

Mikrotalasna tehnika

Komponente mikrotalasnih kola sa četiri pristupa - Mostovi i Sprežnjaci

B. Lutovac

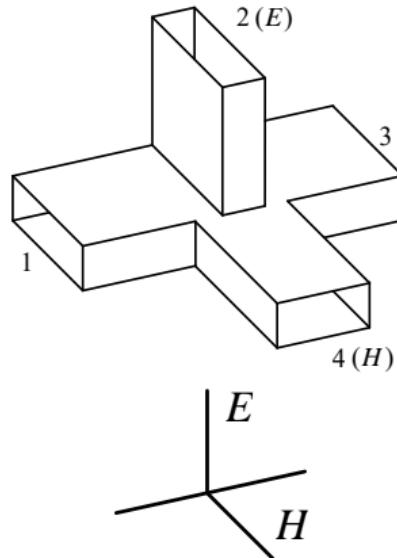
Elektrotehnički fakultet

Decembar 2021. godine



Most

- **Most** je recipročni, reaktivni elemenat sa četiri pristupa sa sledećim svojstvom: Snaga dovedena na bilo koji od 4 pristupa dijeli se po pola (nema refleksije) na dva od preostala 3 pristupa, pri čemu se pretpostavlja da su svi pristupi prilagođeni. Postoji više vrsta mostova.
- **Magično T** ima više varijanti, a mi ćemo razmotriti jednu od njih tzv. dvojni T spoj, koji je prikazan na slici.
- To je u stvari kombinacija T spojeva u E i H ravni. Kraci 1, 2, i 3 obrazuju T spoj u E ravni, dok kraci 1, 4, i 3 obrazuju T spoj u H ravni. Na šemama se dvojni T spoj označava kao što je pokazano na slici.
- Pristup 2 se naziva E pristup, a pristup 4 – H pristup.

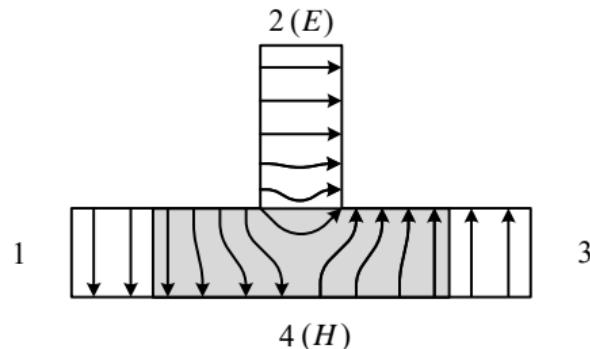


- Prvo što se može uočiti je da kraci 2 i 4 (odnosno E i H pristup) nijesu međusobno spregnuti, tj. pri pobuđivanju jednog od njih, ne pobuđuje se onaj drugi, odnosno,
 $S_{24} = S_{42} = 0$.



Magično T

- Ako se pobuđuje pristup 2, linije električnog polja izgledaju kao na slici.
- Vidimo da su u talasovodu linije električnog polja antisimetrične, što pobuđuje talas TE_{20} . Međutim, pošto su svi talasovodi, pa i H pristup, dimenzionisani za osnovni tip talasa TE_{10} , talas TE_{20} se ne može prostirati.
- Prema tome, pristup 4 se ne pobuđuje, kada se pobuđuje pristup 2.
- Zbog recipročnosti, važi i obrnuto, što se može direktno provjeriti razmatrajući raspored linija električnog polja pri pobuđivanju pristupa 4.
- Pretpostavimo da su u pristupu 2 i 4 postavljeni elementi za prilagođenje, što eliminiše refleksiju u njima, dakle,
 $S_{22} = S_{44} = 0$.



- Dalje, zbog simetrije da je $S_{11} = S_{33}$.
Takođe, (vidi svojstva T spoja u E i H ravni)
 $S_{14} = S_{34}$ (pri pobuđivanju pristupa 4, pobuđuju se pristupi 1 i 3 talasima iste amplitudine i u fazi).
- Pri pobuđivanju pristupa 2 pobuđuju se pristupi 1 i 3 talasima iste amplitudine, ali sa faznim pomjerajem π , te je $S_{12} = -S_{32}$.



Magično T...

- Matrica rasijanja za magično T, uzimajući u obzir da mora biti simetrična, ima oblik:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & 0 & -S_{12} & 0 \\ S_{13} & -S_{12} & S_{11} & S_{14} \\ S_{14} & 0 & S_{14} & 0 \end{bmatrix}$$

- Iz uslova unitarnosti dobijamo

$$|S_{11}|^2 + |S_{12}|^2 + |S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 = 1 \quad (1)$$

$$2|S_{12}|^2 = 1 \Rightarrow |S_{12}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

$$2|S_{14}|^2 = 1 \Rightarrow |S_{14}| = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

- Zamjenom (2) i (3) u (1) dobijamo:

$$|S_{11}|^2 + |S_{13}|^2 = 0 \Rightarrow S_{11} = 0 \text{ i } S_{13} = 0$$

- Most je automatski prilagođen i sa strane pristupa 1 (a samim tim i sa strane pristupa 3, jer je $S_{33} = S_{11}$), i kraci 1 i 3 (bočni kraci), nijesu spregnuti.
- Ovo znači da pri pobuđivanju pristupa 1 nema refleksije u njemu i ne pobuđuje se pristup 3. Pri pobuđivanju pristupa 3, nema refleksije u njemu i ne pobuđuje se pristup 1. Ako su elementi S_{12} i S_{14} realni, dobićemo matricu rasijanja u obliku:

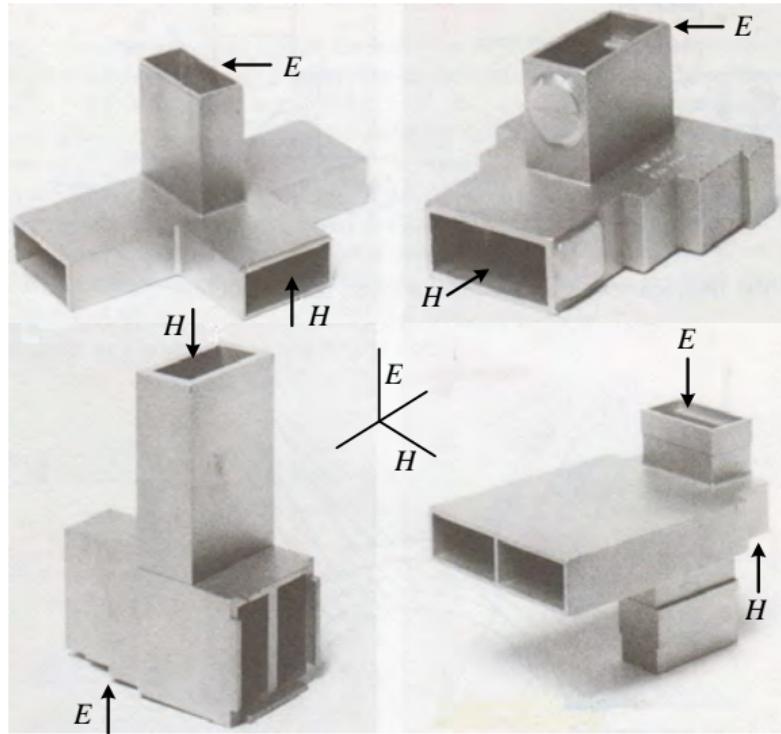
$$\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

- Na osnovu ove matrice se vidi da je magično T stvarno most. Ako promijenimo oznake krajeva, mijenjaće se i matrica rasijanja.



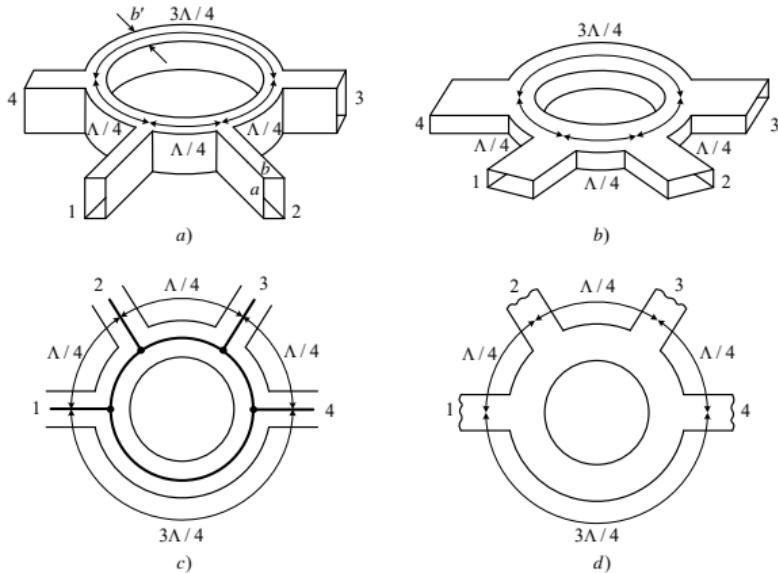
Magično T...

- Magično T predstavlja relativno širokopojasan uređaj ($10 \div 15\%$ oko centralne učestanosti za koju je projektovan); širokopojasnost je uglavnom uslovljena širokopojasnošću elemenata za prilagođenje u E i H pristupu.
- Nedostatak ovog mosta je relativno glomazna konstrukcija.
- Kompaktniju konstrukciju imaju neke od drugih varijanti prikazane na slici.



Prstenasti most (Hibridni prsten)

- Prstenasti most može može biti talasovodni u E ravni (slika a)), talasovodni u H ravni (slika b)), koaksijalni (slika c) i trakasti (slika d)).
- Talasovodni prsten u E ravni je kombinacija 4 T spoja u E ravni.
- Svaki od talasovoda 1 do 4 sa odsječcima savijenog talasovoda lijevo i desno od njega, predstavlja T spoj u E ravni, ako se pri tome zanemari zakrivljenost savijenog talasovoda.
- Pretpostavimo da se pobuđuje jedan od pristupa na primjer, pristup 1. U savijenom talasovodu formiraće se dva talasa iste amplitude, fazno pomjereni za π , koji se kreću u suprotnim smjerovima.
- Talas koji ide desno do pristupa 2 prelazi put $\Lambda/4$ a talas koji ide lijevo do istog pristupa

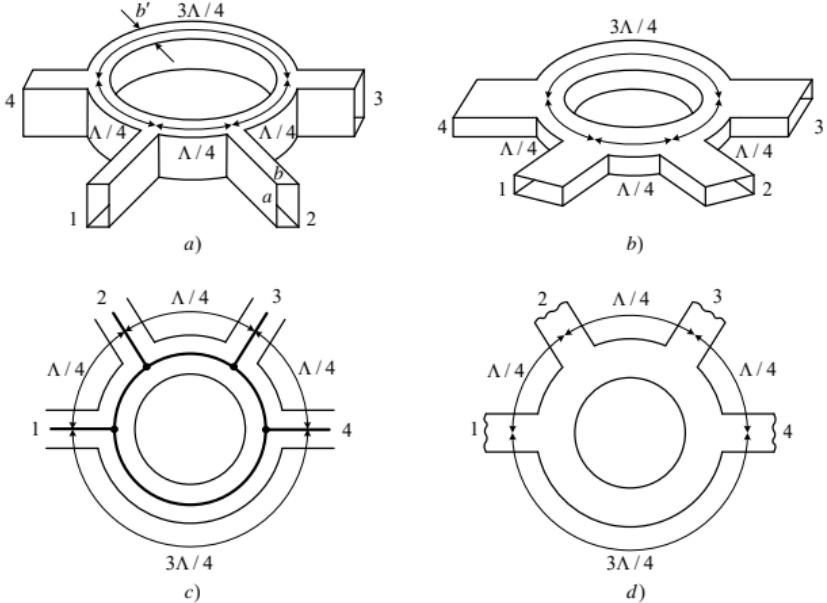


prelazi put $\Lambda/4 + 3\Lambda/4 + \Lambda/4$.

