

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Širokopásmový dělič výkonu

Václav Kubizňák

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Kubizňák**
Osobní číslo: **I13383**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a řídicí technologie**
Název tématu: **Širokopásmový dělič výkonu**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Proveďte rozbor vlastností planárního děliče výkonu. V programu CST microwave studio realizujte parametrický model. Zjistěte dosažitelný rozsah dělicích poměrů mezi porty. Proveďte rozbor vlivu parametru substrátu na rozměry a ztráty děliče. Proveďte rozbor vlivu podléptání na změnu dělicích poměrů. Realizujte dělič pro pracovní kmitočet 3 GHz. Porovnejte změřené s-parametry prototypu se simulací v CST.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

POZAR, David M. Microwave engineering. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012, xvii, 732 p. ISBN 04-706-3155-4.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Vadim Závodný

Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce:

31. října 2015

Termín odevzdání diplomové práce:

13. května 2016



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2015

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne

Václav Kubizňák

Poděkování

Na tom to místě bych moc rád poděkoval mé rodině za finanční, ale hlavně psychickou podporu při studiu. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Vadimu Závodnému Ph.D. za seznámením se simulačním softwarem a cenné rady při psaní té to práce, hlavně děkuji za jeho trpělivost a ochotu pomoci mi.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou širokopásmových děličů výkonu a jejich návrhem. V práci je popsán výběr vhodného typu planárního vedení a dielektrického materiálu desky. Dále se zabývá popisem několika typů děličů výkonu a posléze návrhem zadaného děliče a jeho simulace v programu CST. Nakonec je navržený dělič realizován a jsou změřeny jeho rozptylové parametry na měřícím přístroji.

Klíčová slova

Širokopásmový dělič výkonu, Wilkinsonův dělič výkonu, dělič typu Rat-race, dělič typu Gysel, rozptylové parametry, mikropásek, planární vedení

Title

WideBand Power Divider

Annotation

This diploma thesis deals with the question of broadband power dividers and their design. In the work a selection of a suitable type of planar transmission line and dielectric plate material. It also deals with the description of several types of power dividers and then with the design of the specified divider and its simulation in the CST. Finally, the designed power divider is realized and its s-parameters are measured on the measuring instrument.

Keywords

Broadband power dividers, Wilkinson power divider, Rat-race coupler, Gysel power divider, scattering parameters, microstrip line, planar transmission line

Obsah

SEZNAM ZKRATEK.....	9
SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD.....	12
1 PLANÁRNÍ VEDENÍ	13
1.1 DIELEKTRICKÁ DESKA.....	13
1.1.1 <i>Relativní permitivita</i>	13
1.1.2 <i>Ztrátový činitel</i>	13
1.1.3 <i>Používané materiály</i>	13
1.2 TYPY PLANÁRNÍHO VEDENÍ	14
1.2.1 <i>Páskové vedení</i>	14
1.2.2 <i>Mikropáskové vedení</i>	15
1.2.3 <i>Další typy planárního vedení</i>	17
2 DĚLIČE VÝKONU A SMĚROVÉ ODBOČNICE	20
2.1 ROZPTYLOVÉ PARAMETRY	20
2.2 SMĚROVÉ VAZEBNÍCH ČLENY	21
2.2.1 <i>Druhy směrovosti</i>	22
2.3 DĚLIČ TYPU T	23
2.4 WILKINSONŮV DĚLIČ.....	24
2.4.1 <i>Nekompenzovaný Wilkinsonův dělič</i>	24
2.4.2 <i>Kompenzovaný Wilkinsonův dělič</i>	25
2.4.3 <i>Nesymetrický Wilkinsonův dělič</i>	25
2.5 GYSELŮV DĚLIČ	27
2.6 BRANCH-LINE	28
2.7 RAT-RACE.....	29
2.8 ŠIROKOPÁSMOVÝ 0°/180° DĚLIČ.....	31
3 NÁVRH ŠIROKOPÁSMOVÉHO 0°/180° DĚLIČE	33
3.1 VOLBA SUBSTRÁTU	33
3.2 VÝPOČET	34
3.3 NÁVRH A OPTIMALIZACE V DESIGN STUDIU	36
3.3.1 <i>Sestavení děliče</i>	36
3.3.2 <i>Optimalizace</i>	38
3.4 PŘEVEDENÍ A OPTIMALIZACE V MICROWAVE STUDIU.....	40
3.4.1 <i>Převedení do Microwave Studia</i>	40
3.4.2 <i>Simulace pomocí Frequency Solver</i>	41
3.4.3 <i>Optimalizace</i>	42
4 SIMULACE DĚLIČE TYPU RAT-RACE	46
4.1 NÁVRH DĚLIČE RAT-RACE.....	46
4.2 ZHODNOCENÍ DĚLIČE RAT-RACE	47
5 MĚŘENÍ	52
5.1 KALIBRACE VEKTOROVÉHO ANALYZÁTORU	52
5.2 LABORATORNÍ MĚŘENÍ DĚLIČE	53
5.3 NAMĚŘENÁ DATA.....	54
5.4 ZHODNOCENÍ	58

ZÁVĚR.....	60
LITERATURA.....	62
PŘÍLOHY.....	63

Seznam zkratek

3D	3_Dimension (Třírozměrné)
DS	Design Studio
CST	Computer Simulaton Technology
HEM	Hybridní ElektroMagnetická (vlna)
MWS	Microwave Studio
SMA	SubMiniature version A (typ konektoru)
SMD	Surface Mount Technology
TE	Transverzálně (příčně) Elektrická (vlna)
TEM	Transverzálně (příčně) ElektroMagnetická (vlna)
TM	Transverzálně (příčně) Magnetická (vlna)

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Páskové vedení	14
Obrázek 2 – Elektrické a magnetické pole v páskovém vedení	15
Obrázek 3 - Mikropáskové vedení.....	16
Obrázek 4 - Elektrické a magnetické pole v mikropáskovém vedení.....	16
Obrázek 5 -Třívodičové koplanární vedení.....	17
Obrázek 6 - Dvouvodičové koplanární vedení.....	18
Obrázek 7 - Mikropáskové vázané vedení.....	18
Obrázek 8 - Statické kapacity pro sudý a lichý vid	18
Obrázek 9 – Vázané symetrické páskové vedení	18
Obrázek 10 - Sudý a lichý vid na vázaném symetrickém vedení	19
Obrázek 11 - Lineární N-Bran	20
Obrázek 12 - Směrnost prvního druh	22
Obrázek 13- Směrnost druhého druhu.....	23
Obrázek 14- Směrnost třetího druh	23
Obrázek 15 - Wilkinsonův dělič	24
Obrázek 16 - Kompenzovaný Wilkinsonův dělič	25
Obrázek 17 - Nesymetrický Wilkinsonův dělič	26
Obrázek 18 - Gyselův dělič	27
Obrázek 19 - Branch-line	29
Obrázek 20 - Rat-race.....	30
Obrázek 21 - 0°/180° širokopásmový dělič	31
Obrázek 22 - S-parametry 0°/180° širokopásmového děliče	32
Obrázek 23 - Graf závislosti impedance vedení na šířce pásku vybraných materiálů	33
Obrázek 24 - Graf Závislosti tloušťky dielektrika na šířce pásku při impedanci 50 Ω.....	34
Obrázek 25 - Graf závislosti tloušťky na šířce pásku při impedanci 50 Ω	34
Obrázek 26 - Makro výpočtu impedance v CST Microwave Studiu	35
Obrázek 27 - Použité bloky v CST Design Studiu	36
Obrázek 28 - Blokové schéma širokopásmového děliče	37
Obrázek 29 - S-parametry nenaladěný 0°/180° širokopásmový dělič.....	38
Obrázek 30 - Ukázka prostředí Optimalizéru	38
Obrázek 31 - S-Parametry děliče, první optimalizace	39
Obrázek 32 - Layout děliče, vlevo s chybou, vpravo opravený	39
Obrázek 33 - S-parametry a fáze mezi vybranými bránami děliče.....	40
Obrázek 34 - Dělič v Microwave Studiu s výrazněnými chybami	41
Obrázek 35 - Prostředí nastavení frekvenčního řešitele	42
Obrázek 36 - 3D zobrazení děliče v CST Microwave Studiu	43
Obrázek 37 - Graf s-parametrů a fází mezi vstupy a výstupy.....	43
Obrázek 38 – S-parametry útlumu odrazů jednotlivých bran.....	44
Obrázek 39 – S-parametry izolací širokopásmového děliče.....	44
Obrázek 40 - Blokové schéma Rat-race.....	47
Obrázek 41 - Layout Rat-race	47
Obrázek 42 - S-parametry mezi vstupními a výstupní bránami Rat-race.....	48
Obrázek 43 - S-parametry útlumů odrazů Rat-race	48
Obrázek 44 - S-parametry izolací Rat-race	49

Obrázek 45 – Vektorový analyzátor ROHDE & SCHWARZ ZVL	52
Obrázek 46 - Kalibrační sada ZV-Z135	52
Obrázek 47 - Měřicí pracoviště	53
Obrázek 48 - Provedení 0°/180° širokopásmového děliče.....	54
Obrázek 49 - Naměřené S-parametry a fáze	54
Obrázek 50 - Naměřené s-parametry útlumu odrazů bran.....	55
Obrázek 51 - Naměřené S-parametry izolací	56
Obrázek 52 - Simulace elektrického pole vstupujícího portem 1	58
Obrázek 53 - Simulace elektrického pole vstupujícího portem 4	59

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Dielektrické materiály a jejich parametry	14
Tabulka 2 - Vypočítaná šířka jednotlivých úseků pomocí makra a pomocí rovnice.....	35
Tabulka 3 - S-parametry návrhu děliče na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče	45
Tabulka 4 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče.....	45
Tabulka 5 - S-parametry návrhu děliče na frekvenci 3 GHz	45
Tabulka 6 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na frekvenci 3 GHz	46
Tabulka 7 - S-parametry návrhu děliče na horní frekvenci pracovní šířky pásma děliče	46
Tabulka 8 – S-parametry děliče Rat-race v dolní frekvenci šíře pásma.....	49
Tabulka 9 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče Rat-race	49
Tabulka 10– S-parametry děliče Rat-race na frekvenci 3 GHz	50
Tabulka 11- Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na frekvenci 3 GHz	50
Tabulka 12 – S-parametry děliče Rat-race v horní frekvenci šíře pásma	50
Tabulka 13 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na horní frekvenci pracovní šíře pásma děliče Rat-race	51
Tabulka 14 – S-parametry v dolní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče.....	56
Tabulka 15 – Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na dolní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče.....	56
Tabulka 16 – S-parametry na frekvenci 3 GHz vyrobeného děliče	57
Tabulka 17 – Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na frekvenci 3 GHz vyrobeného děliče	57
Tabulka 18 – S-parametry v horní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče	57
Tabulka 19 - Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na horní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče.....	58

Úvod

Širokopásmové děliče mají velké uplatnění například v radarové technice, kde je potřeba signál přijímat, nebo vysílat z více antén, přitom zajistit, aby se navzájem signály neovlivňovaly nedocházelo k jejich velkému útlumu anebo aby se neodrážely zpět. Jejich konstrukce přitom může být rozličná, od koaxiálního vedení, přes vlnovody používající se na velkých výkonech anebo v planární podobě, tedy leptané cesty na dielektrické desce.

Úkolem této diplomové práce je návrh, simulace a poté ověření reálné funkce širokopásmového děliče $0^\circ/180^\circ$ na frekvenci 3 GHz. Navrhovaný dělič je převzat z článku pánů R. Knöchel a B. Mayer z Technische Universität Hamburg-Harburg, kde tento dělič popisují na frekvenci 10 GHz. Pro simulaci bude použit simulační program CST a jeho Design Studia a Microwave Studio.

První část diplomové práce je věnována teorii planárních obvodů, jejich základním parametrům a používaným materiálům. Dále jsou zde popsány jednotlivé typy planárních obvodů, jejich přednosti, slabiny, jaké druhy vln se v nich šíří a popsána jejich fyzická konstrukce.

Další část je věnována děličům výkonu, seznámení s rozptylovými parametry a vysvětlení druhů směrovosti. Dále je zde popsáno několik vybraných typů děličů a směrových odbočnic, vysvětlen jejich princip funkce a popsána jejich konstrukce s výpočty. Jako poslední dělič je zde teoreticky popsán navrhovaný širokopásmový dělič.

Po popsání obvodu a vysvětlení funkce se v další kapitole můžeme pustit do návrhu. Na začátku je potřeba zvolit jaký typ planárního vedení použijeme a jaké použijeme dielektrikum, k tomu nám pomůže teorie z první kapitoly. Poté můžeme přikročit ke konstrukčním výpočtům děliče a jeho návrhu v programu CST Design studio a jeho optimalizaci. Pomocí Design Studia získáme hrubé výsledky rozptylových parametrů, ale také blíže určené rozměry děliče pro CST Microwave Studio, což zrychlí optimalizaci v MWS.

Po od simulování a optimalizaci děliče můžeme přistoupit jeho výrobě a měření, k tomu je věnována čtvrtá kapitola. Zde je popsán postup měření a výsledky měření s hodnocením a porovnáním se simulací.

1 Planární vedení

Planární vedení je tvořeno tenkými vodivými cestami na dielektrické desce. Mezi základní typy planárního vedení patří páskové vedení a mikropáskové a další.

1.1 Dielektrická deska

Dielektrická deska, nazývaná substrát, je základem planárních obvodů. Výběr substrátů závisí na mnoha parametrech, které se přizpůsobují určité aplikaci. Jedním z hlavních parametrů je kmitočtové pásmo, na kterém bude dielektrická deska používána, nebo teplota, kterou má materiál snést. Další velice důležité základní parametry dielektrických materiálů jsou relativní permitivita a ztrátový činitel.

1.1.1 Relativní permitivita

Relativní permitivita, ϵ_r , vyjadřuje kolikrát je permitivita daného prostředí větší než permitivita vakua ϵ_0 . Je to materiálová konstanta a je závislá na fyzikální podmínkách, jako je teplota, tlak, nebo kmitočet elektrického pole.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

1.1.2 Ztrátový činitel

Dalším parametrem je ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$, ten popisuje dielektrické ztráty v materiálu. Máme-li harmonický průběh je definován jako poměr činné složky protékajícího kondenzátorem ku složce jalové.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_w}{I_c} \quad (1.2)$$

1.1.3 Používané materiály

Materiálů pro dielektrické desky je mnoho, ale na vysokých frekvencích se nejčastěji používají materiály vyrobené na bázi keramiky. Jejich velkou výhodou je vysoká časová stabilita mechanických i elektrických parametrů, nestárne vlivem působení extrémních teplot, nestárne časem a nekoroduje. V tabulce 1 je uvedeno několik různých dielektrických materiálů pro vysokofrekvenční aplikace.

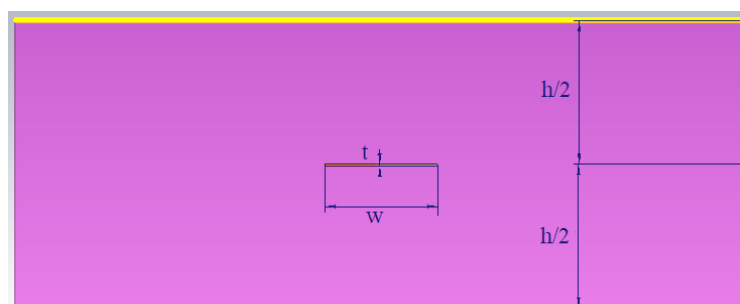
Tabulka 1 - Dielektrické materiály a jejich parametry

materiál	ϵ_r (při 10 GHz)	$\text{tg } \delta$ (při 10 GHz)
Rogers 4350B	3,48	0,0037
Rogers 3003	3,00	0,001
I-Tera	3,45	0,0031
Astra MT77	3,00	0,0017
Teflon	2,1	0,0002
Korundová keramika	9,9	0,0001
Beryliová keramika	6,6	0,0004

1.2 Typy planárního vedení

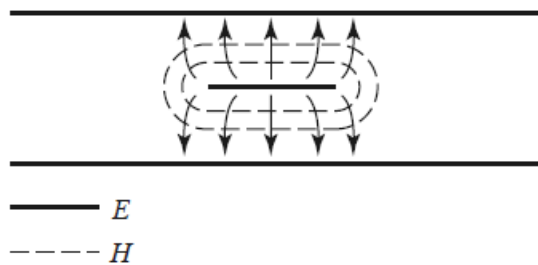
1.2.1 Páskové vedení

Páskové vedení, obrázek 1, je druh planárního vedení používané pro mikrovlnné integrované obvody. Základem je tenký vodivý pás se šířkou w , který je umístěn ve středu mezi dvě vodivé zemnicí desky. Desky jsou od sebe vzdáleny o vzdálenost h a prostor mezi nimi je vyplněn dielektrikem. V praxi se obvykle vyleptá vodivá cesta středního vodiče na dielektrickou desku o tloušťce $h/2$, která z druhé strany je nanesená zemnicí vrstva. Potom je strana se středním vodičem zakryta dielektrikem znovu o šířce $h/2$ a zemnicí vrstvou.



Obrázek 1 - Páskové vedení

V tomto druhu vedení se šíří čistá vlna TEM, to je způsobeno použitím dvou vodičů a homogenního dielektrika. Však stejně jako u koaxiálního vedení mohou se šířit i vlny vyššího řádu, pro jejich odstranění se omezuje vzdálenost mezi zemnicími rovinami na méně než polovinu délku vlny. Rozložení elektrické a magnetické složky je vidět na obrázku 2.



Obrázek 2 – Elektrické a magnetické pole v páskovém vedení

Impedanci páskového vedení můžeme spočítat podle vzorce:

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_r}} \frac{h}{W_e + 0,441 * h} \quad (1.3)$$

kde:

$$\frac{W_e}{h} = \frac{W}{h} - \begin{cases} 0 & \text{pro } \frac{W}{h} > 0,35 \\ (0,35 - \frac{W}{h})^2 & \text{pro } \frac{W}{h} < 0,35 \end{cases} \quad (1.4)$$

Tento výpočet impedance zanedbává tloušťku pásku a je přesný přibližně na 1 % výsledků. Přesnost výpočtů klesá se zvětšující se šířkou pásku.

