

# Softverski alati za projektovanje antena

**-skripta-**



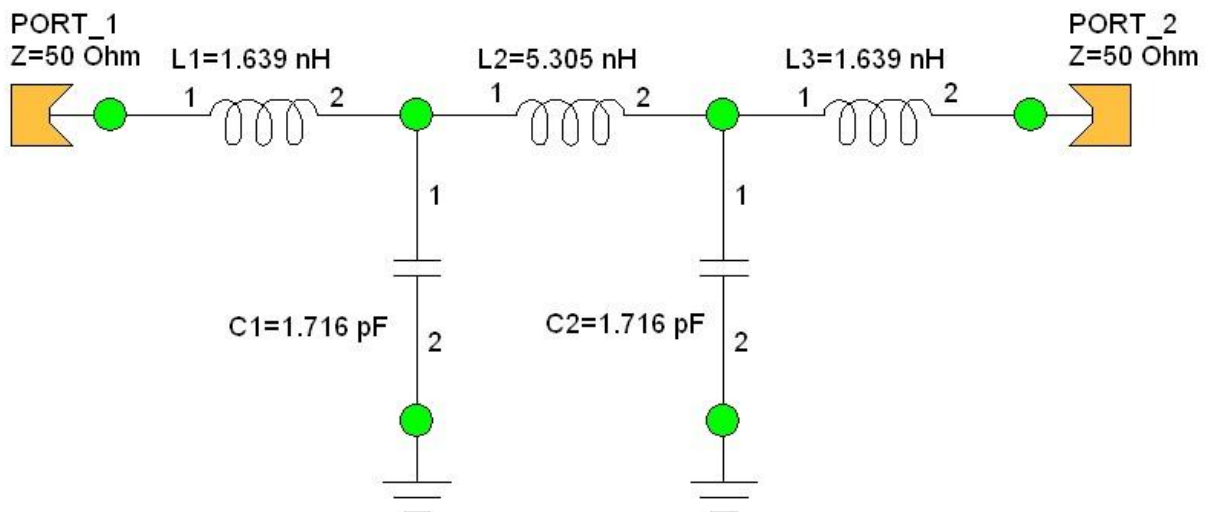
## Čas 1. Proračun $s$ -parametara, prenosnih karakteristika mikrotalasnih filtera i postizanje prilagođenja na vod.

**P01.** Filtar propusnik niskih učestanosti realizovan je pomoću koncentrisanih elemenata [WIPL-D, Quick Tour 3.1.1]

Specifikacije filtra:

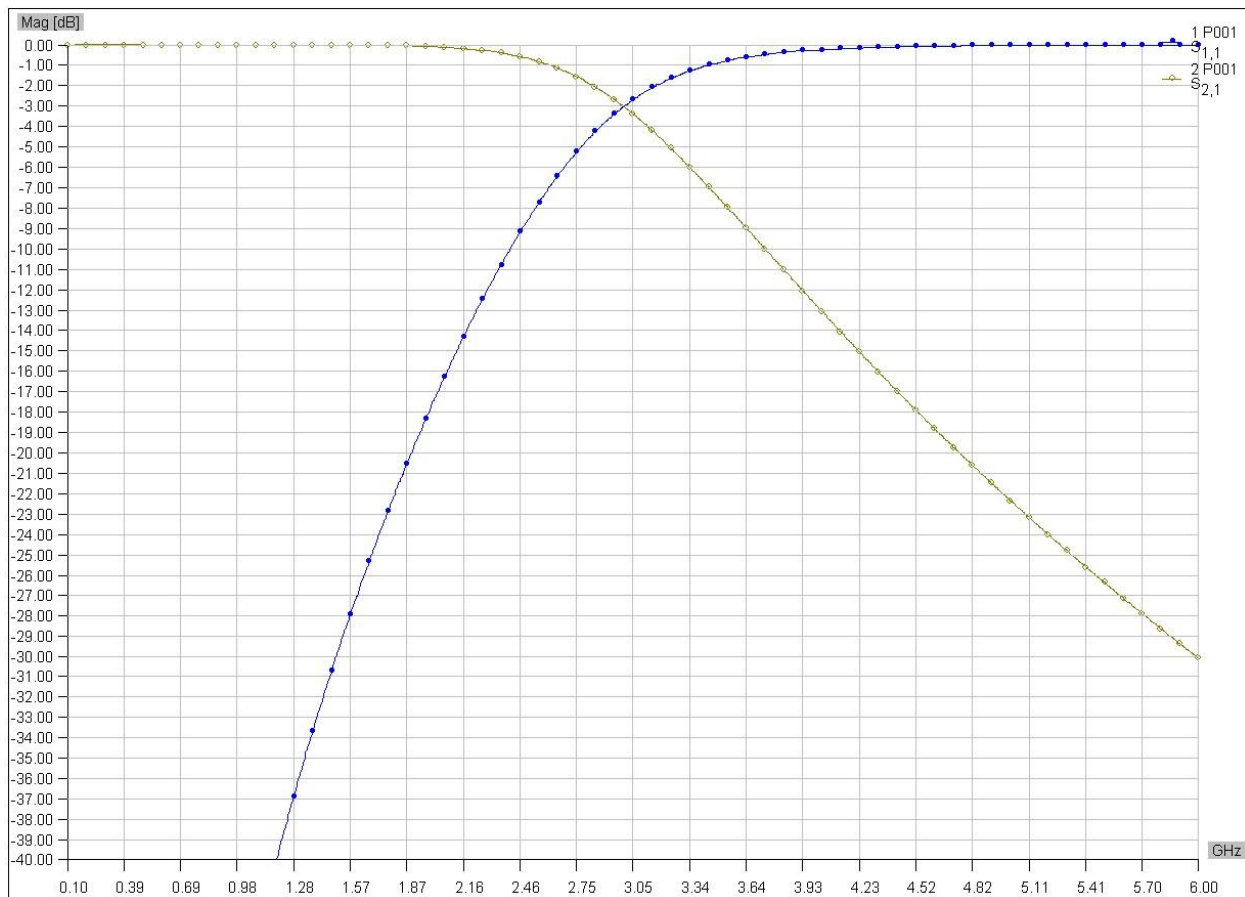
- maksimalno ravna transfer funkcija u propusnom opsegu,
- granična učestanost 3 GHz ,
- minimalno uneseno slabljenje na 4,5 GHz iznosi 15 dB .

Specifikacija je zadovoljena filtrom 5-tog reda. Potrebno je proračunati  $|s_{11}|$  i  $|s_{21}|$  (u dB) u opsegu učestanosti od 0,1 GHz do 6 GHz , za nominalne impedanse pristupa od  $50 \Omega$  .



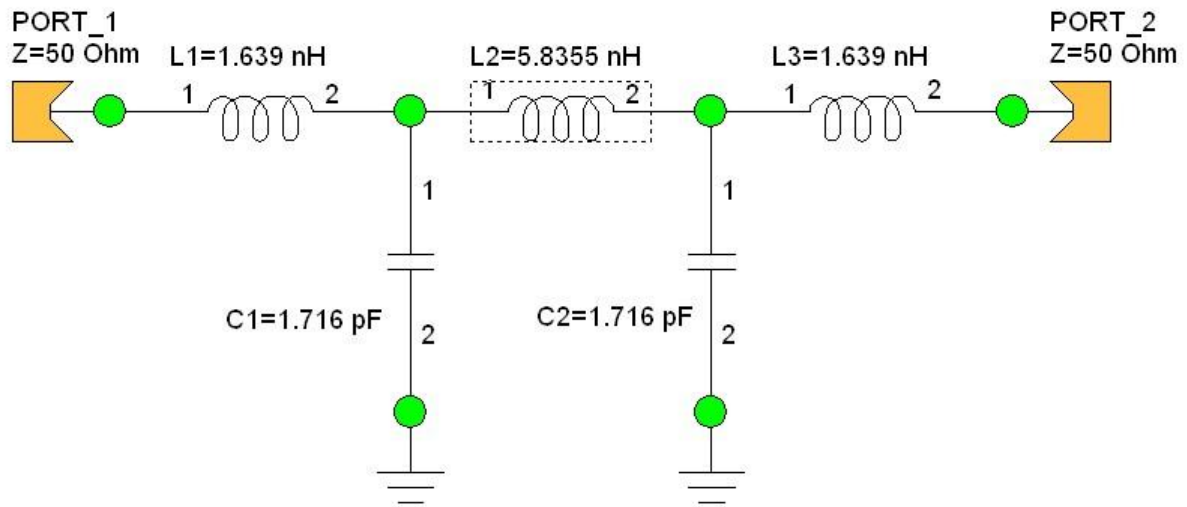
Slika 1(a).

Na slici 1(b) prikazani su  $|s_{11}|$  i  $|s_{21}|$  u dB.



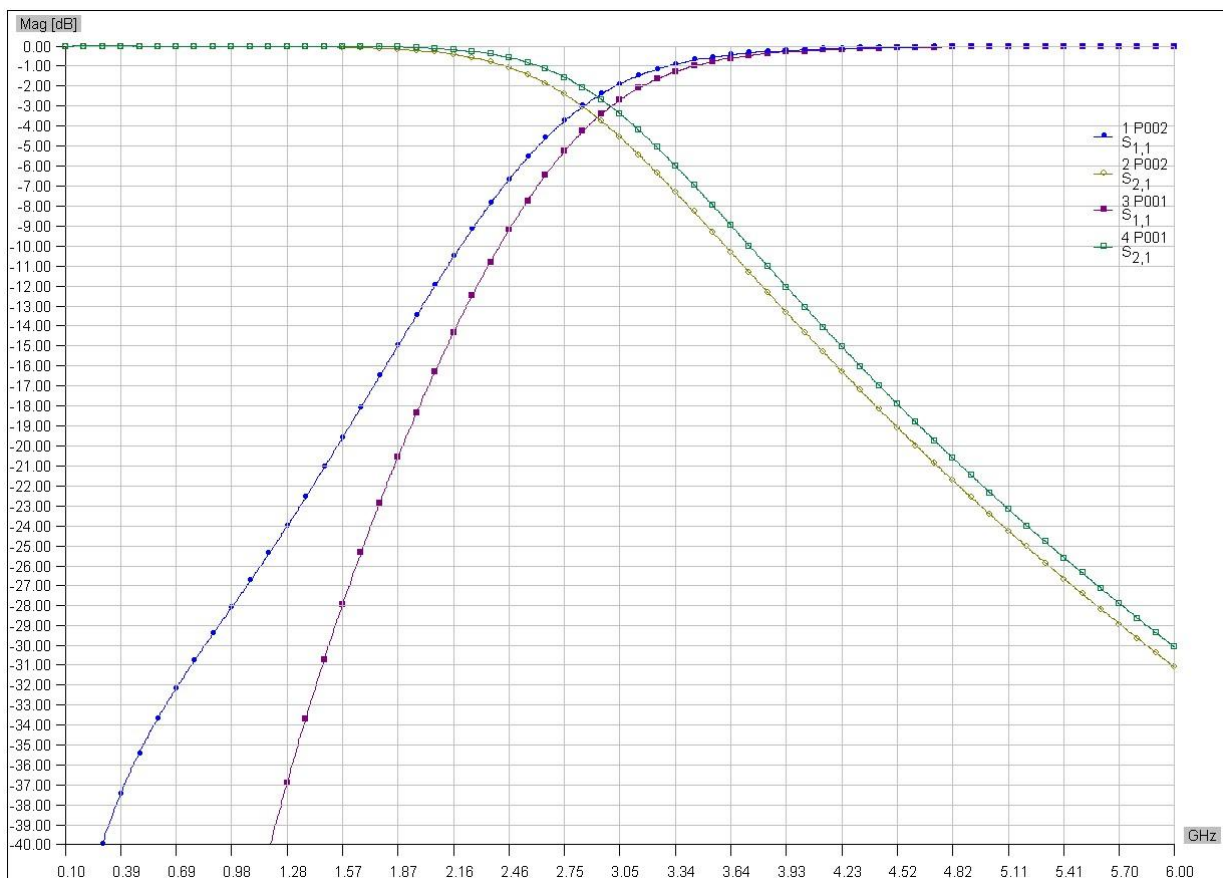
Slika 1(b).

