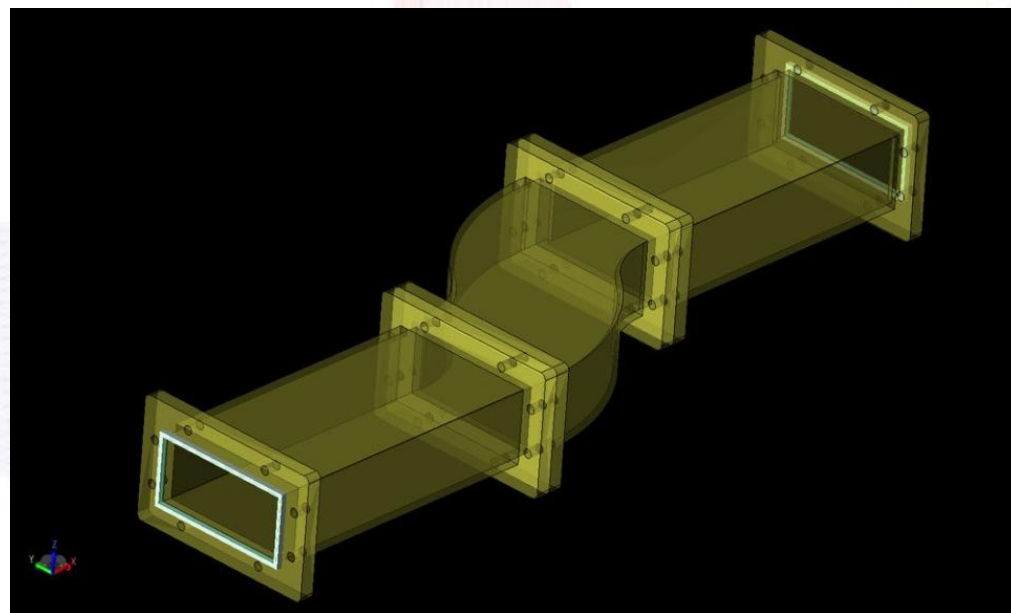
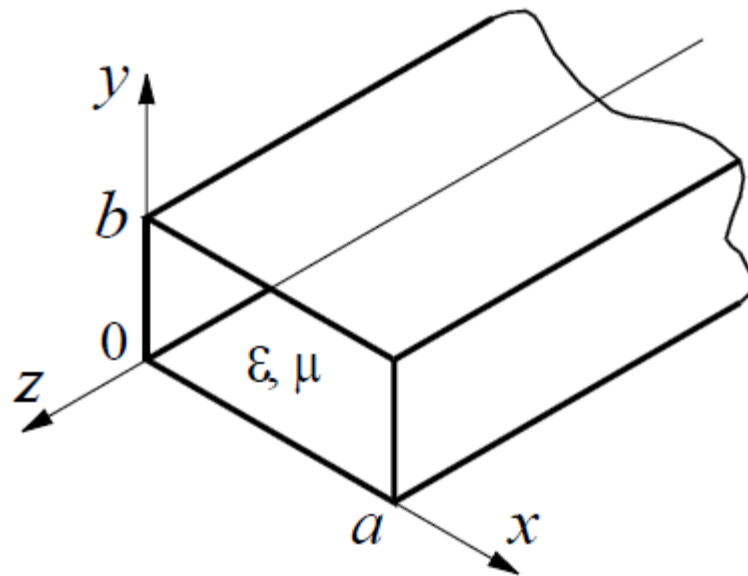


Правоугаони таласовод



Увод

- Анализираћемо простирање ЕМ таласа дуж металног таласовода правоугаоног попречног пресека
– Странице правоугаоника су a и b ($a > b$)



Слика 5.1. Правоугаони таласовод.

Увод

- Сматраћемо, најпре, да је проводник таласовода савршен и да је диелектрик хомоген и, такође, без губитака
 - Као што је раније показано, у оваквом таласоводу се могу простирати таласи ТЕ и ТМ типа, а не могу се простирати таласи ТЕМ типа
 - Биће приказани детаљи извођења структуре поља ових таласа (ТЕ и ТМ)
 - Разматраће се изрази за снагу која се преноси таласоводом, као и изрази за коефицијент слабљења
 - Биће приказане неке таласоводне компоненте (прилагођења, ослабљивачи, рачве, усмерени спрежњаци итд.) и дисконтинуитети

ТЕ и ТМ таласи у правоугаоном таласоводу - ТЕ таласи

- Сматрамо да је таласовод приказан на претходној слици без губитака
 - Основне једначине за ТЕ и ТМ таласе у оваквом систему изведене су у другом поглављу
 - Тада је показано да се код ТЕ таласа трансверзалне компоненте електричног и магнетског поља могу изразити преко z -компоненте магнетског поља, према једначинама

$$\underline{\mathbf{E}}_t = \frac{j\omega\mu}{K^2} \mathbf{i}_z \times \nabla_t \underline{H}_z \quad \underline{\mathbf{H}}_t = -\frac{\gamma}{K^2} \nabla_t \underline{H}_z$$

- У нашем случају, трансверзалне компоненте су x -компонента и y -компонента, тј.

$$\underline{\mathbf{E}}_t = \underline{E}_x \mathbf{i}_x + \underline{E}_y \mathbf{i}_y, \quad \underline{\mathbf{H}}_t = \underline{H}_x \mathbf{i}_x + \underline{H}_y \mathbf{i}_y$$

TE таласи

- Развијањем трансверзалног набла оператора у Декартовим координатама, из једначина

се добија

$$\underline{\mathbf{E}}_t = \frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \mathbf{i}_z \times \nabla_t \underline{H}_z \quad \underline{\mathbf{H}}_t = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \nabla_t \underline{H}_z$$

$$\underline{E}_x = -\frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}, \quad \underline{E}_y = \frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}$$

$$\underline{H}_x = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}, \quad \underline{H}_y = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}$$

где је $\gamma = j\beta$

TE таласи

- На основу резултата из другог поглавља, скаларна функција \underline{H}_z зависи од Декартових координата као

$$\underline{H}_z(x, y, z) = \underline{H}_z(x, y, 0) \exp(-\underline{\gamma}z)$$

и задовољава таласну једначину

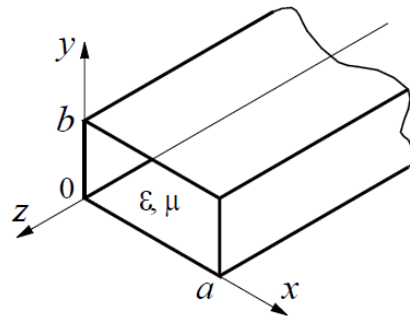
$$\Delta_t \underline{H}_z + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

која у Декартовим координатама гласи

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

TE таласи

- Електрично поље мора задовољавати граничне услове на површи проводника таласовода, тј. $\underline{E}_{\tan} = 0$
- На левом зиду таласовода ($x=0$) и на десном зиду ($x=a$) тангенцијална компонента је y -компонента, односно мора бити $\underline{E}_y(0, y, z) = \underline{E}_y(a, y, z) = 0$
- На доњем зиду таласовода ($y=0$) и на горњем зиду ($y=b$) тангенцијална компонента је x -компонента, односно мора бити $\underline{E}_x(x, 0, z) = \underline{E}_x(x, b, z) = 0$



Слика 5.1. Правоугаони таласовод.

TE таласи

- На основу ових граничних услова и једначина

$$\underline{E}_x = -\frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}, \quad \underline{E}_y = \frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}$$

добијају се гранични услови за \underline{H}_z

– Прецизније, за први извод \underline{H}_z по координати нормалној на зид таласовода

- У општем облику ови гранични услови се могу записати као $\frac{d\underline{H}_z}{dn} = 0$ где d/dn означава извод у правцу нормале на зид таласовода, односно преко Декартових координата као

$$\frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x} = 0 \text{ за } x = 0 \text{ и } x = a, \quad \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y} = 0 \text{ за } y = 0 \text{ и } y = b$$

TE таласи

- Анализа поља TE таласа у правоугаоном таласоводу сада се своди на решавање таласне једначине

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

заједно са граничним условима

$$\frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x} = 0 \text{ за } x = 0 \text{ и } x = a, \quad \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y} = 0 \text{ за } y = 0 \text{ и } y = b$$

–Када се из ових једначина одреди \underline{H}_z , остале компоненте поља се могу израчунати из једначина

$$\underline{E}_x = -\frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}, \quad \underline{E}_y = \frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}$$

$$\underline{H}_x = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}, \quad \underline{H}_y = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}$$

TE таласи

- Таласну једначину

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

Ћемо решавати **методом раздвајања променљивих**

- За успешну примену овог метода пожељно је да се површ дисконтинуитета (зидови таласовода у нашем случају) поклапају са координатним површима (са координатним равнима Декартовог система у нашем случају)
- По методи раздвајања променљивих, непозната функција се представи у облику производа (непознатих) функција које зависе само од једне координате
- У нашем случају $\underline{H}_z(x, y, 0) = \underline{X}(x)\underline{Y}(y)$ где $\underline{X}(x)$ зависи само од x -координате, а $\underline{Y}(y)$ само од y -координате

TE таласи

- Заменом једначине $\underline{H}_z(x, y, 0) = \underline{X}(x)\underline{Y}(y)$ у једначину

$$\underline{H}_z(x, y, z) = \underline{H}_z(x, y, 0) \exp(-\gamma z)$$

и заменом те једначине у таласну једначину

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

добијамо, после скраћивања фактора $\exp(-\gamma z)$

$$\frac{\partial^2 (\underline{X}\underline{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\underline{X}\underline{Y})}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{X}\underline{Y} = 0$$

- С обзиром на то да је $\partial \underline{Y} / \partial x = 0$ и $\partial \underline{X} / \partial y = 0$, одавде следи

$$\underline{Y} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2} + \underline{X} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} + \underline{K}^2 \underline{X}\underline{Y} = 0$$

где су парцијални изводи замењени обичним

TE таласи

- Дељењем претходне једначине производом $\underline{X}\underline{Y}$ ($\underline{X}\underline{Y} \neq 0$), добија се

$$\frac{1}{\underline{X}} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2} + \frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} + \underline{K}^2 = 0$$

- Коефицијент \underline{K} је раније дефинисан као $\underline{K}^2 = \gamma^2 + k^2$, где је коефицијент простирања ($\gamma = j\beta$) јединствен за цео талас, а

$$k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$$

исто у свим тачкама диелектрика таласовода, јер је диелектрик хомоген

–Према томе, \underline{K} не зависи од x и y координата

TE таласи

- У претходној диференцијалној једначини \underline{X} зависи само од x , па $d^2\underline{X}/dx^2$ може зависити само од x , тако да и

$$\underline{f}(x) = \frac{1}{\underline{X}} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2}$$

може зависити само од x

- На сличан начин закључујемо да члан

$$\underline{g}(y) = \frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2}$$

може зависити само од y

TE таласи

- Сада се једначина

$$\frac{1}{\underline{X}} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2} + \frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} + \underline{K}^2 = 0$$

своди на једначину облика $f(x) + g(y) + \underline{\text{const}} = 0$

- Очигледно, $g(y) + \underline{\text{const}}$ не зависи од x , па $f(x)$ мора бити једнако константи
 - Означимо ту константу са $-\underline{k}_x^2$ (због касније погодности)
 - Сада добијамо
- Слично томе, $g(y)$ мора бити константа, коју ћемо означити са $-\underline{k}_y^2$, односно имамо

$$\frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} = -\underline{k}_y^2$$

TE таласи

- Из једначина

$$\underline{f}(x) + \underline{g}(y) + \underline{\text{const}} = 0 \quad \frac{1}{\underline{X}} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2} = -\underline{k}_x^2 \quad \frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} = -\underline{k}_y^2$$

следи да \underline{k}_x и \underline{k}_y морају задовољавати једначину

$$\underline{k}_x^2 + \underline{k}_y^2 = \underline{K}^2$$

- Једначине $\frac{1}{\underline{X}} \frac{d^2 \underline{X}}{dx^2} = -\underline{k}_x^2$ и $\frac{1}{\underline{Y}} \frac{d^2 \underline{Y}}{dy^2} = -\underline{k}_y^2$ су обичне диференцијалне једначине другог реда са константним коефицијентима

$$\underline{X}(x) = \underline{C}_1 \sin(k_x x) + \underline{C}_2 \cos(k_x x)$$

– Њихова општа решења су $\underline{Y}(y) = \underline{C}_3 \sin(k_y y) + \underline{C}_4 \cos(k_y y)$

- У овим једначинама узето је да су \underline{k}_x и \underline{k}_y реалне величине, као што ће бити показано касније

TE таласи

- На основу овога, опште решење таласне једначине

$$\frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{H}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{H}_z = 0$$

је $\underline{H}_z(x, y, z) = (\underline{C}_1 \sin(k_x x) + \underline{C}_2 \cos(k_x x))(\underline{C}_3 \sin(k_y y) + \underline{C}_4 \cos(k_y y)) \exp(-\underline{\gamma} z)$

- Према граничним условима

$$\frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x} = 0 \text{ за } x = 0 \text{ и } x = a, \quad \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y} = 0 \text{ за } y = 0 \text{ и } y = b$$

мора бити $\underline{C}_1 = 0$ (да би био задовољен услов за $x = 0$),
 $\sin k_x a = 0$ (да би био задовољен услов за $x = a$),
 $\underline{C}_3 = 0$ (да би био задовољен услов за $y = 0$) и $\sin k_y b = 0$
(да би био задовољен услов за $y = b$)

TE таласи

- Из претходних услова следе услови

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad m = 0,1,2,\dots, \quad k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 0,1,2,\dots$$

- Ако уведемо ознаку $\underline{C}_2\underline{C}_4 = \underline{H}_0$, где је \underline{H}_0 комплексна константа, добијамо

$$\underline{H}_z(x, y, z) = \underline{H}_0 \cos \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

- На основу једначина

$$\underline{E}_x = -\frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}, \quad \underline{E}_y = \frac{j\omega\mu}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}$$

$$\underline{H}_x = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial x}, \quad \underline{H}_y = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{H}_z}{\partial y}$$

добијају се изрази за трансверзалне компоненте електричног и магнетског поља

TE таласи

$$\underline{E}_x(x, y, z) = \frac{j\omega\mu}{K^2} \underline{H}_0 \frac{n\pi}{b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{E}_y(x, y, z) = -\frac{j\omega\mu}{K^2} \underline{H}_0 \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

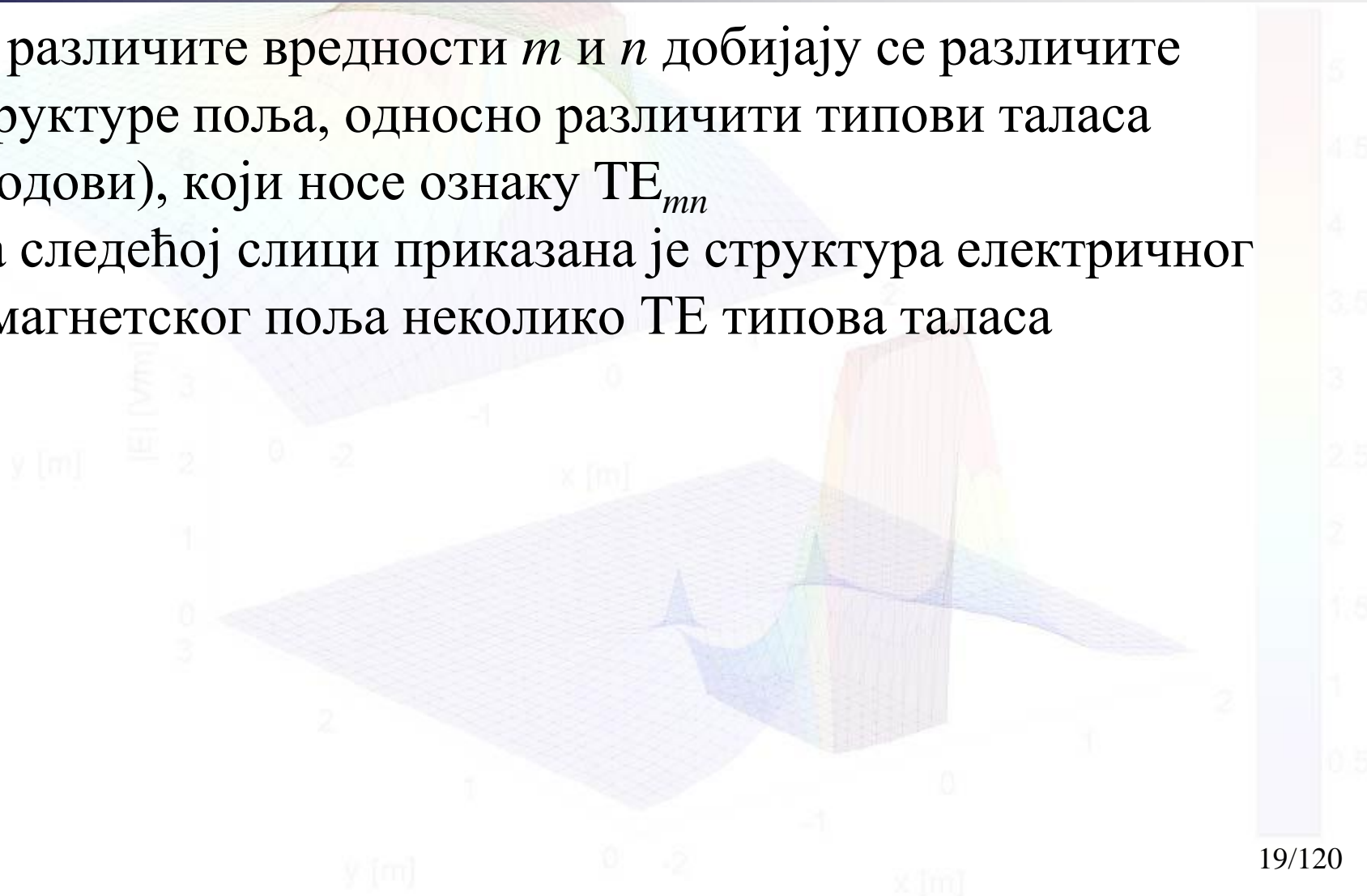
$$\underline{H}_x(x, y, z) = \frac{j\beta}{K^2} \underline{H}_0 \frac{m\pi}{a} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{H}_y(x, y, z) = \frac{j\beta}{K^2} \underline{H}_0 \frac{n\pi}{b} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

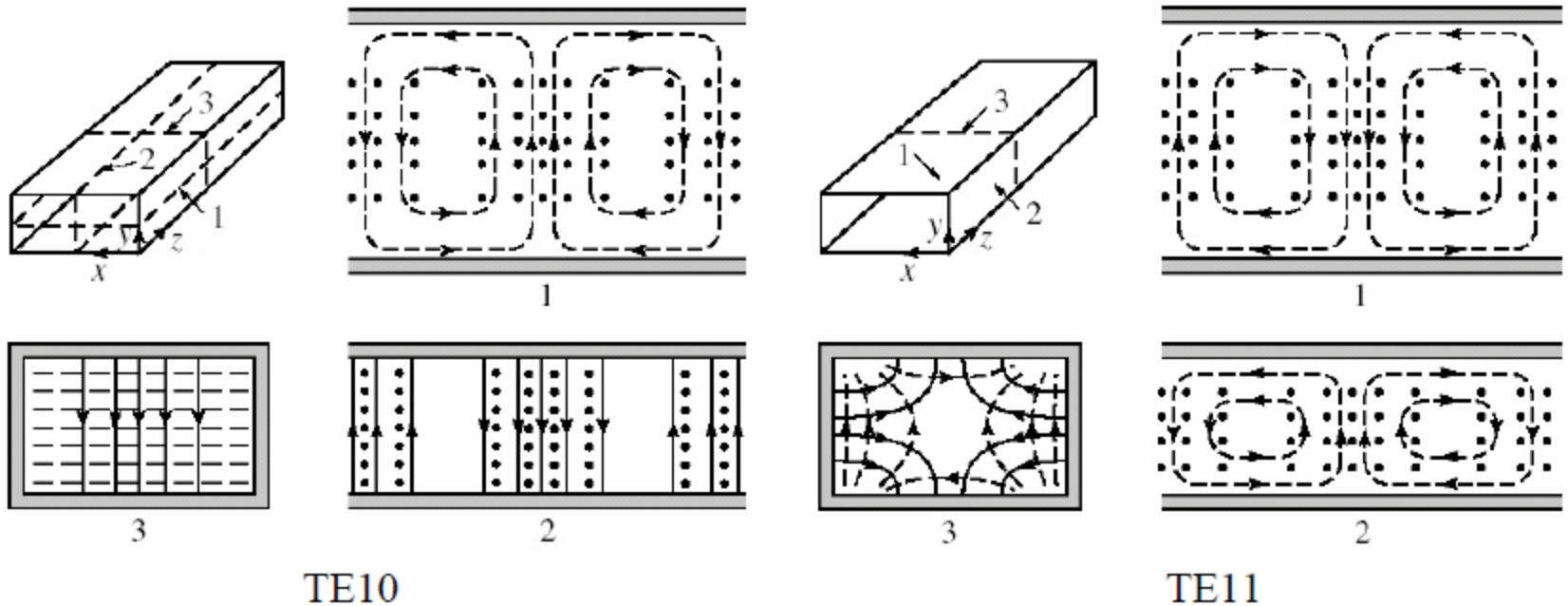
- У горњим изразима је $K^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$ и $\beta = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$
 - Из претходних једначина је очигледно да **не може истовремено бити $m=0$ и $n=0$**
 - У противном, не постоји електрично поље ($\underline{E}_x=0$ и $\underline{E}_y=0$), па стога не постоји ни талас

TE таласи

- За различите вредности m и n добијају се различите структуре поља, односно различити типови таласа (модови), који носе ознаку TE_{mn}
- На следећој слици приказана је структура електричног и магнетског поља неколико TE типова таласа



TE таласи



Слика 5.2. Линије електричног поља (—) и магнетског поља (---) неких TE и TM типова таласа у уздужном и попречном пресеку правоугаоног таласовода.

