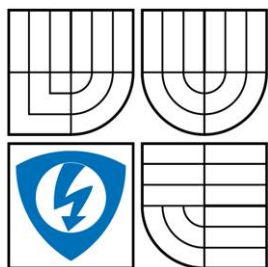


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SPECIÁLNÍ METODY MIKROVLNNÝCH VEKTOROVÝCH MĚŘENÍ

SPECIAL METHODS FOR MICROWAVE VECTOR MEASUREMENTS

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. TOMÁŠ URBANEC

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. JIŘÍ SVAČINA CSc.

BRNO 2007

LICENČNÍ SMLOUVA POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Tomáš Urbanec

Bytem: Nová 377, 683 35 Letonice

Narozen/a (datum a místo): 7. 6. 1976 v Třinci

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

.....

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

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

- disertační práce
- diplomová práce
- bakalářská práce
- jiná práce, jejíž druh je specifikován jako

.....

(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Speciální metody mikrovlnných vektorových měření

Vedoucí/ školitel VŠKP: Prof. Ing. Jiří Svačina CSc.

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

tištěné formě – počet exemplářů

elektronické formě – počet exemplářů

* hodící se zaškrtněte

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

V práci je popsán princip měření metodou šestibranu, jeho teoretický návrh, vliv jeho parametrů na přesnost měření a vlastnosti dalších obvodů pro zpracování jeho signálů. Jednoduchý šestibran byl plně realizován a jeho parametry prezentovány. Jako vlastní přínos je navržen nový přístup k použití metody s více detektory. Jeho základními vlastnostmi jsou více funkčních šestibranů na jednom pracovním kmitočtu a rozšíření pracovního pásma na rozsah 1 : 100 i více. Takový šestibran byl navržen pro rozsah 50 až 2680 MHz, realizován a jeho parametry prezentovány.

Abstract

Theoretical principles of the sixport measurement method are presented. Description of theoretical design and influence of its parameters on measurement precision follows. Simple sixport measurement system was made and its parameters are described. As the main thesis contribution there is described a new approach to method with more detectors in the system. Main features are more valid sixports at one specific frequency and frequency bandwidth available up to 1 : 100 and more. Such a wideband measurement system was designed for the frequencies between 50 and 2680 MHz and its parameters are presented in the work.

Klíčová slova

Vektorová měření, měřící metoda šestibranu, vektorový obvodový analyzátor, činitel odrazu, širokopásmová měření, kalibrace.

Keywords

Vector measurements, sixport measurement method, vector network analyzer, reflection coefficient, wideband measurements, calibration.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

URBANEC, T. Speciální metody mikrovlnných vektorových měření . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 90 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou disertační práci na téma „Speciální metody mikrovlnných vektorových měření“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího disertační práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Obsah

1	ÚVOD	1
2	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ.....	2
2.1	METODA MĚŘICÍHO VEDENÍ	2
2.2	METODA PORUCHOVÉHO DVOJBRANU	3
2.3	VEKTOROVÝ OBVODOVÝ ANALYZÁTOR.....	4
2.4	METODA MIKROVLNNÉHO ŠESTIBRANU	5
2.4.1	<i>Princip metody.....</i>	<i>5</i>
2.4.2	<i>Konkrétní zapojení mikrovlnného šestibranu</i>	<i>8</i>
2.4.3	<i>Kalibrace metody.....</i>	<i>10</i>
2.5	ROZBOR VLIVŮ VZDÁLENOSTI BODŮ Q OD STŘEDU JEDNOTKOVÉ KRUŽNICE	11
2.6	POLOHA BODŮ Q OKOLO JEDNOTKOVÉ KRUŽNICE	16
3	CÍLE ŘEŠENÍ.....	20
4	VLASTNÍ ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	21
4.1	NÁVRH ŠIROKOPÁSMOVÉHO ŠESTIBRANU	21
4.2	NÁVRH NOVÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA PRINCIPU ŠESTIBRANU	23
4.3	TEORETICKÝ NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU	24
4.3.1	<i>Tvorba kritériální funkce</i>	<i>24</i>
4.3.2	<i>Použití numerických metod pro výpočet měřicího systému.....</i>	<i>26</i>
4.4	REALIZACE JEDNODUCHÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA PRINCIPU METODY ŠESTIBRANU.....	31
4.4.1	<i>Realizace jednoduchého šestibranu.....</i>	<i>31</i>
4.4.2	<i>Realizace bloku úpravy a zesílení signálu</i>	<i>37</i>
4.4.3	<i>Realizace bloku A/D převodu a komunikace s PC.....</i>	<i>38</i>
4.4.4	<i>Programové vybavení pro PC.....</i>	<i>39</i>
4.5	VÝSLEDKY MĚŘENÍ POMOCÍ JEDNODUCHÉHO ŠESTIBRANU	49
4.6	NÁVRH KALIBRAČNÍ SADY PRO ŠESTIBRAN.....	56
4.7	REALIZACE ŠIROKOPÁSMOVÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA PRINCIPU ŠESTIBRANU	59
4.8	VÝSLEDKY MĚŘENÍ POMOCÍ ŠIROKOPÁSMOVÉHO MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA PRINCIPU ŠESTIBRANU.....	67
	ZÁVĚR.....	74
	LITERATURA.....	76
	SEZNAM PŘÍLOH	79

1 Úvod

V mikrovlnné technice je stálá potřeba měření, vyplývající z dynamického rozvoje tohoto perspektivního oboru. Měření se dělí na skalární a vektorová. Skalární měření umožňují měřit pouze velikost veličin, např. amplitudu činitele odrazu, bez informace o argumentu této měřené veličiny. Takováto měření jsou dostatečná převážně v případech, kdy potřebujeme měřit mikrovlnný výkon, útlum prostředí či obvodu, např. vedení, míru přizpůsobení obvodů (tedy velikost odražené vlny od obvodu) atp. Použití skalárních měření však neposkytuje dostatek informací v případě návrhu a tvorby například antén, kdy je potřeba znát nejen modul činitele odrazu, ale také jeho argument, aby bylo možno určit impedanci navrhované antény, obvodu. Další uplatnění vektorová měření nacházejí v medicíně při zobrazovacích technikách, v diagnostice, v průmyslových aplikacích apod.

Vektorová měření tedy zaujímají důležité postavení nejen v mikrovlnné technice. Standardním postupem pro vektorová měření je použití vektorového obvodového analyzátoru, který umožňuje měřit v širokém rozsahu kmitočtů s vysokou přesností určení jak amplitudy mikrovlnného signálu, tak i jeho fáze. Daní za přesné výsledky měření je však jeho vysoká obvodová složitost daná nutností několikeré kmitočtové konverze i náročnost na přesnost realizace a z toho vyplývající vysoká cena takovéhoho zařízení.

Proto byly hledány alternativní postupy, jak vektorová měření provést. Jeden z využívaných postupů je tzv. metoda šestibranu, která je schopna pomocí měření čtyř hodnot činného výkonu následně určit komplexní činitel odrazu na jedné z bran.

