РАСЧЕТ ПЛАВНОГО МНОГОВОЛНОВОГО ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДНОГО ПЕРЕХОДА

В. В. Должиков

На практике в тех случаях, когда необходимо пропустить большую мощность или иметь широкую полосу пропускания, часто используют волноводы с размерами, допускающими распространение высших типов волн [1]. Поскольку такие волноводы в начале и конце тракта соединяются со стандартными волноводами, то на волноводные переходы должно быть наложено условие обеспечения малых потерь основной волны

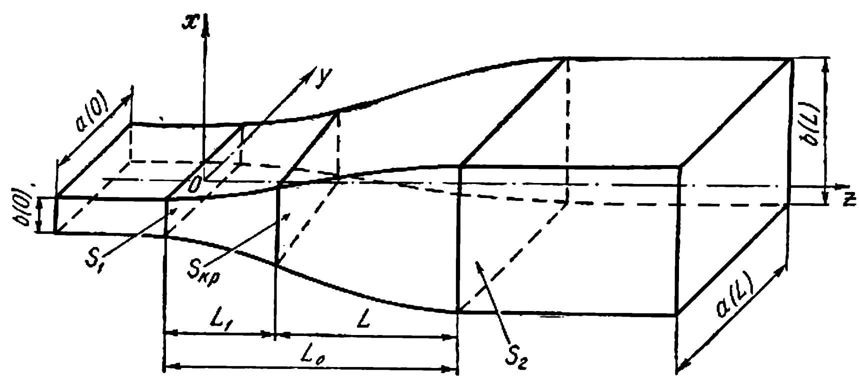

Рис. 1. Плавный волноводный переход.

на преобразование в высшие типы волн. В работе [2] предложен плавный волноводный многоволновый переход, обеспечивающий минимальные потери основной волны на преобразование в ближайшие паразитные типы волн. Однако его расчет осуществлялся в предположении, что размеры обоих волноводов далеки от критических для паразитных волн, а это не всегда бывает на практике.

В настоящей работе получен плавный волноводный переход, соединяющий два прямоугольных волновода с подобными сечениями. Расчет производился с учетом близости критического сечения для ближайшей паразитной волны.

Пусть необходимо осуществить переход между двумя прямоугольными волноводами с подобными сечениями S_1 и S_2. Вдоль оси z распространяется основная волна H_{10}. Размеры правого волновода допускают распространение ближайших паразитных волн, которыми в этом случае, согласно [3], будут E_{12}, H_{12}. Предположим, что $S_{кр}$ есть критическое сечение для этих паразитных волн. Таким образом, весь переход можно разделить на две части. Первая между S_1 и $S_{кр}$, здесь основные потери будут за счет отражения основной волны, на втором участке $S_{кр}$ — S_2 основную роль будут играть потери на преобразование в H_{12}, E_{12}. Поэтому целесообразно рассчитывать первую часть из соображений получения минимального коэффициента отражения ρ, а вторую — из обеспечения минимальных потерь основной волны на преобразование в H_{12}, E_{12}, т. е. вторая часть всего перехода будет многоволновым переходом. Расчету подобного волноводного перехода, т. е. перехода, соединяющего два волновода с сечениями S_0 и S_2, из которых S_0 близко к критическому сечению, и посвящена данная работа.

Необходимо рассчитать переход между S_0, близким к $S_{кр}$ и S_2, который обеспечил бы минимальные потери основной волны на преобразование в ближайшие паразитные волны H_{12}, E_{12}. В этой работе потребуем минимума потерь на преобразование в H_{12}.

Выражение для приведенной амплитуды волны H_{12}, согласно [3], можно записать следующим образом:

$$P_j = -\frac{\delta}{\sqrt{2(\delta^2+4)}} \int\limits_{L_1}^{L_0} \sqrt{\frac{h_j(z)}{h_m(z)}} \frac{1}{b} \frac{db}{dz} e^{-i\int\limits_{L_1}^{z}(h_m-h_j)dz} dz, \tag{1}$$

где h_m и h_j — постоянные распространения волн — H_{10} и H_{12} в волноводе. Введя новую переменную

$$\xi = \frac{\int\limits_{L_1}^{z}(h_m-h_j)\,dz}{\int\limits_{L_1}^{L_0}(h_m-h_j)\,dz} = \frac{1}{\delta}\int\limits_{L_1}^{z}(h_m-h_j)\,dz, \tag{2}$$

а также, обозначив

$$-\frac{1}{b}\frac{db}{d\xi}\sqrt{\frac{h_j(\xi)}{h_m(\xi)}} = \frac{dF}{d\xi}, \tag{3}$$

