

ГИГРОСКОПИЧЕСКОЕ УВЛАЖНЕНИЕ ТЕЛЕФОННОГО КАБЕЛЯ С ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Беспрозванных А.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

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

На протяжii двох рокiв телефонний розподiльний кабель знаходився в ексікаторі, в якому відносна вологість дорівнювала майже 100 %. Періодично виконувалось вимірювання електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат. Встановлено, що з часом разом із зволоженням спостерігається процес набухання полімерної поліетиленової оболонки та ізоляції. Гігроскопічна волога з поверхні проникає в об'єм матеріалу та розчиняється в ньому. При цьому товщина оболонки та ізоляції зростає, а довжина – зменшується.

На протяжении двух лет телефонный распределительный кабель находился в эксикаторе, относительная влажность в котором составляла практически 100 %. Периодически производилось измерение емкости и тангенса угла диэлектрических потерь. Установлено, что со временем наряду с процессом увлажнения наблюдается процесс набухания полимерной полиэтиленовой оболочки и изоляции. Гигроскопическая влага с поверхности проникает в объем материала и растворяется. При этом толщина изоляции и оболочки возрастает, а длина – уменьшается.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации кабелей возможно продольное и поперечное проникновение влаги в сердечник кабеля. Причиной продольного распространения влаги является наличие свободного объема, поперечного – водопоглощение полимерной оболочки и изоляции за счет влагопроницаемости и диффузии паров воды [1-3].

В кабелях всегда имеет место свободный объем. Так, в кабеле КСПП 1x4x1,2 один погонный метр имеет 100 см³ объема полиэтиленовой изоляции и 10 см³ объема воздуха. Объем воздуха составляет 10% от объема твердой изоляции. В не увлажненном состоянии наличие воздушной прослойки в кабелях связи играет положительную роль. Она приводит к меньшим значениям эквивалентной диэлектрической проницаемости, емкости и коэффициента затухания. Однако заполнение свободного объема водой приводит к обратному эффекту.

Критическое значение диаметра свободного объема, соответствующее потере устойчивости границы «воздух – вода», т.е. распространению воды по длине кабеля, определяется только свойствами воды. Установлено, что критический диаметр для воды равен $d_{кр} = 6,5 \pm 0,1$ мм. В кабеле КСПП диаметр свободного объема составляет 18 мм. В результате распространения воды по свободному объему наблюдается изменение диэлектрических характеристик изоляции кабеля: уменьшается сопротивление изоляции жил по отношению к экрану и между жилами, увеличивается эквивалентная диэлектрическая проницаемость, рабочая емкость, тангенс угла диэлектрических потерь, активная проводимость, затухание (рис.1) [4].

Цель статьи – наблюдение во времени гигроскопического увлажнения телефонного кабеля с полиэтиленовой оболочкой.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УВЛАЖНЕННОГО КАБЕЛЯ

На начальных стадиях увлажнения изменяются емкость и активная проводимость изоляции кабеля.

Сопротивление цепи и индуктивность кабеля не подвергнутся действию влаги.

Считаем, что кабель является однородным, (параметры не изменяются по длине). В процессе увлажнения влага равномерно распределяется по всей длине кабеля. Схема замещения электрического кабеля (цепь с распределенными параметрами) может быть представлена в виде Т-образной схемы с сосредоточенными параметрами (рис.2).

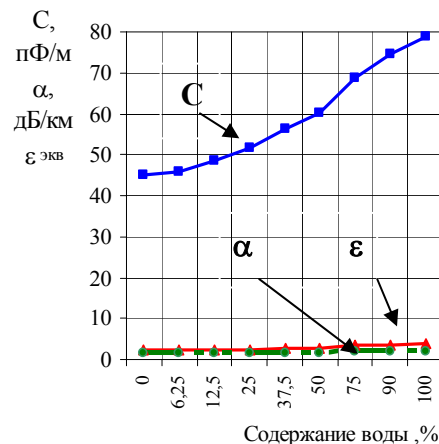


Рис.1. Влияние содержания воды в сердечнике кабеля ТПП 50x2x0,5 на емкость, диэлектрическую проницаемость и коэффициент затухания ($f = 1$ кГц)

