

**Список литературы:** 1. Мещанов Г.И. Развитие производства новых типов пожаробезопасных кабелей в России // Кабели и провода. – 2007. – № 4. – С. 5-9. 2. Байер Г. Нанокompозиты как огнезащитная система // Кабель-news. – 2013. – № 5. – С. 60-64. 3. Изольовані проводи та кабелі. Вимоги до пожежної безпеки. ДСТУ 4809:2007. – К.: 2007. – 14 С.

**Bibliography (transliterated).** 1. Meschanov G.I. Rarvitie proizvodstva novih tipov poszarobezopasnih kabeley v Rossiy Kabely i provoda. – 2007. – № 4. – С. 5-9. 2. Bayer. G. Nanokompозиты как огнезащитная система Kabely i provoda. – 2013. – № 5. – С. 60-64. 3. Izolyovany provody ta kadel'y. Vimogi do poshzeshzhnoy bespeky. DSTU 4809:2007. – K.: 2007. – 14.

*Надійшла (received) 10.02.2014*

УДК 621.315

**В.М.ЗОЛОТАРЕВ**, д-р техн. наук, ген. директор, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**В.В.ЗОЛОТАРЕВ**, канд. техн. наук, директор по внешнеэкон. связям, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**С.В.БУЗЬКО**, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**Т.Ю.АНТОНЕЦ**, инженер, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;

**А.А.НАУМЕНКО**, канд. техн. наук, вед. специалист, ПАО «Завод Южкабель», Харьков

## **ВЛИЯНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ЭКРАНОВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КАБЕЛЯХ**

Выведена зависимость диэлектрических потерь от проводимости экранов в силовых кабелях. Типовой конструкцией современных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является коаксиальная конструкция типа «проводящий экран из полимера - изоляция из сшитого полиэтилена, второй - проводящий экран из полимера». Установлена зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости.

**Ключевые слова:** силовой кабель, изоляция, диэлектрические потери.

**Введение.** Основной в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена является коаксиальная конструкция. В ней на уплотненную токопроводящую жилу методом экструзии с помощью строенной экструзионной головки одновременно накладываются экран по жиле из полупроводящего полиэтилена, собственно изоляционный слой из высококачественного изоляционного полиэтилена, а также экран по изоляции из полупроводящего полиэтилена. Причем проводимости экрана по жиле и экрана по изоляции могут отличаться.

© В.М.Золотарев, В.В.Золотарев, С.В.Бузько, Т.Ю.Антонец, А.А.Науменко, 2014

ся друг от друга. Таким образом, получается многослойная конструкция сердечника кабеля, в которой полупроводящие слои имеют существенно большую проводимость, чем изоляционный слой полиэтилена.

В [1] электромагнитные процессы в такого рода конструкциях сшитой полиэтиленовой изоляции кабеля рассмотрены с учетом только тока смещения и тока проводимости. При удельной проводимости сшитого полиэтилена порядка  $10^{-14}$  Ом·м, его относительной проницаемости 2,3 и угловой частоте  $314 \text{ с}^{-1}$  (что соответствует промышленной частоте приложенного напряжения), теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь оказывается равным  $1,56 \cdot 10^{-6}$ . Однако измерения на реальных образцах кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена дают значительно большее значение тангенса угла диэлектрических потерь порядка  $10^{-3} \dots 10^{-4}$ . Таким образом, учет только сквозного тока проводимости через изоляцию дает заниженное значение тангенса угла диэлектрических потерь примерно на два порядка.

**Задачей настоящей работы** является более полный учет токов в сшитой полиэтиленовой изоляции, влияющих на тангенс угла диэлектрических потерь.

К этим токам относятся:

- сквозной ток проводимости или ток утечки, обусловленный чисто активной проводимостью диэлектрика;
- ток и, соответственно, потери, обусловленные поляризацией атомов и молекул под действием переменного поля;
- абсорбционный ток, возникающий вследствие имеющихся неоднородностей структуры диэлектрика;
- эквивалентный ток, связанный с ионизационными потерями в газовых включениях различной формы, и других неоднородностях.

**Решение задачи.** Если объединить ток проводимости и суммарный ток поляризации, учитывающий также ионизационные процессы, то проводимость неидеального диэлектрика  $\gamma$  можно выразить через активную проводимость  $\gamma'$  и угол поляризации  $\alpha$  так

$$\gamma = \gamma' + \omega \varepsilon \sin \alpha.$$

Тогда теоретическое значение тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной изоляционной конструкции будет равно

$$\begin{aligned}
 \operatorname{tg} \delta = & \frac{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1) \varepsilon_3]}{[(\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \gamma_3 - \omega^2 (\varepsilon_1 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_1) \varepsilon_3]} \times \\
 & \times \frac{[(\gamma_2 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3) \alpha_1 + (\gamma_1 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_3) \alpha_2 + (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \alpha_3] +}{\cdot (-\omega) [(\varepsilon_3 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_3) \alpha_1 + (\varepsilon_3 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_3) \alpha_2 + (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \alpha_3] +} \times \\
 & \times \frac{+ \omega^2 [\gamma_3 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) + \varepsilon_3 (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)]}{+ \omega [\gamma_3 (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) + \varepsilon_3 (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2)]} \times \\
 & \times \frac{\cdot [(\varepsilon_3 \gamma_2 + \varepsilon_2 \gamma_3) \alpha_1 + (\varepsilon_3 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_3) \alpha_2 + (\varepsilon_2 \gamma_1 + \varepsilon_1 \gamma_2) \alpha_3]}{\cdot [(\gamma_2 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_2 \varepsilon_3) \alpha_1 + (\gamma_1 \gamma_3 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_3) \alpha_2 + (\gamma_1 \gamma_2 - \omega^2 \varepsilon_1 \varepsilon_2) \alpha_3]} \quad (1)
 \end{aligned}$$