Dalšími známými metodami jsou metoda měřícího vedení, která patří k nejstarším, eventuálně další varianty, jako je metoda pětibranu, nebo metoda poruchového dvojbranu.

2 Současný stav řešení

2.1 Metoda měřícího vedení

Měření tímto postupem je jedním z nejstarších a pro jeho provedení potřebujeme pouze vhodné měřící vedení pro dané kmitočtové pásmo, tedy pro nízké kmitočty lze použít koaxiální měřící vedení, pro vyšší je nutno použít vlnovodnou linku.

Celá metoda pracuje s měřením stojatých vln na vedení, kdy při zatížení vedení přizpůsobenou zátěží je napětí na poloze nezávislé, ve všech ostatních případech vzniká stojaté vlnění. Měřením maximálního a minimálního napětí je možno určit poměr stojatých vln ze vztahu

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

odtud můžeme určit velikost činitele odrazu

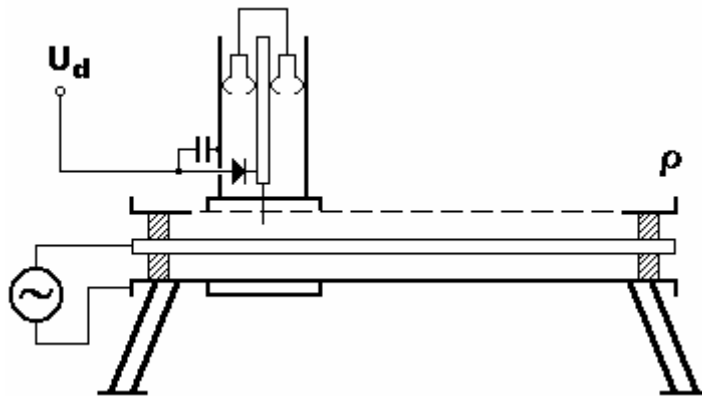
$$|\rho| = \frac{PSV - 1}{PSV + 1}. \quad (2)$$

Jeho argument je pak dán vztahem

$$\varphi_{\rho} = \pi - \frac{4 \cdot \pi \cdot x_m}{\lambda_v}, \quad (3)$$

kde x_m je vzdálenost minima stojatého vlnění od polohy, ve které bylo při připojení zkratu. λ_v je délka vlny na vedení, či ve vlnovodu. Výsledný komplexní činitel odrazu je tedy

$$\rho = |\rho| \cdot e^{j\varphi_{\rho}}. \quad (4)$$

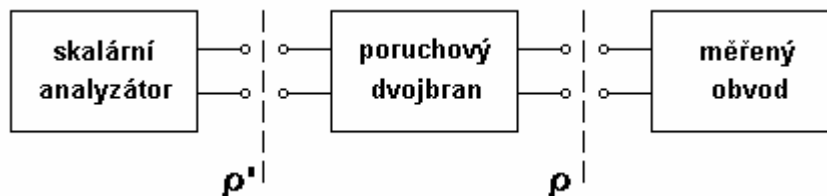


Obr.1 Principiální konstrukce měřícího vedení

Vlastnosti metody jsou dány hlavně konstrukčními vlastnostmi použitého vedení, tedy šířkou pásma přenosu u vlnovodu, u koaxiálního provedení je nejnižší pracovní kmitočet dán délkou vedení, pro který je jeho délka rovna $\lambda_v/2$. Dynamický rozsah měření činitele odrazu je dán rozlišovací schopností detektoru, protože při malém činiteli odrazu bude stojaté vlnění jen nepatrné a maximální i minimální napětí budou téměř totožná. Rozlišení ve fázi je dáno přesností posuvného mechanismu měřícího vedení a odečítání jeho polohy. Omezením zde je také vliv měřící sondy na rozložení pole v okolí vedení. Proto se používá laděný detektor s velmi volnou vazbou tak, aby co nejméně deformoval měřený průběh.

Metoda se používá spíše pro měření na jednom kmitočtu a proměření činitele odrazu v závislosti na frekvenci je díky manuální obsluze velice zdoluhavé. Automatizace měření se provádí nahrazením ručního posuvu posuvem motorovým, řízeným výpočetní technikou.

2.2 Metoda poruchového dvojbranu



Obr.2 Princip metody poruchového dvojbranu

V roce 1998 publikovali Hoffmann a Škvor v [1] tuto metodu, jako doplněk ke skalárnímu obvodovému analyzátoru. Měří se čtyři hodnoty odraženého výkonu. Nejprve přímo při připojeném měřeném obvodu k analyzátoru, a pak se mezi měřený

obvod a analyzátor postupně vkládají tři různé, tzv. poruchové dvojbrany. Ty transformují činitel odrazu ρ na ρ' , jehož modul měří skalární analyzátor:

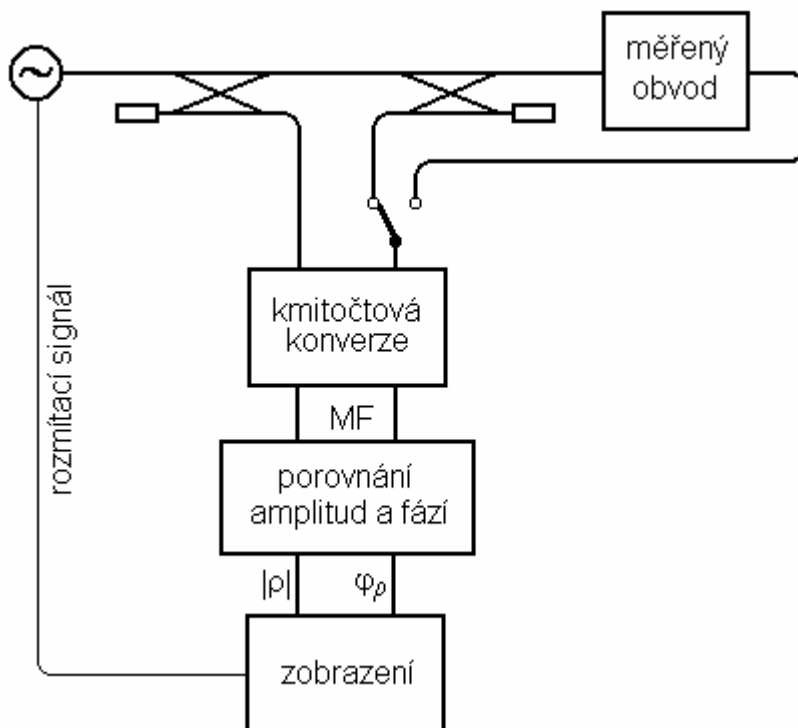
$$\rho' = S_{11} + \frac{S_{12} \cdot S_{21} \cdot \rho}{1 - S_{22} \cdot \rho} \quad (5)$$

Vznikne sada čtyř hodnot, které jsou různě ovlivněny vloženými dvojbrany a metoda tak pracuje velmi obdobně, jako metoda mikrovlnného šestibranu, znázorněná na obr.4. Pouze se najednou měří jen jeden výkon. Na rozdíl od metody šestibranu se však S parametry jednotlivých poruchových dvojbranů mění, a tak nelze použít stejné metody výpočtu. Při kalibračním měření je nutno určit všechny S parametry použitých dvojbranů.

