

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДОВ, СВЯЗАННЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫМИ ЩЕЛЯМИ

В. К. Пироженко

Харьков

Связанные волноводные системы получили широкое распространение в технике СВЧ. Они применяются в качестве направленных ответвителей, преобразователей и фильтров типов волн и т. д.

Наиболее удобным для расчета характеристик подобных систем является метод связанных волн [1—6]. Однако в большинстве работ анализируются общие свойства связанных линий передачи в предположении известных коэффициентов связи [1—3], либо коэффициенты связи определяются через параметры эквивалентной схемы [4], вычисление которых во многих случаях затруднительно. В работе [5] приводятся выражения для коэффициентов связи в прямоугольных волноводах, связанных через различные последовательности эллиптических щелей. Для щелей другой конфигурации определение коэффициентов связи производится различными методами, в том числе и экспериментальными, которые часто применимы только к конкретным рассматриваемым системам.

Как следует из сказанного выше, основной сложностью при использовании метода связанных волн является определение коэффициентов связи, знание которых позволяет довольно легко и быстро рассчитывать как фазовые, так и амплитудные зависимости полей в рассматриваемых структурах.

В данной статье, основываясь на результатах работ [3, 6, 7], получены выражения для коэффициентов связи в некоторых типах регулярных волноводов, связанных различными прямоугольными щелями. Эти выражения позволяют рассчитать постоянные распространения, а также некоторые амплитудные соотношения в рассматриваемых структурах.

Результаты теоретического анализа проиллюстрированы численными примерами.

Фазовые зависимости полей в волноводных системах определяются постоянными распространения, которые для обоих основ-

ных типов волн в двух связанных объемных линиях равны [3, 6]:

$$\gamma_{1,2} = \left[\frac{\beta_1^2 + \beta_2^2}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\beta_1^2 - \beta_2^2)^2 + 4k_{12}^2 k_{21}^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Здесь

$$\beta_{1,2}^2 = \alpha_{1,2}^2 + k_{11,22}^2 \quad (2)$$

$\alpha_{1,2}$ — постоянные распространения в первом или втором из связанных волноводов; k_{11} , k_{22} , k_{12} и k_{21} — коэффициенты связи определяемые по формулам работ [6, 7] для связанных через щели в общих стенках волноводов:

$$\begin{aligned} k_{11}^2 &= -j\omega\mu\sigma_{e12}^{(1)}; & k_{22}^2 &= -j\omega\mu\sigma_{e21}^{(2)}; \\ k_{12}^2 &= -j\omega\mu\sigma_{e12}^{(2)}; & k_{21}^2 &= -j\omega\mu\sigma_{e21}^{(1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

В выражениях (3) σ_e представляют собой некоторые эквивалентные проводимости [6]

$$\begin{aligned} \sigma_{epq}^{(p)} &= \left| \int_{V_p} \vec{i}_{epq} dv \right|^2 \left\{ \int_{V_p} P_{pq} dv \right\}^{-1}; \\ \sigma_{epq}^{(q)} &= \frac{V_q}{V_q + V_{pq}} \left| \int_{V_q + V_{pq}} \vec{i}_{epq} dv \right|^2 \left\{ \int_{V_q} P_{pq} dv \right\}^{-1}; \\ p, q &= 1, 2; \quad p \neq q. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь V_1 (V_2) является единичным объемом первого (второго) волновода; а V_{12} — соответствующим объемом щели связи. В случае дискретной связи величины $V_{1,2}$ и V_{12} — объемы, приходящиеся на один период структуры. Значения величин \vec{i}_{epq} и P_{pq} ($p, q = 1, 2; p \neq q$) зависят от геометрии исходных волноводов, типа волны в них, а также от конфигурации и расположения щелей связи и определяются по формулам работы [6]. Для двух связанных систем они принимают вид

$$\begin{aligned} \vec{i}_{epq} &= [\vec{n}, \vec{H}'_{pq}] \delta(\xi - \xi_{pq}); \\ P_{pq} &= \int_{S_{pq}} [\vec{E}_{pq}, \vec{H}'_{pq}] \vec{n} ds; \\ p, q &= 1, 2; \quad p \neq q. \end{aligned} \quad (5)$$

