

## Obsah

<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>1. Směrové vazební členy</b>	<b>3</b>
1.1 Směrovosti směrových odbočnic	3
1.2 Typy směrových odbočnic	4
<b>2. Reálné směrové odbočnice</b>	<b>5</b>
2.1 Roviny symetrie směrových odbočnic	5
2.2 Technické parametry reálné směrové odbočnice	6
<b>3. Návrh směrových odbočnic</b>	<b>7</b>
3.1 Čtvercová směrová odbočnice	7
3.2 Hybridní čtvercová směrová odbočnice	10
3.3 Kruhová směrová odbočnice	11
3.4 Hybridní kruhová směrová odbočnice	13
3.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	15
3.6 Kombinovaný člen	17
3.7 Langeho odbočnice	20
<b>4. Konkrétní návrh směrových odbočnic</b>	<b>23</b>
4.1 Čtvercová směrová odbočnice	23
4.2 Hybridní čtvercová směrová odbočnice	27
4.3 Kruhová směrová odbočnice	28
4.4 Hybridní kruhová směrová odbočnice	29
4.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	30
4.6 Kombinovaný člen	33
4.7 Langeho odbočnice	35
<b>5. Naměřené charakteristiky navržených směrových odbočnic</b>	<b>37</b>
5.1 Čtvercová směrová odbočnice	37
5.2 Hybridní čtvercová směrová odbočnice	41
5.3 Kruhová směrová odbočnice	45
5.4 Hybridní kruhová směrová odbočnice	48
5.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	51
5.6 Langeho odbočnice	53
5.7 Kombinovaný člen	55
<b>6. Univerzální držák</b>	<b>57</b>
<b>7. Laboratorní úloha</b>	<b>61</b>
<b>8. Závěr</b>	<b>77</b>
<b>9. Použitá literatura a zdroje</b>	<b>78</b>
<b>10. Přílohy</b>	<b>79</b>
10.1 Skalární analyzátor ANRITSU 54147A – návod k obsluze	79
10.2 Ukázka návrhu směrových odbočnic	89

## Úvod

V mikrovlnných strukturách se často požaduje odbočit část mikrovlnného výkonu. Přitom však požadujeme, aby toho odbočení neuneslo žádné přídavné odrazy nebo velké utlumení dané části signálu. Takovými strukturami, které splňují tato kritéria jsou tzv. směrové odbočnice (směrové vazební členy). Se směrovými odbočnicemi se můžeme setkat v různých děličích a sdružovačích signálu a v dalších mikrovlnných obvodech. Pro odbočení velkých mikrovlnných výkonů se samozřejmě používají směrové odbočnice vytvořené z vlnovodů, ve kterých jsou vhodně umístěny vazební otvory pro vytvoření požadované vazby. Tu lze ovlivnit tvarem, polohou těchto otvorů a jejich velikostí. Pro malé mikrovlnné výkony se používají planární (mikropáskové) směrové odbočnice. Právě těmito strukturami se v této práci budeme zabývat.

U těchto struktur jsou vlastnosti (například širokopásmovost) dány tvarem odbočnice a pak zejména rozměry (délka a šířka) mikropásků, ze kterých jsou jednotlivé struktury sestaveny. Dále se budeme zabývat simulací a srovnáním teoretických výsledků s naměřenými. Naměřené výsledky byly získány měřením reálných vazebních členů vyrobených právě podle popsané metodiky návrhu. U jednotlivých typů odbočnic jsou dále možné konstrukční úpravy, které mohou vést ke zlepšení jejich základních parametrů. Těmto úpravám se však budeme věnovat pouze teoreticky, protože jejich praktická aplikace by si vyžádala delší zkoumání uvedených struktur a vlivu těchto úprav na jejich parametry. Důležitými prostředky, díky kterým je možné provádět srovnání teoretických a praktických výsledků, jsou simulační programy mikrovlnných struktur. Těchto programů je na trhu celá řada, my se však seznámíme podrobněji pouze s jedním – Ansoft Designerem, který umožňuje zahrnout celou řadu ovlivňujících faktorů.

Výsledkem této práce je laboratorní úloha určená studentům magisterského studia oboru Elektronika a sdělovací technika. Tato úloha obsahuje všechny popsané části, tedy teoretický návrh, simulaci a měření reálných směrových odbočnic. K tomuto účelu byl vytvořen univerzální držák, který může sloužit nejen pro uchycení směrových odbočnic, ale spousty pasivních planárních struktur příslušných rozměrů. Podrobněji se jednotlivým částem návrhu a simulace budeme zabývat v jednotlivých kapitolách.

# 1. Směrové vazební členy - směrové odbočnice (SO)

Věta o existenci ideální směrové odbočnice [1]:

Reciproční bezztrátový a totálně přizpůsobený čtyřbran je ideální směrovou odbočnicí.

Rozptylová matice [S] je symetrická a prvky hlavní diagonály jsou nulové. Pak je v každém řádku a sloupci ještě jeden nulový prvek, neexistuje tedy vazba mezi daným ramenem a některým jiným.

Zjednodušeně se na odbočnici můžeme podívat jako na čtyřbran, kde jedna (obvykle první) brána je vstupní (budící), dvě brány jsou výstupní (výstupní výkon na kmitočtu návrhu je přesně definován pomocí vazebního a vložného útlumu), do čtvrté brány ideálně neproniká žádný výkon (u reálné odbočnice je tato brána impedančně zakončena kvůli bezodrazovosti).

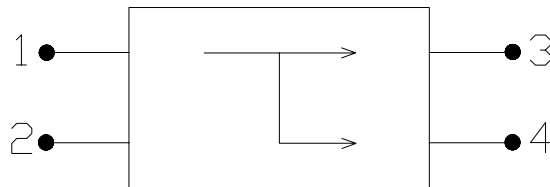
Dle [3] hybridním členem (hybridní SO, 3dB SO) nazýváme takovou směrovou odbočnicí, u které je vazební a vložný útlum roven  $C = IL = 3\text{dB}$ .

## 1.1 Rozlišujeme tři druhy směrovosti směrových odbočnic:

### a) Směrovost 1.druhu

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{12} = S_{34} = 0$$



Rozptylová matice má tvar:

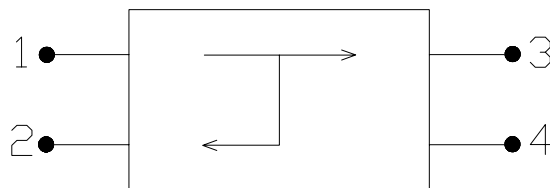
$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{24} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

### b) Směrovost 2.druhu

- protisměrový vazební člen

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{14} = S_{23} = 0$$



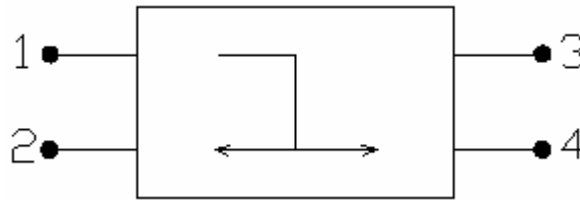
Rozptylová matice má tvar:

$$S = \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{vmatrix}$$

### c) Směrovost 3.druhu

$$S_{11} = S_{22} = S_{33} = S_{44} = 0$$

$$S_{13} = S_{24} = 0$$



Rozptylová matice má tvar:

$$S = \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & 0 & S_{34} & 0 \end{vmatrix}$$

### 1.2 Typy směrových odbočnic

Směrové odbočnice mají různé tvary a provedení. Můžeme tedy odbočnice rozdělit na:

- čtvercové (příčkové T)
- prstencové (kruhové)
- směrové odbočnice z vázaných vedení
- interdigitální (Langeho odbočnice)
- širokopásmové
- kombinovaný vazební člen (kombinace mikropásmového a šěrbinového vedení)

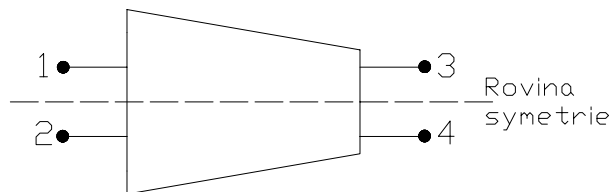
O hybridní směrové odbočnici mluvíme tehdy, je-li vazební a vložený útlum  $C = IL = 3\text{dB}$ . Jednotlivé odbočnice mají různé vlastnosti jako šířka pásma a útlumy popsané dále. Některé vlastnosti lze ovlivnit konstrukčně, například změnou tvaru stejné odbočnice, nebo přidáním dalších prvků pro zlepšení jejich parametrů. Těmito prvky mohou být přizpůsobovací pahýly, impedanční transformátory, fázové invertory atd. Některé konstrukční úpravy však nevedou ke zlepšení některého z parametrů, nýbrž pouze zmenšují plochu zabranou odbočnicí při zachování jejich vlastností. Jednotlivým konstrukčním typům SO a metodice jejich návrhu se budeme zabývat v dalších kapitolách.

Na vázaném vedení se nešíří vidy TE a TM, ale vid HEM, který se aproximuje vidy kvazi – TEM s jejichž pomocí se dá návrh realizovat a při zanedbání tloušťky mikropásků je řešení zpravidla velmi jednoduché. Vidy kvazi-TEM jsou lichý vid (odd) a sudý (even), které odpovídají protifázovému a soufázovému buzení obou pásků (viz obr.10).

## 2. Reálné směrové odbočnice

### 2.1 Roviny symetrie SO

#### a) Odbočnice s jednou rovinou symetrie

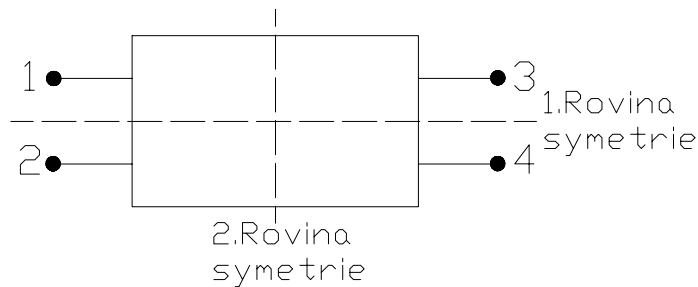


$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} \\ S_{33} &= S_{44} \\ S_{13} &= S_{24} \\ S_{14} &= S_{23} \end{aligned}$$

K úplnému popisu stačí 6 komplexních parametrů

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{33} & S_{34} \\ S_{14} & S_{13} & S_{34} & S_{33} \end{vmatrix}$$

#### b) Odbočnice se dvěma kolnými rovinami symetrie (dvojnásobně reflexně symetrická SO)



$$\begin{aligned} S_{11} &= S_{22} = S_{33} = S_{44} \\ S_{12} &= S_{34} \\ S_{13} &= S_{24} \\ S_{14} &= S_{23} \end{aligned}$$

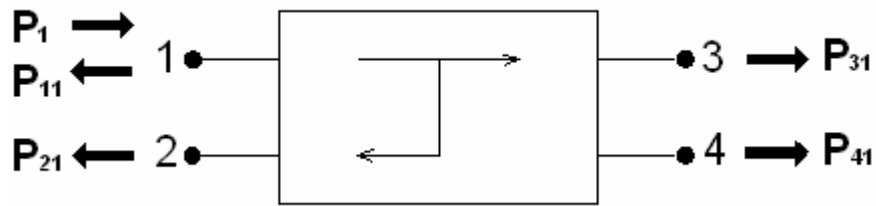
K úplnému popisu nám stačí 4 komplexní parametry

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{vmatrix}$$

Ideální dvojnásobně reflexně symetrická SO je tzv. kvadrurní člen. Výstupní signály jsou vzájemně posunuty o  $\pi/2$ .

## 2.2 Technické parametry reálné SO

Dvojnásobně reflexně symetrická SO se směrovostí 2.druhu



$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{vmatrix} \xrightarrow{\text{IDEÁLNÍ SO}} \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{12} \\ 0 & S_{13} & S_{12} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & jk & \sqrt{1-k^2} & 0 \\ jk & 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & 0 & jk \\ 0 & \sqrt{1-k^2} & jk & 0 \end{vmatrix}$$

kde  $k = |S_{12}| < 1$  ..... napěťový koeficient vazby

Základními parametry směrových odbočnic jsou:

### 1. Vložný útlum (insertion loss)

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_{31}} = 20 \log \frac{1}{|S_{31}|} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1-k^2}} \quad [dB] \quad (1)$$

### 2. Vazební útlum (coupling)

$$C = 10 \log \frac{P_1}{P_{21}} = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} = 20 \log \frac{1}{k} \quad [dB] \quad (2)$$

### 3. Izolace (isolation)

$$I = 10 \log \frac{P_1}{P_{41}} = 20 \log \frac{1}{|S_{41}|} \quad [dB] \quad (3)$$

### 4. Směrovost (directivity)

$$D = 10 \log \frac{P_{21}}{P_{41}} = 20 \log \frac{|S_{21}|}{|S_{41}|} \quad [dB] \quad (4)$$

Vztah mezi vazebním útlumem, izolací a směrovostí je:  $I = C + D$

### 5. Zpětný útlum (return loss)

$$RL = 10 \log \frac{P_1}{P_{11}} = 20 \log \frac{1}{|S_{11}|} \quad [dB] \quad (5)$$

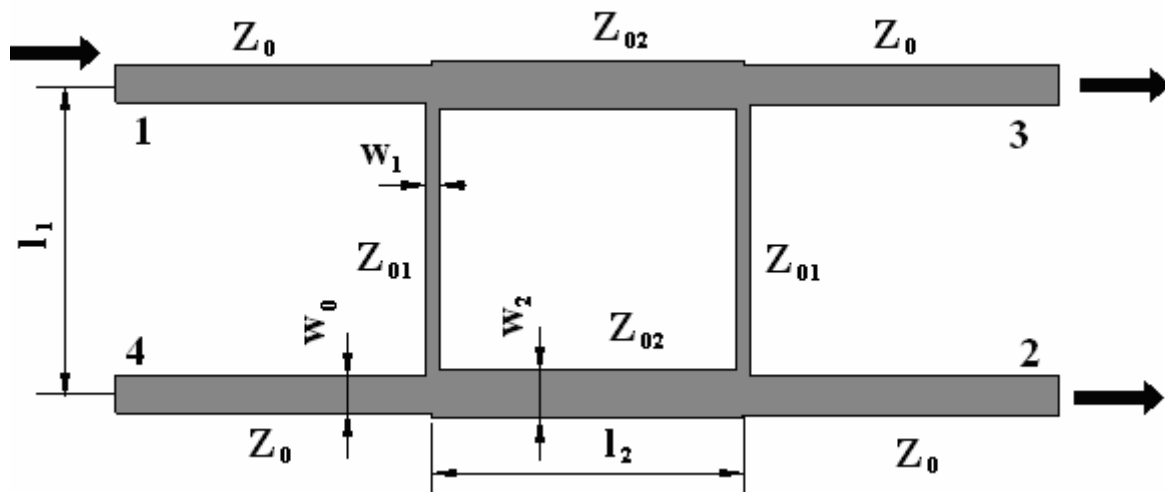
### 6. Vstupní PSV

$$PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad [-] \quad (6)$$

## 3. Návrh směrových odbočnic

Směrové odbočnice se navrhují na jednom (středním) kmotočtu. Pro tuto hodnotu  $f_0$  a požadovaný vazební útlum  $C$  se určí rozměry odbočnice. Důležité parametry pro konkrétní návrh jsou vlastnosti použité dielektrické podložky, zejména výška substrátu  $h$ , relativní permitivita dielektrika  $\epsilon_r$ , případně tloušťka pokovení  $t$  a charakteristická impedance připojeného vedení  $Z_0$  (obvykle  $50 \Omega$ ). Dále se zjišťuje, jaké jsou parametry odbočnice v okolí středního kmotočtu. To provádíme buď měření jednotlivých parametrů, nebo simulací v programu k tomu určenému. Tímto programem může být Puff, Sonet, Ansoft Designer případně jiný program pro simulaci mikrovlnných planárních struktur. My se okrajově dotkneme simulace v programu Puff, ale hlavním našim používaným programem bude Ansoft Designer, který se hodí nejen pro planární struktury, ale i pro různé aktivní obvody.

### 3.1 Čtvercová SO (Branch – line directional coupler)



Obr. 1 Základní tvar čtvercové SO

Matrice  $S$  je shodná s maticí pro odbočnici se dvěma rovinami symetrie, směrovost 1. druhu

Pro ideální směrovou odbočnici platí:

1) Podmínka impedančního přizpůsobení

$S_{11} = S_{12} = 0$ , pak

$$\left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 = 1 \quad (7)$$

2) Vazební útlum

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{14}|} \rightarrow C = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02}}{Z_0}\right)^2}} \quad (8)$$

3) Průchozí útlum

$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} \rightarrow IL = 20 \log \frac{Z_0}{Z_{02}} \quad (9)$$

**Návrh:**

- zadáno:  $f$  (kmitočet středu pásma),  $C$  (vazební útlum),  $Z_0$  (impedance vstupního vedení, zpravidla  $50\Omega$ ),  $\epsilon_r$  (relativní permitivita dielektrické podložky),  $h$  (výška substrátu)

1) Určíme vlnovou impedanci  $Z_{02}$  jejím vyjádřením z rovnice (8)

$$C = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02}}{Z_0}\right)^2}} \Rightarrow Z_{02} = Z_0 \sqrt{1 - \frac{1}{10^{\frac{C}{20}}}} \quad (10)$$

2) Z podmínky impedančního přizpůsobení (7) určíme vlnovou impedanci  $Z_{01}$

$$\left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 = 1 \Rightarrow Z_{01} = Z_0 Z_{02} \sqrt{\frac{1}{Z_0^2 - Z_{02}^2}} \quad (11)$$

3) Určíme šířku mikropásků  $w_1, w_2$

$$\text{a) } \frac{h}{w} = \frac{1}{4} \left( \frac{e^H}{2} - e^{-H} \right), \text{ kde } H = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \frac{Z_0}{60} + \frac{0,9}{\pi} \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}, \text{ pro } \frac{w}{h} \leq 1 \quad (12)$$

$$\Rightarrow w = \frac{h}{\frac{h}{w}}$$

$$b) \quad \frac{w}{h} = \frac{120\pi}{Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left( \frac{2}{\pi} - \frac{\varepsilon_r - 1}{3,7\varepsilon_r} \right) \cdot \ln \left( \frac{120\pi^2}{Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} - 1 + 1,84 \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \right), \text{ pro } \frac{w}{h} \geq 1$$

$$\Rightarrow w = h \frac{w}{h} \quad (13)$$

kde za  $Z_0$  dosadíme vlnovou impedanci  $Z_{01}$  nebo  $Z_{02}$ , abychom získali šířku pásku příslušného k dané vlnové impedanci  $w_1$  nebo  $w_2$ .

4) Určení efektivní šířky pásků  $w_{ef1}$ ,  $w_{ef2}$ . Zjednodušeně si tuto šířku můžeme představit jako jakousi společnou náhradní šířku úzkého mikropásku a pokovené spodní straně substrátu.

$$a) \quad w_{ef} = \frac{2\pi h}{\ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right)}, \text{ pro } \frac{w}{h} \leq 1 \quad (14)$$

$$b) \quad w_{ef} = w + \frac{2h}{\pi} \ln \left[ 17,08 \left( \frac{w}{2h} + 0,85 \right) \right], \text{ pro } \frac{w}{h} \geq 1 \quad (15)$$

kde za  $w$  dosadíme  $w_1$  případně  $w_2$

5) Určení efektivní permitivity  $\varepsilon_{efr}$ , respektive její odmocniny, z rovnice pro určení charakteristické impedance mikropáskového vedení

$$Z_0 = \frac{120\pi h}{w_{ef} \sqrt{\varepsilon_{efr}}} \Rightarrow \sqrt{\varepsilon_{efr}} = \frac{120\pi h}{Z_0 w_{ef}} \quad (16)$$

kde za  $Z_0$  dosadíme  $Z_{01}$  nebo  $Z_{02}$  a k nim příslušné  $w_{ef1}$ ,  $w_{ef2}$

6) Výpočet délek mikropásků  $l_1$ ,  $l_2$  z vlnových délek. Z tohoto vztahu je patrné, že pro různé vlnové impedance vyjdou různé délky vlny na příslušném mikropásku.

$$\lambda_g = \frac{c}{f \sqrt{\varepsilon_{efr}}} \Rightarrow l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4}$$

$$\Rightarrow l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4} \quad (17)$$

Pro příliš krátké úseky vedení se tyto nahrazují úseky délky:  $l = \frac{3\lambda_g}{4}$

7) Určení vloženého útlumu

$$IL = 20 \log \frac{Z_0}{Z_{02}} \quad (18)$$

### 3.2 Hybridní čtvercová SO

- zadáno:  $C = IL = 3 \text{ dB}$ ,  $f$ ,  $Z_0$ ,  $\epsilon_r$ ,  $h$  (výška substrátu)

1) Určíme  $Z_{02}$

$$Z_{02} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

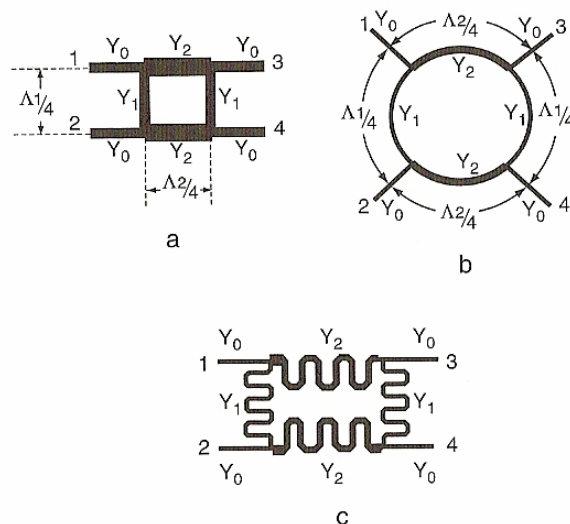
2) Určíme  $Z_{01}$

$$Z_{01} = Z_0 \quad (20)$$

3) Další postup je stejný jako v předchozím případě, tedy použijeme vztahy (12) ÷ (17)

Uvedený postup jsem pro zjednodušení návrhu vytvořil jako spustitelný m-file do programu matlab pod názvem ctvercova.m

Čtvercové směrové odbočnice mají poměrně malou šířku pásma, která je přibližně 5%  $f_0$  (středního kmitočtu neboli kmitočtu návrhu). Čtvercové odbočnice jsou obecně úzkopásmovější než odbočnice kruhové (prstencové), ale konstrukčními úpravami lze zvětšit šířku pásma. Možné konstrukční úpravy vedoucí ke zmenšení plochy vidíme na obr. 2.



Obr. 2 Konstrukční úpravy čtvercových SO pro zmenšení plochy  
 a) standardní, b) tvar prstence, c) meandrovitý tvar

Větší šířku pásma u tohoto typu odbočnic lze zvýšit jejich kaskádním řazením, obvyklý počet vertikálních příček takto vzniklé odbočnice je pak  $n = 3 \div 4$ . Při větším počtu nelze odbočnici realizovat, neboť  $Z_0 > 120 \Omega$ .

### 3.3 Kruhá SO (prstencové , ring directional coupler, rat-race coupler)

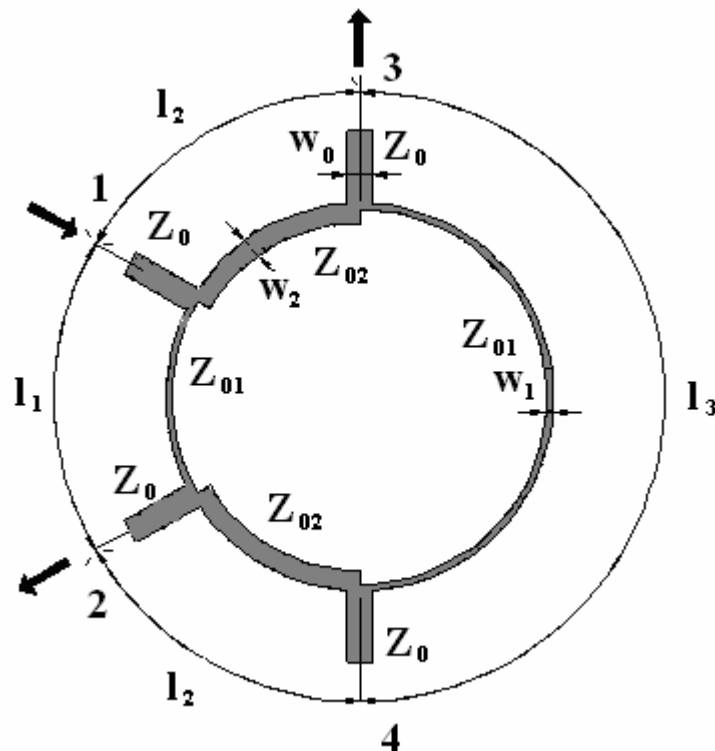
Základní konstrukční řešení vyplývá již názvu, je tvořeno kruhem složeného z kruhových oblouků širokých a dlouhých podle příslušné vlnové impedance daného úseku mikropáskového vedení. Typický tvar je na obr.3.

Jedná se o směrovou odbočnici s jednou rovinou symetrie. Odbočnice má směrovost 2.druhu. Celková délka prstence je  $3\lambda_g/2$ , neboť  $l_1, l_2$  jsou čtvrtvlnné úseky vedení  $Z_{v1}, Z_{v2}$ , tedy  $l_1 = \lambda_{g1}/4, l_2 = \lambda_{g2}/4$  a  $l_3 = 3\lambda_{g1}/4$ . Pro takto dlouhé úseky vedení je maximální a nejméně kmitočtově závislá vazba  $k$ . Pro velmi krátké úseky vedení  $\lambda_g/4$  se tyto úseky nahradí úseky  $3\lambda_g/4$  a úsek  $3\lambda_g/4$  nahradíme délkou  $5\lambda_g/4$ .

Šířka pásma těchto odbočnic je  $5 \div 10 \% f_0$

Rozptylová matice této odbočnice má tvar:

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & S_{33} & S_{34} \\ 0 & S_{13} & S_{34} & S_{33} \end{vmatrix}$$



Obr. 3 Kruhá odbočnice

Máme čtyři možnosti buzení a tomu odpovídající výstupy:

Při buzení do brány 1 (2) jsou výstupní signály 2 a 3 (1 a 4) ve fázi

Při buzení do brány 3 (4) jsou výstupní signály 1 a 4 (2 a 3) v protifázi

Pro ideální SO platí vždy vztahy vedoucí k jednoduchému návrhu.

**Ideální SO:**  $S_{11} = S_{33} = 0$

1) Impedanční přizpůsobení

$$\left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 = 1 \quad (21)$$

2) Vazební útlum

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{12}|} = 20 \log \frac{1}{|S_{34}|} \rightarrow C = 20 \log \frac{Z_{01}}{Z_0} \quad (22)$$

3) Průchozí útlum

$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} \rightarrow IL = 20 \log \frac{Z_{02}}{Z_0} \quad (23)$$

**Návrh:**

- zadáno:  $f$  (kmitočet středu pásma),  $C$  (vazební útlum),  $Z_0$  (impedance vstupního vedení, zpravidla  $50\Omega$ ),  $\varepsilon_r$  (relativní permitivita dielektrické podložky),  $h$  (výška substrátu)

1) Určíme vlnovou impedanci  $Z_{01}$  z rovnice (22). Z této rovnice plyne

$$Z_{01} = Z_0 \cdot 10^{\frac{C}{20}} \quad (24)$$

2) Z rovnice impedančního přizpůsobení (21) jednoznačně vyplývá vztah pro  $Z_{02}$

$$Z_{02} = Z_0 Z_{01} \sqrt{\frac{1}{Z_{01}^2 - Z_0^2}} \quad (25)$$

3) Určíme šířky pásků pomocí rovnic (12) ÷ (16)

4) Určíme délky jednotlivých úseků jako:

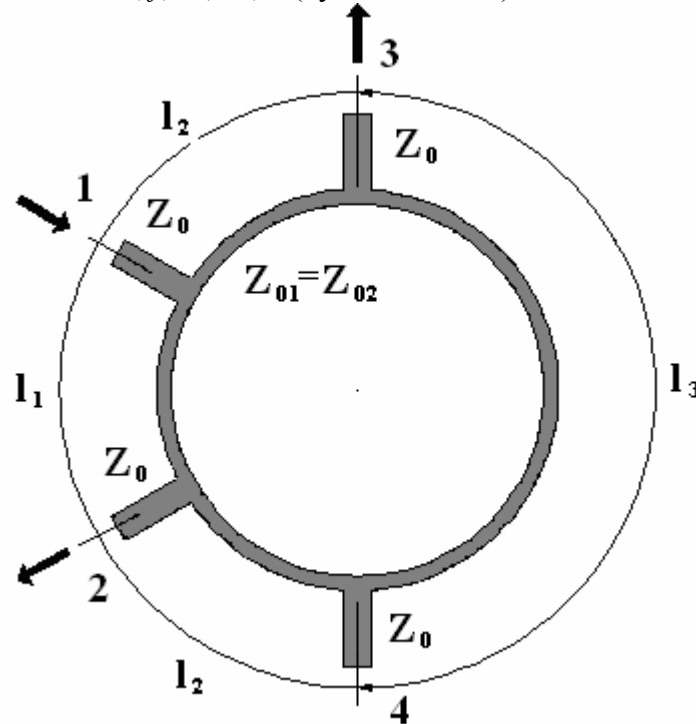
$$l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4} \quad l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4} \quad l_3 = \frac{3\lambda_{g1}}{4} \quad (26)$$

5) Určíme vazební útlum

$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} = \frac{Z_{02}}{Z_0} \quad (27)$$

### 3.4 Hybridní kruhová SO

- zadáno:  $C = IL = 3 \text{ dB}$ ,  $f$ ,  $Z_0$ ,  $\epsilon_r$ ,  $h$  (výška substrátu)



Obr. 4 Hybridní kruhová odbočnice

**Návrh:**

1) Určíme vlnové impedance  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ , které jsou stejné podle vztahu

$$Z_{01} = Z_{02} = Z_0 \sqrt{2} \quad (28)$$

Z rovnosti impedancí plynou stejně široké a dlouhé mikropásky, čímž se návrh zjednoduší

2) Použitím vztahů (12) ÷ (16) určíme šířku pásků

3) Určíme délku mikropásků

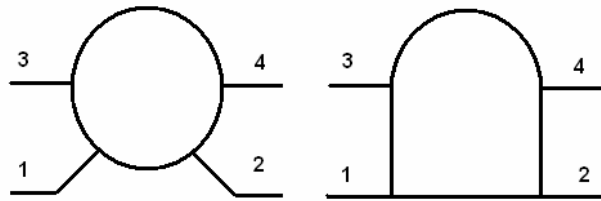
$$\lambda_{g1} = \lambda_{g2} = \lambda_g \Rightarrow l_1 = l_2 = \frac{\lambda_g}{4} \quad l_3 = \frac{3\lambda_g}{4} \quad (29)$$

Návrh lze opět zjednodušit pomocí programu kruhova.m, který obsahuje příslušné vzorce.

### Konstrukční úpravy

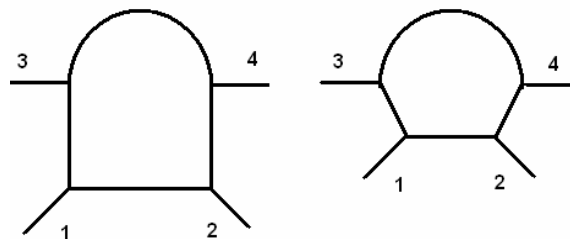
- Účelem je :

- a) orientovat výstupní ramena tak, aby byla vzájemně rovnoběžná či kolmá pro jednodušší připojování dalších obvodů, viz obr.5.



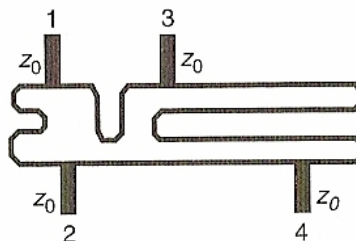
Obr. 5 Konstrukční úpravy bran

- b) zmenšit vliv nespojitostí v rozvětvení ramen hybridu na jeho kmitočtové vlastnosti (lze zvětšit šířku pásma až na 20%  $f_0$ ), obr.6



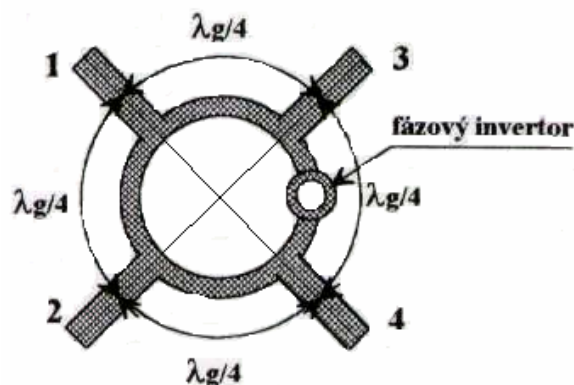
Obr. 6 Konstrukční úpravy nespojitostí

- c) zmenšit plochu prstence (např. meandrovitý tvar, lze tak zmenšit plochu 3 ÷ 4 krát). Tuto úpravu ukazuje obr.7 [3].



Obr. 7 Meandrovitý tvar SO pro zmenšení plochy

Pro větší šířku pásma nahradíme úsek dlouhý  $3\lambda_g/4$  úsekem  $\lambda_g/4$  a kmitočtově nezávislým fázovým invertorem  $180^\circ$ . Šířka pásma tak vzroste na 25 ÷ 30%  $f_0$ . Principiální tvar provedení je na obr.8 [2].

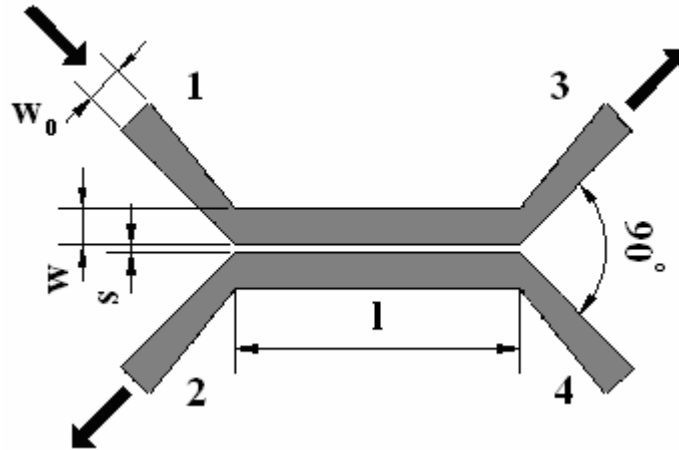


Obr. 8 Úprava SO s fázovým invertorem

Fázový invertor lze konstrukčně řešit pomocí vázaného vedení nebo kombinací mikropáskové – šterbinové vedení.

### 3.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení (Coupled – line directional coupler)

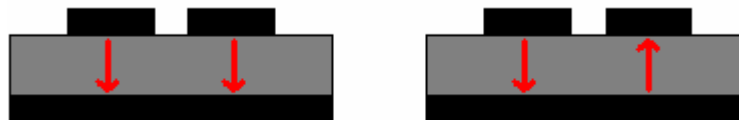
Vázané vedení jsou vlastně dva rovnoběžné, stejně široké mikropásky, mezi kterými je mezera, která určuje vzájemnou vazbu. Tato odbočnice má směrovost 2.druhu (jiný typ směrovosti nelze dosáhnout) a dvojnásobnou reflexní symetrii. Základní tvar je na obr.9.



Obr. 9 Konstrukční provedení SO z vázaných vedení

#### Návrh

Při syntéze vázaných vedení je nutno uvažovat impedance sudého (even) a lichého (odd) vidu, které vzniknou na vázaném vedení. Tyto impedance pak označujeme jako  $Z_{oe}$  a  $Z_{oo}$ , kde indexy jsou právě podle anglického názvu vidů. Na obr.10 vidíme buzení mikropásků a vybudění sudého a lichého vidu. Na obr.10a) sudé buzení do obou mikropásků – vybudí se pouze sudý vid, obr.10b) liché buzení do obou mikropásků – vybudí se pouze lichý vid.



Obr. 10 Buzení jednotlivých vidů a) sudého

b) lichého

Při návrhu je nutné vzít v úvahu impedanci jak sudého tak lichého vidu, které lze stanovit poměrně jednoduše. Ruční návrh vázaného vedení jako celku je však komplikovaný a vychází z představy, že pomocí vztahů (12) a (13) určíme poměr  $w/h$  pro impedanci sudého a lichého vidu samostatně – tzv. metoda ekvivalentního mikropáskového vedení. Po určení těchto poměrů řešíme následující soustavu rovnic.

$$\frac{w_1}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{2 \cosh \left( \pi \frac{w}{h} + \frac{\pi s}{2h} \right) - \cosh \left( \frac{\pi s}{2h} \right) + 1}{\cosh \left( \frac{\pi s}{2h} \right) + 1} \right)$$

(30)

$$\frac{w_2}{h} = \frac{2}{\pi} \cosh^{-1} \left( \frac{2 \cosh \left( \pi \frac{w}{h} + \frac{\pi s}{2h} \right) - \cosh \left( \frac{\pi s}{2h} \right) + 1}{\cosh \left( \frac{\pi s}{2h} \right) - 1} \right) + \frac{4}{\pi \left( 1 + \frac{\epsilon_r}{2} \right)} \cosh^{-1} \left( 1 - 2 \frac{\frac{w}{h}}{\frac{s}{h}} \right)$$

Z řešení této soustavy bychom dostali  $w/h$  a  $s/h$  samotného vázaného vedení. Řešení této soustavy je však poměrně složité, použijeme tedy pro výpočet  $w/h$  a  $s/h$  program, který to umožňuje. Tímto programem může být např. Puff, Ansoft Serenádě, Ansoft Designer nebo programy, které jsou volně k dispozici na internetu pro řešení vázaného vedení. Ruční návrh tedy bude spočívat pouze v určení impedancí sudého a lichého vidu.

Pro ideální SO platí:

$$S_{11} = S_{14} = S_{12} = S_{13} = 0$$

- 1) Vazební útlum. Tento útlum je nutno volit větší, než u čtvercové nebo kruhové SO, neboť by mohlo dojít k tomu, že nám vyjde šířka vazební mezery tak malá, že ji nebudeme moci technologicky realizovat. Hodnota  $C$  je třeba volit tedy s jistým citem nebo vyzkoušet. Rozměry se budou samozřejmě lišit pro různé frekvence návrhu a různé dielektrické podložky.

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{12}|} = 20 \log \frac{1}{k} = 20 \log \frac{Z_{oe} + Z_{oo}}{Z_{oe} - Z_{oo}} \quad (31)$$

- 2) Impedanční přizpůsobení

$$Z_0 = \sqrt{Z_{oe} Z_{oo}} \quad (32)$$

Z těchto rovnic lze pro zadané  $C$ ,  $Z_0$  určit  $Z_{oe}$  a  $Z_{oo}$  ze vztahů

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + 10^{-\frac{C}{20}}}{1 - 10^{-\frac{C}{20}}}} = \frac{Z_0^2}{Z_{oo}} \quad (33)$$

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1 - 10^{-\frac{C}{20}}}{1 + 10^{-\frac{C}{20}}}} = \frac{Z_0^2}{Z_{oe}} \quad (34)$$

Tyto impedance spolu s parametry substrátu a kmitočtu zadáme do příslušného programu a ten nám vypočítá  $w/h$  a  $s/h$ , případně i délku  $\lambda_g/4$  pro určení délky vázaného vedení, obvykle se tato délka zadává jako elektrická délka  $90^\circ$ . Zjištění těchto hodnot se budeme věnovat v kapitole určené konkrétnímu návrhu odbočnic.

Jako kontrola výpočtu platí vždy  $Z_{oe} > Z_{oo}$ . Pro ideální odbočnici z vázaných vedení dále platí, že fázové rychlosti sudého a lichého vidu jsou shodné  $v_{fe} = v_{fo}$ , to však u vedení s vlnou kvazi – TEM nelze přesně splnit, neboť platí vždy  $v_{fe} < v_{fo}$ , což vede ke zúžení pracovního pásma a poklesu směrovosti.