TE таласи

- На основу једначине

$$f_c = \frac{K}{2\pi\sqrt{\epsilon\mu}}$$

за критичну учестаност TE_{mn} типа таласа се добија

$$f_{cTE_{mn}} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

- На основу претходне једначине и једначине

$$\underline{Z}_{TE} = \frac{\underline{Z}_{TEM}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

може се израчунати таласна импеданса TE_{mn} типа таласа

TE таласи

- Ако је $a > b$, онда најнижу критичну учестаност има TE_{10} тип таласа, који се назива **доминантним типом таласа**
 - Видећемо касније да сви ТМ типови таласа имају критичну учестаност вишу од TE_{10} типа таласа
- Критична учестаност доминантног типа таласа је

$$f_{cTE_{10}} = \frac{1}{2a\sqrt{\epsilon\mu}}$$

TE таласи

- Испитајмо сада који TE_{mn} тип таласа има следећу критичну учестаност
 - То мора бити талас TE_{20} или TE_{01}
 - Ако је $a/2 < b < a$, онда најнижу критичну учестаност, после TE_{10} типа таласа, има TE_{01} тип таласа

$$f_{cTE_{01}} = \frac{1}{2b\sqrt{\epsilon\mu}}$$

- Ако је $b < a/2$, најнижу критичну учестаност после доминантног типа таласа има TE_{20} тип таласа

$$f_{cTE_{20}} = \frac{1}{a\sqrt{\epsilon\mu}}$$

TE таласи

- Стандардни таласоводи се обично праве тако да је $b = a/2$
 - Тада је $f_{cTE_{20}} = f_{cTE_{01}} = 2f_{cTE_{10}}$
 - У опсегу учестаности од **једне октаве**, од $f_{cTE_{10}}$ до $2f_{cTE_{10}}$, од свих TE_{mn} типова таласа у таласоводу се може простирати само доминантни тип таласа
 - Видећемо да се у том опсегу не може простирати ниједан од TM_{mn} типова таласа

TE таласи

- С обзиром на то да је доминантни тип таласа најважнији, наводимо изразе за компоненте поља овог типа таласа

$$\underline{H}_z(x, y, z) = \underline{H}_0 \cos \frac{\pi x}{a} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{E}_y(x, y, z) = -j\omega\mu \underline{H}_0 \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi x}{a} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{H}_x(x, y, z) = j\beta \underline{H}_0 \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi x}{a} \exp(-j\beta z)$$

- Све остале компоненте поља су једнаке нули

TM таласи

- Код TM таласа, на основу једначина

$$\underline{\mathbf{E}}_t = -\frac{\gamma}{\underline{K}^2} \nabla_t \underline{E}_z \quad \underline{\mathbf{H}}_t = -\frac{j\omega\varepsilon}{\underline{K}^2} \mathbf{i}_z \times \nabla_t \underline{E}_z$$

трансверзалне компоненте електричног и магнетског поља могу се изразити преко z -компоненте електричног поља као

$$\underline{E}_x = -\frac{j\beta}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x}, \quad \underline{E}_y = -\frac{j\beta}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y}$$

$$\underline{H}_x = \frac{j\omega\varepsilon}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial y}, \quad \underline{H}_y = -\frac{j\omega\varepsilon}{\underline{K}^2} \frac{\partial \underline{E}_z}{\partial x}$$

TM таласи

- Раније је показано да скаларна функција \underline{E}_z зависи од Декартове z -координате као

$$\underline{E}_z(x, y, z) = \underline{E}_z(x, y, 0) \exp(-\underline{\gamma}z)$$

и задовољава таласну једначину

$$\Delta_t \underline{E}_z + \underline{K}^2 \underline{E}_z = 0$$

која у Декартовим координатама гласи

$$\frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \underline{E}_z}{\partial y^2} + \underline{K}^2 \underline{E}_z = 0$$

- Као и код ТЕ таласа, електрично поље мора задовољавати граничне услове $\underline{E}_{\tan} = 0$
 - Сада је \underline{E}_z тангенцијално на површ проводника, па мора бити $\underline{E}_z = 0$ на сва четири зида таласовода (тј за $x=0$, $x=a$, $y=0$ и $y=b$)

TM таласи

- Претходна таласна једначина може се решити слично као код ТЕ таласа, методом раздвајања променљивих –Идентичним поступком као код анализе ТЕ таласа добија се опште решење за \underline{E}_z дато са
$$\underline{E}_z(x, y, z) = (\underline{C}_1 \sin(k_x x) + \underline{C}_2 \cos(k_x x))(\underline{C}_3 \sin(k_y y) + \underline{C}_4 \cos(k_y y)) \exp(-\underline{\gamma} z)$$
- Према граничним условима, сада мора бити $\underline{C}_2 = 0$, $\sin k_x a = 0$, $\underline{C}_4 = 0$ и $\sin k_y b = 0$
- Одавде се добијају услови идентични раније добијеним условима

$$k_x = \frac{m\pi}{a}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad k_y = \frac{n\pi}{b}, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

TM таласи

- Ако означимо производ $\underline{C}_1 \underline{C}_3$ са \underline{E}_0 , добија се, коначно

$$\underline{E}_z(x, y, z) = \underline{E}_0 \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{E}_x(x, y, z) = -\frac{j\beta}{\underline{K}^2} \underline{E}_0 \frac{m\pi}{a} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{E}_y(x, y, z) = -\frac{j\beta}{\underline{K}^2} \underline{E}_0 \frac{n\pi}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

$$\underline{H}_x(x, y, z) = \frac{j\omega\varepsilon}{\underline{K}^2} \underline{E}_0 \frac{n\pi}{b} \sin \frac{m\pi x}{a} \cos \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

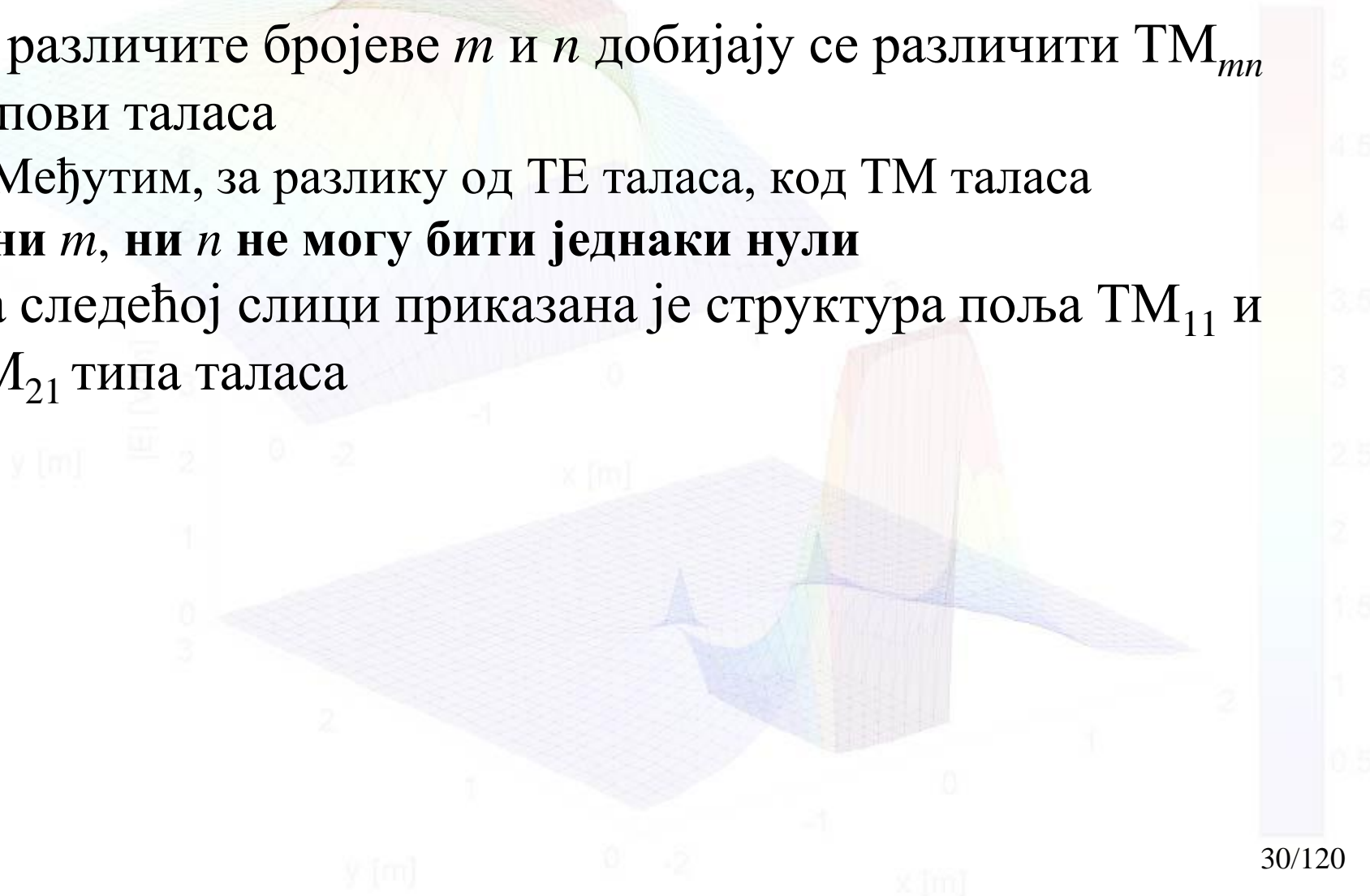
$$\underline{H}_y(x, y, z) = -\frac{j\omega\varepsilon}{\underline{K}^2} \underline{E}_0 \frac{m\pi}{a} \cos \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \exp(-j\beta z)$$

где је

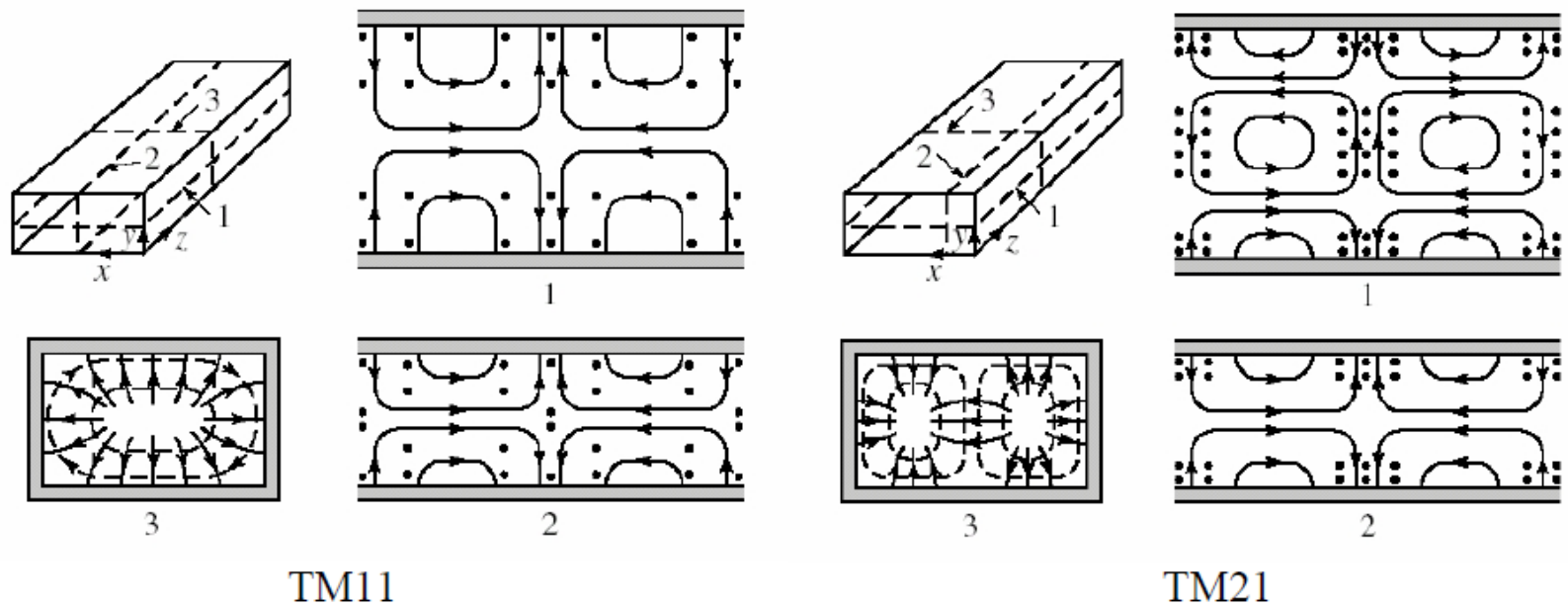
$$\underline{K}^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \quad \beta = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$$

TM таласи

- За различите бројеве m и n добијају се различити TM_{mn} типови таласа
 - Међутим, за разлику од TE таласа, код TM таласа **ни m , ни n не могу бити једнаки нули**
- На следећој слици приказана је структура поља TM_{11} и TM_{21} типа таласа



TM таласи



Слика 5.2. Линије електричног поља (————) и магнетског поља (---) неких TE и TM типова таласа у уздужном и попречном пресеку правоугаоног таласовода.

TM таласи

- Формула за критичну учестаност TM типа таласа је иста као за TE тип таласа

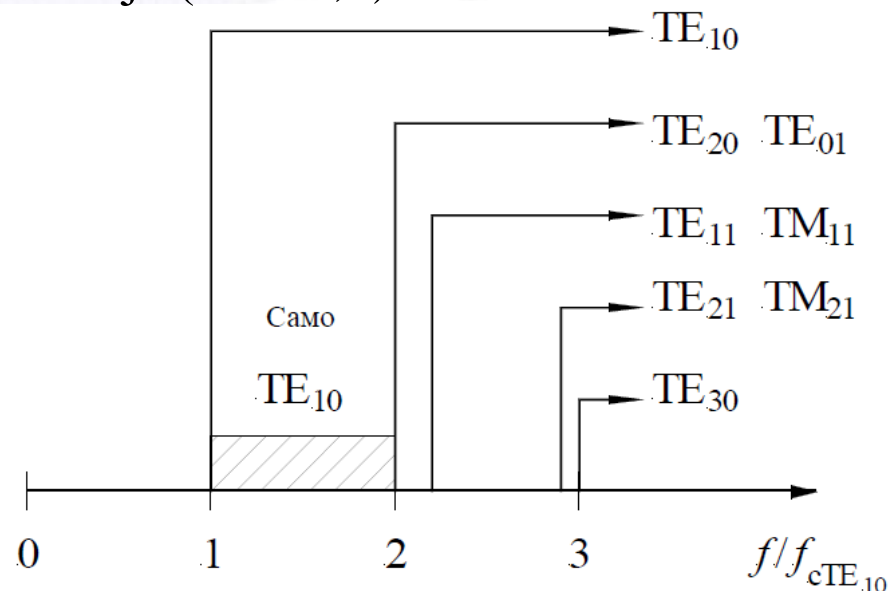
$$f_{cTM_{mn}} = \frac{1}{2\sqrt{\epsilon\mu}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}$$

- Таласна импеданса TM_{mn} типа таласа израчунава се помоћу формуле

$$\underline{Z}_{TM} = \underline{Z}_{TEM} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

TM таласи

- Најнижу критичну учестаност од TM_{mn} типова таласа има TM_{11} тип таласа
 - Ова учестаност је виша и од $f_{cTE_{10}}$, и од $f_{cTE_{01}}$
 - На слици је приказан распоред критичних учестаности за таласовод стандардних димензија ($b/a=0,5$)



Слика 5.3. Распоред критичних учестаности TE_{mn} и TM_{mn} типова таласа за стандардни правоугаони таласовод ($b/a = 0,5$).

TM таласи

- У опсегу учестаности од $f_{\text{сTE}_{10}}$ до $f_{\text{сTE}_{20}}$ у таласоводу се може простирати само доминантни тип таласа
 - Ово је у пракси важно из следећих разлога
 - Начин спрезања таласовода са другим елементима микроталасних кола (на пример, са коаксијалним водовима) зависи од типа таласа
 - Ако се на једном крају таласовода побуди један тип таласа, на другом крају таласовода ћемо моћи да извучемо енергију из таласа само ако је систем за спрегу прилагођен том типу таласа
 - На пример, ако побудимо доминантни тип таласа, на месту пријема спрега мора бити прилагођена том типу таласа

ТМ таласи

- Када би таласовод био униформан (**и без губитака**), енергија коју пошаљемо једним типом таласа стигла би на други крај таласовода у потпуности у том истом типу таласа
 - Међутим, због неизбежних дисконтинуитета (савијутака, спојева и сличног), на сваком месту где таласовод није униформан структура поља одступа од оне коју има доминантни тип таласа
- Такво поље се може, формално, представити као суперпозиција свих могућих типова таласа
 - Међутим, сви таласи чија је критична учестаност изнад радне учестаности не могу се простирати, док се таласи чија је критична учестаност довољно ниска могу простирати
 - Таласи који се побуђују на дисконтинуитету, а могу се простирати, са собом односе део енергије
 - » Због спреге, међутим, на месту пријема из таласовода **не можемо** извући енергију свих тих типова таласа

TM таласи

- Простирање виших типова таласа (дакле, свих осим доминантног типа) може се спречити ако се радна учестаност узме у опсегу од $f_{\text{сТЕ}_{10}}$ до $f_{\text{сТЕ}_{20}}$ (код таласовода стандардних димензија)
 - Стога тај опсег представља нормалан радни опсег таласовода
 - Видећемо касније, међутим, да ни цео тај опсег није технички употребљив због врло великих губитака који се јављају у близини критичне учестаности доминантног типа таласа

TM таласи

- За анализу стојећих таласа на таласоводу може се, формално, применити исти апарат као код водова, само што сада улогу напона преузима трансверзално електрично поље, улогу струје преузима трансверзално магнетско поље, а улогу карактеристичне импедансе код водова преузима код таласовода таласна импеданса

TM таласи

- С обзиром на то да су, код прогресивног таласа, трансверзалне компоненте електричног и магнетског поља синфазне у једном попречном пресеку таласовода, у рачуну се може узети електрично и магнетско поље дуж било које линије паралелне z -оси
 - На пример, код доминантног типа таласа се може узети најјаче поље (за $x = a/2$), али се интензитет тог репрезентативног електричног поља може одабрати и узимајући у обзир снагу која се преноси таласоводом, као што ће бити објашњено у осмом поглављу

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Средња снага која се преноси прогресивним таласом у правоугаоном таласоводу може се израчунати из

израза

$$P_t = \operatorname{Re} \left[\int_{S_t} (\underline{\mathbf{E}} \times \underline{\mathbf{H}}^*) \cdot d\mathbf{S} \right] = \frac{1}{Z_T} \int_{S_t} |\underline{\mathbf{E}}_t|^2 dS = Z_T \int_{S_t} |\underline{\mathbf{H}}_t|^2 dS$$

- Флуксу кроз попречни пресек таласовода доприноси само z -компонента Поинтинговог вектора, која је одређена само трансверзалним (тј. x и y) компонентама електричног и магнетског поља
- У Декартовим координатама добијамо

$$P_t = \operatorname{Re} \left[\int_{y=0}^b \int_{x=0}^a (\underline{E}_x \underline{H}_y^* - \underline{E}_y \underline{H}_x^*) dx dy \right]$$

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Заменом израза за компоненте поља таласа и интеграцијом добија се за TE_{m0} и TE_{0n} типове таласа

$$P_t = \frac{ab}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{f^2}{f_c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} |\underline{H}_0|^2$$

- За TE_{mn} типове таласа ($m, n \neq 0$) добијамо

$$P_t = \frac{ab}{4} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \frac{f^2}{f_c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} |\underline{H}_0|^2$$

- За TM_{mn} типове таласа добијамо

$$P_t = \frac{ab}{4} \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \frac{f^2}{f_c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2} |\underline{E}_0|^2$$

- У претходним изразима $|\underline{H}_0|$ и $|\underline{E}_0|$ су ефективне вредности

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Највећа снага која се може преносити таласоводом ограничена је пробојем диелектрика у таласоводу
 - За разлику од водова, загревање проводника није критично, јер се проводник налази са спољашње стране и добро се хлади
- Према томе, највећи **тренутни** интензитет електричног поља ни у једној тачки не сме премашити критично поље (E_{kr})
 - На пример, код прогресивног **доминантног типа таласа**, највећи **тренутни** интензитет електричног поља (за $x = a/2$) износи

$$E_{\max} = \omega\mu \frac{a}{\pi} |H_0| \sqrt{2}$$

па се највећа снага која се може преносити таласоводом добија у облику

$$P_{t \max} = \frac{E_{\max}^2 ab}{4 |Z_{TE_{10}}|}$$

$$Z_{TE} = \frac{Z_{TEM}}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

при чему је таласна импеданса $Z_{TE_{10}}$ дата као

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- У пракси се увек узима одређена маргина сигурности, односно не допушта се да E_{\max} премаши, на пример $0,5E_{kr}$
 - Ако је диелектрик ваздух, онда је $E_{kr} = 3 \text{ MV/m}$ (за сув ваздух)
 - Ако се узме $E_{\max} = E_{kr}$, израз

$$P_{t \max} = \frac{E_{\max}^2 ab}{4 |Z_{TE_{10}}|}$$

се може написати у облику

$$P_{t \max} [\text{kW}] = 597 a_{[\text{cm}]} b_{[\text{cm}]} \frac{\lambda}{\lambda_g}$$

- Критично поље влажног ваздуха је мање него ако је ваздух сув
 - Да би се спречило продирање влаге у таласовод, што би имало за последицу смањење максималне снаге која се може преносити, као и повећање губитака услед присуства воде, таласоводи се често пуне инертним гасом или азотом, који су под притиском
 - Осим тога, са повећањем притиска, критично поље гаса расте

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Ако таласовод није прилагођен, тј. ако постоји не само инцидентни, већ и рефлектовани талас, онда је средња снага која се преноси доминантним типом таласа једнака

$$P_{t \max} = P_i - P_r = \frac{ab}{4|Z_{\text{TE}_{10}}|} (E_{i \max}^2 - E_{r \max}^2)$$

где је P_i средња снага која се преноси инцидентним таласом, P_r средња снага која се преноси рефлектованим таласом, $E_{i \max}$ највећа тренутна вредност електричног поља инцидентног таласа, а $E_{r \max}$ највећа тренутна вредност електричног поља рефлектованог таласа

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Претходни израз, који исказује **суперпозицију средњих снага** које се преносе прогресивним таласом, може се доказати ако се посматра суперпозиција два таласа и одреди реални део флукса Поинтинговог вектора кроз попречни пресек таласовода
- При томе треба узети у обзир да је таласна импеданса $Z_{TE_{10}}$ реална величина, па је $Z_{TE_{10}} = |Z_{TE_{10}}|$
 - Аналоган резултат је изведен у трећем поглављу за водове

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Како је $E_{i\max}^2 - E_{r\max}^2 = (E_{i\max} + E_{r\max})(E_{i\max} - E_{r\max}) = E_{\max}E_{\min}$ при чему је E_{\max} највећа тренутна вредност електричног поља у максимуму, а E_{\min} највећа тренутна вредност електричног поља у минимуму стојећег таласа, и важи $E_{\max}/E_{\min} = \sigma$, при чему је σ коефицијент стојећих таласа, добија се

$$P_t = \frac{E_{\max}^2 ab}{4\sigma |Z_{TE_{10}}|}$$

што је σ пута мање него када је таласовод прилагођен

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- С обзиром на то да су таласоводи, обично, испуњени гасом, губици у диелектрику су занемарљиво мали
 - Ако то није случај коефицијент слабљења због губитака у диелектрику може се израчунати према једначини

$$\alpha_d = \frac{\sigma_e}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon'}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} = \frac{\beta \tan \delta_d}{2 \left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2\right)}$$

- Коефицијент слабљења услед губитака у проводницима може се израчунати према једначинама

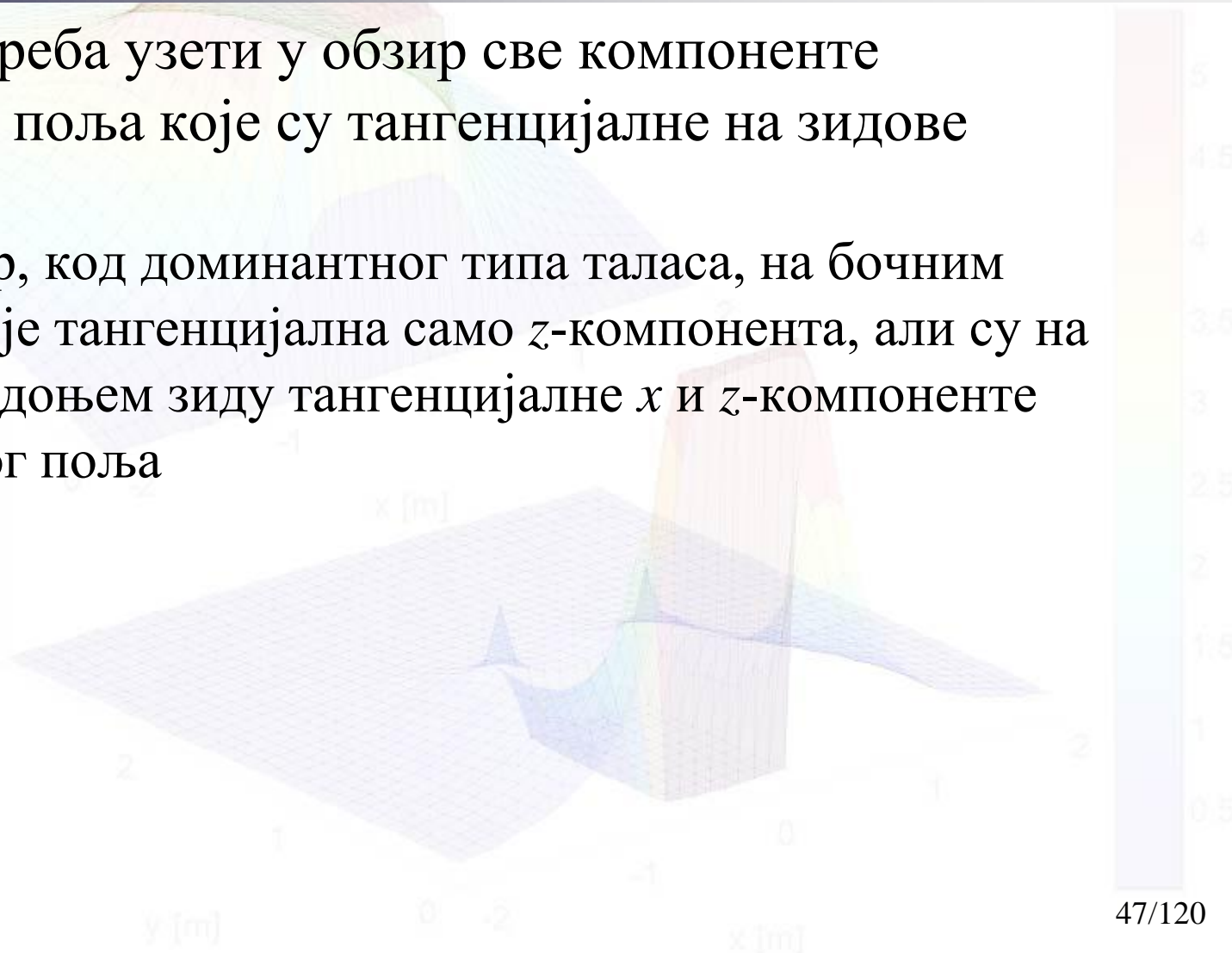
$$\alpha = \frac{P'_{gub}}{2P_t}$$

$$P'_{gub} = P'_p + P'_d$$

$$P'_p = \oint_{C_p} R_s |\underline{\mathbf{H}}_{tg}|^2 dl$$

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- При томе треба узети у обзир све компоненте магнетског поља које су тангенцијалне на зидове таласовода
 - На пример, код доминантног типа таласа, на бочним зидовима је тангенцијална само z -компонента, али су на горњем и доњем зиду тангенцијалне x и z -компоненте магнетског поља



Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- За различите типове таласа добијамо

$$\alpha_{\text{pTE}_{m0}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{R_s}{b \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \left(1 + \frac{2b}{a} \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \right)$$

$$\alpha_{\text{pTE}_{0n}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{R_s}{b \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \left(1 + \frac{2a}{b} \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \right)$$

$$\alpha_{\text{pTE}_{mn}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{R_s}{b \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \left(\left(1 + \frac{b}{a} \right) \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 + \frac{b}{a} \frac{m^2 \frac{b}{a} + n^2}{m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2} \left(1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \right) \right)$$

$$\alpha_{\text{pTM}_{mn}} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \frac{R_s}{b \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \frac{m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^3 + n^2}{m^2 \left(\frac{b}{a}\right)^2 + n^2}$$

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Зидови таласовода се често посребрују, да би се спречила корозија бакарних зидова, и тиме губици одржали малим
 - Међутим, због микронеравина зидова, губици у стварним таласоводима су већи од оних израчунатих према горњим формулама, **до два пута**
 - Ово повећање зависи од начина обраде зидова (начина nanoшења сребрне превлаке) и расте са учестаношћу

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Ток слабљења у зависности од учестаности за неколико најнижих типова таласа приказан је на следећој слици

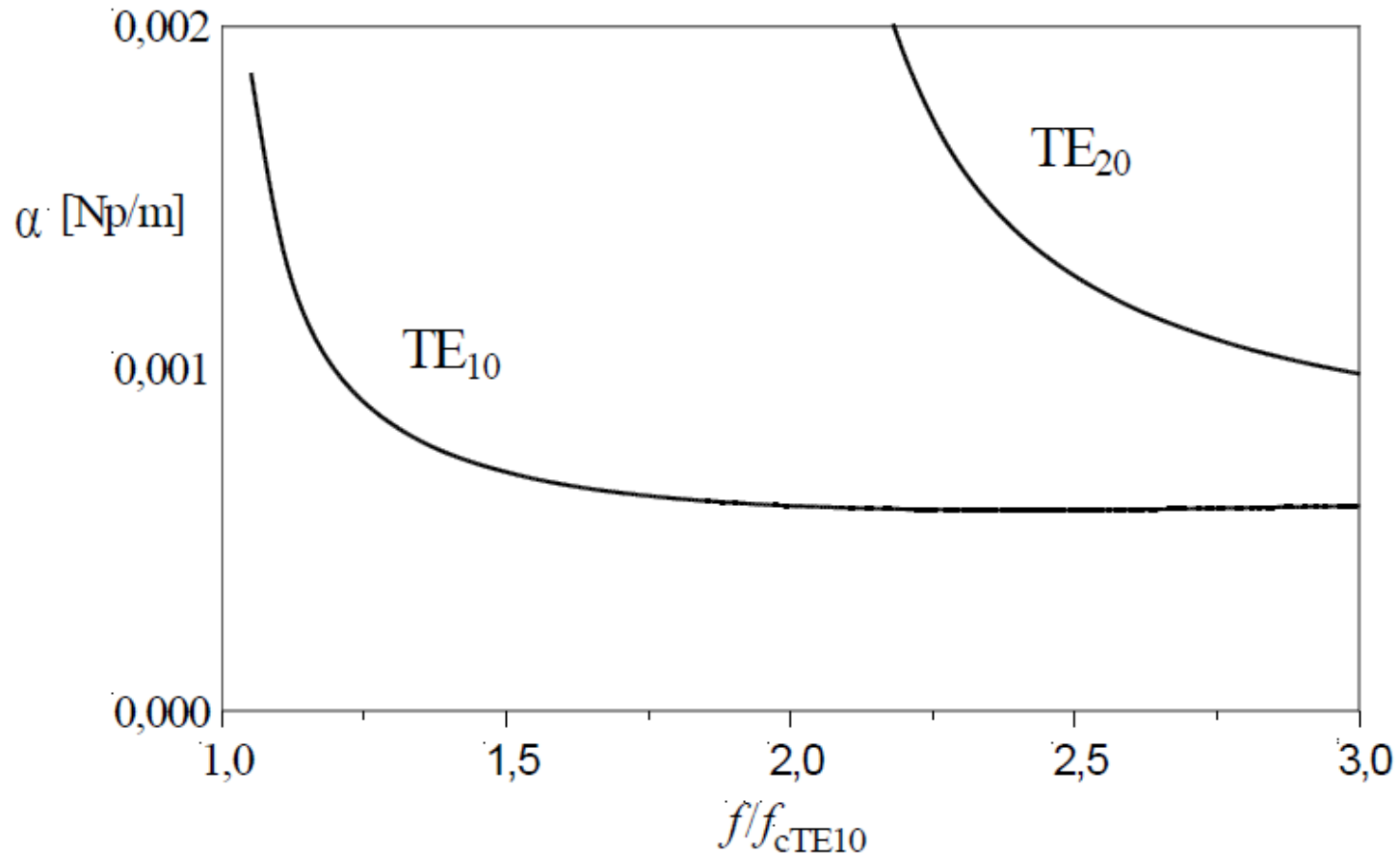
– Најмање слабљење за TE_{mn} типове таласа је при учестаности

$$f_{\min} = f_c \sqrt{1,5(1+p) + \sqrt{2,25(1+p^2)} - p}$$

- За TE_{m0} типове таласа је $p = \frac{2a}{b}$
- За TE_{0n} типове таласа је $p = \frac{2b}{a}$
- За TE_{mn} типове таласа ($m, n \neq 0$) је
- За TM_{mn} типове таласа је $f_{\min} = f_c \sqrt{3}$

$$p = \frac{a}{b} \frac{1 + \frac{m^2}{n^2} \left(\frac{b}{a}\right)^3}{1 + \frac{m^2}{n^2} \left(\frac{b}{a}\right)^2}$$

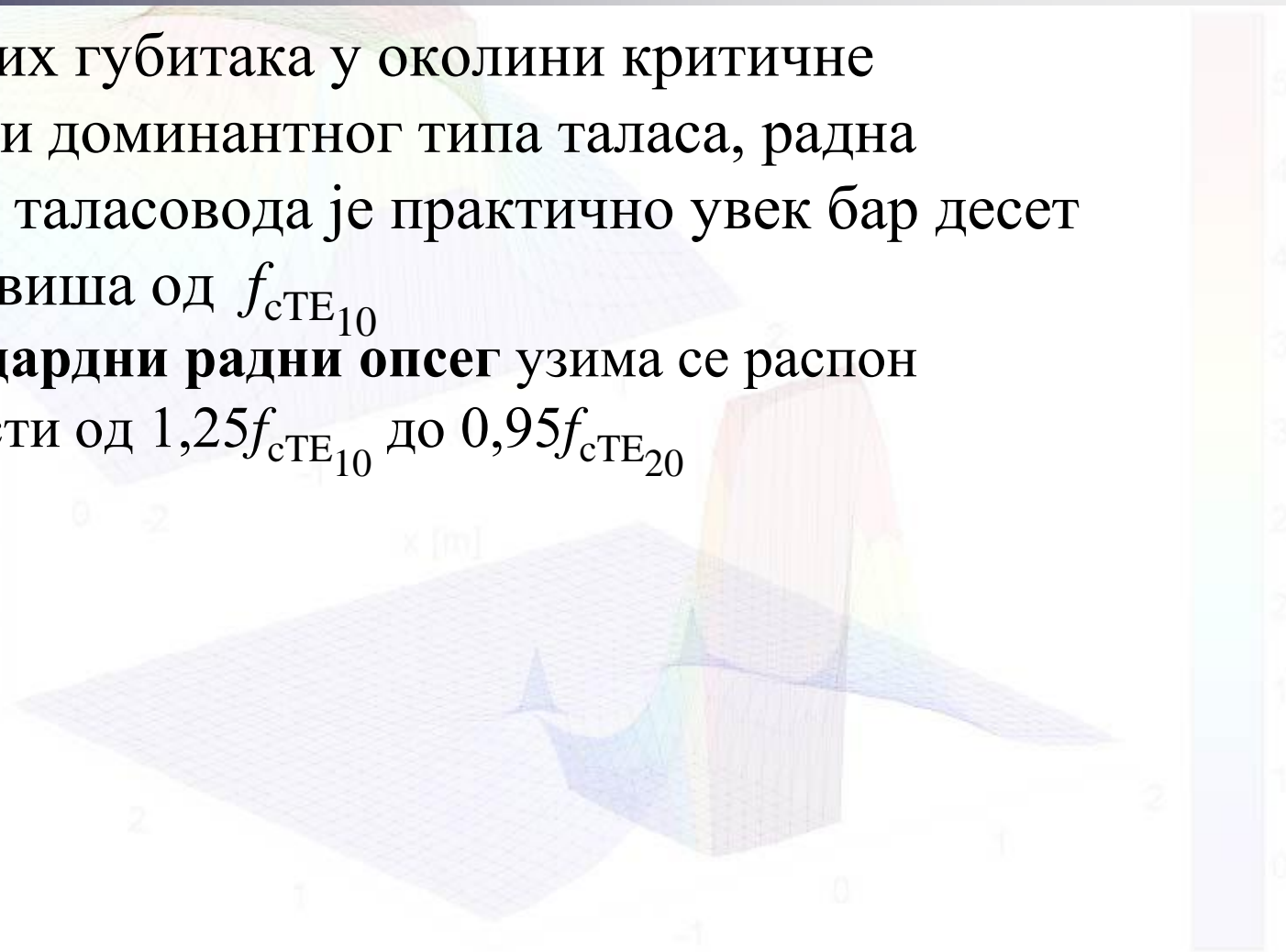
Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења



Слика 5.4. Коефицијент слабљења доминантног и првог следећег типа таласа у таласоводу ИЕС-R14.

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Због великих губитака у околини критичне учестаности доминантног типа таласа, радна учестаност таласовода је практично увек бар десет процената виша од $f_{\text{сТЕ}_{10}}$
 - Као стандардни радни опсег узима се распон учестаности од $1,25f_{\text{сТЕ}_{10}}$ до $0,95f_{\text{сТЕ}_{20}}$



Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

- Подаци за стандардне правоугаоне таласовода дати су у следећој табели
 - Радни опсег учестаности је дат за доминантни тип таласа
 - ИЕС ознаке су према централној учестаности радног опсега израженој у стотинама мегахерца
 - Ознаке према америчким стандардима (WR) су према ширини таласовода (a) израженој у стотим деловима инча ($1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$)
 - Димензија a и b су унутрашње
 - Подаци за максималну снагу односе се на доњу и горњу учестаност радног опсега таласовода

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

Таблица 5.1. Стандардни правоугаони таласоводи.

Тип		Опсег учестаности [GHz]		Димензије [mm]		Теоријско слабљење		Максимална снага [MW]
153 IEC-	WR-	од f_d	до f_g	a	b	@ f [GHz]	α [dB/m]	@ f_d - @ f_g
R3	2300	0,32	0,49	584,2	292,1	0,386	0,00078	153–212
R4	2100	0,35	0,53	533,4	266,7	0,422	0,00090	120–173
R5	1800	0,41	0,62	457,2	228,6	0,49	0,00113	93,4–131,9
R6	1500	0,49	0,75	381,0	190,5	0,59	0,00149	67,6–93,3
R8	1150	0,64	0,98	292,1	146,05	0,77	0,00222	35,0–53,8
R9	975	0,76	1,15	247,65	123,82	0,91	0,00284	27,0–38,5
R12	770	0,96	1,46	195,58	97,79	1,15	0,00405	17,2–24,1
R14	650	1,14	1,73	165,10	82,55	1,36	0,00522	11,9–17,2
R18	510	1,45	2,20	129,54	64,77	1,74	0,00749	7,5–10,7
R22	430	1,72	2,61	109,22	54,61	2,06	0,00970	5,2–7,5
R26	340	2,17	3,30	86,36	43,18	2,61	0,0138	3,1–4,5
R32	284	2,60	3,95	72,14	34,04	3,12	0,0189	2,2–3,2
R40	229	3,22	4,90	58,17	29,083	3,87	0,0249	1,6–2,2
R48	187	3,94	5,99	47,55	22,149	4,73	0,0355	1,4–2,0
R58	159	4,64	7,05	40,39	20,193	5,57	0,0431	0,79–1,0
R70	137	5,38	8,17	34,82	15,799	6,46	0,0576	0,56–0,71
R84	112	6,57	9,99	28,499	12,624	7,89	0,0794	0,35–0,46

Снага која се преноси правоугаоним таласоводом и коефицијент слабљења

Таблица 5.1. Стандардни правоугаони таласоводи.

Тип		Опсег учестаности [GHz]		Димензије [mm]		Теоријско слабљење		Максимална снага [MW]
153 IEC-	WR-	од f_d	до f_g	a	b	@ f [GHz]	α [dB/m]	@ $f_d - @ f_g$
R100	90	8,20	12,5	22,860	10,160	9,84	0,110	0,20–0,29
R120	75	9,84	15,0	19,050	9,525	11,8	0,1133	0,17–0,23
R140	62	11,9	18,0	15,799	7,898	14,2	0,176	0,12–0,16
R180	51	14,5	22,0	12,954	6,477	17,4	0,238	0,080–0,107
R220	42	17,6	26,7	10,668	4,318	21,1	0,370	0,043–0,058
R260	34	21,7	33,0	8,636	4,318	26,1	0,435	0,034–0,048
R320	28	26,4	40,0	7,112	3,556	31,6	0,583	0,022–0,031
R400	22	32,9	50,1	5,690	2,845	39,5	0,815	0,014–0,020
R500	19	39,2	59,6	4,775	2,388	47,1	1,060	0,011–0,015
R620	15	49,8	75,8	3,759	1,880	59,9	1,52	0,0063–0,0090
R740	12	60,5	91,9	3,099	1,549	72,6	2,03	0,0042–0,0060
R900	10	73,8	112	2,540	1,270	88,6	2,74	0,0030–0,0041
R1200	9	92,2	140	2,032	1,016	111	3,82	0,0018–0,0026
R1400	7	114	173	1,651	0,826	136,3	5,21	0,0012–0,0017
R1800	5	145	220	1,295	0,648	174,0	7,50	0,00071–0,0010
R2200	4	172	261	1,092	0,546	206,0	9,70	0,00051–0,0007
R2600	3	217	330	0,864	0,432	260,5	13,76	0,00035–0,0004

Таласоводне компоненте

- Техника таласовода је добила свој пуни замах још у почетку развоја микроталаса, тако да постоји читав низ таласоводних компоненти – Прелази са коаксијалних водова на таласоводе, спрежњаци између два таласовода, кратки спојеви, прилагођења, ослабљивачи, савијуци, филтри, мреже за прилагођење итд
- О неким од тих компоненти биће речи у наставку

Таласоводне компоненте

- Таласоводи се могу побуђивати на разне начине
 - На пример, генератор може имати коаксијални прикључак, и у том случају је потребно имати прелаз са коаксијалног вода на таласовод
 - Такође, ако пријемник има коаксијални улаз, исти прелаз се може искористити за извлачење сигнала из таласовода и за спој са коаксијалним водом који иде до пријемника

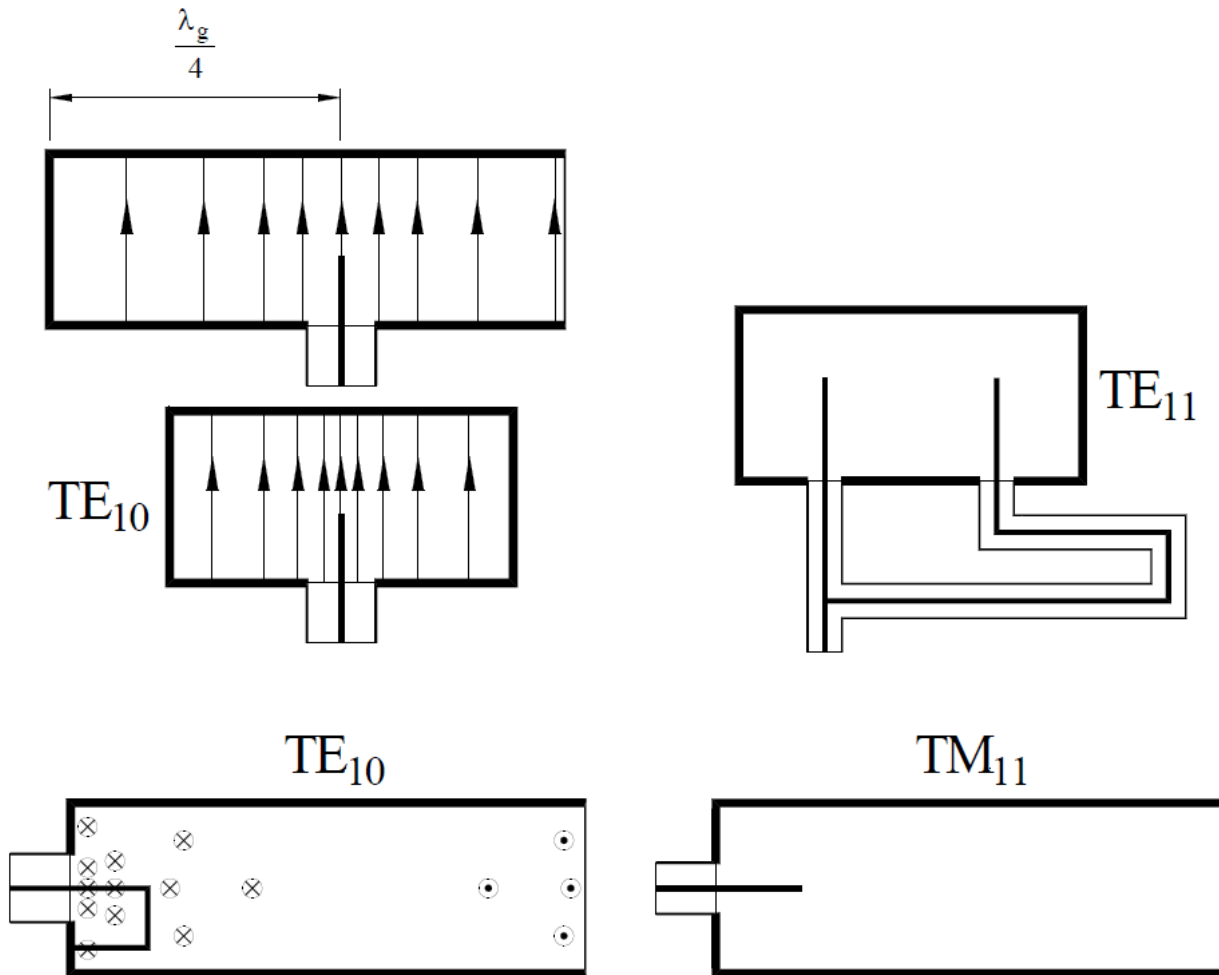
Таласоводне компоненте

- Спруге између коаксијалних водова и таласовода се могу поделити на две групе:
 - Капацитивне (електричне)
 - Индуктивне (магнетске)
- Основни облик капацитивне спруге је кратка жица (антеница, сонда), која представља продужетак унутрашњег проводника коаксијалног вода
 - Спољашњи проводник се везује на зид таласовода
 - Жица би требало да је паралелна вектору јачине електричног поља у таласоводу, како би спруга била што јача

Таласоводне компоненте

- Индуктивна спрега је у облику петљице, која је везана између унутрашњег проводника коаксијалног вода и масе (зида таласовода)
 - Раван петљице требало би да је управна на вектор јачине магнетског поља
 - Обично се спрега поставља близу кратко спојеног краја таласовода
 - Таласовод се не сме оставити отвореним, јер би из отвора постојало јако зрачење енергије

Таласоводне компоненте

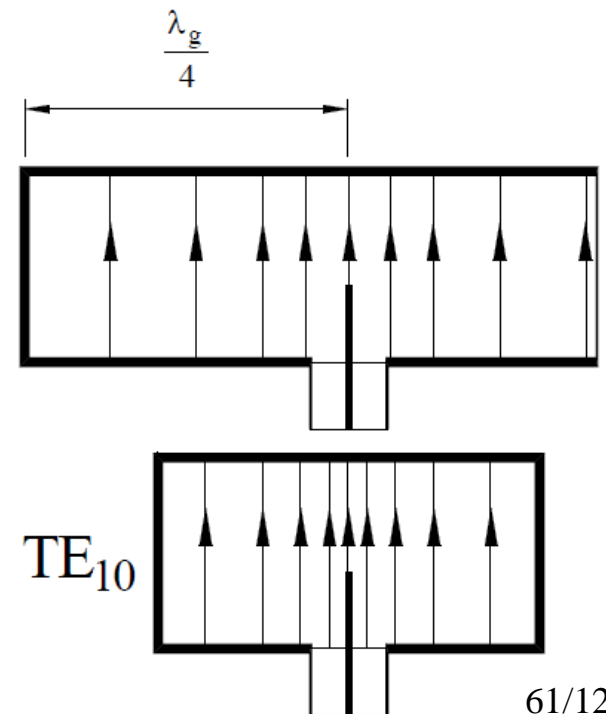


- Начин постављања спреге зависи од типа таласа у таласоводу
 - Неки од ових примера приказани су на слици

Слика 5.5. Прелаз са коаксијалног вода на правоугаони таласовод.

