УДК 621.315

В.М.ЗОЛОТАРЕВ, д-р техн. наук, ген. директор, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;
В.П.КАРПУШЕНКО, канд. экон. наук, советник ген. директора, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;
В.В.ЗОЛОТАРЕВ, канд. техн. наук, нач. отдела, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;
Ю.А.АНТОНЕЦ, канд. техн. наук, техн. директор, ПАО «Завод Южкабель», Харьков;
А.А.НАУМЕНКО, канд. техн. наук, ведущий специалист, ПАО «Завод Южкабель», Харьков

ЗАВИСИМОСТЬ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОТ КОНСТРУКЦИИ МНОГОСЛОЙНОЙ СШИТОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДОВ

На основі математичної моделі стаціонарного електричного поля в багатошаровому неідеальному діелектрику досліджено залежність тангенса кута діелектричних втрат від конструкції багатошарової зшитої (вулканізованої) ізоляції в силових кабелях і проводах.

On the basis of mathematical model of stationary electric field in multilayer non-ideal dielectric, the tangent of dielectric loss angle in multilayer crosslinked (vulcanized) structures of power cables and wires are investigated.

На основе математической модели стационарного электрического поля в многослойном неидеальном диэлектрике исследована зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции многослойной сшитой (вулканизированной) изоляции в силовых кабелях и проводах.

Анализ источников. Изоляционная конструкция токопроводящей жилы с пластмассовой изоляцией может быть выполнена однослойной или многослойной, в зависимости от условий ее применения. Однослойная изоляция из сшиваемых композиций может быть выполнена на основе, например, полиолефинов и органосиланов [1, 2]. Двухслойная изоляция может применяться в различного рода огнестойких кабелях [3, 4]. Причем, первый слой (считая от проводника жилы) изготавливают обычно методом обмотки из слюдяной бумаги, а второй слой – из линейного или сшитого полиэтилена (например, силанольносшитого, сшитого пероксидными соединениями в среде водяного пара или сухого сжатого азота), а также из поливинилхлоридного пластиката. Трехслойная изоляция, характерная для экранированных токопроводящих жил силовых кабелей энергетического назначения напряжением 6 кВ и выше, которые под медным экраном имеют экран по жиле из проводящего полиэтилена, собственно полиэтиленовый изоляционный слой и экран по изоляции из того же проводящего полиэтилена [5, 6]. Причем все три слоя наносятся одновременно методом экструзии и одновременно вулканизируются в вулканизационной линии.

Наконец, четырехслойная изоляция может иметь место, когда на упомянутую трехслойную конструкцию методом обмотки наносят слой полупроводящего водонабухающего или не водонабухающего полотна [5, 6]. Сюда же следует отнести и случай изоляции высоковольтных защищенных проводов, которые могут иметь трехслойную пластмассовую конструкцию в виде экрана по жиле, собственно полиэтиленового изоляционного слоя и экрана по изоляции, а также четвертый изоляционный слой, которым является окружающий воздух при воздушной прокладке таких проводов [7].

Постановка задачи. Будем считать, что диэлектрик состоит из n кусочно-однородных областей $\Omega_1, \Omega_2, \ldots, \Omega_i, \ldots, \Omega_n$ ограниченных, соответственно, коаксиальными цилиндрами, имеющими радиусы $r_0 - r_1,\ r_1 - r_2,\ \ldots,\ r_{i-1} - r_i,\ \ldots,\ r_{n-1} - r_n$. Пусть в каждой области Ω_i однородный диэлектрик характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью ε_i и удельной электропроводностью γ_i, а идеально проводящие электроды для возбуждения поля в диэлектрике имеют радиусы r_0 и r_n. Тангенс угла диэлектрических потерь для случая однослойной изоляции вычисляется по простой формуле

$$\dot{I} = \oint \dot{J}(r_n)dl = \oint \dot{Y}_n \dot{E}_n dl_n = 2\pi r_n \dot{Y}_n \dot{E}(r_n), \tag{1}$$

где $\dot{E}(r_n)$, $\dot{J}(r_n)$ – соответственно, нормальная компонента электрической напряженности на внутренней поверхности внешнего электрода, имеющего радиус r_n;

dl – элемент длины линии, образующейся при сечении внешнего бесконечно тонкого электрода плоскостью, перпендикулярной оси выбранной цилиндрической системы координат;

$\dot{Y}_n$ – полная проводимость слоя диэлектрика с номером n.