- Pošto je razlika ovih puteva jednaka Λ , ova dva talasa zadržavaju ispred pristupa 2 polaznu fazu razliku π , pa se pristup 2 pobuđuje.

Prstenasti most (Hibridni prsten)...

- Isto se dešava i sa pristupom 4.
- Ispred pristupa 3 talasi koji se kreću kroz savijeni talasovod prelaze puteve koji se razlikuju za
$$(\Lambda/4 + 3\Lambda/4) - (\Lambda/4 + \Lambda/4) = \Lambda/2$$
 što unosi dodatnu faznu razliku od π .
- Prema tome, ispred pristupa 3 talasi koji se kreću kroz savijeni talasovod, naći će se u fazi, pa se pristup 3 ne pobuduje.
- Snaga iz pristupa 1 se podjednako dijeli na pristupe 2 i 4, ali je ta snaga manja od polovine snage u pristupu 1 zbog refleksije u njemu.
- Preostaje da se eliminiše ta refleksija, odnosno, da se izvrši prilagođenje.

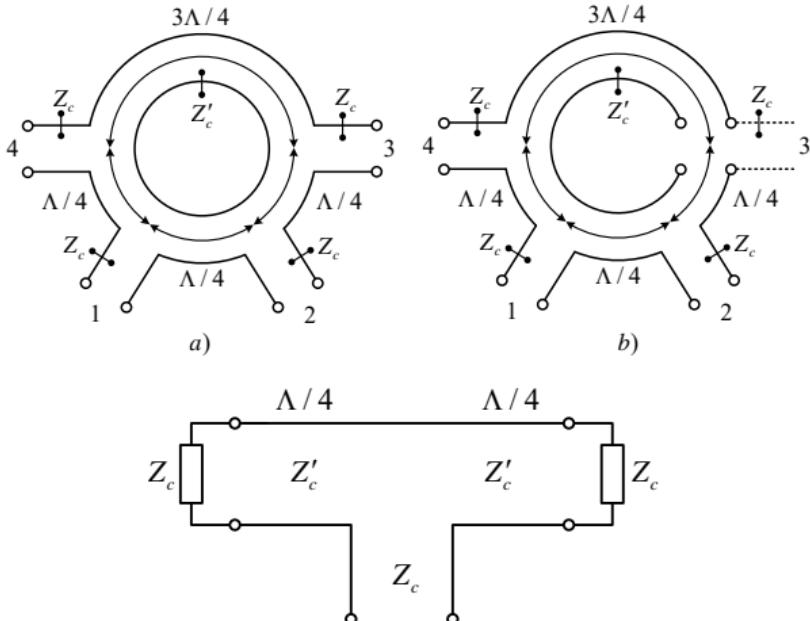


- Za to nije neophodan neki poseban element za prilagođenje, već se ono postiže pogodnim izborom odnosa karakterističnih impedansi pristupnih talasovoda i savijenog talasovoda.

Prstenasti most (Hibridni prsten)...

- Približna ekvivalentna šema talasovodnog prstena u E ravni je redno grananje vodova (slika a)).
- Pošto se pri pobuđivanju pristupa 1, pristup 3 ne pobuđuje, to će na ekvivalentnoj šemi biti predstavljeno prekidima (slika b)).
- Dva otvorena voda dužine $\Lambda/4$ i $3\Lambda/4$ imaju ulaznu impedansu jednaku nuli i tako dolazimo do ekvivalentne šeme na slici desno (dolje). Sa nje vidimo, da se vod 1 završava prijemnikom čija je impedansa $Z_c'^2/Z_c + Z_c'^2/Z_c = 2Z_c'^2/Z_c$.
- Prema tome, uslov prilagođenja (sa strane pristupa 1) je

$$\frac{2Z_c'^2}{Z_c} = Z_c$$



odakle slijedi da je

$$Z_c' = \frac{Z_c}{\sqrt{2}}$$

Prstenasti most (Hibridni prsten)...

- Pošto je

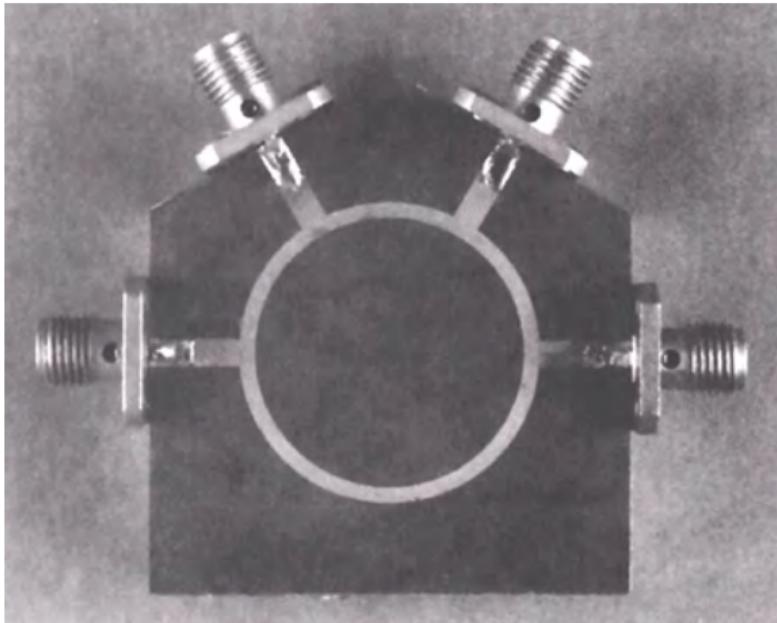
$$Z_c = \frac{b}{a} Z, \quad Z'_c = \frac{b'}{a} Z$$

dobijamo da treba da bude

$$b' = \frac{b}{\sqrt{2}}$$

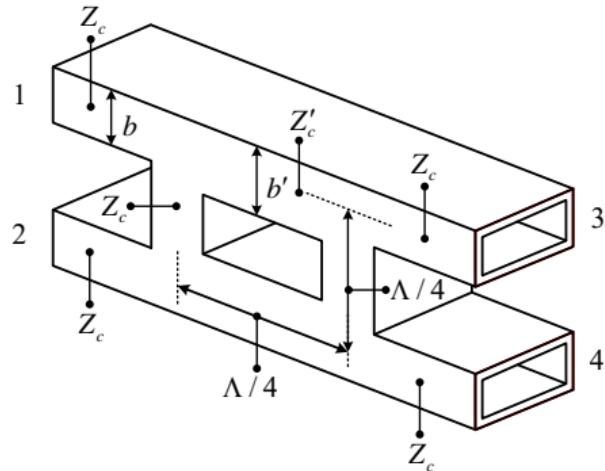
- Isti je uslov za prilagođenje sa strane bilo kog drugog pristupa i dobijamo most.
- Snaga iz bilo kojeg pristupa se dijeli na pola na dva susjedna pristupa (ovo smo pokazali za pristup 1 ali je isto i za bilo koji drugi pristup).
- Ekvivalentna šema za ostala 3 prstena je paralelno grananje vodova.

- Uslov prilagođenja za njih je $Z'_c = \sqrt{2}Z_c$.
- Realizacija mikrotrakastog prstenastog mosta (hibridnog prstena) je prikazana na slici ispod.



Kvadratni most

- Kvadratni most se takođe, može izvesti u talasovodnoj, koaksijalnoj i trakastoj varijanti.
- Na slici je prikazan kvadratni talasovodni most u E ravni. Može se pokazati da je za njega uslov prilagođenja $Z'_c = Z_c\sqrt{2}$ odnosno $b' = b\sqrt{2}$.
- Pri ispunjenju tog uslova snaga iz bilo kog pristupa se dijeli po pola na dva naspramna pristupa (na primjer, iz 1 u 3 i 4), pri čemu talas u pristupu koji je produžetak pristupa koji se pobuđuje, prednjači za $\pi/2$.
- Za ostala tri kvadratna mosta (talasovodni u H ravni, koaksijalni i trakasti) uslov prilagođenja je $Z'_c = Z_c/\sqrt{2}$.
- Matrica rasijanja kvadratnog mosta u E ravni



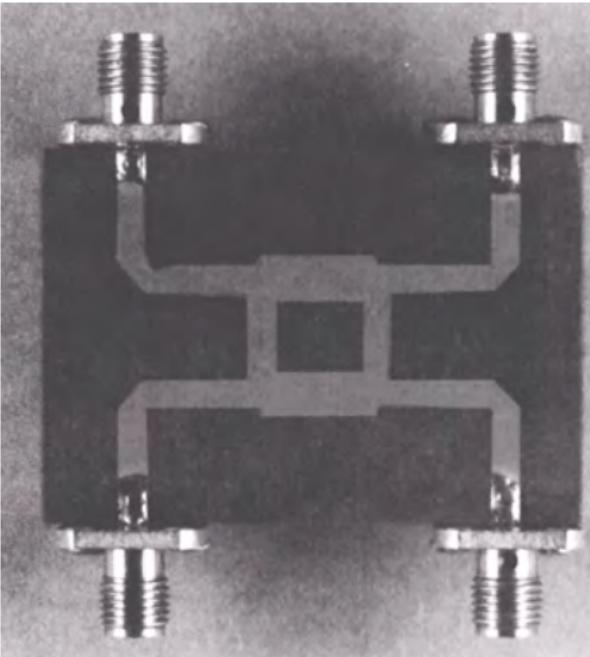
se lako može napisati uzimajući u obzir navedena svojstva i jednaka je:

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



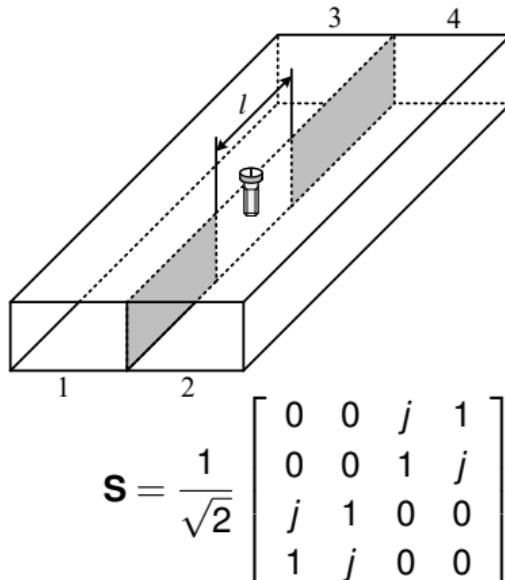
Kvadratni most...

- Zbog toga što u konstrukcijama hibridnog prstena i kvadratnog mosta figurišu talasne dužine, ova dva mosta su uskopojasna odnosno, zadržavaju svojstvo mosta samo u uskom opsegu ($\sim 5\%$) oko centralne učestanosti za koju su projektovani.
- Realizacija mikrotrakastog kvadratnog mosta je prikazana na slici.



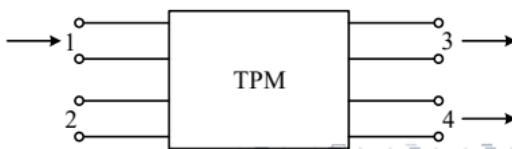
Talasovodni prorwzni most

- Ovo je jedan od najčešće korišćenih mostova, jer je relativno širokopojasan ($10 \div 15\%$), i ima kompaktnu konstrukciju.
- Sastoji se (slika dsno) od dva jednakataravougaona talasovoda sa zajedničkim zidom u kojem je napravljen prorez dužine l .
- Za eliminisanje refleksije (odnosno, za prilagođenje sa strane bilo kog pristupa) služi zavrtanj postavljen na sredini proreza.
- Može se pokazati, da se za određenu vrijednost dužine l , dobija most.
- Na primjer, snaga iz pristupa 1 se dijeli po pola u pristupima 3 i 4, pri čemu talas u pristupu 3 prednjači talasu u pristupu 4 za $\pi/2$. Matrica rasijanja prozognog mosta (za numeraciju krajeva, kao na slici) ima oblik:



pri čemu je postignuto da je S_{14} realno.

- Oznaka za TPM.