получим для амплитуды следующую формулу:

$$P_j = \frac{\sigma}{\sqrt{2\sigma^2+4}}\int\limits_0^1 \frac{dF}{d\xi} e^{-i\sigma\xi}\,d\xi. \tag{4}$$

Поскольку F есть функция относительно образующих, то, чтобы рассчитать переход, очевидно, надо найти $F\cdot(\zeta)$, обеспечивающую минимальное значение $|P_j|$, т. е. необходимо определить вид $F(\xi)$, которая обеспечит $|P_j|$ меньше $|P_j|_{\max}$, любого наперед заданного, при $\sigma \leqslant \sigma_{\min}$. В качестве такой функции берем функцию, полученную в [4]. При этом $|P_j| \leqslant 0{,}03$, а $\sigma_{\min} = 2{,}7\pi$;

$$F = F(0)\left[1 + (q-1)\left(\xi - \frac{0{,}58}{2\pi}\sin 2\pi\xi - \frac{0{,}03}{4\pi}\sin 4\pi\xi\right)\right]. \tag{5}$$

С другой стороны, из (3) видно, что

$$\frac{dF}{db} = -\frac{1}{b}\sqrt{\frac{h_j}{h_m}},$$

тогда
$$2F(0)\left[1+(q-1)\left(\xi-\frac{0.58}{2\pi}\sin 2\pi\xi-\frac{0{,}03}{4\pi}\sin 4\pi\xi\right)\right]=$$
$$=\sqrt[4]{1+\frac{4}{\sigma^2}}\ln\frac{\sqrt[4]{1+\frac{4}{\delta^2}}+t}{\sqrt[4]{1+\frac{4}{\delta^2}}-t}-\ln\frac{1+t}{1-t}+2\,\mathrm{arctg}\frac{t}{\sqrt[4]{1+\frac{4}{\delta^2}}}-2\,\mathrm{arctg}\,t. \qquad (6)$$

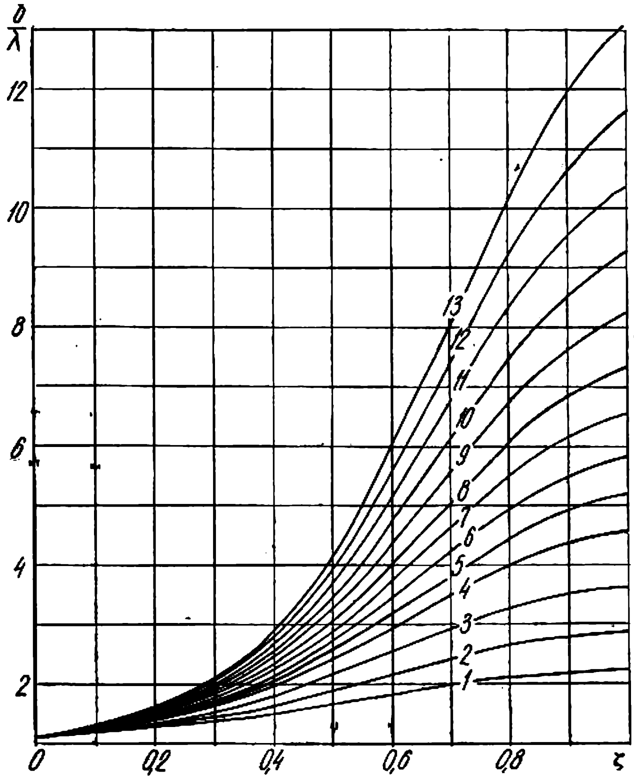

Рис. 2. Зависимость b от ζ при $b(0)=1{,}05\lambda$, $\delta=0{,}5$. Кривые *1, 2, 3 . . . 14* для $q=1{,}53$; 1,84; 2,2; 2,6; 3,1; 3,7; 4,3; 5,1; 6,0; 7,1; 8,4; 9,9; 11,6; 13,7; 16,2.

Это выражение в неявной форме определяет требуемую образующую как функцию ξ, где
$$t=\sqrt[4]{1-\frac{4}{4b^2-\delta^2}}.$$

Из (2) получаем связь между z/L и ξ, а также между L и σ:
$$\frac{z}{L}=\frac{\int\limits_0^{\xi}\left[\sqrt{1-\frac{\delta^2}{4b^2(\xi)}}+\sqrt{1-\frac{4+\delta^2}{4b^2(\xi)}}\right]b^2(\xi)\,d\xi}{\int\limits_0^{1}\left[\sqrt{1-\frac{\delta^2}{4b^2(\xi)}}+\sqrt{1-\frac{4+\delta^2}{4b^2(\xi)}}\right]b^2(\xi)\,d\xi}; \qquad (7)$$

$$L=\frac{\sigma_{\min}}{2\pi}\int\limits_0^1\left[\sqrt{1-\frac{\delta^2}{4b^2(\xi)}}-\sqrt{1-\frac{4+\delta^2}{4b^2(\xi)}}\right]b^2(\xi)\,d\xi. \quad \delta=\frac{b}{a}=\mathrm{const}. \qquad (8)$$