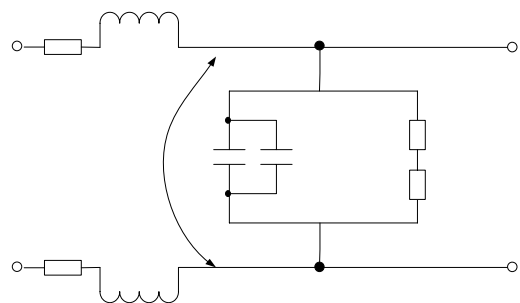


Рис.2. Схема замещения увлажненного кабеля

Емкость C и активная проводимость G (на переменном токе) увлажненного кабеля с учетом схемы замещения могут быть определены как:

$$C_{увл} = C_{исх} + \Delta C = C_{исх} \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C_{исх}}\right) = C_{исх} \cdot \left(1 + \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}\right) \quad (1)$$

$$G_{увл} = G_{исх} + \Delta G = G_{исх} \cdot \left[\frac{\Delta G}{G_{исх}} + \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{увл}}{\operatorname{tg} \delta_{исх}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta C}{C_{исх}}\right)\right] = G_{исх} \cdot \left[\frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}} + \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{увл}}{\operatorname{tg} \delta_{исх}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}\right)\right], \quad (2)$$

где $C_{исх}$, $\epsilon_{исх}$, $G_{исх}$, $\operatorname{tg} \delta_{исх}$ – емкость, эквивалентная диэлектрическая проницаемость и эквивалентный тангенс угла диэлектрических потерь кабеля в исходном, не увлажненном, состоянии; ΔC , ΔG , $\Delta \epsilon_{увл}$, $\Delta \operatorname{tg} \delta_{увл}$ – приращение емкости, проводимости, диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляции кабеля в результате увлажнения.

Увеличение емкости C и активной проводимости G приводит к уменьшению волнового сопротивления $Z_{в}$ и росту коэффициента распространения γ и его частей – коэффициента затухания α и коэффициента фазы β (рис.1):

$$\dot{Z}_{увл} = \sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G_{увл} + j \cdot \omega \cdot C_{увл}}} = \quad (3)$$

$$\sqrt{\frac{R + j \cdot \omega \cdot L}{G_{исх} \left[\frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}} + \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{увл}}{\operatorname{tg} \delta_{исх}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}\right) \right] + j \cdot \omega \cdot C_{исх} \left(1 + \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}\right)}},$$

$$\dot{\gamma} = \alpha + j \cdot \beta = \sqrt{(R + j \cdot \omega \cdot L) \cdot (G_{увл} + j \cdot \omega \cdot C_{увл})} = \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_{исх} \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(1 + \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}\right) \cdot \left[G_{исх} \cdot \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{увл}}{\operatorname{tg} \delta_{исх}} + j \cdot \omega \cdot C_{исх}\right] + G_{исх} \cdot \frac{\Delta \epsilon_{увл}}{\epsilon_{исх}}}{G_{исх} + j \cdot \omega \cdot C_{исх}}},$$

Для диапазона тональных частот $\Delta f = 4$ кГц, $R \gg \omega L$, $C \gg \omega G$, поэтому можно записать:

$$\dot{Z}_{увл} \approx \sqrt{\frac{R}{j \cdot \omega \cdot C_{увл}}}, \quad (5)$$

$$\alpha_{увл} = 8,69 \cdot \sqrt{\omega \cdot R \cdot C_{увл}}, \quad (6)$$

где R и L – активное сопротивление и индуктивность кабеля.

ТЕСТОВЫЙ ОБЪЕКТ

Влияние влаги на параметры передачи рассмотрено на примере распределительного телефонного кабеля абонентской сети ТПП - 10х2 - 0,4 с изоляцией и оболочкой на основе полиэтилена. Кабель состоит из 10 пар (20 проводников с медными токопроводящими жилами диаметром 0,4 мм). Поверх сердечника кабеля наложен алюминиевый экран с дренажным проводником (рис.3) [5 - 8].