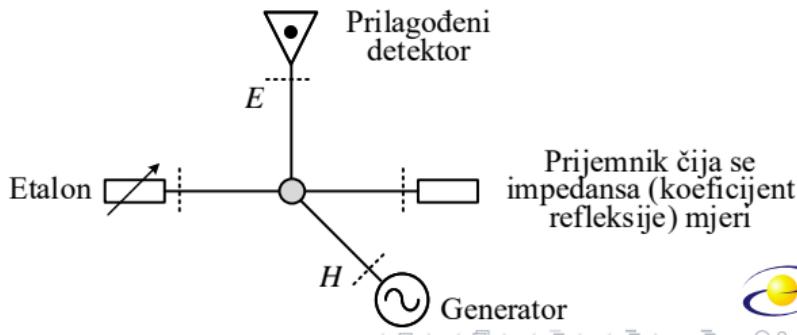


Primjena mostova

- Primjena mosta kao **kao djeljitelja snage po polu (ili kao sumatora jednakih snaga)** proističe iz same definicije mosta.
- Zbog recipročnosti, svaki most može da posluži i kao sumator jednakih snaga. Pri tome, treba voditi računa o faznim pomjerajima.
- Na primjer, ako na pristupe 3 i 4 talasovodnog proreznog mosta dovedemo jednakе snage, to nije dovoljno da se te snage sabiju u pristupu 1, potrebno je da signal u pristupu 3 prednjači signalu u pristupu 4 za $\pi/2$.
- **Primjena mosta za mjerjenje impedanse (koeficijenta refleksija)** prikazana je na slici.
- U H pristup magičnog T postavljen je generator, u E pristup postavljen je prilagođeni detektor, a u bočne pristupe prijemnik čija se impedansa (koeficijent refleksije) mjeri, kao i tzv.

etalon-prijemnik promjenljive impedanse (koeficijenta refleksije), koja je poznata u svakom trenutku.

- Princip mjerjenja je jednostavan. Mijenjamo impedansu etalona, dok detektor ne pokaže nulu.



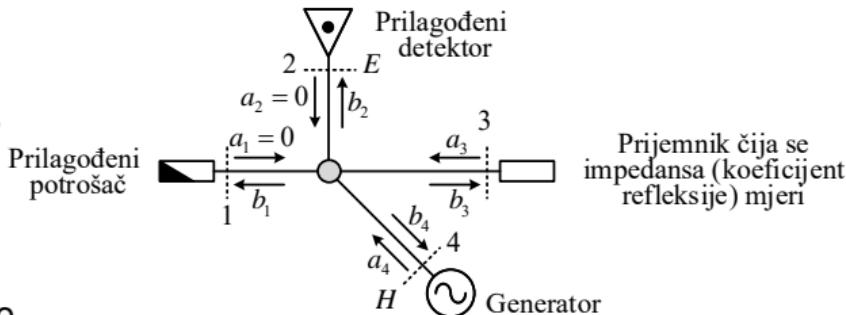
Primjena mostova...

- Tada je mjerena impedansa (koeficijent refleksije) jednaka impedansi (koeficijentu refleksije) etalona.
- Ovo slijedi iz svojstava magičnog T. Ako nas interesuje samo moduo koeficijenta refleksije, možemo korisiti šemu sa slike (desno) koja ne sadrži etalon.
- Prepostavimo da je poznata snaga koju daje generator $P_{gen} = P_4^+ = \frac{1}{2}|a_4|^2$ i snaga koju pokazuje detektor $P_{det} = P_2^- = \frac{1}{2}|b_2|^2$.

- Podimo od matrice rasijanja:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ a_3 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

- Iz ove relacije slijedi: $b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}a_4$,
 $b_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-a_3)$, $b_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}a_4$, $b_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}a_3$.



- Koeficijent refleksije prijemnika u pristupu 3 je:

$$\rho_3 = \frac{a_3}{b_3} = \frac{-\sqrt{2}b_2}{\frac{1}{\sqrt{2}}a_4} = -2 \frac{b_2}{a_4}$$

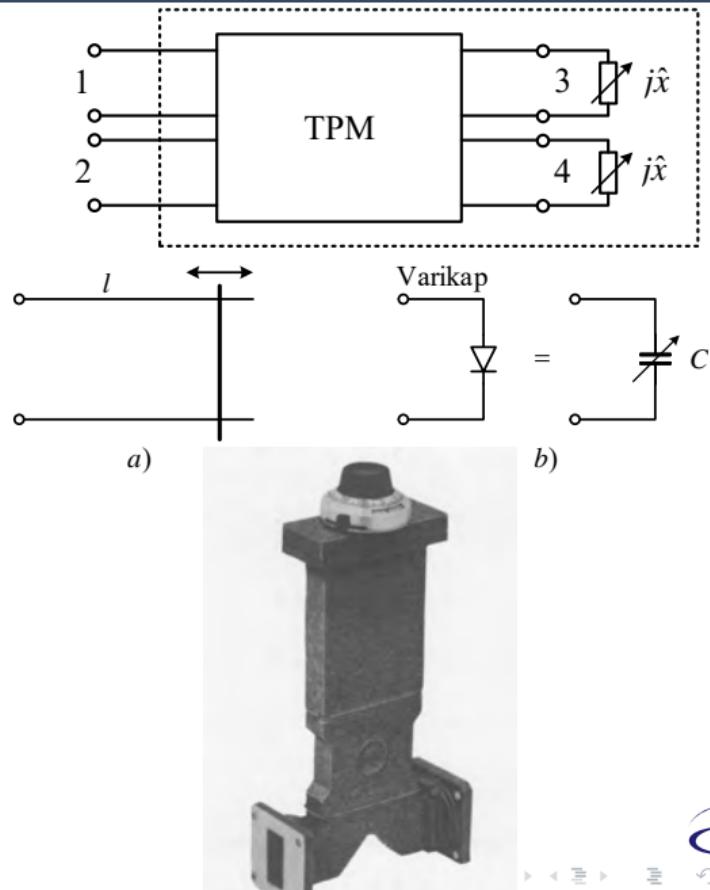
- Kvadrat njegovog modula jednak je:

$$|\rho_3|^2 = 4 \frac{|b_2|^2}{|a_4|^2} = 4 \frac{P_{det}}{P_{gen}}$$



Primjena mosta za realizaciju kontinualnog recipročnog regulatora faze

- Potreban je (slika) most i dva jednaka reaktivna promjenljiva opterećenja \hat{x} .
- Tada je četvorokrajnik 1 – 2 recipročni kontinualni regulator faze, kod kojeg se faza φ kontinualno mijenja promjenom \hat{x} .
- Kao promjenljivo reaktivno opterećenje može se uzeti pomični kratkospojnik prikazan na slici a) za koji je $\hat{x} = \operatorname{tg}\beta l$ ili varikap dioda sa slike b) za koju je $\hat{x} = 1/(\omega C Z_c)$, gdje se kapacitivnost C kontinualno mijenja promjenom inverznog napona polarizacije diode.
- Na slici je prikazan kontinualni recipročni regulator faze sa talasovodnim proreznim mostom, gdje je promjenljivo reaktivno opterećenje realizovano pomoću pomičnih kratkospojnika u dva kraka mosta.



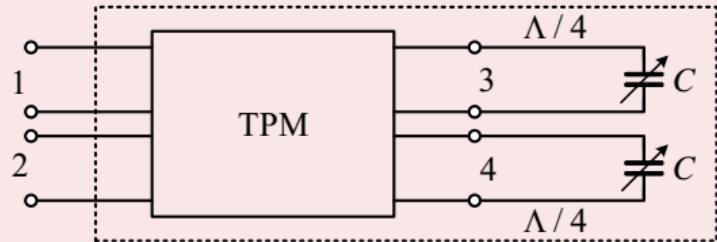
PRIMJER 1.

Postavka:

Na krajeve 3 i 4 talasovodnog proreznog mosta priključene su varikap diode na rastojanjima $\Lambda/4$ od referentnih ravni kako to pokazuje slika.

Kapacitivnosti dioda se mogu istovremeno, kontinualno mijenjati u granicama od $C_1 = 0.5 \text{ pF}$

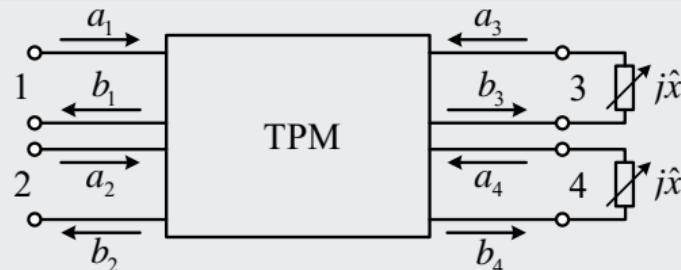
do $C_2 = 1 \text{ pF}$. Pokazati da je četvorokrajnik 1 – 2 kontinualni recipročni regulator faze, i naći granice u kojima se mijenja fazna razlika φ između signala na izlazu i ulazu. Poznato je $f = 10 \text{ GHz}$ i $Z_c = 50 \Omega$ (karakteristična impedansa svih vodova).



Rješenje.

U ravnima 3 i 4 koje se nalaze na rastojanjima $\Lambda/4$ od dioda, impedanse su jednake:

$$\hat{Z}_3 = \hat{Z}_4 = \frac{1}{\hat{Z}_{\text{diode}}} = j\omega C Z_c = j\hat{x}$$



Rješenje.

Ovo važi jer je $\hat{Z}_{diode} = 1/(j\omega C Z_c)$. Na osnovu matrice rasijanja prozognog mosta imamo

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

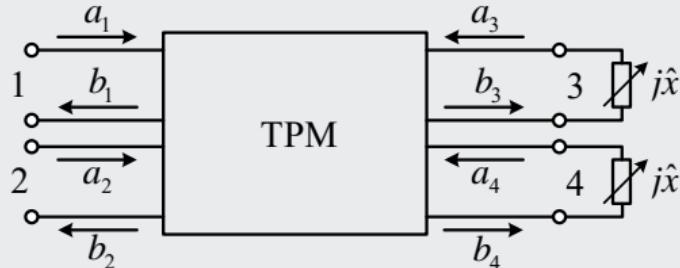
odnosno,

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja_3 + a_4)$$

$$b_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_3 + ja_4)$$

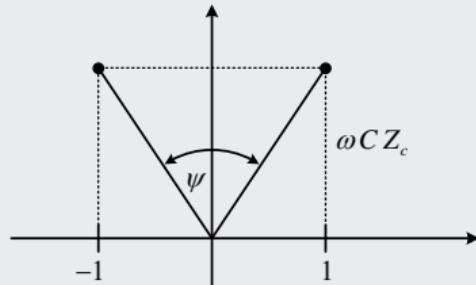
$$b_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja_1 + a_2)$$

$$b_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 + ja_2)$$



Koeficijenti refleksije na pristupima 3 i 4 su

$$\rho_3 = \rho_4 = \frac{a_3}{b_3} = \frac{a_4}{b_4} = \frac{j\hat{x} - 1}{j\hat{x} + 1} = \frac{j\omega C Z_c - 1}{j\omega C Z_c + 1} = e^{j\psi}$$



PRIMJER 1...

Rješenje.

