметизированную ванну перед наложением экрана, под давлением до 1,5 МПа. В качестве заполнителя используются композиции из продуктов перегонки нефти - петролатум, часто с добавлением полиэтилена (таблица 1) [3]. Вытеснение воздуха и заполнение сердечника кабеля жидким гидрофобным заполнителем (ЖГЗ) приводит к увеличению емкости пар (таблица 2) и коэффициенту затухания (таблица 3) [2-4].

Таблица 1

Характеристики ЖГЗ	Значение
Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ	2,8
Удельное объемное сопротивление ρ_v , Ом·м	$1 \cdot 10^{12}$
$\text{tg}\delta$ на частоте 100 кГц	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Условная вязкость, с	20 -22

Таблица 2

диаметр жилы, мм	Коэффициент затухания кабеля СТПАПБП α , дБ/км на частоте для кабелей					
	Без гидрофобного заполнения			С гидрофобным заполнением		
	1 кГц	512 кГц	1024 кГц	1 кГц	512 кГц	1024 кГц
0,4	1,9	19,5	27,2	2,0	20,8	29,1
0,5	1,5	16,7	23,4	1,6	18,0	25,2

Таблица 3

Электрические параметры специальных телефонных кабелей со сплошной полиэтиленовой изоляцией типа СТПАПБП

Параметры	Норма
Электрическое сопротивление изоляции жил на постоянном токе на 1 км, Мом, не менее: - для кабелей без гидрофобного заполнения (для 100% значений) - для кабелей с гидрофобным заполнением	6500 5000
Рабочая емкость на частоте 0,8 или 1 кГц на 1 км, нФ: - для кабелей без гидрофобного заполнения (для 100% значений) - для кабелей с гидрофобным заполнением	45 ± 5 50 ± 5
Испытательное напряжение в течение 1 мин, В на постоянном токе: - между жилами рабочих пар - между жилами и экраном - между жилами и алюминиевой оболочкой	1500 3000 (до 315 В постоянного тока) 750 (до 200 В постоянного тока) 7500

Цель статьи – сравнительный анализ поперечной структуры незаполненных и заполненных гидрофобным желе телефонных кабелей пучковой скрутки по результатам прямых измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь.

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ РАБОЧЕЙ ЕМКОСТИ ПАРЫ

Основу симметричного кабеля составляют два идентичных проводника (рис. 1), расположенных параллельно друг другу либо скрученных с определенным шагом (витая пара). Рабочая (эффективная) емкость C_e одиночной пары (рис. 2) включает в себя взаимную (частичную) емкость (C_{12}) изоляционного про-

межутка между жилами 1 и 2 и собственные емкости жил 1 и 2 (C_{11} , C_{22}), включенные последовательно:

$$C_e = C_{12} + \frac{C_{11} \cdot C_{22}}{C_{11} + C_{22}} = C_{12} + \frac{1}{2} C_{11} \quad (1)$$

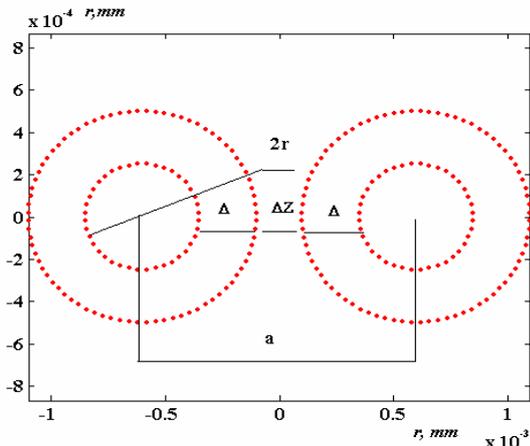


Рис. 1. Развертка пары симметричного кабеля: $2r$ – диаметр токопроводящей жилы, a – расстояние между центрами жил; Δ – толщина изоляции, ΔZ – зазор между проводниками

Она определяется как [1-2, 5]:

$$C_p = \frac{\pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{ЭКВ}}}{\ln \frac{a - r}{r}} \quad (2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ – эффективная (эквивалентная) диэлектрическая проницаемость изоляции пары, учитывающая как собственно твердую изоляцию (ϵ_d), так и зазора между ними (ϵ_b).

