

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Bakalářská práce

Návrh a realizace
zařízení pro měření
poměru stojatých
vln (PSV)

AUTOR PRÁCE

Jan Spáčil

VEDOUcí PRÁCE

Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

18.5.2014

Anotace

Tato bakalářská práce se věnuje návrhu a konstrukci PSV metru pro pásmo 1 až 2 GHz. Na začátku práce je teoretický základ z hlediska odrazu vln na vedení a jsou popsány nejčastější konstrukce směrových vazeb. Druhá část se práce zabývá samotným postupem návrhu od volby vhodných součástek až po jejich zapojení. Poslední část je věnována měření parametrů jednotlivých částí PSV metru a měření PSV s navrženým PSV metrem.

Abstrakt

This bachelor thesis is focused on SWR meter's design and construction for band from 1 GHz to 2 GHz. At the beginning of the work there are theoretical basics of wave reflection on transition line and there are also described the most used construction of directional couplers. The second part deals with itself process of design from the selection of suitable parts to wiring them. The last part is devoted to the measurement of parts of SWR meter and the measurement with designed SWR meter.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

.....

Obsah

Abstrakt	Chyba! Zázložka není definována.
Abstrakt	1
Čestné prohlášení.....	2
Seznam použitých symbolů	4
1 Úvod	5
2 Teorie.....	6
2.1 Veličiny impedančního nepřizpůsobení	6
2.1.1 Poměr stojatých vln	6
2.1.2 Činitel odrazu a útlum odrazu	7
2.2 Směrové vazby.....	8
2.3 Nejčastěji používané směrové vazby.....	10
2.3.1 Vlnovodné provedení	11
2.3.2 Vázaná vedení.....	11
2.3.3 Směrové můstky	13
3 Návrh systému.....	15
3.1 Výkonová bilance.....	15
3.2 Blokový popis problému.....	15
3.3 Směrová vazba.....	16
3.4 Detektor.....	18
3.4.1 Použité integrované obvody.....	18
3.4.2 Zapojení.....	20
3.5 Program pro Arduino.....	22
3.5.1 Program	23
3.5.2 Převod a korekce naměřených hodnot	24
4 Realizace a měření parametrů	27
4.1 Směrová vazba.....	27
4.1.1 Změřené parametry.....	28
4.2 Detektor.....	31
4.2.1 Změřené parametry.....	32
4.3 Měření celku a porovnání s komerčním produktem.....	35
5 Závěr	38
Citovaná literatura.....	39

Seznam použitých symbolů

λ	Vlnová délka
PSV	Poměr stojatých vln
Z_0	Charakteristická impedance
Z_K	Impedance zátěže
U_+	Napěťová postupná vlna
U_-	Napěťová odražená vlna
$U_{\max}$	Maximum stojaté vlny
$U_{\min}$	Minimum stojaté vlny
Γ	Činitel odrazu
U_k	Napětí na konci vedení
I_k	Proud na konci vedení
L	Délka vedení
Z	Vzdálenost od začátku vedení
Γ	Součinitel šíření
U_{0+}	Napěťová postupná vlna na konci vedení
U_{0-}	Napěťová odražená vlna na konci vedení
Γ_0	Činitel odrazu na konci vedení
$\mathbf{s}$	Rozptylová matice
s_{xy}	Prvek rozptylové matice
Δ_{dB}	Kladná odchylka měření RL
Δ_{-dB}	Záporná odchylka měření RL
IL	Vložný útlum
C	Vazební útlum
I	Izolace
D	Směrovost
RL	Útlum odrazu
λ_g	Vlnová délka ve vlnovodu
$P_{\max LTC}$	Maximální vstupní výkon IO LTC5583
$P_{\min LTC}$	Minimální detekovatelný vstupní výkon IO LTC5583
DPS	Desky plošných spojů

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a realizovat systém pro měření PSV na vedení. Práce se bude skládat z teoretického rozboru problému, výběru vhodných součástek pro PSV metr a jejich zapojení. Dále se bude věnovat měření jednotlivých částí systému a ohodnocení jejich vlastností. Poslední část se bude věnovat měření PSV s tímto navrženým a realizovaným PSV metrem.

2 Teorie

Impedanční přizpůsobení ovlivňuje množství výkonu přeneseného ze zdroje přes vedení do zátěže. Vzhledem k tomu, že impedanční přizpůsobení ovlivňuje chování obvodu, je dobré zavést vhodnou míru, která bude vyjadřovat impedanční přizpůsobení. Míra impedančního přizpůsobení může být vyjádřena jak skalární, tak i vektorovou veličinou.

2.1 Veličiny impedančního nepřizpůsobení

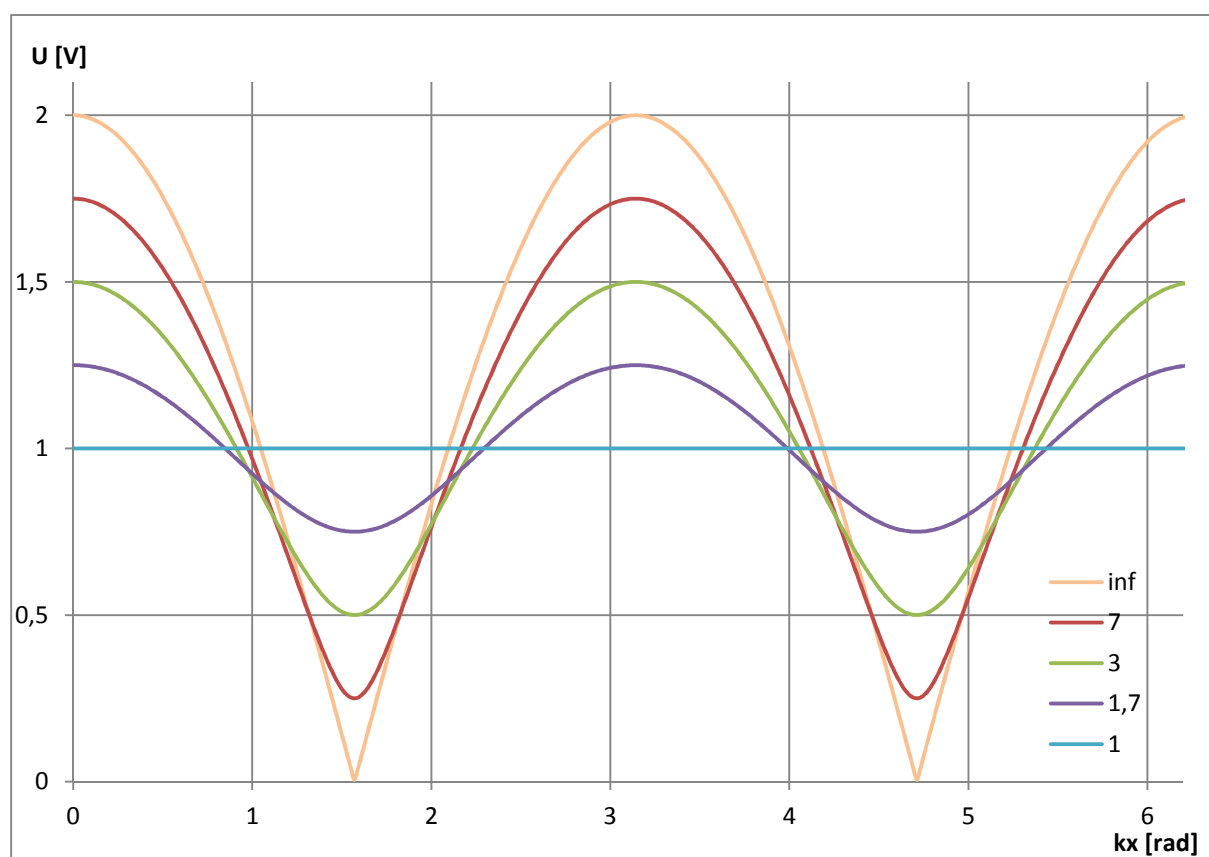
Nejprve nadefinujeme veličiny vyjadřující míru impedančního přizpůsobení.

2.1.1 Poměr stojatých vln

Poměr stojatých vln je skalární veličina.

Při odrazu na rozhraní mezi vedením o impedanci Z_0 a zátěží s impedancí Z_k vzniká odražená vlna U^- , která se v každém bodě sčítá s vlnou postupnou U^+ . Tam, kde se obě vlny sčítají ve fázi, vzniká maximum stojaté vlny U_{max} a tam, kde se vlny sčítají v protifázi, vzniká minimum stojaté vlny U_{min} . Stojaté vlny jsou kvalifikovány skalárním parametrem PSV (VSWR).

$$PSV = \frac{U_{max}}{U_{min}} \quad (1)$$



Obr. 1 - Stojatá vlna na vedení pro různé PSV

Na Obr. 1 je zobrazeno rozložení napětí stojaté vlny na vedení a různé hodnoty PSV. Jsou zde dobře patrná minima a maxima stojaté vlny.

2.1.2 Činitel odrazu a útlum odrazu

Činitel odrazu definujeme jako poměr komplexních amplitud napěťové vlny odražené a přímé. Jedná se o vektorovou veličinu.

$$\Gamma = \frac{U^-}{U^+} \quad (2)$$

Vyjádříme činitel odrazu v libovolném místě vedení pomocí činitele odrazu na konci vedení. K tomuto účelu vyjdeme z Rov. 3

$$U = \frac{1}{2}(U_k + Z_0 I_k)e^{\gamma(l-z)} + \frac{1}{2}(U_k - Z_0 I_k)e^{-\gamma(l-z)} \quad (3)$$

Kde vlna přímá je:

$$U^+ = \frac{1}{2}(U_k + Z_0 I_k)e^{\gamma(l-z)} \quad (4)$$

A vlna odražená je:

$$U^- = \frac{1}{2}(U_k - Z_0 I_k)e^{-\gamma(l-z)} \quad (5)$$

Na konci vedení je $z = l, U = U_0$ takže:

$$U_0^+ = \frac{1}{2}(U_k + Z_0 I_k) \quad (6)$$

$$U_0^- = \frac{1}{2}(U_k - Z_0 I_k) \quad (7)$$

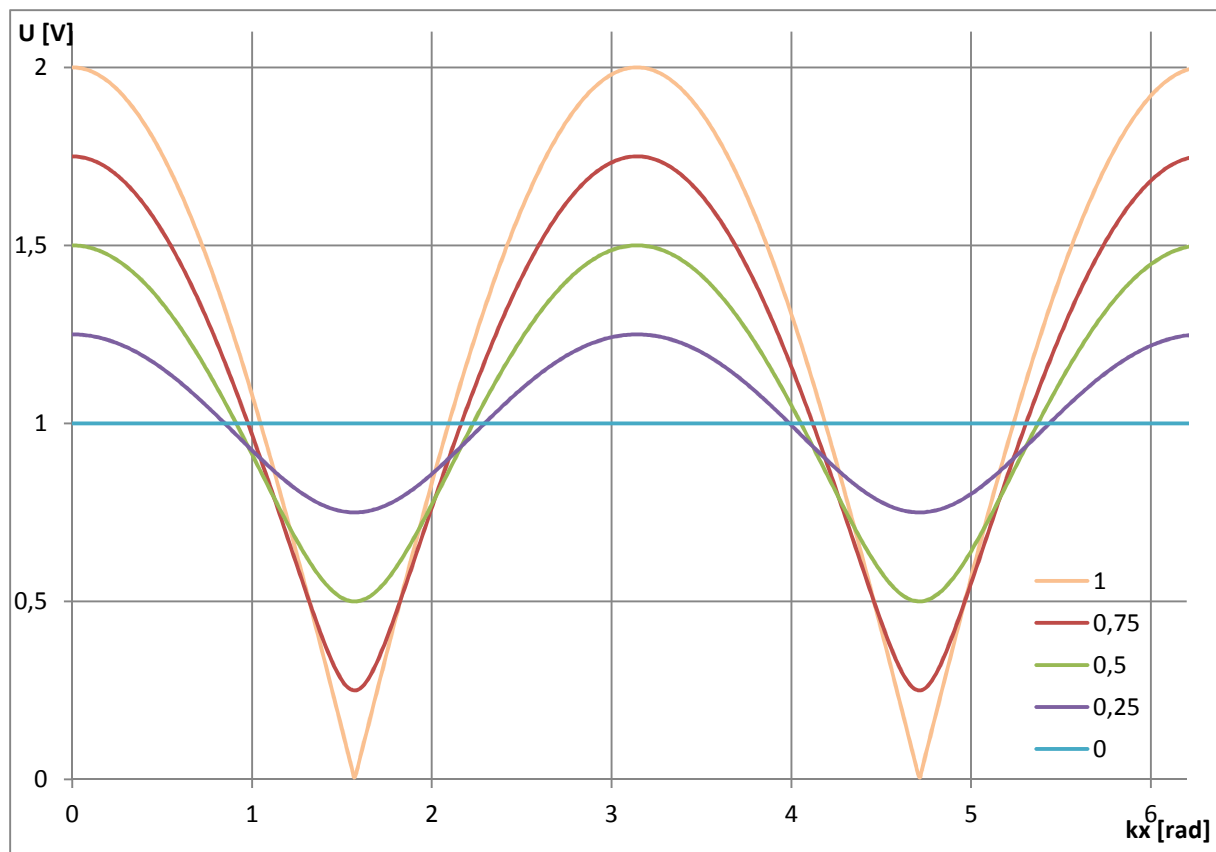
Činitel odrazu na konci vedení je:

$$\Gamma_0 = \frac{U_k - Z_0 I_k}{U_k + Z_0 I_k} = \frac{Z_k - Z_0}{Z_k + Z_0} \quad (8)$$

Konečný tvar je

$$\Gamma = \Gamma_0 e^{-2\gamma z} \quad (9)$$

Kde y je vzdálenost měřená od zátěže směrem ke zdroji. [1]



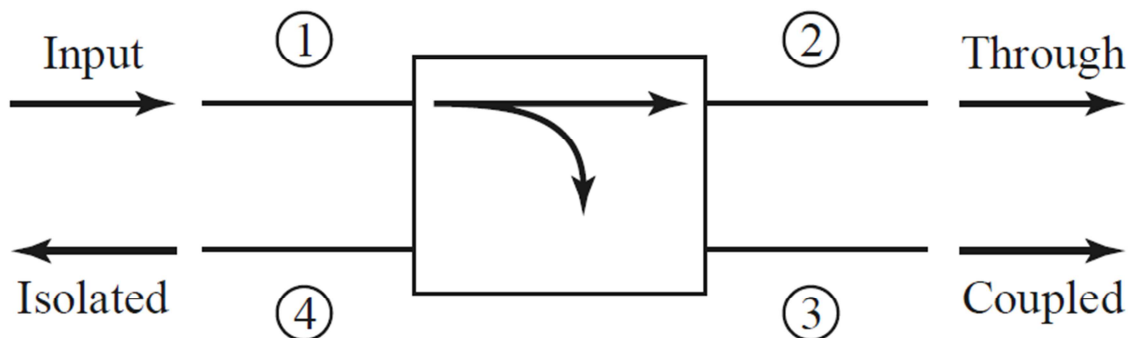
Obr. 2 - Stojatá vlna na vedení pro různé Γ

Na Obr. 2 jsou zobrazeny stojaté vlny pro různé činitele odrazu.

2.2 Směrové vazby

Směrové vazby jsou důležitá součást PSV metru. Ovlivňují dosažitelné parametry PSV metru. Především šířku pásma, maximální měřitelný PSV a nejistotu měření. Proto je vhodné popsat jejich vlastnosti a popsat veličiny, kterými se popisují jejich parametry.

Směrová vazba je mikrovlnný obvod, který je schopen vyvázat část mikrovlnného výkonu postupně nebo odražené vlny. Tyto vazby jsou v různých provedeních, které se od sebe liší strukturou, například svojí šířkou pásma. Základem většiny vedení jsou dvě vedení, která jsou mezi sebou určitým způsobem vázaná a dochází k interakci jejich elektromagnetických polí. Směrové vazby jsou impedančně přizpůsobené čtyřbrany.



