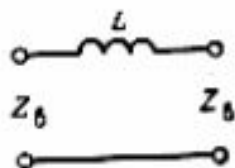
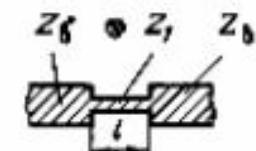


# Индуктивные элементы

1. Последовательная индуктивность



Конструкция элемента

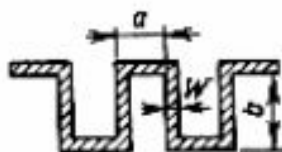


$$Z_1 \gg Z_0; t < \lambda_0/8$$

а)



б)



в)



г)



д)

Формулы для расчета

$$L \approx Z_1 l \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}/c};$$

$L$  — в Гн;  $c = 3 \cdot 10^{11}$  мм/с;  $l$  — в мм;

$Z_1$  — в Ом;

$$L = 200,5 \cdot 10^{-21} \{ \ln [l/(W+t)] - 1,76 \};$$

$l$  — периметр в мм;

$W$  — в мм;  $t$  — толщина в мм;

$L$  — в нГн

$$L = 0,1b [4\pi \ln(2a/W) - C_n],$$

$n$  — число элементов меандровой линии длиной  $b$ ;  $C_n \approx 1,5n$ ;

$L$  — в нГн;  $a, b, W$  — в мм;

$$L = 39,3 \cdot 0,8a^2 N^2 / (6a + 10b);$$

$$a = (R_1 + R_2)/2;$$

$$b = R_2 - R_1;$$

$L$  — в нГн;  $a, b$  — в мм;

$R_1$  — внутренний радиус в мм;

$R_2$  — внешний радиус в мм;

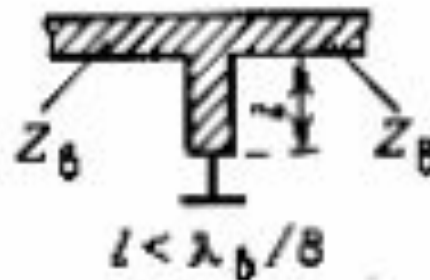
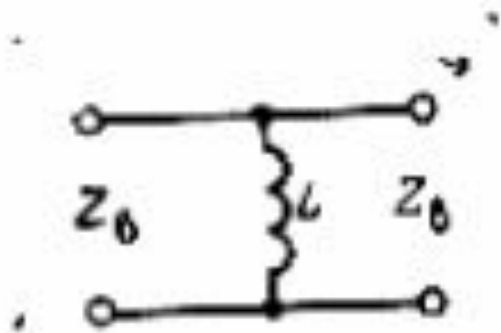
$N$  — число витков;

$$L = 8,5S^{1/2} N^{3/2};$$

$L$  — в нГн;  $S$  — площадь в см<sup>2</sup>

# Индуктивные элементы

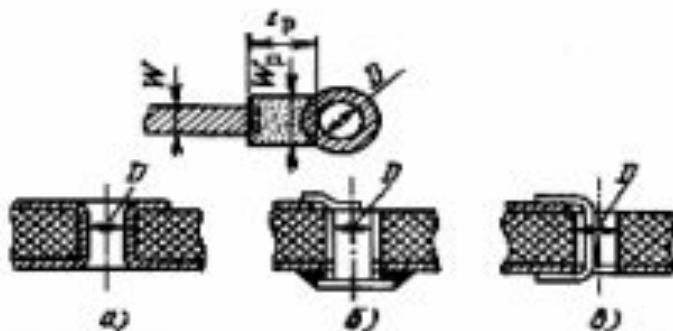
2 Параллельная индуктивность



Для короткозамкнутого отрезка линии передачи  $Z_{ex} = iZ_0 \operatorname{tg}(\beta l)$ .

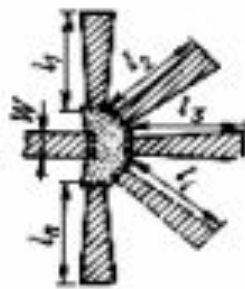
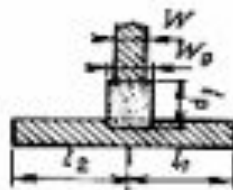
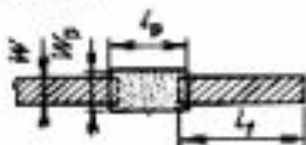
# Резистивные элементы

1. Прямоугольный резистор с заземлением через отверстие в подложке



$$R = R_{\text{ст}} l_p / W_p, \text{ где } R_{\text{ст}} \text{ в Ом}$$

2. Резисторы с четвертьволновыми разомкнутыми шлейфами


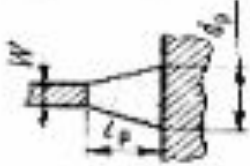



$$R = R_{\text{ст}} l_p / W_p, \text{ Ом; } l_{\text{шл}} \approx \lambda_g / 4,$$

$$Z_{\text{шл}} \approx 0,1 R \operatorname{tg}(\pi/2 \sqrt{k}),$$

где  $k = f_2 / f_1$ ;  $f_1$  и  $f_2$  — граничные частоты полосы пропускания;  $Z$  в Ом

# Резистивные элементы

<p>3. Резистор в форме сектора</p> 	$R = R_s \alpha \pi / 180 \ln(r_2/r_1),$ <p>где <math>R</math> — в Ом</p>
<p>Тип резистора</p>	<p>Формулы для расчета</p>
<p>4. Резистор в форме трапеции</p> 	$R = [R_s l_p / (d_p - W)] \ln(d_n/W),$ <p>где <math>R</math> — в Ом</p>
<p>5. Резистор в форме полукруглости</p> 	$R = R_s \pi / \ln(r_2/r_1),$ <p>где <math>R</math> — в Ом</p>

