

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

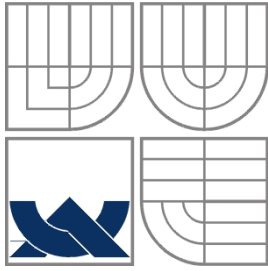
NÁVRH A REALIZACE MIKROVLNNÉ SMĚROVÉ ODBOČNICE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

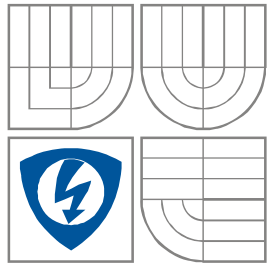
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MIROSLAV NEJEDLÝ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH A REALIZACE MIKROVLNNÉ SMĚROVÉ ODBOČNICE

DESIGN AND REALISATION OF MICROWAVE DIRECTIONAL COUPLER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Miroslav Nejedlý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Radek Dvořák

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Miroslav Nejedlý

ID: 77760

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a realizace mikrovlnné směrové odbočnice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte typy mikrovlnných směrových odbočnic pro mikrovlnná pásma nad 1 GHz a zabývejte se možnostmi jejich realizace s ohledem na dosažitelnou šířku pásma a náročnost výroby. Vyberte dva vhodné typy směrové odbočnice pro pásma nad 1 GHz a proveďte optimalizaci na šířku pásma ve zvoleném simulačním programu; požadovaný vazební útlum je 12 dB. Odladěnou odbočnicí realizujte a proměřením na obvodovém analyzátoru zjistěte skutečné dosažené parametry realizované odbočnice.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SVAČINA, J. Mikrovlnná integrovaná technika. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008
- [2] MALORATSKY, L. G. Passive and Microwave Integrated Circuits, Canada: J. Wiley & Sons, 2004
- [3] HOFFMANN, K. Planární mikrovlnné obvody. Skriptum. Praha: FEL ČVUT v Praze, 2003

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Radek Dvořák

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Miroslav Nejedlý
Bytem: Vepřová 73, Vepřová, 592 11
Narozen/a (datum a místo): 22. března 1985 v Novém Městě na Moravě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Návrh a realizace mikrovlnné směrové odbočnice

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Radek Dvořák

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užit, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 21. května 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou mikrovlnných směrových odbočnic. V práci jsou prezentovány některé mikrovlnné směrové odbočnice a je proveden rozbor jednotlivých odbočnic. V práci jsou také rozebrány postupy návrhů jednotlivých odbočnic a šířky pásma, kterého dosahují.

Je proveden návrh dvou vybraných směrových odbočnic a určení jejich rozměrů. Jsou také provedeny pomocí vybraného programu simulace obou zvolených odbočnic.

Dále jsou tyto odbočnice realizovány, na obvodovém analyzátoru je ověřena jejich činnost a jsou ověřeny skutečné parametry odbočnic.

Klíčová slova

Mikrovlnná, směrová, odbočnice, vlnovod, směrovost, šířka pásma, návrh, simulace.

Abstract

The diploma thesis deals with microwave directional coupler. The paper presents some of the microwave directional coupler and an analysis of bifurcations. The paper also discussed the various techniques of bifurcations and the bandwidth to which they are making.

Proposal is implemented in two selected directional couplers and determining their size. They also performed using the selected simulation program selected two bifurcations.

Furthermore, these couplers are made on the perimeter of the analyzer is verified by their actions and are verified by the actual parameters of the coupler.

Keywords

Mikrowave, directional, coupler, waveguide, directivity, bandwidth, proposal, simulation.

Bibliografická citace mé práce:

NEJEDLÝ, M. *Návrh a realizace mikrovlnné směrové odbočnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 63 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Návrh a realizace mikrovlnné směrové odbočnice jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Radku Dvořákovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 21. května 2010

.....
podpis autora

Obsah

1. ÚVOD	13
2. VLASTNOSTI SMĚROVÝCH ODBOČNIC	13
2.1 Tři druhy směrovosti u ideálních odbočnic	14
2.1.1 Směrovost 1.druhu	14
2.1.2 Směrovost 2.druhu	14
2.1.2 Směrovost 3.druhu	15
2.2 Parametry reálných směrových odbočnic.....	15
3. DRUHY SMĚROVÝCH ODBOČNIC.....	17
3.1 Mikropáskové směrové odbočnice	17
3.2 Vlnododové směrové odbočnice.....	17
3.2.1 Betheova směrová odbočnice	17
3.2.2 Směrová odbočnice se dvěma vazebními otvory	18
4. MIKROPÁSKOVÉ SMĚROVÉ ODBOČNICE	19
4.1 Čtvercová směrová odbočnice	19
4.2 Kruhová směrová odbočnice	23
4.3 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	25
4.4 Širokopásmové směrové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	26
4.5 Interdigitální (Langeho) odbočnice	28
4.6 Kombinovaný člen (De Rondeho člen)	29
5. NÁVRH ODBOČNICE	30
5.1 Návrh kruhové odbočnice.....	31
5.2 Návrh širokopásmové odbočnice z mikropáskových vedení	37
5.3 Určení rozměrů přívodního vedení kruhové odbočnice	40
5.4 Určení rozměrů přívodního vedení širokopásmové odbočnice.....	41
6. SIMULACE	42
6.1 Simulace kruhové odbočnice.....	42
6.1.1 Simulace kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB	42
6.1.2 Simulace kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB	43
6.2 Simulace širokopásmové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	46
7. REALIZACE SMĚROVÉ MIKROVLNNÉ ODBOČNICE.....	48

8. MĚŘENÍ SMĚROVÉ ODBOČNICE	49
8.1 Zjištění a porovnání parametrů směrové kruhové odbočnice	49
8.2 Zjištění a porovnání parametrů směrové širokopásmové odbočnice.....	53
9. ZÁVĚR.....	57
LITERATURA	59
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	60
PŘÍLOHY	61

Seznam obrázků

Obr. 2.1 - Směrovost 1.druhu	14
Obr. 2.2 - Směrovost 2.druhu	14
Obr. 2.3 - Směrovost 3.druhu	15
Obr. 2.4 - Signály směrové odbočnice.....	15
Obr. 3.1 - Betheova směrová odbočnice	18
Obr. 3.2 - Schwingerova směrová odbočnice	18
Obr. 3.3 - Ribletova směrová odbočnice.....	19
Obr. 3.4 - Morenova směrová odbočnice	19
Obr. 4.1 - Čtvercová směrová odbočnice	20
Obr. 4.2 - Čtyřpříčkový vazební člen	22
Obr. 4.3 - Kruhová směrová odbočnice	23
Obr. 4.4 - Kruhová odbočnice s fázovým invertorem.....	25
Obr. 4.5 - Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	25
Obr. 4.6 - Symetrická širokopásmová směrová odbočnice.....	27
Obr. 4.7 - Asymetrická širokopásmová směrová odbočnice	28
Obr. 4.8 - Langeho odbočnice	28
Obr. 4.9 - Kombinovaný člen	29
Obr. 5.1 - Symetrická širokopásmová směrová odbočnice se 3 sekcemi.....	37
Obr. 5.2 - Určení rozměrů a šířky mezery pro vazbu c_1	39
Obr. 5.3 - Určení rozměrů a šířky mezery pro vazbu c_2	39
Obr. 5.4 - Určení šířky přívodního vedení kruhové odbočnice.....	41
Obr. 6.1 - Náhradní obvod kruhové odbočnice pro vazební útlum 12dB	42
Obr. 6.2 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 12dB	43
Obr. 6.3 - Náhradní obvod kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB	44
Obr. 6.4 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB	44
Obr. 6.5 - Kruhová odbočnice pro vazební útlum 9dB	45

Obr. 6.6 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB	46
Obr. 6.7 - Širokopásmová odbočnice z vázaných mikropáskových vedení	47
Obr. 6.8 - Simulace širokopásmové odbočnice	47
Obr. 6.9 - Čtvrtvlnná širokopásmová odbočnice	48
Obr. 7.1 - Kruhová odbočnice s přívodním vedením	48
Obr. 7.2 - Širokopásmová odbočnice s přívodním vedením	49
Obr. 7.3 - Universální držák pro měření směrové odbočnice.....	49
Obr. 8.1 - Analýza parametrů kruhové směrové odbočnice.....	50
Obr. 8.2 - Činitel odrazu vstupní brány kruhové odbočnice	50
Obr. 8.3 - Vazební útlum kruhové odbočnice.....	51
Obr. 8.4 - Vložný útlum kruhové odbočnice	52
Obr. 8.5 - Izolace kruhové odbočnice	52
Obr. 8.5 - Analýza parametrů širokopásmové směrové odbočnice	53
Obr. 8.6 - Činitel odrazu vstupní brány širokopásmové odbočnice.....	54
Obr. 8.7 - Vazební útlum širokopásmové odbočnice	54
Obr. 8.8 - Vložný útlum širokopásmové odbočnice.....	55
Obr. 8.9 - Izolace širokopásmové odbočnice.....	56

Seznam tabulek

Tab.1 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB.....	33
Tab.2 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB.....	37
Tab.3 - Rozměry širokopásmové odbočnice s vazebním útlumem 12dB	40
Tab.4 - Rozměry širokopásmové odbočnice tříčtvrtělným úsekem vedení	40
Tab.5 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB.....	42
Tab.6 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB.....	43

1. ÚVOD

Mikrovlnné směrové odbočnice jsou mikrovlnné obvody, které se používají pro odbočení části mikrovlnného výkonu. Při tomto odbočení, ale nesmí vnášet žádné odrazy či tlumení části signálu. Pro směrové odbočnice se také používá název směrový vazební člen, který se používají např. v děličích výkonu, směšovačích a dalších mikrovlnných obvodech.

Vlastnosti mikrovlnných směrových odbočnic jsou pak dány tvarem odbočnice a také jejími rozměry, jako jsou šířka a délka mikropásků, ze kterých je odbočnice zkonstruována.

Směrové odbočnice mohou mít různou konstrukční podobu, ale jejich vlastnost, což je odbočit mikrovlnný signál, musí být stále u všech stejná. Mezi jednotlivé druhy mikrovlnných směrových odbočnic můžeme zařadit např. čtvercové a kruhové odbočnice, odbočnice z vázaných mikropáskových vedení, interdigitální odbočnice a kombinované členy. Kromě mikrovlnných mikropáskových odbočnic existují i další typy odbočnic jako jsou vlnododové směrové odbočnice a koaxiální směrové odbočnice.

Diplomová práce se zabývá jednotlivými typy mikrovlnných směrových odbočnic pro mikrovlnná pásma nad 1 GHz. Dále se zabývá možnostmi jejich realizace s ohledem na dosažitelnou šířku pásma a náročnost výroby. Jsou vybrány dva vhodné typy směrové odbočnice pro pásma nad 1 GHz. Je provedena optimalizace na šířku pásma ve zvoleném simulačním programu na požadovaný vazební útlum 12 dB. Realizované odbočnice jsou proměřeny pomocí obvodového analyzátoru a jsou zjištěny jejich skutečné dosažené parametry.

2. VLASTNOSTI SMĚROVÝCH ODBOČNIC

Věta o existenci ideální směrové odbočnice [1]:

„Reciproký bezztrátový a totálně přizpůsobený čtyřbran je ideální směrovou odbočnicí.“

Čtyřbran může být takový:

- a) který je přizpůsoben
- b) u něhož výkon vstupující do jedné brány vystupuje pouze dalšími dvěma branami, z ostatních bran nevystupuje žádný výkon
- c) součet vstupních výkonů je roven výstupním výkonům

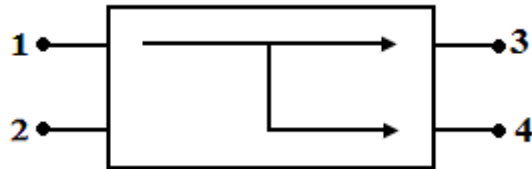
Jednotlivé vlastnosti mohou být rozděleny do dvou skupin:

- 1) vlastnosti ideální směrové odbočnice
- 2) vlastnosti reálné směrové odbočnice

2.1 Tři druhy směrovosti u ideálních odbočnic

2.1.1 Směrovost 1.druhu

Princip směrovosti 1.druhu je naznačen na Obr. 2.1 [1].



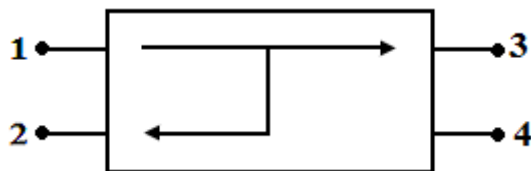
Obr. 2.1 - Směrovost 1.druhu

Směrovost 1. druhu lze popsat její rozptylovou maticí S [1].

$$S = \begin{vmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & 0 & 0 \\ S_{41} & S_{42} & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

2.1.2 Směrovost 2.druhu

Směrovost 2.druhu je opět naznačena na Obr.2.2 [1].



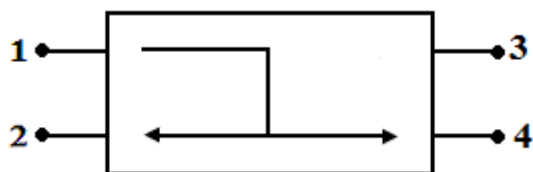
Obr. 2.2 - Směrovost 2.druhu

Směrovost 2. druhu lze popsat její rozptylovou maticí S [1] a tuto odbočnici lze nazývat též jako protisměrný vazební člen.

$$S = \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{vmatrix}$$

2.1.2 Směrnost 3.druhu

Směrnost 3. druhu je naznačena na následujícím Obr.2.3 [1].



Obr. 2.3 - Směrnost 3.druhu

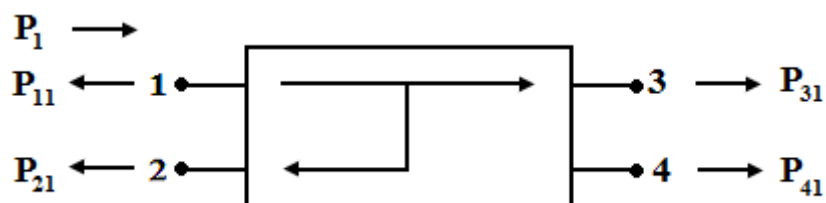
Směrnost 3. druhu se dá opět popsat pomocí rozptylové matice S [1].

$$S = \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{21} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{32} & 0 & S_{34} \\ S_{41} & 0 & S_{43} & 0 \end{vmatrix}$$

2.2 Parametry reálných směrových odbočnic

Žádný prvek v jejich rozptylové matici není nulový a mají velmi často určitou geometrickou symetrii.

Vstupní a výstupní signály lze definovat podle Obr.2.4 [1].



Obr. 2.4 - Signály směrové odbočnice

Takto definovaná směrová odbočnice se nazývá dvojnásobně reflexně symetrická směrová odbočnice a lze ji popsat pomocí její rozptylové matice S [1].

$$S = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} \end{vmatrix} \xrightarrow{\text{ideální SO}} \begin{vmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{21} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{31} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{42} & S_{43} & 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & j \cdot k & \sqrt{1-k^2} & 0 \\ j \cdot k & 0 & 0 & \sqrt{1-k^2} \\ \sqrt{1-k^2} & 0 & 0 & j \cdot k \\ 0 & \sqrt{1-k^2} & j \cdot k & 0 \end{vmatrix}$$

Napěťový koeficient přenosu do vazebního ramene je $k = |S_{12}|$.

Parametry reálných směrových odbočnic:

Dělení vstupních signálů mezi dvě vstupní brány charakterizují vložný a vazební útlum.

1) Vložný útlum (insertion loss) [1] [dB]

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_{31}} = 20 \log \frac{1}{|S_{31}|} \quad (2.3.1)$$

2) Vazební útlum (Coupling) [1] [dB]

$$C = 10 \log \frac{P_1}{P_{21}} = 20 \log \frac{1}{|S_{21}|} \quad (2.3.2)$$

3) Izolace (Isolation) [1] [dB]

Určuje oddělení čtvrté brány od ostatních bran odbočnice.

$$I = 10 \log \frac{P_1}{P_{41}} = 20 \log \frac{1}{|S_{41}|} \quad (2.3.3)$$

4) Směrovost (directivity) [1] [dB]

Vyjadřuje směrové vlastnosti vedlejších bran.

$$D = 10 \log \frac{P_{21}}{P_{41}} = 20 \log \frac{|S_{21}|}{|S_{41}|} \quad (2.3.4)$$

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

5) Zpětný útlum – činitel odrazu (return loss) [1] [dB]

$$RL = 10 \log \frac{P_1}{P_{11}} = 20 \log \frac{1}{|S_{11}|} \quad (2.3.5)$$

6) Vstupní PSV [1]

$$PSV = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} \quad (2.3.6)$$

Odraz na všech branách směrové odbočnice musí být minimální.

3. DRUHY SMĚROVÝCH ODBOČNIC

Pro oddělení části signálu od přenášeného signálu se používají směrové odbočnice, které tento signál oddělují. Směrové odbočnice nesmějí ovlivňovat přenášené signály.

Existují různé druhy mikrovlnných směrových odbočnic jako jsou mikropáskové, vlnododové a další. V této kapitole budou popsány některé druhy vlnododových a mikropáskových směrových odbočnic. Budou popsány jejich vlastnosti a stručné postupy při jednotlivém návrhu mikropáskových odbočnic.

3.1 Mikropáskové směrové odbočnice

Tyto odbočnice můžeme rozdělit na:

- čtvercové
- kruhové
- z vázaných mikropáskových vedení
- širokopásmové (vícestupňové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení)
- interdigitální (Langeho odbočnice)
- kombinovaný vazební člen

Jednotlivé druhy mikropáskových odbočnic jsou popsány v kapitole 4.

3.2 Vlnododové směrové odbočnice

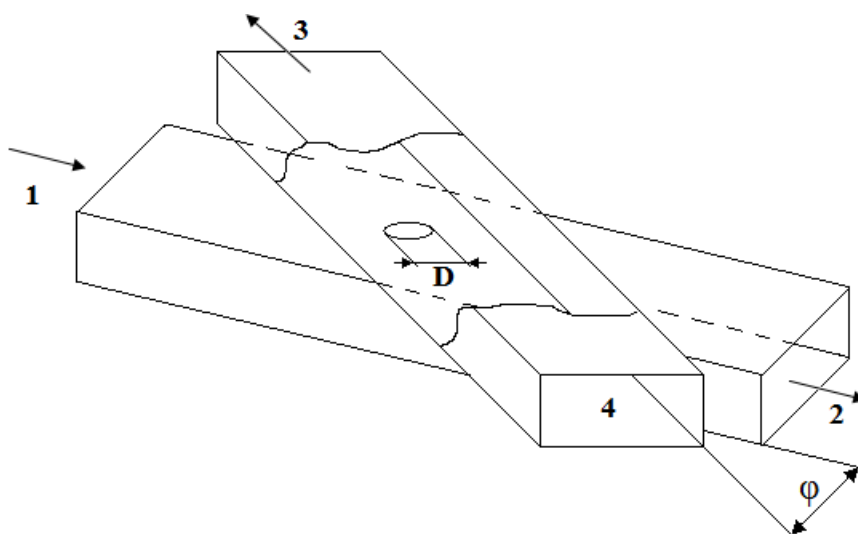
Tyto odbočnice lze rozdělit do dvou skupin

- 1) vazba mezi vlnodody je realizována jediným vazebním otvorem, mezi které patří např. Betheova směrová odbočnice.
- 2) vazba mezi vlnodody je tvořena několika vazebními otvory, kdy vznikají jako důsledek skládání vzájemně fázově posunutých vln. Mezi zástupce patří např. směrová odbočnice se dvěma vazebními otvory (Schingerova odbočnice, Ribletova odbočnice, Morenova odbočnice a další).