2.3 Vektorový obvodový analyzátor

Nejpoužívanější metodou pro měření komplexního činitele odrazu, či přenosu je vektorový obvodový analyzátor. Je schopen měřit v širokém rozsahu kmitočtů s velmi malou chybou. Při spojení s výpočetní technikou, která provádí další korekce měřených charakteristik a potlačuje případné chyby analyzátoru, je možné měření s přesností na setiny dB a desetiny stupňů.

Velmi zjednodušený princip je vidět na obr. 3. Signál z generátoru je částečně odbočen do analyzátoru jako referenční signál. Druhým signálem je buďto signál získaný pomocí směrové odbočnice, tedy signál od měřeného obvodu odražený, nebo případně jiný, který je potřeba měřit, například měřeným obvodem přenesený. Pomocí několikanásobné kmitočtové konverze jsou získány signály na mezifrekvenčním kmitočtu, na kterém se již zpracovává poměr amplitud a rozdíl fází obou signálů. Nejnáročnější je provedení kmitočtové konverze, protože musí pracovat v celém rozsahu kmitočtů analyzátoru, viz. [2]. Provádí se například směřováním s kmitočtem, který je od měřeného posunut o stálý rozdíl. Pokud není k dispozici, používá se směšování s oscilátorem na nízkém kmitočtu, který prochází širokopásmovým násobičem. Směšovací produkt je pak zpětnovazebnou smyčkou, která řídí oscilátor, udržován na požadovaném mezifrekvenčním kmitočtu.

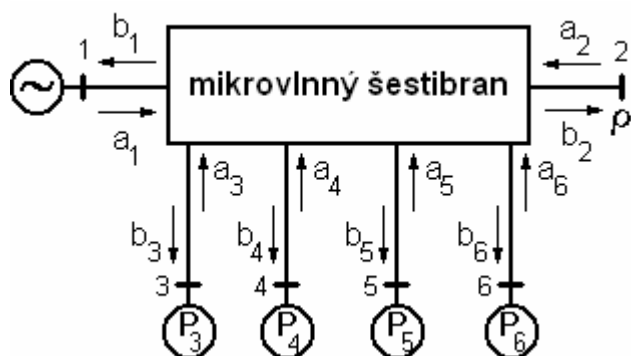


Obr.3 Ideové zapojení vektorového obvodového analyzátoru

2.4 Metoda mikrovlnného šestibranu

2.4.1 Princip metody

S potřebou častějšího měření na mikrovlnných kmitočtech vyvstala otázka, zda neexistuje metoda, která by byla schopna nahradit klasickou konstrukci vektorového analyzátoru a dokázala se vyhnout jeho vysoké obvodové složitosti. V 70-tých letech G. F. Engen v [3] publikoval návrh metody, která dokáže měřit amplitudu i fázi mikrovlnného signálu pouze s pomocí čtyř detektorů, které měří činné výkony mikrovlnného signálu. Metoda umožňuje přesun složitosti konstrukce vektorového analyzátoru na následné náročnější výpočetní zpracování. S rozvojem výpočetní techniky je tento přístup výhodnější časově i finančně. Použití metody šestibranu tak umožňuje rozšířit vektorová měření do průmyslu i lékařství, což do té doby nebylo v masovém měřítku možné.



Obr.4 Blokové schéma měřící metody mikrovlnného šestibranu

Na obr.4 je vidět principiální zapojení této měřící metody. Na bránu 1 je připojen generátor mikrovlnného signálu, na bráně 2 je připojen měřený objekt, jehož činitel odrazu chceme měřit, na branách 3 až 6 měříme výkon na ně dopadající. Na bráně 2 platí

$$\rho = \frac{a_2}{b_2} \quad , \quad (6)$$

kde ρ je činitel odrazu na bráně 2, a a_2 a b_2 jsou odražená, respektive dopadající vlna na tuto bránu. Za předpokladu, že mikrovlnný šestibran je lineární obvod, platí

$$b_3 = A \cdot a_2 + B \cdot b_2 \quad , \quad (7)$$

kde b_3 je vlna dopadající na bránu 3. A a B jsou komplexní konstanty, které jsou vlastností konkrétního použitého šestibranu. Z důvodu praktičtějšího měření výkonu lze vztah (7) převést na

$$P_3 = |A \cdot a_2 + B \cdot b_2|^2 \quad , \quad (8)$$

kde P_3 je výkon měřený na bráně 3. Analogicky lze napsat vztahy pro P_4 až P_6

$$P_4 = |C \cdot a_2 + D \cdot b_2|^2 \quad , \quad (9)$$

$$P_5 = |E \cdot a_2 + F \cdot b_2|^2 \quad , \quad (10)$$

$$P_6 = |G \cdot a_2 + H \cdot b_2|^2 \quad , \quad (11)$$

kde C...H jsou další komplexní konstanty popisující šestibran.

Z praktických důvodů, kterými může být například amplitudová nestabilita generátoru, nebo závislost jeho výstupního výkonu na frekvenci, je vhodné zvolit u jedné z bran např. $A=0$, tj. vztah (8) přejde na

$$P_3 = |B \cdot b_2|^2 \quad . \quad (12)$$

Tímto je výkon na bráně 3 úměrný pouze výkonu z generátoru dopadajícímu na měřenou zátěž a je nezávislý na hodnotě činitele odrazu na bráně 2. Tato volba nám již poněkud konkretizuje zatím obecný šestibran, avšak lze ji brát pouze jako

zjednodušení, a pro určení přesných výsledků použijeme původní vztah (8). Zjednodušení nám umožní blíže porozumět chování šestibranu a zároveň určit jeho vlastnosti potřebné pro měření. Abychom měli ve vztazích (9) až (11) přímo hledaný činitel odrazu ρ , upravíme je s použitím (6)