**P02.** Ponoviti prethodni primer za brojnu vrednost induktivnosti  $L_2$  uvećanu za 10%. Uporedno prikazati parametre  $|s_{11}|$  i  $|s_{21}|$  (u dB) za primere p01 i p02.



Slika 2(a).

Uporedni grafik parametara  $|s_{11}|$  i  $|s_{21}|$  (u dB) za primere p01 i p02 prikazan je na slici 2(b).



Slika 2(b).

**P03.** Primer sa idealnim mikrotalasnim vodovima.

Dat je idealni vod karakteristične impedanse  $Z_c = 50 \Omega$ .

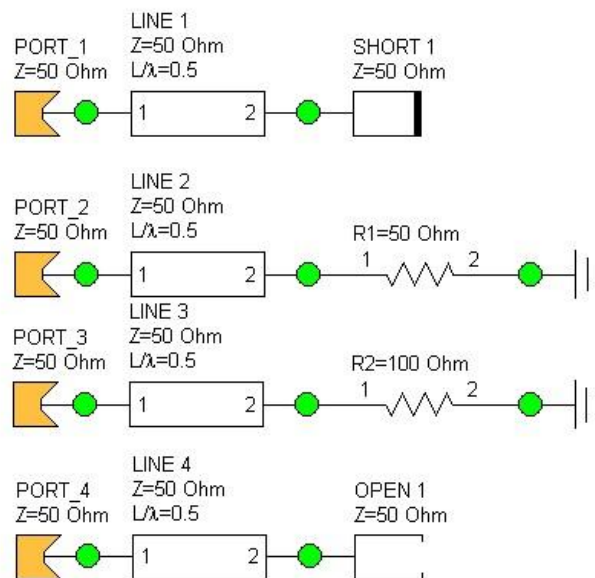
Referentna učestanost iznosi  $f_0 = 5 \text{ GHz}$ .

Dužina voda na referentnoj učestanosti iznosi  $L = \lambda/2$ .

Vod je završen:

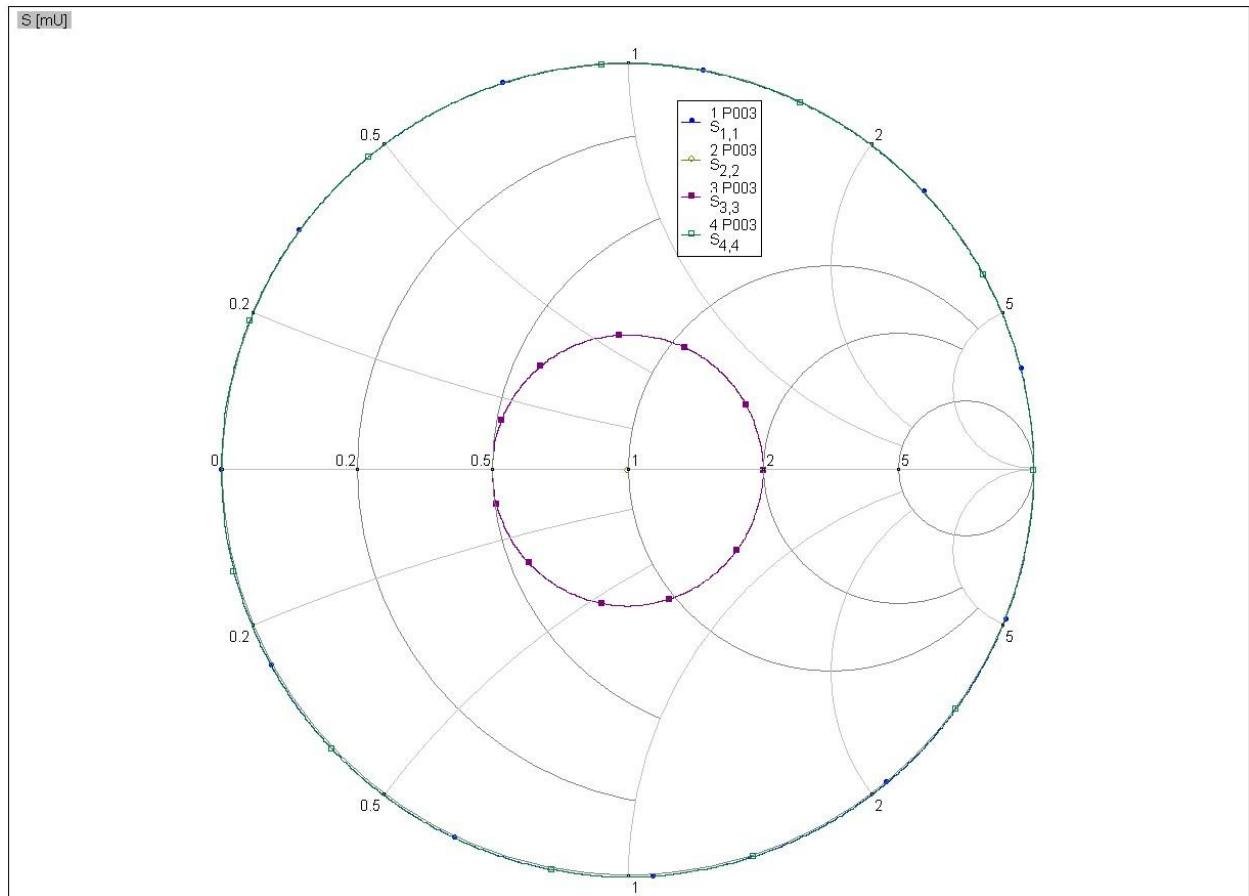
- kratkim spojem,
- potrošačem  $Z_p = 50 \Omega$ ,
- potrošačem  $Z_p = 100 \Omega$ ,
- otvorenom vezom.

Odrediti  $s$ -parametre u opsegu učestanosti od 1 GHz do 10 GHz. Uporedno prikazati  $s$ -parametre u Smitovom dijagramu.



Slike 3(a).

Uporedni grafik  $s$ -parametara u Smitovom dijagramu prikazan je na slici 3(b).



Slika 3(b).

**P04.** Primer sa realnim mikrotalasnim vodovima u mikrotrakastoj tehnologiji.

Vod realizovan u mikrotrakastoj tehnologiji karakteristične impedanse  $Z_c = 50 \Omega$ .

Referentna učestanost iznosi  $f_0 = 5 \text{ GHz}$ .

Dužina voda na referentnoj učestanosti iznosi  $L = \lambda/2$ .

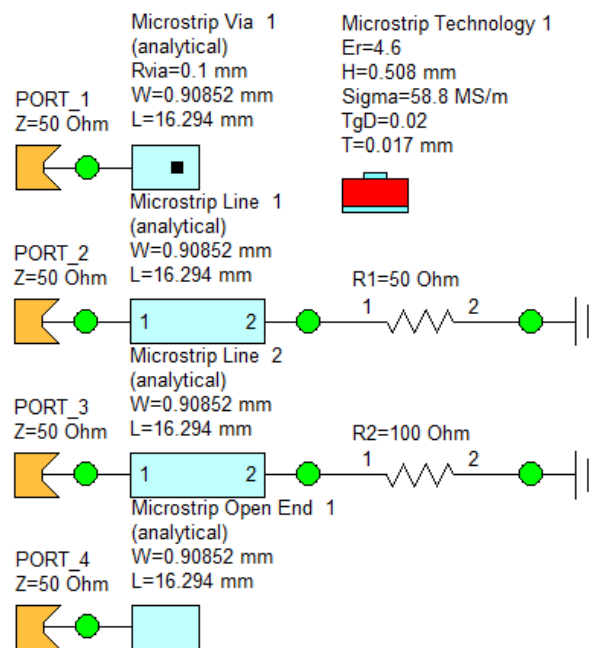
Parametri supstrata FR-4 su:

$\epsilon_r = 4,6$  (relativna permitivnost dielektrika),  $\text{tg}\delta = 0,02$  (tangens ugla gubitaka),  $h = 0,508 \text{ mm}$  (visina supstrata), provodnost metala  $\sigma = 58,8 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ , debljina metalizacije  $t = 0,017 \text{ mm}$ .

Vod je završen:

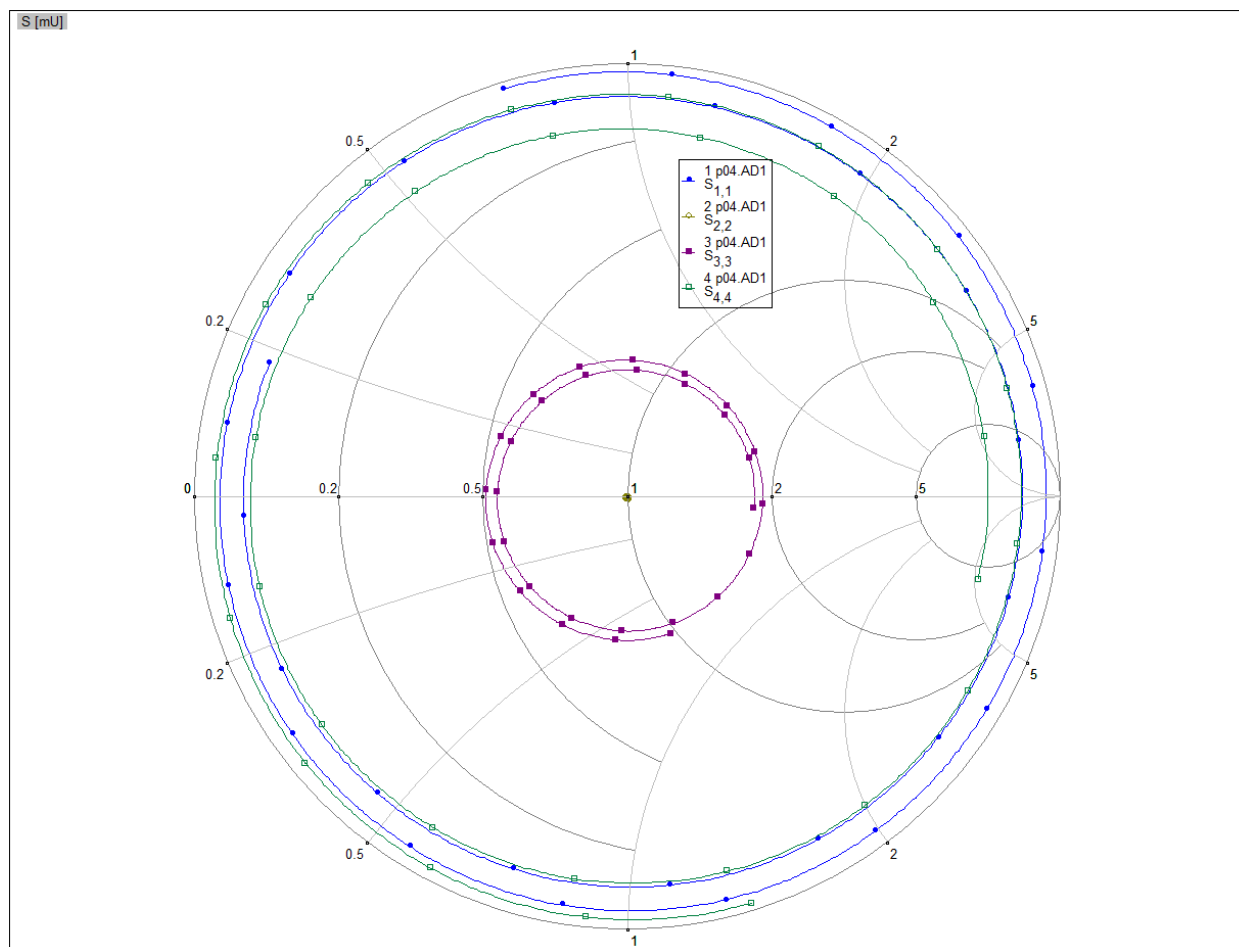
- kratkim spojem,
- potrošačem  $Z_p = 50 \Omega$ ,
- potrošačem  $Z_p = 100 \Omega$ ,
- otvorenom vezom.