3.2.1 Betheova směrová odbočnice

Tato směrová odbočnice je tvořena vlnodody, mezi kterými se nachází jediný malý vazební otvor o velikosti D , který je znázorněn na Obr.3.1 [5]. Aby došlo k odbočení signálu, musí se vazba v odbočnici vytvořit elektrickou a magnetickou složkou elektromagnetického pole. Magnetická vazba je přímo úměrná $\cos\varphi$. Při úhlu 90° pak tato odbočnice ztrácí směrové

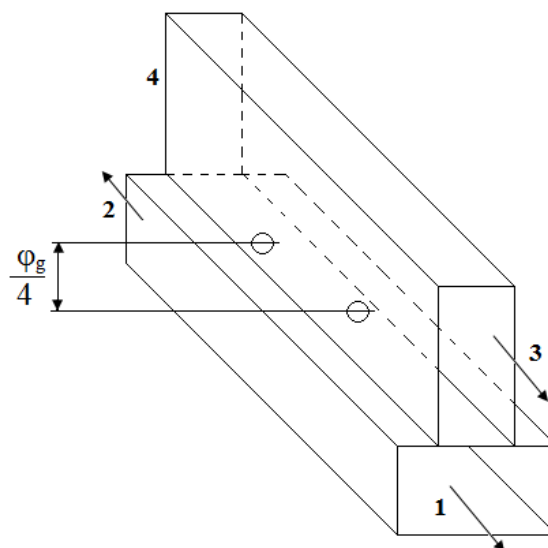
vlastnosti. Šířka pásma se u této směrové odbočnice dosahuje přibližně 10% ze středního kmitočtu.



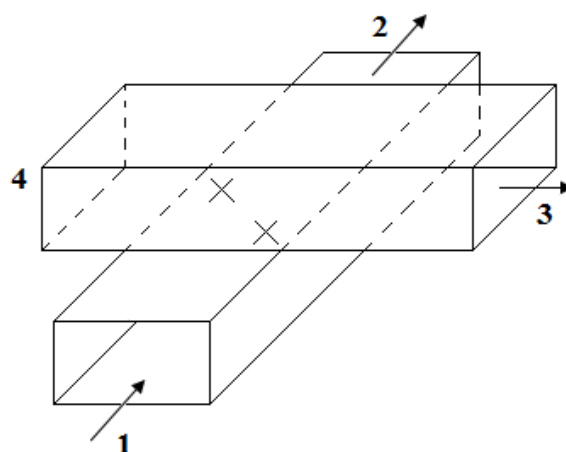
Obr. 3.1 - Betheova směrová odbočnice

3.2.2 Směrová odbočnice se dvěma vazebními otvory

U této odbočnice jsou vazební otvory od sebe vzdáleny o $\lambda_g/4$ a bývají většinou kruhové, které jsou umístěny uprostřed společné stěny vlnovodů. Nevýhodou těchto odbočnic je jejich kmitočtová závislost. Zvýšení šířky pásma se provádí vhodným umístěním vazebních otvorů, tím se dosáhne toho, že napětí v místě štěrbin je fázově posunuto a je v protifázi. Na tomto principu jsou založeny Schwingerova odbočnice Obr.3.2 [5] a Ribletova odbočnice Obr.3.3 [5], která má vazební otvory ve tvaru písmene T.

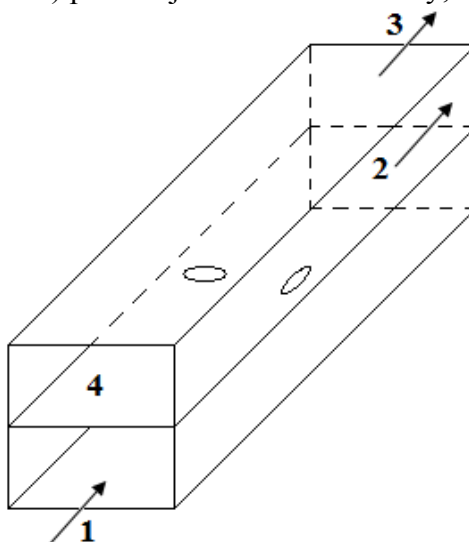


Obr. 3.2 - Schwingerova směrová odbočnice



Obr. 3.3 - Ribletova směrová odbočnice

Další směrovou odbočnicí je odbočnice Morenova Obr.3.4 [5], u které se k dosažení fázového posunu 180° (protifáze) používají dva vazební otvory, které jsou vzdáleny o $\lambda_g/4$.

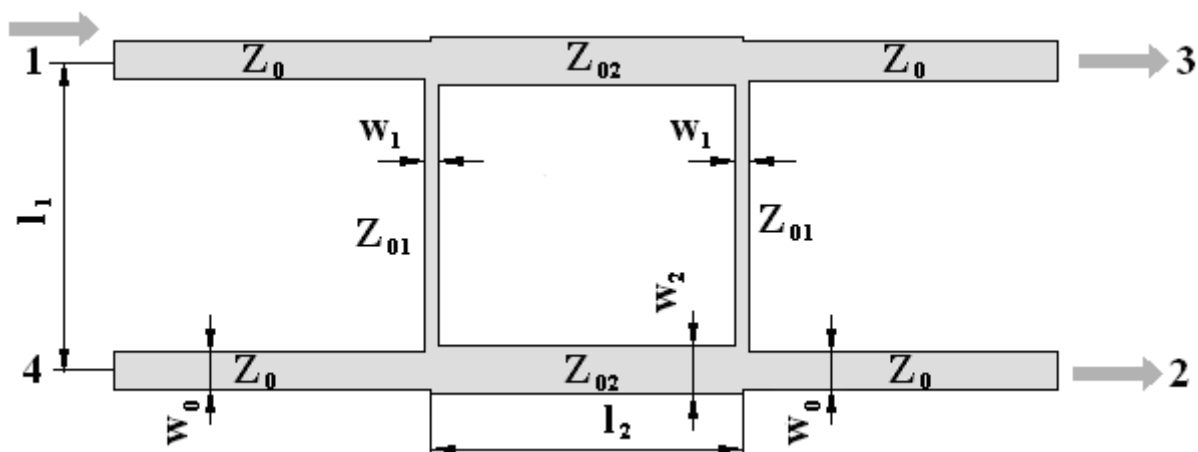


Obr. 3.4 - Morenova směrová odbočnice

4. MIKROPÁSKOVÉ SMĚROVÉ ODBOČNICE

4.1 Čtvercová směrová odbočnice

Čtvercová směrová odbočnice je jednou z nejjednodušších vazebních členů vzhledem ke své konstrukci. Jedná se o čtyřbran, který má směrovost 1.druhu a výstupní signály jsou u něj posunuty o 90° . K jejímu popisu stačí pouze čtyři parametry a to S_{11} , S_{12} , S_{13} a S_{14} , tudíž pro její popis stačí matice S pro odbočnici se dvěma rovinami symetrie. Čtvercová směrová odbočnice je znázorněna na Obr.4.1 [2].



Obr. 4.1 - Čtvercová směrová odbočnice

Při návrhu této odbočnice lze vycházet z ideální směrové odbočnice, pro kterou platí vztahy:

- 1) Pro podmínku impedančního přizpůsobení, kdy $S_{11}=0$ lze získat vztah [1]

$$\left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 - \left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 = 1 \quad (4.1.1)$$

- 2) Pro určení vazebního útlumu [1]

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{14}|} = 20 \log \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{Z_{02}}{Z_0}\right)^2}} \quad (4.1.2)$$

- 3) Určení průchozího útlumu [1]

$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} = 20 \log \frac{Z_0}{Z_{02}} \quad (4.1.3)$$

Návrh odbočnice je následující:

- 1) Určení z rovnice (4.1.2) velikost vlnové impedance Z_{02}
- 2) Z rovnice (4.1.1) pro impedančního přizpůsobení určit Z_{01}
- 3) Určení šířky mikropásků w_1 a w_2 pro použitý substrát a vypočtené impedance

Postup výpočtu šířky mikropásků je následující:

Nejdříve se určí poměr $\frac{h}{w}$ [7]

$$\frac{h}{w} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^H}{2} - e^{-H} \right), \quad H \text{ je pak dáno podle následujícího vztahu [7]} \quad (4.1.4)$$

$$H = \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} \cdot \frac{Z_{0k}}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \quad (4.1.5)$$

Pro vztahy (4.1.4) a (4.1.5) [7] musí být splněna podmínka:

$$\frac{w}{h} \leq 1, \quad (4.1.6)$$

pokud je podmínka splněna může být vyjádřena šířka mikropásku w jako

$$w = \frac{h}{\frac{h}{w}} \quad (4.1.7)$$

Pokud není splněna podmínka ze vztahu (4.1.6) pak pro poměr $\frac{w}{h}$ platí [7].

$$\frac{w}{h} = \frac{120 \cdot \pi}{Z_{0k} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left(\frac{2}{\pi} - \frac{\varepsilon_r - 1}{3,7 \cdot \varepsilon_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{120 \cdot \pi^2}{Z_{0k} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 + 1,84 \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \right) \quad (4.1.8)$$

šířka mikropásku w , je pak dána dle vzorce

$$w = h \cdot \frac{w}{h} \quad (4.1.9)$$

Ve vztazích (4.1.5) a (4.1.8) je nutné místo Z_{0k} dosazovat právě vlnové impedance Z_{01} a Z_{02} .

4) Určení délek mikropásků l_1 a l_2 z vlnových délek

Nejdříve je nutné určit efektivní šířka mikropásků w_{ef} .

pro $\frac{w}{h} \leq 1$ pak platí [1]

$$w_{ef} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\ln \left(\frac{8 \cdot h}{w} + \frac{w}{4 \cdot h} \right)} \right) \quad (4.1.10)$$

pro $\frac{w}{h} \geq 1$ pak platí [1]

$$w_{ef} = w + \frac{2 \cdot h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \left(\frac{w}{2 \cdot h} + 0,85 \right) \right] \quad (4.1.11)$$

Dále musí být určena efektivní permitivita $\sqrt{\varepsilon_{ef}}$, kterou lze vyjádřit ze vzorce pro vlnový odpor [1].

$$Z_{0k} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{\sqrt{\varepsilon_{ef}} \cdot w_{ef}} \quad (4.1.12)$$

$$\sqrt{\varepsilon_{ef}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{Z_{0k} \cdot w_{ef}}, \text{ kde za } Z_{0k} \text{ se opět dosazují vlnové} \quad (4.1.13)$$

impedance Z_{01} a Z_{02}

Poté mohou být určeny vlnové délky [1].

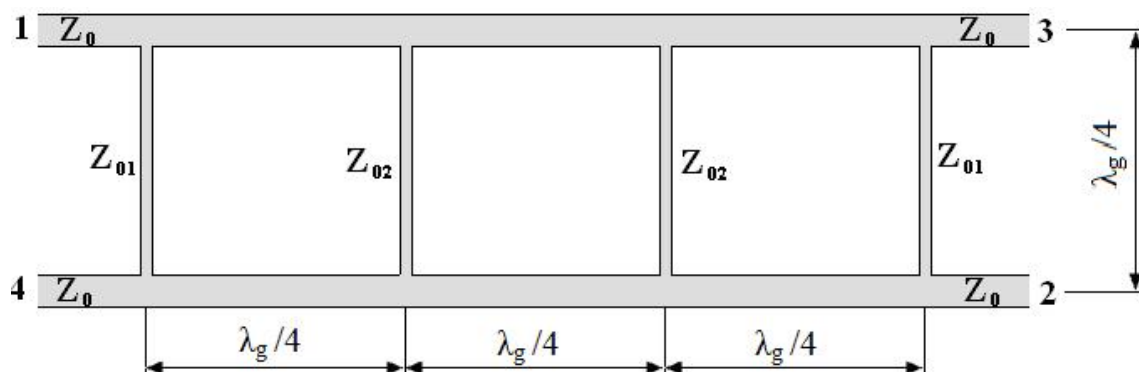
$$\lambda_g = \frac{C}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef}}} \quad (4.1.14)$$

Nakonec pro čtvrtvlnné úseky vedení s impedancemi Z_{01} a Z_{02} mohou být určeny délky těchto úseků [1].

$$l = \frac{\lambda_g}{4} \quad (4.1.15)$$

Čtvercové směrové odbočnice dosahují poměrně malých šířek pásma, které většinou bývají pouze kolem 5% z jejich středního kmitočtu. Ze šířky pásma vyplývá, že tyto odbočnice jsou úzkopásmové, ale určitými konstrukčními úpravami lze jednotlivé parametry odbočnice zlepšit. Mění se tvar odbočnice např. do kruhového tvaru či meandrového vedení.

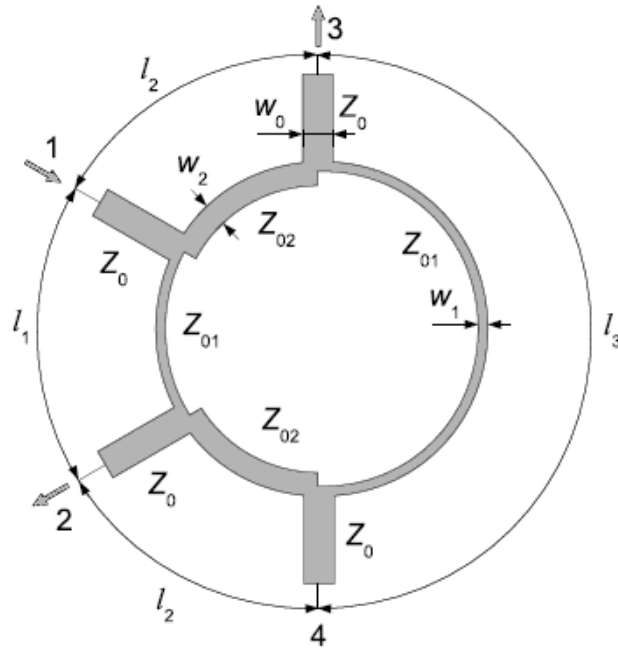
Pro zvýšení šířky pásma lze odbočnici přizpůsobit pahýlem. Další možností zvýšení šířky pásma je možnost udělat strukturu z více příček řazením do kaskády, tzv. příčkového vazebního členu. Na Obr.4.2 [1] je znázorněn čtyřpříčkový vazební člen.



Obr. 4.2 - Čtyřpříčkový vazební člen

4.2 Kruhá směrová odbočnice

Kruhá směrová odbočnice je tvořena kruhovými oblouky, které jsou široké podle impedance mikropáskového vedení. Jedná se o směrovou odbočnici, která je tvořena jednou rovinou symetrie, tudíž není kvadraturním členem. Vyznačuje se směrovostí 2.druhu. Při zanedbání ztrát a volbě čtvrtvlnných úseků l_1 a l_2 vedení Z_{01} a Z_{02} , kdy $l_1 = \lambda_{g1}/4$, $l_2 = \lambda_{g2}/4$ a $l_3 = \lambda_{g3}/4$ je pak celková délka prstence $3\lambda_g/2$. Při těchto délkách úseků vedení je pak odbočnice kmitočtově nezávislá. Podoba kruhové směrové odbočnice je znázorněna na Obr.4.3 [2]



Obr. 4.3 - Kruhá směrová odbočnice

Kruhovou odbočnici lze popsat pomocí rozptylové matice [1].

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

Kruhovou odbočnici lze budít čtyřmi způsoby [1]:

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

Při návrhu této odbočnice lze opět vycházet z ideální směrové odbočnice, pro kterou platí vztahy:

- 1) Pro podmínku impedančního přizpůsobení, kdy $S_{11}=0$ lze získat vztah [1]

$$\left(\frac{Z_0}{Z_{01}}\right)^2 + \left(\frac{Z_0}{Z_{02}}\right)^2 = 1 \quad (4.2.1)$$

- 2) Pro určení vazebního útlumu [1]

$$C = 20 \log \frac{1}{|S_{12}|} = 20 \log \frac{1}{|S_{34}|} = 20 \log \frac{Z_{01}}{Z_0} \quad (4.2.2)$$

- 3) Určení průchozího útlumu [1]

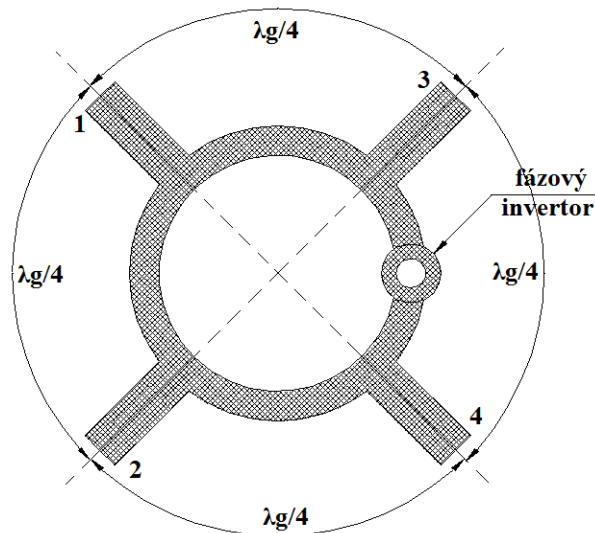
$$IL = 20 \log \frac{1}{|S_{13}|} = 20 \log \frac{Z_{02}}{Z_0} \quad (4.2.3)$$

Návrh odbočnice je následující:

- 1) Určení z rovnice (4.2.2) velikost vlnové impedance Z_{01}
- 2) Určení impedančního přizpůsobení Z_{02} z rovnice (4.2.1)
- 3) Určení šířky mikropásků w_1 a w_2 pro použitý substrát ze vzorců (4.1.4) až (4.1.9)
- 4) Určení délek mikropásků z vlnových délek pomocí vztahů (4.1.10) až (4.1.15)

$$l_1 = \lambda_{g1} / 4, l_2 = \lambda_{g2} / 4, l_3 = 3 \cdot \lambda_{g1} / 4$$
- 5) Určení vložného útlumu ze vzorce (4.2.3)

Kruhové směrové odbočnice dosahují širších šířek pásma než čtvercové směrové odbočnice a to kolem 5 až 10% ze středního kmitočtu. Vlastnosti směrové odbočnice lze opět zlepšit pomocí konstrukčních úprav. Rozšíření kmitočtového pásma lze provést náhradou úseku vedení, které je dlouhé $3\lambda_g/4$, úsekem $\lambda_g/4$ a fázovým invertorem. V takto realizované kruhové směrové odbočnici může dojít ke zvětšení šířky pásma. Kruhová odbočnice s fázovým invertorem je znázorněna na Obr.4.4 [1].