В соотношениях (5) \vec{H}'_{12} (\vec{H}'_{21}) представляет собой напряженность магнитного поля в исходном первом (втором) волноводе, а векторы \vec{E}_{12} и \vec{E}_{21} имеют вид

$$\vec{E}_{12,21} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \vec{i}_{e12,21}. \quad (6)$$

Величины ξ — текущие координаты, нормальные к поверхности щелей связи; ξ_{pq} — координата, определяющая границу этой поверхности со стороны p -го волновода. S_{pq} — поверхность щели связи со стороны p -й линии.

Подставляя в соотношения (1)—(6) выражения для полей рассматриваемых типов волн в соответствующих волноводах [8], можно определить искомые постоянные распространения.

В табл. 1—3 приводятся расчетные формулы, полученные для коэффициентов связи k_{11} , k_{22} , k_{12} и k_{21} в системах, состоящих из прямоугольных и круглых волноводов, связанных посредством длинной узкой продольной щели либо через периодически расположенные щели прямоугольного сечения.

Табл. 1 соответствует случаю связи двух прямоугольных волноводов. В ней рассмотрены следующие системы:

1. Прямоугольные волноводы, связанные продольной сплошной щелью, прорезанной в

- а) соприкасающихся широких стенках;
- б) соприкасающихся узких стенках;
- в) комбинированный случай.

2. Прямоугольные волноводы, связанные периодически расположенными щелями прямоугольной формы, прорезанными в

- а) соприкасающихся широких стенках;
- б) соприкасающихся узких стенках;
- в) комбинированный случай.

В комбинированных случаях волновод, у которого щели прорезаны в широкой стенке обозначается линией I , а волновод со щелями в узкой стенке — линией II .

В табл. 2 приведены формулы для двух связанных круглых волноводов:

3. Круглые волноводы, связанные с

- а) продольной сплошной щелью;
- б) периодически расположенными щелями прямоугольной формы.

Табл. 3 соответствует случаю связи круглого и прямоугольного волноводов. Рассматриваются такие структуры:

4. Круглый волновод, связанный с прямоугольным, обращенным к круглому широкой стенкой. Щели имеют следующую конфигурацию:

- а) продольная сплошная щель;
- б) периодически расположенные щели прямоугольной формы.

5. Круглый волновод, связанный с прямоугольным, обращенным к круглому узкой стенкой. Щели имеют следующую конфигурацию:

- а) продольная сплошная щель;
- б) периодически расположенные щели прямоугольной формы.

Круглые волноводы обозначены как линия I , а прямоугольные — линия II .

Таблица 1

Вид системы	Тип волны в линии		Коэффициенты связи			
	I	II	k_{11}^2	k_{22}^2	k_{12}^2	k_{21}^2
1а	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{d}{a_1} B_1 D_1$	$k^2 \frac{d}{a_2} B_2 D_2$	$k^2 \frac{d}{a_2} A_2 B_1 D_1$	$k^2 \frac{d}{a_1} A_1 B_2 D_2$
2а	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} B_2 C_2 E_2$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 B_2 C_2 E_2$
1б	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{d}{b_1}$	$k^2 \frac{d}{b_2}$	$k^2 A_2 \frac{d}{b_2}$	$k^2 A_1 \frac{d}{b_1}$
2б	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{dt}{b_1 l} C_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} C_2$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 C_1$	$k^2 \frac{dt}{b_1 l} A_1 C_2$
1в	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{d}{a_1} B_1 D_1$	$k^2 \frac{d}{b_2}$	$k^2 \frac{d}{b_1} B_1 D_1 A_2$	$k^2 \frac{d}{a_1} A_1$
2в	H_{10}	H_{10}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} C_2$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 C_2$
2а	E_{11}	E_{11}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 F_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} B_2 C_2 F_2$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 B_1 C_1 F_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 B_2 C_2 F_2$
2б	E_{11}	E_{11}	$k^2 \frac{dt}{b_1 l} G_1 C_1 H_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} G_2 C_2 H_2$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 G_1 C_1 H_1$	$k^2 \frac{dt}{b_1 l} A_1 G_2 C_2 H_2$
2в	E_{11}	E_{11}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 F_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} G_2 C_2 H_2$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 B_1 C_1 F_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 G_2 C_2 H_2$
2а	H_{10}	E_{11}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} B_2 C_2 F_2$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 B_2 C_2 F_2$
2в	H_{10}	E_{11}	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} G_2 C_2 H_2$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 B_1 C_1 E_1$	$k^2 \frac{dt}{a_1 l} A_1 G_2 C_2 H_2$