Таласоводне компоненте

- Одстојање између сонде и кратког споја (b') је, најчешће, око $\lambda_g/4$, како би се талас рефлектован од кратког споја сабирао у фази са таласом који од сонде полази директно на десну страну, док је одстојање између сонде и бочног зида $s \approx a/2$

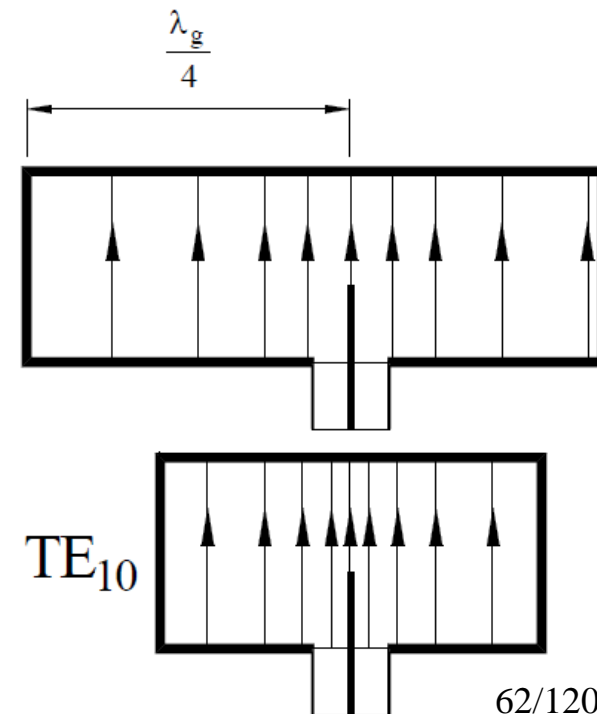


Таласоводне компоненте

- Улазна импеданса спреге зависи од њеног положаја, димензија и учестаности
- Улазна импеданса сонде за спрегу са доминантним типом таласа је, на пример, дата приближним изразом

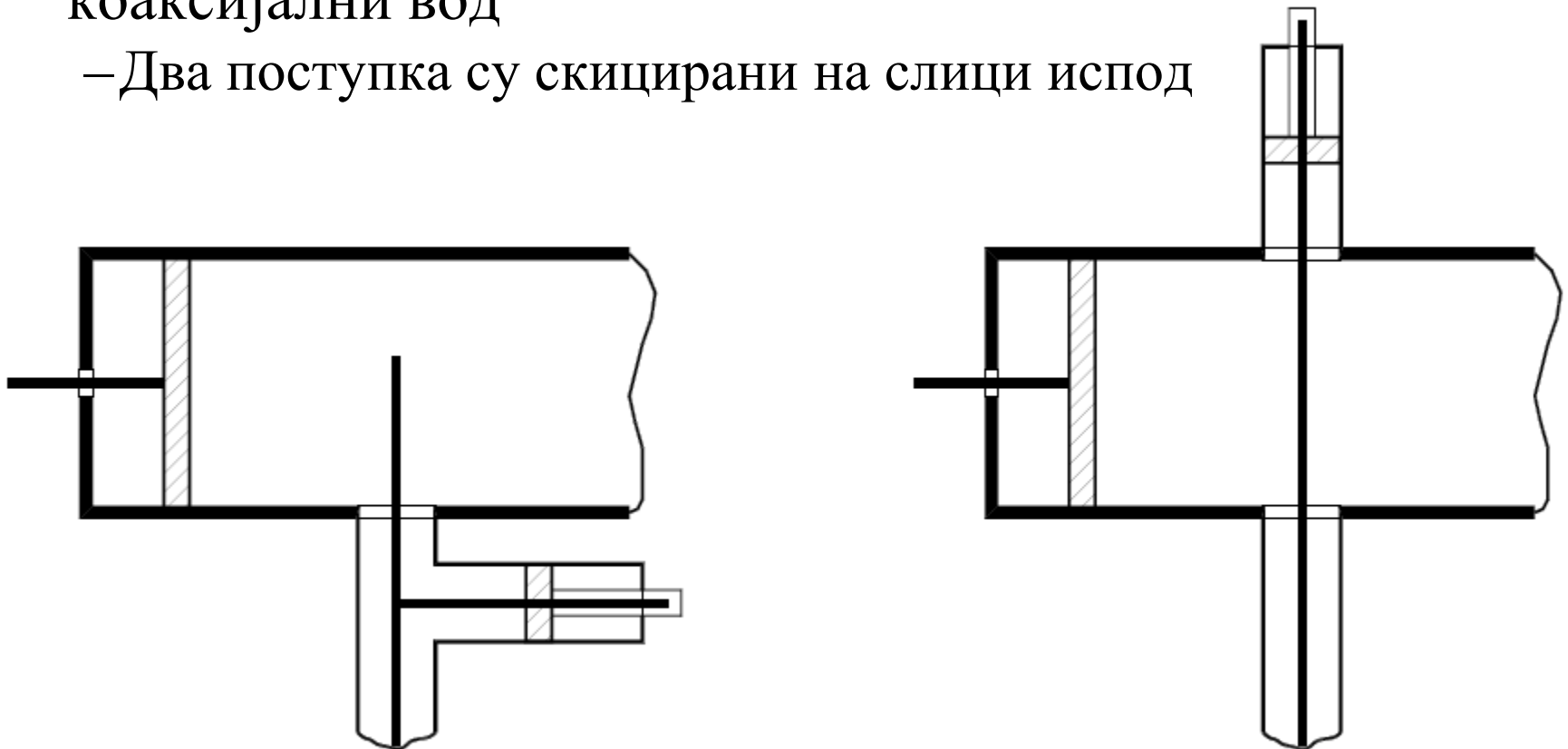
$$\underline{Z}_a = 2l_{\text{eff}} \frac{\underline{Z}_{\text{TE}}}{ab} \sin \frac{2\pi b'}{b} \left(\sin 2\beta s + \frac{j}{2\sin 2\beta s} \right)$$

где је l_{eff} ефективна дужина сонде, која је приближно једнака половини физичке дужине сонде ако је сонда танка и много краћа од таласне дужине



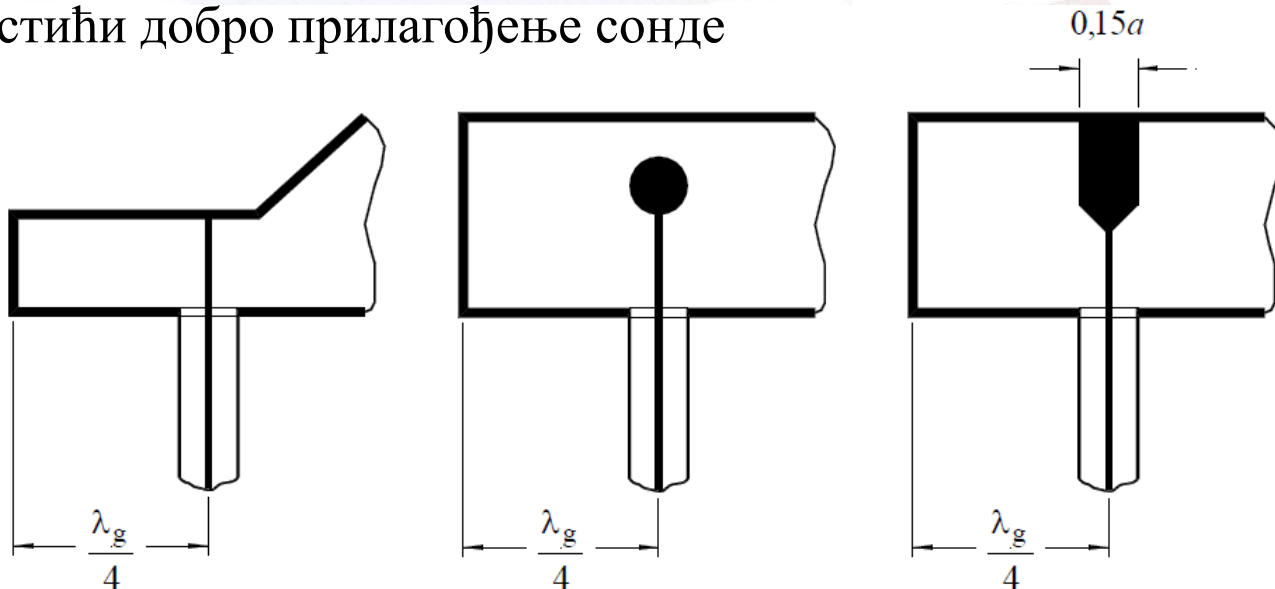
Таласоводне компоненте

- Сонда се може на разне начине прилагодити на коаксијални вод
 - Два поступка су скицирани на слици испод



Таласоводне компоненте

- Сонде приказане до сад су релативно ускопојасне, јер се њихове улазне импедансе брзо мењају са учестаношћу
 - За веће опсеге учестаности примењују се сонде већих дебљина, као на пример оне приказане на следећој слици
 - Подешавањем облика сонде, или сужавањем таласовода, могуће је постићи добро прилагођење сонде

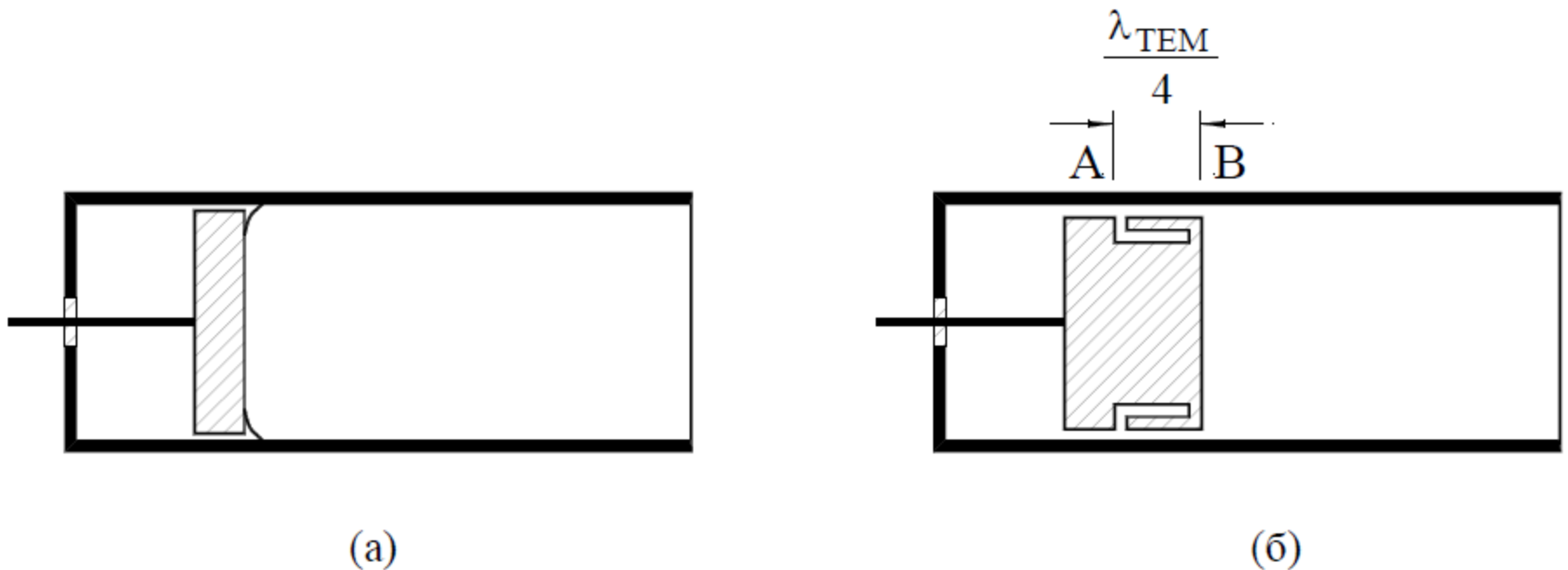


Слика 5.7. Широкопојасни прелази са коаксијалног вода на правоугаони таласовод.

Таласоводне компоненте

- Фиксан кратак спој таласовода се прави тако што се таласовод пресече попречно и затвори равном металном плочом која се мора добро залемити за таласовод, како би се остварио квалитетан електрични контакт
- Помичан кратак спој се остварује убацивањем металног клипа, чије су димензије мало мање од димензија попречног пресека таласовода
 - Електрични контакт између клипа и зидова таласовода остварује се причвршћивањем чешљасте опруге за чело клипа, док контактна пера клизе по таласоводу (видети следећу слику)
 - Међутим, овакав спој није довољно квалитетан (посебно при високим учестаностима) јер налегање пера није увек сигурно
 - Због тога могу постојати значајне прелазне отпорности између пера и зида таласовода, а тачка контакта није прецизно дефинисана

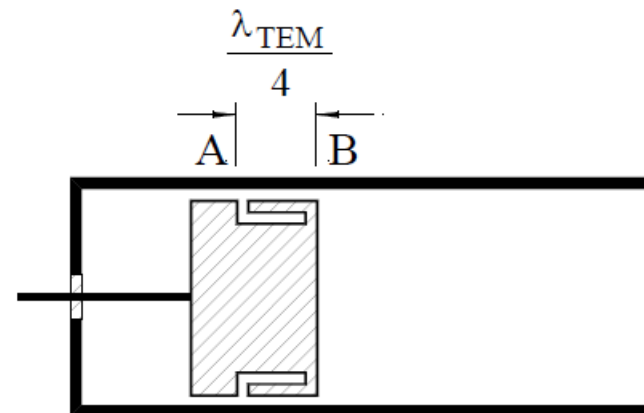
Таласоводне компоненте



Слика 5.8. Помични кратки спојеви таласовода.

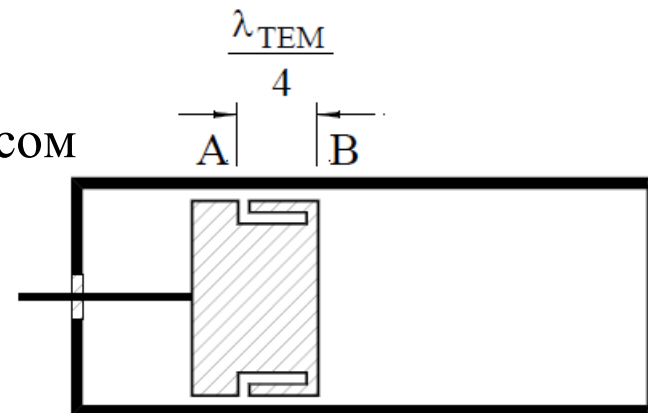
Таласоводне компоненте

- Одличан помичан кратак спој може се остварити конструкцијом клипа приказаном на слици
 - По целом обиму клипа (за TE_{10} тип таласа довољно је само по ширим странама) прави се жлеб
 - Површ клипа и површ зида таласовода, односно две паралелне стране у жлебу клипа, чине плочасте водове, чија је дужина при радној учестаности једнака $\lambda_{TEM}/4$
 - Вод који чине стране жлеба кратко је спојен



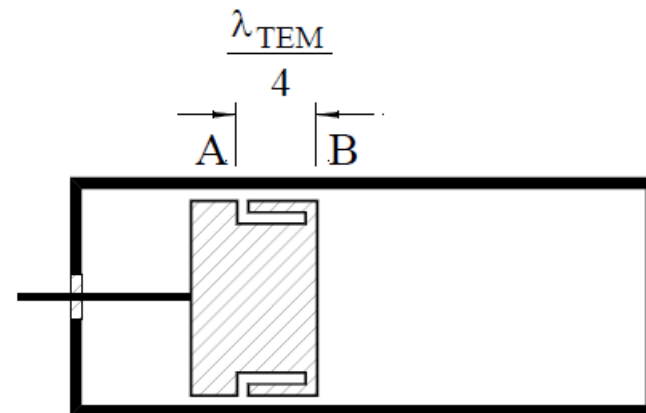
Таласоводне компоненте

- На кратком споју је максимум струје стојећег таласа, а нула напона
- У тачки А стојећи талас на овом воду има максимум напона, а нулу струје
 - Импеданса у том попречном пресеку вода је (теоријски) бесконачно велика
 - Стога између зида таласовода и клипа у тачки А не мора постојати добар контакт
 - Довољна је чак само капацитивност између клипа и зида таласовода
 - Други вод, који образују зид таласовода и зид клипа, завршен је том бесконачном импедансом



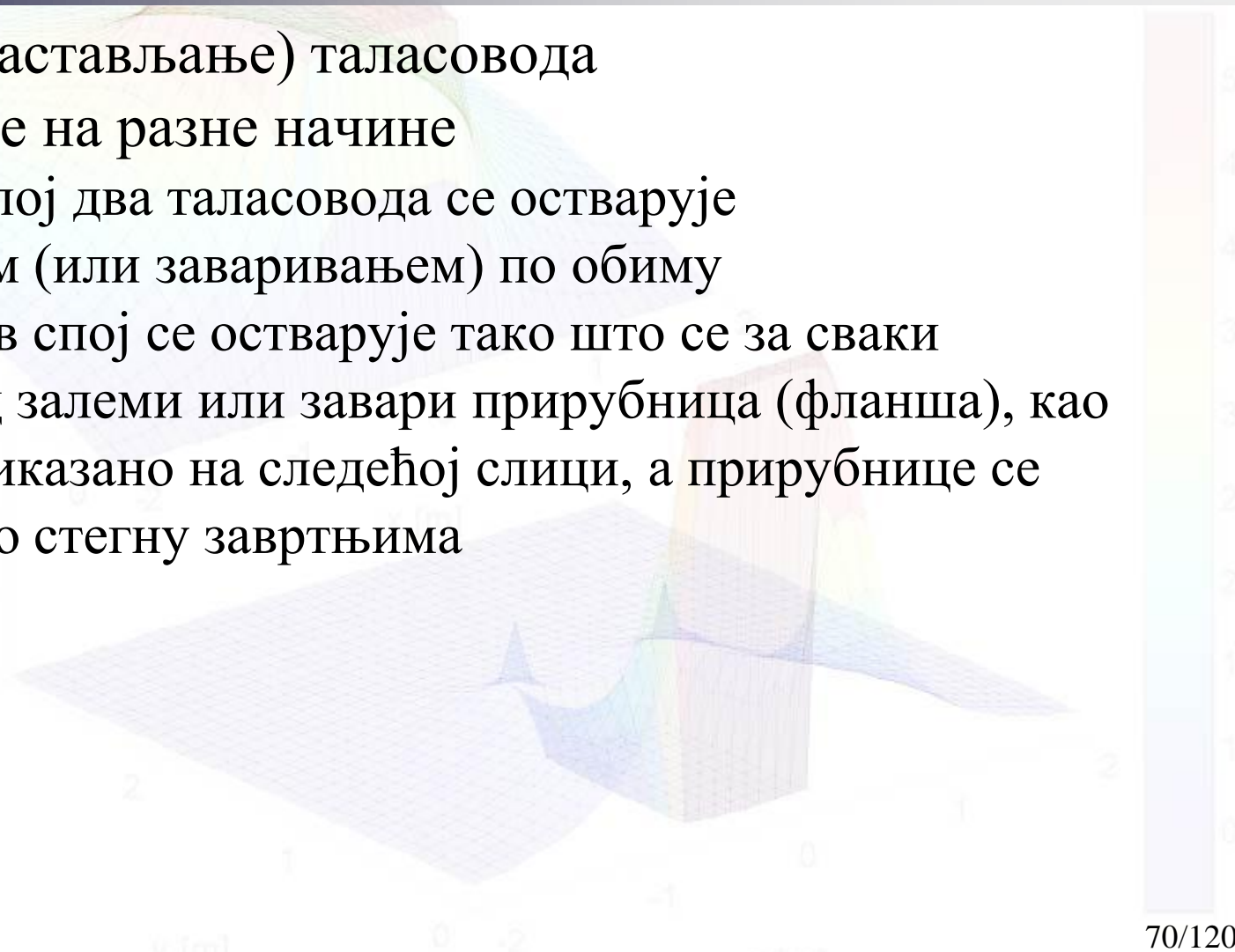
Таласоводне компоненте

- Како је дужина вода $\lambda_{\text{ТЕМ}}/4$, улазна импеданса вода (у равни чела клипа, означеној са В) једнака је нули, односно у тачки В постоји одличан електрични кратак спој између клипа и зидова таласовода
 - Мана описаног кратког споја је, очигледно, то што је ускопојасан

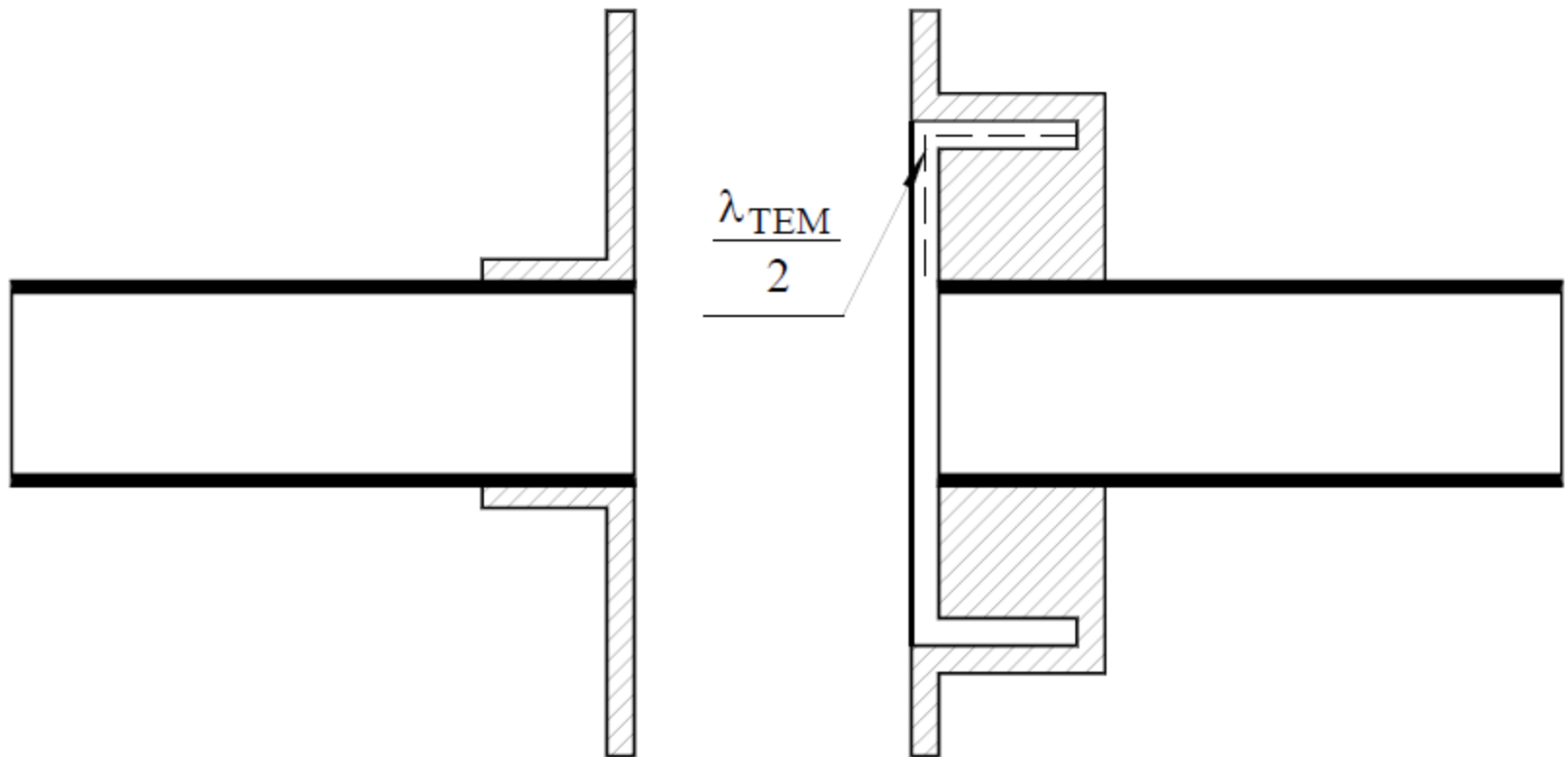


Таласоводне компоненте

- Спајање (настављање) таласовода остварује се на разне начине
 - Фиксан спој два таласовода се остварује лемљењем (или заваривањем) по обиму
 - Растављив спој се остварује тако што се за сваки таласовод залемим или заварим прирубницу (фланша), као што је приказано на следећој слици, а прирубнице се међусобно стегну завртњима



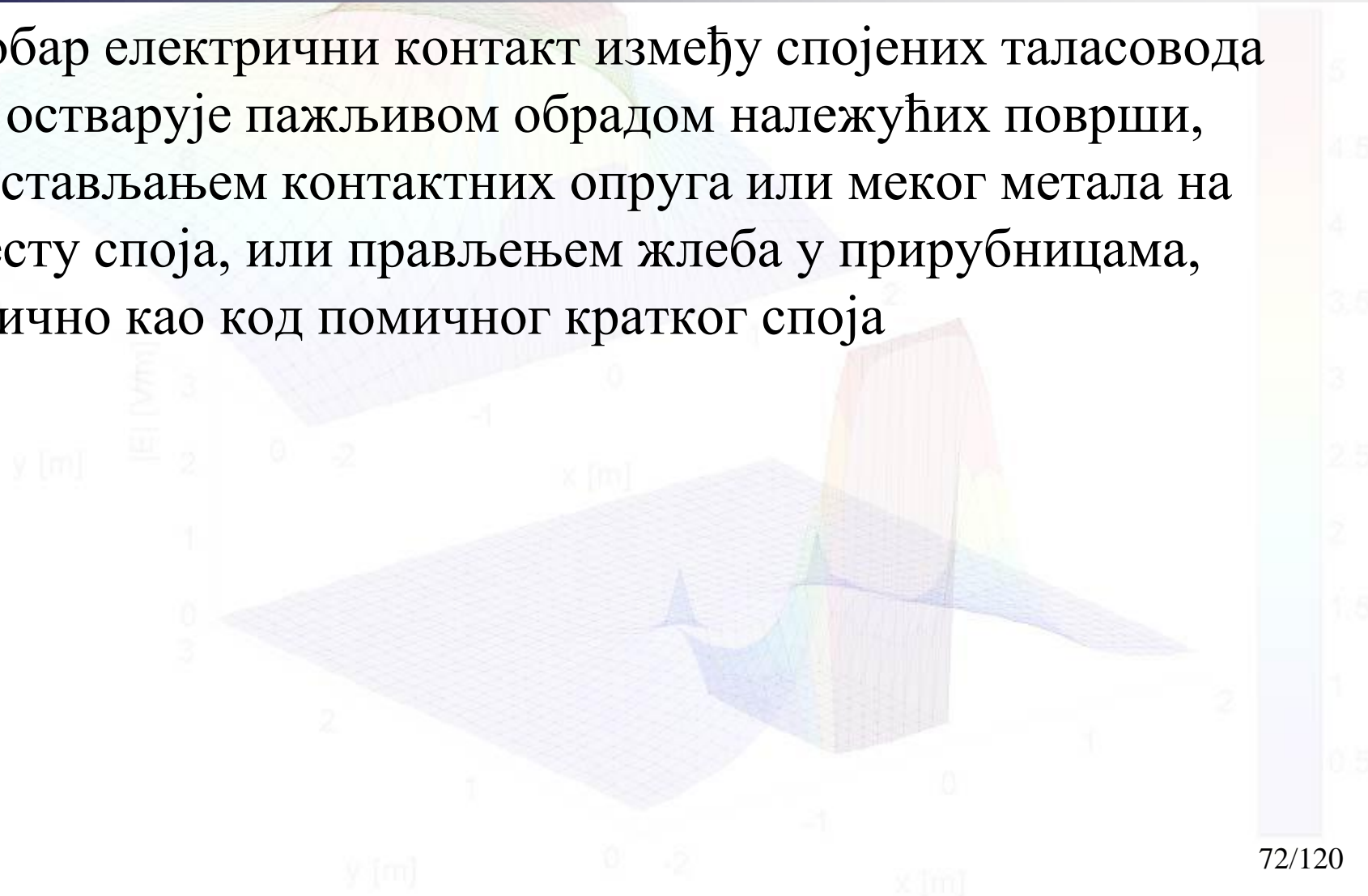
Таласоводне компоненте



Слика 5.9. Спајање таласовода прирубницама.