Na osnovu slike (prethodni slajd) zaključujemo da je $\psi = 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C Z_c}$. Sada možemo pisati:
 $a_3 = e^{j\psi} b_3$, $a_4 = e^{j\psi} b_4$. Zamjenom ovih relacija u relacije sa prethodnog slajda dobijamo:

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} [j e^{j\psi} b_3 + e^{j\psi} b_4] = \frac{e^{j\psi}}{\sqrt{2}} \left[j \frac{1}{\sqrt{2}} (ja_1 + a_2) + \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 + ja_2) \right] = j e^{j\psi} a_2 = e^{j(\psi + \frac{\pi}{2})} a_2$$

Slično, $b_2 = e^{j(\psi + \frac{\pi}{2})} a_1$. Sada možemo pisati:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{j\psi} \\ e^{j\psi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

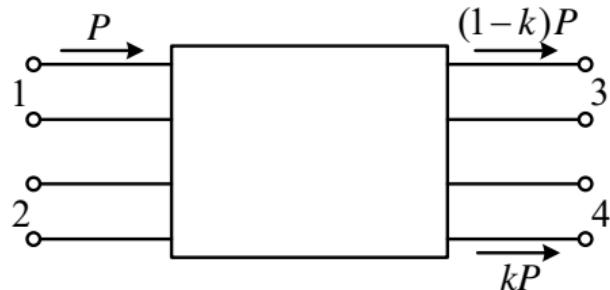
gdje je $\varphi = \frac{\pi}{2} + \psi = \frac{\pi}{2} + 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C Z_c}$. Vidimo da se radi o recipročnom, kontinualnom regulatoru faze gdje kontinualnom promjenom kapacitivnosti C kontinualno mijenjamo fazu φ . Granice u kojima se može mijenjati faza φ su

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{2} + 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C_1 Z_c} = 155^\circ$$

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2} + 2 \operatorname{arctg} \frac{1}{\omega C_2 Z_c} = 125^\circ$$

Primjena mostova za realizaciju djelitelja snage u proizvoljnem odnosu

- Djelitelj snage u proizvoljnem odnosu je recipročni reaktivni osmokrajnik.
- Kod njega se snaga dovedena na bilo koji od pristupa dijeli (bez refleksije) na dva od preostala 3 pristupa, ali u proizvoljnem odnosu (slika desno).
- Koeficijent k može biti fiksan ili se kontinualno mijenjati.
- U ovom drugom slučaju govorimo o promjenljivom djelitelju snage.
- Za realizaciju promjenljivog djelitelja snage potrebna su dva mosta i jedan recipročni kontinualni regulator faze.



- S obzirom da ovaj zadnji možemo realizovati u vidu mosta sa dva jednaka, promjenljiva reaktivna opterećenja možemo promjenljivi djelitelj snage realizovati sa 3 mosta.
- Analiza promjenljivog djelitelja snage sprovedena je u sledećem primjeru.

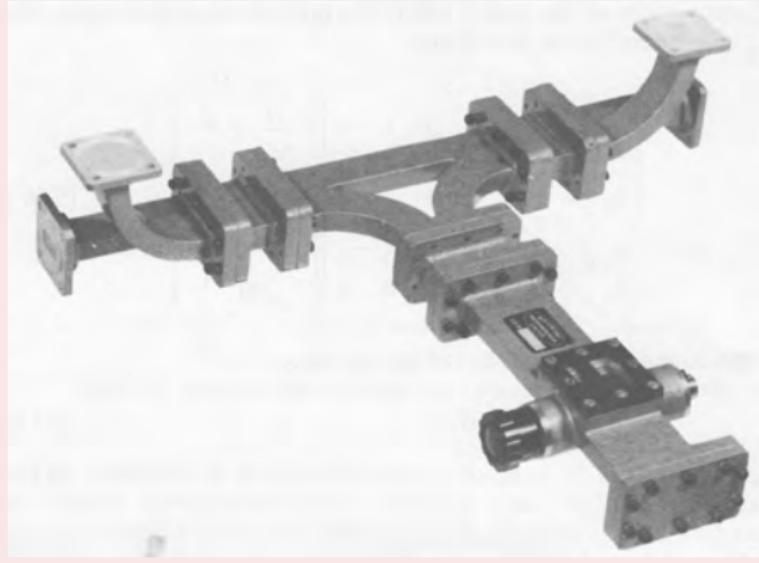
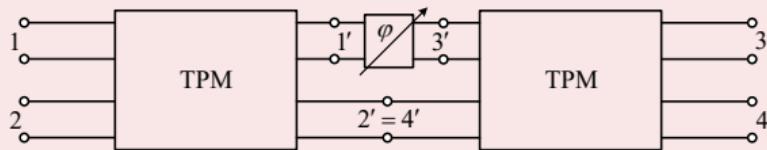


PRIMJER 2.

Postavka:

Dva talasovodna prezerna mosta i kontinualni recipročni regulator faze vezani su prema šemii prikazanoj na slici. Pokazati da je osmokrajnik $1 - 2 - 3 - 4$ promjenljivi djelitelj snage.

Realizacija promjenljivog djelitelja snage je prikazana na slici, gdje je recipročni kontinualni regulator faze realizovan u vidu mosta sa dva pomična kratkospojnika (pomenut ranije).



PRIMJER 2...

Rješenje.

Za prvi most sa slike možemo pisati

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix}$$

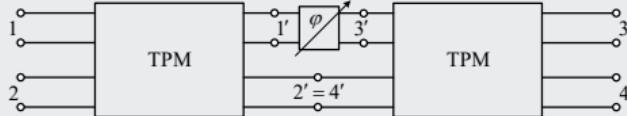
Odavde dobijamo sledeće relacije

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja'_1 + a'_2)$$

$$b_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a'_1 + ja'_2)$$

$$b'_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja_1 + a_2)$$

$$b'_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_1 + ja_2)$$



$$\begin{bmatrix} b'_3 \\ b'_4 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & j & 1 \\ 0 & 0 & 1 & j \\ j & 1 & 0 & 0 \\ 1 & j & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_3 \\ a'_4 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

ili

$$b'_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja_3 + a_4)$$

$$b'_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_3 + ja_4)$$

$$b_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (ja'_3 + a'_4)$$

$$b_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} (a'_3 + ja'_4)$$

Za drugi most važi:

PRIMJER 2...

Rješenje.

Napomena: Veličine a su na lijevoj strani a veličine b na desnoj. Ove veličine pripadaju mostovima, tako da direktni (upadni) talas a'_1 za lijevi most, predstavlja reflektovani talas za regulator faze.

Za recipročni regulator faze važi

$$\begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & e^{i\varphi} \\ e^{i\varphi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b'_1 \\ b'_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Obratimo pažnju, da su u ovoj relaciji veličine a na lijevoj strani, a veličine b na desnoj strani, **suprotno** u odnosu na relacije za mostove.

Razlog za ovo je što direktni talasi za mostove predstavljaju reflektovane talase za regulator faze, a reflektovani talasi za mostove su direktni talasi za regulator faze. Rješavanjem relacije (4) dobijamo: $a'_1 = e^{i\varphi} b'_3$ i $a'_3 = e^{i\varphi} b'_1$. Za tačke 2' i 4' koje se poklapaju važi da je $a'_2 = b'_4$ i $a'_4 = b'_2$ što je očigledno sa slike iz postavke zadatka (direktni talas a'_2 za lijevi most je reflektovani talas b'_4 za desni most i slično za a'_4). Iz dobijenih 12 relacija, eliminiraju se sve veličine, osim onih sa indeksima 1, 2, 3 i 4.

Lako se dobija (provjeriti)

PRIMJER 2...

Rješenje.

$$b_1 = \frac{1}{2} [(1 - e^{j\varphi}) a_3 + j(1 + e^{j\varphi}) a_4]$$

$$b_2 = \frac{1}{2} [j(1 + e^{j\varphi}) a_3 + (e^{j\varphi} - 1) a_4]$$

$$b_3 = \frac{1}{2} [(1 - e^{j\varphi}) a_1 + j(1 + e^{j\varphi}) a_2]$$

$$b_4 = \frac{1}{2} [j(1 + e^{j\varphi}) a_1 + (e^{j\varphi} - 1) a_2]$$

ili

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 - e^{j\varphi} & j(1 + e^{j\varphi}) \\ 0 & 0 & j(1 + e^{j\varphi}) & e^{j\varphi} - 1 \\ 1 - e^{j\varphi} & j(1 + e^{j\varphi}) & 0 & 0 \\ j(1 + e^{j\varphi}) & e^{j\varphi} - 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}$$

Analizom dobijene matrice zaključujemo da se radi o promjenljivom djeljitelju snage. Na primjer, snaga iz pristupa 1 prenosi se (bez refleksije) na krajeve 3 i 4, ali odnos tih snaga zavisi od φ .

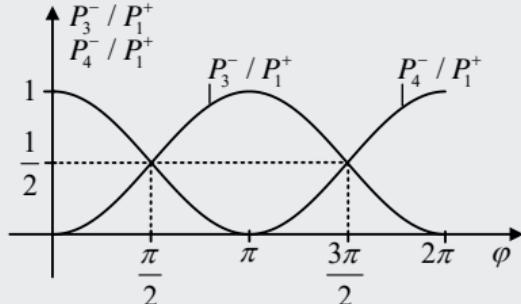
PRIMJER 2...

Rješenje.

$$\left. \frac{P_3^-}{P_1^+} \right|_{\substack{\text{svi pristupi} \\ \text{prilagodjeni}}} = |S_{31}|^2 = \frac{1}{4} |1 - e^{j\varphi}|^2 = \frac{1}{2} (1 - \cos \varphi)$$

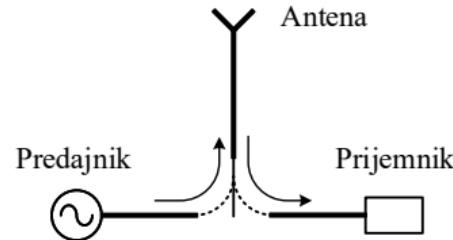
$$\left. \frac{P_4^-}{P_1^+} \right|_{\substack{\text{svi pristupi} \\ \text{prilagodjeni}}} = |S_{41}|^2 = \frac{1}{4} |j(1 + e^{j\varphi})|^2 = \frac{1}{4} |1 + e^{j\varphi}|^2 = \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi)$$

Koeficijent k sa slike (promjenljivi djeljitelj snage) je $k = \frac{1}{2} (1 + \cos \varphi)$. Grafik ovih snaga prikazan je na slici ispod. Za $\varphi = 0$ sva snaga iz pristupa 1 se prenosi na pristup 4. Za $\varphi = \pi$, sva snaga iz pristupa 1 se prenosi na pristup 3. Za $\varphi = \frac{\pi}{2}$ i $\varphi = \frac{3\pi}{2}$ imamo most, odnosno, djeljitelj snage po polu između pristupa 3 i 4.



Primjena mostova za realizaciju antenske skretnice (komutatora) predaja/prijem

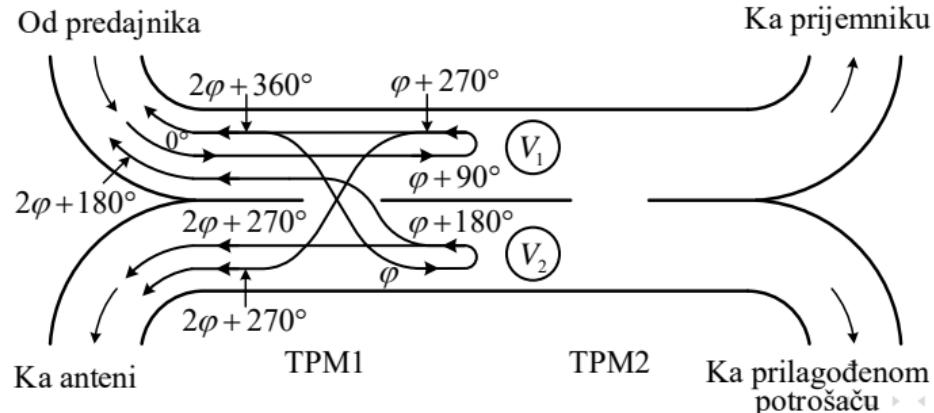
- Ova skretnica čija je simbolična oznaka prikazana na slici (desno) omogućava da predajnik i prijemnik koriste zajedničku antenu, ali tako da su međusobno izolovani.
- Ovo je naročito važno zbog zaštite prijemnika od signala velike snage iz predajnika u režimu predaje. Primjer ovakve skretnice imamo kod radara.
- U režimu predaje, predajnik emituje kratke impulse velike snage koji se vode na antenu i emituju u okolini prostora, a u pauzama između dva impulsa, reflektovani signali koje prima ista antena prosleđuju se prijemniku (režim prijema).
- U režimu prijema radi se o vrlo malim snagama.