Сопротивление такого пленочного  $R = R_s l_p / W_p = R_s n$ , где  $l_p$  и  $W_p$  — длина и ширина пленочного резистора;  $n = l_p / W_p$  — коэффициент формы  
 $R_s = 1 / \sigma t_p$ , (Ом/□)

# Резистивные элементы

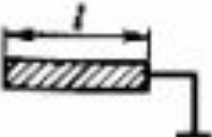

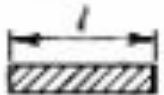

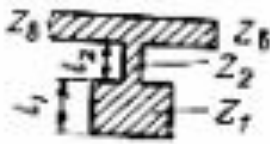
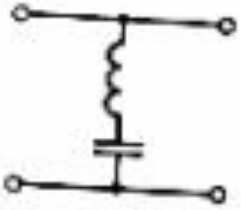
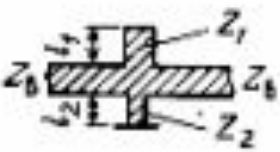
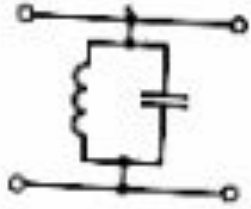
## 6. Распределенные резисторы







Модуль коэффициента отражения  
 $|\Gamma| = 0,008 R_s \lambda_s / Z_0 W$

Погонное затухание, дБ/ед. длины,  
 $\alpha_c = 8,7 R_s / Z_0 W$

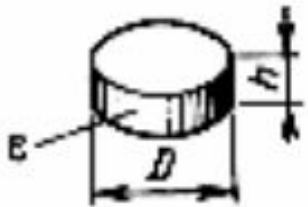
# Резонаторы

№№ п/п	Топология резонатора	Длина	Эквивалентная схема	Формулы для расчета
1		$l = \lambda_{в}/4$		—
2		$l = \lambda_{в}/2$		—
3		—		$z_1 \ll z_2; z_2 > z_B; C \approx \frac{33,3}{z_1} l_1 \sqrt{\varepsilon};$ $L = \frac{z_2}{30} l_2 \sqrt{\varepsilon}; l \text{— в см};$ $z \text{— в Ом}; C \text{— в пФ}; L \text{— в нГн}$
4		—		$z_1 \ll z_2; z_2 > z_B; C \approx \frac{33,3}{z_1} l_1 \sqrt{\varepsilon};$ $C \text{— в пФ}; L \text{— в нГн};$ $L = \frac{z_2}{30} l_2 \sqrt{\varepsilon}$

# Резонаторы

5		$l = n\lambda_{\text{в}}$	—	$\lambda_{\text{рез}} = \pi d_{\text{ср}} \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}$
6		$l = 2(a + b) = n\lambda_{\text{в}}$	—	$\lambda_{\text{рез}} = l\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}/n; a \gg W; b \gg W$
7		—	—	$\lambda_{\text{рез}} = \frac{[2\pi r_{\text{эф}} \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}]}{d_{m,n}};$ $r_{\text{эф}} = f(d, h); d_{m,n} \text{ — функция Бесселя } n\text{-го порядка}$
8		—	—	$\lambda_{\text{рез}} = \frac{2\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}}{\sqrt{\left(\frac{m}{a_{\text{эф}}}\right)^2 + \left(\frac{n}{b_{\text{эф}}}\right)^2}};$ $a_{\text{эф}} = \left[ \frac{120\pi a^3 h}{z_{\text{в}}(a, h, \epsilon) \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \right]^{\frac{1}{4}};$ $b_{\text{эф}} = \left[ \frac{120\pi b^3 h}{z_{\text{в}}(b, h, \epsilon) \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}}} \right]^{\frac{1}{4}};$

# Диэлектрические резонаторы



$f_{рез} = A(\epsilon + B) / h \sqrt{\epsilon}$ , где  $A$  и  $B$  — постоянные коэффициенты, определяемые экспериментально;  $\epsilon = h/D$

Принцип действия диэлектрического резонатора основан на явлении полного внутреннего отражения от границы раздела диэлектрик – воздух.

К недостаткам ДР следует отнести

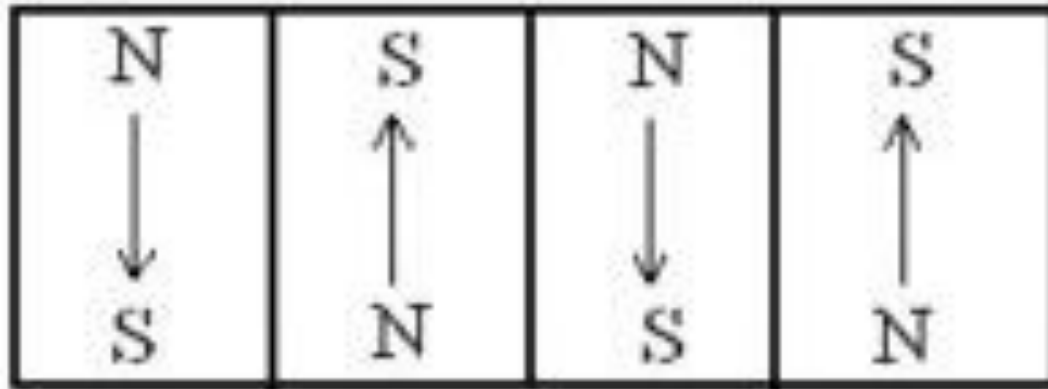
- необходимость экранирования резонатора, что увеличивает массогабаритные параметры,
- наличие чувствительности к колебаниям температуры окружающей среды.