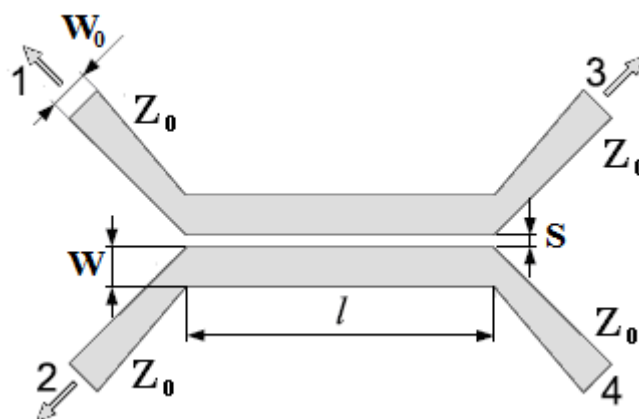


Obr. 4.4 - Kruhová odbočnice s fázovým invertorem

Fázový invertor lze provést pomocí vázaných mikropáskových vedení, nevýhodou této realizace je nesnadná realizace zkratů přes dielektrický substrát. Další možnosti konstrukce fázového invertoru jsou pomocí „zkřížení“ vodičů mikropáskového vedení a také pomocí kombinace mikropáskové vedení a štěrbinového vedení.

4.3 Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení je složena ze dvou rovnoběžných a stejně širokých mikropásků, mezi kterými je mezera. V této odbočnici nelze dosáhnout jiné směrovosti než 2.druhu. Její tvar je znázorněn na Obr.4.5 [2].



Obr. 4.5 - Odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

Šířkou mikropásků a velikostí vazební mezery lze ovlivňovat vazební útlum. Při buzení mohou vznikat dva vidy a to sudý a lichý, které vznikají na vázaném vedení. Vznikají

tak dvě impedance, jedna pro sudý vid Z_{0E} (4.3.1) [1] a pro lichý vid Z_{0O} (4.3.2) [1]. Tyto impedance lze vyjádřit podle následujících vztahů, kde C je vazební útlum.

$$Z_{0E} = Z_0 \sqrt{\frac{1 + 10^{-\frac{C}{20}}}{1 - 10^{-\frac{C}{20}}}} \quad (4.3.1)$$

$$Z_{0O} = Z_0 \sqrt{\frac{1 - 10^{-\frac{C}{20}}}{1 + 10^{-\frac{C}{20}}}} \quad (4.3.2)$$

Jelikož ve směrové odbočnici z vázaných mikropáskových vedení je fázová rychlost lichého vidu větší než sudého vidu, dochází k poklesu šířky pásma a také směrovosti. V tomto důsledku se opět používají různé konstrukční úpravy, jako je např. odklon přírodních vedení o 45° (celkem pak 90°) v důsledku vzájemného ovlivňování, dále pak zmenšením impedančního skoku na vstupu a výstupu vázaných vedení. Také se používají různé metody pro vyrovnání fázových rychlostí sudého a lichého vidu (např. přidání dielektrické vrstvy, vrstvený substrát, přídavná kapacita mezi pásy pro snížení rychlosti lichého vidu, prodloužení vazební štěrby, širokopásmové odbočnice, zvýšení vazby kaskádním spojením...).

4.4 Širokopásmové směrové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

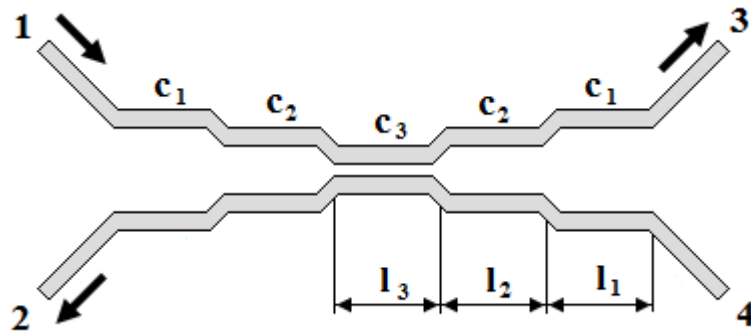
Jedná se o víceúrovňovou odbočnici s různými stupni vazby v jednotlivých stupních.

Elektrická délka všech stupňů je stejná $(\alpha_{ei} + \alpha_{oi}) = \pi$. Se zvyšováním počtu sekcí roste i šířka pásma.

Širokopásmové směrové odbočnice se dělí do dvou typů:

a) Symetrická širokopásmová směrová odbočnice

Musí mít vždy lichý počet jednotlivých sekcí, tím vzniká to, že jsou výstupní signály vzájemně posunuty o $\pi/2$, které nesouvisí s počtem sekcí. Symetrická širokopásmová odbočnice je znázorněna na Obr.4.6 [3], tato odbočnice má 3 sekce.



Obr. 4.6 - Symetrická širokopásmová směrová odbočnice

Vazební útlum širokopásmové odbočnice lze vypočítat dle následujícího vztahu [3]

$$C = 20 \cdot \log(c) \quad (4.4.1)$$

Pro jednotlivé vazby lze vypočítat vazební útlum dle následujících vzorců:
pro 3 sekce odvozených z [3]

$$c = c_2 - 2 \cdot c_1 \quad (4.4.2)$$

$$c_2 = 10 \cdot c_1 \quad (4.4.3)$$

$$c_1 = c_3 = \frac{c}{8} = \frac{0,25}{8} = 0,031 \quad (4.4.4)$$

pro 5 sekcí odvozených z [3]

$$\frac{c_3}{536} = \frac{c_2}{84} = \frac{c_1}{9} \quad (4.4.5)$$

$$c = c_3 - 2 \cdot c_2 + 2 \cdot c_1 = \frac{386 \cdot c_1}{9} \quad (4.4.6)$$

Jelikož ve vázaných vedeních vznikají dva vidy je nutné při návrhu s těmito vidy počítat. Výpočet impedance sudého Z_{0E} a lichého Z_{0O} vidu pro jednotlivé vazby lze vypočítat [3].

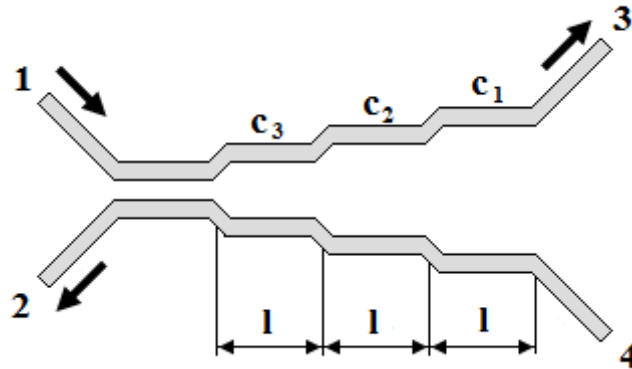
$$Z_{0E} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+c}{1-c}} \quad (4.4.7)$$

$$Z_{0O} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1-c}{1+c}} \quad (4.4.8)$$

Kde za c se dosazují hodnoty činitele vazby jednotlivých sekcí $c_1, c_2 \dots$

b) Asymetrická širokopásmová směrová odbočnice

Tato směrová odbočnice může mít jak lichý tak i sudý počet vazebních sekcí. Oproti symetrické širokopásmové směrové odbočnici lze získat větší šířku pásma. Výstupní signály jsou fázově posunuty podle počtu vazebních sekcí, např. při dvou sekcích posuv o 180° , tři sekce 90° , čtyři sekce fázový posuv 0° . Na Obr.4.7 [3] je znázorněna asymetrická širokopásmová směrová odbočnice se čtyřmi sekcemi.

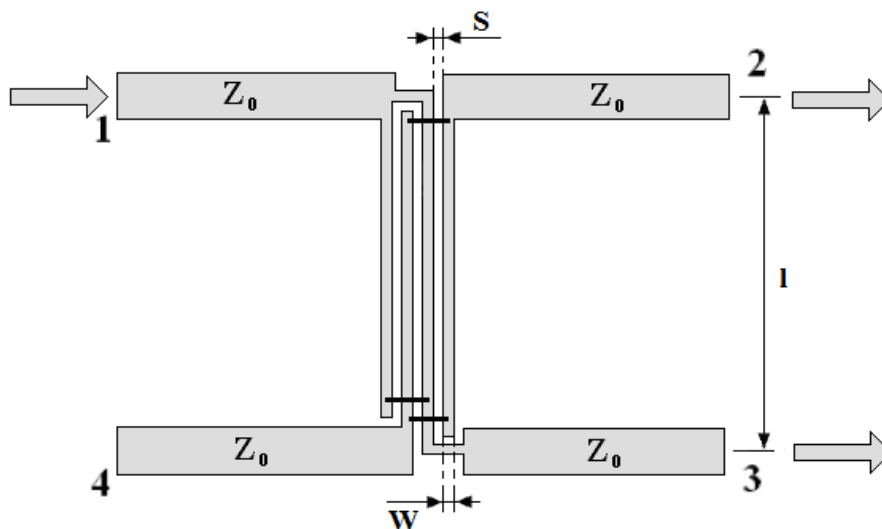


Obr. 4.7 - Asymetrická širokopásmová směrová odbočnice

Jelikož návrh odbočnic z vázaných mikropáskových vedení je pro ruční výpočet poměrně složitý, používá se pro jejich návrh výpočetní program např. Ansoft Designer, Puff a podobné.

4.5 Interdigitální (Langeho) odbočnice

Tato odbočnice je tvořena pomocí stejně širokých vázaných mikropáskových vedení, které tvoří paralelní spojení. Vazba jednotlivých pásků je prováděna mezi sousedními pásky, vždy přes jeden pásek. Jedna z možných struktur této odbočnice je na Obr.4.8 [1].



Obr. 4.8 - Langeho odbočnice

Velká výhoda Langeho odbočnic je ta, že mohou dosahovat velmi malých vazebních útlumů, oproti odbočnicím z vázaných mikropáskových vedení.

Pro přizpůsobení a izolaci musí být splněno [1]:

$$Z_v = \frac{Z_{ve} \cdot Z_{vo} \cdot (Z_{ve} + Z_{vo})^2}{[Z_{ve} + (n-1) \cdot Z_{vo}] \cdot [Z_{vo} + (n-1) \cdot Z_{ve}]} \quad (4.5.1)$$

Z_{ve} a Z_{vo} opovídají samostatné dvojici pásků, Z_v je vlnový odpor napájecích vedení a n je sudý počet vazebních pásků, na Obr.4.8 jsou 4 pásky.

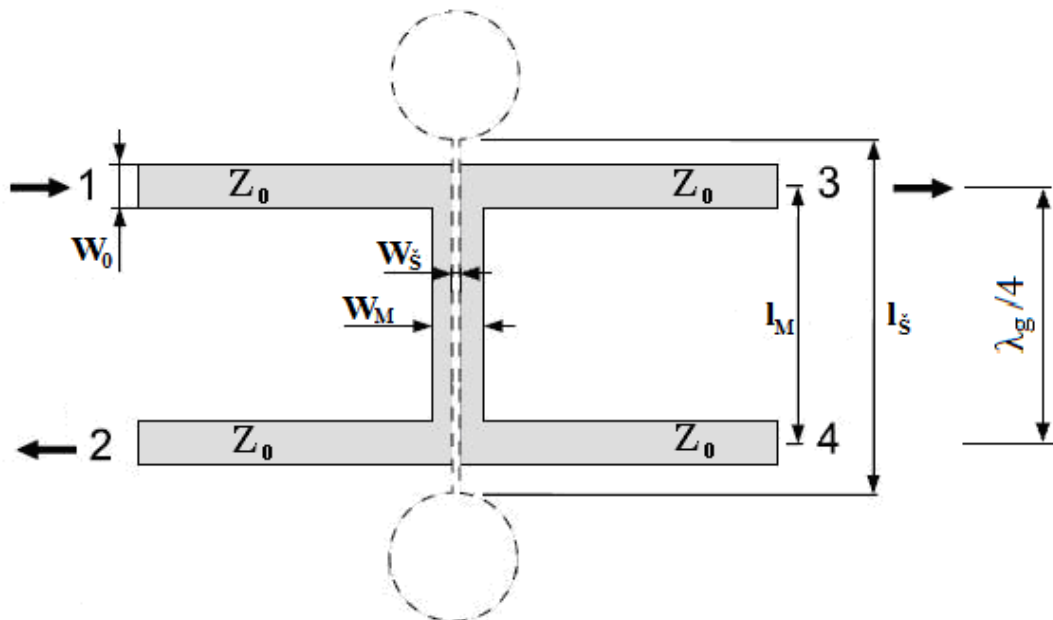
Pro koeficient vazby platí [1]:

$$k = |S_{12}| = (n-1) \frac{Z_{ve}^2 \cdot Z_{vo}^2}{2 \cdot Z_{ve} \cdot Z_{vo} + (n-1)(Z_{ve}^2 + Z_{vo}^2)} \quad (4.5.2)$$

$$C = 20 \log \frac{1}{k} \quad (4.5.3)$$

4.6 Kombinovaný člen (De Rondeho člen)

Jedná se o odbočnici, která je složena z kombinace mikropáskového a šterbinového vedení. Tato odbočnice dosahuje směrovosti 2.druhu a je znázorněna na Obr.4.9 [2].



Obr. 4.9 - Kombinovaný člen

Kombinovaný člen dosahuje velkých šířek pásma díky kombinaci štěrbinového vedení a mikropáskového vedení.

Princip činnosti podle [1]

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

- a) Přes příčný mikropásek – vlny v ramenech 2 a 4 se šíří v opačných směrech se stejnou fází.
- b) Přes příčnou štěrbinu – vlny v ramenech 2 a 4 se šíří s opačnou fází, kdy dvojnásobný přechod mikropásek-štěrbina vytváří fázový invertor.

V rameni 2 se vlny setkávají ve stejné fázi a sčítají se. V rameni 4 se vlny setkávají v opačné fázi a tudíž se vyruší. Proto je rameno 4 od ramene 1 izolované.

Při návrhu kombinovaného členu se návrh rozděluje do dvou směrů a to určení šířek mikropásků a pak určení rozměrů štěrbin. Při výpočtu rozměrů je nejjednodušší použití programu, ale pro rozměr štěrbin se musí postupovat iterační metodou. A navrhování se tak stává celkem obtížné z důvodu složitých odvozování vzorců pro výpočty.

Při konstrukčních úpravách se používá připojení kapacit na konce štěrbin, které se realizují pomocí štěrbinového úseku vedení o délce l_M .

5. NÁVRH ODBOČNICE

Tato kapitola je založena na návrhu vybraných odbočnic a určení jejich rozměrů. Pro návrh byly vybrány dvě odbočnice a to kruhová a symetrická širokopásmová odbočnice z vázaných mikropáskových vedení.

Směrové odbočnice se navrhují pro jeden střední kmitočet f_0 a požadovaný vazební útlum C . Na základě těchto dvou parametrů se posléze určují rozměry vybrané odbočnice, pro které je dalším důležitým parametrem zvolený substrát.

Pro návrh směrových odbočnic byl vybrán substrát s relativní permitivitou $\epsilon_r=3,4$, výškou substrátu $h=1,52$ a ztrátovým činitelem $tg\delta=0,06$. Důvod jeho výběru je výška substrátu, se kterou je vybrané odbočnice vypočítat dle zadání a aby splňovaly technologické požadavky na výrobu. Nejmenší rozměr, který je možné z hlediska výroby vyrobit je 0,25mm jak šířky mikropáskového vedení tak i mezery mezi nimi. Pro jiné substráty, s jinou permitivitou a výškou, nebylo docíleno požadovaných rozměrů.

5.1 Návrh kruhové odbočnice

Pro návrh kruhové odbočnice byla zvolena dielektrická podložka s následujícími parametry relativní permitivita $\epsilon_r=3,4$ a výška substrátu $h=1,52$. Impedance vstupního vedení Z_0 bývá zpravidla 50Ω . Dále byl zvolen střední kmitočet pásma $f=5\text{GHz}$ pro požadovaný vazební útlum $C=12\text{dB}$.

Určení vlnových impedancí Z_{01} a Z_{02} ze vzorců (4.2.2) resp. (4.2.1)

$$Z_{01} = Z_0 \cdot 10^{\frac{C}{20}} = 50 \cdot 10^{\frac{12}{20}} = 199,05\Omega$$

$$Z_{02} = Z_0 \cdot Z_{01} \cdot \sqrt{\frac{1}{Z_{01}^2 + Z_0^2}} = 50 \cdot 199,05 \cdot \sqrt{\frac{1}{199,05^2 + 50^2}} = 51,65\Omega$$

Určení poměru $\frac{h}{w}$ pro výpočet šířky mikropásku w_1 ze vztahů (4.1.4) a (4.1.5)

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \cdot \frac{Z_{01}}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} = \sqrt{\frac{3,4 + 1}{2}} \cdot \frac{199,05}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4 + 1} = 5,07699\text{mm}$$

$$\frac{h}{w_1} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{H_1}}{2} - e^{-H_1} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{5,07699}}{2} - e^{-5,07699} \right) = 20,0347$$

Aby mohl být platný výsledek z předchozího vztahu, musí být platná podmínka:

$$\frac{w_1}{h} \leq 1, \text{ odkud}$$

$$\frac{h}{w_1} \geq 1, \text{ po dosazení je zřejmé, že podmínka je splněna a může být určena}$$

šířka mikropásku w_1 , který bude vyjádřen ze vzorce pro výpočet $\frac{h}{w_1}$

$$w_1 = \frac{h}{\frac{h}{w_1}} = \frac{1,52}{20,0347} = 0,0758\text{mm}$$

Určení poměru $\frac{h}{w}$ pro výpočet šířky mikropásku w_2 ze vztahů (4.1.4) a (4.1.5)

$$H_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \cdot \frac{Z_{02}}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} = \sqrt{\frac{3,4 + 1}{2}} \cdot \frac{51,65}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4 + 1} = 1,43323\text{mm}$$

$$\frac{h}{w_2} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{H_2}}{2} - e^{-H_2} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{1,43323}}{2} - e^{-1,43323} \right) = 0,46439$$

Aby mohl být platný výsledek z předchozího vztahu, musí být platná podmínka:

$$\frac{w_2}{h} \leq 1, \text{ odkud}$$

$$\frac{h}{w_2} \geq 1, \text{ po dosazení je zřejmé, že podmínka není splněna a proto musí být}$$

šířka mikropásku w_2 , určena podle vzorce (4.1.8), pro který platí podmínka $\frac{w_2}{h} \geq 1$

$$\frac{w_2}{h} = \frac{120 \cdot \pi}{Z_{02} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left(\frac{2}{\pi} - \frac{\varepsilon_r - 1}{3,7 \cdot \varepsilon_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{120 \cdot \pi^2}{Z_{02} \cdot \sqrt{\varepsilon_r}} - 1 + 1,84 \cdot \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r} \right)$$

$$\frac{w_2}{h} = \frac{120 \cdot \pi}{51,65 \cdot \sqrt{3,4}} - \frac{2}{\pi} - \left(\frac{2}{\pi} - \frac{3,4 - 1}{3,7 \cdot 3,4} \right) \cdot \ln \left(\frac{120 \cdot \pi^2}{51,65 \cdot \sqrt{3,4}} - 1 + 1,84 \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4} \right)$$

$$\frac{w_2}{h} = 2,187$$

Šířka mikropásku w_2 , je pak dána dle vzorce (4.1.9)

$$w_2 = h \cdot \frac{w_2}{h} = 1,52 \cdot 2,187 = 3,32132 \text{ mm}$$

Aby bylo možné vypočítat délky mikropásků musí být nejprve určena jejich efektivní šířka, která byla určena dle vztahů (4.1.10) pro šířku mikropásku w_1 a (4.1.11) pro šířku mikropásku w_2 jelikož nebyla splněna podmínka ze vztahu (4.1.6).

$$w_{1ef} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\ln \left(\frac{8 \cdot h}{w_1} + \frac{w_1}{4 \cdot h} \right)} \right) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 1,52}{\ln \left(\frac{8 \cdot 1,52}{0,07586} + \frac{0,07586}{4 \cdot 1,52} \right)} \right) = 1,881122 \text{ mm}$$

$$w_{2ef} = w_2 + \frac{2 \cdot h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \left(\frac{w_2}{2 \cdot h} + 0,85 \right) \right]$$

$$w_{2ef} = 3,32132 + \frac{2 \cdot 1,52}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \left(\frac{3,32132}{2 \cdot 1,52} + 0,85 \right) \right] = 6,713389 \text{ mm}$$

Dále musí být určena efektivní permitivita $\sqrt{\epsilon_{ef}}$, která byla vyjádřena ze vzorce (4.1.12). Efektivní permitivita je potřebná pro výpočet vlnových délek.

$$\sqrt{\epsilon_{ef1}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{Z_{01} \cdot w_{1ef}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot 1,52}{199,05 \cdot 1,881122} = 1,5303$$

$$\sqrt{\epsilon_{ef2}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{Z_{02} \cdot w_{2ef}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot 1,52}{51,65 \cdot 6,713389} = 1,6523$$

Určení vlnových délek dle vztahu (4.1.14)

$$\lambda_{g1} = \frac{C}{f \cdot \sqrt{\epsilon_{ef1}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9 \cdot 1,5303} = 0,03921m$$

$$\lambda_{g2} = \frac{C}{f \cdot \sqrt{\epsilon_{ef2}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9 \cdot 1,6523} = 0,03631m$$

Pro určení jednotlivých délek mikropásků se určí čtvrtvlnné úseky vedení s impedancemi Z_{01} a Z_{02} .

$$l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4} = \frac{0,03921}{4} = 0,0098017m = 9,8017mm$$

$$l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4} = \frac{0,03631}{4} = 0,0090778m = 9,0778mm$$

Vypočtené rozměry kruhové odbočnice pro vazební útlum 12dB jsou uvedeny v Tab.1, kde jsou i vypočtené hodnoty i pomocí programu Ansoft Designer. Rozdílnost výsledných rozměrů je dána nepřesností výpočtu a zaokrouhlováním.