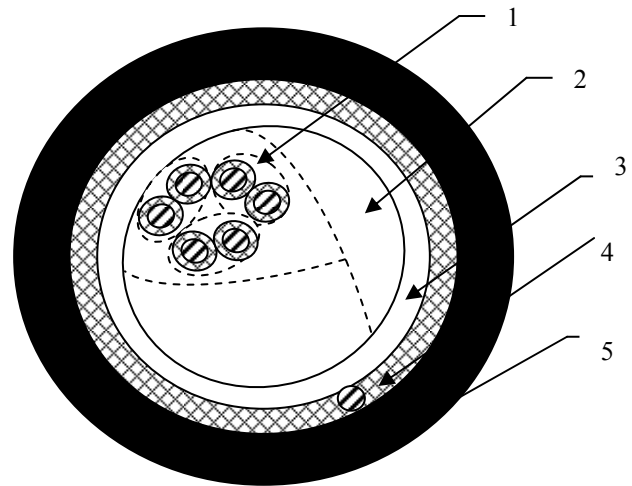


Рис.3. Конструкция тестового объекта
1 - скрученная пара; 2 - 10-ти парный сердечник кабеля; 3 – скрепляющая лента на основе полиэтилентерефталата; 4 – алюминиевый экран с дренажным проводником; 5 – защитная полиэтиленовая оболочка с добавлением 2,5 % сажи

Кабель длиной 0,8 м свободно, не касаясь воды, находился в стеклянном сосуде – эксикаторе. Относительная влажность воздуха в эксикаторе составляла 100 %. На протяжении более двух лет кабель периодически извлекался для измерения C и $\operatorname{tg} \delta$. Для уменьшения влияния поверхностной влаги на результаты измерения кабель в течении часа – двух находился на открытом воздухе (естественная сушка образца). Емкость и тангенс угла диэлектрических потерь измерялись по схеме: алюминиевый экран с дренажным проводником относительно всех остальных проводников, соединенных вместе, на четырех частотах: 0,1; 1; 10 и 1 000 кГц.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 4 представлены временные ряды измеренных значений C (а) и $\operatorname{tg} \delta$ (б) распределительного кабеля с полиэтиленовой оболочкой в процессе гигроскопического увлажнения.

Участок 1 соответствует измерению параметров в процессе увлажнения, 2 – естественной сушке образца в течение одного месяца.

На рис. 5 – 6 приведены частотные зависимости емкости и тангенса угла диэлектрических потерь образца кабеля в процессе увлажнения.

В исходном состоянии емкость и тангенс угла диэлектрических потерь слабо зависят от частоты (рис. 5, 6 кривые 1). В начале гигроскопического увлажнения образца идет увеличение C и $\operatorname{tg} \delta$ (рис. 5, 6 кривые 2). В конце – отмечается снижение емкости (рис. 5 кривые 3) и рост $\operatorname{tg} \delta$ в области низких частот (рис.6 кривые 3).

Падающие зависимости емкости от частоты являются подтверждением того, что в свободный объем кабеля попала гигроскопически - связанная вода - сильно полярный диэлектрик, который и определяет такой характер зависимостей. Уменьшение емкости образца в конце наблюдения связано с параллельны-

ми процессами, происходящими при увлажнении кабеля. Это можно объяснить набуханием оболочки и изоляции. В результате увеличивается толщина и уменьшается длина оболочки и изоляции, изменяется свободный объем сердечника кабеля.

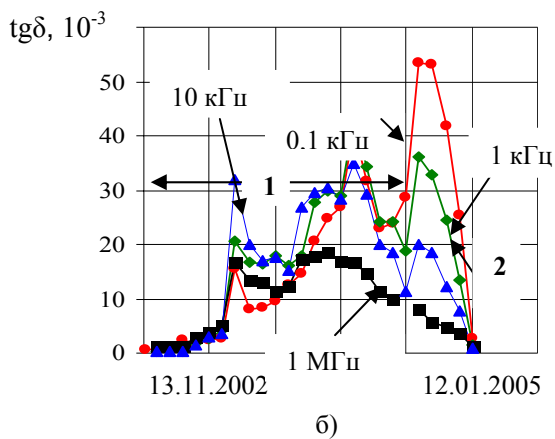
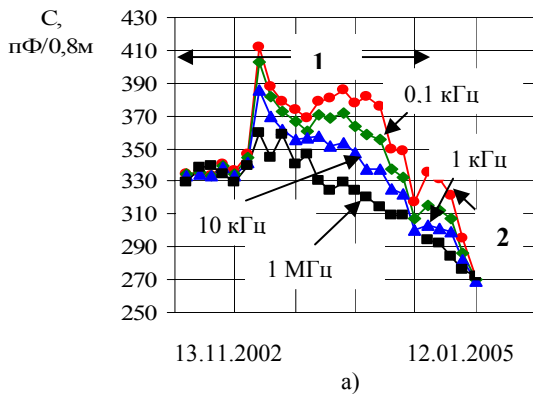


Рис. 4. Частотно-временные ряды измеренных значений C и $\text{tg}\delta$ кабеля ТПП в процессе гигроскопического увлажнения

