

## ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ВОЛНАМИ ТИПА Т

### § 9.1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромагнитные волны, векторы напряженности электрического и магнитного полей которых лежат в плоскости, перпендикулярной направлению распространения, называют *поперечными электромагнитными волнами* или волнами типа Т.

Волна типа Т в отличие от волн типов Н и Е распространяется в линии при любой частоте ( $\omega_{\text{крг}} = 0$ ), что важно для практики.

Для волн типа Т поперечное волновое число  $g = 0$ , поэтому продольное волновое число  $h$  оказывается таким же, как и в случае однородной плоской волны. Для линии без потерь

$$h = b = w\sqrt{e_a m_a}, \quad (9.1)$$

откуда

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{e_a m_a}}, \quad (9.2)$$

$$I_\epsilon = I. \quad (9.3)$$

Здесь  $\lambda$ —длина однородной плоской волны в заполняющем диэлектрике с параметрами  $e_a m_a$ .

Характеристическое сопротивление волны типа Т в линии без потерь, обозначаемое  $Z_{cT}$  и равное отношению поперечной составляющей напряженности электрического поля и поперечной составляющей напряженности магнитного поля бегущей волны, совпадает с аналогичной, величиной, вычисленной для однородной плоской волны в неограниченном пространстве:

$$Z_{cT} = Z_c = \sqrt{m_a / e_a}. \quad (9.4)$$

Комплексные амплитуды полей типа Т в поперечной плоскости удовлетворяют векторным уравнениям Лапласа:

$$\nabla_\perp^2 \mathbf{E}_0 = 0, \nabla_\perp^2 \mathbf{H}_0 = 0. \quad (9.5)$$

Распределение электрического и магнитного полей вдоль продольной оси  $z$  можно записать в виде бегущей волны:

Для линии с потерями

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{-j\gamma z}, \quad \mathbf{H} = \mathbf{H}_0 e^{-j\gamma z}, \quad (9.6)$$

где  $g = b - ja$  — коэффициент распространения:  $\mathbf{E}_0$  и  $\mathbf{H}_0$  определяются уравнениями (9.5).

Электрические и магнитные поля волны типа Т в плоскости поперечного сечения линии передачи по структуре будут такими же, как и постоянные во времени электрические и магнитные поля, существующие в системе при тех же граничных условиях. Это означает, что распространение волны типа Т возможно лишь в линиях, которые могут быть использованы для передачи постоянного тока (двухпроводные, коаксиальные, полосковые и др.).

Статический характер поперечного распределения электрического поля позволяет определить разность потенциалов между проводниками линии (рис. 9.1):

$$U = \int_{L(P,Q)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l}', \quad (9.7)$$

не зависящую от выбора пути интегрирования  $\Delta$  в поперечной плоскости. Ток вдоль проводников:

$$I = \int_l \mathbf{H}_\eta \cdot d\mathbf{l}, \quad (9.8)$$

находят интегрированием вектора  $\eta$ , плотности поверхностного электрического тока по контуру сечения проводника  $l$ .

Линии передачи с волной типа Т характеризуются волновым сопротивлением  $Z_B$ , равным

отношению комплексных амплитуд; напряжения и тока в режиме бегущих волн и выражающимся через погонные индуктивность  $L_1$  и емкость  $C_1$  линии следующим образом:

$$Z_B = \sqrt{L_1 / C_1}. \quad (9.9)$$

Фазовая скорость в линии передачи с волной типа Т

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{L_1 / C_1}}. \quad (9.10)$$

Мощность, переносимая волной по линии передачи,

$$P = \frac{1}{2} \int_S \operatorname{Re} | \mathbf{E} \mathbf{H}^* | dS$$

или

$$P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\epsilon_a}{\mu_a}} \int_S | \mathbf{E} |^2 dS, \quad (9.12)$$

где интегрирование ведется по поперечному сечению линии.

Коэффициент ослабления  $\alpha$  волны в линии передачи складывается из коэффициента  $\alpha_\partial$ , учитывающего потери в диэлектрике, и коэффициента

$\alpha_m$ , описывающего потери в металле:

$$\alpha = \alpha_\partial + \alpha_m M^{-1}, \quad (9.13)$$

здесь

$$\alpha_\partial = \frac{1}{2} w \sqrt{\epsilon_a m_a} \operatorname{tg} \delta, \quad (9.14)$$

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \frac{R_s \int_l | \mathbf{H}_\tau |^2 dl}{\int_S \operatorname{Re} | \mathbf{E} \mathbf{H}^* | dS}, \quad (9.15)$$

где  $R_s$  — поверхностное сопротивление металла (см. главу 4).

Интегрирование в числителе ведется по контуру сечения линии, в знаменателе — по поперечному сечению линии.

### Двухпроводные линии передачи

Двухпроводная линия образована системой из двух параллельных проводников, окруженных однородным веществом с параметрами  $\epsilon_a$  и  $m_a$ .

На рис. 9.2 показана симметричная двухпроводная линия передачи из одинаковых проводников круглого сечения. Рассмотрим основные расчетные соотношения для этой линии. Комплексные амплитуды тока  $I$  и напряжения  $U$  для бесконечной линии без потерь:

$$\begin{aligned} \mathbf{I} &= I e^{-j\beta z}, \\ \mathbf{U} &= U e^{-j\beta z}. \end{aligned} \quad (9.16)$$

Погонные параметры двухпроводной линии передачи

$$L_1 \approx \frac{m_a}{p} \ln \left( \frac{2D - d}{d} \right) \Gamma_H / \text{м}, \quad (9.17)$$

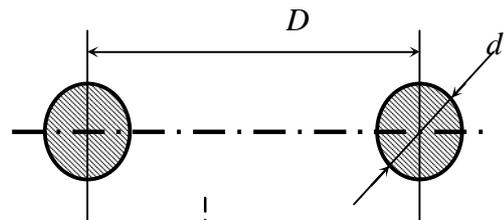


Рис. 9.2

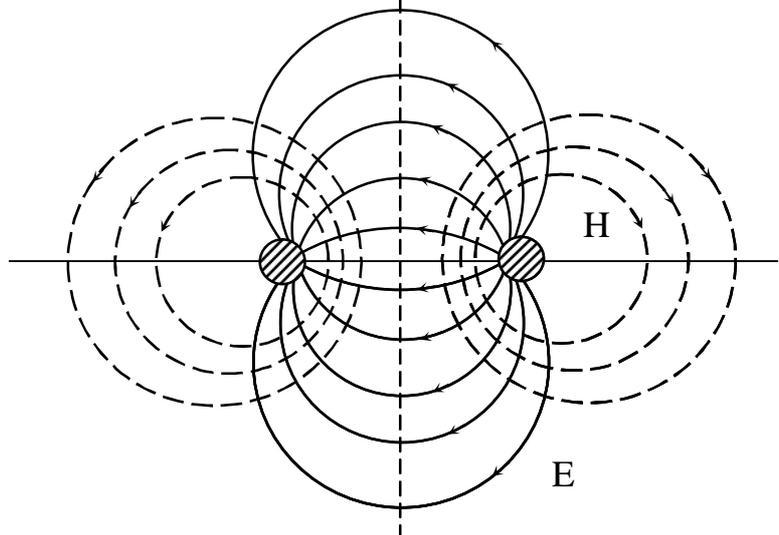


Рис. 9.3

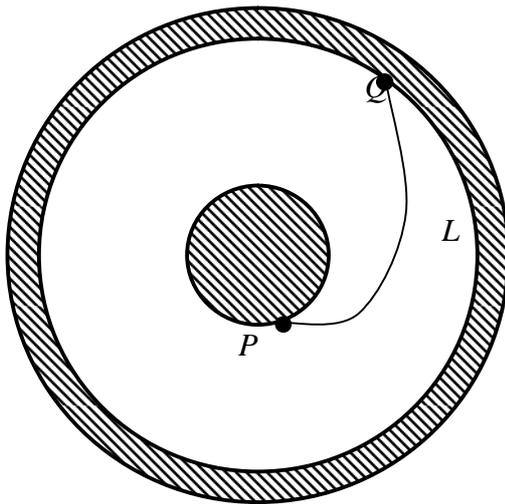


Рис. 9.1

$$C_1 \approx \pi \epsilon_a \frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}, \Phi / \text{м}. \quad (9.18)$$