Tab.1 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB

C=12dB	Z_{01} [Ω]	Z_{02} [Ω]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]
Vypočtené hodnoty	199,05	51,65	0,0758	3,3213	9,8017	9,0778
Vypočtené hodnoty pomocí programu Ansoft			0,0571	3,3385	9,9802	9,0487

Výpočet vložného (přechozího) útlumu dle vztahu (4.2.3)

$$IL = 20 \log \frac{Z_{02}}{Z_0} = 20 \cdot \log \frac{51,65}{50} = 0,28dB$$

Jelikož vypočtené rozměry odbočnice nejsou realizovatelné, protože technologické podmínky výroby vyžadují rozměry mikropásků alespoň 0,25mm, musel být snížen vazební útlum na takovou hodnotu, pro kterou kruhová odbočnice lze realizovat. Tato hodnota vazebního útlumu je 9dB. Před snížením vazebního útlumu byly provedeny výpočty s jinými dostupnými substráty, ale odbočnice by byla také nerealizovatelná.

Určení vlnových impedancí Z_{01} a Z_{02} ze vzorců (4.2.2) resp. (4.2.1)

$$Z_{01} = Z_0 \cdot 10^{\frac{c}{20}} = 50 \cdot 10^{\frac{9}{20}} = 140,919\Omega$$

$$Z_{02} = Z_0 \cdot Z_{01} \cdot \sqrt{\frac{1}{Z_{01}^2 + Z_0^2}} = 50 \cdot 140,919 \cdot \sqrt{\frac{1}{140,919^2 + 50^2}} = 47,121\Omega$$

Určení poměru $\frac{h}{w}$ pro výpočet šířky mikropásku w_1 ze vztahů (4.1.4) a (4.1.5)

$$H_1 = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \cdot \frac{Z_{01}}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} = \sqrt{\frac{3,4 + 1}{2}} \cdot \frac{140,919}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4 + 1} = 3,6398mm$$

$$\frac{h}{w_1} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{H_1}}{2} - e^{-H_1} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{3,6398}}{2} - e^{-3,6398} \right) = 4,7543$$

Aby mohl být platný výsledek z předchozího vztahu, musí být platná podmínka:

$$\frac{w_1}{h} \leq 1, \text{ odkud}$$

$$\frac{h}{w_1} \geq 1, \text{ po dosazení je zřejmé, že podmínka je splněna a může být určena}$$

šířka mikropásku w_1 , který bude vyjádřen ze vzorce pro výpočet $\frac{h}{w_1}$

$$w_1 = \frac{h}{\frac{h}{w_1}} = \frac{1,52}{4,7543} = 0,3197mm$$

Určení poměru $\frac{h}{w}$ pro výpočet šířky mikropásku w_2 ze vztahů (4.1.4) a (4.1.5).

$$H_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}} \cdot \frac{Z_{02}}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} = \sqrt{\frac{3,4 + 1}{2}} \cdot \frac{47,121}{60} + \frac{0,9}{\pi} \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4 + 1} = 1,3211mm$$

$$\frac{h}{w_2} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{H_2}}{2} - e^{-H_2} \right) = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{e^{1,3211}}{2} - e^{-1,3211} \right) = 0,4017$$

Aby mohl být platný výsledek z předchozího vztahu, musí být platná podmínka:

$$\frac{w_2}{h} \leq 1, \text{ odkud}$$

$\frac{h}{w_2} \geq 1$, po dosazení je zřejmé, že podmínka není splněna a proto musí být šířka mikropásku w_2 , určena podle vzorce (4.1.8), pro který platí podmínka $\frac{w_2}{h} \geq 1$.

$$\frac{w_2}{h} = \frac{120 \cdot \pi}{Z_{02} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} - \frac{2}{\pi} - \left(\frac{2}{\pi} - \frac{\epsilon_r - 1}{3,7 \cdot \epsilon_r} \right) \cdot \ln \left(\frac{120 \cdot \pi^2}{Z_{02} \cdot \sqrt{\epsilon_r}} - 1 + 1,84 \cdot \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r} \right)$$

$$\frac{w_2}{h} = \frac{120 \cdot \pi}{47,121 \cdot \sqrt{3,4}} - \frac{2}{\pi} - \left(\frac{2}{\pi} - \frac{3,4 - 1}{3,7 \cdot 3,4} \right) \cdot \ln \left(\frac{120 \cdot \pi^2}{47,121 \cdot \sqrt{3,4}} - 1 + 1,84 \cdot \frac{3,4 - 1}{3,4} \right)$$

$$\frac{w_2}{h} = 2,5278$$

Šířka mikropásku w_2 , je pak dána dle vzorce (4.1.9)

$$w_2 = h \cdot \frac{w_2}{h} = 1,52 \cdot 2,5278 = 3,8423 \text{ mm}$$

Aby bylo možné vypočítat délky mikropásků musí být nejprve určena jejich efektivní šířka, která byla určena dle vztahů (4.1.10) pro šířku mikropásku w_1 a (4.1.11) pro šířku mikropásku w_2 jelikož nebyla splněna podmínka ze vztahu (4.1.6).

$$w_{1ef} = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\ln \left(\frac{8 \cdot h}{w_1} + \frac{w_1}{4 \cdot h} \right)} \right) = \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot 1,52}{\ln \left(\frac{8 \cdot 1,52}{0,3197} + \frac{0,3197}{4 \cdot 1,52} \right)} \right) = 2,6238 \text{ mm}$$

$$w_{2ef} = w_2 + \frac{2 \cdot h}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \left(\frac{w_2}{2 \cdot h} + 0,85 \right) \right]$$

$$w_{2ef} = 3,8423 + \frac{2 \cdot 1,52}{\pi} \cdot \ln \left[17,08 \left(\frac{3,8423}{2 \cdot 1,52} + 0,85 \right) \right] = 6,8524 \text{ mm}$$

Dále musí být určena efektivní permitivita $\sqrt{\varepsilon_{ef}}$, která byla vyjádřena ze vzorce (4.1.12). Efektivní permitivita je potřebná pro výpočet vlnových délek.

$$\sqrt{\varepsilon_{ef1}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{Z_{01} \cdot w_{1ef}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot 1,52}{140,919 \cdot 2,6238} = 1,54977$$

$$\sqrt{\varepsilon_{ef2}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot h}{Z_{02} \cdot w_{2ef}} = \frac{120 \cdot \pi \cdot 1,52}{47,121 \cdot 6,8524} = 1,77462$$

Určení vlnových délek dle vztahu (4.1.14)

$$\lambda_{g1} = \frac{C}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef1}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9 \cdot 1,54977} = 0,03871m$$

$$\lambda_{g2} = \frac{C}{f \cdot \sqrt{\varepsilon_{ef2}}} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^9 \cdot 1,77462} = 0,03381m$$

Pro určení jednotlivých délek mikropásků se určí čtvrtvlnné úseky vedení s impedancemi Z_{01} a Z_{02} .

$$l_1 = \frac{\lambda_{g1}}{4} = \frac{0,03871}{4} = 0,0096788m = 9,6788mm$$

$$l_2 = \frac{\lambda_{g2}}{4} = \frac{0,03381}{4} = 0,0084525m = 8,4525mm$$

Z důvodu malých délek úseků mohou být délky vypočteny pro tříčtvrtvlnné úseky vedení.

$$l_1 = \frac{3 \cdot \lambda_{g1}}{4} = \frac{3 \cdot 0,03871}{4} = 0,029036m = 29,036mm$$

$$l_2 = \frac{3 \cdot \lambda_{g2}}{4} = \frac{3 \cdot 0,03381}{4} = 0,025357m = 25,357mm$$

Takto navržená kruhová odbočnice již splňuje požadavky na výrobu a to, aby šířky mikropásků byly alespoň 0,25mm. Námi navržená kruhová odbočnice má nejmenší rozměr mikropásku 0,319mm.

Vypočtené rozměry kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB jsou uvedeny v Tab.2, kde jsou i vypočtené hodnoty i pomocí programu Ansoft Designer. Rozdílnost výsledných rozměrů je dána nepřesností výpočtu a zaokrouhlováním.

Tab.2 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB

C=9dB	Z_{01} [Ω]	Z_{02} [Ω]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]
Vypočtené hodnoty	140,919	47,121	0,3197	3,8423	9,6788	8,4524
Vypočtené hodnoty pomocí programu Ansoft			0,3016	3,8645	9,7276	8,9882

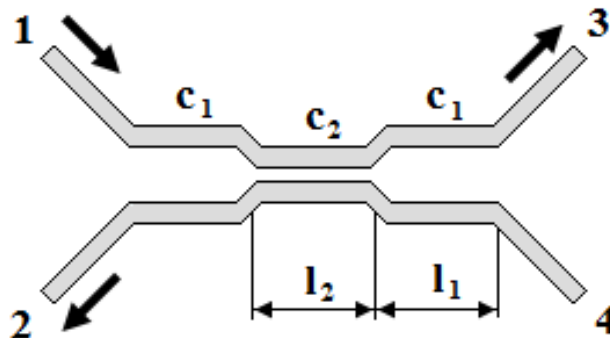
Výpočet vložného (přechodného) útlumu dle vztahu (4.2.3)

$$IL = 20 \log \frac{Z_{02}}{Z_0} = 20 \cdot \log \frac{47,121}{50} = 0,515 \text{ dB}$$

5.2 Návrh širokopásmové odbočnice z mikropáskových vedení

Pro návrh širokopásmové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení byla opět zvolena dielektrická podložka jako při návrhu kruhové odbočnice a to s následujícími parametry, relativní permitivita $\epsilon_r=3,4$ a výška substrátu $h=1,52$. Impedance vstupního vedení Z_0 bývá zpravidla 50Ω , proto byla zvolena právě 50Ω . Dále byl zvolen střední kmitočet pásma $f=10\text{GHz}$ pro požadovaný vazební útlum $C=12\text{dB}$.

Pro návrh byla zvolena symetrická širokopásmová odbočnice se třemi sekcemi dle následujícího obrázku.



Obr. 5.1 - Symetrická širokopásmová směrová odbočnice se 3 sekcemi

Vazební útlum této směrové odbočnice je dán dle vztahu (4.4.1), ale jelikož vazební útlum je 12dB je nutné převést tento útlum na činitel vazby c .

$C = 20 \cdot \log(c)$, odtud převedeme vazební útlum v dB na bezrozměrné číslo c

$$c = 10^{\frac{-C}{20}} = 10^{\frac{-12}{20}} = 0,25$$

Z celkového činitele vazby c můžeme určit jednotlivé činitele vazby dle vztahů pro výpočet odbočnice se 3 sekcemi a to z celkové vazby dle vztahu (4.4.2), vazbu druhé sekce c_2 (4.4.3) a nakonec vazbu sekcí c_1 (4.4.4).

$$c = c_2 - 2 \cdot c_1, \text{ kde } 10 \cdot c_1 = c_2$$

Odtud vyjádříme součinitel první a třetí vazby

$$c_1 = \frac{c}{8} = \frac{0,25}{8} = 0,031$$

Součinitel druhé vazby

$$c_2 = 10 \cdot \frac{c}{8} = 10 \cdot \frac{0,25}{8} = 0,31$$

Dalším krokem při návrhu zvolené širokopásmové odbočnice je určení impedancí sudého resp. lichého vidu pro vazbu c_1 dle vztahů (4.4.7) a (4.4.8), kde za c dosazujeme právě hodnotu vypočtenou pro c_1 .

$$Z_{0E} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+c_1}{1-c_1}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1+0,031}{1-0,031}} = 51,5748\Omega$$

$$Z_{0O} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1-c_1}{1+c_1}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1-0,031}{1+0,031}} = 48,4733\Omega$$

Dále je nutné vypočítat impedance sudého a lichého vidu pro vazbu c_2 opět ze vztahů (4.4.7) a (4.4.8), kde za c dosazujeme hodnotu c_2 .

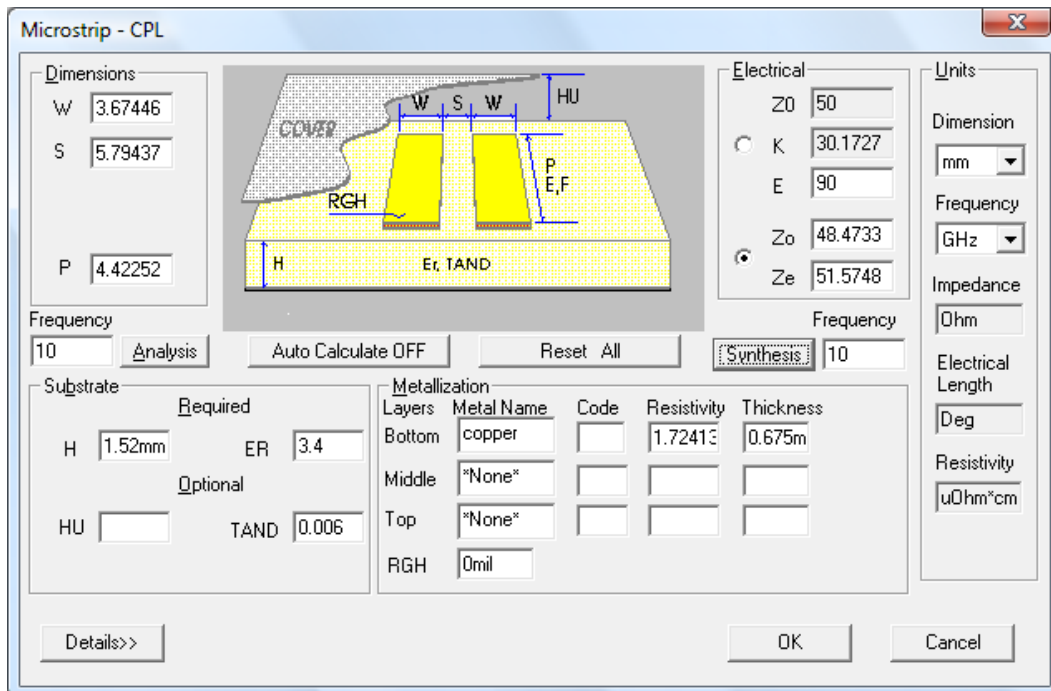
$$Z_{0E} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1+c_2}{1-c_2}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1+0,31}{1-0,31}} = 68,8939\Omega$$

$$Z_{0O} = Z_0 \cdot \sqrt{\frac{1-c_2}{1+c_2}} = 50 \cdot \sqrt{\frac{1-0,31}{1+0,31}} = 36,2877\Omega$$

Jelikož je určení rozměrů mikropásků při ručním návrhu poměrně složité, proto byl pro určení rozměrů odbočnice použit program Ansoft Designer, který má funkci pro výpočet rozměrů vázaných vedení.

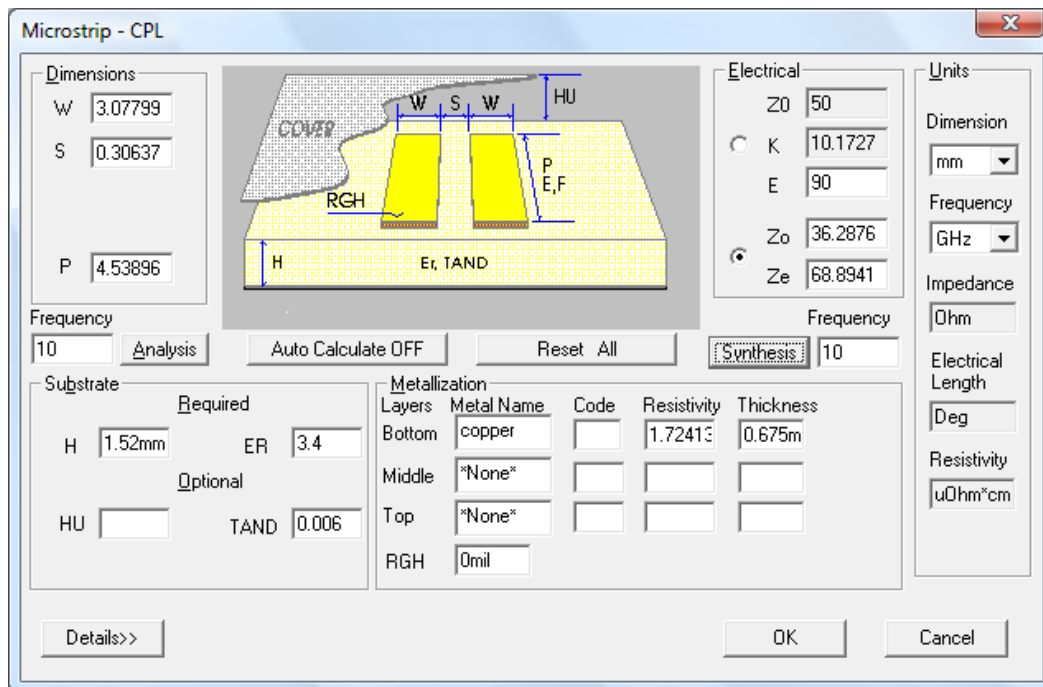
Určení rozměrů mikropásků a šířky mezery mezi mikropásky pomocí programu Ansoft je následující. V programu vytvoříme projekt pro návrh mikropáskových vedení. Dále vybereme vázané mikropáskové vedení a to pomocí následujícího postupu Circuit – TRL – Microstrip – CPL. Poté se zobrazí okno Obr.5.2, kde můžeme postupovat dvěma způsoby a to, že zadáme přímo vazební útlum (zde označovaný jako K) nebo pomocí vypočtených vidů.