- Za realizaciju skretnice potrebna su dva mosta i dva tzv. varničara.
- Varničar je gasna cijev postavljena u pravcu linija električnog polja talasovoda u kom je postavljen.
- Na ekvivalentnoj šemi tome odgovara paralelno vezivanje na ekvivalentni vod. U režimu predaje, kada je snaga velika, u varničaru nastaje pražnjenje koje za talas predstavlja praktično kratak spoj, pa se u tom slučaju talas reflektuje od varničara.

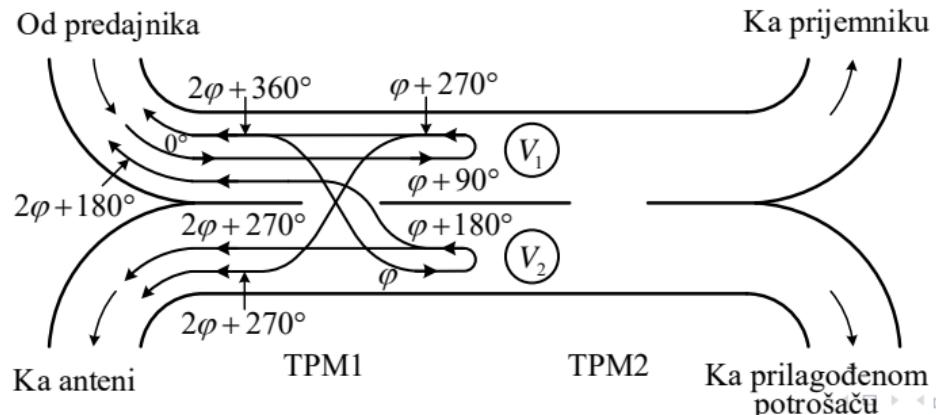
Skretnica na bazi dva kaskadno vezana TPM - Režim predaje

- Nasuprot tome, u režimu prijema, kada je snaga mala varničar se ne aktivira, odnosno predstavlja otvorenu granu, pa talas, praktično bez slabljenja, prolazi dalje.
- Na slici je pokazana skretnica na bazi dva kaskadno vezana talasovodna prorezna mosta i dva varničara (V_1 i V_2).
- Razmotrimo režim predaje, kada varničari (u idealanom slučaju) predstavljaju kratke spojeve. Signal od predajnika se na prvom mostu dijeli na dva signala iste amplitude, koji su pomjereni za $\pi/2$ (vidi svojstva talasovodnog proreznog mosta). Neka su faze tih talasa φ i $\varphi + \pi/2$ (φ potiče od pređenog puta i vidjećemo da ne igra nikakvu ulogu). Poslije refleksije od varničara, faze ovih talasa se mijenjaju za π i svaki od njih se vraća nazad na most i opet dijeli po pola, sa fazama prikazanim na slici.



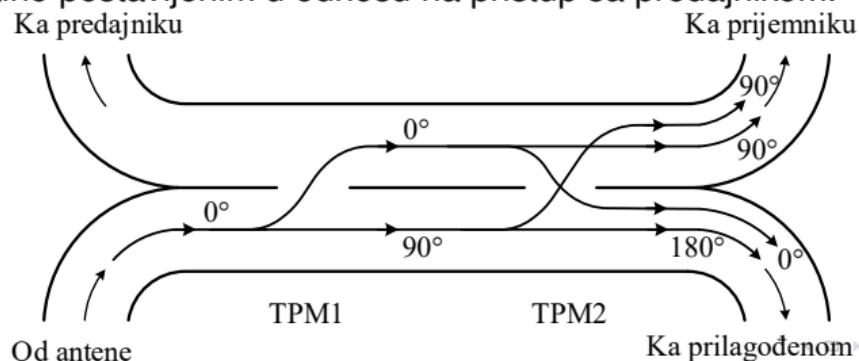
Skretnica na bazi dva kaskadno vezana TPM - Režim predaje...

- Vidimo, da u pristupu sa predajnikom imamo dva talasa iste amplitude, koji su fazno pomjereni za 180° i oni se poništavaju, pa u pristupu sa predajnikom nema refleksije.
- U pristupu sa antenom imamo dva talasa iste amplitude i u fazi pa se oni superponiraju. Prema tome, u režimu predaje sva snaga iz generatora ide na antenu. Prijemnik je, dakle, apsolutno zaštićen (izolovan), ali smo pretpostavili da su varničari idealni odnosno, da predstavljaju idealan kratak spoj.
- U realnom slučaju kada varničari nijesu idealni, prijemnik i dalje ostaje apsolutno izolovan od predajnika.
- Primjetimo da φ ne igra nikakvu ulogu pa ćemo dalje uzimati da je $\varphi = 0$.



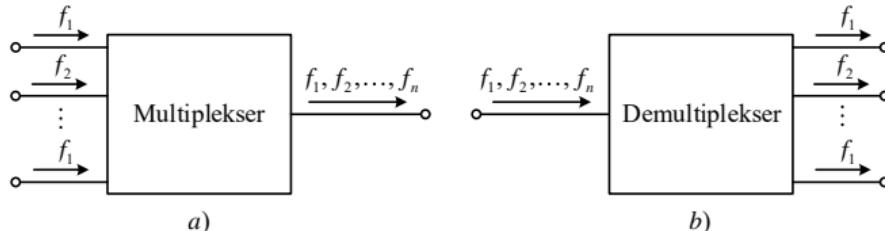
Skretnica na bazi dva kaskadno vezana TPM - Režim prijema

- Razmotrimo sada režim prijema (slika dolje), kada varničari predstavljaju otvorene grane.
- Faze talasa su prikazane na istoj slici. Sa slike vidimo da je stavljen $\phi = 0$ i da je promjena faze talasa pri prelazu sa jednog mosta na drugi jednaka 0.
- Ovo takođe, ne mijenja stav, jer je ta promjena faze ista u oba talasovoda. Vidimo da se talasi iste amplitude, fazno pomjereni za π , poništavaju u pristupu sa prilagođenim potrošačem, a u pristupu sa prijemnikom, dolazi do prostog sabiranja dva talasa iste amplitude i u fazi.
- U režimu prijema, sva snaga iz antene završava u prijemniku koji je dijagonalno smješten u odnosu na pristup sa antenom koji se pobuduje.
- Ako varničari u režimu predaje ne predstavljaju idealan kratak spoj, tada mamo dva talasa iste (male) amplitude, fazno pomjereni za 90° koji prolaze kroz varničare i superponiraće se u pristupu dijagonalno postavljenim u odnosu na pristup sa predajnikom.

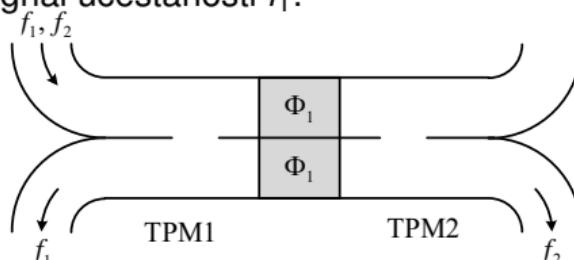


Primjena mostova za frekventno multipleksiranje (demultipleksiranje) signala

- Simbolična šema frekventnog multipleksera je prikazana na slici a), a demultipleksera na slici b).

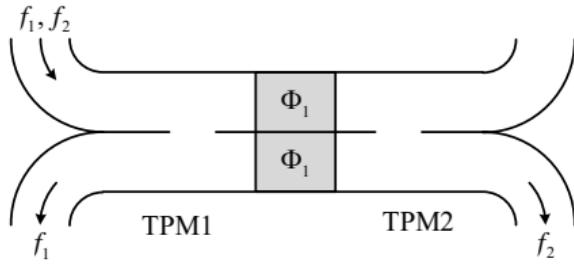


- U prvom slučaju signali različitih učestanosti f_1, f_2, \dots, f_n iz n predajnika završavaju u istoj grani (sa antenom); u drugom, različiti signali sa antene završavaju svaki u svojoj grani.
- Zbog recipročnosti, radi se o istom uređaju. Razmotrimo šemu demultipleksiranja dva signala. Potrebna su dva kaskadno vezana talasovodna prorezna mosta i dva filtra nepropusnika opsega (ili dva filtra propusnika opsega). Šema sa filtrima nepropusnicima opsega prikazana je na slici ispod. Filtri se realizuju na bazi apsorbacionih rezonatora. Neka su na slici filtri Φ_1 , filtri nepropusnici opsega za signal učestanosti f_1 .



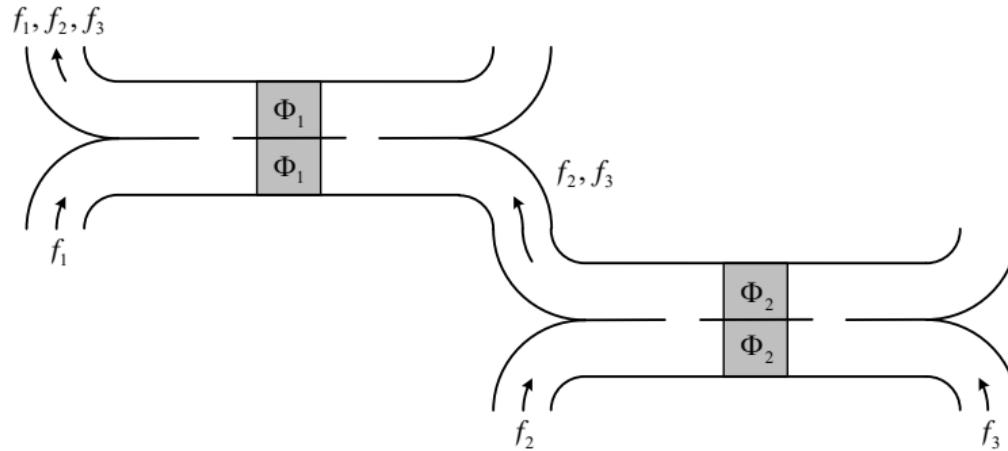
Primjena mostova za frekventno multipleksiranje (demultipleksiranje) signala...

- Tada oni za taj signal predstavljaju kratak spoj (signal se reflektuje).
- Signal učestanosti f_1 završava u susjednom pristupu. Za signal učestanosti f_2 , filtri predstavljaju otvorene grane (signal prolazi praktično bez slabljenja).
- Prema predhodnom objašnjenjima, taj signal će završiti u dijagonalno naspramnom pristupu.
- Ako se promijeni smjer svih strelica, dobićemo šemu multipleksiranja dva signala.
- Ovakav uređaj koji (de)multipleksira dva signala naziva se **diplexer**.
- Njegova fotografija je prikazana na slici.



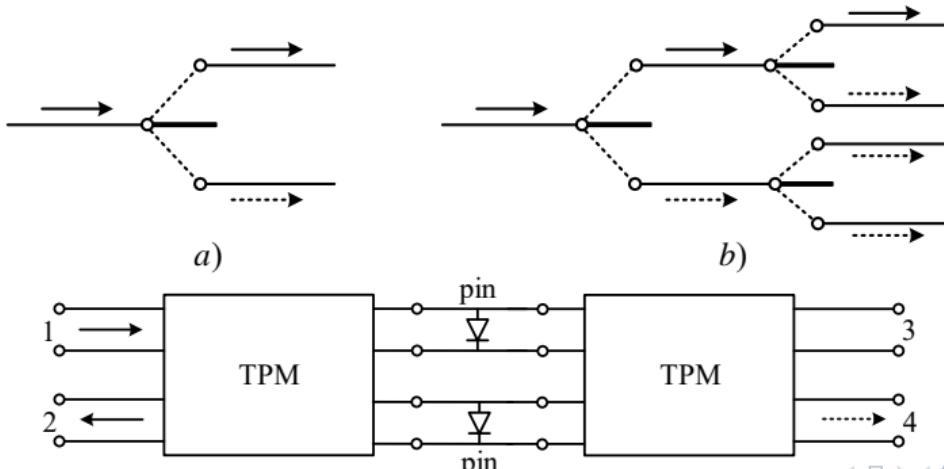
Primjena mostova za frekventno multipleksiranje (demultipleksiranje) signala...