Chceme-li vypočítat geometrické rozměry pásku, můžeme použít výpočet:

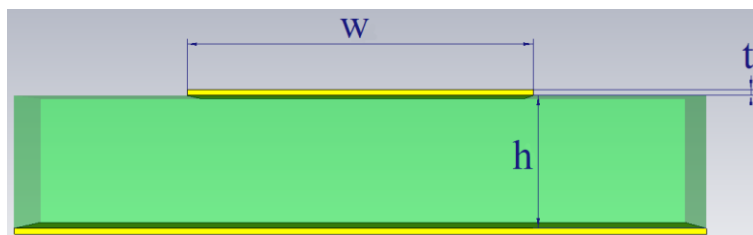
$$\frac{W}{h} = \begin{cases} x & \text{pro } \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 < 120\Omega \\ 0,85 - \sqrt{0,6 - x} & \text{pro } \sqrt{\varepsilon_r} Z_0 > 120\Omega \end{cases} \quad (1.5)$$

kde:

$$x = \frac{30\pi}{\sqrt{\varepsilon_r} Z_0} - 0,441 \quad (1.6)$$

1.2.2 Mikropáskové vedení

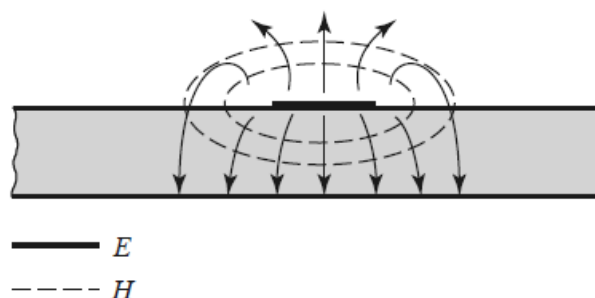
Jedním z nejpoužívanějších typů planárního vedení je mikropáskové vedení, vodivá cesta, o tloušťce t a šířce w , je nanášená na dielektrickou desku, tloušťky h . Z druhé strany dielektrické desky je nanášená zemnicí plocha, obrázek 3. Jeho časté používání je dáno jednoduchou výrobou pomocí fotolitografických procesů, při tom se snadno integrují pasivní i aktivní mikrovlnné součástky.



Obrázek 3 - Mikropáskové vedení

Z hlediska toho, že část elektromagnetické vlny je uzavřena mezi vodivým pásem, přes dielektrikum a zemnicí rovinu a část je z vodivého pásu rozptýlená do prostoru nad substrátem, většinou prostor se vzduchem. Z toho důvodu se nemůže v mikropáskovém vedením šířit čistá vlna TEM, protože fázová rychlost TEM ve vzduchu je rovna rychlosti světla, ale fázová rychlost v dielektriku je nižší (1.7).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1.7)$$



Obrázek 4 - Elektrické a magnetické pole v mikropáskovém vedení

Ve skutečnosti se tedy mikropáskovým vedením šíří hybridní vlna TM-TE, ta je ale velice složitá na výpočet. Ve většině praktických aplikací je však tloušťka dielektrického substrátu velmi malá ($h \ll \lambda$). Díky tomuto předpokladu můžeme hybridní TEM vlnu nahradit kvazi-TEM a získat tak aproximaci rychlosti fáze, propagační konstanty a charakteristické impedance ze statických nebo kvazistatických řešení.

Impedance mikropáskového vedení lze vypočítat pomocí vzorce:

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_p}} \ln \left(\frac{8d}{w} + \frac{w}{4h} \right) & \text{pro } \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_p} \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0,667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1,444 \right) \right]} & \text{pro } \frac{w}{h} \geq 1 \end{cases} \quad (1.8)$$

kde:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \quad (1.9)$$

Známe-li již impedanci a potřebujeme zjistit rozměry pásku, použijeme vzorec:

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2} & \text{pro } \frac{w}{h} < 2 \\ \frac{2}{\pi} [B - 2 - \ln(2B - 1) + C] & \text{pro } \frac{w}{h} > 2 \end{cases} \quad (1.10)$$

kde:

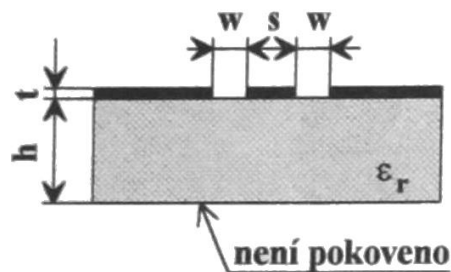
$$A = \frac{Z_0}{60} \sqrt{\frac{\varepsilon_r + 1}{2}} + \frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 1} \left(0,23 + \frac{0,11}{\varepsilon_r} \right) \quad (1.11)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z_0\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (1.12)$$

$$C = \frac{\varepsilon_r - 1}{2\varepsilon_r} \left\{ \ln(B - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{\varepsilon_r} \right\} \quad (1.13)$$

1.2.3 Další typy planárního vedení

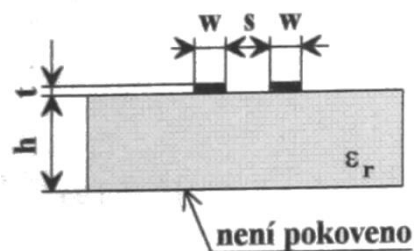
- Třívodičové koplanární vedení (Koplanární vlnovod)



Obrázek 5 - Třívodičové koplanární vedení

Dominantním videm šířícím se vedením je vid HEM, na nízkých kmitočtech ho pak můžeme aproximovat jako kvazi-TEM

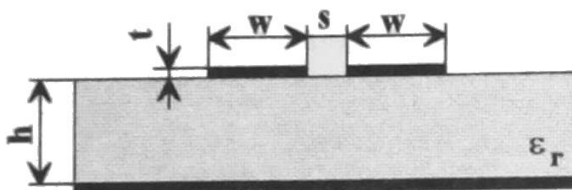
- Dvouvodičové koplanární vedení



Obrázek 6 - Dvouvodičové koplanární vedení

Dvouvodičovým koplanárním vedením se šíří, jako dominantní vid, vid HEM, na nízkých kmitočtech lze aproximovat na kvazi-TEM.

- Mikropáskové vázané vedení



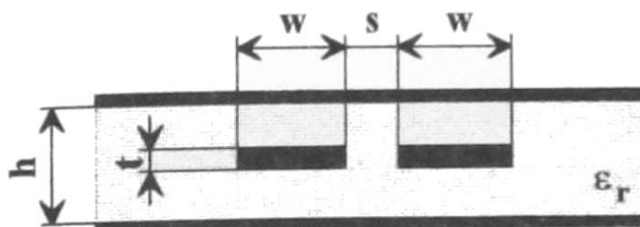
Obrázek 7 - Mikropáskové vázané vedení

Vedení se šíří sudý a lichý vid HEM, při nižších kmitočtech lze tyto vidy aproximovat jako sudý a lichý kvazi TEM vid.



Obrázek 8 - Statické kapacity pro sudý a lichý vid

- Vázané symetrické páskové vedení



Obrázek 9 – Vázané symetrické páskové vedení

Ve vázaném symetrickém páskovém vedení je dominantní vid TEM ve dvou konfiguracích, sudý vid a lichý vid.

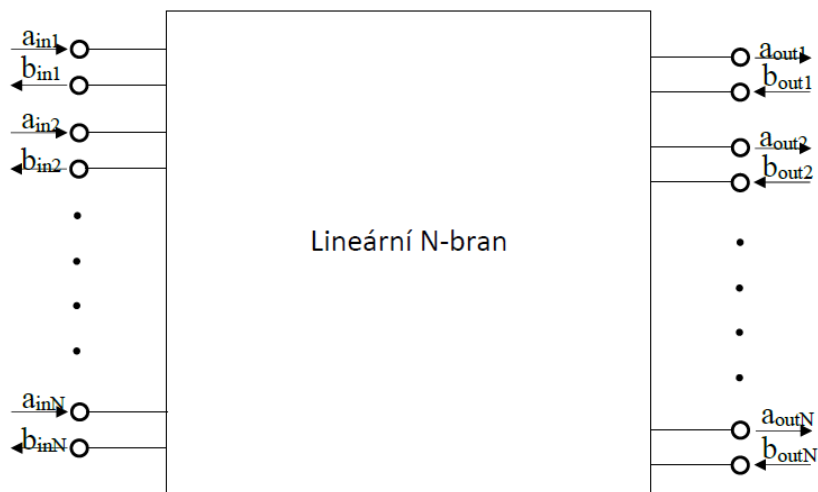


Obrázek 10 - Sudý a lichý vid na vázaném symetrickém vedení

2 Děliče výkonu a směrové odbočnice

2.1 Rozptylové parametry

Nízkofrekvenční obvody lze jednoduše popsat pomocí známých parametrů, jako jsou impedanční, admitanční, nebo hybridní parametry. Ve vysokofrekvenčních obvodech je, ale použití těchto parametrů velice složité, nebo nemožné, protože proudy a napětí se obtížně měří. Z toho to důvodu se používají rozptylové parametry, S-parametry, které se snadno měří a pro jejich vyjádření se využívá přímá a odražená vlna v určitém místě.



Obrázek 11 - Lineární N-Bran

Máme-li lineární mnohobran s N bránami, vstupující, tzv. dopadající, elektromagnetickou vlnu označíme jako a_1, a_2, \dots, a_N , odraženou, tzv. rozptýlenou, vlnu označíme jako b_1, b_2, \dots, b_N . Pak rovnice S-parametru můžeme zapsat jako:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + \dots + S_{1N}a_N \quad (2.1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + \dots + S_{2N}a_N$$

$$\vdots = \vdots + \vdots + \ddots + \vdots$$

$$b_N = S_{N1}a_1 + S_{N2}a_2 + \dots + S_{NN}a_N$$

Tuto soustavu můžeme přepsat do maticové podoby, tak že amplitudy dopadajících vln a rozptýlených vln můžeme zapsat do sloupcových vektorů \mathbf{a} a \mathbf{b} . S-parametry pak můžeme zapsat jako čtvercovou matici \mathbf{S} , kde jednotlivé prvky jsou koeficienty S_{mn} , ty můžeme vyjádřit jako podíl jednotlivých odražených a dopadajících vln.

$$S_{mn} = \frac{b_m}{a_n} \quad (2.2)$$

Pak:

$$b = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_N \end{pmatrix} \quad a = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \quad S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Prvky matice S na hlavní diagonále, tedy S_{11} , S_{22} , ..., S_{NN} , jsou koeficienty odrazu n -té brány. Ostatní koeficienty matice S , kde $m \neq n$, se nazývají koeficienty přenosu n -té brány do m -té brány. Obvod, který má symetrickou matici S , tedy přenos z m -té brány do i -té brány stejný jako přenos z n -té brány do m -té, se nazývá reciproký.

Rozptylové parametry udávají amplitudy napěťových vln. Pro výpočet výkonů se počítá absolutní hodnoty.

Odražený výkon n -té brány $(P_{odr})_n$, se dá vyjádřit jako součin výkonu dopadajícímu n -tou bránu, $(P_{dop})_n$ a druhá mocnina absolutní hodnoty prvku matice S na hlavní diagonále:

$$(P_{odr})_n = (P_{dop})_n |S_{nn}|^2 \quad (2.4)$$

Obdobně lze vyjádří přenesený výkon, P_{mn} , z n -té brány do m -té:

$$P_{mn} = (P_{dop})_n |S_{mn}|^2 \quad (2.5)$$

2.2 Směrové vazebních členy

Ideální směrový vazební člen popisuje věta o existenci ideální směrové odbočnice a ta zní: „Reciproký bezeztrátový a totálně přizpůsobený čtyř bran je ideální směrová odbočnice.“[5] Tedy aby existoval takovýto čtyřbran musí být obvod přizpůsobený, jednou branou bude výkon vstupovat, obvykle se volí první brána, do odbočnice a dvěma bránami vystupovat, z poslední brány nebude vystupovat žádný výkon. Výkony vstupující do odbočnice vstupní bránu musejí být v rovnováze se součtem výkonů na výstupních branách.

Rozptylová matice odpovídající těmto požadavkům bude pak symetrická, tedy bude splňovat podmínku reciprocity. Prvky na hlavní diagonále budou vždy nulové, do vstupní

brány se nesmí zpět odrážet žádný výkon. Dále nesmí existovat vazba mezi příslušnými bránami, takže v každém sloupci bude ještě jeden prvek nulový.

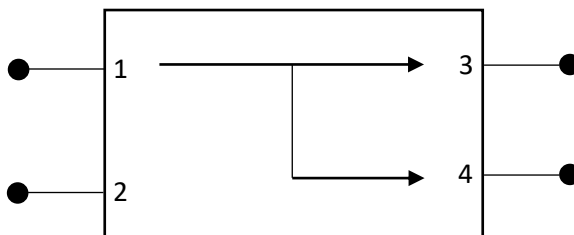
2.2.1 Druhy směrovosti

Rozlišujeme tři druhy směrovosti směrových vazebních členů:

a) Směrovost prvního druhu

Při tomto druhu směrovosti vstupuje signál do vstupní brány, obvykle brána jedna, jak je to vidět na obrázku 12, potom vystupuje branami tři a čtyři. Rozptylová matice se potom bude rovnat:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 0 & S_{13} & S_{14} \\ 0 & 0 & S_{23} & S_{24} \\ S_{13} & S_{23} & 0 & 0 \\ S_{14} & S_{24} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

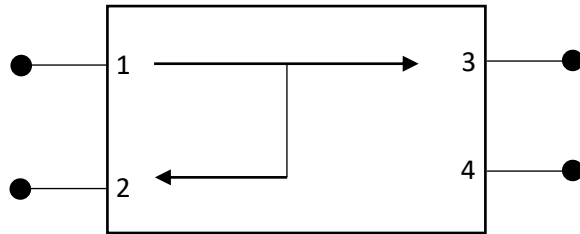


Obrázek 12 - Směrovost prvního druh

b) Směrovost druhého druhu

Budeme-li budít vstupní bránu, potom výkon se rozdělí mezi brány dvě a tři. To je vidět na obrázku 13 a rozptylová matice pak bude vypadat:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} & 0 \\ S_{12} & 0 & 0 & S_{24} \\ S_{13} & 0 & 0 & S_{34} \\ 0 & S_{24} & S_{34} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

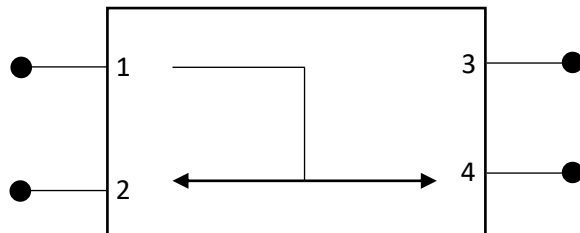


Obrázek 13- Směrnost druhého druhu

c) Směrnost třetího druhu

Výkon vstupující do odbočnice se rozdělí mezi brány dvě a čtyři, obrázek 14, rozptylová matice pak bude vypadat:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{23} & 0 \\ 0 & S_{23} & 0 & S_{34} \\ S_{14} & 0 & S_{34} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.9)$$



Obrázek 14- Směrnost třetího druhu

2.3 Dělič typu T

Jedním z nejjednodušších děličů je dělič typu T, je to troj bran, který může být použit k rozdělení nebo k sloučení výkonu. Jeho hlavní výhodou je, že lze aplikovat skoro na každý typ vedení.

Pokud bude vedení bezeztrátové, nebo jen s malou ztrátou, bude charakteristická impedance reálná:

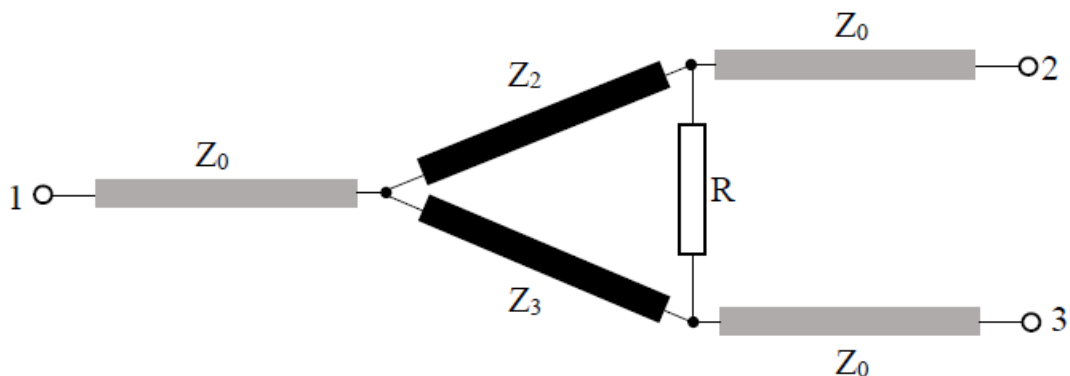
$$\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} = \frac{1}{Z_0} \quad (2.10)$$

Výběrem výstupních impedancí Z_1 a Z_2 , se může volit výstupní poměr výkonu. Tedy, jestliže vstupní impedance bude 50Ω a výkon bude rozdělen rovnoměrně mezi dva výstupy, zvolí se výstupní impedance 100Ω . Tím to se sice docílí, že do každé větve půjde

polovina výkonu, ale výstupní impedance bude nepřizpůsobená. Přizpůsobení výstupů se zajistí použitím čtvrt-vlnných transformátorů. Nyní je přizpůsobený vstup i výstupy, ale výstupní porty mezi sebou nejsou izolované.

2.4 Wilkinsonův dělič

Wilkinsonův dělič rozděluje výkon vstupního signálu do dvou výstupních signálů se stejnou fází, nebo slučuje signál ze dvou zdrojů do jednoho. Tento výkon jde dělit symetricky, do každé větve se rozdělí polovina (3 dB) výkonu, nebo nesymetricky, na jedné výstupní bráně bude větší výkon než na druhé. Vyroben může být pomocí mikropáskové, tak i páskové technologie.



Obrázek 15 - Wilkinsonův dělič

2.4.1 Nekompensovaný Wilkinsonův dělič

Základem jsou dva úseky vedení dlouhé čtvrt vlny, impedanční transformátory, jedná-li se o symetrický obvod, budou jejich charakteristické impedance Z_2 a Z_3 stejně velké.

$$Z_2 = Z_3 = \sqrt{2}Z_0 \quad (2.11)$$

Kde Z_0 je charakteristická impedance zdroje a zátěže.