Для двухслойной изоляции он вычисляется по общей формуле [8].

$$\begin{aligned} tg\delta &= \frac{(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1) + \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)(\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)}{\omega[(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1) - (\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]} = \\ &= \frac{\omega^2(\varepsilon_2^2\gamma_1\alpha_1 + \varepsilon_1^2\gamma_2\alpha_2) + \gamma_1\gamma_2(\gamma_1\alpha_2 + \gamma_2\alpha_1)}{\omega[\varepsilon_2\gamma_1^2\alpha_2 + \varepsilon_1\gamma_2^2\alpha_1 + \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2(\varepsilon_1\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_1)]}. \end{aligned} \tag{2}$$

Выражение (2) для tgδ записано через удельные характеристики ε_1, γ_1 и ε_2, γ_2 слоев диэлектрика.

Рассмотрим зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от параметров трехслойных и четырехслойных изоляционных конструкций, которые имеют широкое практическое применение.

Для трехслойной изоляционной конструкции точная зависимость для tgδ было выведено в [8]

$$tg\delta = \frac{[(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\cdot\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3]\cdot}{[(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\cdot\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3]\cdot}\times$$
$$\times\frac{\cdot[(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] +}{\cdot(-\omega)[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3] +}\times \tag{3}$$
$$\times\frac{+\omega^2[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\cdot}{+\omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\cdot}\times$$
$$\times\frac{\cdot[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3]}{\cdot[(\gamma_2\gamma_1 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3]}.$$

Это выражение в общем виде содержит все необходимые параметры трех изоляционных слоев, но из-за сложности его трудно анализировать.

Решение задачи. Чтобы проанализировать эту зависимость будем исходить из тех условий, что в проводящих экранах по жиле и изоляции (слой 1 и 3) токами смещения по сравнению с токами проводимости можно пренебречь также как можно пренебречь током проводимости по сравнению с током смещения в среднем изоляционном слое полиэтилена (слой 2). Тогда в соответствии с результатами, полученными в [8] имеем

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^{n}\dot{Y}_k}{\dot{\beta}}, \tag{4}$$

где $\dot{\beta} = \prod_{m=1}^{n}\dot{Y}_m\sum_{k=1}^{n}\dot{Y}_k^{-1}\alpha_k$, $\alpha_k = \frac{1}{2\pi}\ln\frac{r_k}{r_{k-1}}$, $k = 1,2,...,n$, $m = 1,2,...,n$.

Для трехслойной изоляции

$$\dot{\beta} = \prod_{k=1}^{3}\dot{Y}_k\sum_{k=1}^{3}\dot{Y}_k^{-1}\alpha_k = \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\left(\frac{1}{\dot{Y}_1}\alpha_1 + \frac{1}{\dot{Y}_2}\alpha_2 + \frac{1}{\dot{Y}_3}\alpha_3\right) = \tag{5}$$
$$= \dot{Y}_2\dot{Y}_3\alpha_1 + \dot{Y}_1\dot{Y}_3\alpha_2 + \dot{Y}_1\dot{Y}_2\alpha_3.$$

$$\prod_{k=1}^{3}Y_k\dot{\beta}^* = \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^* = \{[(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_1\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_1)\cdot\varepsilon_3] +$$
$$i\omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\}\cdot \tag{6}$$
$$\cdot\{[(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] -$$
$$-i\omega[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3]\}.$$

$$R_e\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = [(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\cdot\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3]\cdot$$
$$\cdot[(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3] +$$
$$+\omega^2[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\cdot$$
$$\cdot[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3];$$

$$
\begin{aligned}
&I_m\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = [(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\cdot\gamma_3 - \omega^2(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\varepsilon_3]\cdot\\
&\cdot(-\omega)[(\varepsilon_3\gamma_2 + \varepsilon_2\gamma_3)\alpha_1 + (\varepsilon_3\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_3)\alpha_2 + (\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2)\alpha_3] +\\
&+\omega[\gamma_3(\varepsilon_2\gamma_1 + \varepsilon_1\gamma_2) + \varepsilon_3(\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)]\cdot\\
&\cdot[(\gamma_2\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_3)\alpha_1 + (\gamma_1\gamma_3 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_3)\alpha_2 + (\gamma_1\gamma_2 - \omega^2\varepsilon_1\varepsilon_2)\alpha_3].
\end{aligned} \tag{7}
$$