Волновое сопротивление

$$Z_{\epsilon} \approx 120 \sqrt{\frac{m}{e}} \ln\left(\frac{2D-d}{d}\right), \text{Ом}. \quad (9.19)$$

Картина силовых линий электромагнитного поля показана на рис. 9.3. Мощность, переносимая волной типа Т в двухпроводной линии передачи,

$$P = \frac{U^2}{2Z_{\epsilon}} = \frac{U^2}{240} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}, \text{Вт}. \quad (9.20)$$

Напряженность электрического поля максимальна на участках поверхности, которые наиболее близки друг к другу. Приближенно при  $d/D < 0,4$

$$E_{\max} = \frac{U}{d} \frac{1+d/(2D)}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}. \quad (9.21)$$

Диэлектрик способен выдержать без электрического пробоя некоторое предельное значение напряженности электрического поля  $E_{\text{пред}}$  которое и определяет предельную переносимую мощность.

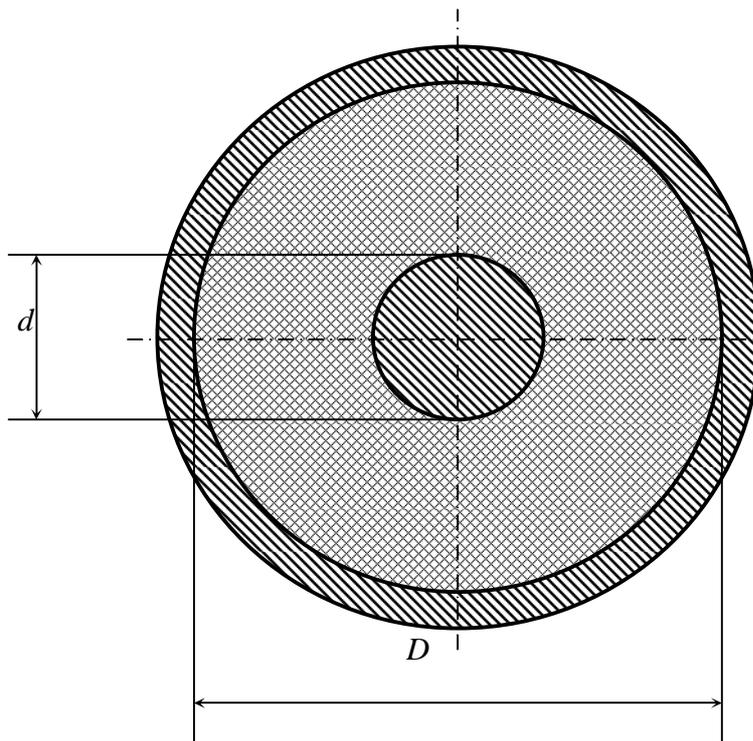
Коэффициент ослабления волны за счет потерь и диэлектрике определяется формулой (9.14). Коэффициент ослабления, обусловленный сопротивлением проводников.

$$a_m = \frac{R_s}{\pi d Z_B \sqrt{1-(d/D)^2}}, \text{м}^{-1}. \quad (9.22)$$

Здесь квадратный корень учитывает повышение ослабления вследствие неравномерного распределения тока; при  $d < D/3$  этой поправкой можно пренебречь.

### Коаксиальные линии передачи

Коаксиальная линия передачи представляет собой систему из двух соосных металлических цилиндров с диаметрами  $d$  и  $D$ , разделенных слоем диэлектрика с проницаемостью  $\epsilon_a$  и  $\mu_a$



(рис. 9.4).

Комплексная амплитуда вектора  $E$  бегущей волны в коаксиальной линии передачи без потерь

$$\underline{E} = \frac{U}{\ln(D/d)} \frac{1}{r} e^{-j\beta z} \mathbf{1}_r, \quad (9.23)$$

где  $U$  — комплексная амплитуда напряжения (разности потенциалов) между внутренним и внешним проводниками в сечении  $r = 0$ .

Рис. 9.4

Для линии без потерь

$$Z_{сТ} = \sqrt{m_a / e_a} = 120p \sqrt{m / e}, Ом \quad (9.24)$$

Погонные параметры коаксиальной линии передачи:

$$L_1 = m_a / (2p) \ln(D / d), Гн / м, \quad (9.25)$$

$$C_1 = \frac{2pe_a}{\ln(D / d)}, Ф / м. \quad (9.26)$$

Волновое сопротивление коаксиальной линии передачи

$$Z_a = 60 \sqrt{\frac{m}{e}} \ln(D / d) = 138 \sqrt{\frac{m}{e}} \lg(D / d), Ом. \quad (9.27)$$

Переносимая мощность

$$P = \frac{U^2}{120} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu} \frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}}, Вт, \quad (9.28)$$

$$U = E_{\max} \frac{d}{2} \ln(D / d), В. \quad (9.29)$$

Выражение (9.28) можно представить в виде

$$P = \frac{E_{\max}^2 d^2}{480} \sqrt{\frac{e}{m} \ln\left(\frac{D}{d}\right)} Вт. \quad (9.30)$$

Коэффициент ослабления волны типа Т в коаксиальной линии перепай, учитывающий потери в диэлектрике, определяется формулой (9.14). Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в металле,

$$a_{вм} = \sqrt{\frac{e}{m} \frac{R_{s1} / d + R_{s2} / D}{120p \ln(D / d)}}, м^{-1}. \quad (9.31)$$

где  $R_{s1}$  и  $R_{s2}$  — поверхностные сопротивления металла внутреннего и внешнего цилиндров соответственно.

В коаксиальной линии передачи волны электрического и магнитного типов являются высшими типами волн. Обычно они не используются для передачи, но могут возникать как паразитные. Для подавления волн высших типов достаточно, чтобы частота колебаний удовлетворяла неравенству

$$w \leq \frac{4}{\sqrt{m_a e_a} (d + D)}. \quad (9.32)$$

### Полосковые линии передачи

В технике СВЧ широко применяют направляющие системы, называемые полосковыми линиями передачи, которые особенно удобны в печатных и интегральных схемах СВЧ. На рис. 9.5, а и б

изображены полосковые линии передачи несимметричного и симметричного типов. Эти линии либо заполнены воздухом, либо имеют основание из твердого диэлектрика.

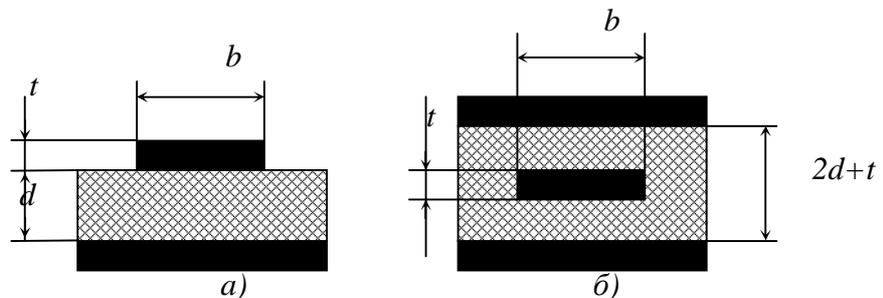


Рис. 9.5

Строгая теория полосковых линий довольно сложна. Так называемая квази-Т-волна в этих линиях может существовать, если ширина токонесущего проводника и расстояние между ним и заземленной пластиной меньше половины длины волны в линии передачи. При этом электрическое и магнитное поля сосредоточены в основном в пространстве между проводником и заземленной пластиной. Электрическое поле в поперечной плоскости может быть описано уравнением Лапласа (9.5).