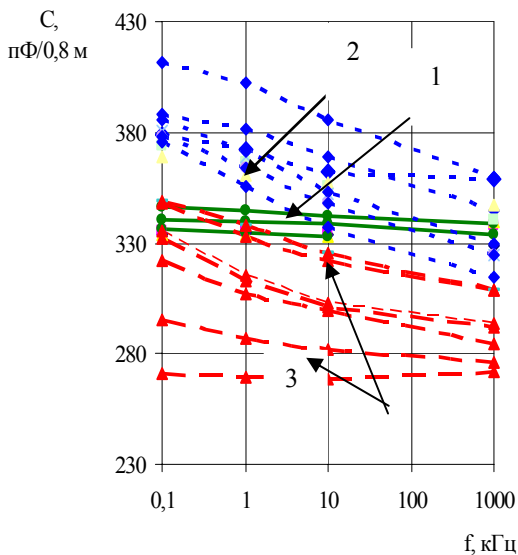


Рис.5. Частотные зависимости емкости образца кабеля в процессе увлажнения

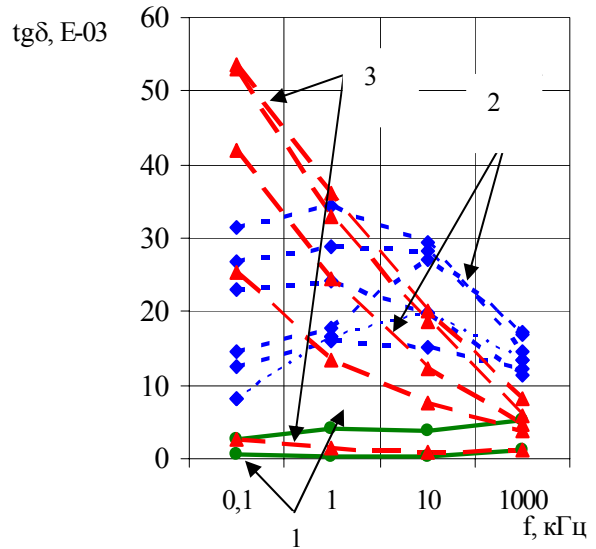


Рис.6. Частотные зависимости $\text{tg}\delta$ образца кабеля в процессе увлажнения

Подтверждением процессов увлажнения и набухания изоляции являются частотные зависимости $\text{tg}\delta$ (рис.6 кривые 2 и 3).

На этапе гигроскопического увлажнения тангенс угла диэлектрических потерь имеет выраженный максимум. В начале увлажнения и заполнения свободного объема сердечника кабеля водой максимум проявляется на частоте 10 кГц. По мере увеличения содержания влаги – на частоте 1 кГц. При этом для частоты 10 кГц наблюдается положительная корреляция между C и $\text{tg}\delta$: большим значениям емкости соответствуют большие значения тангенса угла диэлектрических потерь (рис.7, I).

На этапе набухания изоляции и оболочки характер частотной зависимости $\text{tg}\delta$ меняется. С ростом частоты $\text{tg}\delta$ уменьшается. При этом большим значениям $\text{tg}\delta$ соответствуют меньшие значения емкости на частоте 0,1 кГц (рис.7, II). После естественной сушки в течение месяца падающий характер зависимости $\text{tg}\delta$ от частоты сохраняется.

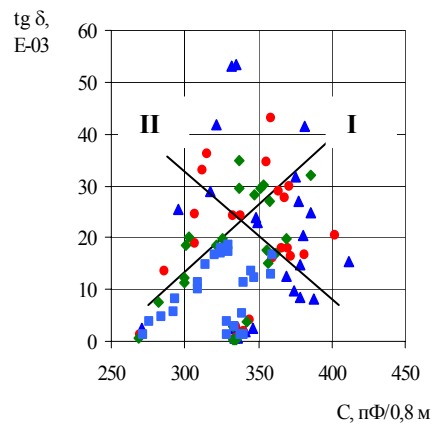


Рис.7. C - $\text{tg}\delta$ зависимости образца кабеля в процессе увлажнения для разных частот