Вид системы	Тип волны		Коэффициенты связи			
	Р линии		k_{11}^2	k_{22}^2	k_{12}^2	k_{21}^2
	I	II				
3а	H_{11}	H_{11}	$k^2 I_1 J_1 K_1$	$k^2 I_2 J_2 K_2$	$k^2 I_2 L_2 J_1 K_1$	$k^2 I_1 L_1 J_2 K_2$
3б	H_{11}	H_{11}	$k^2 \frac{I}{l} I_1 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 C_2 J_2 M_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 L_2 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2 J_2 M_2$
3в	H_{01}	H_{01}	$k^2 I_1$	$k^2 I_2$	$k^2 I_2 L_2$	$k^2 I_1 L_1$
3г	H_{01}	H_{01}	$k^2 \frac{I}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 C_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2$
3д	E_{01}	E_{01}	$k^2 \frac{I}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 C_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 L_2 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2$
3а	H_{01}	H_{11}	$k^2 I_1$	$k^2 I_2 J_2 K_2$	$k^2 I_2 L_2$	$k^2 I_1 L_1 J_2 K_2$
3б	H_{01}	H_{11}	$k^2 \frac{I}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 C_2 J_2 M_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 L_2 C_1$	$k \cdot \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2 J_2 M_2$
3в	E_{01}	H_{11}	$k^2 \frac{I}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 C_2 J_2 M_2$	$k^2 \frac{I}{l} I_2 L_2 C_1$	$k^2 \frac{I}{l} I_1 L_1 C_2 J_2 M_2$

Коэффициенты связи

Вид системы	Тип волны в линии		Коэффициенты связи	
	I	II	k_{11}^2	k_{12}^2
4а	H_{11}	H_{10}	$k^2 I_1 J_1 K_1$	$k^2 \frac{d}{a_2} A_2 J_1 K_1$
4б	H_{11}	H_{10}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 C_1 J_1 M_1$
5а	H_{11}	H_{10}	$k^2 I_1 J_1 K_1$	$k^2 \frac{d}{b_2} A_2 J_1 K_1$
5б	H_{11}	H_{10}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 C_1 J_1 M_1$
4б	H_{11}	E_{11}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 C_1 J_1 M_1$
5б	H_{11}	E_{11}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1 J_1 M_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 C_1 J_1 M_1$
4а	H_{01}	H_{10}	$k^2 I_1$	$k^2 \frac{d}{a_2} A_2$
4б	H_{01}	H_{10}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 C_1$
5а	H_{01}	H_{10}	$k^2 I_1$	$k^2 \frac{d}{b_2} A_2$
5б	H_{01}	H_{10}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 C_1$
4б	E_{01}	H_{10}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 C_1$
4б	E_{01}	E_{11}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{dt}{a_2 l} A_2 C_1$
5б	E_{01}	E_{11}	$k^2 \frac{t}{l} I_1 C_1$	$k^2 \frac{dt}{b_2 l} A_2 C_1$
			$k^2 I_1 L_1 B_2 D_2$	$k^2 I_1 L_1 B_2 D_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 E_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 E_2$
			$k^2 I_1 L_1$	$k^2 I_1 L_1$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 F_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 F_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2 H_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2 H_2$
			$k^2 I_1 L_1 B_2 D_2$	$k^2 I_1 L_1 B_2 D_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 E_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 E_2$
			$k^2 I_1 L_1$	$k^2 I_1 L_1$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 F_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 B_2 C_2 F_2$
			$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2 H_2$	$k^2 \frac{t}{l} I_1 L_1 C_2 H_2$