В полосковых линиях передачи с диэлектрическим основанием волны типа Т не могут распространяться в чистом виде из-за неоднородности диэлектрика. Однако теория и опыт показывают, что поля и поток мощности сосредотачиваются главным образом в диэлектрике между токонесущим проводником и заземленной пластиной. Поэтому можно принять допущение об однородности диэлектрика, заполняющего всю линию передачи.

Картины силовых линий электромагнитного поля в полосковых линиях передачи приведены на рис. 9.6, а и б. Для практических расчетов удобны следующие приближенные соотношения, которые хорошо согласуются с опытными данными [8].

Погонные емкости (Ф/м) рассчитывают по формулам:

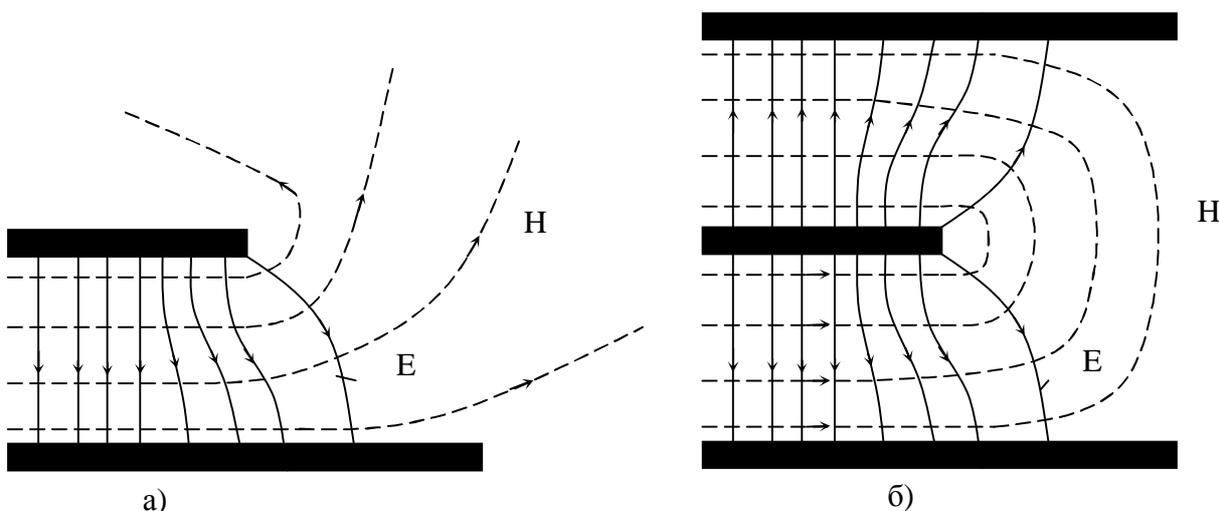


Рис. 9.6

для несимметричной полосковой линии передачи (см. рис. 9.5, а);

$$C_1 = 1,06 \cdot 10^{-11} e(1 + b/d)(t/d \ll 1, b/d > 0,6), \quad (9.33)$$

$$C_1 = 1,06 \cdot 10^{-11} e(1 + b/d) \frac{1}{1 - t/d} (b/d < 2), \quad (9.34)$$

$$C_1 = 1,06 \cdot 10^{-11} e \left( 1 + \frac{b}{d} \left( \frac{1}{1 - t/d} \right) \right) (b/d > 2). \quad (9.35)$$

для симметричной полосковой линии передачи (см. рис. 9.5, б)

$$C_1 = 1,54 \cdot 10^{-11} e(1 + b/d)(t/d \ll 1, b/d > 0,6), \quad (9.36)$$

$$C_1 = 1,54 \cdot 10^{-11} e(1 + b/d) \frac{1}{1 - t/d} (b/d < 2), \quad (9.37)$$

$$C_1 = 1,54 \cdot 10^{-11} e \left( 1 + \frac{b}{d} \left( \frac{1}{1 - t/d} \right) \right) (b/d > 2). \quad (9.38)$$

Волновые сопротивления с учетом толщины токонесущего проводника  $l$  рассчитывают по формулам:

для несимметричной линии передачи

$$Z_e = \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{314}{1 + b/d} (b/d < 2), \quad (9.39)$$

$$Z_e = 314 \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{1}{1 + \frac{b}{d} \left( \frac{1}{1-t/d} \right)} (b/d > 2). \quad (9.40)$$

для симметричной линии передачи

$$Z_e = 216 \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{1-t/d}{1+b/d} (b/d < 2), \quad (9.41)$$

$$Z_e = 216 \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{1}{1 + \frac{b}{d} \left( \frac{1}{1-t/d} \right)} (b/d > 2). \quad (9.42)$$

Волновые сопротивления без учета толщины проводника определяются соотношениями: для несимметричной линии передачи-

$$Z_e = \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{314}{1+b/d}, \quad (9.43)$$

для симметричной линии передачи

$$Z_e = \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{216}{1+b/d}. \quad (9.44)$$

Передаваемая мощность в несимметричной полосковой линии передачи

$$P = 8,44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{e}{m}} E_0^2 d^2 \ln \frac{r_B}{r_A}, Bm, \quad (9.45)$$

где  $E_0$  — амплитуда напряженности поля в центре линии, В/м.

Значения коэффициентов  $r_B$  и  $r_A$  в зависимости от отношения  $b/d$  определяют по таблицам в Приложении IV,

При  $b/d \geq 1$  в формуле (9.45) можно принять, что

$$\ln \frac{r_B}{r_A} \approx r_B, \quad (9.46)$$

в результате чего она упрощается:

$$P = 8,44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{e}{m}} E_0^2 d^2 r_B, Bm. \quad (9.47)$$

Предельная мощность в полосковых линиях передачи ограничивается условиями пробоя и допустимым нагревом диэлектрика. Если пробой диэлектрика определяет предел мощности в импульсе, то нагрев ограничивает передаваемую мощность при непрерывной работе или среднюю мощность в импульсном режиме.

Предельная мощность полосковых линий передачи, обусловленная условиями электрического пробоя, ограничивается максимально допустимой величиной напряженности электрического поля у края проводника, так как поле внутри линии неравномерно:

$$E_{\max} = 2E_0 / k_H, \quad (9.48)$$

где  $k_H$  учитывает неравномерность распределения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения несимметричной полосковой линии.

Для несимметричной полосковой линии передачи

$$k_H \approx 2 \sqrt{2 \frac{t}{d} + 4 \frac{t}{d}}. \quad (9.49)$$

При малых значениях  $t/d$

$$k_H \approx 2 \sqrt{2 \frac{t}{d}}. \quad (9.50)$$

Для несимметричной полосковой линии передачи, учитывая выражения (9.47), (9.48) и заменяя  $E_{\max}$  на  $E_{\text{пред}}$ , получим

$$P_{\text{пред}} = 8,44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{e}{m}} E_{\text{пред}}^2 d^2 r_B \frac{k_H^2}{4}, Bm. \quad (9.51)$$

На основании неравенства (9.50) формулу (9.51) можно упростить:

$$P_{\text{перед}} = 16,88 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{e}{m}} E_{\text{перед}}^2 d^2 r_B \frac{t}{d}, \text{ Вм}. \quad (9.52)$$

Передаваемая мощность в симметричной полосковой линии передачи

$$P = \frac{1}{60p^2} \sqrt{\frac{e}{m}} E_0^2 d^2 k_c^2 \ln\left(\frac{1+r_c}{1-r_c}\right), \quad (9.53)$$

где

$$k_c^2 = \sqrt{\frac{t}{2d} \left(1 + \frac{t}{d}\right) \left(2 + \frac{t}{d}\right) \left(4 + \frac{t}{d}\right)}. \quad (9.54)$$

Это коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряженности электрического поля в плоскости поперечного сечения. Значения  $r_c$  для различных отношений  $b/d$  приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

b/d	1	1,2	1,4	1,6	2	3	4	5	6	9	14	20
$r_c$	0,89	0,92	0,945	0,948	0,98	0,99	0,9909	0,999	0,996	0,999	0,9999	0,9999