Pro určení rozměrů pro vazbu c_1 jsou vypočtené rozměry podle Obr.5.2, kde šířka mikropásku je označeno jako W, šířka mezery S a délka mikropásku P.



Obr. 5.2 - Určení rozměrů a šířky mezery pro vazbu c_1

Pro určení rozměrů pro vazbu c_2 jsou vypočtené rozměry podle Obr.5.3, kde je opět šířka mikropásku je označeno jako W, šířka mezery S a délka mikropásku P.



Obr. 5.3 - Určení rozměrů a šířky mezery pro vazbu c_2

Vypočtené hodnoty rozměrů širokopásmové odbočnice pro čtvrtvlnné úseky vedení je uvedeno v Tab.3. Výpočet byl proveden pouze pro hodnoty impedancí sudého a lichého vidu. Výpočet šířky a délky mikropásků a mezery mezi nimi bylo provedeno pomocí programu Ansoft Designer.

Tab.3 - Rozměry širokopásmové odbočnice s vazebním útlumem 12dB

C=12dB	Z_{0E} [Ω]	Z_{0O} [Ω]	w [mm]	l [mm]	s [mm]
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_1	51,5748	48,4733	3,6744	4,4225	5,7943
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_2	68,8939	36,2877	3,0776	4,5390	0,3061

Pro docílení delších úseků vedení může být proveden výpočet s třičtvrtvlnným úsekem vedení. Tyto rozměry jsou zaznamenány v Tab.4.

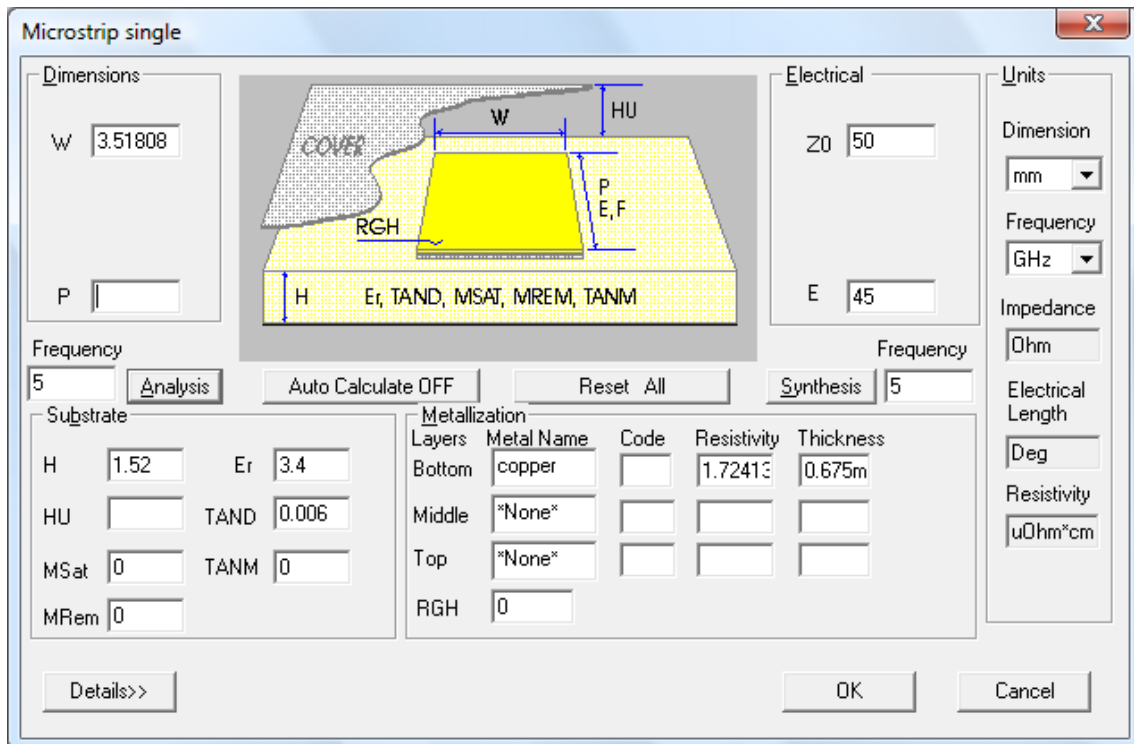
Tab.4 - Rozměry širokopásmové odbočnice třičtvrtvlnným úsekem vedení

C=12dB	Z_{0E} [Ω]	Z_{0O} [Ω]	w [mm]	l [mm]	s [mm]
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_1	51,5748	48,4733	3,6744	13,2676	5,7943
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_2	68,8939	36,2877	3,0776	13,6169	0,3061

5.3 Určení rozměrů přívodního vedení kruhové odbočnice

Impedance přívodních vedení je pro kruhovou odbočnici na Obr.4.3 označena jako Z_0 . Toto vedení se navrhuje pro $Z_0=50\Omega$, aby došlo k impedančnímu přizpůsobení odbočnice. Nejdůležitějším rozměrem pro přizpůsobení je šířka mikropásku w_0 . Délka mikropásku se volí na základě vlastních potřeb na připojení odbočnice.

Určení rozměru šířky mikropásku, pro kruhovou odbočnici na středním kmitočtu 5GHz, bylo provedeno za použití programu Ansoft Designe a to dle Obr.5.4. V programu byl vytvořen projekt pro návrh mikropáskových vedení. Dále bylo vybráno samostatné mikropáskové vedení a to pomocí následujícího postupu Circuit – TRL – Microstrip – Single. Byla zadána impedance vedení $Z_0=50\Omega$ a elektrická délka E. Dále byla zadána požadovaná střední frekvence $f_0=5\text{GHz}$ a poté pomocí tlačítka Synthesis proveden výpočet šířky mikropásku. Šířka přívodního mikropásku byla vypočtena $w_0=3,51808\text{mm}$.



Obr. 5.4 - Určení šířky přívodního vedení kruhové odbočnice

Dále byla určena i délka přívodního vedení pro všechny 4 vstupní brány stejná a to $l_0=10,15\text{mm}$. Důvod zvolení této délky byl takový, aby bylo možné takto navrženou odbočnici upevnit do měřicího držáku o rozměrech $40\times 40\text{mm}$.

5.4 Určení rozměrů přívodního vedení širokopásmové odbočnice

Návrh byl proveden stejným postupem jako u kruhové odbočnice jen s tím rozdílem, že střední frekvence musela být změněna na 10GHz na které byl proveden návrh této odbočnice.

Výsledkem návrhu byla šířka mikropásku $w_0=3,723\text{mm}$ a zvolená délka $l_0=12,4\text{mm}$. Zvolená délka byla opět upravena tak, aby odbočnice mohla být umístěna do měřicího držáku o rozměrech $40\times 40\text{mm}$.

6. SIMULACE

6.1 Simulace kruhové odbočnice

Pro simulaci kruhové odbočnice byl zvolen program Ansoft Designer. Byly provedeny simulace tří kruhových odbočnic. První simulace byla provedena pro odbočnici s vazebním útlumem 12dB, ale tato odbočnice nesplňuje technologické nároky na výrobu z důvodu velmi malých rozměrů mikropásků. Proto další simulace byla provedena pro odbočnici s vazebním útlumem 9dB. Obě tyto odbočnice byly simulovány pro jejich náhradní obvody. Poslední simulace kruhové odbočnice byla provedena pro vazební útlum 9dB, kde již nebylo použito náhradní schéma, ale její skutečný tvar.

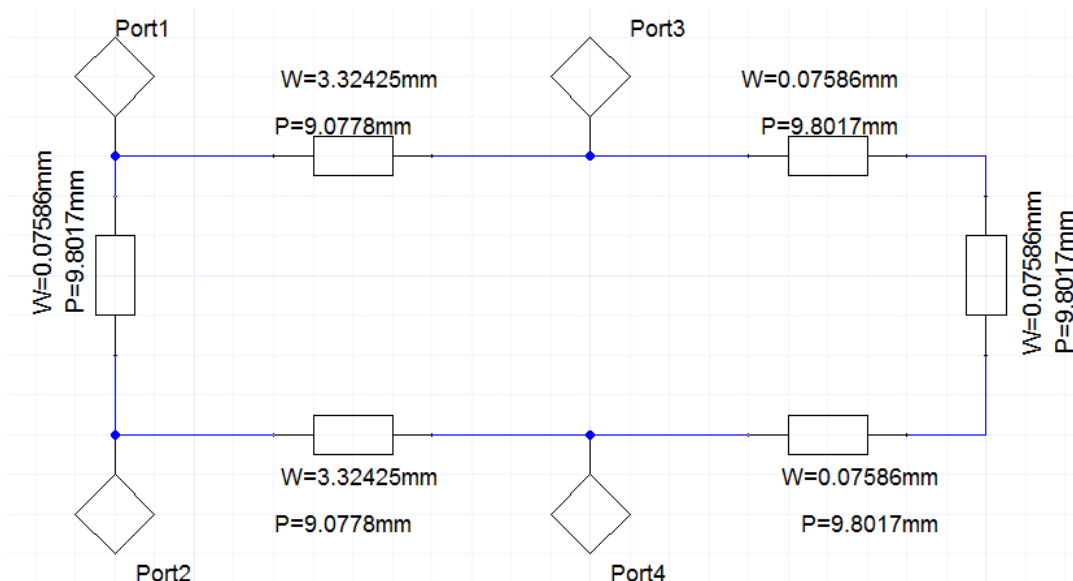
6.1.1 Simulace kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB

Vypočtené rozměry odbočnice jsou v Tab.5. Impedance vstupního vedení byla zvolena 50Ω , odkud pak byly vypočteny hodnoty vlnových impedancí Z_{01} a Z_{02} . Jak již bylo uvedeno v kapitole 5, tato odbočnice nesplňuje požadavky na výrobní technologie, protože nedosahuje nejmenšího rozměru nutného pro výrobu alespoň 0,25mm.

Tab.5 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 12dB

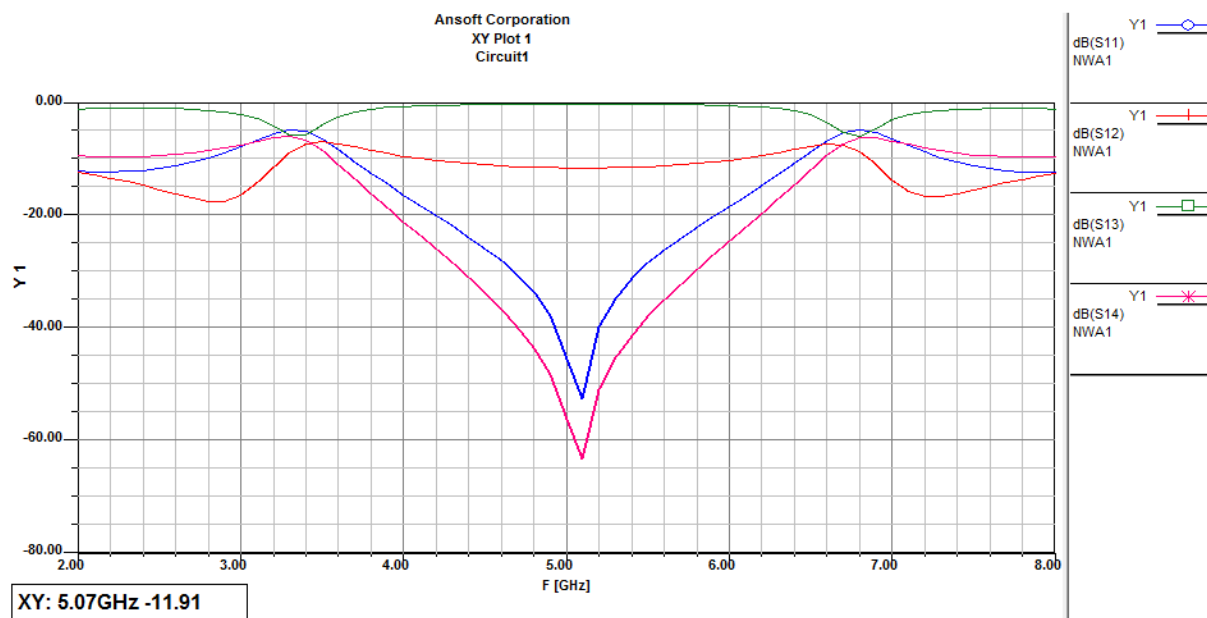
C=12dB	Z_{01} [Ω]	Z_{02} [Ω]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]
Vypočtené hodnoty	199,05	51,65	0,0758	3,3213	9,8017	9,0778

Pro simulaci byly použity pouze námi vypočtené hodnoty. Náhradní obvod kruhové odbočnice je znázorněn na Obr.6.1, jedná se o upravené schéma, které je složeno z mikropáskových vedení.



Obr. 6.1 - Náhradní obvod kruhové odbočnice pro vazební útlum 12dB

Na Obr.6.2 je uveden výsledek simulace s jednotlivými výstupními parametry. Vazební útlum je zde uváděn jako parametr S_{12} a vložný útlum pak S_{13} . Další dva parametry S_{11} a S_{14} popisují chování odbočnice. Parametr S_{11} nám určuje činitel odrazu a S_{14} určuje výstupní výkon.



Obr. 6.2 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 12dB

Z výsledné simulace je vidět, že se mírně posunul střední kmitočet a to na hodnotu 5,07GHz, toto posunutí kmitočtu je zapříčiněno zaokrouhlováním při výpočtu jednotlivých rozměrů mikropásků. Ze simulace je také vidět, že vazební útlum na středním kmitočtu je 11,91dB, což je opět výsledek ovlivněný výpočtem. Vložný útlum je pak 0,15dB, vypočtený útlum je 0,28dB.

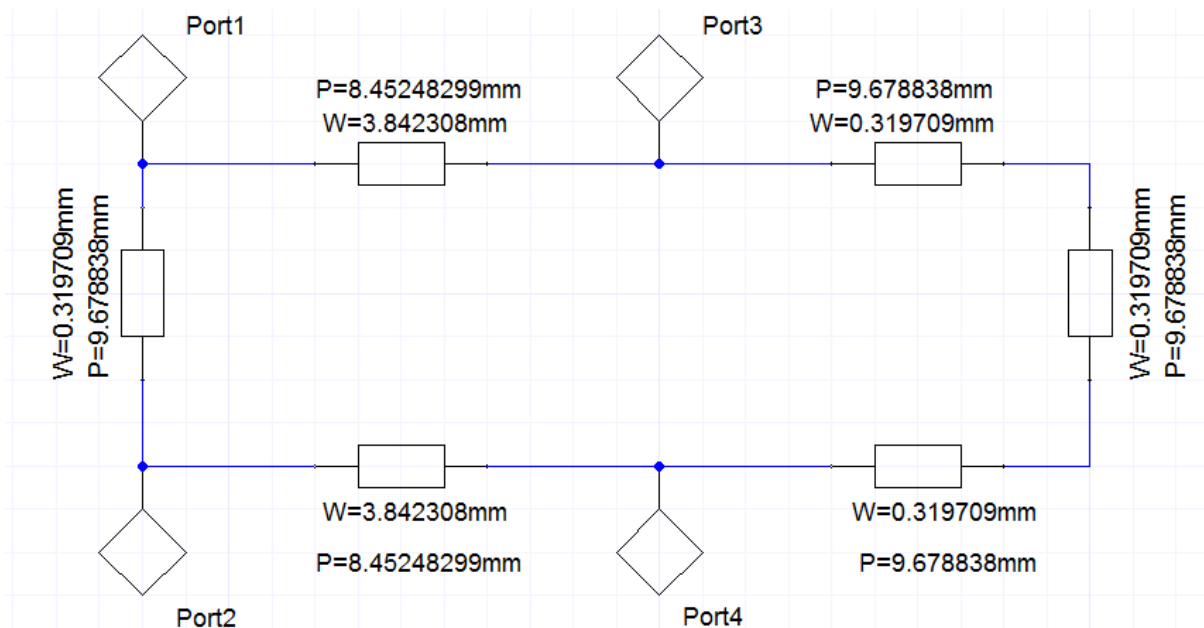
6.1.2 Simulace kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB

Pro vazební útlum 9dB odbočnice již splňuje technologické požadavky na výrobu. Vypočtené hodnoty odbočnice jsou uvedeny v Tab.6. Simulace byla provedena pro čtvrtvlnné délky úseků vedení.

Tab.6 - Rozměry kruhové odbočnice s vazebním útlumem 9dB

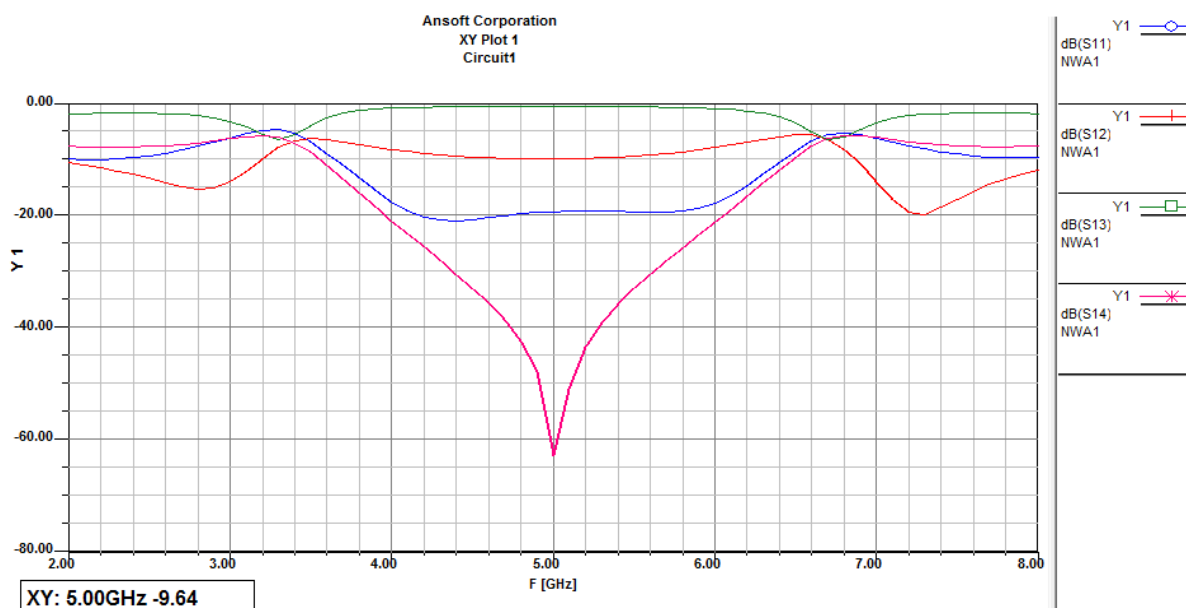
C=9dB	Z_{01} [Ω]	Z_{02} [Ω]	w_1 [mm]	w_2 [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]
Vypočtené hodnoty	140,919	47,121	0,3197	3,8423	9,6788	8,4524

Pro simulaci byly opět použity pouze námi vypočtené hodnoty. Náhradní obvod kruhové odbočnice je znázorněn na Obr.6.3 a opět se jedná o upravené schéma, které je složeno z mikropáskových vedení.



