ЛЕКЦИЯ №6 «ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ВОЛНАМИ ТИПА Т»

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 ($\omega_{\text{крТ}} = 0$), 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

$$h = \beta = \omega\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}\,, \tag{9.1}$$

откуда

$$v_{\text{ф}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}\,, \tag{9.2}$$

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda\,. \tag{9.3}$$

Здесь λ — длина однородной плоской волны в заполняющем диэлектрике с параметрами ε_a и μ_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:

$$Z_{cT} = Z_c = \sqrt{\mu_a / \varepsilon_a}\,. \tag{9.4}$$

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

$$\nabla_\perp^2 E_0 = 0\,, \nabla_\perp^2 H_0 = 0\,. \tag{9.5}$$

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

$$\dot{E} = E_0 e^{-j\gamma z}\,, \dot{H} = H_0 e^{-j\gamma z}\,, \tag{9.6}$$

где $\gamma = \beta - j\alpha$ — 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):

$$\dot{U} = \int_{L(P,Q)} \dot{E} dl \, , \qquad (9.7)$$

не зависящую от выбора пути интегрирования L в поперечной плоскости. Ток вдоль проводников:

$$\dot{I} = \int_l \dot{\eta}_э dl \, , \qquad (9.8)$$

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

Линии передачи с волной типа Т характеризуются волновым сопротивлением $Z_В$, 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:

$$ZB{=}L1/C1 \, . \qquad (9.9)$$

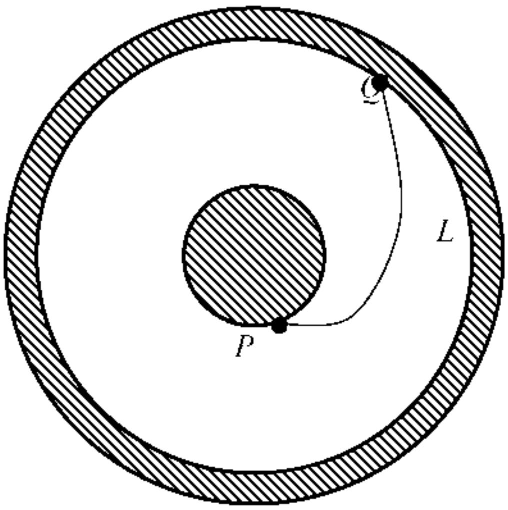

Рис. 9.1

Фазовая скорость в линии передачи с волной типа Т

$$v_ф = \frac{1}{\sqrt{L_1/C_1}} . \qquad (9.10)$$

Мощность, переносимая волной по линии передачи,

$$P = \frac{1}{2} \int_S Re \left| \dot{E} \breve{\tilde{H}} \right| dS \qquad (9.11)$$

или

$$P = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon_a}{\mu_a}} \int_S \left| \dot{E} \right|^2 dS \, , \qquad (9.12)$$

где интегрирование ведется по поперечному сечению линии.

Коэффициент ослабления α волны в линии передачи складывается из коэффициента α_∂, учитывающего потери в диэлектрике, и коэффициента $\alpha_м$, описывающего потери в металле:

$$\alpha = \alpha_\partial + \alpha_м \, , м^{-1}, \qquad (9.13)$$

здесь

$$\alpha_\partial = \frac{1}{2} \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} \mathrm{tg}\, \delta_э \, , \qquad (9.14)$$

$$\alpha_м = \frac{1}{2} \frac{R_S \int_l |\dot{H}_\tau|^2 dl}{\int_S Re \left| \dot{E} \breve{\tilde{H}} \right| dS} , \qquad (9.15)$$

где R_s — поверхностное сопротивление металла.

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

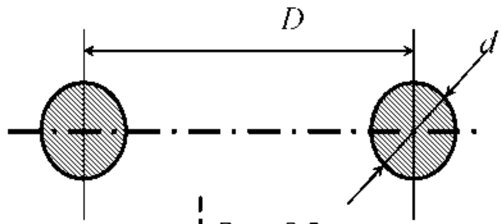

Рис. 9.2

Двухпроводные линии передачи

Двухпроводная линия образована системой из двух параллельных проводников, окруженных однородным веществом с параметрами ε_a и μ_a.