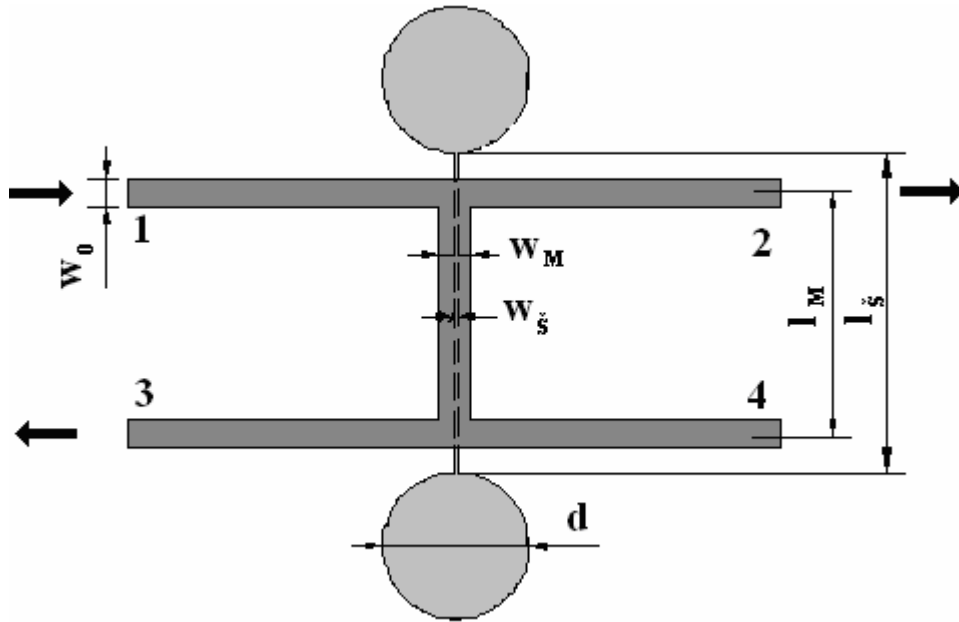
### Konstrukční úpravy pro zlepšení parametrů SO

- 1) Vazba mezi vedením vzniká jen na úseku délky  $l$ , proto se přívodní vedení nesmí navzájem ovlivňovat. Odklání se proto o úhel  $\alpha = 45^\circ$  proti horizontální ose symetrie. Příslušné brány na každé straně odbočnice jsou tedy vzájemně odkloněny o  $90^\circ$ .
- 2) Je nutno zmenšit impedanční skok na vstupu a výstupu vedení pomocí impedančních transformátorů, jehož délka se obvykle volí  $\approx 4w_0$
- 3) Metody vyrovnávání fázových rychlostí  $v_{fe}$ ,  $v_{fo}$ . Fázové rychlosti sudého a lichého vidu lze vyrovnat různými způsoby:
  - Přídavná dielektrická vrstva nad vázané vedení vede k tomu, že se vedení stává téměř dokonale příčně homogenní, šíří se tedy vlna TEM
  - Doplnění vodivé desky nad vázané vedení, obvykle s nulovým potenciálem, kde nesymetrické mikropásky přejdou na symetrické s vlnou TEM
  - Substrát s jedinou permitivitou nahradíme vrstveným dielektrikem, tím vzroste  $v_{fe}$  a obě rychlosti se téměř vyrovnají
  - Přídavnou kapacitou mezi pásy např. interdigitálním kapacitorem. Tím se zmenší rychlost  $v_{fo}$ .
  - Přímou vazební štěrbinu nahradíme pilovitou štěrbinou, tím se prodlouží dráha lichého vidu
  - Použití širokopásmových SO, které vypadají jako kaskádní spojování skokově se rozšiřujících vázaných vedení, což vede současně ke zvětšení šířky pásma. Tyto odbočnice mohou být symetrické či asymetrické podle svislé osy symetrie

### 3.6 Kombinovaný člen ( De Rondeho člen)

Jedná se o kombinaci mikropáskového a štěrbinového vedení (Slot line). Někdy se tato odbočnice nazývá štěrbinová SO. Konstrukce je naznačena na obr.11. Z horní strany dielektrické podložky je mikropásek ve tvaru H, který nemá žádnou vazební mezeru a na spodní straně substrátu, která dosud sloužila pouze jako celistvá stínící zemní plocha, je vytvořena úzká štěrbina zakončená naprázdno, což je realizováno na obou koncích štěrbinový kruhem, který se vytvoří odleptáním měděné folie.

Jedná se o dvojnásobně reflexně symetrickou SO se směrovostí 2.druhu.



Obr. 11 Konstrukce kombinovaného členu

Princip činnosti:

Při buzení do brány 1 vlna prochází do brány 3. Do sousedního vedení 2 – 4 se vlna dostává dvěma cestami:

- přes příčný mikropásek – vlny v ramenech 2 a 4 mají stejnou fázi jako vlna v bráně 1
- přes příčnou štěrbinu – v ramenu 2 má vlna stejnou fázi, v ramenu 4 opačnou fázi (dvojnásobný přechod mikropásek – štěrbinu – mikropásek = fázový invertor)

V ramenu 2 se vlny setkávají soufázově a sečítají se tedy. V ramenu 4 protifázově a ruší se. Rameno 4 je tedy od ramene 1 izolováno.

**Pro ideální kombinovaný člen platí:**

1) Podmínka impedančního přizpůsobení:

$$S_{11} = S_{14} = 0$$

$$\frac{2Z_0^2}{Z_{01}Z_{02}} + \frac{Z_0^2}{Z_{01}} = 1 \quad (35)$$

2) Vazební útlum

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{12}|} \rightarrow C = 20 \log \left( \frac{Z_0}{Z_{01}} + \frac{Z_0}{Z_{02}} \right) \quad (36)$$

3) Průchozí útlum

$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} = 20 \log \left[ \frac{Z_{02}}{Z_0} \left( \frac{Z_0}{Z_{01}} + \frac{Z_0}{Z_{02}} \right) \right] = 20 \log \frac{Z_{02}}{Z_0} + C \quad (37)$$

## Návrh

1) Určíme koeficient vazby z definice vazebního útlumu (2), pak tedy

$$k = 10^{-\frac{c}{20}} \quad (38)$$

2) Z rovnice impedančního přizpůsobení (35) a rovnice vazebního útlumu (36) určíme  $Z_{01}$ ,  
 $Z_{02}$

$$Z_{01} = Z_0 \frac{k}{1 - \sqrt{1 - k^2}} \quad (39)$$

$$Z_{02} = Z_0 \frac{k}{\sqrt{1 - k^2}} \quad (40)$$

3) Určíme impedanci mikropásku  $Z_{0M}$  a impedanci štěrby  $Z_{0\delta}$  jako:

$$Z_{0M} = \frac{Z_{01}}{2} \quad Z_{0\delta} = Z_{02} \quad (41)$$

4) Určíme rozměry mikropásku  $l$ ,  $w_M$  - podle vztahů (12) ÷ (17),  $l = \lambda_{gM}/4$

5) Určíme šířku štěrby  $w_\delta$ . K tomu je zapotřebí několik kroků podobných návrhu mikropásku. Jedná se o řešení iteračním postupem

a) Pro  $Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r} \leq 500 \Omega$

$$k' = \left( \frac{e^{\frac{120\pi^2 \sqrt{2}}{Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r}}} - 2}{e^{\frac{120\pi^2 \sqrt{2}}{Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r}}} + 2} \right)^2 \quad \rightarrow k = \sqrt{1 - k'^2} \quad (42)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \ln \frac{1+k}{1-k}$$

Pro  $Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r} \geq 500 \Omega$

$$k = \left( \frac{e^{\frac{Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r}}{120\sqrt{2}}} - 2}{e^{\frac{Z_0 \sqrt{1 + \epsilon_r}}{120\sqrt{2}}} + 2} \right)^2 \quad (43)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} \ln \frac{1+k}{1-k}$$

Dosadíme za  $Z_0 = Z_0 \xi$ . Vyjde nám  $w/h = w \xi / h$ , které dosadíme do vztahů (44) příp. (46) a vypočteme  $Z_0^{(1)}$ . Výpočet vztahů (42) příp. (43) pak opakujeme pro hodnotu  $Z_0^{(2)} = 2 Z_0 - Z_0^{(1)}$ . Pokračujeme tak dlouho, dokud  $Z_0^{(i)} = Z_0$  s požadovanou přesností a z posledního vypočteného poměru  $w/h = w \xi / h$  určíme  $w \xi$ .

b) Pro  $0,2 \leq \frac{w}{h} \leq 1$

$$Z_0 = 113,19 - 53,55 \log \varepsilon_r + 1,25 \frac{w}{h} (114,59 - 51,88 \log \varepsilon_r) + 20 \left( \frac{w}{h} - 0,2 \right) \left( 1 - \frac{w}{h} \right) - \left[ 0,15 + 0,23 \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} (2,07 \log \varepsilon_r - 0,79) \right] \cdot \left[ 10,25 - 5 \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} (2,1 - 1,42 \log \varepsilon_r) - 100 \frac{h}{\lambda} \right]^2 \quad (44)$$

$$\frac{\lambda_g}{\lambda} = 0,987 - 0,483 \log \varepsilon_r + \frac{w}{h} (0,111 - 0,0022 \varepsilon_r) - \left( 0,121 + 0,094 \frac{w}{h} - 0,0032 \varepsilon_r \right) \log \left( 100 \frac{h}{\lambda} \right) \quad (45)$$

Pro  $0,02 \leq \frac{w}{h} \leq 0,2$

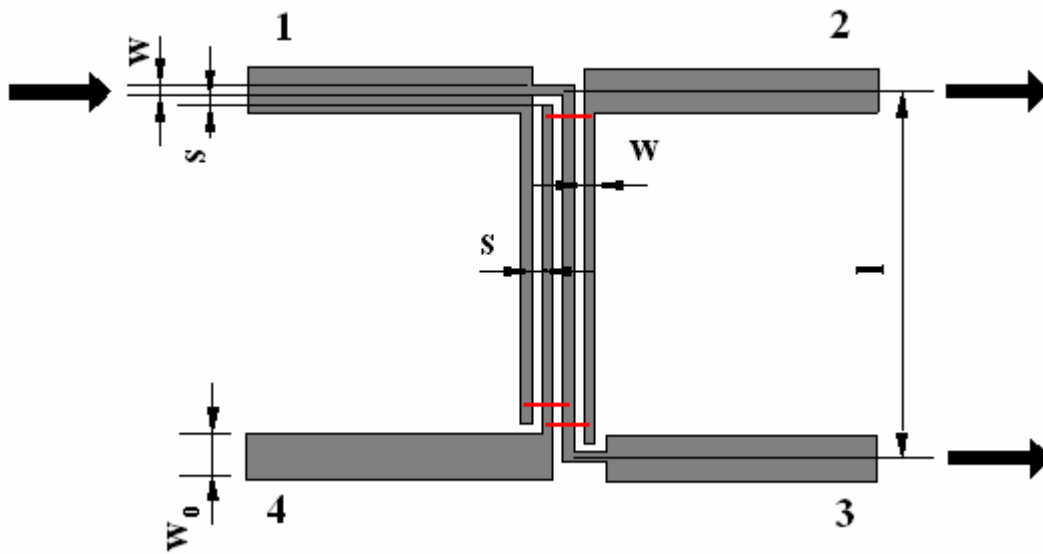
$$Z_0 = 72,62 - 35,19 \log \varepsilon_r + 50 \frac{h}{w} \left( \frac{w}{h} - 0,02 \right) \left( \frac{w}{h} - 0,2 \right) + \log \left( \frac{w}{h} \right) (44,28 - 19,58 \log \varepsilon_r) - \left[ 0,32 \log \varepsilon_r - 0,11 + \frac{w}{h} (1,07 \log \varepsilon_r + 1,44) \right] \cdot \left( 11,4 - 6,07 \log \varepsilon_r - 100 \frac{h}{\lambda} \right)^2 \quad (46)$$

$$\frac{\lambda_g}{\lambda} = 0,923 - 0,448 \log \varepsilon_r + 0,2 \frac{w}{h} - \left( 0,29 \frac{w}{h} + 0,017 \right) \log \left( 100 \frac{h}{\lambda} \right) \quad (47)$$

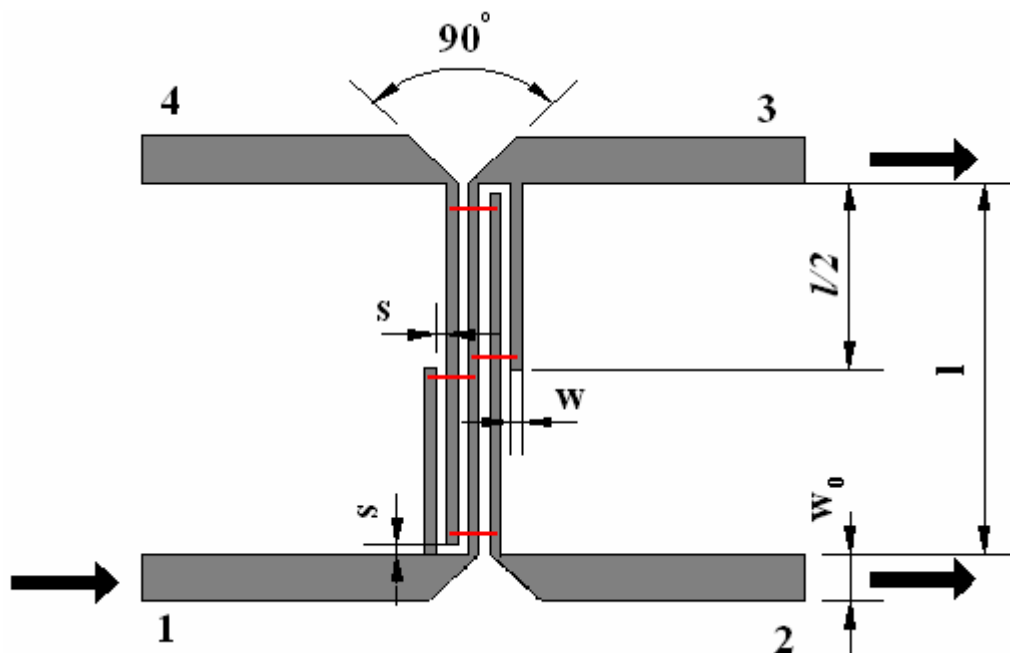
### 3.7 Langeho odbočnice (interdigitální SO)

Pokud bychom chtěli navrhovat SO z vázaného vedení pro malý vazební útlum ( $C < 3$  dB), dospěli bychom k tomu, že mezera mezi mikropásky je příliš malá. Také pro příliš malý vazební útlum můžeme dojít k tomu, že tato mezera nelze vůbec vypočítat. Proto byla navržena Langeho odbočnice, pojmenovaná po jejím strůjci. Tato odbočnice sestává z několika obvykle stejných paralelních mikropásků. Pásků bývá většinou sudý počet, obvykle si vystačíme se 4. Vazba je pak vždy mezi dvěma sousedními pásky. Typickou konstrukci můžeme vidět na obr.12. Tato odbočnice se může vyskytovat v několika různých konstrukčních úpravách, ale všechny jsou si vzájemně ekvivalentní. Taková konstrukční úprava může být například dle obr.13, kde se jeden krajní mikropásek rozdělí na polovinu. Pak na obou stranách paralelních pásků je jedna polovina.

Velkou výhodou těchto odbočnic je možnost dosáhnout malých vazebních útlumů, které bychom pomocí odbočnice z vázaného vedení nebyli schopni realizovat z výše uvedeného důvodu. Možnou nevýhodou může být nutnost propojit mikropásky vždy přes jeden, aby vždy sudé a liché mikropásky byly propojeny. Toto propojení je nejlepší realizovat pomocí zlatého drátku, ale někdy se spokojíme i s měděnou propojkou.



Obr. 12 Základní konstrukční provedení Langeho odbočnice



Obr. 13 Jedna z možných konstrukčních úprav Langeho odbočnice

Pro ideální SO platí:

1) Podmínka impedančního přizpůsobení

$$Z_0^2 = \frac{Z_{oe} Z_{oo} (Z_{oe} + Z_{oo})^2}{[Z_{oe} + (n-1)Z_{oo}][Z_{oo} + (n-1)Z_{oe}]} \quad (48)$$

kde  $n$  je počet prstů (vazebních vedení), na obr.12 i obr.13 je  $n = 4$

2) Koeficient vazby

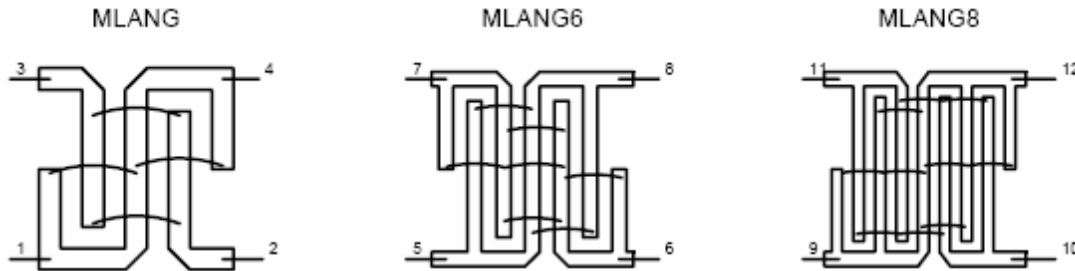
$$k = (n-1) \frac{Z_{oe}^2 - Z_{oo}^2}{2Z_{oe}Z_{oo} + (n-1)(Z_{oe}^2 + Z_{oo}^2)} \quad (49)$$

Samozřejmě zde opět platí vztah mezi koeficientem vazby a vazebním útlumem

$$C = 20 \log \frac{1}{k} = 20 \log \frac{1}{|S_{12}|} \quad (50)$$

Zvláštním případem je Langeho odbočnice s  $n = 2$ . V tom případě přejde v odbočnici z jednoduchého vázaného vedení.

Existuje spousta článků o Langeho odbočnicích, např. [6]. Z tohoto článku je vložen následující obrázek, který ukazuje odbočnici podle obr.13 s větším počtem prstů ( $n = 4$ ,  $n = 6$  a  $n = 8$ ) pro dosažení menšího vazebního útlumu se stejnou šířkou mezery mezi pásky jako u vázaného vedení.



### Návrh

1) Určíme koeficient vazby dle rovnice (38)

2) Určíme vlnové impedance sudého a lichého vidu

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \frac{(n-1)(1+q)}{(k+q) + (n-1)(1-k)} \quad (51)$$

$$Z_{oe} = Z_{oo} \frac{k+q}{(n-1)(1-k)} \quad (52)$$

$$q = \sqrt{k^2 + (n-1)^2 (1-k^2)} \quad (53)$$

$k$  je činitel vazby určený vztahem (38)

3) Další postup spočívá v řešení dvou samostatných (nevázaných) vedení o charakteristických impedancích

$$Z_{01} = \frac{Z_{oe}}{2} \quad \text{a} \quad Z_{02} = \frac{Z_{oo}}{2} \quad (54)$$

4) Pro tato samostatná vedení získáme  $w_1, w_2$  pomocí vztahů (12) a (13)

5) Řeší se transcendentní rovnice pro neznámou  $a$

$$\frac{w_2}{h} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccosh} h \left[ \frac{b(a+1)-2}{a-1} \right] + r \cdot \operatorname{arccosh} h \left[ \frac{\operatorname{arccosh} h \frac{b(a+1)+a-1}{2}}{\operatorname{arccosh} h a} \right] \quad (55)$$

kde 
$$b = \cosh \left( \frac{\pi w_1}{2 h} \right) \quad (56)$$

koefficient  $r$  stanovíme podle velikosti relativní permitivity jako

$$r = \begin{cases} \frac{1}{\pi} & \varepsilon_r > 6 \\ \frac{8}{\pi(\varepsilon_r + 2)} & \varepsilon_r < 6 \end{cases} \quad (57)$$

6) Z hodnot  $a$  a  $b$  se určí  $s$  a  $w$

$$\frac{s}{h} = \frac{2}{\pi} \operatorname{arccosh} h a \quad (58)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{1}{\pi} \left( \operatorname{arccosh} h \frac{b(a+1)+a-1}{2} - \operatorname{arccosh} h a \right) \quad (59)$$

#### **4. Konkrétní návrh směrových odbočnic a jejich charakteristiky**

V této kapitole se budeme zabývat konkrétnímu návrhu výše uvedených SO pro zadané (případně zvolené) parametry.

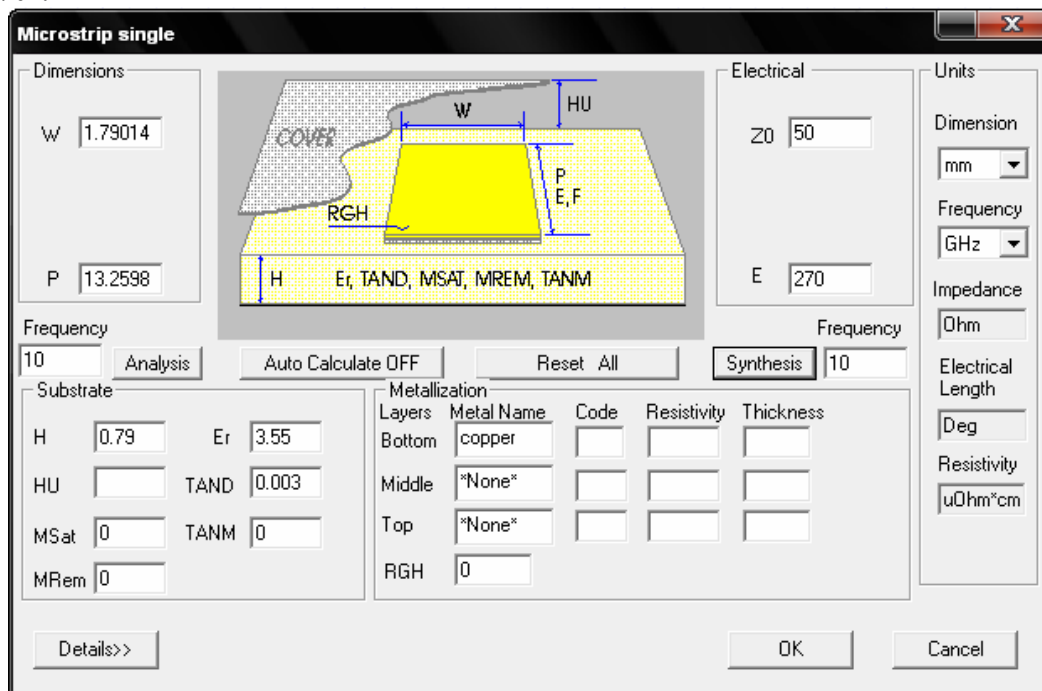
##### **4.1 Čtvercová SO**

Zadáno:  $f = 1,5$  GHz,  $Z_0 = 50 \Omega$ ,  $C = 6$  dB, dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\varepsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$  mm,  $t = 35 \mu\text{m}$ , ztrátový činitel  $\operatorname{tg} \delta = 0,003$ .

Pro návrh máme několik možností:

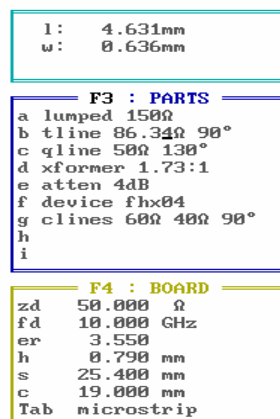
- použijeme vztahy (10) – (18) k určení všech parametrů
  - pro návrh použijeme připravený program *ctvercova.m*, který již vztahy obsahuje
  - pomocí vztahů (10), (11) určíme  $Z_{01}$  a  $Z_{02}$  a pro další návrh použijeme
    - program Puff, Serenade, Designer (viz dále)
    - program z internetových stránek (detailnější popis dále)
- <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/magnetic.htm>

Program Designer obsahuje přímo jakousi paletu pro počítání mikropáskového vedení jednak samostatného mikropásku, jednak vázaného vedení, ale i Langeho odbočnice. Toto uživatelské okno je na obr.14. Dostaneme se do něj pomocí menu Circuit/TRL/Microstrip/Single. Do tohoto okna zadáváme hodnotu  $Z_0 = Z_{01}$  příp.  $Z_0 = Z_{02}$ ,  $E$  značí elektrickou délku mikropásku, v našem případě  $90^\circ$  pro čtvrtvlnnou délku vedení respektive  $270^\circ$  pro třičtvrtvlnné úseky vedení, frekvenci návrhu, výšku substrátu, jeho permitivitu a ztrátový činitel, případně ještě další údaje pokud jsou od výrobce známe. Poté stiskem tlačítka **Synthesis** získáme šířku mikropásku ( $W$ ) a jeho třičtvrtvlnnou délku ( $P$ ) pro  $E = 270^\circ$ .



Obr. 14 Okno programu Designer pro návrh mikropáskového vedení

Pomocí programu Puff určíme rozměry mikropásků následujícím postupem. Po spuštění se pomocí klávesy F4 přepneme do okna s názvem BOARD, ve kterém editujeme parametry  $z_d$  ( $50\Omega$ ),  $f_d = 1,5\text{GHz}$ ,  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$ . Poté se přepneme pomocí F3 do okna PARTS a editujeme položku *tline*  $Z_0$   $90^\circ$  případně  $270^\circ$ , kde  $Z_0$  je námi vypočtená impedance  $Z_{01}$  příp.  $Z_{02}$  a stiskem klávesy „=“ se zobrazí hodnoty  $l$ ,  $w$ . Výřez obrazovky z programu je na obr.15 (výpočet je pro kmitočet 10 GHz).



Obr. 15 Ukázka výpočtu rozměrů mikropásku programem Puff

Pokud zvolíme návrh pomocí programu na stránkách uvedených výše, pak pro návrh čtvercové odbočnice musíme dále kliknout na následující odkazy na této stránce:

**Branch-line Coupler Design & Analysis / Theoretical Information** pro teoretický rozbor problému a označení impedancí jednotlivých mikropásků. **Branch-line Coupler Design & Analysis / Design and Analysis /Design** pro výpočet rozměrů. Otevře se nám okno, které je na obr.16, do kterého zadáme příslušné parametry. Platí  $Z_{01} = Z_B$  a  $Z_{02} = Z_A$ . Jedná se o jinak nazvané tytéž impedance jako na obr.1.

Obr. 16 Internetový program pro výpočet rozměrů mikropásků čtvercové SO

Stiskem tlačítka **Submit** získáme výsledky v podobě rozměrů  $w/h$ , ze kterého vynásobením hodnotou  $h = 0,79$  získáme šířky pásků přímo v mm. Tento program však nepočítá délky pásků.

Přehled vypočtených parametrů je v tab.1, kde pro výpočet byl využit program v matlabu, Puff, Serenade nebo Designer, jehož studentskou verzi lze stáhnout ze stránek Ansoft zcela zdarma. Z této tabulky také vyplývá, že se rozměry téměř neliší, je tedy principiálně jedno, kterou metodou návrh provádíme. Rozdíly zřejmě vznikají v přesnosti výpočtů a zaokrouhlování. Případná velká přesnost se stejně ztratí při výrobě, neboť s našimi technologickými postupy nelze dosáhnout přesnosti takové, s jakou počítáme. Pro konstrukci se v případě potřeby (příliš krátké úseky) nahrazují příslušné délky mikropáskových úseků takto:

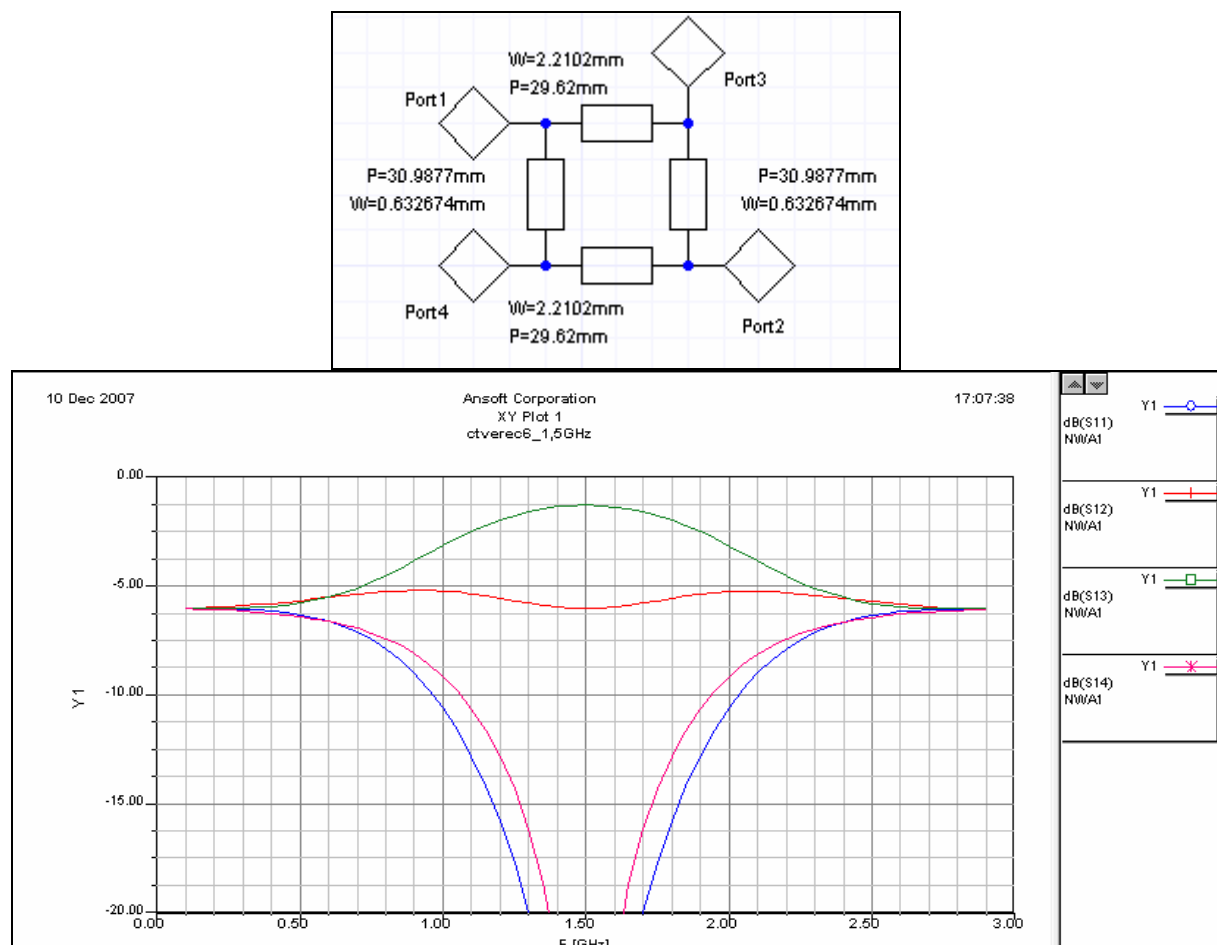
$$\frac{\lambda_g}{4} \rightarrow \frac{3\lambda_g}{4} \qquad \frac{3\lambda_g}{4} \rightarrow \frac{5\lambda_g}{4}$$

Toto nahrazení neovlivní funkci odbočnice na středním kmitočtu, neboť se v každém případě jedná o lichý násobek čtvrtvlnného úseku, avšak na odbočnici jako na celek tato nahrazení mají vliv na její širokopásmovost. Šířka pásma se po takovémto nahrazení zmenší, avšak pro vysoké kmitočty jsou pásy tak krátké, že protilehlé pásy vytváří parazitní vázané vedení, které zhoršuje nebo zcela zabraňuje správnému chování odbočnice. V tomto případě budeme uvažovat třičtvrtvlnné úseky vedení.

C = 6dB	Matlab	Designer	Puff
$Z_{01}$ [ $\Omega$ ]	86,3289		
$Z_{02}$ [ $\Omega$ ]	43,2669		
$w_1$ [mm]	0,6263	0,6327	0,636
$l_1$ [mm]	31,005	30,9877	29,893
$w_2$ [mm]	2,2843	2,2102	2,218
$l_2$ [mm]	29,543	29,62	29,74

Tab. 1 Rozměry mikropásků čtvercové odbočnice

K posouzení správnosti návrhu využijeme simulaci v programu Designer, ve kterém je díky nepříliš složité obsluze simulace poměrně rychlá a přehledná. Simulované výstupní parametry jsou na obr.17



Obr. 17 Schema a simulace čtvercové SO a její výstupní parametry

Pro simulaci a numerický návrh musí být hodnoty na středním kmitočtu totožné s určitou tolerancí. Pak je zřejmé, že jsme při návrhu postupovali správně. Z obr.17 lze odečíst hodnoty s určitou rezervou, ale je patrné, že na středním kmitočtu je teorie shodná se simulací. Můžeme některé parametry odečíst: vazební útlum  $S_{12} = -6\text{dB}$  a vložný útlum  $S_{13} = -1,1\text{dB}$ .

#### 4.2 Hybridní čtvercová SO

Zadáno:  $f = 1,5 \text{ GHz}$ ,  $Z_0 = 50 \ \Omega$ , dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79 \text{ mm}$ ,  $t = 35 \ \mu\text{m}$ ,  $\text{tg}\delta = 0.003$ ,  $C = IL = 3 \text{ dB}$

Pro návrh je téměř shodný postup s tím rozdílem, že impedance  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$  vypočteme ze vztahů (19), (20). Přehled vypočtených rozměrů je v tab.2.

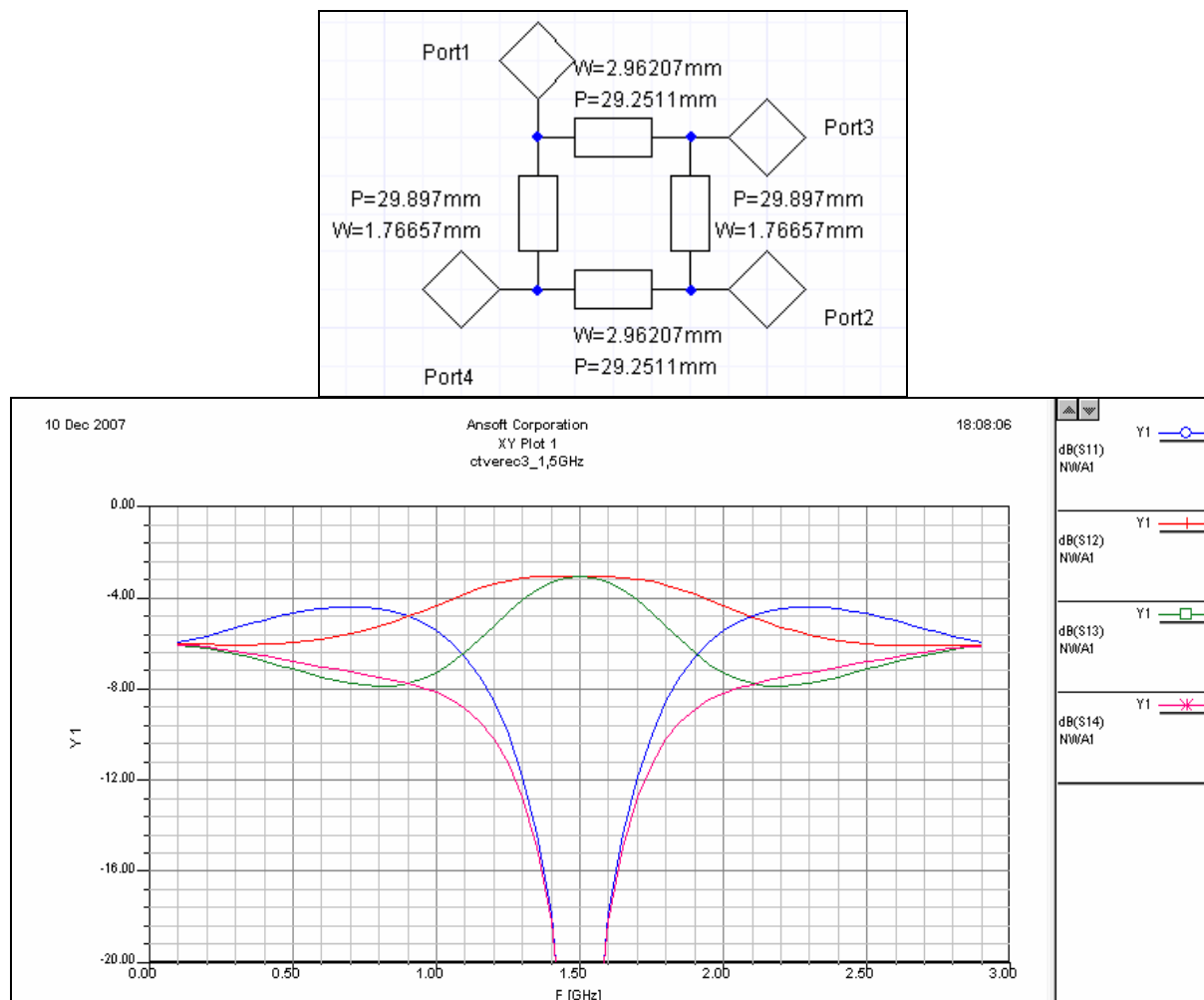
<b>C=IL=3dB</b>	<b>Matlab</b>	<b>Designer</b>	<b>Puff</b>
<b><math>Z_{01} \ [\Omega]</math></b>	50		
<b><math>Z_{02} \ [\Omega]</math></b>	35,3553		
<b><math>w_1 \ [\text{mm}]</math></b>	1,7714	1,76657	1,775
<b><math>l_1 \ [\text{mm}]</math></b>	29,943	29,897	29,97
<b><math>w_2 \ [\text{mm}]</math></b>	2,9605	2,9621	2,954
<b><math>l_2 \ [\text{mm}]</math></b>	30,003	29,2511	29,654

Tab. 2 Rozměry hybridní čtvercové SO

Navržená hybridní SO je opět simulována v programu Designer a tyto parametry vidíme na obr.18.

Z obr.18 vyplývá totožnost parametrů  $S_{12} = S_{13} = -3\text{dB}$ , tedy odpovídající parametry návrhu  $C = IL = 3 \text{ dB}$ .

Z obr.17 i obr.18 je vidět, že parametr  $S_{14}$  je dostatečně velký. Z této brány tedy bude vystupovat velmi malý výkon. U ideální odbočnice je hodnota výstupního výkonu nulová, odpovídající  $S$ -parametr tedy nekonečný. Tato brána se bezodrazově přizpůsobí impedancí  $50\Omega$ . Parametr  $S_{11}$  nám určuje činitel odrazu vstupní brány. Designer má přímo prvek čtvercové odbočnice, ale po zadání rozměrů simulace nevychází. Jedná se zřejmě o nějakou chybu programu a proto budeme odbočnice raději simulovat z jednotlivých mikropásků.