Принимая во внимание (4) при принятых допущениях имеем следующие условия

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1; \tag{8}$$

$$\dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2; \tag{9}$$

$$\dot{Y}_3 = \gamma_3. \tag{10}$$

Тогда, в соответствии с (4), (5), (6), (7), (3) получаем

$$\dot{Y} = \frac{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3}{\dot{\beta}} = \frac{\gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3}{\dot{\beta}}; \tag{11}$$

$$
\begin{aligned}
&\dot{\beta}^* = (\dot{Y}_2\dot{Y}_3\alpha_1 + \dot{Y}_1\dot{Y}_3\alpha_2 + \dot{Y}_1\dot{Y}_2\alpha_3)^* = (i\omega\varepsilon_2\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\gamma_3\alpha_2 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\alpha_3)^* =\\
&[\gamma_1\gamma_3\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)];
\end{aligned} \tag{12}
$$

$$
\begin{aligned}
&\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^* = i\omega\varepsilon_2\gamma_1\gamma_3[\gamma_1\gamma_3\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)] =\\
&= \omega^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1) + i\omega\varepsilon_2\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\alpha_2;
\end{aligned} \tag{13}
$$

$$R_e\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = \omega^2\varepsilon_2{}^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1); \tag{14}$$

$$I_m\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{\beta}^*\} = \omega\varepsilon_2\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\alpha_2; \tag{15}$$

$$tg\delta \approx \frac{\omega^2\varepsilon_2{}^2\gamma_1\gamma_3(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)}{\omega\varepsilon_2\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\alpha_2} \approx \omega\frac{\varepsilon_2(\alpha_1\gamma_3 + \alpha_3\gamma_1)}{\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\alpha_2}. \tag{16}$$

Выражение (3) после формальной подстановки в него $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_3 = 0$, $\gamma_2 = 0$ должно совпадать с выражением (16), в чем можно убедиться, выполнив такую подстановку

$$tg\delta \approx \frac{\omega^2[\gamma_3\varepsilon_2\gamma_1][\varepsilon_2(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3)]}{\omega[\gamma_3\varepsilon_2\gamma_1][\gamma_1\gamma_3\alpha_2]} \approx \omega\frac{\varepsilon_2(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3)}{\gamma_1\gamma_3\alpha_2}. \tag{17}$$

Последнее подтверждает правильность полученного приближенного выражения (16) для tgδ трехслойной изоляционной конструкции при условиях (8)…(10), когда γ_1 и γ_2 соответственно в слоях 1 и 3 не равны друг другу. Если эти проводимости равны между собой, то есть когда выполняются условия

$$\dot{Y}_1 = \dot{Y}_3 = \gamma_1 = \gamma_3 = \gamma. \tag{18}$$

$$\dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2 = i\omega\varepsilon. \tag{19}$$

то выражение (17) можно упростить и представить в виде

$$tg\delta \approx \omega \frac{\varepsilon\gamma(\alpha_1 + \alpha_3)}{\gamma_2 \alpha_2} = f_1 f_2 \,. \tag{20}$$

Таким образом, выражение для тангенса угла диэлектрических потерь в трехслойной изоляционной конструкции при выполнении условий (18), (19) можно представить в виде произведения двух функций, в котором первая функция f_1 зависит только от параметров, характеризующих материал диэлектрика в слоях

$$f_1 = \omega\varepsilon / \gamma \,, \tag{21}$$

а вторая функция f_2 зависит только от геометрических параметров этих слоев.

$$f_2 = (\alpha_1 + \alpha_3)/\alpha_2 = \left(\ln\frac{r_1}{r_0} + \ln\frac{r_3}{r_2}\right) \Big/ \ln\frac{r_2}{r_1} \,, \tag{22}$$

то есть является чисто геометрическим фактором для трехслойной изоляционной конструкции.

Исследуем зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от конструкции изоляции и рассмотрим такие основные случаи.

Случай 1. Пусть r_1 стремится к r_0 и r_2 к r_3, что равнозначно бесконечному уменьшению толщины первого и третьего слоев, которые согласно (18) характеризуются только проводимостью γ. Одновременно при $r_1 \to r_0$ и $r_2 \to r_3$ толщина слоя 2, который согласно (19) характеризуется только реактивной проводимостью $i\omega\varepsilon$, будет неограниченно приближаться к толщине $r_3 - r_0$ слоя всего диэлектрика, а сама трехслойная изоляция превращается из трехслойной в однослойную. Тогда при сколь угодно близких значениях r_1, r_0 и r_2, r_3 функция f_1 будет ограниченной, отношения r_1/r_0 и r_2/r_3 будут стремиться к единице, натуральные логарифмы этих отношений – к нулю, а при фиксированных значениях r_0 и r_3 знаменатель (22), равный $\ln r_2/r_1$ при $r_2 \to r_3$, $r_1 \to r_0$ стремится к значению $\ln r_0/r_3$ и остается величиной ограниченной. Тогда при неизменной угловой частоте ω имеем

$$\lim_{\substack{r_1 \to r_0 \\ r_2 \to r_3}} tg\delta = \lim_{\substack{r_1 \to r_0 \\ r_2 \to r_3}} f_1 f_2 = f_1 \lim_{\substack{r_1 \to r_0 \\ r_2 \to r}} \frac{\ln\frac{r_1}{r_0} + \ln\frac{r_3}{r_2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}} = 0 \,. \tag{23}$$

