

ВЛИЯНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОДНИКОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

*A.V. Lobanov, Cand. Sc. (Engineering), General Director
of RPC "Spetskabel";*

D. A. Lobanov, engineer of RPC "Spetskabel"

*А.В. Лобанов, канд. техн. наук, генеральный
директор ООО НПП «Спецкабель»;*

Д.А. Лобанов, инженер ООО НПП «Спецкабель»

Аннотация. Представлено теоретическое и экспериментальное обоснование необходимости учёта влияния при СВЧ на параметры передачи коаксиальных и симметричных кабелей непроводящих, электропроводящих и полупроводящих плёнок, образующихся на поверхности проводников в результате возможных экстремальных условий эксплуатации. Даны необходимые пояснения правомерности вывода и применимости расчётных зависимостей для определения, в частности, коэффициента затухания кабелей в зависимости от свойств поверхностного покрытия проводников. Полученные результаты могут быть использованы для оценки изменения параметров специальных кабелей, в том числе огнестойких, при работе в экстремальных условиях.

Ключевые слова: высокочастотные коаксиальные и симметричные кабели, коэффициент затухания, полупроводящий поверхностный слой.

Аннотация. It is theoretically and experimentally proved that the influence of non-conducting, electrically conducting and semiconducting films, formed on the conductor surface due to potential extreme operation conditions, on the transmission parameters of high-frequency coaxial and symmetrical cables should be taken into account. Necessary explanations are given to confirm the validity of the conclusion and applicability of the calculated dependences used to determine, in particular, the attenuation constant of cables depending on the properties of the conductor surface coating. The results obtained may be used to evaluate changes of the parameters of special cables, including fire-resistant ones, when working in extreme conditions.

Ключевые слова: high-frequency coaxial and symmetrical cables, attenuation constant, semiconducting surface layer.

Материал поступил в редакцию 08.10.2020

E-mail: info@spetskabel.ru

d.lobanov@spcable.ru

Условия эксплуатации специальных кабелей, в зависимости от назначения, могут предполагать воздействия экстремальных факторов, приводящих к необратимым изменениям их параметров. Этот вопрос приобретает особую актуальность, когда необходимо обеспечить работоспособность телекоммуникационных кабелей в системах безопасности во время пожара, а, в отдельных случаях, и после него. Расширение частотного диапазона работы таких ка-

белей в сторону СВЧ приводит к необходимости учёта влияния таких факторов, наличие которых ранее не учитывалось. Так, при воздействии высоких температур проводники кабелей могут покрываться окисной плёнкой. Например, поверхность медных проводников будет покрываться слоем закиси меди Cu_2O , а в условиях выгорания изоляции в огнестойких кабелях на поверхности проводников может образовываться плёнка из сажи, образуя полупроводящий поверх-

ностный слой из углерода. В общем случае сочетание различных внешних воздействующих факторов приводит к появлению на поверхности проводников плёнок с широким спектром электрофизических свойств. И, если эти образования на поверхности проводников силовых кабелей практически не сказываются на передаче электрической мощности, то для высокочастотных кабелей эти факторы могут приводить к существенному ухудшению параметров передачи в СВЧ диапазоне, когда глубина проникновения электромагнитной волны в проводниках уменьшается до единиц микрометра.

Таким образом, целью данной статьи является теоретическое и экспериментальное исследование влияния на потери в высокочастотных кабелях различных типов покрытий поверхности проводников.

Так, при передаче высокочастотных сигналов используются коаксиальные и симметричные кабели, для которых существует основной тип волны. Такую симметричную волну электрического типа E_{00} , не имеющую критической частоты, называют квази-Т-волной («квази» означает, что в отличие от обыкновенной Т-волны имеется продольная составляющая электрического поля) [1].

Продольная составляющая электрического поля в коаксиальном или симметричном кабеле возникает при наличии значительных потерь в проводниках, что также искажает поперечную структуру электромагнитного поля.

Для расчёта параметров передачи в таких кабелях обычно пользуются методом теории цепей с распределёнными параметрами, где учитывают наличие E_z и, следовательно, потери в проводниках, но конфигурацию электромагнитного поля полагают такой, как в линии без потерь. Теория цепей справедлива при выполнении следующих условий:

1) токи смещения в проводниках много меньше токов проводимости [2]

$$\sigma\omega / \varepsilon_a \gg 1; \quad (1)$$

2) характеристическое сопротивление диэлектрика (Z_0) много больше по величине, чем поверхностное сопротивление проводника (R_s) [3]

$$R_s / Z_0 \ll 1; \quad (2)$$

3) длина волны в кабеле значительно больше его поперечных размеров (условие поперечной квазистационарности) [3].

В противном случае, точное решение задачи заключается в нахождении решений для продольных составляющих полей отдельно в проводнике и диэлектрике и согласования их на границе раздела.