Obr. 18 Simulace čtvercové hybridní SO a její výstupní parametry

### 4.3 Kruhová SO

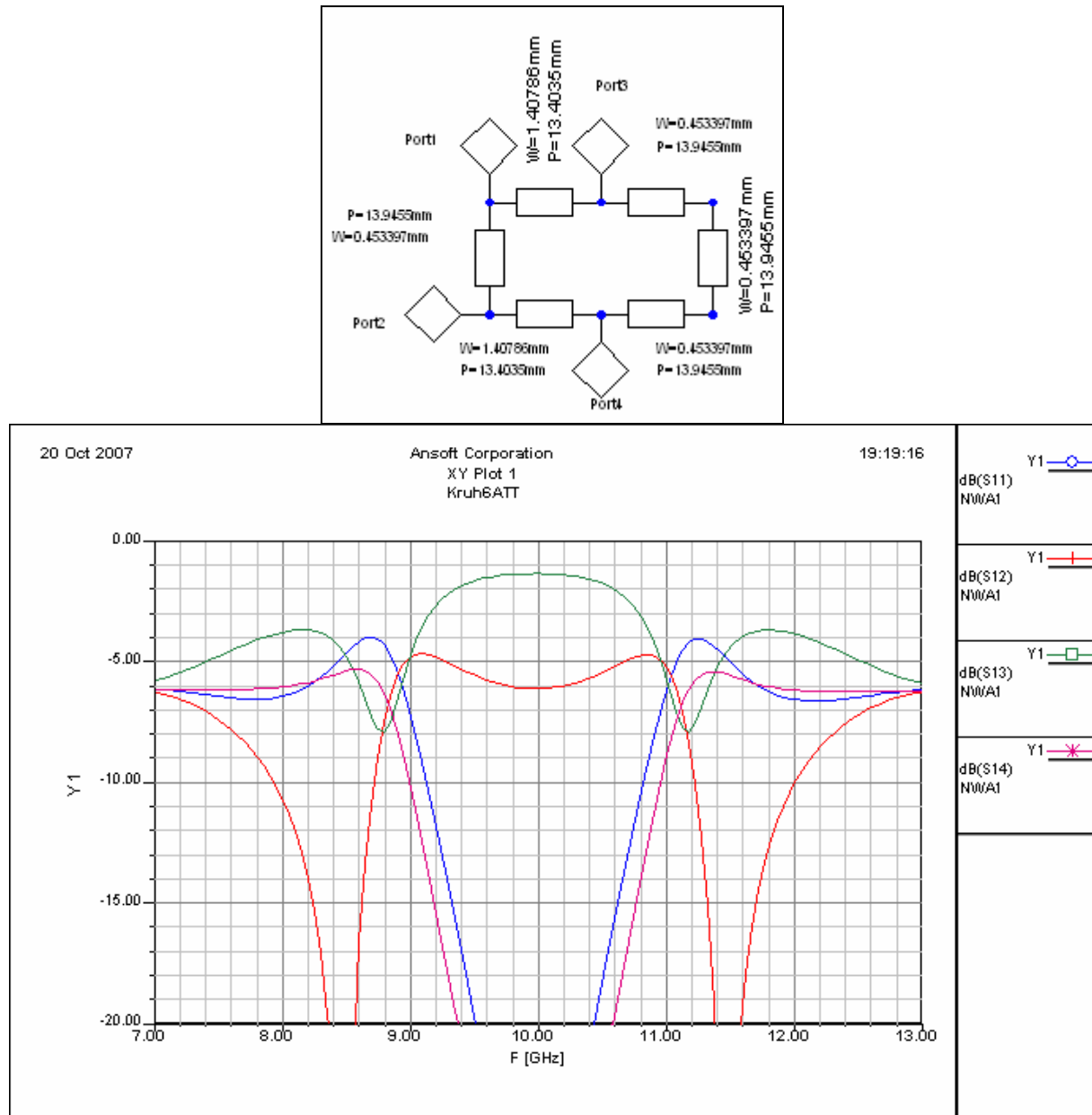
Zadáno:  $f = 10$  GHz,  $Z_0 = 50$   $\Omega$ , dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$  mm,  $t = 35$   $\mu$ m,  $C = 6$  dB

Při návrhu použijeme vztahy (24), (25), (12) – (16), (26), (27) pro ruční návrh. Můžeme také využít programu *kruhova.m*, který obsahuje všechny tyto vztahy. V případě, že pro návrh použijeme Puff nebo Designer, vypočteme pouze impedance  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$  a rozměry pásků vypočteme s pomocí těchto programů stejným postupem jako při návrhu čtvercových odbočnic. V tab.3 jsou vypočtené rozměry kruhové odbočnice a na obr.19 je její následná simulace v Designeru.

C = 6dB	Matlab	Designer	Puff
$Z_{01}$ [ $\Omega$ ]	99,7631		
$Z_{02}$ [ $\Omega$ ]	57,7808		
$w_1$ [mm]	0,4426	0,4534	0,449
$l_1$ [mm]	14,0709	13,9455	14,034
$w_2$ [mm]	1,3882	1,4078	1,392
$l_2$ [mm]	13,4916	13,4035	13,524

Tab. 3 Rozměry kruhové SO

Na obr.19 je pro simulaci použito modifikovaná konstrukční úprava kruhového tvaru odbočnice. Designer opět má prvek kruhové odbočnice, pro který vyjde simulace uspokojivě, avšak je příliš širokopásmový, než simulace odbočnice složené z jednotlivých mikropásků, který se více blíží skutečným parametrům. Z obr. 19 je vidět, že izolace je větší, než u čtvercových odbočnic.

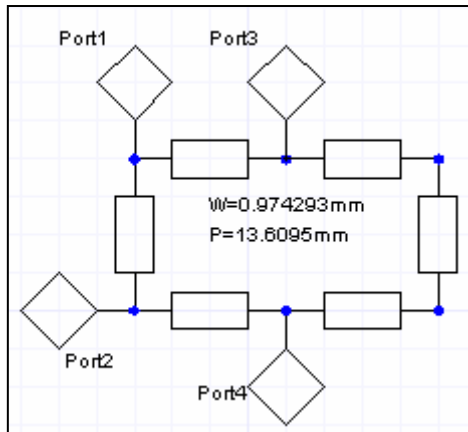


Obr. 19 Simulace kruhové SO a její výstupní parametry

#### 4.4 Hybridní kruhová SO

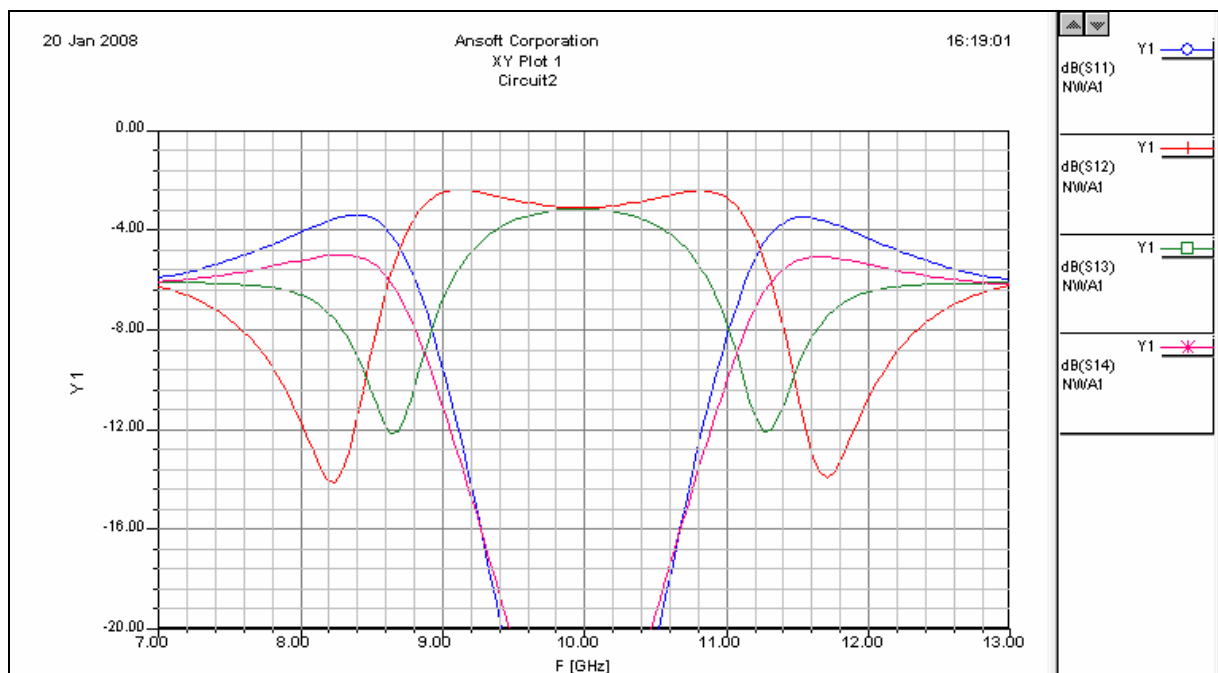
Zadáno:  $f = 10$  GHz,  $Z_0 = 50 \Omega$ , dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$  mm,  $t = 35$   $\mu$ m,  $C = IL = 3$  dB

Postup návrhu je zcela analogický předchozím návrhům s použitím vztahů (28), (12) - (16), (29). V tab.4 jsou vypočtené rozměry a na obr.20 simulovaná SO.



$C=IL=3\text{dB}$	Matlab	Designer	Puff
$Z_{01} [\Omega]$	70,7107		
$Z_{02} [\Omega]$	70,7107		
$w_1 [\text{mm}]$	0,9586	0,9743	0,963
$l_1 [\text{mm}]$	13,7397	13,6095	13,704
$w_2 [\text{mm}]$	0,9586	0,9743	0,963
$l_2 [\text{mm}]$	13,7397	13,6095	13,704

Tab. 4 Rozměry hybridní kruhové SO



Obr. 20 Simulace hybridní kruhové SO a její výstupní parametry

Pro hybridní prstencovou odbočnici jsou impedance  $Z_{01}$  a  $Z_{02}$  stejné. Rozměry pásků jsou tedy shodné

#### 4.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

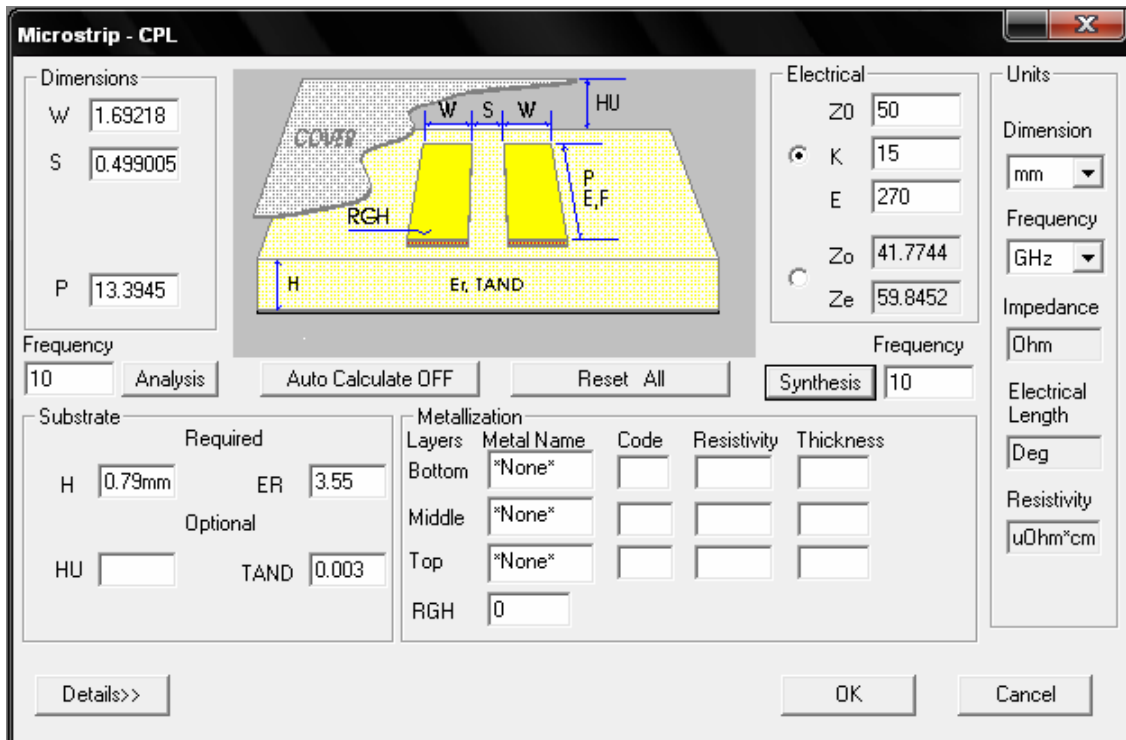
Jak bylo uvedeno v kapitole 3.5, je třeba volit větší vazební útlum, abychom mohli tuto odbočnici vyrobit. Pro naše technologické podmínky vyžadujeme, aby nejmenší rozměry mikropásků nebo mezery byly 0,25 mm. Z tohoto důvodu je pro tuto odbočnici zvolen vazební útlum 15dB.

Zadáno:  $f = 10 \text{ GHz}$ ,  $Z_0 = 50 \Omega$ , dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79 \text{ mm}$ ,  $t = 35 \mu\text{m}$ ,  $C = 15 \text{ dB}$ .

Při návrhu vypočteme pomocí vztahů (33), (34) impedance sudého a lichého vidu  $Z_{oe}$ ,  $Z_{oo}$  a pro výpočet šířky mikropásků, šířku vazební mezery a délku vedení použijeme:

- Puff, Serenádě, Designer
- program na stejné internetové adrese jaká je uvedena v kapitole 4.1

Při návrhu pomocí programu Designer postupujeme obdobně jako je v kapitole 4.1. Základní parametry se zadají shodně, rozdíl je pouze v tom, že pro výběr vázaného vedení zvolíme Circuit/TRL/Microstrip/CPL. Ukázka okna programu Designer s vypočtenými rozměry vázaného vedení je na obr.21. Zadáváme buď  $Z_{00}$  a  $Z_{0e}$  nebo přímo vazební útlum označovaný zde jako  $K$ .



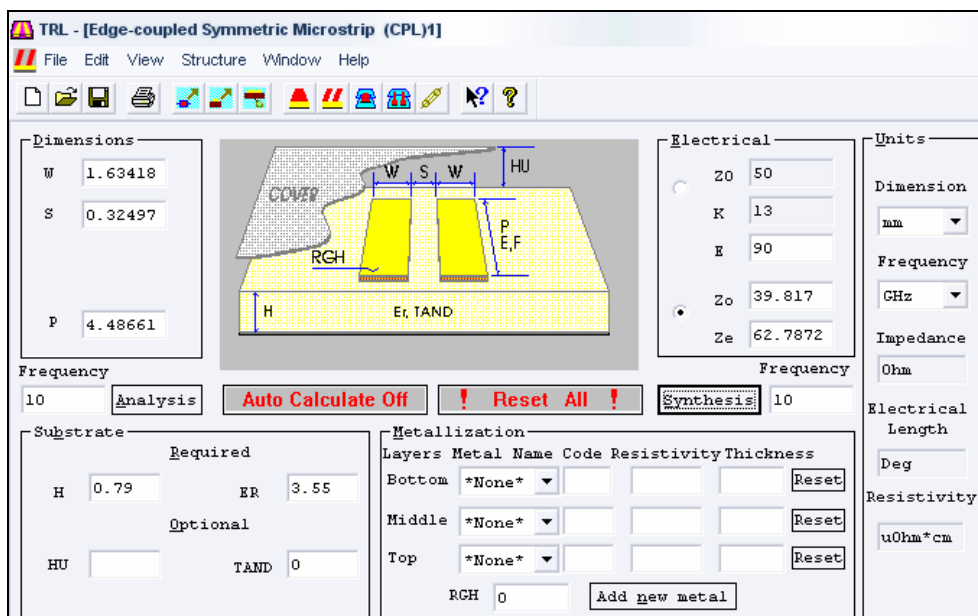
Obr. 21 Ukázka výpočtového okna programu Designer pro návrh vázaného vedení

Návrh pomocí programu Serenade je téměř totožný, neboť Designer vychází ze Serenady. Ukázka je na obr.22

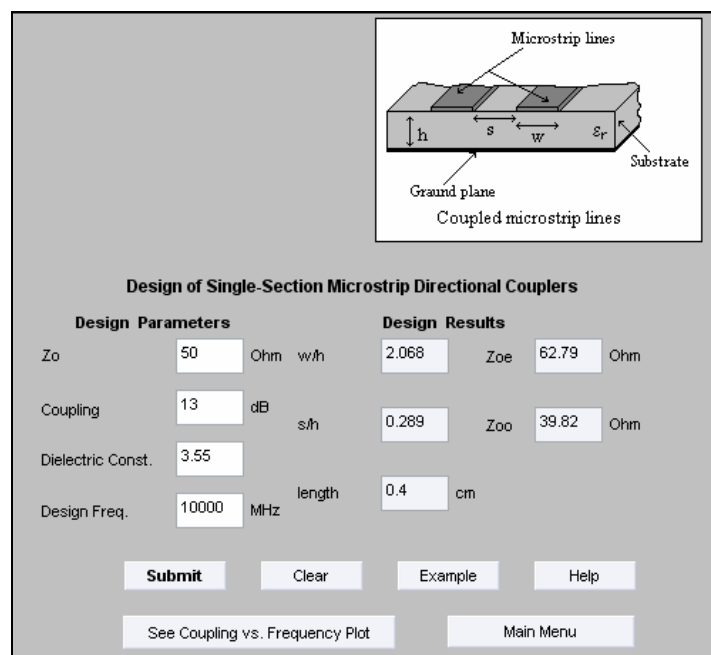
Pro návrh pomocí programu umístěného na internetových stránkách, nejprve zadáme odkaz uvedený v kapitole 4.1. Použijeme odkazu **Directional Coupler Design & Analysis / Design and Analysis/ Design** . Základní okno tohoto programu je na obr.23. Intuitivně toto okno vyplníme základními údaji a výpočet provedeme stiskem **Submit**.

Při návrhu lze použít program *vazane\_ved.m*, který spočítá impedance sudého a lichého vidu, které pak lze dosazovat do Designeru nebo do Puffu.

V tab.5 je přehled vypočtených rozměrů vázaného vedení pomocí Matlabu, Designeru, Puffu a programu na internetu.



Obr. 22 Ukázka okna návrhu vázaného vedení programem Serenade



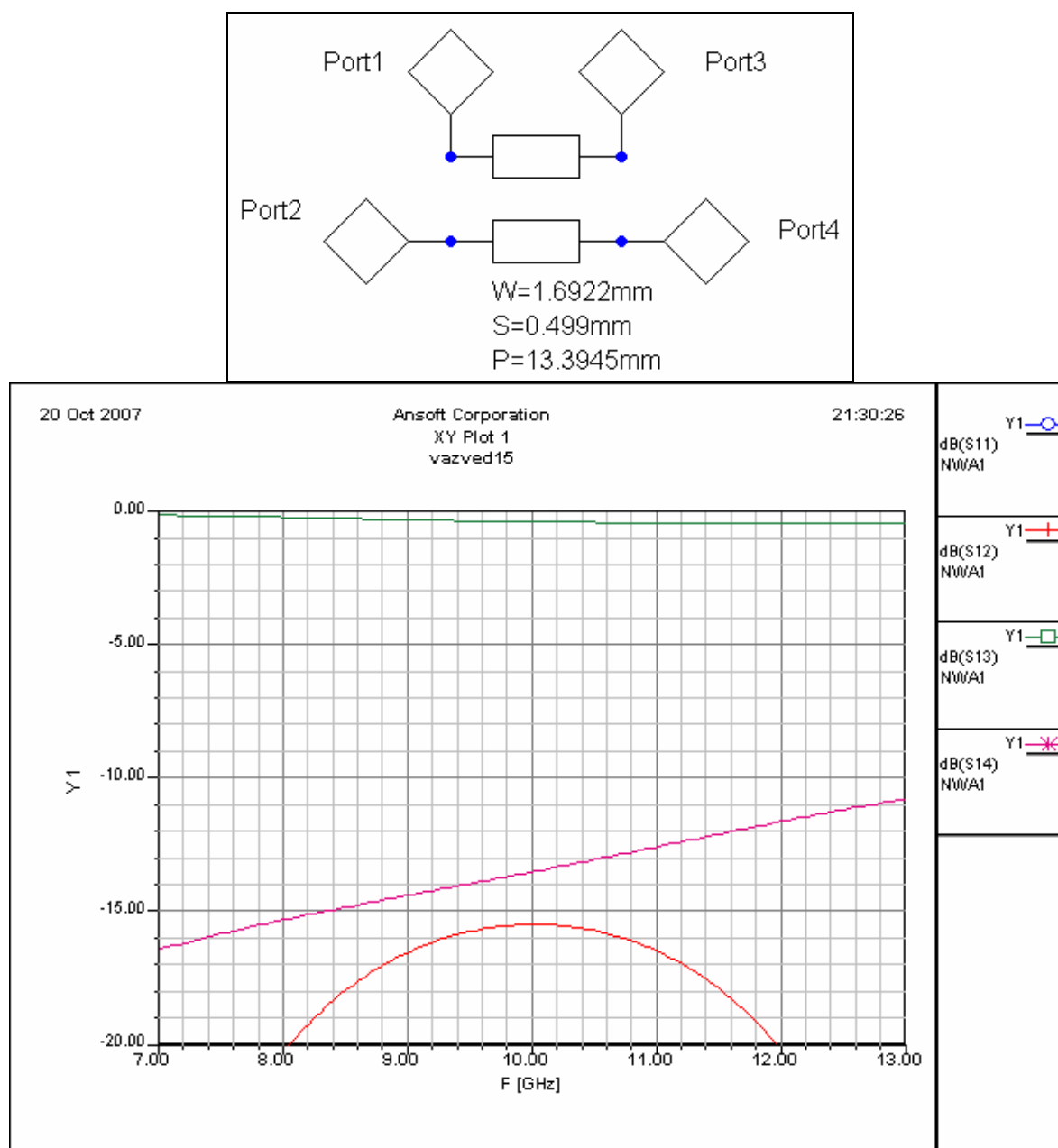
Obr. 23 Výpočtové okno programu pro návrh vázaného vedení

C = 15dB	Matlab	Designer	Puff
Z <sub>oe</sub> [Ω]	59,8452		60
Z <sub>oo</sub> [Ω]	41,7744		42
w [mm]		1,6922	1,695
s [mm]		0,4990	0,4641
l [mm]		13,3945	13,65

Tab. 5 Vypočtené rozměry vázaného vedení

Na obr.24 je simulace směrové odbočnice z vázaného vedení. Vložný útlum je v tomto případě kolem 0,15 dB, vazební útlum je dle návrhu 15dB. Jednotlivé parametry lze získat editací souboru pro program Puff se stejnojmennou příponou, tedy .puff. Zde jsou uložena

veškerá nastavení. Jednotlivé S-parametry jsou zde v nedecibelové podobě. Pro čtení výstupních parametrů z grafu je třeba brát v úvahu jiné číslování portů.



Obr. 24 Simulace SO z vázaného vedení a její výstupní parametry

#### 4.6 Kombinovaný člen

Zadáno:  $f = 3$  GHz,  $Z_0 = 50 \Omega$ , dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$  mm,  $t = 35$   $\mu$ m

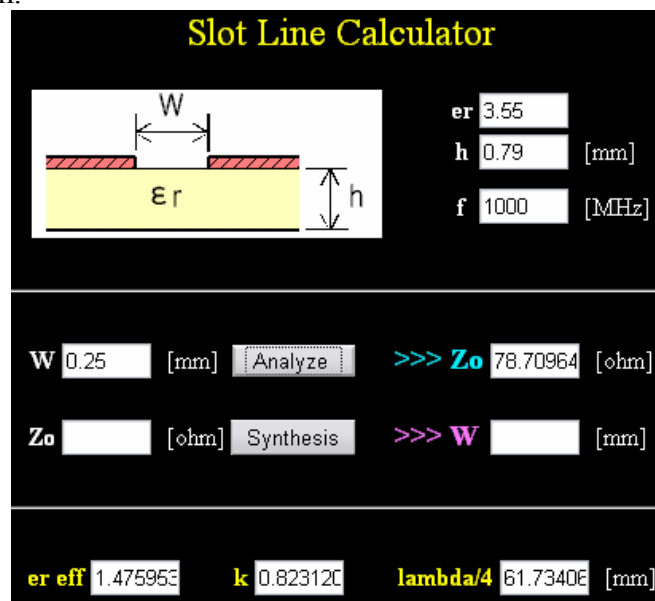
Pro návrh lze využít vztahy (38) – (41), (12) – (17), (42) – (47). Návrh se rozdělí na dvě části. První je určení šířky mikropásku stejným postupem jako například při určování rozměrů čtvercové odbočnice, tedy ze vztahů (12) – (17) z impedance  $Z_{0M}$ . Druhou částí je návrh štěrbin. Tu lze navrhnout pomocí programu umístěného na internetové adrese :

[http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool\\_e.htm](http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool_e.htm) a následným kliknutím na odkaz **Slot Line Calculator**. Do okna zadáme mimo parametry podložky a kmitočtu také impedanci

šterbiny vypočtenou jako  $Z_{0s}$  podle vztahu (41). Výpočtové okno tohoto programu je na obr.25. Musíme však brát na zřetel technologické možnosti. Je tedy dobré postupovat opačně. Z požadované šířky šterbiny (v našem případě minimální šířka šterbiny je 0,25mm) určíme impedanci  $Z_{0s}$  a délku šterbiny  $l_s$ . Další postup je pouze naznačen. Rovnice z příslušných vztahů lze jednoduše odvodit.

- z impedance  $Z_{0s}$  lze ze vztahu (41) určit  $Z_{02}$
- ze vztahu (40) určíme činitel vazby  $k$
- ze vztahu (39) určíme impedanci  $Z_{01}$
- z impedance  $Z_{01}$  určíme pomocí vztahů (12) – (17) šířku a délku mikropásku
- ze vztahu (38) určíme vazební útlum

Vazební útlum lze ovlivnit změnou kmitočtu. Platí nepřímá úměrnost mezi vazebním útlumem a kmitočtem.



Obr. 25 Program pro výpočet šířky šterbiny

Tuto odbočnici nelze v programu Designer simulovat, proto se parametry ověří přímo měřením pro zvolené rozměry. Pro simulaci by bylo zřejmě třeba zvolit složitější simulační program, např. namodelovat tuto odbočnici v matlabu. Volbě velikosti průměru kruhů pro zakončení šterbiny se zabývají různé odborné články např. v IEEE. V tomto případě byl zvolen průměr  $d = 10$  mm, ale na DPS odbočnic je použit průměr 9mm, aby mezi zakončením šterbiny a okrajem destičky byla ještě nějaká měděná plocha.

V tab.6 jsou uvedeny rozměry kombinovaného členu pro zvolenou šířku šterbiny  $w_s = 0,3$ mm.

$w_s$ [mm]	0,3
$Z_{02}=Z_{0s}$ [Ω]	91,3212
$k$ [-]	0,8367
$Z_{0M}$ [Ω]	46,2386
$Z_{01}$ [Ω]	92,4772
$C$ [dB]	1,5482
$w_M$ [mm]	1,9976
$l_M$ [mm]	14,8421
$l_s$ [mm]	19,6874
$IL$ [dB]	6,7719

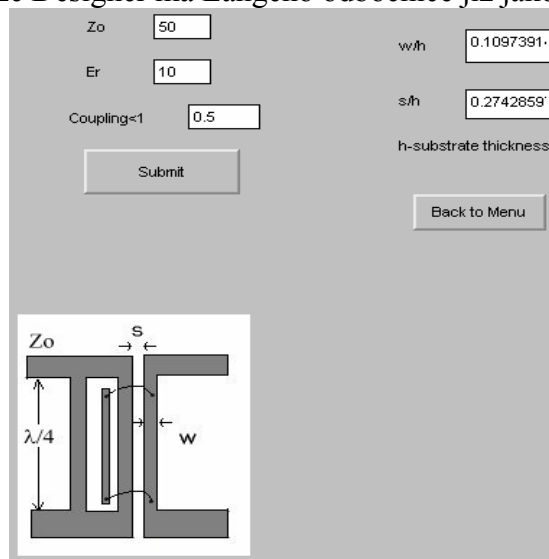
Tab. 6 Rozměry kombinovaného členu

## 4.7 Langeho odbočnice

Zadáno:  $f = 10$  GHz,  $Z_0 = 50 \Omega$ ,  $C = 8$  dB, dielektrická podložka z materiálu Arlon  $\epsilon_r = 3,55$ ,  $h = 0,79$  mm,  $t = 35 \mu\text{m}$

Pro Langeho odbočnici podobně jako pro odbočnici z vázaného vedení je nutné volit vazební útlum takový, abychom ji byli schopni vyrobit. Tuto odbočnici lze navrhnout jednak pomocí vztahů (51) – (59), nebo lze použít program na internetové adrese <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/magnetic.htm>. Dále musíme kliknout na odkaz **Lange Coupler Design** do kterého vepíšeme kmitočet, impedanci připojeného vedení, permitivitu a koeficient vazby  $k$ , určený například vztahem (38). Výsledkem tohoto programu jsou poměry  $w/h$  a  $s/h$ , ze kterých snadno vypočítáme příslušné  $s$  a  $w$ . Ukázka tohoto programu je na obr. 26. Dále je nutné určit délku prstů. To provedeme pomocí programu Designer pro určování rozměrů samostatného mikropásku. Dosadíme hodnotu  $w$ , kmitočet a elektrickou délku  $270^\circ$ . Poté pomocí tlačítka Analysis určíme vlnovou impedanci  $k$  příslušné šířce pásku a pomocí tlačítka Synthesis určíme  $3\lambda_g / 4$ , tedy neznámou délku prstů  $l$ . Nyní už tedy známe všechny parametry odbočnice dle obr. 12 a obr.13. V tab.7 jsou rozměry a parametry Langeho odbočnice pro  $C = 8$  dB. Jak bylo řečeno již dříve, je Langeho odbočnice určena pro malé vazební útlumy, ale vzhledem k technologickému omezení na rozměry větší, než 0,25 mm se tento útlum nemusí zdát malý, ale v porovnání s odbočnicí z vázaných vedení, kde útlum činí  $C = 15$  dB, má Langeho odbočnice skutečně „malý“ vazební útlum.

Tuto odbočnici opět nelze v programu Puff přímo simulovat jako prvek, ale lze určitým nahrazením soustavou vázaných vedení i tuto odbočnici v Puffu simulovat, ale je to zbytečné vzhledem k tomu, že Designer má Langeho odbočnice již jako prvek hotový.



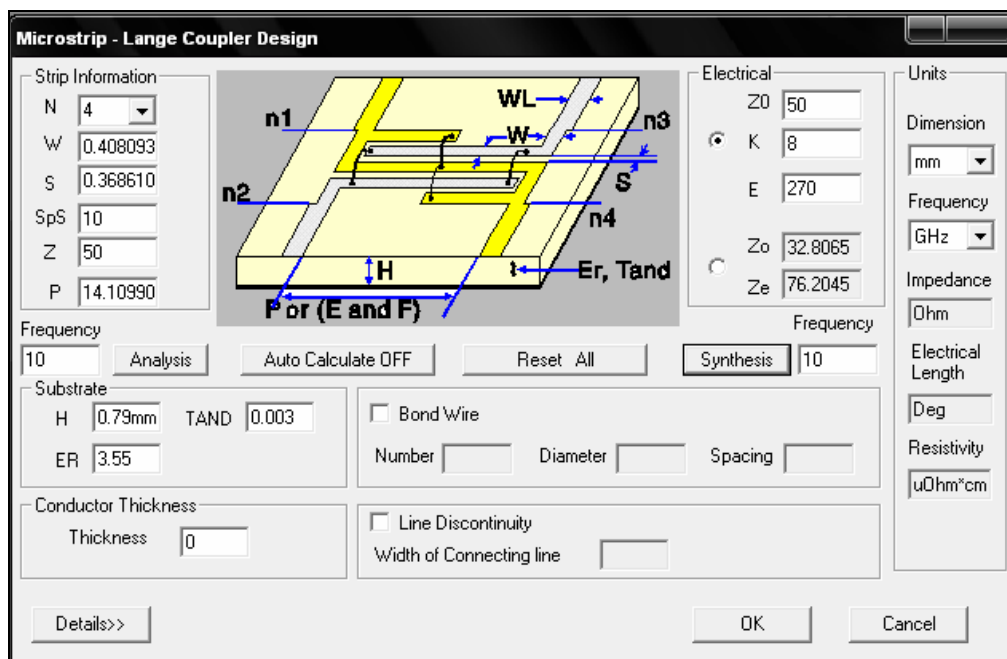
Obr. 26 Program pro výpočet rozměrů Langeho odbočnice

<b>C [dB]</b>	8
<b>k [-]</b>	0,3981
<b>w/h</b>	0,5165
<b>w [mm]</b>	0,4081
<b>s/h</b>	0,4666
<b>s [mm]</b>	0,3686
<b>l [mm]</b>	14,1099

Tab. 7 Rozměry Langeho odbočnice

Langeho odbočnici lze navrhnout programem Ansoft Designer, který se jako studentská verze stáhnou ze stránek výrobce. Ansoft Designer, je vyšší verzí Ansoft Serenade, takže logika návrhu je zcela obdobná. Po spuštění nastavíme **Project/ Insert circuit design**, kde zvolíme materiál (pokud chceme jen navrhovat, je zcela jedno, jaký zvolíme). Návrh Langeho odbočnice (ale i mikropásku i vázaného vedení) lze pak najít v menu **Circuit/ TRL/ Microstrip/ Lange coupler**. Takový návrh je pak na obr.27.

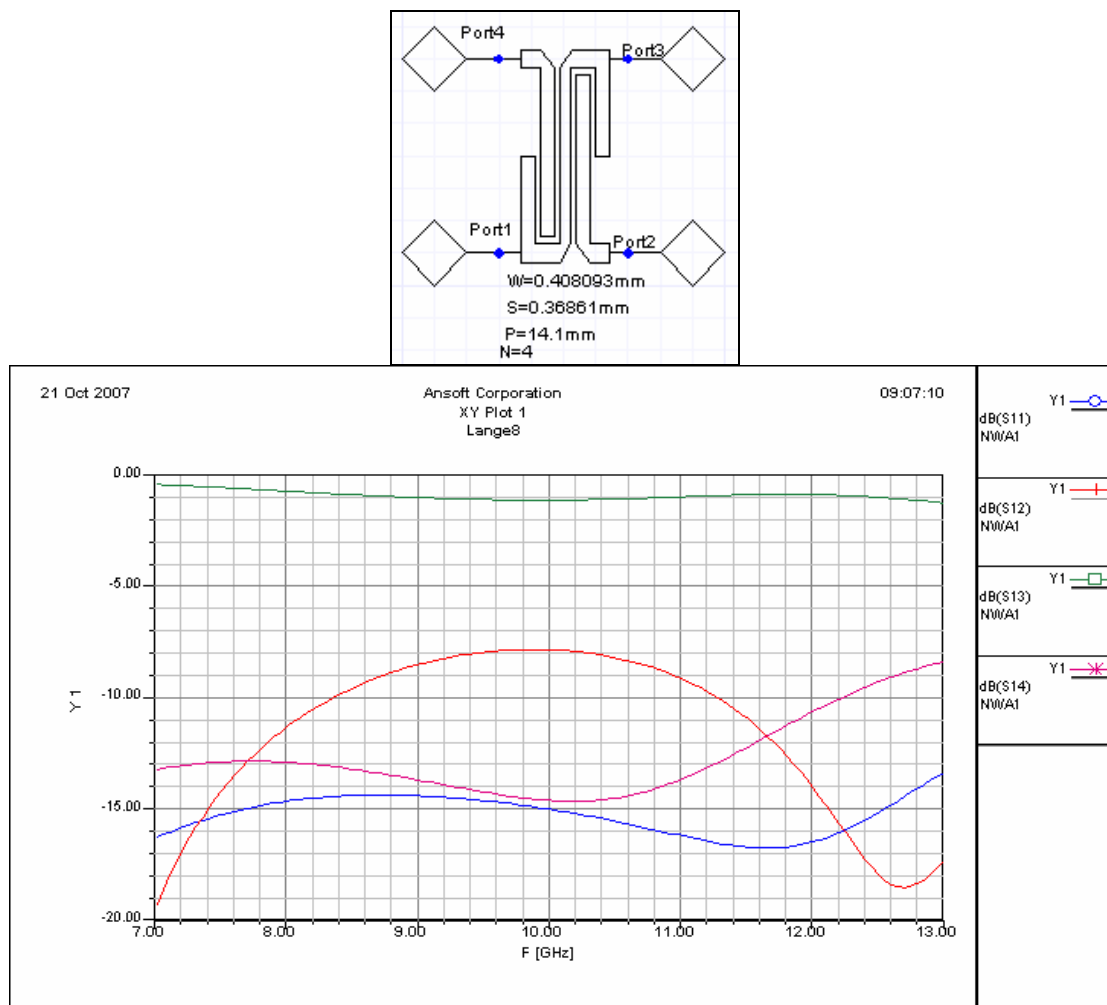
Jako vstupní veličiny jsou impedance připojeného vedení  $Z_0$ , vazební útlum  $K (= C)$ , elektrická délka  $E$  ( $270^\circ$  pro  $3\lambda_g/4$ ), kmitočet a počet prstů  $N$  (obvykle 4), permitivita a výška substrátu. Stiskem Synthesis se provede návrh. Na obr.27 je zvoleno  $N = 4$ , i když by se mohlo zdát, že prstů je pět. Jeden prst je jen rozdělen na dva stejné díly, které jsou jako krajní mikropásky. Pro simulaci je nutné ještě třeba zadat počet propojovacích drátků ( $NW$ ), jejich průměr ( $DW$ ) a jejich vzdálenost ( $SW$ ), šířka připojeného vedení ( $WL$ , obvykle pro  $50\Omega$ ), úhly zkosení středních pásek ( $ANGC = ANG0 = 45^\circ$ ). Parametry propojovacích drátků mají zásadní vliv na charakteristiky této odbočnice. Nejlépe je toto provádět pomocí zlatých drátků. Pokud nevíme jakým materiálem budeme propojovat, zvolíme parametry tak, aby charakteristiky odpovídaly našim požadavkům.



Obr. 27 Návrh Langeho odbočnice v programu Ansoft Designer

Na obr. 28 je takto vypočtená Langeho odbočnice a její simulované parametry v Designeru.

Z obr. 28 je vidět, že vložný útlum je velmi malý (přibližně 1 dB), což je pochopitelné, pokud si prohlédneme konstrukci odbočnice, je vložný útlum dán pouze útlumem „přímého“ mikropásku, kdežto vazební útlum je dán vazbami mezi pásky. Činitel odrazu na vstupní bráně a izolace jsou v tomto případě poměrně malé a to přibližně 15 dB. Dané charakteristiky byly doladěny pomocí parametrů propojovacích drátků.



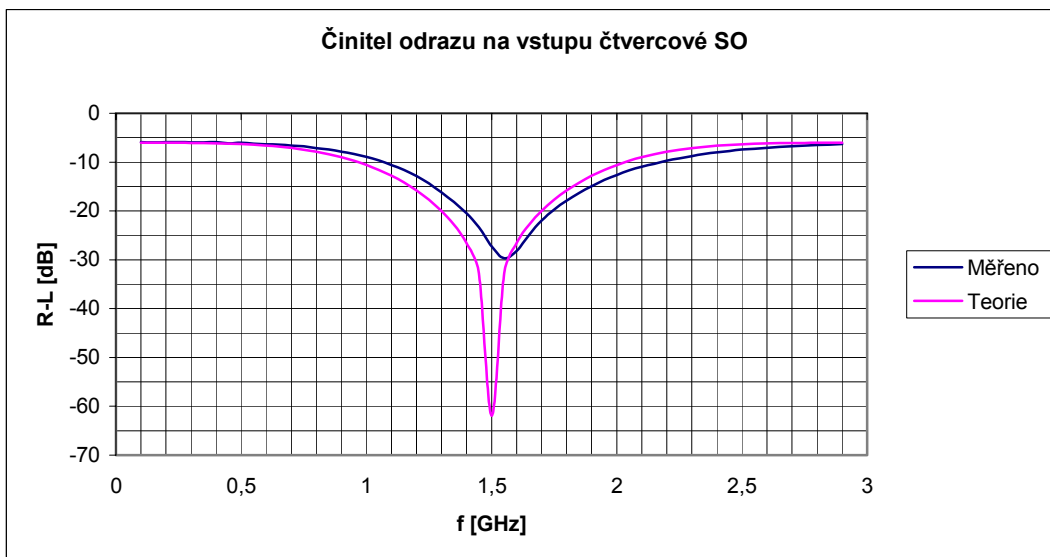
Obr. 28 Tvar a simulace Langeho odbočnice

## **5. Naměřené charakteristiky navržených SO**

Podle návrhů odbočnic z kapitoly 4, byly odbočnice vyrobeny a proměřeny jejich parametry. Naměřeným výsledkům a jejich srovnáním s teoretickými i simulovanými parametry se budeme zabývat právě v této kapitole. Měření probíhalo v rozsahu 0,1 ÷ 20 GHz, ale v této kapitole jsou použity pouze výřezy tohoto intervalu pro lepší odečítání parametrů na kmitočtu návrhu. Všechny průběhy nalezneme v souboru Naměřené výsledky.xls, který je na příloženém CD. Výstupní výkon analyzátoru Anritsu 54147A byl zvolen 0 dBm (1mW).