Если геометрические размеры удовлетворяют неравенствам  $t/d < 0,3$ ;  $b/d > 1$ , то выражение (9.53) можно преобразовать к виду

$$P = 5,4 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{e}{m}} E_0^2 d^2 \left(0,1 + \frac{t}{d}\right) \left(4 + \frac{b}{d}\right). \quad (9.55)$$

Предельная мощность в симметричной полосковой линии передачи

$$P_{\text{перед}} = 5,4 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{e}{m}} E_{\text{перед}}^2 d^2 \left(0,1 + \frac{t}{d}\right) \left(4 + \frac{b}{d}\right). \quad (9.56)$$

Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в проводящих пластинах несимметричной полосковой линии передач,

$$a_m = \frac{R_s}{120pd} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{\ln(r_A k_H / 2)}{\ln(r_B / r_A)}. \quad (9.57)$$

Здесь коэффициент  $k_H$  определяют по соотношению (9.49) или (9.50) а значения  $r_A$  и  $r_B$  — по таблицам в Приложении IV. Коэффициент ослабления, обусловленный потерями в проводящих пластинах симметричной полосковой линии передачи (при  $t/d < 0,3$ ,  $b/d > 1$ ),

$$a_m = \frac{R_s}{120pd} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{7 - 50t/d + b/d}{3,2(0,1 + t/d)(4 + d/b)}. \quad (9.58)$$

В формулах (9.57), (9.58)  $R_s$  — поверхностное сопротивление металла.

Коэффициент ослабления волны типа Т в полосковой линии передачи за счет потерь в диэлектрике определяется соотношением (9.14).

## § 9.2. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ТИПОВЫХ ЗАДАЧ

**9.1** Рассчитать волновое сопротивление и коэффициент ослабления симметричной двухпроводной линии передачи. Диаметр проводов линии  $d = 3$  мм, расстояние между проводами  $D = 200$  мм. Проводники линии выполнены из меди, диэлектрик — воздух. Рабочая частота  $10^8$  Гц.

Решение. В соответствии с формулой (9.19) волновое сопротивление

$$Z_e \approx 120 \sqrt{\frac{m}{e}} \ln\left(\frac{2D-d}{d}\right) = 120 \ln\left(\frac{2 \cdot 200 - 3}{3}\right) = 586 \text{ Ом}.$$

Коэффициент ослабления в двухпроводной линии передачи определяется только сопротивлением проводников, так как потери в диэлектрике отсутствуют. Согласно выражению (9.22)

$$a = a_m = \frac{R_s}{pdZ_B \sqrt{1 - (d/D)^2}}, \text{ м}^{-1}.$$

Вычисляя

$$\frac{d}{D} = \frac{3}{200} = 0,015 \text{ и } \sqrt{1 - (d/D)^2} = \sqrt{1 - 0,015^2} \approx 1,$$

находим коэффициент ослабления

$$a = a_m = \sqrt{\frac{m_{ам} w}{2s_m}} \frac{1}{pdZ_B} = 0,048 * 10^{-2}, \text{ м}^{-1}.$$

**9.2** Найти отношение между внешним и внутренним диаметрами коаксиальной линии передачи с волной типа Т, при котором будет минимальное затухание, считая, что потери в диэлектрике отсутствуют. Внутренний и внешний цилиндры выполнены из одного материала.

Решение. Согласно выражению (9.14)  $\alpha = \alpha_m, \alpha_d = 0$ , Коэффициент ослабления  $\alpha_m$  в коаксиальной линии передачи определяем согласно формуле (9.31). Поскольку  $R_{S1} = R_{S2} = R_s$ , из формулы (9.31) находим

$$a = \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{R_s (1/d + 1/D)}{120p \ln(D/d)}.$$

Преобразуем последнее выражение так, чтобы в него входило в явном виде отношение  $D/d$ :

$$a = \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{R_s (D/d + 1)}{120pD \ln(D/d)},$$

обозначив  $\sqrt{\frac{e}{m}} \frac{R_s}{120pD} = A, \frac{D}{d} = x$ , запишем

$$a = A \frac{1+x}{\ln x}.$$

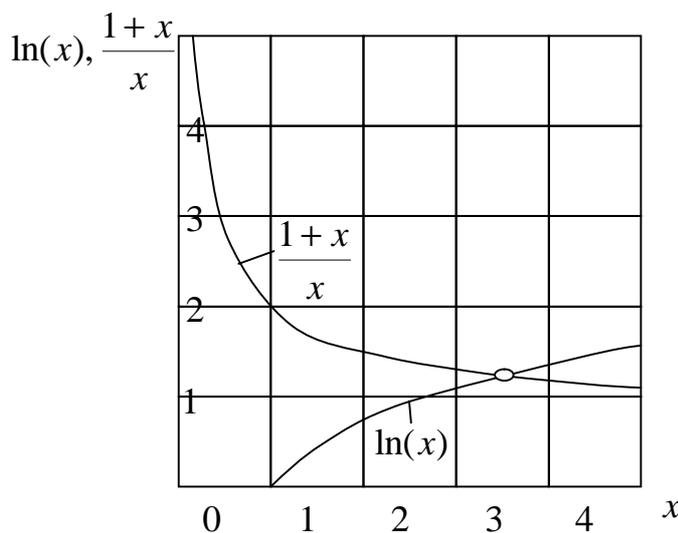


Рис.9.7

Для нахождения экстремума следует решить уравнение

$$\frac{da}{dx} = A \frac{\ln x - \frac{1+x}{x}}{\ln^2 x} = 0$$

или

$$\ln x = \frac{1+x}{x}.$$

Полученное уравнение является трансцендентным. Из графических построений (рис. 9.7) имеем корень  $x = 3,6$ , откуда  $D/d = 3,6$ . Таким образом, минимальное затухание волны типа Т в коаксиальной линии передачи получается при отношении  $D/d = 3,6$ .

**9.3** Центрирование внутреннего цилиндра воздушной коаксиальной линии передачи осуществляют с

помощью диэлектрических шайб (рис. 9.8).

Рассчитать диаметр  $D$  внешнего цилиндра и глубину выточек  $h$  в нем исходя из условия отсутствия отражений.

Волновое сопротивление линии  $Z_B = 70$  Ом, диаметр внутреннего цилиндра линии  $d = 4,5$  мм, диаметр отверстия в шайбе  $d_m = 3,0$  мм, относительная диэлектрическая проницаемость

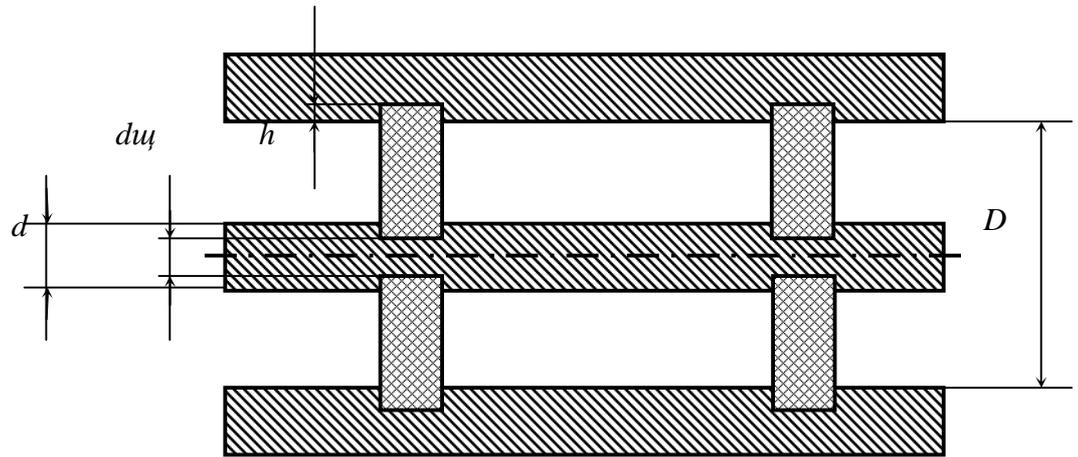


Рис. 9.8

материала шайбы  $\epsilon = 2,3$ . Потерями в линии пренебречь.

