К РАСЧЕТУ ПЛАВНЫХ МНОГОВОЛНОВЫХ ВОЛНОВОДНЫХ ПЕРЕХОДОВ

II

В. В. Должиков, А. И. Терещенко, И. И. Шумлянский

Харьков

При проектировании волноводных трактов, рассчитанных на большие мощности, в качестве согласующих элементов наиболее целесообразно использовать плавные волноводные переходы, поскольку применение локальных настроечных элементов типа штырей, диафрагм и т. д. может привести к возникновению перенапряжений и пробоев.

Так как для передачи большой мощности часто используют волноводы с размерами, допускающими распространение высших типов волн, то одним из основных требований, предъявляемых к плавным волноводным переходам, является обеспечение минимальных потерь основной волны на преобразование в высшие типы волн.

Пусть волноводный переход соединяет два прямоугольных волновода с сечениями S_1 и S_2 ($S_2 > S_1$). Вдоль оси z распространяется основная волна типа H_{10} единичной амплитуды. Размеры сечений соединяемых волноводов допускают существование ближайших высших типов волн.

Необходимо найти форму и длину плавного волноводного перехода, который обеспечивал бы минимальные потери волны H_{10} на преобразование в ближайшие высшие типы волн.

Если потери на стенках волноводного перехода отсутствуют, то очевидно, что мощность основной волны в конце перехода можно записать в виде

$$|P_m|^2 = 1 - \sum_j |P_j|^2,$$

где P_m — амплитуда основной волны;

P_j — амплитуда j-ой паразитной волны.

Амплитуда любой паразитной волны может быть записана следующим образом:

$$P_j = A \int_0^1 f'(\xi_j)\, e^{-i\sigma_j \xi_j}\, d\xi_j, \tag{1}$$

где

$$\xi_j = \frac{\int_0^z (h_m - h_j)\, dz}{\int_0^L (h_m - h_j)\, dz} = \frac{1}{\sigma_j} \int_0^z (h_m - h_j)\, dz; \tag{2}$$

$$f'(\xi) = \sqrt{\frac{h_j(\xi)}{h_m(\xi)}}\, S_{jm}(\xi) \sqrt{\frac{h_m(0)}{h_j(0)}} \tag{3}$$

S_{jm} — коэффициент связи основной волны m с паразитной j;
h_m и h_j — постоянные распространения основной m и паразитной j волн соответственно;
A — постоянный коэффициент.

Относительно введенных переменных ξ и σ можно заметить, что ξ пропорционально $\frac{z}{L}$, а $\sigma \sim L$. Кроме того, $f'(\xi)$ в конечном счете выражается через образующие перехода. Таким образом, чтобы обеспечить минимальные потери основной волны на преобразование в высшие типы волн, необходимо так задать функцию $f(\xi)$, чтобы выполнялось условие $|P_j| \leqslant |P_j|_{\max}$ любого наперед заданного, при всех $\sigma \geqslant \sigma_{\min}$. В качестве $f(\xi)$ возьмем функцию следующего вида:

$$f(\xi) = f(0)\left[1 + (q-1)\left(\xi + \frac{b_1}{2\pi}\sin 2\pi\xi + \frac{b_2}{4\pi}\sin 4\pi\xi\right)\right], \tag{4}$$

где $q = \frac{f(1)}{f(0)}$, а b_1 и b_2 приведены в табл. 1 для соответствующих $|P_j|_{\max}$. Функция вида (4) используется в работе [1]; она позволяет получить переходы, практически одинаковые по своим параметрам и размерам с плавным чебышевским переходом. Из (3) и (4) получим следующее уравнение для определения образующих:

$$\int f'(\xi)\,d\xi = f(0)\left[1 + (q-1)\left(\xi + \frac{b_1}{2\pi}\sin 2\pi\xi + \frac{b_2}{4\pi}\sin 4\pi\xi\right)\right]. \tag{5}$$

Рассчитаем форму плавных многоволновых волноводных переходов для тех случаев, когда соединяемые волноводы имеют подобные сечения или различаются размерами в плоскости H.

1. В том случае, когда S и S_2 — подобные сечения, основные потери происходят за счет преобразования в ближайшие высшие типы волн H_{30}; H_{12}; E_{12}. Амплитуды этих волн, согласно [3], записываются следующим образом:

$$P_{H_{30}} = -\frac{3}{4}\int_0^1 \frac{d\ln a}{d\xi_1} e^{-i\sigma_1\xi_1} d\xi_1;$$

$$P_{H_{12}} = -\frac{\delta}{\sqrt{2}\sqrt{1+\frac{\delta^2}{4}}}\int_0^1 \frac{d\ln a}{d\xi_2} e^{-i\sigma_2\xi_2} d\xi_2;$$

$$P_{E_{12}} = \frac{1}{\sqrt{2}\sqrt{1+\frac{\delta^2}{4}}}\int_0^1 \frac{d\ln a}{d\xi_2} e^{-i\sigma_2\xi_2} d\xi_2,$$