На рис. 9.2 показана симметричная двухпроводная линия передачи из одинаковых проводников круглого сечения.

Рассмотрим основные расчетные соотношения для этой линии.

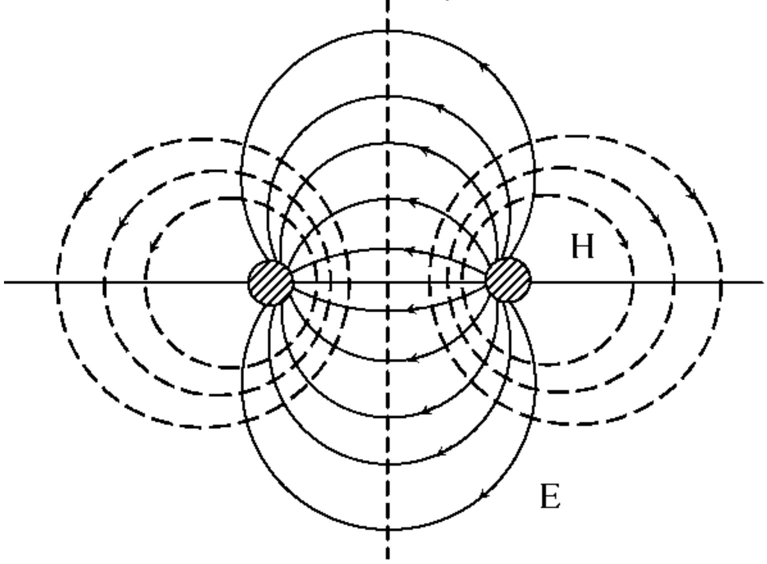

Рис. 9.3

Комплексные амплитуды тока I и напряжения U для бесконечной линии без потерь:

$$\dot{I} = Ie^{-j\beta z},$$

$$\dot{U} = Ue^{-j\beta z}. \tag{9.16}$$

Погонные параметры двухпроводной линии передачи

$$L_1 \approx \frac{\mu_a}{\pi}\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right), \text{Гн/м}, \tag{9.17}$$

$$C_1 \approx \pi\varepsilon_a \frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}, \text{Ф/м}, \tag{9.18}$$

Волновое сопротивление

$$Z_\text{в} \approx 120\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right), \text{Ом}. \tag{9.19}$$

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

$$P = \frac{U^2}{2Z_\text{в}} = \frac{U^2}{240}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\frac{1}{\ln\left(\frac{2D-d}{d}\right)}, \text{Вт}. \tag{9.20}$$

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 $E_{пред}$, которое и определяет предельную переносимую мощность.

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

$$\alpha_{м} = \frac{R_S}{\pi d Z_{в}\sqrt{1-(d/D)^2}} \text{ , м}^{-1} . \quad (9.22)$$

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 ε_a и μ_a (рис. 9.4).