$$P_4 = |C|^2 \cdot |b_2|^2 \cdot |\rho - q_4|^2, \quad (13)$$

$$P_5 = |E|^2 \cdot |b_2|^2 \cdot |\rho - q_5|^2, \quad (14)$$

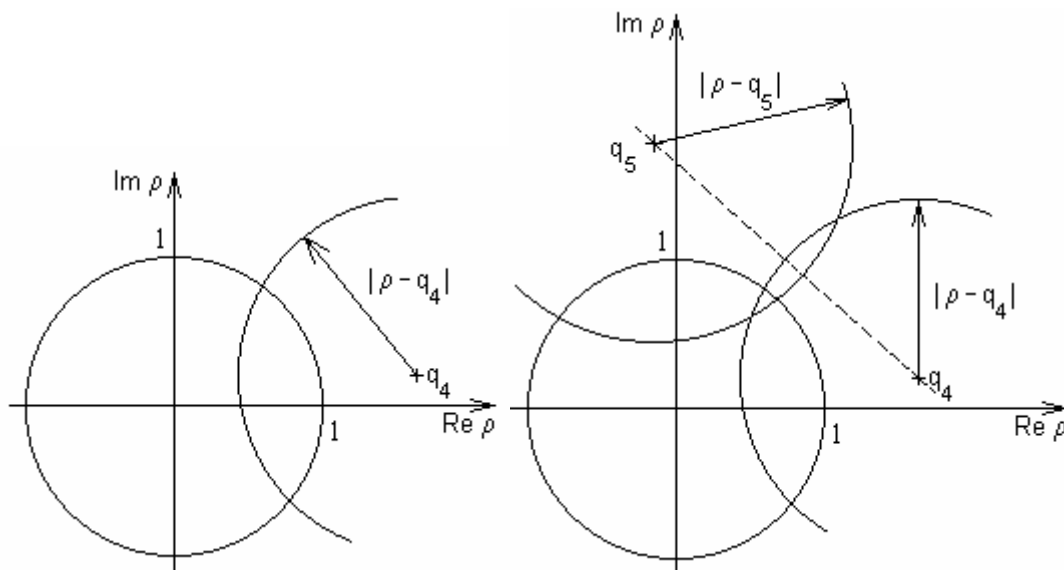
$$P_6 = |G|^2 \cdot |b_2|^2 \cdot |\rho - q_6|^2, \quad (15)$$

kde jsou $q_4 = -D/C$, $q_5 = -F/E$, $q_6 = -H/G$. Odtud by jistě bylo možné řešit úlohu pro ρ , avšak pro názornější představu lze použít ve vztazích (13), (14) a (15) b_2 vyjádřené z (12) a dostáváme:

$$|\rho - q_4|^2 = \frac{P_4}{P_3} \cdot \left| \frac{B}{C} \right|^2, \quad (16)$$

$$|\rho - q_5|^2 = \frac{P_5}{P_3} \cdot \left| \frac{B}{E} \right|^2, \quad (17)$$

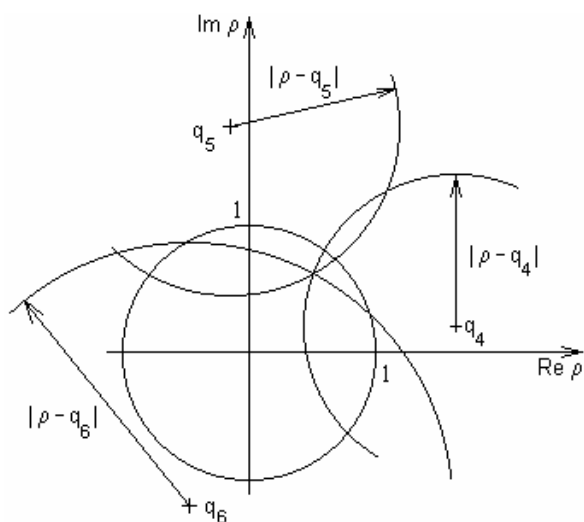
$$|\rho - q_6|^2 = \frac{P_6}{P_3} \cdot \left| \frac{B}{G} \right|^2. \quad (18)$$



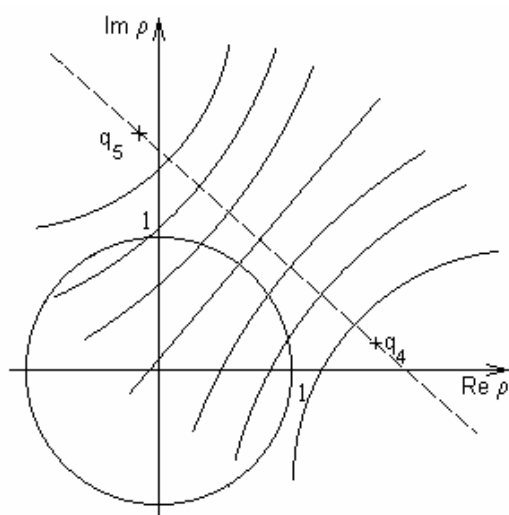
Obr. 5a), 5b) Geometrická interpretace v rovině měřeného činitele odrazu

Na obr. 5a) je vidět geometrická interpretace vztahu (16). V rovině činitele odrazu tvoří kružnici se středem v bodě q_4 a poloměrem $|\rho - q_4|$. Vztah (17) pak tvoří druhou kružnici, viz. obr. 5b), která se s první protíná ve dvou bodech. Pokud budeme předpokládat měření pasivních obvodů, tedy $|\rho| \leq 1$, pak hledaný výsledek leží uvnitř jednotkové kružnice, v místě průsečíku obou kružnic. Průsečíky vznikly sice dva, avšak

za předpokladu, že spojnice středů q_4 a q_5 leží mimo jednotkovou kružnici, pak i jeden z průsečíků bude vždy mimo tuto oblast. Je tedy vidět, že činitel odrazu můžeme již jednoznačně určit, aniž bychom použili třetí vztah (18). Takto by se jednalo o metodu pětibranu. Její hlavní nevýhodou však je větší chyba určení výsledku, protože pokud se kružnice, tak jako na obrázku, protínají pod malým úhlem, metoda je velmi citlivá na nepřesnosti měření a vliv případného šumu při měření.



Obr.6 Přesnější určení ρ pomocí třetí kružnice



Obr.7 Obecný případ zobrazení

Na obr.6 je tedy vidět i poslední, třetí kružnice, která se v ideálním případě protíná s předchozími dvěmi v jediném bodě.

V předchozím rozboru jsme uvažovali platnost vztahu (12), avšak v praxi může platit jen přibližně. V obecnějším případě tedy můžeme vydělit např. (13) vztahem (14) a dostaneme tak vztah

$$\frac{|\rho - q_4|^2}{|\rho - q_5|^2} = \frac{P_4}{P_5} \cdot \left| \frac{E}{C} \right|^2, \quad (19)$$