Odrediti  $s$ -parametre u opsegu učestanosti od 1 GHz do 10 GHz. Uporedno prikazati  $s$ -parametre u Smitovom dijagramu.



Slika 4(a).

Uporedni grafik  $s$ -parametara u Smitovom dijagramu prikazan je na slici 4(b).



Slika 4(b).



**P05.** Primer sa realnim mikrotalasnim vodovima u mikrotrakastoj tehnologiji.

Vod realizovan u mikrotrakastoj tehnologiji karakteristične impedanse  $Z_c = 50 \Omega$ .

Referentna učestanost iznosi  $f_0 = 5 \text{ GHz}$ .

Dužina voda na referentnoj učestanosti iznosi  $L = \lambda/2$ .

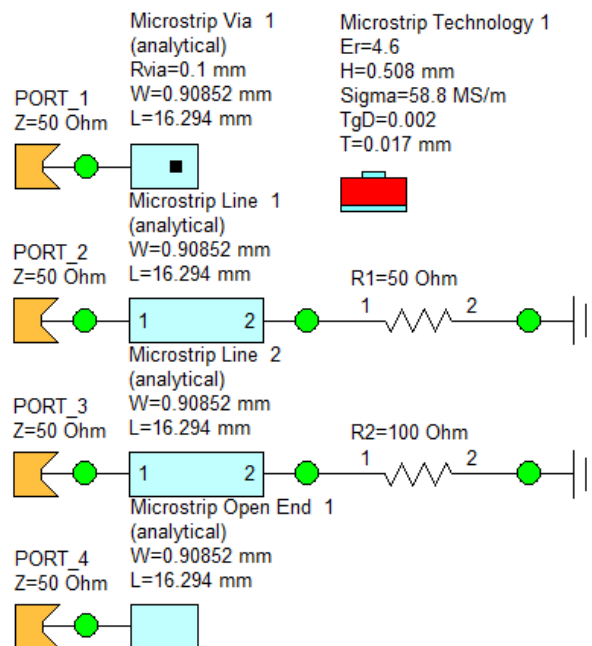
Parametri supstrata su:

$\epsilon_r = 4,6$  (relativna permitivnost dielektrika),  $\text{tg}\delta = 0,002$  (tangens ugla gubitaka),  $h = 0,508 \text{ mm}$  (visina supstrata), provodnost metala  $\sigma = 58,8 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ , debljina metalizacije  $t = 0,017 \text{ mm}$ .

Vod je završen:

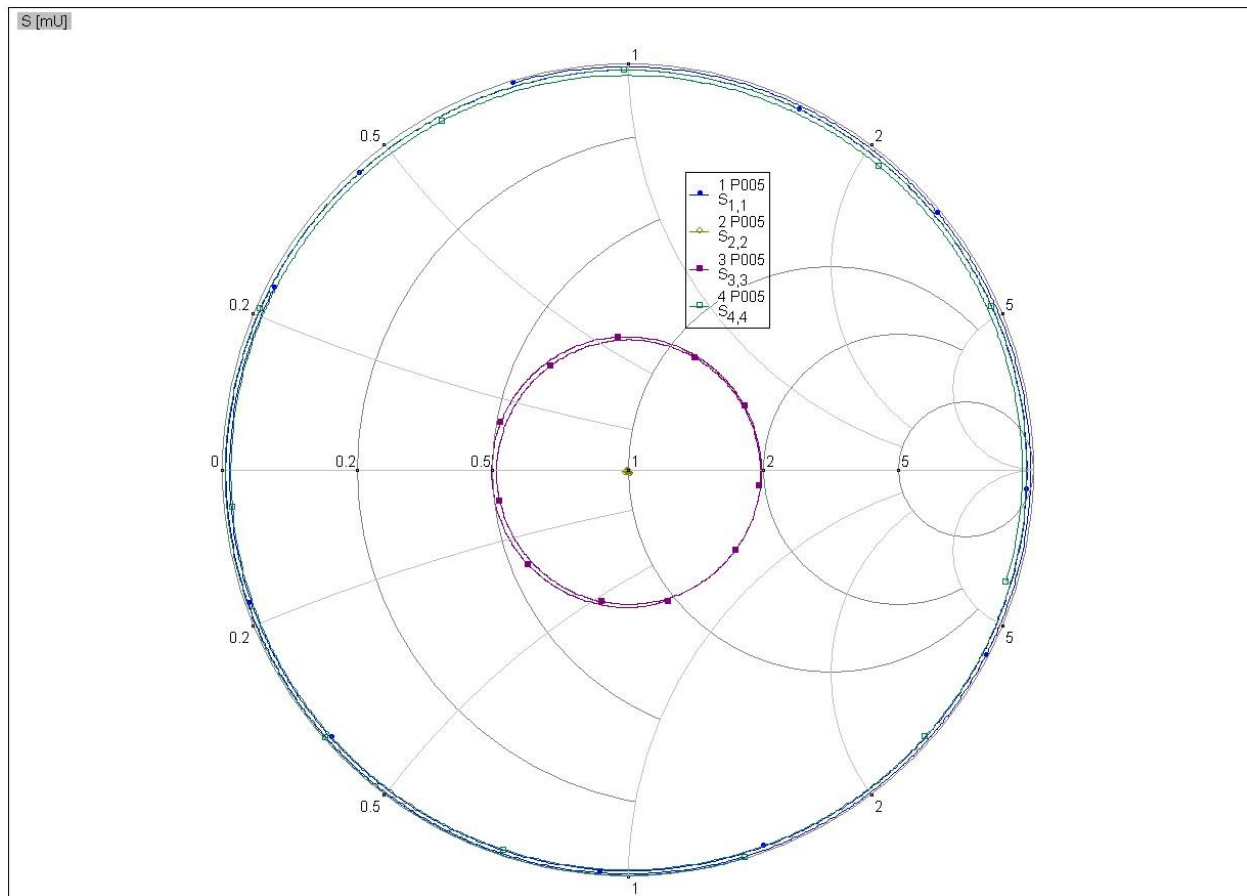
- kratkim spojem,
- potrošačem  $Z_p = 50 \Omega$ ,
- potrošačem  $Z_p = 100 \Omega$ ,
- otvorenom vezom.

Odrediti  $s$ -parametre u opsegu učestanosti od 1 GHz do 10 GHz. Uporedno prikazati  $s$ -parametre u Smitovom dijagramu.



Slika 5(a).

Uporedni grafik  $s$ -parametara u Smitovom dijagramu prikazan je na slici 5(b).



Slika 5(b).

**P06.** Kolo za prilagođenje sa jednim ogrankom [WIPL-D, Quick Tour 3.1.2].

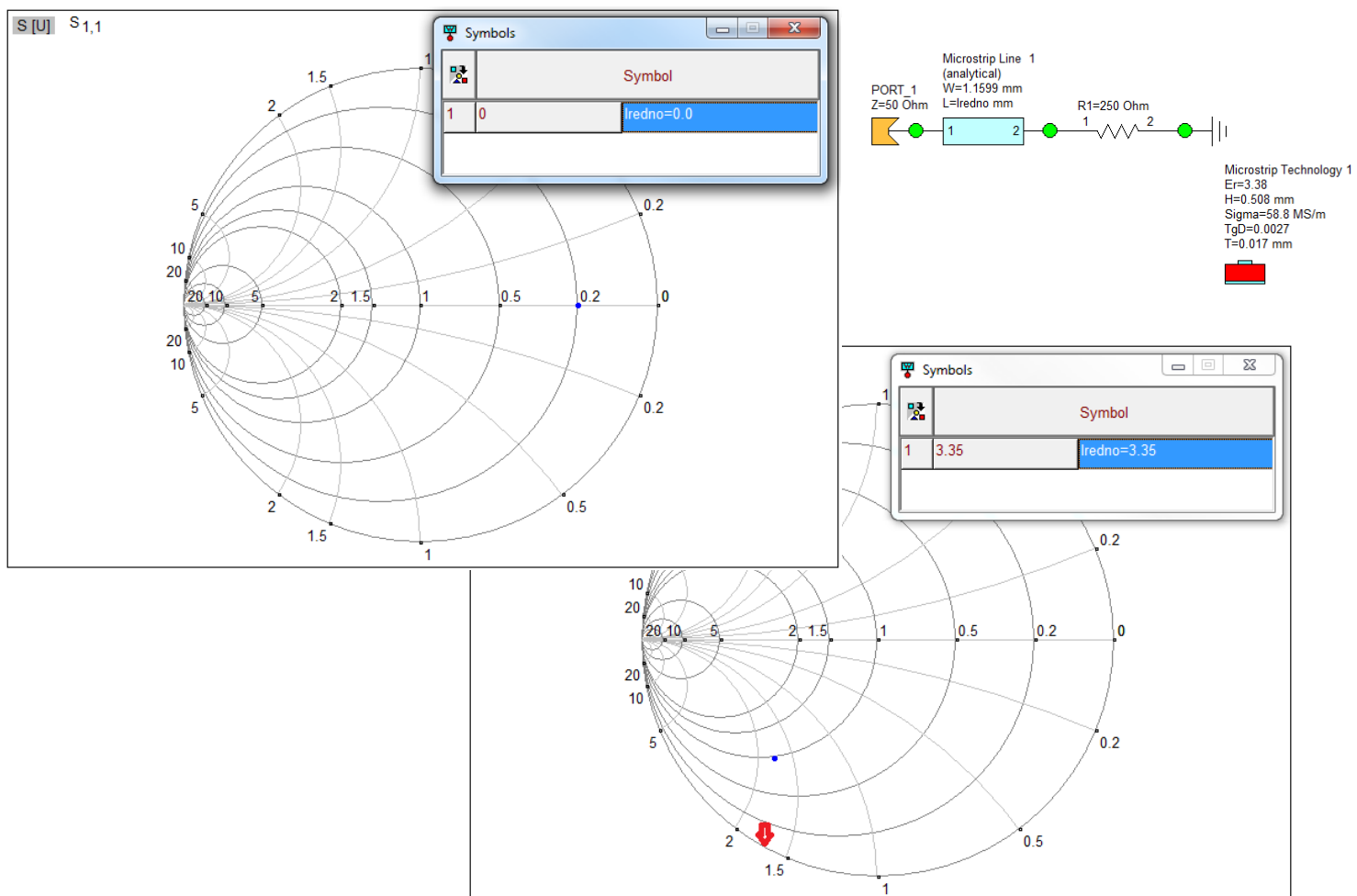
Na centralnoj učestanosti 10 GHz potrebno je prilagoditi potrošač impedanse  $250 \Omega$  na mikrotrakasti vod karakteristične impedanse  $50 \Omega$  (primenjuje se kod mikrostrip antena).

Parametri supstrata su:  $\epsilon_r = 3,38$  (relativna permitivnost dielektrika),  $\text{tg}\delta = 0,0027$  (tangens ugla gubitaka),  $h = 0,508\text{mm}$  (visina supstrata),  $t = 0,017\text{mm}$  (debljina metalizacije), provodnost metala  $\sigma = 58,8 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ .

