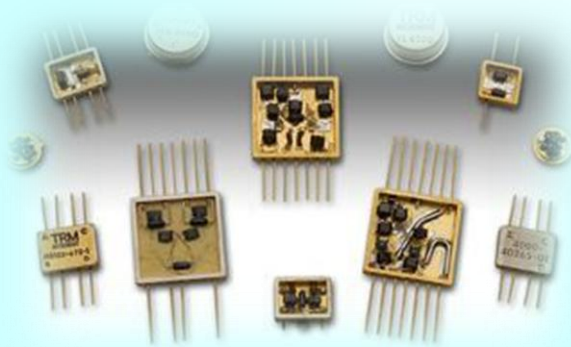


Микроталасна пасивна кола



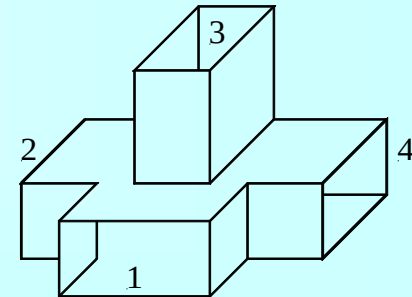
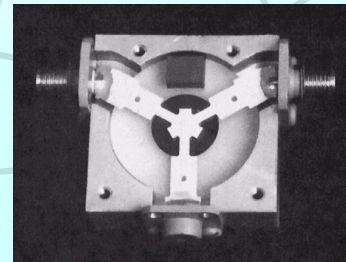
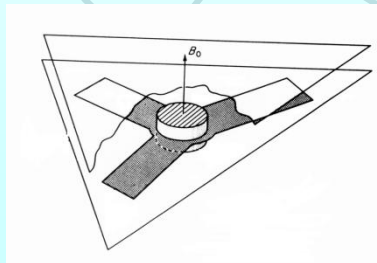
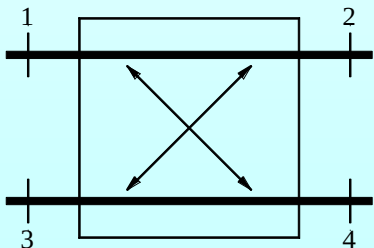
Милка Потребић
Дејан Тошић



Основне микроталасне пасивне КОМПОНЕНТЕ

— део 1 —

*прилагођени потрошачи, краткоспојници, секције,
ограници, ослабљивачи, ММУС,
померачи фазе, делитељи снаге*





Микроталасне компоненте

- Компоненте које нису концентрисане
- Рад им се базира на таласним ефектима: простирању, рефлексији и трансмисији таласа
- Могу бити и електрично мале (нпр. коаксијални кратак спој)
- Биће дати
 - идеализовани s -параметри
 - реализације у техници водова и таласовода
 - оријентациони параметри реалних компоненти
- Нагласак на планарним (микротракастим) водовима



Које компоненте ћемо обрадити

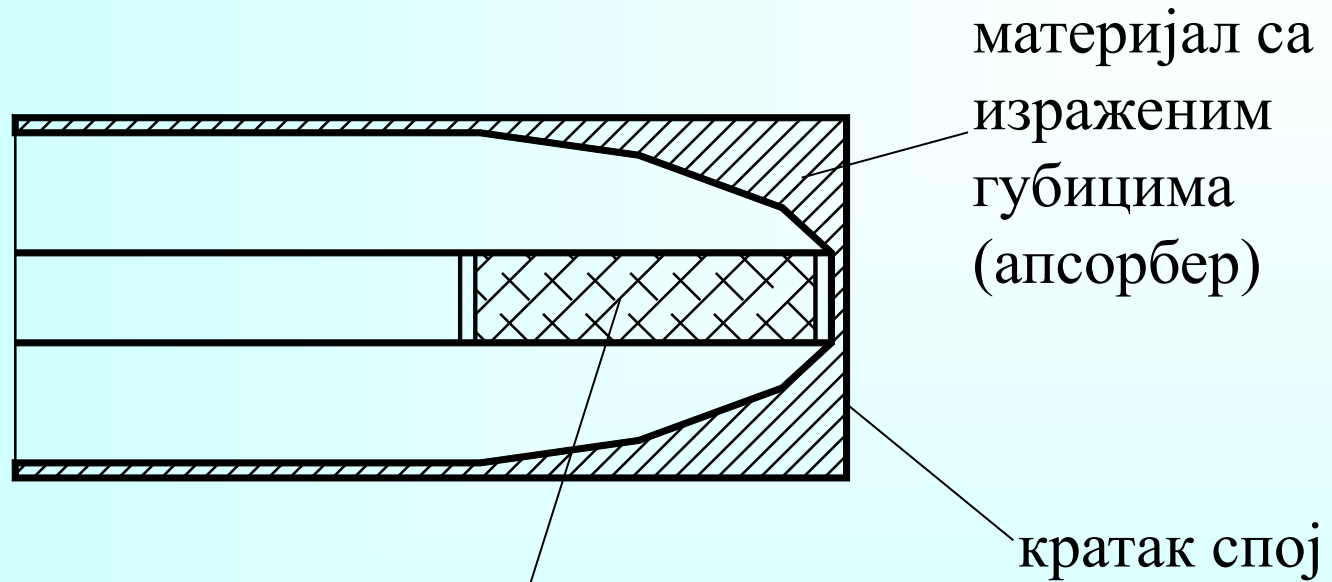
- Прилагођени потрошачи
 - Краткоспојници
 - Секције и огранци водова
 - Ослабљивачи
 - Мреже минималног унетог слабљења
 - Померачи фазе
 - Делитељи снаге
 - Усмерени спрежњаци
 - Изолатори
 - Циркулатори
 - Резонатори
- Феритне (нереципрочне) компоненте



Прилагођени потрошач

- Прилагођени пријемник, прилагођени завршетак, прилагођење,... *matched load, termination...*
- $s_{11} = 0$ ($Z_p = Z_c$, за системноминалнеимпедансе $Z_0 = Z_c$)
- Где се употребљава?
 - за мерење s-параметара
 - за прилагођење водова (мале и велике снаге), укључујући и саме микроталасне компоненте (нпр. усмерене спрежњаке)
 - као "dummy load" (нпр. уместо антене)

Прилагођени потрошач у коаксијалној техници



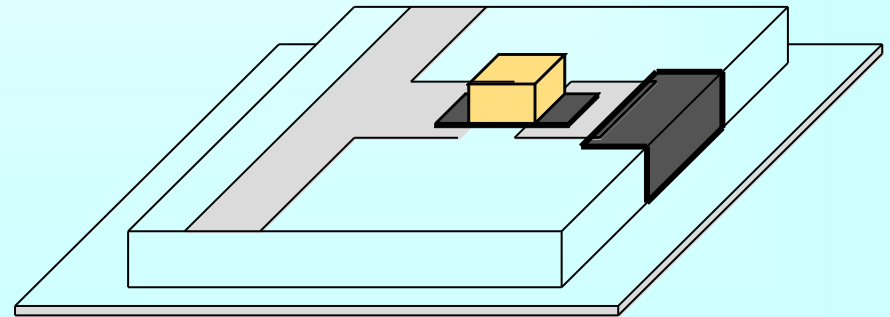
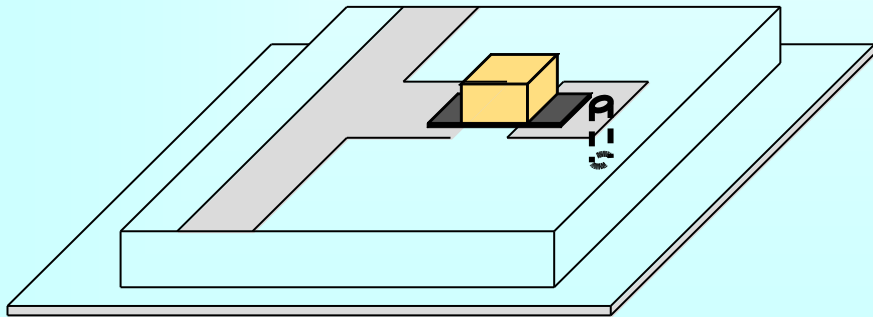
Метал-филм отпорник убачен у
унутрашњи проводник

$$R_p = Z_0 = Z_c$$

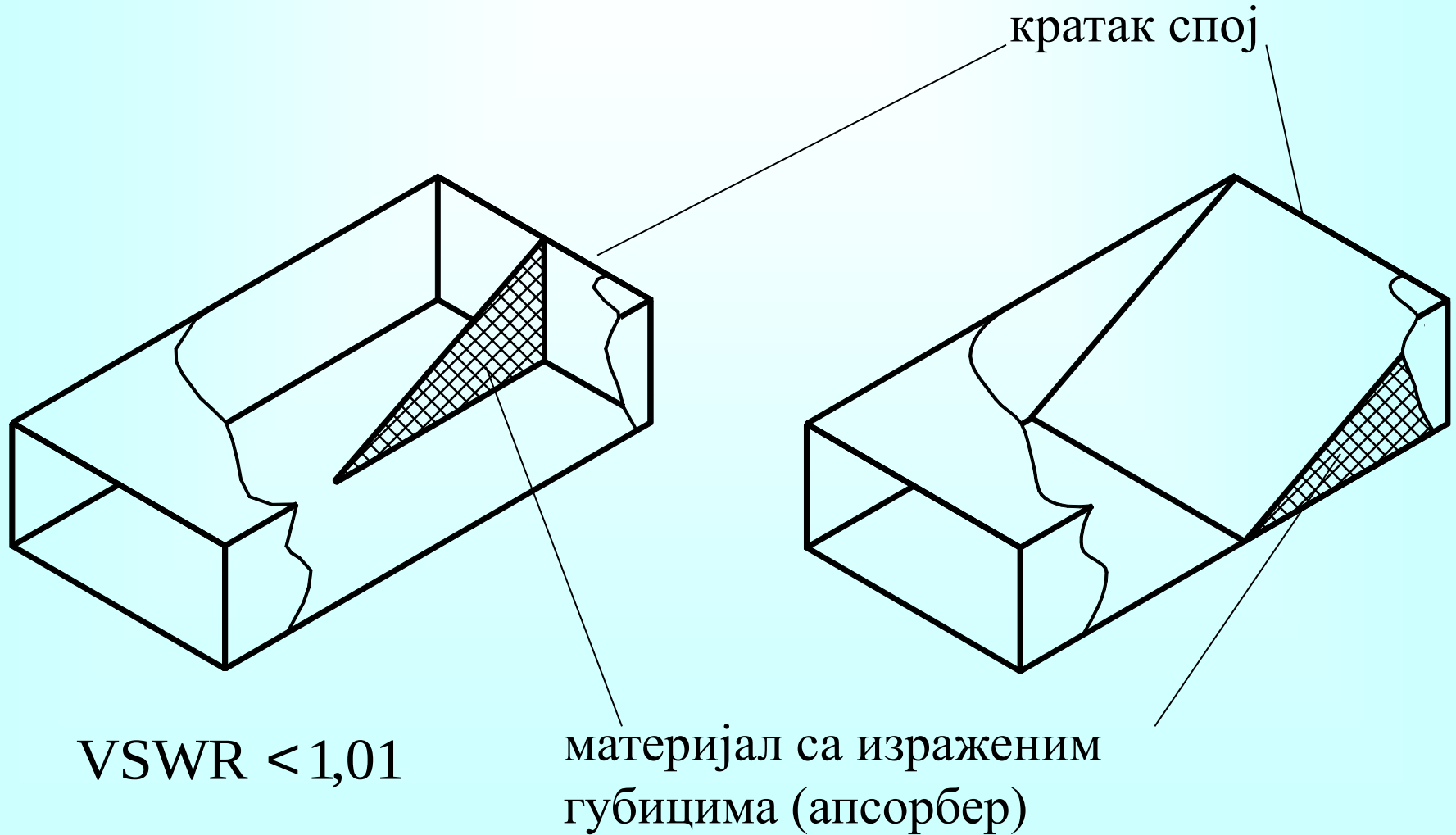
Прилагођени потрошач у техници микротракастих водова



- Паралелни (*shunt*) отпорник $Z_p = Z_0$ (50Ω)
- Вија или обухватни тракасти спој
- Вија и тракасти спој уносе паразитну редну индуктивност, тј. еквивалентно продужење вода



Прилагођени потрошач у таласоводној техници

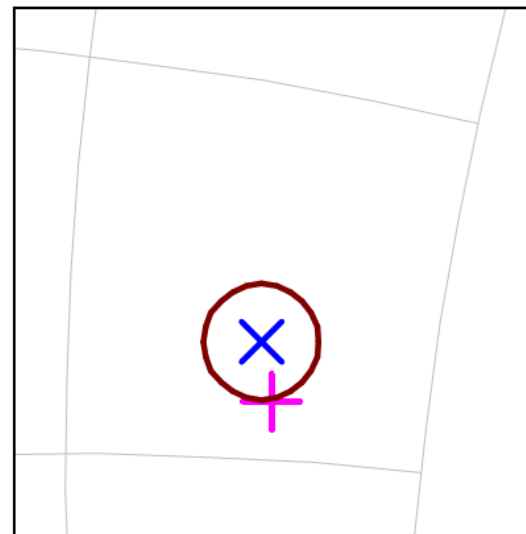
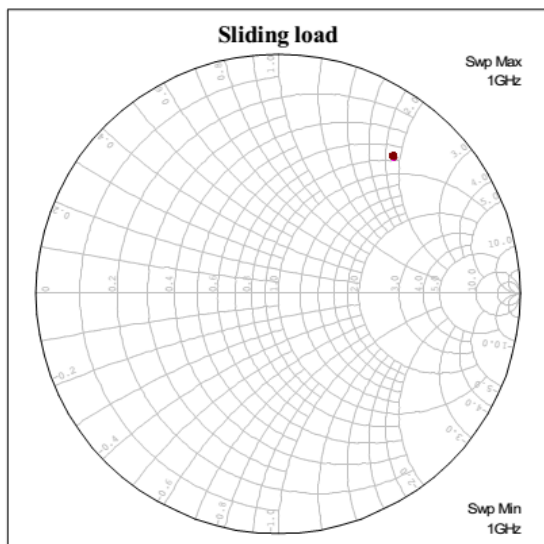
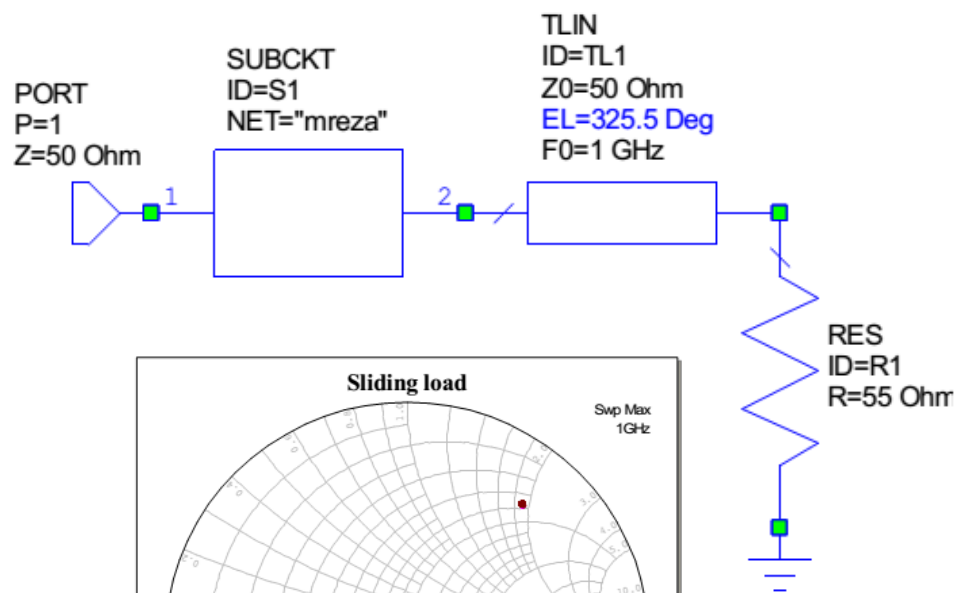