Последнее выражение получено с учетом тока проводимости, тока смещения и тока поляризации, учитываемого в предпоследнем выражении дополнительным членом для проводимости неидеального диэлектрика. Оно содержит все необходимые активные проводимости и диэлектрические проницаемости во всех трех слоях  $\gamma_k, \varepsilon_k$ , а также коэффициенты  $\alpha_k$ , зависящие от размеров рассматриваемой изоляционной конструкции ( $k = 3$ ).

Рассмотрим вопрос о влиянии проводимости экранов по жиле и по изоляции на величину тангенса угла диэлектрических потерь на примере кабелей высокого и сверхвысокого напряжения. В их конструкции на экран по изоляции может накладываться водонабухающее полотно. Однако его толщиной, по сравнению с толщиной экрана по изоляции можно пренебречь и считать конструкцию трехслойной.

Как показывает анализ, при неизменных параметрах собственно изоляционного слоя  $\varepsilon_2 = 2,3 \cdot \varepsilon_0, \gamma_2 = 10^{-15}$ , тангенс угла диэлектрических потерь согласно (1) имеет максимум (рис. 1). Такой же максимум для  $\text{tg } \delta$  наблюдается и в двухслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция».

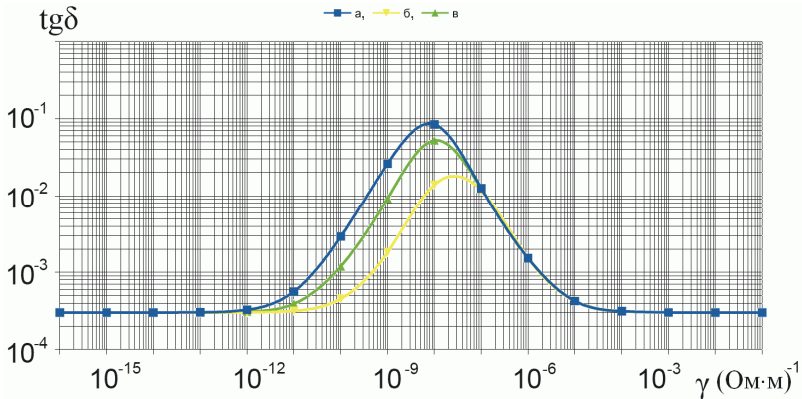


Рисунок 1 – Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле  $\gamma_1$  и по изоляции  $\gamma_3$  в трехслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции» (радиус по жиле  $r_0 = 13,2$  мм, толщина экрана по жиле и по изоляции, соответственно, 1,4 мм и 2 мм, радиус экрана по жиле 14,6 мм, толщина изоляции 16 мм, радиус по изоляции – 30,6 мм, радиус экрана по изоляции с учетом проложенной по нему полупроводящей ленты толщиной 0,4 мм составляет 32 мм);  $\gamma_1 = \gamma_3 = \gamma, \gamma_2 = 10^{-15}$  ( $\text{Ом} \cdot \text{м}^{-1}$ );  $a - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 2,3 \varepsilon_0; b - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 10 \varepsilon_0; в - \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = 4 \varepsilon_0$

Наличие максимума на кривой  $\text{tg } \delta$  можно объяснить следующим образом. Если  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$  неограниченно уменьшать, то свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам высококачественного полиэтилена с низким значением  $\text{tg } \delta$ . При неограниченном увеличении  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$ , свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам хорошего проводника,

то есть к свойствам материала токопроводящей жилы и проводящего металлического экрана, между которыми будет находиться слой высококачественного полиэтилена с низким значением  $\operatorname{tg} \delta$ . Так как значение  $\operatorname{tg} \delta$  не зависит от объема диэлектрика, то при средних значениях проводимости полупроводящих экранов  $\gamma_1$  и  $\gamma_3$  будет наблюдаться максимум тангенса угла диэлектрических потерь для трехслойной конструкции с двумя проводящими экранами. Эти же рассуждения будут справедливыми и для случая конструкции с одним полупроводящим экраном. Проведенное исследование показало, что при выборе проводимости полупроводящих экранов по жиле и по изоляции необходимо учитывать следующее.

Сглаживание электрического поля на макро- и микровыступах проводящих электродов (то есть на поверхностях токопроводящей жилы и медного экрана) происходит при толщине полупроводящих экранов по жиле и изоляции не менее 1 мм и их проводимости  $\gamma_1, \gamma_3$ , не менее  $10^{-6} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  при  $20^\circ \text{C}$ .