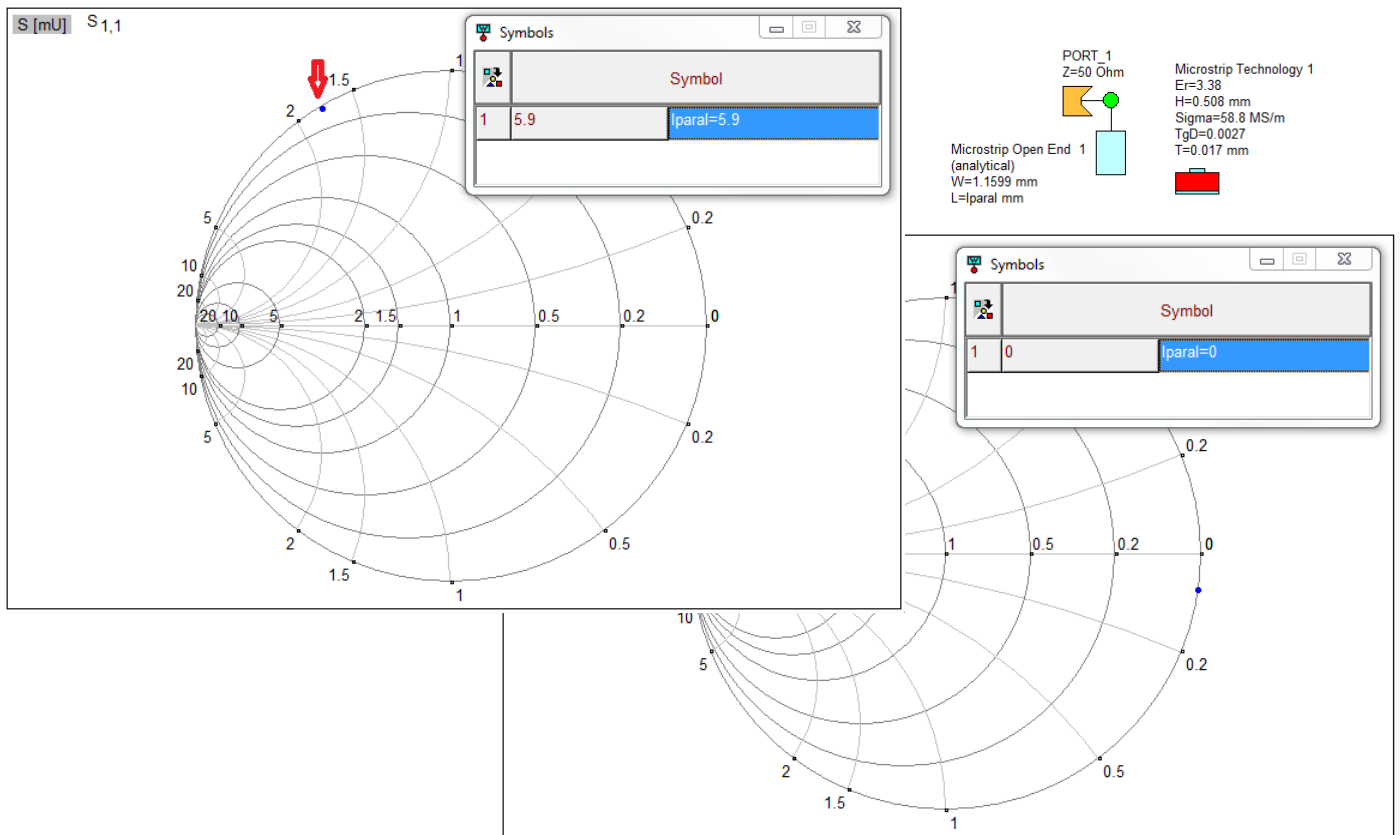
Mreža za prilagođenje sastoji se od voda (odsečka) karakteristične impedanse  $50 \Omega$  i paralelno postavljenog otvorenog ogranka iste karakteristične impedanse (tipično za mikrotrakaste strukture).

**(Uraditi optimizaciju)! Uporediti sa primerom P14!** Prikazati parametar  $|s_{11}|$  (u dB) potrošača sa optimizovanom mrežom za prilagođenje u opsegu učestanosti od 8GHz do 12GHz.

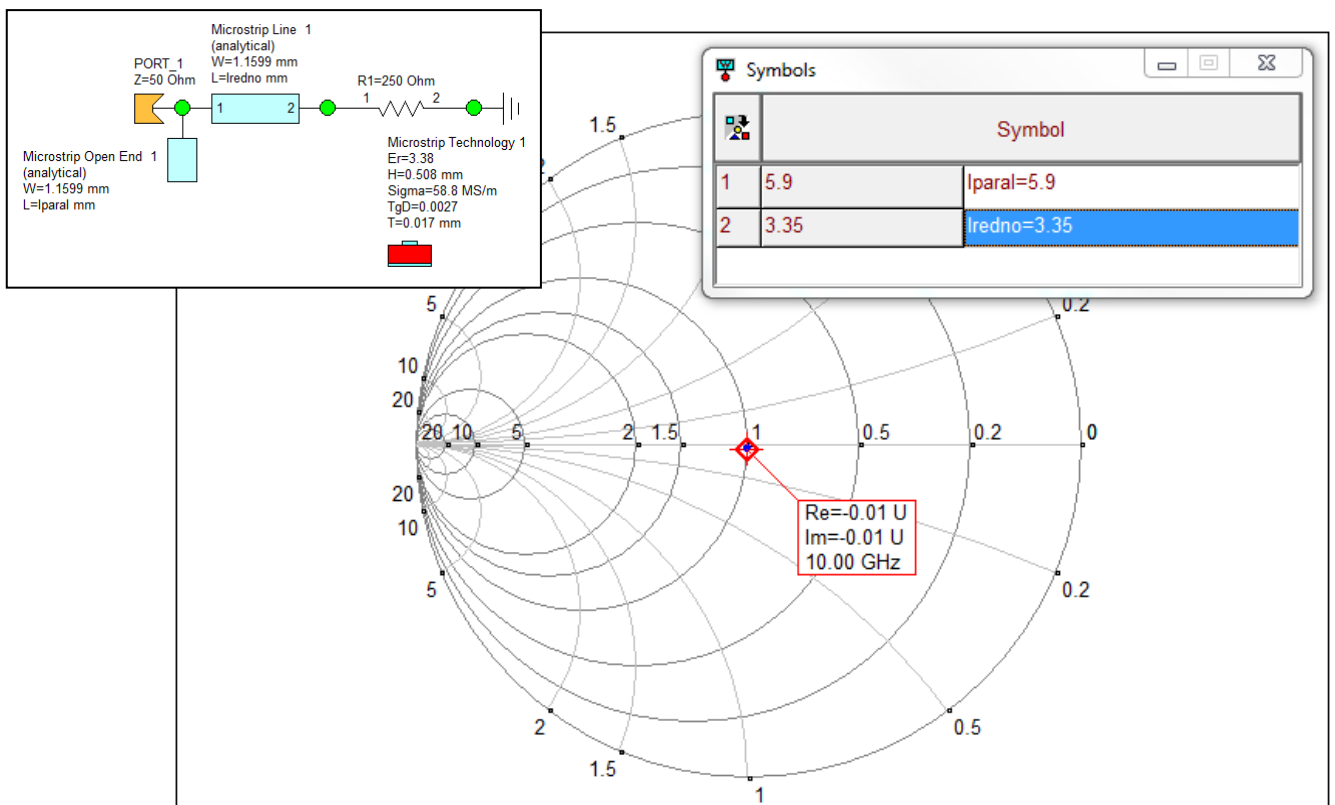
Dužina odsečka određuje se na osnovu preseka kruga konstantnog koeficijenta refleksije i kruga jedinične (normalizovane) konduktanse u Smitovom dijagramu.



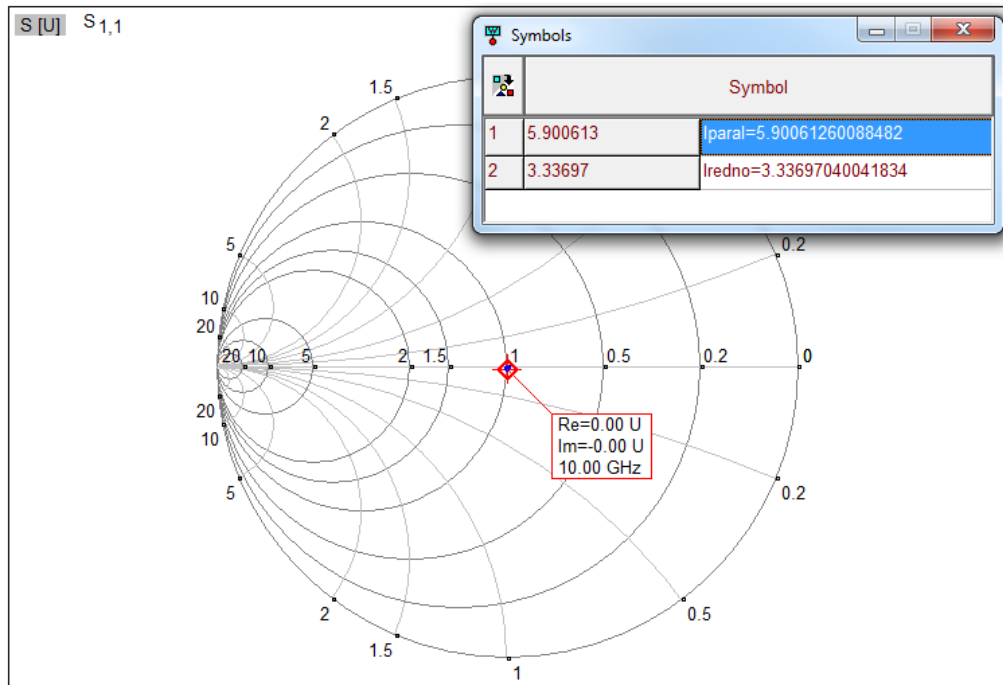
Ulazna admitansa ogranka je čisto reaktivna i jednaka je imaginarnom delu konjugovano-kompleksne ulazne admitanse potrošača sa odsečkom.