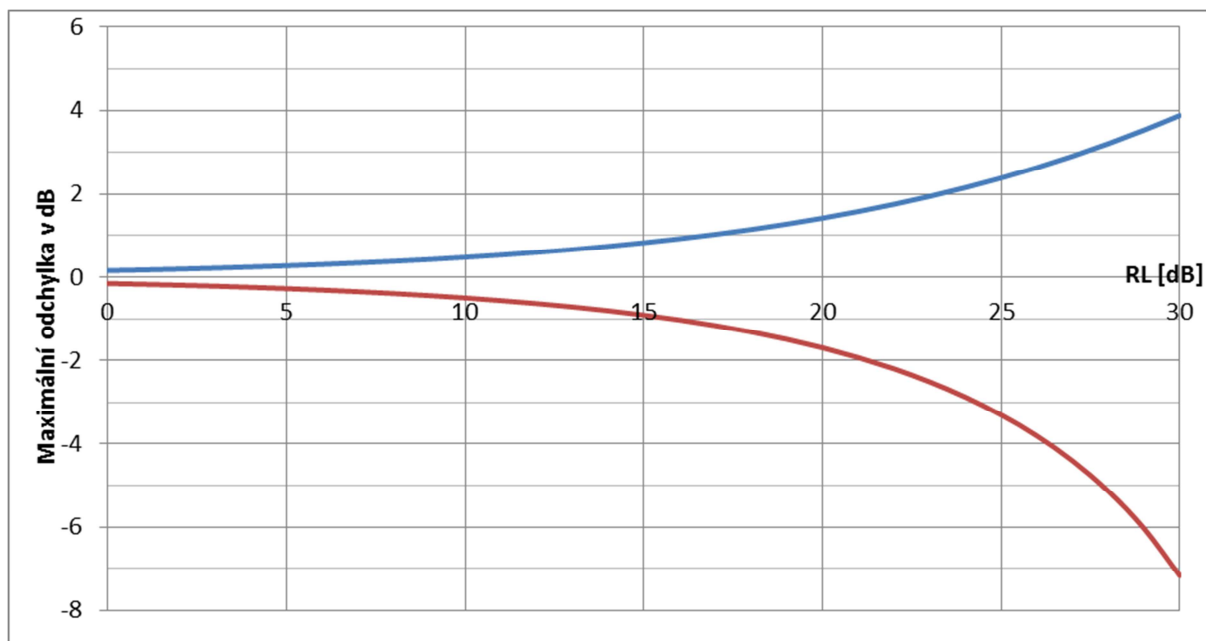
Obr. 3 - Znázornění portů směrové vazby [2]

Vlna procházející z portu 1 na port 2 je zároveň vyvázána na port 3, ale port 4 je v ideálním případě izolován a neprojde na něj nic. Stejným způsobem bude vyvázána vlna procházející z portu 2 na port 1, ale s tím rozdílem, že bude vyvázána na port 4 a port 3 bude od tohoto izolován. Toto chování je popsáno následující rozptylovou maticí.

$$\begin{aligned}
 (S) &= \begin{pmatrix} 0 & s_{12} & s_{13} & 0 \\ s_{12} & 0 & 0 & s_{13} \\ s_{13} & 0 & 0 & s_{12} \\ 0 & s_{13} & s_{12} & 0 \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} 0 & k & j\sqrt{1-k^2} & 0 \\ k & 0 & 0 & j\sqrt{1-k^2} \\ j\sqrt{1-k^2} & 0 & 0 & k \\ 0 & j\sqrt{1-k^2} & k & 0 \end{pmatrix} \quad (10)
 \end{aligned}$$

Kde k je přenos z brány 1 na bránu 2. Tato matice popisuje chování směrové vazby v ideálním případě.

Když používáme směrové odbočnice pro měření útlumu odrazu při skalárním měření, tak nám směrové odbočnice svojí nedokonalostí vnášejí do měření nejistoty způsobené jejich konečnou směrovostí. Vlna procházející z portu 1 na port 2 je vyvázána na port 3 v závislosti na vazebním útlumu a zároveň je vlna procházející z portu 2 na port 1 také vyvázána na port 3 v závislosti na izolaci [3]. Tyto dvě vlny se sečtou nebo odečtou v závislosti na svém fázovém posuvu a způsobí nejistotu měření. Takto vnesená nejistota je při skalárním měření nekorigovatelná. Tento problém odstraňuje vektorové měření, kde je možné takto vnesené nejistoty korigovat a měřit podstatně větší útlumy odrazu, než dovoluje skalární měření.



Obr. 4 - Nejistota měření RL způsobená konečnou směrovostí (pro směrovost 35 dB)

Na Obr. 4 je zachycena maximální nejistota měření útlumu odrazu při měření se směrovou vazbou se směrovostí 35 dB. Odchylka hodnoty opravdové od měřené může být jak kladná, tak záporná, v závislosti na fázovém posunu vyvážané odražené vlny a parazitně vyvážané postupné vlny.

$$\Delta_{dB} = 20 \log \left(1 + 10^{\frac{RL-D}{20}} \right) \quad (11)$$

$$\Delta_{-dB} = 20 \log \left(1 - 10^{\frac{RL-D}{20}} \right) \quad (12)$$

Toto jsou vzorce pro výpočet maximální kladné (Δ_{dB}) a maximální záporné (Δ_{-dB}) nejistoty v dB, kde RL je měřený útlum odrazu v dB a D je směrovost směrové vazby v dB.

V praxi se směrové vazby nepopisují pomocí s-parametrů, ale pomocí jejich technických parametrů.

$$\text{Vložný útlum} \quad IL = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 20 \log \frac{1}{|s_{12}|}, [dB] \quad (13)$$

$$\text{Vazební útlum} \quad C = 10 \log \frac{P_1}{P_3} = 20 \log \frac{1}{|s_{13}|}, [dB] \quad (14)$$

$$\text{Izolace} \quad I = 10 \log \frac{P_1}{P_4} = 20 \log \frac{1}{|s_{14}|}, [dB] \quad (15)$$

$$\text{Směrovost} \quad D = 10 \log \frac{P_3}{P_4} = 20 \log \frac{|s_{13}|}{|s_{14}|}, [dB] \quad (16)$$

$$\text{Útlum odrazu} \quad RL = 10 \log \frac{P_1}{P_{01}} = 20 \log \frac{1}{|s_{11}|}, [dB] \quad (17)$$

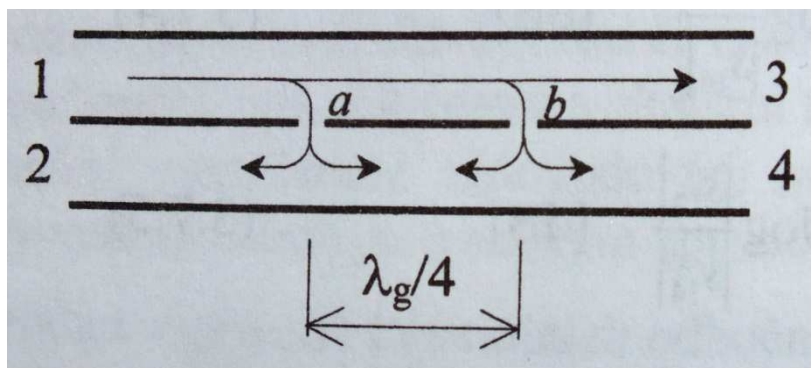
Dále si ukážeme nejběžněji používané směrové vazby a přibližně popíšeme princip jejich funkce.

2.3 Nejčastěji používané směrové vazby

Tato kapitola se bude zabývat popisem nejčastěji používaných směrových vazeb. Bude zde rozebrán princip jejich funkce a popsány jejich základní vlastnosti.

2.3.1 Vlnovodné provedení

Ve vlnovodném provedení se směrové vazby realizují vhodným umístěním vazebních otvorů mezi dvěma vedeními. Tyto otvory se umísťují ve vhodných vzdálenostech od sebe, aby se dosáhlo vhodného fázování vyvedených vln a dále jejich sečtení a odečtení. Zde je to ukázáno na příkladu. Jedná se o dvě souběžná vedení s dírami ve vzdálenosti $\lambda_g/4$. [4] Šířka pásma může být vylepšena zvýšením množství děr a jejich vhodným rozmístěním.



Obr. 5 - Princip činnosti [4]

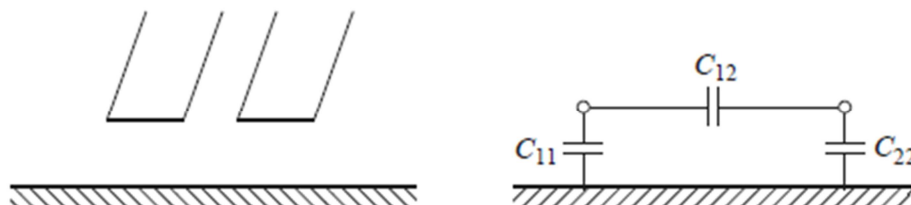
Přenos 1 do 2: Cesty přes otvory a a b se liší o $\lambda_g/2$, takže jsou signály v protifázi a odečtou se.

Přenos z 1 do 4: Cesty přes otvory a a b jsou stejně dlouhé, takže se signály sejdou ve fázi a sečtou se. [4]

Výhody vlnovodných směrových vazeb jsou schopnost přenášet velké výkony a jednoduchá mechanická konstrukce. Mezi nevýhody patří malá šířka pásma těchto vazeb daná jednak šířkou pásma jednovydovosti vlnovodu a také rozměry a vzdálenostmi vazebních děr mezi vlnovody. Další nevýhodou jsou rozměry vlnovodů při použití pod 1 GHz.

2.3.2 Vázaná vedení

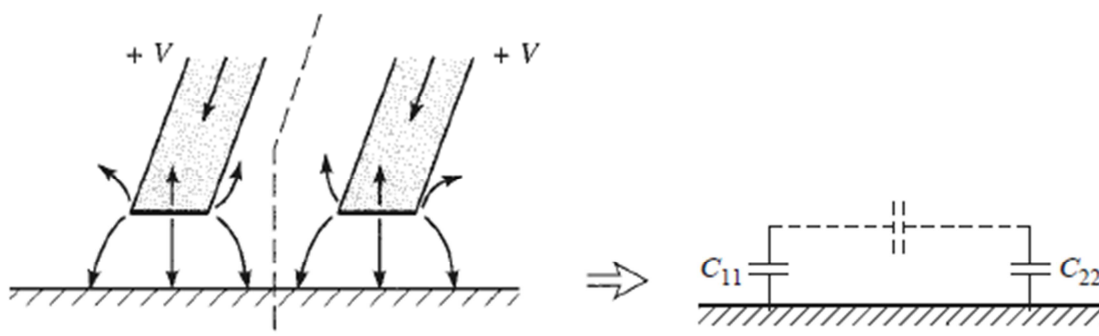
Když jsou dvě nestíněné vedení ve své blízkosti, může být v důsledku interakce dvou elektromagnetických polí navázán výkon z jednoho vedení na druhé. Taková dvě vedení se nazývají vázaná vedení a většinou se skládají ze tří vodičů s tím, že jeden vodič je společný. Směrové vazby s vázanými vedeními předpokládají práci s TEM mody.



Obr. 6 - Směrová vazba a ekvivalentní zapojení [2]

Na Obr. 6 je zobrazeno trojvodičové vázané vedení. Pokud budeme předpokládat šíření modem TEM, tak lze celý problém řešit pomocí kapacit mezi vedeními a rychlostí šíření elektromagnetické vlny. Na Obr. 6 je také zachyceno ekvivalentní zapojení s kondenzátory, kde C_{12} je kapacita mezi pásky a C_{11} a C_{22} je kapacita pásek vůči zemi. Protože pásky mají stejné rozměry, tak $C_{11} = C_{22}$.

Na vázaných vedeních jsou dva speciální typy vidů, sudý a lichý. Sudý vid je buzen, když jsou pásy buzeny vlnami o stejné amplitudě a stejného směru. Lichý vid je buzen, když jsou pásy buzeny vlnami o stejné amplitudě, ale v opačných směrech. Protože se šíří vlna TEM, je fázová rychlost pro oba vidy stejná, $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$, kde $\sqrt{\epsilon_r}$ je relativní permitivita TEM vedení.



Obr. 7 - Rozložení pole pro sudý vid [2]

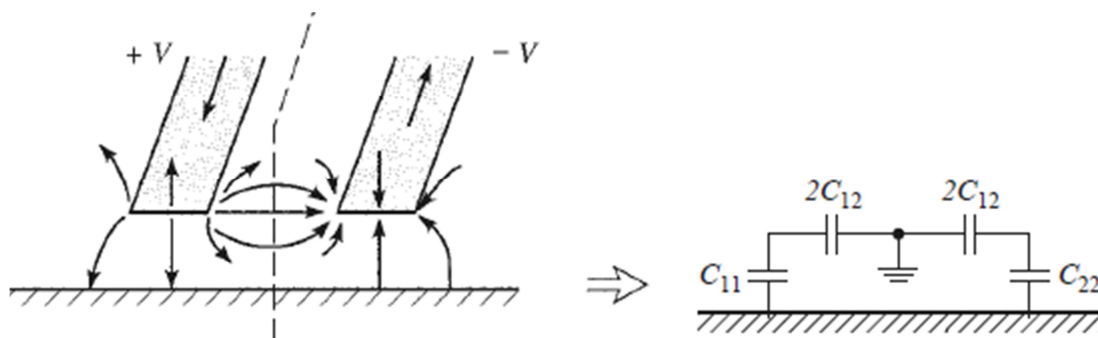
Na Obr. 7 je rozložení pole pro sudý vid. Je zde vidět symetrie podél středové osy. Díky této symetrii není žádná vazba mezi těmito vedeními. Toto je zobrazeno na ekvivalentním zapojení na Obr. 7, kde je vynechán C_{12} . Kapacita pro každé vedení je

$$C_e = C_{11} = C_{22} \quad (18)$$

Charakteristická impedance pro sudý vid je

$$Z_{0e} = \sqrt{\frac{L_e}{C_e}} = \frac{1}{v_p C_e} \quad (19)$$

Kde $v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{L_e C_e}}$



Obr. 8 - Rozložení pole pro lichý vid [2]

Na Obr. 8 je zobrazeno rozložení pole pro lichý vid. Je zde středová symetrie. Při vybuzení lichého vidu je mezi pásy nulové napětí. Toto si můžeme představit jako zem v prostředku kondenzátoru C_{12} . Tato zem je zachycena na ekvivalentním zapojení na Obr. 8. Kapacita mezi vedeními je

$$C_o = C_{11} + 2C_{12} = C_{22} + 2C_{12} \quad (20)$$

a charakteristická impedance pro lichý vid je

$$Z_{0o} = \sqrt{\frac{L_o}{C_o}} = \frac{1}{v_p C_o} \quad (21)$$

Impedance sudého a lichého vidu jsou vztaženy vůči zemi. Tyto dvě impedance jsou důležité pro výpočet charakteristické impedance vazby Z_0 z její vazby C .

$$Z_{0e} = Z_0 \sqrt{\frac{1+C}{1-C}} \quad (22)$$

$$Z_{0o} = Z_0 \sqrt{\frac{1-C}{1+C}} \quad (23)$$

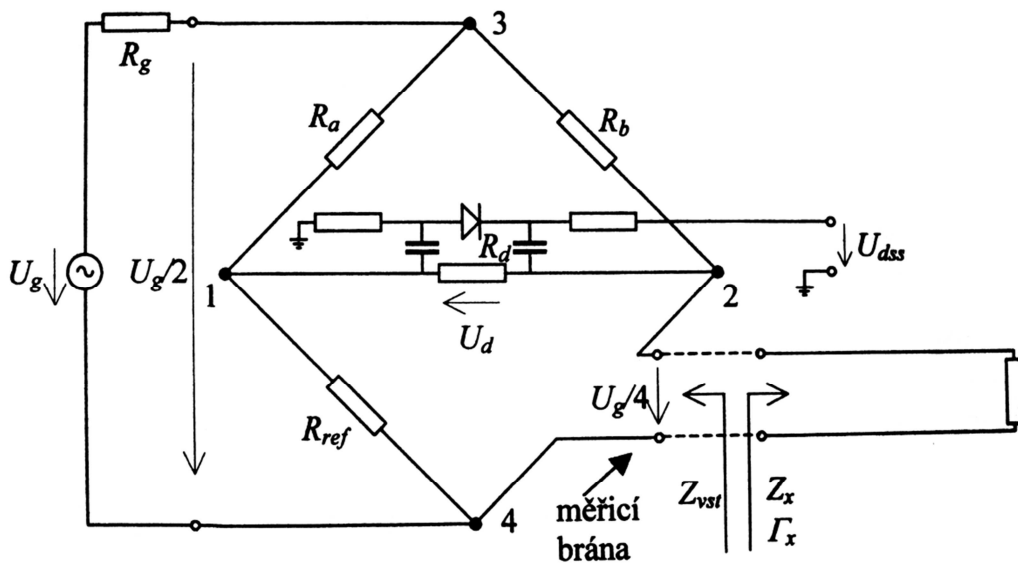
Pro vedení s kvazi-TEM mode, jako je mikropáskové vedení, bude mít toto řešení nízkou směrovost, kvůli rozdílné fázové rychlosti sudého a lichého vidu. [2]

2.3.3 Směrové můstky

Vedle směrových vazeb se pro měření odrazů dají použít také směrové můstky. Jedná se o přizpůsobené trojbrany. Jejich hlavní výhodou oproti směrovým vazbám je jejich širokopásmovost.

Na směrové můstky lze pohlížet jako na trojbran s rozptylovou maticí (v ideálním případě):

$$S = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (24)$$



Obr. 9 - Zapojení směrového můstku [4]

Vysvětlení principu podle Obr. 9. Volí se podmínka $R_a = R_b = R_g = R_d = R_{ref} = Z_0 = 50 \Omega$. Potom platí podmínka $Z_{vst} = R_{ref}$. Nejprve uvažme přizpůsobený stav, tj. $Z_L = R_{ref}$. Měřicí brána je přizpůsobená a odražená vlna má nulovou amplitudu. Potom je impedance můstku mezi body 3 a 4 rovna R_g a napětí dopadající napěťové vlny mezi body 3 a 4 je rovno $U_g/2$. Na měřicí bráně má pak dopadající napěťová vlna šířící se z generátoru amplitudu $U_g/4$, je tedy ztlumená o 6 dB. Můstek je vzhledem k bodům 1, 2 vyvážený a detektor zapojený mezi těmito body měří detekované napětí $U_d = 0$.