При достижении длительно допустимых токов в режиме перегрузки температура кабеля может достигать  $130^\circ \text{C}$ . При этом проводимость материала полупроводящих экранов может измениться на три порядка от  $10^{-3}$  до  $10^{-6} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ . Таким образом для того, чтобы полупроводящие экраны не потеряли своего главного назначения по выравниванию электрического поля на макро- и микровыступах проводящих электродов, следует выбирать электропроводность полупроводящих экранов  $\gamma_1, \gamma_3$  не менее  $10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ , что соответствует их объемному удельному сопротивлению 1000 Ом·м. Отсюда можно сделать вывод, что для нормальной работы кабелей СВН, для которых  $\operatorname{tg} \delta$  нормируется и не должен превышать значения  $10^{-3}$  следует выбирать значения проводимости проводящих пластмассовых экранов не менее  $10^{-3} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ .

Для того, чтобы определить тангенс угла диэлектрических потерь по трехслойной сшитой изоляционной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция из сшитого полиэтилена – полупроводящий экран по изоляции с учетом токов смещения, проводимости и поляризации необходимо учитывать полную проводимость для всех трех слоев. В слоях 1, 3 (то есть в полупроводящем экране по жиле и в полупроводящем экране по изоляции) значения проводимости  $\gamma$ , при ее изменении по крайней мере до величины  $10^{-11}$ , можно принять равным значению активной проводимости  $\gamma'$ . А в изоляционном слое сшитого полиэтилена (то есть в слое 2) имеем

$$\gamma_2 = \gamma'_2 + \omega \varepsilon \sin \alpha_2.$$

Однако угол поляризации  $\alpha$  не известен. Эту трудность можно обойти следующим образом. Учитывая, что  $\sin \alpha$  мало отличается от  $\operatorname{tg} \alpha$ , а тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  в изоляционном слое сшитого полиэтилена определяется не токами проводимости, а в основном токами поляризации, можно принять тангенс угла поляризации примерно равным тангенсу угла диэлектрических потерь

$$\sin \alpha_2 \approx \operatorname{tg} \alpha_2 \approx \operatorname{tg} \delta_2.$$

Для определения тангенса угла диэлектрических потерь чистого поли-

этилена (то есть без примеси углерода) можно воспользоваться, например, результатами теоретических исследований, проведенных в работе [2].

В этой работе путем решения полевой задачи определялась комплексная диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена без проводящих примесей  $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$ . Так, при нормальных условиях, на частоте около 50 Гц было получено значение  $\varepsilon = 2,25 - i \cdot 0,0009$ , что дает значение тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta \approx \varepsilon''/\varepsilon' \approx 4 \cdot 10^{-4}$ .

Второй трудностью при определении тангенса угла диэлектрических потерь трехслойной сшитой конструкции является то, что не известна зависимость диэлектрической проницаемости материала полупроводящих экранов по жиле и изоляции от их проводимости, которая определяется содержанием углерода в них. Однако известно, что повышение содержания проводящих примесей в изоляционных средах ведет к увеличению их диэлектрической проницаемости. Влияние диэлектрической проницаемости полупроводящих экранов на тангенс угла диэлектрических потерь трехслойной сшитой конструкции можно приблизительно установить путем численного эксперимента, увеличивая ее значение при остальных неизменных параметрах. Из рис. 1 видно, что даже существенное увеличение диэлектрической проницаемости полупроводящих экранов с 2,3 до 10 качественно не влияет на зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости полупроводящих экранов.

**Выводы.** При значении проводимости полупроводящих экранов примерно равной  $10^{-8} (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$  значение тангенса диэлектрических потерь в кабеле с трехслойной сшитой изоляционной конструкцией может достигать значения около 0,1, что на два порядка выше предельно допустимого значения, равного 0,001. С увеличением температуры кабеля активная проводимость полупроводящих экранов падает. Эту проводимость выбирают так, чтобы ее значение лежало правее максимума и находилось на горизонтальном участке кривой (рис. 1). Исходя из этого, активную проводимость экранов выбирают с большим запасом, так, что на практике ее значение составляет примерно  $0,1 (\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ .

**Список литературы:** 1. Золотарьов В.В. Пристрої електричних випробувань і контролю параметрів кабелів і проводів з ізоляцією із зшитого поліетилену: Дис...канд. техн. наук. – К.: 2011. – 194 с. 2. J.Yang, R.Huang, D.Zhang. A Field – circuit coupled method to accurately determine intrinsic complex permittivity of XLPE insulation material // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2008. – Vol. 15, № 2. – PP. 334 – 341.

**Bibliography (transliterated):** 1. Zolotaryov V.V. Pritroei elektrichnich viprobuvan kabeliv. Dis. k.t.n. – K.: 2011. – 194. 2. J.Yang, R.Huang, D.Zhang. A Field – circuit coupled method to accurately determine intrinsic complex permittivity of XLPE insulation material // IEEE Transaction on dielectrics and electrical insulation. – 2008. – Vol. 15, № 2. – 334 – 341.

*Надійшла (received) 14.03.2014*