Поскольку в общем случае, изменение свойств поверхностного слоя предполагается в весьма широком диапазоне, то условия (1) и (2) могут не выполняться. Поэтому параметры передачи необходимо искать непосредственно из решения уравнений Максвелла.

В дифференциальной форме записи для однородной изотропной среды и гармонических колебаний уравнения имеют следующий вид:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \sigma \bar{E} + i\omega \varepsilon_a \bar{E} = i\omega \varepsilon' \bar{E}, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -i\omega \mu_a \bar{H} \quad (4)$$

σ – удельная проводимость среды;

где ε_a и μ_a – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;

ε' – комплексная диэлектрическая проницаемость, равная

$$\varepsilon' = \varepsilon_a (1 + \sigma / i\omega \varepsilon_a) \quad (5)$$

Используя уравнения (3) и (4) можно получить следующие векторные уравнения:

$$\nabla^2 \bar{E} + \omega^2 \varepsilon' \mu_a \bar{E} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 \bar{H} + \omega^2 \varepsilon' \mu_a \bar{H} = 0, \quad (7)$$

где ∇^2 – оператор Лапласа.

Уравнения (6) и (7) называют волновыми уравнениями.

Модель электромагнитного поля в коаксиальном или симметричном кабелях удобно представлять в цилиндрической системе координат.

Волновое уравнение в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial F}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 F}{\partial \varphi^2} + K^2 F = 0 \quad (8)$$

где F – составляющая электрического поля;

K – поперечный волновой коэффициент.

Для анализа влияния поверхностного слоя на поверхность проводников рассмотрим модель коаксиального кабеля, представленную на рис. 1, с поверхностным слоем у внутреннего проводника. Любая составляющая поля определяется решением соответствующего дифференциального уравнения. Учёт влияния слоя на поверхности внешнего проводника принципиально не даёт новой информации в рассматриваемом вопросе и, поэтому, нами не учитывался.

Компоненты поля в цилиндрических координатах найдены в [4]. Для симметричных поперечных волн, в частности для квази-Т-волны, составляющие



поля E_z и H_φ во внутренних точках: для каждой из сред распространения – внутреннем проводнике, слое на поверхности проводника и изоляции кабеля, определяются уже известным образом. При этом, в получаемых для E_z и H_φ соотношениях, поперечный волновой коэффициент будет иметь следующий вид:

$$K_m = \sqrt{k_m^2 + \gamma^2} \quad (9)$$

где m указывает на принадлежность к среде, в которой распространяется волна (рис. 1); k_m – постоянная распространения в среде;

$$k_m^2 = \mu_{am} \omega^2 \left(\varepsilon_{am} - \frac{i\sigma_m}{\omega} \right); \quad (10)$$

$$\frac{N_0(K_2 r_{c1}) - \frac{\frac{i\mu_{a1}K_1}{k_1^2} N_1(K_2 r_1) + \frac{\mu_{a2}K_2}{k_2^2} N_0(K_2 r_1)}{\frac{i\mu_{a1}K_1}{k_1^2} I_1(K_2 r_1) + \frac{\mu_{a2}K_2}{k_2^2} I_0(K_2 r_1)} I_0(K_2 r_{c1})}{\frac{\mu_{a2}K_2}{k_2^2} \frac{N_1(K_2 r_{c1}) - \frac{\frac{i\mu_{a1}K_1}{k_1^2} N_1(K_2 r_1) + \frac{\mu_{a2}K_2}{k_2^2} N_0(K_2 r_1)}{\frac{i\mu_{a1}K_1}{k_1^2} I_1(K_2 r_1) + \frac{\mu_{a2}K_2}{k_2^2} I_0(K_2 r_1)} I_1(K_2 r_{c1})}} = \mu_{a3} \frac{K_3^2}{k_3^2} \frac{r_{c1}}{r_2} \left(r_2 \ln \frac{r_2}{r_{c1}} + i \frac{\mu_{a4}}{\mu_{a3}} \frac{k_3^2}{K_3^2} \frac{K_4}{k_4^2} \right) \quad (12)$$

где $\gamma = \alpha + i\beta$ – постоянная распространения волны в кабеле;

ε_{am} и μ_{am} – абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости среды;

σ_m – удельная электрическая проводимость среды;

ω – циклическая частота.

Составляющие поля, при отсутствии отражений, изменяются вдоль оси z по экспоненциальной зависимости, т.е.

$$F = F_0 e^{i\gamma z - i\omega t} \quad (11)$$

Опуская промежуточные выкладки, приведём конечное трансцендентное уравнение, позволяющее определить постоянную распространения волны в кабеле:

В уравнение (12) входят функции Бесселя от аргумента, величина которого определяется параметрами слоя.