Последнее выражение показывает, что при неограниченном уменьшении толщин слоев 1 и 3 и увеличении при этом толщины слоя 2 до значения $r_3 - r_0$ тангенс угла диэлектрических потерь стремится к нулю. Этот вывод физически прозрачен, так как изоляция из трехслойной с двумя диссипативными слоями превращается в однослойную без активных потерь.

Случай 2. В трехслойной изоляции толщина слоя 2, в котором отсутствует активная проводимость, стремится к нулю, а изоляция превращается из трехслойной в двухслойную, причем оба слоя 1 и 3 характеризуются только активной проводимостью. Тогда при ограниченной функции f_1 имеем из (17) при конечном $\omega\varepsilon_2$

$$\lim_{r_1 \to r_2} tg\delta = \omega\varepsilon_2 \lim_{r_1 \to r_2} \frac{\gamma_3 \ln\frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln\frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1\gamma_3 \ln\frac{r_2}{r_1}} = \infty \ . \qquad (24)$$

поскольку при конечных $\gamma_1\gamma_3$ и r_0r_3 числитель выражения (24) остается ограниченным, а его знаменатель – стремится к нулю.

Случай 3. В трехслойной изоляции толщина одного из слоев (1 или 3), который характеризуется только активной проводимостью, неограниченно уменьшается. При этом изоляция в пределе превращается в двухслойную.

Если, например, неограниченно уменьшать толщину $r_1 - r_0$ первого слоя, то из (17) получаем при конечных $\gamma_3 = \gamma$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon$

$$\lim_{r_1 \to r_0} tg\delta = \omega\varepsilon_2 \lim_{r_1 \to r_0} \frac{\gamma_3 \ln\frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln\frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1\gamma_3 \ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{\omega\varepsilon}{\gamma} \frac{\ln\frac{r_3}{r_2}}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \ . \qquad (25)$$

При уменьшении до нуля толщины $r_3 - r_2$ третьего слоя в трехслойной конструкции в пределе при $r_2 \to r_3$, $\gamma_1 = \gamma$ и $\varepsilon_2 = \varepsilon$ получим, как можно видеть, тот же результат, который дает формула (25), то есть

$$\lim_{r_2 \to r_3} tg\delta = \omega\varepsilon_2 \lim_{r_2 \to r_3} \frac{\gamma_3 \ln\frac{r_1}{r_0} + \gamma_1 \ln\frac{r_3}{r_2}}{\gamma_1\gamma_2 \ln\frac{r_2}{r_1}} = \frac{\omega\varepsilon}{\gamma} \frac{\ln\frac{r_1}{r_0}}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \ . \qquad (26)$$

К этому же результату приводит и формула (2) при $r_2 \to r_3$, то есть при условиях

$$\begin{aligned} \dot{Y}_2 &= i\omega\varepsilon_2 = i\omega\varepsilon \ ; \quad \gamma_2 = 0 \ ; \\ \dot{Y}_1 &= \gamma_1 = \gamma \ ; \qquad \varepsilon_1 = 0 \, . \end{aligned} \qquad (27)$$

что дает после их подстановки в (2)

$$\lim_{r_2 \to r_3} tg\delta = \frac{\omega^2 \varepsilon_2 \gamma_1 \alpha_1}{\omega[\varepsilon_2 \gamma_1 \alpha_2]} = \frac{\omega\varepsilon}{\gamma} \frac{\ln\frac{r_1}{r_0}}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \, . \qquad (28)$$

Выражения (26), (28) показывают, что и для двухслойной конструкции, в случае, когда один из слоев имеет только активную проводимость, а другой – чисто реактивную, тангенс угла диэлектрических потерь можно представить также подобно (20) в виде произведения двух функций, одна из которых

f_1 зависит только от свойств материалов, а другая f'_2 – является чисто геометрическим фактором, то есть

$$tg\delta = f_1 f_2' = \frac{\omega\varepsilon}{\gamma} \frac{\ln\dfrac{r_1}{r_0}}{\ln\dfrac{r_2}{r_1}}, \tag{29}$$

а f_1 и f'_2, соответственно, равны

$$f_1 = \omega\varepsilon/\gamma; \qquad f_2' = \frac{\ln\dfrac{r_1}{r_0}}{\ln\dfrac{r_2}{r_1}}. \tag{30}$$

Таким образом, как для трехслойной изоляционной конструкции с двумя диссипативными слоями с одинаковыми проводимостями, так и для двухслойной конструкции с одним диссипативным слоем функции f_1, зависящие от свойств материалов слоев, одинаковы. Функции f_2 и f'_2, зависящие от геометрических параметров, различны для этих двух изоляционных конструкций.