**Решение.** Воздушную коаксиальную линию передачи с шайбами можно рассматривать как каскадное соединение отрезков регулярных линий. Поскольку в плоскости стыка шайбы и воздушной линии напряжение  $U$  является непрерывной функцией координаты  $z$ , мощность может быть целиком передана из одной линии в другую без отражения, если  $Z_{н1} = Z_{B2}$ , где  $Z_{B2}$  — волновое сопротивление той части, где расположена шайба.

Согласно выражению (9.27)

$$Z_{B1} = 60 \ln\left(\frac{D}{4,5}\right) = 70 \text{ Ом},$$

откуда  $D = 14,45$  мм. Далее находим

$$Z_{B1} = 60 \sqrt{\frac{1}{2,3}} \ln\left(\frac{14,45 + 2h}{3,0}\right).$$

Приравняв  $Z_{B1}$  и  $Z_{B2}$ , получаем уравнение

$$70 = 60 \sqrt{\frac{1}{2,3}} \ln\left(\frac{14,45 + 2h}{3,0}\right) \text{ или } \ln\left(\frac{14,45 + 2h}{3,0}\right) = 1,77.$$

корень которого  $h = 1,58$  мм.

Полученное решение является приближенным, поскольку не учитываются локальные возмущения поля из-за скачков диаметров проводников.

**9.4** Рассчитать волновое сопротивление, погонные емкость и индуктивность, а также предельную передаваемую мощность в несимметричной полосковой линии передачи с воздушным заполнением. Параметры линии: ширина проводника  $b = 5$  мм, расстояние между проводником и заземленной пластиной  $d = 1$  мм, толщина проводника  $t = 0,025$  мм (см. рис. 9.5, а), предельно допустимое значение напряженности электрического поля в воздухе  $E_{\text{пред}} = 30$  кВ/см.

**Решение.** Волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи определяется выражением (9.39) или (9.40) в зависимости от отношения  $b/d$ . В нашем случае  $b/d > 2$ , поэтому

$$Z_e = 314 \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{1}{1 + \frac{b}{d} \left(\frac{1}{1 - t/d}\right)}, \text{ Ом.}$$

Полосковая линия передачи заполнена воздухом, для которого  $\epsilon = 1$   $\mu = 1$ . Тогда

$$Z_e = 314 \frac{1}{1 + \frac{5}{1} \left(\frac{1}{1 - 0,025/1}\right)} = 51,24 \text{ Ом.}$$

Волновое сопротивление можно определить и по формуле (9,43), т. к. в рассматриваемом случае  $t/d=0.025 \ll 1$ .

$$Z_e = \sqrt{\frac{m}{e}} \frac{314}{1+b/d} = \frac{314}{1+5/1} = 52,333 \text{ Ом}.$$

Погрешность при этом не превышает 2,5%. Погонную емкость находим по формуле (9.33):

$$C_1 = 1,06 \cdot 10^{-11} e(1+b/d) = 1,06 \cdot 10^{-11} (1+5/1) = 63,6 \text{ нФ/м},$$

а погонную индуктивность – по формуле

$$Z_B = \sqrt{L_1/C_1} \Rightarrow L_1 = Z_B^2 C_1 = 0.173 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}.$$

Предельная передаваемая мощность в несимметричной полосковой линии передачи вычисляется по формуле (9.52). При отношениях  $b/d=5$  и  $t/d = 0,025$  по таблицам в Приложении IV находим, что  $r_e = 14,56$ . Тогда  $P_{\text{пред}} = 5,53 \text{ кВт}$ .

**9.5** Рассчитать коэффициент ослабления в симметричной полосковой линии передачи с твердым диэлектриком. Параметры линии: ширина проводника  $b = 1,2 \text{ мм}$ , расстояние между проводником и заземленной пластиной  $d = 1 \text{ мм}$ , толщина  $t = 0,05 \text{ мм}$  (см. рис.9.5,б). Проводники выполнены из меди. Параметры диэлектрика:  $\mu_r = 1$ ,  $\varepsilon = 2,55$ ,  $\text{tg } \delta_s = 8 \cdot 10^{-10}$ . Рабочая частота  $6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ .

Решение. Согласно выражению (9.13) коэффициент ослабления волны

$$\alpha = \alpha_d + \alpha_m.$$

Коэффициент ослабления  $\alpha_d$  за счет потерь в диэлектрике определяется формулой (9.14).

Так как

$$\sqrt{e_a m_a} = \sqrt{em} \sqrt{e_0 m_0} = \frac{\sqrt{em}}{3 \cdot 10^8},$$

то

$$\alpha_d = \frac{1}{2} 2p \cdot 10^9 \sqrt{2,55 \cdot 1} \frac{1}{3 \cdot 10^8} \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 0,0798 \text{ м}^{-1}.$$

Коэффициент ослабления  $\alpha_m$ , обусловленный потерями в проводящих пластинах, Согласно (9.58) равен  $0,0979 \text{ м}^{-1}$ . Суммарный коэффициент ослабления

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_d = 0,0979 + 0,0798 = 0,1777 \text{ м}^{-1}.$$

### § 9.3. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**9.6** Рассчитать погонные параметры и волновое сопротивление коаксиального кабеля марки РК-75-9-12. Параметры кабеля: диаметр внутреннего провода 1,35 мм, диаметр внешнего проводника 9,0 мм, относительная проницаемость диэлектрика  $\varepsilon = 2,2$ .

*Ответ:*  $L_l = 0,379 \text{ мкГн/м}$ ,  $C_1 = 64,4 \text{ пФ/м}$ ,  $Z_B = 76,7 \text{ Ом}$ .

**9.7** Для изготовления двухпроводной симметричной воздушной линии передачи имеется провод диаметром 3 мм.

Найти расстояние между проводами, обеспечивающее волновое сопротивление 600 Ом, а также погонные параметры линии.

*Ответ:*  $22,4 \text{ см}$ ,  $L_l = 2 \text{ мкГн/м}$ ,  $C_1 = 5,55 \text{ пФ/м}$ .

**9.8** Рассчитать волновое сопротивление, погонные индуктивность и емкость несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком. Параметры линии: ширина токонесущей полоски  $b = 7 \text{ мм}$ , расстояние между токонесущей полоской и заземленной пластиной  $d = 1 \text{ мм}$ , толщина токонесущей полоски  $t = 0,05 \text{ мм}$  (см. рис. 9.5, а). Диэлектрик — фторопласт. Потерями в линии пренебречь.

*Ответ:*  $26 \text{ Ом}$ ,  $0,126 \text{ мкГн/м}$ ,  $186,3 \text{ пФ/м}$ .

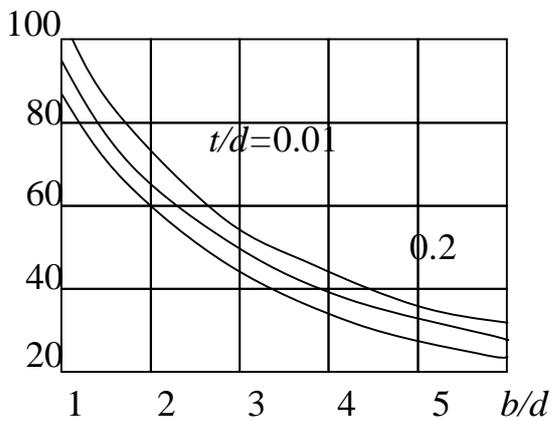


Рис. 9.9

**9.9** Определить погонные параметры симметричной полосковой линии передачи с твердым диэлектриком, если известно, что ее волновое сопротивление 50 Ом, а фазовая скорость распространения волны  $2 \cdot 10^8$  м/с.

*Ответ:*  $L_1 = 0,25$  мкГн/м,  $C_1 = 100$  пФ/м.