Obr. 6.3 - Náhradní obvod kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB

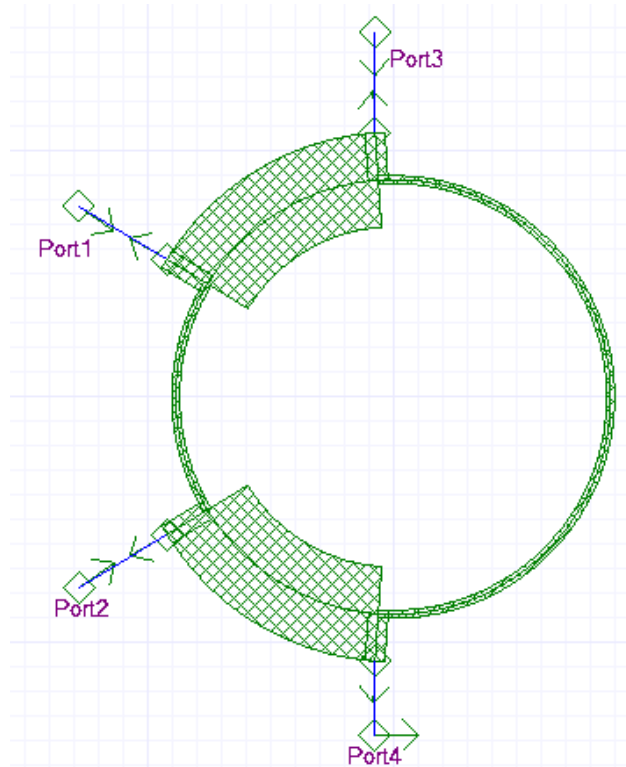
Na Obr.6.4 je znázorněn výsledek simulace s jednotlivými výstupními parametry. Vazební útlum je zde opět uveden jako parametr S_{12} a vložný útlum pak S_{13} . Další dva parametry S_{11} a S_{14} popisují chování odbočnice. Parametr S_{11} nám určuje činitel odrazu a S_{14} určuje izolaci.



Obr. 6.4 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB

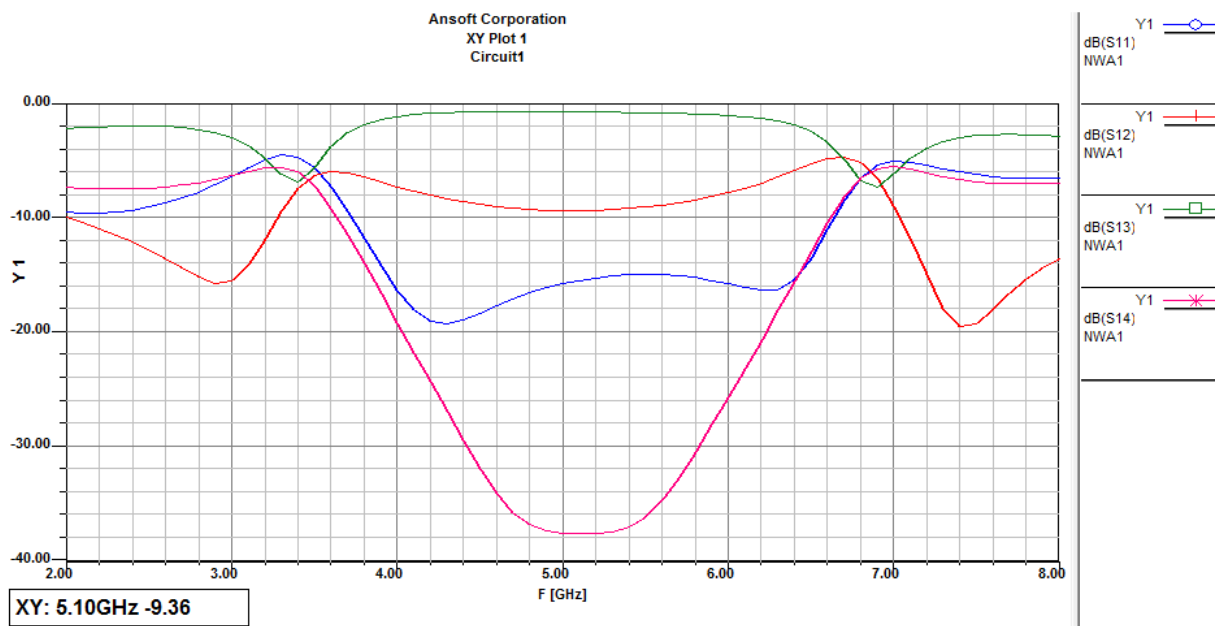
Z výsledné simulace je vidět, že vazební útlum na středním kmitočtu 5GHz je 9,64dB, což je s nejvyšší pravděpodobností způsobeno opět výpočtem. Vložný útlum je pak 0,56dB a vypočtený útlum vyšel 0,515dB.

Pro tuto kruhovou odbočnici s vazebním útlumem 9dB byla pomocí programu Ansoft provedena ještě simulace pro posouzení vlivu jednotlivých mikropáskových vedení a vazeb mezi nimi. Kruhová odbočnice byla nakreslena opět v programu Ansoft Designer, ale nyní pomocí Layout editoru. Výsledkem je odbočnice na Obr.6.5.



Obr. 6.5 - Kruhová odbočnice pro vazební útlum 9dB

Opět byla provedena její simulace, která je znázorněna na Obr.6.6. Popis jednotlivých parametrů je stejný jako v předchozím případě.



Obr. 6.6 - Simulace kruhové odbočnice pro vazební útlum 9dB

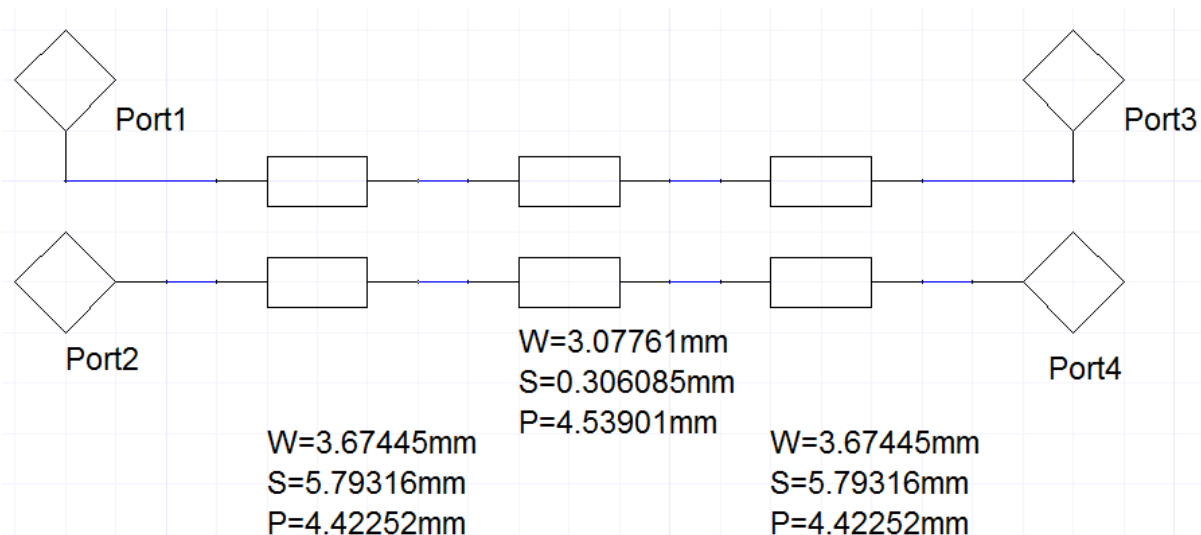
Z výsledné simulace je vidět, že došlo ke zvětšení šířky pásma. Střední kmitočet se opět mírně posunul a to na hodnotu 5,1GHz. Vazební útlum je pak na tomto středním kmitočtu 9,36dB. Posun středního kmitočtu a mírné zvětšení vazebního útlumu je způsobeno opět výpočtem a zaokrouhlováním. Došlo i k mírnému zvýšení vložného útlumu na hodnotu 0,73dB.

6.2 Simulace širokopásmové odbočnice z vázaných mikropásmových vedení

Pro simulaci širokopásmové odbočnice byl opět zvolen program Ansoft Designer. Byla provedena simulace pro zjednodušené schéma této odbočnice, které je znázorněno na Obr.6.7. Rozměry odbočnice jsou zaznamenány v Tab.7. a pro tento návrh byl zvolen střední kmitočet 10GHz.

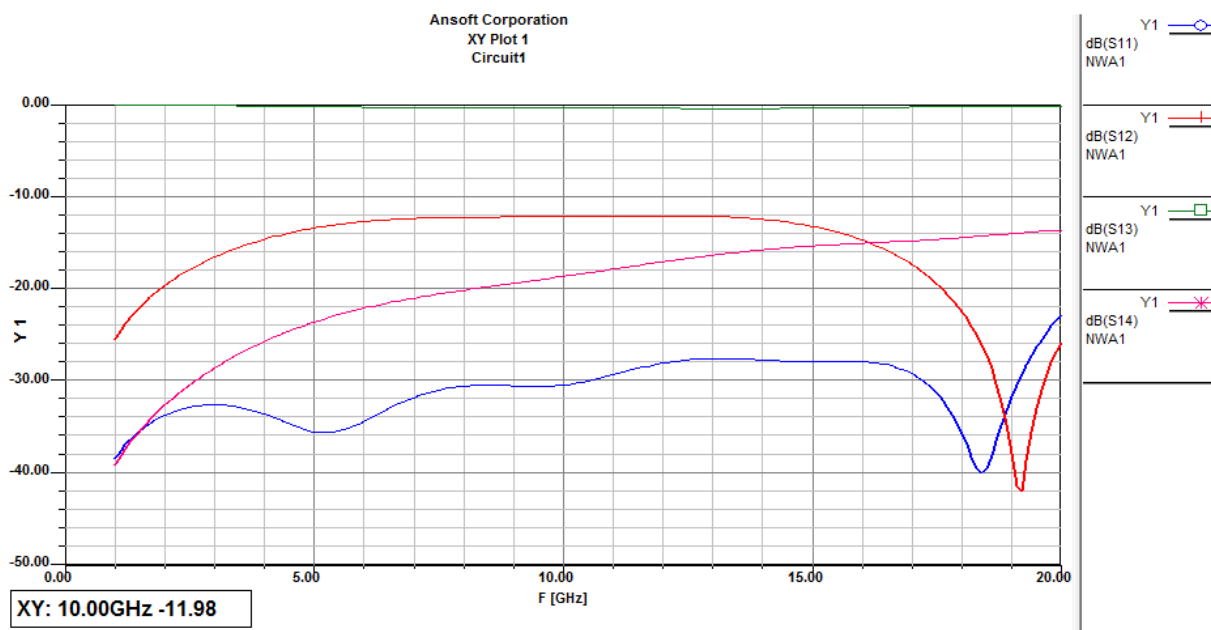
Tab.7 - Rozměry širokopásmové odbočnice s vazebním útlumem 12dB

C=12dB	Z_{0E} [Ω]	Z_{0O} [Ω]	w [mm]	l [mm]	s [mm]
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_1	51,5748	48,4733	3,6744	4,4225	5,7931
Vypočtené hodnoty pro vazbu c_2	68,8939	36,2877	3,0776	4,5390	0,3061



Obr. 6.7 - Širokopásmová odbočnice z vázaných mikropáskových vedení

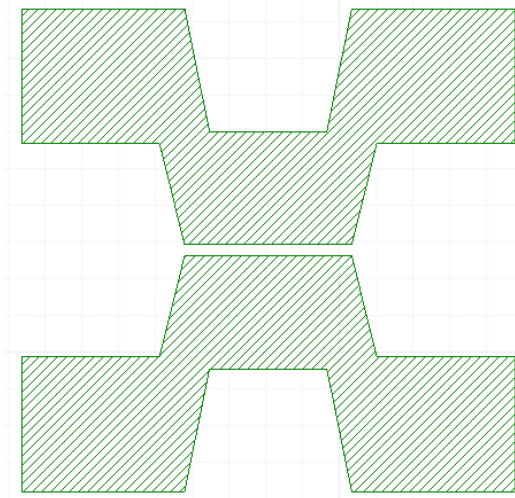
Na Obr.6.8 je znázorněn výsledek simulace s jednotlivými výstupními parametry. Vazební útlum je zde opět uveden jako parametr S_{12} a vložný útlum pak S_{13} .



Obr. 6.8 - Simulace širokopásmové odbočnice

Ze simulace je vidět, že vazební útlum je na středním kmitočtu 10GHz roven požadovanému útlumu 12dB. Vložný útlum má hodnotu 0,35dB. Simulace byla provedena pro čtvrtvlnné délky jednotlivých úseků vedení. Pro třičtvrtěvlnné úseky vedení dojde k zúžení šířky pásma.

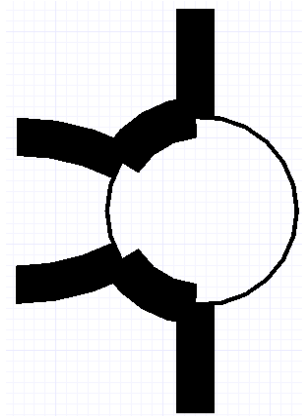
Tato odbočnice byla opět nakreslena v programu Ansoft Designer pomocí Layout editoru. Takto navržená odbočnice je znázorněna na Obr.6.9.



Obr. 6.9 - Čtvrtvlnná širokopásmová odbočnice

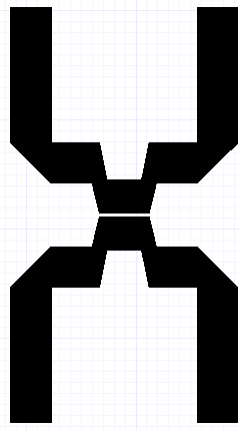
7. REALIZACE SMĚROVÉ MIKROVLNNÉ ODBOČNICE

Před realizací byly obě navržené odbočnice doplněny o mikropáskové vstupní a výstupní vedení o impedanci $Z_0=50\Omega$. U kruhové odbočnice poté bylo vstupní vedení pro brány 1 a 2 mírně prohnuto tak, aby bylo kolmé ke kraji desky dle Obr.7.1. Reálné rozměry odbočnic jsou v příloze P1.



Obr. 7.1 - Kruhová odbočnice s přívodním vedením

Obdobně byla doplněna i druhá navržené odbočnice, která je zobrazena na Obr.7.2.



Obr. 7.2 - Širokopásmová odbočnice s přívodním vedením

Obě takto navržené odbočnice byly vyrobeny a umístěny do univerzálního měřicího držáku tak, aby bylo možno získat hodnoty parametrů, kterých dosahují. Tento držák umožňuje uchycení desek o maximálním rozměru 40x40mm. Držák dosahuje podobných parametrů jako konektory SMA a je zobrazen na Obr.7.3 [2].



Obr. 7.3 - Univerzální držák pro měření směrové odbočnice

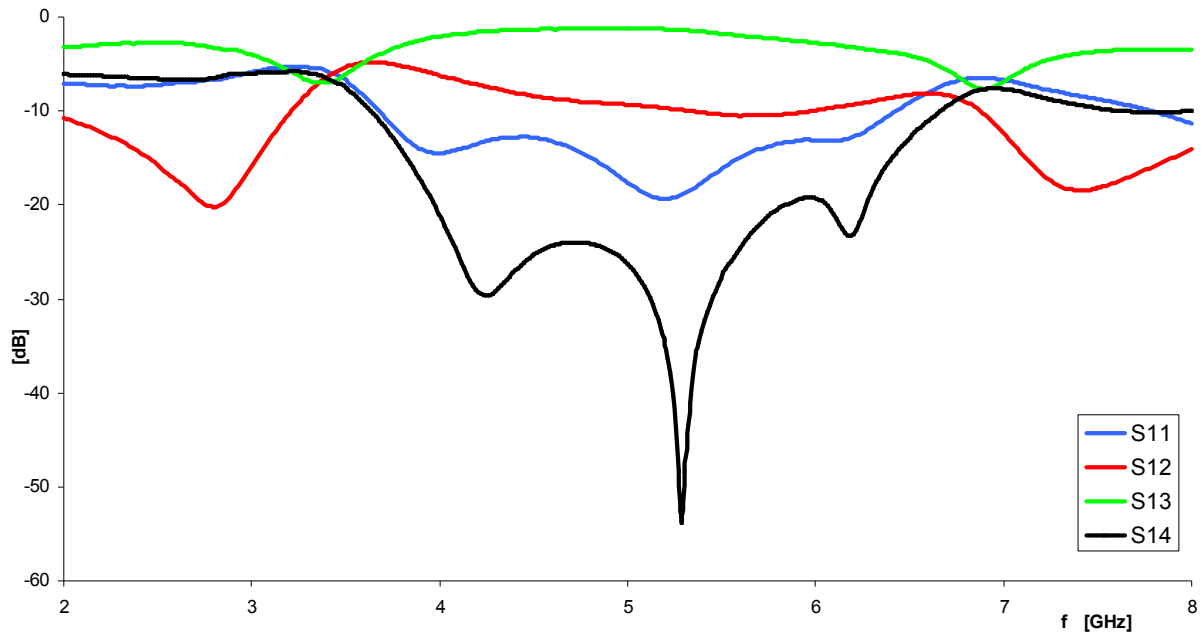
8. MĚŘENÍ SMĚROVÉ ODBOČNICE

8.1 Zjištění a porovnání parametrů směrové kruhové odbočnice

Realizovaná odbočnice byla proměřena pomocí skalárního obvodového analyzátoru ANRITSU 54147A, který dovoluje měření v rozsahu frekvencí od 10MHz do 20GHz. Tento rozsah je pro realizovanou odbočnici dostačující. Před samotným měřením musel být analyzátor kalibrován na požadovaný rozsah měřené frekvence, v tomto případě od 2GHz do 8GHz. Nepřipojené brány odbočnice pak musely být zakončeny impedancí 50Ω.