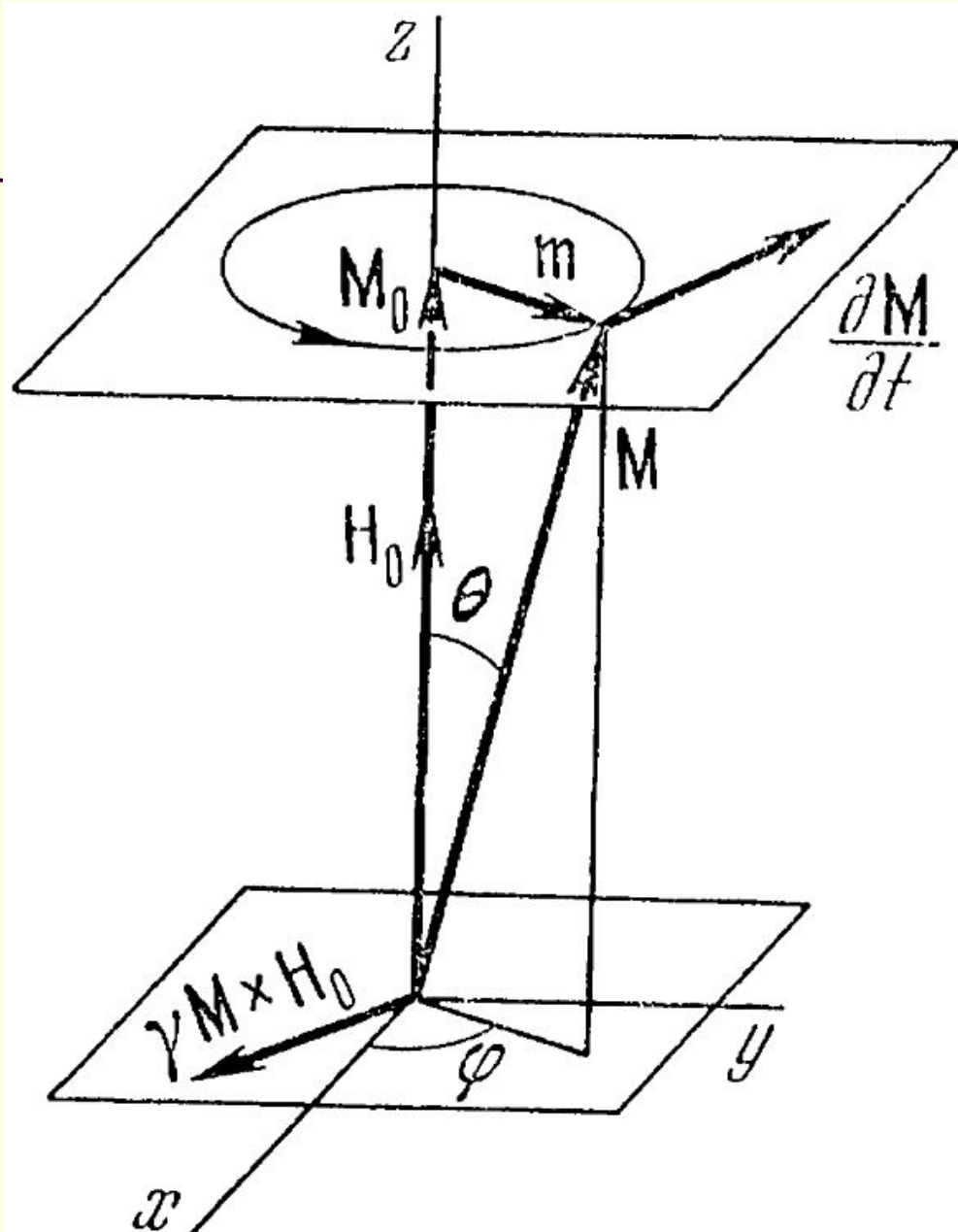
# Ферритовые резонаторы

## Доменная структура ферромагнетиков

Внутреннее размагничивающее поле приводит к самопроизвольному делению материала на более мелкие магнитные структуры - *домены* с противоположными магнитными полюсами. При этом внутреннее магнитное поле замыкается внутри ферромагнетика, уменьшая избыточную *свободную магнитную энергию*.



# Ферритовые резонаторы



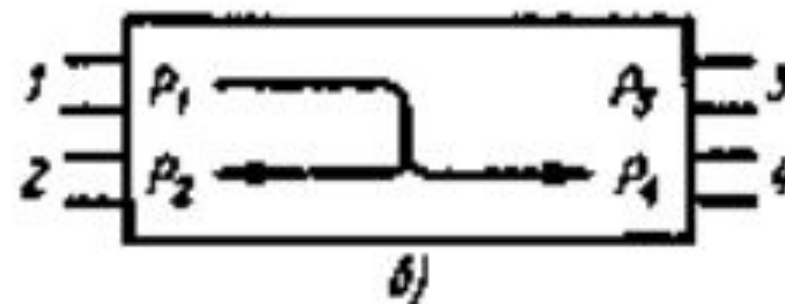
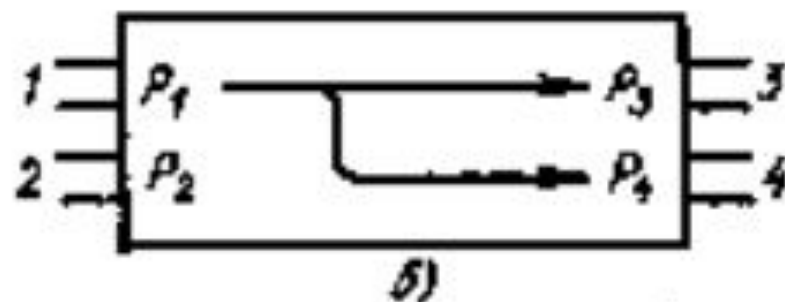
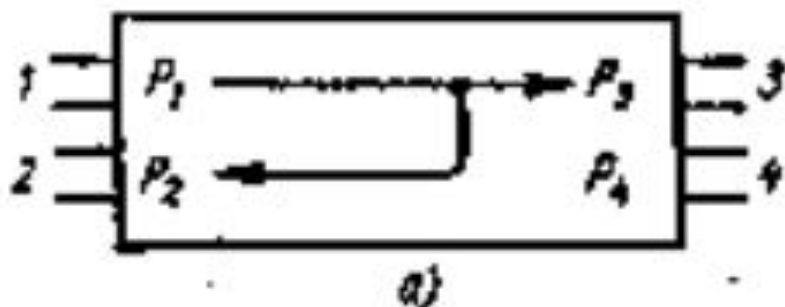
$$M(t) = M_0 + m e^{i\omega t}$$