VSWR < 1,01

материјал са израженим
губицима (апсорбер)

Помично прилагођење (sliding load)

- За најтачнију калибрацију мерног система (анализатор мрежа, коакс. техника)





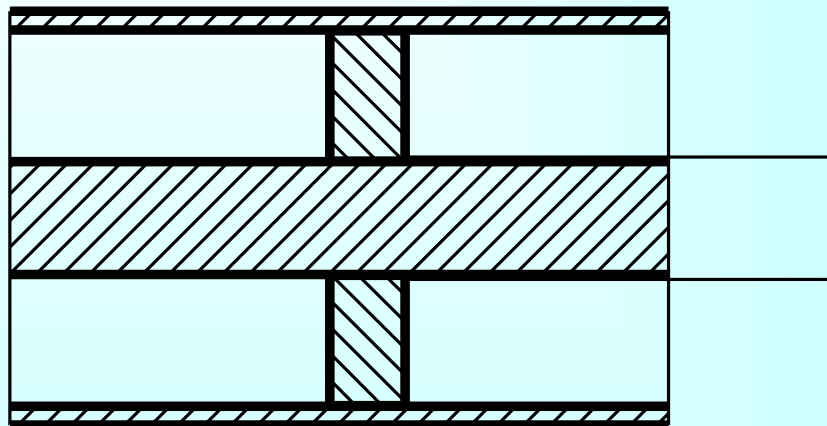
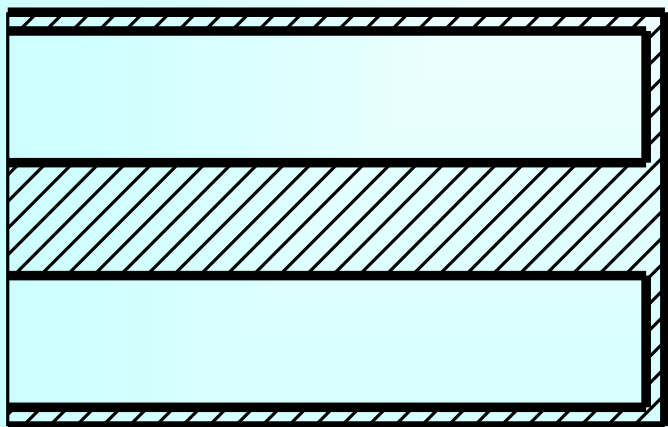
Краткоспојник

- *Short circuit, short*
- $s_{11} = -1$ ($Z_p = 0$)
- За потребе мерења / калибрације мерног система (коакс, таласовод)
- За кратко спојени огранак
- За затварање краја таласовода
- Помични кратак спој
 - коаксијални: за најтачнију калибрацију мерног система
 - за прилагођење разних прелаза

Краткоспојник у коаксијалној техници



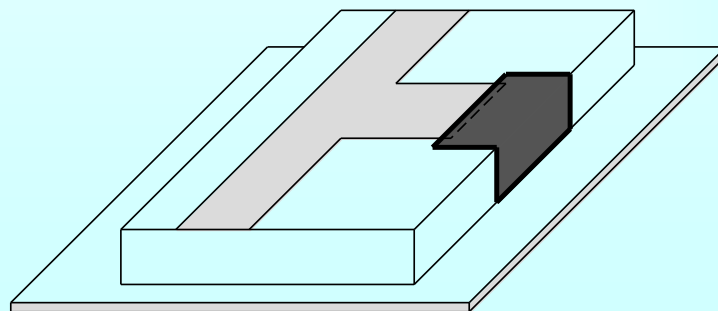
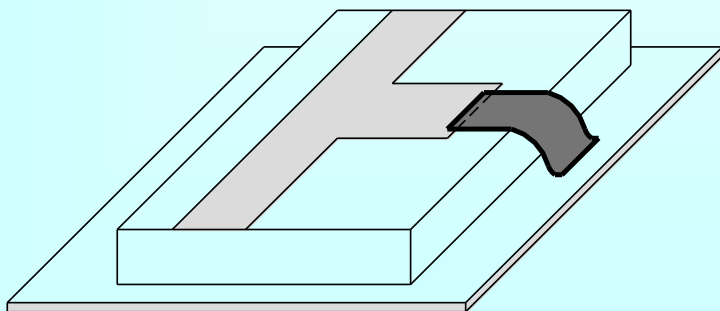
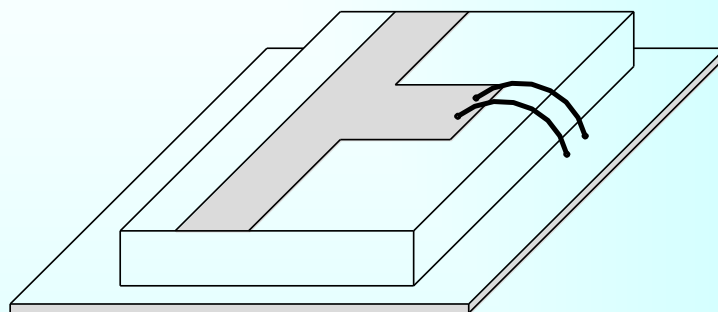
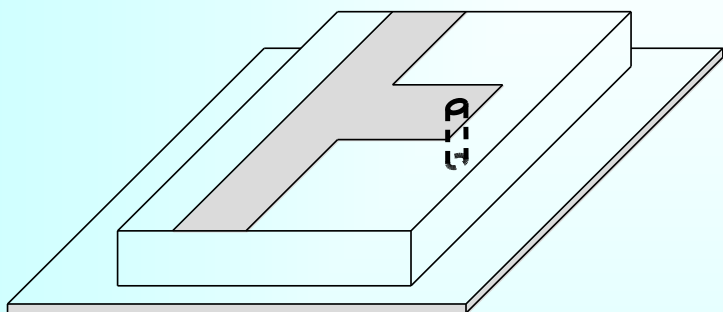
Од свих завршетака најближи је идеалном



Краткоспојник

у микротракастој техници

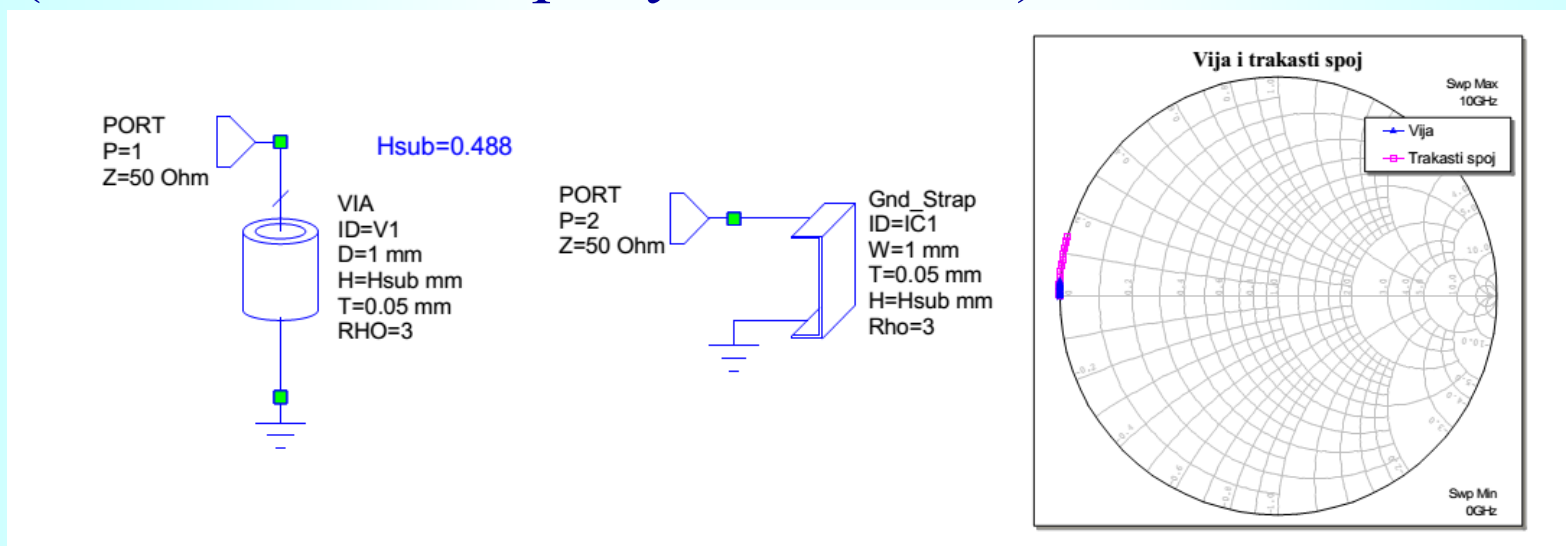
Вије, жичани и тракасти спојеви



Краткоспојник

у микротракастој техници

- Паразитна индуктивност и отпорност
(еквивалентно продужење вода)



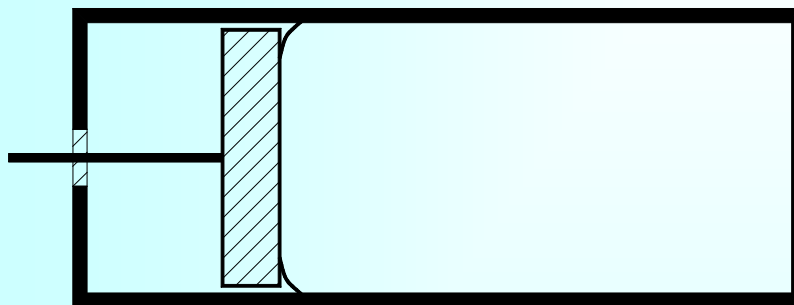
- Вишеструка вија има мање паразитне ефекте од обичне
- Тракасти спој има веће паразитне ефекте од вије
- Жичани спој има највеће паразитне ефекте

Краткоспојник

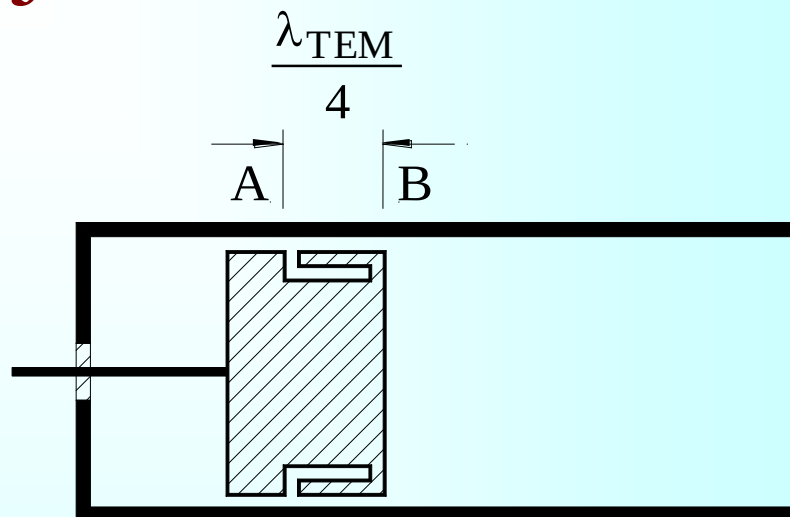
у таласоводној техници



Помични:

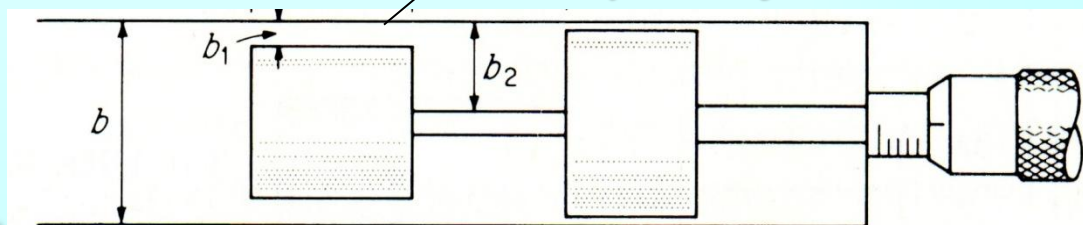
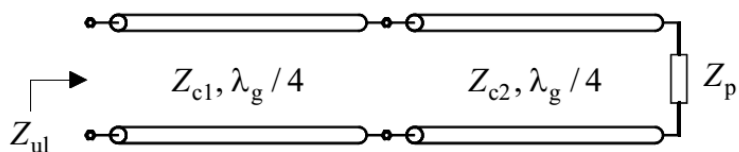


контактни (са перима)



бесконтактни (са $\lambda/4$
трансформаторима)
ускопојасни!