Наконец рассмотрим четырехслойную изоляционную конструкцию. Возьмем вначале случай, характерный для силовых кабелей, в которых на трехслойную пластмассовую изоляцию и проводящий экран по жиле – собственно изоляция – проводящий экран по изоляции дополнительно наложен слой из полупроводящего полотна так, что при толщинах слоев $r_1 - r_0$; $r_2 - r_1$, их проводимости соответственно равны

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1; \quad \dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2; \quad \dot{Y}_3 = \gamma_3; \quad \dot{Y}_4 = \gamma_4. \tag{31}$$

Последовательно вычисляя по (4), (5), (6), (7) получаем

$$\dot{Y} = \frac{\prod_{k=1}^{4} \dot{Y}_k}{\dot{\beta}} = \frac{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{Y}_4}{\dot{\beta}}; \tag{32}$$

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \prod_{m=1}^{4} \dot{Y}_m \sum_{k=1}^{4} \dot{Y}_k^{-1}\alpha_k = \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{Y}_4\left(\frac{1}{\dot{Y}_1}\alpha_1 + \frac{1}{\dot{Y}_2}\alpha_2 + \frac{1}{\dot{Y}_3}\alpha_3 + \frac{1}{\dot{Y}_4}\alpha_4\right) = \\ &= \left(\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{Y}_4\alpha_1 + \dot{Y}_1\dot{Y}_3\dot{Y}_4\alpha_2 + \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_4\alpha_3 + \dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\alpha_4\right) = \\ &= (i\omega\varepsilon_2\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_3\gamma_4\alpha_2 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3\alpha_4); \end{aligned} \tag{33}$$

$$\beta^* = \left[\gamma_1\gamma_3\gamma_4\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2\left(\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1\gamma_3\alpha_4\right)\right]; \tag{34}$$

$$\begin{aligned} \prod_{k=1}^{4} \dot{Y}_k\beta^* &= \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3\gamma_4\left[\gamma_1\gamma_3\gamma_4\alpha_2 - i\omega\varepsilon_2\left(\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1\gamma_3\alpha_4\right)\right] = \\ &= \left[\omega^2\varepsilon_2\gamma_1\gamma_3\gamma_4\left(\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1\gamma_3\alpha_4\right) + i\omega\varepsilon_2\gamma_1^{\,2}\gamma_2\gamma_3\gamma_4^{\,2}\alpha_2\right]; \end{aligned} \tag{35}$$

$$R_e\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{Y}_4\dot{\beta}^*\} = \omega^2\varepsilon_2\gamma_1\gamma_3\gamma_4\left(\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1\gamma_3\alpha_4\right). \tag{36}$$

После чего получаем выражение для тангенса угла диэлектрических потерь с учетом (36)

$$I_m\{\dot{Y}_1\dot{Y}_2\dot{Y}_3\dot{Y}_4\dot{\beta}^*\} = \omega\varepsilon_2\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\gamma_4{}^2\alpha_2\,, \qquad (37)$$

которое, как видно, при бесконечно тонком слое 4, то есть при $\alpha_4 = \ln r_4/r_3$ после сокращений переходит в выражение

$$tg\delta = \frac{R_e\{\prod_{k=1}^{n}\dot{Y}_k\dot{\beta}^*\}}{I_m\{\prod_{k=1}^{4}\dot{Y}_k\beta^*\}} = \frac{\omega\varepsilon_2\left(\gamma_3\gamma_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_4\alpha_3 + \gamma_1\gamma_3\alpha_4\right)}{\gamma_1{}^2\gamma_3{}^2\gamma_4{}^2\alpha_2} = \omega\varepsilon_2\frac{\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3}{\gamma_1\gamma_3\alpha_2}\,. \qquad (38)$$

полностью совпадающее с выражением (17) для тангенса угла диэлектрических потерь трехслойной конструкции, что подтверждает правильность формулы (37). Если все проводимости γ_1, γ_2, γ_3, γ_4 равны между собой и равны γ, то при $\varepsilon_2 = \varepsilon$ получаем из (37).