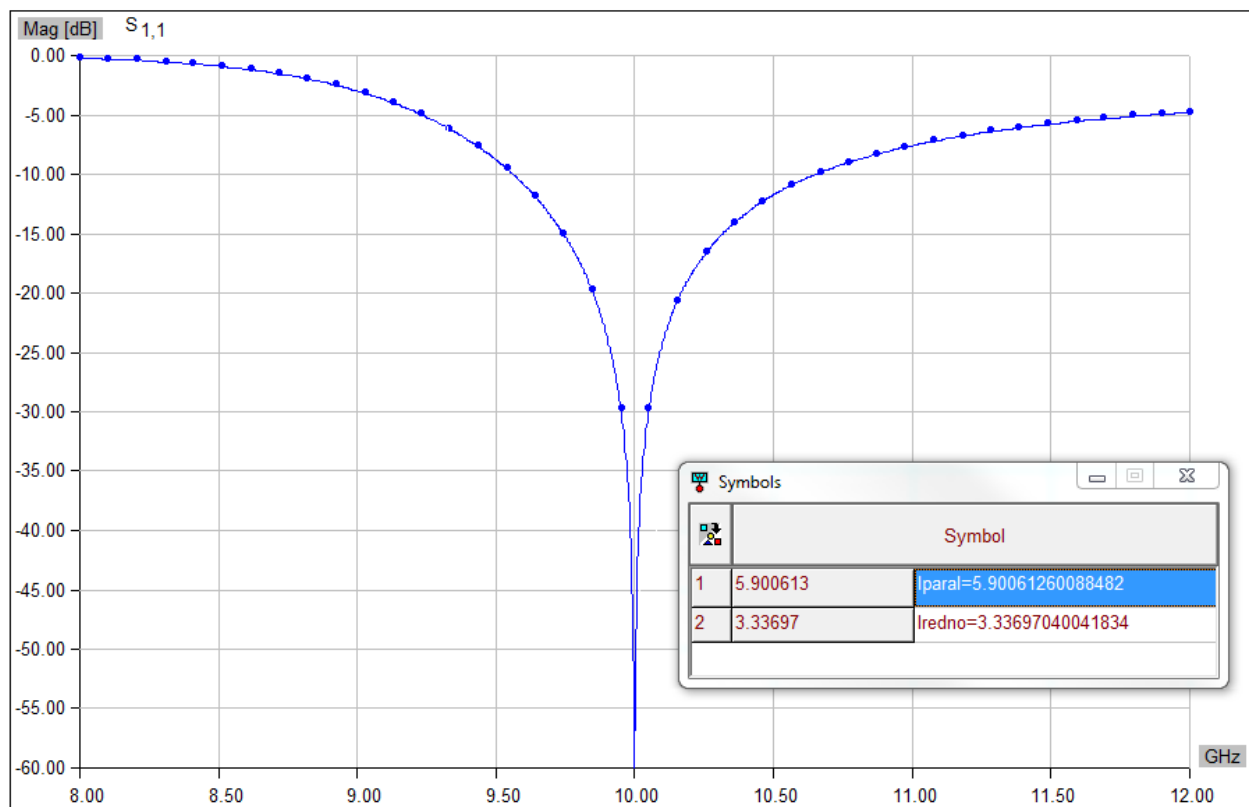
Kombinacijom ogranka i odsečka dobija se kolo za prilagođenje.



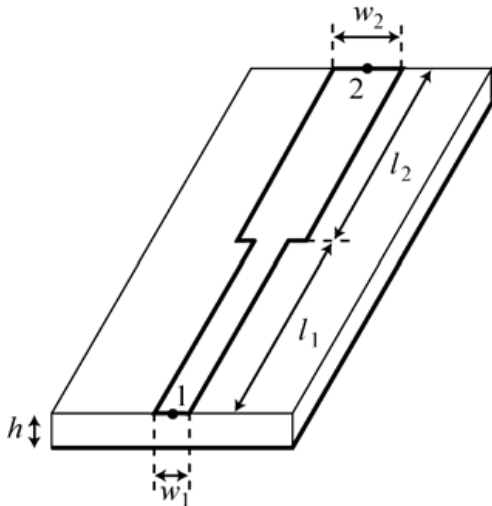
Nakon optimizacije na slici 6(a) prikazan je ulazni koeficijent refleksije na centralnoj učestanosti u Smitovom dijagramu. Parametar  $|s_{11}|$  (u dB) potrošača sa optimizovanom mrežom za prilagođenje u opsegu učestanosti od 8GHz do 12GHz prikazan je na slici 6(b).



Slika 6(a).



Slika 6(b).

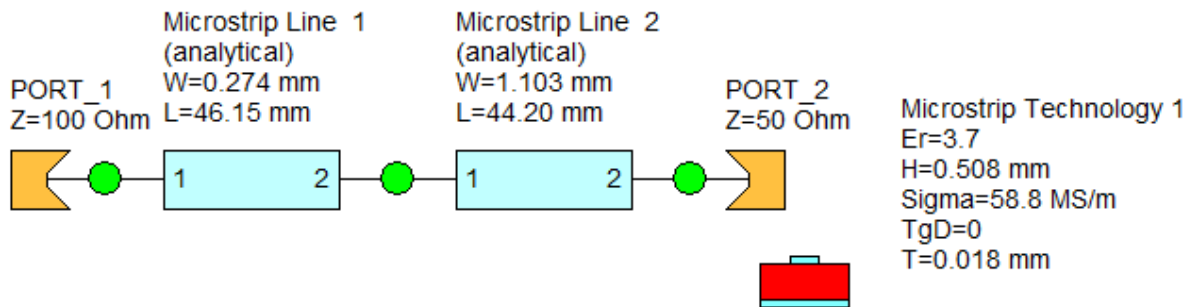


Slika 7.

**P07.** (Januar 2009) Na slici 7 je prikazano mikrotalasno kolo koje se sastoji od dva redno vezana mikrotrakasta voda. Širina trake prvog voda je  $w_1 = 0,274\text{mm}$ , dužina prvog voda je  $l_1 = 46,15\text{mm}$ , širina trake drugog voda je  $w_2 = 1,103\text{mm}$ , a dužina drugog voda je  $l_2 = 44,20\text{mm}$ . Kolo je napravljeno na podlozi debljine  $h = 0,508\text{mm}$  i relativne permitivnosti  $\epsilon_r = 3,7$ . Izračunati  $s$ -parametre ovog kola, na učestanosti  $f = 1\text{GHz}$ , ukoliko prvi pristup kola čini tačka 1 i masa, a drugi pristup tačka 2 i masa. Nominalna impedansa prvog pristupa je  $Z_{01} = 100\Omega$ , a drugog pristupa  $Z_{02} = 50\Omega$ . Zanemariti gubitke i parazitne efekte na spoju vodova.

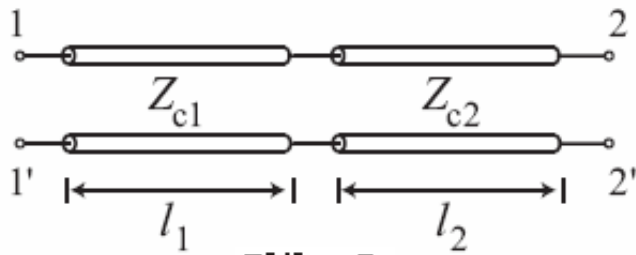
Rešenje:

$$[S] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +1 & -2\sqrt{2} \\ -2\sqrt{2} & -1 \end{bmatrix}$$



frequency [GHz]	i	j	Y-mag [mS]	Y-phase [°]	Z-mag [ohm]	Z-phase [°]	S-mag	S-phase [°]
1	1	1	175.9	77.3	2263	79.21	0.3013	4.431
1	1	2	341.4	77.33	1168	-100.8	0.943	-177.3
1	2	1	341.4	77.33	1168	-100.8	0.943	-177.3
1	2	2	661.2	77.31	601.9	79.19	0.3034	-179

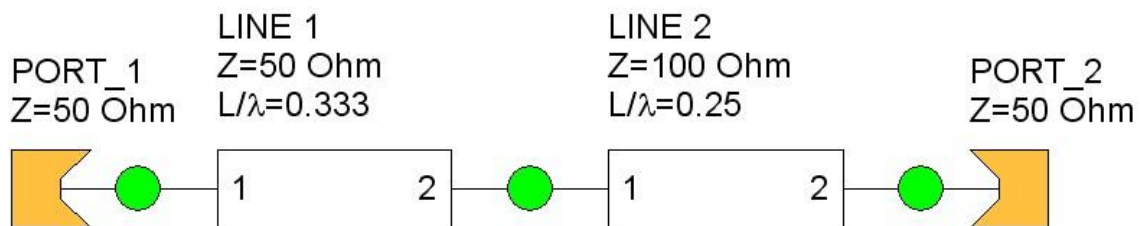
**P08.** (Januar 2008) Dva idealna voda bez gubitaka vezana su redno kao na slici 8. Karakteristične impedanse vodova su  $Z_{c1}=50\Omega$  i  $Z_{c2}=100\Omega$ , a dužine su  $l_1=\lambda_{g1}/3$  i  $l_2=\lambda_{g2}/4$ , gde je  $\lambda_{g1}$  talasna dužina na prvomvodu i  $\lambda_{g2}$  talasna dužina na drugomvodu. Prvi pristup mreže čine priključci 1-1', a drugi 2-2'. Nominalne impedanse oba pristupa su  $Z_{01}=Z_{02}=50\Omega$ . Izračunati  $s$ -parametre ove mreže.



Slika 8.

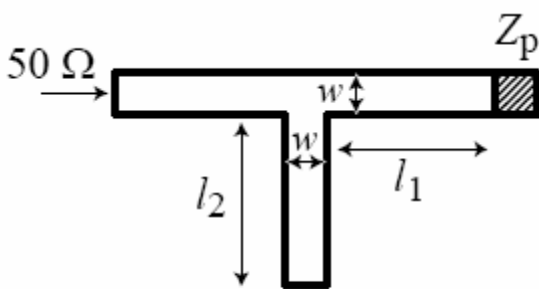
Rešenje:

$$[s] = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 3e^{-j4\pi/3} & 4e^{-j7\pi/6} \\ 4e^{-j7\pi/6} & 3 \end{bmatrix} = \frac{1}{10} \begin{bmatrix} 3(-1+j\sqrt{3}) & 4(-\sqrt{3}+j) \\ 4(-\sqrt{3}+j) & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-0,3+j0,52) & (-0,69+j0,4) \\ (-0,69+j0,4) & 0,6 \end{bmatrix}$$



frequency [GHz]	i	j	Y-real [mS]	Y-imag [mS]	Z-real [ohm]	Z-imag [ohm]	S-real	S-imag
1	1	1	-2.602E-15	-34.81	-7.816E-14	-87.02	-0.3022	0.5184
1	1	2	-3.161E-16	-20.07	1.318E-13	200.7	-0.6937	0.3985
1	2	1	-3.469E-15	-20.07	1.634E-13	200.7	-0.6937	0.3985
1	2	2	-2.602E-15	-8.702	-2.487E-13	-348.1	0.6	2.939E-17

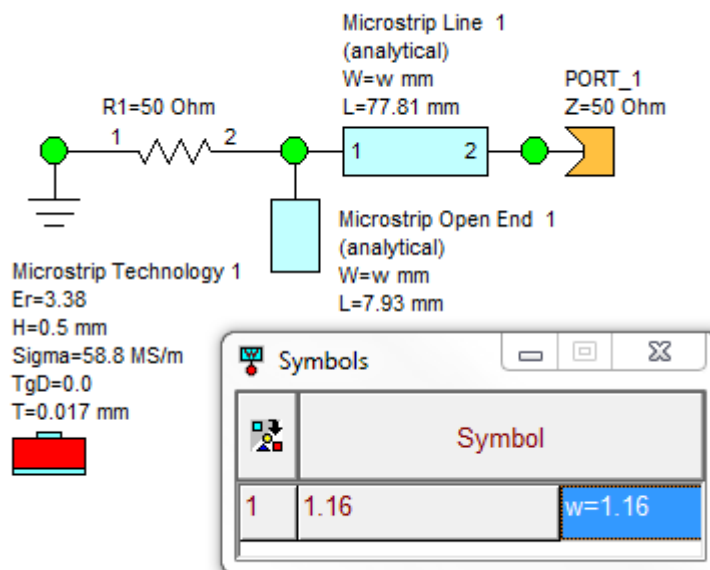
**P09.** (Septembar 2008) Kolo za prilagođenje je realizovano u mikrotrakastoj tehnici, na podlozi visine  $h=0,5\text{ mm}$  i relativne permitivnosti  $\epsilon_r=3,38$ . Radna učestanost je  $f=1,9\text{ GHz}$ . Širina svih traka je  $w=1,16\text{ mm}$ , dužina ogranka je  $l_2=7,93\text{ mm}$ , a odstojanje od potrošača na kome je postavljen ogranak je  $l_1=77,81\text{ mm}$ . Ukoliko je posle ogranka, na strani ka sistemu postignuto potpuno prilagođenje po snazi na vod, izračunati nepoznatu kompleksnu impedansu potrošača  $Z_p$ .