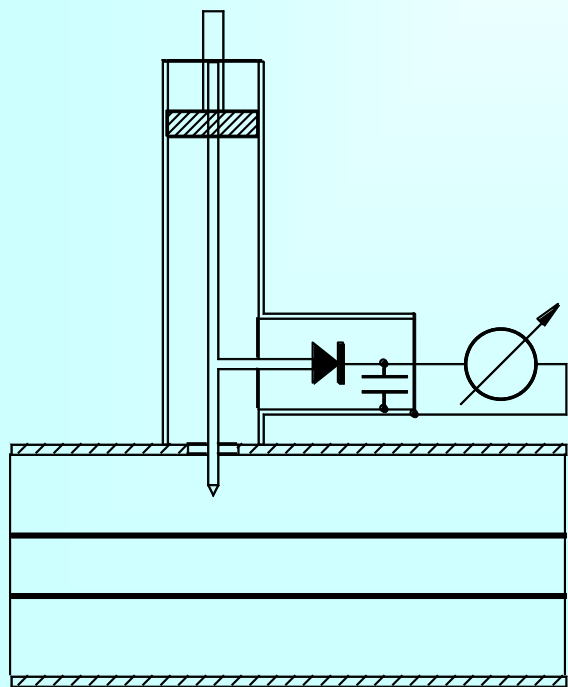
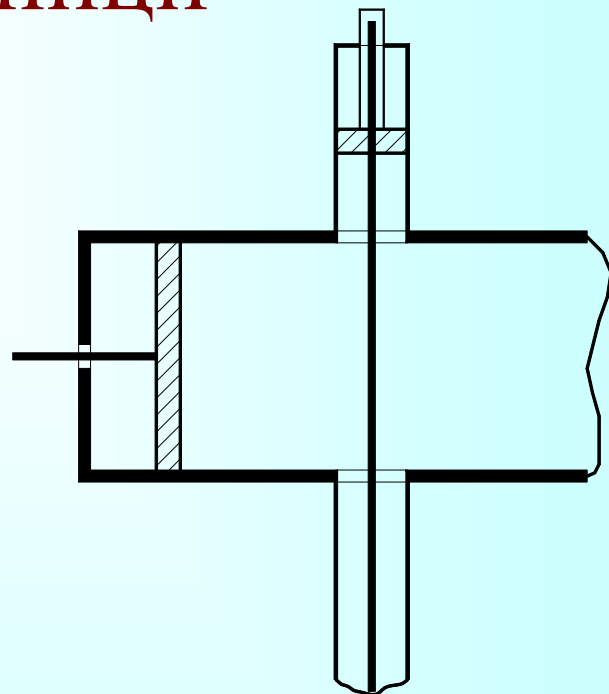
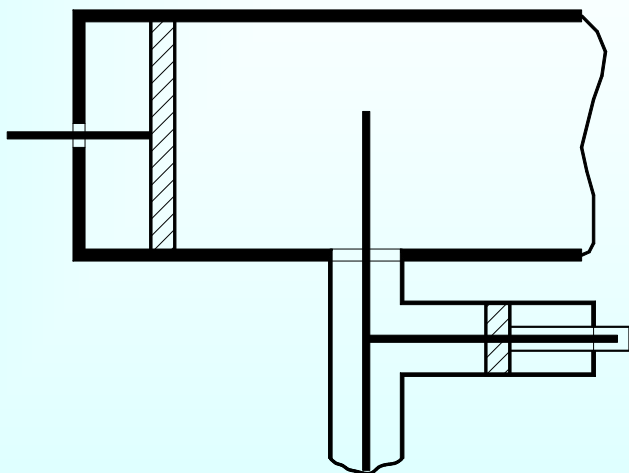
$$Z_{ul} = (Z_{c1} / Z_{c2})^2 Z_p$$



Краткоспојник у таласоводној техници



Примена краткоспојника за прилагођење

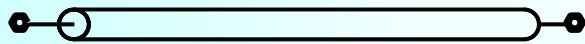




Секција (одсечак) вода

- Униформан, са хомогеним диелектриком (ТЕМ талас)

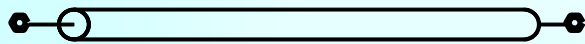
- Без губитака:



$$Z_c, \epsilon_{re}, D$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\Theta} \\ e^{-j\Theta} & 0 \end{bmatrix}$$

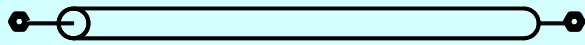
$$Z_0 = Z_c$$



$$\theta = \beta D = \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\epsilon_{re}} D$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

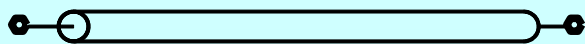
- Са малим губицима:



$$Z_c, \epsilon_{re}, \alpha, D$$

$$S \approx \begin{bmatrix} 0 & e^{-\gamma D} \\ e^{-\gamma D} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_0 = \text{Re } Z_c$$



$$\gamma = \alpha + j \frac{2\pi f}{c_0} \sqrt{\epsilon_{re}}$$

$$Z_c \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$



Секција вода са малим губицима

- Некад се морају узети тачни изрази за $\mathbf{S}$ и Z_c :

$$\mathbf{S} = \frac{\begin{bmatrix} \text{sh}(\gamma D)(Z_c^2 - Z_0^2) & 2Z_0Z_c \\ 2Z_0Z_c & \text{sh}(\gamma D)(Z_c^2 - Z_0^2) \end{bmatrix}}{2\text{ch}(\gamma D)Z_0Z_c + \text{sh}(\gamma D)(Z_0^2 + Z_c^2)}$$

$$\gamma = \alpha + j\frac{2\pi f}{c_0}\sqrt{\epsilon_{\text{re}}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

- Пример: Кратак, кратко спојени огранак (Q-фактор)



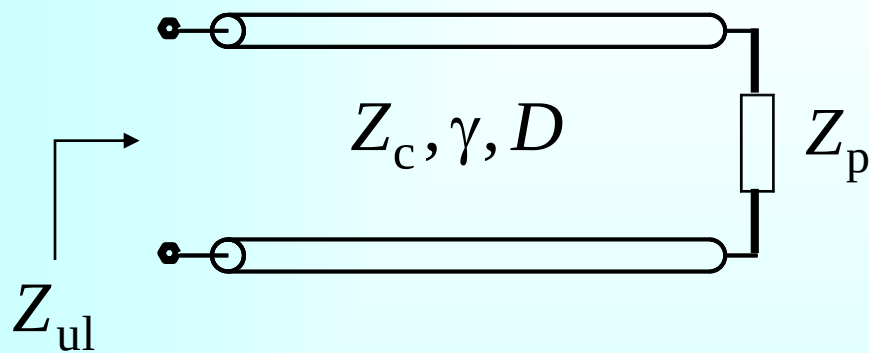
Секција вода са нехомогеним диелектриком

- Нехомоген диелектрик - квази-ТЕМ талас
- Ради се као да је реч о ТЕМ таласу
- Ова апроксимација је добра за учестаности до неколико GHz
- Тачност апроксимације зависи од много чинилаца (дебљине и врсте супстрата, димензија вода, начина побуђивања,...)



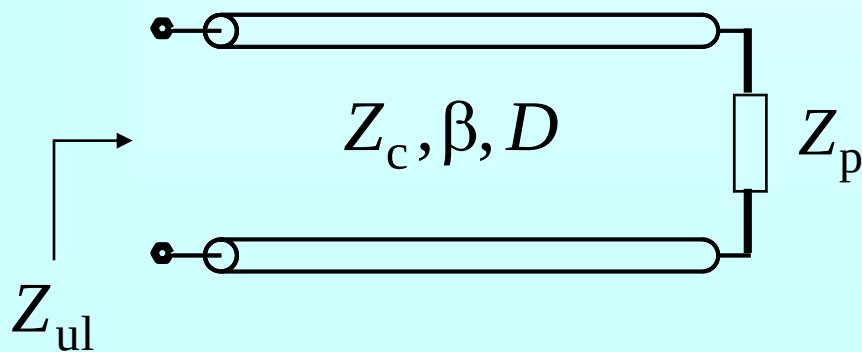
Секција вода завршена пријемником

- Са губицима:



$$Z_{ul} = Z_c \frac{Z_p + Z_c \operatorname{th}(\gamma D)}{Z_c + Z_p \operatorname{th}(\gamma D)}$$

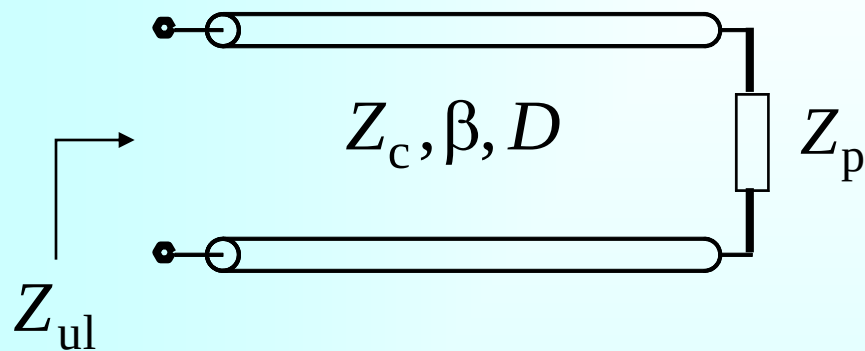
- Без губитака:



$$Z_{ul} = Z_c \frac{Z_p + jZ_c \operatorname{tg}(\beta D)}{Z_c + jZ_p \operatorname{tg}(\beta D)}$$

$$(\beta D = \Theta)$$

$\lambda/4$ секција вода (без губитака) као трансформатор импедансе



$$\beta D = \Theta = \pi / 2$$

$$Z_{ul} = Z_c \frac{Z_p + jZ_c \operatorname{tg}(\beta D)}{Z_c + jZ_p \operatorname{tg}(\beta D)} = Z_c \frac{Z_p \cos(\beta D) + jZ_c \sin(\beta D)}{Z_c \cos(\beta D) + jZ_p \sin(\beta D)} = \frac{Z_c^2}{Z_p}$$

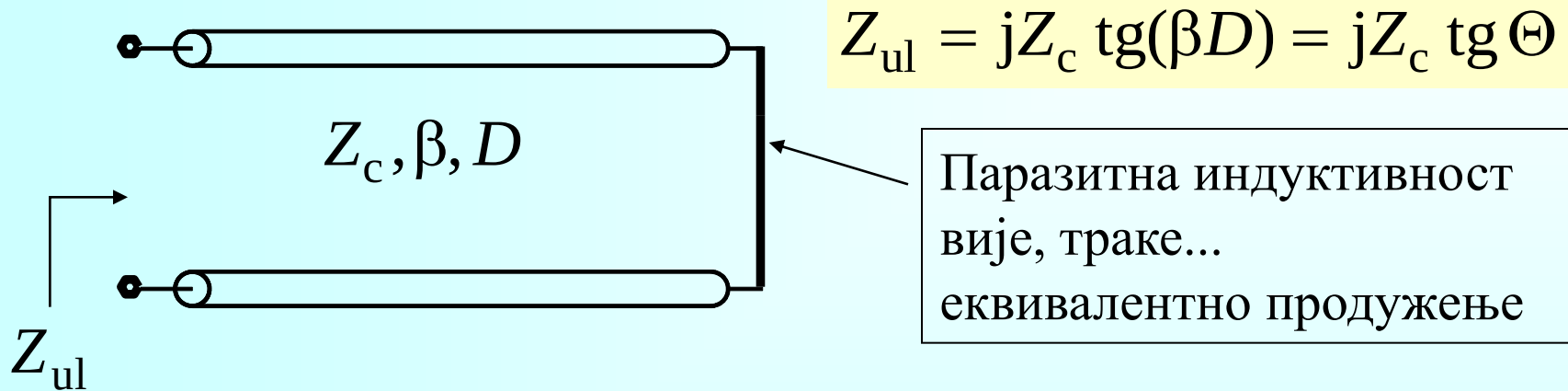
$$s_{11} = -s_{11p} \left(\Gamma_p \right)$$





Кратко спојен огранак вода (без губитака)

- Кратко спојен (*short-circuited stub*):



Задатак: У MWO направити модел

1) *идеалног* и 2) *реалног* (микротракастог) кратко спојеног огранка

FR-4 ($\epsilon_r = 4,6$, $\text{tg } \delta = 0,02$), $h = 1 \text{ mm}$, $t = 18 \mu\text{m}$, $Z_0 = 50 \Omega$,

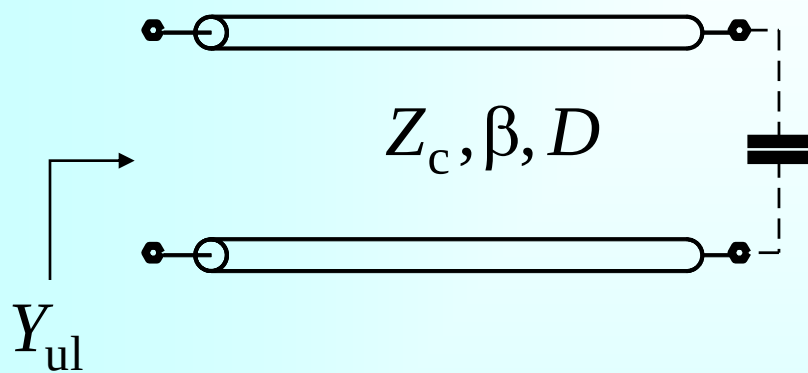
$f = 5 \text{ GHz}$, $D = 0 - \lambda_g / 2$, Smith Chart





Отворен огранак вода (без губитака)

- Отворен (*open-circuited stub*):



$$Y_{ul} = jY_c \operatorname{tg}(\beta D) = jY_c \operatorname{tg} \Theta$$

Паразитна капацитивност
еквивалентно продужење

Задатак: У MWO направити модел

1) *идеалног* и 2) *реалног* (микротракастог) отвореног огранка

FR-4 ($\epsilon_r = 4,6$, $\operatorname{tg} \delta = 0,02$), $h = 1 \text{ mm}$, $t = 18 \text{ }\mu\text{m}$, $Z_0 = 50 \text{ }\Omega$,

$f = 5 \text{ GHz}$, $D = 0 - \lambda_g / 2$, Smith Chart



Кратко спојен и отворен огранак $\lambda/4$ микротракастог вода (без губитака)



- За **кратко спојен** $\lambda/4$ огранак пожељно је да

$$Z_{ul} = \frac{Z_c^2}{Z_{K.S.}} \text{ буде што веће, тј. } Z_c \text{ што веће, тј.}$$

узак микротракасти вод



- За **отворен** $\lambda/4$ огранак пожељно је да

$$Z_{ul} = \frac{Z_c^2}{Z_{OTV.}} \text{ буде што мање, тј. } Z_c \text{ што мање, тј.}$$