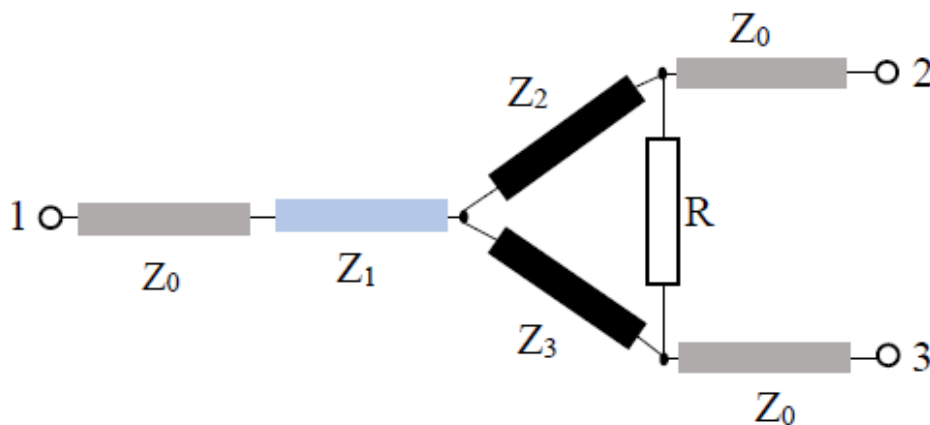
Pro zlepšení izolace mezi výstupními branami 2 a 3, je dán do obvodu rezistor R , jedná se o klasickou součástku se soustředěnými parametry. Kvůli parazitním vlastnostem součástky by měla mít zanedbatelné rozměry vůči vlnové délce, z tohoto důvodu se používají rezistory v provedení SMD.

$$R = 2Z_0 \quad (2.12)$$

Vstupuje-li signál branou 1, nebo vstupují-li signály se stejnou amplitudou a polaritou branami 2 a 3, jedná se o takzvaně sudý vid. Mezi branami 2 a 3 je stejný potenciál, nepoteče mezi nimi žádný proud a rezistor R se neuplatní.

Vstupují-li branami 2 a 3 signály, které mají stejnou amplitudu, ale opačnou polaritu, jedná se o takzvaný sudý vid. Mezi branami 2 a 3 již není stejný potenciál a začne mezi nimi téct proud, ten se odečte v místě spojení čtvrt vlnových úseků, takže zde bude napětí nulové, dále se odečte taky v polovině rezistoru R.

2.4.2 Kompenzovaný Wilkinsonův dělič



Obrázek 16 - Kompenzovaný Wilkinsonův dělič

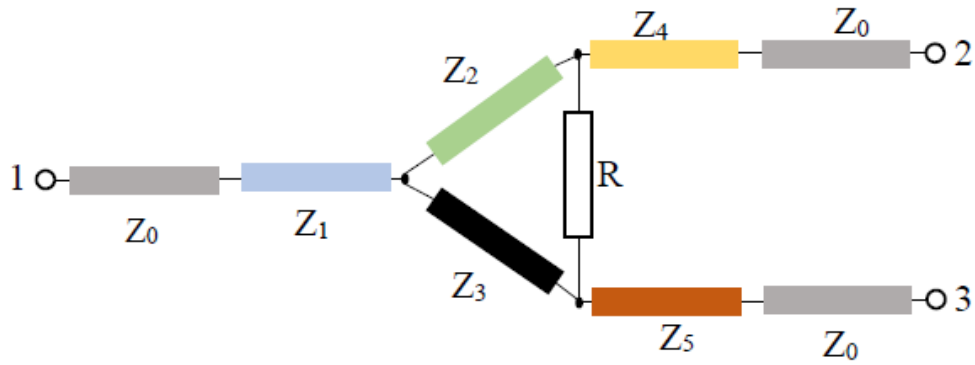
Přidáním dalšího čtvrtvlnového impedančního transformátoru ke vstupní bráně se docílí rozšíření kmitočtového pásma a zároveň ke zlepšení impedančního přizpůsobení vstupní brány. Pro správné fungování obvodu je potřeba znovu určit impedance jednotlivých úseků vedení. Impedanci Z_1 přidaného úseku, danou vztahem (2.13), a impedance ramen Z_2 a Z_3 jsou pak dány vztahem (2.14). Rezistor R je stejný jako u nekompenzovaného děliče (2.12).

$$Z_1 = \frac{1}{\sqrt[4]{2}} Z_0 \quad (2.13)$$

$$Z_2 = Z_3 = \sqrt[4]{2} Z_0 \quad (2.14)$$

2.4.3 Nesymetrický Wilkinsonův dělič

Pokud je potřeba použít nestejný dělicí poměr lze Wilkinsonův dělič na něj adaptovat přidáním dvou čtvrtvlnových impedančních transformátorů k výstupním bránám.



Obrázek 17 - Nesymetrický Wilkinsonův dělič

Zde již impedance Z_2 a Z_3 nebudou stejné a jejich výpočet a výpočet přidávaných impedančních transformátorů pro nekompensovaný je zde:

$$Z_2 = Z_0 \sqrt{k(1+k^2)} \quad (2.15)$$

$$Z_3 = Z_0 \sqrt{\frac{1+k^2}{k^3}} \quad (2.16)$$

$$Z_4 = Z_0 \sqrt{k} \quad (2.17)$$

$$Z_5 = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad (2.18)$$

$$R = Z_0 \frac{1+k^2}{k} \quad (2.19)$$

$$\frac{P_4}{P_5} = k^2 \quad (2.20)$$

Kde P_4 a P_5 jsou výstupní výkony na branách 4 a 5

Kompensovaný nesymetrický Wilkinsonův dělič se vytvoří obdobně jako u symetrické verze, přidáním čtvrtvlnovým úsekem vedení do vstupní brány.

$$Z_1 = Z_0 \sqrt[4]{\frac{k}{1+k^2}} \quad (2.21)$$

$$Z_2 = \sqrt[4]{k^3 \cdot (1+k^2)} \quad (2.22)$$

$$Z_3 = \sqrt[4]{\frac{1+k^2}{k^5}} \quad (2.23)$$

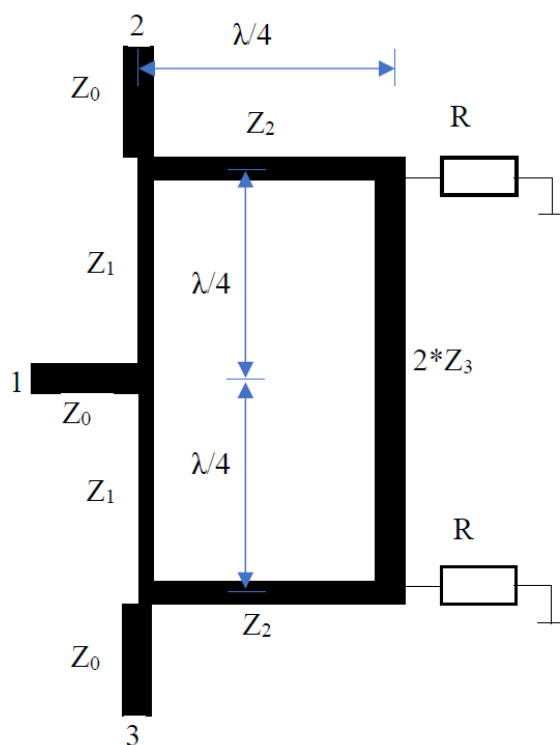
$$Z_4 = Z_0 \sqrt{k} \quad (2.24)$$

$$Z_5 = \frac{Z_0}{\sqrt{k}} \quad (2.25)$$

$$R = Z_0 \frac{1 + k^2}{k} \quad (2.26)$$

2.5 Gyselův dělič

Zásadní slabinou Wilkinsonova děliče je jeho použití pro vyšší výkony, to je způsobeno rezistorem R. Jak již bylo zmíněno, aby obvod fungoval je potřeba aby měl rezistor R zanedbatelné parazitní vlastnosti, tedy co nejmenší fyzickou velikost. S tím, ale při zvyšujícím se výkonu přibývá problém s odvodem tepla vznikajícího na tom to rezistoru. Dělič typu Gysel, obrázek 18, je modifikací Wilkinsonova dělič a řeší problém pro využití děliče na vyšších výkonech.



Obrázek 18 - Gyselův dělič

Gyselův dělič, souměrným 3dB dělení, je tvořen čtvrtvlnnými impedančními transformátory, ale na rozdíl od Wilkinsonova děliče má 5 bran, z toho jedna brána je vstupní, brána 1, a dvě výstupní, brány 2 a 3, zbylí dvě jsou zakončené přizpůsobenou zátěží R. Rezistor zde již nepropojuje výstupní brány, ale dva odpory tedy zakončují bránu 4 a 5. Rezistory mají velikost jako charakteristická impedance vedení Z_0 , ale může být i

jiná, a jejich fyzická velikost již nemusí být co nejmenší, ale může se jednat, dle požadavků, klidně i o výkonové rezistory s větší velikostí a lepším odvodem tepla.

Při sudém vidu, např. napájení vstupní branou, se signál rovnoměrně se stejnou fází rozdělí k výstupním branám 2 a 3. Díky tomu, že signál má pořád stejnou fází, tak v místě, kde jsou spojeny dva stejné impedanční transformátory Z_4 nepoteče žádný proud a obvod se v tomto místě chová jako by byl rozpojený. U bran 4 a 5 se signály potkají v proti fázi a vyruší se, rezistory se nevyužijí.

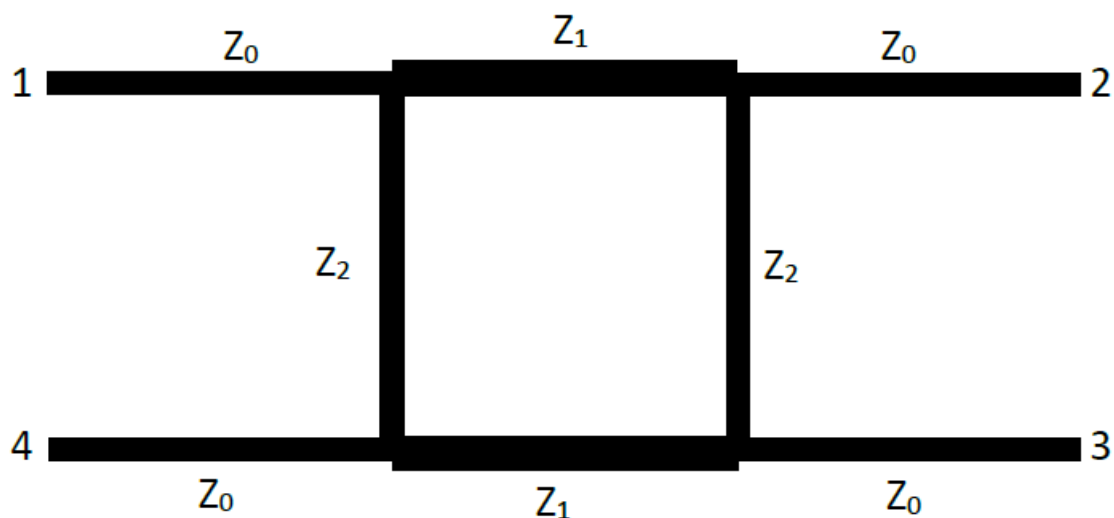
Pokud bude obvod napájen signály s opačnými fázemi do bran 2 a 3 jedná se o lichý vid, signály procházející k bráně 1 se v místě mezi impedančními transformátory Z_2 odečtou a vznikne zde virtuální zkrat, ten též vznikne mezi impedančními transformátory Z_4 . To se v obvodu projeví jako rozpojení obvodu a veškerý výkon poteče přes rezistory.

Impedanční transformátory Z_2 plní stejnou funkci jako ramena u Wilkinsonova děliče, tudíž se pro ně používá stejný výpočet. Výpočet impedančních transformátorů Z_3 se provádí pomocí vztahu (2.27), je vidět, že pokud velikost rezistoru bude stejná jako charakteristická impedance vedení bude mít i impedanční transformátor Z_3 stejnou velikost. Pro úsek vedení Z_4 se nepoužívá žádný výpočet impedance a jeho velikost se volí optimalizací, pomocí jeho změny lze ovlivňovat šířku pásma

$$Z_3 = \sqrt{Z_0 R} \quad (2.27)$$

2.6 Branch-line

Branch-line je směrový vazební člen se čtyřmi přizpůsobenými branami a symetrickou konstrukcí, tedy každá brána se dá použít jako vstupní. Má směrovost prvního druhu, jestliže signál bude napájet bránu 1, výstupními branami budou brány 2 a 3, které budou na druhé straně, signály na výstupu budou mít mezi sebou fázi s rozdílem 90° . Poslední brána 4 bude izolována.



Obrázek 19 - Branch-line

Symetrie tohoto hybridního členu je vidět v rozptylové matici (2.28), kde každý řádek matice lze vytvořit pomocí přetvoření prvního řádku. Protože obvod je přizpůsobený jsou odrazy od jednotlivých bran nulové taktéž je izolace i mezi bránami na stejné straně, tedy dvojice bran 1-4 a 2-3.

$$S = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & j & 1 & 0 \\ j & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & j \\ 0 & 1 & j & 0 \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

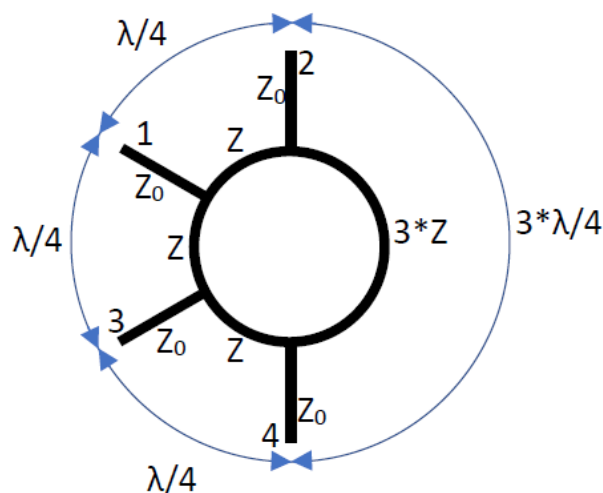
Analýza a výpočet obvodu se provádí, stejně jako u předchozích děličů, pomocí sudého a lichého vidu. Z_0 je charakteristická impedance vedení a Z_1 , Z_2 jsou charakteristické impedance, které mají délku čtvrt vlny. Pokud bude Branch-line rovnoměrně dělit výkon výpočet charakteristických impedancí Z_1 , Z_2 se provede pomocí rovnic:

$$Z_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{2}} \quad (2.29)$$

$$Z_2 = Z_0 \quad (2.30)$$

2.7 Rat-race

Rat-race, též kruhový vazební člen, je čtyřbran, u kterého je fázový rozdíl mezi výstupními bránami 180° , ale může pracovat i v režimu s nulovým fázovým rozdílem. Brána 1 je volena jako součtová brána a brána 4 jako rozdílová.



Obrázek 20 - Rat-race

Má směrovost druhého druhu, takže pokud do brány 1 bude vstupovat signál, brána 4 bude izolována. Signál se rovnoměrně rozdělí mezi výstupní brány 2 a 3, přitom oba výstupy budou mít stejnou fázi. Pokud obvod bude buzen do brány 4, nyní brána 1 bude izolována a na výstupní brány 2 a 3 se signál dostane s opačnou fází. Na rozptylové matici (2.31) lze ověřit symetrii ideálního obvodu rat-race s rovnoměrným dělením 3 dB.

$$s = \frac{-j}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Dělič Rat-race se nejčastěji vyobrazuje v kruhovém tvaru, ale v praxi může mít i jinou geometrii. Důležité je, že obvod se dá tedy rozložit na šest čtvrtvlnových impedančních transformátorů, velikost impedance úseků Z je vázaná na charakteristickou impedanci vedení Z_0 (2.32).

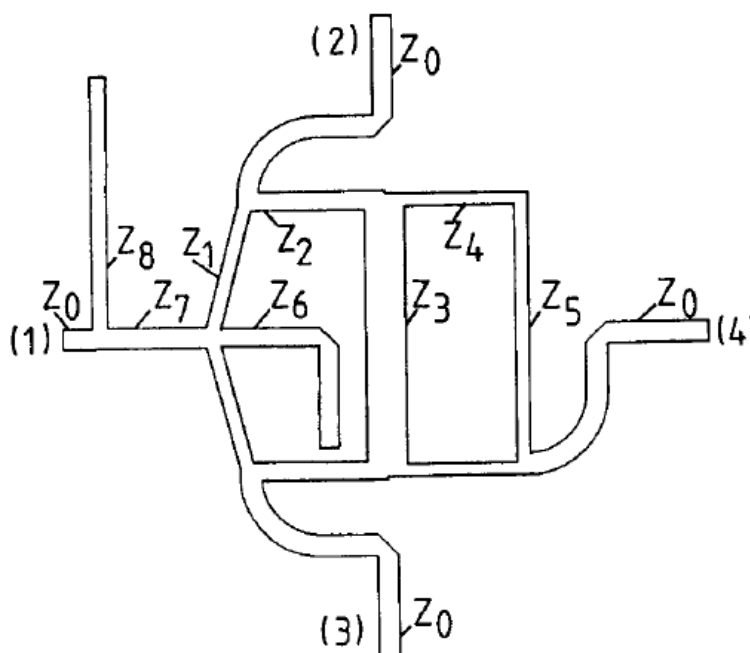
$$Z = \sqrt{2} Z_0 \quad (2.32)$$

Na obrázku 20 je vidět, že jestliže je obvod buzen do brány 1, signál se dostane na výstupní brány 2 a 3 přes čtvrtvlnový impedanční transformátory. Signál na výstupních branách bude oproti vstupnímu signálu o 90° zpožděný a fáze mezi výstupy bude stejná. U brány 4 se signály odečtou a do brána 4 bude izolovaná. Pakliže bude obvod buzen do brány 4, signál se do brány 3 dostane přes jeden čtvrtvlnný impedanční transformátor a zpozdí se o 90° , bráně 2, ale vede cesta přes tři čtvrtvlnné impedančními transformátory a signál se zpozdí o 270° . Rozdíl fáze mezi výstupními bránami pak bude 180° . U brány 1 se signály znova odečtou a nebude se do ní dostávat žádný výkon.