### **5.1 Čtvercová SO**

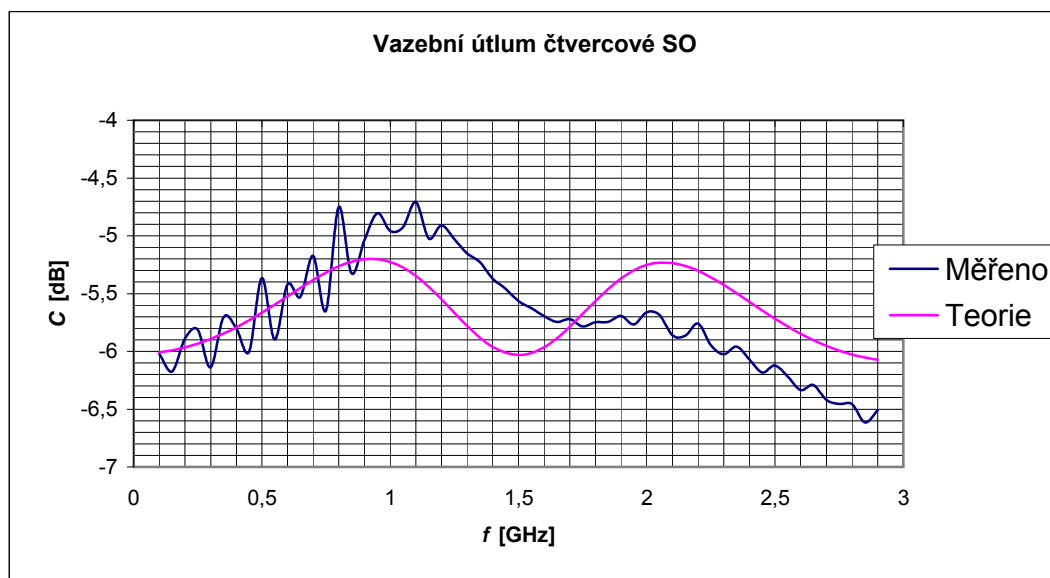
Tato odbočnice byla navržena na  $f = 1,5$  GHz pro  $C = 6$  dB pro materiál, který již byl několikrát zmiňován. Na obr.29 je činitel odrazu na vstupu odbočnice. Je zde srovnání naměřené charakteristiky a charakteristiky teoretické z programu Designer. Téměř všechny naměřené parametry jsou srovnány s parametry simulovanými programem Ansoft Designer. Jediným parametrem, který není srovnáván jsou poměry stojatých vln, neboť pro simulaci tyto poměry vychází rovny jedné, tedy dokonalé přizpůsobení.



Obr. 29 Činitel odrazu na vstupu čtvercové SO

Z obr. 29 je vidět, že naměřený činitel odrazu je poloviční, než teoretický, ale i hodnota 30 dB je poměrně slušná hodnota, neboť tato hodnota nám říká, jak je tlumen signál pronikající zpět ke generátoru. Také je z této charakteristiky patrný malý kmitočtový posuv, který bude pozorovatelný na všech charakteristikách.

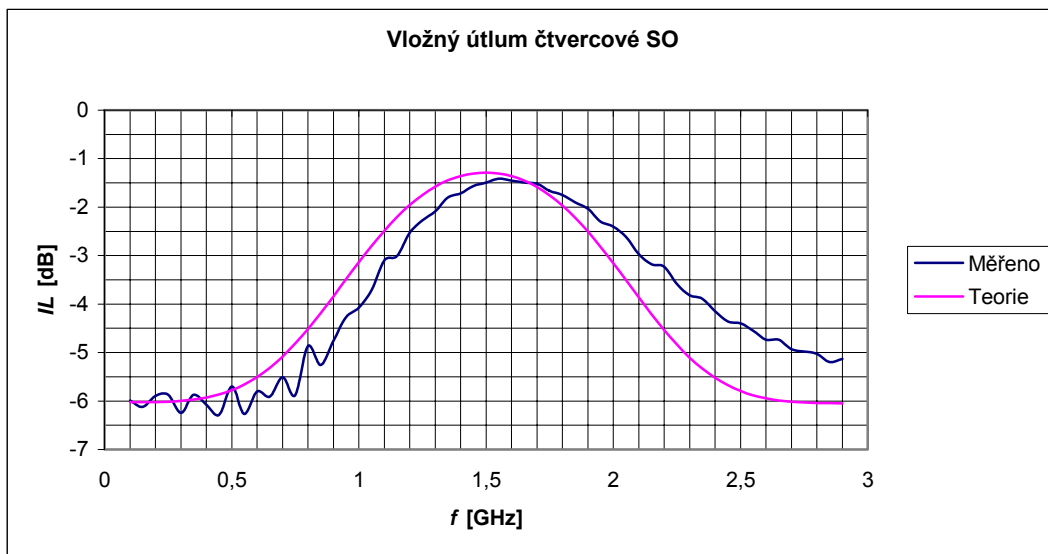
Důležitými parametry odbočnice jsou zcela jistě vazební a vložný útlum. Na obr. 30 vidíme vazební útlum. Je patrné, že naměřený a simulovaný průběh se částečně liší, když podoba charakteristiky zůstala zachována a rozdíl mezi navrženou (6dB) a měřenou (5,6dB) hodnotou činí 0,4 dB. Možnou příčinou by mohla být nesymetrie obvodu. Mohlo by se zdát, že by to mohlo být způsobeno nesprávným přizpůsobením, ale jak dále uvidíme z charakteristik *PSV* na jednotlivých branách, je přizpůsobení dobré.



Obr. 30 Vazební útlum čtvercové SO

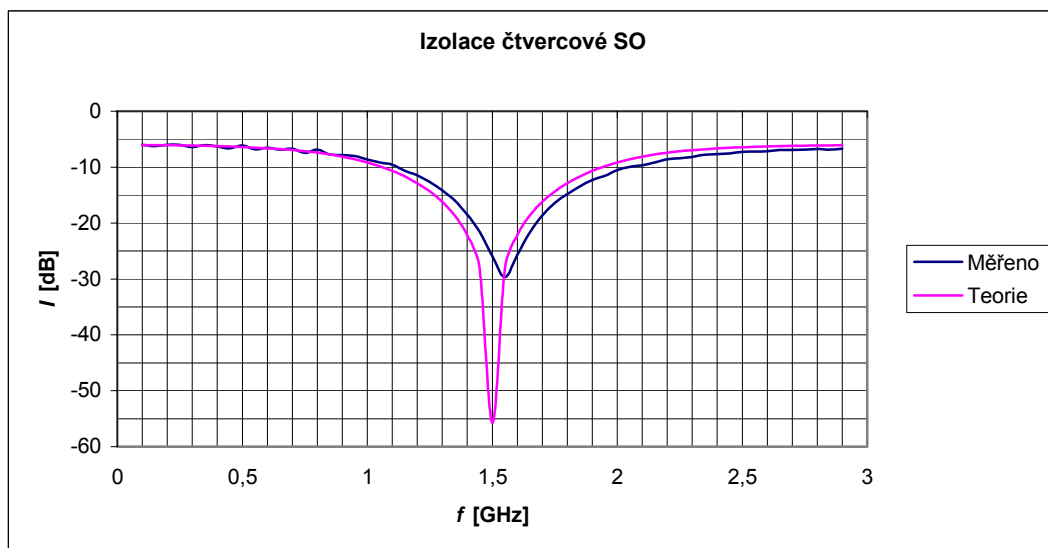
Vložný útlum je na obr. 31. Je z něj opět vidět kmitočtový posuv a rozchod charakteristik pro kmitočty nad středním kmitočtem stejně jako vazební útlum. Možnou

příčinu se mi nepodařilo stanovit stejně jako příčinu zvlnění u některých naměřených charakteristik.



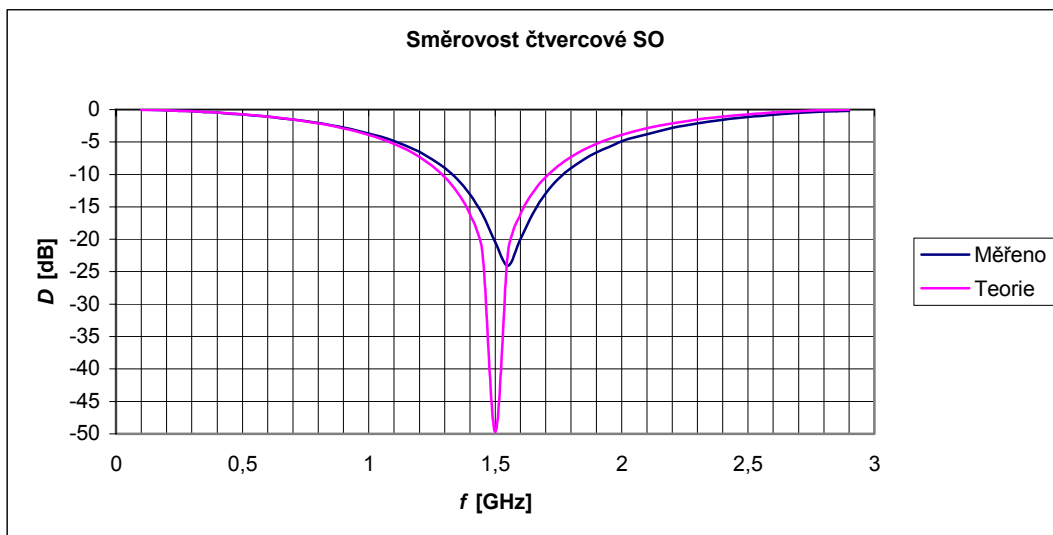
Obr. 31 Vložný útlum čtvercové SO

Další důležitou vlastností je izolace. Tento parametr nám říká, jaký mikrovlnný výkon proniká do izolované (čtvrté) brány, do které v ideálním případě neproniká výkon žádný. Tato charakteristika je na obr. 32 a je z ní vidět, že naměřená izolace je přibližně poloviční, než simulovaná, ale i hodnota potlačení 30 dB je dobrá hodnota. Pro vyšší kmitočty než pracovní je vidět nepatrný rozdíl, ale to je dáno zřejmě vertikálním rozlišením osy. Tento rozchod charakteristik by mohl být stejný s vazebním a vložným útlumem pokud bychom použili stejná měřítka os.



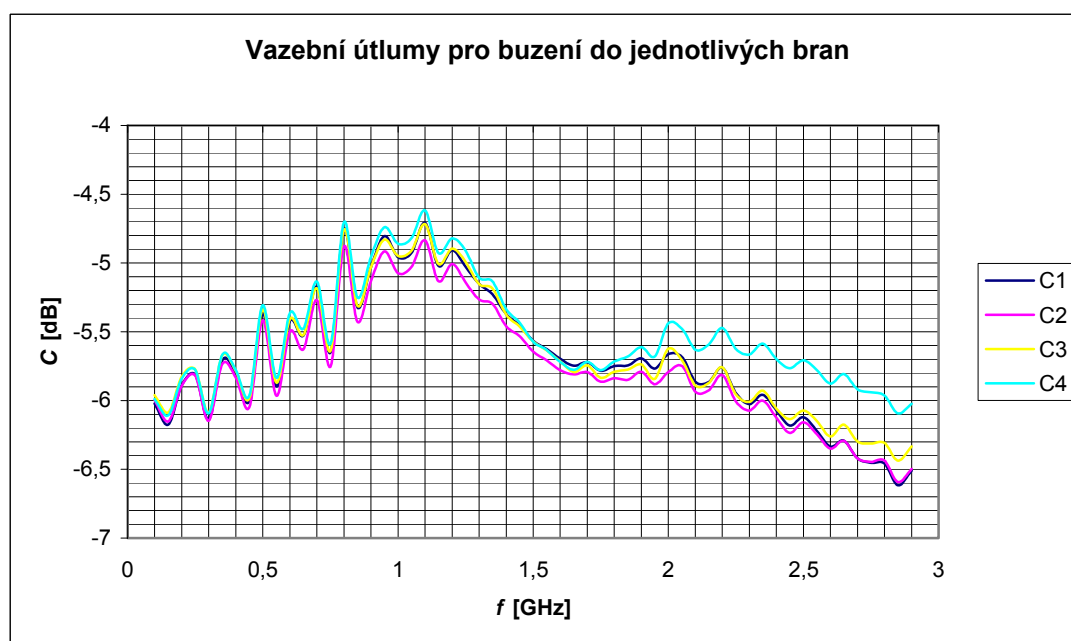
Obr. 32 Izolace čtvercové SO

Další vlastností, která je vazbou mezi izolací a vazebním útlumem, je směrovost, pro kterou platí  $D = I - C$ . Protože směrovost závisí na vazbě, tak je jasné, že odchylky vazebního útlumu se musí promítnout i do směrovosti.



Obr. 33 Směrovost čtvercové SO

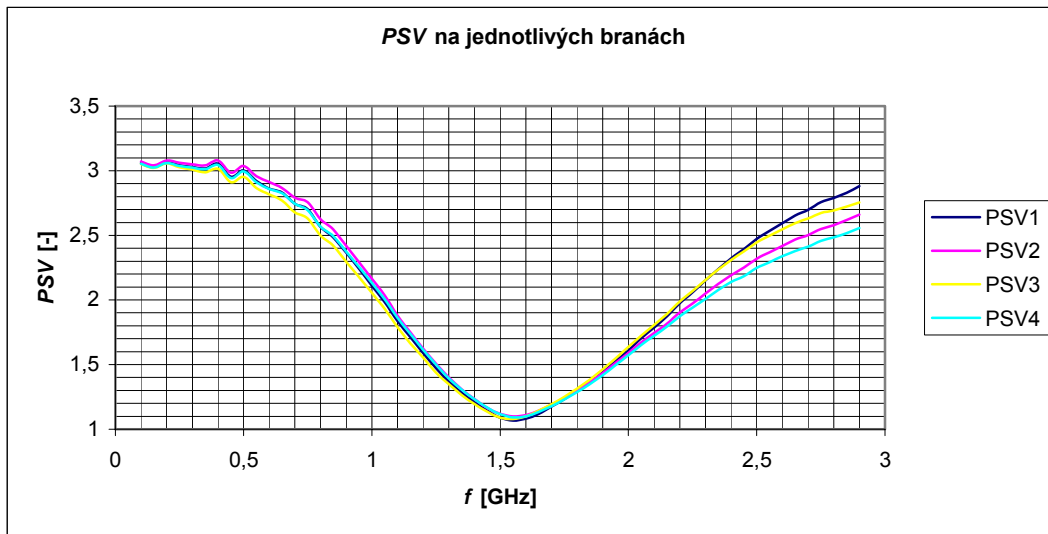
Někoho by určitě napadlo, podle čeho se určí ta „pravá“ vstupní brána. Odpověď na tuto otázku nám pomůže nalézt reciprocita obvodu, tedy jak se chová odbočnice při buzení do jiné brány. Pokud bychom reciprocitu zkoumali na teoretické bázi, pak dojdeme k tomu že obvod je zcela reciproční a symetrický a odpovídá to tedy definici ideální SO uvedené v úvodu této práce. Je jasné, že reciprocita obvodu bude stejná pro všechny parametry, zaměříme se tedy pro ukázkou pouze na jeden – vazební útlum. Tyto vazební útlumy pro buzení do jednotlivých bran jsou na obr. 34 a lze z něj říci, že obvod je téměř reciproční.



Obr. 34 Vazební útlumy pro buzení do jednotlivých bran čtvercové SO

K podobnému závěru ohledně reciprocity můžeme dojít i z měření *PSV* na jednotlivých branách na obr. 35, ze kterého také vidíme kromě reciprocity i přizpůsobení, které je velmi dobré, neboť *PSV* na všech branách činí přibližně 1,1 na kmitočet 1,55 GHz, což odpovídá pracovnímu kmitočtu určeného ze všech charakteristik.

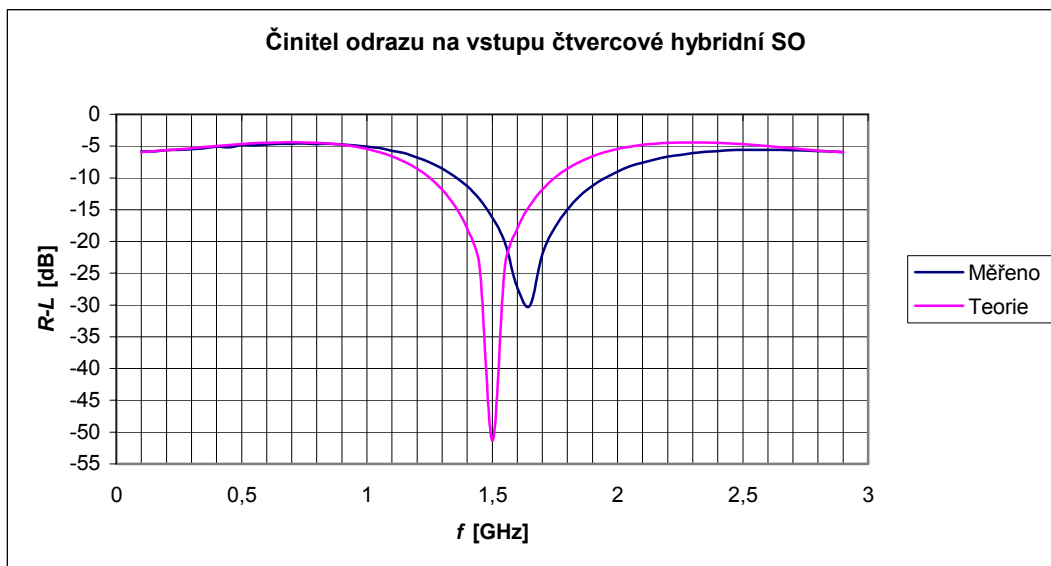
Pro simulaci této odbočnice nebyly zahrnuty útlumy konektorů, které nemají zřejmě na tomto kmitočtu takový útlum jako pro odbočnice navržené na pracovní kmitočet 10 GHz.



Obr. 35 PSV na jednotlivých branách čtvercové SO

## 5.2 Hybridní čtvercová SO

Tato odbočnice byla navržena na  $f = 1,5$  GHz pro  $C = IL = 3$  dB. Na obr.36 je činitel odrazu na vstupu odbočnice. Je zde srovnání naměřené charakteristiky a charakteristiky teoretické z programu Designer.

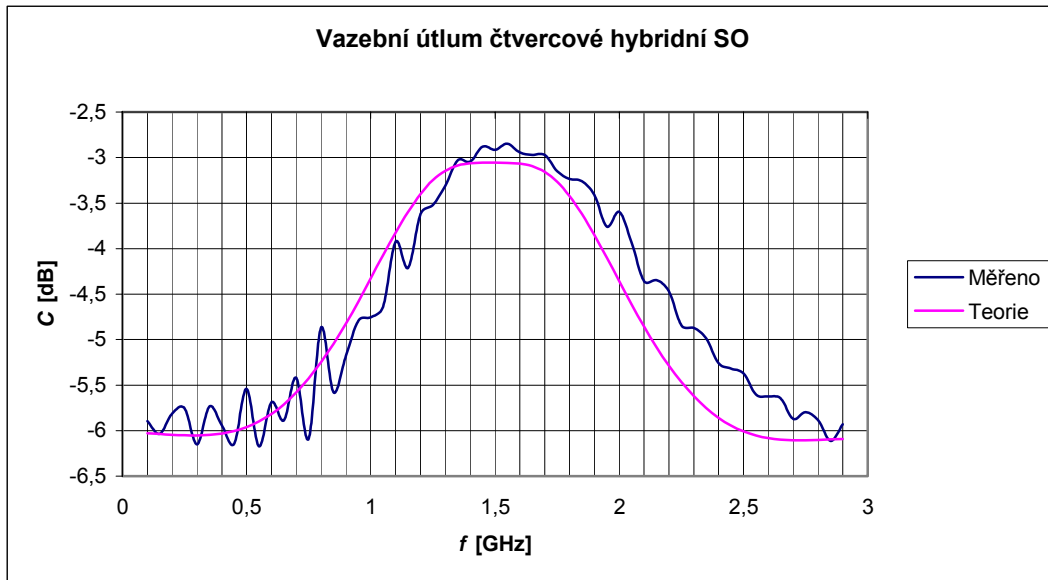


Obr. 36 Činitel odrazu na vstupu hybridní čtvercové SO

Z tohoto obrázku je patrné nejen to, že naměřená hodnota je nižší, než teoretická, ale došlo ke kmitočtovému posuvu charakteristik reálné SO na kmitočet 1,65 GHz. Reálná hodnota činitele odrazu je 30 dB, což je velice dobrá hodnota z hlediska odrazu signálu zpět do vstupní brány odbočnice.

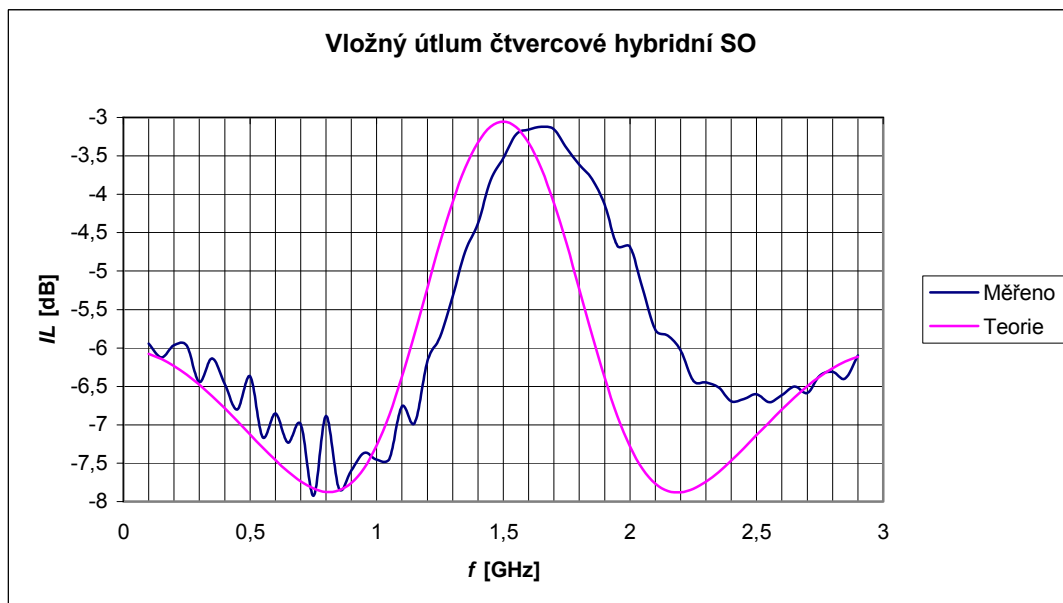
Obrázek 37 nám pak znázorňuje vazební útlum této odbočnice. Opět je zde vidět kmitočtový posuv. Naměřená a teoretická charakteristika jsou si velmi podobné a pro simulaci nebyly vloženy útlumy zahrnující útlumy konektorů, které nemají zřejmě na tomto

kmitočtu příliš velký útlum. To se potvrdilo i při měření kombinovaného členu. Pro odbočnice navržené na vyšší kmitočet bylo nutné pro srovnávání měření a teorie vložit do simulace útlumy konektorů s hodnotou 0,5 dB. Skutečná hodnota vazebního útlumu je přibližně 2,8 dB, ale to lze považovat za relativně přesné výsledky a chyba oproti navrhovanému vazebnímu útlumu 3dB je poměrně malá.



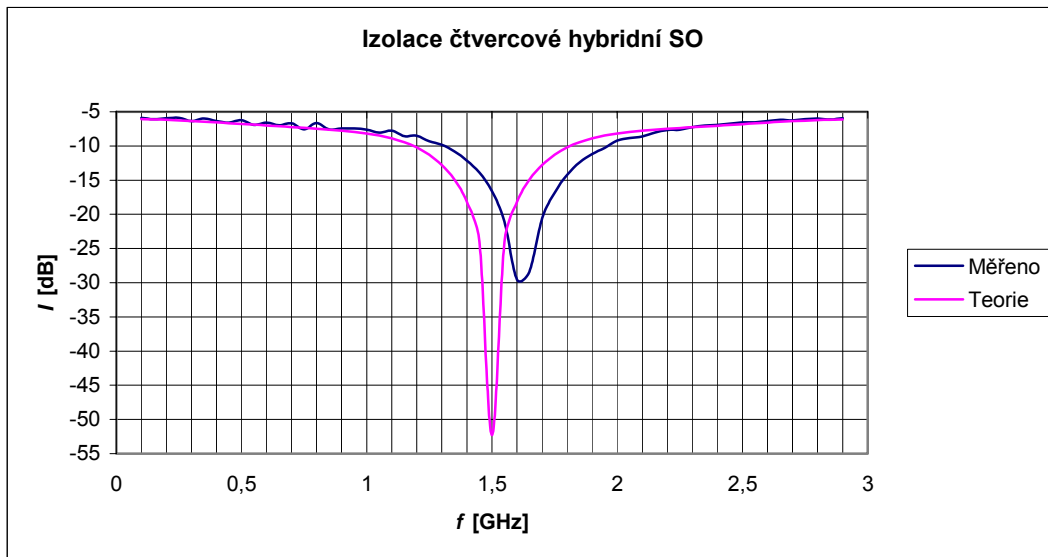
Obr. 37 Vazební útlum hybridní čtvercové SO

Podobná situace je patná z charakteristik vložného útlumu na obr.38. Pro kmitočet nad pracovní kmitočet dochází k rozchodu mezi skutečným a teoretickým vložným útlumem, ale i přes to jsou si charakteristiky velmi podobné. V maximu se liší přibližně o desetinu dB. U některých naměřených charakteristik je patné určité zvlnění, které se neobjevuje u všech odbočnic. Na možnou příčinu tohoto zvlnění jsem bohužel nepřišel.



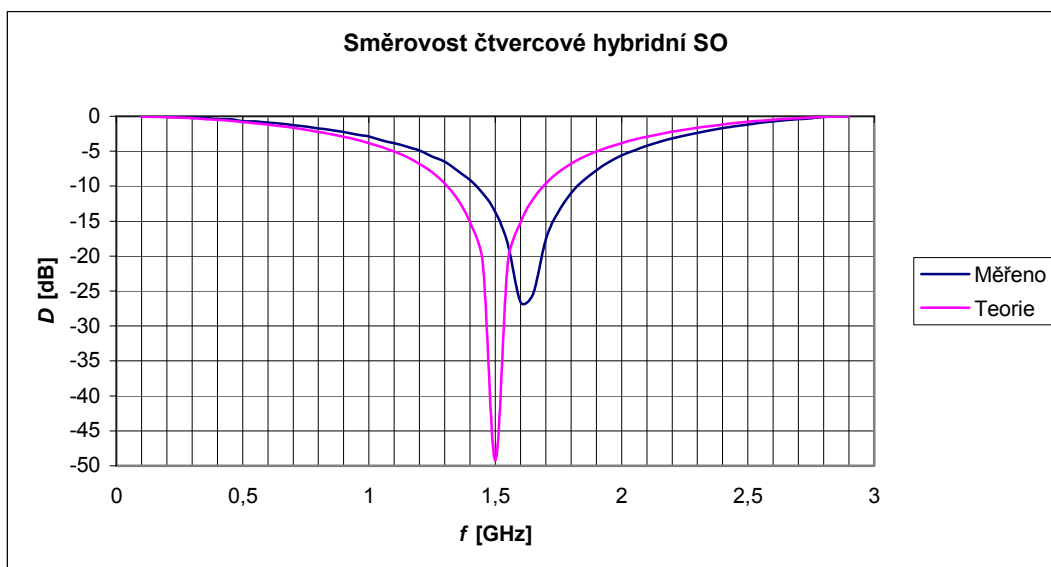
Obr. 38 Vložný útlum hybridní čtvercové SO

Dalším, neméně důležitým parametrem odbočnic je izolace. Tento parametr nám vyjadřuje jaký mikrovlnný výkon proniká ze vstupní brány do brány bezodrazově zakončené. Závislost izolace je pak na obr.39. Skutečná izolace je 30 dB, teoretická hodnota činí 50 dB. I tak lze považovat izolaci za dostatečnou, neboť uvažíme-li vstupní výkon 0 dBm (1mW), pak výkon na 4.bráně bude -30 dBm (1μW).



Obr. 39 Izolace hybridní SO

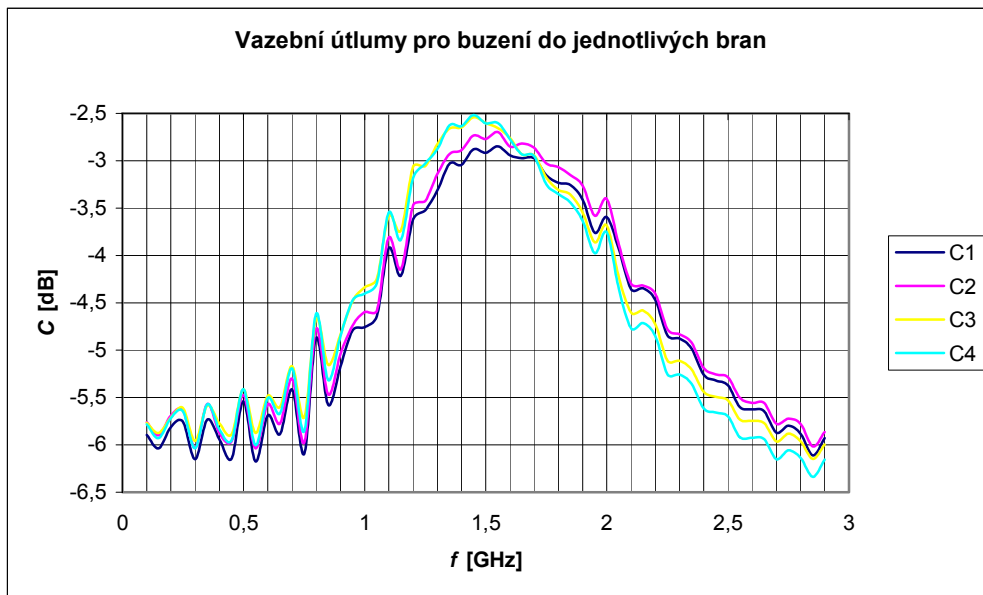
Úzce související veličinou s izolací a vazbou je směrovost, kterou lze určit vztahem  $D = I - C$ . Ta je na obr. 40 a dosahuje hodnoty 27 dB. Tato hodnota je sice poloviční, než teoretická hodnota, ale i tak lze považovat tuto odbočnici z hlediska směrovosti za dobrou. Profesionálně vyrobené odbočnice mohou mít směrovost samozřejmě větší.



Obr. 40 Směrovost hybridní čtvercové SO

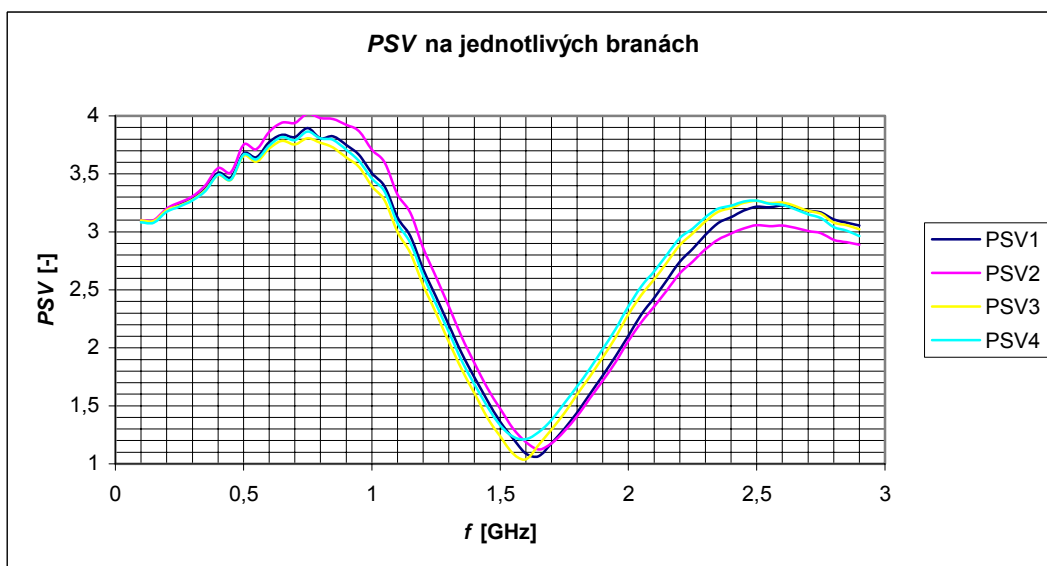
Dále by mohla určitě někoho zajímat reciprocita tohoto obvodu, tedy to, co se stane, když ji budeme budít do jiné brány, než kterou jsem zvolil jako vstupní. Pokud bychom chtěli reciprocitu zkoumat na teoretické bázi, pak dojdeme k tomu, že simulace jsou naprosto totožné a odbočnice je zcela reciproční, což odpovídá definici SO. Reciprocitu reálné SO

můžeme zkoumat na všech předchozích parametrech. Na obr. 41 je reciprocita posuzována pouze pro vazební útlum a předpokládáme, že pro všechny parametry bude reciprocita odbohu stejná. Jsou zde zobrazeny vazební útlumy pro buzení do jednotlivých bran, tedy  $C1$  označuje vazební útlum pro buzení do brány 1 (vazba na bráně 2),  $C2$  vyjadřuje vazební útlum při buzení do brány 2 (vazba na bráně 1) atd. Z těchto charakteristik tedy vyplývá, že lze, s jistou rezervou, považovat obvod za reciproční.



Obr. 41 Vazební útlumy pro buzení odbočnice do jednotlivých bran

Podobně můžeme reciprocitu posuzovat například z  $PSV$  na jednotlivých branách na obr. 42, ale tyto závislosti nám spíše ukazují přizpůsobení obvodu na jednotlivých branách. To lze považovat za velmi dobré, neboť na vstupní bráně je  $PSV = 1,08$ , což se od ideální hodnoty  $PSV = 1$  liší nepatrně.



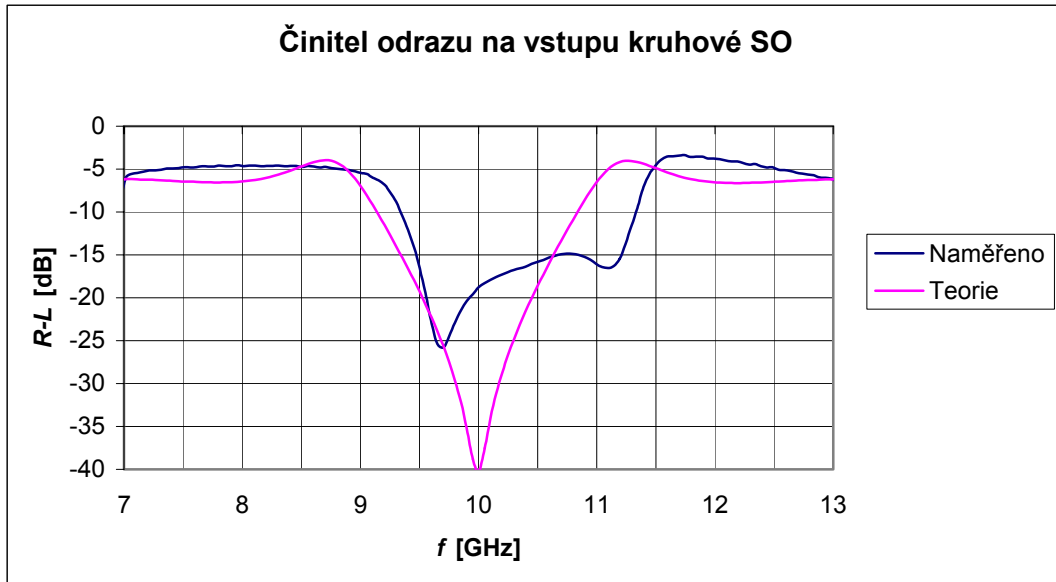
Obr. 42  $PSV$  na jednotlivých branách hybridní čtvercové SO

Ze všech charakteristik současně lze stanovit optimální pracovní kmitočet pro shodnou vazbu a vložný útlum, největší směrovost, nejlepší izolaci, nejmenší  $PSV$  atd. To vše vede

k jednomu kmitočtu, který by měl být v ideálním případě shodný s kmitočtem návrhu, ale je patrné, že došlo k určitému kmitočtovému posuvu.

### 5.3 Kruhová SO

Tato odbočnice byla navržena na  $f = 10$  GHz pro  $C = 6$  dB. Na obr.29 je činitel odrazu na vstupu odbočnice. Je zde srovnání naměřené charakteristiky a charakteristiky teoretické z programu Designer.

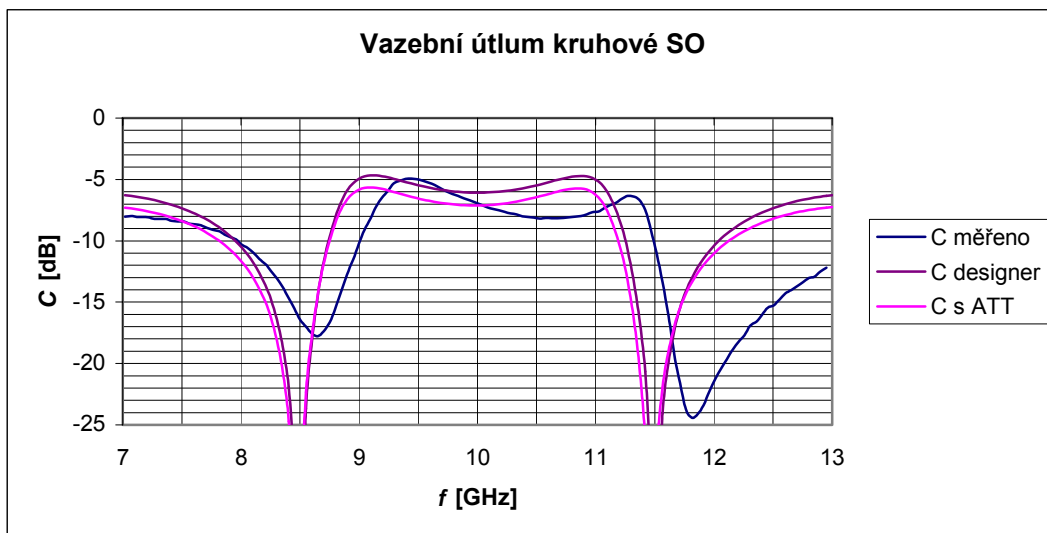


Obr. 29 Činitel odrazu na vstupu kruhové SO

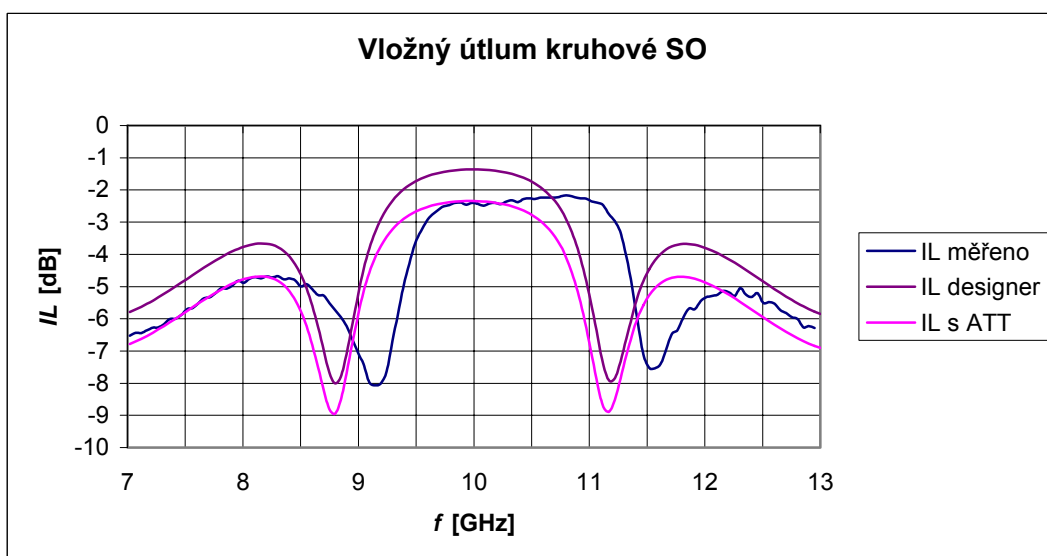
Z průběhů na obr.29 vyplývá, že reálný činitel odrazu je max.25 dB, kdežto teoretický sahá ke 40 dB, Rozdíl je zřejmě způsoben ne zcela dokonalým přizpůsobením.