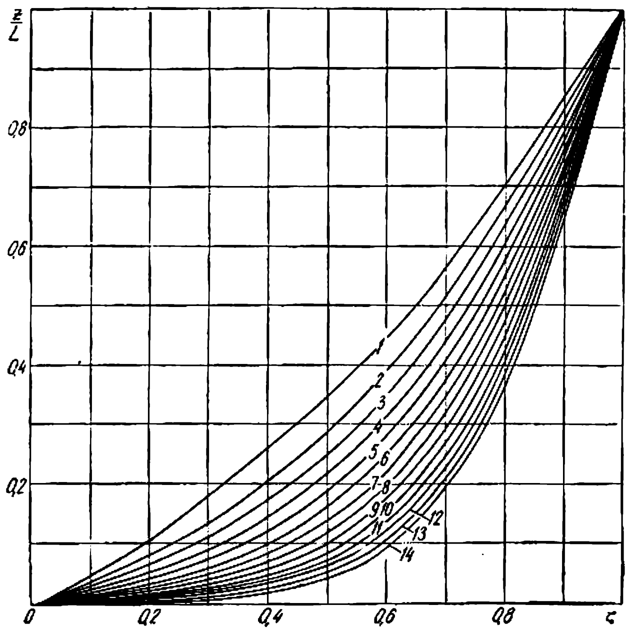

Рис. 3. Зависимость $\frac{z}{L}$ от ς, $\delta = 0{,}5$.
Кривые *1*, *2*, *3*... *14* для $q = 1{,}53$; 1,84; 2,2; 2,6; 3,1; 3,7; 4,3; 5,1; 6,0; 7,1; 8,4; 9,9; 11,6; 13,7; 16,2.

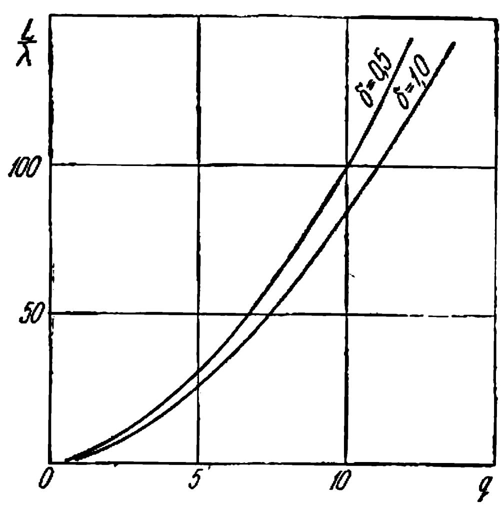

Рис. 4. Зависимость L от q, $\delta = 0{,}5$; 1,0.

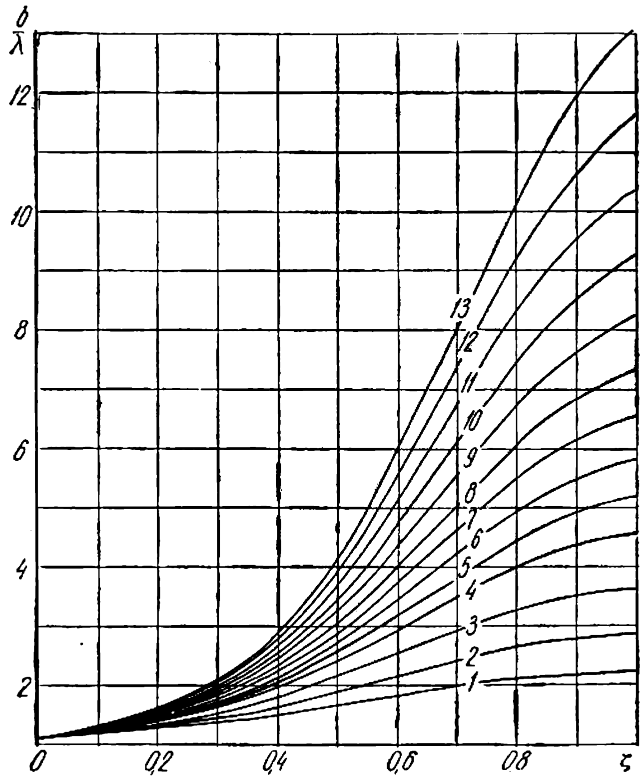

Рис. 5. Зависимость b от ζ при $b(0) = 1{,}15\lambda$, $\delta = 1{,}0$. Кривые *1, 2, 3... 15* для $q = 1{,}17$; 1,53; 1,94; 2,5; 3,2; 4,0; 4,5; 5,1; 5,7; 6,4; 7,2; 8,1; 9,1; 10,2; 11,4.