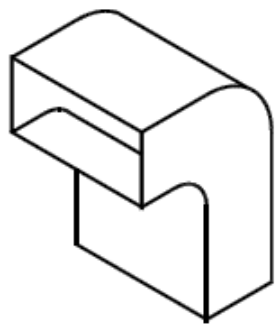
Таласоводне компоненте

- Дobar електрични контакт између спојених таласовода се остварује пажљивом обрадом належућих површи, постављањем контактних опруга или меког метала на месту споја, или прављењем жлеба у прирубницама, слично као код помичног кратког споја

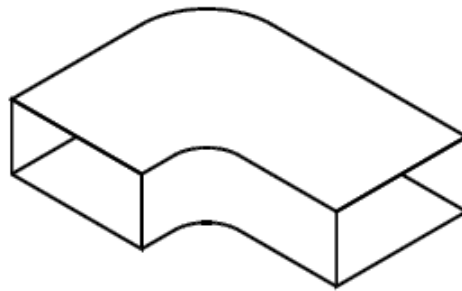


Таласоводне компоненте

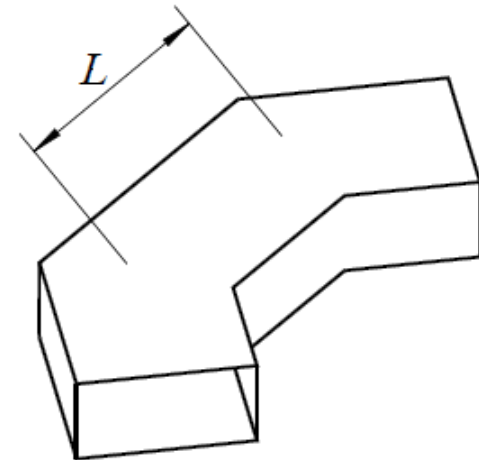
- У случају да таласовод треба савити (на пример, под правим углом), савијутац не сме бити оштар, јер би то унело велики дисконтинуитет
- Три начина како се савијутац може направити, а да унети дисконтинуитет не буде превелик, приказани су на следећој слици



(a)



(б)

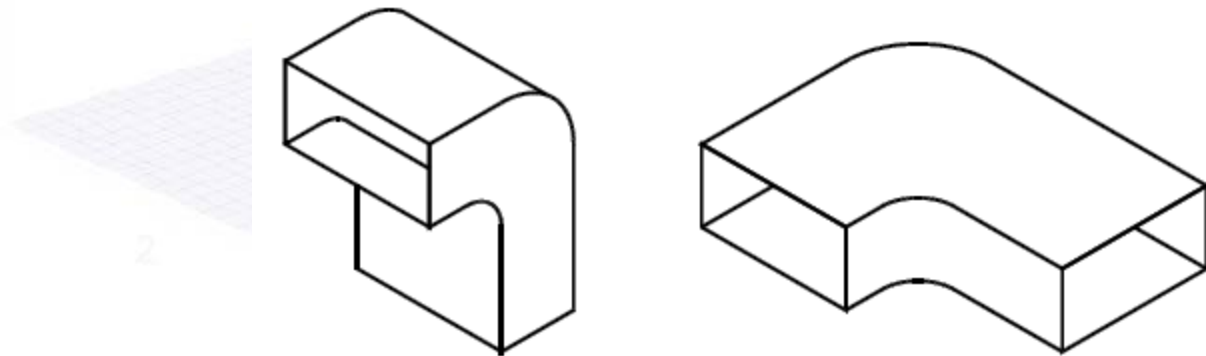


(в)

Слика 5.10. Савијуци правоугаоног таласовода.

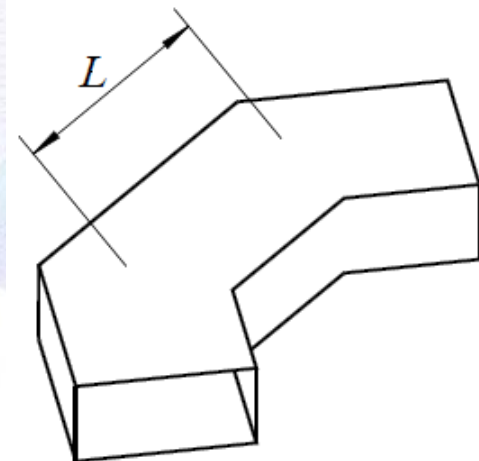
Таласоводне компоненте

- Први савијутак (леви на слици) је у равни паралелној електричном пољу (E -равни)
- Други савијутак (десни на слици) је у равни паралелној магнетском пољу (H -равни)
- У оба случаја полупречник унутрашње кривине савијутка треба да буде бар **1,5 пута већи** од димензија таласовода (a или b) која је у равни савијутка



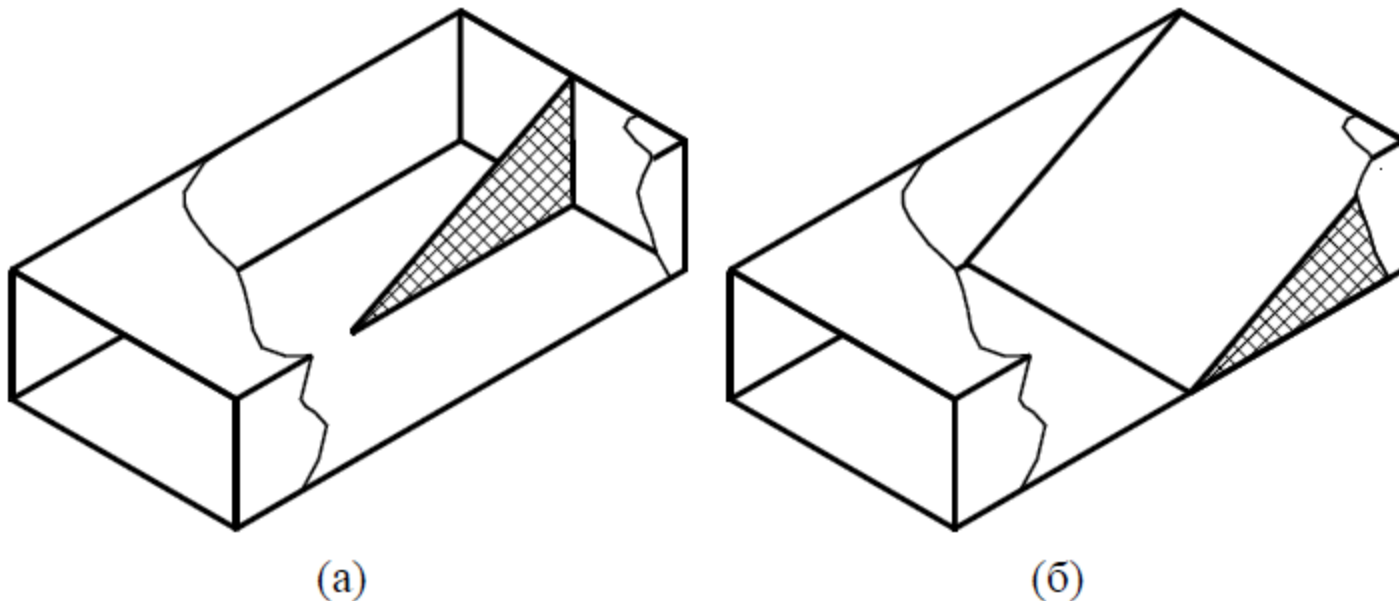
Таласоводне компоненте

- Савијутак приказан на слици има два дисконтинуитета, али је одстојање између њих једнако $L = \lambda_g/4 + n\lambda_g/2$ (где је n цео број)
- Под претпоставком да сваки дисконтинуитет не ствара сувише велику рефлексiju, два таласа рефлектована од дисконтинуитета су практично истих интензитета, али у противфази (због различитих пређених путева), па се практично поништавају (при једној учестаности)



Таласоводне компоненте

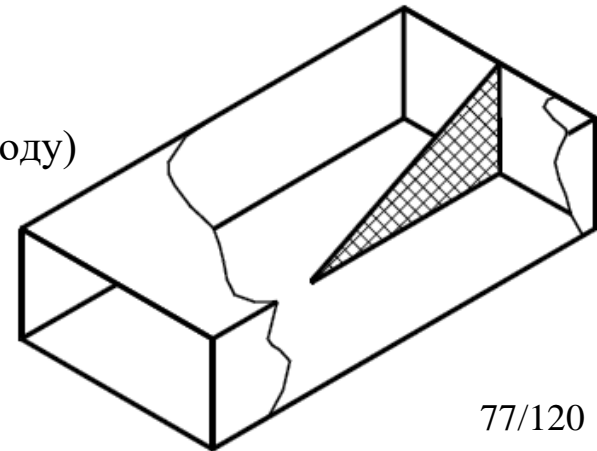
- Завршно оптерећење (прилагођење) таласовода остварује се уметањем материјала који има изражене губитке, као што је приказано на слици



Слика 5.11. Прилагођени завршеци правоугаоног таласовода.

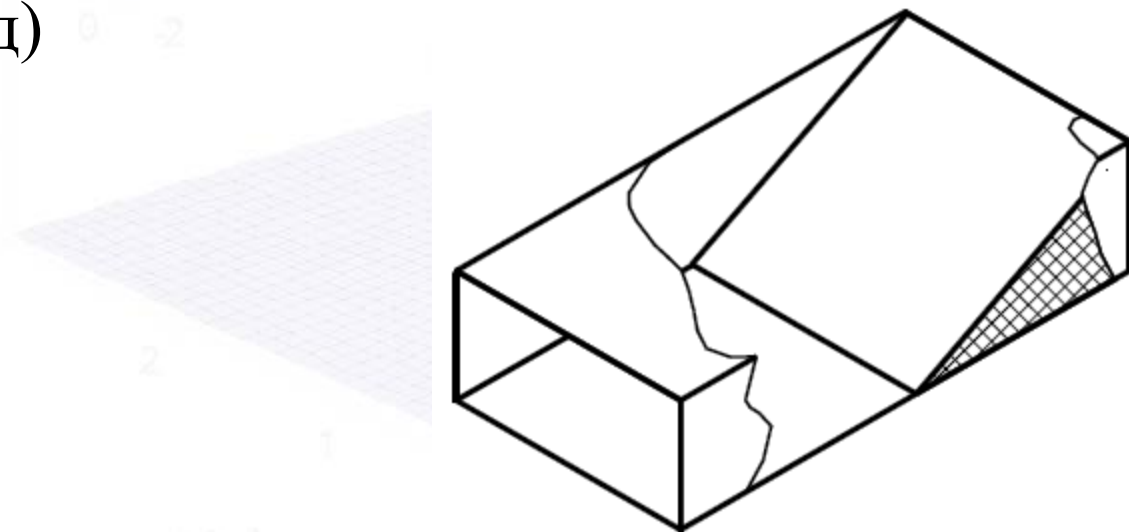
Таласоводне компоненте

- На таквом завршетку се таласовод обично кратко спаја, како би се спречило зрачење енергије из таласовода
- Завршно оптерећење (за доминантни тип таласа) са слике је погодно за мале снаге, а састоји се од отпорне плочице постављене у средини таласовода (диелектрична плочица са танким резистивним филмом)
 - Плочица је паралелна електричном пољу таласовода (које је најјаче у средини)
 - То поље индукује струје у плочици, услед чега се јављају Џулови губици и талас слаби при простирању дуж плочице
 - Као што се види са слике, плочица је зашиљена у правцу из кога наилази талас, како би се што више смањила рефлексија таласа од плочице (која представља дисконтинуитет у таласоводу)
 - Дужина зашиљеног дела треба да је већа од $\lambda_g/2$



Таласоводне компоненте

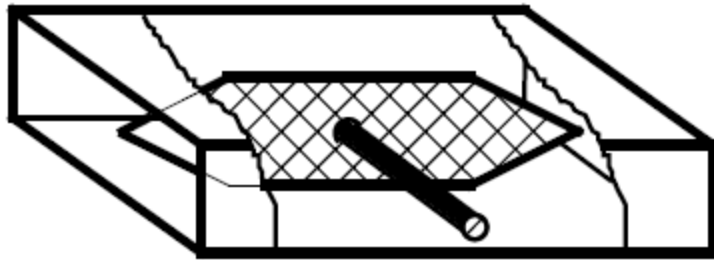
- Други завршетак, приказан на слици, је клин од апсорпционог материјала (графитне смесе, или чак дрвета), који делује слично плочици
- Завршетак за велике снаге мора да се хлади (ваздухом или водом), а као апсорпциони материјал се често ставља вода (која протиче кроз стаклену цев уметнуту у таласовод)



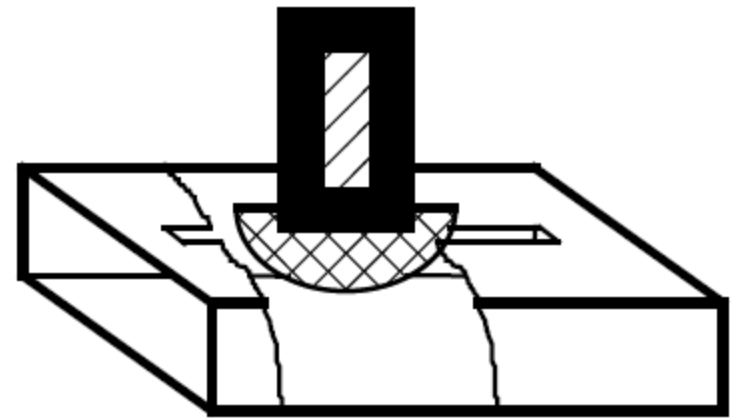
Таласоводне компоненте

- Слично прилагођеном завршетку прави се ослабљивач (атенуатор)
 - То је секција таласовода (са приступима на оба краја) који слаби талас који се простире од једног до другог приступа (од реда величине неколико dB до неколико десетина dB)
 - Атенуатор се умеће у таласовод на месту на коме треба остварити слабљење
 - Атенуатор се може остварити постављањем отпорне плочице паралелно електричном пољу у таласоводу
 - Плочица треба да је зашиљена на оба краја, како би се смањиле рефлексije при наиласку таласа
 - На следећој слици приказане су неке од конструкција ослабљивача

Таласоводне компоненте



(a)

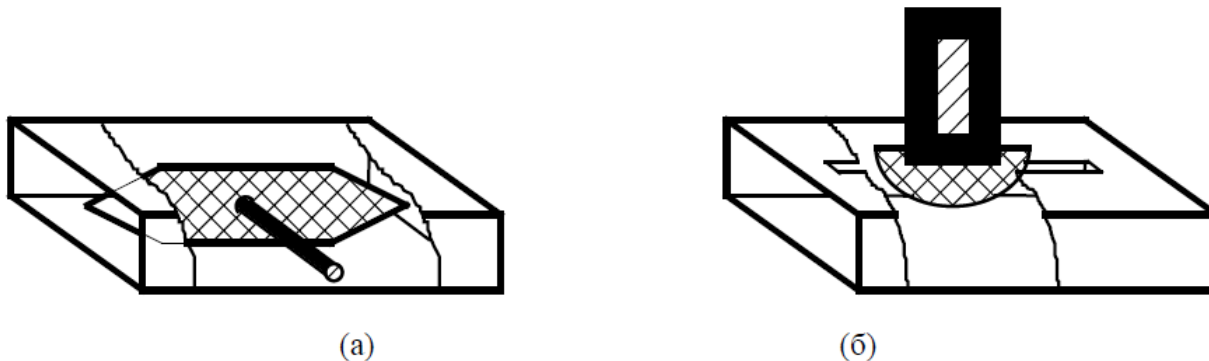


(б)

Слика 5.12. Таласоводни ослабљивачи.

Таласоводне компоненте

- У оба случаја померањем отпорне плочице може се мењати унето слабљење
- Код атенуатора са леве слике слабљење је највеће када се плочица налази у средини таласовода, а најмање (практично нема слабљења) када се плочица постави уз вертикални зид таласовода
 - Код атенуатора са десне слике плочица се извлачи из таласовода кроз лонгитудијални прорез (постављен на средини таласовода)
– Слабљење је утолико веће, уколико је плочица увученија у таласовод



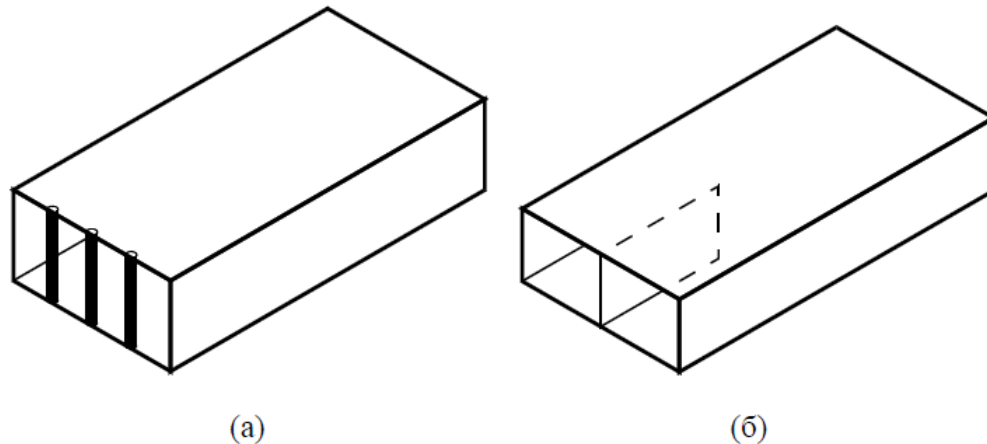
Слика 5.12. Таласоводни ослабљивачи.

Таласоводне компоненте

- Таласни филтри се постављају у таласовод да би се обезбедило простирање само једног типа таласа (уколико је учестаност довољно висока када се може протирати неколико типова таласа)
 - То су металне решетке или плочице које пропуштају један тип таласа (или неколико типова), а рефлектују друге типове
 - Оне се постављају тако да је вектор јачине електричног поља таласа чије се простирање допушта нормалан на жице које чине решеткицу, или нормалан на плочице (тима се простирање таласа врло мало ремети)
 - Међутим, вектор јачине електричног поља таласа које не треба пропустити мора бити паралелан жицама, односно плочицама
 - Тима се електрично поље “кратко спаја”, па се талас рефлектује

Таласоводне компоненте

- На слици лево скициран је филтар који се састоји од неколико жица, а који пропушта TE_{0n} типове таласа и рефлектује TE_{m0} типове таласа
- Филтар скициран на слици десно се састоји од металне плочице постављене у средини таласовода
– Овај филтар рефлектује TE_{10} тип таласа, а пропушта TE_{20} и TE_{01} типове таласа



Слика 5.13. Таласни филтри.