**9.10** Определить волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи, если известно, что в качестве диэлектрика используется материал с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,55$ , а погонная емкость линии 60 пФ/м.

*Ответ:* 88,7 Ом.

**9.11** Построить зависимость волнового сопротивления симметричной полосковой линии с воздушным заполнением от отношения ширины центрального проводника  $b$  к расстоянию между проводником и заземленной пластиной  $d$  для трех значений  $t/d$  (0,01; 0,1; 0,2), где  $t$  — толщина проводника (см. рис. 9.5, б). Отношение  $b/d$  изменять от 1 до 6.

*Ответ:* зависимость  $Z_w(b/d)$  для разных значений ( $t/d$  представлена на рис. 9.9).

**9.12** Определить волновое сопротивление несимметричной полосковой линии передачи с твердым диэлектриком, если известно, что длина волны в линии 10 см, а погонная емкость 100 пФ/м. Рабочая частота 2 ГГц.

*Ответ:* 50 Ом.

**9.13** Волновое сопротивление коаксиальной линии передачи на волне типа Т равно 60 Ом. Диэлектрик — воздух. Определить погонные индуктивность и емкость, а также скорость распространения волны в линии.

*Ответ:* 0,2 мкГн/м; 55,5 пФ/м,  $v_{\phi} = 3 \cdot 10^8$  м/с.

**9.14** Определить предельные размеры коаксиальной линии передачи, при которых может распространяться только волна типа Т. Длина волны передаваемых колебаний 15 см, волновое сопротивление 50 Ом. Диэлектрик — воздух.

*Ответ:*  $d = 2,89$  см,  $D = 6,66$  см.

**9.15** Для коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 5$  мм,  $D = 11$  мм (см. рис. 9.4) вычислить частоту, до которой волны высших типов не распространяются. Диэлектрик — воздух. Как изменится значение частоты, если коаксиальную линию заполнить диэлектриком с  $\epsilon = 2,1$ ?

*Ответ:*  $f = 11,94$  ГГц, уменьшится в 1,45 раза.

**9.16** В коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 2,1$  мм,  $D = 7,3$  мм (см. рис. 9.4) распространяется волна типа Т. Частота колебаний 3 ГГц. Относительная проницаемость диэлектрика  $\epsilon = 2,2$ .

Записать выражения для мгновенных значений векторов поля  $E$  и  $H$  при условии, что амплитуда напряжения между цилиндрами равна 1 кВ. Потерями в линии пренебречь. Определить фазовую скорость и длину волны в линии. Построить картину силовых линий поля.

*Ответ:*  $E(t) = 802,6 \frac{1}{r} \cos(6\pi \cdot 10^9 t - 93,15z) \text{ В/м},$

$H(t) = 3,16 \frac{1}{r} \cos(6\pi \cdot 10^9 t - 93,15z) \text{ А/м},$

$v_{\phi} = 2,02 \cdot 10^8 \text{ м/с},$

$I_B = 6,74 \text{ см}.$

Картина силовых линий поля представлена на рис. 9.10. |

**9.17** По коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 12$  мм,

$D = 28$  мм (см. рис. 9.4) на волне типа Т передается мощность 100 кВт. Диэлектрик — воздух. Определить амплитуду тока в линии.

Ответ: 62,72 А.

**9.18** В коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 4,5$  мм,  $D = 12$  мм (диэлектрик — воздух) существует ток с амплитудой 1 А.

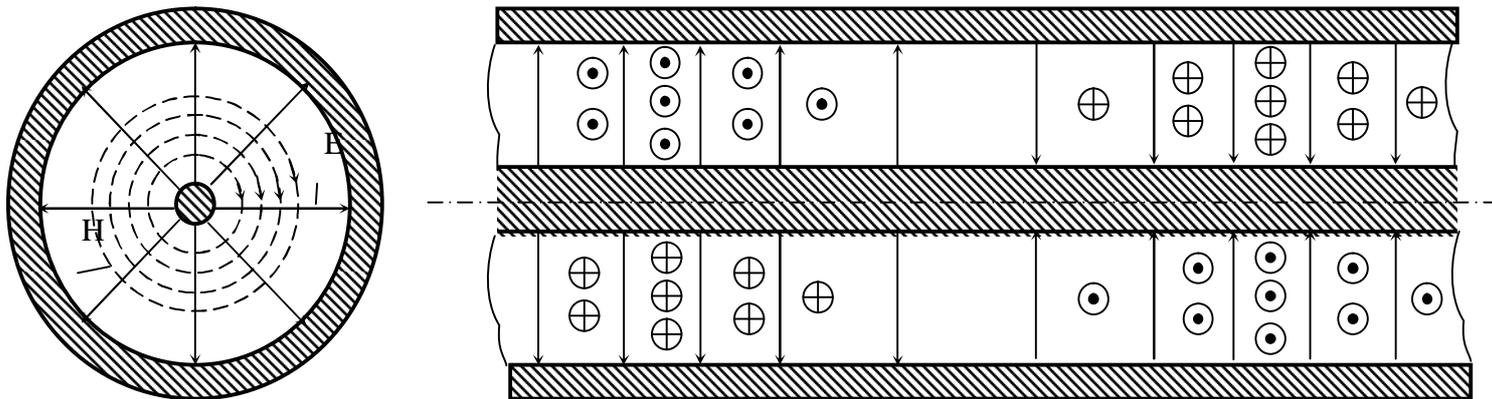


Рис. 9.10

Определить амплитудные значения напряженностей электрического и магнитного полей волны типа Т на поверхностях внутреннего и наружного цилиндров.

Ответ:  $E_r(r=d/2) = 26,67$  кВ/м,  $H_\phi(r = d/2) = 70,77$  А/м,  $E_r(r = D/2) = 10$  кВ/м,  $H_\phi(r=D/2) = 26,54$  А/м.

**9.19** По коаксиальной линии передачи, диаметр внутреннего цилиндра которой  $d = 2$  мм, на волне типа Т передается мощность 10 Вт. Волновое сопротивление линии 60 Ом. Относительная проницаемость диэлектрика  $\epsilon = 2,2$ .

Найти максимальные значения напряженностей электрического и магнитного полей в линии.

Ответ:  $E_{r \max} = 23,36$  кВ/м,  $H_{\phi \max} = 91,93$  А/м.

**9.20** По симметричной двухпроводной воздушной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 2$  мм,  $D = 40$  мм передается мощность 2 кВт.

Определить амплитуду напряжения между проводами и амплитуду тока в линии.

Ответ: 1,326 кВ, 3,016 А.

**9.21** Линия, питаемая генератором синусоидального напряжения с частотой 25 МГц, имеет погонные параметры  $C_l = 16$  пФ/м и  $L_l = 1$  мкГн/м.

Найти фазовую скорость и длину волны в линии.

Ответ:  $2,5 \cdot 10^8$  м/с, 10 м.

**9.22** Определить погонные параметры несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком, если известно, что длина волны в линии 7 см, а волновое сопротивление 50 Ом. Рабочая частота 3 ГГц.

Ответ: 0,24 мкГн/м, 95,2 пФ/м.

**9.23** Определить погонные параметры двухпроводной симметричной линии передачи, если известно, что волновое сопротивление линии 100 Ом, рабочая частота 100 МГц. Диэлектрик — воздух.

Ответ: 0,33 мкГн./м, 33,3 пФ/м.