Slika 9.

Rešenje:  $Z_p = (75 - j25)\ \Omega$ .

Po teoremi prilagođenja po snazi,  $Z_p = Z_g^*$ , gde je  $Z_g$  unutrašnja impedansa ekvivalentnog (Thevenenovog ili Nortonovog) generatora.



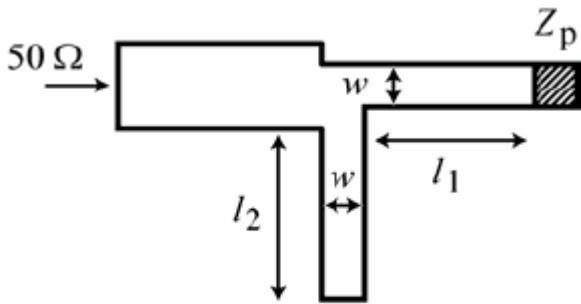
Slika 9.

Pomoću kola sa slike 9 određujemo  $Z_g$ .

frequency [GHz]	i	j	Y-real [mS]	Y-imag [mS]	Z-real [ohm]	Z-imag [ohm]	S-real	S-imag
1.9	1	1	12.58	-4.807	69.36	26.51	0.2016	0.1773



**P10.** (Avgust 2008) Projektovati kolo za prilagođenje antene čija je ulazna impedansa  $Z_p = (75 - j75) \Omega$  na nominalnu impedansu  $Z_0 = 50 \Omega$ , na učestanosti  $f = 900 \text{ MHz}$ . Kolo za prilagođenje ima jedan ogranak, kao na slici 10. Karakteristična impedansa dela voda od potrošača do ogranka, kao i ogranak je  $Z_c = 75 \Omega$ . Vod od ogranka ka ostatku sistema ima karakterističnu impedansu  $50 \Omega$ . Kolo treba da bude realizovano u mikrotrakastoj tehnici, na podlozi čija je debljina  $h = 0,3 \text{ mm}$ , a relativna permitivnost  $\epsilon_r = 4,4$ . Zanimariti parazitne efekte na spoju vodova različitih širina linije. **(Uraditi optimizaciju!)**



Slika 10.

Rešenje:

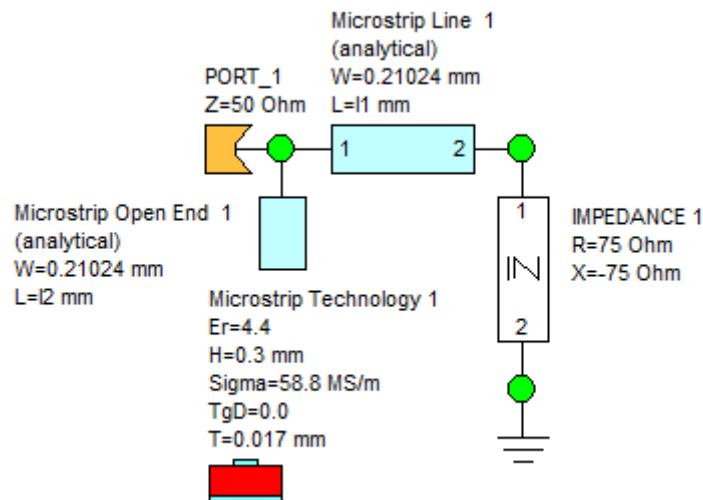
Širina trake je  $w = 0,267 \text{ mm}$ , a talasna dužina na vodu je  $\lambda_g = 186,7 \text{ mm}$ . Prvi skup rešenja je

$$l_1^{(1)} = 19,5 \text{ mm} + n \frac{\lambda_g}{2}, \quad l_2^{(1)} = 68,8 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2}, \quad \text{a drugi skup rešenja je } l_1^{(2)} = 41,3 \text{ mm} + n \frac{\lambda_g}{2},$$

$$l_2^{(2)} = 26,1 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2}, \quad \text{gde su } m, n \in N_0.$$

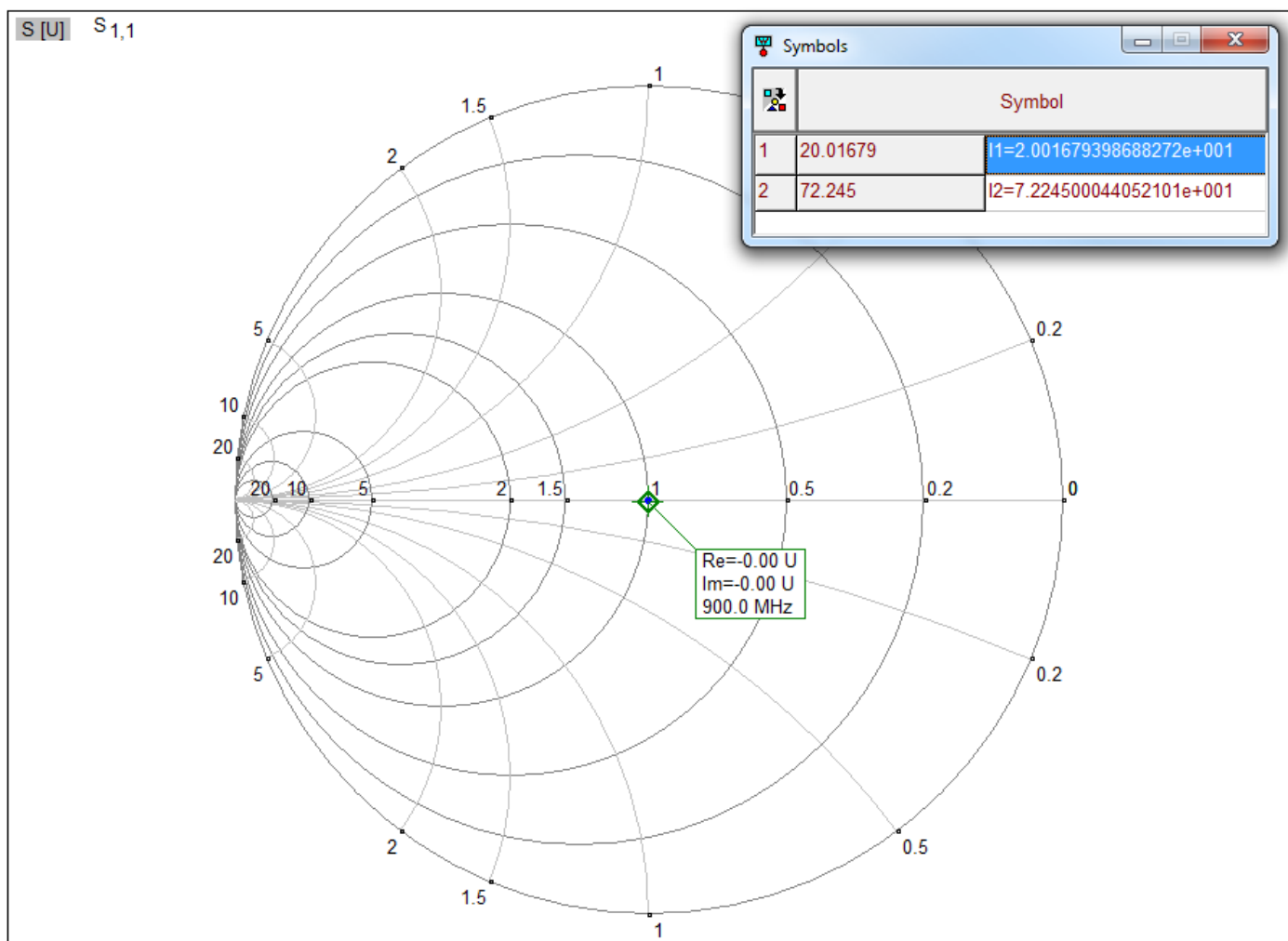
Koristeći se postupkom kao u p06, projektovano je kolo za prilagođenje (za prvi par rešenja).

**Domaći:** (Projektovati kolo za prilagođenje za drugi par rešenja).



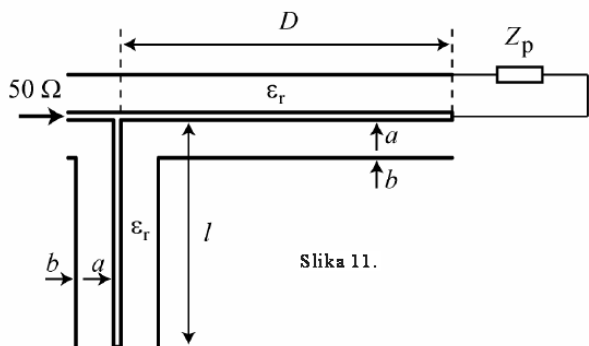
Slika 10(a).

Na slici 10(b) prikazan je koeficijent refleksije u Smitovom dijagramu i dužine ogranka i odsečka za prvi par rešenja nakon optimizacije dužina ogranda i odsečka.



Slika 10(b).

**P11.** (Novembar 2008) Projektovati kolo za prilagođenje antene čija je ulazna impedansa  $Z_p = (75 - j75) \Omega$  na nominalnu impedansu  $Z_0 = 50 \Omega$ . Učestanost generatora je  $f = 900 \text{ MHz}$ . Kolo za prilagođenje ima



jedan otvoreni ogranak, kao na slici. Deo voda od potrošača do ogranka, kao i sam ogranak, načinjeni su od koaksijalnog voda poluprečnika unutrašnjeg provodnika  $a = 0,5 \text{ mm}$ , i spoljašnjeg poluprečnika  $b = 1,87 \text{ mm}$ . Relativna permitivnost dielektrika koaksijalnog voda je  $\epsilon_r = 2,5$ . Smatrati da vod od ogranka ka ostatku sistema ima karakterističnu impedansu  $50 \Omega$ . Zanimariti parazitne efekte na spoju koaksijalnih vodova. **(Uraditi optimizaciju!)**

Rešenje:

Karakteristična impedansa koaksijalnog voda pomoću koga je potrebno napraviti kolo za prilagođenje je

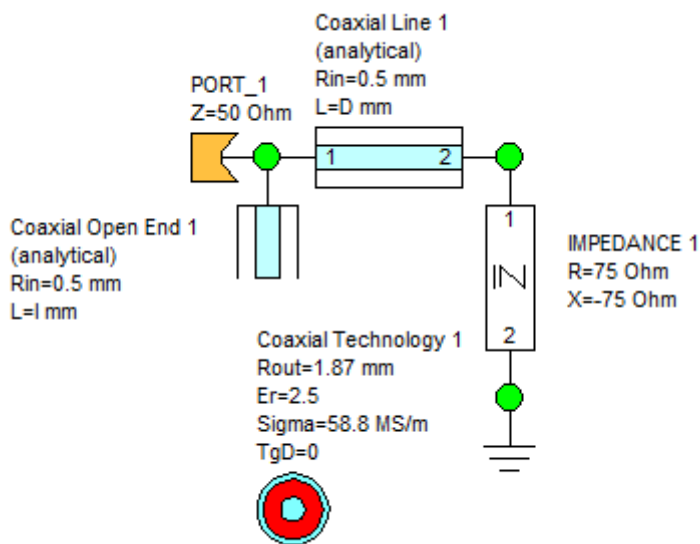
$$Z_c \approx \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{b}{a} \approx 50 \Omega, \text{ a talasna dužina u koaksijalnom vodu je } \lambda_g = 211 \text{ mm. Dimenzije kola za}$$

$$\text{prilagođenje su } D^{(1)} = 57,5 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2}, \quad l^{(1)} = 30,6 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2}, \quad \text{odnosno } D^{(2)} = 24,3 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2},$$

$$l^{(2)} = 74,6 \text{ mm} + m \frac{\lambda_g}{2} \text{ gde je } m \in \mathbb{N}_0.$$