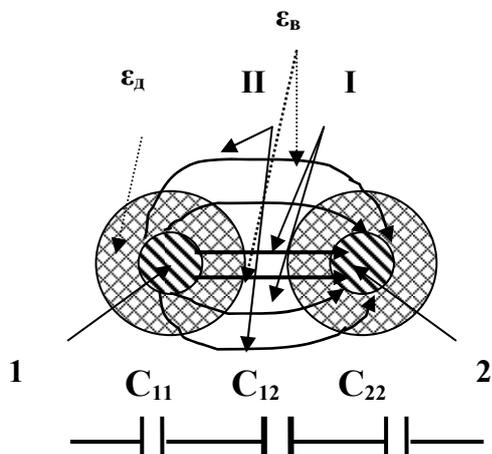


Рис. 2. Собственные (C_{11} и C_{22}) и взаимные (C_{12}) емкости двух жил

В (2) вычисление $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$ связано с определением объема, занятого воздухом, между проводниками (ΔZ , силовые линии I). Силовые линии электрического поля, выходящие из жилы 1, часть пути проходят как по твердому диэлектрику (ϵ_d), так и по воздуху (ϵ_b) даже при отсутствии воздушного зазора между изолированными жилами ΔZ (рис. 2, силовая линия II).

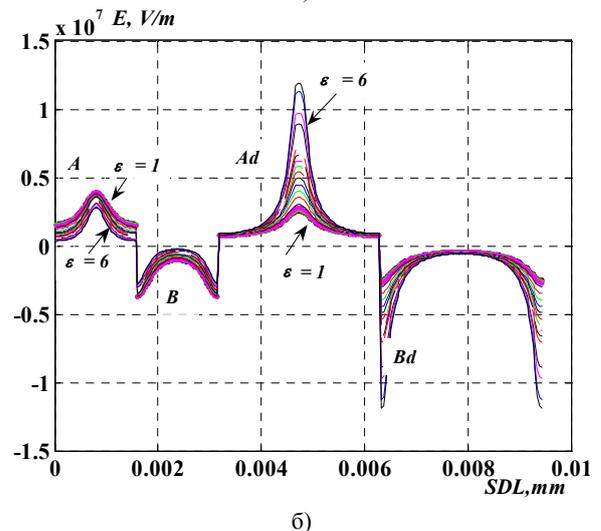
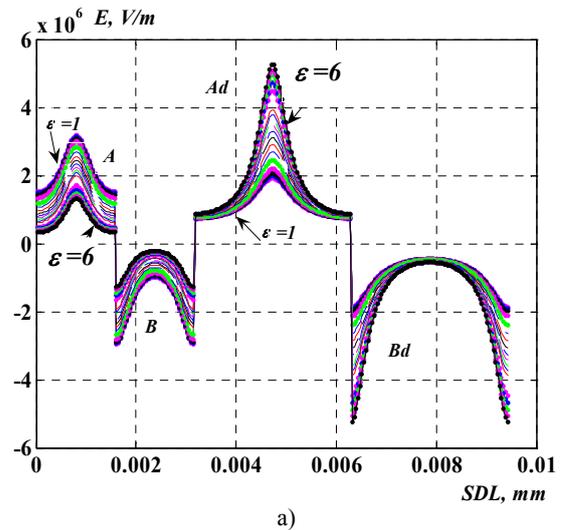


Рис. 3. Развертки напряженности поля по поверхностям жил витой пары (A, B) и их изоляции (Ad, Bd). Относительная диэлектрическая проницаемость изоляции жил варьировалась от $\epsilon_2 = 1$ до $\epsilon_2 = 3$. Диаметры проводников 0,5 мм, толщина изоляции 0,25 мм, воздушный зазор между изолированными жилами 0,1 мм (а) и 0,01 мм (б).