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В процессе гигроскопического увлажнения телефонного распределительного кабеля с полиэтиленовой изоляцией и полиэтиленовой оболочкой наблюдается два параллельных процесса, разнесенных во времени. На протяжении двух лет происходит проникновение влаги в свободный объем кабеля. При этом емкость и тангенс угла диэлектрических потерь возрастают относительно исходного, не увлажненного, состояния. Влага в этом случае распределяется в свободном объеме в виде шаровидных частиц. Однако через два года (для данного кабеля и условий, в которых он находился) начинается уменьшение емкости. При этом меняется характер зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от частоты. Вода растекается по поверхности полиэтиленовой изоляции, т.к. меняется угол смачивания. Он становится равным меньше 90° (рис.7). Влага распределяется в виде нитей и пленок, как по поверхности, так и внутри объема изоляции. Размер молекулы воды равен $2,7 \text{ \AA}$. Она способна проникать даже во внутри молекулярную пористость полиэтилена (таблица 1). В результате диффузии воды с поверхности в объем полиэтилена, оболочка и изоляция кабеля поглощают (растворяют) влагу. Коэффициент растворимости для полиэтилена равен $h = (1,66 - 11,2) 10^{-4} \text{ кг/(м}^3 \text{ Па)}$ (таблица 2). В низкочастотных телефонных кабелях ТПП используется полиэтилен низкой плотности, который характеризуется повышенным поглощением влаги. В процессе набухания полиэтилена возрастает толщина изоляции. Это приводит к уменьшению емкости. Вместе с тем происходит изменение свободного объема, в котором помимо заземленной влаги находится воздух. Наблюдается также укорочение полиэтиленовой оболочки и изоляции по длине кабеля.

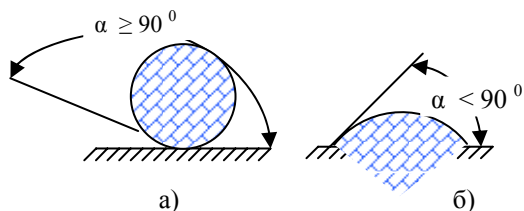


Рис.8 Растекание капли воды на не смачиваемой (а) и смачиваемой (б) поверхности материала

Таблица 1

Ориентировочные размеры пор электроизоляционных материалов

Наименование пористости	Размер пор, \AA
Макропоры в керамике	$10^3 - 10^6$
Капилляры в волокнах целлюлозы	10^3
Поры в стенках волокна	10 - 100
Межмолекулярная пористость различных материалов	10 - 50
Внутри молекулярная пористость	До 10

Таблица 2

Предельное поглощение полимерных материалов при температуре 20°C

Материал	Коэффициент растворимости $h, 10^{-4}$, $\text{кг/(м}^3 \times \text{Па)}$
Полиэтилен	1,66÷11,2
Поливинилхлорид	9,94÷42
Полистирол	0,51÷4,2
Политетрафторэтилен	0,94÷1,2
Полиметилметакрилат	2,47÷9,75
Полиуретан	39,7÷52,5
Кремнийорганическая резина	50÷60

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ

Оценку изменения толщины изоляции и свободного объема между проводниками в сердечнике кабеля выполним в следующей последовательности. В выбранной схеме емкость измеряется между внешним экраном с дренажным проводником и остальными проводниками, соединенными вместе. Поэтому при расчетах можно воспользоваться емкостью для коаксиального кабеля:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{исх}}}{\ln \frac{r_{\text{экр}}}{r_{\text{пров}}}}, \quad (7)$$

где $r_{\text{экр}}$ – радиус по экрану, $r_{\text{пров}}$ – радиус всех токопроводящих жил.

Значение эквивалентной диэлектрической проницаемости полиэтиленовой изоляции с учетом воздушной прослойки в исходном состоянии примем равным $\epsilon_{\text{исх}} = 1,9$, что соответствует реальным данным [6]. Тогда в исходном, не увлажненном состоянии, отношение радиуса экрана к радиусу всех жил, т.е. толщина изоляции со свободным воздушным объемом при $C_{\text{исх}} = 330 \text{ пФ/0,8 м}$ на частоте $0,1 \text{ кГц}$ будет равна:

$$\left(\frac{r_{\text{экр}}}{r_{\text{пров}}} \right)_{\text{исх}} = e^{0,32} = 1,4$$