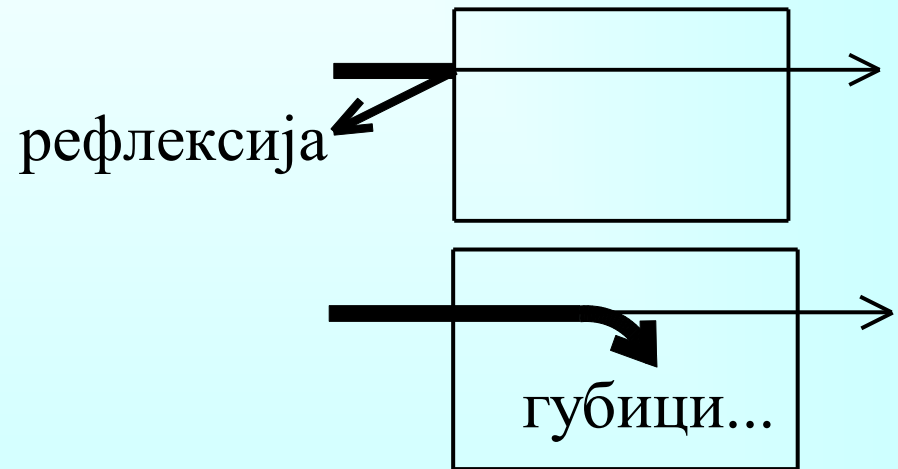
широк микротракасти вод





Ослабљивач

- Атенуатор, *attenuator*
- За уношење слабљења у преношени сигнал (талас),
индиректно - за регулацију појачања
- Без губитака
(неприлагођен!)
- Прилагођен
(са губицима)
- Идеалан и реципрочан:

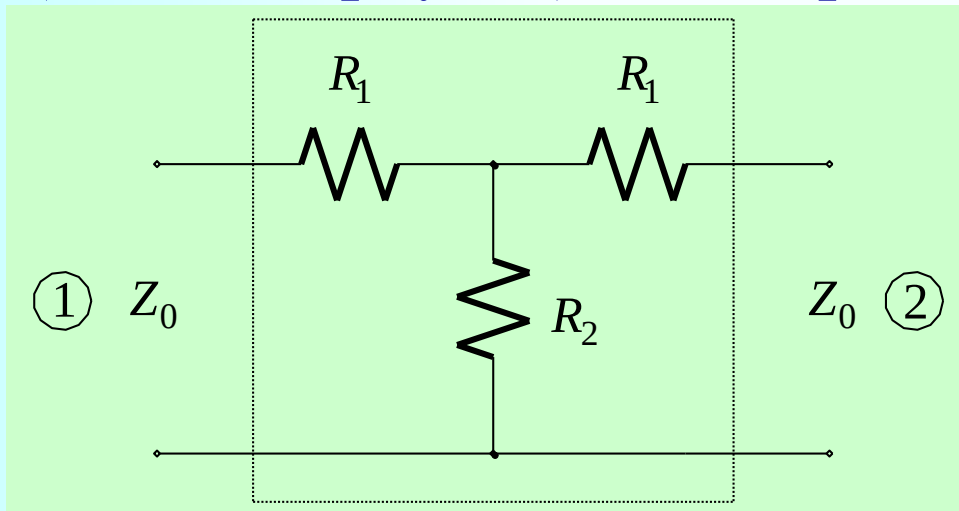


$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & s_{21} \\ s_{21} & 0 \end{bmatrix} \quad |s_{21}| < 1$$



Ослабљивачи у техници водова

- Основни прототип је отпорничка **Т** или **П** мрежа (звезда - троугао). Симетричан:



$$s_{11} = s_{22} = 0,$$

$$s_{12} = s_{21} < 1 \text{ (задато)}$$

$$A_{IL} = -|s_{21}|_{[dB]}$$

Решење:

$$R_1 = \frac{1 - s_{21}}{1 + s_{21}} Z_0, \quad R_2 = \frac{2s_{21}}{1 - s_{21}^2} Z_0$$

Могуће је остварити све $s_{21} \in (0, 1)$

Задатак: 3 dB ($s_{21} = 1/\sqrt{2}$) атенуатор за $Z_0 = 50 \Omega$. Одредити:

1. рачунски, 2. оптимизацијом у MWO



, WIPL-D

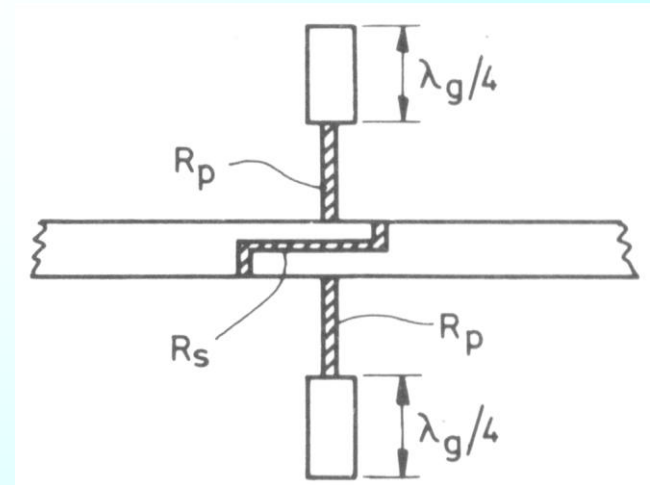


$$R_1 = 8,58 \Omega, \quad R_2 = 141,4 \Omega$$

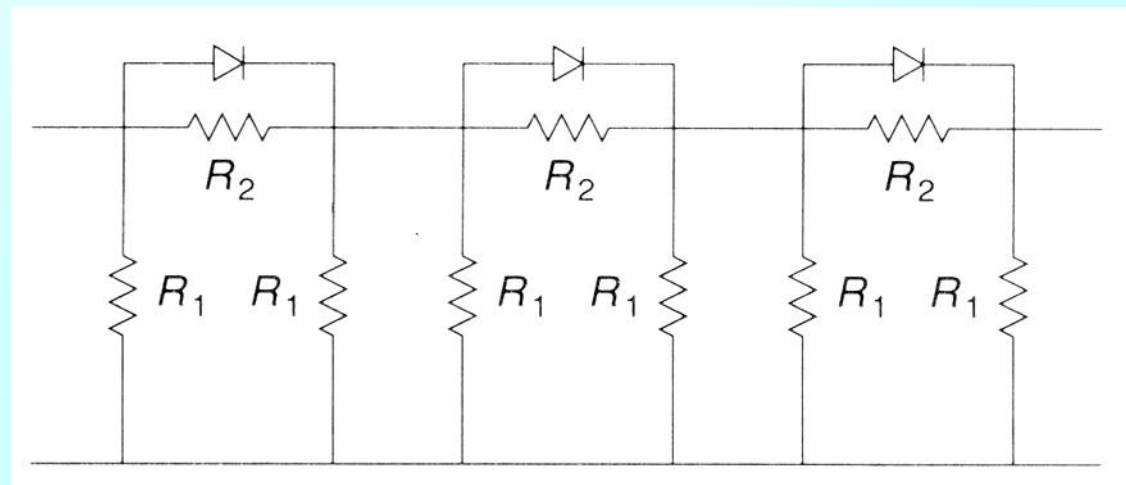


Ослабљивачи (микротракаста техника)

- У микрострип техници дебелослојних филмова (П):



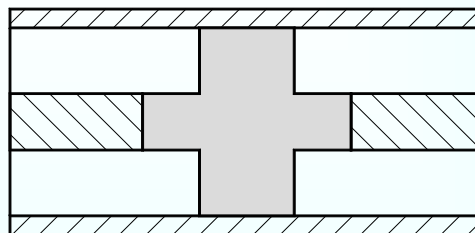
- Електронски контролисани (П):



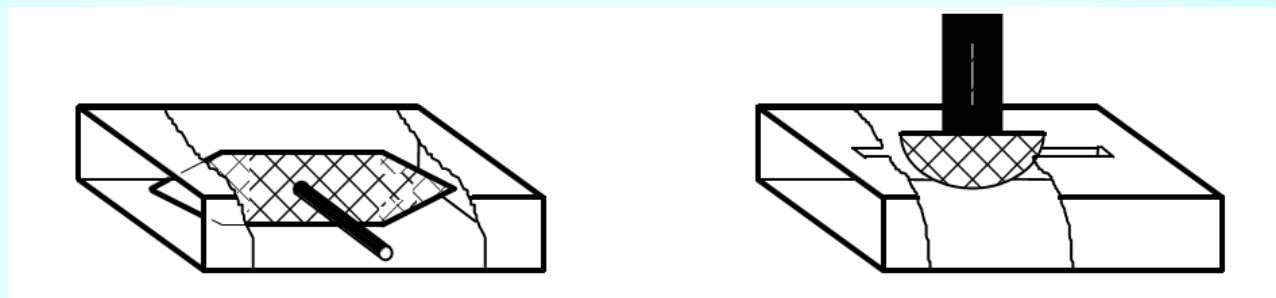
Ослабљивачи (коакс. и таласоводни)



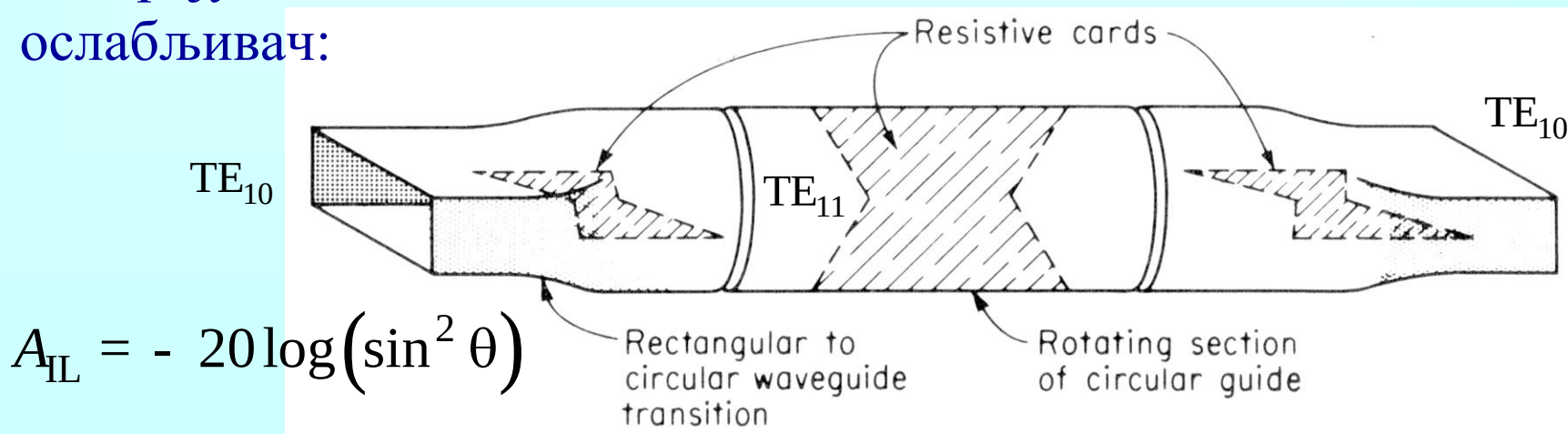
- Коаксијални (Т):



- Таласоводни:



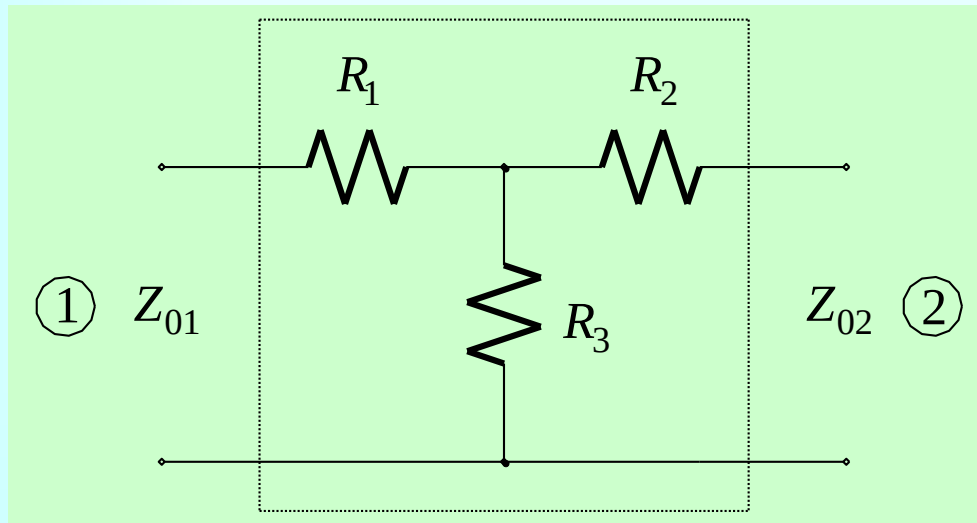
- Ротирајући таласоводни
ослабљивач:



Мрежа минималног унетог слабљења



- *Minimum insertion loss pad*
- ММУС је прилагођена отпорничка мрежа са два приступа *различитих* номиналних импеданси приступа, *минималног унетог слабљења*.



Није могуће остварити
све $s_{21} \in (0,1)$.
Постоји $|s_{21}|_{\max}$.