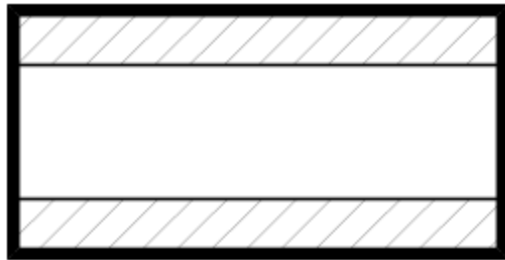
Таласоводне компоненте

- Раније је поменуто да се анализа простирања таласа у таласоводу може свести на анализу простирања на еквивалентном воду
 - У техници водова, уметањем реактанси (најчешће паралелно, јер је то конструкционо обично једноставније, али може и редно) могу се реализовати различите мреже за прилагођење, филтри итд.
 - Слично се може остварити и у техници таласовода, уметањем различитих дисконтинуитета (на пример, жица и плочица) или огранака таласовода, што је еквивалентно уметању реактанси у еквивалентни вод

Таласоводне компоненте

- На следећој слици приказани су различити дисконтинуитети – Дијафрагме су металне плочице постављене у попречни пресек таласовода и залемљене за његове зидове
 - Дијафрагма која смањује висину таласовода (b) понаша се као капацитивност везана паралелно у еквивалентни вод, дијафрагма која смањује ширину таласовода (a) понаша се као индуктивност, а дијафрагма која смањује обе димензије понаша се као паралелно везано антирезонантно коло (паралелно LC коло)
 - Једна или више жица (стубића), залемљене за под и плафон таласовода, понашају се као паралелно везана индуктивност
 - Завртњ се понаша као паралелно везана капацитивност уколико је дужина завртња у таласоводу мања од приближно $3b/4$, а као паралелно везана индуктивност уколико му је дужина већа
 - Окретањем завртња остварује се променљива реактанса, која је погодна за подешавање (на пример, за експериментално подешавање прилагођења мрежом која има две паралелно везане реактансе)

Таласоводне компоненте



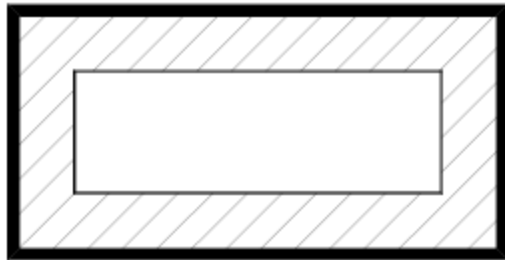
Капацитивна дијафрагма



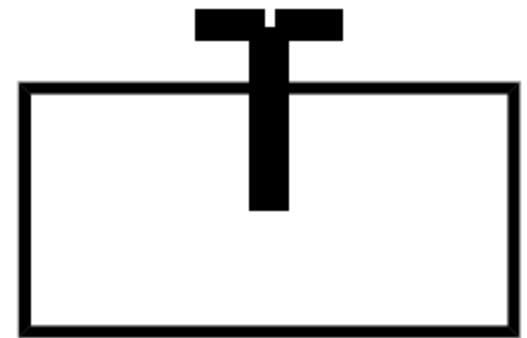
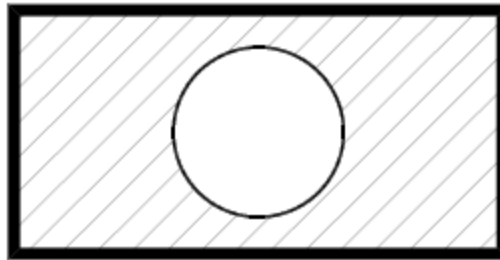
Индуктивна дијафрагма



Стубић



Резонантне дијафрагме

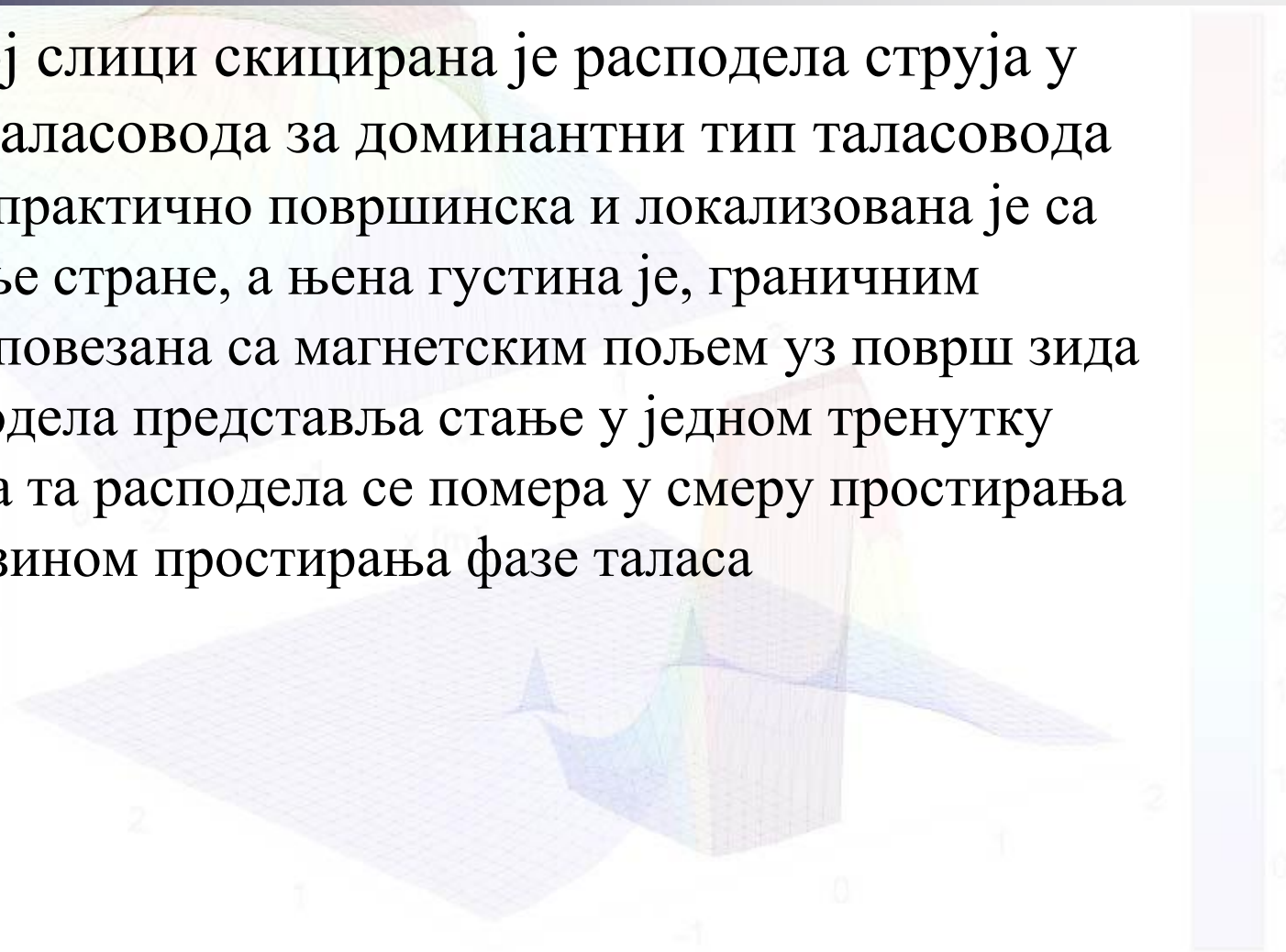


Завртањ

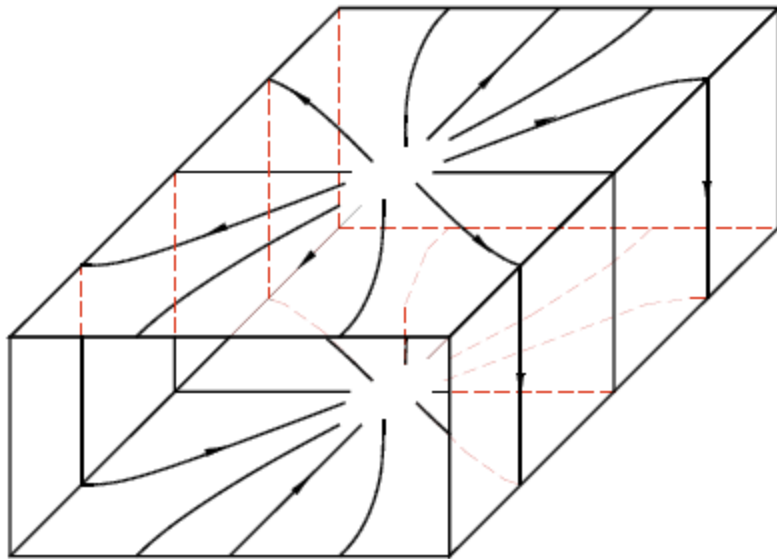
Слика 5.14. Дисконтинуитети у таласоводу.

Таласоводне компоненте

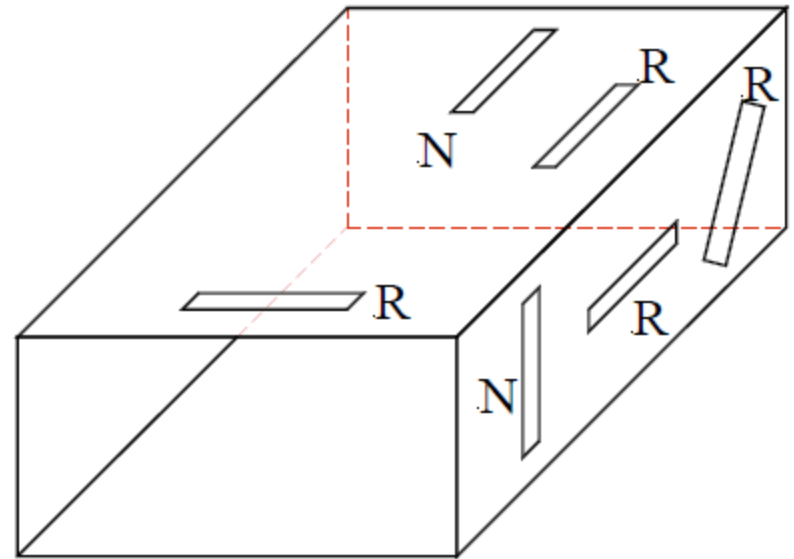
- На следећој слици скицирана је расподела струја у зидовима таласовода за доминантни тип таласовода
 - Струја је практично површинска и локализована је са унутрашње стране, а њена густина је, граничним условом, повезана са магнетским пољем уз површ зида
 - Ова расподела представља стање у једном тренутку времена, а та расподела се помера у смеру простирања таласа брзином простирања фазе таласа



Таласоводне компоненте



(a)

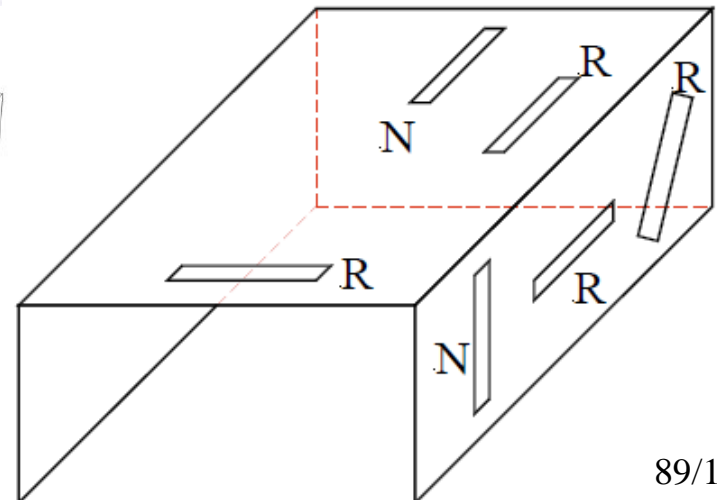
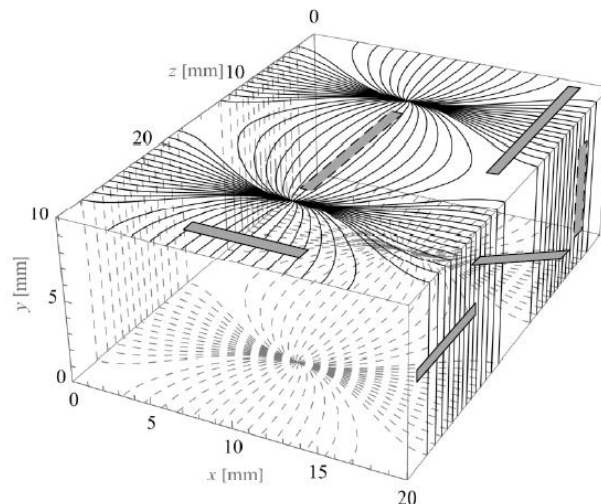


(б)

Слика 5.15. (а) Расподела струје у зидовима таласовода и (б) прорези.

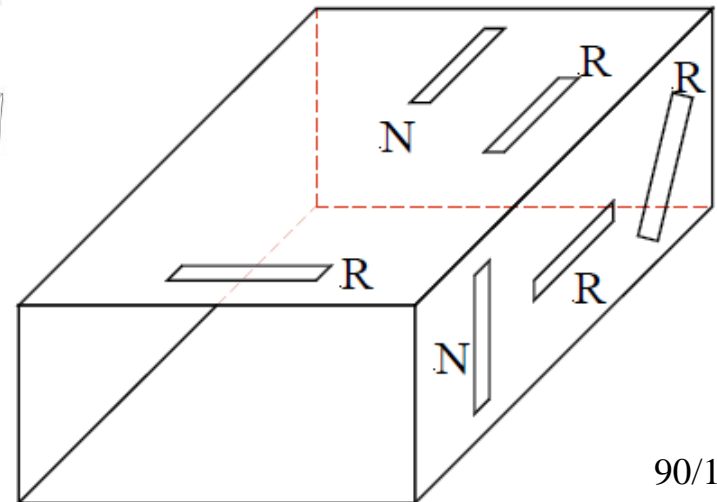
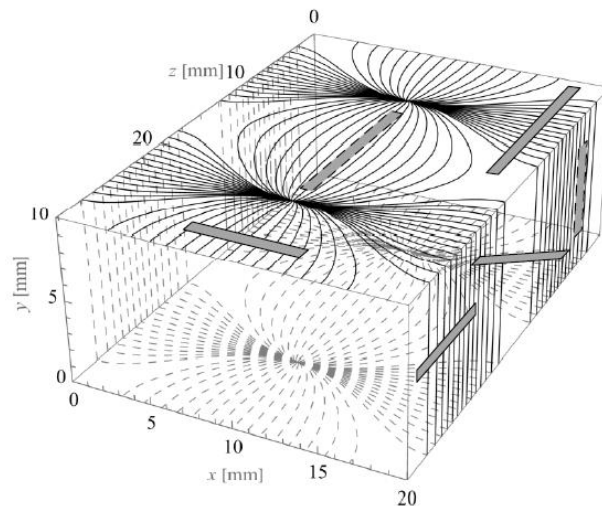
Таласоводне компоненте

- У зидовима таласовода могу се поставити различити прорези
 - Уколико прорез не пресеца струјнице, неће битно реметити простирање таласа
- Такав је лонгитудијални прорез постављен на средини шире стране таласовода или трансверзални прорез на ужој страни
 - У циљу што већег смањења утицаја прореза на поље у таласоводу, у практичним реализацијама прорез се постепено сужава у близини својих крајева



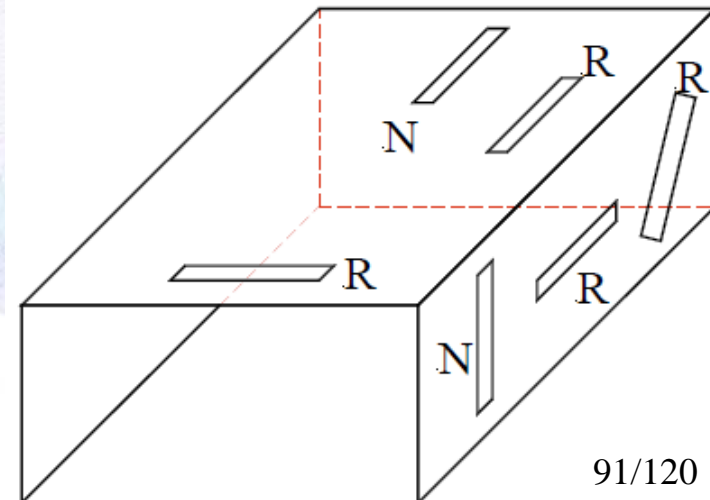
Таласоводне компоненте

- Лонгитудијални прорез се може искористити, на пример, за отварање таласовода у циљу снимања криве стојећег таласа (уношењем сонде са детектором, као код коаксијалног мерног вода) или за увлачење или извлачење отпорне плочице променљивог ослабљивача
- Сви остали прорези на слици ремете расподелу струје у зидовима таласовода, а тиме и поље у таласоводу



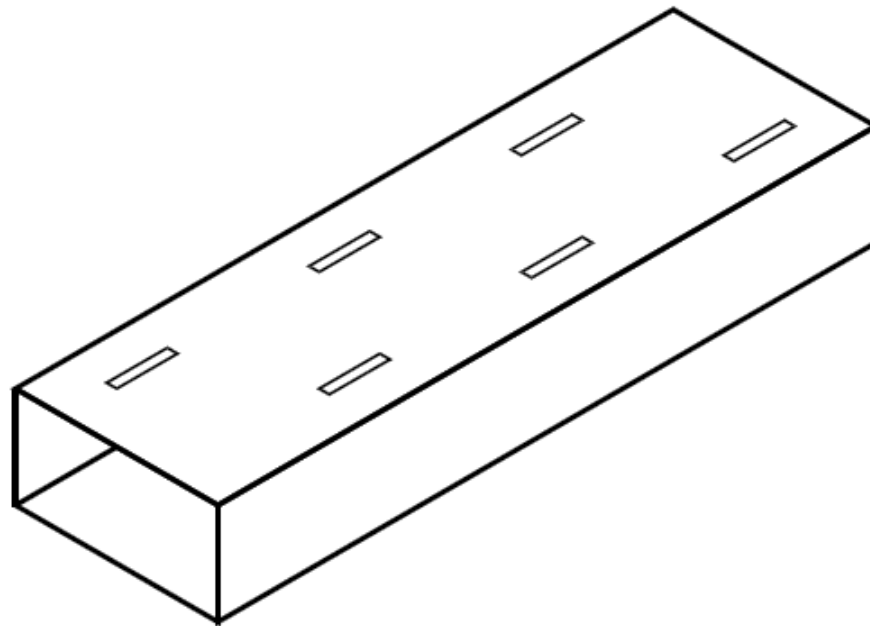
Таласоводне компоненте

- Пошто пресецају струјнице, на дужим страницама прореца нагомилавају се наелектрисања (која се мењају у времену у ритму промене поља у таласоводу)
 - Стога у прорезу постоји електрично поље
 - Због околних струја, у прорезу постоји и магнетско поље, а Поинтингов вектор у прорезу има компоненту нормалну на отвор, тако да долази до размене енергије између унутрашњости таласовода и околине
- Та размена је посебно интензивна уколико је дужина прореца око **половине таласне дужине**, када је прорез резонантан (и понаша се као ефикасна антена)
- Дакле, део енергије коју носи талас у таласоводу зрачи се кроз такав прорез



Таласоводне компоненте

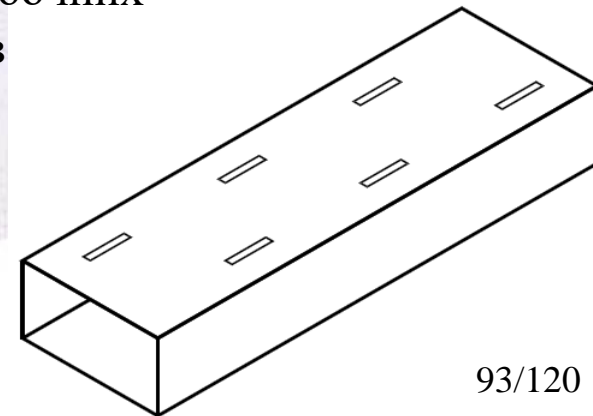
- Зрачећи прорези (прорезне антене) обично се постављају у низу, као што је приказано на слици, у циљу остваривања усмереног зрачења



Слика 5.16. Антенски низ зрачећих прореза.

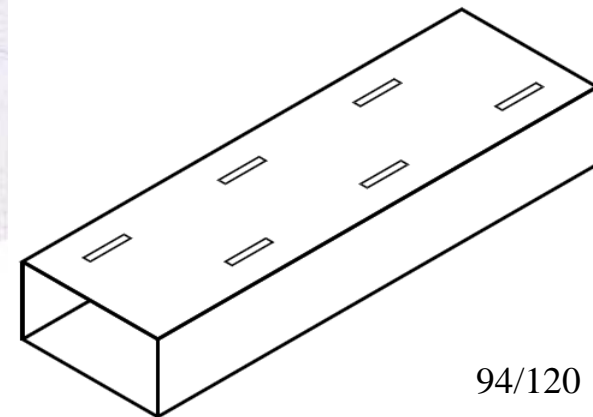
Таласоводне компоненте

- Средине прореза са слике су размакнуте за $\lambda_g/2$ мерено дуж таласовода
 - Прорези су постављени наизменично са једне и друге стране симетралне равни таласовода у циљу синфазног побуђивања прореза
 - Тиме се добија најјаче поље антенског низа у правцу нормалном на зид таласовода у коме су прорези
 - Јачина поља које зрачи прорез зависи од одстојања прореза од симетралне равни таласовода и мања је уколико је прорез ближи тој равни
 - Растојања прореза од симетралне равни обично опадају ка крајевима антенског низа како би се добио неуниформни антенски низ (најјаче зраче елементи око средине низа), који има нижи ниво бочних листова у дијаграму зрачења него униформни низ



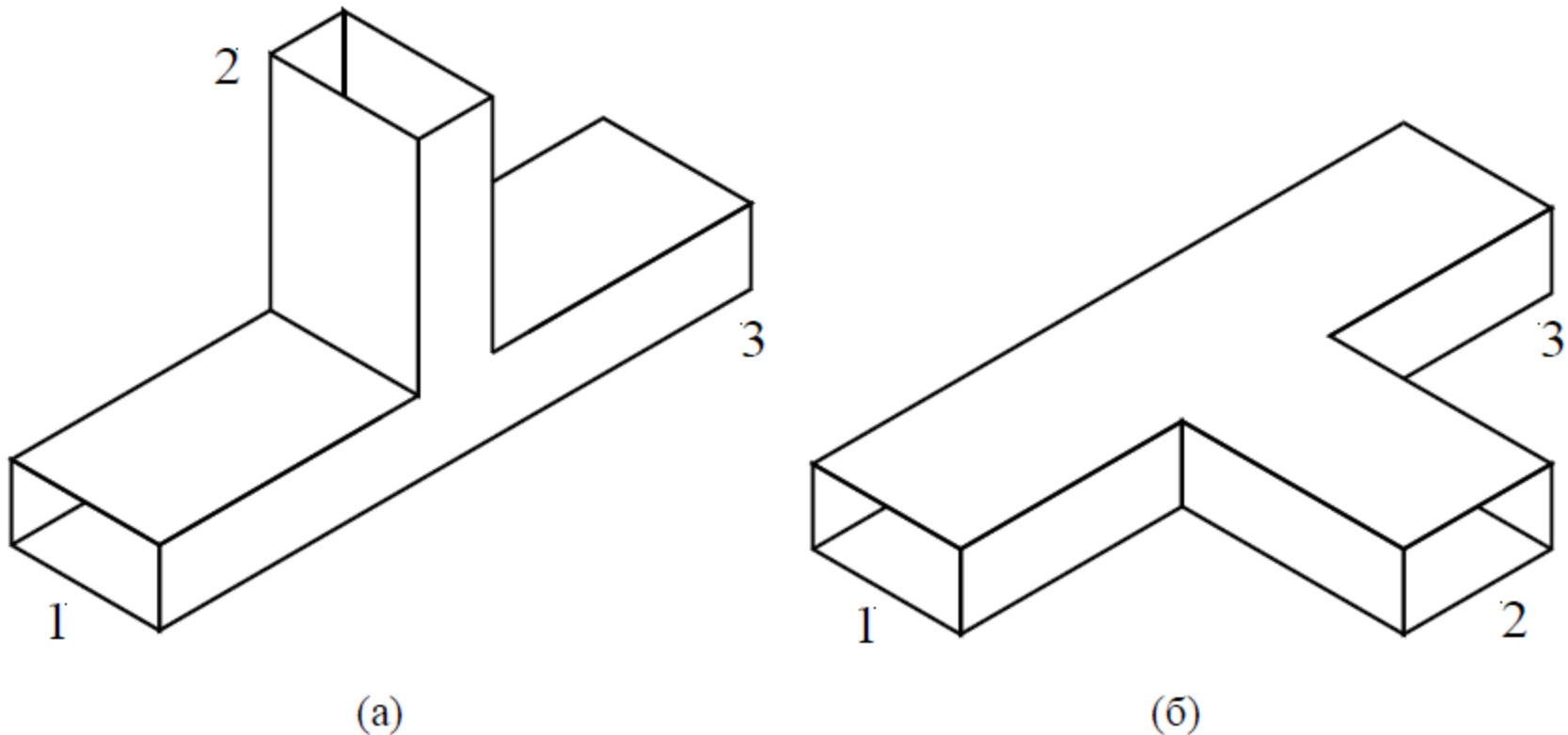
Таласоводне компоненте

- Антенски низ са слике има дијаграм зрачења у облику лепезе (усмерен у симетралној равни таласовода, а раширен у екваторијалној равни прореза)
 - Постављањем паралелно неколико таласовода са прорезима може се добити дводимензиони антенски низ (антенска решетка), који има усмерену карактеристику зрачења у простору (у обе поменуте равни)



Таласоводне компоненте

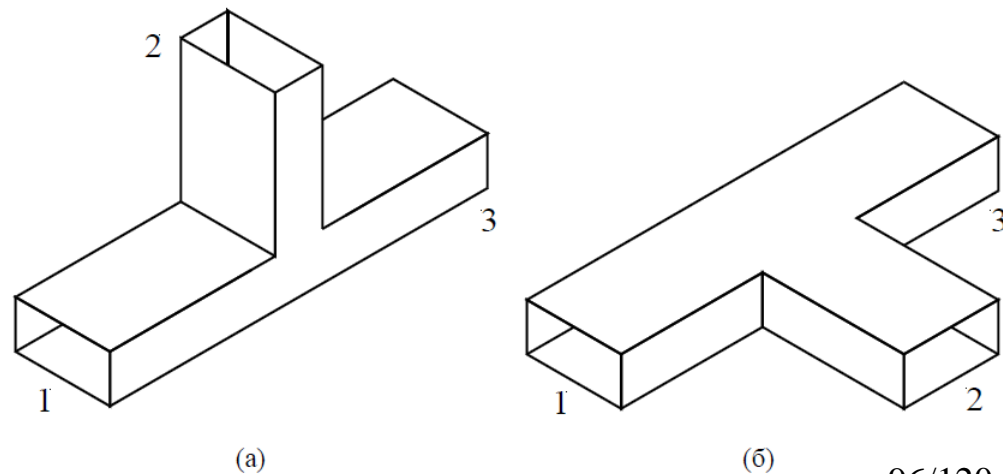
- Рачвање таласовода се обично прави у облику Т-спојева, приказаних на следећој слици



Слика 5.17. (а) ЕТ-спој и (б) НТ-спој.