Na obr. 30 je frekvenční závislost vazebního útlumu. Z porovnání teoretické a skutečné charakteristiky plyne, že došlo ke kmitočtovému posuvu charakteristiky na 10,6 GHz, ale vazební útlum má v minimu hodnotu -7,8 dB oproti navrhovaným 6dB. Určitý decibelový rozdíl se dá zdůvodnit nepřesnou výrobou, ale to jen několik málo procent. Další chybu vnáší do měření připojené konektory, kde při měření jsou v cestě vždy dva konektory a těm můžeme přisoudit přibližně 0,5 dB na konektor. Další chybu zde mohou vnést vstupní mikropásky, které nejsou vždy čtvrtvlnné (tříčtvrtvlnné), ale tato chyba činí max. 0,2 dB. V neposlední řadě je další rozdíl způsoben nedokonalým přizpůsobením a nepřesnou symetrií obvodu, obvod tedy není zcela reciproční.

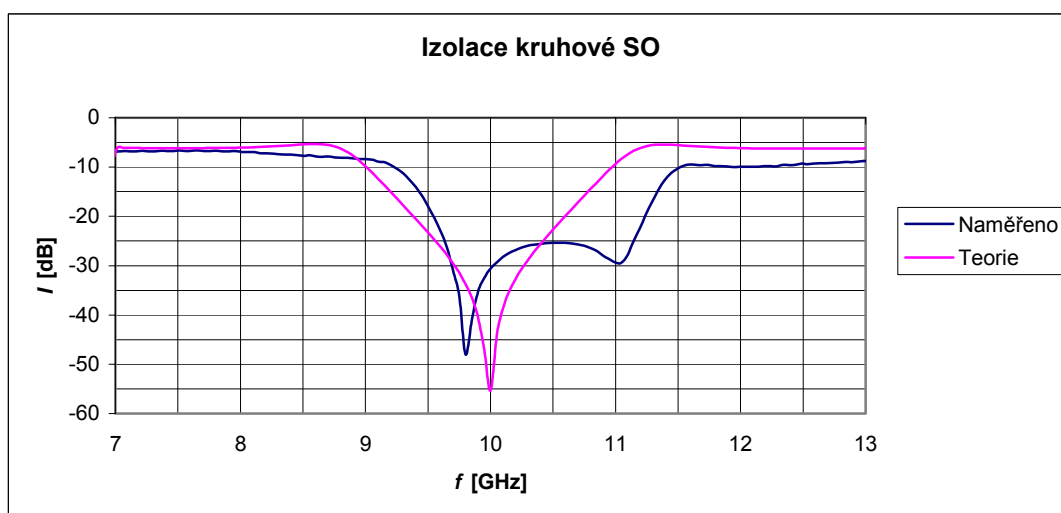
Na obr.31 je pak znázorněn průběh vložného útlumu, který je ovšem, stejně jako vazební útlum a ostatní charakteristiky, větší, než průběh teoretický. Na obr. 30 a 31 jsou tři charakteristiky. Jedna znázorňuje naměřené výsledky, druhá je teoretický průběh z programu designer (označena „designer“) a poslední je také simulovaný průběh, ovšem se započtenými útlumy konektorů apod. (označený „s ATT“). Z charakteristik je vidět, že širokopásmovost simulované charakteristiky a charakteristiky měřené, je téměř shodná a velikosti útlumů ( vazebního i vložného) jsou téměř shodné s charakteristikou simulovanou.



Obr. 30 Vazební útlum kruhové SO



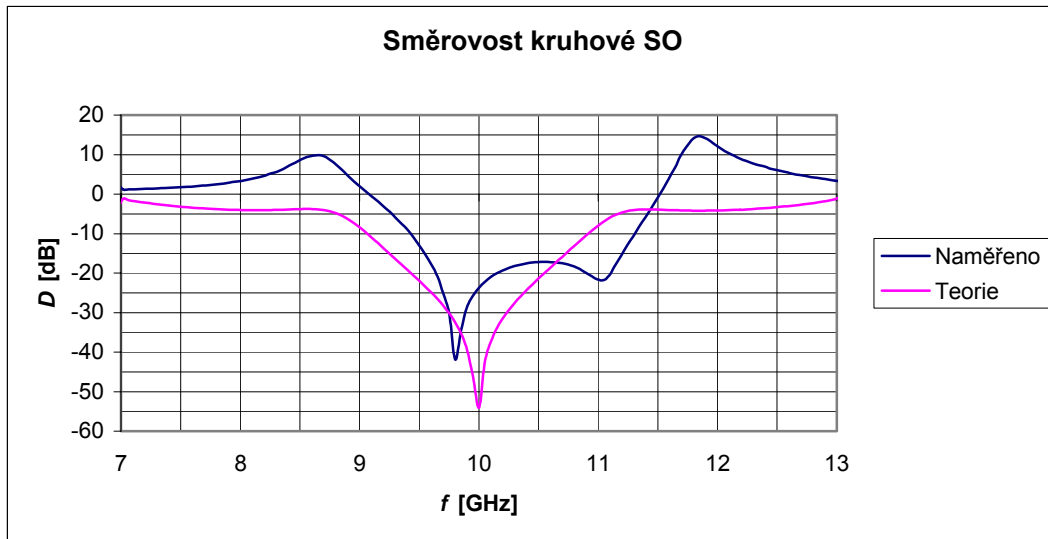
Obr. 31 Vložný útlum kruhové SO



Obr. 32 Izolace kruhové SO

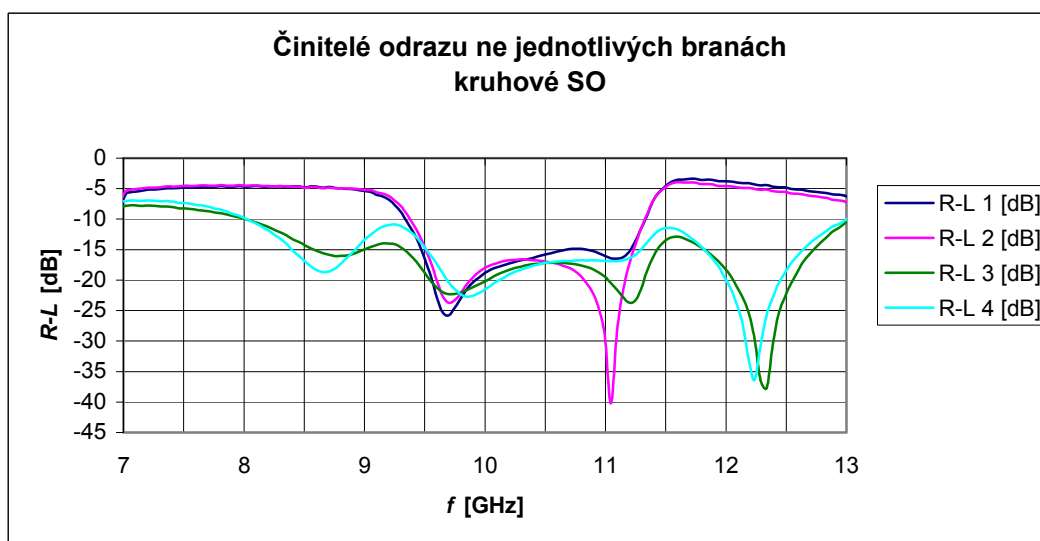
Na obr.32 je průběh izolace ( $S_{14}$ ). U reálné SO dosahuje izolace na kmitočtu 10,6 GHz přibližně 25 dB, u teoretické SO je izolace kolem 55 dB.

Obr.33 ukazuje průběh směrovosti, která je u reálné SO na kmitočtu 10,6 GHz přibližně 18 dB, u teoretické SO je kolem 53 dB. Směrovost u reálné SO sahá i do kladných hodnot, neboť platí  $D = I - C$ . Pokud je izolace malá a vazební útlum velký, tak dochází k tomu, že je směrovost kladná.

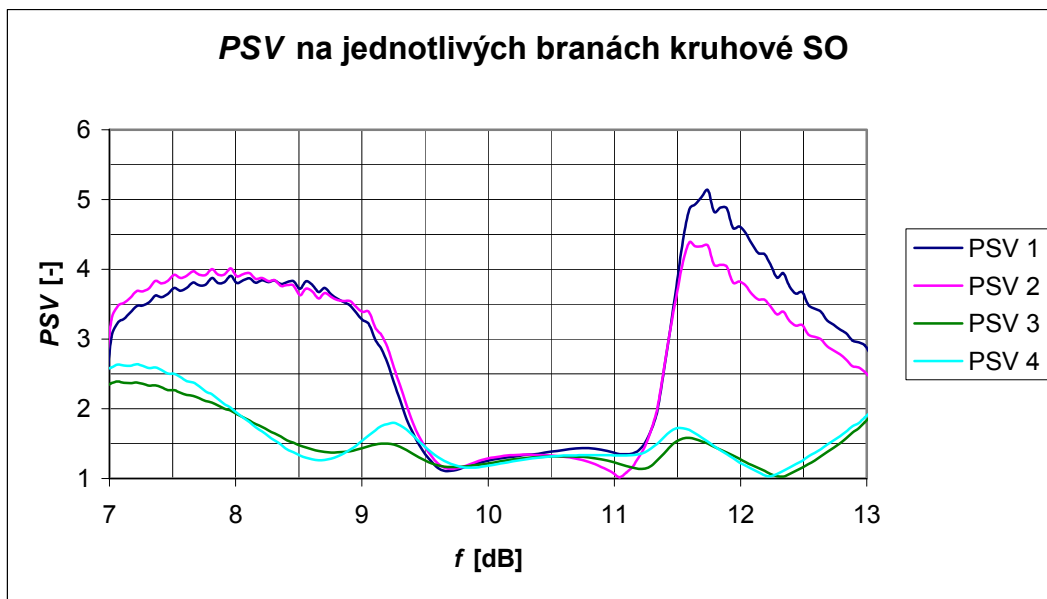


Obr. 33 Směrovost kruhové SO

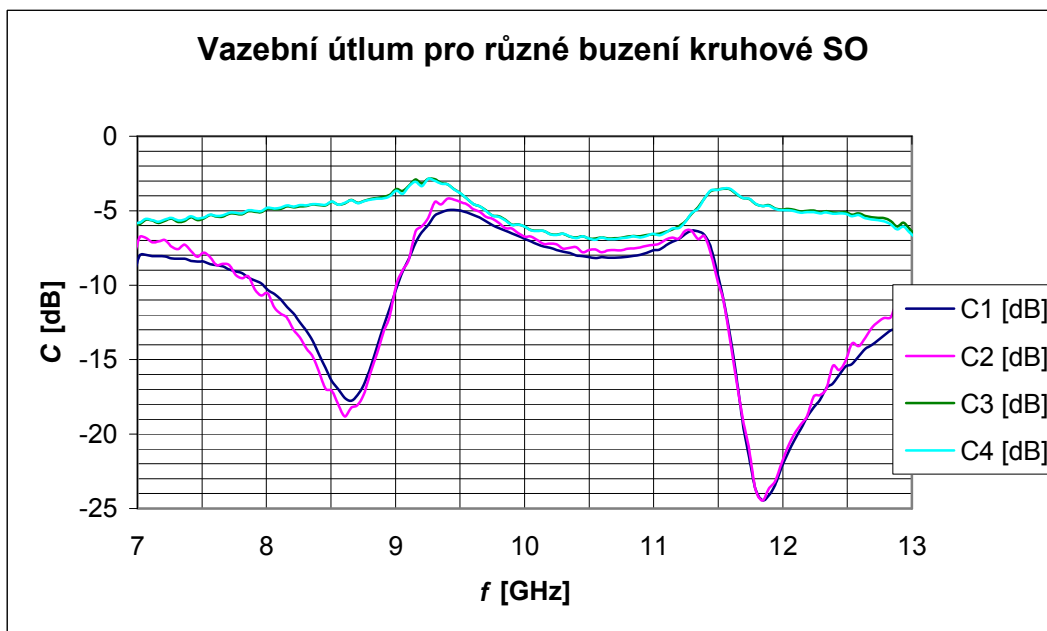
Na následujících obrázcích je srovnání jednotlivých bran. Na obr. 34 jsou činitele odrazu, které nejsou zcela stejné, avšak liší se jen nepatrně a dosahují hodnoty kolem 17 dB na 10,6 GHz. Na obr. 35 jsou poměry stojatých vln PSV jednotlivých bran, které jsou na 10,6 GHz přibližně 1,3, což samozřejmě způsobuje nedokonalé přizpůsobení a nějaké odrazy. Na obr. 35 je zobrazen vazební útlum pro buzení do jednotlivých bran. Např.  $C_1$  označuje vazební útlum při buzení do brány 1,  $C_2$  vazební útlum při buzení do brány 2 atd. Tyto útlumy jsou téměř shodné, tedy symetrie SO není zcela špatná, ale celkem dobrá. Z obr.33, 34 a 35 je patrné podobné chování dvojic bran 1, 2 a 3, 4.



Obr. 34 Činitele odrazu jednotlivých bran kruhové SO



Obr. 35 PSV na jednotlivých branách kruhové SO



Obr. 36 Vazební útlum pro buzení do jednotlivých bran kruhové SO

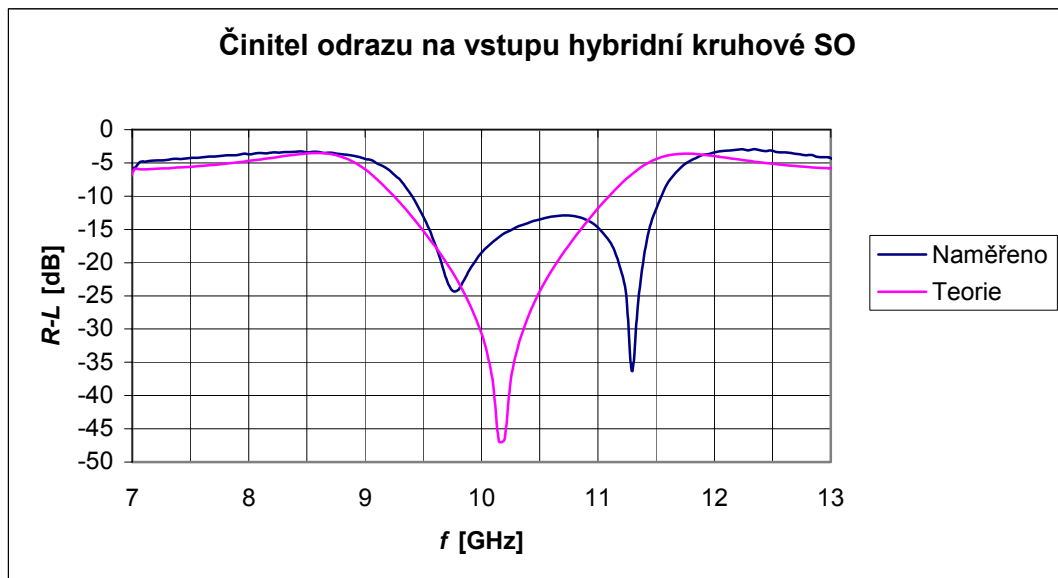
#### 5.4 Hybridní kruhová SO

Tato odbočnice byla také navržena na pracovním kmitočtu 10 GHz. Platí pro ni  $C = IL = 3$  dB, materiálové konstanty a parametry jsou stejné jako v předchozím případě.

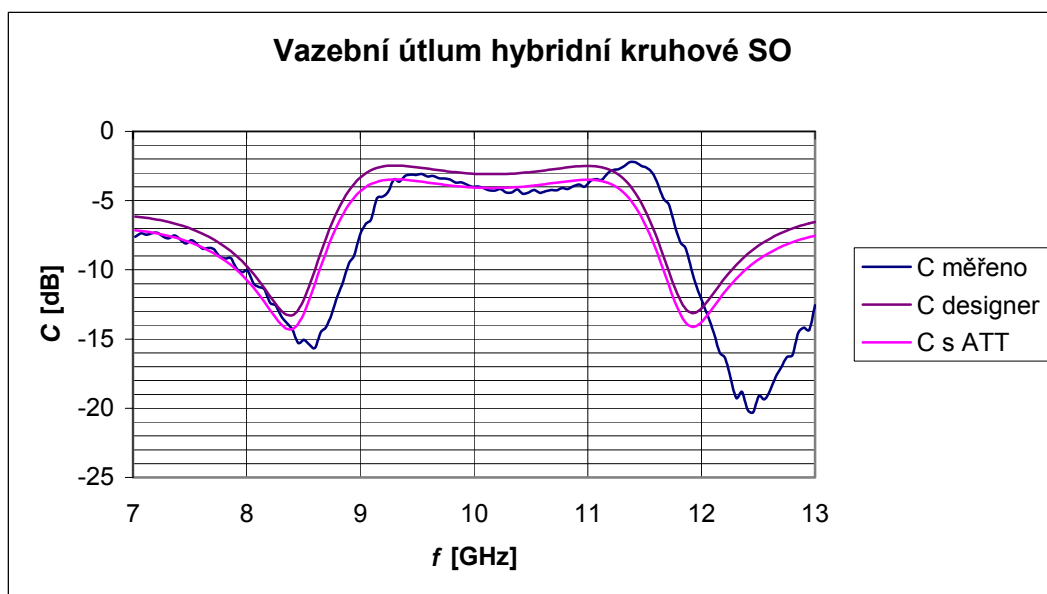
Nejsou zde již vloženy všechny srovnávací charakteristiky. Kompletní srovnávací charakteristiky jsou na CD v souboru *Naměřené výsledky.xls*.

Na obr. 37 je činitel odrazu na vstupu hybridní kruhové SO, který je pro reálnou SO na kmitočtu 10,5 GHz přibližně 14 dB, což není příliš velká hodnota. Je také patné, že při simulaci dochází ke kmitočtovému posuvu doprava přibližně o 250 MHz, což odpovídá frekvenčnímu posuvu u naměřených charakteristik. Na obr. 38 je vazební útlum této odbočnice a u reálné SO je o 1,5 dB menší, než odpovídá teoretickému průběhu. Chyby vnesené do realizace a měření jsou stejné jako u předchozí SO. Navrhovaný vazební útlum

(3dB) se od naměřeného (4,5 dB) liší o 1,5 dB, ale pokud připočteme 1,2 dB jako útlumy konektorů (viz charakteristiky na obr. 58), je výsledná chyba nepatrná, obdobně samozřejmě útlum vložný.

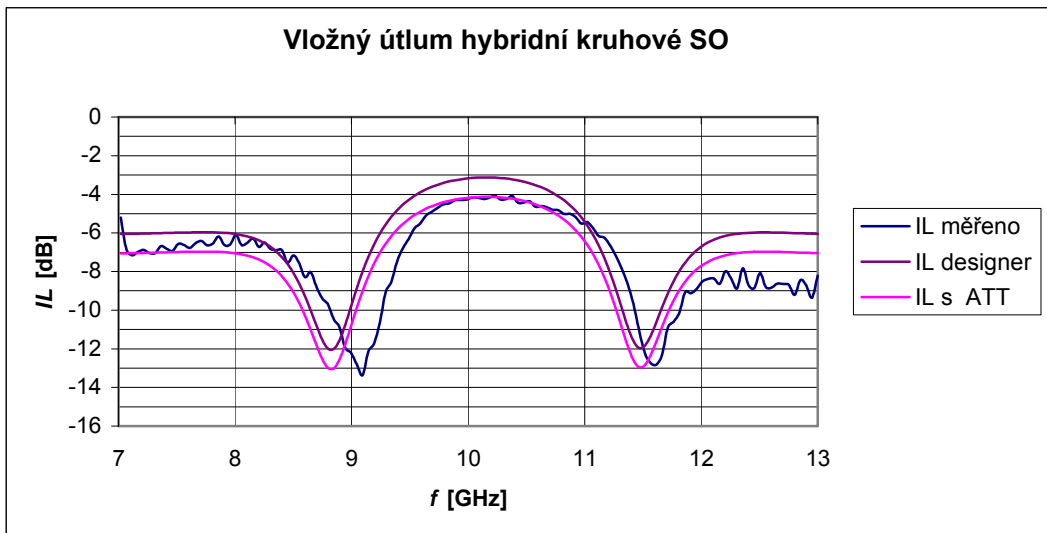


Obr. 37 Činitel odrazu na vstupu hybridní kruhové SO

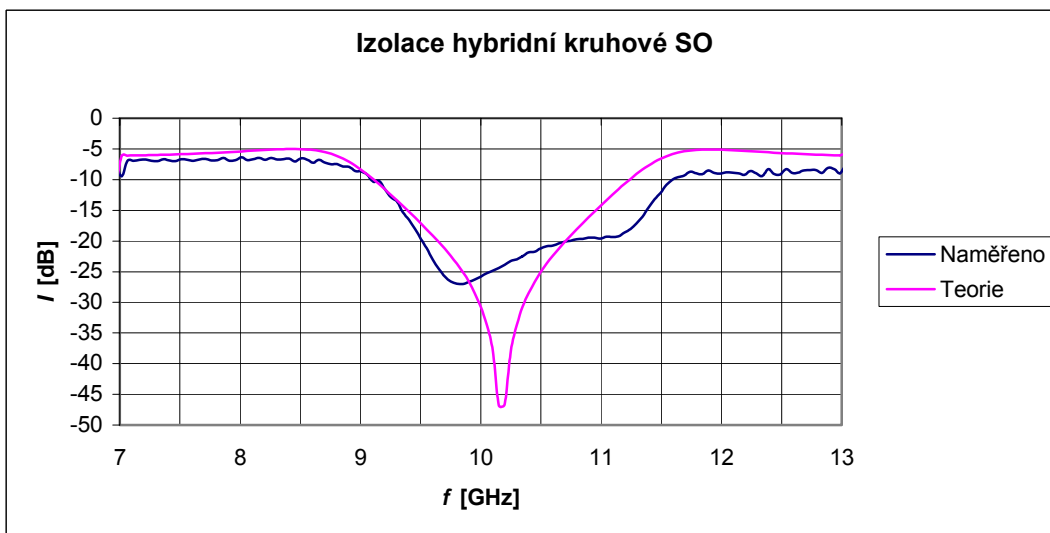


Obr. 38 Vazební útlum hybridní kruhové SO

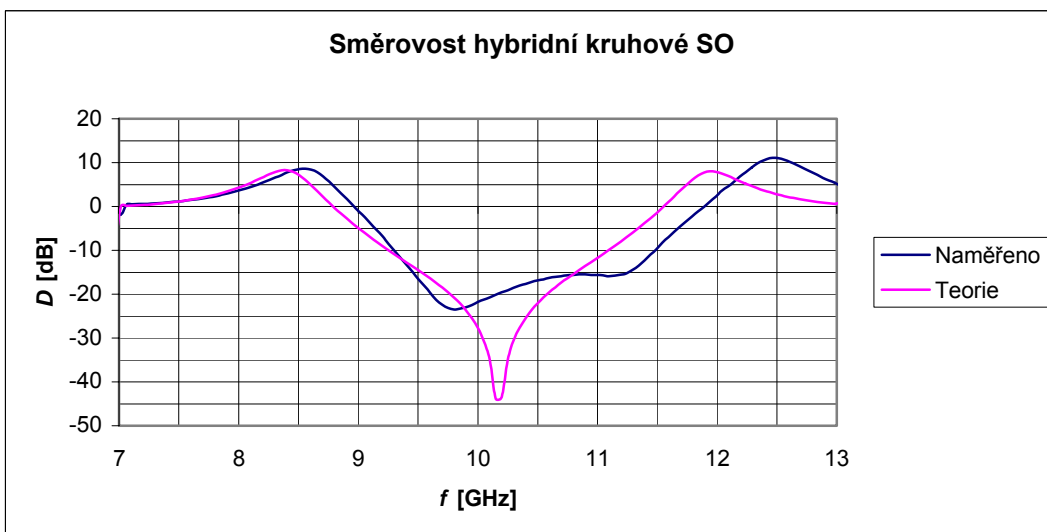
Obr.39 ukazuje průběh vložného útlumu, který je přibližně 4,2 dB a je téměř shodný s hodnotou simulovanou se zahrnutými útlumy. Na obr. 40 je izolace, která je kolem 20 dB, což není špatná hodnota, když větší hodnota by byla zcela jistě lepší z hlediska pronikání signálu do izolované brány. Naměřená izolace je přibližně poloviční, než izolace simulovaná. Na obr. 41 vidíme směrovost, která je přibližně 17 dB. Teoretická směrovost je opět kolem 100 dB.



Obr. 39 Vložný útlum hybridní kruhové SO

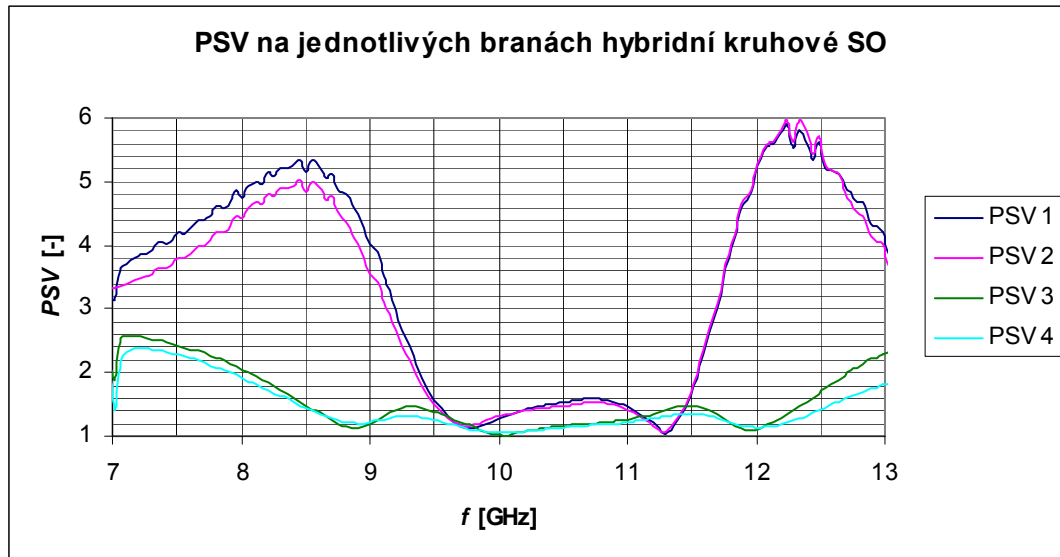


Obr. 40 Izolace hybridní kruhové SO



Obr. 41 Směrovost hybridní kruhové SO

Na obr. 42 jsou *PSV* jednotlivých bran, které jsou přibližně 1,5, což opět vnáší určité nepřizpůsobení na vstupních branách. Z tohoto obrázku je patná podobnost bran 1, 2 a bran 3, 4. Tuto podobnost bychom však lépe chápali z tvaru kruhové odbočnice, která nemá všechny mikropásky stejně široké.

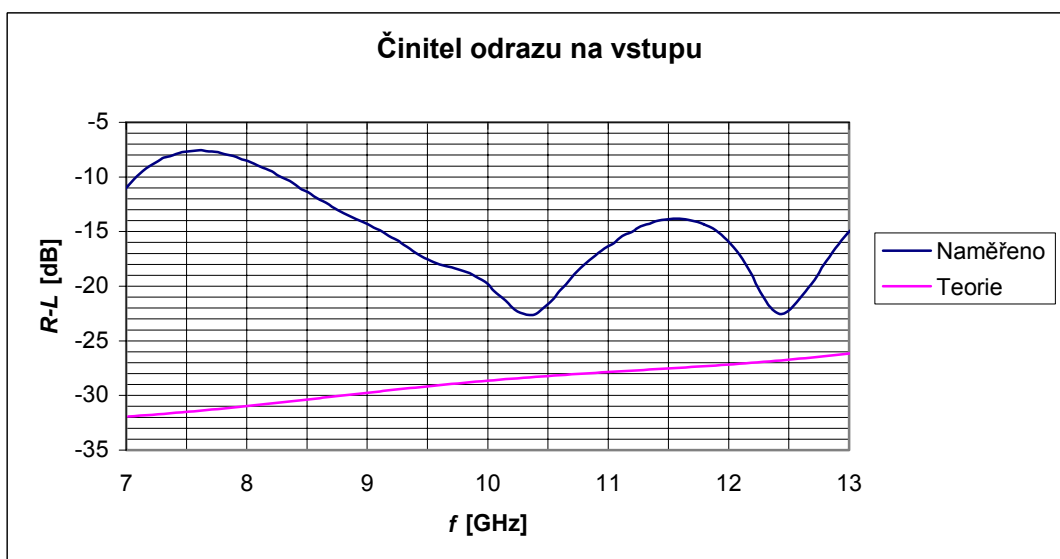


Obr. 42 *PSV* na jednotlivých branách hybridní kruhové SO

### 5.5 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

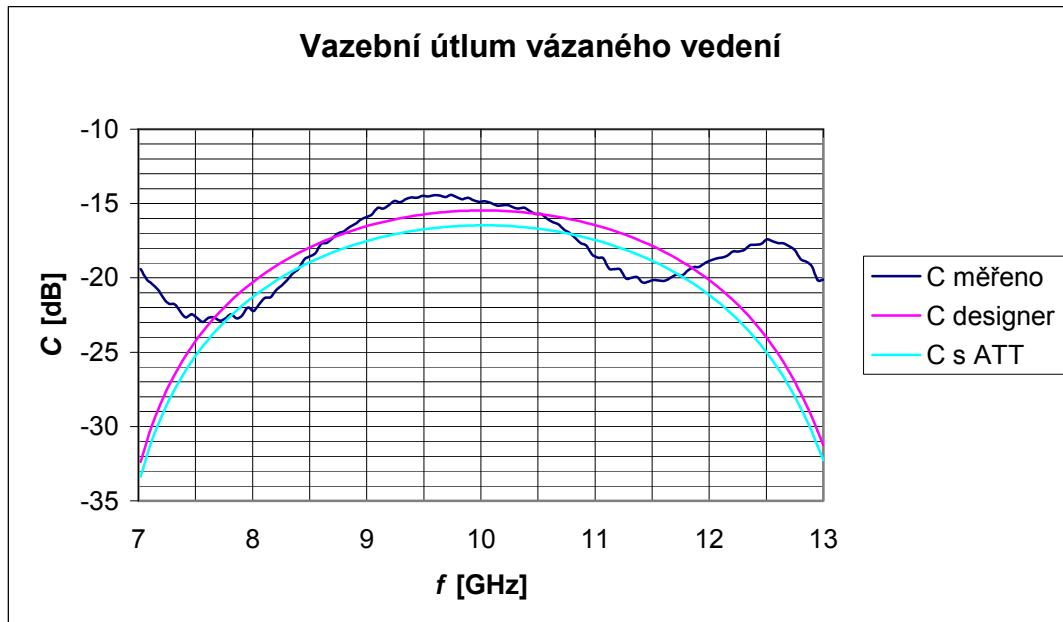
Tato odbočnice by la navržena na pracovní kmitočet 10 GHz s vazebním útlumem  $C = 15$  dB. Z důvodu výroby byl zvolen tak „velký“ vazební útlum.

Na obr.43 vidíme průběhy naměřeného a simulovaného činitele odrazu. Na středním kmitočtu je simulovaná hodnota kolem 30 dB, kdežto změřená hodnota dosahuje 20 dB. Z tohoto grafu neměřené charakteristiky, že maximální pokles je na kmitočtu přibližně 10,4 GHz a to 22,5 dB. Myslím si, že činitel odrazu na vstupu 20 dB je poměrně slušná hodnota, když samozřejmě vyšší hodnota by byla ještě lepší.



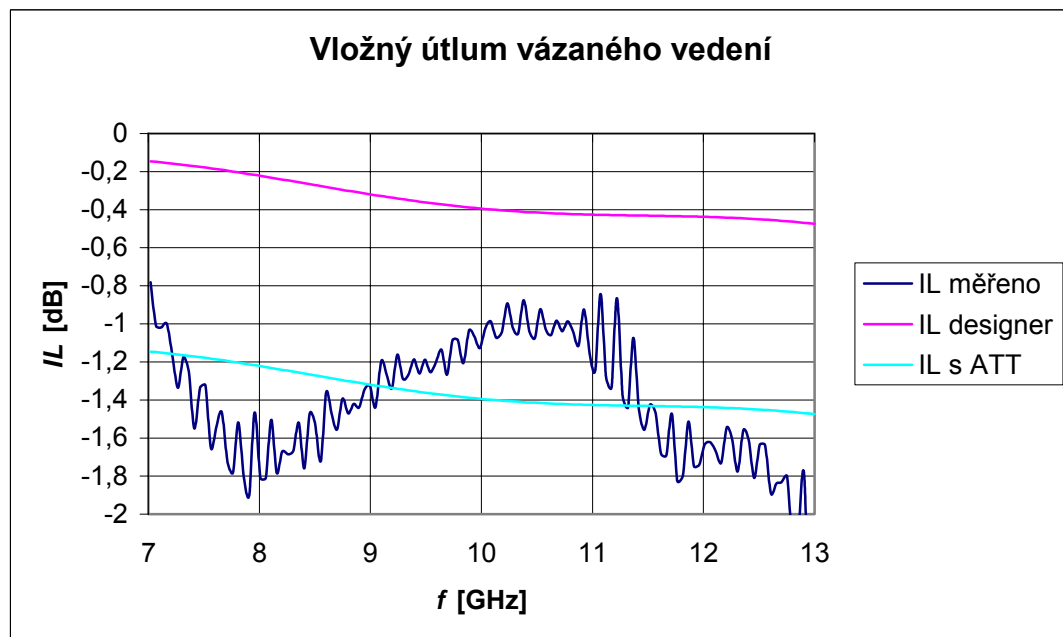
Obr. 43 Činitel odrazu na vstupu odbočnice z vázaných vedení

Na obr. 44 vidíme průběhy vazebního útlumu. Vidíme, že vazební útlum změřený má na 10 GHz vazební útlum 15 dB, což přesně odpovídá návrhu. Budeme-li uvažovat, že je do měření vnesen útlum konektorů, pak teoretická hodnota vazebního útlumu činí 14 dB. Teoretická hodnota s uvážením útlumů činí hodnota 16,5 dB.



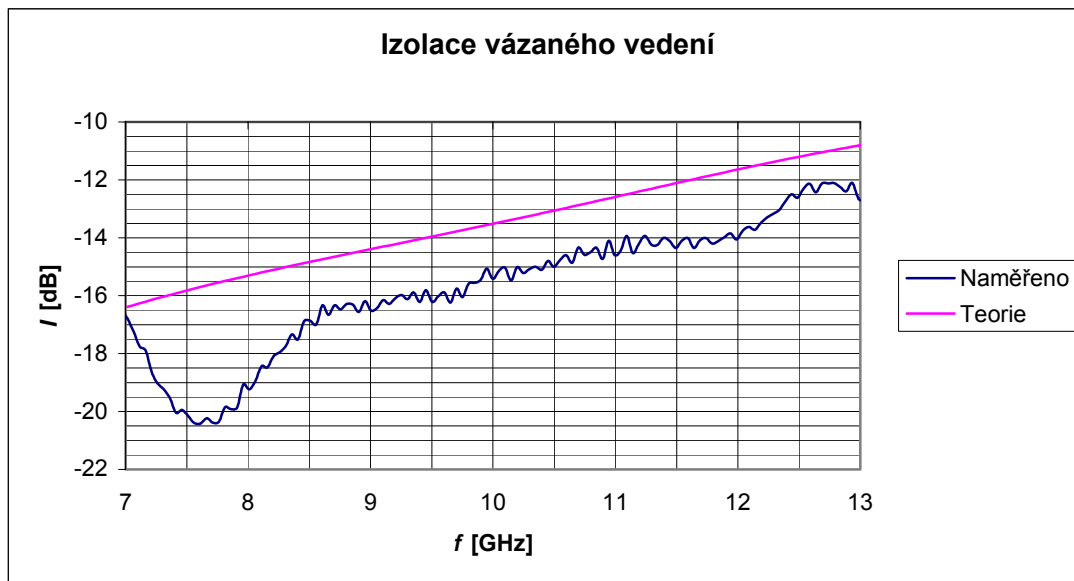
Obr. 44 Vazební útlum odbočnice z vázaného vedení

Na obr. 45 vidíme průběhy vložného útlumu. Zde se průběh teoretický (s uvážením ztrát) blíží k průběhu naměřenému, pokud uvážíme, rozlišení osy. Velikost vložného útlumu je 1 dB naměřená hodnota a 1,4 dB hodnota teoretická.



Obr. 45 Vložný útlum vázaného vedení

Izolace vázaného vedení je zobrazena na obr. 46. Naměřená i simulovaná hodnota se liší o necelé 2 dB, což lze považovat za dostatečně přesné. Naměřená izolace v tomto případě dosahuje lepší hodnoty, než byla simulací očekávána.



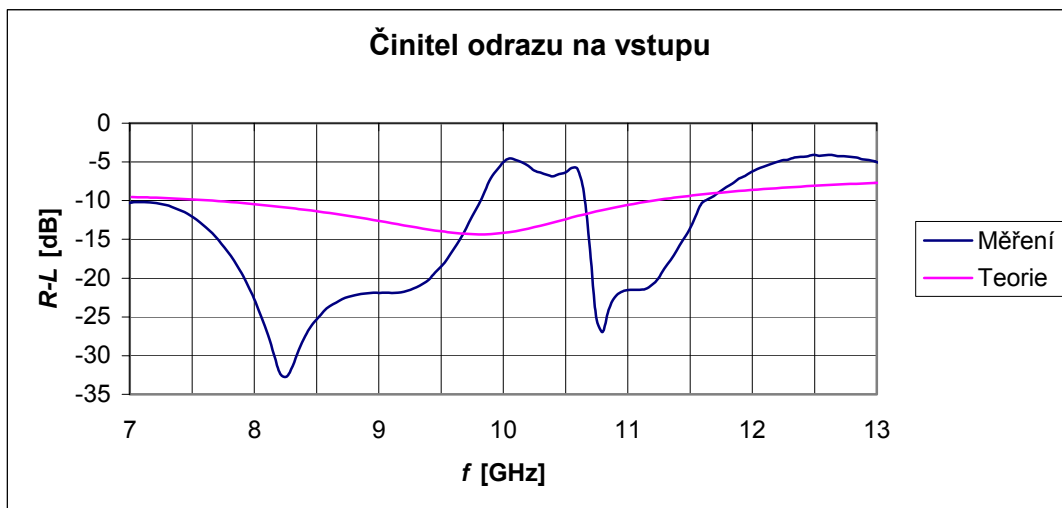
Obr. 46 Izolace vázaného vedení

Pokud bychom chtěli vynést závislost směrovosti, došli bychom k závěru, že směrovost je kladná, neboť izolace je menší, než vazba, což je vidět na obr. 24. Potom tedy rozdíl  $D = I - C$  je kladný ( $I$  i  $C$  jsou záporná čísla). Situace by byla jiná a směrovost by byla záporná, pokud by vazební útlum nebyl tak velký, ale toho bohužel v našich technologických podmínkách nelze dosáhnout.

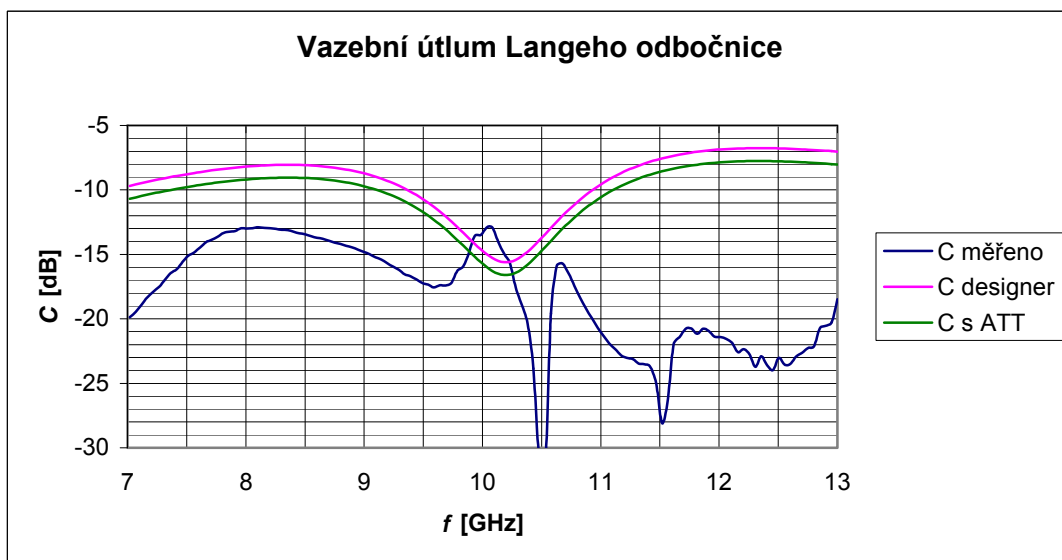
## 5.6 Langeho odbočnice

Tato odbočnice byla navržena na kmitočtu 10 GHz pro vazební útlum  $C = 8$  dB, aby ji bylo možno bezproblémově realizovat s našimi technologickými možnostmi. V praxi jsou tyto odbočnice určeny pro malý vazební útlum, ale velikost mezery mezi mikropáskou je pak velmi malá a nároky na přesnou výrobu jsou velké a v našich podmínkách nerealizovatelné. I přesto je vazební útlum menší, než u odbočnice z vázaných mikropáskových vedení. Pokud bychom zvýšili počet prstů se stejnou vazební mezerou, dosáhneme menšího vazebního útlumu.