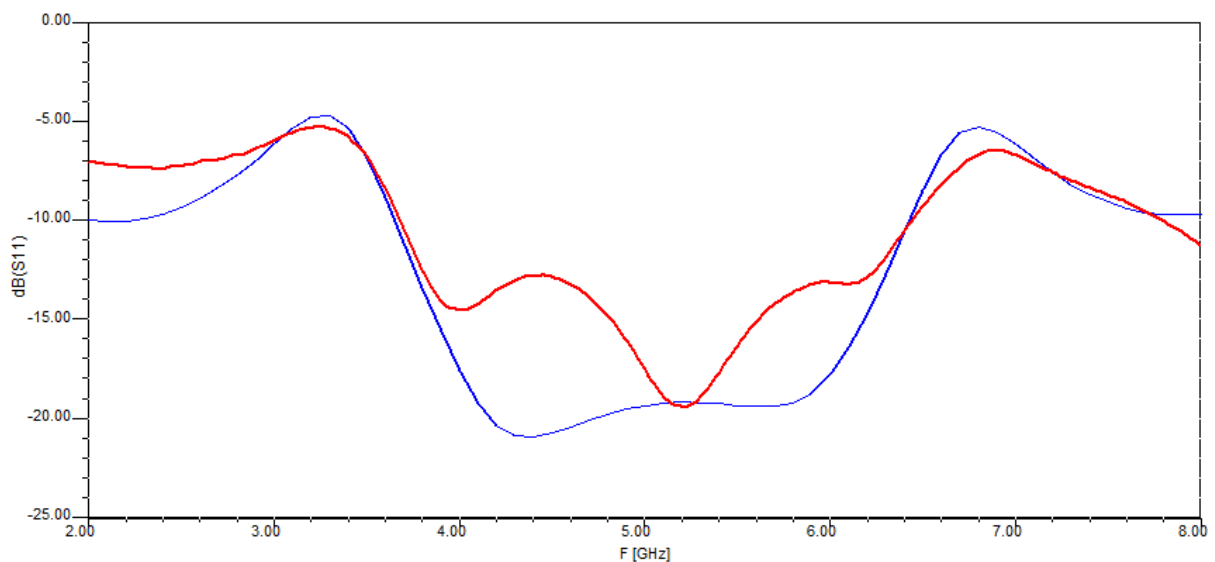
Technické parametry skalárního obvodového analyzátoru ANRITSU 54147A jsou uvedeny v příloze P2.

Naměřené průběhy jsou zaznamenány na Obr.8.1, dále byly jednotlivé průběhy porovnány s hodnotami ze simulace a zobrazeny na Obr. 8.2, 8.3, 8.4 a 8.4.



Obr. 8.1 - Analýza parametrů kruhové směrové odbočnice

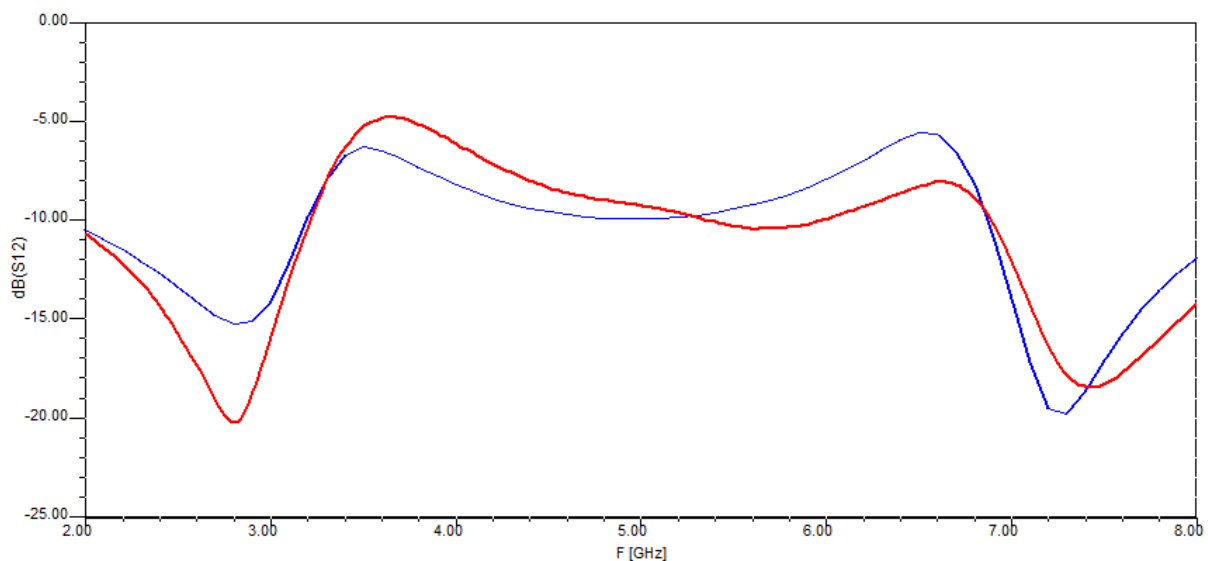
Na Obr.8.1 byly zobrazeny naměřené hodnoty realizované směrové kruhové odbočnice. Parametr S11 značí činitel odrazu vstupní brány, parametr S12 pak vazební útlum, S13 značí vložný útlum a parametr S14 pak izolaci.



Obr. 8.2 - Činitel odrazu vstupní brány kruhové odbočnice (simulace modrý průběh, měření červený průběh)

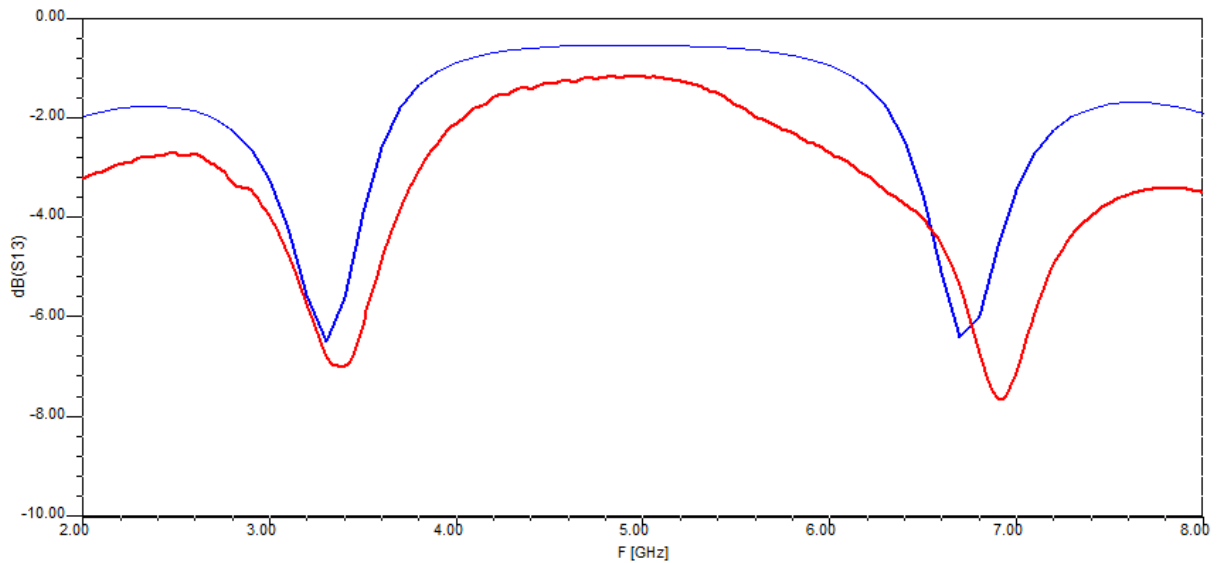
Parametr S11 značí hodnoty činitele odrazu vstupní brány a na Obr.8.2 jsou zobrazeny simulované a měřené průběhy činitele odrazu vstupní brány kruhové odbočnice. Modrý průběh značí získané hodnoty pomocí simulace a červený průběh pak naměřené hodnoty realizované odbočnice. Jak je z průběhu vidět došlo u realizované odbočnice k mírnému posunutí středního kmitočtu na hodnotu 5,25GHz. Na tomto kmitočtu je velikost odrazu 19,4dB. Izolace odečtená ze simulace, pro střední kmitočet 5GHz, byla 19,3dB což je shodné s hodnotou naměřenou.

Posunutí středního kmitočtu může být způsobeno nepřesností při návrhu odbočnice, dále pak nepřesností výroby a chyby při měření.



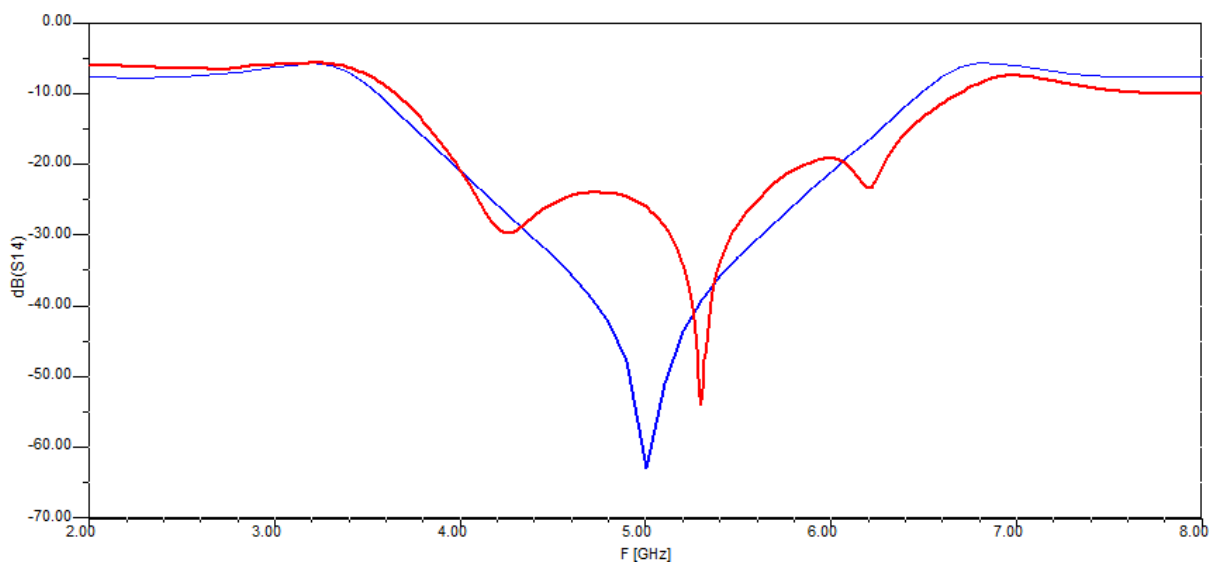
*Obr. 8.3 - Vazební útlum kruhové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S12 značí vazební útlum a na Obr.8.3 jsou současně zobrazeny simulované a naměřené průběhy vazebního útlumu kruhové odbočnice. Velikost vazebního útlumu na posunutém středním kmitočtu 5,22GHz má hodnotu 9,6dB. Kruhová odbočnice byla navržena pro vazební útlum 9dB. Hodnota vazebního útlumu odečtená ze simulace má velikost 9,64dB. Při porovnání měřené a simulované hodnoty zjistíme, že dosahují téměř shodných hodnot, ale obě se liší cca o 0,6dB od požadované hodnoty. Tento rozdíl může být dán nepřesností návrhu, výrobou, typem použitých konektorů a chybou měření.



*Obr. 8.4 - Vložný útlum kruhové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S13 určuje hodnoty vložného útlumu, na Obr.8.4 jsou současně zobrazeny simulované a měřené průběhy vložného útlumu. Měřením na kmitočtu 5,22GHz byl odečten vložný útlum o velikosti 1,2dB. Pomocí simulace byla odečtena hodnota 0,56dB. Při porovnání měřeného a simulovaného vložného útlumu je vidět, že realizovaná odbočnice dosahuje vyšší hodnoty než ideální simulovaná hodnota.



*Obr. 8.5 - Izolace kruhové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S14 značí velikost izolace odbočnice a na Obr.8.5 jsou zobrazeny simulované a měřené průběhy izolace kruhové odbočnice. Na posunutém kmitočtu 5,22GHz

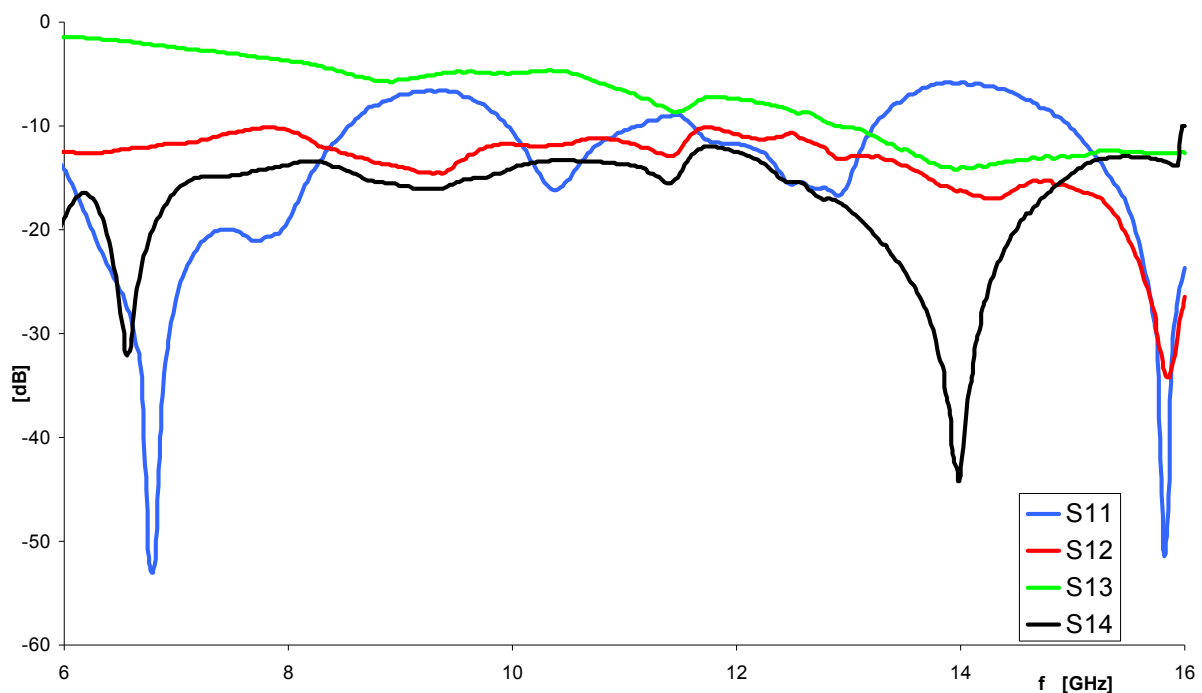
byla naměřena hodnota izolace odbočnice téměř 54dB. U teoretické směrové odbočnice je pak tato izolace 62dB. Při porovnání těchto dvou hodnot zjistíme, že opět došlo k mírnému zhoršení parametru.

Rozdílné hodnoty měřených parametrů realizované a teoretické kruhové odbočnice jsou nejspíše dány nepřesností při návrhu (zaokrouhlování), dále pak nepřesností výroby, chyba při měření a útlumem vedení a konektorů.

8.2 Zjištění a porovnání parametrů směrové širokopásmové odbočnice

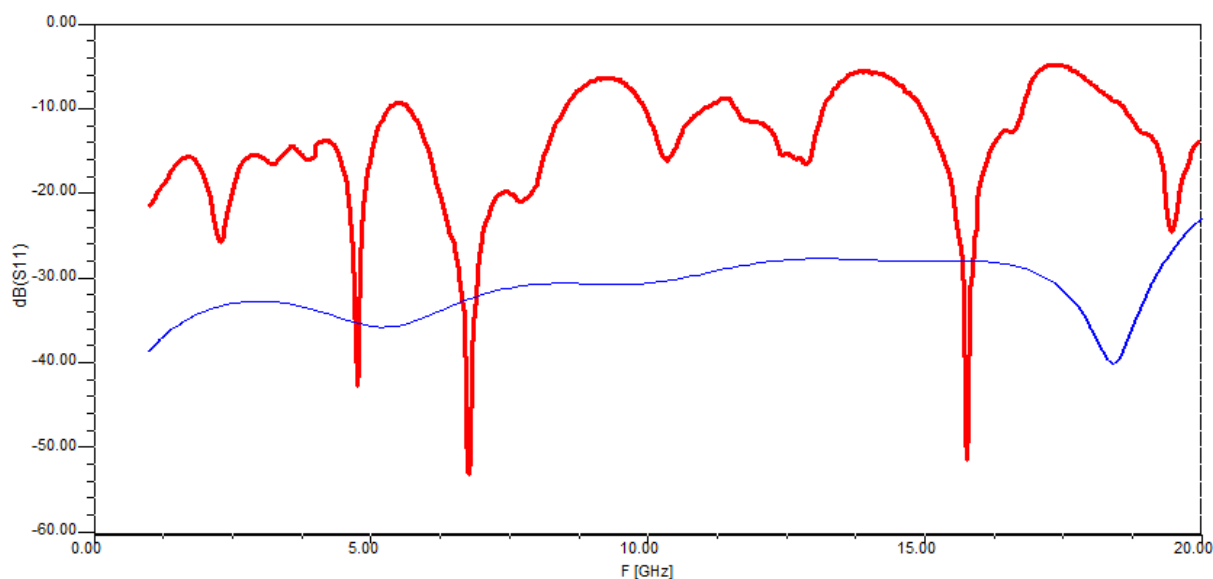
Tato odbočnice byla opět proměřena pomocí skalárního obvodového analyzátoru ANRITSU 54147A. Před samotným měřením musel být znovu analyzátor kalibrován na požadovaný rozsah měřené frekvence, v tomto případě od 1GHz do 20GHz. Nepřipojené brány odbočnice pak musely být zakončeny impedancí 50Ω .

Naměřené průběhy širokopásmové odbočnice jsou zaznamenány na Obr.8.5, dále byly jednotlivé průběhy porovnány s hodnotami ze simulace a zobrazeny na Obr.8.6, 8.7, 8.8 a 8.9.



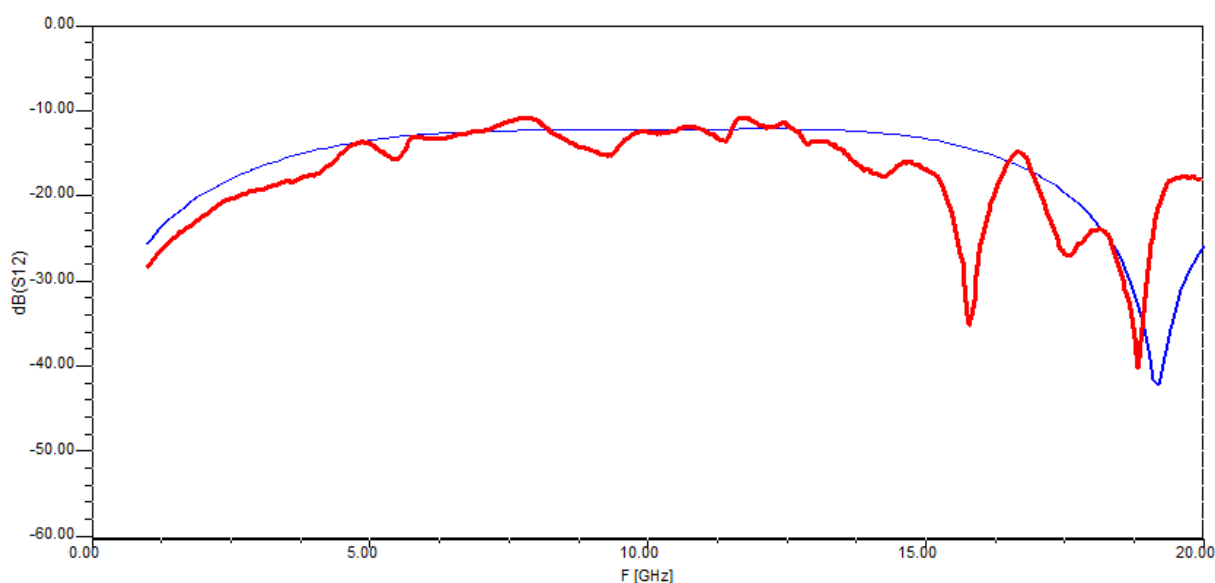
Obr. 8.5 - Analýza parametrů širokopásmové směrové odbočnice

Na Obr.8.5 byly zobrazeny naměřené hodnoty realizované směrové širokopásmové odbočnice. Parametr S11 značí činitel odrazu vstupní brány, parametr S12 pak vazební útlum, S13 značí vložný útlum a parametr S14 pak izolaci odbočnice.