Уравнение Ландау-Лифшица

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma M \times H$$

$$\omega = \gamma H_0$$

## Направленные ответвители



$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{bmatrix}$$

# Основные параметры направленных ответвителей и их связь с матрицей рассеяния

*Рабочее затухание* (дБ) определяется отношением мощностей на входе и выходе первичной линии

$$C_{13} = 10 \lg(P_1 / P_3) = 10 \lg(1 / |S_{13}|^2).$$

*Переходное ослабление*

$$C_{14} = 10 \lg(P_1 / P_4) = 10 \lg(1 / |S_{14}|^2).$$

*Развязка* зависит от отношения мощностей на входе первичной линии и на развязанном выходе вторичной линии

$$C_{12} = 10 \lg(P_1 / P_2) = 10 \lg(1 / |S_{12}|^2).$$

*Направленность* НО

$$C_{24} = 10 \lg(P_2 / P_4) = 10 \lg(|S_{12}|^2 / |S_{14}|^2).$$

*Коэффициент стоячей волны* в  $i$ -м плече

$$K_{cm U_i} = (1 + |S_{ii}|) / (1 - |S_{ii}|).$$

*Коэффициент деления* по мощности

$$m = |M|^2 = |S_{13}|^2 / |S_{14}|^2.$$

# Матрица рассеяния идеального направленного ответвителя

□ условия идеального согласования  $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$

□ условия идеальной развязки  $S_{12} = S_{21} = S_{43} = S_{34} = 0$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{24} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

□ Условие симметрии устройства  $S_{13} = S_{24}; S_{14} = S_{23}.$

# Матрица рассеяния идеального направленного ответвителя

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{13} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Если пренебречь потерями энергии, то

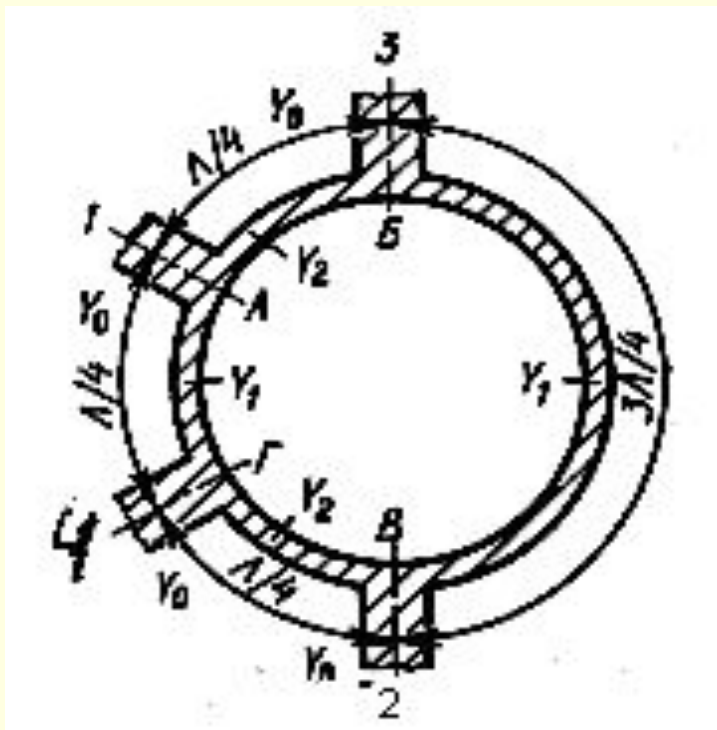
$$|S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 = 1, \quad S_{13}S_{14}^* + S_{13}^*S_{14} = 0$$

Одно из возможных решений

$$S_{14} = ik, \quad S_{13} = \sqrt{1-k^2},$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} & ik \\ 0 & 0 & ik & \sqrt{1-k^2} \\ \sqrt{1-k^2} & ik & 0 & 0 \\ ik & \sqrt{1-k^2} & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

# Кольцевой направленный ответвитель



Условие идеального согласования

$$y_1^2 + y_2^2 = 1.$$

$$(y_1 = Y_1 / Y_0, y_2 = Y_2 / Y_0)$$

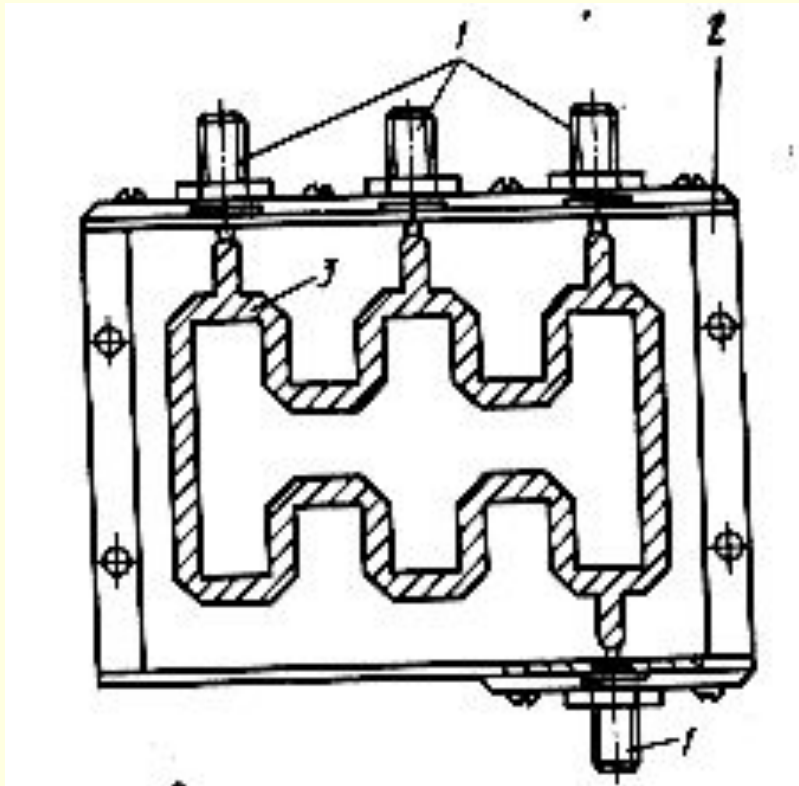
$$S = j \begin{bmatrix} 0 & 0 & y_2 & y_1 \\ 0 & 0 & -y_1 & y_2 \\ y_2 & -y_1 & 0 & 0 \\ y_1 & y_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Коэффициент деления мощности