Pokud je měřicí brána zakončena obecnou nepřizpůsobenou zátěží Z_L , platí pro koeficient odrazu $|\Gamma_L|$:

$$|\Gamma_L| = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (25)$$

Odražená napěťová vlna má pak amplitudu:

$$U_r = \frac{U_g}{2} \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (26)$$

Odražená napěťová vlna se na bráně detektoru projeví s poloviční amplitudou:

$$U_d = \frac{U_r}{2} = \frac{U_g}{8} \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{U_g}{8} \cdot |\Gamma_L| \quad (27)$$

Nedokonalostmi přizpůsobení generátoru a detektoru dochází k průniku postupné vlny z generátoru k detektoru. Dále musí být zajištěny stejné hodnoty součástek. Musí být zajištěna při návrhu také geometrická symetrie rozložení součástek. Při vhodném návrhu lze dosahovat velmi vysokých směrovostí (až kolem 47 dB). Vzhledem k vloženému útlumu 6 dB je použití směrového můstku nevhodné pro měření s velkým průchozím výkonem.

3 Návrh systému

3.1 Výkonová bilance

Účelem této kapitoly je určit, jaké výkony jsem schopný s daným detektorem a vazbou měřit a zda je nutné tyto signály dodatečně zesílit pro detektor. Jako detektor bude použit obvod LTC5583 a jako vazba bude použit BDCN-7-25+. V prvotním přiblížení nebude uvažována směrovost vazby.

LTC5583 má rozsah vstupního výkonu od -58 dBm do 3 dBm. BDCN-7-25+ má vazbu v pásmu 1 až 2 GHz přibližně 7 dB. Z těchto údajů se dá určit maximální a minimální výkon, který se dá touto sestavou detekovat.

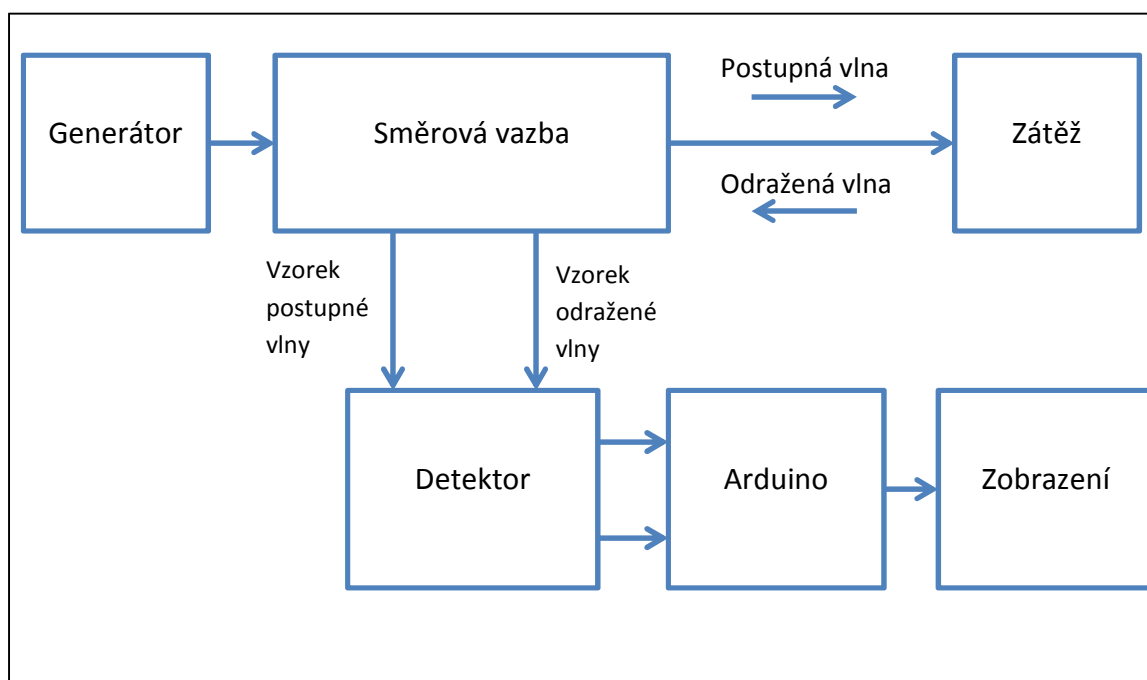
$$P_{max} = P_{maxLTC} + C = 3 + 7 = 10 \text{ dBm} \quad (28)$$

$$P_{min} = P_{minLTC} + C = -58 + 7 = -51 \text{ dBm} \quad (29)$$

P_{max} maximální detekovatelný vstupní výkon. Tento výkon je dostatečně malý na to, aby se dal bez obtíží generovat pomocí laboratorních generátorů. Minimální detekovatelný výkon P_{min} je -51 dBm, což nám poskytuje dostatečný dynamický rozsah detektoru 61 dB. Toto by nám teoreticky umožňovalo měřit útlum odrazu v rozsahu 61 dB. Prakticky je tato hodnota omezená směrovostí vazby a izolací vstupu LTC5583. Tato omezení jsou rozebrána dále.

3.2 Blokový popis problému

PSV bude řešen jako zapojení několika jednotlivých a vyměnitelných bloků.

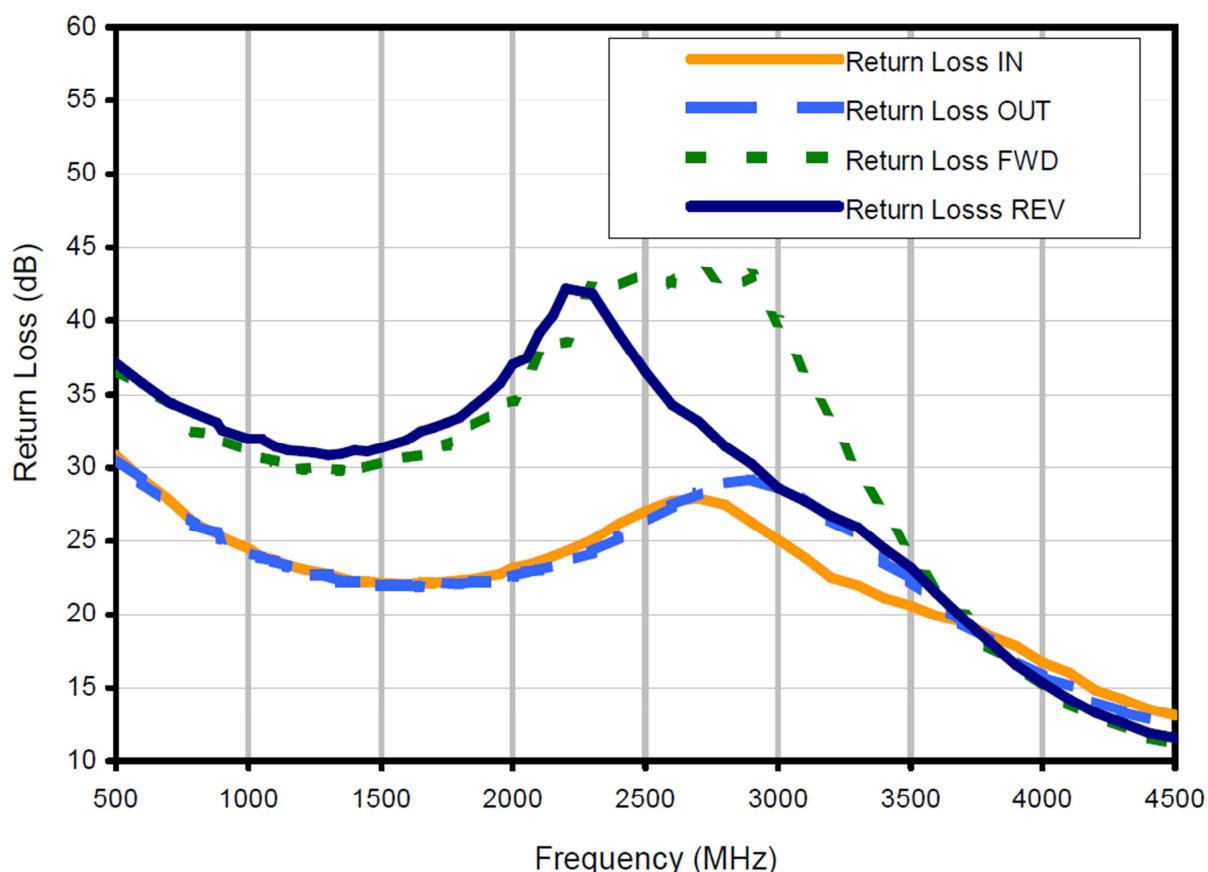


3.3 Směrová vazba

Volba směrové vazby je pro celý PSV metr kritická, protože určuje rozsahy, ve kterých bude možné měřit PSV. Tento rozsah je určen směrovostí vazby. Dále také určuje maximální průchozí výkon, který bude možno měřit, a to svým vložným útlumem (především výkonové ztráty ve vazbě) a také svým vazebním útlumem.

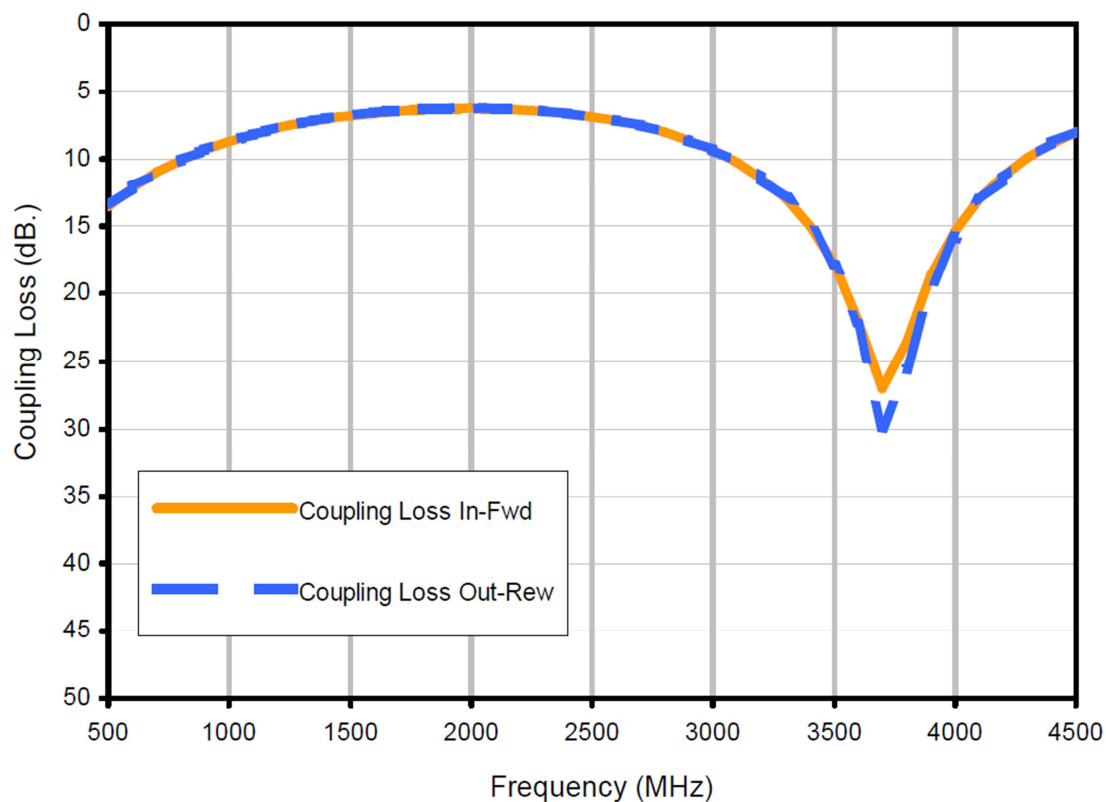
Před začátkem hledání vazby byly zvoleny požadavky na vyrovnané parametry v celém pásmu od 1 GHz do 2 GHz. Toto se týká především vazebního útlumu. Bylo by vhodné, kdyby vazební útlum byl kolem 10 dB. Hlavní důvod k tomuto nízkému vazebnímu útlumu je zajištění vysokého dynamického rozsahu při použití v nízko výkonových aplikacích. Dále by bylo vhodné, aby směrovost vazby v tomto pásmu neklesla pod 15 dB. Útlumy odrazů by měly být na jednotlivých portech lepší než 20 dB.

Těchto parametrů dosahuje čtyřportová směrová vazba BDCN-7-25+ od Mini-Circuits.

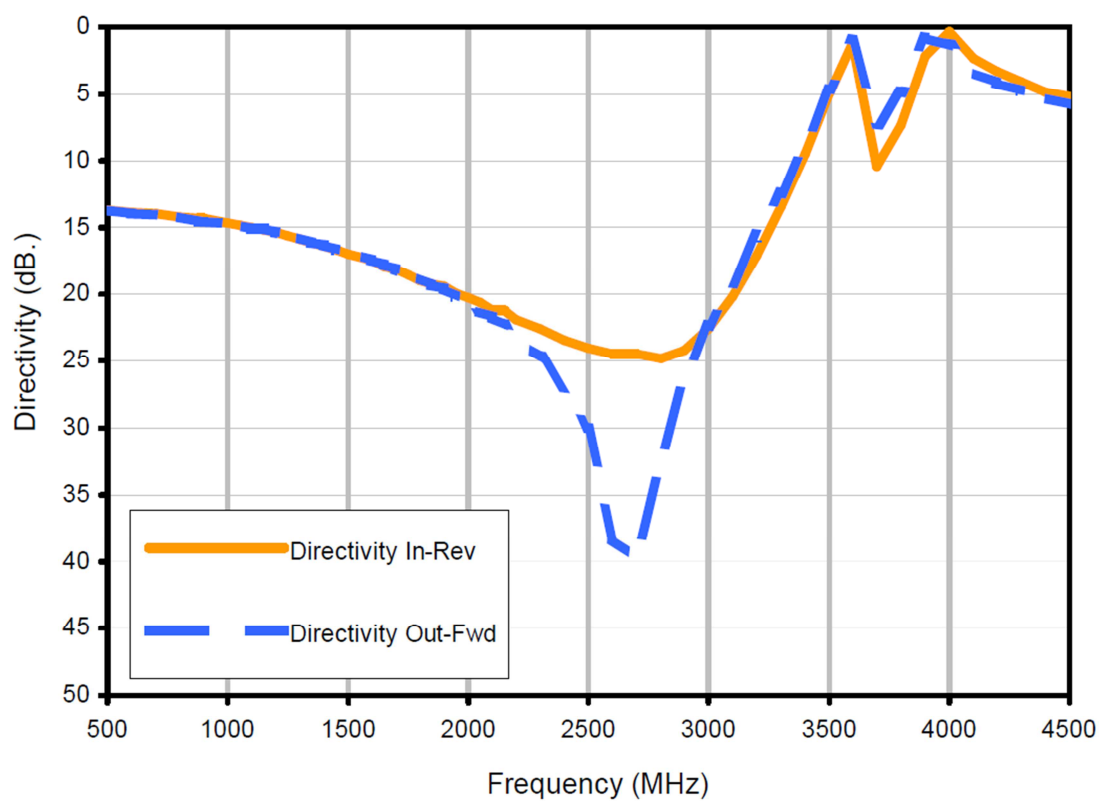


Obr. 11 - Útlum odrazu jednotlivých portů [5]

Obr. 11 zobrazuje průběhy útlumu odrazu na jednotlivých portech směrové vazby. Z tohoto hlediska je útlum odrazu nad 20 dB do 3500 MHz.



Obr. 12 - Vazební útlum směrové vazby [5]



Obr. 13 - Směrovost vazby [5]

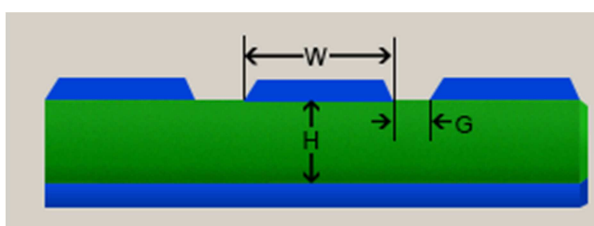
Obr. 12 zachycuje vazební útlum směrové vazby. V pásmu od 1 GHz do 2 GHz je vazební útlum mezi 6 až 8 dB. Toto je celkem vyhovující, co se týče vlivu na dynamický rozsah PSV metru. Tato změna

se nejvíce projeví nejistotou při měření výkonů, pokud se předem nekalibruje na danou frekvenci. Dále je z tohoto grafu zřejmé, že vazba má vyhovující parametr vložného útlumu až do 3 GHz.

Obr. 13 zachycuje směrovost směrové vazby. Průběh In-Rev zachycuje parazitní průnik ze vstupního portu IN na port pro odraženou vlnu REV a Out-Fwd zachycuje parazitní průnik z portu OUT na port pro postupnou vlnu Fwd. Směrovost vazby se, dle grafu na Obr. 13, se zvyšující frekvencí zlepšuje až do hodnoty 25 dB pro In-Rev a 40 dB pro Out-Fwd na cca 2,6 GHz. V zadaném pásmu 1 až 2 GHz je směrovost pod 15 dB, což zajišťuje dobré vlastnosti vazby v tomto pásmu. Z grafu dále vyplývá, že vazba by měla mít vyhovující směrovost až do cca 3,2 GHz.