В таблицах приняты следующие обозначения:

$$A_{1,2} = \frac{a_{1,2}^2 b_{1,2}}{a_{1,2} b_{1,2} + gd}; \quad B_{1,2} = \left(\frac{\sin \frac{\pi d}{2a_{1,2}}}{\frac{\pi d}{2a_{1,2}}} \right)^2;$$

$$C_{1,2} = \left(\frac{\sin \alpha_{1,2} t}{a_{1,2} t} \right)^2; \quad G_{1,2} = \left(\frac{\sin \frac{\pi d}{2b_{1,2}}}{\frac{\pi d}{2b_{1,2}}} \right)^2;$$

$$D_{1,2} = \frac{2 \cos^2 \left[\frac{\pi}{2a_{1,2}} (2h_{1,2} + d) \right]}{1 + \left(\frac{\sin \frac{\pi d}{a_{1,2}}}{\frac{\pi d}{a_{1,2}}} \right) \cos \frac{\pi}{a_{1,2}} (2h_{1,2} + d)};$$

$$E_{1,2} = \frac{2 \left\{ (k^2 - 2\alpha_{1,2}^2) \cos^2 \left[\frac{\pi}{2a_{1,2}} (2h_{1,2} + d) \right] + \alpha_{1,2}^2 \right\}}{(k^2 - 2\alpha_{1,2}^2) \left[1 + \frac{\sin \frac{\pi d}{a_{1,2}}}{\frac{\pi d}{a_{1,2}}} \cos \frac{\pi}{a_{1,2}} (2h_{1,2} + d) \right] + 2\alpha_{1,2}^2};$$

$$F_{1,2} = \frac{2 \sin^2 \left[\frac{\pi}{2a_{1,2}} (2h_{1,2} + d) \right]}{1 - \frac{\sin \frac{\pi d}{a_{1,2}}}{\frac{\pi d}{a_{1,2}}} \cos \frac{\pi}{a_{1,2}} (2h_{1,2} + d)};$$

$$H_{1,2} = \frac{2 \sin^2 \left[\frac{\pi}{2b_{1,2}} (2h_{1,2} + d) \right]}{1 - \frac{\sin \frac{\pi d}{b_{1,2}}}{\frac{\pi d}{b_{1,2}}} \cos \frac{\pi}{b_{1,2}} (2h_{1,2} + d)}; \quad (7)$$

$$I_{1,2} = \frac{d}{\pi R_{1,2}}; \quad J_{1,2} = \left(\frac{\sin \frac{\psi_{1,2}}{2}}{\frac{\psi_{1,2}}{2}} \right)^2;$$

$$L_{1,2} = \frac{\pi R_{1,2}^2}{\pi R_{1,2}^2 + gd};$$

$$K_{1,2} = \frac{2 \cos^2 \left(\theta_{1,2} + \frac{\psi_{1,2}}{2} \right)}{1 + \frac{\sin \psi_{1,2}}{\psi_{1,2}} \cos (2\theta_{1,2} + \psi_{1,2})};$$

$$M_{1,2} = \frac{2 \left\{ N + (1-N) \cos \left(\theta_{1,2} + \frac{\psi_{1,2}}{2} \right) \right\}}{\left\{ [1+N] + [1-N] \frac{\sin \psi_{1,2}}{\psi_{1,2}} \cos (2\theta_{1,2} + \psi_{1,2}) \right\}};$$