$$m = |S_{31}|^2 / |S_{41}|^2 = y_2^2 / y_1^2.$$

$$y_1 = \sqrt{1/(1+m)}, y_2 = \sqrt{m/(1+m)}$$

# Пример конструкции кольцевого НО

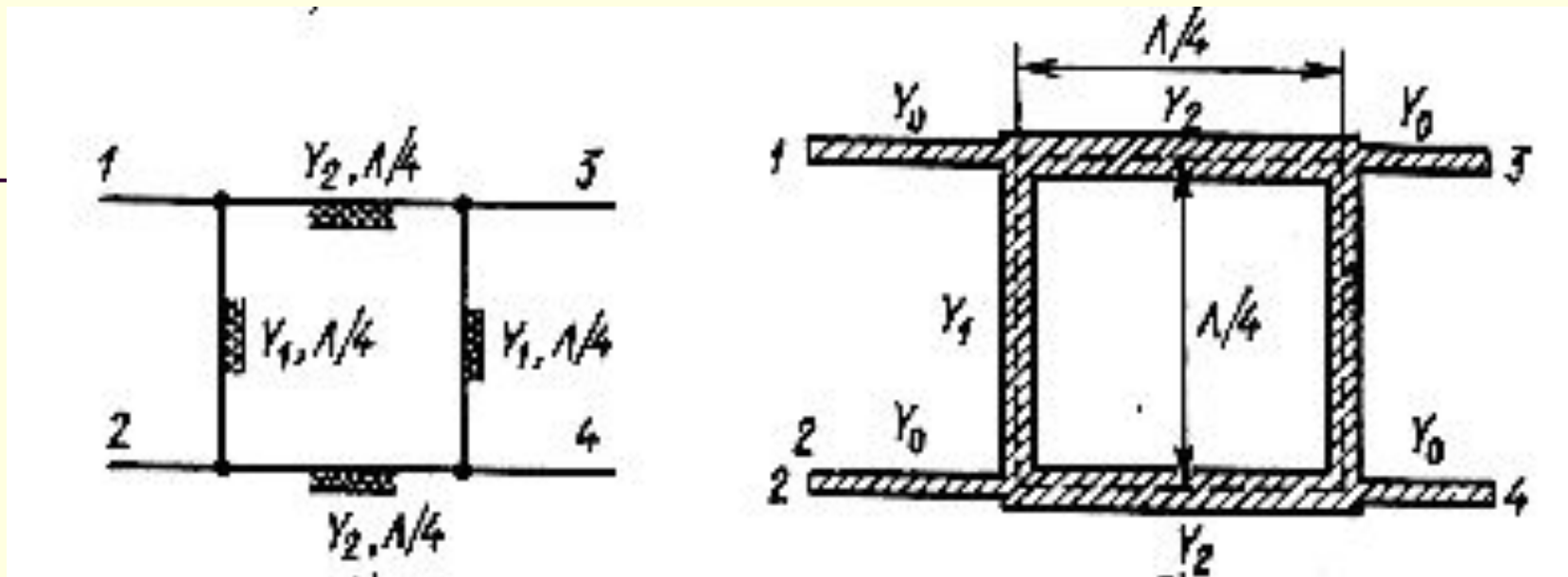


Отрезки линий передачи свернуты в меандр

Относительная полоса частот кольцевого НО длиной  $3/2 \lambda_B$  не превышает 20 %