**9.24** В коаксиальной линии передачи распространяется бегущая волна типа Т, переносящая мощность  $P$ .

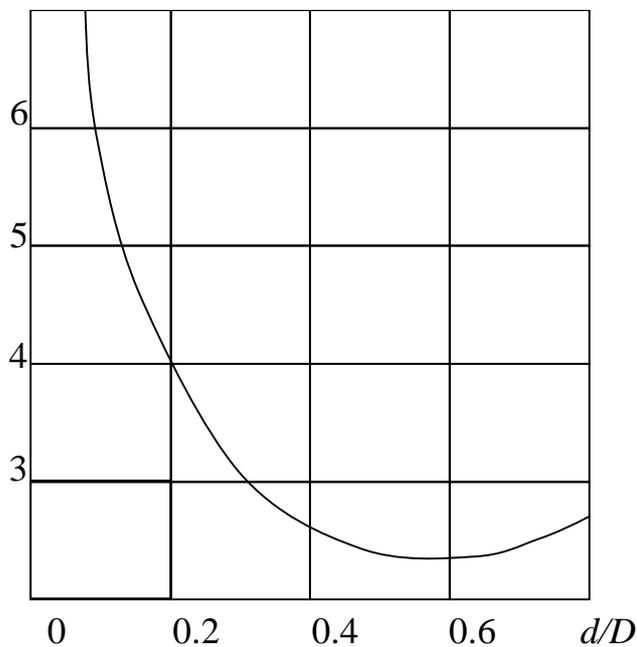


Рис. 9.11

Построить зависимость максимальной напряженности электрического поля в линии от диаметра внутреннего провода  $d$  при заданных значениях  $D$  и  $P$ . При каком значении  $d/D$  имеет место минимальная величина  $E_{\max}$  и какому волновому сопротивлению при воздушном заполнении линии это соответствует?

Ответ:

$$E_{\max} = \frac{21,9}{D} \sqrt{PF}, \text{ где } F = \frac{D/d}{\sqrt{\ln(D/d)}}$$

Зависимость  $F(d/D)$  приведена на рис. 9.11. Минимальная величина  $E_{\max}$  имеет место при  $d/D=0,606$ , что соответствует  $Z_B = 30$  Ом.

**9.25 \*** Вывести формулу для определения максимальной напряженности электрического поля в

двухпроводной линии передачи, состоящей из цилиндрических проводов с диаметром сечения  $d$  и расстоянием между проводами  $D$ . В проводах линии существует ток  $I$ .

Ответ: 
$$E_{\max} = \frac{Z_B I}{d} \frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)} \frac{1}{1-d/2D}$$

при  $d/D \ll 1$  
$$E_{\max} \approx \frac{Z_B I}{d} \frac{1+d/2D}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}$$

**9.26** В коаксиальной линии передачи с поперечными размерами  $d=2$  мм,  $D = 10$  мм (см. рис. 9.4) распространяется волна типа Т. Диэлектрик — воздух. Определить амплитуды поверхностной плотности тока на цилиндрических поверхностях линии и максимальную амплитуду плотности тока смещения в диэлектрике линии, если известно, что амплитуда напряжения между цилиндрами 20 В. Рабочая частота  $3 \cdot 10^9$  Гц.

Ответ:  $\eta(r = d/2) = 33$  А/м,  $\eta(r = D/2) = 6,6$  А/м,  $J_{\text{смmax}} = 2,072 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup>.

**9.27** Решить задачу 9.26 в случае, когда диэлектрик коаксиальной линии имеет относительную проницаемость  $\epsilon = 2,2$ . Потерями в линии пренебречь.

Ответ:  $\eta(r = d/2) = 48,94$  А/м,  $\eta(r = D/2) = 9,79$  А/м,  $J_{\text{смmax}} = 4,559 \cdot 10^3$  А/м<sup>2</sup>.

**9.28** Вывести формулу для определения максимального среднего значения вектора Пойнтинга в симметричной двухпроводной линии передачи (см. рис. 9.2), если известна амплитуда тока в линии.

$$P_{\text{срmax}} = \frac{60I^2}{pd^2} \sqrt{\frac{m}{e}} (1+d/2D)^2.$$

**9.29** Используя данные задачи 9.26, определить средние значения вектора Пойнтинга на поверхности проводников линии.

Ответ:  $P_{\text{ср}}(r = d/2) = 2,052 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>,  $P_{\text{ср}}(r = D/2) = 8,207 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>.

**9.30** Определить мощность, передаваемую в согласованную нагрузку по двухпроводной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 4$  мм,  $D = 40$  см. Диэлектрик — воздух. Амплитуда напряжения между проводами линии 10 кВ. Потерями в линии пренебречь.

Ответ: 78,72 кВт.

**9.31** В коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 9$  мм,

$D = 21$  мм (см. рис. 9.4) распространяется волна типа Т.

Определить предельную передаваемую мощность, если пробой происходит при напряженности электрического поля 30 кВ/см. Диэлектрик — воздух.

Ответ:  $1,287 \cdot 10^6$  Вт.

**9.32** Определить предельную мощность, которая может быть передана по двухпроводной симметричной линии с диаметром проводов  $d = 10$  мм, если пробой происходит при напряженности электрического поля 30 кВ/см. Погонная емкость линии 8 пФ/м.

Ответ:  $12,28 \cdot 10^6$  Вт.

**9.33** В согласованную нагрузку, подключенную на выходе коаксиальной линии передачи длиной 10 м размерами поперечного сечения  $d=4,68$  мм,  $D=11,7$  мм (см. рис. 9.4), должна поступить мощность 1 кВт. Линия выполнена из меди. Диэлектрик — воздух. Частота передаваемых колебаний 3 ГГц.

Рассчитать мощность, поступающую от источника на вход линии, а также амплитуду напряжения на входе линии.

Ответ: 1283,5 Вт, 375,75 В.

**9.34** Коаксиальная линия с размерами поперечного сечения  $d = 19$  мм,  $D = 40$  мм служит для передачи мощности 10 кВт. Длина волны генератора 50 см.

Определить мощность, которая будет выделяться на участке длиной 1 м, прилегающем к генератору, если линия изготовлена из латуни. Диэлектрик — воздух.

Ответ: 72 Вт.

**9.35** В коаксиальной линии передачи распространяется волна типа Т.

Для фиксированной частоты колебаний построить зависимость затухания за счет потерь в металле от отношения  $D/d$ . Внутренний диаметр наружного проводника, а также параметры материала, из которого выполнена линия, считать известными. Внутренний и внешний проводники выполнены из одинаковых материалов.

Ответ:  $\Delta = 0,023 \sqrt{\frac{e}{m} \frac{R_s}{D}} F(D/d) \text{ дБ/м}$

где  $F(D/d) = \frac{1 + D/d}{\ln D/d}$ .

Зависимость  $F(D/d)$  приведена на рис. 9.12.

**9.36** В качестве линии передачи используется коаксиальный кабель марки РК-75-4-11 длиной 10 м с размерами поперечного сечения  $d = 0,72$  мм,  $D = 4,8$  мм. Кабель изготовлен из меди. Диэлектрик имеет параметры  $\epsilon = 2,2$ ,  $\text{tg} \delta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$ . Частота передаваемых колебаний 3 ГГц.

Определить к. п. д. системы. Как изменится к. п. д., если частоту передаваемых колебаний увеличить в четыре раза.

Ответ: 90%, 79%.

**9.37** Генератор синусоидальной э. д. с. питает согласованную двухпроводную воздушную линию передачи длиной 200 м. Диаметр проводов линии 8 мм, расстояние между проводами 32 см. Материал проводов — медь. Амплитуда напряжения генератора 3 кВ, частота 10 МГц.  $I$

Определить к. п. д. линии, мощность потерь и мощность, передаваемую в нагрузку.

Ответ: 97,44%, 219,8 Вт и 8,362 кВт соответственно.

**9.38** Найти отношение диаметра провода  $d$  и расстояния между проводами  $D$  в симметричной двухпроводной линии передачи, при котором будет минимальное

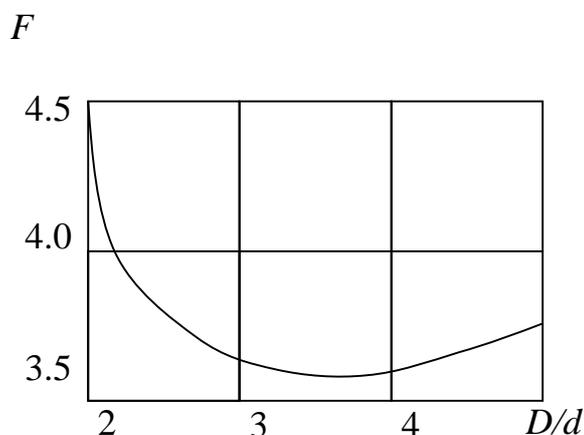


Рис. 9.12

затухание.