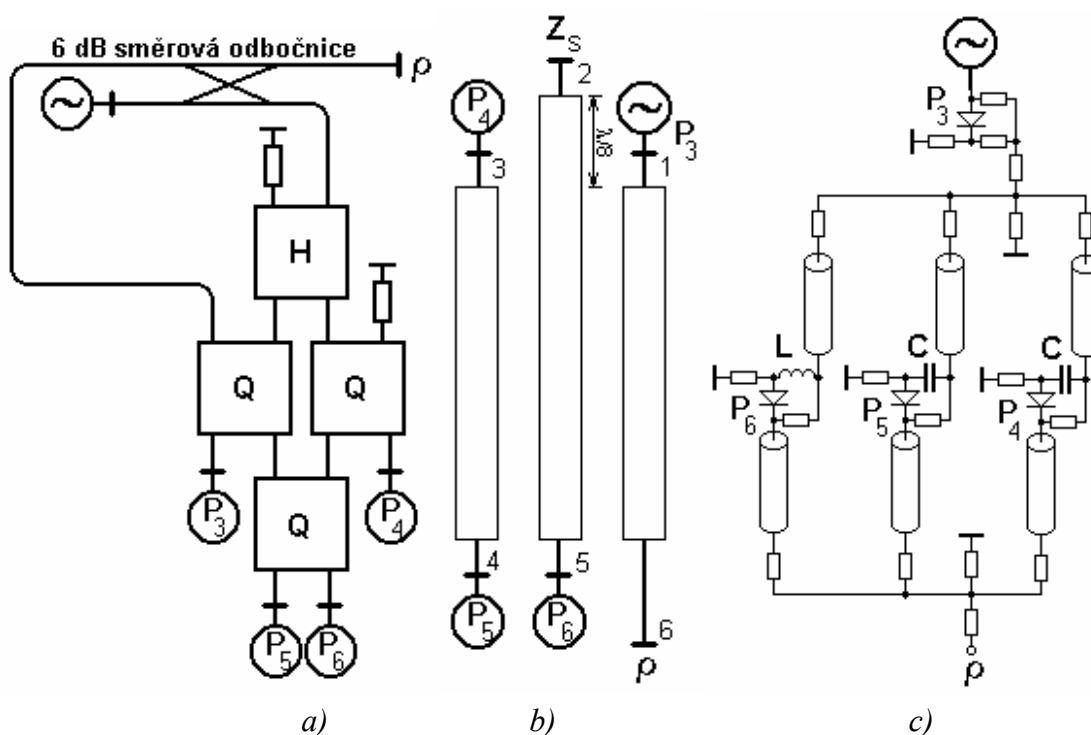
který vyjadřuje opět kružnici, avšak se středem ležícím na přímce spojující body q_4 a q_5 . Celá situace je znázorněna na obr.7. Zde již poloha středu není konstantní a závisí na aktuálním poměru P_4, P_5 .

2.4.2 Konkrétní zapojení mikrovlnného šestibranu

Z předchozího vyplývá, že pro správnou funkci celé metody je potřeba zvolit vhodný obvod, který bude splňovat několik podmínek:

- Pro jednodušší řešení celého výpočtu je potřeba, aby $A=0$, tedy aby výkon na jedné z bran byl úměrný pouze signálu z generátoru a neznámá zátěž jej neovlivňovala. To lze nejnázne provést pomocí směrové odbočnice.
- Z důvodů odolnosti vůči šumu a konečného dynamického rozsahu použitých detektorů se volí vzdálenost středů q od počátku souřadného systému ~ 1.5 [3], z toho vyplývá potřebný dynamický rozsah měření asi 15 dB viz. dále.
- Pro jednoznačnost řešení a malou chybu řešení je potřeba, aby byly středy q rovnoměrně rozmístěny kolem jednotkové kružnice, ideálně s odstupem 120° .

Na následujících obrázcích jsou uvedeni zástupci třech typických představitelů mikrovlnných šestibranů.



Obr.8 a) Klasické zapojení šestibranu, většinou realizované vlnovody. b) Šestibran vytvořený pomocí trojice vázaných mikropáskových vedení. c) Širokopásmový šestibran kombinovaný s prvky se soustředěnými parametry

Na obr.8a) je vidět klasické zapojení šestibranu, známé od jeho prvotního návrhu v [3], kdy hlavním cílem bylo měření na vysokých mikrovlnných kmitočtech, a tomu odpovídající realizace ve vlnovodné technologii. Obvod H je hybridní 180° člen a Q jsou 90° kvadrurní členy. Díky použité technologii bylo zapojení předurčeno pro maximální rozsah 1 : 2 daný vlnovody. V době této konstrukce byla snaha o precizní rozmístění středů q a jejich vzdáleností od počátku tak, aby bylo možno vhodným

součtem, či rozdílem jednotlivých signálů přímo získat reálnou a imaginární složku činitele odrazu a pomocí obrazovky je zobrazit. Kalibrace se prováděla na jediném kmitočtu a případné korekce se prováděly ručně. Stále tedy zůstávala snaha o precizní provedení šestibranu. Později s rozmachem výpočetní techniky se okamžitě začaly objevovat její použití pro automatizaci a přesnou kalibraci měření. Od tohoto okamžiku bylo možné použít šestibrany s jednodušší konstrukcí, jejichž vlastnosti byly více závislé na kmitočtu, či naopak bylo možné stejný šestibran použít v širším rozsahu kmitočtů.

Na obr.8b) je vidět šestibran další generace [4], který využívá velmi jednoduchý obvod složený z trojice vázaných mikropáskových vedení. Z_s je přesný širokopásmový zkrat. Tento obvod nedodrží přesné rozložení středů q , navíc jejich poloha se s kmitočtem mění. To však při kalibrování v celém rozsahu pracovních kmitočtů není na závadu a dosažitelná šířka pásma měření je až 1 : 10. Z této konstrukce je vidět jednoznačný přechod od složitých, precizních a tudíž nákladných konstrukcí k jednoduchým, jejichž vlastnosti můžeme korigovat při následném výpočtu pomocí dostupné výpočetní techniky. Podobnou konstrukcí, hojně používanou je směrová odbočnice s bezztrátovým symetrickým pětibranem. Referenční výkon je měřen na odbočnici, a pak na třech branách pětibranu, na čtvrtou je připojena měřená impedance a na poslední je přes zmiňovanou odbočnici připojen generátor. Tato konstrukce také vyniká jednoduchostí a je relativně širokopásmová [5].

Posledním typem na obrázku 8c) je představitel třetí generace [6], který se vyznačuje extrémní širokopásmovostí až tří dekad, i když zatím nebyl realizován pro vyšší mikrovlnné kmitočty, ale pro pásmo 2 až 2000 MHz. Prvky L a C představují potřebný fázový posun na nízkých kmitočtech, kde délky vedení nemají žádný vliv. Ty přebírají funkci na vyšších kmitočtech, kde L a C již představují vysokou, resp. nízkou impedanci. Je třeba se vyhnout všem případným rezonancím a tedy prudkým změnám fáze. To je zajištěno oddělovacími rezistory, které zároveň zajišťují správné impedanční přizpůsobení. Daní za takovéto přizpůsobování je vysoký průchozí útlum šestibranu o velikosti až 20 dB.

2.4.3 Kalibrace metody

Pro účely měření a kalibrace je vhodnější použít jiný popis šestibranu, než vyjádření ve vztazích (16) až (18). Dle [7] lze napsat

$$\rho = r + jx = \frac{\sum_{i=1}^4 (F_i + jG_i) \cdot P_i}{\sum_{i=1}^4 H_i \cdot P_i}, \quad (20)$$

kde ρ je hledaný činitel odrazu a F_i , G_i a H_i jsou reálné konstanty popisující daný šestibran a P_i jsou změřené výkony. Vztah můžeme i v tomto zatím obecném případě normovat například vůči konstantě H_4 a pro určení ρ tak potřebujeme znát jedenáct

konstant šestibranu. Ty určíme vhodným kalibračním postupem podle vztahu (20) pomocí dostatečného počtu známých impedancí, připojených postupně na měřící bránu. Oddělením reálné a imaginární složky v (20) jej můžeme přepsat na dva vztahy:

$$\sum_{i=1}^4 F_i \cdot P_i - r \cdot \sum_{i=1}^3 H_i \cdot P_i = r \cdot P_4 \quad , \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^4 G_i \cdot P_i - x \cdot \sum_{i=1}^3 H_i \cdot P_i = x \cdot P_4 \quad . \quad (22)$$

Tyto vztahy se už dají použít pro kalibraci měření. Pomocí sedmi různých známých impedancí je možno provést celou kalibraci. Díky nepřesnostem měření, či šumu však tato metoda nemusí vždy vést k cíli. Proto se používají také další metody, popsané např. v [8], které využívají složitější postupy výpočtu. Většinou kalibrují pomocí posuvného zkratu, či zátěže a několika dalších známých impedancí.