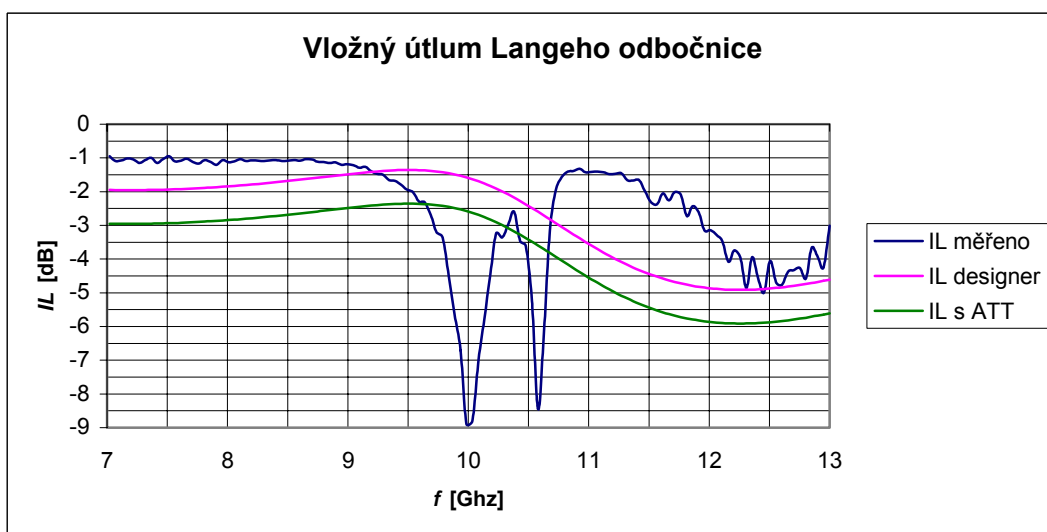
Na obr. 47 je činitel odrazu na vstupu. Je vidět, že skutečný střední kmitočet se posunul na hodnotu 8,25 GHz, kde je naměřený činitel odrazu nejmenší. Ve skutečnosti je činitel odrazu třikrát větší než teorie. Kmitočtový posun je vidět i z charakteristik vazebního útlumu (obr.48) a to nejen měřených, ale i simulovaných pro průměr drátku 0,5 mm. Na kmitočtový posun má totiž propojovací drátek velmi velký vliv. Aby se simulace ztotožnila s měřením, museli bychom laborovat s nastavením parametrů průměru drátku, vzdáleností propojovacích drátků, průměrem pocínovaných plošek pro tyto drátky. Je jasné, že tyto parametry mají na tuto odbočnici zásadní vliv. Proto je naměřený vazební útlum 13 dB, ale tvar charakteristiky je zachován. Ukázka přesné simulace se zohledněním všech různých parametrů je na obr. 50 [6], jedná se o profesionální návrh a výrobu této SO.



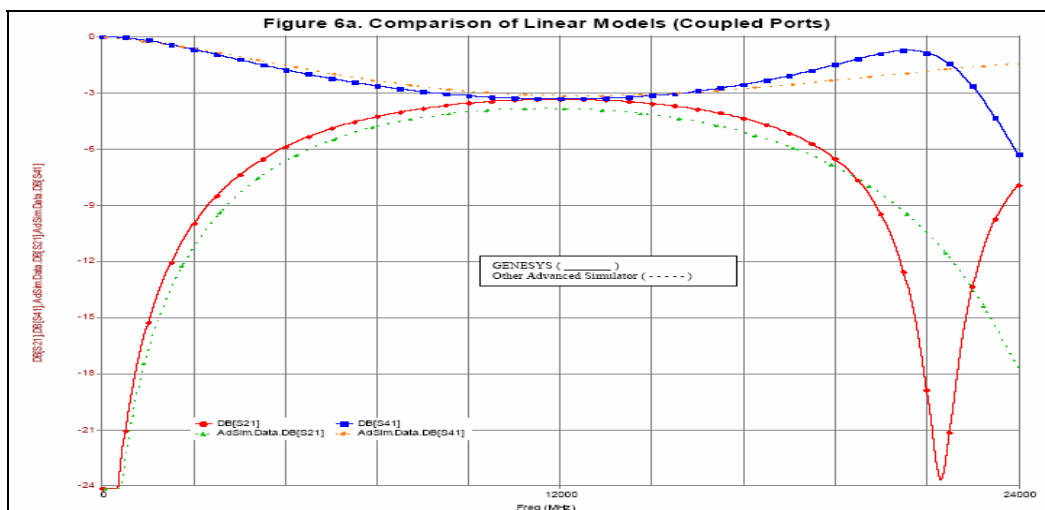
Obr. 47 Činitel odrazu na vstupu Langeho odbočnice



Obr. 48 vazební útlum Langeho odbočnice



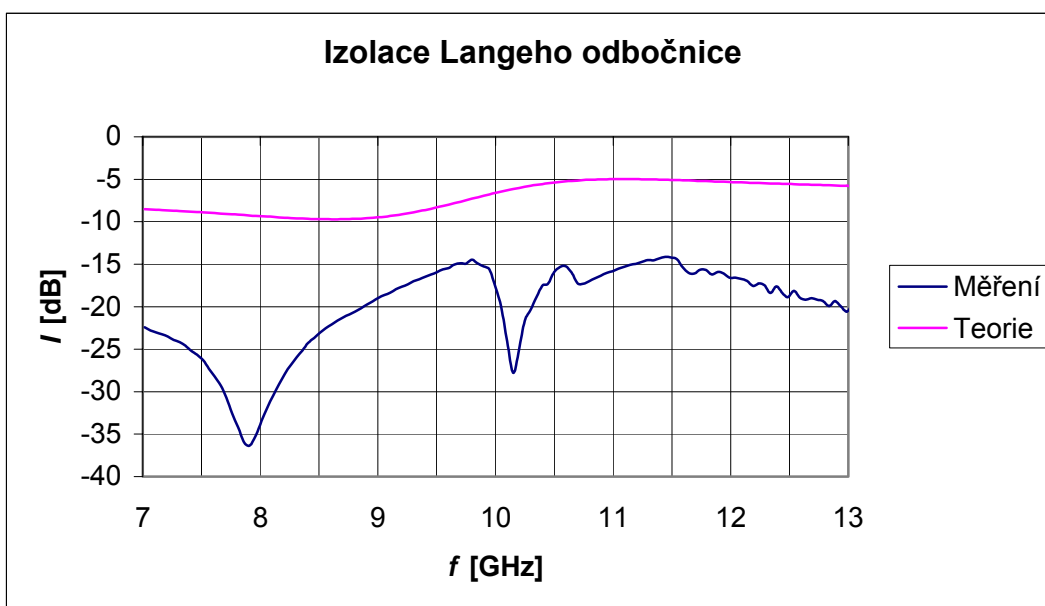
Obr. 49 Vložný útlum Langeho odbočnice



Obr. 50 Ukázka přesné simulace Langeho odbočnice  $C = IL = 3$  dB

Z obr.49, kde je zobrazen vložný útlum Langeho odbočnice, je vidět, že skutečný vložný útlum je naopak menší, než simulace.

Izolace je zobrazena na obr. 51 a je z něj vidět, že izolace dosahuje ve skutečnosti čtyřnásobku teorie.



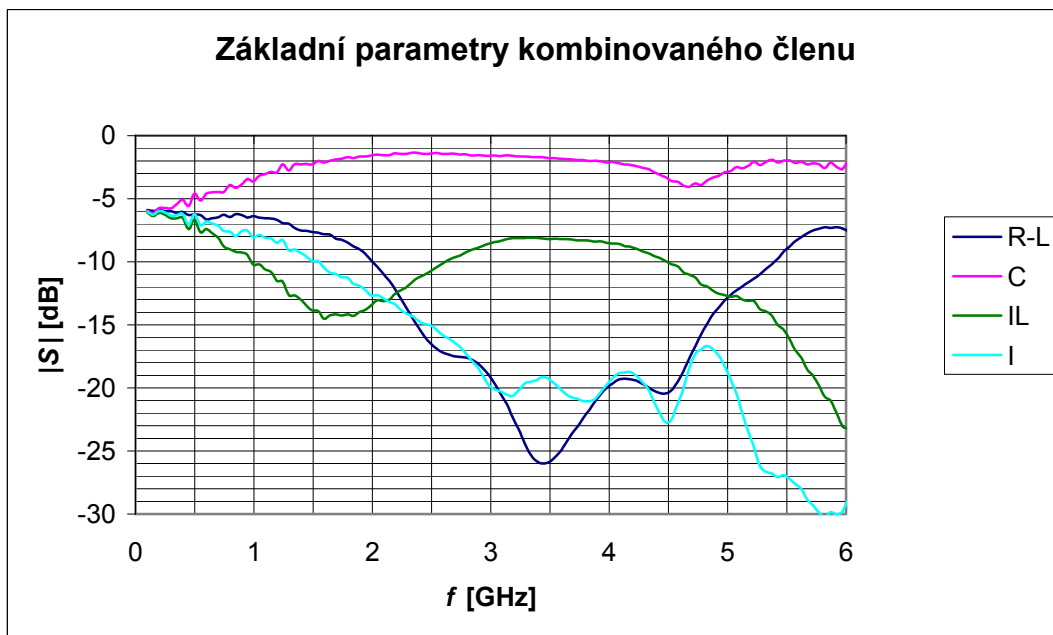
Obr. 51 Izolace Langeho odbočnice

Odchytky, které jsou mezi simulací a naměřenými výsledky, jsou způsobené použitým drátovým propojením jednotlivých prstů, které má velký vliv na parametry odbočnice, avšak podobnost průběhů je zachována.

### 5.7 Kombinovaný člen (De Rondelo člen)

Kombinovaný člen byl navržen podle kapitoly 4.6 na pracovní kmitočet 3 GHz, na kterém je vypočtený vazební útlum  $C = 1,54$  dB podle postupu uvedeného v téže kapitole.

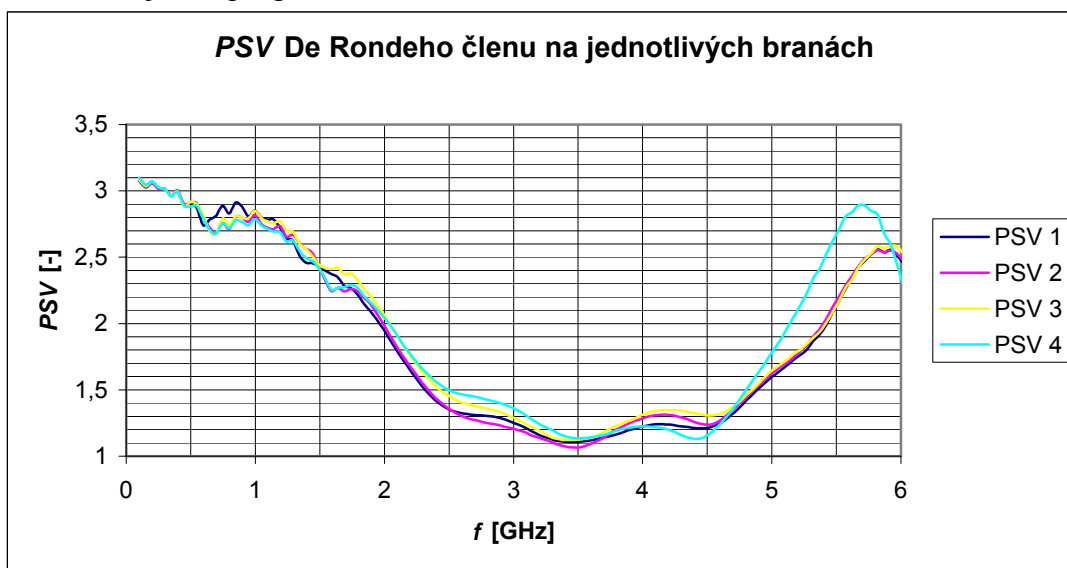
Na obr. 52 jsou nejdůležitější parametry De Rondelo členu.



Obr. 52 Charakteristiky kombinovaného členu

Z charakteristik na obr.52 je patrné, že vazební útlum kombinovaného členu je 1,59 dB, což téměř zcela odpovídá teoretickým hodnotám. Možností, proč je tato hodnota přesná a u ostatních SO ne, je několik. První úvahou by mohlo být to, že použité konektory nemají na tomto kmitočtu takový útlum, což se potvrdilo i u čtvercových odbočnic. Další roli by mohla hrát šterbina na spodní straně mikropásku, která je buď navržena zcela přesně a nebo pokud ne, tak je zcela náhodou vhodně umístěna při výrobě, protože její poloha pod středem mikropásku hraje významnou roli při vazbě mezi branami. Vložný útlum je 8,4 dB. Činitel odrazu na vstupu a izolace jsou shodně kolem 20 dB. Činitelé odrazu na ostatních branách jsou kolem hodnoty 25 dB. Na obr. 53 jsou *PSV* na jednotlivých branách, které jsou přibližně 1,3 na kmitočtu 3 GHz a jsou téměř totožné pro všechny brány a lze tedy považovat obvod jako celek za dostatečně přizpůsobený a reciproční.

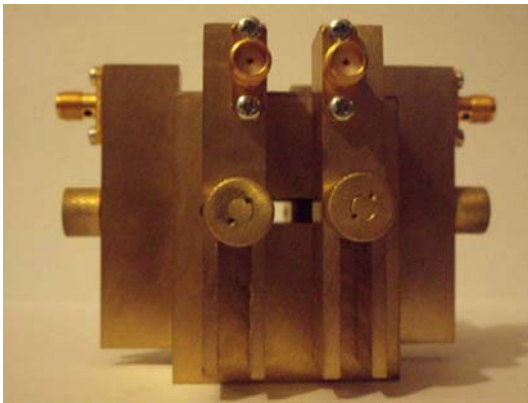
Tuto odbočnici nelze bohužel v uvedených programech simulovat, proto se musíme spokojit pouze s naměřenými výsledky. Kombinovaný člen by zřejmě šel simulovat např. v Matlabu nebo jiném programu.



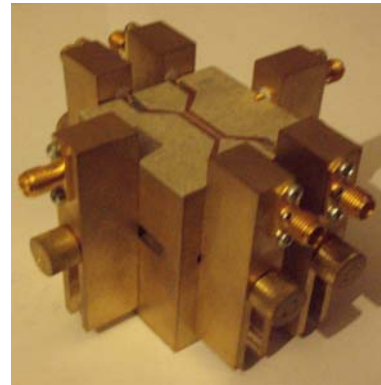
Obr. 53 *PSV* na jednotlivých branách kombinovaného členu

## 6. Univerzální držák

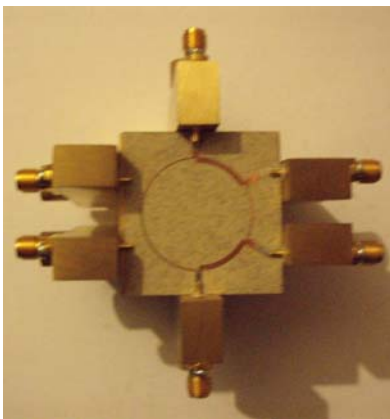
Pro účely použití vyrobených směrových odbočnic jako laboratorní přípravky, byl navržen podle inspirace na internetových stránkách, které se věnují návrhům a výrobě různých držáků [7], univerzální držák pro všechny popsané typy směrových odbočnic. Tento držák nám umožňuje ušetřit spoustu konektorů. Ukázka tohoto držáku je na obr. 54, 55, na kterých je boční pohled. Na obr. 56, 57 je ukázka uchycení odbočnice kruhové a odbočnice z vázaného vedení. Tento držák umožňuje uchycení podložek rozměrů 40 x 40 mm až téměř do okrajů, neboť pohyblivé části konektorů lze natáčet. Konektory jsou na své pohyblivé části umístěny na okraji, aby bylo možno docílit jejich poloze co nejbližší ke středu a nebo po jejich přehození mít piny konektorů co nejvíce k okraji dielektrické podložky.



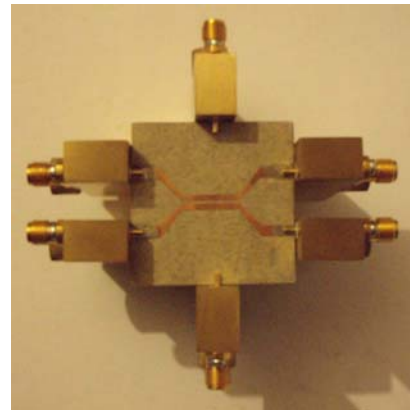
Obr. 54 Boční pohled na držák



Obr. 55 Boční pohled na držák



Obr. 56 Uchycení kruhové SO

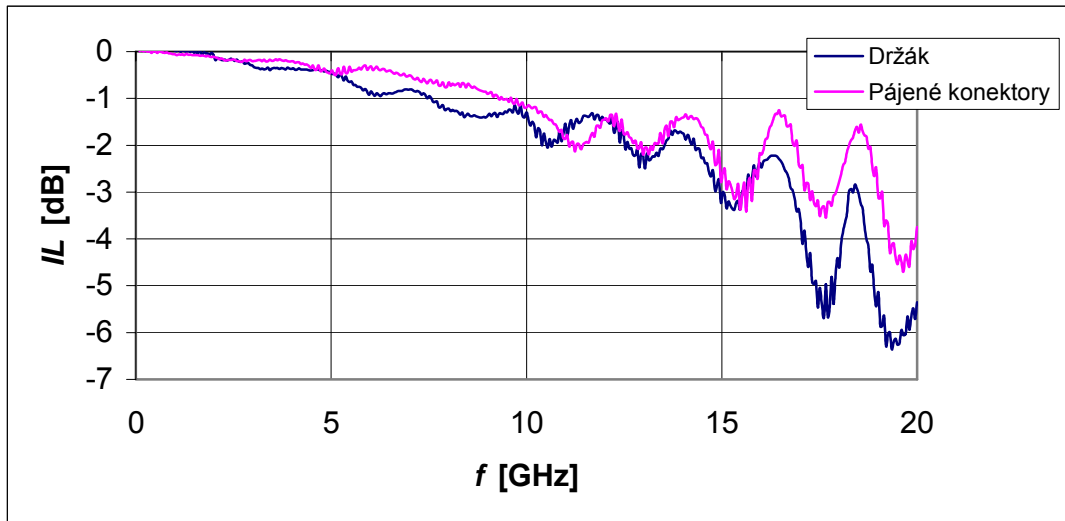


Obr. 57 Uchycení vázaného vedení

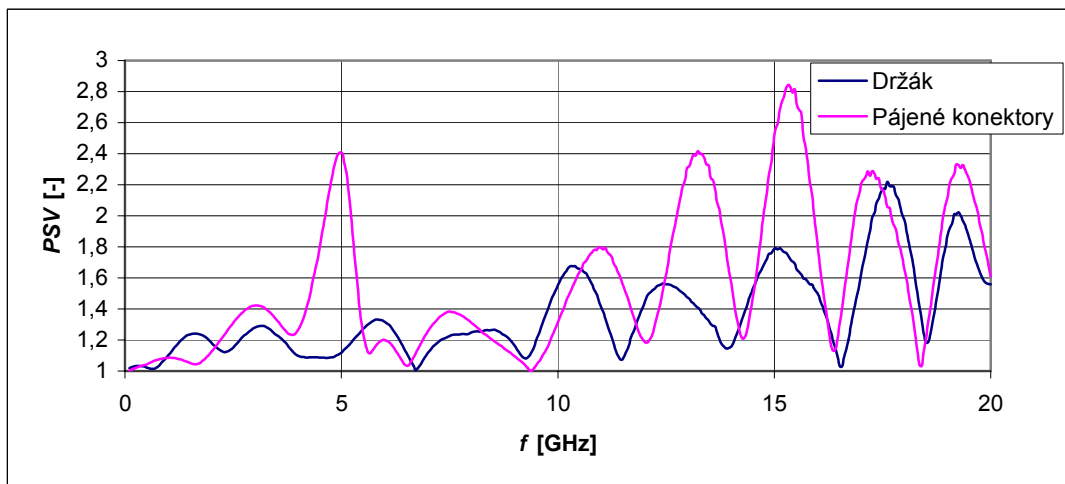
Měřením bylo ověřeno, že při dostatečném přitlačení (aby se konektory nepohybovaly) lze dosáhnout velmi podobných parametrů jako u pájených konektorů. Následující obrázky ukazují srovnání pájených konektorů a držáku, tedy konektor – mikropásek – konektor. Obr. 58 ukazuje srovnání vložného útlumu, který je do cca 16 GHz téměř stejný pro obě možnosti připojení. Nad tento kmitočet je útlum pájených konektorů přibližně o 2 dB menší, než u držáku. Činitel odrazu na vstupu na obr. 60 lze považovat za nepříliš odlišný pro pájené konektory a držák. Překvapivě lepších hodnot dosahuje držák v poměru stojatých vln. Tato charakteristika na obr. 59 nevykazuje ostré zákmity jako pájené konektory.

Na téměř všechny typy odbočnic nebude mít tedy držák velmi podobné parametry jako pájené konektory. Výjimkou bude kombinovaný člen, neboť zemnicí plocha tvořena držákem

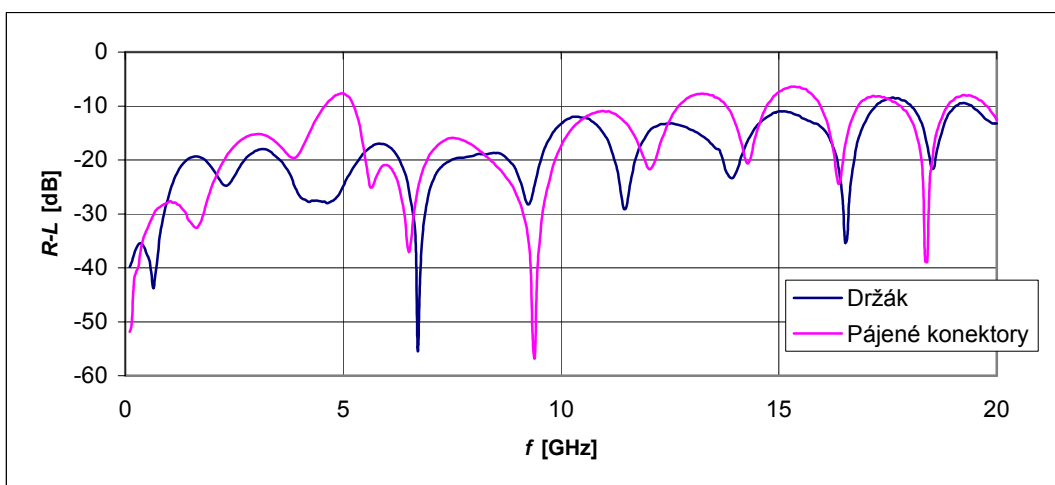
je v těsné blízkosti štěrbině a bude ovlivňovat elektromagnetické pole kolem ní a tedy i její parametry ( impedance, útlumy).



Obr. 58 Srovnání vložného útlumu pro držák a pájené konektory

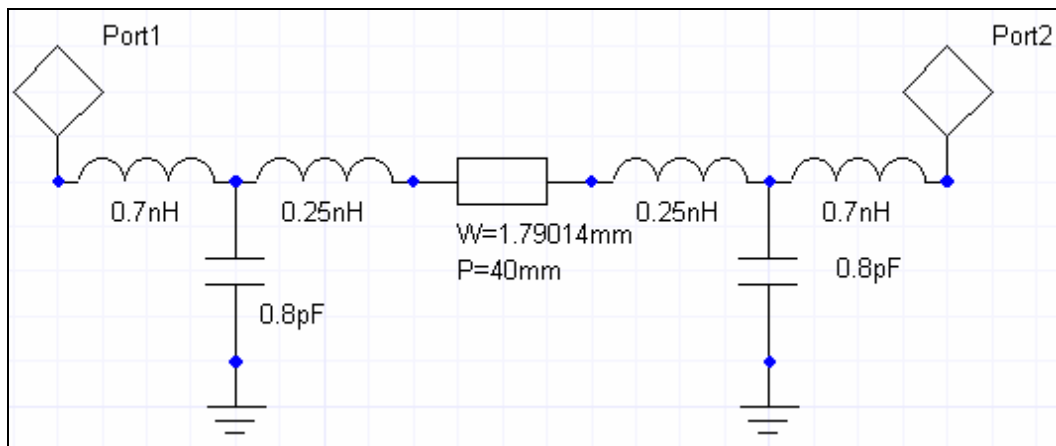


Obr. 59 Srovnání poměru stojatých vln pro držák a pájené konektory



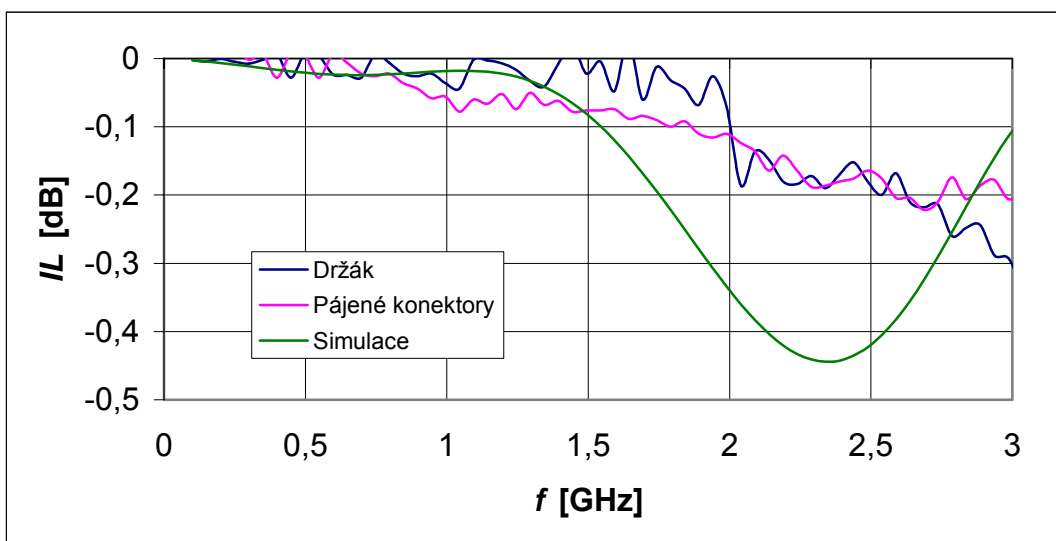
Obr. 60 Srovnání činitele odrazu pro držák a pájené konektory

Dle [8] lze konektor SMA nahradit do kmitočtu 3GHz jeho náhradním schematem podle obr. 61, kde jsou pro simulaci použity dva konektory SMA a mezi ně je vložen 50Ω mikropásek délky 40mm, aby se tato simulace dala srovnat s parametry univerzálního držáku (rozměry držáku jsou právě 40mm) i pájenými konektory.



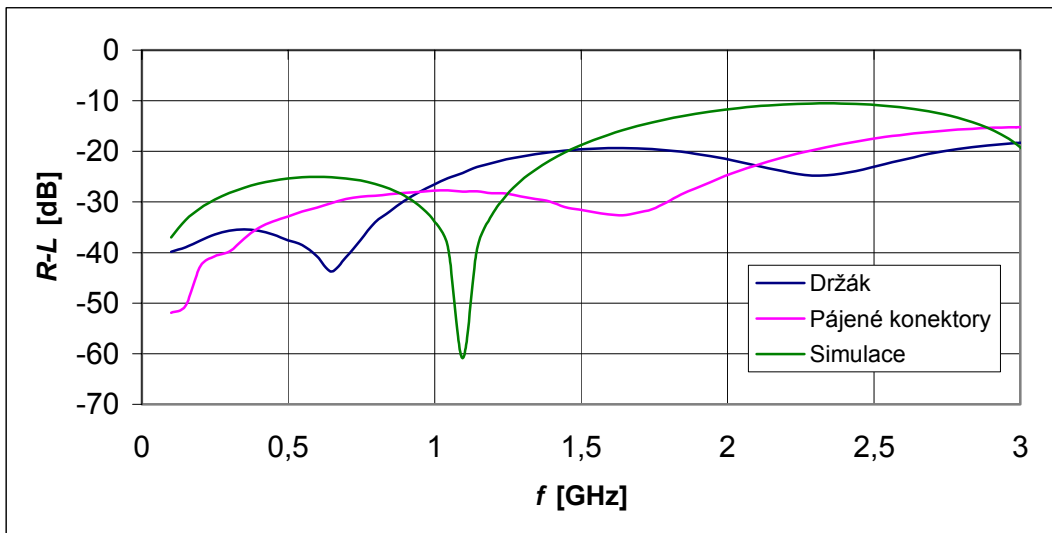
Obr. 61 Náhradní schema konektoru SMA

Srovnání simulace, držáku a pájených konektorů je na obr. 62, kde jsou příslušné závislosti vložného útlumu těchto jednotlivých „soustav“ konektor – mikropásek – konektor. Pokud vezmeme v úvahu rozlišení vertikální osy, tak můžeme říci, že náhradní schema se velmi přesně shoduje s naměřenými parametry s rozdílem nízkých jednotek desetin decibelu.



Obr. 62 Srovnání vložného útlumu simulace, držáku a pájených konektorů

Na obr. 63 je podobné srovnání pro zpětný útlum, ze kterého je vidět velká podobnost charakteristik. Pájené konektory a držák mají téměř shodný zpětný útlum, simulace se na určitých kmitočtech od těchto dvou charakteristik liší více.



Obr. 63 Srovnání zpětného útlumu simulace, držáku a pájených konektorů

## 7. Laboratorní úloha

### Mikropáskové vazební směrové a hybridní členy

Úkolem této laboratorní úlohy je seznámit se se základními parametry mikropáskových směrových odbočnic a s jejich základním návrhem, simulací a měřením.

#### Zadání:

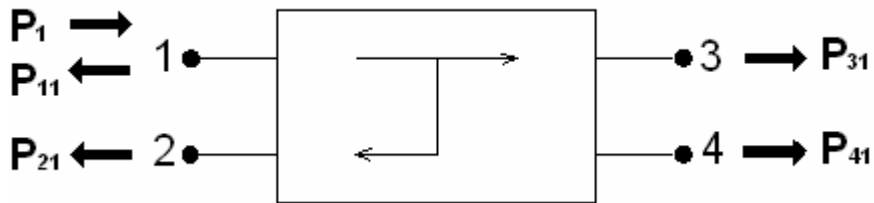
- 1) Pro dané typy směrových odbočnic (dále jen SO) změřte pomocí obvodového analyzátoru Anritsu 54147A jejich základní parametry v okolí jejich pracovního kmitočtu. Těmito parametry jsou zejména vazební útlum C, vložný útlum IL, činitel odrazu na vstupu R-L, izolace I a poměr stojatých vln PSV na vstupní bráně. Bránu, kterou nebudete při měření zrovna používat, nezapomeňte bezodrazově zakončit impedancí  $50\Omega$ . Dále z naměřených charakteristik vypočtete směrovost D. Výstupní výkon analyzátoru volte  $P_{\text{výst}} = 0$  dBm. V následující tabulce jsou uvedeny jednotlivé typy odbočnic, jejich vazební útlum C na pracovním kmitočtu f.

Typ SO	C [dB]	f [GHz]
Čtvercová	6	1,5
Hybridní čtvercová	3	1,5
Kruhová	6	10
Hybridní kruhová	3	10
Vázané vedení	15	10
Kombinovaný člen	1,5	3
Langeho	8	10

- 2) Pro materiál Arlon AR355 s  $\epsilon_r = 3,55$ , výškou substrátu  $h = 0,79$  mm, ztrátovým činitelem  $\text{tg}\delta = 0,003$ , impedance připojeného vedení  $Z_0 = 50\Omega$  navrhnete pro vazební útlum z předchozí tabulky rozměry vybraného typu směrové odbočnice. Tuto odbočnici simulujte v programu Ansoft Designer a porovnejte simulované a naměřené charakteristiky a pokuste se vysvětlit možné neshody výsledků. Pro odbočnice se středním kmitočtem 10 GHz do simulace zahrňte i útlumy konektorů a další ztráty v podobě vloženého útlumového článku mezi každý mikrovlnný port a bránu odbočnice o hodnotě 0,5 dB.
- 3) Pro hybridní čtvercovou odbočnici změřte vazební útlumy pro buzení do jednotlivých bran a v závěru pojednejte o reciprocitě odbočnice.

## Technické parametry reálné SO

Dvojnásobně reflexně symetrická SO se směrovostí 2.druhu



Matice S takovéto směrové odbočnice má tvar:

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{12} & S_{11} & S_{14} & S_{13} \\ S_{13} & S_{14} & S_{11} & S_{12} \\ S_{14} & S_{13} & S_{12} & S_{11} \end{vmatrix} \xrightarrow{\text{IDEÁLNÍ SO}} \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{13} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{12} \\ 0 & S_{13} & S_{12} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & jk & \sqrt{1-k^2} & 0 \\ jk & 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & 0 & jk \\ 0 & \sqrt{1-k^2} & jk & 0 \end{vmatrix}$$

kde  $k = |S_{12}| < 1$  ..... napět'ový koeficient vazby daný vztahem (2)

Základní parametry směrových vazebních členů:

**1. Vložný útlum** (insertion loss)

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_{31}} = 20 \log \frac{1}{|S_{31}|} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1-k^2}} \quad [dB] \quad (1)$$

**2. Vazební útlum** (coupling)

$$C = 10 \log \frac{P_1}{P_{21}} = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} = 20 \log \frac{1}{k} \quad [dB] \quad (2)$$

**3. Izolace** (isolation)

$$I = 10 \log \frac{P_1}{P_{41}} = 20 \log \frac{1}{|S_{41}|} \quad [dB] \quad (3)$$

**4. Směrovost** (directivity)

$$D = 10 \log \frac{P_{21}}{P_{41}} = 20 \log \frac{|S_{21}|}{|S_{41}|} \quad [dB] \quad (4)$$

Vztah mezi vazebním útlumem, izolací a směrovostí je:  $I = C + D$

## 5. Zpětný útlum (return loss)

$$RL = 10 \log \frac{P_1}{P_{11}} = 20 \log \frac{1}{|S_{11}|} \quad [dB] \quad (5)$$

## 6. Vstupní PSV

$$PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad [-] \quad (6)$$

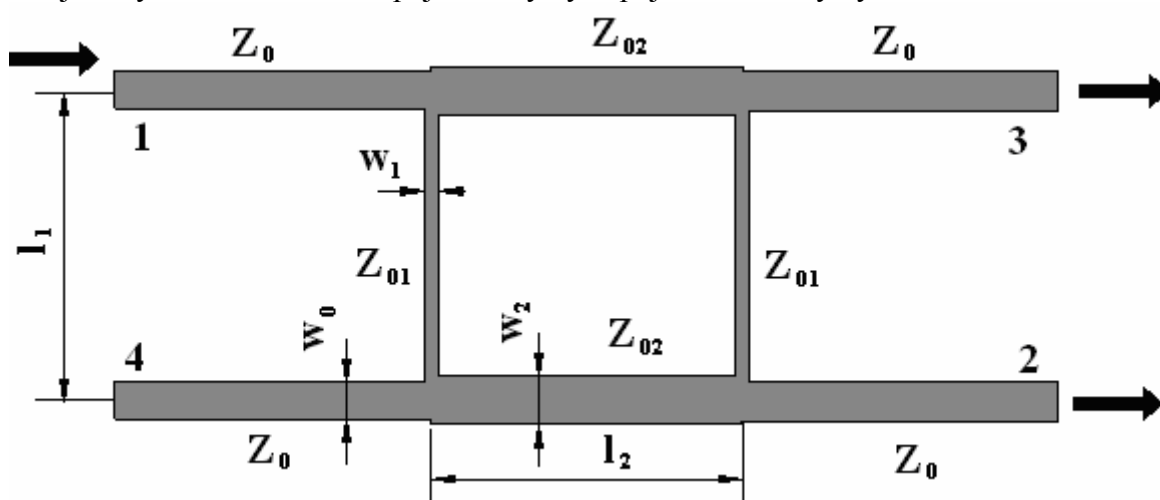
## Zjednodušený návrh směrových odbočnic

Zde se budeme zabývat návrhem směrových odbočnic pouze ve velmi zjednodušené podobě, tedy jen nezbytný počet vzorců, kterými se určí ze zadaných parametrů nejzákladnější vlastnosti mikropásků, ze kterých se pak samotné odbočnice skládají. Těmito parametry jsou většinou vlnové impedance  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$  případně impedance sudého a lichého vidu  $Z_{oo}$ ,  $Z_{oe}$ . Zbytek návrhu za nás provede program určený pro výpočet rozměrů mikropásku ze zadaných vlnových impedancí. Ve skutečnosti lze celý návrh provést ručně, ale nejedná se v některých případech o jednoduché vzorce. Základními parametry, které pro výpočet potřebujeme jsou:

- vazební útlum C
- kmitočet návrhu f
- parametry dielektrické podložky  $\epsilon_r$ ,  $\text{tg} \delta$  (dielektrické ztráty), h (výška substrátu)

## Čtvercová SO (Branch – line directional coupler)

Jak již název napovídá, jedná se o odbočnici ve tvaru čtverce. Konstrukční tvar této odbočnice je na obr. 1. Význam jednotlivých symbolů je z obrázku zcela jasný. Impedance  $Z_0$  je charakteristická impedance připojeného vedení (obvykle  $50 \Omega$ ). Šipky na obrázku nám ukazují kudy do odbočnice vstupuje a kudy vystupuje mikrovlnný výkon.



Obr. 1 Základní tvar čtvercové SO

Podle definic základních parametrů uvedených výše můžeme upřesnit význam jednotlivých útlumů přímo z tohoto obrázku. Brána 1 je tedy vstupní, na bráně 2 naměříme vazební útlum, na bráně 3 vložný útlum a brána 4 se bezodrazově zakončí impedancí  $50\Omega$ , na této bráně bychom naměřili izolaci.