В процессе гигроскопического увлажнения эквивалентная диэлектрическая проницаемость возрастает. Ее значение определим на основании (1) для емкости в увлажненном состоянии, равном $C = 385 \text{ пФ/м}$. При этом считаем, что геометрия сердечника кабеля не меняется ($r_{\text{экр}} / r_{\text{пров}} = \text{const} = 1,4$):

$$\frac{\Delta \epsilon_{\text{увл}}}{\epsilon_{\text{исх}}} = \frac{C_{\text{увл}}}{C_{\text{исх}}} - 1 = \frac{385}{330} - 1 = 0,17$$

$$\Delta \epsilon_{\text{увл}} = 1,9 \cdot 0,17 = 0,323;$$

$$\epsilon_{\text{увл}} = 1,9 + 0,323 = 2,223$$

Отношение $r_{\text{экр}} / r_{\text{пров}}$ в результате набухания изоляции изменится ($C_{\text{набух}} = 300 - 315 \text{ пФ / 0,8 м}$) и будет равно:

$$\ln\left(\frac{r_{\text{экр}}}{r_{\text{пров}}}\right)_{\text{набух}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,223}{315 \div 300} =$$

$$= 0,39 \div 0,41$$

$$\left(\frac{r_{\text{экр}}}{r_{\text{пров}}}\right)_{\text{набух}} = e^{0,39 - 0,41} = 1,48 \div 1,5$$

Увеличение толщины изоляции при набухании составляет 6 – 7 %.

Укорочение длины Δl кабеля при этом будет равно:

$$\Delta l = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{набух}}}{C_{\text{исх}}} \cdot l_{\text{каб}} = \frac{330 - (300 - 315)}{330} \cdot 0,8 \approx$$

$$= 3,5 \div 7 \text{ см,}$$

т.е. 4,5 – 9 % от длины кабеля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределительный телефонный кабель прокладывается в кабельной канализации от распределительного шкафа до распределительной коробки абонентской телефонной сети. Рабочее затухание в сети не должно превышать 4,34 дБ [9]. При этом длина линии - около 3 км. В линии не предусмотрена установка усилителей. На магистральном участке от АТС до распределительного шкафа применяется содержание кабелей под избыточным давлением (не менее 0,05 Мпа) для защиты от влаги. На распределительном участке кабели не содержатся под избыточным давлением. Влага проникает внутрь кабеля. За два года наблюдений емкость возросла на 17%. Коэффициент затухания в области тональных частот (6) увеличился на $\sqrt{17} = 4,1$ %, что эквивалентно укорочению абонентской линии на 120 м.

Рост диэлектрических потерь (4) в диапазоне частот 0,1 – 1000 кГц приводит к ухудшению параметров влияния и делает проблематичным передачу цифровых сигналов как аналоговых, так и цифровых модемов технологий ADSL абонентской телефонной сети для абонентов, удаленных от АТС.

Поглощение и растворение влаги полиэтиленом приводит к изменению геометрических размеров кабеля. В оболочке и изоляции за счет усадки по длине возникают дополнительные механические напряжения. А это повышает вероятность образования трещин в оболочке и снижает ресурс работы кабеля [10].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Михайлов М.М. Влагопроницаемость органических диэлектриков.- М.-Л.: Государственное энергетическое издательство. 1960.- 160с.
- [2] Геча Э.Я. Водопоглощение твердых диэлектриков. Анализ современных представлений // Кабели и провода.- 2002.- № 4 - №5. - с.28 – 32
- [3] Геча Э.Я., Ларин Ю.Т. Продольная герметизация полевых оптических кабелей: необходимость, целесообразность, возможность // Кабели и провода.- 2000.- №6.- с.27 – 30.
- [4] Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Ржевская Е.В. Влияние увлажнения диэлектрика на амплитудно-частотные характеристики полимерных кабелей // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сб. н. трудов ХГПУ, вып.7, часть третья, Х., ХГПУ, 1999. – с.177 – 181

- [5] ГОСТ Р 51311 – 99. Кабели телефонные с полиэтиленовой изоляцией в пластмассовой оболочке
- [6] Брискер А.С., Руга А.Д., Шарле Д.Л. Справочник. Городские телефонные кабели. - М.: Радио и связь, 1991. – 207с.
- [7] ГОСТ 16336 – 91. Композиции полиэтилена для кабельной промышленности.
- [8] ГОСТ Р 51369 – 99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности
- [9] ОСТ 45.82 – 96. Стандарт отрасли. Сеть телефонная городская. Линии абонентские кабельные с металлическими жилами. Нормы эксплуатационные Госкомсвязи России
- [10] Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Гладченко В.Я., Васильева О.В. Влияние внутренних термомеханических напряжений на ресурс тонкослойной изоляции // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. Сб. н. трудов ХГПУ, вып.6, часть первая, Х., ХГПУ, 1998. – с.540 – 542.

Поступила 23.03.2005