Нахождение величины γ в общем случае может быть осуществлено с помощью численных методов. Однако при расчёте детерминанта или при поиске численного значения непосредственно из уравнения (12), возникают значительные трудности, связанные с

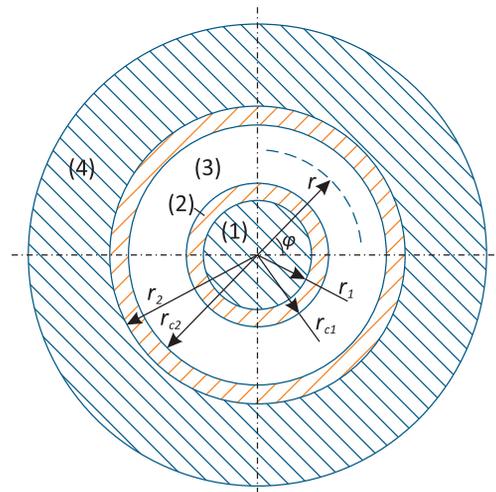


Рис. 1. Поперечное сечение коаксиального кабеля: 1 – внутренний проводник; 2 – поверхностный слой или покрытие; 3 – изоляция; 4 – внешний проводник





ограниченной точностью расчёта функций Бесселя и их производений.

Задача значительно упрощается и сводится к аналитическому выражению для γ в предположении, что слой обладает свойствами металла ($\sigma_2/\omega\epsilon_{a2} \geq 10^2$) или диэлектрика ($\sigma_2/\omega\epsilon_{a2} \leq 10^{-2}$), т.е. когда аргумент $K_2 r$ достаточно велик или достаточно мал.

Таким образом, для кабеля с металлическим поверхностным слоем на внутреннем проводнике с учётом потерь в изоляции выражение для коэффициента затухания α_{MC} , найденное из уравнения (12), имеет следующий вид:

$$\alpha_{MC} \approx \frac{4,34 \sqrt{\frac{\epsilon_{a3}}{\mu_{a3}}}}{\ln \frac{r_2}{r_{c1}}} \left(\frac{R_{s1}}{r_1} K_{R1} + \frac{R_{s4}}{r_2} \right) + 4,34 \omega \sqrt{\mu_{a3} \epsilon_{a3}} \operatorname{tg} \delta_3, \quad \frac{\text{дБ}}{\text{М}} \quad (13)$$

$$\text{где } K_{R1} = \frac{1 - \left(p - \frac{1}{p} \right) \sin x \cos x}{g p \cos^2 x + \frac{1}{p} \sin^2 x},$$

$$p = \frac{1 + \operatorname{gth} x}{g + \operatorname{th} x}, \quad g = \sqrt{\frac{\mu_{a1} \sigma_2}{\mu_{a2} \sigma_1}}, \quad x = \frac{\sqrt{2}}{2} \Delta \sqrt{\omega \mu_{a2} \sigma_2} = \frac{\Delta}{\theta_2},$$

θ_2 – глубина проникновения волны в среду слоя, м;
 Δ – толщина слоя, м;

$\operatorname{tg} \delta_3$ – тангенс угла диэлектрических потерь в изоляции;

R_{s1} и R_{s4} – активное поверхностное сопротивление внутреннего и внешнего проводников, Ом:

$$R_{s1} = \sqrt{\frac{\omega \mu_{a1}}{2 \sigma_1}}, \quad R_{s4} = \sqrt{\frac{\omega \mu_{a4}}{2 \sigma_4}},$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_4$ – удельная электрическая проводимость внутреннего проводника, слоя и внешнего проводника, Ом/м.

Величина K_{R1} является коэффициентом, показывающим изменения активного поверхностного сопротивления внутреннего проводника при введении поверхностного слоя с отличной от основного металла проводимостью, т.е.

$$K_{R1} = \frac{R_{s2}}{R_{s1}}$$

где R_{s2} – активное сопротивление поверхности проводника со слоем.

Коэффициент затухания α_{DC} кабеля с диэлектрическим слоем на внутреннем проводнике имеет следующее выражение:

$$\alpha_{DC} \approx \frac{4,34 \sqrt{\frac{\epsilon_{a3}}{\mu_{a3}}}}{\ln \frac{r_2}{r_{c1}}} \left(\frac{R_{s1}}{r_1} + \frac{R_{s4}}{r_2} \right) K_M + 4,34 \omega \sqrt{\mu_{a3} \epsilon_{a3}} \operatorname{tg} \delta_3 K_D, \quad \frac{\text{дБ}}{\text{М}} \quad (14)$$

$$\text{где } K_M = \frac{1 + (\operatorname{tg} \delta_2) t_\epsilon}{(1 + t_\epsilon)^2 \sqrt{1 + t_\mu + t_\epsilon}}$$

$$K_D = \frac{1 + t_\mu \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \delta_2 \mu_{a3}}{\operatorname{tg} \delta_3 \mu_{a2}} \right)}{(1 + t_\epsilon)^2 \sqrt{1 + t_\mu + t_\epsilon}}$$

$$t_\epsilon = \frac{\Delta}{r_1 \frac{\epsilon_{a1}}{\epsilon_{a3}} \ln \frac{r_2}{r_{c1}}}, \quad t_\mu = \frac{\Delta}{r_1 \frac{\mu_{a3}}{\mu_{a2}} \ln \frac{r_2}{r_{c1}}}$$