2.8 Širokopásmový $0^\circ/180^\circ$ dělič

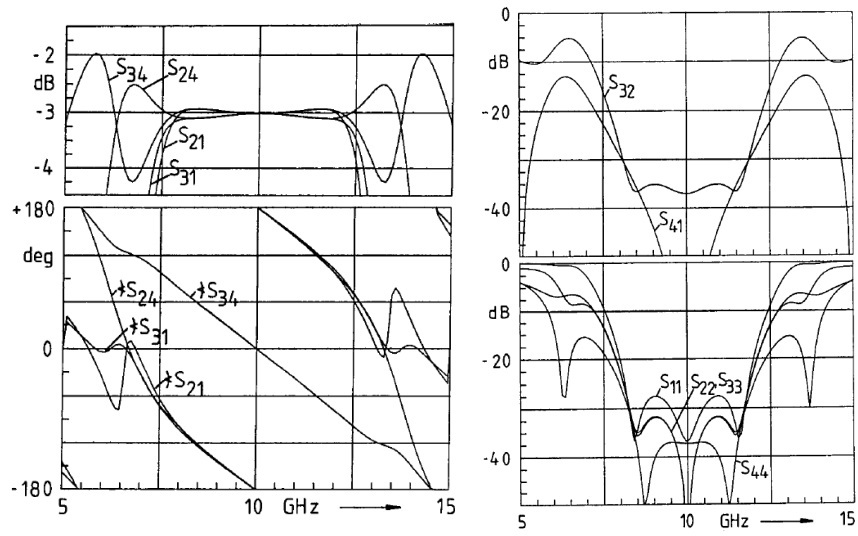
Jako široko pásmový dělič by se dal použít dělič Wilkinsonův, ten je ale omezen jen aplikace s malým výkonem. Gyselův dělič pro změnu řeší problémy s výkonem, ale má užší šířku pásma, malou šířku pásma mají i děliče Branch-line a Rat-race.

Širokopásmový $0^\circ/180^\circ$ dělič funguje obdobně jako dělič typu Rat-race, je tedy možné ho použít na vyšších výkonech, ale má i větší šíři pásma. Stejně jako Rat-race má směrovost druhého druhu Signál vstupující branou 1 se rovnoměrně rozdělí mezi výstupní brány 2 a 3, na obou branách budou mít stejné fázové zpoždění 90° , takže mezi nimi nebude žádný fázový rozdíl. Brána 4 je izolovaná. Bude-li obvod buzen branou 4, nyní brána 1 bude izolovaná, na výstupní bráně 3 bude signál posunutý o 90° a na bráně 2 o 270° , fázový rozdíl výstupních bran bude 180° . Naproti od děliče typu Rat-race má větší šířku pásma, zatím co typická šířka pásma Rat-race děliče je kolem 20-30 %, u toho to typu děliče by se mohla teoreticky relativní šířka pásma pohybovat kolem 40-45 %.



Obrázek 21 - $0^\circ/180^\circ$ širokopásmový dělič

Na obrázku obrázku 21 je vyobrazen tento obvod. Z_0 je charakteristická impedance vedení, Z_1 je charakteristická impedance úseku dlouhého čtvrtvlny, stejně jako úseky s charakteristickými impedancemi Z_2 , Z_4 a Z_7 . Úseky s charakteristickými impedancemi Z_3 a Z_5 mají délku rovnou polovině vlny, zbývající úseky, s charakteristickou impedancí Z_6 a Z_8 , mají délku $\lambda/2$, ale vlivem ladění můžou být ty to úseky zkrácené až na $\lambda/4$. Jednotlivé impedance úseků jsou uvedené v tabulce 2. Na obrázku 22 jsou grafy kde je vyobrazena teoretická funkčnost děliče na 10GHz.



Obrázek 22 - S-parametry $0^\circ/180^\circ$ širokopásmového děliče

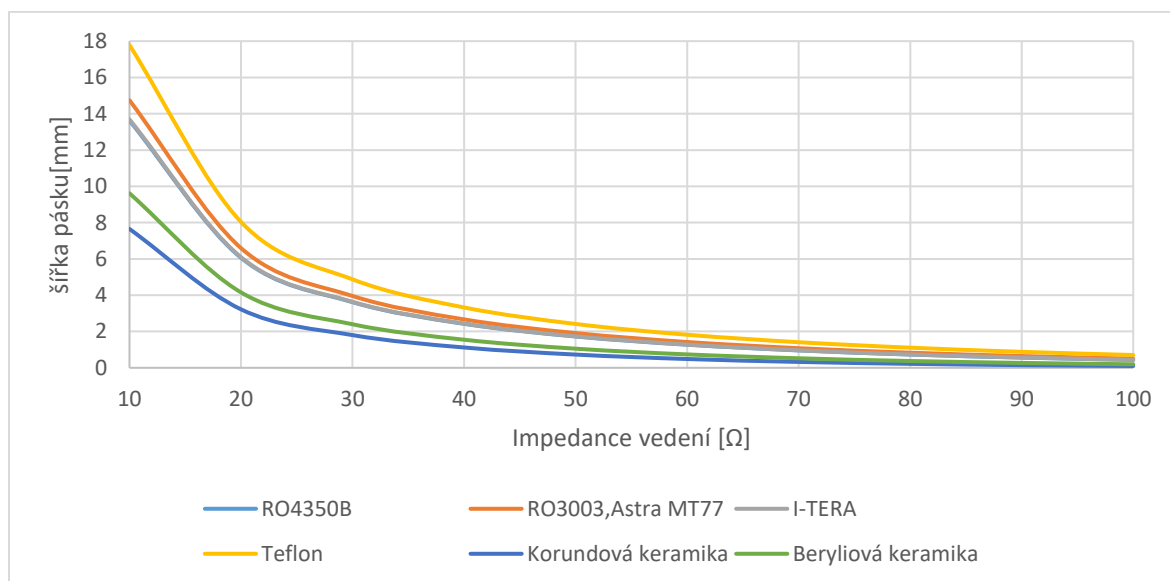
3 Návrh širokopásmového 0°/180° děliče

3.1 Volba substrátu

Pro návrh planárního obvodu byla zvolena, pro její jednoduchost výroby a s tím i spojenou cenu, mikropásková technologie. Dále je potřeba zvolit vhodný substrát dielektrické desky, při jeho výběru je potřeba zohlednit důležité vlastnosti, viz. první kapitola, ale musíme zohlednit i cenu a dostupnost daného materiálu.

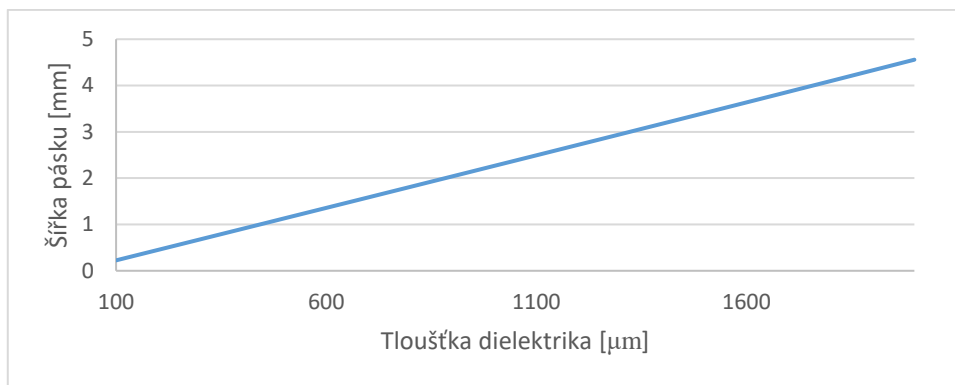
Jedním z velice limitujících parametrů je šířka pásku, pokud by byl pásek vodiče příliš úzký mohlo by dojít vlivem podleptání k přerušení vodivého pásku a tím znehodnocení celého děliče. Navíc na příliš úzké vodiče by se špatně upevňovali konektory.

Na obrázku 23 je vyobrazen graf s ukázkou několika vybraných dielektrických materiálů, graf znázorňuje, jak se mění šířka pásku v závislosti na impedanci vedení. Můžeme pozorovat, že při malých hodnot impedancí je mezi jednotlivými materiály velký rozdíl a se zvyšující impedancí exponenciálně klesají a šířky pásku jednotlivých materiálů se vyrovnávají. Z běžně používaných materiálů pro vysokofrekvenční obvody můžeme vidět, že nejlíp vychází Rogers RO3003 a Astra MT77.

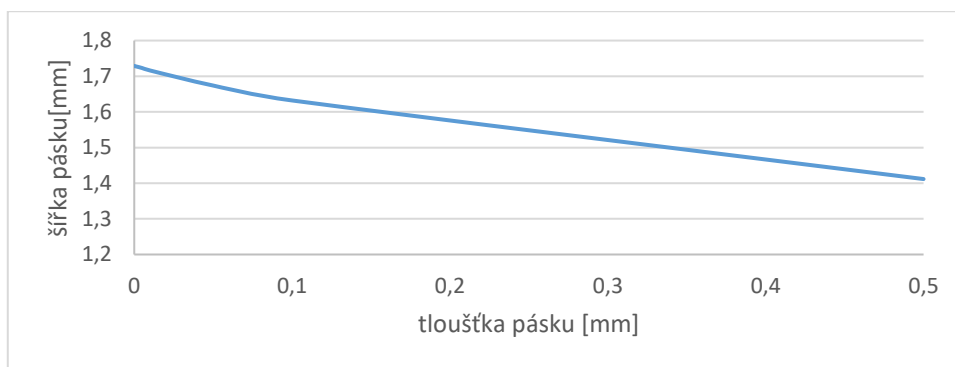


Obrázek 23 - Graf závislosti impedance vedení na šířce pásku vybraných materiálů

Na dalších dvou obrázcích, obrázek 24 a obrázek 25, je znázorněna šířka pásku v závislosti k jinému rozměru. Prvním případě k šířce dielektrika, zde můžeme pozorovat, že se zvětšující tloušťkou desky se zvětšuje šířka pásku takřka lineárně. Na druhém obrázku je znázorněno, jak se zmenšuje šířka pásku při zvětšování tloušťky pásku



Obrázek 24 - Graf závislosti tloušťky dielektrika na šířce pásku při impedanci 50Ω

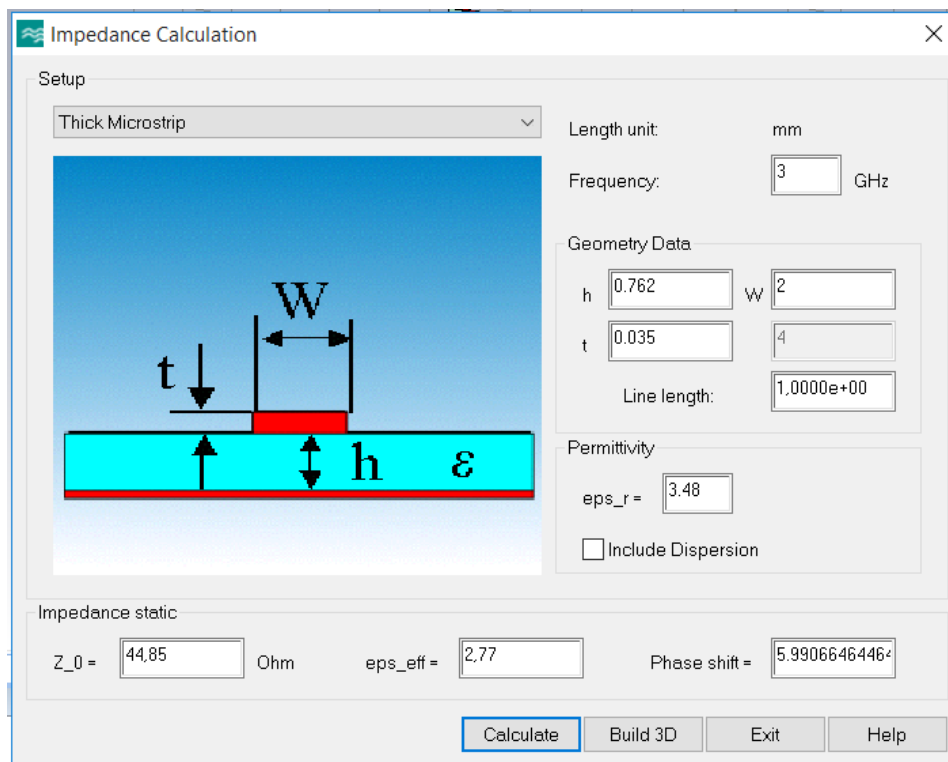


Obrázek 25 - Graf závislosti tloušťky na šířce pásku při impedanci 50Ω

Nakonec byl pro tento návrh vybrán keramický materiál Rogers RO4350B, který má relativní permitivitu $\epsilon_r = 3,48$ a ztrátový činitel $\text{tg } \delta = 0,0037$. Tloušťka desky bude $h = 0,762$ mm a bude ze spodní strany pokoven mědí, sloužící jako zemnicí deska, o tloušťce $t = 35\mu\text{m}$ a z druhé strany budou nanесeny vodivé měděné cesty děliče stejné tloušťky.

3.2 Výpočet

Pro výpočet šířky mikropásku jednotlivých úseků, w_0, w_1, \dots, w_8 , bylo použito makra na výpočet impedance v CST Microwave Studiu, obrázek 26. Prostředí makra počítá při vložení parametrů charakteristickou impedancí vedení, takže pro zjištění šířky pásku se musí manuálně měnit šířka tak aby se co nejvíce blížila k požadované impedanci. Po nalezení potřebné impedance jsme získali hledanou šířku pásku.



Obrázek 26 - Makro výpočtu impedance v CST Microwave Studiu

Pro srovnání byl použit výpočet rozměrů mikropáskového vedení, který je uvedený v první kapitole, výpočet byl proveden v Excelu a je součástí přílohy.

Tabulka 2 - Vypočítaná šířka jednotlivých úseků pomocí makra a pomocí rovnice

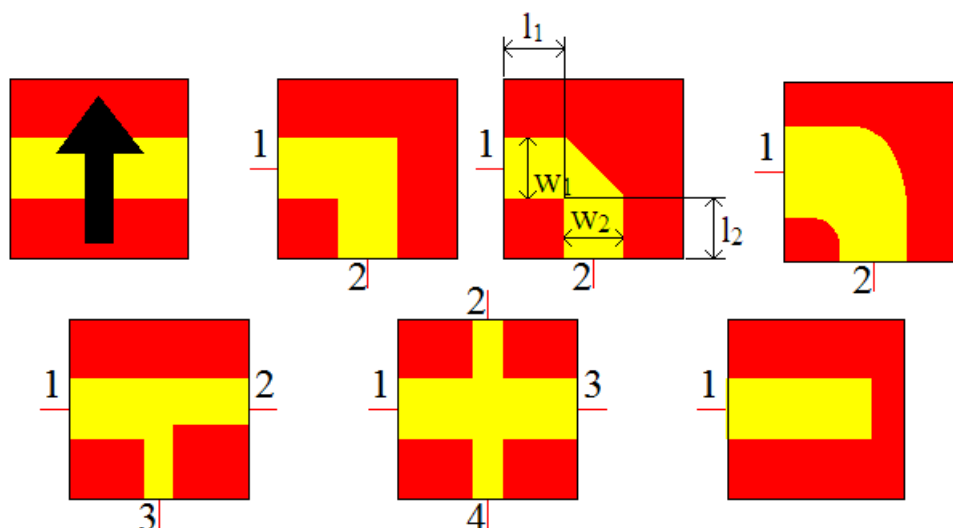
Úsek:	l [mm]:	Z [Ω]:	w(makro) [mm]:	w(rovnice) [mm]:
0	--	50	1,70805	1,728698
1	$\lambda/4$	69,64	0,9132	0,97354
2	$\lambda/4$	55,78	1,3953	1,445718
3	$\lambda/2$	41,70	2,235	2,283491
4	$\lambda/4$	77,81	0,7195	0,781325
5	$\lambda/2$	69,97	0,904	0,964793
6	$\langle \lambda/4; \lambda/2 \rangle$	86,03	0,566	0,629732
7	$\lambda/4$	49,95	1,683	1,731459
8	$\langle \lambda/4; \lambda/2 \rangle$	91,96	0,4763	0,540251

Z tabulky je vidět, že mezi výpočtem v makru a výpočtem ze vzorce je malý rozdíl, který dělá průměru přibližně půl desetiny milimetru. To mohlo být způsobeno použitím vzorců se zanedbáním tloušťky pásku.

3.3 Návrh a optimalizace v Design Studiu

Program CST Design Studio je blokově orientovaný návrhový systém pro simulaci na systémové úrovni. V této části ho budeme používat pro návrh děliče a jeho základní optimalizaci. Velkou výhodou je možnost vygenerování 3D modelu a převedení do Microwave Studia.