$$tg\delta = \frac{\omega\varepsilon}{\gamma}\;\frac{\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_4}{\alpha_2} = f_1 f_2''\,, \qquad (39)$$

то есть тангенс угла диэлектрических потерь в четырехслойной изоляции можно также представить в виде произведения двух функций f_1 и f'_2, из которых первая зависит от свойств материалов $f_1 = \omega\varepsilon/\gamma$, а вторая является геометрическим фактором и равна

$$f''_2 = \frac{\ln\frac{r_1}{r_0} + \ln\frac{r_3}{r_2} + \ln\frac{r_4}{r_3}}{\ln\frac{r_2}{r_1}}\,. \qquad (40)$$

Проводя те же рассуждения для случая, когда параметры имеют значение

$$\dot{Y}_1 = \gamma_1\,; \quad \dot{Y}_2 = i\omega\varepsilon_2\,; \quad \dot{Y}_3 = \gamma_3\,; \quad \dot{Y}_4 = i\omega\varepsilon_4\,,$$

характерное для самонесущих защищенных изолированных проводов, по аналогии с предыдущим, получаем

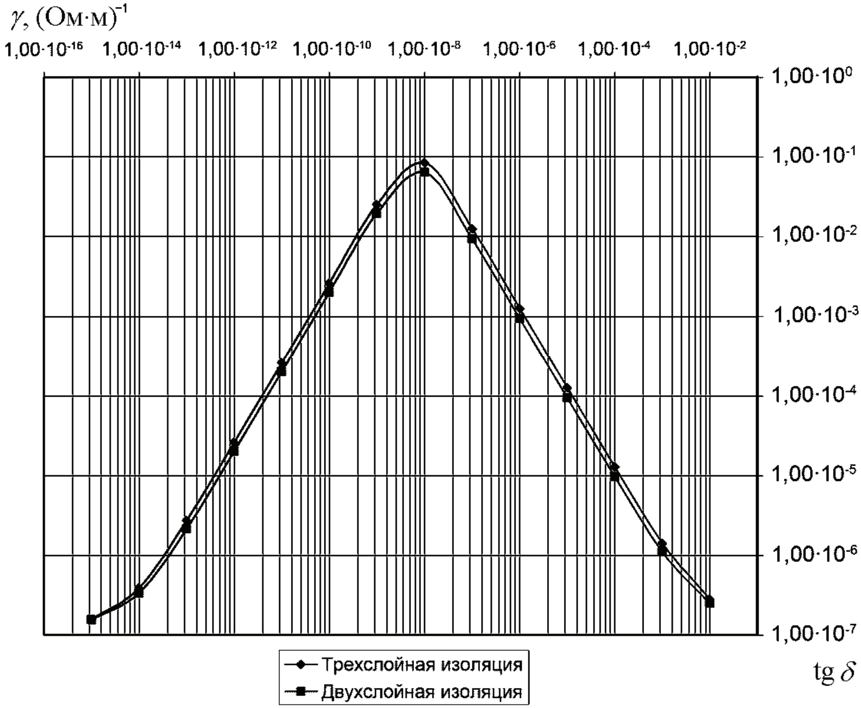
$$\begin{aligned}\dot{\beta} = &\left(i\omega\varepsilon_2\gamma_3 i\omega\varepsilon_4\alpha_1 + \gamma_1\gamma_3 i\omega\varepsilon_4\alpha_2 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3 i\omega\varepsilon_4 + \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3\alpha_4\right) = \\ &\left[-\omega^2\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right) - i\omega\gamma_1\gamma_3\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right) + i\omega\left(\varepsilon_4\gamma_1\gamma_3\alpha_2 + \varepsilon_2\gamma_1\gamma_3\alpha_4\right)\right];\end{aligned} \qquad (42)$$

$$\dot{\beta}^* = \left[-\omega^2\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right) - i\omega\gamma_1\gamma_3\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right)\right]; \qquad (43)$$

$$\begin{aligned}&\prod_{k=1}^{4}\dot{Y}_k\dot{\beta}^* = \gamma_1 i\omega\varepsilon_2\gamma_3 i\omega\varepsilon_4\cdot\dot{\beta}^* = -\omega^2\varepsilon_2\varepsilon_4\gamma_1\gamma_3\dot{\beta}^* = \\ &= \omega^2\varepsilon_2\varepsilon_4\gamma_1\gamma_3\left[\omega^2\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right) + i\omega\gamma_1\gamma_3\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right)\right] = \\ &= \omega^4\left(\varepsilon_2\varepsilon_4\right)^2\gamma_1\gamma_3\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right) + i\omega^3\left(\gamma_1\gamma_3\right)^2\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right);\end{aligned} \qquad (44)$$