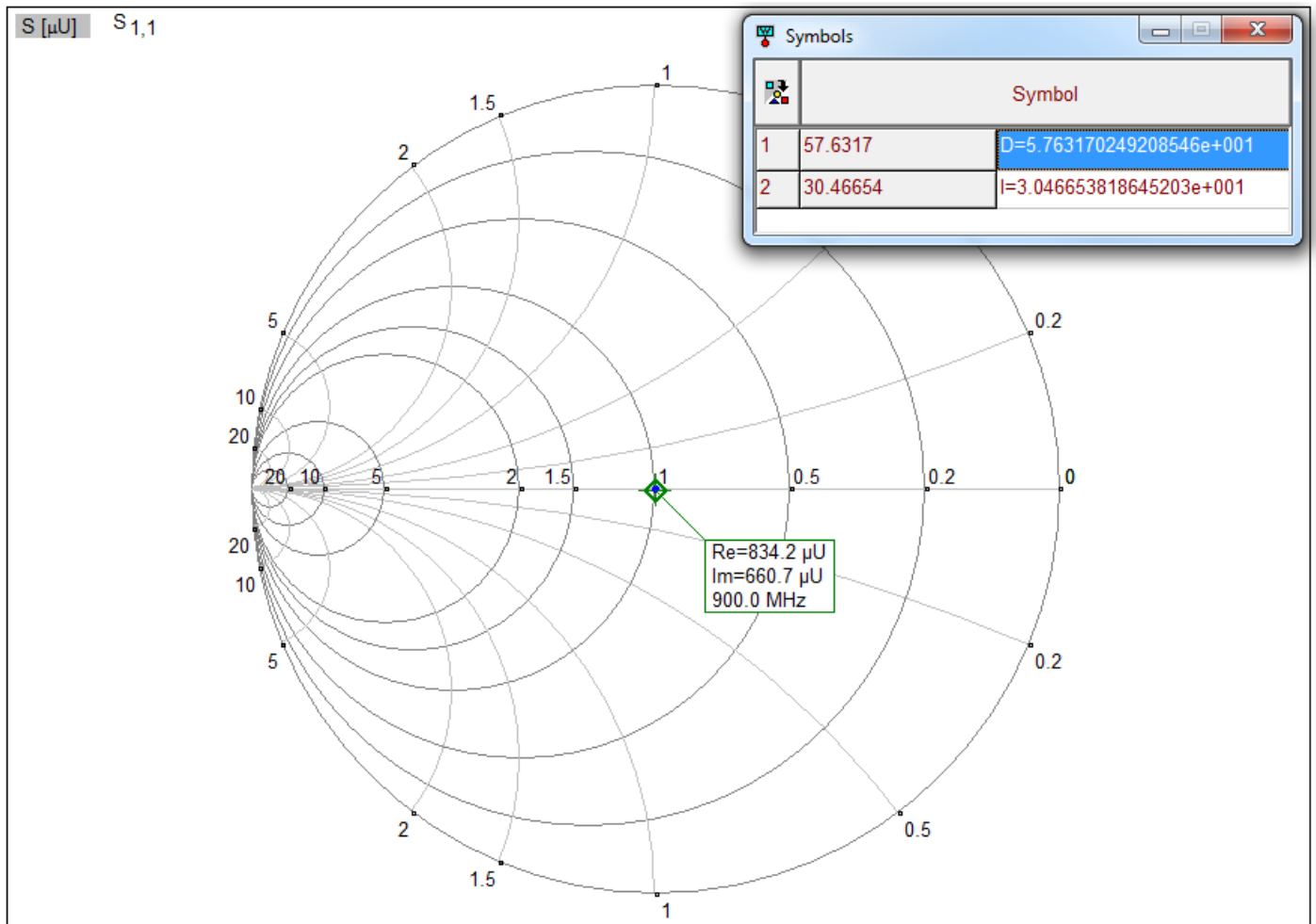
Koristeći se postupkom kao u p06, projektovano je kolo za prilagođenje (za prvi par rešenja).

**Domaći:** (Projektovati kolo za prilagođenje za drugi par rešenja).

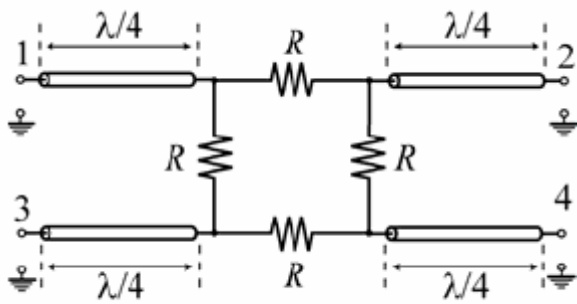


Slika 11(a).

Na slici 11(b) prikazan je koeficijent refleksije u Smitovom dijagramu i dužine ogranka i odsečka za prvi par rešenja nakon optimizacije dužina ogranka i odsečka.



Slika 11(b).

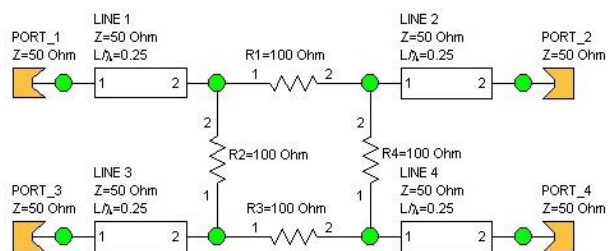


Slika 12.

**P12.** Izračunati  $s$ -parametre četvoroportne mreže prikazane na slici 12. Otpornosti svih otpornika su jednake i iznose  $R=100\ \Omega$ . Pristup (port) mreže čini čvor sa odgovarajućim indeksom i tačka nultog potencijala (masa). Svi vodovi su jednakih dužina,  $l=\lambda/4$ , gde je  $\lambda$  talasna dužina na vodu, a karakteristične impedanse svih vodova su  $Z_c = 50\ \Omega$ . Nominalne impedanse svih pristupa mreže su  $Z_0 = 50\ \Omega$ .

Rešenje:

$$[S] = -\frac{1}{6} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

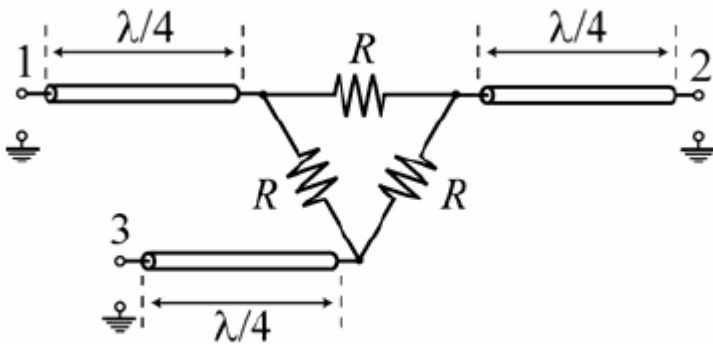


Y,Z,S: p012

frequency [GHz]	i	j	Y-mag [mS]	Y-phase [°]	Z-mag [ohm]	Z-phase [°]	S-mag	S-phase [°]
1	1	1	2.887E7	-90	50	-4.962E-6	0.1667	180
1	1	2	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	1	3	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	1	4	2.887E7	-90	4.33E-6	-90	0.1667	180
1	2	1	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	2	2	2.887E7	-90	50	-4.962E-6	0.1667	180
1	2	3	2.887E7	-90	4.33E-6	-90	0.1667	180
1	2	4	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	3	1	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	3	2	2.887E7	-90	4.33E-6	-90	0.1667	180
1	3	3	2.887E7	-90	50	-4.962E-6	0.1667	180
1	3	4	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	4	1	2.887E7	-90	4.33E-6	-90	0.1667	180
1	4	2	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	4	3	2.887E7	-90	25	180	0.3333	180
1	4	4	2.887E7	-90	50	-4.962E-6	0.1667	180

number of significant digits: 4   
 Mag / Phase   
 Print   
 Print Setup ...   
 Close

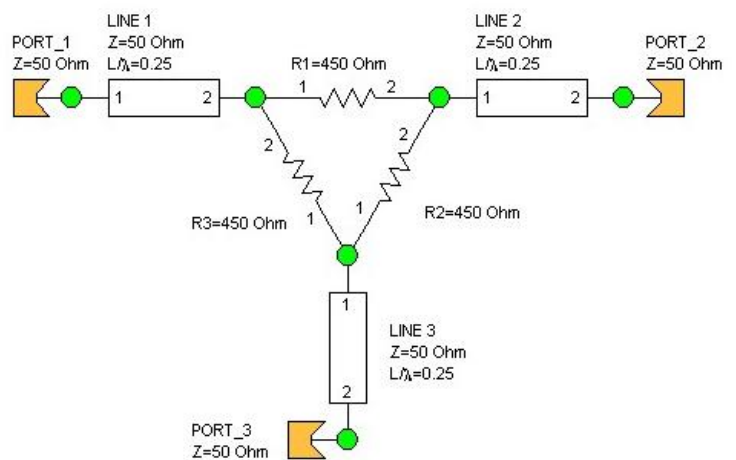
**P13.** (Jun 2008) Izračunati  $s$ -parametre troportne mreže prikazane na slici 13. Otpornosti svih otpornika su jednake i iznose  $R = 450 \Omega$ . Pristup (port) mreže čini čvor sa odgovarajućim indeksom i tačka nultog potencijala (masa). Svi vodovi su jednakih dužina,  $l = \lambda/4$ , gde je  $\lambda$  talasna dužina na vodu na radnoj učestanosti, a karakteristične impedanse svih vodova su  $Z_c = 50 \Omega$ . Nominalne impedanse svih pristupa mreže su  $Z_0 = 50 \Omega$ .



Slika 13.

Rešenje:

$$\underline{s} = -\frac{1}{6} \begin{bmatrix} 4 & 1 & 1 \\ 1 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 4 \end{bmatrix}$$



frequency [GHz]	i	j	Y-mag [mS]	Y-phase [°]	Z-mag [ohm]	Z-phase [°]	S-mag	S-phase [°]
1	1	1	3.849E7	-90	11.11	4.135E-5	0.6667	180
1	1	2	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	1	3	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	2	1	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	2	2	3.849E7	-90	11.11	4.135E-5	0.6667	180
1	2	3	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	3	1	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	3	2	3.849E7	-90	5.556	180	0.1667	180
1	3	3	3.849E7	-90	11.11	4.135E-5	0.6667	180

**P14.** Potrebno je projektovati mrežu za prilagođenje potrošača impedanse  $Z_p = 250\Omega$  na vod karakteristične impedanse  $50\Omega$  pomoću četvrttalasnog transformatora impedanse na centralnoj učestanosti  $10\text{GHz}$ .

- koristeći idealne vodove,
- mikrotrakastu tehnologiju (**za domaći**).

Parametri supstrata su:  $\epsilon_r = 3,38$  (relativna permitivnost dielektrika),  $\text{tg}\delta = 0,0027$  (tangens ugla gubitaka),  
 $h = 0,508\text{mm}$  (visina supstrata),  $t = 0,017\text{mm}$  (debljina metalizacije), provodnost metala  $\sigma = 58,8 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$ .