$$N = \frac{a_{1,2}^2}{x_{1,2}^4 R_{1,2}^2}.$$

Величины a и b представляют собой соответственно размеры широкой и узкой стенок прямоугольных волноводов; h — расстояние от нижней стенки волновода до щели связи; R — радиус круглых волноводов; ψ — угол раствора щели связи в круглых волноводах; θ — угол между плоскостью, перпендикулярной к электрическим силовым линиям волны H_{11} в круглом волноводе, и плоскостью, проходящей через центр этого волновода и верхний край щели связи; g — глубина, d — ширина; $2t$ — длина щели связи в направлении распространения энергии; $2l$ — расстояние между началами соседних щелей при периодической связи; k — волновое число; α — постоянная распространения рассматриваемого типа волны в исходном (без щелей) волноводе; $x = \frac{2\pi}{\lambda_{кр}}$ для соответствующего типа волны в круглом волноводе, в величине $M_{1,2}$ x берется для волны H_{11} , у которой $\lambda_{кр} = 3,413R$.

Во всех обозначениях индексы I соответствуют линии I , а индексы 2 — линии II .

Как видно из выражений, приведенных в таблицах, коэффициенты связи зависят от геометрии и свойств исходных линий, а также от конфигурации и расположения щелей связи. В полученных формулах учитывается конечная глубина щелей связи (размер g).

Все коэффициенты связи, пропорциональны ширине щели связи d и при ее уменьшении стремятся к нулю, т. е. в выражениях (1) соблюдается переход к изолированным волноводам. То же замечание относится и к длине щели связи $2t$ при дискретной связи систем.

Распределение поля на щели связи, определяемое структурой поля распространяющегося в волноводе типа волны, в коэффициентах связи учитывается множителями D , E , F , H , K и M , величина которых в связи с этим зависит от места расположения щели в волноводе. При уменьшении ширины щели связи ($d \rightarrow 0$ в прямоугольных и $\psi \rightarrow 0$ в круглых волноводах) коэффициенты D , E , F , H , K и M стремятся к единице. С физической точки

времени это объясняется тем, что при уменьшении ширины щели связи поле в пределах последней можно считать однородным.

Следовательно, при малой ширине щелей связи вычисления упрощаются, так как множители D , E , F , H , K и M являются наиболее сложными в выражениях для коэффициентов связи. Однако к замене рассматриваемых множителей единицей нужно подходить осторожно, так как в некоторых случаях при незначительном увеличении ширины щели величина их довольно быстро отходит от единицы. Особенно резко это проявляется при связи

волн типа H_{10} в прямоугольном и H_{11} в круглом волноводах.

Вычисления коэффициентов связи по приведенным формулам не требуют большой затраты времени, так как все зависимости выражены в явном виде и нет необходимости решать какие-либо уравнения. Для вычислений необходимо знать только дисперсионные зависи-

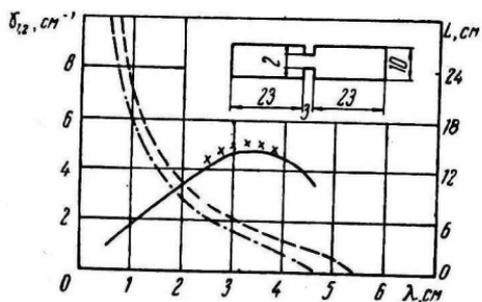


Рис. 1.

мости изолированных исходных волноводов.

Расчетные формулы для коэффициентов связи в случае систем, состоящих из волноводов с иными формами поперечного сечения (или при распрстранении в волноводах других типов волн) выводятся по соотношениям (1)–(6). Так как коэффициенты связи определяются структурой поля распространяющегося в исходном волноводе мода вблизи боковой стенки, в которой прорезаны щели, то при подобных структурах поля рассматриваемых типов волн в различных системах вблизи щелей связи коэффициенты связи также имеют подобный вид. В частности, коэффициенты связи для гребневых волноводов при щелях связи, прорезанных в стенках боковых полостей, подобны коэффициентам связи в прямоугольном волноводе (H_{10} волна), так как структура поля основного типа волны гребневых волноводов вблизи боковых стенок подобна структуре поля H_{10} волны прямоугольного волновода [9]. Единственное отличие заключается в коэффициенте A , который для гребневых волноводов принимает вид

$$A_{гр} = \frac{S_{гр}}{S_{гр} + S_{щ}}, \quad (8)$$

где $S_{гр, щ}$ — площадь поперечного сечения гребневого волновода или щели связи соответственно

Знание коэффициентов связи позволяет определить по формуле (1) постоянные распространения обоих основных типов волн в связанных волноводах, а также период пространственных биений и коэффициенты преобразования [4], что, в свою

очередь, позволяет построить зависимости амплитуд полей в линиях от длины участка связи.