Z těchto grafů vyplývá, že vazba má zcela vyhovující parametry v pásmu od 1 GHz do 2 GHz s tím, že by jí mělo být možné provozovat až do 3 GHz. Tuto možnost bude nutné potvrdit měřením.

Při návrhu DPS je vhodné, aby všechny cesty na DPS byly vůči sobě otočené o 90°. Tímto se omezí parazitní vazby na DPS a sníží se negativní vliv této vazby na celkovou směrovost směrové vazby.



Obr. 14 - Koplanární vedení

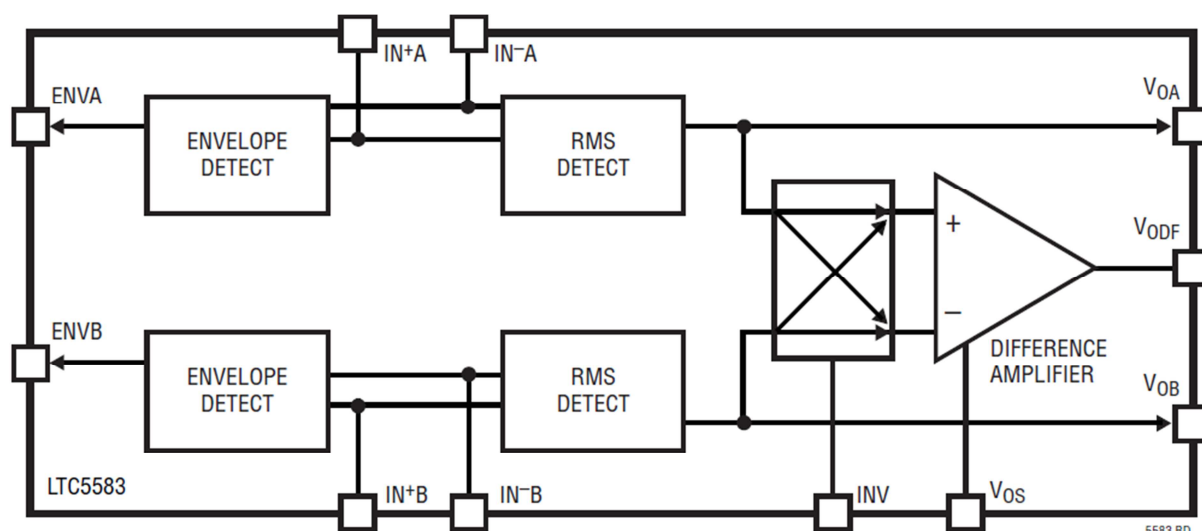
Jako vedení na DPS je použito 50 Ω koplanární vedení o rozměrech $W=0,67$ mm a vzdálenost od vedlejších $G=0,174$ mm (Obr. 14) na substrátu FR4 o tloušťce $H=1,5$ mm. Použití koplanárního vedení je výhodné z důvodu menších rozměrů W oproti mikropásku a také v omezení parazitních vazeb mezi vedeními. Kolem koplanárního vedení jsou rozmístěny natěsně prokovy.

3.4 Detektor

Detektor by měl být realizován jako nadstavba (shield) pro Seeeduino a zároveň by měl být i samostatně použitelný. Tím, že se jedná o Seeeduino shield, je předem do jisté míry určena velikost DPS a umístění některých dutinkových lišt pro zapojení k Seeeduinu.

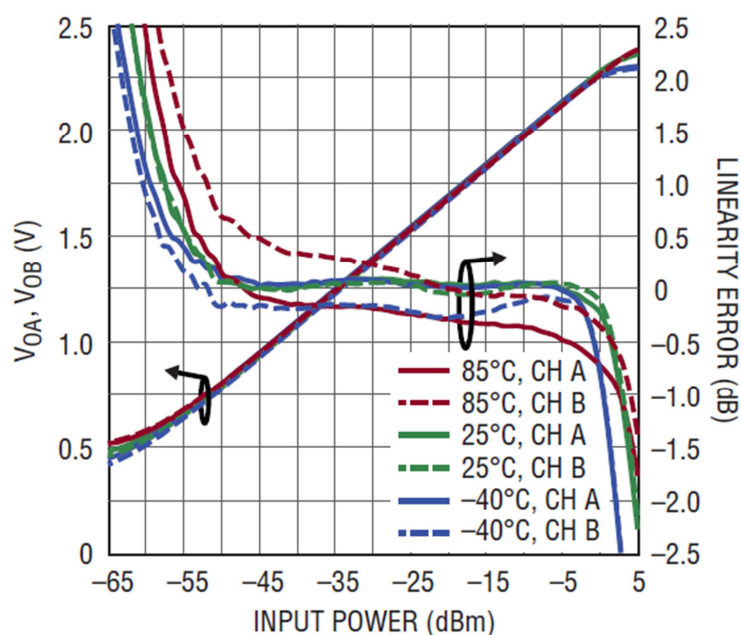
3.4.1 Použité integrované obvody

Jako detektor bude použit integrovaný obvod LTC5583. Jedná se o dvojitý detektor výkonu s výstupem v logaritmickém měřítku a rozdílovým výstupem, který se dá použít pro měření PSV. Zároveň má tento IO detektor obálky signálu. Tento IO má izolaci mezi jednotlivými vstupy při použití na stejné frekvenci 40 dB na 2,14 GHz. Pokud se použije diferenční vstup, může být izolace zlepšena na více než 55 dB. Tato hodnota izolace mezi vstupy omezuje maximální měřitelný útlum odrazu, ale tato hodnota je natolik vysoká, že mnohem větší nejistotu měření způsobí malá směrovost vazby.



Obr. 15 - Blokové schéma LTC5583 [6]

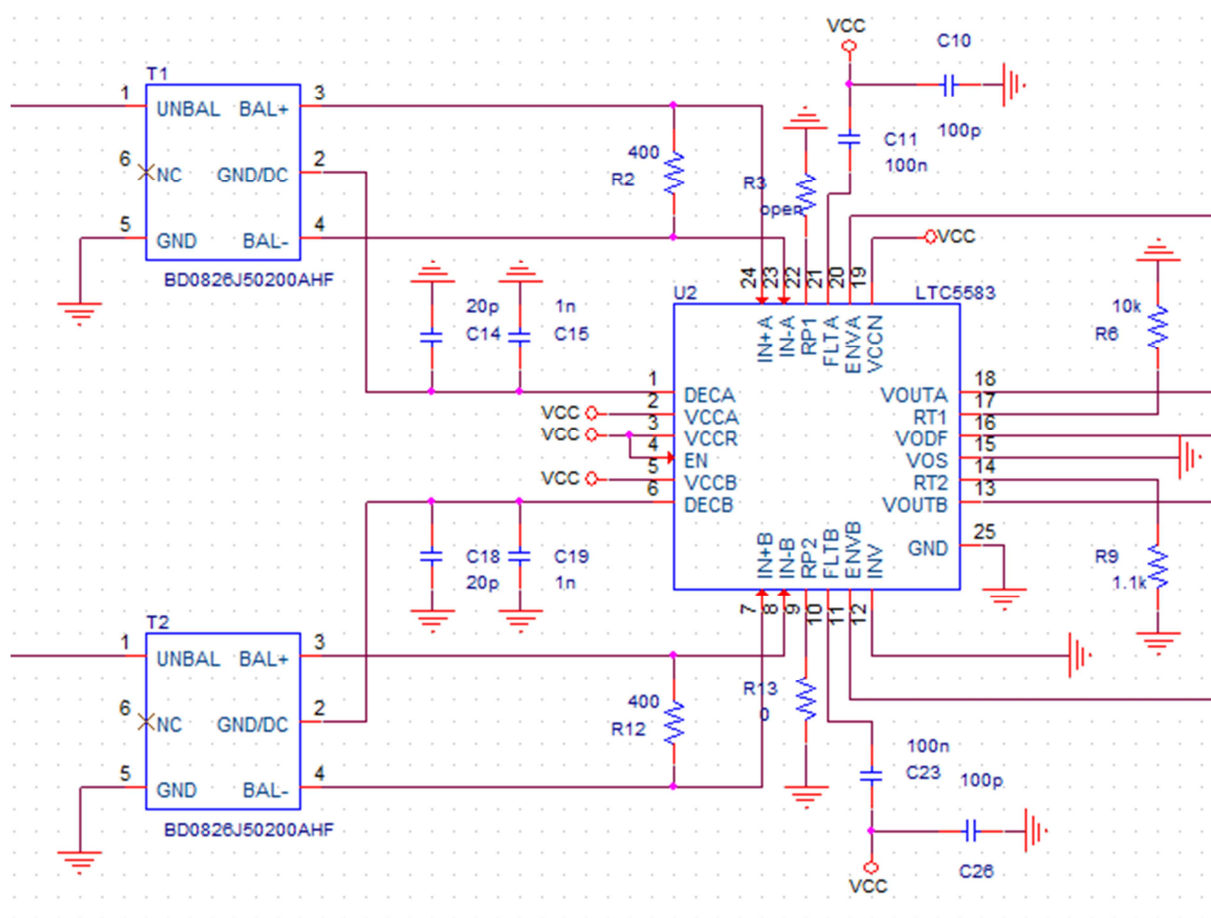
Obr. 15 zachycuje blokové schéma LTC 5583. IN+A a IN-A jsou diferenční vstupy pro VF signál vstupu A. Vstup B má diferenční vstup IN+B a IN-B. Tyto signály se dělí do dvou detektorů, detektor obálky a detektoru RMS. ENVA a ENVB jsou výstupy pro signál obálky vstupního signálu. VOA a VOB jsou výstupy detektoru výkonu v logaritmické míře. Vstup INV nastavuje, zda má diferenční zesilovač provádět VOA-VOB, a nebo VOB-VOA. VOS nastavuje stejnosměrný posun výstupu VODF. Na výstupu VODF je rozdílový signál (VOA-VOB)+VOS, nebo (VOB-VOA)+VOS.



Obr. 16 - Převodní charakteristika LTC5583 [6]

Obr. 16 zachycuje převodní charakteristiku detektoru výkonu v závislosti na vstupním výkonu při 2,1 GHz. Zároveň je v tomto obrázku zachycena chyba převodu v dB. V rozsahu -50 až 0 dBm při teplotě 25° C je převod s chybou blíží se nule.

3.4.2 Zapojení



Obr. 17 - Zapojení detektoru

Na Obr. 17 je zapojení detektoru. T1 a T2 jsou symetrizační transformátory BD0826J50200AHF od Anaren. Jedná se transformátor 1:4 pracujícím v pásmu od 800 MHz do 2600 MHz. V pásmu 1 až 2 GHz má vstupní útlum odrazu pod 18 dB.

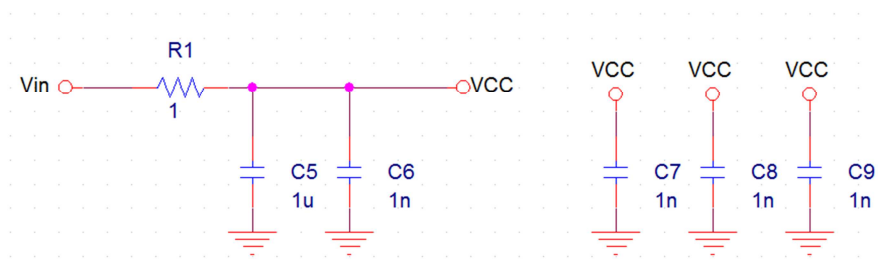
Výstup ze symetrizačního transformátoru má impedanci 200 Ω. Mezi vstupy IN+ a IN- je impedance 400 Ω, proto musím být ještě ke vstupům IN+ a IN- paralelně přidán odpor R2 a R12 o hodnotě 400 Ω. Piny DECA a DECB mají napětí 1,6 V a mají být připojeny ke středu symetrizačního transformátoru. Tyto výstupy jsou zároveň střídavě spojeny se zemí pomocí kondenzátorů C14, C15, C18 a C19.

Integrovaný obvod má nastavitelnou teplotní kompenzaci pomocí pinů RT1, RT2, RP1 a RP2. V katalogovém listě jsou popsány vhodné hodnoty odporů připojených k těmto pinům v závislosti na zvolené pracovní frekvenci. V katalogu byly hodnoty pro 880 MHz a 2140 MHz, což je na krajích zadaného pásma. Tyto hodnoty se příliš od sebe neliší, proto jsem zvolil průměr mezi těmito hodnotami. Takže RT1 bude připojen přes odpor R6 o hodnotě 10k na zem a RT2 je přes odpor R9 o hodnotě 1k1 také připojen na zem. Na pinu RP1 nebude odpor R3 osazen. Na RP2 bude odpor R13 osazen zkratem.

INV je zapojen na zem. Tímto je nastaveno na výstupu VODF provedení rozdílu (VOA-VOB)+VOS. Toto rozdílové napětí je přivedeno na analogový vstup pro Arduino A2.

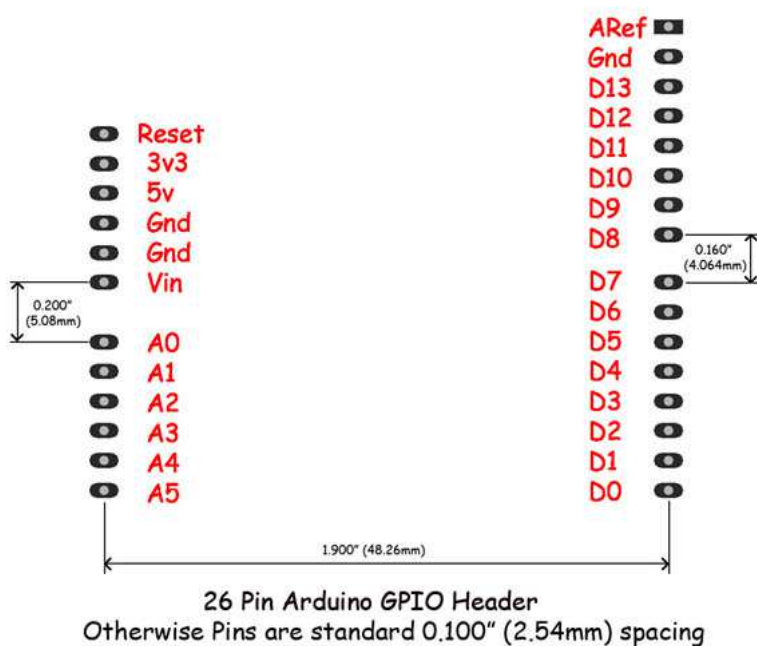
ENVA a ENVB jsou výstupní piny detektoru obálky signálu. Tyto výstupy sice nejsou použity v této práci, ale přesto jsou vyvedeny na analogové vstupy pro Arduino. ENVB je zapojen na A0 a ENVA je zapojen na A4.

VOUTA a VOUTB jsou výstupy RMS detektorů. Hodnoty napětí na těchto pinech odpovídají hodnotám vstupního výkonu v dBm. Jsou připojeny na analogové vstupy pro Arduino. VOUTB je připojen na A1 a VOUTA je připojen na A3.



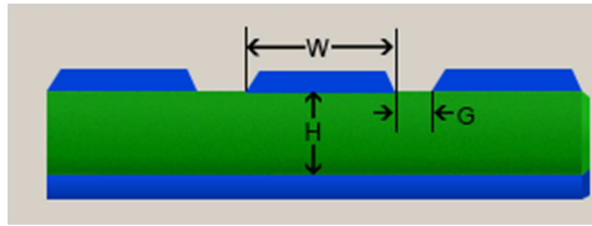
Obr. 18 - Napájení LTC5583

Integrovaný obvod požaduje, aby byl napájen (Obr. 18) přes odpor R1 o hodnotě 1 Ω . Tento odpor má zajistit vhodný náběh napájecího napětí při zapnutí [6]. C5 je filtrační kondenzátor a C6, C7, C8 a C9 jsou blokovací kondenzátory, které jsou u každého napájecího pinu.

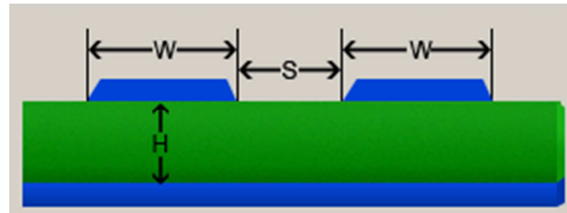


Obr. 19 - Rozměry děr pro dutinkovou lištu v DPS

Zapojení na DPS je děláno s ohledem na připojení k Arduino (Obr. 19). Tímto bylo určeno rozložení na DPS.



Obr. 20 - Koplanární vedení



Obr. 21 - Symetrické vedení

Pro přivedení VF signálu od SMA konektoru k symetrizačním transformátorům je použito koplanární vedení. Rozměry tohoto vedení byly spočítány pomocí programu Saturn PCB Toolkit V6.52. Pro $50\ \Omega$ na substrátu FR4 o tloušťce 1,5 mm je vypočtena hodnota šířky pásku $W=0,67\text{ mm}$ a vzdálenost od vedlejších $G=0,174\text{ mm}$ (Obr. 20). Symetrické vedení z transformátorů s impedancí $200\ \Omega$ je o parametrech $W=0,2\text{ mm}$, $S=1\text{ mm}$ (Obr. 21).