где ξ_1, ξ_2 и σ_1, σ_2 определяются выражением (2), $\delta = \frac{b}{a} = \text{const}$, а a и b — размеры широкой и узкой стенок волновода. При этом функции $f(\xi)$ имеют вид

$$f_1(\xi_1) = \ln a(\xi_1); \quad f_2(\xi_2) = \ln a(\xi_2).$$

Подставляя найденные выражения для $f(\xi)$ в уравнение (5), найдем образующие перехода:

$$a_1(\xi_1) = e^{\ln a(0)\left[1+(q-1)\left(\xi_1+\frac{b_1}{2\pi}\sin 2\pi\xi_1+\frac{b_2}{4\pi}\sin 4\pi\xi_1\right)\right]}, \quad (6а)$$

$$a_2(\xi_2) = e^{\ln a(0)\left[1+(q-1)\left(\xi_2+\frac{b_1}{2\pi}\sin 2\pi\xi_2+\frac{b_2}{4\pi}\sin 4\pi\xi_2\right)\right]}, \quad (6б)$$

где

$$q = \frac{\ln a(L)}{\ln a(0)}.$$

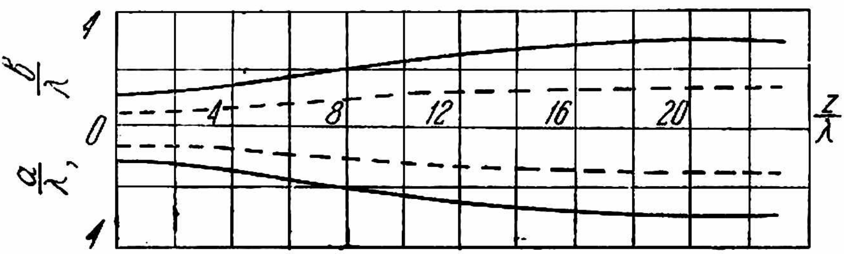

Рис. 1.

Образующие, определяемые выражением (6а), обеспечат минимум амплитуды волны H_{30}, а (6б) — минимум волн H_{12} и E_{12}. Длина перехода L, а также связь между ξ и $\frac{z}{L}$ определяются из выражения (2):

$$L_1 = \frac{\sigma_{\min}}{8\pi^2}\,\frac{e^{2\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}{\ln\frac{a(L)}{a(0)}}\,a^2(0)\,I_0(r); \quad (7а)$$

$$L_2 = \frac{\gamma^2\sigma_{\min}}{4\pi^2}\cdot\frac{e^{2\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}{\ln\frac{a(L)}{a(0)}}\,a^2(0)\,I_0(r); \quad (7б)$$

$$\frac{z}{L_1} = \frac{e^{2\xi_1\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}{e^{2\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}; \quad (8а)$$

$$\frac{z}{L_2} = \frac{e^{2\xi_2\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}{e^{2\ln\frac{a(L)}{a(0)}}-1}, \quad (8б)$$

где $I_0(r)$ — функция Бесселя от мнимого аргумента, $r = \frac{b_1\ln\frac{a(L)}{a(0)}}{\pi}$, а $\sigma_{\min}$, b_1 и b_2, выбираем из табл. 1 для соответствующих $|P_j|_{\max}$.

Таблица 1

$\left\|\frac{P_l}{l_1 - l_0}\right\|_{max}$	0,03	0,02	0,01	0,005
b_1	−0,58	−0,67	−0,795	−0,885
b_2	−0,03	−0,04	−0,02	−0,000
$\frac{\sigma_{min}}{\pi}$	2,8	3,04	3,5	5,18

Из (8*а*) и (8*б*) видно, что зависимости $\frac{z}{L_1}$ и $\frac{z}{L_2}$ от ξ_1 и ξ_2 одинаковы; более того, согласно (6*а*) и (6*б*), $a\left(\frac{z}{L_1}\right)$ и $a\left(\frac{z}{L_2}\right)$ также одинаковы. Следовательно, если положить $L_1 = L_2 = L$, то переход, форма которого даст минимальную амплитуду волны H_{30}, обеспечит также и минимальные амплитуды волн H_{12} и E_{12}.

Таким образом, (6*а*), (8*а*), (7*а*) или (7*б*) позволяют рассчитать переход, форма которого обеспечит минимальные амплитуды одновременно трех указанных типов волн.

Следует заметить, что в качестве L при $\delta < \frac{1}{\sqrt{2}}$ необходимо брать величину, определяемую (7*а*), а при $\delta > \frac{1}{\sqrt{2}}$ — (7*б*). На рисунке показана форма плавного многоволнового волноводного перехода между волноводами с сечениями $S_1 = 1{,}05\lambda \cdot 2{,}0\lambda$ и $S_2 = 2{,}86\lambda \cdot 5{,}76\lambda$, построенная с помощью полученных формул. Переход имеет длину 23λ, при этом амплитуды волн H_{30}, H_{12} и E_{12} не больше чем 0,03.

Как частный случай может быть рассмотрен переход между волноводами с различными размерами сечений в плоскости H. Ближайшей паразитной волной здесь является волна типа H_{30}, и форма перехода описывается выражениями (6*а*), (7*а*) и (8*а*).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Терещенко, В. В. Должиков. Плавные волноводные переходы с минимальным коэффициентом отражения. Труды XXII Всесоюзной сессии НТОРиЭ им. А. С. Попова, М., 1966, стр. 3.

2. В. В. Должиков. Расчет плавного многоволнового прямоугольного волноводного перехода. Сб. «Радиотехника», вып. 3, Изд-во ХГУ, Харьков, 1966.

3. Б. З. Каценеленбаум. «Теория нерегулярных волноводов», Изд-во АН СССР, 1961.