2.5 Rozbor vlivů vzdálenosti bodů q od středu jednotkové kružnice

Jak již bylo zmíněno v kapitolách 2.4.1 a 2.4.2, pro správnou činnost šestibranu je nutné zvolit vzdálenost bodů q od středu jednotkové kružnice. Vzdálenost je dána útlumem měřícího signálu mezi detektory a měřící branou. Pokud bude útlum nulový, body q budou ležet na jednotkové kružnici, s rostoucím útlumem se budou od kružnice vzdalovat. Uvážíme-li rozložení měření dle obr.9, můžeme psát

$$U_0 = q, \quad (23)$$

$$U_{\min} = q - 1 = U_0 - U_0 \cdot 10^{-\frac{2L}{20}}, \quad (24)$$

$$U_{\max} = q + 1 = U_0 + U_0 \cdot 10^{-\frac{2L}{20}}, \quad (25)$$

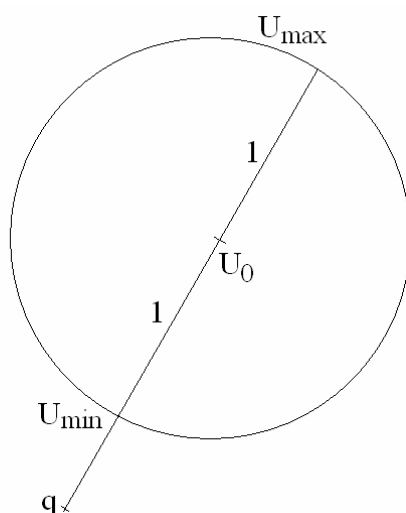
kde q je vzdálenost měřícího bodu od středu jednotkové kružnice, U_{\max} a U_{\min} jsou maxima a minima napětí při měření zátěže s $|\rho| = 1$, L je vložený útlum mezi detektory a měřící branou. Ze vztahů (23) a (24) lze vyjádřit vztah mezi q a L následovně:

$$q = 10^{\frac{2L}{20}}. \quad (26)$$

Potřebnou dynamiku měření D lze pak určit z následujícího vztahu:

$$D = 20 \cdot \log\left(\frac{U_{\max}}{U_{\min}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{q+1}{q-1}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{10^{\frac{2L}{20}} + 1}{10^{\frac{2L}{20}} - 1}\right). \quad (27)$$

Konkrétní tvar těchto závislostí je vidět v grafu na obr.10.



Obr.9 Zobrazení potřebné dynamiky měření

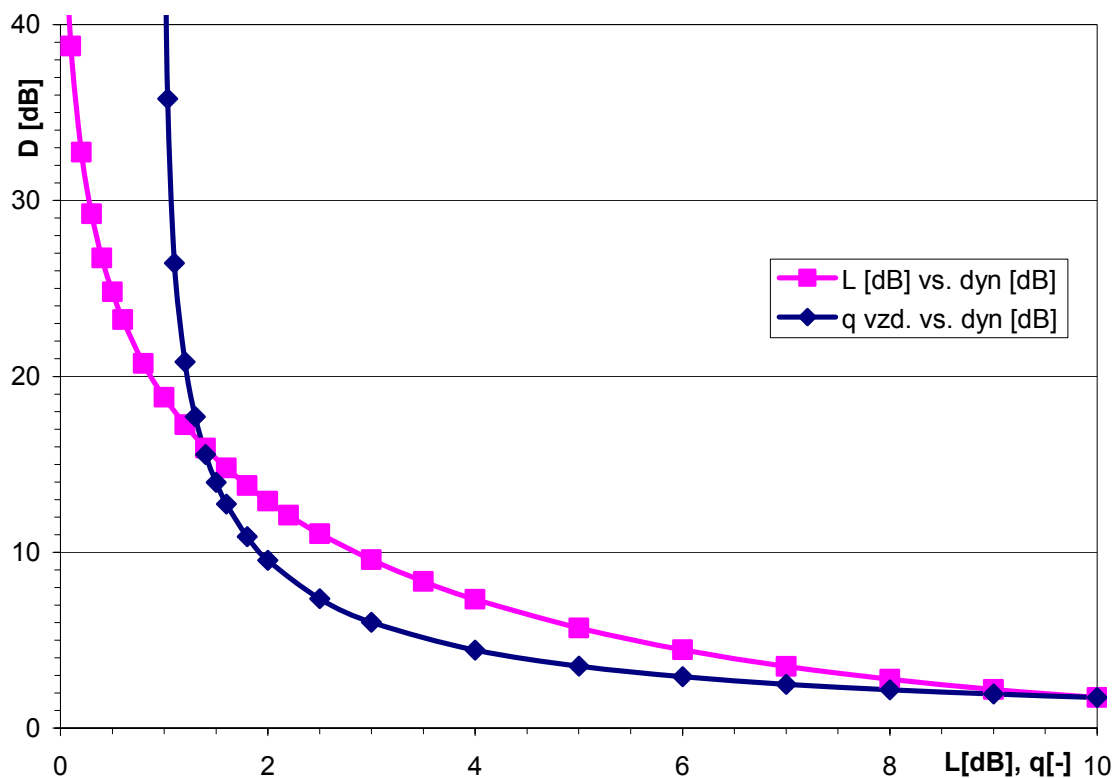
Z grafu na obr.10 by se mohlo zdát, že pro měření je jednoznačně výhodné zvolit velké q , tedy velký útlum L . To by ovšem znamenalo, že bude klesat výstupní úroveň měřícího signálu (poroste útlum celého šestibranu) a zároveň bude potřeba měřit na detektorech přesněji, protože stejná změna impedance vyvolá menší změnu detekovaného napětí.