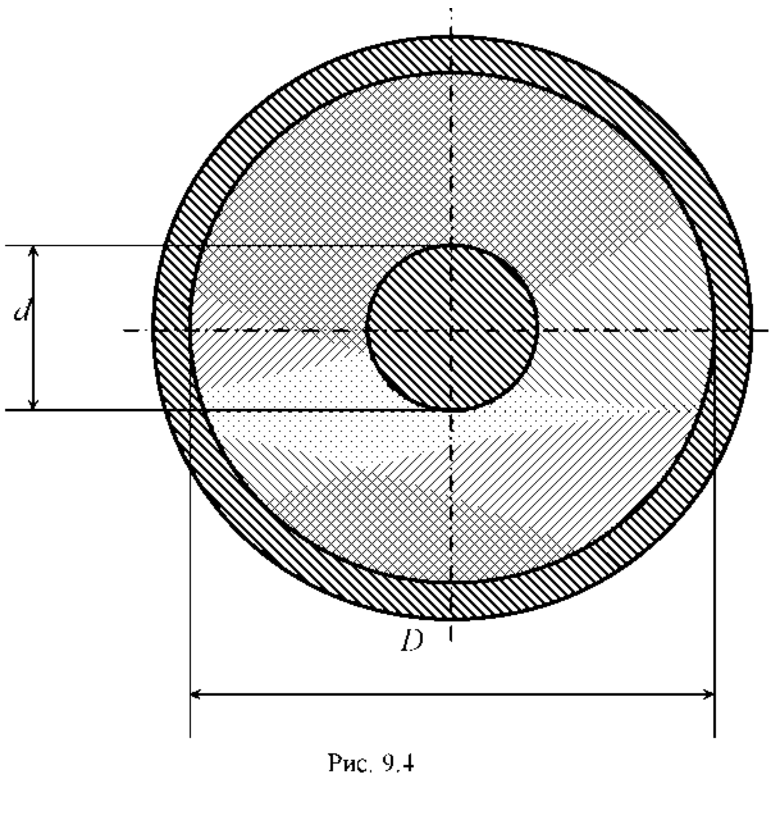

Рис. 9.4

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

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

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

Для линии без потерь

$$Z_{cT} = \sqrt{\mu_a/\varepsilon_a} = 120\pi\sqrt{\mu/\varepsilon}\,, \text{Ом} \qquad (9.24)$$

Погонные параметры коаксиальной линии передачи:

$$L_1 = \frac{\mu_a}{2\pi}\ln(D/d)\,, \text{Гн/м}\,, \qquad (9.25)$$

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon_a}{\ln(D/d)}, \text{Ф/м}\,, \qquad (9.26)$$

Волновое сопротивление коаксиальной линии передачи

$$Z_{\text{в}} = 60\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\ln(D/d) = 138\lg(D/d)\,, \text{Ом}\,. \qquad (9.27)$$

Переносимая .мощность

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

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

Выражение (9.28) можно представить в виде

$$P = \frac{E_{max}^2 d^2}{480}\sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\ln\left(\frac{D}{d}\right), \text{Вт}. \qquad (9.30)$$

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

$$\alpha_{\text{м}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}}\frac{R_{S_1}/d + R_{S_2}/D}{120\pi\ln(D/d)}\,, \text{м}^{-1}\,. \qquad (9.31)$$

где R_{S_1} и R_{S_2} — 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

$$\omega \le \frac{4}{\sqrt{\mu_a\varepsilon_a}(d+D)}\,. \qquad (9.32)$$

Полосковые линии передачи

В технике СВЧ широко применяют направляющие системы, называемые полосковыми линиями

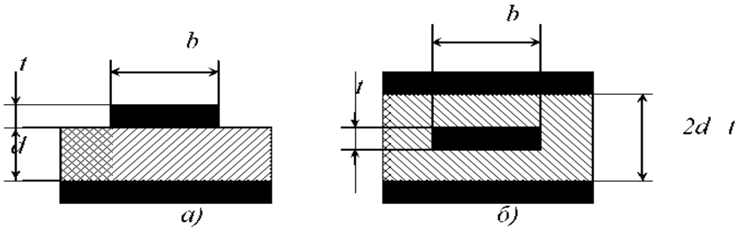

Рис. 9.5

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.

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 сосредоточиваются 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.