- Ako je broj signala veći od dva, potrebno je kaskadno vezati više ćelija (slika sa predhodnog slajda).
- Na primjer, na slici ispod je prikazana šema multipleksiranja, a sa promjenom smjera strelica i šema demultipleksiranja tri signala učestanosti f_1 , f_2 i f_3 .
- Φ_1 su filtri nepropusnici ospega za signal učestanosti f_1 , a Φ_2 filtri nepropusnici opsega za signal učestanosti f_2 .



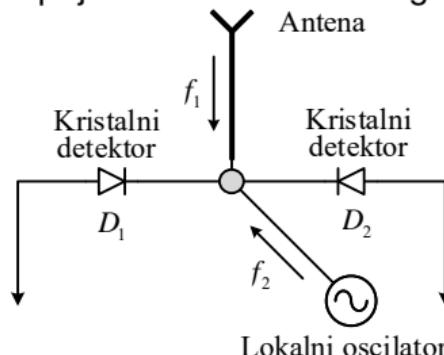
Primjena mostova za realizaciju preklopnika kanala

- Simbolična oznaka dvokanalnog preklopnika kanala pokazana je na slici a). Pomoću njega se jedan isti signal može uputiti u dvije različite grane.
- Kombinacijom dvokanalnih preklopnika, mogu se realizovati višekanalni preklopnići, gdje se jedan isti signal može uputiti u bilo koju od 2^n različitih grana (slučaj $n = 2$ - slika b)).
- Za realizaciju dvokanalnog preklopnika potrebna su dva mosta i dvije pin diode kao što prikazuje slika ispod.
- Ako se signal dovodi na pristup 1, a obje diode polarisane direktno (kratak spoj), onda signal završava u pristupu 2. Ako se obje diode polarisu inverzno (otvorene grane), signal se prenosi na pristup 4.



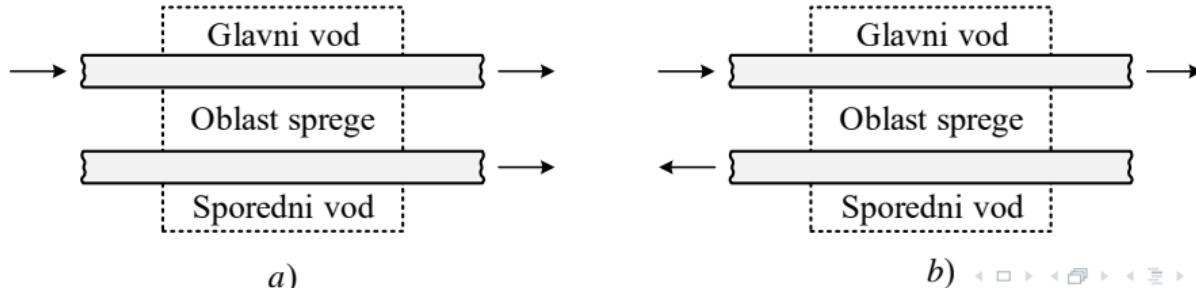
Primjena mosta za realizaciju mikrotalasnog mješača

- Mikrotalasni mješač koji se koristi u superheterodinskim prijemnicima prikazan je na slici.
- Signal sa antene učestanosti f_1 se dovodi na E pristup magičnog T, a signal iz lokalnog oscilatora učestanosti f_2 na H pristup magičnog T ($f_2 > f_1$). Na izlazu kristalnih detektorova pojavljuju se signali učestanosti $mf_1 \pm nf_2$.
- Pomoću odgovarajućih filtera, eliminiju se sve učestanosti osim učestanosti $f_1 - f_2$ (međuučestanost).
- Izlazni signal na ovoj učestanosti ima amplitudu proporcionalnu amplitudi signala sa antene, pod uslovom da signal iz lokalnog oscilatora ima mnogo veću amplitudu od signala sa antene.
- Međuučestanost ima fiksiranu vrijednost (u dijapazonu $1 \div 100\text{MHz}$), tako da za neki drugi signal različite učestanosti sa antene, mora se istovremeno promijeniti i učestanost lokalnog oscilatora. Sve dalje operacije u prijemniku vrše se na signalu ove fiksirane učestanosti.



Usmjereni sprežnjak

- Sprežnjak je recipročni, reaktivni mikrotalasni element sa 4 pristupa koji ima svojstvo da se snaga dovedena na bilo koji od 4 pristupa, bez refleksije, prenosi na 2 od preostala 3 pristupa za koje se smatra da su prilagođeni.
- Most je dakle, specijalan slučaj sprežnjaka, kada se dijeljenje snage vrši po polu. Sprežnjak se realizuje na bazi dva voda koji su na jednom dijelu spregnuti tako da se pri pobuđivanju jednog voda (glavni vod) dio energije prenosi na drugi vod (pomoćni, sporedni vod) ali tako da se pobuđuje samo jedan od njegovih krajeva.
- Simbolično to možemo predstaviti kao na slici a) i b).
- Za sprežnjak realizovan kao na a) kažemo da je to sprežnjak direktnog tipa (SDT) kod koga je smjer kretanja energije u sporednom vodu isti kao i smjer kretanja energije u glavnem vodu.
- Za sprežnjak realizovan prema b) kažemo da je to sprežnjak inverznog tipa (SIT), gdje je smjer kretanja energije u sporednom vodu suprotan od smjera kretanja energije u glavnom vodu.

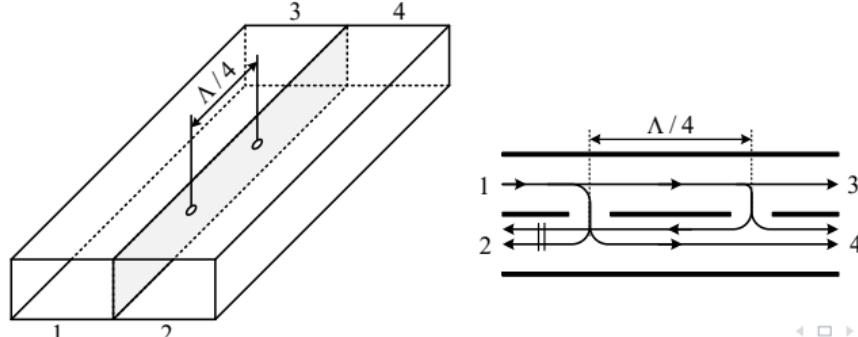


Usmjereni sprežnjak...

- Prema tome koliki dio snage se iz glavnog voda odvaja u sporedni vod razlikujemo:
 - Sprežnjake sa slabom spregom**, kod kojih se u sporedni vod odvaja manje od desetog dijela snage iz glavnog voda.
 - Sprežnjake sa jakom spregom** kod kojih se u sporedni vod odvaja više od desetog dijela snage iz glavnog voda.

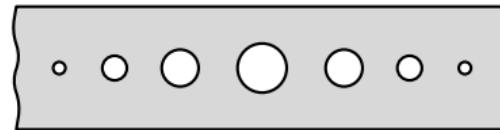
Sprega između glavnog i sporednog voda može se ostvariti na više načina

- Pomoću jednog ili više otvora u zajedničkom zidu (ovaj način se primjenjuje kod talasovoda).
 - Približavanjem vodova (koristi se kod vodova sa TEM talasom).
 - Vezivanjem vodova sa dva ili više paralelnih ograna (ovaj način se koristi i kod talasovoda i kod vodova sa TEM talasom)
- Razmotrimo način realizacije sprežnjaka pomoću jednog ili više otvora. U zajedničkom zidu dva pravougaona talasovoda (slika) napravljena su dva mala otvora na međusobnom rastojanju $\Delta/4$.



Usmjereni sprežnjak...

- Pretpostavimo da se pobuđuje pristup 1 što znači da je vod 1 – 3 glavni vod. Na prvom otvoru, jedan mali dio snage se odvaja u vod 2 – 4 koji je ovdje sporedni vod, pri čemu talasi ka pristupima 2 i 4 zbog simetrije imaju istu amplitudu.
- Pošto su ti talasi male amplitude zanemarićemo odvajanje snage iz talasa koji ide ka pristupu 4, na drugom otvoru. Talas koji ide kroz glavni vod (praktično nepromjenjene amplitude), nastavlja ka pristupu 3 i na drugom otvoru dolazi ponovo do odvajanja jednog malog dijela snage u sporedni vod, tako da najveći dio snage završava u pristupu 3.
- U pristupu 2 imamo dva talasa praktično iste amplitude, ali fazno pomjereni za π zbog toga što prelaze puteve koji se razlikuju za $\Lambda/4 + \Lambda/4 = \Lambda/2$. Ti talasi se poništavaju, tj. pristup 2 se ne pobuđuje. U pristupu 4 imamo dva talasa gotovo iste amplitude, ali u fazi, jer prelaze iste puteve. Ta dva talasa se superponiraju tako da se pristup 4 pobuđuje. Očigledno se radi o sprežnjaku direktnog tipa, sa slabom spregom (mali otvori - mala prenešena snaga).
- Ovaj sprežnjak je uskpojasan jer je rastojanje između otvora izraženo preko talasne dužine. Da bi se dobio širokopojasan sprežnjak koristi se više od dva otvora (slika ispod), čije se dimenzije i međusobna rastojanja proračunavaju.

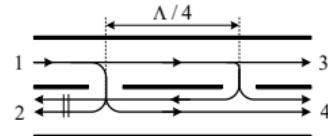
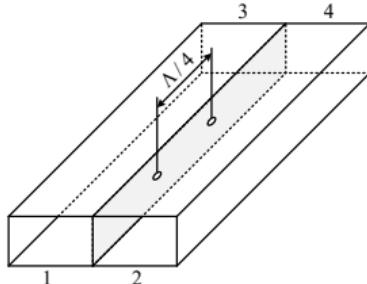


Usmjereni sprežnjak...

- Izgled ovakvog sprežnjaka je prikazan na slici desno.
- Kod realnog sprežnjaka, nije moguće postići da se jedan pristup ne pobuđuje (pristup 2 na slici) odnosno, jedan veoma mali dio snage se odvaja i u ovoj pristup.
- Zbog toga za realni sprežnjak definišemo veličinu koja se naziva **usmjerenost** sprežnjaka (D) pomoću koje karakterišemo kvalitet sprežnjaka

$$D = 10 \log \frac{P_{\text{na izlazu sporednog voda}}}{P_{\text{na suprotnom izlazu sporednog voda}}} \text{ (dB)}$$

- Očigledno, sprežnjak je kvalitetniji (D je veće) ukoliko je manja snaga koja se odvaja u suprotan izlaz sporednog voda.
- Za idealan sprežnjak imenilac na desnoj strani je jednak nuli, pa je $D = \infty$. Kvalitetni sprežnjaci imaju $D \geq 30 \text{ dB}$.



Usmjereni sprežnjak...