Samotný návrh se tedy zjednoduší (po zanedbání některých věcí) na výpočet dvou vztahů

1) Určíme vlnovou impedanci  $Z_{02}$

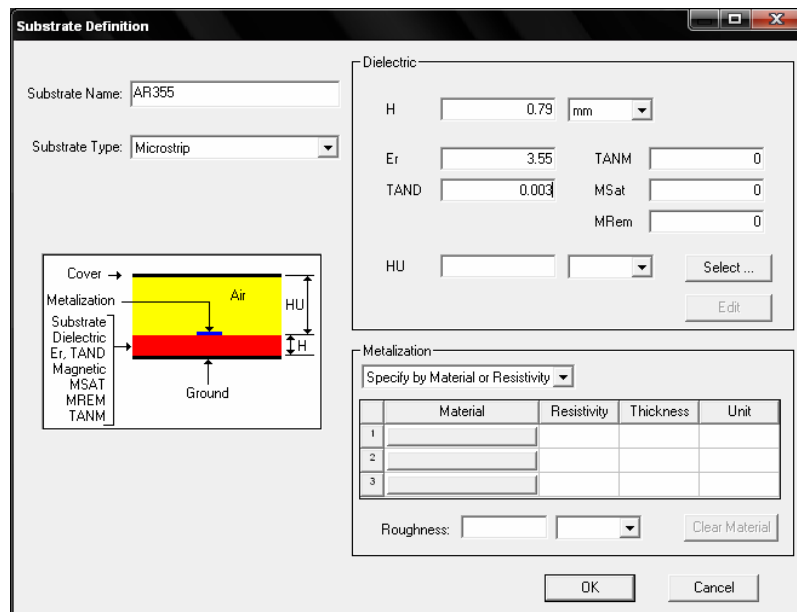
$$C = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02}}{Z_0}\right)^2}} \Rightarrow Z_{02} = Z_0 \sqrt{1 - \frac{1}{10^{\frac{C}{10}}}} \quad (7)$$

2) Z podmínky impedančního přizpůsobení určíme vlnovou impedanci  $Z_{01}$



$$\left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 = 1 \Rightarrow Z_{01} = Z_0 Z_{02} \sqrt{\frac{1}{Z_0^2 - Z_{02}^2}} \quad (8)$$

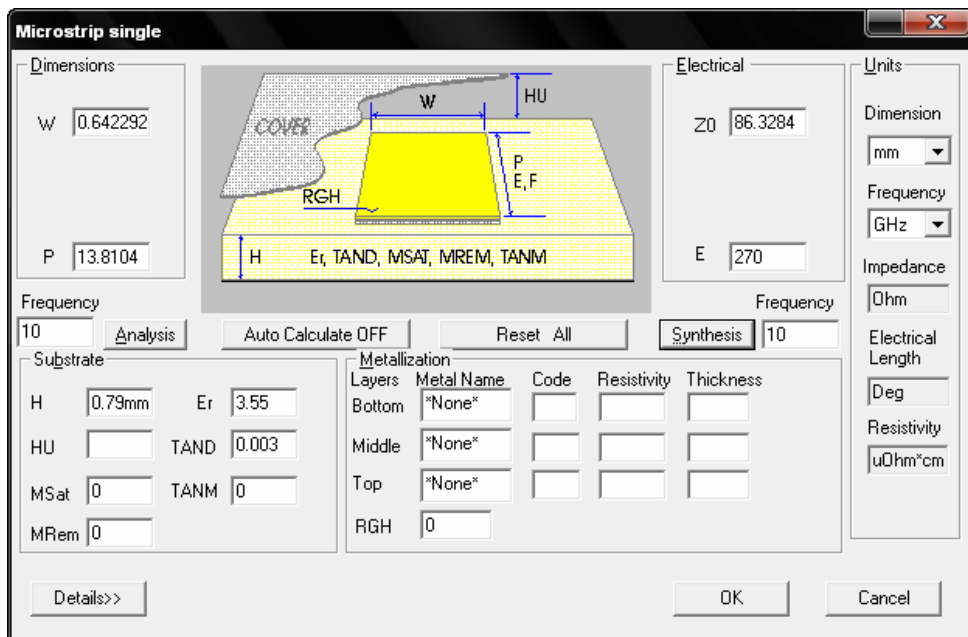
Další výpočty za nás provede některý z mnoha programů. My se budeme dále zabývat jen programem Ansoft Designer, jehož studentská verze se dá na internetu stáhnout zcela zdarma a našim požadavkům tato verze bude zcela vyhovovat. Tuto verzi lze získat ze stránek [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com) v záložce downloads/Ansoft Designer SV po uvedení údajů (jméno, mail...) vám přijde odkaz na stažení tohoto programu.

Po spuštění Designeru musíme nejprve vybrat typ projektu, v našem případě **Projekt/Insert Circuit Design** nebo v horní liště stiskneme ikonu se schematickou značkou bipolárního tranzistoru. Poté se nám objeví nabídka materiálů, pokud nenalezneme ten, který potřebujeme, vybereme jakýkoliv a materiál nastavíme později. Nejprve potřebujeme podle obr. 1 určit rozměry mikropásků z vypočtených vlnových impedancí. To provedeme následujícím postupem: **Circuit/TRL/Microstrip/Single**. Otevře se nám okno pro výběr materiálu. Pokud jsme našli již při spuštění programu náš materiál, pouze dáme **OK**, pokud jsme ho však nenašli, musíme jej nyní vytvořit a to pomocí tlačítka **New**. V následujícím okně, které se nám otevře, zadáme název našeho materiálu a jeho parametry. Ukázka tohoto okna je na obr. 3. Po zadání parametrů potvrdíme pomocí **OK** a v předchozí tabulce opět potvrdíme výběr našeho materiálu pomocí **OK**.

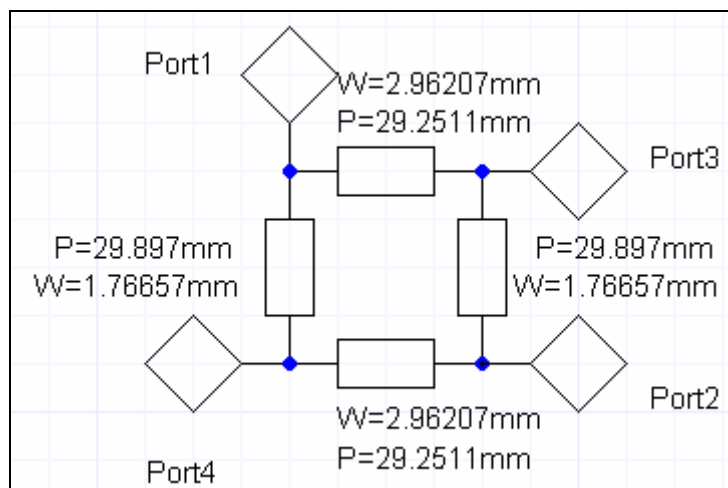


Obr. 2 Vytvoření materiálu v Designeru

Nyní se ocitneme v okně pro výpočet rozměrů mikropásku podle obr. 3, kde již máme zadaný substrát, zbývá tedy pouze zadat naši vlnovou impedanci  $Z_{01}$  do pole označeného  $Z_0$ , elektrickou délku  $E$  (v našem případě  $270^\circ$  pro vedení  $3\lambda_g/4$ ) a střední kmitočet do pravého políčka frequency, protože provádíme syntézu tak výpočet dokončíme stiskem tlačítka **Synthesis**. Vlevo výpočtového okna se nám objeví vypočtená délka mikropásku  $P$  a jeho šířka  $W$ . Stiskem tlačítka **OK** umístíme tento mikropásek na plochu. Stejným způsobem vypočteme rozměry mikropásku z druhé vlnové impedance  $Z_{02}$ . Z daných úseků sestojíme strukturu podle obr. 1 (bez přípojných vedení  $Z_0$ ). Můžeme prvky řadit buď přímo k sobě a nebo je propojit pomocí ikonky, která je vpravo nahoře a vypadá takto: . Tyto propojky se při simulaci neuvažují. Nyní zbývá pouze připojit mikrovlnné porty, jejichž ikona umístěná v pravém horním rohu vypadá takto: . Teď máme sestavenou celou strukturu (viz obr.4) a můžeme přistoupit k její simulaci. Cesta k jejímu nastavení je: **Circuit/Add Solution Setup**. Zvolíme typ analýzy **Linear Network Analysis** a kategorii **Frequency Domain**, stiskem **Next** se dostaneme k nastavení kmitočů stiskem **Add**, zadáme kmitočty a stiskneme **Add**. Dokončíme nastavení stiskem tlačítka **Dokončit**. Spustíme analýzu **Circuit/Analyze** a její průběh je vidět vpravo dole. Výsledky simulace zobrazíme **Circuit/Create Report**. Máme na výběr z několika možností. Klasický graf (rectangular plot), tabulku hodnot (data table), kterou můžeme uložit a importovat do excelu, kde porovnáme výsledky s naměřenými. Možnosti zobrazení jsou pak zcela intuitivní, máme na výběr z mnoha možností ( pro nás  $S$  parametry v dB).



Obr. 3 Výpočetní okno rozměrů mikropásku



Obr. 4 Ukázka zapojení čtvercové SO v Designeru

V knihovně bychom našli přímo prvek čtvercové SO, avšak její simulace neodpovídá realitě, proto provádíme simulaci skládáním mikropásků.

### Hybridní čtvercová SO

Jak již bylo zmíněno, u hybridních členů platí rovnost vazebního a vložného útlumu, tedy  $C = IL = 3$  dB. Tvar je stejný s obr. 1, jen šířky a délky mikropásku odpovídají jejich impedancím, které jsou pochopitelně jiné, než v předchozím případě.

Výpočet se nám opět zredukuje na výpočet dvou vztahů.

1) Určíme  $Z_{02}$

$$Z_{02} = \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

2) Určíme  $Z_{01}$

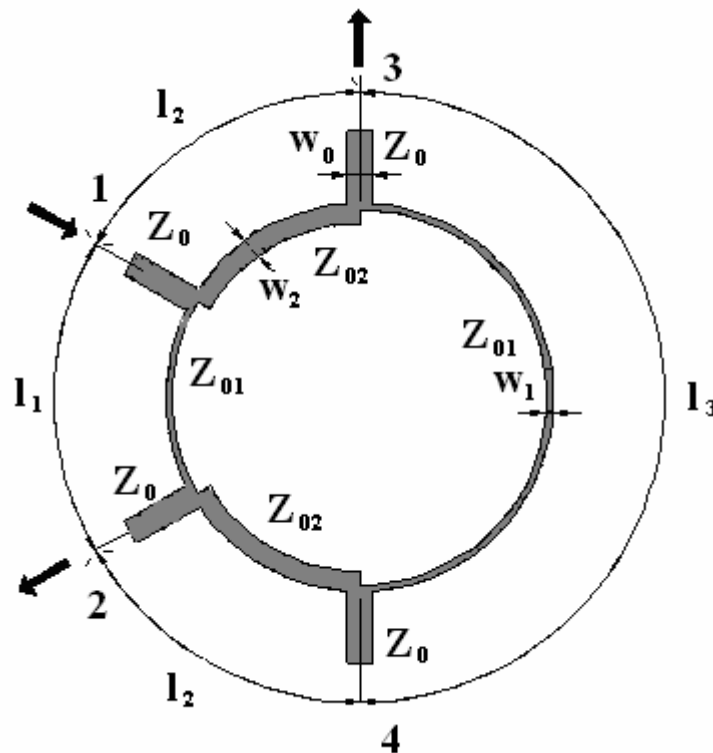
$$Z_{01} = Z_0 \quad (10)$$

Výpočet rozměrů mikropásku, nastavení simulace a zobrazení výsledků je stejný jako v předchozím případě.

### Kruhá SO (prstencové , ring directional coupler, rat-race coupler)

Základní konstrukční řešení vyplývá již názvu, je tvořeno kruhem složeného z kruhových oblouků širokých a dlouhých podle příslušné vlnové impedance daného úseku mikropáskového vedení. Typický tvar je na obr. 5.

Jedná se o směrovou odbočnici s jednou rovinou symetrie. Odbočnice má směrovost 2.druhu. Celková délka prstence je  $3\lambda_g/2$ , neboť  $l_1, l_2$  jsou čtvrtvlnné úseky vedení  $Z_{v1}, Z_{v2}$ , tedy  $l_1 = \lambda_{g1}/4, l_2 = \lambda_{g2}/4$  a délka  $l_3 = 3\lambda_{g1}/4$ . Pro takto dlouhé úseky vedení je maximální a nejméně kmitočtově závislá vazba  $k$ . Pro velmi krátké úseky vedení  $\lambda_g/4$  se tyto úseky nahradí úseky  $3\lambda_g/4$  a úsek dlouhý  $3\lambda_g/4$  nahradíme délkou  $5\lambda_g/4$ .



Obr. 5 Kruhá odbočnice

Máme čtyři možnosti buzení této odbočnice a tomu odpovídající výstupy:

Při buzení do brány 1 (2) jsou výstupní signály 2 a 3 (1 a 4) ve fázi

Při buzení do brány 3 (4) jsou výstupní signály 1 a 4 (2 a 3) v protifázi

Samotný návrh je opět stejný a omezí se na výpočet dvou jednoduchých vztahů.

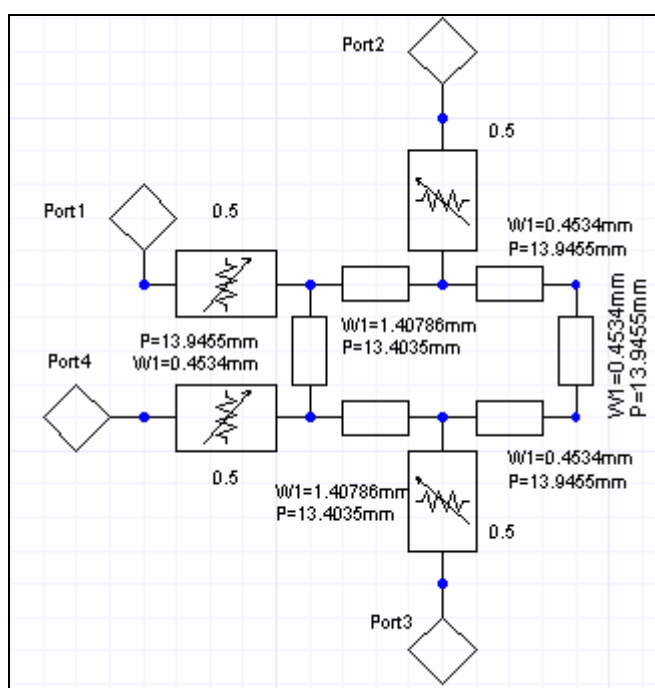
1) Určíme vlnovou impedanci  $Z_{01}$

$$Z_{01} = Z_0 \cdot 10^{\frac{c}{20}} \quad (11)$$

2) Z rovnice impedančního přizpůsobení bychom dostali vztah pro  $Z_{02}$

$$Z_{02} = Z_0 Z_{01} \sqrt{\frac{1}{Z_{01}^2 - Z_0^2}} \quad (12)$$

Návrh v Designeru je téměř stejný jako pro čtvercové odbočnice. Elektrické délky mikropásku volíme  $3\lambda_g/4$  ( $270^\circ$ ) a  $5\lambda_g/4$  ( $450^\circ$ ). Opět bychom v knihovně našli prvek kruhové SO, jehož simulace se podobá realitě, avšak je širokopásmovější, proto použijeme opět principu složení z jednotlivých úseků vedení podle obr. 6. Pro kmitočet 10 GHz mají již použité konektory určitý útlum, který do simulace zahrneme pomocí vložení útlumových článků mezi každou bránu odbočnice a mikrovlnný port. To provedeme tak, že v levé části okna designeru (pod jménem našeho projektu Project1) se přepneme na záložku **Components/Ideal Microwave/ATTN/Atenuator**. Tento útlumový článek připojíme ke každému vstupu (výstupu) odbočnice a nastavíme hodnotu 0,5dB viz obr. 6.



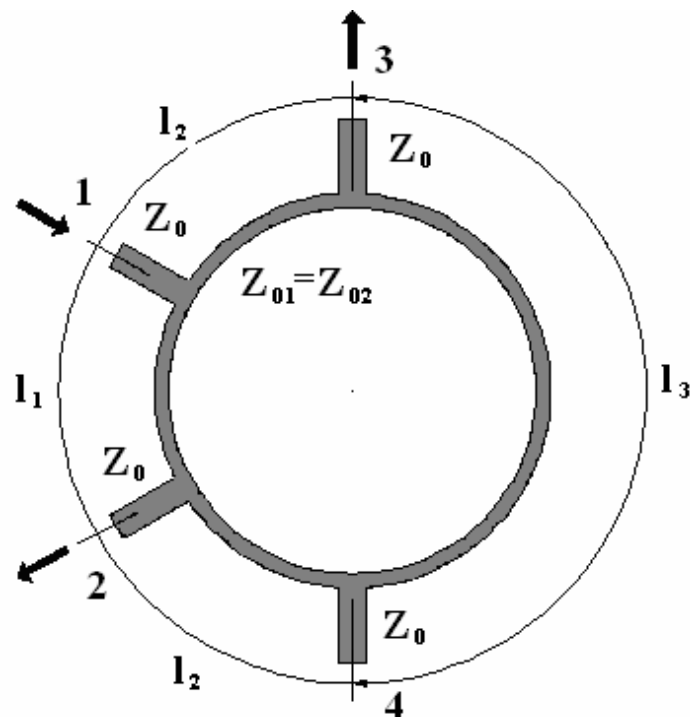
Obr. 6 Ukázka zapojení kruhové SO v Designeru s uvážením útlumů

### Hybridní kruhová SO

Z hlediska návrhu se jedná o nejjednodušší směrovou odbočnici, neboť pro výpočet je potřeba jediný vztah.

$$Z_{01} = Z_{02} = Z_0 \sqrt{2} \quad (13)$$

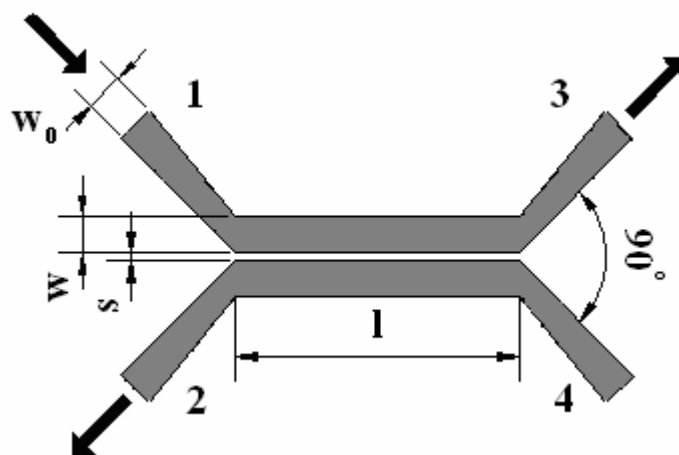
Tvar této odbočnice je na obr. 7, zapojení pro simulaci je na obr. 6 (s jinými šířkami a délkami mikropásků). Výpočet rozměrů mikropásku je opět stejný jako pro čtvercové SO stejně jako nastavení simulace a vykreslení grafů, opět uvážíme vliv útlumu konektorů.



Obr. 7 Hybridní kruhová odbočnice

### Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení (Coupled – line directional coupler)

Vázané vedení jsou vlastně dva rovnoběžné, stejně široké mikropásky, mezi kterými je mezera, která určuje vzájemnou vazbu, viz obr. 8. Tato odbočnice má směrovost 2.druhu (jiný typ směrovosti nelze dosáhnout) a dvojnásobnou reflexní symetrii.

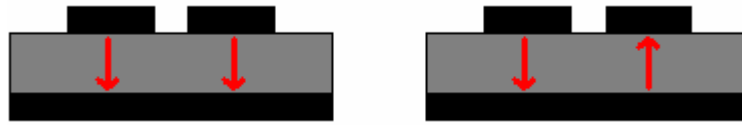


Obr. 8 Konstrukční provedení SO z vázaných vedení

Při syntéze vázaných vedení je nutno uvažovat impedance sudého (even) a lichého (odd) vidu, který vznikne na vázaném vedení. Tyto impedance pak označujeme jako  $Z_{oe}$  a  $Z_{oo}$ , kde indexy jsou právě podle anglického názvu vidů. Na obr. 9 vidíme buzení mikropásků a vybuzení sudého a lichého vidu. Na obr. 9a) sudé buzení do obou mikropásků – vybudí se pouze sudý vid, obr. 9b) liché buzení do obou mikropásků – vybudí se pouze lichý vid.

Při návrhu je nutné vzít v úvahu impedanci jak sudého tak lichého vidu, které lze stanovit poměrně jednoduše. Ruční návrh vázaného vedení jako celku je však komplikovaný a vychází z řešení složité soustavy dvou rovnic, jejich řešením bychom dostali  $w$  a  $s$  samotných

mikropásků. Designer umí spočítat rozměry vázaného vedení z impedancí sudého a lichého vidu, tedy velmi nám opět usnadní práci při návrhu.



Obr. 9 Buzení jednotlivých vidů a) sudého

b) lichého

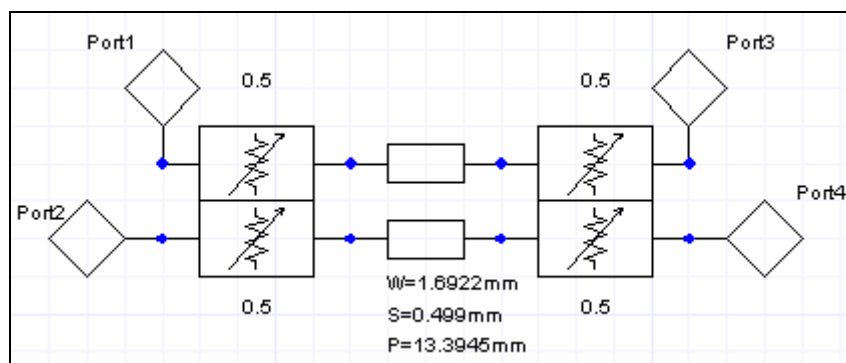
Při uvážení všech zjednodušení se pak návrh rozpadne na výpočet dvou jednoduchých rovnic.

$$Z_{oe} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + 10^{-\frac{c}{20}}}{1 - 10^{-\frac{c}{20}}}} = \frac{Z_0^2}{Z_{oo}} \quad (14)$$

$$Z_{oo} = Z_0 \sqrt{\frac{1 - 10^{-\frac{c}{20}}}{1 + 10^{-\frac{c}{20}}}} = \frac{Z_0^2}{Z_{oe}} \quad (15)$$

Jako kontrola výpočtu platí vždy  $Z_{oe} > Z_{oo}$ . Pro ideální odbočnici z vázaných vedení dále platí, že fázové rychlosti sudého a lichého vidu jsou shodné  $v_{fe} = v_{fo}$ , to však u vedení s vlnou kvazi – TEM nelze přesně splnit, neboť platí vždy  $v_{fe} < v_{fo}$ , což vede ke zúžení pracovního pásma a poklesu směrovosti. Srovnání fázových rychlostí lze dosáhnou konstrukčními úpravami, kterými se tady však zabývat nebudeme.

V designeru postupujeme tak, že jako u čtvercových nebo kruhových odbočnic vybereme po spuštění dielektrický materiál. Výpočtové okno vázaného vedení zobrazíme: **Circuit/TRL/Microstrip/CPL** a vybereme materiál nebo vytvoříme nový. Do výpočtového okna máme dvě možnosti zadávání parametrů pro výpočet. Buď ze známých impedancí sudého a lichého vidu a elektrické délky ( $270^\circ$ ), nebo přímo pomocí charakteristické impedance připojeného vedení ( $50\Omega$ ), elektrické délky ( $270^\circ$ ) a vazebního útlumu (zde označen  $K$ ). Zadáním kmitočtu a stiskem **Synthesis** dokončíme výpočet a stiskem **OK** umístíme odbočnici na plochu. zapojení doplníme útlumovými články 0,5dB a porty, nastavíme simulaci a vykreslíme výsledky případně uložíme tabulku hodnot. Postup je analogický s předchozími odbočnicemi, opět doplníme attenuátory viz obr. 10.



Obr. 10 Ukázka zapojení vázaného vedení v Designeru s uvážením útlumů

## Kombinovaný člen ( De Rondeho člen)

Jedná se o kombinaci mikropáskového a štěrbinového vedení (Slot line). Někdy se tato odbočnice nazývá štěrbinová SO. Konstrukce je naznačena na obr. 11. Z horní strany dielektrické podložky je mikropásek ve tvaru H, který nemá žádnou vazební mezeru a na spodní straně substrátu, který dosud sloužil pouze jako celistvá stínící zemnicí plocha, je vytvořena úzká štěrbiná zakončená naprázdno, což je realizováno na obou koncích štěrbinou kruhem, který se vytvoří odleptáním měděné folie.

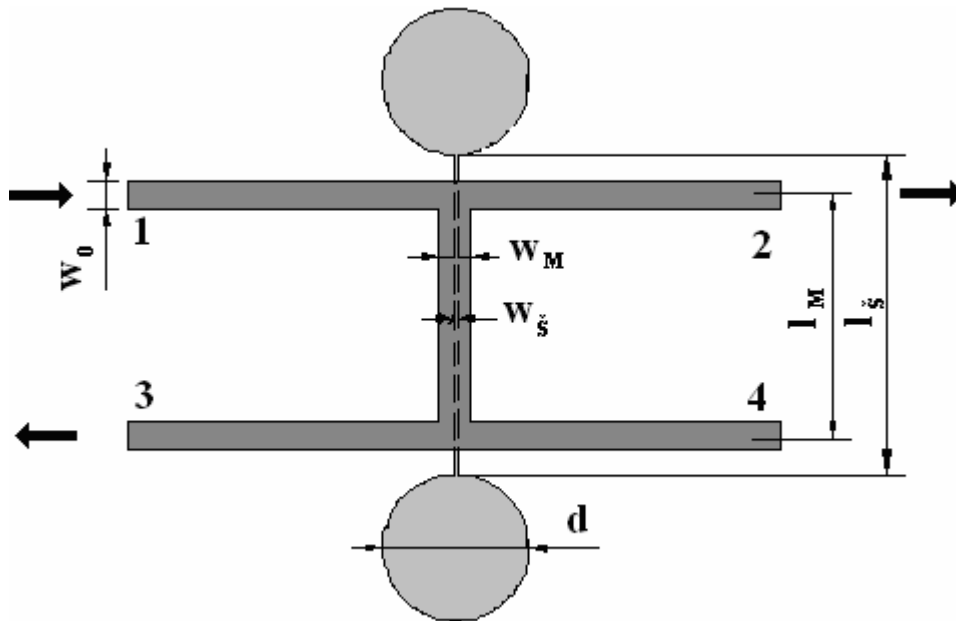
Jedná se o dvojnásobně reflexně symetrickou SO se směrovostí 2.druhu.

Princip činnosti:

Při buzení do brány 1 vlna prochází do brány 3. Do sousedního vedení 2 – 4 se vlna dostává dvěma cestami:

- c) přes příčný mikropásek – vlny v ramenech 2 a 4 mají stejnou fázi jako vlna v bráně 1
- d) přes příčnou štěrbinu – v ramenu 2 má vlna stejnou fázi, v ramenu 4 opačnou fázi (dvojnásobný přechod mikropásek – štěrbiná – mikropásek = fázový invertor)

V ramenu 2 se vlny setkávají soufázově a sečítají se tedy. V ramenu 4 protifázově a ruší se. Rameno 4 je tedy od ramene 1 izolováno.



Obr. 11 Konstrukce kombinovaného členu

Návrh kombinovaného členu je trochu komplikovanější, neboť je zapotřebí několik vztahů, Designer a jeden internetový program pro výpočet samotné štěrbiny.

Návrh se rozdělí na dvě části. První je určení šířky a délky mikropásku stejným postupem jako například při určování rozměrů čtvercové odbočnice z impedance  $Z_{0M}$ . Tuto odbočnici lze částečně navrhnout s pomocí programu umístěného na internetové adrese :

[http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool\\_e.htm](http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool_e.htm) a následným kliknutím na odkaz **Slot Line Calculator**. Lze použít i jiný program, který umožňuje výpočet štěrbin. Z požadované šířky štěrbin (v našem případě minimální šířka štěrbin je 0,25mm; v našem případě je voleno 0,3mm) určíme impedanci  $Z_{0s}$  a délku štěrbin  $l_s$ , zadáme samozřejmě i parametry podložky a kmitočet návrhu. Výpočtové okno je zobrazeno na obr. 12, kde uvedené  $Z_0 = Z_{0s}$ ,  $\lambda/4 = l_s$ .

Další postup je následující:

$$1) \quad Z_{02} = Z_{0s} \quad (16)$$

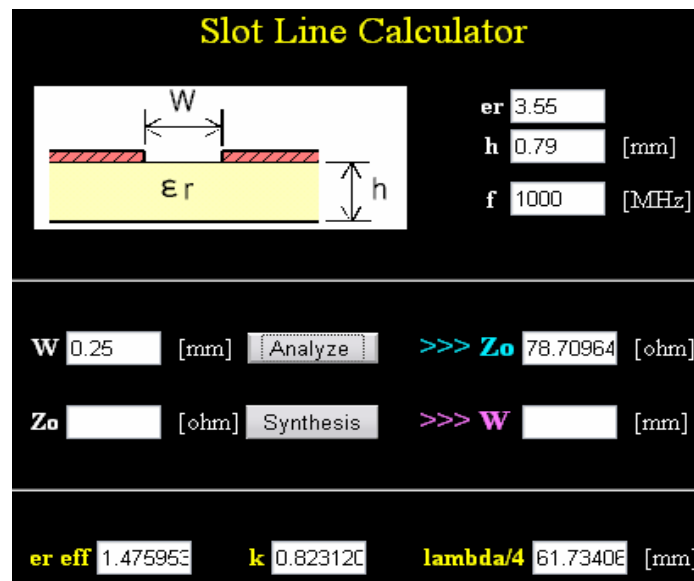
$$2) \text{ Činitel vazby } k, \quad Z_{02} = Z_0 \frac{k}{\sqrt{1-k^2}} \Rightarrow k = \frac{Z_{02}}{\sqrt{Z_0^2 + Z_{02}^2}} \quad (17)$$

nebo přímo dole ve výpočtovém okně dle obr.7

$$3) \text{ Vlnová impedance mikropásku } Z_{0M} = \frac{Z_{01}}{2} = \frac{Z_0}{2} \frac{k}{1-\sqrt{1-k^2}} \quad (18)$$

4) Rozměry mikropásku pomocí Designeru

$$5) \text{ Vazební útlum } C = 20 \log \frac{1}{k} \quad (19)$$



Obr. 12 Program pro výpočet šířky štěrby

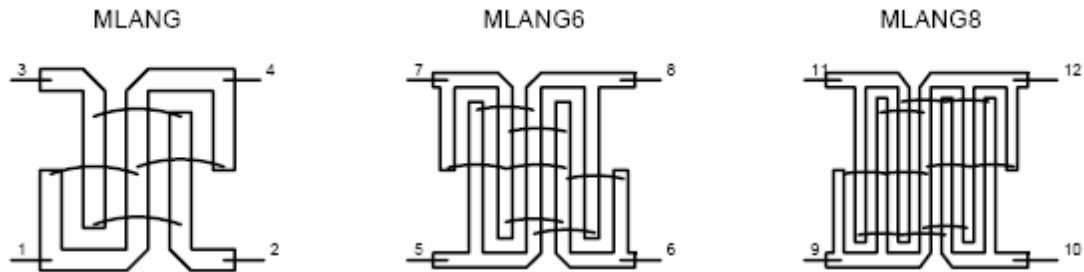
Tuto odbočnici nelze v programu Designer simulovat. K simulaci bychom mohli použít např. Matlab.

### Langeho SO (interdigitální SO)

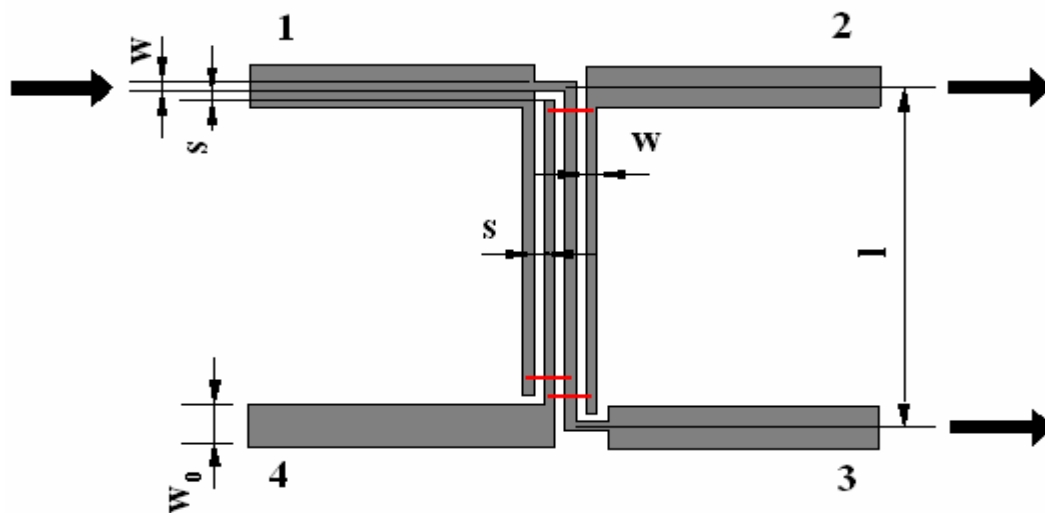
Pokud bychom chtěli navrhovat SO z vázaného vedení pro malý vazební útlum ( $C < 3$  dB), dospěli bychom k tomu, že mezera mezi mikropásky je příliš malá. Také pro příliš malý vazební útlum můžeme dojít k tomu, že tato mezera nelze vůbec vypočítat. Proto byla navržena Langeho odbočnice, pojmenovaná po jejím strůjci. Tato odbočnice sestává z několika obvykle stejných paralelních mikropásků. Pásků bývá většinou sudý počet, obvykle si vystačíme se 4. Vazba je pak vždy mezi dvěma sousedními pásky. Typickou konstrukci můžeme vidět na obr. 14. Tato odbočnice se může vyskytovat v několika různých konstrukčních úpravách, ale všechny jsou si vzájemně ekvivalentní. Takováto konstrukční úprava může být například dle obr. 15, kde se jeden krajní mikropásek rozdělí na polovinu. Pak na obou stranách paralelních pásků je jedna polovina. Na obr. 13 je názorná ukázka Langeho SO s větším počtem prstů, než 4.

Velkou výhodou těchto odbočnic je možnost dosáhnout malých vazebních útlumů, které bychom pomocí odbočnice z vázaného vedení nebyli schopni realizovat z výše

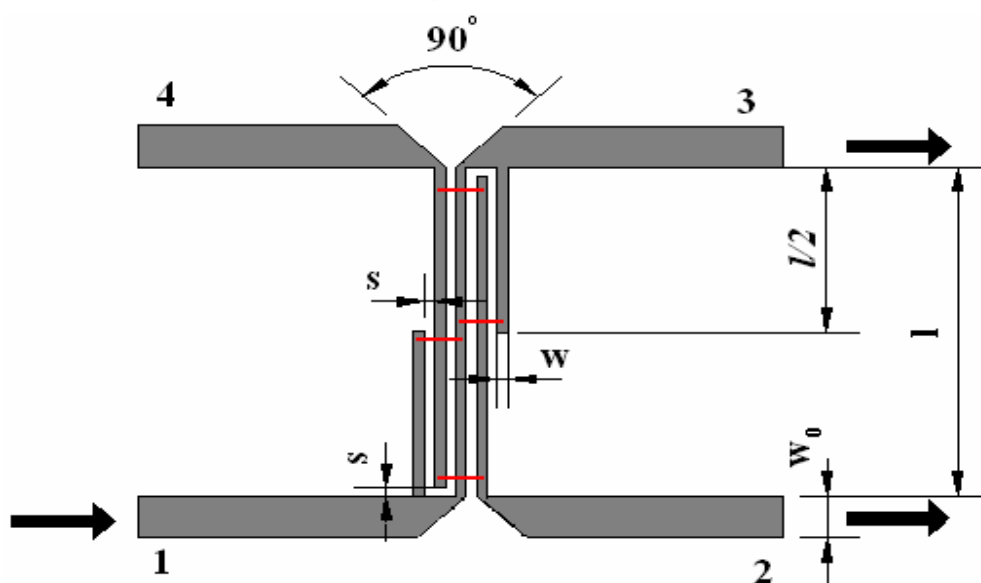
uvedeného důvodu, nebo chcete-li, se stejnou velikostí mezery mezi pásy dosáhneme s Langeho odbočnicí těsnější vazby, než u odbočnice z vázaných mikropáskových vedení. Možnou nevýhodou může být nutnost propojit mikropásy vždy přes jeden, aby vždy sudé a liché mikropásy byly propojeny. Toto propojení je nejlepší realizovat pomocí zlatého drátku, ale někdy se spokojíme i s měděnou propojkou.



Obr. 13 Langeho odbočnice s větším počtem prstů



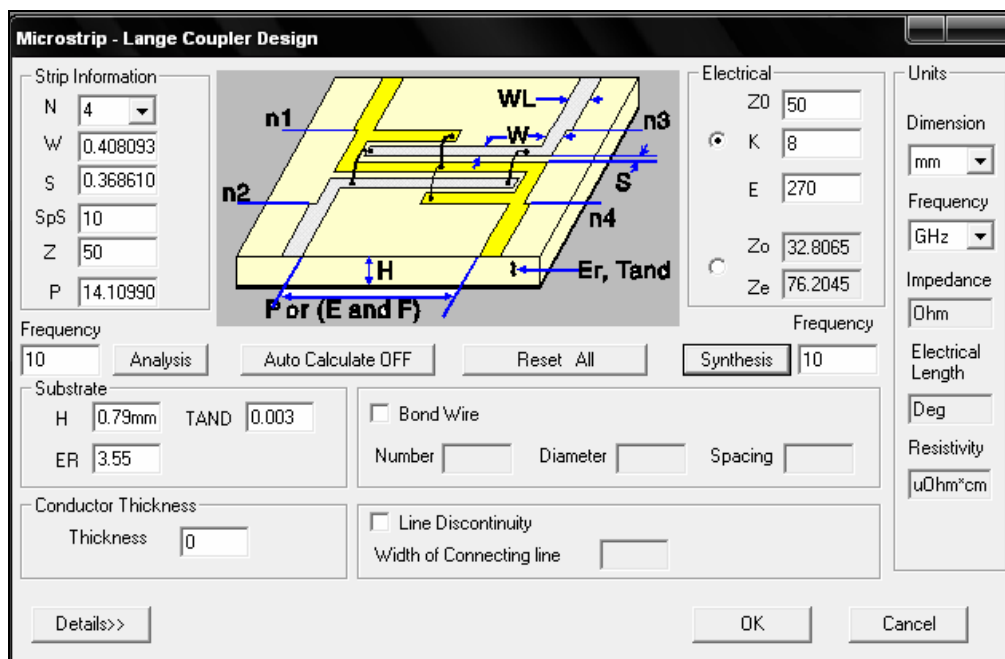
Obr. 14 Konstrukční provedení Langeho odbočnice



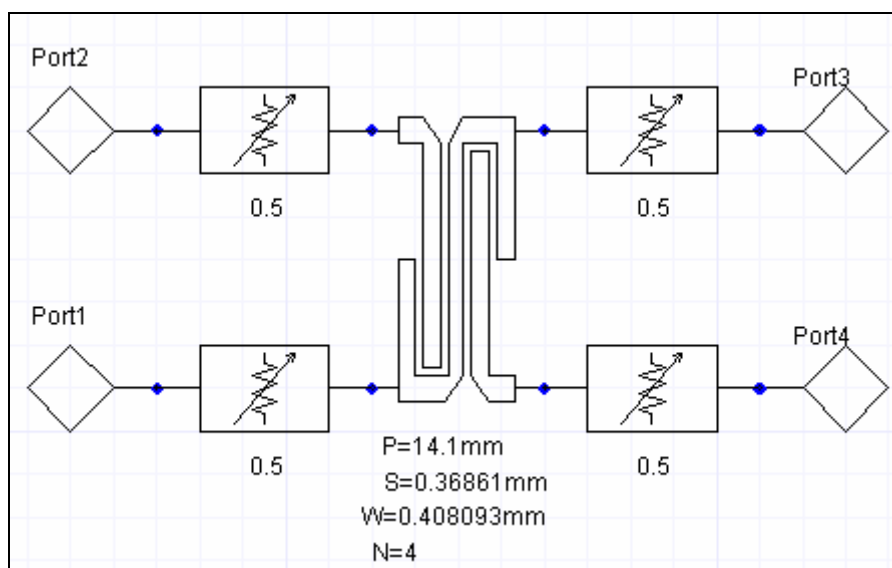
Obr. 15 Jedna z možných konstrukčních úprav Langeho odbočnice

Ruční návrh této odbočnice je poměrně komplikovaný zejména v tom, že řešíme transcendentní rovnice pro impedance sudého a lichého vidu s neznámou v argumentu hyperbolických goniometrických funkcí. Proto návrh provedeme pomocí programu Designer, který toto přímo umožňuje.

Po spuštění programu a výběru materiálu, spustíme výpočtové okno Langeho odbočnic postupem: **Circuit/TRL/Microstrip/Lange Coupler**, zvolíme materiál nebo jej vytvoříme postupem uvedeným v pojednání o čtvercových odbočnicích. Výpočtové okno pro Langeho odbočnice je na obr. 16. Vstupními hodnotami jsou charakteristická impedance  $Z_0 = 50\Omega$ , vazební útlum (označen K), elektrická délka E ( $270^\circ$  pro  $3\lambda_g/4$ ), kmitočet a počet prstů N (většinou  $N = 4$ ) a stiskem tlačítka **Synthesis** provedeme výpočet. Stiskem OK umístíme odbočnici na plochu, doplníme útlumovými články, porty a můžeme přistoupit k simulaci. Zapojení v Designeru je na obr. 17.