В качестве примера были рассчитаны характеристики трех систем (рис. 1—3, все размеры указаны в миллиметрах). Ширина волноводов на рис. 3 равна 30 мм. На рис. 1 и 2 проставлены экспериментальные точки для периода пространственных биений L (сплошные кривые на всех рисунках), а на рис. 3 — для постоянного распространения γ_1 (штриховые кривые на всех рисунках) и γ_2 (штрих-пунктирные кривые на всех рисунках). Кружочки

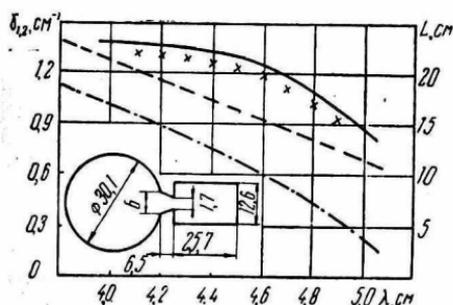


Рис. 2.

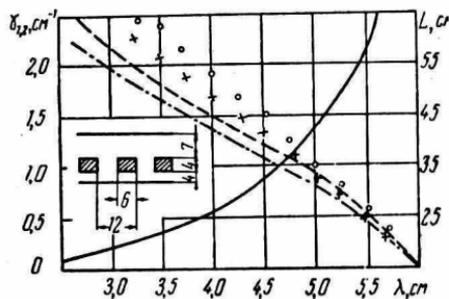


Рис. 3.

соответствуют γ_1 , а звездочки — γ_2 . Расхождение между экспериментальными и расчетными данными для первых двух систем не превышает 5%, что практически является вполне приемлемым. Значительно большие расхождения (до 15% при больших величинах γ_1 , 2) в случае третьей системы (рис. 3) объясняются тем, что исследовалась система с довольно сильной связью (ширина щели равна половине периода системы), а такая связь приводит к заметным искажениям поля исходных линий, в то время как коэффициенты связи выводились в предположении малого влияния системы связи на поля в изолированных волноводах [6, 7].

Таким образом, приведенные в данной работе формулы могут быть использованы для инженерных расчетов характеристик связанных волноводов. Погрешности расчета при этом удовлетворительны, а трудоемкость вычислений значительно ниже, чем при использовании других методов, в частности, методов сшивания полей на границах частичных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. S. E. Miller. В. S. T. J., 33, 661, 1954.
2. Б. М. Машковцев, К. Н. Цибизов, Б. Ф. Емелин. Теория волноводов. Изд-во «Наука». 1966.
3. А. Г. Шейн, В. К. Пироженко. К теории связанных объемных передающих линий. «Радиотехника и электроника», 13, 6, 1967.
4. У. Люиселл. Связанные и параметрические колебания в электронике. Изд-во иностр. лит-ры, 1963.

5. Б. М. Машковцев, Л. З. Бенсман, А. А. Хохрев. Широкополосный направленный ответвитель. «Радиотехника», 15, 4, 1960.

6. В. К. Пироженко. К теории несимметричных связанных электродинамических линий передач. Сб. «Радиотехника», вып. 21. Изд-во ХГУ, Харьков, 1972.

7. В. К. Пироженко. К определению коэффициентов связи в связанных объемных передающих линиях. Сб. «Радиотехника», вып. 15. Изд-во ХГУ, Харьков, 1970.

8. В. В. Никольский. Теория электромагнитного поля. Изд-во «Высшая школа», 1964.

9. А. Л. Фельдштейн, А. Р. Явич, В. П. Смирнов. Справочник по элементам волноводной техники. Изд-во «Советское радио», 1967.