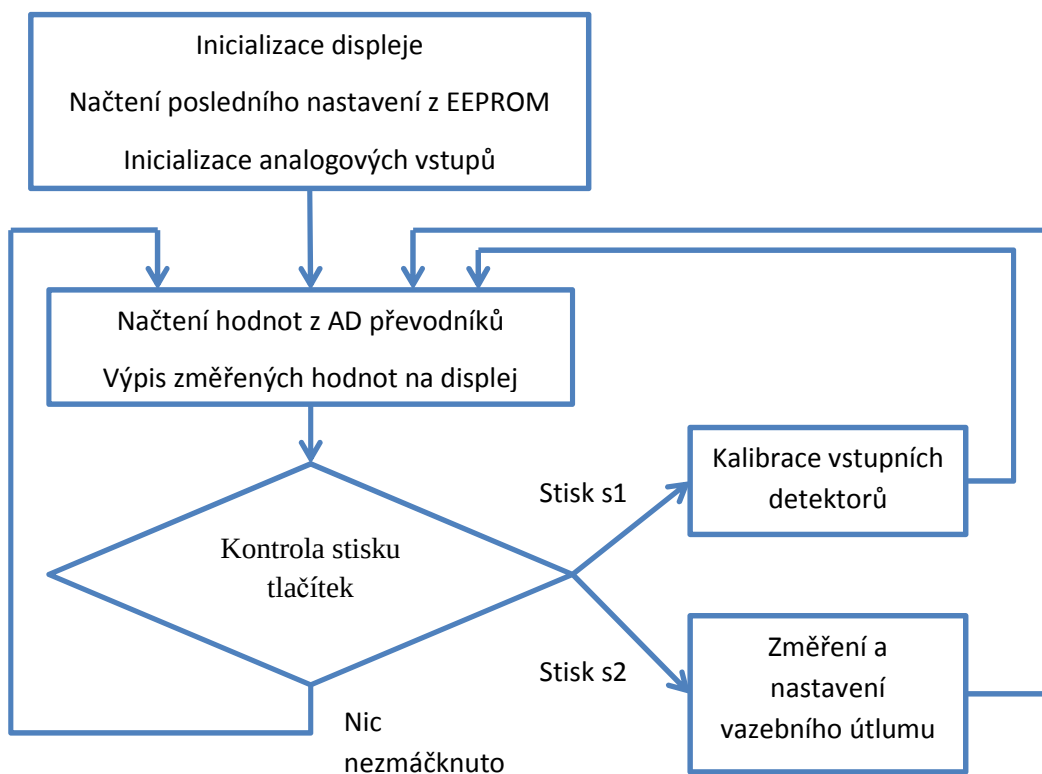
Po celém obvodu DPS je odmaskována rozlitá zemní plocha pro dodatečné připájení stínění. Toto stínění má sloužit pro omezení rušení od digitálních částí Arduina.

3.5 Program pro Arduino

Program bude udělán na desce Seeduino Mega. Seeduino Mega je kompatibilní s Arduino Mega. Rozdíl v těchto dvou deskách je pouze v drobných obvodových změnách a změně návrhu DPS. Seeduino Mega je osazen mikrokontrolérem ATmega2560.

Program pro Arduino bude realizovat korekci, kalibraci a zobrazení detekovaných hodnot TLC5583. V programu by se mělo dát přepínat mezi převodní charakteristikou získanou z datasheetu a převodní charakteristikou získanou pomocí kalibrace detektoru. Dále by program měl obsahovat možnost snadno změřit vazební útlum, a dále tento útlum korigovat u hodnot výkonu.

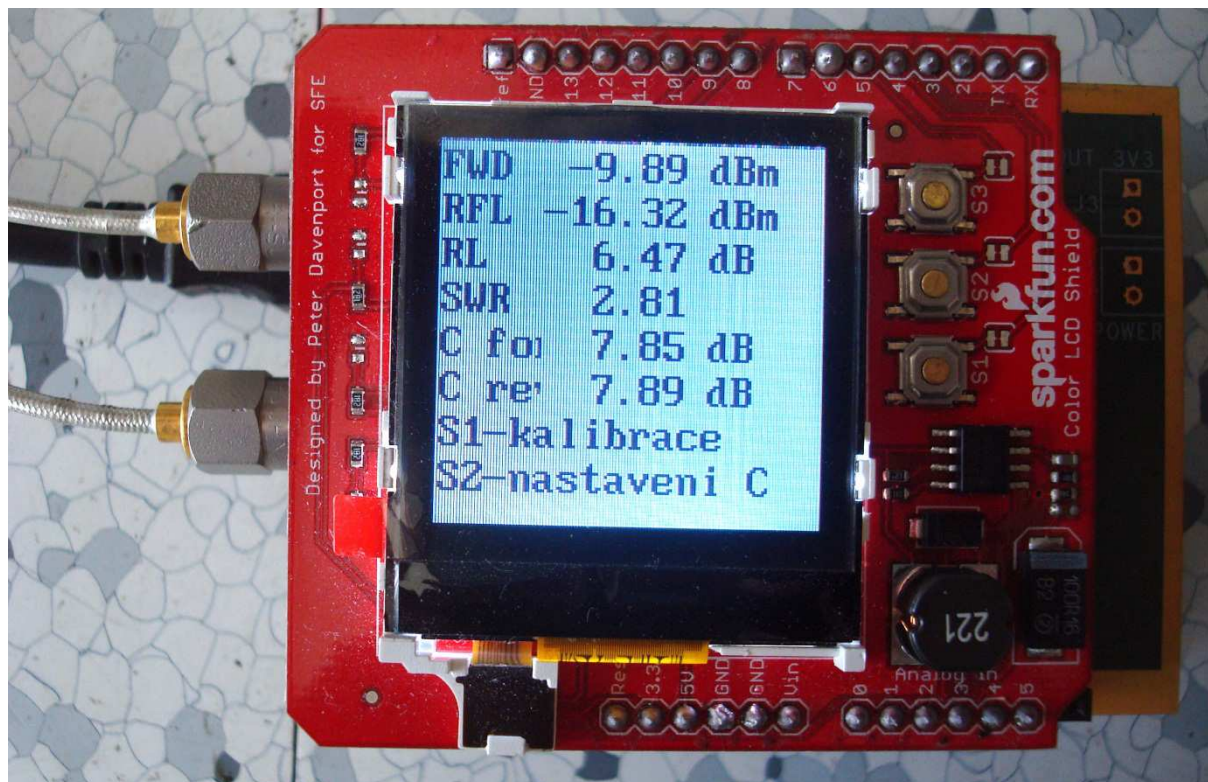
3.5.1 Program



Obr. 22 - Zjednodušený vývojový diagram

Po zapnutí se inicializuje displej, z EEPROM se načtou převodní hodnoty vstupních napětí na výkon v dBm a načte se předchozí zkalibrovaná hodnota vazebního útlumu směrové vazby. Poté se na displeji zobrazí pozadí. Pozadí obsahuje pouze nadpisy pro výkony, útlum odrazu, PSV a vazební útlum.

Ve smyčce programu se přepisují už pouze číselné hodnoty. Dále ve smyčce programu se pomocí AD převodníků odečítají vstupní napětí a zobrazují se číselné hodnoty. Dále se při každém průchodu smyčkou kontroluje, zda není zmáčknuté některé z tlačítek. Díky tomu, že se ve smyčce programu přepisují pouze číselné hodnoty, zvyšuje se rychlost zápisu na displej a omezuje se bliknutí displeje, které nastávalo při jeho celkovém přepsání.



Obr. 23 - Zobrazení hodnot na displeji

Na fotografii, Obr. 23, je zobrazený displej při měření útlumu odrazu. Na displeji, jak bylo řešeno výše, se přepisují pouze číselné hodnoty, které se v čase mění. To jsou FWD, RFL, RL a SWR.

Zkratka	Význam	Jednotky
FWD	Výkon postupné vlny	dBm
RFL	Výkon odražené vlny	dBm
RL	Útlum odrazu	dB
SWR	Poměr stojatých vln	-
C for	Změřený vazební útlum směrové vazby pro postupnou vlnu	dB
C ref	Změřený vazební útlum směrové vazby pro odraženou vlnu	dB

Tabulka 1 – Zobrazené hodnoty na displeji

Tabulka 1 popisuje významy jednotlivých zkratk vypsáných na displeji.

3.5.2 Převod a korekce naměřených hodnot

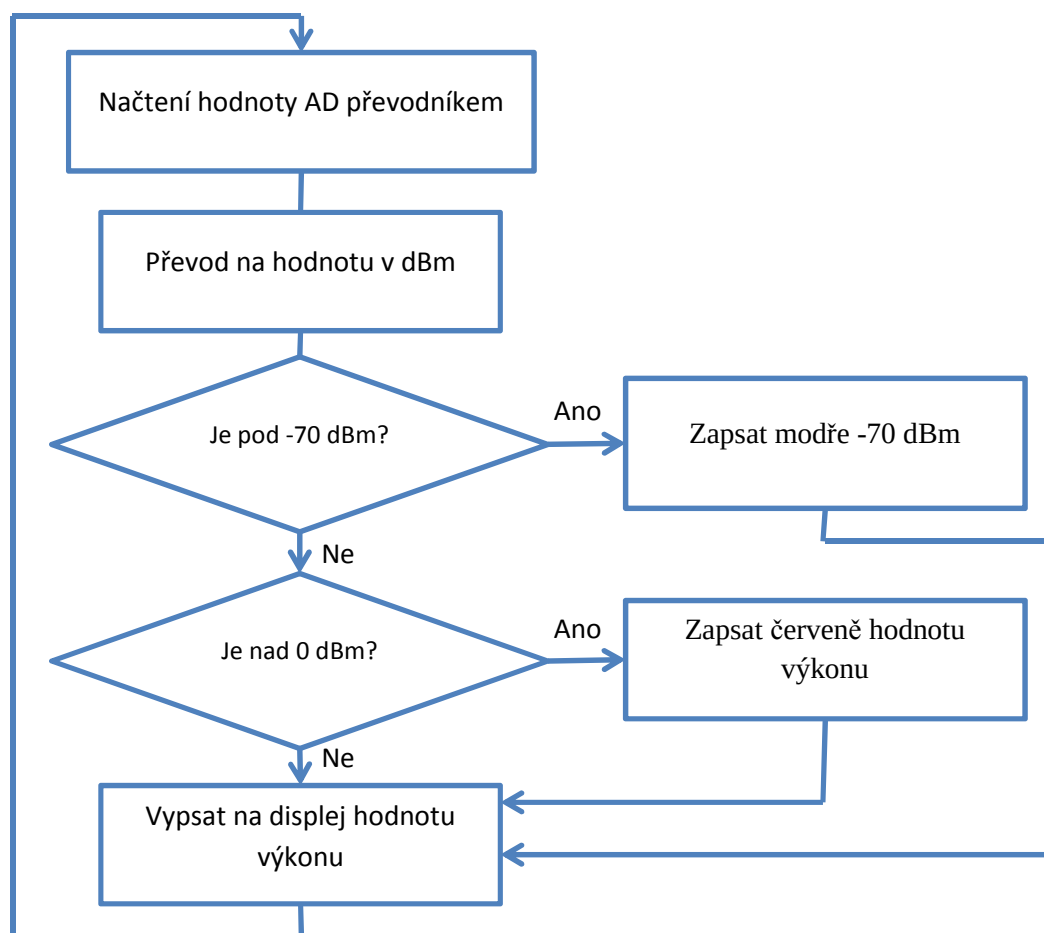
Odečtené hodnoty z AD převodníků se nejprve převedou na hodnotu v dBm.

$$P = kx + a \quad (30)$$

K je směrnice spočítaná jako $k = \frac{U_{nap}}{2^{10}-1} \cdot Slp$, kde U_{nap} je napájecí napětí mikrokontroléru, Slp je převod z napětí na dBm. a je posun pro nulové vstupní napětí. S tím, že převodní hodnoty jsou přímo

zadané z programu, s možností je později zkalibrovat. Přímé zadané převodní hodnoty jsou $k = 0,0958$ a $a = 77,8$. Tyto hodnoty vycházejí z převodní charakteristiky (Obr. 16) v datasheetu.

Poté se kontroluje, zda jsou v dynamickém rozsahu detektoru. Pokud jsou pod -70 dBm, zobrazí se pouze hodnota -70 dBm v modré barvě. Tímto se zabraňuje nestandardnímu chování při zobrazování čísel. Pokud je hodnota nad 0 dBm, tak se zobrazuje červeně. Tímto se zobrazuje upozornění na maximální vstupní výkon. Ještě před zapsáním čísel na displej, se přičte k hodnotám výkonu hodnota vloženého útlumu směrové vazby.



Obr. 24 - Postup převodu výkonu a výpisu na displej

Po tom, co jsou hodnoty výkonu postupné a odražené vlny načteny, se spočítá útlum odrazu.

$$RL = P_F - P_R \text{ (dB)} \quad (31)$$

Z útlumu odrazu se spočítá poměr stojatých vln.

$$psv = \frac{1 + 10^{\frac{-RL}{20}}}{1 - 10^{\frac{-RL}{20}}} \quad (32)$$

Převodní hodnoty se dají také nalézt pomocí kalibrace. Kalibrace spočívá v nalezení k a a z rovnice $P = k \cdot x + a$. K zjištění se použije připojení definovaných výkonů na vstupy detektoru a následný výpočet pomocí rovnic:

$$k = \frac{P_1 - P_2}{x_1 - x_2} \quad (33)$$

$$a = \frac{P_2 x_1 - P_1 x_2}{x_1 - x_2} \quad (34)$$

Kde P_1 a P_2 jsou definované výkony na vstupu a x_1 a x_2 jsou hodnoty odečtené pomocí AD převodníků v Arduinu.

Dále je možno změřit vazební útlum a korigovat změřené hodnoty výkonů. Toto se provede připojením směrové vazby, přizpůsobením jejího výstupu a připojením na vstup požadovaného výkonu. Tento vstupní výkon je přímo nastaven v programu, ale je možno ho změnit v závislosti na vazebním útlumu vazby tak, aby byl dostatečný vstupní na detektoru. Poté je proveden rozdíl mezi hodnotou zadanou v programu a hodnotou změřenou detektorem na vstupu pro postupnou vlnu.

$$C = P_{zad} - P_{měř} \quad (35)$$

Kde P_{zad} je zadaný výkon v programu a $P_{měř}$ je změřený výkon detektorem.

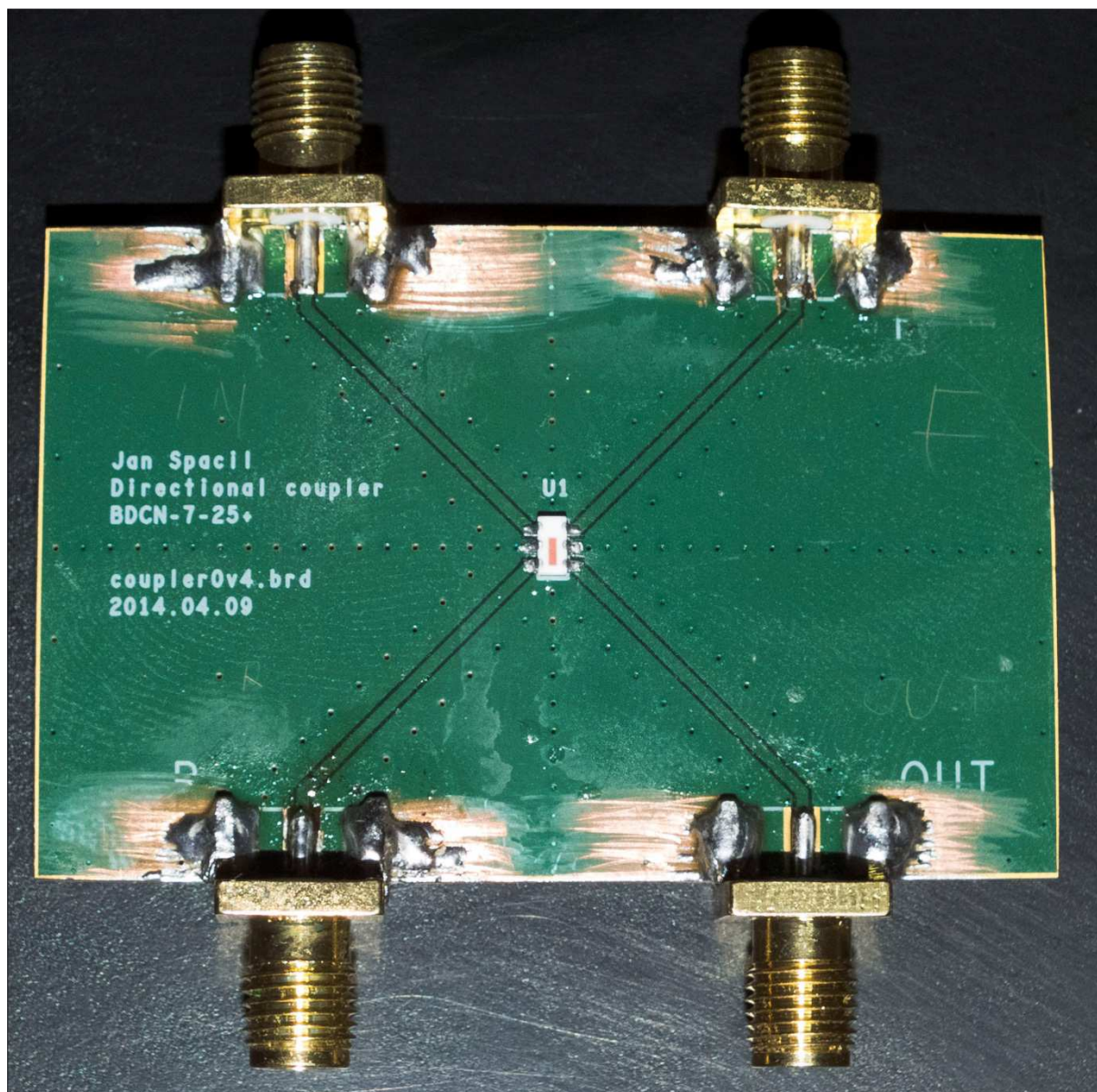
Tímto se změří hodnota vazby pouze pro postupnou vlnu. Aby se mohla změřit hodnota vazebního útlumu i pro odraženou vlnu, je třeba na vazbě zaměnit vstup a výstup. A poté změřit tento vazební útlum. Výpočet je zase proveden pomocí rov. 35.