Диэлектрик —

воздух. I

Ответ:  $d/D = 0,435$ .

- 9.39** Рассчитать погонное затухание в несимметричной полосковой линии передачи, заполненной воздухом. Размеры поперечного сечения линии (см. рис. 9.5, о):  $b = 12$  мм,  $d = 2$  мм,  $t = 0,050$  мм. Линия выполнена из меди. Рабочая частота 500 МГц. Сравнить полученное значение затухания с затуханием в линии

тех же размеров, если допустить, что напряженность электрического поля в плоскости поперечного сечения распределена равномерно, а искажения поля у краев отсутствуют. Оценить погрешность расчета.

Ответ: 0,06 дБ/м, 13%.

- 9.40** В каких пределах можно изменять отношение  $D/d$  в коаксиальной линии передачи, чтобы затухание отличалось не более чем на 10% от минимального? Диэлектрик — воздух.

Ответ: допустимо отступление от оптимального отношения  $D/d = 3,6$  в пределах 2,4-6,6.

- 9.41** Определить погонное затухание волны типа Т и предельную мощность, которая может быть передана по симметричной полосковой линии, заполненной воздухом, если пробой происходит при напряженности электрического поля 30 кВ/см. Длина волны в линии 5 см. Параметры линии: ширина проводника  $b = 2,93$  мм, расстояние между проводником и заземленной пластиной  $d = 1$  мм, толщина  $t = 0,05$  мм (см. рис. 9.5, б).

Линия выполнена из меди.

Ответ: 1,049 дБ/м, 50,52 кВт.

$D$ , дБ/м

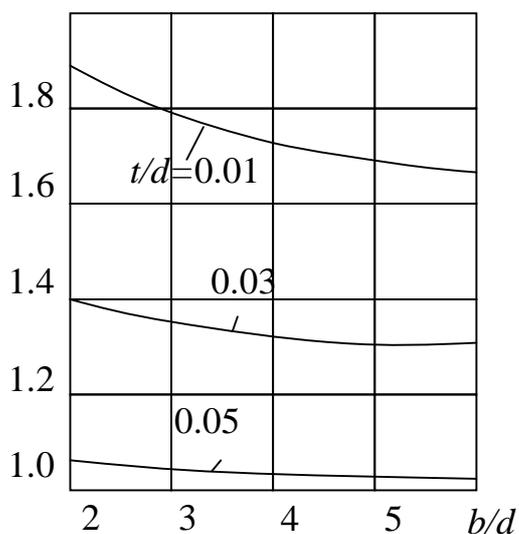


Рис. 9.14

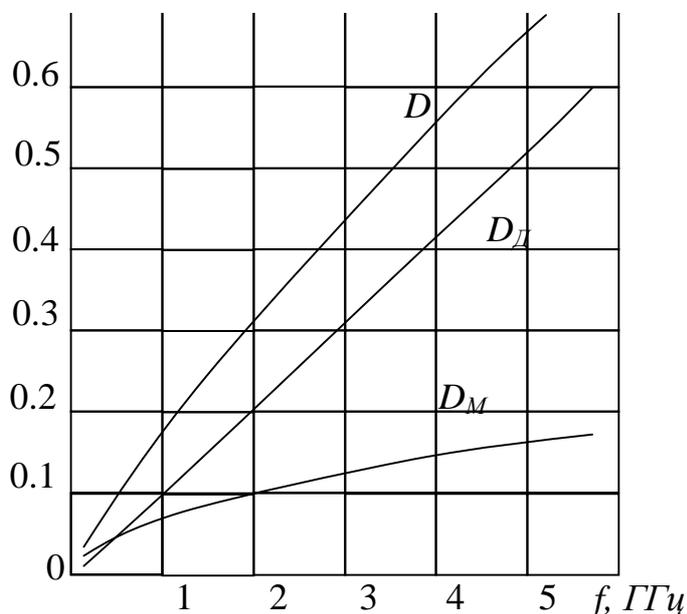


Рис. 9.13

- 9.42** Определить погонное затухание в несимметричной полосковой линии передачи, заполненной диэлектриком. Длина волны в линии 5 см. Параметры линии:  $b = 2$  мм,  $d = 2$  мм,  $t = 0,05$  мм. Относительная проницаемость диэлектрика  $\epsilon = 9$ ,  $\text{tg } \delta = 8 \cdot 10^{-4}$ . Токонесущая полоска и заземленная пластина выполнены из меди. Какова при этом доля потерь в металле и в диэлектрике?

Ответ: 0,807 дБ/м, доля потерь составляет 0,371 и 0,436 дБ/Мв соответственно.

**9.43** Построить график зависимости суммарного и частичных коэффициентов затухания волны типа Т за счет потерь в металле и диэлектрике от частоты для коаксиальной линии передачи с размерами поперечного сечения  $d = 2,72$  мм,  $D = 16$  мм. Проводники выполнены из меди, Диэлектрик — полиэтилен. Частота поля 0,1 — 6 ГГц.

*Ответ:* график зависимости для коаксиальной линии передачи приведен на рис. 9.13.

**9.44** Построить график зависимости затухания волны типа Т в симметричной полосковой линии передачи, заполненной воздухом, от ширины проводника  $b$  (отношение  $b/d$  задавать в пределах 2—6) для трех значений толщины  $t$  (отношение  $t/d$  принять равным 0,01; 0,03; 0,05). Расстояние между проводником и заземленной пластиной  $d = 1$  мм. Линия выполнена из меди. Длина волны в линии 5 см.

*Ответ:* график зависимости  $\Delta(b/d)$  приведен на рис. 9.14.

**9.45** Построить график зависимости суммарного и частичных коэффициентов затухания волны типа Т за счет потерь в металле и в диэлектрике от частоты для симметричной полосковой линии передачи. Параметры линии:  $b = 6$  мм,  $t = 0,05$  мм,  $d = 1$  мм,  $s = 2,4$ ,  $\text{tg } \delta_3 = 7 \cdot 10^{-4}$ . Линия выполнена из меди. Частота поля 0,1—10 ГГц.

*Ответ:* график зависимости  $\Delta(f)$  для симметричной полосковой линии передачи приведен на рис. 9.15.

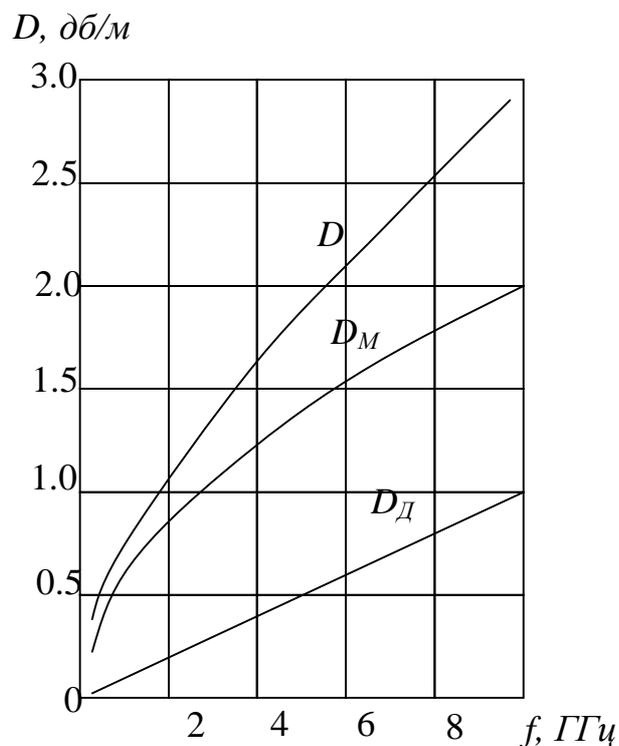


Рис. 9.15