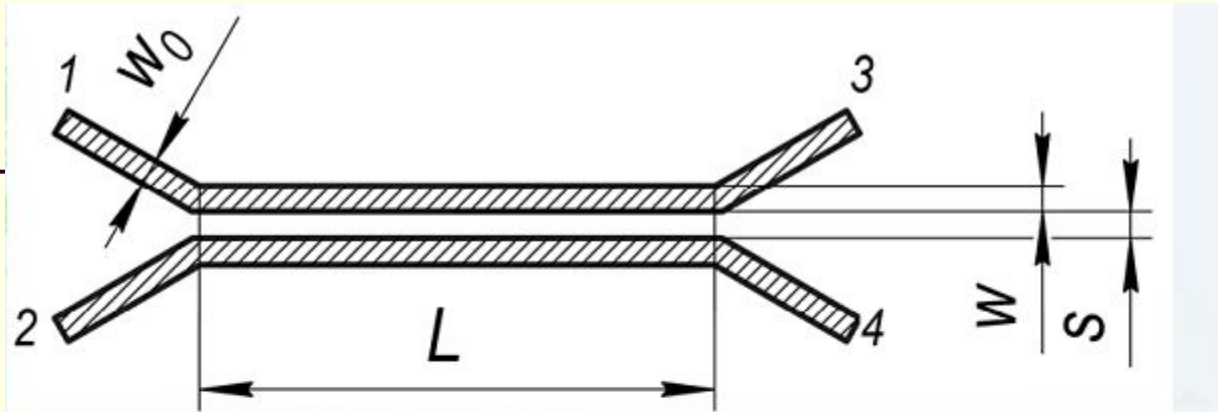
# Шлейфные направленные ответвители



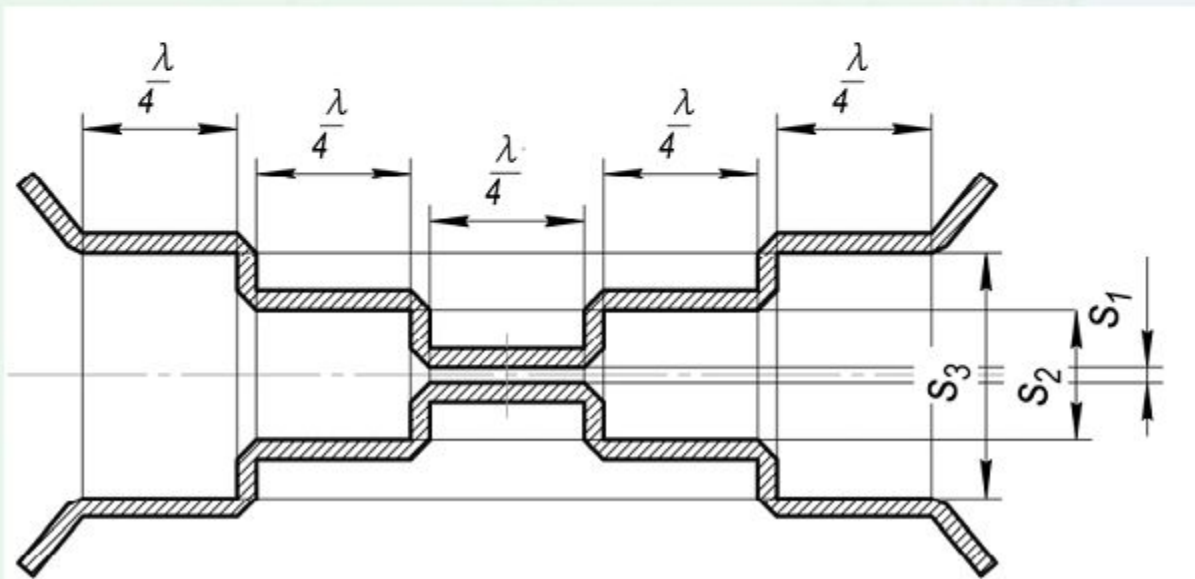
Условие идеального согласования двухшлейфного НО:  $y_1^2 = y_2^2 - 1$

$$S = -\frac{1}{y_2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & y_1 \\ 0 & 0 & y_1 & j \\ j & y_1 & 0 & 0 \\ y_1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