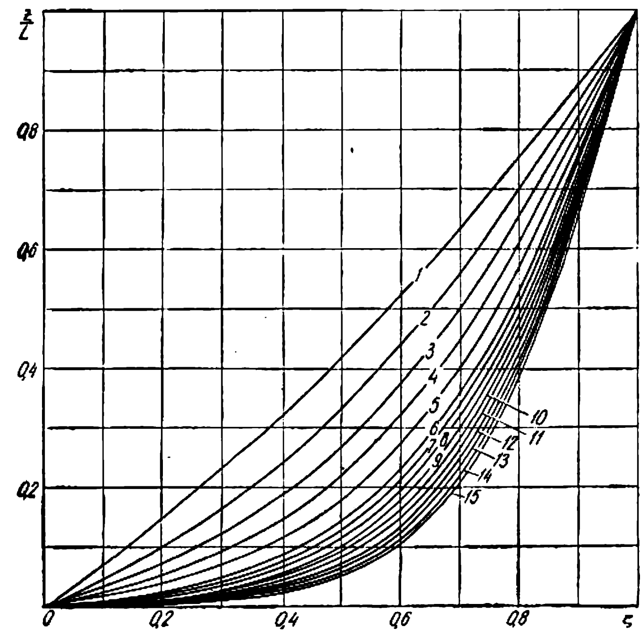

Рис. 6. Зависимость $\frac{z}{L}$ от ζ, $\delta = 1{,}0$.

Кривые *1, 2, 3... 15* для $q = 1{,}17$; 1,53; 1,94; 2,5; 3,2; 4,0; 4,5; 5,1; 5,7; 6,4; 7,2; 8,1; 9,1; 10,2; 11,4.

Таким образом, формулы (6), (7) и (8) позволяют построить образующие плавного многоволнового перехода, обеспечивающего $|P_l| \leqslant 0{,}03$ для $\sigma \geqslant 2{,}7\pi$, и найти его длину.

По формулам (6), (7) к (8) были рассчитаны семейства кривых зависимостей $b = f(\xi)$, $\frac{Z}{L} = f(\xi)$ и $L = f(q)$, позволяющих рассчитать геометрию плавного многоволнового волноводного перехода для большинства практически важных случаев.

На конкретном примере покажем методику расчета геометрии плавного многоволнового волноводного перехода с использованием кривых, приведенных на рисунках 2, 3, 4, 5, 6.

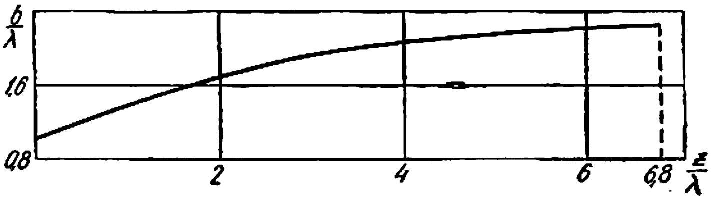

Рис. 7.

Необходимо рассчитать плавный многоволновый переход, обеспечивающий минимальные потери основной волны H_{10} на преобразование в паразитную волну H_{12}. Размеры сечения $S_0 - 2{,}1\lambda \times 1{,}05\lambda$, а сечения $S_2 - 4{,}62\lambda \times 2{,}31\lambda$. Исходя из заданных размеров определяем $q = 2{,}2$. Из семейства кривых на рис. 2 выбираем кривую $b(\zeta)$, соответствующую данному значению q (если такой кривой нет, то легко видеть, что она может быть построена с помощью кривых для $q > 2{,}2$ и $q < 2{,}2$). Из рис. 3 аналогичным образом находим кривую зависимости для $\frac{z}{L}$ от ζ. Обе кривые позволяют построить $b = f\left(\frac{z}{L}\right)$. И, наконец, из рис. 4 находим длину L, соответствующую нашему $q = 2{,}2$, после чего не представляет труда получить зависимость b от z. Вид образующей для рассчитанного перехода показан на рис. 7.

ЛИТЕРАТУРА

1. Loredo. Low-loss Transmission in Rastangular waveguid, Brit, Communs and Electron. 1962, 9, 10, 738.
2. А. И. Терещенко, В. В. Должиков. Изв. вузов — «Радиотехника», 1965 8, 1, 48,.
3. Б. З. Каценеленбаум, Теория нерегулярных волноводов, М., Изд-во АН СССР, 1961.