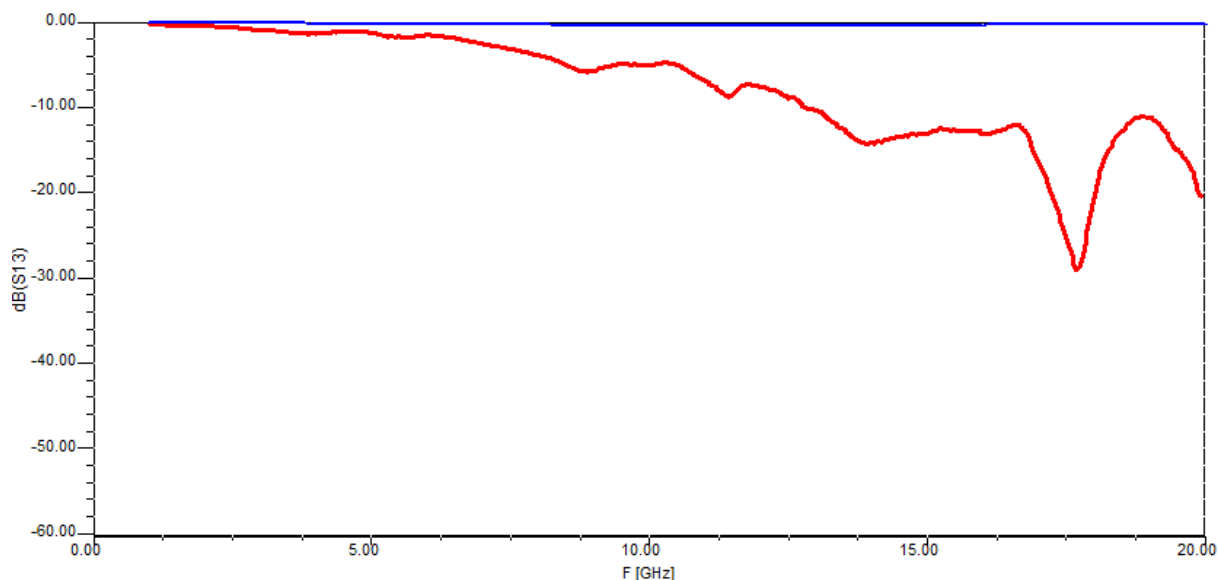
*Obr. 8.6 - Činitel odrazu vstupní brány širokopásmové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S11 představuje činitel odrazu od vstupní brány Obr.8.6. Nejvyššího odrazu dosahuje odbočnice na hodnotách frekvence 6,8GHz a 15,8GHz, kde dosahuje cca 54dB. Na středním kmitočtu 10GHz je odraz vstupní brány asi 16dB. V porovnání se simulací, kde na středním kmitočtu byl odraz 30dB značí o značném nárůstu o 14dB. Rozdíl naměřených a hodnot získané simulací může být způsoben nepřesností návrhu, výroby, typem použitých konektorů a chybou měření. Další vliv na změnu simulovaných a měřených hodnot budou mít i vazby mezi jednotlivými úseky vedení z mikropásků, jedná se o zkosené vedení mikropásků, které se nijak nepočítají a pouze náhodně určují.



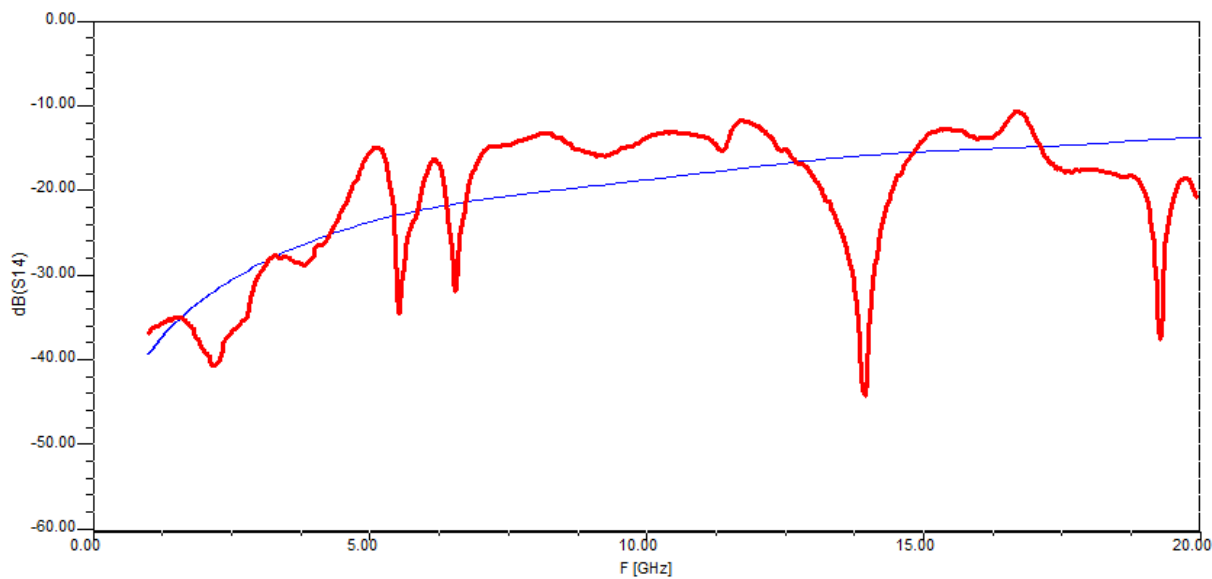
*Obr. 8.7 - Vazební útlum širokopásmové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S12 značí vazební útlum Obr.8.7. Při měření byla středním kmitočtu 10GHz změřena velikost vazebního útlumu 12,3dB. Naměřený průběh vazebního útlumu se značně přibližuje hodnotám ideální odbočnice, ale na kmitočtu 15,8GHz k prudkému poklesu útlumu na hodnotu 34dB. V celém průběhu vazebního útlumu dochází k mírnému kolísání změny v hodnotách vazebního útlumu, které jsou nejspíš způsobeny nepřesností výroby a také jednotlivými vazbami mezi úseky vedení, které nebyly počítány. Nárůst vazebního útlumu může být také způsoben útlumem použitých konektorů.



*Obr. 8.8 - Vložný útlum širokopásmové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Parametr S13 značí vložný útlum Obr.8.8. V porovnání se simulací byl vložný útlum téměř nulový, ze změřeného průběhu je zřejmé, že došlo ke zvětšení tohoto útlumu. Vložný útlum roste se zvyšující se frekvencí. Na středním kmitočtu 10GHz je vložný útlum 4,9dB. Vliv na pokles vložného útlumu má také použitý univerzální měřicí držák.



*Obr. 8.9 - Izolace širokopásmové odbočnice
(simulace modrý průběh, měření červený průběh)*

Posledním měřeným parametrem byl parametr S14 – izolace odbočnice Obr.8.9. Na kmitočtu 10GHz dosahuje měřená izolace hodnoty 15dB což se dosti přibližuje hodnotě simulované 20dB.

Rozdílné hodnoty měřených parametrů realizované a teoretické širokopásmové odbočnice jsou opět nejspíše dány nepřesností při návrhu (zaokrouhlování), dále pak nepřesností výroby, chyba při měření a útlumem vedení a konektorů. Dalším výrazný vliv chyb vnesly vazby mezi jednotlivými úseky vedení z mikropásků, jedná se o zkosené vedení mikropásků, které se nijak nepočítají a pouze náhodně určují.

9. ZÁVĚR

Diplomová práce je založena na problematice v oblasti mikrovlnných směrových odbočnic. Bylo uvedeno několik typů směrových odbočnic a jejich parametry.

Jednou z možností směrových odbočnic jsou vlnovodové mikrovlnné směrové odbočnice, které dosahují šířky pásma většinou kolem 10% z jejich středního kmitočtu. Vlnovodové odbočnice jsou svými parametry použitelné pro odbočnice v pásmech nad 1GHz, ale jejich konstrukce je poměrně složitá, z důvodu co nejpřesnějších rozměrů vlnovodu.

Další možnost jak konstruovat směrové odbočnice je pomocí mikropáskových vedení. Mikropásková vedení lze poměrně snadno konstruovat, proto byla pro návrhy mikrovlnných směrových odbočnic použita právě tato metoda konstrukce.

Z prostudované oblasti mikropáskových směrových odbočnic dosahuje nejvyšší šířky pásma kombinovaný člen. Tato směrová odbočnice dosahuje, díky svému přechodu mikropásek a šterbinové vedení, velmi vysoké šířky pásma. Její nevýhodou při konstrukci může být právě její poměrně obtížné navrhování kombinace mikropásek a šterbinové vedení.

Další možností jsou širokopásmové směrové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení, nazývané jako vícestupňové směrové odbočnice z vázaných mikropáskových vedení. Mohou dosahovat poměrně vysokých šířek pásma, která závisí na počtu jednotlivých sekcí. Širokopásmové odbočnice jsou dvojího druhu a to symetrické a asymetrické. Jejich návrh a konstrukce je srovnatelná s ostatními mikropáskovými odbočnicemi, proto byla symetrická odbočnice použita pro návrh v této práci. Byly vypočteny hodnoty impedancí sudého a lichého vidu v jednotlivých sekcích odbočnice a pomocí programu Ansoft Designer pak určeny rozměry jednotlivých částí této odbočnice. Simulace byla provedena opět pomocí programu Ansoft Designer, kde byl ověřen výpočet rozměrů na požadovaný vazební útlum. Požadovaný vazební útlum byl 12dB a po ověření simulací vyšel 11,98dB.

Jelikož pro návrh a realizaci mikrovlnné směrové odbočnice jsou vyžadovány alespoň dvě tyto odbočnice, byla pro druhou odbočnici zvolena kruhová směrová odbočnice. Tato odbočnice totiž dosahuje šířek pásma jako vlnovodové odbočnice, kolem 10% ze středního kmitočtu, ale konstrukčně je oproti vlnovodovým jednodušší. Byl proveden návrh této odbočnice pro požadovaný vazební útlum 12dB, ale z technologických požadavků na výrobu, kdy nejmenší rozměr může být 0,25mm, tuto odbočnici není možné vyrobit, jelikož rozměr mikropásku je menší než 0,25mm. Z tohoto důvodu muselo dojít, po dohodě s vedoucím práce, k úpravě zadání a to změnou vazebního útlumu na 9dB, při kterém již kruhová odbočnice splňuje požadavky na výrobu pro zvolený substrát. Pro kruhovou odbočnici byla provedena simulace pomocí programu Ansoft, kde byla ověřena správnost návrhu. Vazební útlum byl snížen na 9dB a po ověření simulací vyšel 9,64dB, tento rozdíl je způsoben nepřesností výpočtu a zaokrouhlováním.

Nepřesnost výpočtů mezi výpočtem a výpočtem pomocí programu Ansoft je u navržených odbočnic téměř zanedbatelná a to hlavně z důvodu výroby, jelikož takto přesných rozměrů se při výrobě nedá docílit. Pro obě zvolené směrové odbočnice byl vybrán substrát

s relativní permitivitou $\epsilon_r=3,4$ a výškou substrátu $h=1,52$. Důvod jeho výběru byla výška substrátu, se kterou je možné vybrané odbočnice vypočítat dle zadání tak, aby splňovaly technologické požadavky na výrobu. Pro jiné substráty, s jinou permitivitou a výškou, nebylo docíleno požadovaných rozměrů.

Navržené směrové odbočnice byly realizovány a dále bylo pomocí skalárního obvodového analyzátoru provedeno měření jednotlivých parametrů odbočnice. U obou vyrobených odbočnic bylo provedeno srovnání s hodnotami získanými pomocí simulace, uvedeno v kapitole 8. U kruhové odbočnice parametry dosahovali téměř stejných hodnot, jen došlo k mírnému posunutí středního kmitočtu na hodnotu 5,22GHz. Mírné nepřesnosti v jednotlivých parametrech mohly být dány nepřesností při návrhu dále pak nepřesností výroby, či chybami při měření.

Parametry změřené u širokopásmové odbočnice se lišili v porovnání s ideálními průběhy o něco více než u kruhové odbočnice. Největší rozdíl byl zaznamenán při měření činitele odrazu vstupní brány, kde došlo k výraznému rozdílu od předpokládané hodnoty. Ostatní parametry se svými hodnotami již přibližují k hodnotám získaným pomocí simulace. Jednotlivé odlišnosti jsou způsobeny nepřesností návrhu, kde byly vazby mezi jednotlivými úseky (zkosené vedení mikropásků) určeno pouze náhodně. Toto určení má největší vliv na jednotlivé měřené parametry, které mohly být dále ovlivněny nepřesností výroby či útlumem konektorů.

LITERATURA

- [1] HOFFMANN, K., Planární mikrovlnné obvody, Fakulta elektrotechnická, ČVUT v Praze, 2008, s.44-76
- [2] ORSÁG,P., SVAČINA, J. Kmitočtové vlastnosti mikrovlnných planárních směrových vazebních a hybridních členů. *Elektrorevue*. Únor 2009 [cit. 14. března 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/communication-technology-5/0/kmitoctove-vlastnosti-mikrovlnnych-planarnich-smerovych-vazebnich-a-hybridnich-clenu/>>. ISSN 1213-1539
- [3] Young, L., Parallel Coupled Lines and Directional Couplers, Artech House INC, USA, 1972, s.164-195
- [4] Program pro návrh planárních vedení. [cit. 14. března 2009]. Dostupný z WWW: <<http://www.ee.bilkent.edu.tr/~microwave/magnetic.htm>>.
- [5] SVAČINA,J., HANUS, S., Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika. Přednášky. Brno: VUT, 2002, s.174-176
- [6] SVAČINA, J. Mikrovlnná integrovaná technika. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008
- [7] SVAČINA, J. Mikrovlnná integrovaná technika. Přednášky. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008, s.14-30, s.74-106
- [8] Datasheet Anritsu 54147A, [cit. 23.dubna 2010]
Dostupné na: http://www.testwall.com/datasheets/ANRIT_54100ASERIES32658.pdf

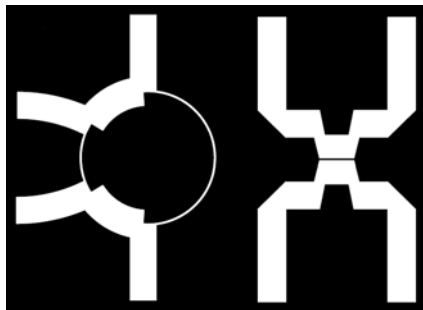
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

S	rozptylová matice směrovosti
IL	vložný útlum
C	vazební útlum
I	izolace
D	směrovost
RL	činitel útlumu
PSV	poměr stojatých vln
Z	impedance mikropáskového vedení
l	délka mikropáskového vedení
w	šířka mikropáskového vedení
h	výška substrátu
ϵ_r	relativní permitivita
w_{ef}	efektivní šířka mikropásku
ϵ_{ef}	efektivní permitivita
λ	vlnová délka
Z_{0E}	impedance sudého vidu
Z_{0O}	impedance lichého vidu
k	koeficient vazby
$tg\delta$	ztrátový činitel

PŘÍLOHY

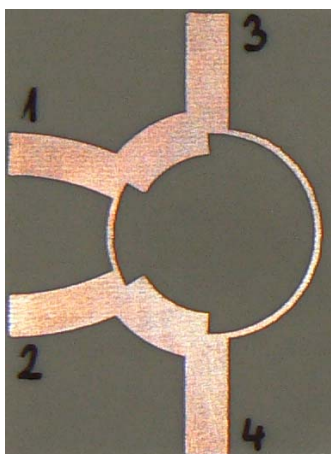
P.1 Odbočnice

Odbočnice pro realizaci – velikost 1:1

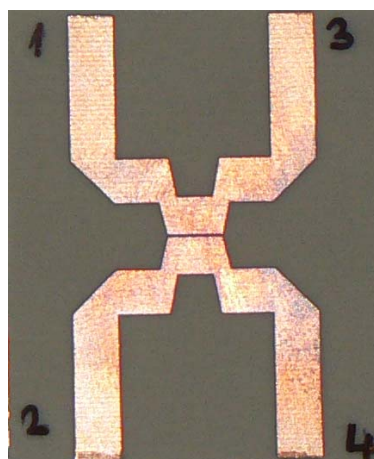


Kruhová a širokopásmová odbočnice

Realizované odbočnice

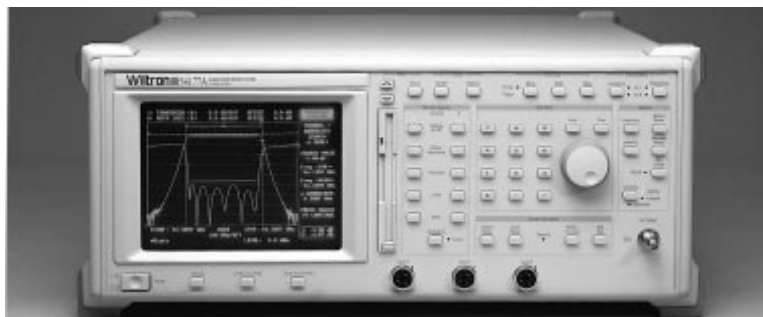


Kruhová odbočnice



Širokopásmová odbočnice

P.2 TECHNICKÉ PARAMETRY SKALÁRNÍHO ANALYZÁTORU ANRITSU 54147A



Výrobní číslo: K 454001

Analyzátor [8]

Měřicí režim	přenos (dB), odrazné ztráty (dB), SWR (lineární SWR), volitelné skupinové zpoždění (ns), výkon (dBm)
Dynamický rozsah	-55 dBm až +16 dBm
Vstupy	Tři, dva standardní vstupy (A a B), možnost třetího referenčního kanálu R
Kanály	2 kanály A a B
Citlivost	0,1 až 10 dB(m)
Funkce kurzorů	automatické hledání maxim a minim, dB úrovně, dB šířky pásma, aktivní marker
Průměrování	2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 nebo 256
Limitní čáry	Dvě limitní čáry, buď jedna hodnota nebo více úrovní segmentace.
Autoscale	Automatický výběr citlivosti pro optimální zobrazení
Externí VGA výstup	VGA konektor pro připojení monitoru.
Trace mask	Naměřenou křivku lze uložit jako součást rastru k pozdějšímu použití jako srovnávací křivku.
Save/Recal	Třináct nastavení předního panelu a třináct naměřených dat lze uložit do paměti.
3,5'' disketa	Možnost ukládání dat na disketu 3,5

Vnitřní generátor analyzátoru [8]

Frekvenční rozsah	10 MHz až 20 GHz
Alternate sweep	Rozmítání se přepíná mezi frekvenčními rozsahy rozdílně pro každý kanál
Nastavování frekvence	Krok ± 200 kHz
Výstupní výkon	max. 10 dBm při zátěži 50 Ω .
Výstupní poměr stojatých vln	PSV < 1,8
Přesnost nastavení výkonu	± 1 dB při stabilizovaném výkonu