# Ответвители на связанных линиях

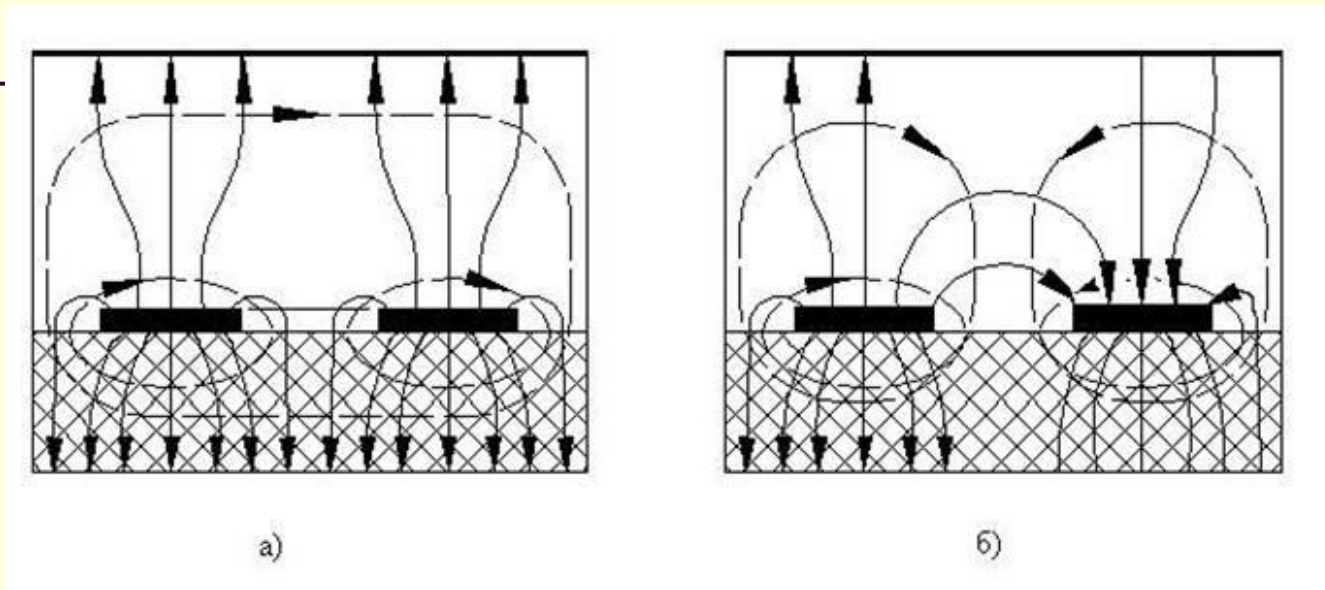


**Односекционный НО**

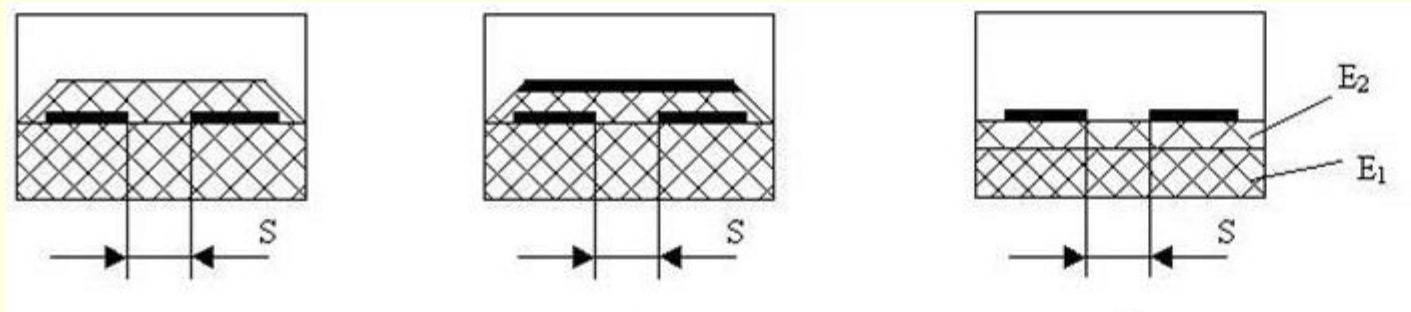


**Многосекционный НО**

# Ответвители на связанных линиях

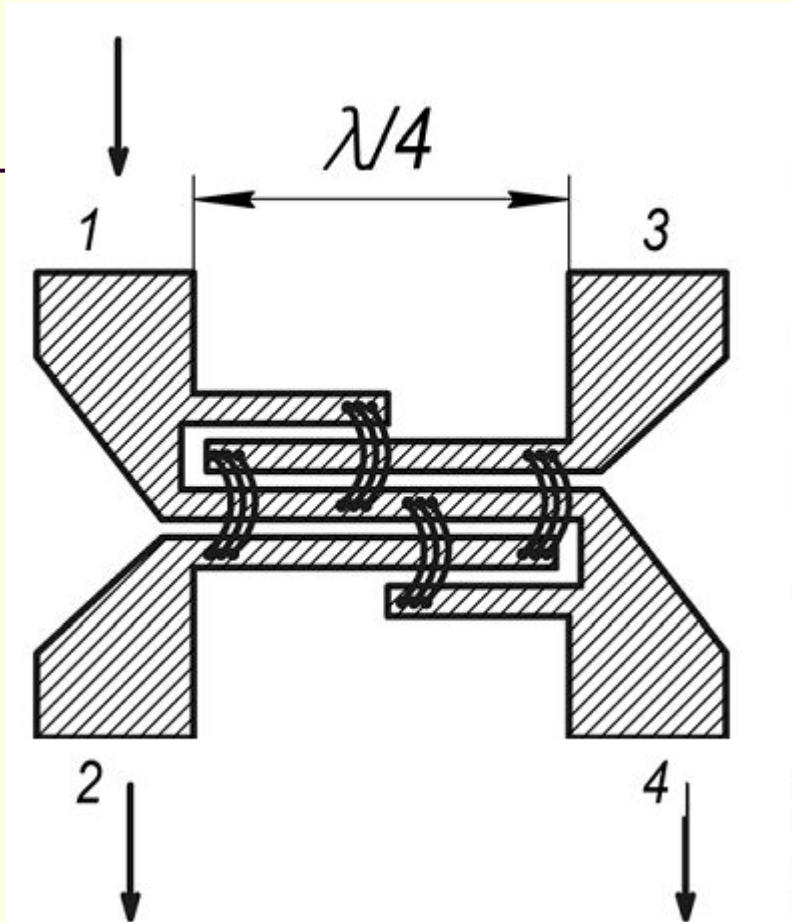


Структура поля четной (а) и нечетной (б) волн в НО



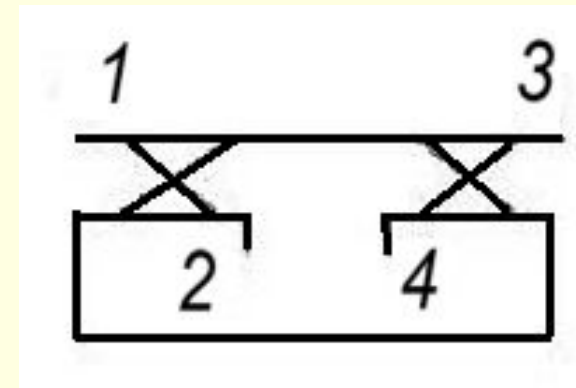
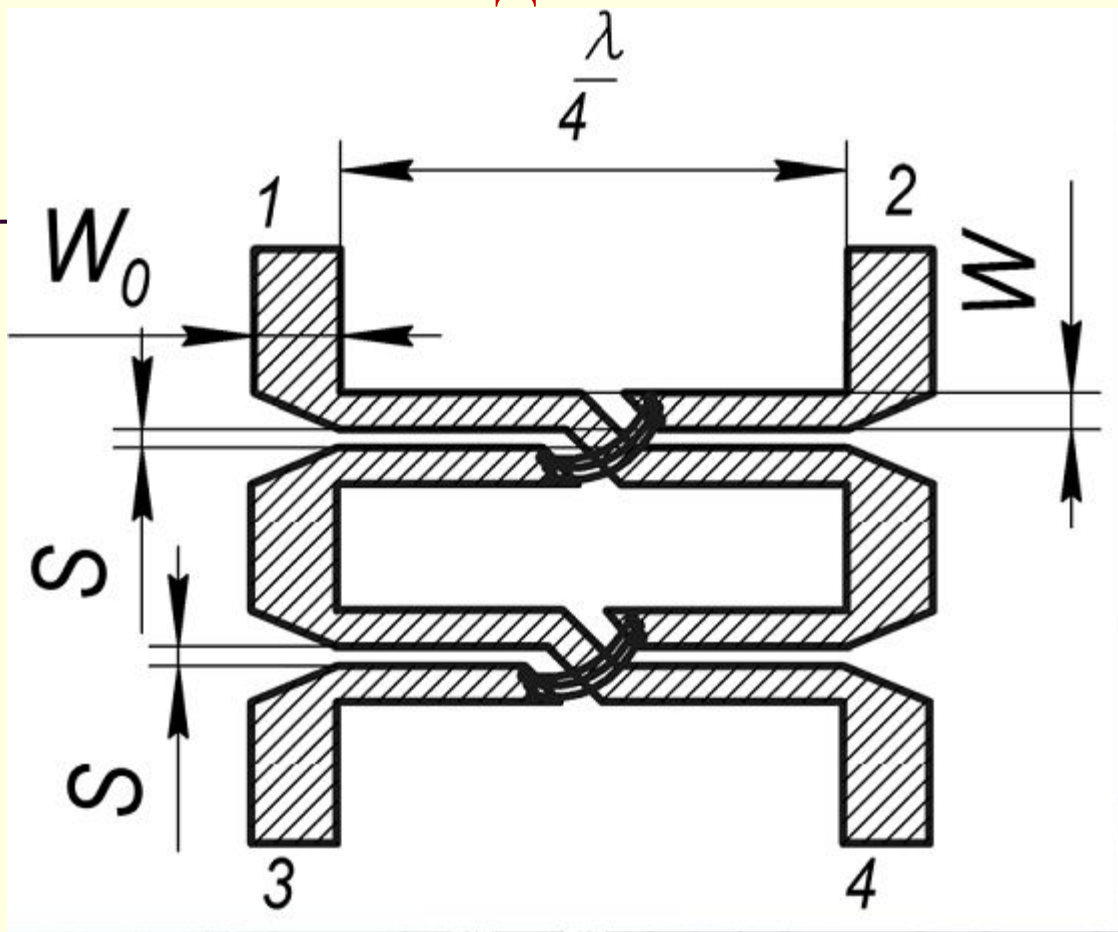
Способы выравнивания фазовых скоростей четных и нечетных волн