Zvážíme-li, že se pro měření použijí diodové detektory v oblasti kvadratické detekce, pak jejich výstupní napětí bude úměrné dopadajícímu výkonu. Napětí detektorů je potřeba převést pro zpracování v počítači do digitální podoby A/D převodníkem, budeme uvažovat n bitový převodník, tedy 2^n úrovní. Pak je možno určit krajní hodnoty měření jako:

$$P_{\max} = 2^n - 1, \quad (28)$$

$$P_0 = \frac{2^n - 1}{\left(1 + 10^{\frac{-2L}{20}}\right)^2}, \quad (29)$$

$$P_{\min} = \frac{(2^n - 1) \cdot \left(1 - 10^{\frac{-2L}{20}}\right)^2}{\left(1 + 10^{\frac{-2L}{20}}\right)^2}. \quad (30)$$

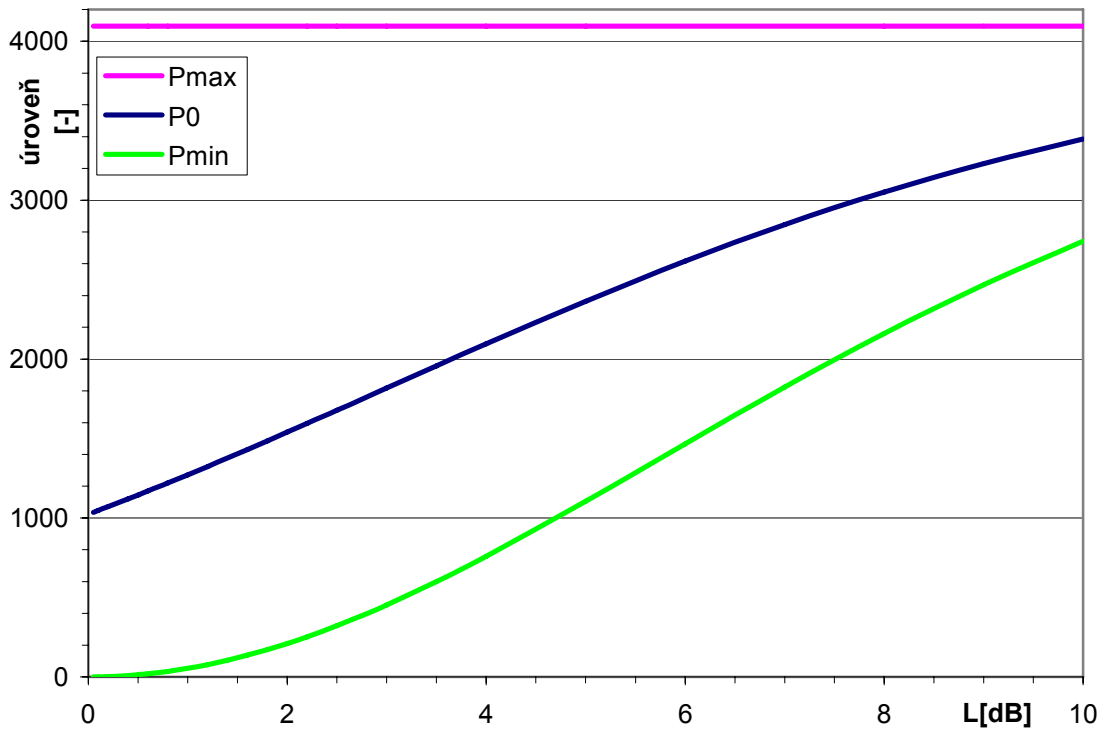


Obr.10 Závislost potřebné měřicí dynamiky na vloženém útlumu L a vzdálenosti q

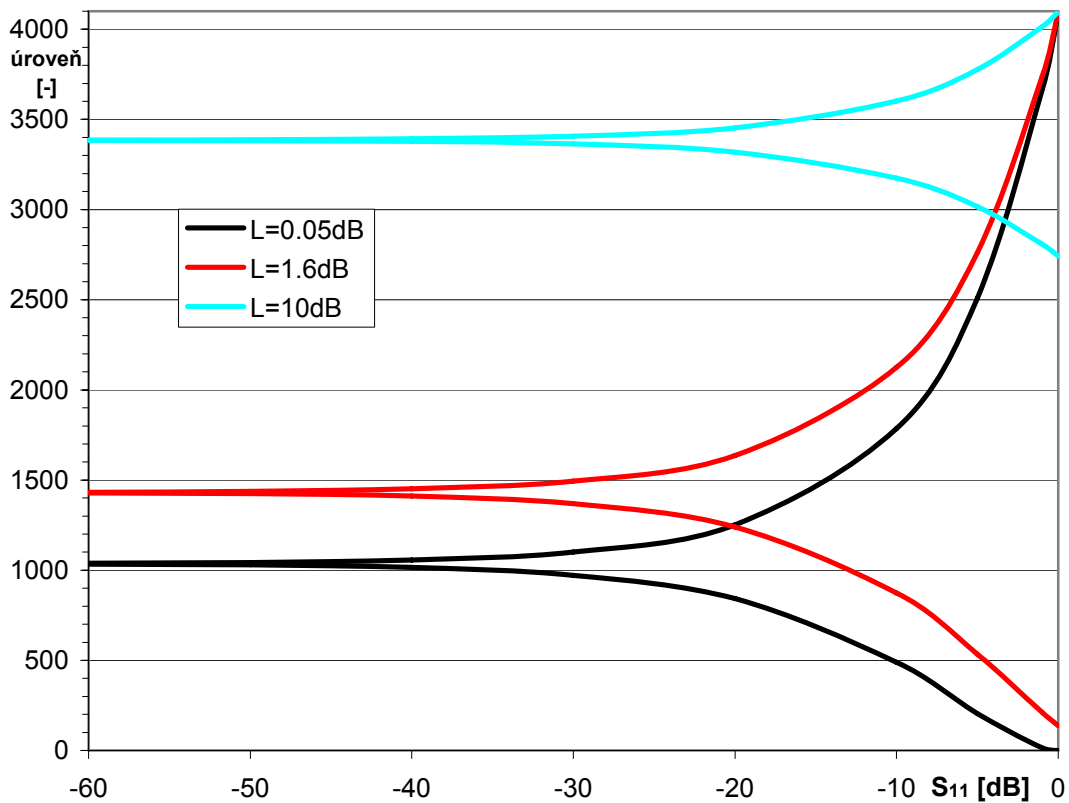
Tyto vztahy lze pro názornost také zobrazit v grafu na obr.11. Jako příklad je zvolen 12ti bitový A/D převodník. Je vidět, že s rostoucím útlumem L klesá využitelnost převodníku, při útlumu cca 7 dB je využita pouze polovina jeho rozsahu. Můžeme vyjádřit vztah pro změřený výkon aktuálního činitele odrazu S_{11} v dB jako

$$P_m = \frac{(2^n - 1) \cdot \left(1 \pm 10^{\frac{-2L}{20}} \cdot 10^{\frac{S_{11}}{20}}\right)^2}{\left(1 + 10^{\frac{-2L}{20}}\right)^2}, \quad (31)$$

kde znaménko \pm je ovlivněno fází S_{11} , tedy jestli dochází k součtu napětí či k jejich rozdílu.