4 Realizace a měření parametrů

Tato kapitola se bude věnovat měření parametrů jednotlivých částí PSV metru a měření útlumů odrazu s tímto navrženým PSV metrem.

4.1 Směrová vazba

Směrová vazba je jedna z hlavních součástí PSV metru a z velké části určuje jeho vlastnosti. Z tohoto důvodu je potřeba podrobně změřit její parametry.



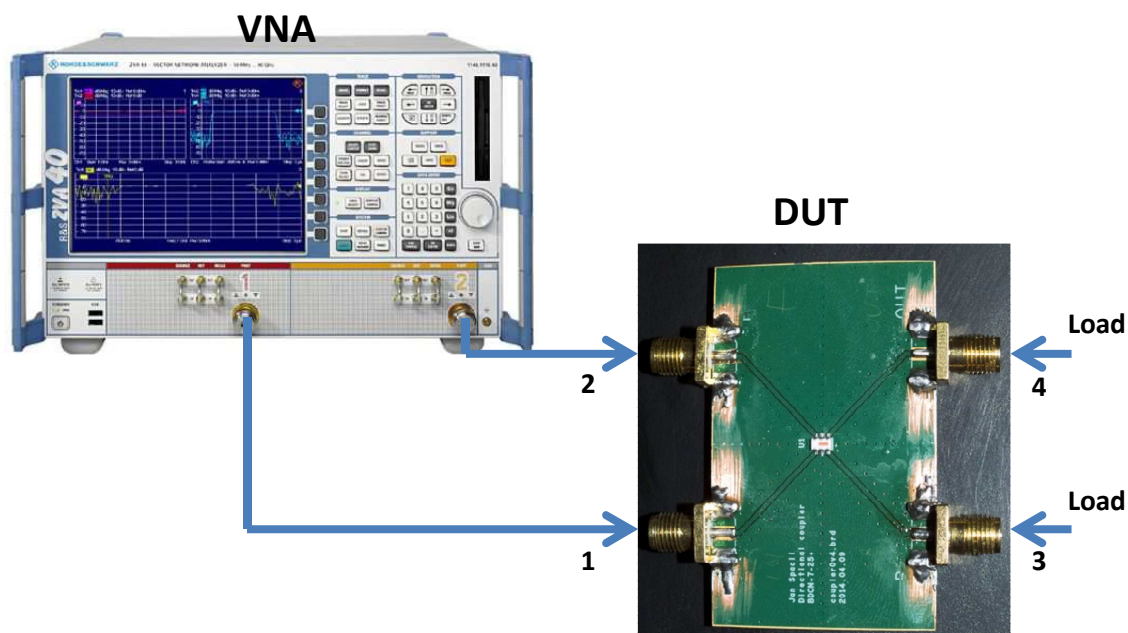
Obr. 25 - Osazená směrová vazba

DPS se směrovou vazbou byla navrhnutá pro konektory SMA od výrobce Telegärtner. Bohužel tyto konektory pro tloušťku DPS 1,5 mm nebyly k dispozici.

Při osazování se projevila výhoda vnitřního zapojení směrové vazby BDCN-7-25+, která nemá signálové vstupy uzemněné. Díky tomu bylo možno rychle zkontrolovat správné připojení pomocí ohmmetru.

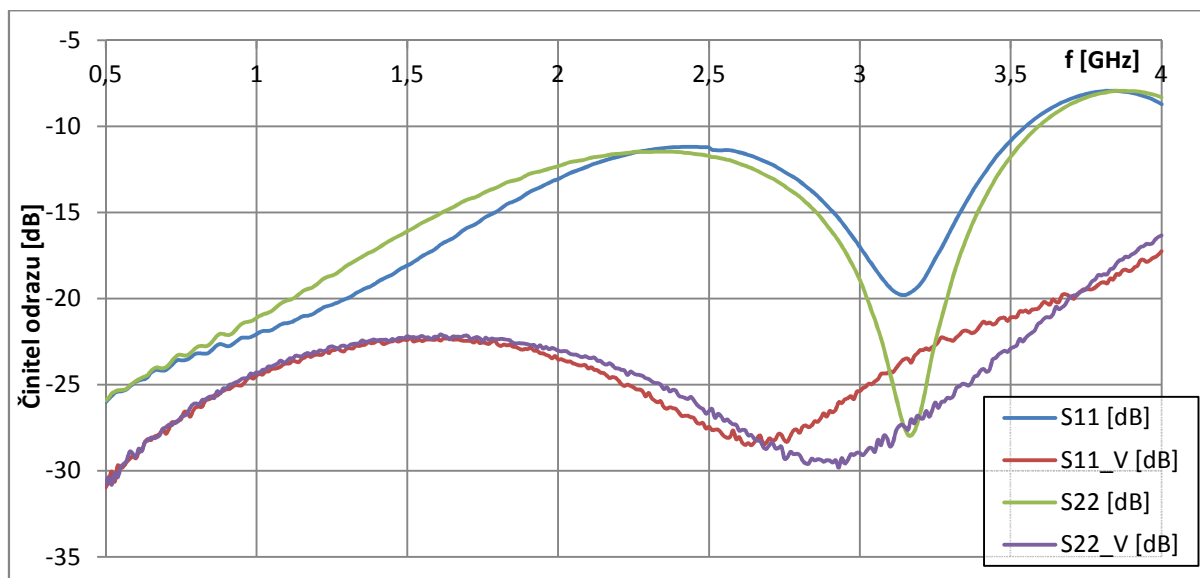
4.1.1 Změřené parametry

Změřené parametry směrové vazby budou porovnávány s parametry dodané výrobcem. Všechny parametry dodané výrobcem jsou označeny na konci _V.

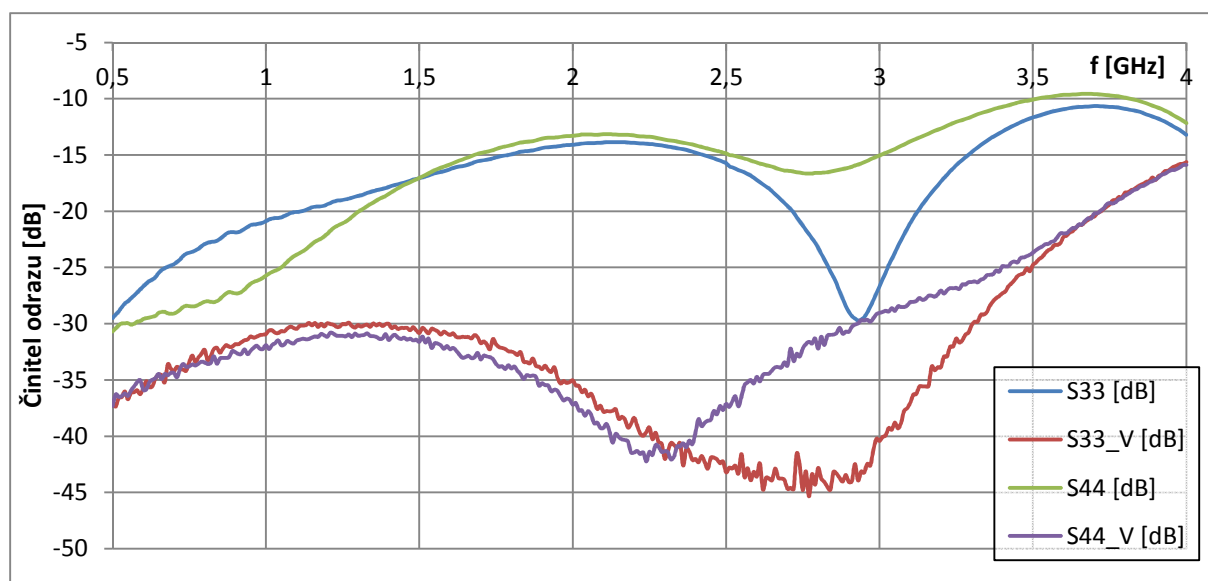


Obr. 26 - Zapojení při měření s-parametrů směrové vazby

Při měření s-parametrů směrové vazby byla směrová vazba a VNA zapojen dle Obr. 26. Aby bylo možno změřit všechny s parametry bylo třeba zapojit vazbu k VNA všemi možnými kombinacemi s tím, že nezapojené porty se přizpůsobily bezodrazovou koncovkou.

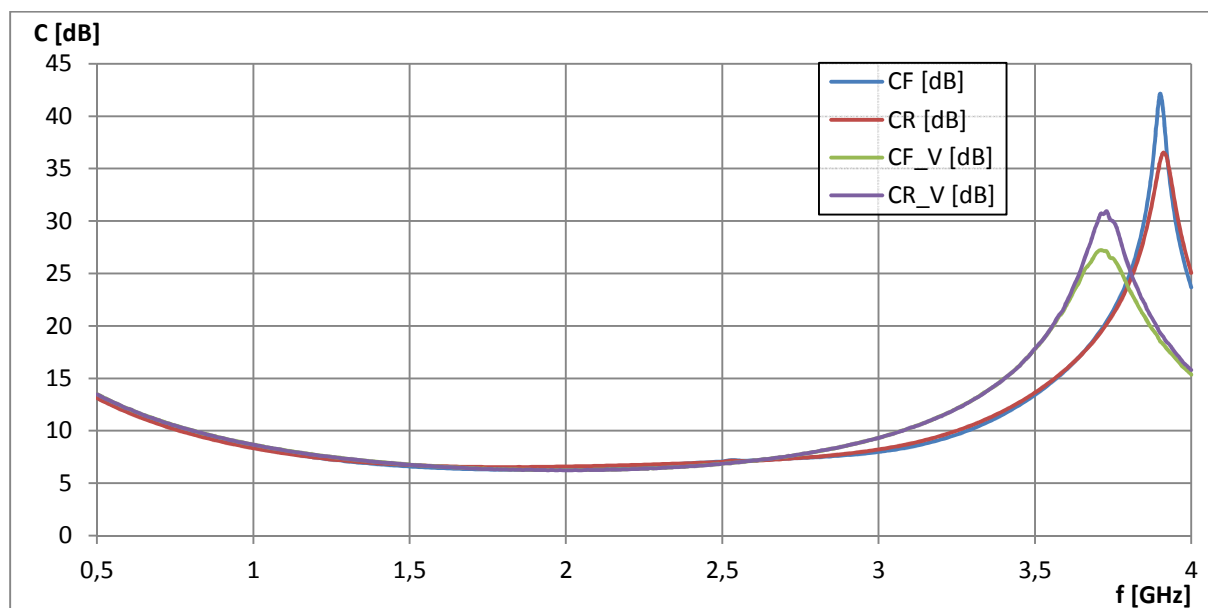


Obr. 27 - s11 a s22 směrové vazby BDCN-7-25+



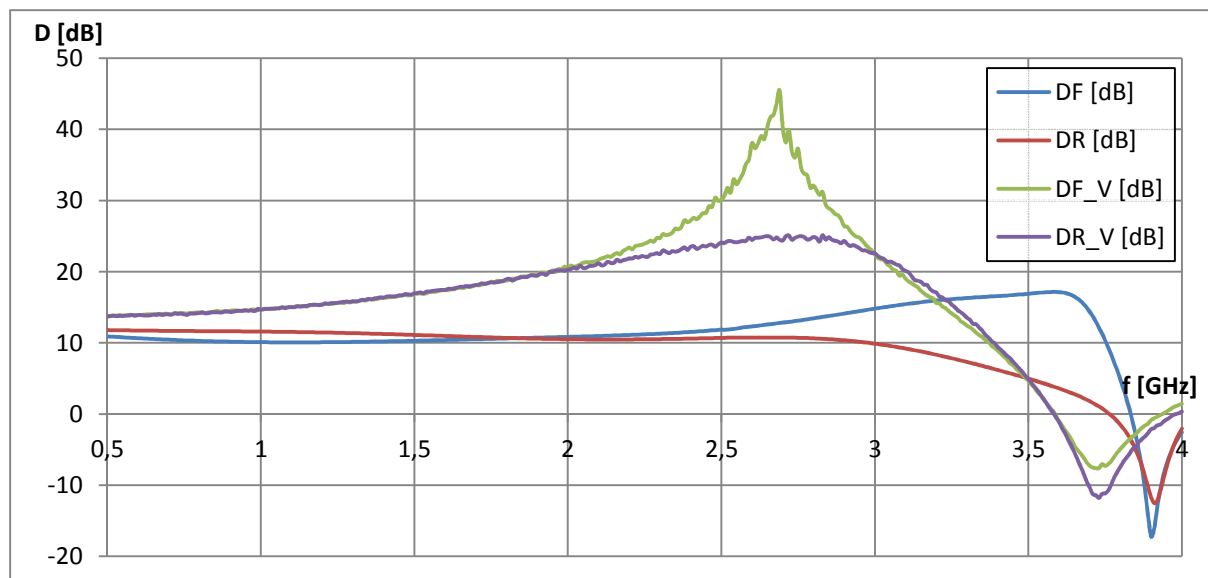
Obr. 28 - s33 a s44 směrové vazby BDCN-7-25+

Prizpůsobení jednotlivých portů DPS směrové vazby, parametry S11, S22, S33 a S44, je podstatně horší (Obr. 27 a Obr. 28), než je udáváno v katalogu směrové vazby. Ve zde sledovaném pásmu od 1 GHz do 2 GHz je ve větší části pásma pod -15 dB. Toto je celkem únosné, i když by bylo lepší, kdyby v celém tomto pásmu byly parametry pod -20 dB. Bylo by vhodné udělat lépe plošky pro SMA konektor a zkontrolovat výpočet koplanárního vedení.



Obr. 29 - Vazební útlum směrové vazby BDCN-7-25+

Na Obr. 29 jsou průběhy vazebního útlumu změřeného na vazbě a průběhy změřené výrobcem. CF je vazební útlum pro postupnou vlnu a CR je vazební útlum pro odraženou vlnu. Z porovnání s hodnotami dodanými výrobcem vyplývá, že dosahuje trochu lepších parametrů v pásmu od 2,7 GHz do 3,3 GHz. Rozdíl je v plošším průběhu směrovosti.

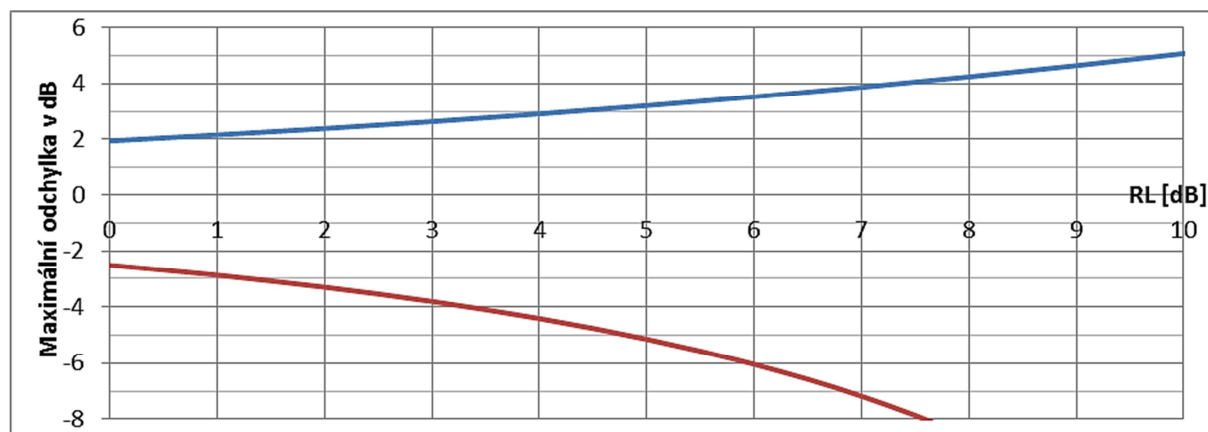


Obr. 30 - Směrnost směrové vazby BDCN-7-25+

Hodnoty směrnosti, Obr. 35, v pásmu od 1 GHz do 2 GHz jsou horší o 3 až 10 dB. Tento rozdíl je poměrně dost velký a bude mít velký vliv na měření PSV. Směrnost byla z naměřených s- parametrů vypočtena dle rovnice Útlum odrazu

$$RL = 10 \log \frac{P_1}{P_{01}} = 20 \log \frac{1}{|s_{11}|}, [dB]$$

(17).