Испытательное напряжение 1500 В. С ростом относительной диэлектрической проницаемости изоляции жил уменьшается напряженность на поверхностях жил (эффект градирования) и возрастает – на поверхности изоляции

Расчет электрического поля пары численным методом (рис. 3) учитывает "траекторию" силовой линии при ее прохождении, как твердой изоляции, так и воздуха [6]. Напряженность на поверхности изолированной полиэтиленом ($\epsilon = 2,2$) жилы возрастает на 70% при уменьшении воздушного зазора с 0,1 до 0,01 мм. Рабочая емкость, определенная численным методом, возрастает на 28%. Рассчитанная по (2) – на 10%. Расхождение между емкостями, найденными в результате численного расчета C_e и по (2) C_p , составляет 18% (рис. 4). Корректировочный коэффициент K_p , учитывающий расхождение между емкостями, наименьший в области малых значений диэлектрических проницаемостей и при малом воздушном зазоре между проводниками (более плотном их прилегании, малом шаге скрутки) (рис. 4).

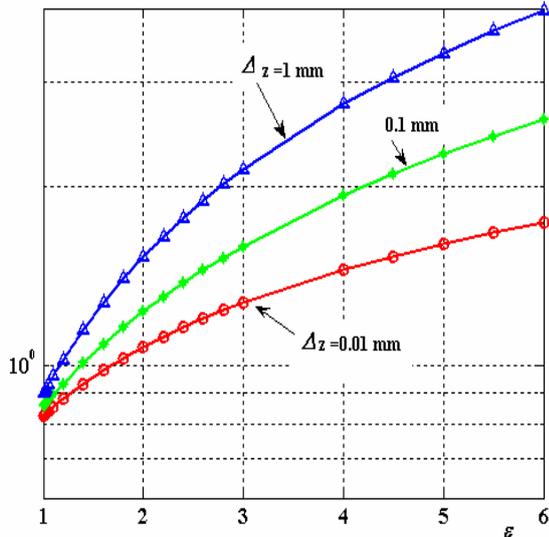
$K_p = C_p / C_e$ 

Рис. 4. Влияние материала изоляции на рабочую емкость витой пары при разных величинах воздушного зазора Δz

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Рабочие емкости телефонных кабелей измеряются в соответствии с ГОСТ 10786 -72 приборами с двумя клеммами. Жилы 1 и 2 (рис. 2) подключаются к зажимам моста непосредственно или через соединительные провода. Противоположный конец измеряемой цепи разомкнут. Все остальные цепи (жилы), экран и металлическая оболочка кабеля заземляются. **Заземление не отводит мимо измерительной цепи мешающие токи рядом расположенных изоляционных промежутков. В результате измеряется не рабочая, а совокупная емкость** (см. таблицу 2). Результаты измерений усложняют анализ состояния изоляции пар, как в процессе изготовления, так и эксплуатации.

В прямом методе измерений емкости и тангенса угла диэлектрических потерь используются 3 клеммы измерителя (например, измерителя иммитанса E7-14, E7-15): две - измерительные, одна - экранирующая. Измерительные клеммы подключаются к выбранной частичной емкости - изоляционному промежутку, например, к жилам пары, любой жиле и экрану. Экранирующая - к общей точке соединения всех остальных частичных емкостей. Наличие экранирующей клеммы позволяет отвести токи мешающих емкостей мимо измерительной цепи прибора. Эти токи не оказывают влияния на результаты измерений. Измеряется только выбранная, истинная, частичная емкость. Так, при измерении емкости C_{12} изоляционного промежутка между жилами 1 и 2 (рис. 2) прибором с двумя клеммами и третьим экранирующим собственными емкостями C_{11} и C_{22} отводятся мимо измерительной цепи и не оказывают влияния на результаты измерений:

$$C_{\text{изм}} = C_{12}$$

Емкость изоляционного промежутка между парами, измеренная прибором с тремя клеммами, будет в два раза меньше, измеренной прибором с двумя клеммами и заземленными остальными элементами кабеля.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Тестовые образцы - два образца телефонных кабелей пучковой скрутки с диаметром токопроводящих жил 0,5 мм идентичной конструкции, предназначенные для реализации технологии "последней мили", с шагами скруток пар 40 - 30 мм [3]. В ранее изготавливаемых телефонных кабелях абонентской сети шаги скруток пар составляли от 300 до 100 мм [1]. Первый образец - без заполнения длиной 1,80 м, второй - с гидрофобным заполнением длиной 1,85 м. Одинаковая длина образцов необходима для корректного сравнения измеряемых параметров (рис. 5). Сканирование поперечной структуры выполнено прямым методом. В таких кабелях 20 жил и один общий экран, т.е. 210 изоляционных промежутков (частичных емкостей). Только 10 из них - промежутки между жилами, составляющими пары.

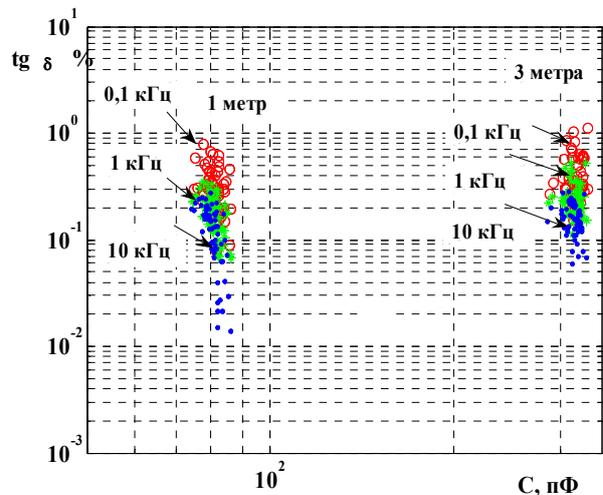


Рис. 5. Среднестатистическое усреднение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов кабеля ТППЗ-10х2х0,5 разной длины

На рис. 6 - 10 представлены результаты измерений частичных емкостей и $\text{tg} \delta$ изоляционных промежутков тестовых образцов. Для заполненного кабеля подавляющая часть значений емкостей изолированных жил смещена в область больших значений (см. рис. 7, 1г), а незначительная - на том же уровне, что и для незаполненного кабеля (рис. 7, 1). Это связано с тем, что на поверхности этих жил нет гидрофобного желе. Для незаполненного кабеля емкости жил на экран меньше, чем емкости пар (рис. 8, 2 и 3). Для заполненного кабеля - наоборот: емкости жил на экран больше, чем емкости пар.

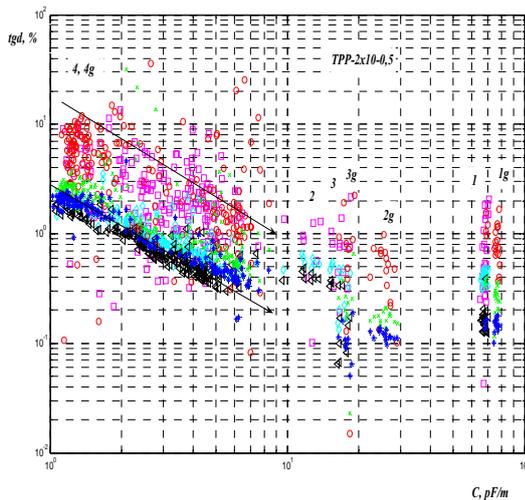


Рис. 6. C – tgδ диаграмма образцов кабелей ТПП-2x10 – 0,5 без гидрофобного заполнения (1 – 4) и с ним (1g – 4g). Частоты измерений: 0,1 кГц ('o', 's'), 1 кГц ('x', '^'), 10 кГц ('*', 'p')