Мрежа минималног унетог слабљења

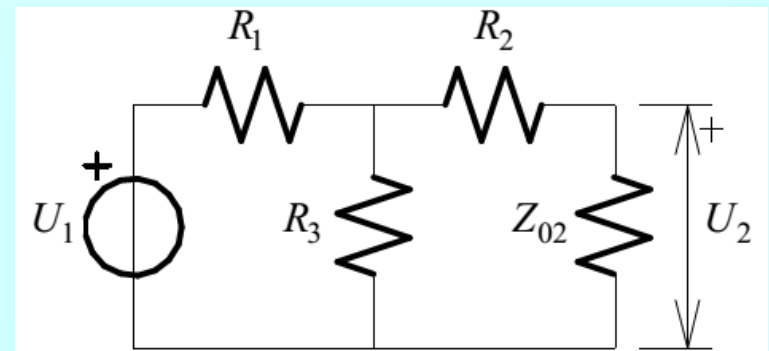
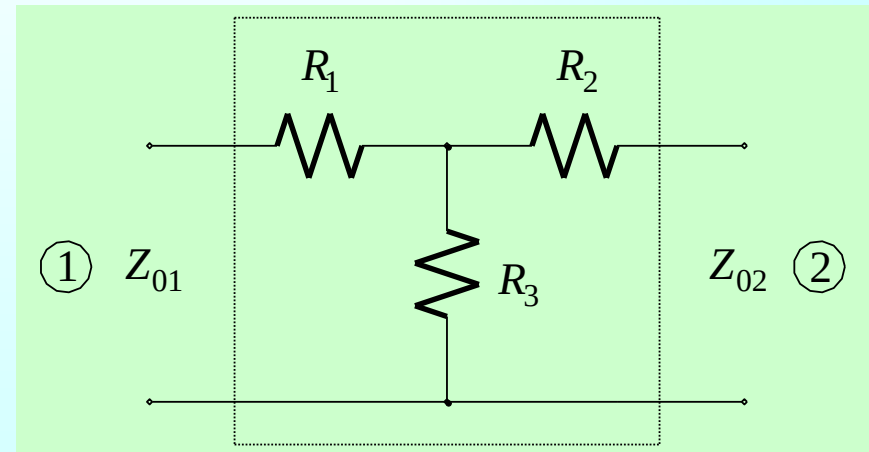


- Примена:
 - једноставан трансформатор импедансе
 - атенуатор за случај $Z_{01} \neq Z_{02}$
- Задатак: За дато Z_{01} и Z_{02} одредити R_1, R_2, R_3 и $|s_{21}|_{\max}$
- Решавање преко напона:

$$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} = \frac{U_2 \sqrt{Z_{01}}}{U_1 \sqrt{Z_{02}}} \rightarrow \max$$

$$Z_{01} = R_1 + R_3 \parallel (R_2 + Z_{02})$$

$$Z_{02} = R_2 + R_3 \parallel (R_1 + Z_{01})$$





Мрежа минималног унетог слабљења

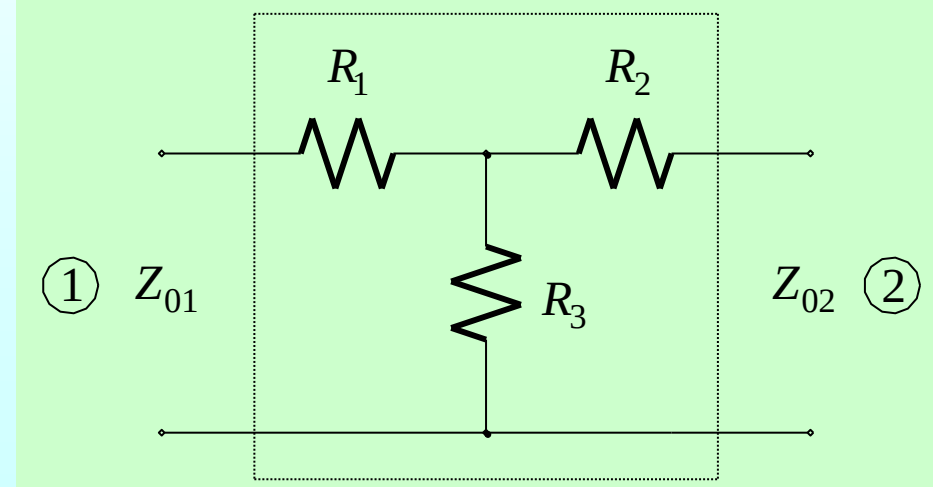
- Претпоставка (без губитка општости): $Z_{01} > Z_{02}$
- Решење:

$$R_1 = \sqrt{Z_{01}(Z_{01} - Z_{02})}, \quad R_2 = 0, \quad R_3 = \frac{Z_{02}\sqrt{Z_{01}}}{\sqrt{Z_{01} - Z_{02}}},$$

$$s_{21\max} = \frac{\sqrt{Z_{01}} - \sqrt{Z_{01} - Z_{02}}}{\sqrt{Z_{02}}}$$

- $s_{21\max}$ опада брзо са повећањем Z_{01} / Z_{02}

$$\frac{Z_{01}}{Z_{02}} = \frac{75}{50}, \quad s_{21\max} = 0,52$$



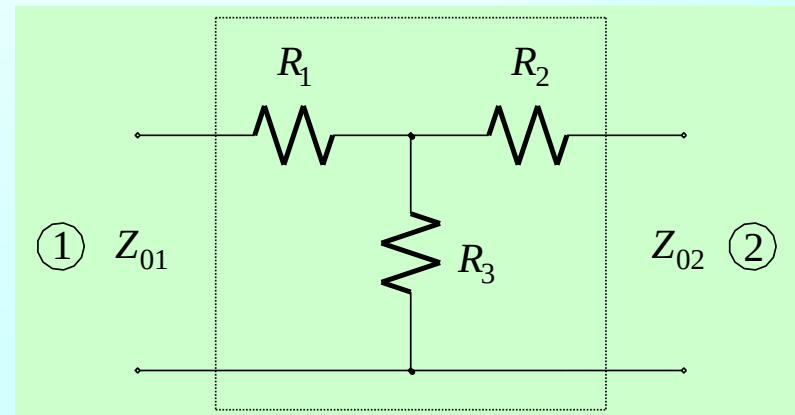
Мрежа минималног унетог слабљења



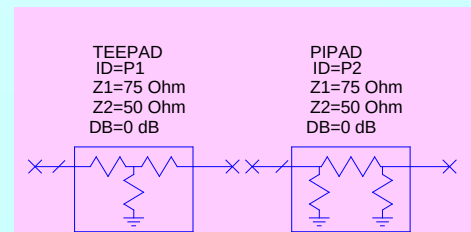
- Задатак: Направити ММУС у МВО  и WIPL-D. 
 - применом формула
 - применом оптимизације за $S_{21} \rightarrow \max$

$$R_1 = \sqrt{Z_{01}(Z_{01} - Z_{02})}, \quad R_2 = 0, \quad R_3 = \frac{Z_{02}\sqrt{Z_{01}}}{\sqrt{Z_{01} - Z_{02}}},$$

$$S_{21\max} = \frac{\sqrt{Z_{01}} - \sqrt{Z_{01} - Z_{02}}}{\sqrt{Z_{02}}}$$



- ТЕЕРАД и РИРАД
у МВО нису ММУС, већ ослабљивачи!





Померач фазе

- *Phase shifter*
- Мрежа (са 2 или више приступа) која остварује фиксну или променљиву промену фазе таласног сигнала
- Примене: фазирани антенски низови, мерења,...

- Прилагођена, реципрочна (нпр. вод) $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\varphi} \\ e^{-j\varphi} & 0 \end{bmatrix}$

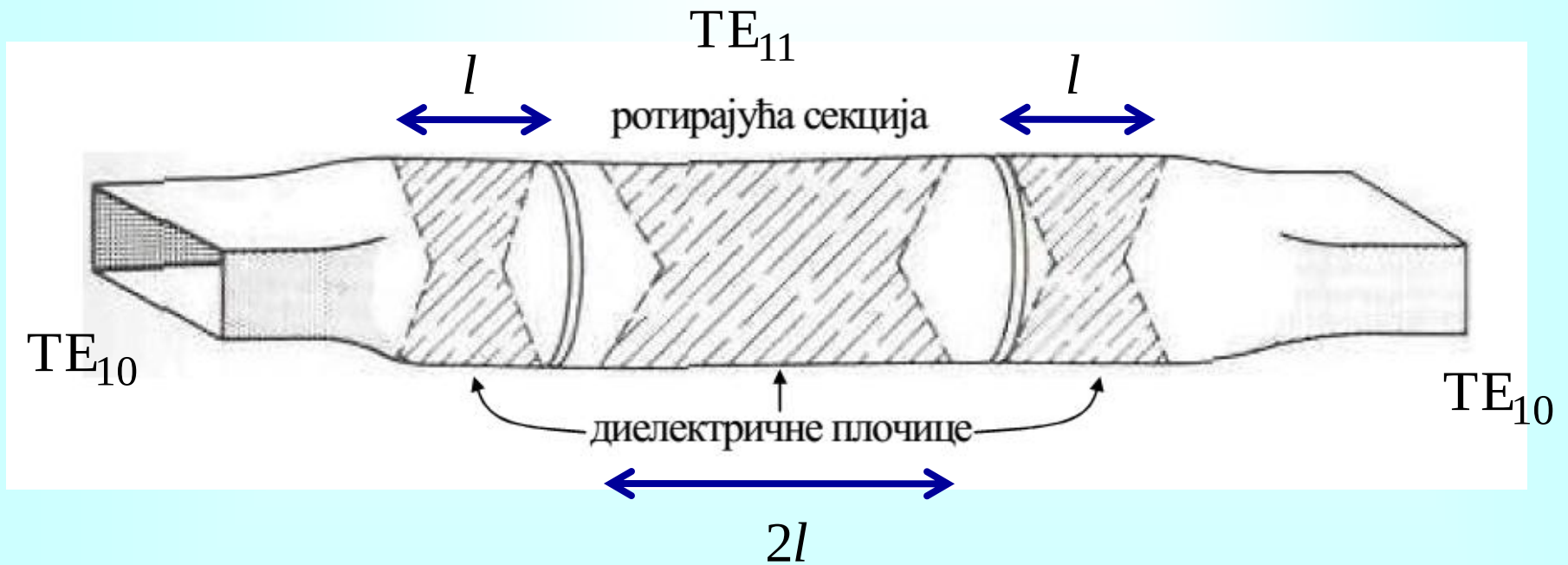
- Нереципрочна (феритна) $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & e^{-j\varphi_1} \\ e^{-j\varphi_2} & 0 \end{bmatrix}$

– жиратор $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

$$\varphi_1 = 180^\circ \quad \text{и} \quad \varphi_2 = 0^\circ$$



Ротирајући таласоводни помераач фазе

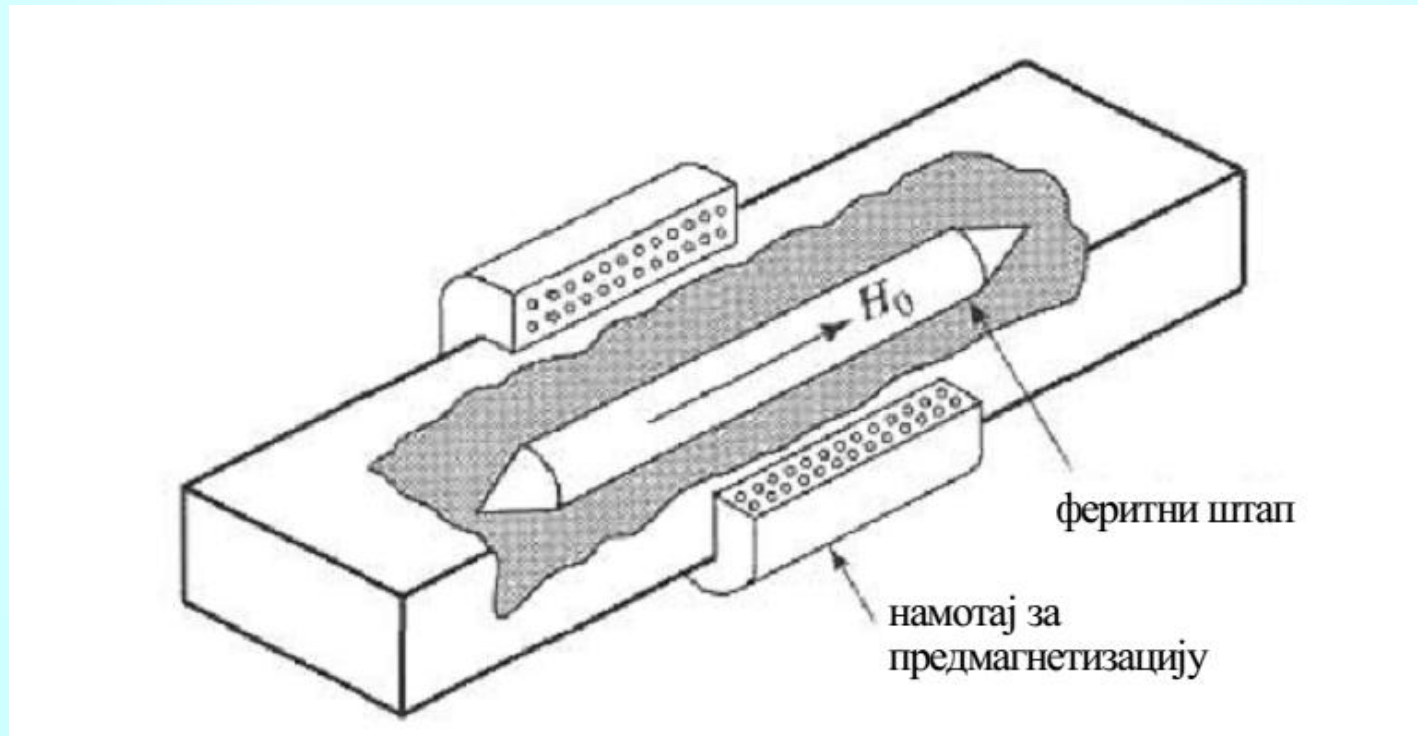


$$\varphi = 4\beta_{\parallel}l + 2\theta$$

Таласоводни реципрочни феритни померач фазе



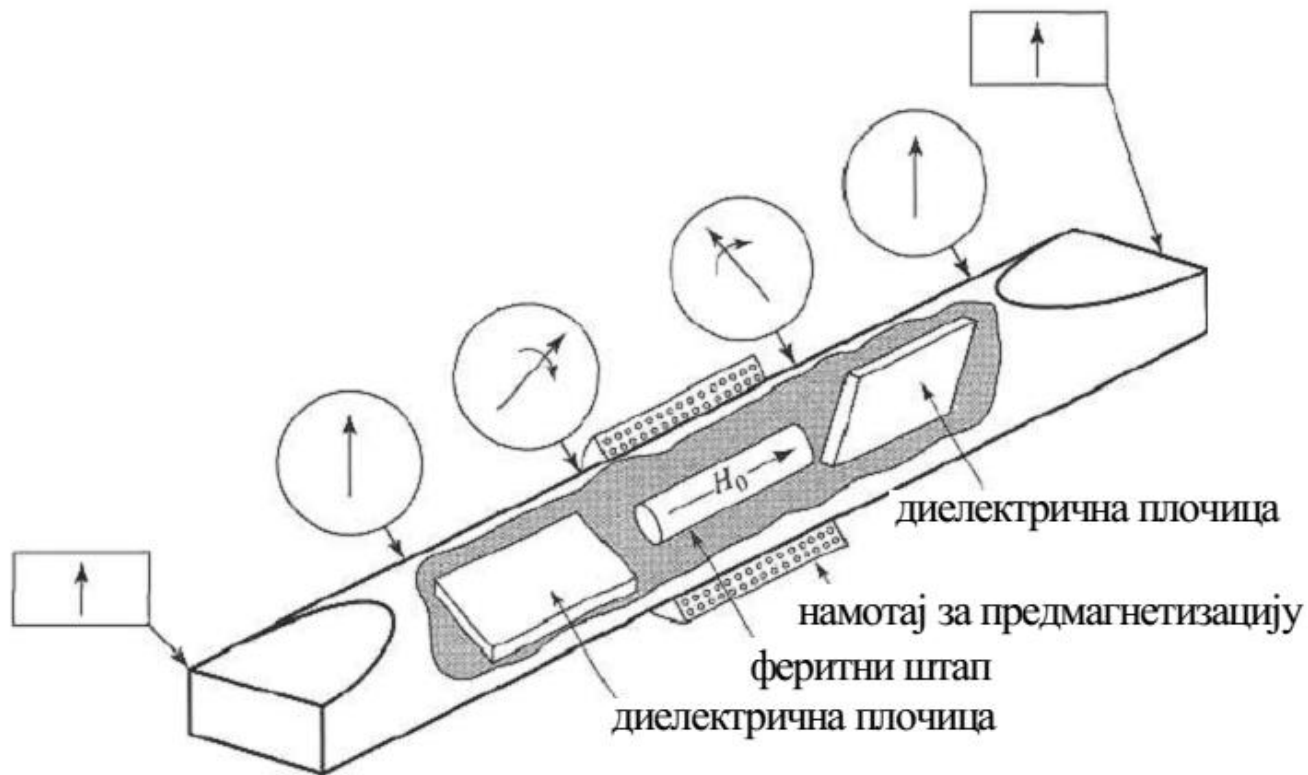
- *Reggia-Spencer* померач фазе
- Такође са феритном шипком, али реципрочан
- Мана: знатно зависи од учестаности