$\operatorname{tg} \delta_2$ – тангенс угла диэлектрических потерь слоя.

Расчёт параметров кабеля с полупроводящим слоем на поверхности проводников, когда $10^{-2} \leq \sigma/\omega\epsilon_a \leq 10^2$, проблематичен из-за технических трудностей, связанных с недостаточной точностью расчётов значений функции Бесселя от аргумента порядка единицы. Однако на СВЧ, когда глубина проникновения волны в поверхностный слой становится гораздо меньше радиуса кривизны поверхности, можно не учитывать профиль поперечного сечения проводников. Замена цилиндрических проводников на плоские при решении полевых задач позволяет перейти от функций Бесселя к гиперболическим, что значительно облегчает расчёты. По данным [5] такая замена даёт достаточно хорошее приближение при величине отношения радиуса проводника к глубине проникновения θ не менее 7–8. Используем данное положение для расчёта параметров передачи радиочастотных кабелей с полупроводящей плёнкой на поверхности проводников. Тогда проводник с поверхностным слоем может быть представлен, как показано на рис. 2, в виде сплошного плоского проводника практически бесконечной толщины, электрические и магнитные свойства которого в общем случае характеризуются тремя параметрами – ϵ_{a1}, μ_{a1} и σ_1 ; проводник покрыт слоем другого материала толщиной Δ с параметрами – ϵ_{a2}, μ_{a2} и σ_2 , среда, занимающая остальную часть полупространства, имеет параметры ϵ_{a3}, μ_{a3} и σ_3 .

Пусть данная плоскость является направляющей для распространяющейся вдоль её поверхности

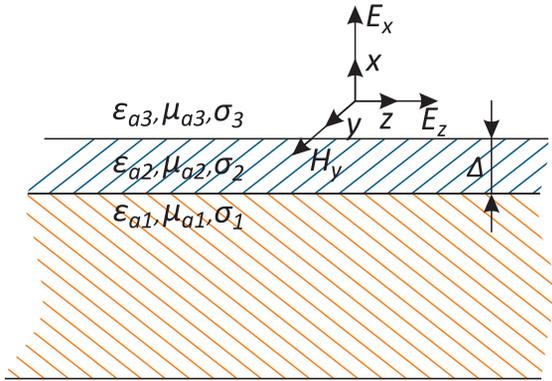


Рис. 2. Плоская металлическая поверхность с поверхностным слоем: 1 – металл; 2 – поверхностный слой или покрытие; 3 – диэлектрическая среда

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} = K^2 H_y, \tag{18}$$

где $K^2 = \gamma^2 - k^2$.

Решение уравнения (18) в общем случае имеет форму равенства

$$H_y = (Ae^{-Kx} + Be^{Kx})e^{i\omega t - i\gamma z}. \tag{19}$$

Для основного проводника отрицательная экспонента должна отсутствовать, так как при $x \rightarrow -\infty$ составляющая поля $H_y \rightarrow \infty$, т.е. постоянная $A=0$. Рассуждая аналогично для диэлектрической среды получаем $B = 0$. Таким образом, получаем:

$$\begin{aligned} H_{y1} &= B_1 e^{K_1 x} e^{i\omega t - i\gamma z}, \\ H_{y2} &= (A_2 \operatorname{sh} K_2 x + B_2 \operatorname{ch} K_2 x) e^{i\omega t - i\gamma z}; \\ H_{y3} &= A_3 e^{-K_3 x} e^{i\omega t - i\gamma z} \end{aligned} \tag{20}$$

волны. Из-за потерь в слое и проводнике, поле имеет E_z составляющую. Образующееся в этом случае поле представляет поверхностную волну типа $E_{00'}$, структура которой вблизи плоскости будет идентична квази-Т-волне в коаксиальном кабеле [6].

Поверхностный импеданс направляющей металлической плоскости с тонким поверхностным слоем, равный

$$Z_{\text{шт}} = \left. \frac{E_{z3}}{H_{y3}} \right|_{x=0} \tag{15}$$

определяется путём отыскания составляющих поля в каждой из сред и согласования их на границе раздела.