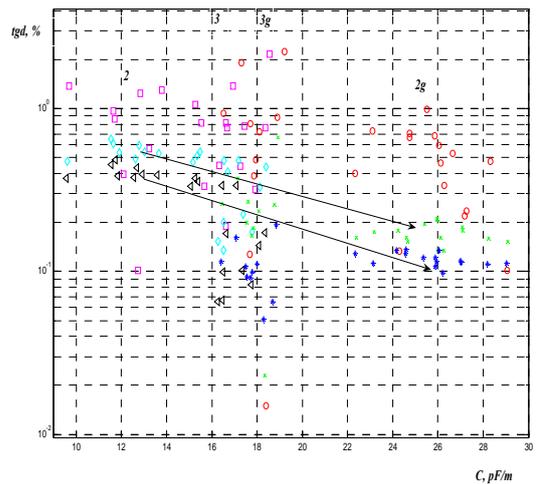


Рис. 8. То же, что на рис.7, но для областей: 2, 2g – емкости жил на экран; 3, 3g - емкости пар. Видны значимые отличия по емкости и тангенсу угла диэлектрических потерь на частотах 1 и 10 кГц (показаны стрелками)

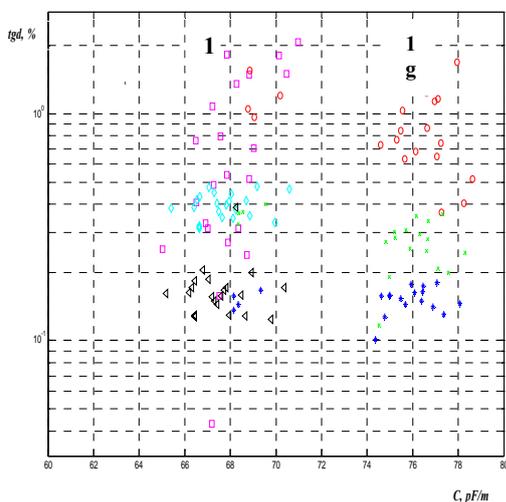


Рис. 7. Параметры частичных емкостей образцов кабелей ТПП-2x10-0,5 без гидрофобного заполнения (1) и с ним (1g). Область собственных емкостей изолированных жил. Видны значимые отличия по емкости и тангенсу угла диэлектрических потерь на частоте 1 кГц

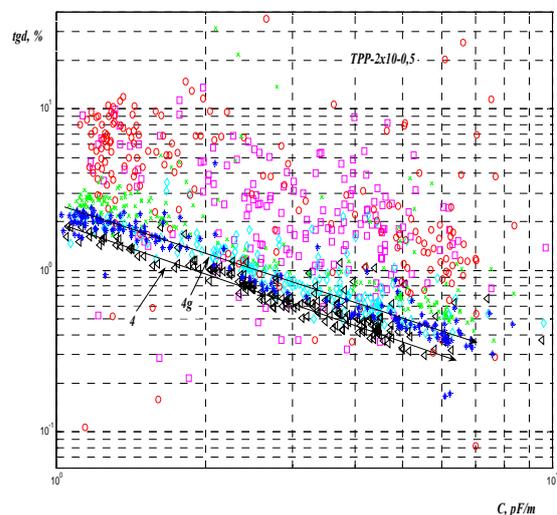


Рис. 9. То же, что и на рис. 7, но для области взаимных емкостей между жилами: 4 – без гидрофобного заполнения; 4g – с гидрофобным заполнением

Вытеснение воздуха ($\epsilon_v = 1$) и заполнение свободного объема гидрофобом между проводниками и экраном ($\epsilon_r > 2$) выражено в большей степени, чем между парами проводников. Причина - свободный объем между проводниками пар мал из-за более плотного взаимного расположения (см. рис. 8, 3 и 3g).