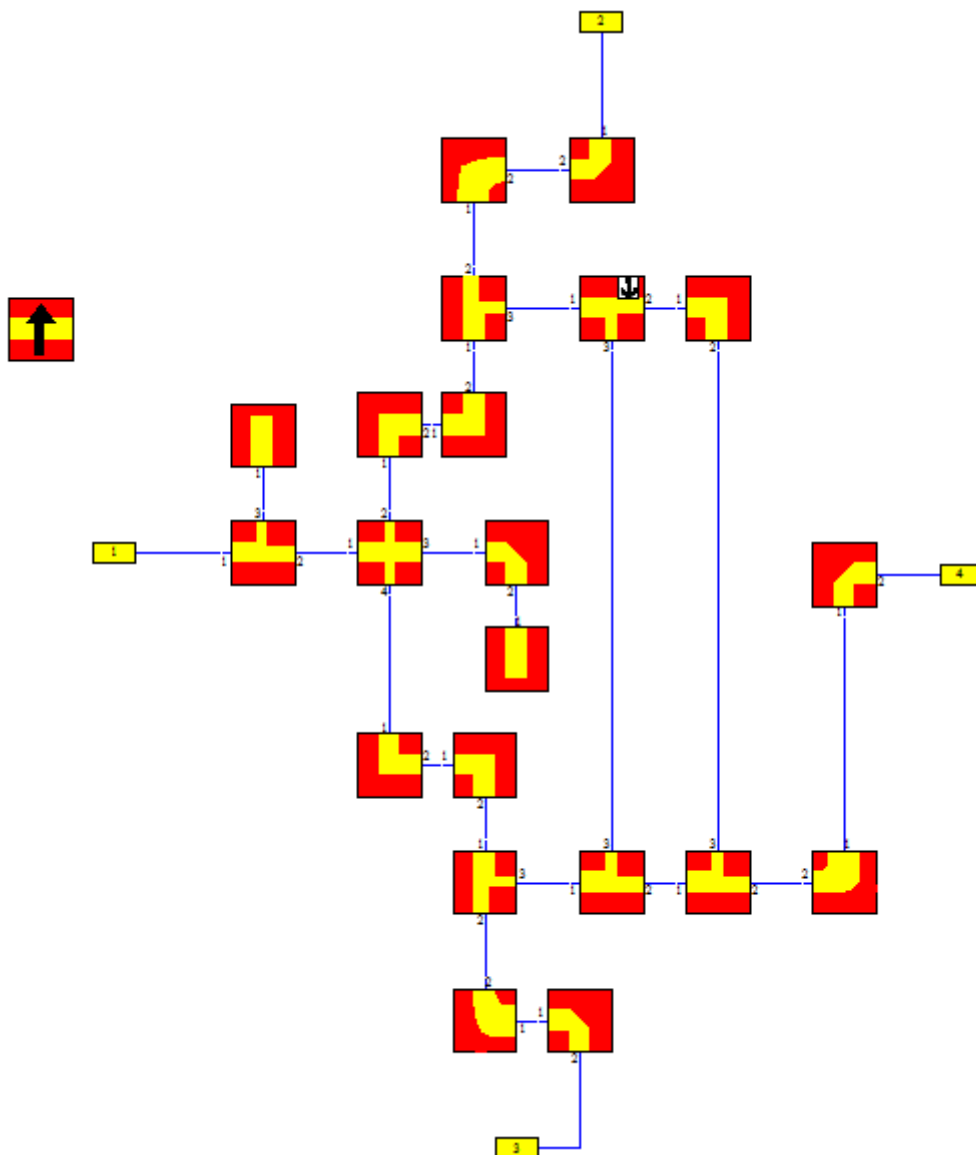
3.3.1 Sestavení děliče



Obrázek 27 - Použité bloky v CST Design Studiu

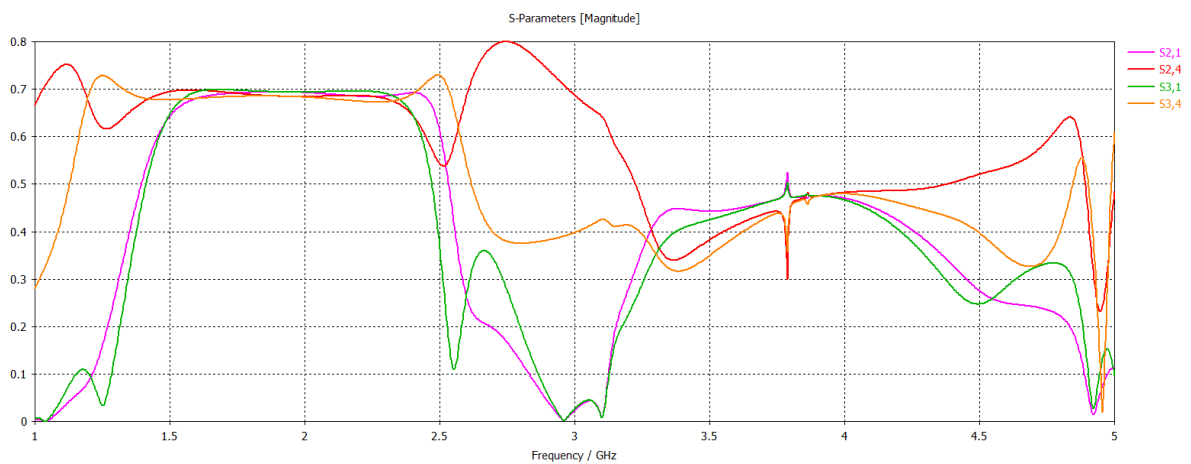
Celý obvod je zkonstruován pomocí mikropáskových bloků, základem je referenční blok, obrázek 27 vlevo nahoře, který nese informaci parametrech substrátu. Jednotlivé části se potom skládají taktéž z bloků, které se mezi sebou propojují pomocí bran a simulují mikropáskové vedení daného tvaru, vstupy a výstupy celého obvodu jsou zakončené porty. V každém bloku se pak nastaví parametry, jako jsou šířky a délky jednotlivých portů, ty se můžou zadat jako číslo nebo i ve formě globálních parametrů.

Při zadávání délky je potřeba dát si pozor na správnou hodnotu, například při skoseném rohu se délka ramene měří v ose do osy druhého ramene, ale v CST Design Studiu se měří jen k začátku druhého ramene, jak je to naznačeno na obrázku obr.27 nahoře druhý zprava. Z toho vyplývá, že s tím musíme počítat při zadávání jednotlivých délek a zadávanou hodnotu zkrátit o polovinu šířky druhého ramene. Analogicky se budou zadávat i délky u zbylých bloků. Celkový sestavený obvod pomocí bloků je na obrázku 28.



Obrázek 28 - Blokové schéma širokopásmového děliče

Výsledek první simulace v Design Studiu je na obrázku 29, kde jsou zobrazeny s-parametry s portem 1 a 4 jako vstupy a porty 2 a 3 jako výstupy. Zde je vidět že dělič není na laděný na 3GHz. Pro přeladění byla jako nejvhodnější parametr zvolena lambda.



Obrázek 29 - S-parametry nenaladěný 0°/180° širokopásmový dělič

3.3.2 Optimalizace

Optimalizace se provádí pomocí funkce Optimizer, obrázek 30, kde zvolíme požadované parametry, které chceme měnit, dále se musí vytvořit podmínka podle, které se bude zjišťovat nejvhodnější nastavení parametrů. Na obrázku 31 je vidět graf vybraných s-parametrů po první optimalizaci.

Optimizer

Simulation type: Frequency Domain Solver Acceleration...

Settings Goals Info

Algorithm: Trust Region Framework Properties... 1D Storage Properties...

Algorithm settings

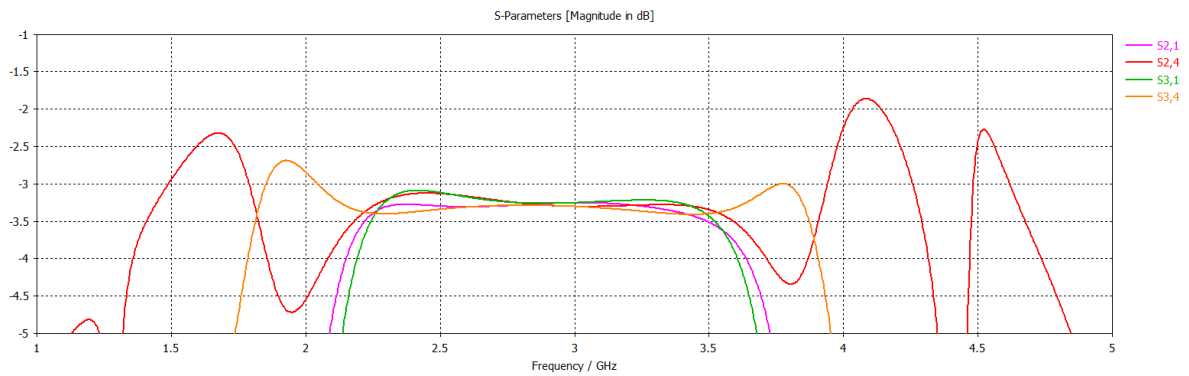
Reset min/max 3 % of initial value

Use current as initial value Use data of previous calculations

	Parameter /	Min	Max	Initial	Current	Best
<input type="checkbox"/>	h	0.6858	0.8382	0.762	0.762	0.762
<input type="checkbox"/>	k	5.526	6.754	6.14	6.14	6.14
<input checked="" type="checkbox"/>	L01	15.446	18.879	17.280643952371	17.280643952371	17.281
<input checked="" type="checkbox"/>	L6	23.454	28.666	26.548150847094	26.548150847094	26.548
<input checked="" type="checkbox"/>	L8	24.088	29.44	28.330716842335	28.330716842335	28.331
<input checked="" type="checkbox"/>	L11	8.202	10.025	8.9149801896263	8.9149801896263	8.915
<input checked="" type="checkbox"/>	L12	14.245	17.411	16.095174259655	16.095174259655	16.095
<input checked="" type="checkbox"/>	lamda	63.016	66.914	64.835049863096	64.835049863096	64.835

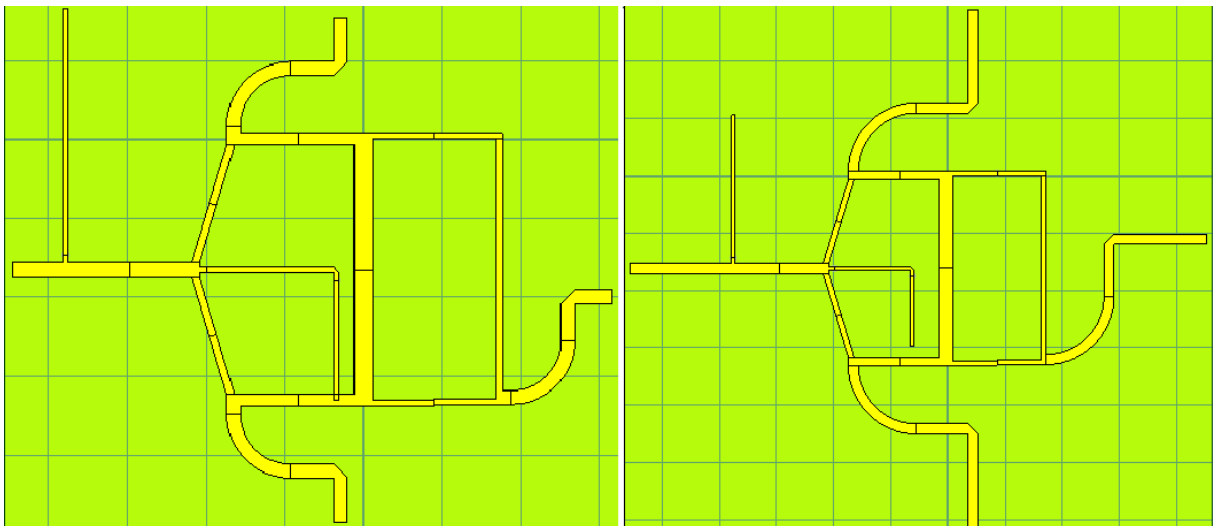
Start OK Apply Close Help

Obrázek 30 - Ukázka prostředí Optimalizéru

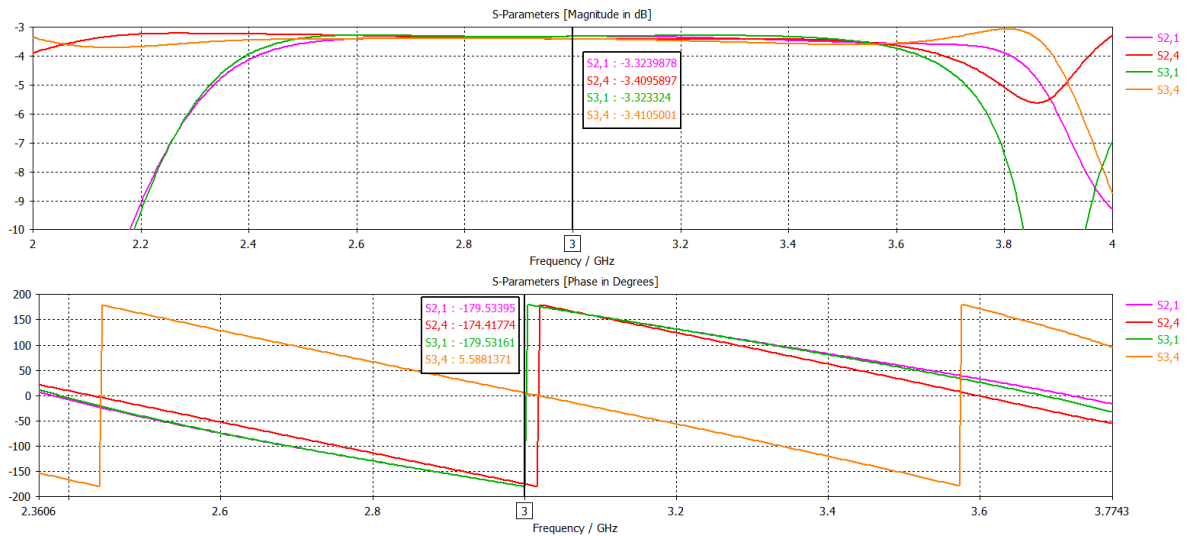


Obrázek 31 - S-Parametry děliče, první optimalizace

Po optimalizaci vznikl problém překrývání úseku 6 s úsekem 2, obrázek 32 vlevo, úsek 6 se tedy musí zkrátit. Provedeme druhou optimalizaci, kde budou měněny parametry λ , L6, což je délka úseku 6, L8, délka úseku 8.



Obrázek 32 - Layout děliče, vlevo s chybou, vpravo opravený



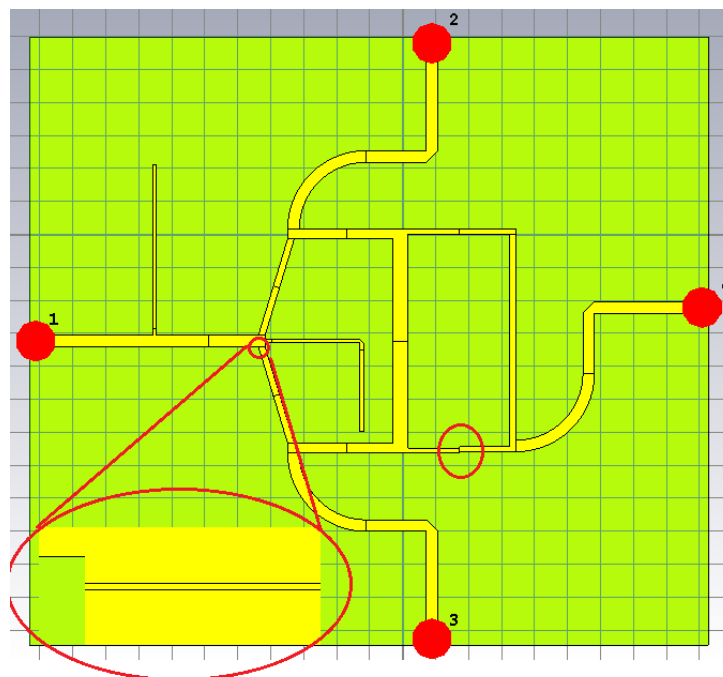
Obrázek 33 - S-parametry a fáze mezi vybranými bránami děliče

3.4 Převedení a optimalizace v Microwave Studiu

CST Microwave Studio je software pro návrh vysoko frekvenčních zařízení a jejich elektromagnetickou analýzu. Velkou výhodou je přístup k úplné technologii, která umožňuje výběr simulátoru nebo typu mřížky. Výběr těchto výpočetních technik závisí na navržené zařízení, neexistuje univerzální řešení pro všechny aplikace, proto Microwave Studio v sobě obsahuje několik různých simulačních technik, Time Domain solvers, Frequency Domain Solvers, Integral Equation Solver, Multilayer Solver, Asymptotic solver, a Eigenmode Solver.

3.4.1 Převedení do Microwave Studia

Pro vytvoření modelu v Microwave Studiu bylo použito funkce převodu modelu z Design Studia, díky tomu byl vytvořen grafický model v MWS podle zadaných a optimalizovaných parametrů z Design Studia. Po převodu je potřeba opravit drobné chyby v geometrii, které v Design Studiu nezpůsobovali problém, ale v Microwave Studiu by mohli vést k nechtěným odrazům nebo útlumům. Nepřesné napojení geometrie, které jsou potřeba odstranit, jsou zobrazeny na obrázku 34.

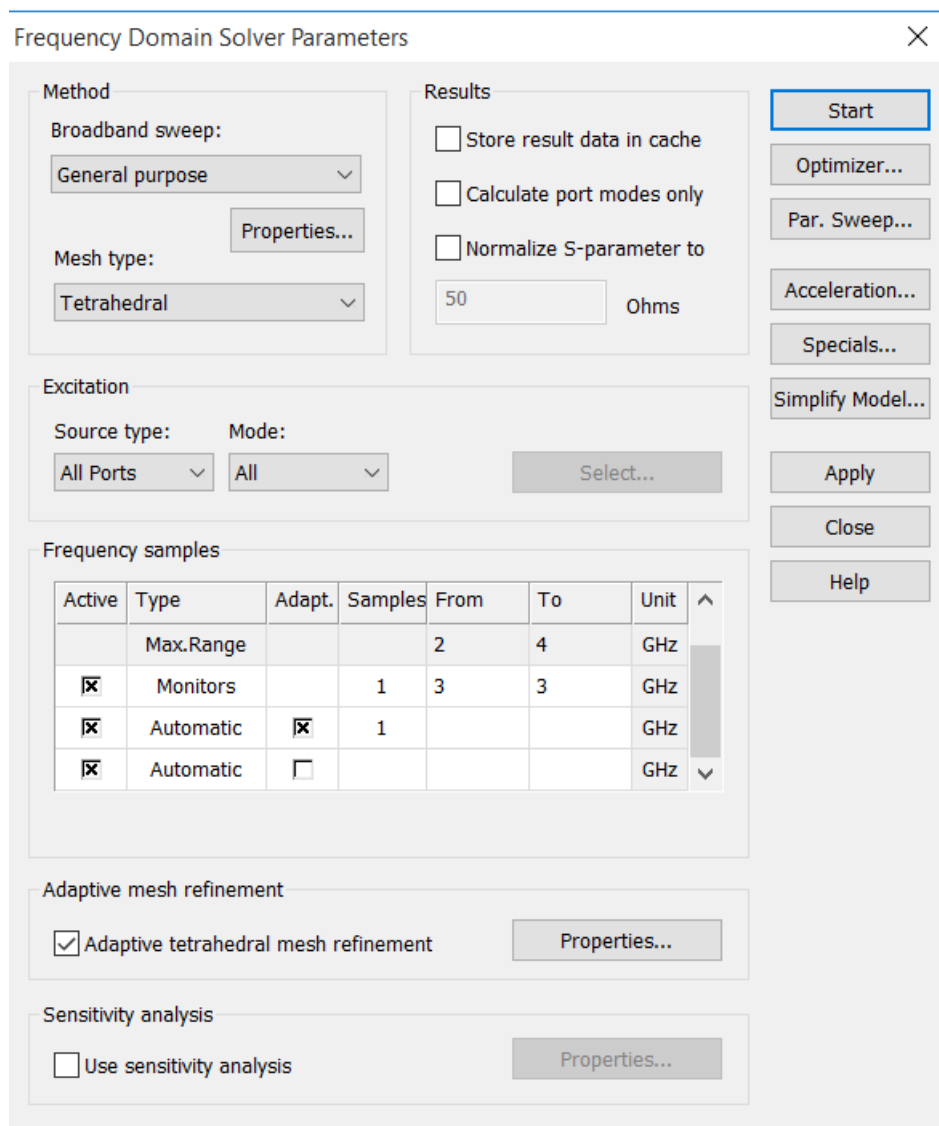


Obrázek 34 - Dělič v Microwave Studiu s výraznými chybami

3.4.2 Simulace pomocí Frequency Solver

Pro výpočet S-parametrů byl vybrán simulátor Frequency Domain Solver, který je nejvhodnější pro elektricky malé aplikace nebo aplikace s vysokým Q. Krom S-parametrů vypočítává elektromagnetické pole uvnitř i vně zařízení. Velkou výhodou Frekvenčního řešitele v Microwave Studiu je možnost přepnutí z kartézského a tetrahedrál ní mřížkování, to upravuje úsekové znázornění zakřivených ploch na skutečnou povrchovou mřížku a tím zvyšuje rychlost a přesnost výpočtů.