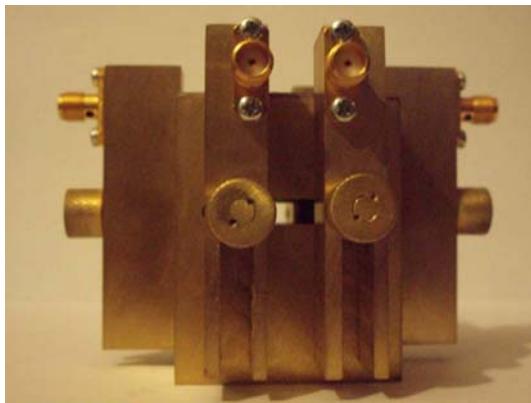
Obr. 16 Výpočtové okno pro Langeho odbočnice v Designeru



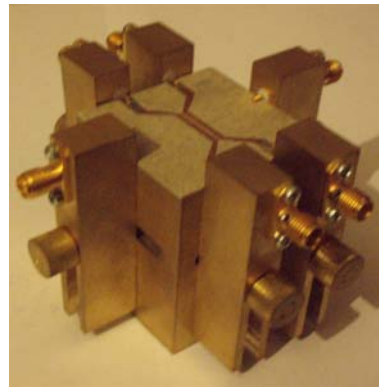
Obr. 17 Ukázka zapojení vázaného vedení v Designeru s uvážením útlumů

## Univerzální držák směrových odbočnic

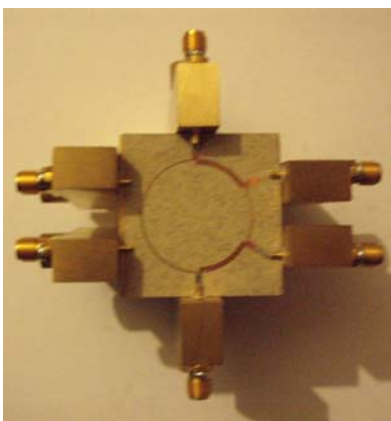
Pro účely laboratorního použití byl navržen univerzální držák pro všechny popsané typy směrových odbočnic. Jeho výhodou je, že není nutné k obvodu pájet konektory, snadná obsluha a rychlá výměna zkoumaných obvodů. Ukázka tohoto držáku je na obr. 18, 19, na kterých je boční pohled. Na obr. 20, 21 je ukázka uchycení odbočnice kruhové a odbočnice z vázaného vedení. Tento držák umožňuje uchycení dielektrických podložek rozměrů 40 x 40 mm až téměř do okrajů, neboť pohyblivé části konektorů lze natáčet. Konektory jsou na své pohyblivé části umístěny na okraji, aby bylo možno docílit jejich poloze co nejbližší ke středu (obr. 21 – konektory však nejsou zcela u sebe) a nebo po jejich přehození mít piny konektorů co nejvíce k okraji dielektrické podložky (obr.20 – přehozené konektory, nejsou však zcela při okraji).



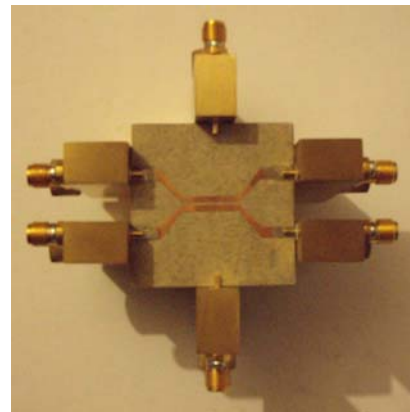
Obr. 18 Boční pohled na držák



Obr. 19 Boční pohled na držák



Obr. 20 Uchycení kruhové SO



Obr. 21 Uchycení vázaného vedení

S tímto držákem je třeba zacházet šetrně, ale při tom tak, abychom docílili co nejlepšího kontaktu mezi odbočnicí a konektory. Vždy je nutné dodržet rozměry podložek 40x40, protože při menším rozměru by hrozil zkrat generátoru respektive obvodového analyzátoru. Pro uchycení je zapotřebí dostatečně přitlačit pohyblivé části s konektory a přitáhnout bočním šroubem tak, aby se konektor nepohyboval. S konektory SMA je třeba zacházet samozřejmě opatrně. Pro obvody s celistvou pokovenou spodní stranou, která slouží jako zem, má držák téměř totožné útlumy, jako pájené konektory. Z výše popsaných typů SO má držák vliv na parametry kombinovaného členu, který má ve spodní straně pokovené straně

substrátu vytvořenou šěrbinu a těsná blízkost zemní plochy držáku ovlivňuje její elektromagnetické pole a tím i parametry kombinovaného členu.

## Skalární obvodový analyzátor ANRITSU 54147A

Pro základní vlastnosti a práci s tímto analyzátozem je již vytvořen dostatečně podrobný návod pro obsluhu, který je uveden v příloze.

### Použitá literatura a zdroje

- [1] SVAČINA, J., *Mikrovlnné integrované obvody* – učební text postgraduálního studia, FEKT VUT v Brně
- [2] HOFFMANN, K., *Planární mikrovlnné obvody*, ČVUT v Praze
- [3] MALORATSKY, L. G., *Passive Rf & microwave integrated circuits*
- [4] <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/magnetic.htm>, internetové stránky určené pro návrh planárních vedení
- [5] [http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool\\_e.htm](http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool_e.htm), internetové stránky určené pro návrh planárních vedení
- [6] [http://eesof.tm.agilent.com/pdf/eagleware/apps/0010\\_AccuracyProofLange.pdf](http://eesof.tm.agilent.com/pdf/eagleware/apps/0010_AccuracyProofLange.pdf), článek o Langeho odbočnicích

## **8. Závěr**

Tato práce je vyvrcholením mého téměř dvouletého studia směrových odbočnic. V první fázi projektu jsem se zabýval teoretickým rozbořením mikrovlnných planárních odbočnic. Nejprve zjištění jednotlivých typů směrových vazebních a hybridních členů a pak jejich základním numerickým návrhem. Pro zadaný materiál a kmitočet jsem jednotlivé typy směrových odbočnic navrhl a před jejich výrobou bylo nutné ověřit správnost návrhu simulací v některém z programů určených pro simulaci planárních struktur. Nejprve jsem prováděl simulaci v programu Puff. Tento program je velice jednoduchý a pro základní simulaci zcela dostačující, avšak v něm nelze provádět simulaci složitějších struktur nebo aktivních mikrovlnných obvodů. Po simulaci byly odbočnice vyrobeny ve školní dílně a proměřeny jejich základní parametry na obvodovém analyzátoru. Z důvodu seznámení studentů s programem Designer, jsem provedl simulaci všech odbočnic v tomto programu. Tento program má velice široké uplatnění a mnou navržená laboratorní úloha slouží jako základní seznámení s tímto programem, který mohou studenti využít i v jiných předmětech nebo při simulacích svých prací. Bohužel kombinovaný člen nelze v tomto programu simulovat. Na jeho simulaci by bylo zřejmě třeba použít složitější simulační program, třeba Matlab. Základním úkolem této práce bylo navrhnout laboratorní úlohu se směrovými odbočnicemi. Do této laboratorní úlohy jsem vložil návrh, simulaci a měření odbočnic. Studenti si osvojí nejen základní úkony s programem Designer, ale i základní vlastnosti směrových odbočnic a možnosti měření na obvodovém analyzátoru. Pro použití k této laboratorní úloze jsem navrhl univerzální držák směrových odbočnic. Z naměřených charakteristik plyne, že parametry držáku lze srovnat s parametry pájených konektorů. Bohužel však má držák rozměrové omezení na velikost substrátu 40x40 mm, což může v některých případech být málo. Za úvahu by zřejmě stálo vyrobení stejného držáku pro větší dielektrické podložky. Vliv na parametry má tento držák u kombinovaného členu, kde zemní plocha držáku se nachází v těsné blízkosti šterbiny a tím ovlivňuje její parametry a parametry celého členu. Objektivně musím říci, že popsané struktury vazebních členů lze zkoumat mnohem podrobněji, tedy přesnější simulací (s uvažováním více parametrů). Domnívám se také, že jinou technologií výroby by bylo dosaženo větší přesnosti parametrů.

## **9. Použitá literatura a zdroje**

- [1] SVAČINA, J., *Mikrovlnné integrované obvody* – učební text postgraduálního studia, FEKT VUT v Brně
- [2] HOFFMANN, K., *Planární mikrovlnné obvody*, ČVUT v Praze
- [3] MALORATSKY, L. G., *Passive Rf & microwave integrated circuits*
- [4] <http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/magnetic.htm>, internetové stránky určené pro návrh planárních vedení
- [5] [http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool\\_e.htm](http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/tool_e.htm), internetové stránky určené pro návrh planárních vedení
- [6] [http://eesof.tm.agilent.com/pdf/eagleware/apps/0010\\_AccuracyProofLange.pdf](http://eesof.tm.agilent.com/pdf/eagleware/apps/0010_AccuracyProofLange.pdf), článek o Langeho odbočnicích
- [7] <http://www.icmicroeave.com>, internetové stránky určené návrhům univerzálních držáků
- [8] <http://www.cst.com/Content/Applications/Article/Article.aspx?id=106>, stránky zabývající se simulací konektorů SMA

# Skalární obvodový analyzátor

## ANRITSU 54147A

10 MHz až 20 GHz



## Stručný návod k obsluze

# 1. ZÁKLADNÍ TECHNICKÉ PARAMETRY

## 1.1 Zabudovaný generátor

<b>Frekvenční rozsah</b>	10 MHz až 20 GHz, řízeno krystalem
<b>Start - Stop</b>	Rozmítání od – do zvoleného kmitočtu
<b>Center-Width</b>	Rozmítání od zvoleného středního kmitočtu po $\pm 0,5$ zvoleného pásma
<b>Alternate sweep</b>	Rozmítání se přepíná mezi frekvenčními rozsahy nastavenými rozdílně pro každý kanál
<b>Nastavování frekvence</b>	Krok $\pm 200$ kHz
<b>Doba rozmítání</b>	Jeden běh typicky trvá 70ms pro rozlišení 101bodů, při použití průměrování a vyhlazování 130ms
<b>Výstupní výkon</b>	max. 10 dBm při zátěži 50 $\Omega$ .
<b>Výstupní poměr stojatých vln</b>	PSV < 1,8
<b>Přesnost nastavení výkonu</b>	$\pm 1$ dB při stabilizovaném výkonu, při použití zátěže 75 $\Omega \pm 1,2$ dB
<b>Řízení výkonu - interní</b>	Přední panel dovoluje nastavení přes 10 dB nebo od -70 dBm do maximální hodnoty výkonu při použití 70 dB atenuátoru

## 1.2 Analyzátor

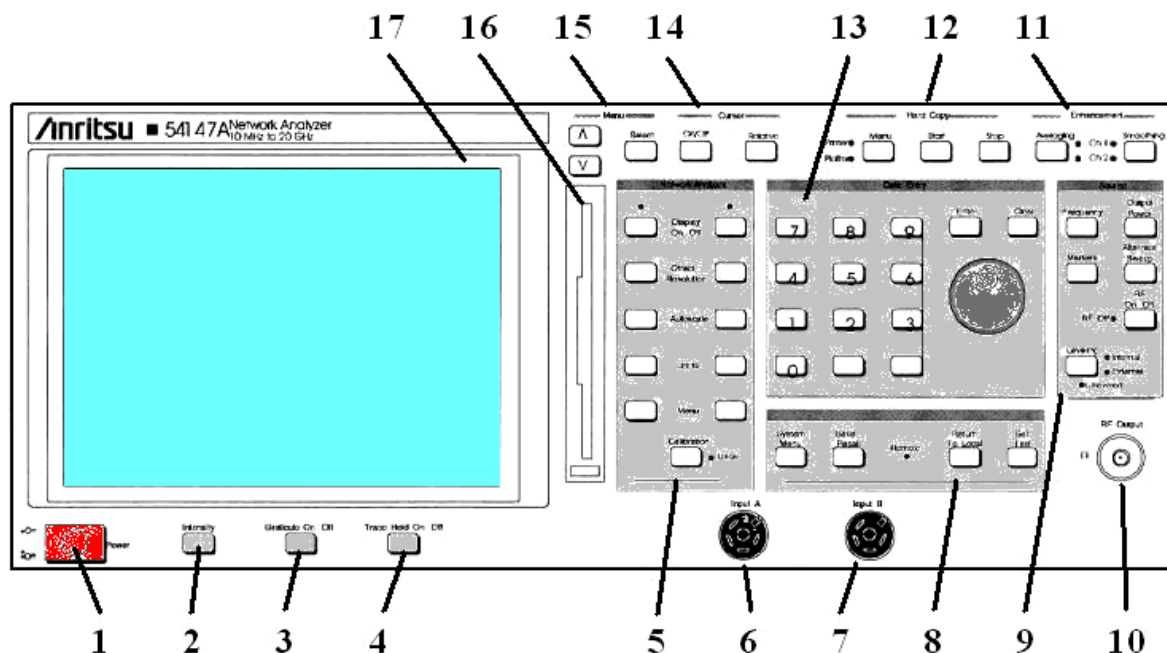
<b>Dynamický rozsah</b>	-55 dBm ÷ +16 dBm
<b>Vstupy</b>	2 standardní vstupy A, B
<b>Kanály</b>	Mohou být vybrány a současně zobrazeny dva kanály ze vstupů A nebo B.
<b>Rozlišení zobrazení</b>	Horizontálně 51, 101, 201 nebo 401 bodů. Vertikálně 0,0 25dB, 0,0025 ns.
<b>Rastr</b>	10 vertikálních dílků, horizontální rastr se řídí nastavenou frekvencí po 1, 2 nebo 5 dílcích. Lze vypnout a ponechat pouze značky na osách.
<b>Rozlišení (citlivost)</b>	0,1 dB(m) ÷ 10 dB(m) na dílek. Nezávisle nastavitelný každý kanál 0,1 ÷ 100 ns na dílek.
<b>Autoscale</b>	Automaticky vybere citlivosti pro optimální zobrazení

<b>Externí VGA výstup</b>	Zadní panel obsahuje VGA konektor pro připojení barevného monitoru. Barvy jednotlivých stop lze volit v menu.
<b>Kurzory</b>	Velikost amplitudy a frekvence je číselně zobrazena pro oba kanály v rozsahu $-99,9 \div +99,9$ dB (ns). Kurzory dále nabízí funkce: automatické hledání maxim a minim, decibelové úrovně, šířky pásma v dB, přechod k další značce.
<b>Korekce zobrazovaných dat</b>	Systémové chyby měření jsou odstraněny při kalibraci odrazem na otevřeném a zkratovaném zakončení. Kalibrační data jsou uložena v rozlišení 0,002 dB ve zvoleném frekvenčním rozsahu. Při snižování rozsahu rozmítání je použita interpolace.
<b>Vyhlazování</b>	Filtrace nastavitelná v pěti úrovních k redukci šumu a interference při nízkých úrovních signálu. Pro oba kanály lze nastavit nezávisle.
<b>Průměrování</b>	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 nebo 256 postupných běhů je průměrováno k odstranění šumu. Pro oba kanály lze nastavit nezávisle.
<b>Limitní čáry</b>	Dvě limitní čáry, buď jednotlivé hodnoty nebo víceúrovňově článkované, až pro 10 jednotlivých částí. Lze vyhodnotit překročení.
<b>Trace mask</b>	Naměřenou křivku lze uložit jako součást rastru k pozdějšímu použití jako srovnávací křivka.
<b>Save/Recal</b>	Třináct nastavení předního panelu a třináct naměřených dat lze uložit v nezávislé paměti. Lze ji pro bezpečnostní účely mazat.
<b>3,5" disketa</b>	Naměřená data lze ukládat na disketu 3,5 palce formátu MS-DOS®. Data se ukládají v ASCII formátu pro zpracování pomocí PC.

### 1.3 Periferie

<b>GPIB</b>	Přístroj je vybaven standardní sběrnici GPIB (IEEE488.2). Veškeré ovládací prvky předního panelu lze nastavovat po sběrnici.
<b>Tiskárna</b>	Lze připojit plotter na GPIB sběrnici, kompatibilní s HPGL plottery, nebo přes paralelní port tiskárnu. K ovládní tiskárny není třeba PC.
<b>I/O – vstupy a výstupy</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- výstup horizontálního rozmítání <math>0 \pm 10V</math></li> <li>- GPIB sběrnice</li> <li>- paralelní port (Centronics)</li> <li>- externí VGA výstup</li> <li>- externí řízení úrovně (výstupního výkonu) BNC(f)</li> </ul>
<b>Self Test</b>	Přístroj provede automaticky svou kontrolu po každém zapnutí, nebo stisknutí tlačítka „Self Test“.
<b>Měřicí konektory</b>	N(f)

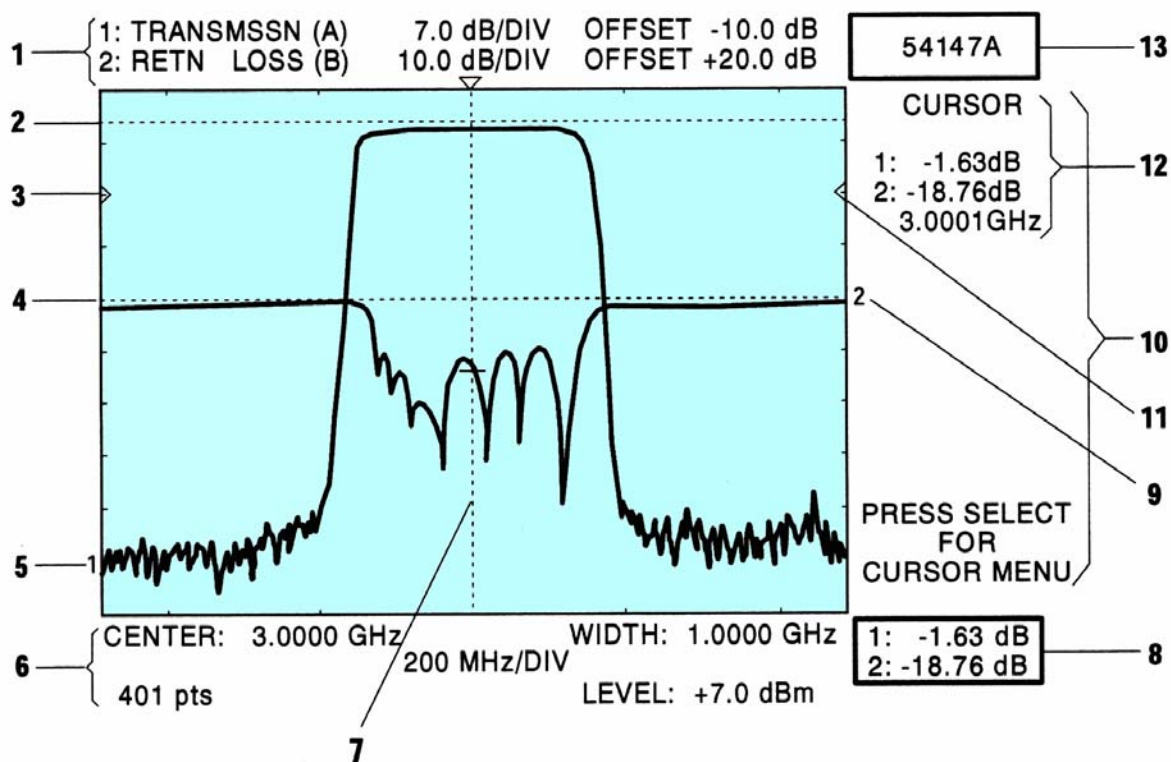
## 1.4 Hlavní ovládací prvky a jejich stručný popis



Prvek	Název	Popis funkce
1	Power	Síťový vypínač. Po zapnutí proběhne vnitřní kontrola přístroje <b>self test</b> . Při bezchybném stavu se objeví nápis <b>ALL TESTS PASSED</b> . V případě, že je nalezena chyba se zobrazí její označení, příp. bliká některá z LED na předním panelu přístroje. Přesné určení chyby vyžaduje použití originálního manuálu. <b>Po zapnutí a proběhnutí testu přístroj nastaví poslední použité nastavení !</b>
2	Intensity	Po stisknutí tlačítka se zobrazí na monitoru menu sloužící k nastavení jasu monitoru. Jas se mění současně na vestavěném i na externím monitoru. Použitím tlačítek ▲▼ (vpravo nahoře vedle vestavěného monitoru) se přepínáme mezi úrovněmi nastavení jasu rastru a nastavením jasu průběhů a popisů.
3	Graticule On/Off	Zapnutí/vypnutí rastru zobrazení.
4	Trace Hold On/Off	Podržení zobrazeného průběhu.
5	Network Analyzer	Funkční skupina ovládacích prvků sloužící k nastavení analýzy. Nastavuje jednotlivé průběhy, zapíná jejich vykreslování (signalizováno LED), nastavuje offset a krok, limitní čáry pro jednotlivé průběhy, zapíná „Trace mask“ uložení posledního vykresleného průběhu do rastru monitoru, volbu měřicího kanálu apod.
6	Input A	Měřicí vstup A.
7	Input B	Měřicí vstup B.
8	System Functions	Skupina ovládacích prvků pro práci s nastavením přístroje,

		ukládáním naměřených dat, vyvoláním testu a návratu do lokálního ovládání z dálkového režimu řízení.
<b>9</b>	<b>Source</b>	Ovládání vnitřního generátoru mikrovlnného signálu. Volby rozmítání, pomocného rozmítání, výstupní úrovně, pomocných značek a zapínání a vypínání výstupního signálu. Kontrolní LED signalizují použitou kontrolu úrovně a stav vypnutého signálu.
<b>10</b>	<b>RF Output</b>	Výstup mikrovlnného signálu, konektor N.
<b>11</b>	<b>Enhancement</b>	Rozšiřující funkce. Vyhlazování a průměrování průběhů lze volit nezávisle pro oba kanály. Použití funkcí je signalizováno pro každý kanál LED.
<b>12</b>	<b>Hard Copy</b>	Ovládání tisku.
<b>13</b>	<b>Data Entry</b>	Klávesnice a otočný knoflík s potvrzovacími tlačítky pro zadávání číselných parametrů.
<b>14</b>	<b>Cursor</b>	Zapínání kurzorů a přepínání jejich funkcí.
<b>15</b>	<b>Menu</b>	Pohyb v jednotlivých menu přístroje a potvrzování výběru.
<b>16</b>	<b>Disk Drive</b>	3.5" mechanika pro ukládání naměřených dat a parametrů měření.
<b>17</b>	<b>CRT</b>	Monochromatický monitor přístroje. Je vhodné používat externí barevný VGA monitor, jelikož průběhy zobrazené na externím monitoru jsou barevně nastavitelné v 256 krocích pro jednotlivé složky RGB pro každý průběh a pro rastr a menu přístroje.

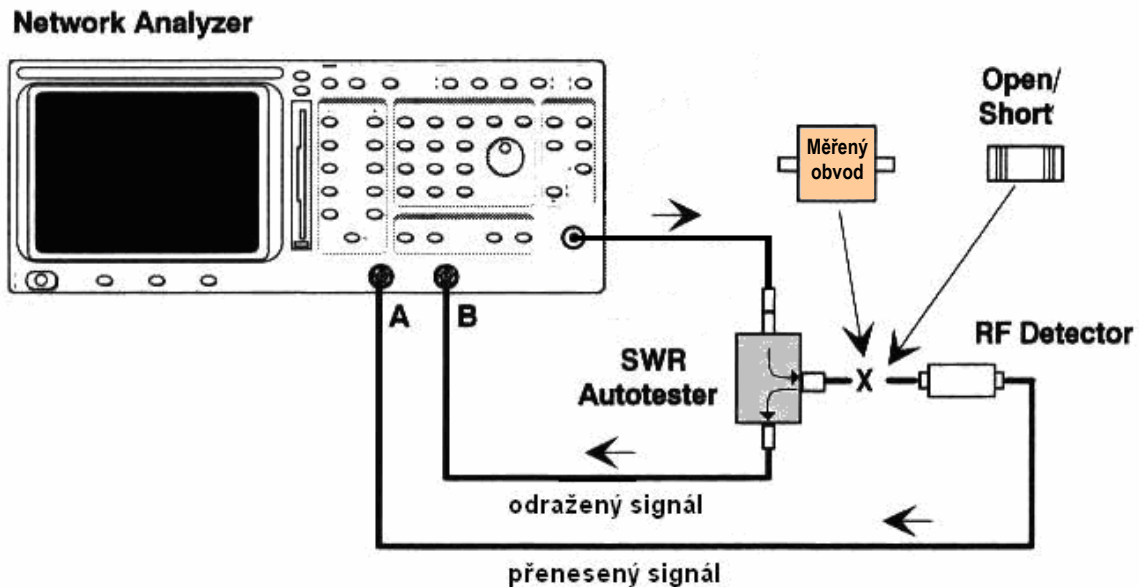
## 1.5 Údaje na obrazovce analyzátoru



Prvek	Popis funkce
1	Popis zobrazených průběhů v kanálech 1 a 2, údaj v závorce značí použitý vstup
2	Nastavená limitní úroveň v kanálu 1
3	Značka kalibrační úrovně 0 dB v kanálu 1
4	Nastavená limitní úroveň v kanálu 2
5	Zobrazený průběh 1 (kanál 1)
6	Informační panel generátoru. Horní řádek uvádí frekvenční rozsah buď pomocí centrální frekvence a šířky okolního pásma, nebo pomocí počáteční a koncové frekvence (volí se pomocí ▼▲ v menu zdroje). Údaj uprostřed oblasti značí použitý krok kmitočtového rastru. Údaj ve spodním řádku počet měřených bodů a výstupní úroveň signálu.
7	Indikátor pozice kurzoru.
8	Oblast pro systémová hlášení. Kromě chyb a výstrah se zde zobrazují také údaje kurzorů.
9	Zobrazený průběh 2 (kanál 2)
10	Oblast s údaji kurzorů, příp. analyzátozem nalezených hodnot (šířka pásma apod.). Při stisknutí ovládacích prvků se zde zobrazují jednotlivá menu.
11	Značka kalibrační úrovně 0 dB v kanálu 2
12	Oblast s údaji nastavených kurzorů
13	Status přístroje, zobrazuje typ, příp. informace o podržení průběhu, alternativním rozmítání atd.

## 2. MĚŘENÍ PŘENOSOVÝCH A ODRAZOVÝCH CHARAKTERISTIK MIKROVLNNÉHO OBVODU

### 2.1 Zapojení



#### Poznámky k zapojení:

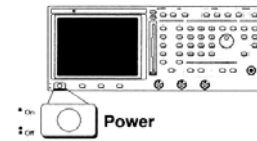
1. K současnému měření přenosu a odrazu, příp. vstupního poměru stojatých vln mikrovlnných obvodů je společně s obvodovým analyzátozem použit tzv. **SWR Autotester**, což je širokopásmový směrový vazební můstek (směrová odbočnice) sloužící k rozdělení postupujícího signálu a signálu odraženého od vstupu měřeného obvodu.
2. K výstupnímu konektoru N generátoru zabudovaného v analyzátozem je trvale připojen kabel s konektorem SMA – **neodpojovat od generátoru !** Konec kabelu je připojen na vstup SWR Autotesteru. Výstupní kabel SWR Autotesteru (pevně připojený) se připojí na vstup B analyzátozem.
3. S použitými konektory SMA je nutno zacházet **velmi opatrně**. **Konektory je nutno dotahovat pevně, ale s citem ! Pozor na šroubování „přes závit“ !** K utažení používejte zelené převlekové „matice“ na jednotlivých konektorech.
4. Proměřujete-li přenos a odraz na různých vstupech **vícebranu** (např. trojbranu či čtyřbranu), je nutno zbývající (tj. nevyužitě) brány obvodu zakončit bezodrazovými zatěžovacími odpory 50 Ω s konektory SMA.
5. Kabel detektoru (**RF Detector**) je připojen na vstup A analyzátozem (viz schéma zapojení).
6. Velikost napěťového činitele odrazu  $|\rho|$  je skalárním analyzátozem vyjadřována v logaritmické míře v [dB] jako tzv. **zpětný útlum (Return Loss) RL**

$$RL = 20 \cdot \log|\rho| = 20 \cdot \log \frac{PSV - 1}{PSV + 1} \quad [\text{dB}] ,$$

kde PSV (= SWR) značí poměr stojatých vln na téže bráně měřeného obvodu.

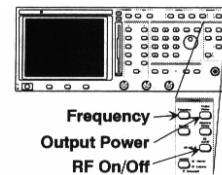
## 2.2 Výchozí nastavení

Zapneme přístroj vypínačem **Power**. Na obrazovce se objeví sdělení o úvodním testu. Na konci testování se zobrazí nápis **ALL TESTS PASSED**.



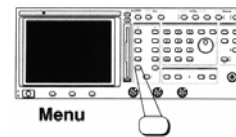
Provedeme reset do továrního nastavení. Stiskneme tlačítko **System Menu** ve skupině **System Function**. Pomocí tlačítek **▼▲** ve skupině **Menu** vybereme položku **RESET** a potvrdíme stiskem tlačítka **Select** ve skupině **Menu**. V dalším menu zvolíme položku **RESET TO FACTORY DEFAULTS** a potvrdíme stiskem tlačítka **Select**.

**Výstupní úroveň signálu** nastavíme stiskem tlačítka **Output Power** ve skupině **Source**. Pomocí klávesnice nebo otočného knoflíku **Data Entry** zadáme požadovanou hodnotu (např. **0 dBm**) a potvrdíme stiskem klávesy **Enter**. Přitom musí být zapnuta interní stabilizace výkonu generátoru – u klávesy **Leveling** svítí LED dioda **Internal**.



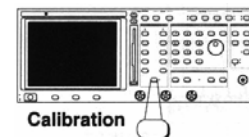
**Kmitočtový rozsah rozmitání** zadáváme po stisknutí tlačítka **Frequency** ve skupině **Source**. Pomocí tlačítek **▼▲** ve skupině **Menu** se pohybujeme mezi položkami **START** a **STOP** a z klávesnice ve skupině **Data Entry** zadáváme požadované hodnoty kmitočtu; každé zadání ukončíme tlačítkem **Enter**.

Po výchozím resetu do továrního nastavení by měl být přístroj připraven k měření přenosu v kanálu 1 a činitele odrazu v kanálu 2. Pokud tomu tak není, pak **volba zobrazovaného průběhu** se provede stiskem klávesy **Menu** příslušného **kanálu 1** nebo **2** ve skupině **Network Analyzer**. Pomocí kláves **▼▲** pak zvolíme položku **TRANSMISSION** v kanálu 1 a položku **RETURN LOSS** (zpětný útlum, velikost činitele odrazu) v kanálu 2. Volbu v každém kanálu vždy potvrdíme klávesou **Select** ve skupině **Menu**.



## 2.3 Kalibrace analyzátoru

Při kalibraci je měřený obvod vyřazen a vstup SMA detektoru připojíme přímo k výstupu SWR Autotesteru (bod **X** ve schématu zapojení). Použijeme přitom propojku oboustrannou SMA z kalibrační sady analyzátoru). Stiskneme klávesu **Calibration** ve skupině **Network Analyzer**. V menu v pravé části obrazovky zvolíme položku **START CAL** a stiskneme tlačítko **Select** ve skupině **Menu**. Zobrazí se popis kalibrované veličiny **TRANSMISSION** a nápis určující vstup přístroje (**CONNECT „A“ DETECTOR TO TEST PORT** – připojte detektor ke vstupu A). Připojení potvrdíme klávesou **Select**. Poté probíhá kalibrace pro měření přenosu a o jejím průběhu jsme informováni. Po skončení kalibrace přenosu se zobrazí vodorovná přímka (přenosová charakteristika kalibrovaného detektoru) na úrovni 0 dB v kanálu 1.

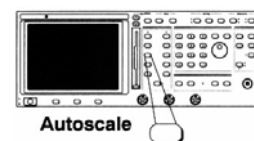


Kalibrace následně automaticky pokračuje pro měření odrazů. Výstup SWR Autotesteru je připojen do vstupu B analyzátoru. V zobrazeném menu nám nápis

**CONNECT OPEN TO TEST PORT** předepisuje, abychom testovací bránu SWR Autotesteru zakončili „naprázdno“. Od výstupu SWR Autotesteru proto nyní odpojíme detektor a z kalibrační sady analyzátoru použijeme prvek s nápisem **OPEN**. Po jeho připojení stiskneme tlačítko **Select**. Po chvíli jsme v menu vyzvání **CONNECT SHORT TO TEST PORT**. Testovací bránu SWR Autotesteru nyní zakončíme „nakrátko“ (použijeme nyní kalibrační prvek s nápisem **SHORT**). Po jeho připojení opět stiskneme tlačítko **Select**. Proběhne závěrečná kalibrace pro měření odrazu. Po skončení kalibrace se zobrazí vodorovná přímka (hodnota zpětného útlumu kalibrovaného SWR Autotesteru) na úrovni 0 dB v kanálu 2.

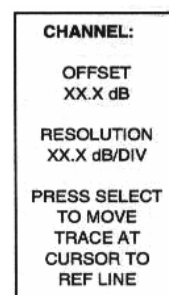
## 2.4 Měření a zpracování dat

Po skončení kalibrace se zobrazí zpráva **CALIBRATION COMPLETED – CONNECT TEST DEVICE – PRESS SELECT WHEN READY**. Připojíme tedy měřený obvod (dvojbran, příp. vícebran) dle zapojení na str. 7 a potvrdíme klávesou



**Select** ve skupině **Menu**. Pro optimální zobrazení stiskneme klávesy **Autoscale** postupně v obou kanálech 1 a 2. Na obrazovce se zobrazí kmitočtový průběh amplitudové (modulové) přenosové charakteristiky obvodu ve zvoleném pásmu kmitočtů (kanál 1) a současně kmitočtový průběh zpětného útlumu *RL* na vstupu měřeného obvodu (kanál 2) – viz ukázkové průběhy na str. 5.

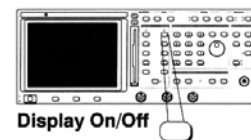
Pokud chceme vhodné zobrazení nastavit sami (ručně), stiskneme v příslušném kanálu tlačítko **Offset/Resolution**. Pomocí zobrazeného menu můžeme posunout průběh na obrazovce ve vertikální ose změnou údaje **OFFSET**, příp. změnit měřítko zobrazení ve vertikálním směru položkou **RESOLUTION**. Hodnoty těchto položek zadáváme z klávesnice v dB nebo spojitě pomocí otočného knoflíku. Zadání vždy potvrdíme stiskem klávesy **Enter**.



Pro lepší zobrazení obou průběhů můžeme rovněž posunout obě značky kalibračních úrovní 0 dB v kanálech 1 a 2 (viz obrázek na str. 5, položky 3 a 11), příp. je doplnit zobrazením vodorovných čar (referenčních přímek) přes stínítko obrazovky. Stiskneme klávesu **Menu** postupně v obou kanálech a tlačítka **▼▲** označíme položku **MORE**. Potvrdíme klávesou **Select** a následně vybereme položku **REF LINE** a potvrdíme klávesou **Select** (v kanálu 2 se přímo vybírá položka **REF LINE**). Pro zapnutí (příp. vypnutí) referenční přímkou použijeme volbu **ON** (příp. **OFF**) a následně použijeme otočný knoflík ve skupině **Data Entry** ke změně polohy kalibrační hodnoty 0 dB (referenční přímkou) na obrazovce analyzátoru.

Chceme-li např. v kanálu 2 zobrazit (místo zpětného útlumu) kmitočtový průběh vstupního **poměru stojatých vln** měřeného obvodu, stiskneme klávesu **Menu** v kanálu 2. V zobrazeném menu pomocí kláves **▼▲** zvolíme položku **SWR** a potvrdíme klávesou **Select**. V dalším menu klávesou **Select** zvolíme položku **SELECT INPUT**, pomocí kláves **▼▲** vybereme vstup **B** a opět potvrdíme klávesou **Select**. Zobrazí se kmitočtový průběh poměru stojatých vln (SWR) na vstupu B analyzátoru. Pro vhodné zobrazení můžeme opět užít klávesu **Autoscale** v kanálu 2. Analyzátor nezobrazuje větší hodnoty PSV než 60.

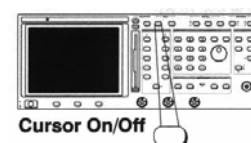
Chceme-li zobrazení průběhu jednoho kanálu zcela vypnout (a ponechat na obrazovce jen jeden průběh), stiskneme klávesu **Display On/Off** ve skupině **Network Analyzer** pro zvolený kanál. Vypnutí kanálu je indikováno zhasnutím LED diody nad tímto tlačítkem.



Čtení jednotlivých bodů na zobrazených průbězích si můžeme usnadnit a zpřesnit použitím uživatelem definovaných **kmitočtových značek – markerů**. Markerů může být až osm, vyvolají se stiskem klávesy **Markers** ve skupině **Source**. Marker M1 až M8 se vybere tlačítky **▼▲** a zapne, příp. vypne se klávesou **Select**. Značka markeru se na obrazovce posouvá pomocí otočného knoflíku.

MARKERS 1-4	MARKERS 5-8
M1: 8.1000 1: -8.25dB 2: +1.31dB	M5: 10.0000 1: +2.22dB 2: +2.31dB
M2: 9.1000 1: -6.40dB 2: +3.21dB	M6: --OFF--
M3: -- OFF--	M7: --OFF--
M4: 11.1000 1: -5.66dB 2: -5.67dB	M8: --OFF--
MARKERS 5-8	MARKERS 1-4
PRESS SELECT FOR ON/OFF	PRESS SELECT FOR ON/OFF

Pro přesné čtení hodnot můžeme rovněž použít funkci kurzoru. **Kurzor(-y)** zapneme / vypneme klávesou **On / Off** ve skupině **Cursor**. Na obrazovce se zobrazí značka kurzoru, její pozici lze měnit otočným knoflíkem analyzátoru. V menu na pravé straně obrazovky se přitom zobrazují údaje o poloze kurzoru.



Zobrazení měřených charakteristik lze zlepšit užitím funkcí vyhlazování průběhu a průměrování dat. **Průměrování** zapneme stiskem klávesy **Averaging** ve skupině **Enhancement**. Zobrazí se menu s výběrem počtu běhů, které se mají průměrovat. Požadovaný počet zvolíme pomocí **▼▲** a potvrdíme klávesou **Select**. Větší počet běhů průměrování prodlužuje dobu měření, obvykle stačí průměrovat do 32 běhů. Stav průměrování se zobrazuje jako podíl aktuálních běhů ku zadanému počtu v pravém horním rohu obrazovky. Pro další manipulaci z naměřenými daty (např. pro jejich uložení) je **nutno vyčkat na konec procesu průměrování**.

Funkci **Vyhlazování** zapneme klávesou **Smoothing** ve skupině **Enhancement**. Zobrazí se menu s výběrem stupně vyhlazování. Požadovaný stupeň zvolíme pomocí otočného knoflíku nebo zadáním číselné hodnoty ve skupině **Data Entry** a potvrdíme tlačítkem **Enter**. Vyšší stupeň vyhlazování znamená výrazně delší dobu měření. **Nepožívejte proto nejvyšší možné hodnoty průměrování ani vyhlazování.**

**Uložení měřených dat** se realizuje stiskem klávesy **Save / Recal** ve skupině **System Function**. V zobrazeném menu zvolíme položku **SAVE** a z dalšího submenu vybereme položku **DISPLAYED TRACES (SPREADSHEET FORMAT)**. Tento výběr uloží data do souboru na disketu. Zvolíme název souboru (pro další ukládání je název inkrementován) v položce **USING TITLE**. V oblasti se znaky se pohybujeme pomocí otočného knoflíku a kláves **▲▼**. Paměť, do které budeme soubor ukládat změníme stiskem položky **MORE DIR**. Vybereme položku **PRES SELECT FOR SAVE** a potvrdíme klávesou **Select**. Při správném postupu se během ukládání na okamžik rozsvítí kontrolní LED na disketové mechanice.

SAVE/RECALL (DATA TYPE)
SETUP ONLY
COMPLETE INST STATE
TRACE MEMORIES
DISPLAYED TRACES (SPREADSHEET FORMAT)
MAIN MENU
USE THEN PRESS SELECT