$$tg\delta = \frac{\omega^4\left(\varepsilon_2\varepsilon_4\right)^2\gamma_1\gamma_3\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right)}{\omega^3\left(\gamma_1\gamma_3\right)^2\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right)} = \frac{\omega\varepsilon_2\varepsilon_4\left(\gamma_3\alpha_1 + \gamma_1\alpha_3\right)}{\gamma_1\gamma_3\left(\varepsilon_4\alpha_2 + \varepsilon_2\alpha_4\right)}\,. \qquad (45)$$

Здесь под r_4 при приближенном вычислении $\alpha_4 = \ln r_4/r_3$ следует понимать очевидно расстояние от центра провода до ближайшего заземленного объекта, а значение диэлектрической проницаемости воздуха ε_4 следует принять равной диэлектрической постоянной ε_0 вакуума. В заключение заметим, что последнее выражение нельзя представить в виде произведения двух функций. Это обусловлено тем, что даже при равенстве проводимостей $\gamma_1 = \gamma_3$, равенство диэлектрических проницаемостей $\varepsilon_2 = \varepsilon_4$ не может быть достигнуто ни при каких условиях, так как ε_4остается всегда строго меньше ε_2.



Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от проводимости экранов по жиле γ_1 и по изоляции γ_3 в трехслойной конструкции (–◆–), а также проводимости экрана по жиле в двухслойной конструкции (–■–) сердечника кабеля (радиус по жиле r_0 = 13 мм, толщина экрана по жиле и по изоляции 2 мм, радиус экрана по жиле 15 мм, радиус по изоляции – 39,5 мм, $\gamma_1 = \gamma_3$, $\gamma_2 = 10^{-15}$ (Ом·м)$^{-1}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 2{,}3 \cdot \varepsilon_0$

В заключение рассмотрим вопрос о влиянии проводимости экранов по жиле и по изоляции на величину тангенса угла диэлектрических потерь в кабелях 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 (3) имеет максимум (см. рисунок). Такой же максимум для tgδ наблюдается и в двухслойной конструкции «полупроводящий экран по жиле – изоляция», как это следует из (2).

Наличие максимума на кривой tgδ можно объяснить следующим образом. Если γ_1 и γ_3 неограниченно уменьшать, то свойства полупроводящих экранов будут стремиться к свойствам высококачественного полиэтилена с низким значением tgδ. При неограниченном увеличении γ_1 и γ_2, 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 tgδ. Так как значение tgδ не зависит от объема диэлектрика, то при средних значениях проводимости полупроводящих экранов γ_1 и γ_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.

Выводы. При выборе проводимости пластмассовых экранов по жиле и по изоляции в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6…330 кВ необходимо учитывать следующее.

1. Сглаживание электрического поля на микровыступах полиэтиленовой изоляции и токопроводящих экранов по жиле и изоляции происходит если толщина экранов составляет не менее 1 мм, а их проводимость γ_1, γ_3, не опускается ниже 10^{-6} (Ом·м)$^{-1}$ при 20º С [9].

2. При достижении длительно допустимых токов в режиме перегрузки температура кабеля может достигать 130º С. При этом проводимость экранов может измениться на три порядка от 10^{-3} до 10^{-6} (Ом·м)$^{-1}$ [9]. Таким образом для того, чтобы полупроводящие экраны не потеряли своего главного назначения по выравниванию электрического поля на выступах, следует выбирать их электропроводность γ_1, γ_3 не менее 10^{-3} (Ом·м)$^{-1}$, что соответствует объемному удельному сопротивлению 1000 Ом·м.

3. Из рисунка можно видеть, что при значении проводимости экранов $\gamma = 10^{-3}$ (Ом·м)$^{-1}$ значение тангенса угла диэлектрических потерь tgδ составляет соответственно $1{,}43 \cdot 10^{-6}$ в трехслойной конструкции с двумя экранами и $1{,}1 \cdot 10^{-6}$ в двухслойной конструкции кабеля одним экраном по жиле. В то же время известно, например, что для трансформаторного масла с удельной электропроводностью $\gamma = 10^{-12}$ (Ом·м)$^{-1}$ и $\varepsilon = 2{,}2$, тангенс угла диэлектрических потерь на частоте 10^6 Гц из формулы $\gamma/\omega\varepsilon$, то есть с учетом только тока проводимости, получается равным примерно 10^{-6}, тогда как непосредствен-