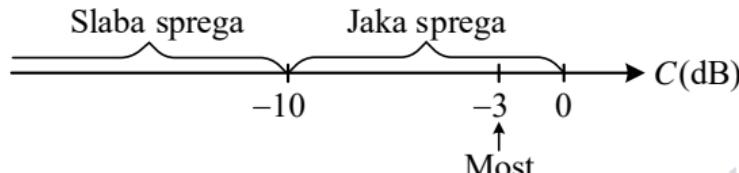
- Drugi važan faktor kod sprežnjaka koji definiše koliki dio snage se iz glavnog odvaja u sporedni vod je koeficijent sprege (C)

$$C = 10 \log \frac{P_{\text{na izlazu sporednog voda}}}{P_{\text{na ulazu u glavni vod}}} (\text{dB})$$

- Na primjer, za sprežnjak sa slike (sprega pomoću jednog ili više otvora)

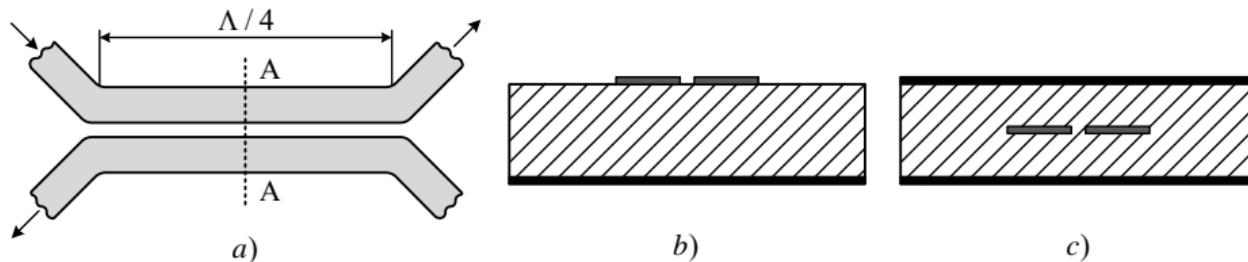
$$C = 10 \log \frac{P_4^-}{P_1^+} (\text{dB})$$

- Na osnovu ove relacije zaključujemo da vrijednosti za C leže u dijapazonu $-\infty < C \leq 0$.
- Očigledno, sprežnjacima sa slabom spregom odgovaraju velike vrijednosti koeficijenta sprege C po apsolutnoj vrijednosti ($C < -10 \text{ dB}$), dok je za sprežnjake sa jakom spregom $-10 \text{ dB} < C \leq 0$ (slika ispod).
- Za most, $C = 10 \log(1/2) = -3 \text{ dB}$. Kada se sva snaga iz glavnog voda prenosi u sporedni onda je $C = 0$ i imamo sprežnjak sa totalnom spregom.



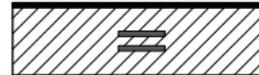
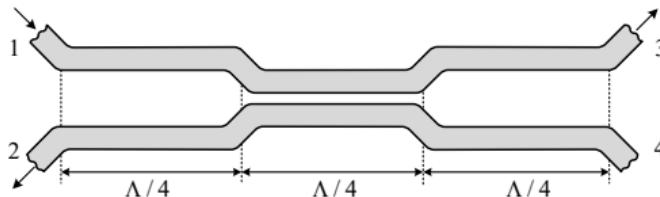
Usmjereni sprežnjak...

- Razmotrimo sada drugi način, kada se sprega ostvaruje približavanjem vodova.
- Ostvarivanje sprege na ovaj način se koristi kod TEM vodova odnosno, koaksijalnog kabla, mikrotrikastog i trakastog voda.
- Ovi sprežnjaci su inverznog tipa. Slika a) prikazuje topologiju trakastog sprežnjaka, slika b) i slika c) poprečni presjek A-A za slučaj mikrotrikastog i trakastog voda.
- Dužina oblasti sprege je $\Lambda/4$, jer se može pokazati da je tada sprega maksimalna. Ovi sprežnjaci su sa slabom spregom, jer bočno približavanje vodova ne može proizvesti jaku elektromagnetsku spregu.
- Takođe, zbog dužine $\Lambda/4$ sprežnjak sa slike a) je uskopojasan.

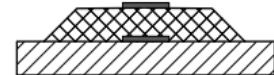


Usmjereni sprežnjak...

- Da bi se dobio širokopojasan sprežnjak, koristi se više kaskadno vezanih sekcija sa različitim spregama kao na slici ispod.
- Dužine sekcija su jednake četvrtini talasne dužine na centralnoj učestanosti.
- Da bi se dobio sprežnjak sa jakom spregom trake se postavljaju čeono kao na slici a) za slučaj trakastog voda odnosno, kao na slici b) za slučaj mikrotrakastog voda. U zadnjem slučaju neophodan je dodatni sloj dielektrika, što usložnjava konstrukciju.



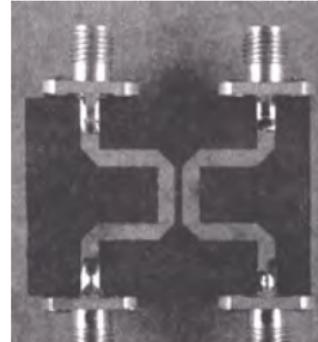
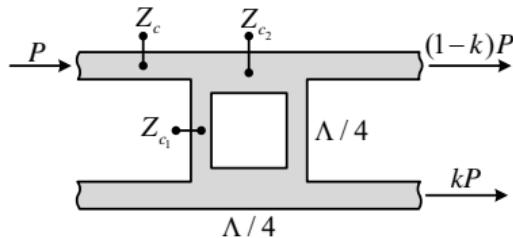
a)



b)

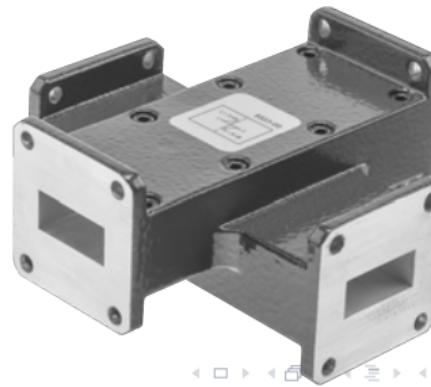
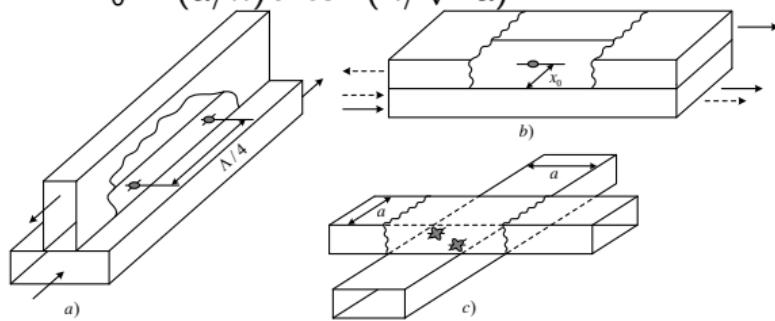
Usmjereni sprežnjak...

- Realizacija mikrotrakastog sprežnjaka sa bočnom spregom je prikazana na slici desno.
- Konačno, moguće je ostvariti spregu između glavnog i sporednog voda, postavljanjem dva ili više paralelnih ogrankaka.
- Ovaj način sprege primjenjuje se i kod talasovoda i kod TEM vodova.
- Na slici ispod prikazana je topologija trakastog sprežnjaka sa dva paralelna ogranka koji nazivamo kvadratni sprežnjak.
- On je direktnog tipa, a pogodnim odabiranjem impedansi Z_{c_1} i Z_{c_2} može se u principu realizovati proizvoljna sprega (u praksi u određenim granicama).
- Ako se odabere $Z_{c_1} = Z_c \sqrt{(1-k)/k}$ i $Z_{c_2} = Z_c \sqrt{1-k}$, gdje je $0 < k < 1$, snaga P iz glavnog voda raspoređuje se kao što je prikazano na slici, pri čemu je koeficijent sprege $C = 10 \log k$ (dB). Za $k = 1/2$ dobija se most (kvadratni trakasti most).



Tipovi talasovodnih sprežnjaka

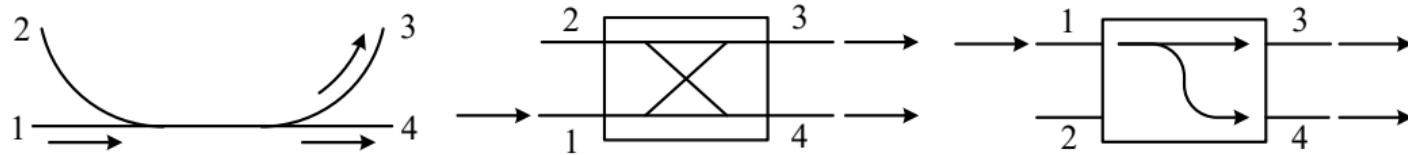
- Navedimo još nekoliko tipova talasovodnih sprežnjaka – Švingerov sprežnjak (inverznog tipa) (slika a)), Beteov sprežnjak (direktnog ili inverznog tipa) (slika b)) i Morenov sprežnjak (slika c)).
- Fotografija Morenovog sprežnjaka (sprežnjaka sa ukrštenim talasovodima) prikazana je na slici.
- Interesantno je da Beteov sprežnjak ima samo jedan otvor za spregu. Pri pobuđivanju glavnog talasovoda, u sporednom talasovodu se u oba smjera pobuđuju talasi na račun električnog i magnetskog polja u otvoru za spregu.
- Pogodnim odabiranjem rastojanja x_0 može se postići da se u jednom ili drugom kraku ponište talasi usled električne i magnetske sprege, tako da se dobije sprežnjak direktnog ili inverznog tipa.
- Pokazuje se da je u prvom slučaju potrebno da bude $x_0 = (a/\pi) \arcsin(\lambda/\sqrt{6}a)$, a u drugom $x_0 = (a/\pi) \arcsin(\lambda/\sqrt{2}a)$.



Matrica rasijanja usmjerenog sprežnjaka

- Na šemama se usmjereni sprežnjak direktnog tipa označava na više načina a to je prikazano na slici.
- Za sprežnjak inverznog tipa, strelica je usmjerena prema pristupu 2 umjesto ka pristupu 4.
- Odredimo sada matricu rasijanja za sprežnjak direktnog tipa za notaciju krajeva kao na slici.
Pošto ne treba da bude refleksije pri pobuđivanju bilo kog pristupa, tada mora biti zadovoljeno $S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$. Dalje, pri pobuđivanju pristupa 1, ne pobuđuje se pristup 2 i obratno. Takođe, zbog simetrije, pri pobuđivanju pristupa 3, ne pobuđuje se pristup 4 i obratno. Dakle $S_{12} = S_{21} = S_{34} = S_{43} = 0$. Takođe, zbog simetrije je $S_{14} = S_{23}$ i $S_{13} = S_{24}$. Prema tome, matrica **S** ima sledeću strukturu

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



Matrica rasijanja usmjerenog sprežnjaka

- Iz predhodne relacije i uslova unitarnosti matrice \mathbf{S} dobijamo

$$|S_{13}|^2 + |S_{14}|^2 = 1 \quad (5)$$

$$S_{13}S_{14}^* + S_{14}S_{13}^* = 0 \quad (6)$$

- Odabiranjem referentnih ravni, možemo postići da, na primjer, element S_{13} bude realan, $S_{13} = |S_{13}| = q$, a q se kreće u granicama $0 \leq q \leq 1$. Tada, na osnovu relacije (5) imamo

$$|S_{14}| = \sqrt{1 - |S_{13}|^2} = \sqrt{1 - q^2}$$

- odnosno

$$S_{14} = |S_{14}| e^{j\psi} = \sqrt{1 - q^2} e^{j\psi}$$

Iz relacije (6) slijedi da je

$$q\sqrt{1 - q^2} e^{j\psi} + q\sqrt{1 - q^2} e^{j\psi} = 0$$

odnosno, $\cos \psi = 0$, pa je $\psi = \pi/2$. Sada za parametar S_{14} možemo pisati

$$S_{14} = \sqrt{1 - q^2} e^{j\frac{\pi}{2}} = j\sqrt{1 - q^2}$$



Matrica rasijanja usmjerenog sprežnjaka...

- Konačni oblik matrice rasijanja sprežnjaka direktnog tipa, pri danoj numeraciji krajeva je

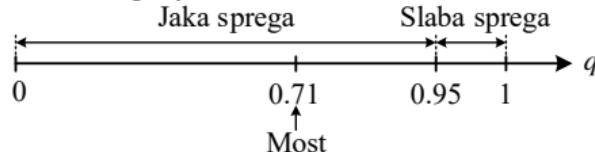
$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & q & j\sqrt{1-q^2} \\ 0 & 0 & j\sqrt{1-q^2} & q \\ q & j\sqrt{1-q^2} & 0 & 0 \\ j\sqrt{1-q^2} & q & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad 0 \leq q \leq 1$$

i izražena je preko jednog realnog parametra q . Ovaj parametar se lako može izraziti preko koeficijenta spregi C i obratno

$$C = 10 \log \frac{P_4^-}{P_1^+} = 10 \log |S_{41}|^2 = 10 \log (1 - q^2) \text{ (dB)}$$

$$q = \sqrt{1 - 10^{C/10}}$$

- Za sprežnjake sa slabom spregom ($C < -10 \text{ dB}$), $q \approx 1$ kao što je prikazano na slici lijevo. Na primjer, za graničnu vrijednost $C = -10 \text{ dB}$ dobija se $q \approx 0.95$. Za totalnu spregu ($C = 0$) $q = 0$, za most ($C = -3 \text{ dB}$), $q = \sqrt{2}/2 \approx 0.71$. Desno je šematska oznaka sprežnjaka inverznog tipa.