Таласоводни неречипрочни феритни помераач фазе



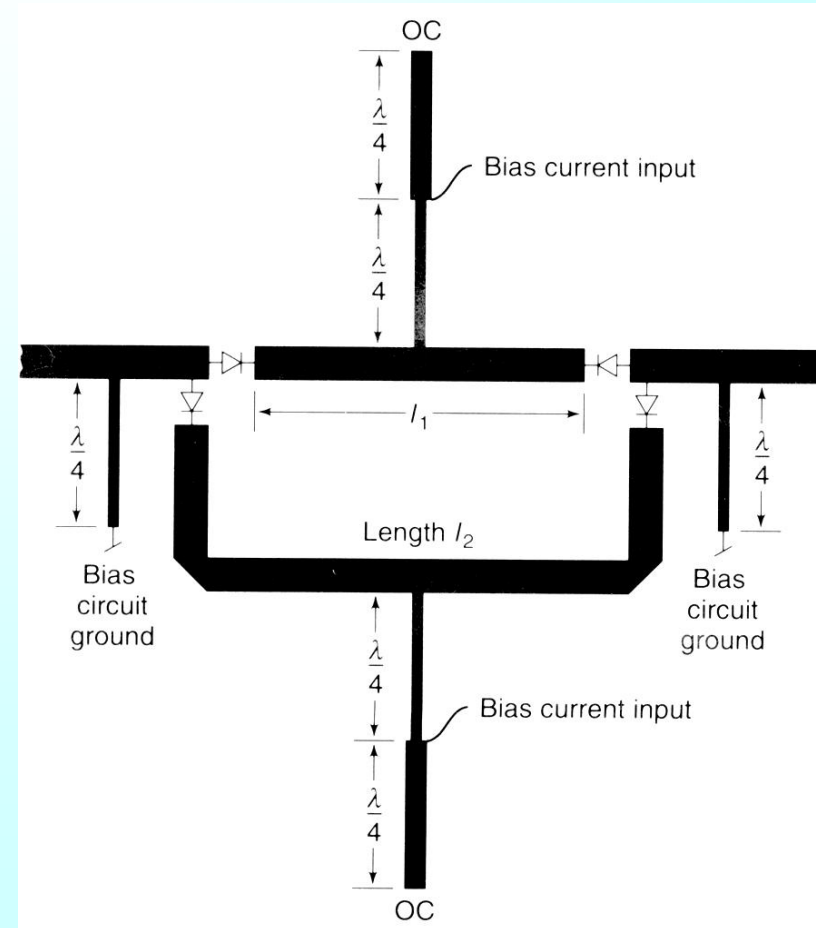
- Заснива се на Фарадејовој ротацији
- Померај фазе се регулише једносмерном струјом магнетизације (DC *bias current*)



Електронски контролисани помераач фазе у техници планарних водова (1/3)



Укључивање појединих
секција (одсечака) и
огранака водова
помоћу
прекидачких
PIN диода



Мана: редне диоде уносе губитке у вођени талас

Електронски контролисани помераачи фазе у техници планарних водова (2/3)

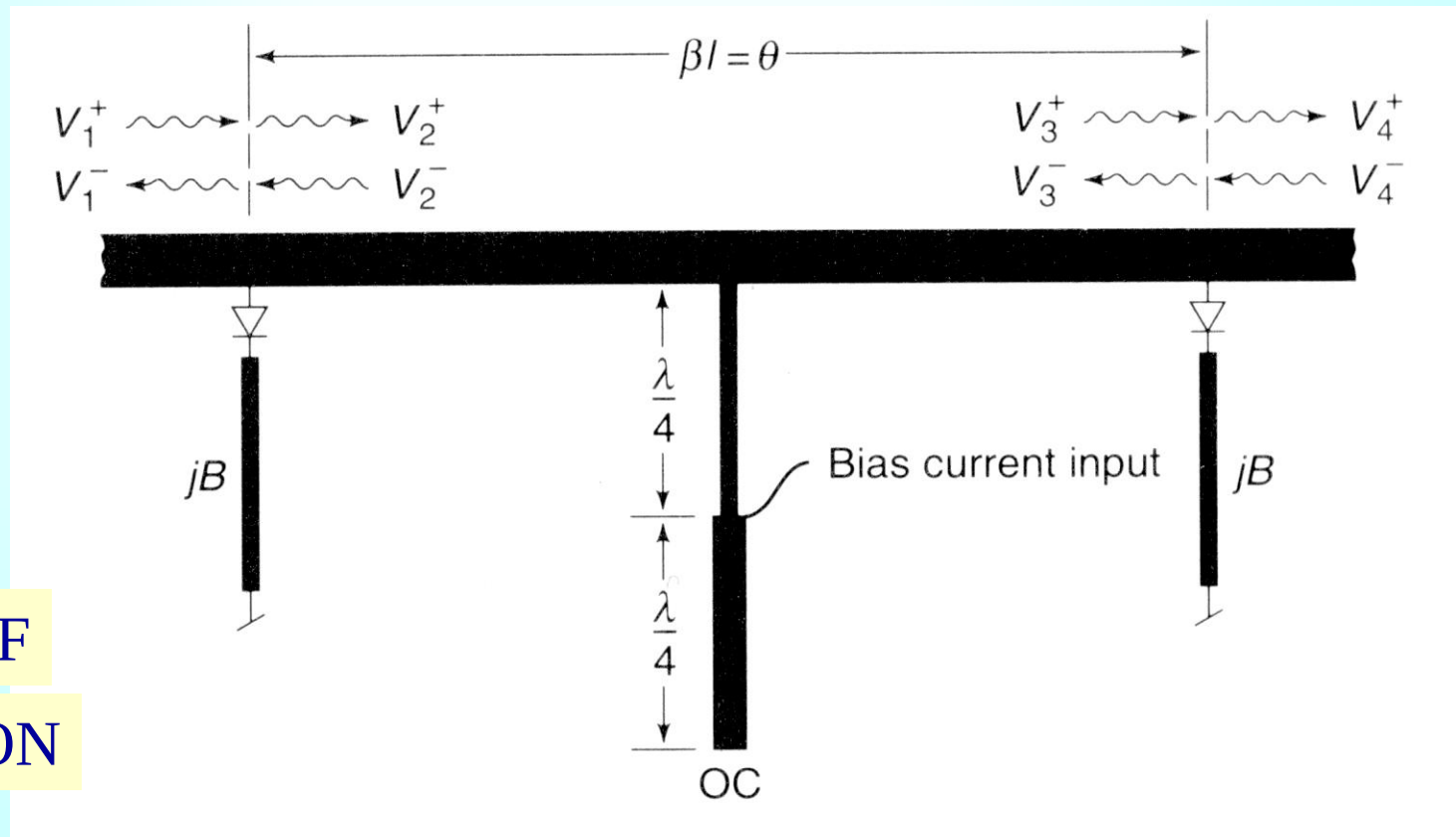


Бољи дизајн (мањи губици) без редних диода

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{2}{b}$$

$\theta = \beta l$ OFF

$\theta' = \pi - \theta$ ON

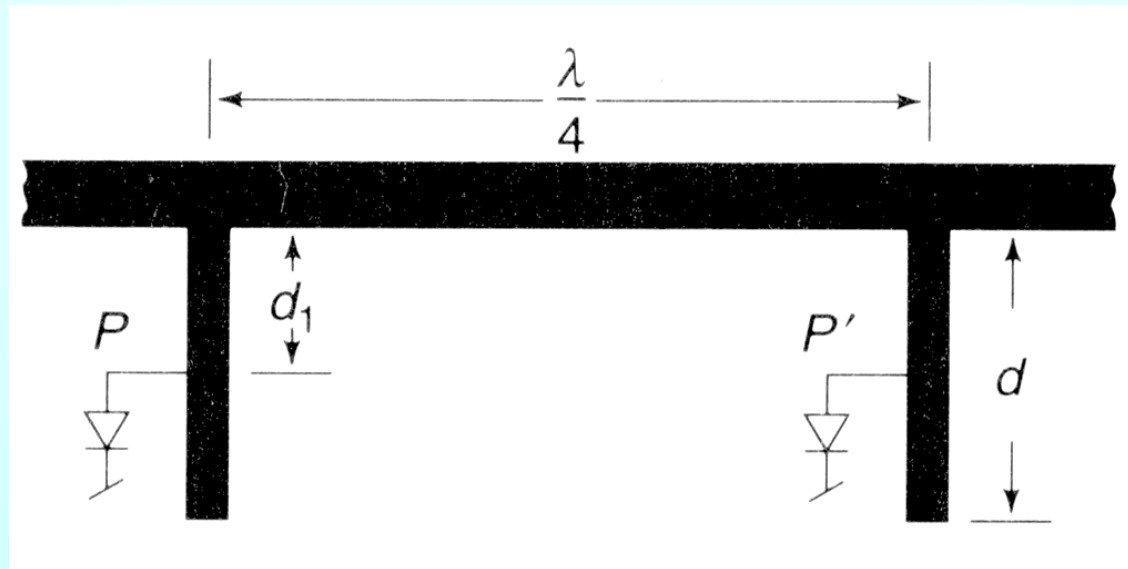


Мана: диоде кад не воде уносе паразитне капацитивности

Електронски контролисани помераачи фазе у техници планарних водова (3/3)



Бољи дизајн (мањи губици) без редних диода



$$\theta = \pi / 4$$

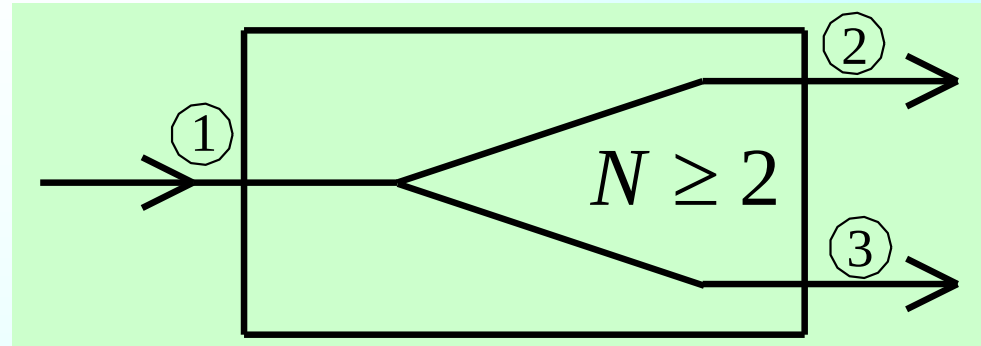
$$B_2 = -B_1$$

$$\theta_{1,2} \approx -\pi / 2 - b_{1,2}$$

Делитељ снаге



- *Power divider*
- Може да се користи и као комбајнер
- Од интереса је да делитељ буде:
 - прилагођен ($s_{11} = s_{22} = s_{33} = \dots = 0$)
 - без губитака
 - са изолованим излазима ($s_{23} = s_{32} = 0$) , али...
- Реципрочна пасивна мрежа без губитака са 3 приступа не може бити прилагођена (на свим приступима)





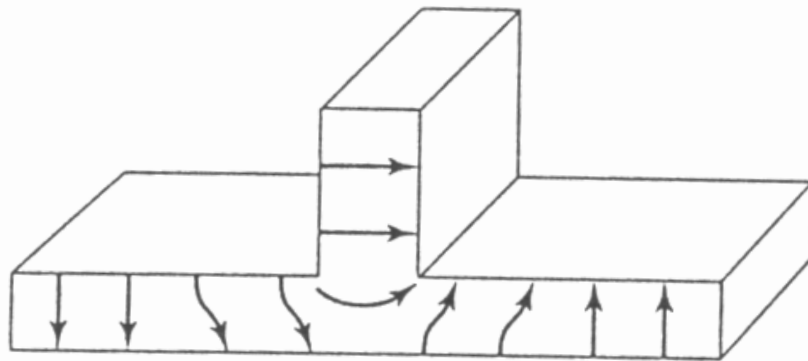
Делитељи снаге

1. Без губитака (Т-спој)
2. Са губицима (отпорнички Т-спој)
3. Вилкинсонов (Wilkinson) делитељ

Усмерени спрежњак је делитељ снаге

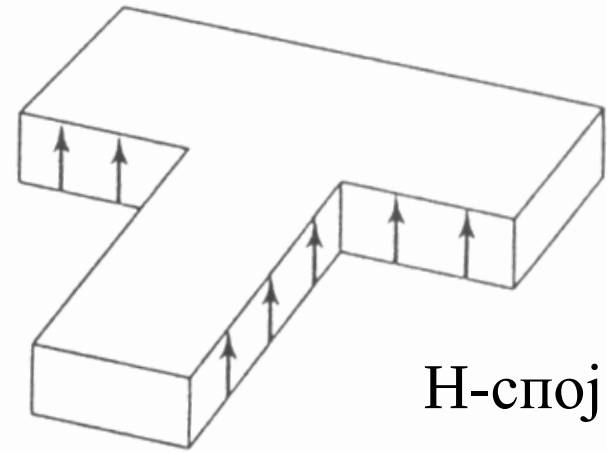


Т-спој (водова и таласовода)