ные измерения дают значение tg$\delta \approx 10^{-3}$ [10]. Это обстоятельство как раз и обусловлено неучетом токов поляризации, адсорбции и потерь ионизации. Теоретический учет этих факторов выходит далеко за рамки настоящей работы. Более того, такая задача не решена в физике диэлектриков и до настоящего времени. Попытки теоретически учесть свойства неоднородных диэлектриков, в частности, были предприняты в [9]. Суть метода состоит в том, что диэлектрик представляется как некоторый композит со стохастической структурой. В нем выделялась элементарная ячейка, содержащая характерную неоднородность (водный триинг). В объеме ячейки решалась полевая задача и определялись эффективные характеристики ячейки, в частности, комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon''$. Далее полагалось, что значение этой проницаемости приближенно равно проницаемости диэлектрика в целом. Так, при нормальных условиях, на частоте около 50 Гц были получены значения $\varepsilon' \approx 2{,}3$ и $\varepsilon'' \approx 2{,}3 \cdot 10^{-3}$, что дает значение тангенса угла диэлектрических потерь tg$\delta \approx \varepsilon''/\varepsilon' \approx 10^{-3}$. Это значение по порядку совпадает с допустимым значением tgδ для кабелей СВН $0{,}3\cdot10^{-3}$ и 10^{-3} при температуре 20º С и 90º С соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что для нормальной работы кабелей СВН, для которых tgδ нормируется и не должен превышать значения 10^{-3} следует выбирать значение проводимости проводящих пластмассовых экранов не менее 10^{-3} (Ом·м)$^{-1}$. При этом полученное теоретическое значение tg$\delta \sim 10^{-6}$, исходя из решения полевой задачи в диэлектрике с учетом только токов проводимости служит нижней его оценкой при выборе необходимой удельной проводимости материала проводящих пластмассовых экранов $\gamma \geq 10^{-3}$ (Ом·м)$^{-1}$. Фактическое значение тангенса угла диэлектрических потерь в изоляции кабеля можно определить только практически путем его измерения с применением, например, мостового метода

Список литературы: **1.** Патент на винахід № 83826, Україна. Здатна до зшивання композиція. МПК C08L 83/04/ *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.11.05, опубліковано 26.08.08., бюл. № 16. **2.** Патент на винахід № 84012, Україна. Здатна до зшивання композиція. МПК C08L 23/00 - / *Василець Л.Г., Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Ганьшина Л.В., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.11.05, опубліковано 10.09.08., бюл. № 17. **3.** Патент на винахід № 85910, Україна. Кабель контрольний. МПК H01 B 7/00 - / *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Василець Л.Г., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 23.05.07, опубліковано 25.11.08., бюл. № 22. **4.** Патент на винахід № 83912, Україна. Кабель силовий вогнестійкий. МПК H01 B 9/00 - / *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Василець Л.Г., Золотарьов В.В.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 23.05.07, опубліковано 25.11.08., бюл. № 22. **5.** Патент на корисну модель № 39644, Україна. Потужний високовольтний кабель. МПК H01 B 7/02-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 10.03.09., бюл. № 5. **6.** Патент на корисну модель № 39645, Україна. Високовольтний кабель з волоконно-оптичним термодатчиком. МПК H01 B 7/02-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 10.03.09., бюл. № 5. **7.** Патент на корисну модель № 38514, Україна. Струмопровідна жила. МПК H02 H 7/04-/ *Золотарьов В.М., Карпушенко В.П., Антонець Ю.П., Золотарьов В.В., Чопов Є.Ю., Обозний А.Л., Науменко О.А., Чайка В.Д.* – Заявник і патентовласник ЗАТ завод «Південкабель», заявлено 01.08.08, опубліковано 12.01.09., бюл. № 1. **8.** *Золотарев В.М., Карпушенко В.П., Золотарев В.В., Антонец Ю.А., Науменко А.А.* Тангенс угла диэлектрических потерь многослойных сшитых изоляционных конструкций // Вестник НТУ «ХПИ». – Х.: НТУ «ХПИ». – 2011.– № 49.– С. 64-73. **9.** *Шидловский А.К., Щерба А.А.* Научно-техническое обеспечение анализа надежности и экологичности высоковольтных кабелей на напряжение до 110 кВ. Институт электродинамики НАН Украины. – Отчет о НИР. Г.р. № 0106U010708. – 2006. – 242 с. **10.** *Сиротинский Л.И.* и др. Техника высоких напряжений. – М-Л.: Госэнергоиздат. – 1940. – 247 с.

Поступила в редколлегию 02.03.2012.