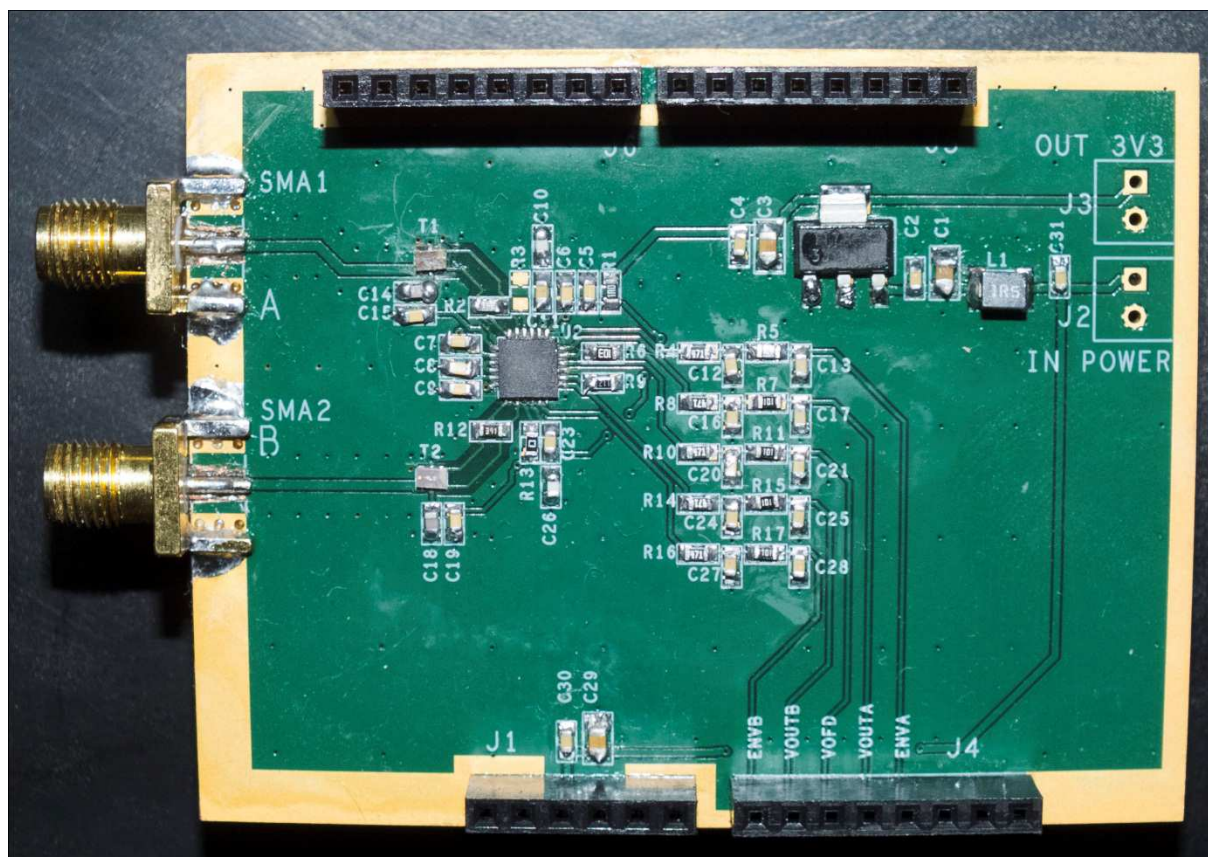


Obr. 31 - Nejistota měřeného útlumu odrazu při 1 GHz

Na Obr. 31 je zobrazená nejistota měření daného útlumu odrazu pro směrnost 10 dB. Tento graf je vypočítán pomocí rovnic 11 a 12.

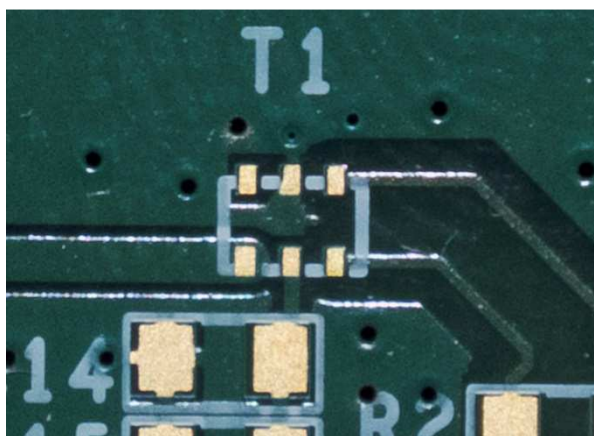
Z tohoto grafu vyplývá, že i měření velmi malých útlumů odrazu bude zatíženo velmi velkou nejistotou měření. Z tohoto důvodu bude lepší použít směrové vazby, které jsou sice úzkopásmové, ale ve svém pásmu dosahují dobrých směrností, 25 dB a více.

4.2 Detektor



Obr. 32 - Osazená DPS detektoru

Při osazování DPS detektoru byl stejný problém s osazením SMA konektoru, kvůli špatnému odmaskování středního vodiče. Takže se musel opatrně připájet, aby nedošlo ke spojení s okolní zemí.

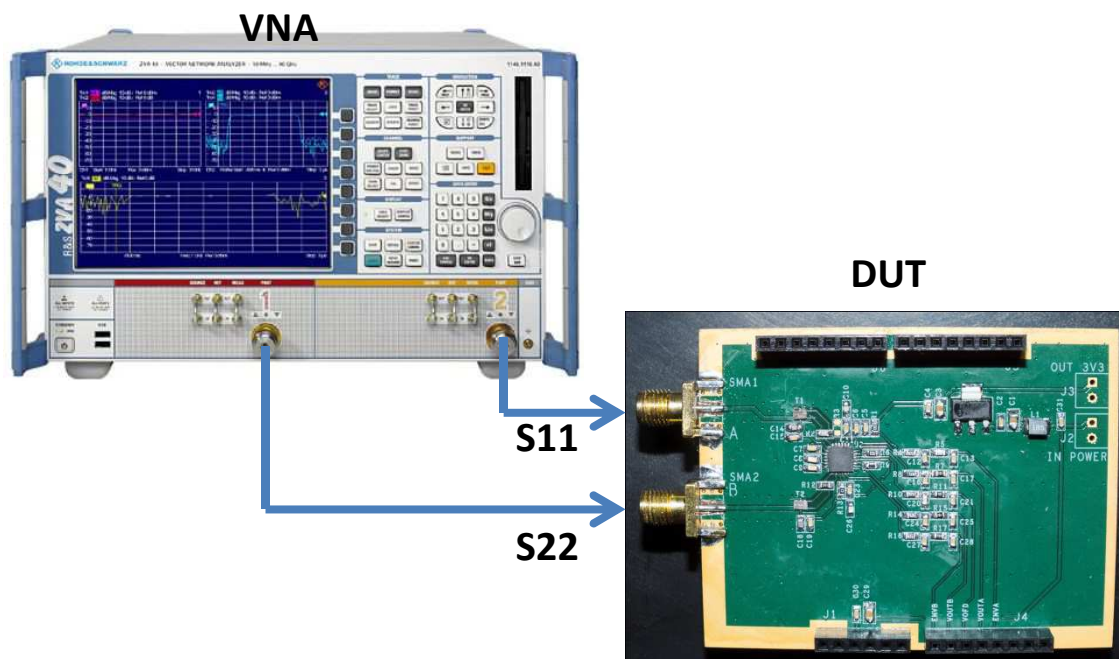


Obr. 33 – Plošky pro symetrizační transformátor

Dále byl problém se špatně zvoleným symetrizačním transformátorem z hlediska jeho rozměrů a umístění vývodů. Vývody nezasahovaly do stran pouzdra transformátoru a plošky na DPS nebyly přístupné ze stran transformátoru. Kvůli tomu musel být transformátor připájen pomocí pasti a následným přetavením pomocí horkovzdušné stanice. V případné další verze by bylo vhodné změnit velikost plošek na DPS nebo použít jiný symetrizační transformátor, který je vhodný pro ruční osazování.

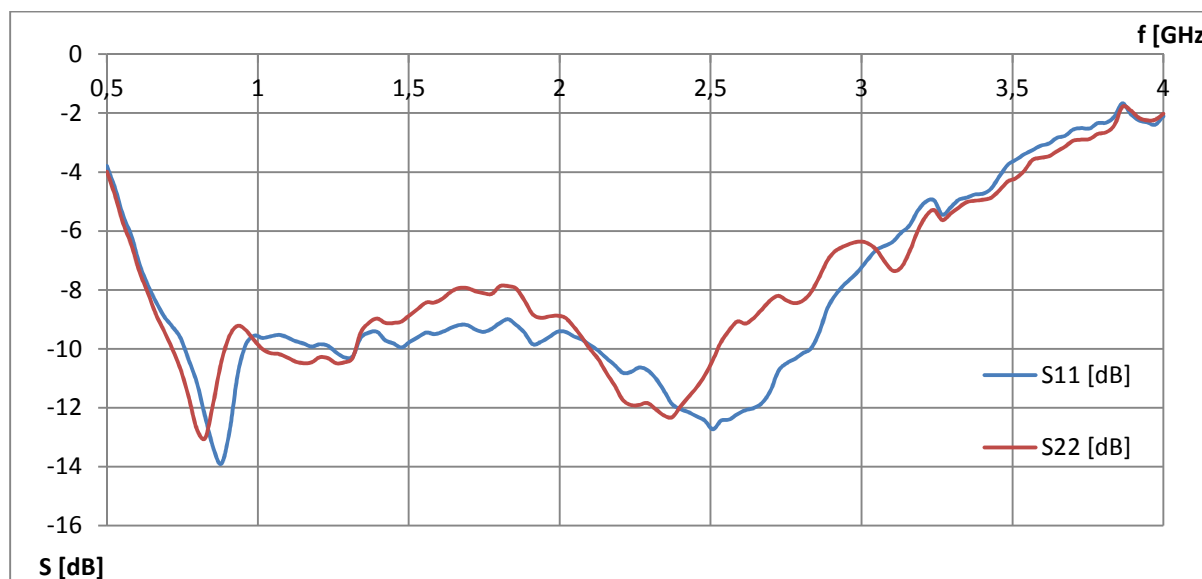
4.2.1 Změřené parametry

Při měření převodních charakteristik a linearity převodu byla také přibližně změřena izolace mezi kanály A a B. Izolace na frekvenci 1 GHz byla lepší jak 65 dB a na 2 GHz byla lepší jak 60 dB. Výrobce v katalogovém listu udává hodnoty pro symetrické buzení na 2 GHz lepší jak 55 dB. Vzhledem ke směrovosti mnou vyrobené a komerčně vyráběných směrových vazeb tato hodnota nebude přidávat další nejistotu při měření PSV.



Obr. 34 - Měření činitele odrazu vstupů detektoru

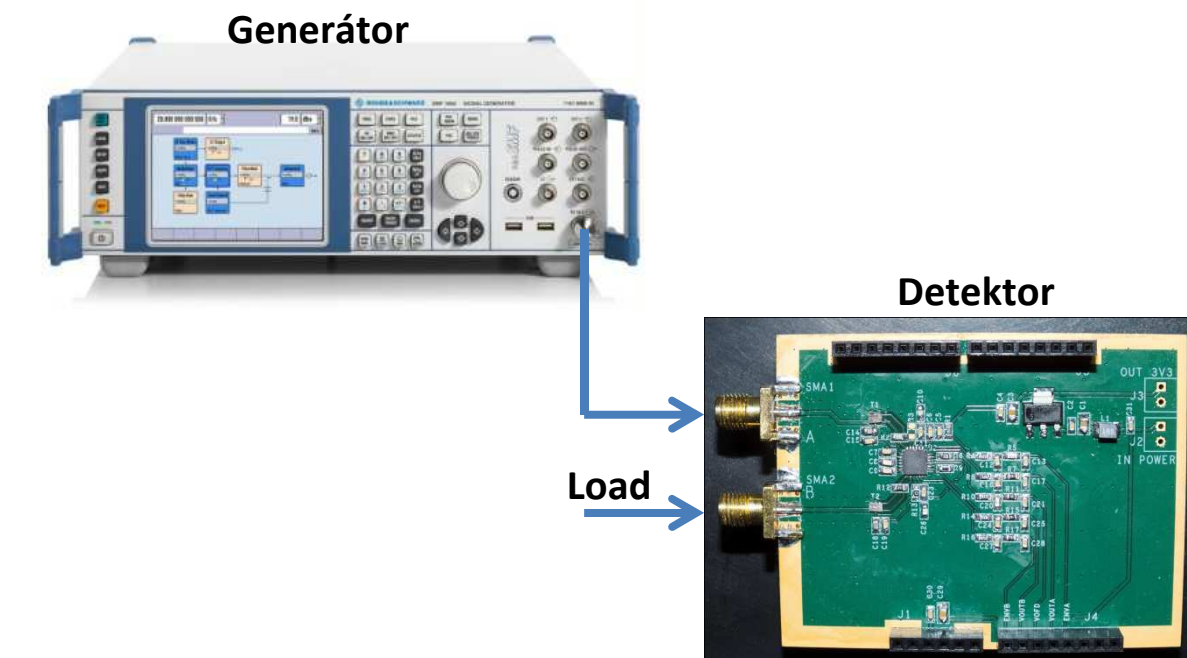
Dle zapojení na Obr. 34 byl měřen činitel odrazu vstupních portů detektoru.



Obr. 35 - S11 a S22 detektoru a S11 symetrizačního transformátoru

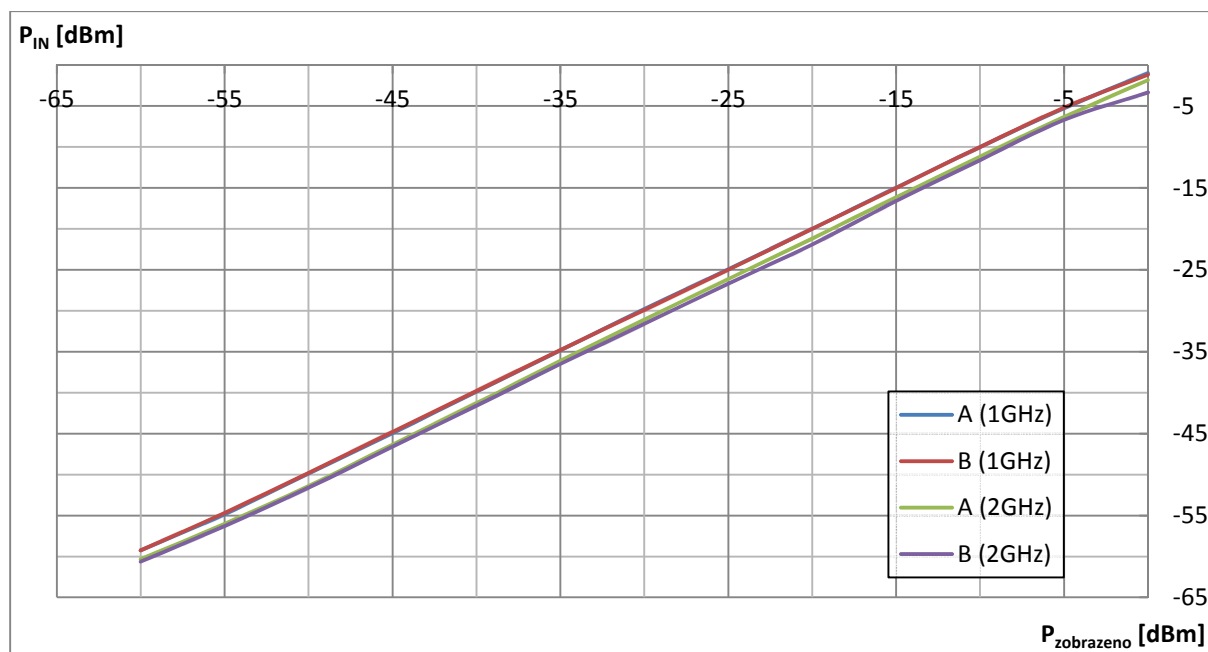
Na Obr. 35 jsou zobrazeny S11 a S22 vstupních portů detektoru. Hodnoty se pohybují od 0,7 GHz do 2,5 GHz kolem -10 dB. Tato hodnota není úplně ideální, ale vyhovující. Případně je možné ještě

doplnit vstupy detektoru atenuátory pro zlepšení S11 a S22. Díky vysokému dynamickému rozsahu je toto možné bez zhoršení ostatních parametrů detektoru.