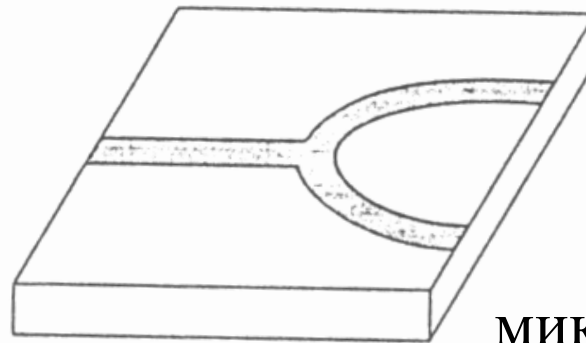
Е-спој

(a)



Н-спој

(b)



микротракасти

(c)



Пример прорачуна Т-споја

- Номиналне импедансе су Z_1, Z_2, Z_3 .
- Нека је $Z_1 = 50 \Omega$, $P_2 : P_3 = 1 : 2$
- Добија се:

$$Z_2 = 3Z_1 = 150 \Omega,$$

$$Z_3 = \frac{3}{2} Z_1 = 75 \Omega$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \sqrt{\frac{2}{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ \sqrt{\frac{2}{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix}$$



Отпорнички Т-спој

$$Z_{c1} = Z_{c2} = Z_{c3} = Z_0 \quad P_2 = P_3$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R$$

$$Z_{ul2} = R + Z_0$$

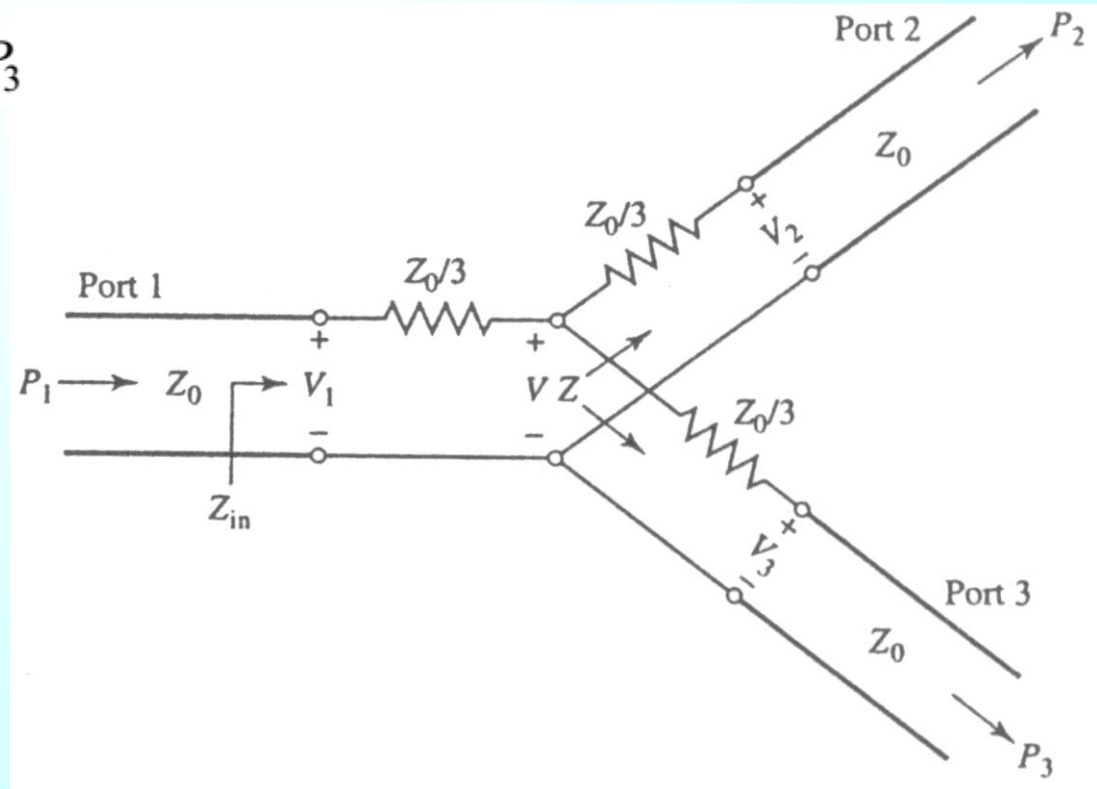
$$Z_{ul} = R + Z_{ul2} / 2$$

$$Z_{ul} = Z_0$$

$$R = Z_0 / 3$$

- Трансфер је -6dB

- 1/2 снаге се губи у отпорницима



$$\mathbf{S} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



Вилкинсонов делитель снаге

- Wilkinson је 1960. смислио начин да задовољи захтеве за

1. прилагођеност делитеља,

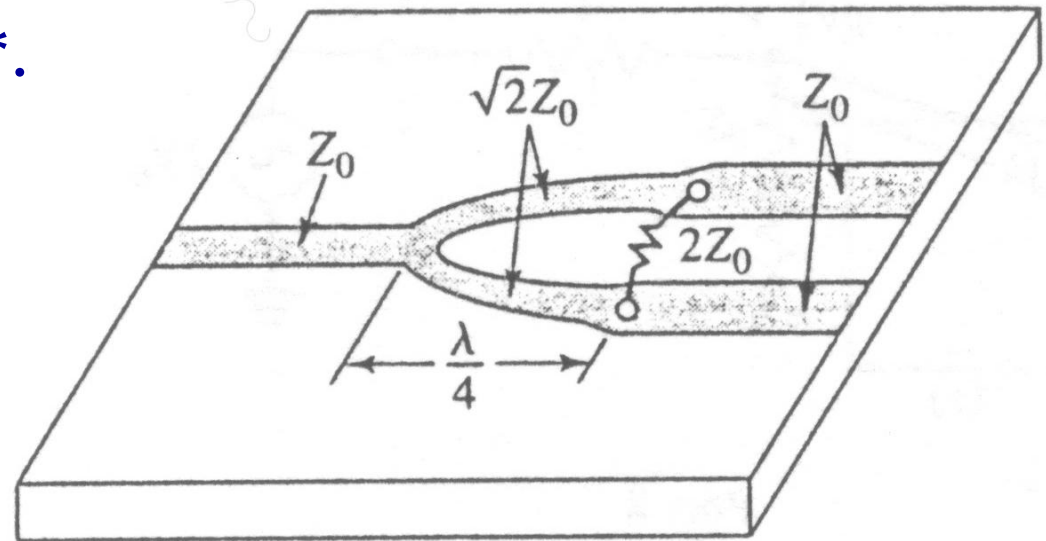
2. изолацију излаза и

3. одсуство губитака*.

$$s_{11} = 0$$

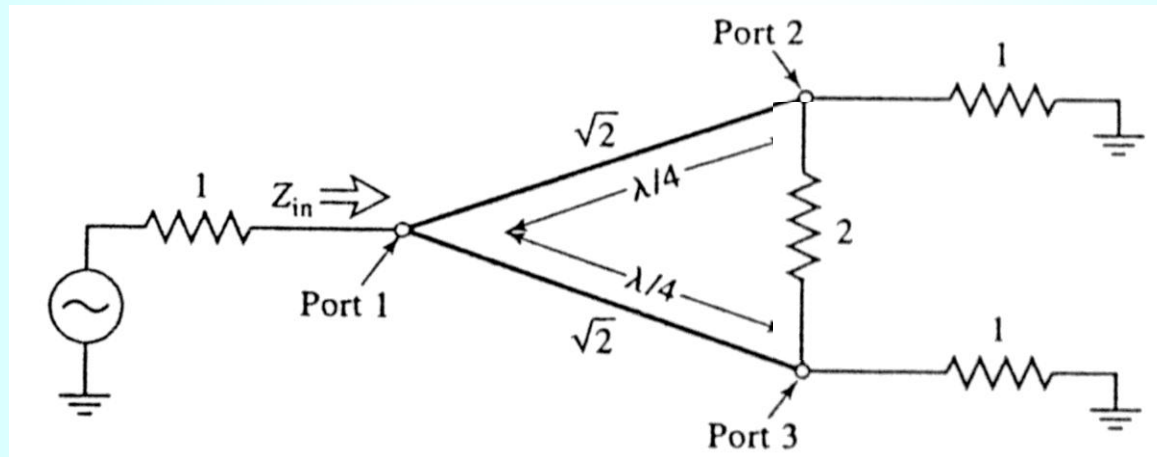
$$s_{22} = 0$$

$$s_{32} = 0$$



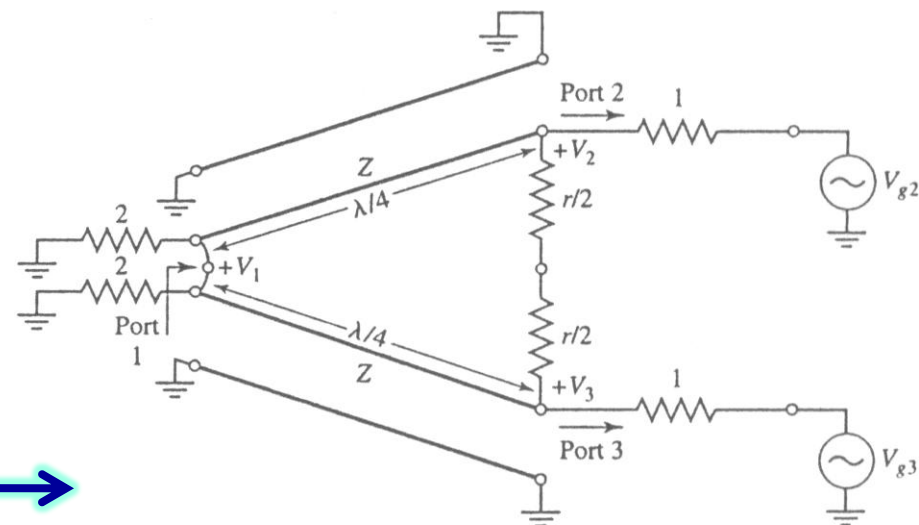
*али не ради се о мрежи без губитака

Налажење параметара Вилкинсонов делитељ снаге...



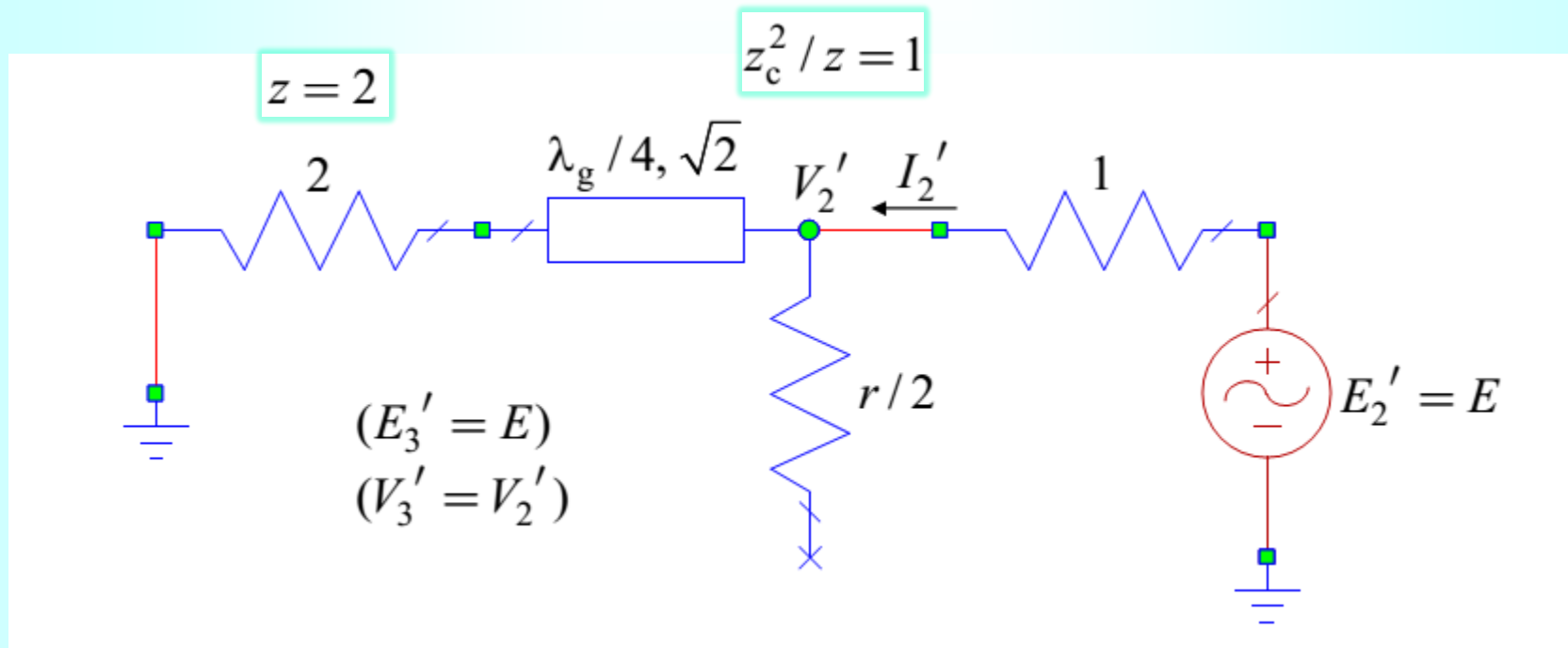
Одредимо s-параметре
посматрањем
парног (*even*) и
непарног (*odd*) мода,
тако да мрежа буде
прилагођена