Na obrázku 35 je ukázka prostředí nastavení frekvenčního řešitele, pole Method umožňuje zvolit si typ mřížkování a techniku generování výsledků. V bloku Excitation si můžeme vybrat, které porty chceme, aby byly buzeny, v našem případě chceme buzení všech portů, abychom dostali kompletní matici s-parametrů. V bloku Adaptive mesh refinement, lze zapnout adaptivní tetrahedrál ní mřížkování a nastavit jeho parametry.

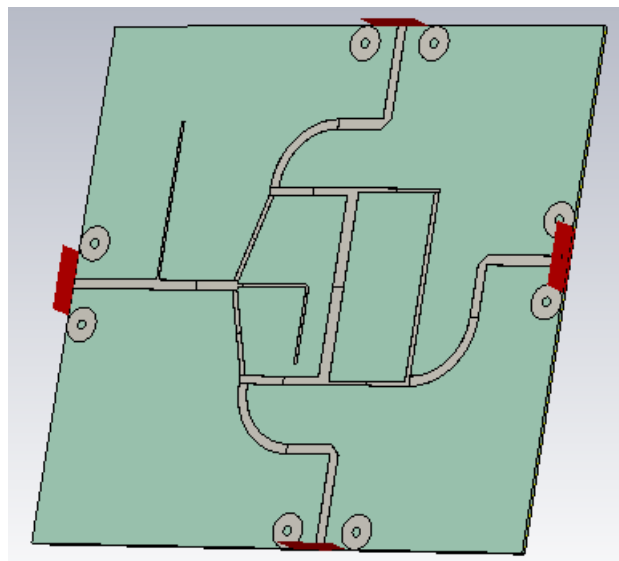


Obrázek 35 - Prostředí nastavení frekvenčního řešitele

3.4.3 Optimalizace

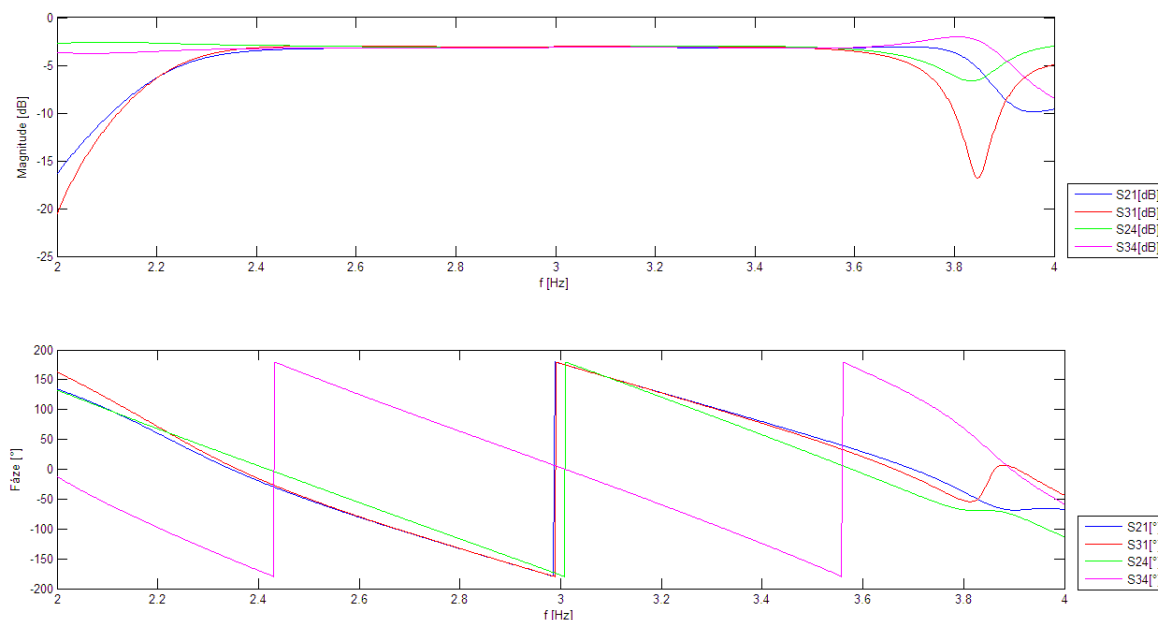
Optimalizace se nastavuje obdobně jako u Design Studia, chceme docílit toho, aby dělič fungoval v co nejširším pásmu, dle teorie kolem 40 % a aby fáze výstupních bran při buzení první branou byla stejná a při buzení branou 4 musejí mít výstupy fázový rozdíl 180°.

Po nastavení těchto požadavků a dokončení optimalizace vyšel jako nejlepší model vyobrazený na obrázku 36.



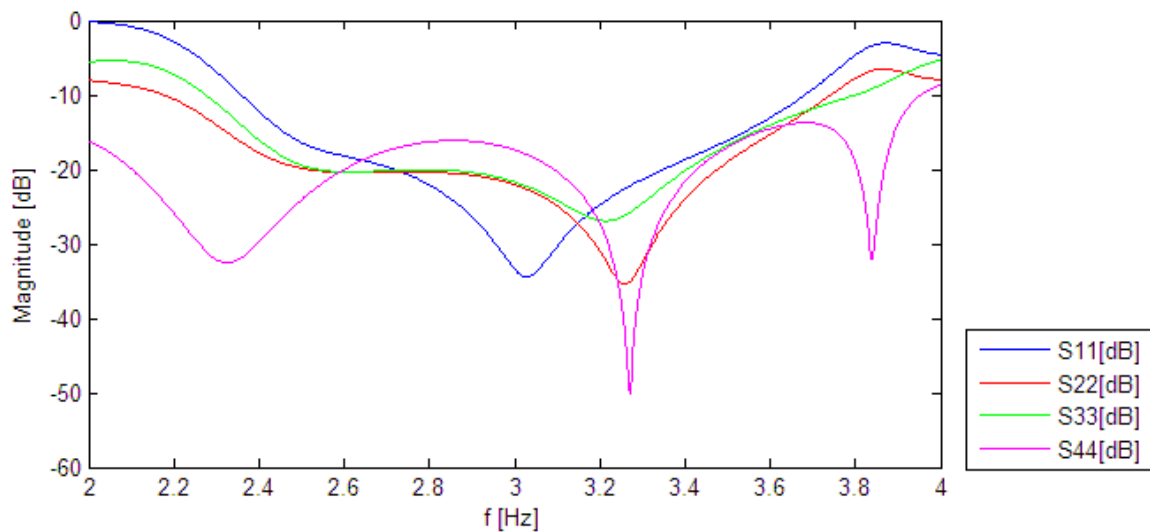
Obrázek 36 - 3D zobrazení děliče v CST Microwave Studiu

Na obrázku 37 nahoře jsou S-parametry S21, S31, S24 a S34 po finální optimalizaci, nejužší pásmo má port 3 při buzení portem 1. Dělič má dobré vlastnosti od frekvence 2296 MHz do 3658MHz poté se jeho útlum začíná zvyšovat. Na středním kmitočtu má největší odchylku na portech necelých 0,14 dB od útlumu 3 dB. V dolní části obrázku je graf fází na výstupních branách při buzení portem 1 a portem 4. Fázový rozdíl při buzení první branou je menší jak 3° a při buzení branou 4 měl být rozdíl fází 180° , navržený obvod má rozdíl o $3,6^\circ$ větší.



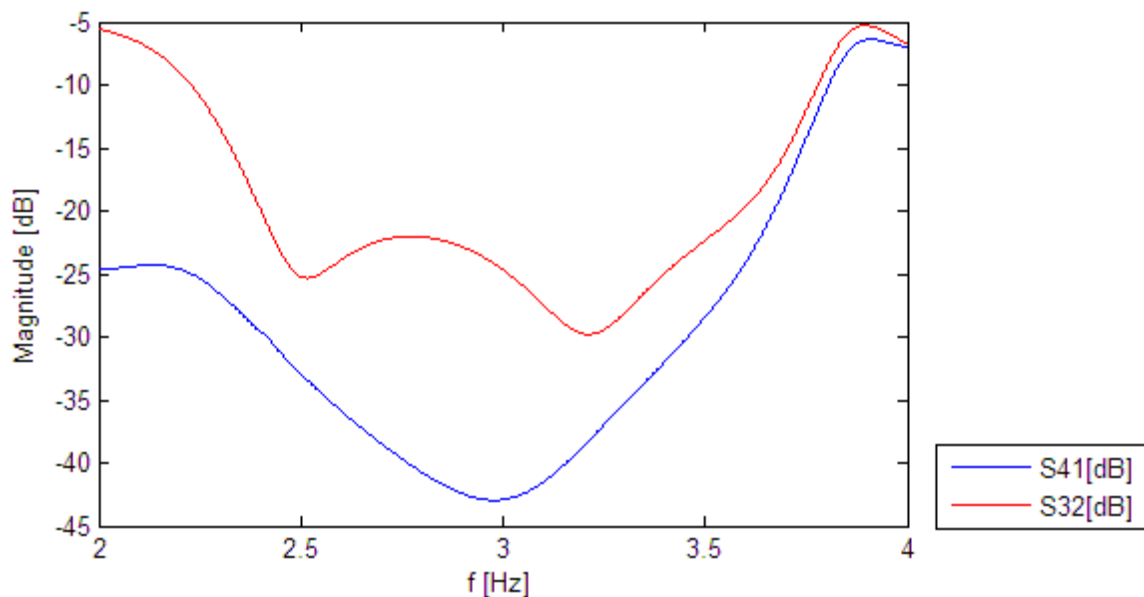
Obrázek 37 - Graf s-parametrů a fází mezi vstupy a výstupy

Na obrázku 38 jsou znázorněny průběhy s-parametrů odrazů, dobrý dělič by měl mít ty to odrazy pod hranicí -14 dB v šířce svého pásma. Nejužší pásmo má průběh S11, jeho pásmo je od 2438 MHz do 3572 MHz, relativní šířka pásma je pak 37,7 %.



Obrázek 38 – S-parametry útlumu odrazů jednotlivých bran

Obrázek 39 obsahuje průběhy s-parametru izolací mezi dvojicemi bran 1-4 a 2-3. Zde je vidět, že mezi Bránami 1 a 4 je dostatečně velká izolace, mezi bránami 2 a 3 je izolace menší, ale pořád v pásmu od 2402 MHz do 3588 MHz, je dostačující. Relativní šířka pásma izolací je 39,6 %.



Obrázek 39 – S-parametry izolací širokopásmového děliče

V tabulkách níže jsou uvedeny s-parametry a tabulka fází návrhu děliče na dolní frekvenci šířky pásma, 2438 MHz, střední frekvenci, 3 GHz a horní frekvenci, 3588 MHz.

Tabulka 3 - S-parametry návrhu děliče na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče

F _L – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-14,0696	-3,36135	-3,06222	-30,8006
2	-3,36142	-18,7855	-22,525	-2,92334
3	-3,06247	-22,5261	-17,6064	-3,23324
4	-30,8178	-2,92346	-3,23345	-27,5073

Tabulka 4 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče

F _L – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-32,2707	-29,3138	-2,95691
SX4	-5,99209	177,5957	-183,588

Tabulka 5 - S-parametry návrhu děliče na frekvenci 3 GHz

3GHz– S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-33,4074	-3,05716	-3,03905	-42,8942
2	-3,05736	-22,0341	-24,6281	-3,1307
3	-3,03918	-24,627	-21,6786	-3,1335
4	-42,911	-3,13039	-3,13321	-17,3762

Tabulka 6 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na frekvenci 3 GHz

3,0GHz – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	177,0013	177,1214	-0,12005
Sx4	-177,444	2,687409	-180,131

Tabulka 7 - S-parametry návrhu děliče na horní frekvenci pracovní šířky pásma děliče

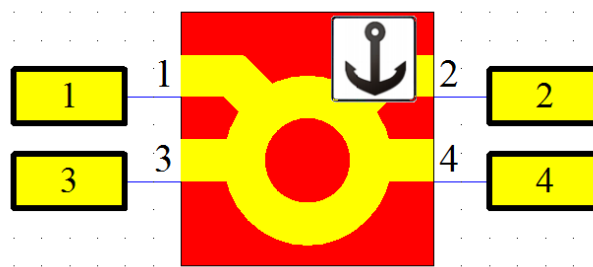
F _H – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-14,0089	-3,17846	-3,40134	-25,4125
2	-3,18102	-16,3099	-20,5301	-3,25265
3	-3,40317	-20,5332	-14,7688	-3,17648
4	-25,4144	-3,25306	-3,17659	-15,0804

F _H – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	36,41539	29,32718	7,088207
SX4	1,901574	175,1379	-173,236

4 Simulace děliče typu Rat-race

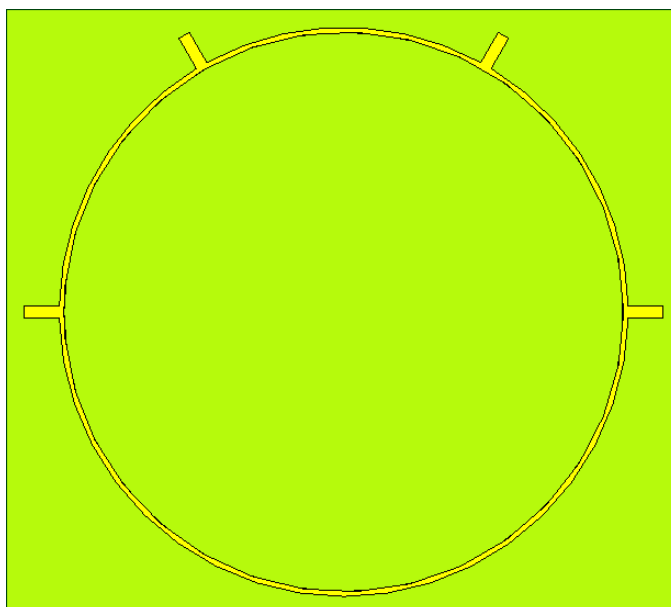
4.1 Návrh děliče Rat-race

Pro návrh děliče byl vybrán program CST Design Studio, kde byl navržen na stejném substrátu jako širokopásmový 0°/180°dělič. Taktéž byl vytvořen pomocí mikropáskové technologie a tloušťka vodivých pásů byla také zachována.



Obrázek 40 - Blokové schéma Rat-race

Design Studio má ve své knihovně blok děliče Rat-race, obrázek 40, k němu poté stačí jen připojit porty. Obvod má být laděný na 3GHz, takže délky a impedance jednotlivých úseků se dají jednoduše spočítat, viz. kapitola 2.7.

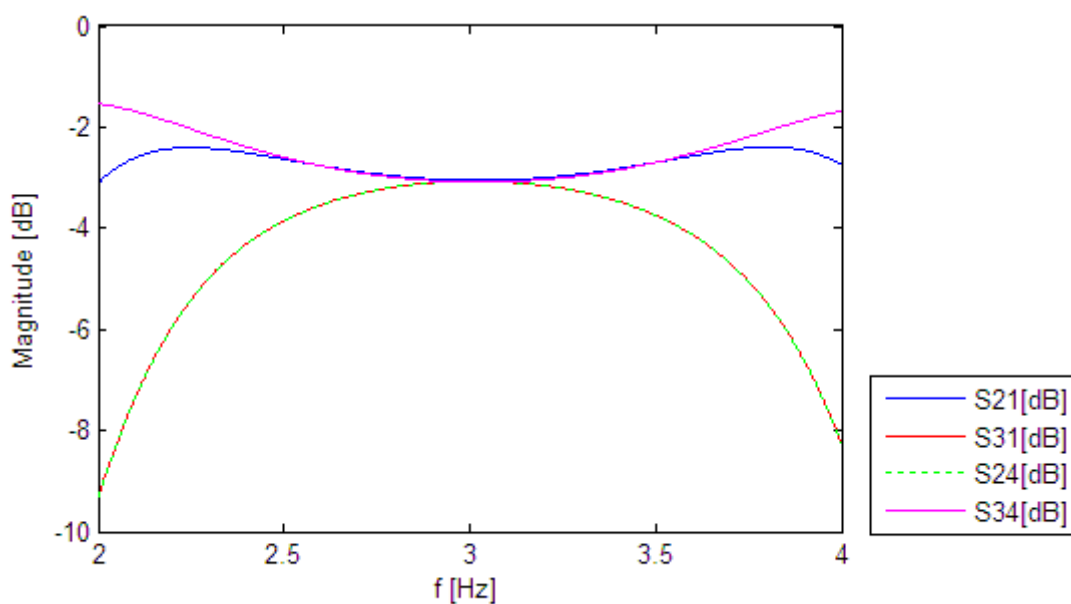


Obrázek 41 - Layout Rat-race

4.2 Zhodnocení děliče Rat-race

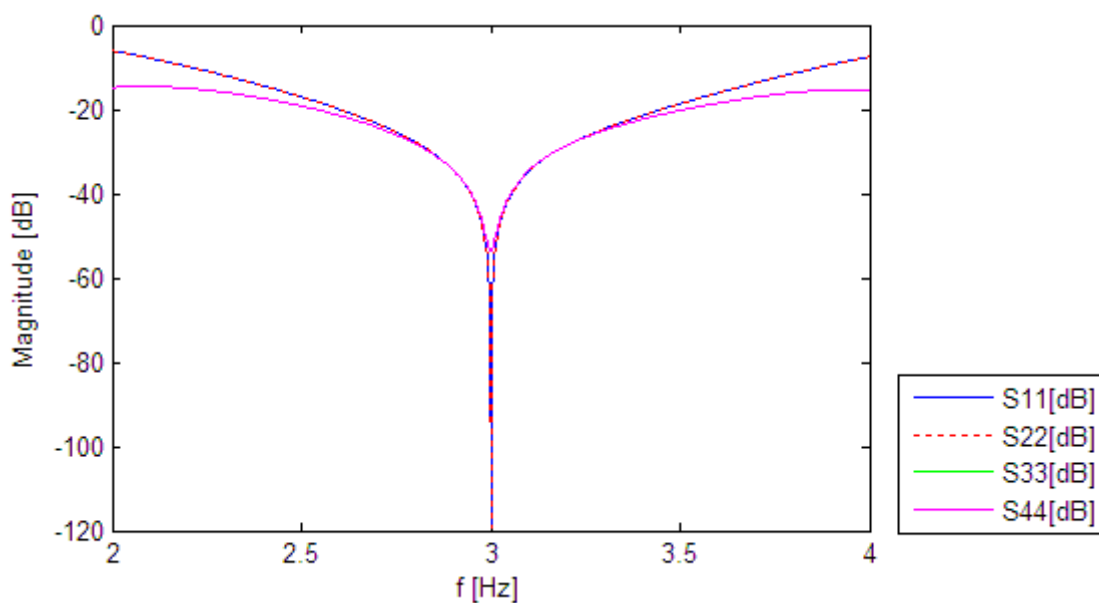
Po optimalizaci děliče v Design Studiu byly vyexportována data a následně zpracována ve výpočetním programu Matlab. Pomocí něhož byli vygenerovány grafy důležitých s-parametrů.