Для рассмотренных областей тангенс угла диэлектрических потерь заполненного кабеля имеет меньшие значения по сравнению с незаполненным, особенно для частоты измерений 1 кГц (рис. 7–9). **Очевидно, что в незаполненном кабеле в свободном объеме присутствует гигроскопически связанная влага [7].** Влага могла попасть внутрь сердечника в процессе изготовления кабеля. Для области взаимных областей между проводниками, в том числе для проводников, удаленных от экрана, tgδ заполненного кабеля больше, чем у незаполненного (рис.10).

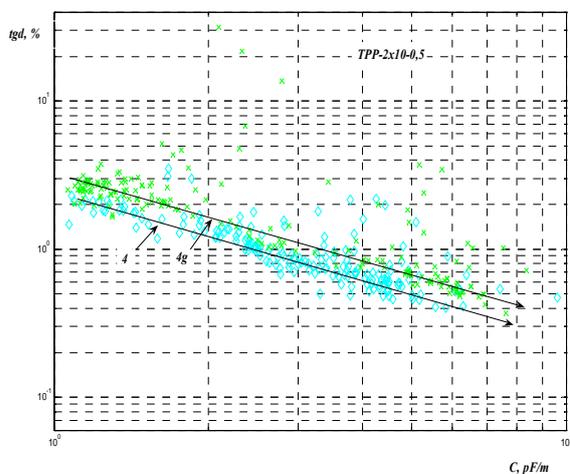


Рис. 10. То же, что и на рис. 9, но для частоты измерений 1 кГц: 4 – без гидрофобного заполнения; 4g – с гидрофобным заполнением

Это может быть связано с конденсацией влаги (росой) на поверхности полиэтилентерефталатной пленки, скрепляющей сердечник кабеля. Сравнение результатов измерений $\text{tg}\delta$ заполненного и незаполненного образцов кабелей показывает, что различие выборок на всех трех частотах измерений значимое (рис. 12–13). Вероятность случайного отличия (Prob) равна 0.

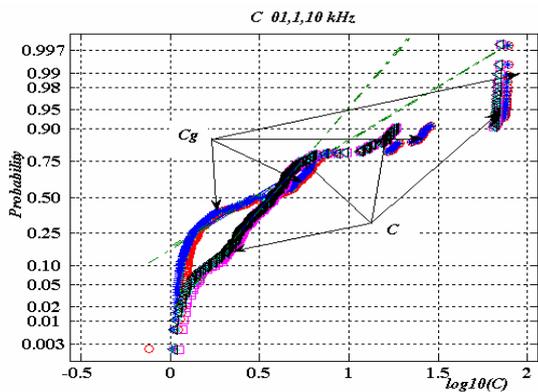


Рис. 11. Интегральные функции распределения значений емкости образцов кабелей ТПП-2х10-0,5 без гидрофобного заполнения (C) и с ним (C_g)

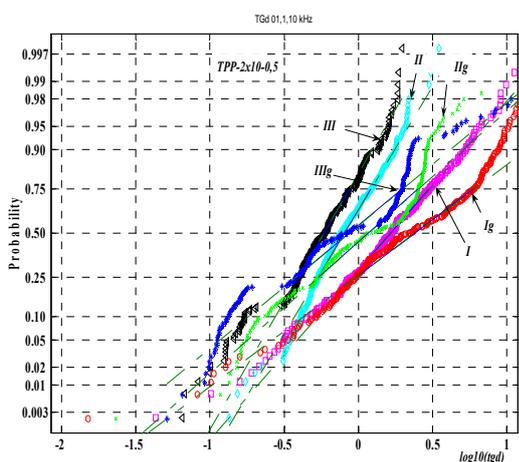


Рис. 12. Интегральные функции распределения $\text{tg}\delta$ изоляционных промежутков образцов кабелей ТПП-2х10-0,5 без гидрофобного заполнения (I, II, III) и с ним (I_g, II_g, III_g). Частоты измерений: 0,1 кГц - I, I_g ; 1 кГц - II, II_g ; 10 кГц - III, III_g