$$E_2 = 2E, E_3 = 0$$





Вилкинсонов делитель, парни мод

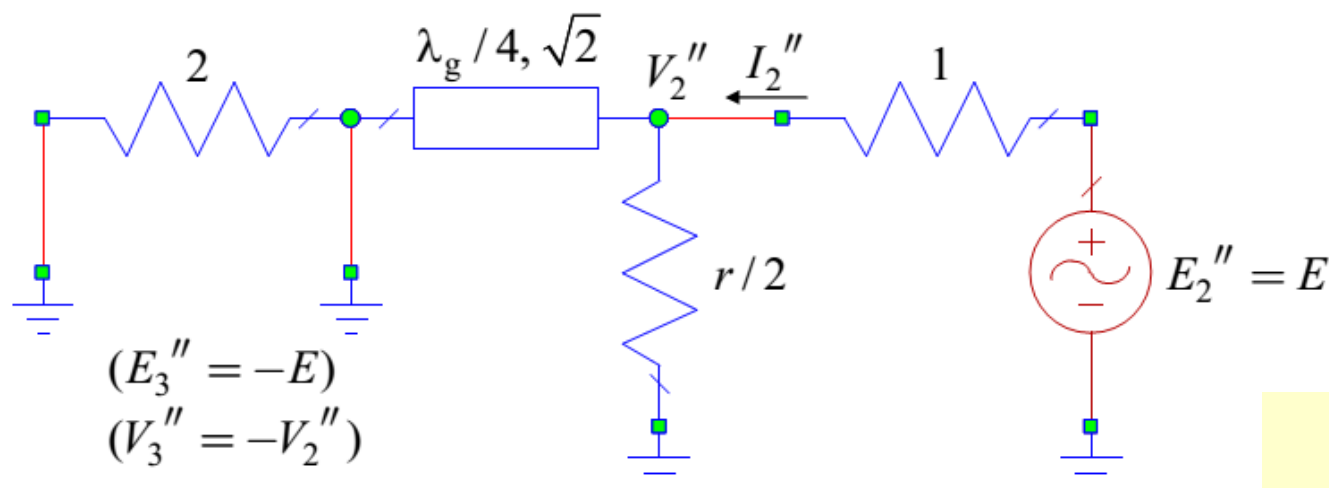


$$z_{ul2}' = 1, I_2' = E / (2Z_0), V_2' = E / 2$$



Вилкинсонов делитель, нечетный мод

$$z_{ul2}' = r/2$$



$$S = -\frac{j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$z_{ul2}'' = 1$$

$$r = 2$$

$$V_2' = V_2'' = E/2$$

$$V_2 = E$$

$$I_2' = I_2'' = E/(2Z_0)$$

$$I_2 = E/Z_0$$

$$z_{ul2} = 1$$

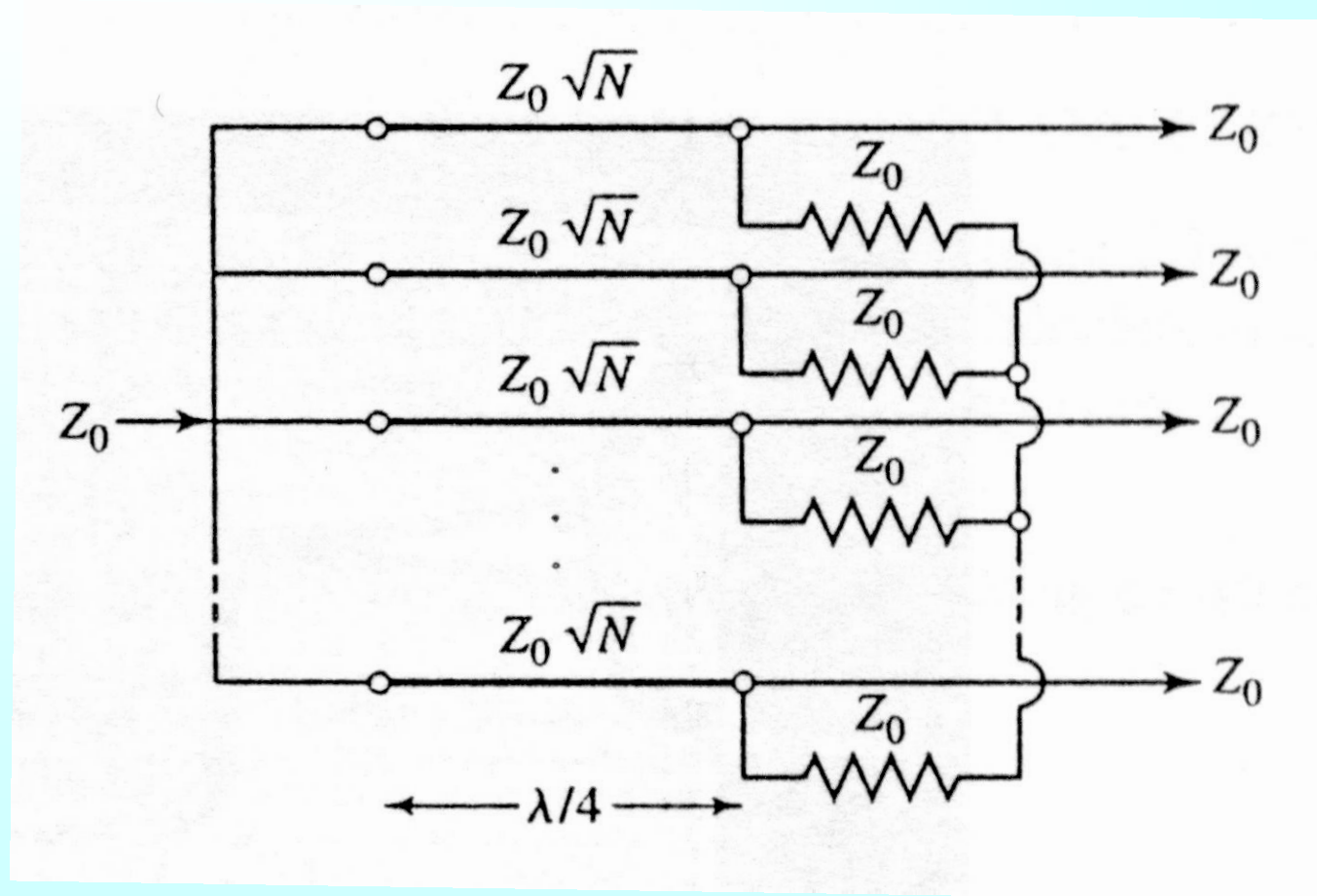
$$R = 2Z_0$$

$$V_3 = V_3' + V_3'' = 0$$

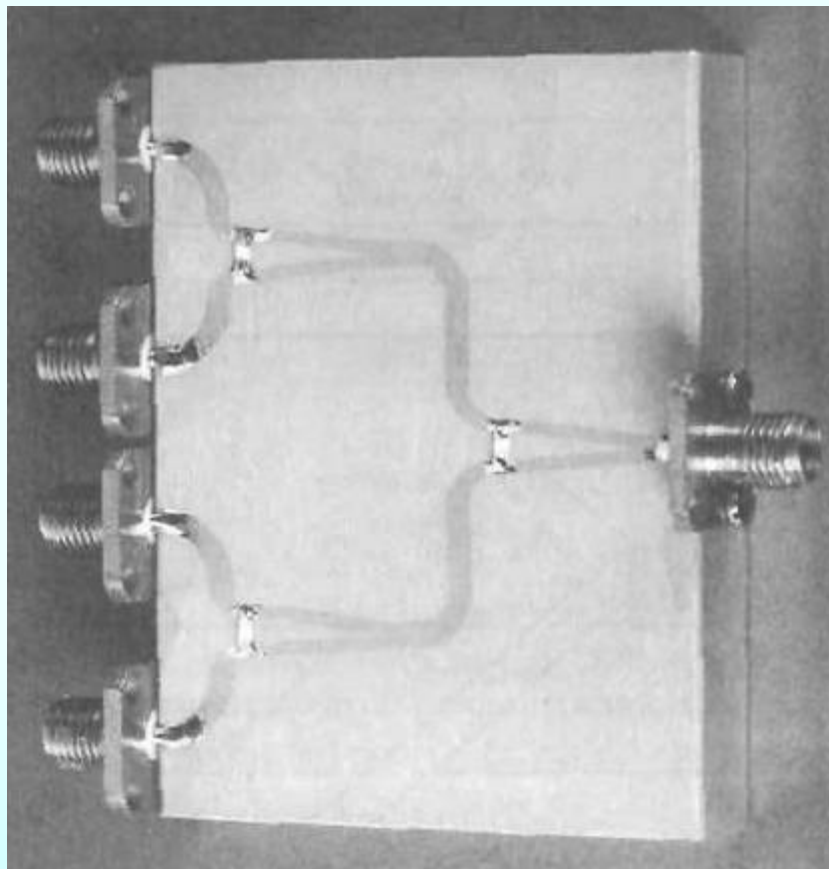
$$s_{32} = V_3/V_2 = 0$$



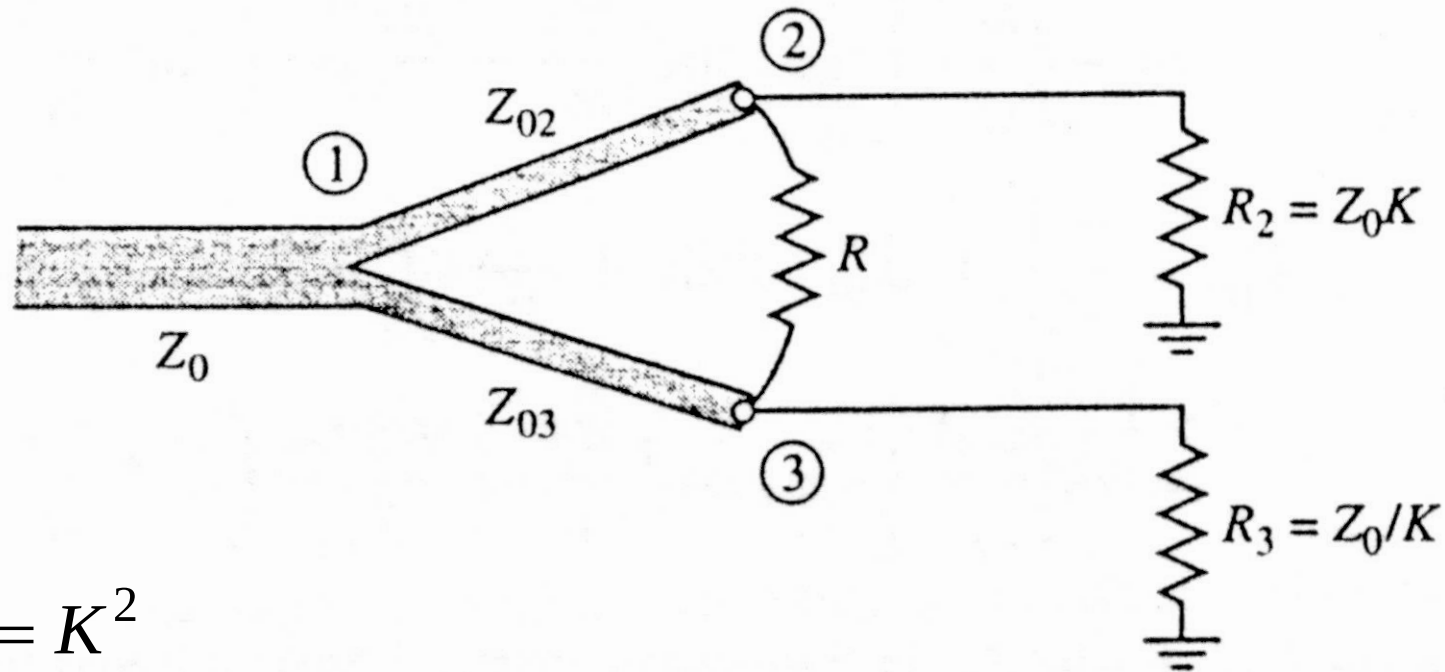
Вилкинсонов делитель са више излаза



Двостепени Вилкинсон делитель у микротракастој техници



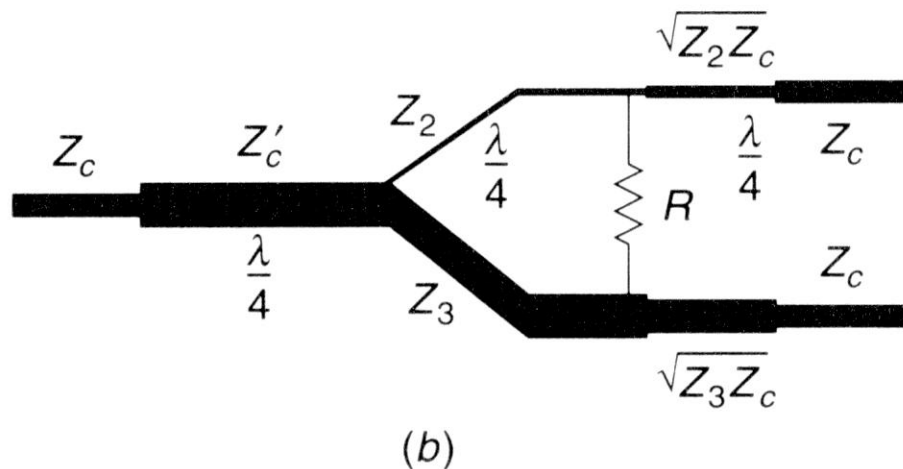
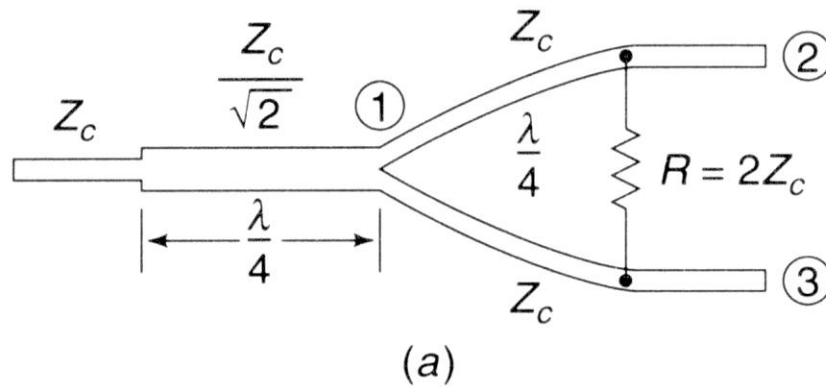
Вилкинсонов делитель са неравномерном поделом снаге



$$\frac{P_3}{P_2} = K^2$$

$$Z_{03} = Z_0 \sqrt{\frac{1+K^2}{K^3}}, \quad Z_{02} = K^2 Z_{03}, \quad R = Z_0 \left(K + \frac{1}{K} \right)$$

Вилкинсонови делители са $\lambda/4$ трансформаторима





Задатак

- Направити Вилкинсона у МВО моделујући савијутке у микротракастој техници
- ... моделујући огранке као спрегнуте микротракасте водове