Будем рассматривать три составляющие поля – E_x , H_y и E_z . Если отсутствует зависимость составляющих в направлении оси y , то для однородной изотропной среды можно записать уравнения (3) и (4) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} &= -i\omega \mu_a H_y; \\ -\frac{\partial H_y}{\partial z} &= i\omega \varepsilon' E_x; \\ \frac{\partial H_y}{\partial x} &= i\omega \varepsilon' E_z. \end{aligned} \tag{16}$$

Откуда получаем волновое уравнение относительно H_y

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = -\omega^2 \varepsilon' \mu_a H_y.$$

Экспоненту изменения составляющих поля вдоль оси z , как это будет в дальнейшем видно, удобно записать в виде:

$$F = F_0 e^{i\omega t - i\gamma z}. \tag{17}$$

Учитывая, что $\frac{\partial^2 H_y}{\partial z^2} = -\gamma^2 H_y$ и $k^2 = \omega^2 \mu_a \varepsilon'$, получим уравнение:

В решении для материала слоя присутствуют оба экспоненциальных члена, для удобства они записаны с помощью гиперболических функций.

Используя последнее уравнение из (16), запишем выражения для продольных составляющих напряжённости электрического поля:

$$\begin{aligned} E_{z1} &= \frac{K_1 B_1}{i\omega \varepsilon'_1} e^{K_1 x} e^{i\omega t - i\gamma z}; \\ E_{z2} &= \frac{K_2}{i\omega \varepsilon'_2} (A_2 \operatorname{ch} K_2 x + B_2 \operatorname{sh} K_2 x) e^{i\omega t - i\gamma z}; \\ E_{z3} &= -\frac{K_3 A_3}{i\omega \varepsilon'_3} e^{-K_3 x} e^{i\omega t - i\gamma z}. \end{aligned} \tag{21}$$

Постоянные коэффициенты могут быть определены из условия непрерывности касательных составляющих поля на границе раздела сред:

$$\frac{E_{z1}}{H_{y1}} = \frac{E_{z2}}{H_{y2}} \text{ при } x = -\Delta; \quad \frac{E_{z2}}{H_{y2}} = \frac{E_{z3}}{H_{y3}} \text{ при } x = 0. \tag{22}$$

Из (20) и (21) с учётом (22) получаем трансцендентное уравнение:

$$\begin{aligned} -\frac{K_1}{\varepsilon'_1} \left(\operatorname{ch} K_2 \Delta + \frac{K_3}{K_2} \frac{\varepsilon'_2}{\varepsilon'_3} \operatorname{sh} K_2 \Delta \right) &= \\ = \frac{K_2}{\varepsilon'_2} \left(\operatorname{sh} K_2 \Delta + \frac{K_3}{K_2} \frac{\varepsilon'_2}{\varepsilon'_3} \operatorname{ch} K_2 \Delta \right). \end{aligned} \tag{23}$$

Поверхностный импеданс из (15) с учётом (20) и (21):

$$Z_{\text{шт}} = -\frac{K_3}{i\omega \varepsilon'_3} \tag{24}$$

Для проводника 1 $\epsilon'_1 \approx \frac{\sigma_1}{i\omega}$ и $k_1^2 \gg \gamma^2$, откуда $K_1 \approx \sqrt{i\omega\mu_{a1}\sigma_1}$. Если слой металлический, то для материала 2 аналогично имеем $K_2 \approx \sqrt{i\omega\mu_{a2}\sigma_2} = k_2$.

Таким образом, при $\sigma_2/i\omega\epsilon_{a2} > 10^2$ из (23) и (24) получаем выражение для поверхностного импеданса

$$Z_{SII} = (1+i)R_{s1} \frac{\operatorname{ch}k_2\Delta + \frac{R_{s2}}{R_{s1}} \operatorname{sh}k_2\Delta}{\operatorname{ch}k_2\Delta + \frac{R_{s1}}{R_{s2}} \operatorname{sh}k_2\Delta}, \text{ Ом,} \quad (25)$$

где $R_{s1} = \sqrt{\frac{\omega\mu_{a1}}{2\sigma_1}}$ и $R_{s2} = \sqrt{\frac{\omega\mu_{a2}}{2\sigma_2}}$, Ом – активные

поверхностные сопротивления проводника без слоя и проводника, целиком состоящего из материала слоя.