Na obrázku 41 jsou vykresleny s-parametry S21, S31, S24 a S34. Zatím co S21 a S34 dosahují velké šířky pásma, S31 a S24 mají pásmo užší, to přibližně od 2466 do 3.570 MHz, tedy relativní šířka pásma je 36,6 %.



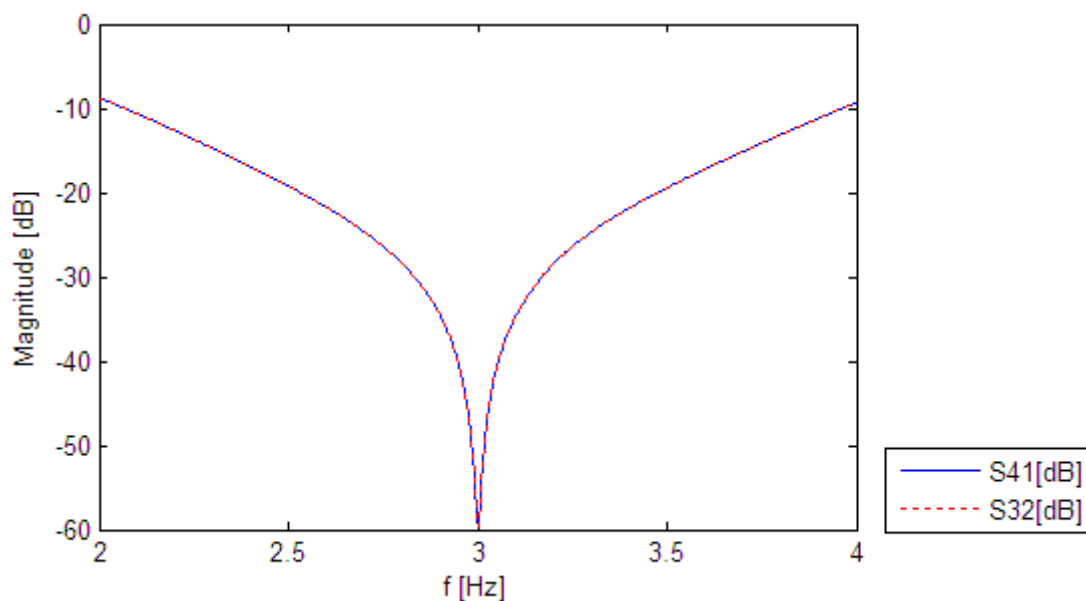
Obrázek 42 - S-parametry mezi vstupními a výstupní bránami Rat-race

Na obrázku 42 jsou vykresleny útlumy odrazů jednotlivých bran, je zde vidět symetrie obvodu, S11 a S22 jsou stejné a S33 je stejný jako S44. Relativní šířka pásma S44 je 43 %, 1304MHz.



Obrázek 43 - S-parametry útlumů odrazů Rat-race

Izolace mezi bránami 1-4 a mezi bránami 2-3, obrázek 43, by měla být lepší jak 20 dB. Ve středním kmitočtu dosahuje dokonce až 60 dB, ale prudce roste a šířka pásma je omezená na 942 MHz, tedy přibližně na 31,3 %.



Obrázek 44 - S-parametry izolací Rat-race

V tabulkách níže jsou uvedeny s-parametry a tabulka fází návrhu děliče na dolní frekvenci šířky pásma, 2534 MHz, střední frekvenci, 3 GHz a horní frekvenci, 3476 MHz.

Tabulka 8 – S-parametry děliče Rat-race v dolní frekvenci šíře pásma

F _L – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-17,9785	-2,6763	-3,73625	-20,0161
2	-2,6763	-17,9785	-20,0161	-3,73625
3	-3,73625	-20,0161	-19,8905	-2,65422
4	-20,0161	-3,73625	-2,65422	-19,8905

Tabulka 9 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na dolní frekvenci pracovní šířky pásma děliče Rat-race

F _L – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-79,462	-70,7686	-8,69343
SX4	-70,7686	119,0629	-189,831

Tabulka 10– S-parametry děliče Rat-race na frekvenci 3 GHz

3GHz– S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-119,362	-3,05067	-3,06852	-59,6751
2	-3,05067	-119,362	-59,6751	-3,06852
3	-3,06852	-59,6751	-53,7099	-3,08633
4	-59,6751	-3,06852	-3,08633	-53,7099

Tabulka 11- Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na frekvenci 3 GHz

3,0GHz – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-103,61	-103,596	-0,01384
Sx4	-103,596	76,42974	-180,025

Tabulka 12 – S-parametry děliče Rat-race v horní frekvenci širší pásma

F _H – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-19,3517	-2,72978	-3,66189	-20,0028
2	-2,72978	-19,3517	-20,0028	-3,66189
3	-3,66189	-20,0028	-20,7547	-2,73798
4	-20,0028	-3,66189	-2,73798	-20,7547

Tabulka 13 - Fáze mezi porty 2 a 3 při buzení první a 4 branou na horní frekvenci pracovní šíře pásma děliče Rat-race

F _H – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-127,607	-136,719	9,11174
SX4	-136,719	32,968	-169,686

5 Měření

5.1 Kalibrace vektorového analyzátoru

Pro měření bylo použito vektorového analyzátoru ROHDE & SCHWARZ ZVL s frekvenčním rozsahem od 9 kHz do 13,6 GHz, obrázek 45. Před vlastním měřením je potřeba analyzátor nastavit na požadovaný frekvenční rozsah, v našem případě od 2 do 4 GHz, a zkalibrovat pomocí kalibrační sady ZV-Z135, obrázek 46.



Obrázek 45 – Vektorový analyzátor ROHDE & SCHWARZ ZVL



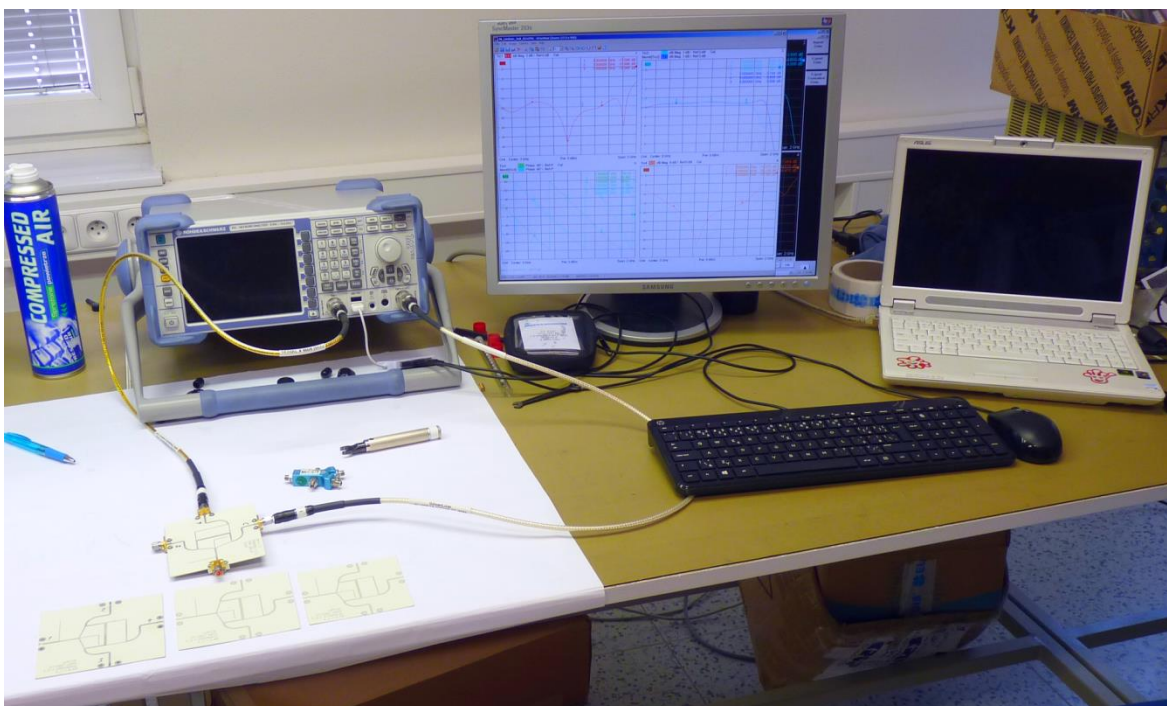
Obrázek 46 - Kalibrační sada ZV-Z135

Pomocí tohoto přípravku zkalibrujeme nejdříve jeden port analyzátoru, kalibrační prvek simuluje zakončení nakrátko, naprázdno a zakončení přizpůsobenou zátěží. Přitom bude druhý zakončen zátěží o velikosti charakteristické impedancí vedení, 50Ω . Poté vyměníme porty a provedeme to samé pro druhý port. Nakonec oba port spojíme přes „Through“

porty na kalibrační sadě. Tímto způsobem eliminujeme vložený útlum přívodních kabelů a spojovacích konektorů a také zjistíme nulový fázový posuv na konektorech analyzátoru.

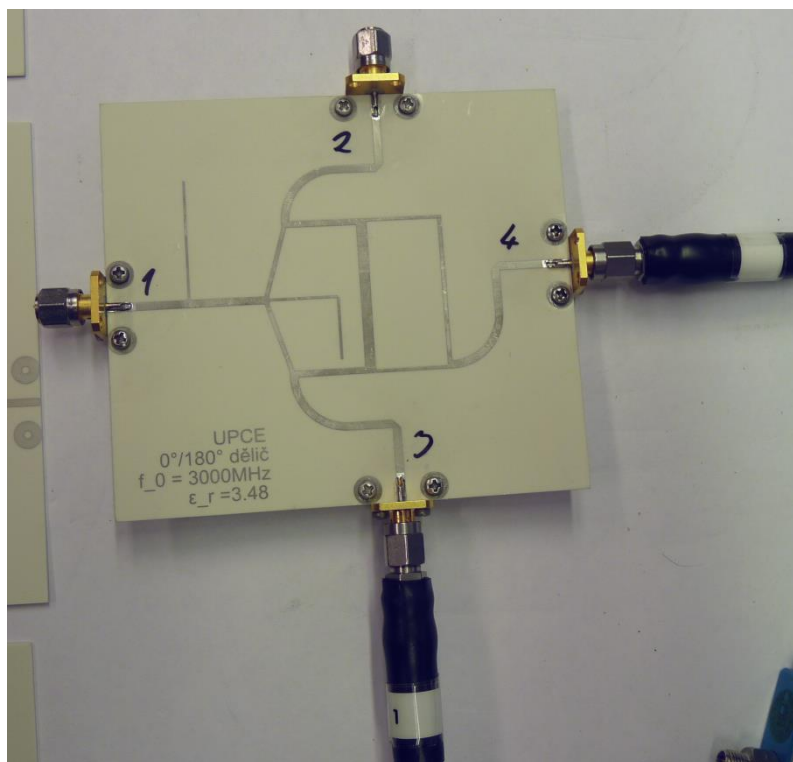
5.2 Laboratorní měření děliče

Realizovaný širokopásmový dělič je čtyřbran, tedy vektorový analyzátor připojíme ke dvěma portům a zbývající dva porty vždy zakončíme přizpůsobenou zátěží. Pro připojení kabelů byli k děliči přidělány SMA konektory, které jsou k desce přichyceny pomocí hliníkové kostičky.



Obrázek 47 - Měřící pracoviště

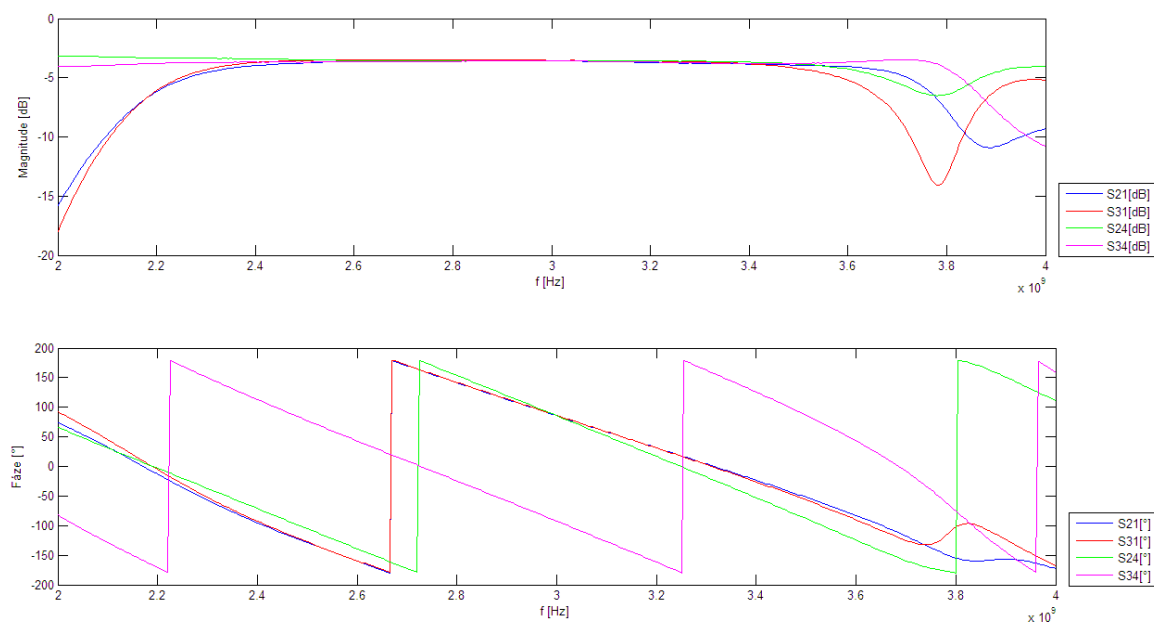
Pro změření všech s-parametrů je potřeba změřit všechny kombinace připojení vektorového analyzátoru k portům děliče. Měřící pracoviště je vyobrazeno na obrázku.47, měřený dělič je pak na obrázku 48, zde je vidět připojení děliče k vektorovému analyzátoru přes porty 3 a 4 a porty 1 a 2 zakončené přizpůsobenou zátěží.



Obrázek 48 - Provedení 0°/180° širokopásmového děliče

5.3 Naměřená data

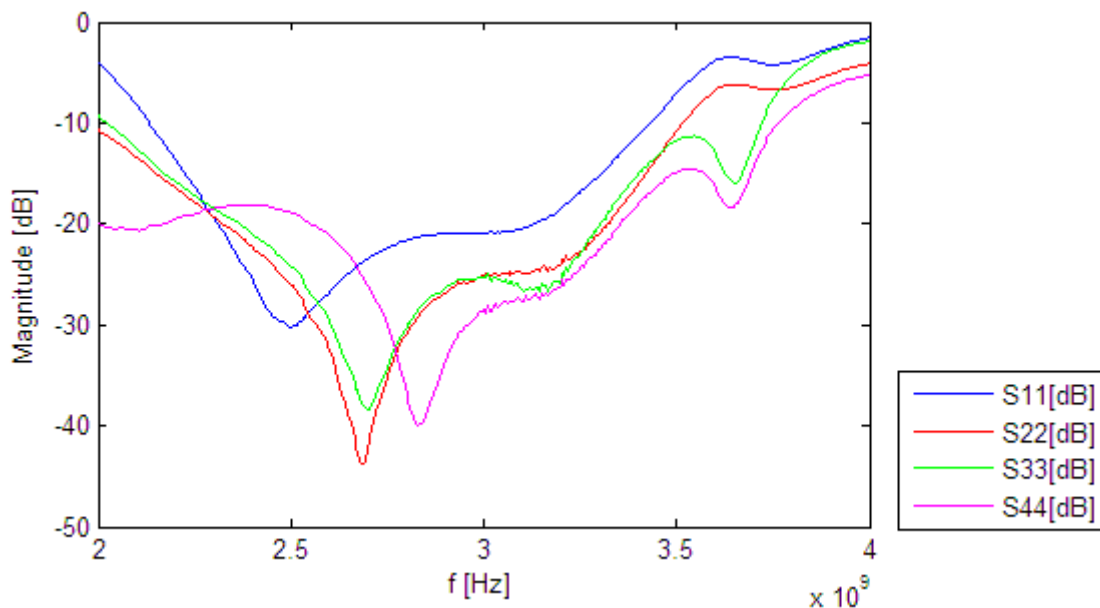
Pomocí vektorového analyzátoru byla získána data, do souboru s2p, obsahující jednotlivé s-parametry a jejich fáze. Pro zpracování dat byl použit výpočetní program Matlab, do kterého byly načteny jednotlivé soubory z měření a poté vytvořeny grafy.