# Ответвитель Ланге



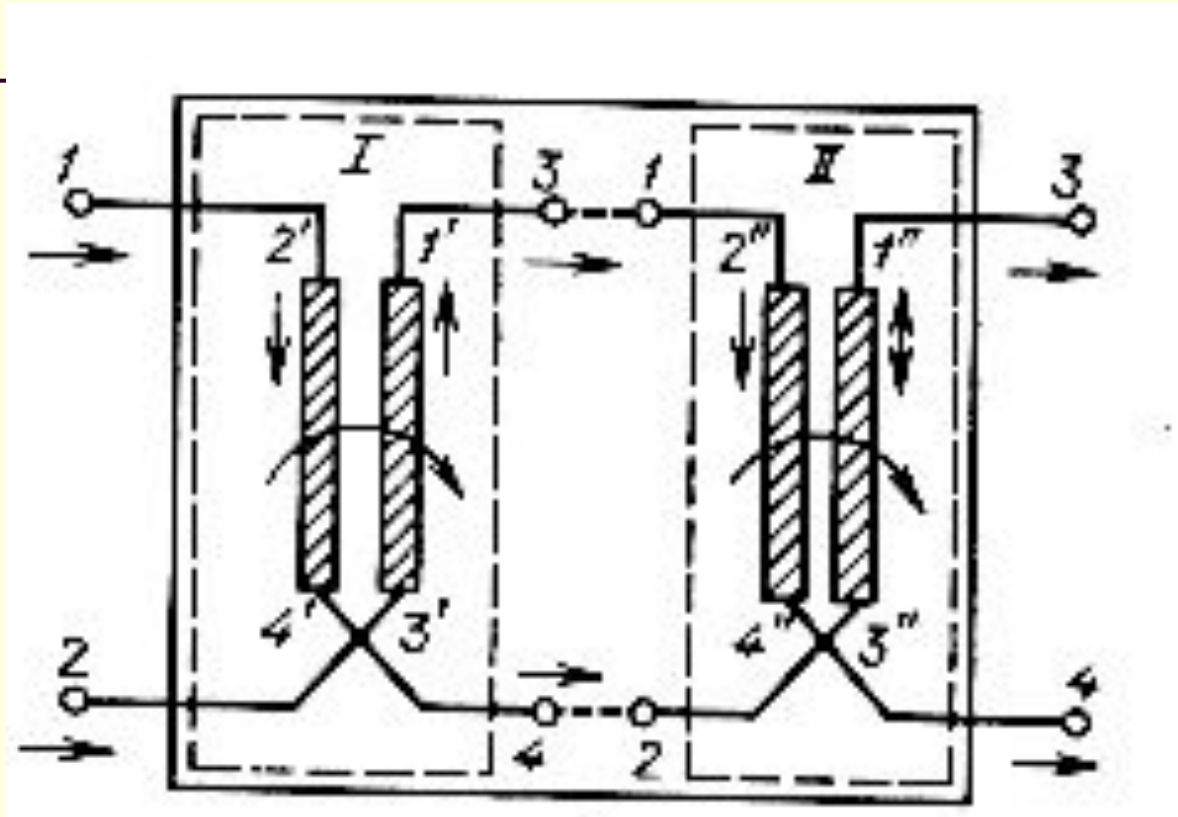
- Позволяет достичь высоких значений коэффициента связи в октавной полосе частот, хорошее согласование и направленность не хуже 24дБ.
- Все передающие МПЛ имеют одинаковое волновое сопротивление, величина которого выбирается из условия согласования ответвителя с подключаемыми к нему устройствами

# Тандемное включение НО



- Тандемный НО является менее чувствительным к геометрическим отклонениям по сравнению с обычным НО на связанных линиях;
- Обеспечивает большую широкополосность.
- Однако имеет значительно большие габариты.

# НО с каскадным соединением



Каскадное соединение позволяет

- увеличить зазоры и ширину проводников в области связи,
- повысить технологичность и воспроизводимость,
- снизить требования к допускам