При рассмотрении полупроводящего и диэлектрического слоёв, решение уравнения (23) усложняется тем, что γ^2 и k_2^2 становятся соизмеримыми величинами, и пренебрегать γ^2 при расчёте поперечного волнового числа $K_2 = \sqrt{\gamma^2 - k_2^2}$, как это делалось в случае металлического слоя, уже нельзя. Поэтому уравнение (23) решалось численно относительно γ^2 с помощью программы Wolfram Mathematica [7]. Однако найденное таким образом значение γ является постоянной распространения волны вдоль плоскости и не может быть напрямую использовано для нахождения коэффициента затухания в коаксиальном кабеле. Вместо этого используем для α известное выражение для коэффициента затухания в коаксиальном кабеле, модифицированное с учётом активного поверхностного сопротивления, вносимого слоями на внутреннем и внешнем проводниках:

$$\alpha \approx 4,34 \sqrt{\frac{\epsilon_{a3}}{\mu_{a3}}} \ln \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{R_{s1}}{r_1} K_{R1} + \frac{R_{s4}}{r_2} K_{R4} \right) + 4,34\omega \sqrt{\epsilon_{a3}\mu_{a3}} \operatorname{tg}\delta_3, \frac{\text{дБ}}{\text{М}} \quad (26)$$

где $K_{Ri} = \frac{R_{SIIi}}{R_{Si}}$. Таким образом α выражается

через активную составляющую поверхностного импеданса проводников $Z_{SII} = R_{SII} + iX_{SII}$, R_{SII} и X_{SII} – активное и реактивное поверхностное сопротивление. Значение Z_{SII} может быть найдено из выражения (24) или (25).

На рис. 3 представлены графики относительного изменения коэффициента затухания коаксиального кабеля с гладкими медными проводниками, получен-

ного по формуле (26), в зависимости от свойств поверхностного слоя. Здесь и в дальнейшем для построения графиков использовалось только выражение (24) для Z_{SII} и значение γ^2 , найденное численно из уравнения (23). Следует отметить, что значения коэффициента затухания, получаемые по формулам (13) и (14) для случаев металлического и диэлектрического слоя, практически совпадают в соответствующих областях с вычислениями по формуле (26).

Более полное представление о характере потерь в проводниках даёт рельеф поверхности R_{SII}/R_{s1} , построенный в координатных осях частоты и проводимости поверхностного слоя (рис. 4). Линии максимумов потерь, как видно из рис. 4, в полупроводящей и проводящей областях растут и сближаются с увеличением частоты. Если их продолжить, то на частотах порядка $10^{15} - 10^{16}$ Гц (световые волны) мы будем иметь один пик потерь с максимумом в проводящей области (проводник не может служить направляющей системой для световых волн).

Приведённые, как частный случай решения уравнений Максвелла, математические зависимости в совокупности с современными прикладными программами расчётов, позволяют проводить необходимые инженерные расчёты возможных изменений параметров высокочастотных кабелей в процессе их эксплуатации. С точки зрения оценки полученных результатов, наибольший интерес представляют исследование влияния полупроводящих плёнок.

Для оценки влияния полупроводящего слоя Cu_2O на величину коэффициента затухания радиочастотных кабелей, использовались результаты испытаний сред-

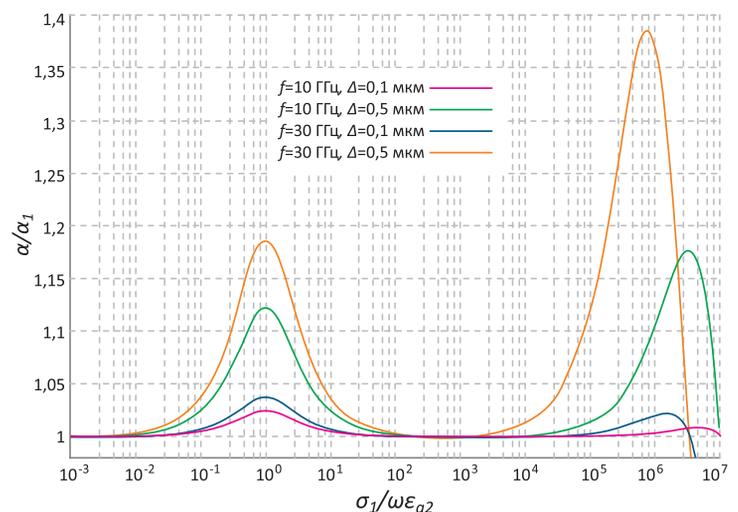


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента затухания кабеля для толщин поверхностного слоя 0,1 и 0,5 мкм при частотах 10 и 30 ГГц ($r_1=0,45$ мм; $r_2=1,475$ мм; $\epsilon_{a3}=2,03\epsilon_0$; $\operatorname{tg}\delta_3=2 \cdot 10^{-4}$; $\epsilon_{a2}=10\epsilon_0$)