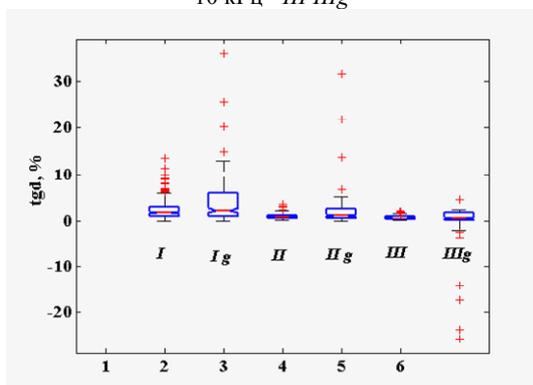


Рис. 13. Статистический анализ результатов прямых измерений $\text{tg}\delta$ образцов кабелей ТПП-2х10-0,5 без гидрофобного заполнения (I, II, III) и с ним (I_g, II_g, III_g) (Частоты измерений: 0,1 кГц - I, I_g ; 1 кГц - II, II_g ; 10 кГц - III, III_g) Различие выборок - значимое ($\text{Prob}=0$)

ВЫВОДЫ

1. Рабочие емкости витых пар симметричных кабелей, определяемые по (2), имеют завышенные значения, особенно для изоляции на основе поливинилхлоридного пластика и больших шагов скруток (рис. 4). Нормы на рабочую емкость пары отражают влияние рядом расположенных пар, конструктивных металлических элементов. Совокупная емкость пар оправдана с точки зрения передачи информационных сигналов.

2. Численный расчет рабочей емкости C_e пар позволяет найти, как взаимную емкость C_{12} между изолированными жилами, так и собственные емкости каждой жилы ($C_{11} \approx C_{22}$). Полученный корректировочный коэффициент K_p дает возможность определить эффективную рабочую емкость витой пары при любом воздушном зазоре (шаге скрутки) и материале изоляции (см. рис. 4).

3. При прямом методе измерений с 3-мя электродами мешающие токи рядом расположенных жил, экранов, металлических оболочек отводятся мимо измеряемой цепи и не влияют на результаты измерений.

4. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры кабелей позволяет анализировать состояние изоляции отдельных жил, изоляционных промежутков между изолированными жилами, свободного объема. Частичные емкости изоляционных промежутков между проводниками пар C_{12} составляют, в среднем, 16 пФ/м в незаполненном кабеле и 18 пФ/м - в заполненном (рис. 6, 8). При этом $\text{tg}\delta$ незаполненному гидрофобным желе кабеле больше, чем в заполненном. Влага попадает внутрь сердечника кабеля, как в процессе изготовления, так и хранения.

5. Заполнение сердечника кабеля желе увеличивает емкости пар, в среднем, на 10%. Неравномерность распределения гидрофобного заполнения в поперечном сечении кабеля приводит к большому разбросу $\text{tg}\delta$ (рис. 13).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гроднев И.И. Кабели связи. - М.: Энергия, 1976. - 269 с.
- [2] Брискер А.С., Руга А.Д., Шарле Д.Л. Справочник. Городские телефонные кабели. - М.: Радио и связь, 1991 - 207 с.
- [3] Портнов Э.Л., Зубилевич А.Л. Электрические кабели связи и их монтаж. - М.: Горячая линия, Телеком, 2005. - 263 с.
- [4] ГОСТ Р 51311 - 99. Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке.
- [5] Демирчян К.С., Нейман Н.В., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. -4-е изд. - СПб.: Питер, 2003. - 576 с.
- [6] Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике. - Киев: ИСДО, 1995. - 120 с.
- [7] Беспрозванных А.В. Гигроскопическое увлажнение телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой. - Электротехника и электромеханика. №4, 2005. - С. 40 -44.

Поступила 11.12.2006