Таласоводне компоненте

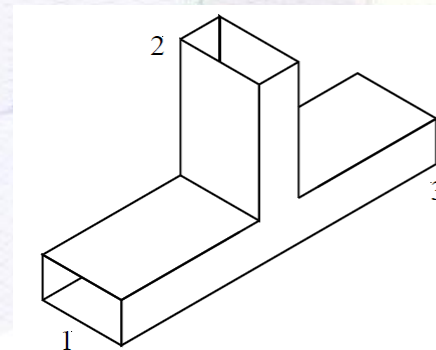
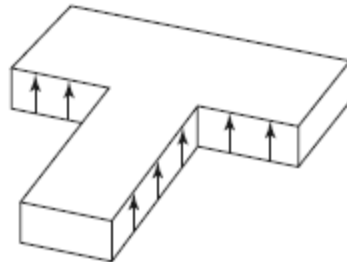
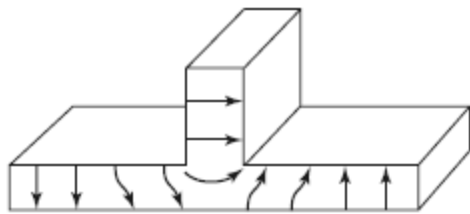
- Код првог споја (слика лево), гранање је у равни паралелној електричном пољу, па се такав спој назива ЕТ-спој
- Код другог споја (слика десно), гранање је у равни паралелној магнетском пољу, па се такав спој назива НТ-спојем



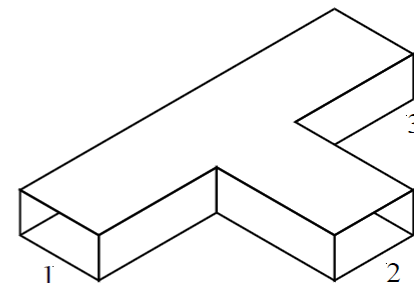
Слика 5.17. (а) ЕТ-спој и (б) НТ-спој.

Таласоводне компоненте

- Претпоставимо да се код ових спојева побуђује доминантни тип таласа на приступу 2, а да су друга два приступа прилагођена
- Због симетрије, таласи на приступима 1 и 3 биће истих интензитета
 - У симетрично постављеним референтним равнима на овим приступима, код ЕТ-споја поља таласа ће бити у противфази, а код НТ-споја поља ће бити у фази



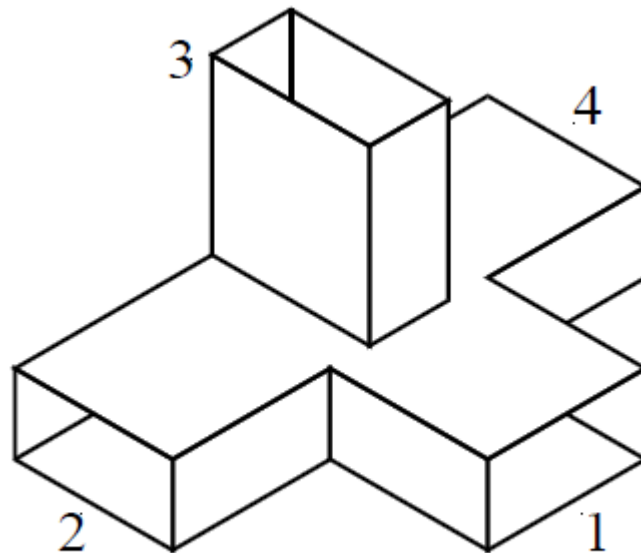
(a)



(б)

Таласоводне компоненте

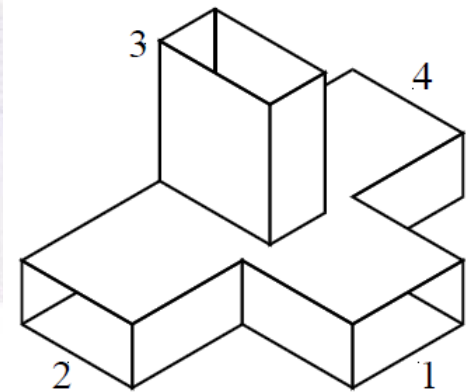
- Комбиновањем ЕТ-споја и НТ-споја добија се спој са четири приступа, приказан на слици, који се назива хибридним Т-спојем (или магичним Т-спојем)



Слика 5.18. Магични Т-спој.

Таласоводне компоненте

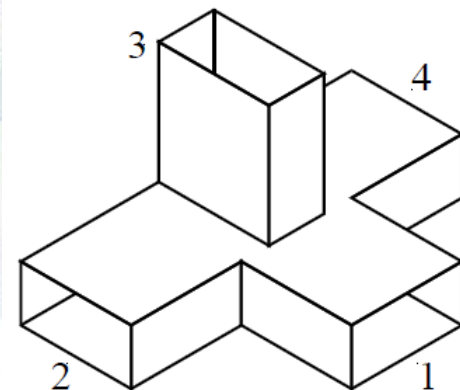
- Ако се овакав спој побуђује на приступу 3 (а остали приступи су прилагођени), на приступима 2 и 4 добиће се таласи истог интензитета и у противфази (као код ЕТ-споја)
 - При томе на приступу 1 нема таласа (приступ је изолован) због геометријске ортогоналности поља доминантног типа таласа у таласоводима који су на приступима 1 и 3
- Уколико се побуђује приступ 1, јављају се два таласа истих интензитета и у фази на приступима 2 и 4 (као код НТ-споја)



Слика 5.18. Магични Т-спој. 19/120

Таласоводне компоненте

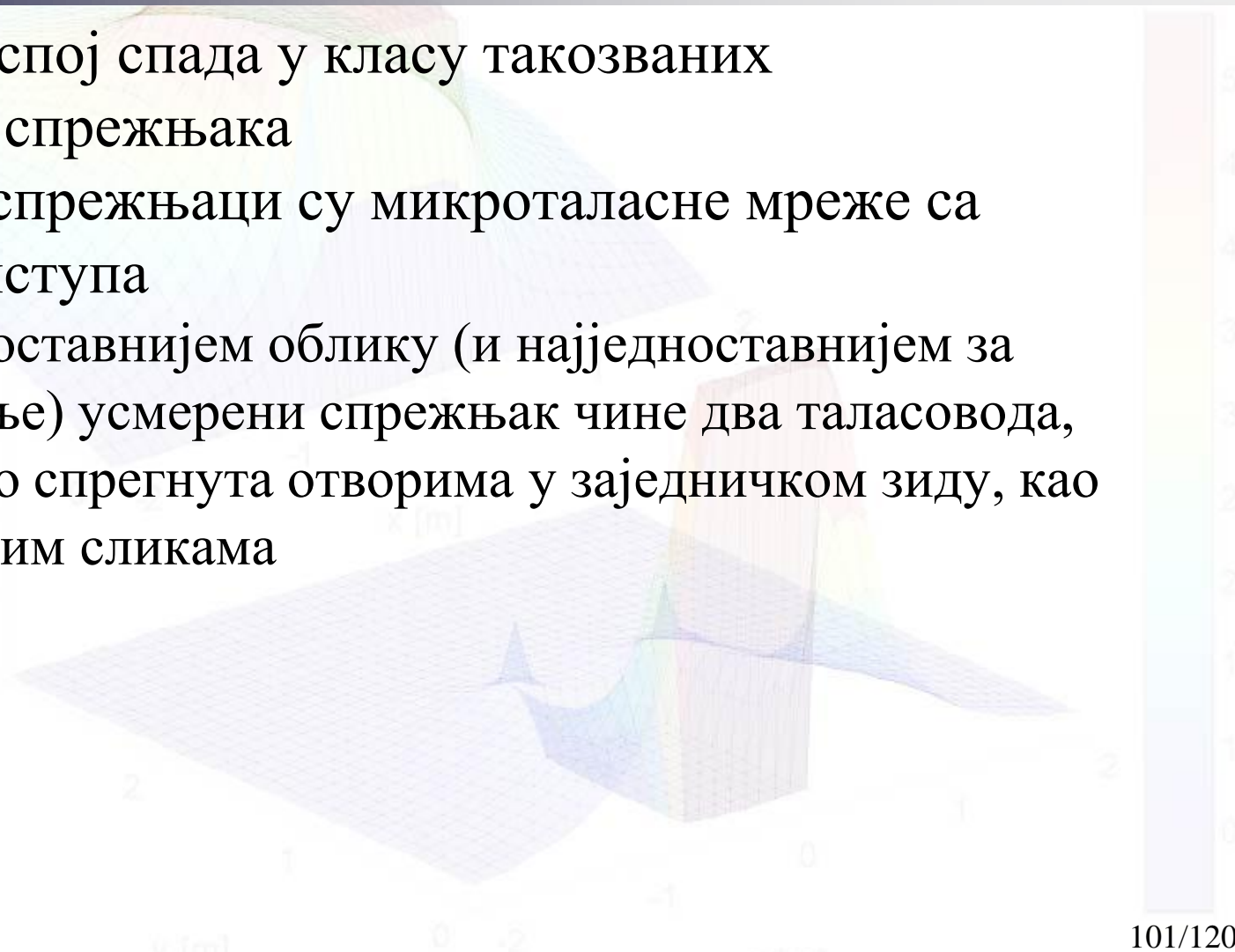
- Према томе, уколико се истовремено побуђују приступи 1 и 3, на приступу 2 добиће се разлика, а на приступу 4 збир сигнала пропорционалних онима који се доводе на приступе 1 и 3
 - Ова особина се примењује код баланских мешача (у пријемницима), где се на приступ 1 доводи сигнал из антене, а на приступ 3 сигнал из локалног осцилатора, док се на приступе 2 и 4 прикључују мешачке диоде
- Уколико се побуди приступ 2, а остали приступи су прилагођени, појавиће се сигнали на приступима 1 и 3, а приступ 4 ће остати изолован (иако се налази право у продужетку приступа 2)
 - О овој “магичној” особини хибридног споја биће више речи у осмом поглављу



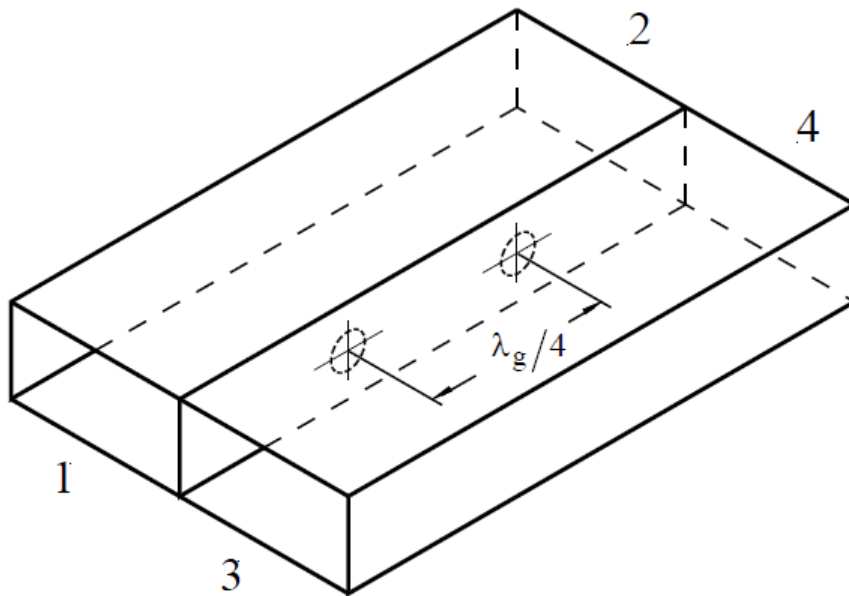
Слика 5.18. Магични Т-спој.

Таласоводне компоненте

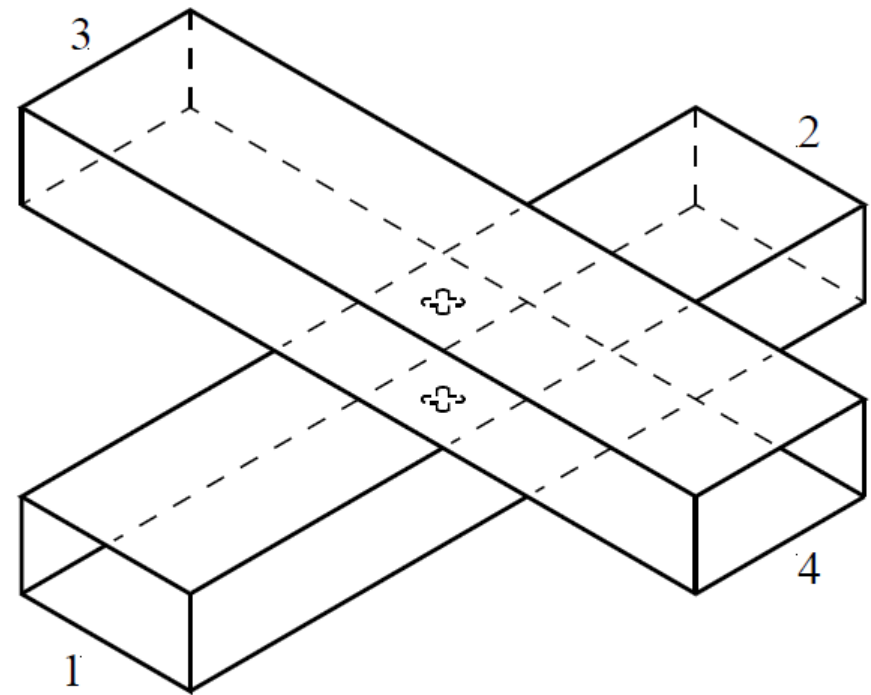
- Хибридни спој спада у класу такозваних усмерених спрежњака
- Усмерени спрежњаци су микроталасне мреже са четири приступа
 - У најједноставнијем облику (и најједноставнијем за разумевање) усмерени спрежњак чине два таласовода, међусобно спрегнута отворима у заједничком зиду, као на наредним сликама



Таласоводне компоненте

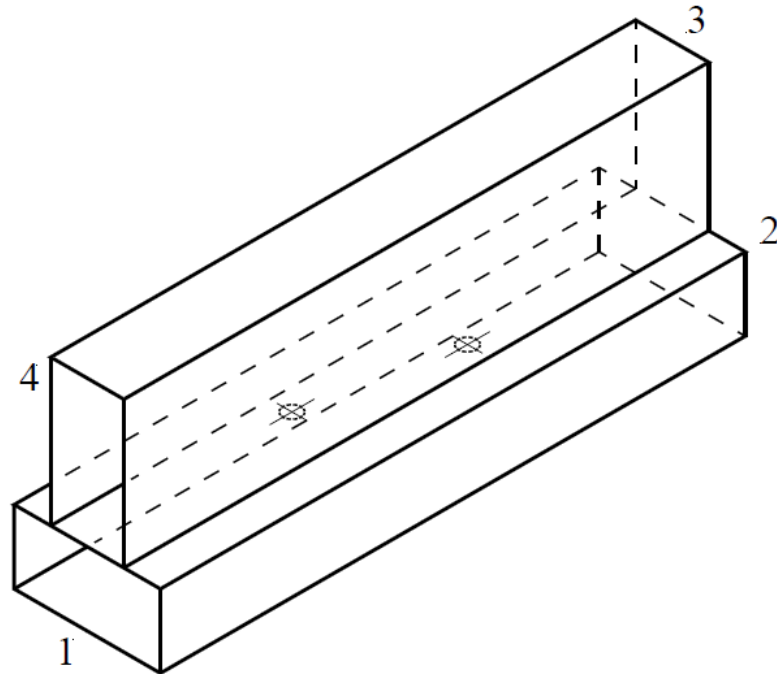


Слика 5.19а. Усмерени спрежњак са спрегом помоћу кружних отвора у ужим странама.

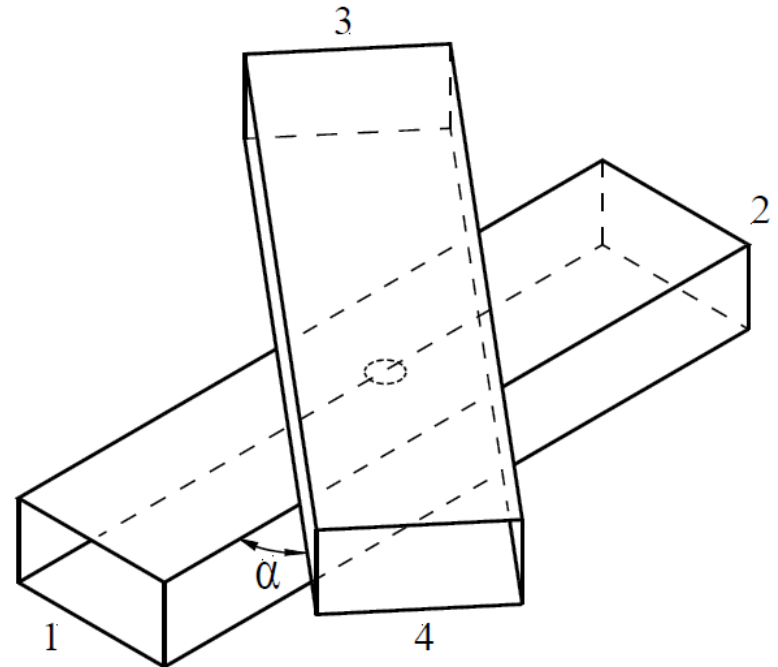


Слика 5.19б. Усмерени спрежњак са спрегом помоћу крстастих отвора у ширим странама.

Таласоводне компоненте



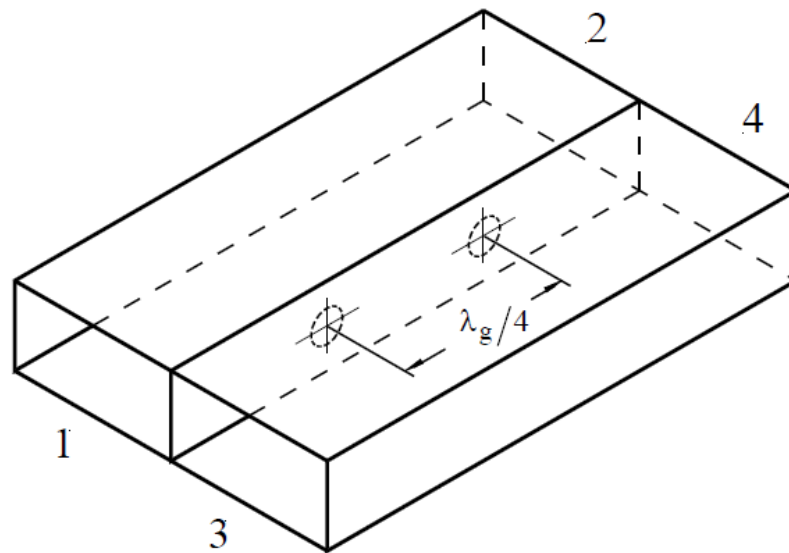
Слика 5.19в. Усмерени спрежњак са спрегом помоћу отвора у ужем зиду таласовода који се наслања на шири зид другог таласовода.



Слика 5.19г. Усмерени спрежњак са спрегом помоћу једног отвора.

Таласоводне компоненте

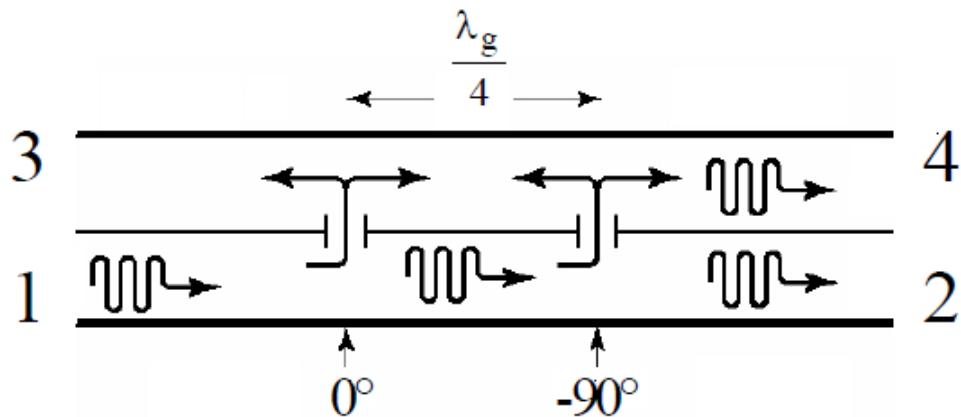
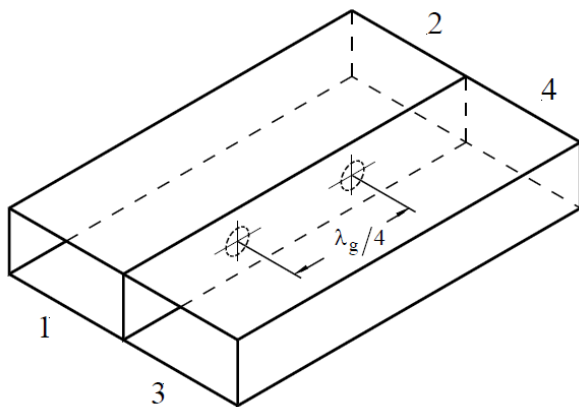
- Посматрајмо два таласовода (истих попречних пресека), који имају паралелне осе и заједничку ужу страну
- У том заједничком зиду налазе се два мала отвора, на међусобном растојању једнаком $\lambda_g/4$



Слика 5.19а. Усмерени спрежњак са спрегом помоћу кружних отвора у ужим странама.

Таласоводне компоненте

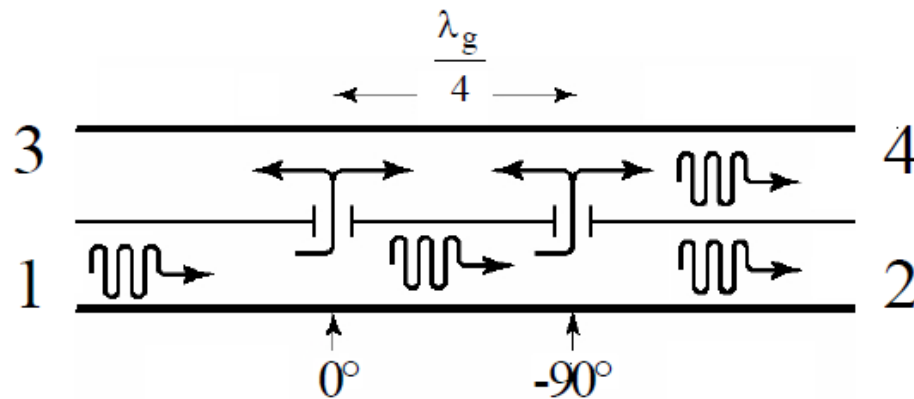
- Претпоставимо да је на приступ 1 прикључен генератор, који побуђује доминантни тип таласа у првом таласоводу, а да су сви остали приступи завршени прилагођењем (као што је приказано на слици десно)
- Уз то, претпоставимо да су отвори у зиду врло мали, тако да практично не утичу на простирање таласа у првом таласоводу



Слика 5.19д. Кретање таласа у спрежњаку са слике 5.19а.