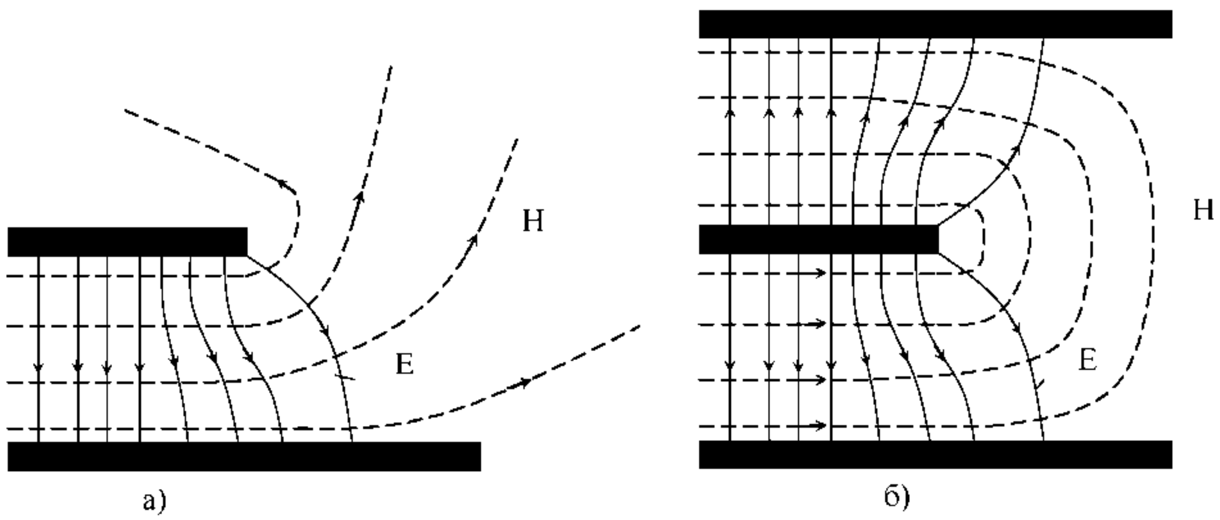

Рис. 9.6

Погонные емкости (Ф/м) рассчитывают по формулам:

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

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

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

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

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

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

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

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

Волновые сопротивления с учетом толщины токонесущего проводника *t* рассчитывают по формулам:

для несимметричной линии передачи

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{314}{1 + b/d}, (b/d < 2), \quad (9.39)$$

$$Z_{\text{в}} = 314 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{1 + \frac{b}{d}\left(\frac{1}{1 - t/d} \right)}, (b/d > 2), \quad (9.40)$$

для симметричной линии передачи

$$Z_{\text{в}} = 216 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1 - t/d}{1 + b/d}, (b/d < 2), \quad (9.41)$$

$$Z_{\text{в}} = 216 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{1 + \frac{b}{d}\left(\frac{1}{1 - t/d} \right)}, (b/d > 2), \quad (9.42)$$

Волновые сопротивления без учета толщины проводника определяются соотношениями:

для несимметричной линии передачи

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{314}{1 + b/d}, \quad (9.43)$$

для симметричной линии передачи

$$Z_{\text{в}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{216}{1 + b/d}. \quad (9.44)$$

Передаваемая мощность в несимметричной полосковой линии передачи

$$P = 8{,}44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 d^2 \ln \frac{r_{\text{В}}}{r_A}, \text{Вт}, \quad (9.45)$$

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

$$\ln \frac{r_{\text{В}}}{r_A} \approx r_{\text{В}}, \quad (9.46)$$

в результате чего она упрощается:

$$P = 8{,}44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 d^2 r_{\text{В}}, \text{Вт}. \quad (9.47)$$

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:

$$E_{max} = 2E_0 / k_H \, , \tag{9.48}$$

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

Для несимметричной полосковой линии передачи

$$k_H \approx 2\sqrt{2\frac{t}{d}} + 4\frac{t}{d}. \tag{9.49}$$

При малых значениях *t/d*

$$k_H \approx 2\sqrt{2\frac{t}{d}}. \tag{9.50}$$

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

$$P_{пред} = 8{,}44 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{пред}^2 d^2 r_{В} \frac{k_H}{4} \text{ , Вт} . \tag{9.51}$$

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

$$P_{пред} = 16{,}88 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{пред}^2 d^2 r_{В} \frac{t}{d} \text{ , Вт} . \tag{9.52}$$

Передаваемая мощность в симметричной полосковой линии передачи

$$P = \frac{1}{60\pi^2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_0^2 d^2 k_c^2 \ln\left(\frac{1+r_c}{1-r_c}\right), \tag{9.53}$$

где

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

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	0,9996	0,9999	0,99999	0,999999

Если геометрические размеры удовлетворяют неравенствам t/d < 0.3; b/d > 1, то выражение (9.53) можно преобразовать к виду

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

Предельная мощность в симметричной полосковой линии передачи

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

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

$$\alpha_{\text{м}} = \frac{R_S}{120\pi d} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \left|\frac{\ln(r_A k_H/2)}{\ln(r_B/r_A)}\right|. \quad (9.57)$$

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, $b/d > 1$),

$$\alpha_{\text{м}} = \frac{R_S}{120\pi d} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{7 - 50t/d + b/d}{3.2(0.1 + t/d)(4 + d/b)}. \quad (9.58)$$

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).