негабаритных полужёстких кабелей с ленточной изоляцией из фторопласта-4. Измерения коэффициента затухания проводились в стадии поставки и после циклов испытаний на наработку при температуре 200 °С. Испытывались образцы кабелей с диаметром по изоляции 4,6 и 5,6 мм с медным и медным посеребрённым внутренними проводниками (по 25 образцов). Увеличение коэффициента затухания кабелей с медными посеребрёнными проводниками после наработки 2000 ч при +200 °С в диапазоне частот 10–15 ГГц в среднем составило 5,5 %, а более подробные исследования потерь в кабелях с медными проводниками показали наличие максимума роста относительных потерь в диапазоне частот 1–16,7 ГГц. На рис. 5 представлены зависимости величины относительных потерь, построенные по предложенной авторами методике, с нанесёнными на них экспериментальными точками. Закись меди Cu_2O является полупроводником р-типа и её проводимость зависит от концентрации акцепторных уровней. Акцепторными центрами в Cu_2O являются атомы кислорода. Поскольку в кабеле закись меди уже не в чистом виде, точно соответствующем химической формуле Cu_2O , в зоне примесной проводимости полупроводника удельную проводимость слоя можно взять примерно равной 1,3 См/м [8]. По той же причине относительная диэлектрическая проницаемость бралась равной 9,5. Коэффициент затухания кабелей с медными проводниками для различных степеней окисленности поверхности рассчитывается по формуле (26) с помощью частотной зависимости коэффициента относительного активного поверхностного сопротивления K_R для толщин окисного слоя $\Delta=0,5\text{--}1,8$ мкм, представленной на рис. 6. Результаты оценки роста потерь в сопоставлении с расчётными зависимостями позволяют установить примерную зависимость роста слоя закиси меди на поверхности проводников. Так, после 2000 ч испытаний на наработку при температуре 200 °С толщина слоя Cu_2O на поверхности проводников кабелей со сплошной фторопластовой изоляцией должна составлять около 0,6 мкм; после 3,5 тыс. ч, соответственно – 0,8 мкм; после 6 тыс. ч – 1,6 мкм и после 10 тыс. ч – 1,8 мкм.

Из полученных зависимостей (рис. 5) видно, что максимум роста потерь в радиочастотных кабелях с окисленными медными проводниками находится в районе 3 ГГц и после 10 тыс. ч испытаний на наработку достигает 17–21 %. При прогнозировании роста потерь в радиочастотных кабелях следует также иметь в виду, что коррозия проводников способствует увеличению шероховатости поверхности, которая будет влиять на потери в более высокочастотной области.

Таким образом, впервые расчётным путём было оценено и экспериментально подтверждено влияние полупроводящей окисной плёнки медных проводников на потери в радиочастотных кабелях.

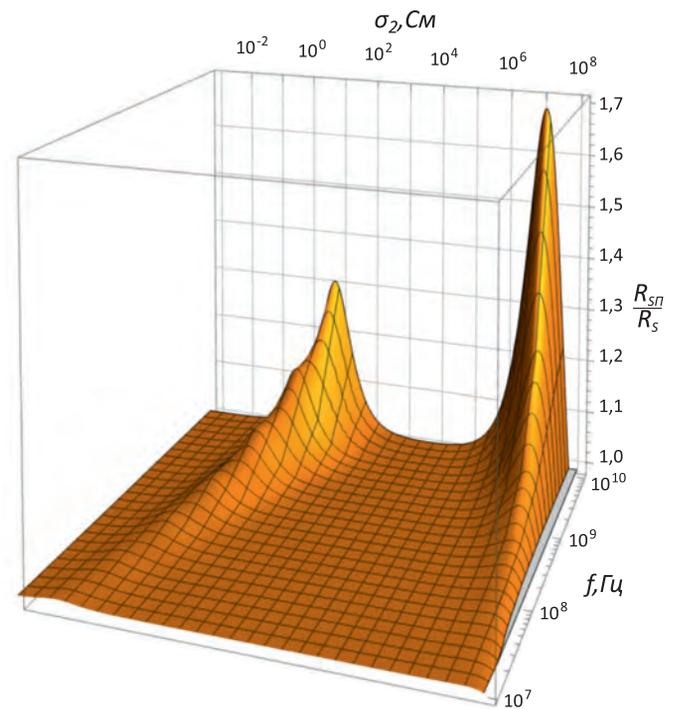


Рис. 4. Зависимость относительного активного поверхностного сопротивления медного проводника от удельной проводимости слоя и частоты. Толщина слоя 1 мкм, $\epsilon_{a2}=10\epsilon_0$