Neke primjene usmjerenog sprežnjaka

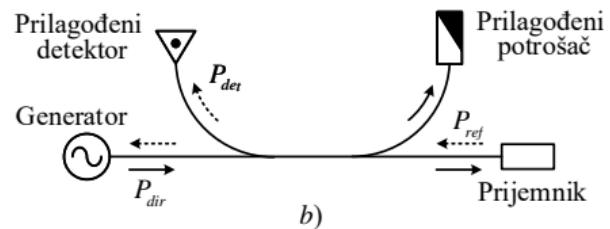
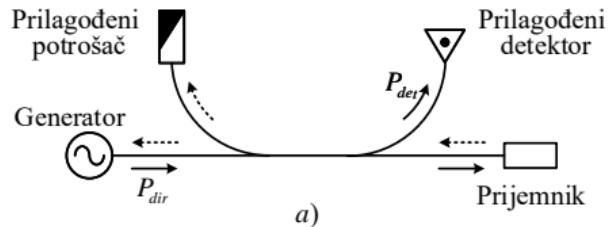
Primjena usmjerenog sprežnjaka za kontrolu i mjerjenje snage

- Primjenjuje se za kontrolu i mjerjenje snage direktnog (slika a)) i reflektovanog (slika b)) talasa na vodu.
- Ovdje se koriste sprežnjaci sa slabom spregom, a princip je da se snaga ne mjeri direktno, što nije najčešće pogodno, jer može imati veliku vrijednost, već se mjeri mala snaga koja se odvaja na sprežnjaku.
- Kod direktnog talasa, koeficijent sprege je definisan kao

$$C = 10 \log \frac{P_{det}}{P_{dir}}$$

a kod reflektovanog

$$C = 10 \log \frac{P_{det}}{P_{refl}}$$



- Za poznati koeficijent sprege C i izmjerenu snagu P_{det} , iz relacija (46) i (46) izračunavamo P_{dir} i P_{refl} . Uzeto je da je sprežnjak direktnog tipa.

Primjena usmjerenog sprežnjaka za mjerjenje modula koeficijenta refleksije

- Šema mjeranja je prikazana na slici. Ako je sprežnjak direktnog tipa imamo

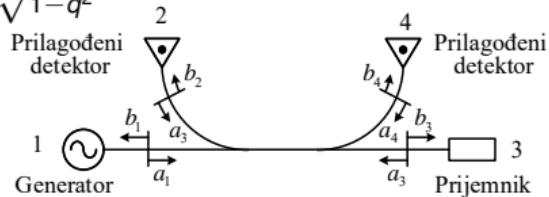
$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & q & j\sqrt{1-q^2} \\ 0 & 0 & j\sqrt{1-q^2} & q \\ q & j\sqrt{1-q^2} & 0 & 0 \\ j\sqrt{1-q^2} & q & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ 0 \\ a_3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

- Razvijanjem matrične relacije dobijamo: $b_1 = qa_3$, $b_2 = j\sqrt{1-q^2}a_3$, $b_3 = qa_1$, $b_4 = j\sqrt{1-q^2}a_1$ pa je koeficijent refleksije

$$\rho_3 = \frac{a_3}{b_3} = \frac{\overline{j\sqrt{1-q^2}}}{\overline{qa_1}} = \frac{\overline{j\sqrt{1-q^2}}}{q \frac{\overline{b_4}}{\overline{j\sqrt{1-q^2}}}} = \frac{1}{q} \frac{\overline{b_2}}{\overline{b_4}}$$

- Kvadrat modula koeficijenta refleksije je

jednak $|\rho_3|^2 = \frac{1}{q^2} \frac{|b_2|^2}{|b_4|^2} = \frac{1}{q^2} \frac{P_2}{P_4}$



Snage P_2 i P_4 mjere detektori. Iz zadnje relacije možemo izračunati moduo koeficijenta refleksije prijemnika gdje se q nalazi iz koeficijenta sprege C koji se obično daje kao podatak uz sprežnjak. Obično se pri ovom mjerenu, koristi sprežnjak sa slabom spregom ($0.95 < q < 1$) pa se može uzeti da je $q \approx 1$. U tom slučaju $|\rho_3| \approx \sqrt{\frac{P_2}{P_4}}$



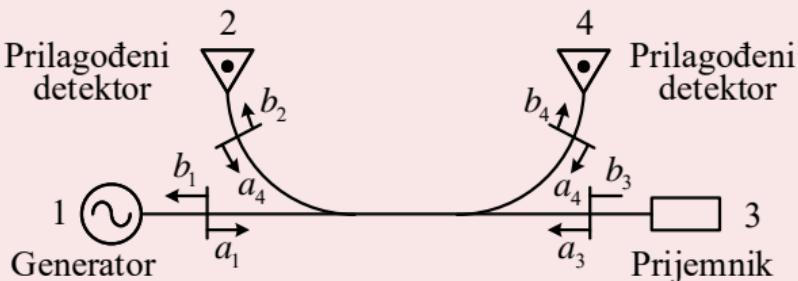
PRIMJER 3.

Postavka:

Pokazivanja prilagođenih detektora u pristupima 2 i 4 sprežnjaka direktnog tipa sa slike su:
 $P_2 = 0.5 \text{ mW}$ i $P_4 = 1.8 \text{ mW}$. Koeficijent stojećeg

talasa u pristupu sa generatorom je $\sigma_1 = 3$.
Odrediti koeficijent sprege sprežnjaka C , snagu

koja se troši u prijemniku P_{prij} i koeficijent
stojećeg talasa u kraku sa prijemnikom.



Rješenje.

Imamo (iz **S** matrice sprežnjaka direktnog tipa): $b_1 = qa_3$, $b_2 = j\sqrt{1-q^2}a_3$, $b_3 = qa_1$, $b_4 = j\sqrt{1-q^2}a_1$ pa je koeficijent refleksije na pristupu 1

$$\rho_1 = \frac{b_1}{a_1} = \frac{qa_3}{\frac{b_4}{j\sqrt{1-q^2}}} = \frac{q \frac{b_2}{j\sqrt{1-q^2}}}{\frac{b_4}{j\sqrt{1-q^2}}} = q \frac{b_2}{b_4}$$

PRIMJER 3.

Rješenje...

Dok je kvadrat modula koeficijenta refleksije

$$|\rho_1|^2 = q^2 \frac{|b_2|^2}{|b_4|^2} = q^2 \frac{P_2}{P_4} \quad (7)$$

S druge strane

$$|\rho_1| = \frac{|b_1|}{|a_1|} = \frac{\sigma_1 - 1}{\sigma_1 + 1} = \frac{3 - 1}{3 + 1} = 0.5 \quad (8)$$

Zamjenom (8) u (7) dobijamo

$$q^2 = |\rho_1|^2 \frac{P_4}{P_2} = 0.9$$

pa je koeficijent sprege jednak

$$C = 10 \log(1 - q^2) = -10 \text{ dB}$$

Moduli direktnog i reflektovanog talasa u pristupu 3 su

$$|a_3| = \frac{|b_2|}{\sqrt{1 - q^2}} \quad (9)$$

$$|b_3| = q |a_1| = q \frac{|b_4|}{\sqrt{1 - q^2}} \quad (10)$$

PRIMJER 3.

Rješenje...

Kvadriranjem relacija (9) i (10) dobijamo izraze

$$|a_3|^2 = \frac{|b_2|^2}{1 - q^2}$$

$$|b_3|^2 = \frac{q^2}{1 - q^2} |b_4|^2$$

odakle slijedi da je P_2

$$P_3^+ = \frac{P_2}{1 - q^2} = 5 \text{ mW}$$

$$P_3^- = \frac{q^2}{1 - q^2} P_4 = 16.2 \text{ mW}$$

Snaga koja se troši u prijemniku

$$P_{prij} = P_3^- - P_3^+ = 11.2 \text{ mW}$$

Kvadrat modula koeficijenta refleksije u pristupu 3 sa prijemnikom je

$$|\rho_3|^2 = \frac{1}{q^2} \frac{|b_2|^2}{|b_4|^2} = \frac{1}{q^2} \frac{P_2}{P_4} \quad (11)$$

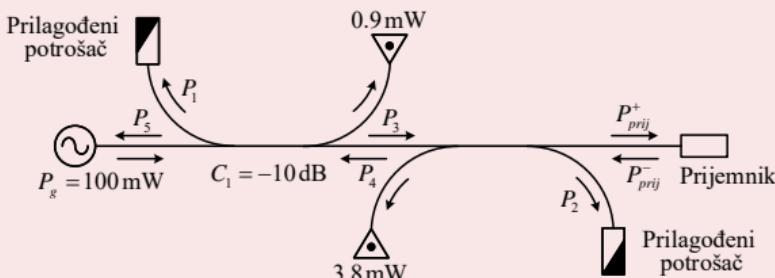
Iz relacije (11) dobijamo da je $|\rho_3| = 0.555$, pa je koeficijent stojećeg talasa u pristupu sa prijemnikom jednak

$$\sigma_3 = \frac{1 + |\rho_3|}{1 - |\rho_3|} = 3.5$$

PRIMJER 4.

Postavka:

Dva sprežnjaka iverznog tipa vezana su kao što pokazuje slika. Poznata je snaga koju daje generator, pokazivanja prilagođenih detektora i koeficijent sprege prvog sprežnjaka. Odrediti snage koje se troše u prilagođenim potrošačima, snagu koja se troši u prijemniku i koeficijent sprege drugog sprežnjaka.



Rješenje.

Zadatak se može uraditi korišćenjem matrica rasijanja (na osnovu predhodnog primjera). Jednostavniji postupak je da se prate tokovi snaga i koriste zadane veličine. Za prvi sprežnjak

$$C_1 = -10 = 10 \log \frac{P_1}{P_{gen}} \quad (12)$$

Iz relacije (12) se dobija

$$P_1 = \frac{P_{gen}}{10} = 10 \text{ mW}$$

PRIMJER 4.

Rješenje...

Snaga generatora je jednaka $P_{gen} = P_1 + P_3$
odakle slijedi da je $P_3 = P_{gen} - P_1 = 90 \text{ mW}$.
Takođe

$$C_1 = -10 = 10 \log \frac{0.9}{P_4}$$

odakle dobijamo $P_4 = 10 \cdot 0.9 = 9 \text{ mW}$. Za drugi
sprežnjak

$$C_2 = 10 \log \frac{3.8}{P_3} = 10 \log \frac{3.8}{90} = -13.7 \text{ dB}$$

Takođe,

$$C_2 = 10 \log \frac{P_2}{P_{prij}^-} \quad (13)$$

Smjenom $P_{prij}^- = P_2 + P_4$ u relaciju (13) dobijamo

$$C_2 = 10 \log \frac{P_2}{P_2 + P_4}$$

odakle je $P_2 = 0.4 \text{ mW}$. Sada računamo
 $P_{prij}^- = P_2 + P_4 = 9.4 \text{ mW}$.

Na osnovu slike (postavka zadatka) vidimo da je
 $P_3 = P_{prij}^+ + 3.8$, pa računamo snagu
 $P_{prij}^+ = P_3 - 3.8 = 86.2 \text{ mW}$. Na kraju
 $P_{prij} = P_{prij}^+ - P_{prij}^- = 76.8 \text{ mW}$.

Posebno uraditi: PRIMJER 7.5 (strana 222), PRIMJER 7.6 (strana 225) i PRIMJER 7.7 (strana 227).
Zadaci na kraju Glave 7 su kombinacija ovih (urađenih) primjera.