Obrázek 49 - Naměřené S-parametry a fáze

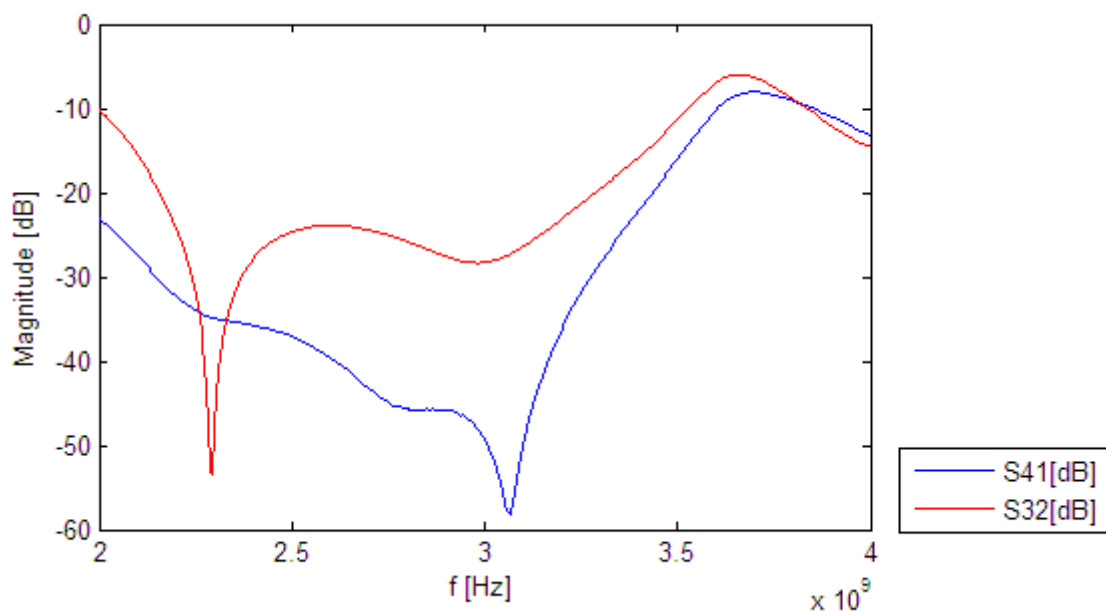
Na obrázku 49 nahoře jsou zobrazeny s-parametry v decibelech mezi vstupními a výstupními porty, tedy S21, S31, S24 a S34. Nejmenší šířku pásma má brána 3 při buzení první branou, je šířka je od 1115 MHz, to je přibližně 38,5 %. V dolní části obrázku jsou vyobrazeny v grafu fáze těchto parametrů.

Na dalším obrázku 50 jsou v grafu vykresleny s-parametry odrazů jednotlivých bran, tedy S11, S22, S33 a S44. Nejužší pásmo má port S11, šířka pásma je od 1090 MHz, tedy relativní šířka pásma je 40,4%



Obrázek 50 - Naměřené s-parametry útlumu odrazů bran

Na obrázku 51 je vyobrazen graf s s-parametry ukazující izolaci mezi vstupními branami, S41, a izolaci mezi výstupními branami, S32. Izolace mezi vstupními bránami je velká a drží pod -20 dB ve velké šířce pásma. Izolace mezi výstupními bránami má horší parametry a šířka pásma rozsah je 1116 MHz, relativní šířka pásma je 41,3 %.



Obrázek 51 - Naměřené S-parametry izolací

V tabulkách níže jsou uvedeny s-parametry a tabulka fází návrhu děliče na dolní frekvenci šířky pásma, 2340 MHz, střední frekvenci, 3 GHz a horní frekvenci, 3455 MHz.

Tabulka 14 – S-parametry v dolní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče

F _L – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-21,7223	-4,2580	-3,9902	-35,2737
2	-4,2570	-20,3935	-33,4110	-3,3627
3	-3,9729	-33,4230	-19,4134	-3,6782
4	-35,2869	-3,3709	-3,6944	-18,2112

Tabulka 15 – Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na dolní frekvenci šíře pásma vyrobeného děliče

F _L – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-72,9738	-69,2205	-3,75333
SX4	-50,7968	134,9429	-185,74

Tabulka 16 – S-parametry na frekvenci 3 GHz vyrobeného děliče

3,0 GHz– S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-20,8421	-3,5909	-3,5414	-49,1147
2	-3,6034	-25,0534	-28,2849	-3,5777
3	-3,5515	-28,2945	-25,2855	-3,6121
4	-49,3740	-3,5725	-3,5938	-28,5648

Tabulka 17 – Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na frekvenci 3 GHz vyrobeného děliče

3,0 GHz – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	85,77219	86,2583	-0,48611
Sx4	85,59332	-92,5273	178,1206

Tabulka 18 – S-parametry v horní frekvenci širší pásma vyrobeného děliče

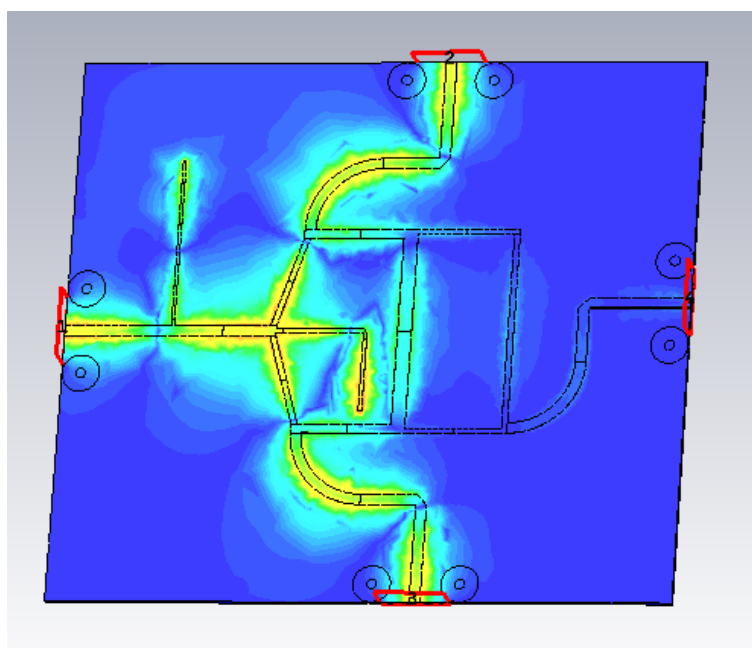
F _H – S-parametry				
S	1	2	3	4
1	-13,9230	-3,7888	-3,8482	-30,3894
2	-3,7716	-17,9442	-20,5537	-3,6888
3	-3,8355	-20,6131	-19,2408	-3,7750
4	-30,3233	-3,7496	-3,8232	-20,1165

Tabulka 19 - Fáze mezi porty 2 a 3, při buzení branou 1 a 4, na horní frekvenci širší pásma vyrobeného děliče

F _H – Fáze			
	S2x	S3x	rozdíl
Sx1	-41,0713	-45,5345	4,4632
SX4	-80,7497	95,5343	-176,284

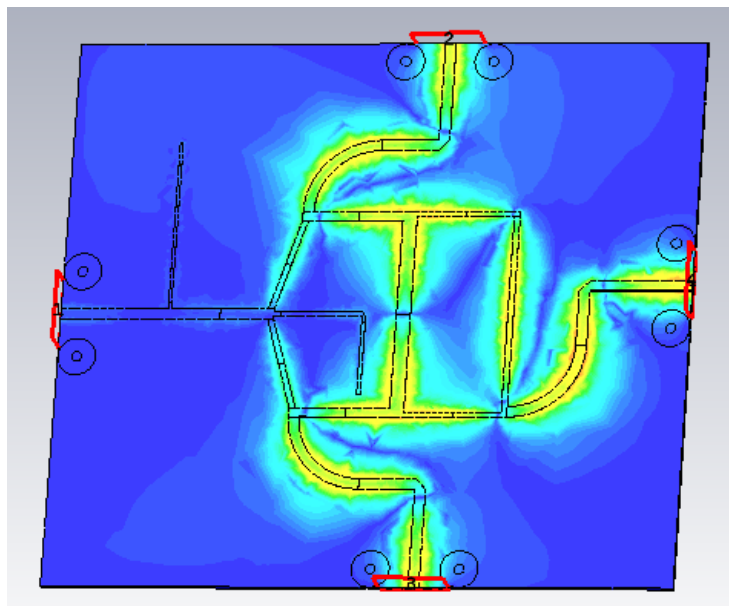
5.4 Zhodnocení

Širokopásmový dělič po návrhu fungoval dle očekávání. N obrázku 52 je dělič buzený do brány jedna. Je zde vyobrazená elektrická vlna, která se stejnou fází dostává na výstupy bran 2 a 3. Do čtvrté brány proniká jen minimum výkonu.



Obrázek 52 - Simulace elektrického pole vstupujícího portem 1

Na obrázku 53 je zobrazeno buzení branou 4, do první brány se zase dostane jen minimum výkonu a výkon se rovnoměrně rozdělí mezi brány 2 a 3. Ty to výstupní signály mají mezi sebou fázový rozdíl 180°.



Obrázek 53 - Simulace elektrického pole vstupujícího portem 4

Po vyrobení a změření bylo zjištěno menší zvětšení rozdílů fází mezi branami 2 a 3 při buzení první branou, změřený rozdíl je $0,49^\circ$. Rozdíl se změnil i při buzení čtvrtou branou, ze 180° na $178,1^\circ$.

Teoretická šířka pásma byla mezi 40–45 % při simulaci bylo dosaženo maximální relativní šířky pásma 37,7 % daná parametrem S11, po vyrobení byla šířka pásma na S11 zvětšila na 40,4 %, za to klesla relativní šířka pásma u S31 a to ze 45,8 na 38,5 %.

Porovnáme-li zhotovený širokopásmový $0^\circ/180^\circ$ dělič s děličem typu Rat-race, navrženým v kapitole 3.5, zjistíme, že zadaný dělič má větší šíři pásma. Obvod Rat-race byl simulovaný pouze v Design Studiu, které zanedbává některé parametry a reálné zhotovení děliče Rat-race by mohlo dosahovat ještě horších parametrů, tedy i menší šíře pásma.

Závěr

První kapitola je věnována teorii o planárních obvodech, jsou zde popsány základní parametry dielektrických materiálů jako je relativní permitivita a ztrátový činitel. Dále je zde uvedeno několik dielektrických materiálů a výčet typů planárního vedení. Dvě nejčastěji používané, páskové a mikropáskové, vedení jsou zde podrobněji popsány a jsou k nim uvedeny vztahy pro výpočet charakteristické impedance a vztahy pro výpočet geometrie vedení. Zde je vidět, že páskové vedení dosahuje díky své konstrukci lepším parametrům, ale zároveň je kvůli ní náročnější na výrobu a tím i dražší.

Druhá kapitola je věnována děličům a směrovým odbočnicím, k jejich popisu se nejlépe hodí rozptylové parametry, se kterými se snadno počítá i na vyšších kmítočtech. Dále je zde popsáno, co je směrový vazební člen, to nejlépe popisuje věta o existenci ideální směrové odbočnici a popis druhů směrovosti.

Většina této kapitoly je pak věnována jednotlivým typům obvodů. Nejednoduším děličem je dělič typu T, z něho vychází Wilkinsonův dělič, který má zlepšenou izolaci díky odporu mezi výstupy. Však tento odpor nemůže být fyzicky velký a nezvládne tak velké výkony, proto celý dělič se nedá použít na vyšších výkonech. To řeší Gyselův dělič, v jeho konstrukci se sice nacházejí dva odpory, ale již nezávisí na jejich fyzické velikosti, tudíž zde mohou být umístěny i výkonové rezistory. Gyselův dělič sice snese větší výkony než Wilkinsonův, ale oproti němu má užší šířku pásma. Podobně jsou na tom i směrové odbočnice Branch line a Rat-race, jejich výkon nelimituje, žádný rezistor, jen samotná leptaná cesta, ale oba mají malou šíři pásma. Pro výkonové širokopásmové aplikace je tedy nejvhodnější $0^\circ/180^\circ$ dělič.

Třetí kapitola je věnována návrhu a simulaci tohoto děliče. Nejdříve bylo potřeba vybrat typ planárního vedení, kvůli jednoduchosti výroby a tím i ceny, byla vybrána mikropásková technologie. Poté bylo potřeba vybrat vhodný dielektrický materiál, jeho tloušťku a tloušťku pásků. Důležitým faktorem bylo, aby šířka pásku při požadované frekvenci byla dostatečná, nejen pro konektory, ale také kvůli možnostem výroby. Nakonec byl vybrán dielektrický materiál Rogers RO3450B. Dalším krokem, po vybrání dielektrického materiálu, je výpočet jednotlivých šířek pásků, ty to hodnoty byli počítány pomocí makra v CST MWS. Pro srovnání výpočtů byli provedeny i výpočty pomocí vztahů uvedených v první kapitole.

Ze známých rozměrů může vytvořit návrh, nejprve v CST Design Studiu, kde jednoduše pomocí bloků byl vytvořen obvod a provedena počáteční simulace a optimalizace. Následně byl dělič převeden do CST Microwave Studia, kde byla doladěna jeho geometrie a poté spuštěná finální optimalizace. Z výsledků simulace je vidět, že obvod při napájení portem 1, až na zanedbatelné odchylky, má na výstupních portech 2 a 3 fázové zpoždění 90° a mezi porty je nulový rozdíl fáze. Při napájení portem 4 je fáze na portu zpožděná o 90° , ale na portu 3 už o 270° , tedy rozdíl fází mezi výstupními porty je 180° . Návrh děliče, dle simulace, má relativní šířku pásma 37,7 %, to je sice méně než předpokládaných 40 %,

ale oproti Rat-race při jeho simulaci bylo dosaženo relativní šíře pásma 31,3 % je pásmo širší.

Pro výrobu desky děliče byla vybrána společnost PragoBoard, kde vyrobili dělič dle parametrů. Poté byla deska osazena SMA konektory a celý dělič byl změřen v laboratořích firmy ELDIS Pardubice s.r.o. Naměřené výsledky oproti simulovaným vykazují větší útlum, ale obvod i tak vykazuje dobré vlastnosti a šířka pásma celého děliče mírně vzrostla.

Tato diplomová práce slouží jako návod na návrh a sestavení širokopásmového děliče. Pro lepší ověření vlastností tohoto děliče by bylo dobré vyzkoušet jeho konstrukci na různých dielektrických materiálech a porovnat změny s-parametrů.

Literatura

- [1] KNOCHEL, R. a B. MAYER. Broadband printed circuit 0 degrees /180 degrees couplers and high power inphase power dividers. In: *IEEE International Digest on Microwave Symposium* [online]. IEEE, 1990, s. 471-474 [cit. 2017-08-25]. DOI: 10.1109/MWSYM.1990.99621. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/99621/>
- [2] BEZOUŠEK, P. *Materiály k přednáškám z předmětu Pokročilé analogové obvody*.
- [3] POZAR, David M. *Microwave engineering*. 4th ed. Hoboken, NJ: Wiley, c2012. ISBN 0470631554.
- [4] MAZÁNEK, Miloš, Pavel PECHAČ a Jan VRBA. *Základy antén, šíření vln a mikrovlnné techniky*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-03997-7.
- [5] HOFFMANN, Karel. *Planární mikrovlnné obvody*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02115-7.
- [6] Elektromagnetické vlny: Mikrovlnná technika. VUT Brno [online]. Brno: FEEC VUT Brno, 2010 [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [7] P-N Designs, Inc., „Microwaves101.com: A practical resource covering the fundamental principles of microwave design,“ 2017. [Online]. Available: <http://www.microwaves101.com>.
- [8] Frequency Domain Solver: CST MICROWAVE STUDIO. CST [online]. Darmstadt: CST Computer Simulation Technology, 2017 [cit. 2017-08-25]. Dostupné z: <https://www.cst.com/products/cstmws/solvers/frequencydomainsolver>
- [10] R&S ® ZVL Vector Network Analyzer: Operating Manual [online]. München. Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG: Rohde & Schwarz GmbH & Co., 2015 [cit. 2017-08-15]. Dostupné z: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zvl_1/ZVL_Operating_en_09.pdf
- [11] ŠINDLER, Marcel. *Mikrovlnný dělič výkonu pro vysoké výkony na frekvenci 18 GHz* [online]. Praha, 2015 [cit. 2017-08-25]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/61617/F3-DP-2015-Sindler-Marcel-DP_sindler.pdf. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

Přílohy

3.1 Tabulka a grafy závislosti mikropásků na rozměrech a materiálu

Soubor: tabulka_mikropásků.xlsx

Soubor v programu MS Excel obsahující různé závislosti, získané pomocí programu TXLine 2003, dielektrických materiálů. První tabulka a graf vyjadřují závislost, mezi impedancí a šířkou pásku u několika vybraných dielektrických materiálů. V další tabulce a grafu jsou šířky pásků v závislosti na tloušťce dielektrika. V poslední dvojici jsou hodnoty šířky pásku v závislosti na tloušťce pásku.

3.2 Výpočet šířky mikropásků

Soubor: výpočet_w.xlsx

Soubor v programu MS Excel, ve kterém jsou výpočty šířek mikropásků, pomocí rovnic v první kapitole, a jejich porovnání s hodnotama vypočtenýma pomocí makra v ST MWS studiu

3.3 Navržený dělič v programu CST DS a MWS

Soubor: verze_1_7_4_2.cst

Složka: verze_1_7_4_2

Projekt návrhu děliče v programu CST Design Studio a poté převedený model do Microwave Studia.

3.4.3 S-parametry a fáze širokopásmového děliče ze simulace v CST MWS

Soubor: CST_delic/DP_3GHz_data3.txt

CST_delic/DP_3GHz_data3.txt

Data s-parametrů a fáze širokopásmového děliče, získána ze simulace v programu CST Microwave studio.

3.4.3 Skript na vykreslení s-parametrů z hodnot ze simulace v CST MWS

Soubor: CST_delic/DP_CST.m

Skript, v programu Matlab, který zpracovává s-parametry a fázi širokopásmového děliče a generuje potřebné grafy. Dále slouží k výpočtu šířek pásma.

4.1 S-parametry a fáze děliče typu Rat-race ze simulace v CST DS

Soubor: Rat-race/ Rat_race_Db.txt

Rat-race/ Rat_race_Ph.txt

Data s-parametrů a fáze děliče typu Rat-race, získána ze simulace v programu CST Design studio.

4.2 Skript na vykreslení s-parametrů z hodnot ze simulace v CST DS

Soubor: Rat-race/rat-race.m

Skript, v programu Matlab, který zpracovává s-parametry a fázi děliče typu Rat-race a generuje potřebné grafy. Dále slouží k výpočtu šířek pásma.

5.3 S-parametry a vybrané fáze širokopásmového děliče z měření

Soubor: Hodnoty_mereni/ hodnoty_mereni.xlsx

Data, v programu MS Excel, s-parametrů a fáze širokopásmového děliče, získána měřením.

5.3 Skript na vykreslení s-parametrů z hodnot z měření

Soubor: Hodnoty_mereni/ DP_mereni.m

Skript generující grafy vybraných s-parametrů a fází širokopásmového děliče získané měřením výrobku.

5. TOP a Bottom strana širokopásmového děliče