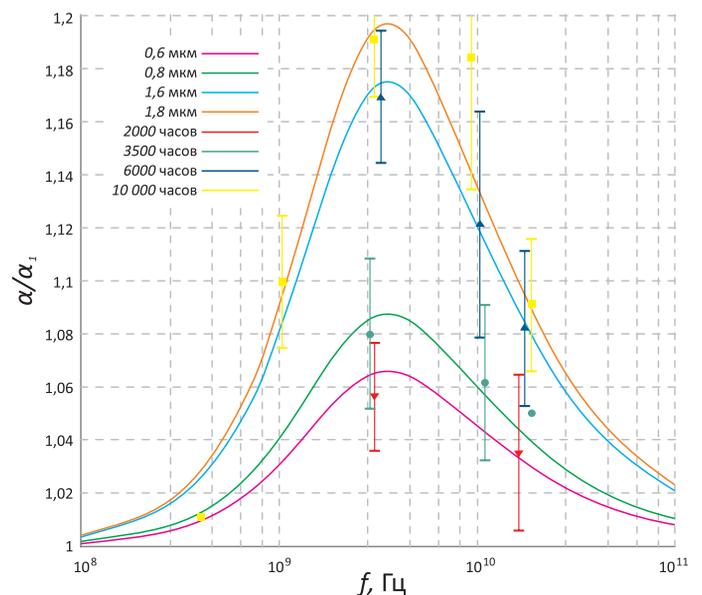


Рис. 5. Частотная зависимость роста относительных потерь в радиочастотных кабелях с медными проводниками в процессе испытаний на наработку при температуре 200 °С. Сплошные линии – расчётные кривые при разных толщинах слоя, точки – экспериментальные значения при различной длительности наработки

Полученные результаты могут быть использованы для расчёта параметров передачи при СВЧ высокочастотных кабелей с учётом возможных полупроводящих образований на поверхности проводников, возникающих в результате экстремальных условий эксплуатации.

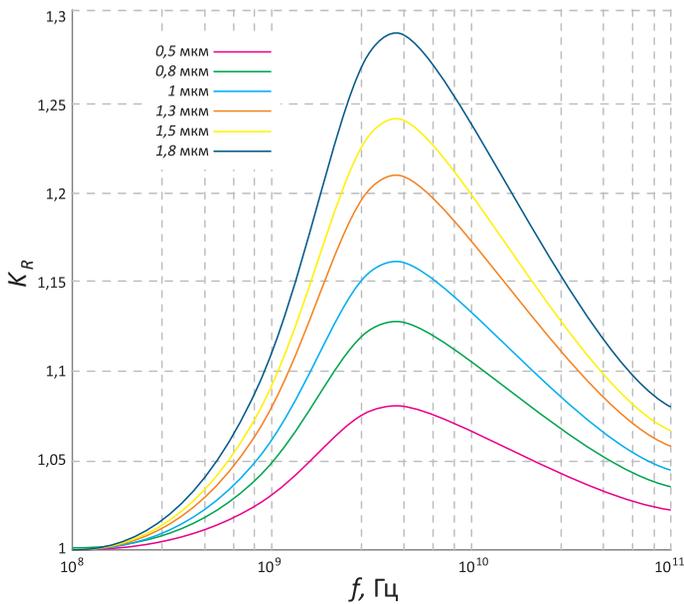


Рис. 6. Частотная зависимость относительного активного поверхностного сопротивления окисленного медного проводника при различных толщинах слоя закиси меди Si_2O на его поверхности

Список литературы

1. Иларионов Ю.А., Раевский С.Б., Сморгонский В.Я. Расчёт гофрированных и частично заполненных волноводов. – М.: Советское радио, 1980. – С. 146–163.
2. Carson J.R. The guided and radiated energy in wire transmission // Journal of the AIEE. – 1924. – Vol. 43, № 10. – P. 908–913.
3. Вайнштейн Л.А. Электромагнитные волны. – М.: Советское радио, 1957. – 581 с.
4. Стреттон Д.А. Теория электромагнетизма. – М.: Гостехиздат, 1948. – С. 460.
5. Рамо С., Уиннери Дж. Поля и волны в современной радиотехнике. – М.: Гостехиздат, 1950. – С. 239–253.
6. Семёнов Н.А. Техническая электродинамика. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
7. Wolfram Research, Inc. // Mathematica, Version 12.1. – Champaign, 2020.
8. Деккер А. Физика электротехнических материалов. Пер. с англ. Б.Н. Мацонашвили; [под ред. и с предисл. Б.М. Тареева]. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1962. – С. 206–209.



ВНИИ КП-МАШ

Осуществляем разработку и изготовление:



- обмоточного оборудования для производства проводов с пленочной, слюдяниновой, бумажной и стекловолоконной изоляцией;

Устройств термообработки проводов:

- индукционных установок подогрева жил;
- высокочастотных установок термообработки;



- экструзионного оборудования для производства проводов и кабелей с кремнийорганической изоляцией сечением до 300мм² ;

- вертикальных печей для термообработки проводов с фторопластовой изоляцией;



- различных видов приемно-отдающих, тяговых устройств и перемоточных станков в том числе для стальной проволоки;

- проходных горизонтальных печей сопротивления с автоматическими механизмами подъема