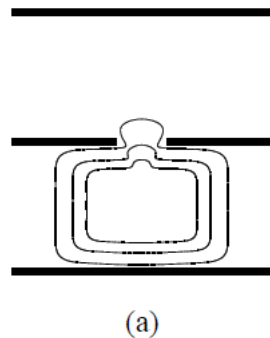
Таласоводне компоненте

- У том случају, у првом таласоводу постоји само прогресивни талас, који се простире од приступа 1 ка приступу 2
- Уз заједнички зид два таласовода постоји само магнетско поље (електрично је максимално у средини таласовода, а нула уз вертикалне зидове)
 - Први отвор у зиду у извесној мери ремети струјнице у првом таласоводу (јер је отвор округлог облика)



Таласоводне компоненте

- Линеје магнетског поља у првом таласоводу мало пролазе кроз отвор у други таласовод, и у другом таласоводу индукују електромагнетско поље
- Због симетрије, у другом таласоводу се стварају два доминантна таласа (други таласи се не могу простирати због односа радне учестаности и критичних учестаности) који путују у супротним смеровима (према приступима 3 и 4)

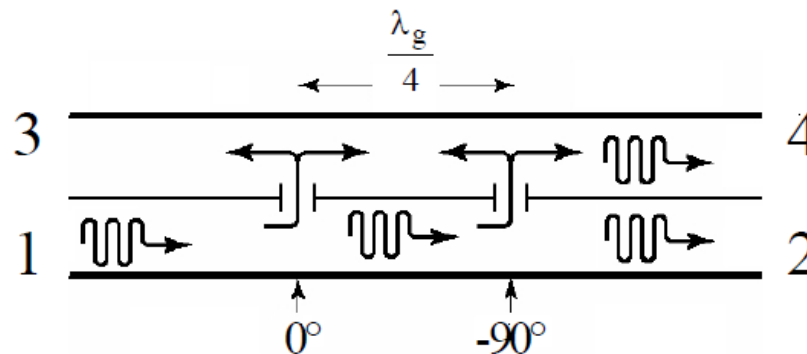


Слика 5.20. Спрега кроз отвор у заједничком зиду таласовода (а) магнетским пољем за систем са слике 5.19а и (б) електричним пољем (—) и магнетским пољем (---) за систем са слике 5.19г.

Таласоводне компоненте

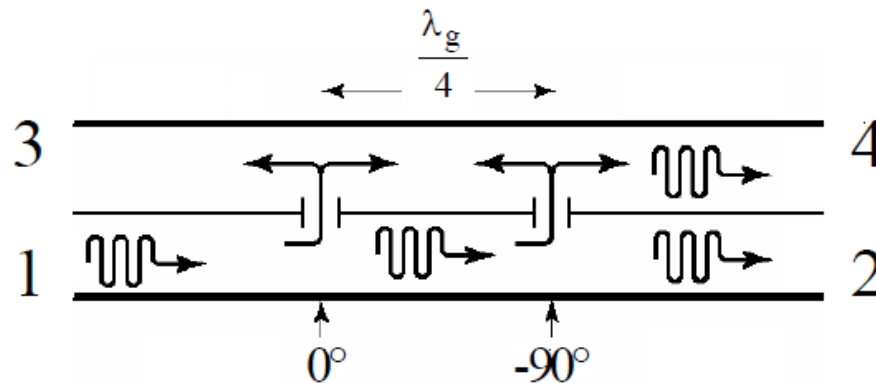
– Због слабе спреге (малог отвора), таласи побуђени у другом таласоводу су много мањег интензитета од прогресивног таласа у првом таласоводу

- Стога талас у првом таласоводу има практично исти интензитет на месту оба отвора, али поље на другом отвору фазно заостаје за $\pi/2$ за пољем на првом отвору због ефекта простирања (за $\lambda_g/4$)
 - Кроз други отвор долази до преслушавања као и у првом отвору, па се у другом таласоводу опет индукују два таласа који се простиру ка приступима 3 и 4
 - Ови таласи су практично истих интензитета као таласи преслушани на првом отвору



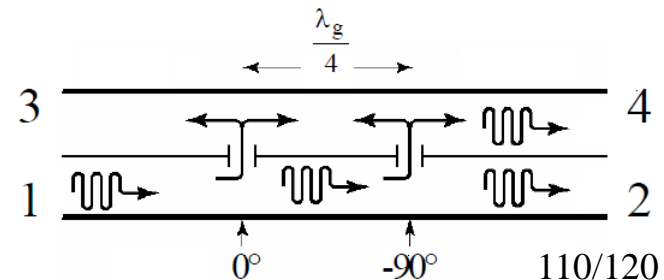
Таласоводне компоненте

- Два таласа (индукована на првом и другом отвору) која се простиру ка приступу 4 имају исте фазе (због истог укупног пређеног пута таласа од приступа 1), али се фазе таласа који се простиру ка приступу 3 разликују за π (јер поље на другом отвору фазно заостаје за $\pi/2$ за пољем на првом отвору, а талас индукован на другом отвору још мора прећи пут дужи за $\lambda_g/4$ од таласа индукованог на првом отвору)
- Због тога се таласи који се простиру ка приступу 3 практично поништавају на том приступу
- Дакле, приступ 3 је изолован
- Као резултат, јавља се преслушани сигнал само на приступу 4



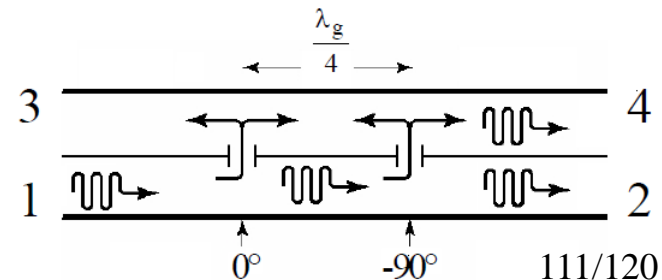
Таласоводне компоненте

- Претпоставимо, сада, да се генератор налази на приступу 2, а да су остали приступи прилагођени
 - У првом таласоводу постоји само прогресивни талас који се простире од приступа 2 ка приступу 1
 - Сличним резоновањем као у претходном случају, може се закључити да се сада преслушани сигнал јавља само на приступу 3, док је приступ 4 изолован
 - Лако је видети да се слични резултати добијају за сигнале преслушане у првом таласоводу када се генератор прикључи на један приступ другог таласовода
 - У сваком случају таласоводи су у спрези, али је спрега директивна, јер се сигнали јављају на различитим приступима, зависно од смера простирања таласа у побуђеном таласоводу



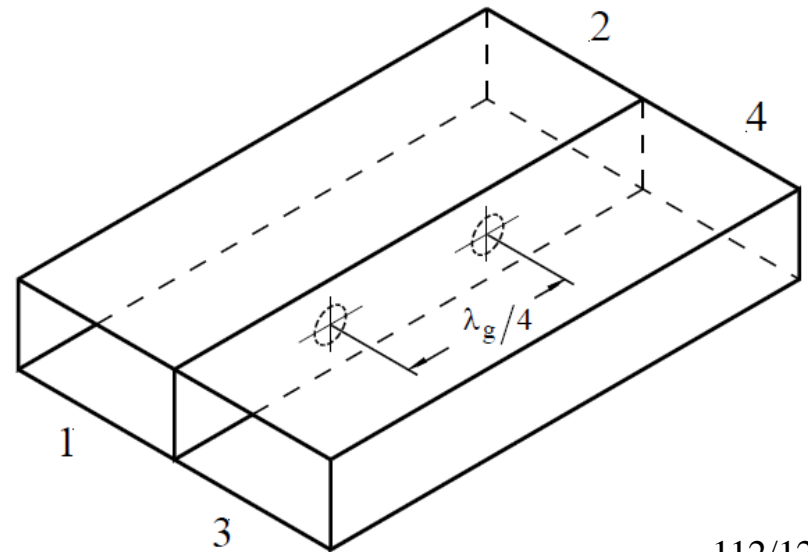
Таласоводне компоненте

- Ако је генератор прикључен на приступ 1 првог таласовода, а приступ 2 завршен неприлагођеним пријемником, на првом таласоводу ће постојати инцидентни талас (који се простире од приступа 1 ка приступу 2) и рефлектовани талас (који се простире у супротном смеру)
 - Претпоставимо и даље да су приступи 3 и 4 завршени прилагођењима
 - Тада ће се на приступу 4 појавити талас сразмеран инцидентном таласу у првом таласоводу, а на приступу 3 талас сразмеран рефлектованом таласу
 - Дакле, у другом таласоводу су добијени раздвојени подаци о прогресивним таласима у првом таласоводу
 - На основу тога, мерењем односа снага таласа на приступима 3 и 4 добија се квадрат модула коефицијента рефлексије у првом таласоводу



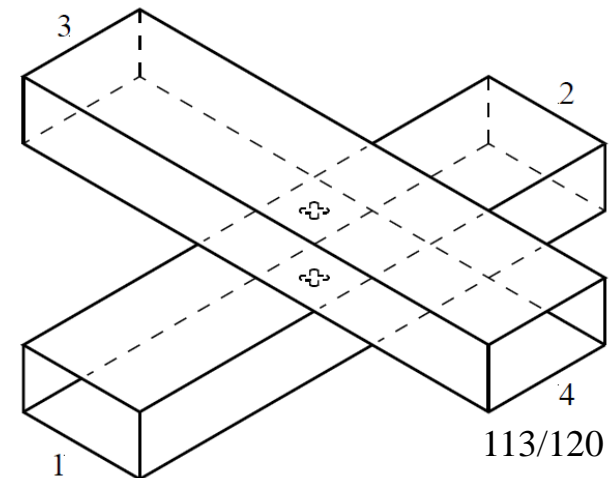
Таласоводне компоненте

- Усмерени спрежњак разматран до сад је ускопојасан (јер се поништавање таласа на приступу 3 јавља само када је растојање између отвора једнако $\lambda_g/4$)
 - Широкопојасни спрежњак се може остварити постављањем неколико подесно димензионисаних отвора у заједничком зиду



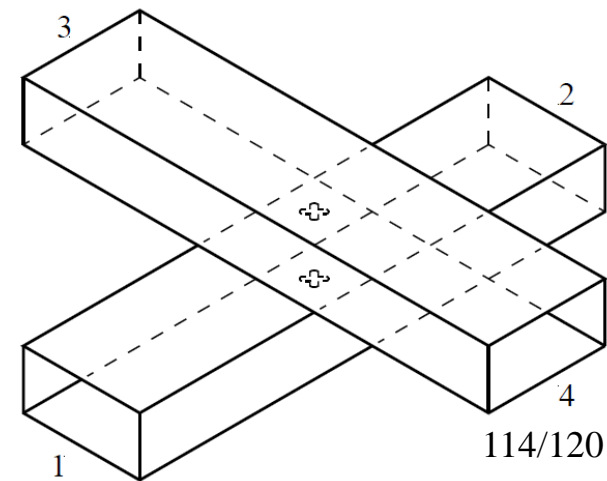
Таласоводне компоненте

- Код следећег усмереног спрежњака осе таласовода су укрштене под правим углом, а заједнички им је део ширег зида
 - На том зиду постоје два отвора, крстастог облика, тако да се остварује само спрега магнетским пољем
 - Талас који се простира у доњем таласоводу од приступа 1 ка приступу 2 индукује кроз сваки отвор по два таласа у горњем таласоводу, који се простиру према приступима 3 и 4



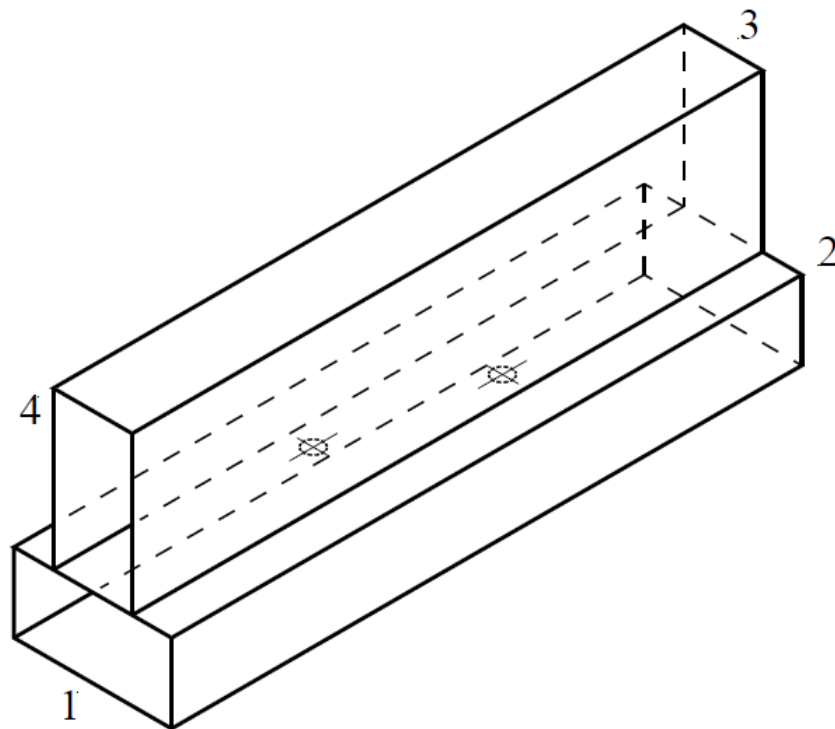
Таласоводне компоненте

- Међутим, таласи који се простиру према приступу 3 су у противфази (само због структуре магнетског поља, док су пређени путеви сигнала од приступа 1 до приступа 3 исти за оба отвора), па се поништавају (без обзира на учестаност)
- Стога остаје само сигнал на приступу 4



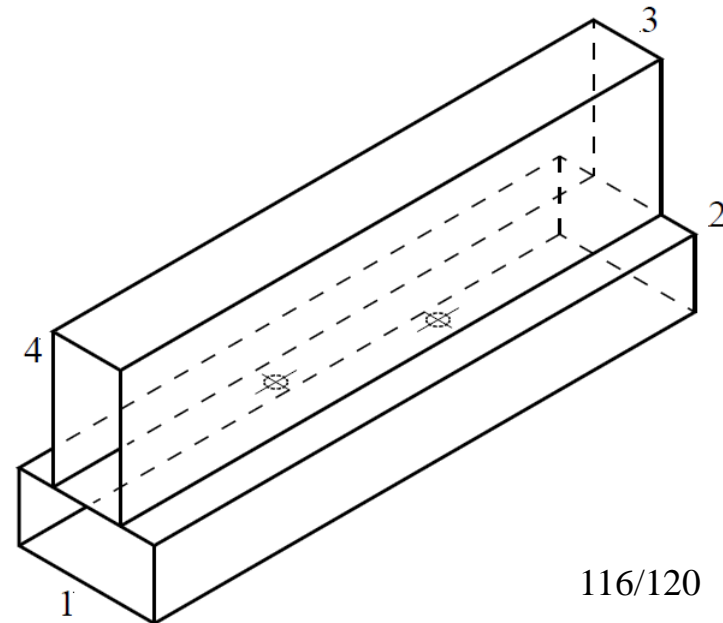
Таласоводне компоненте

- Код трећег примера усмереног спрежњака у техници правоугаоних таласовода, осе таласовода су паралелне, таласоводи имају заједничку раван симетрије, али се ужи зид горњег таласовода наслања на шири зид доњег



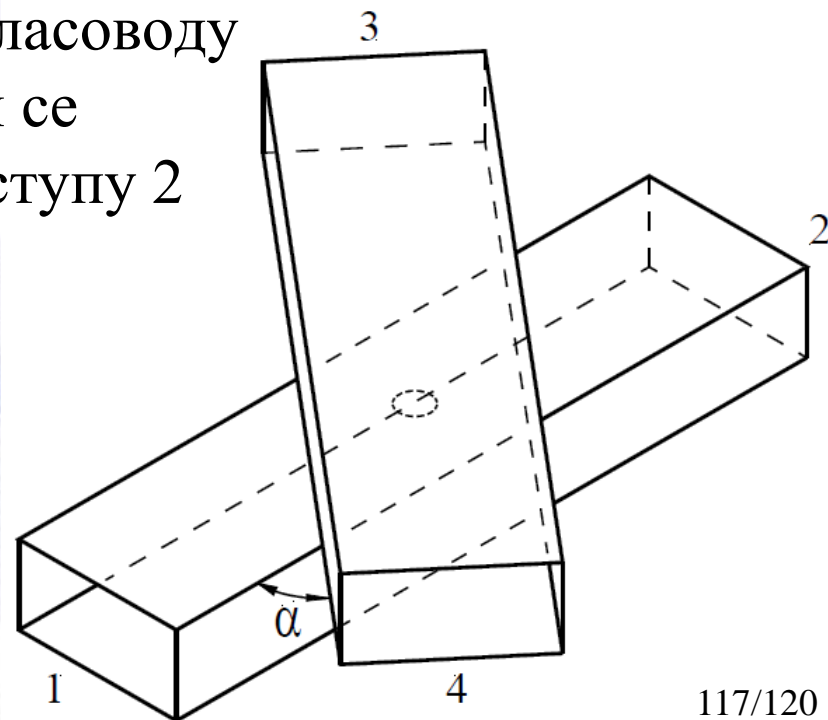
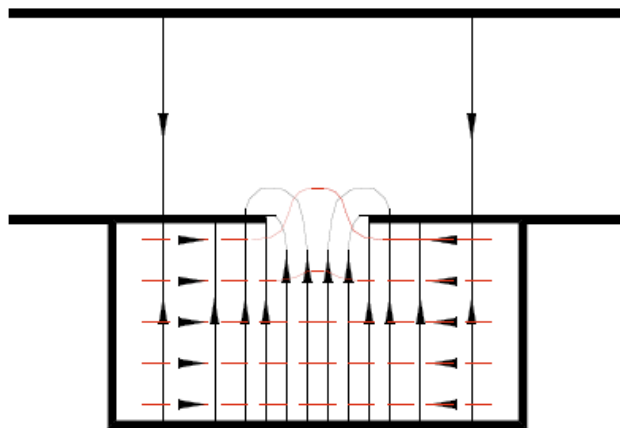
Таласоводне компоненте

- У заједничком зиду постоје два отвора, постављена са супротних страна симетралне равни, на међусобном растојању $\lambda_g/4$ мерено дуж таласовода
- Као и код претходног спрежњака, таласи који се простиру ка приступу 3 су у противфази и практично се поништавају без обзира на учестаност



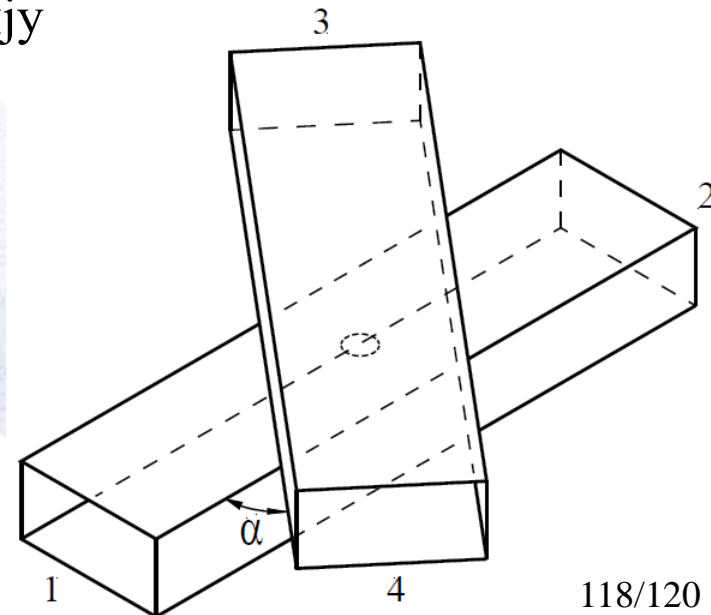
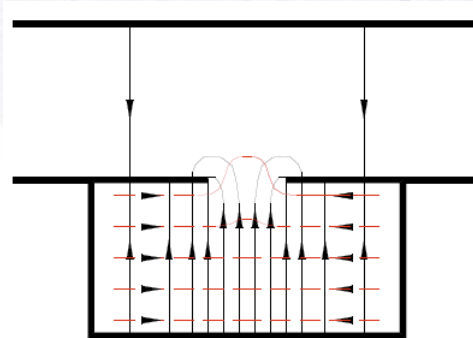
Таласоводне компоненте

- Код четвртог примера усмереног спрежњака осе таласовода заклапају угао α , таласоводи се наслањају један на други широм страном, а у средини стране постоји само један мали округли заједнички отвор – Претпоставимо да на доњем таласоводу постоји прогресивни талас који се простире од приступа 1 ка приступу 2



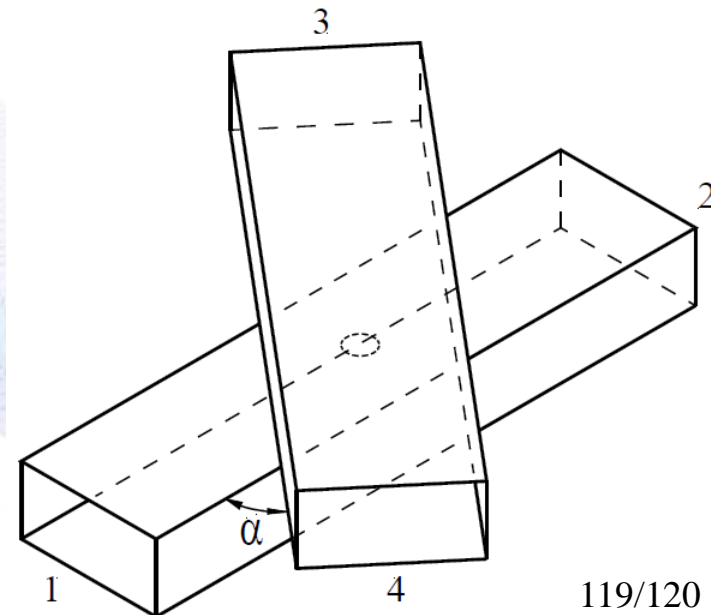
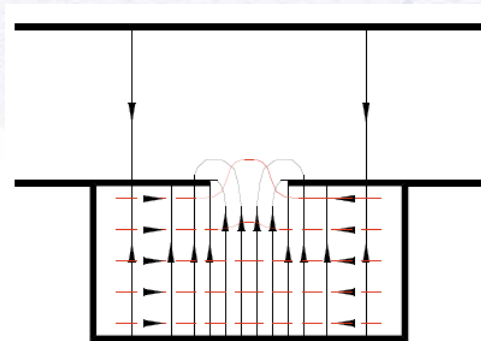
Таласоводне компоненте

- Кроз отвор продире електрично поље тог таласа, које у горњем таласоводу индукује два таласа, истих интензитета, који се простиру ка приступима 3 и 4
 - Уколико отвор није мали, интензитети преслушаних таласа нису једнаки
- Ти таласи имају исту фазу
 - Однос фаза је најлакше посматрати по електричном пољу
- Електрично поље које продире кроз отвор у горњи таласовод има ротациону симетрију (јер је, приближно, такво поље у доњем таласоводу на месту отвора), па јачина преслушаних таласа не зависи од угла α



Таласоводне компоненте

- Кроз отвор продире и магнетско поље таласа из доњег таласовода
 - Доминантни талас у средини горњег таласовода има само компоненту магнетског поља која је паралелна ширини таласовода и заклапа угао α са магнетским пољем доњег таласовода на средини отвора
 - Стога је интензитет преслушаних таласа побуђених магнетским пољем сразмеран са $\cos \alpha$
 - Два таласа побуђена магнетским пољем имају супротне фазе електричног поља



Таласоводне компоненте

- При томе је талас побуђен магнетским пољем који се простире ка приступу 4 у фази са таласом побуђеним електричним пољем који се простире ка приступу 4
- Таласи побуђени електричним и магнетским пољем који се простиру ка приступу 3 имају супротне фазе, а избором угла α може се постићи да се ти таласи потпуно пониште (при једној учестаности)
- Талас који се простире у супротном смеру у доњем таласоводу (од приступа 2 ка 1) тада се преслушава само на приступ 3