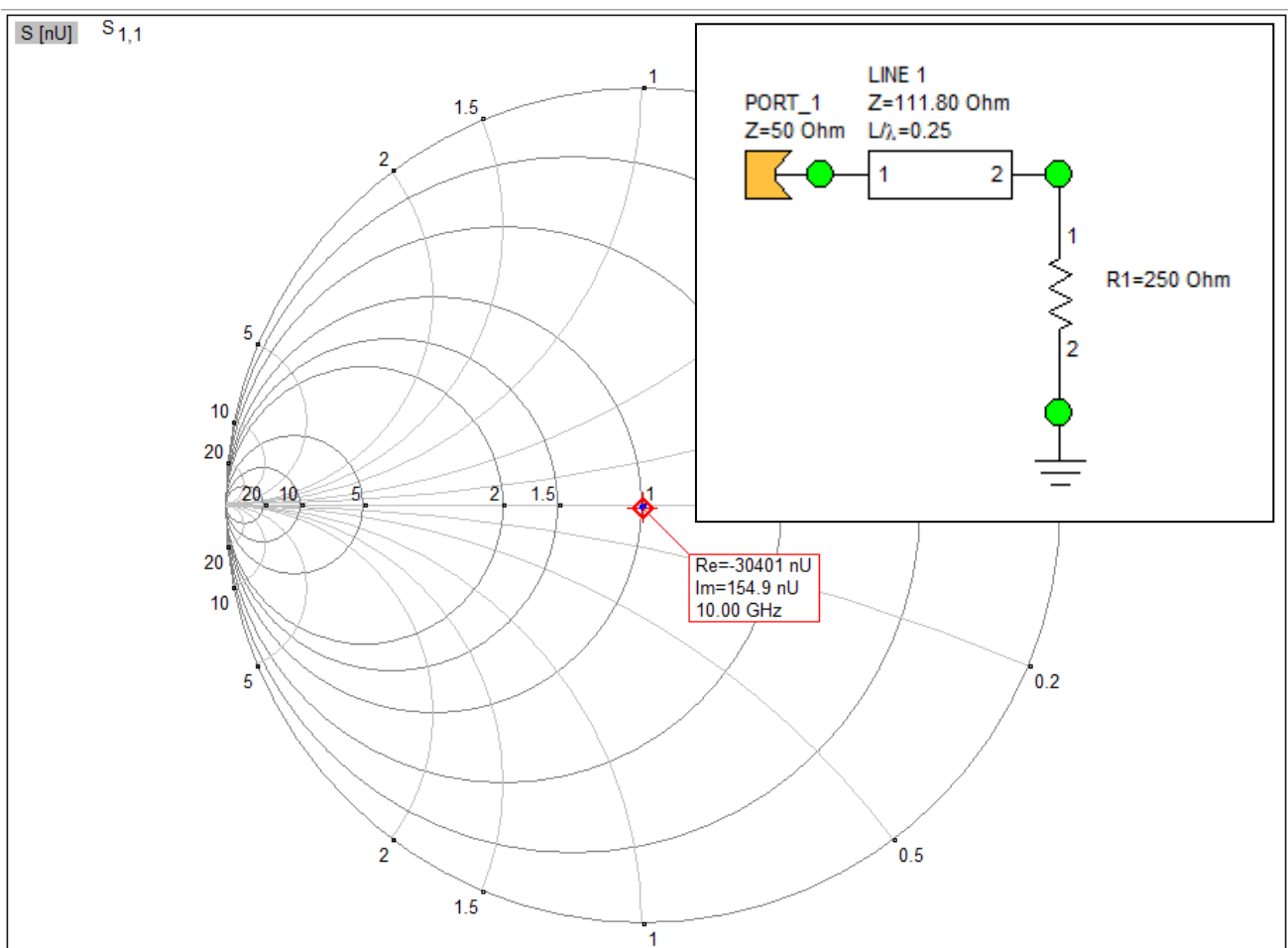
Prikazati parametar  $|s_{11}|$  (u dB) u opsegu učestanosti od  $8\text{GHz}$  do  $12\text{GHz}$ .

Komentarirati širokopoljnost u odnosu na primer **p06**.

Na osnovu formule za proračun karakteristične impedanse četvrttalasnog transformatora impedanse dobija

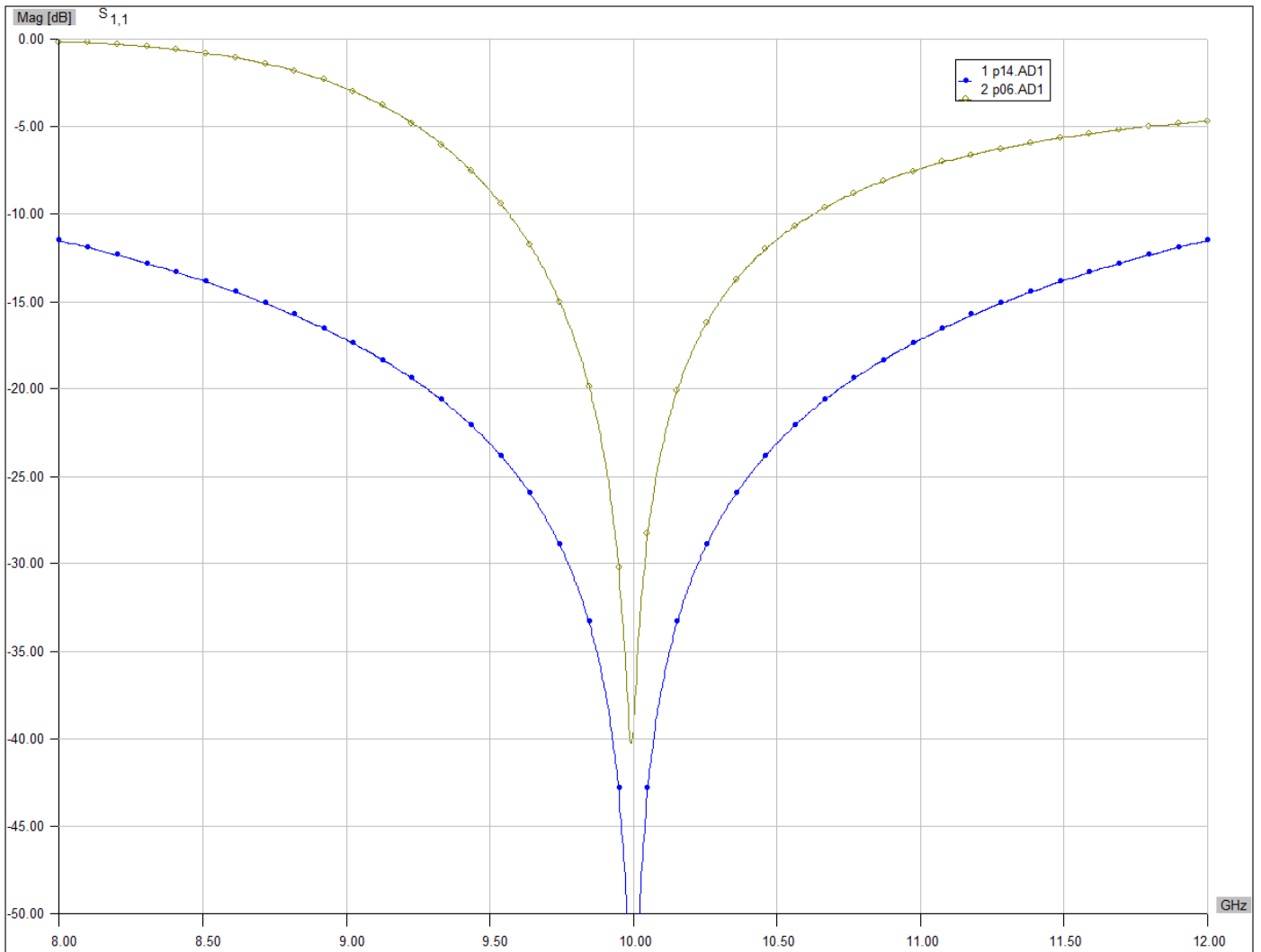
se  $Z_t = \sqrt{Z_c Z_p} = 111,80\Omega$ , gde je  $Z_c$  karakteristična impedansa voda na koji se vrši prilagođenje.

**Napomena:** Četvrttalasni transformator impedanse bez gubitaka može da se koristi kao mreža za prilagođenje samo u slučaju kada je impedansa potrošača čisto realna.



Slika 14(a).

Grafik uporednog prikaza parametra  $|s_{11}|$  (u dB) u opsegu učestanosti od 8GHz do 12GHz za p06 i p14 prikazan je na slici 14(b). U ovom konkretnom primeru prilagođenje ostvareno pomoću četvrttalasnog transformatora impedanse (p14) širokopojasnije je u poređenju sa prilagođenjem realizovanim pomoću jednog ogranka i jednog odsečka (p06).



Slika 14(b).



**P15.** Čebiševljev transformator (*Chebyshev transformer*).

Osnovne osobine transformatora su:

- električna dužina odsečaka je  $\lambda_g/4$  ( $\theta = \pi/2$ ) na referentnoj učestanosti  $f_0$  (gde je  $\lambda_g$  talasna dužina na vodu),
- koeficijent refleksije osciluje između 0 i  $\rho_m$  u propusnom opsegu (*equal-ripple*),
- koeficijent refleksije osciluje po zakonitosti Čebiševljevog polinoma,
- broj nula u koeficijentu refleksije odgovara broju sekcija transformatora,
- koeficijenti Čebiševljevog polinoma su takvi da Čebiševljev polinom  $T_n(x)$  osciluju između  $\pm 1$  kada je  $|x| < 1$ .

$$T_1(x) = x$$

$$T_2(x) = 2x^2 - 1$$

$$T_3(x) = 4x^3 - 3x$$

$$T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$$

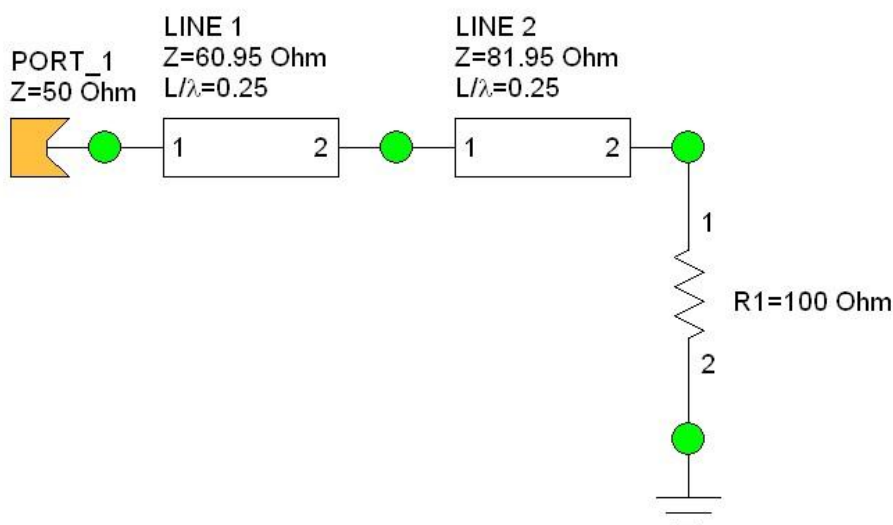
$$T_n(x) = 2xT_{n-1} - T_{n-2}$$

$$T_n(\cos\theta) = \cos(n\theta)$$

**Napomena:** Detalji izvođenja kompletne teorije Čebiševljevog transformatora impedanse i širokopojasnih prilagođenja nalaze se u knjizi *Mikrotalasna Pasivna Kola* [MPK, poglavlje 7, str: 28–34].

Primer [MPK 7, str: 33]: Projektovati Čebiševljev transformator sa dve sekcije, za prilagođenje normalizovane impedanse  $z_p = 2$  ( $Z_p = 100\Omega$ ) na centralnoj učestanosti 1GHz, sa maksimalnim koeficijentom refleksije  $\rho_m = 0,05$ . Prikazati parametar  $|s_{11}|$  u opsegu učestanosti od 0 do 2GHz.

Rešenje:  $Z_1 = 60,95\Omega$ ,  $Z_2 = 81,95\Omega$ .



Slika 15.