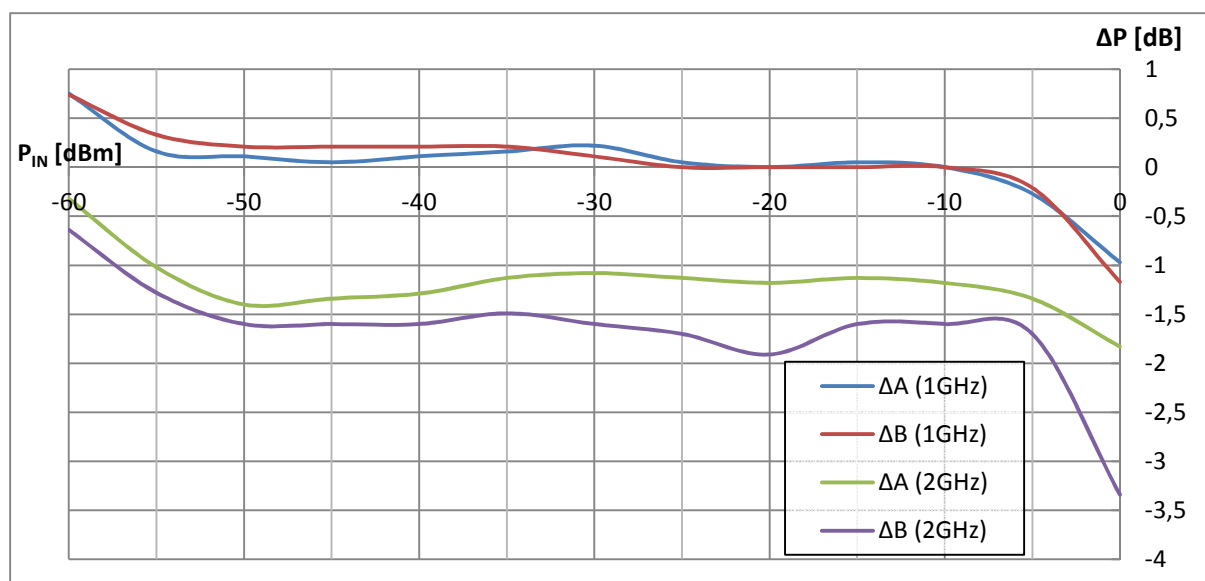


Obr. 36 - Zapojení pro kalibraci a měření převodních charakteristik

Zapojení dle Obr. 36 bylo použito pro kalibraci detektoru a pro měření převodních charakteristik detektoru. Nepoužitý vstup detektoru byl vždycky zakončen bezodrazovou koncovkou.



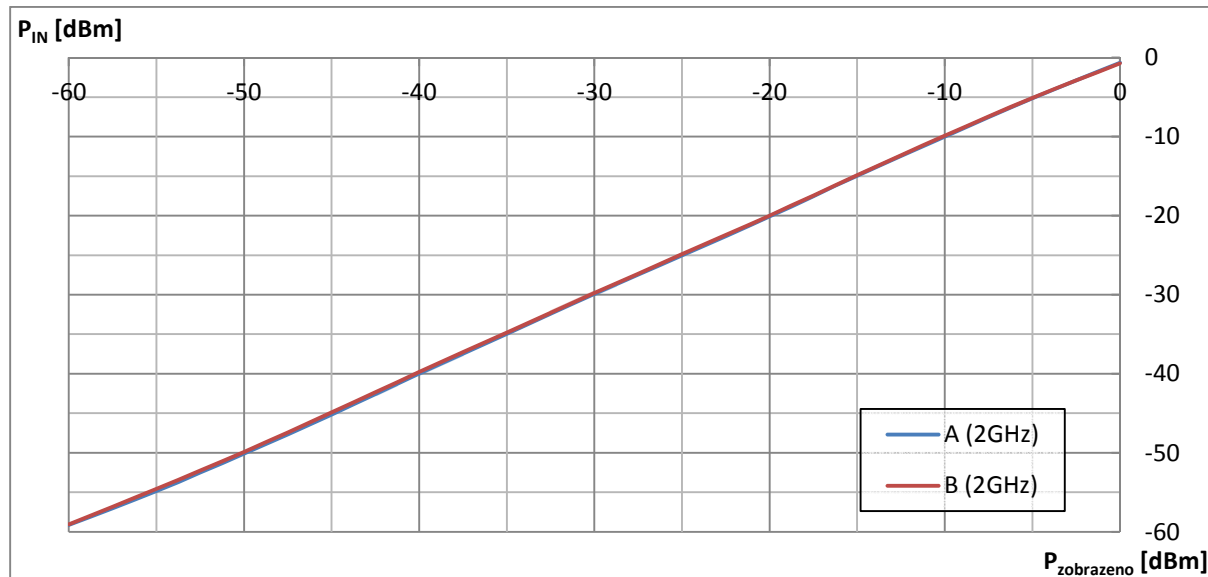
Obr. 37 - Měřené hodnoty při kalibraci na 1 GHz



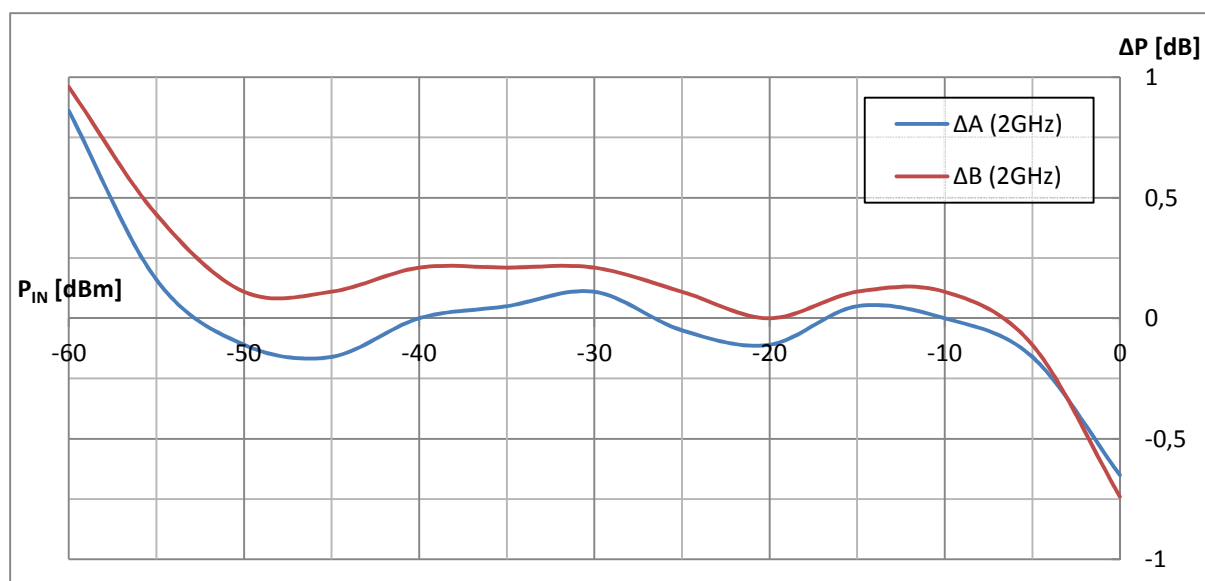
Obr. 38 - Odchylka měřených hodnot při kalibraci na 1 GHz

Po zkalibrování na 1 GHz jsou změřené odchylky od nastaveného výkonu na generátoru v rozsahu vstupních výkonu -55 až -5 dBm do 0,5 dB u obou kanálů. Na odchylkách se může také podepsat nejistota mezi zadanou hodnotou výkonu na generátoru a hodnotou výstupního výkonu.

Když se při zkalibrování na 1 GHz přivedl na vstup detektoru výkon na 2 GHz, došlo pouze k posuvu měřených hodnot o cca 1 dB pro port A a pro B o cca 1,5 dB. Kvůli tomuto posuvu se musí udělat při změně frekvence znovu kalibrace vstupů.



Obr. 39 - Měřené hodnoty při kalibraci na 2 GHz



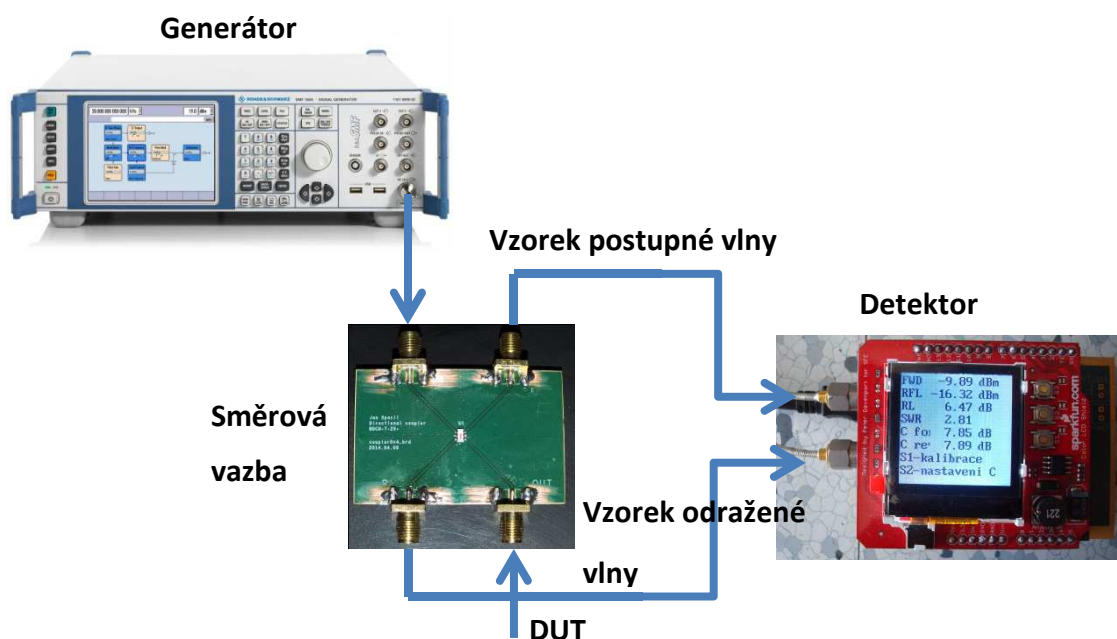
Obr. 40 - Odchylka měřených hodnot při kalibraci na 2 GHz

Jak je z Obr. 40 vidět, po zkalibrování na 2 GHz je odchylka od výkonu nastaveném na generátoru do 0,25 dB v rozsahu vstupních hodnot od -55 do -5 dBm.

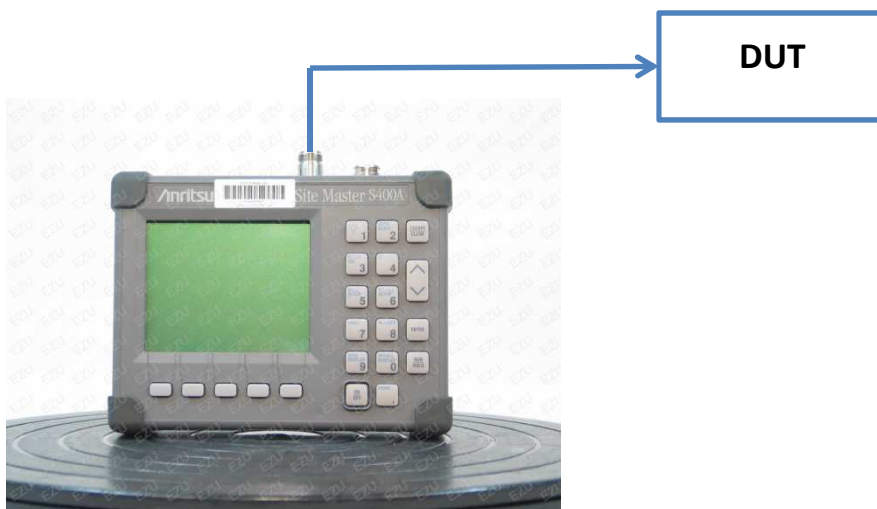
Z těchto změřených odchylek vyplývá, že detektor měří s velmi malou odchylkou s dynamickým rozsahem 50 dB a s odchylkou do 1 dB v rozsahu vstupních hodnot výkonu od -60 do 0 dBm.

4.3 Měření celku a porovnání s komerčním produktem

Při měření jako celku se budou měřit předem známé zátěže pomocí navrženého detektoru a směrové vazby.



Obr. 41 – Měření jako celek



Obrázek 42 - Měření se Sitemaster S400A

Na Obr. 41 je zapojení sestavy při měření PSV. Měřený útlum odrazu (PSV) se bude nastavovat pomocí attenuátorů zakončených zkratem (DUT). Tímto lze velmi dobře nastavit útlum odrazu o hodnotě dvojnásobku hodnoty útlumu attenuátoru.

Nastavený RL	1GHz	2 GHz	1GHz	2 GHz	Sitemaster S400A
RL [dB]	RL _{measure} [dB]	RL _{measure} [dB]	PSV [-]	PSV [-]	RL [dB]
Zkrat	0,84	2,05	20,7	8,5	0
Otevřeny	2,27	2,14	7,7	8,2	0
konec					
4	7,2	5,38	2,5	3,3	4
6	6	1,53	3,0	11,4	6

Tabulka 2 – Změřené hodnoty útlumu odrazu pro 1 GHz a 2 GHz

Při měření byla nastavena výstupní hodnota výkonu generátoru -10 dBm. Vzhledem k vazebnímu útlumu směrové vazby (Obr. 29) bude vstupní výkon na detektoru pro postupnou vlnu -18 dBm na 1 GHz a -16 dBm na 2 GHz. Tímto se zajistí, že bude detektor pracovat v lineární části své charakteristiky, kde je velmi malá nejistota měření. Vzhledem k malé směrovosti vazby jsou měřené hodnoty zatížené velkou nejistotou měření, viz Obr. 31.

	1GHz	2 GHz	1GHz	2 GHz	Sitemaster S400A
RL	RL _{measure} [dB]	RL _{measure} [dB]	PSV [-]	PSV [-]	RL [dB]
Zkrat	0,37	0,11	47,0	157,9	0
Otevřený konec	1,26	1,86	13,8	9,4	0
2	1,1	1,73	15,8	10,1	4
4	8,54	7,48	2,2	2,5	4
6	9,27	8,98	2,0	2,1	6
8	4,39	7,42	4,0	2,5	8
30	10,24	10,35	1,9	1,9	30

Tabulka 3 – Změřené hodnoty útlumu odrazu pro 1 GHz a 2 GHz se zařazenými 30 dB atenuátory

Dále jsem zkusil omezit odrazy mezi detektorem a směrovou vazbou vřazením atenuátorů. Vřazeny byly atenuátory o hodnotě 30 dB. Hodnoty těchto atenuátorů byly připočteny v rámci kalibrace vazebního útlumu směrové vazby. Vysoká hodnota vřazených atenuátorů příliš neomezuje měření vzhledem k velkému dynamickému rozsahu detektoru.

Při měření byla nastavena výstupní hodnota výkonu generátoru 10 dBm. Vzhledem k vazebnímu útlumu směrové vazby (Obr. 29) bude výkon na vstupu detektoru -28 dBm na 1 GHz a -26 dBm na 2 GHz. Pokud by vstupní výkon detektoru klesl pod hodnotu -65 dBm, tak by byl indikován na displeji.

Při měření útlumu odrazu došlo k mírnému zlepšení. Při zakončení impedancí s útlumem odrazu 30 dB se zobrazuje hodnota kolem 10,2 dB, která odpovídá hodnotě směrovosti vazby. S touto směrovou vazbou se dají měřit útlumy odrazu do přibližně 4 až 6 dB s tím, že tato hodnota je zatížena poměrně velkou chybou, viz Obr. 31.

5 Závěr

V rámci této bakalářské práce byl navrhnout detektoru pro PSV metr s obvodem LTC5583. Dále byl navržen a naprogramován program pro Seeeduino, který obsluhuje displej se zobrazenými měřenými hodnotami. Nakonec byla navržena deska plošných spojů pro směrovou vazbu BDCN-7-25+, který byla v tomto PSV metru použita.

Hlavní úpravou detektoru by měla být změna symetrizačních transformátorů za typy vhodné pro ruční osazení a úprava plošek na DPS pro SMA konektor. Detektor vykazoval dobré parametry, co se týče linearity převodu vstupních výkonů. Bylo by však vhodné zlepšit přizpůsobení vstupů detektoru.

Použitá širokopásmová směrová vazba se u skalárního měření ukázala jako ne příliš vhodné řešení. Hlavní nevýhodou této vazby byla její malá směrovost. Vzhledem k tomu, že tato část PSV metru je modulární, tak lze změnit směrovou vazbu za jinou s vhodnějšími parametry. Vhodnou volbou by mohli být úzkopásmové směrové vazby, které by vykazovaly lepší směrovost (nad 25 dB). Nevýhodou těchto vazeb je, že mají malé šířku pásma kolem 100 MHz.

Další možnosti rozšíření této práce jsou především v softwarových vylepšeních. Jedním z možných vylepšení by mohla být frekvenční korekce měřeného výkonu a tím zjednodušit kalibraci. Další vylepšení může být v možnosti uložit větší množství zkalibrování vstupů detektoru a vazebních útlumů do paměti. Dále je zde možnost měřená data posílat do PC.

Reference

- [1] V. Tysl a V. Růžička, Teoretické základy mikrovlné techniky, Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989.
- [2] D. M. Pozar, Microwave Engineering, John Wiley & Sons, Inc, 2012.
- [3] T. K. Ishii, Handbook of Microwave Technology: Components and devices, San Diego: Academic Press Limited, 1995.
- [4] K. Hoffmann a H. Přemysl, Vysokofrekvenční a mikrovlná měření, Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006.
- [5] MiniCircuits, „BDCN-7-25+ - Bi-Directional Coupler,“ [Online]. Available: www.minicircuits.com/pdfs/BDCN-7-25+.pdf. [Přístup získán 12 Březen 2014].
- [6] LTC5583 - Matched Dual-Channel 6GHz RMS Power Detector, Milpitas: Linear Technology Corporation, 2010.

Přílohy

Příloha 1 – Schéma zapojení

Příloha 2 – Program pro Seeeduino