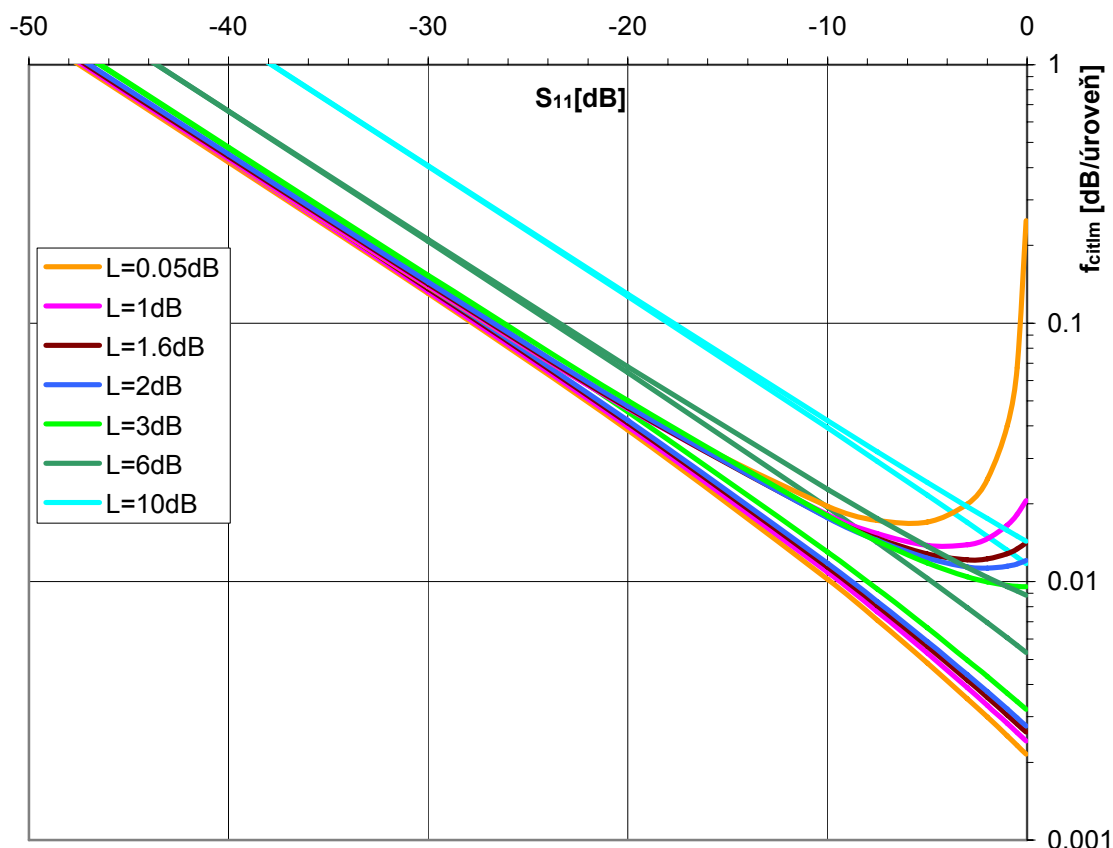
Obr. 11 Hodnoty P_{\max} , P_0 a P_{\min} po převodu 12ti bitovým A/D převodníkem v závislosti na vloženém útlumu L



Obr. 12 Vliv vloženého útlumu L na převodní charakteristiky modulu S_{11} vzhledem k úrovním 12ti bitového převodníku

Pokud na vztahu (31) provedeme derivaci dle S_{11} a následně jej upravíme, získáme rozlišení měření v dB na úroveň

$$f_{\text{citlm}} = \frac{1}{P_m'} = \pm \frac{1}{(2^n - 1) \ln(10)} \frac{10 \left(1 + 10^{\frac{-2L}{20}}\right)^2}{\left(1 \pm 10^{\frac{S_{11}-2L}{20}}\right) \cdot 10^{\frac{S_{11}-2L}{20}}}. \quad (32)$$



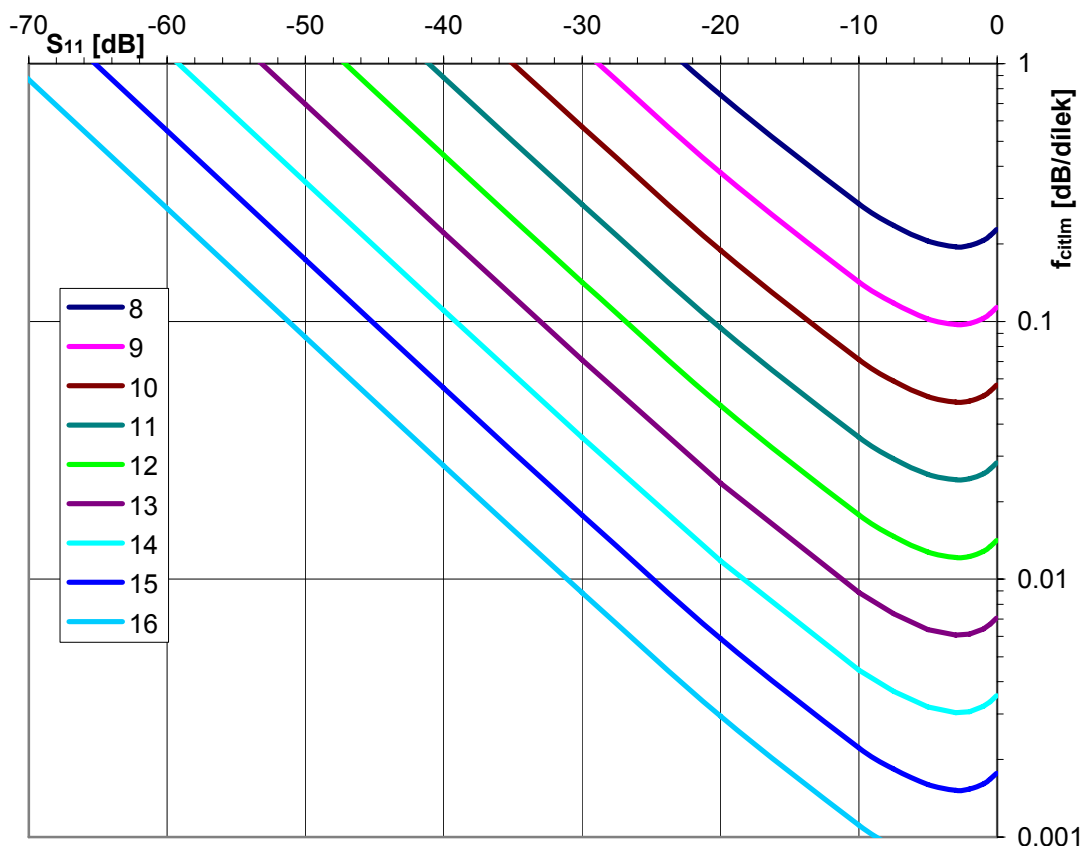
Obr.13 Vliv vloženého útlumu L na rozlišení měření při 12ti bitovém A/D převodníku

Na obr.13, kde jsou zobrazeny závislosti f_{citlm} na měřeném S_{11} a L , jsou vidět dvě vlastnosti měření.

První vlastnost je vidět na průsečíku jednotlivých křivek s osou x, tedy že s rostoucí hodnotou L dynamika měření klesá, i když ne stejně rychle.

Důležitá je však druhá vlastnost, kde v blízkosti osy y, tedy v úrovni $S_{11} \approx 0$ dB, velmi klesá citlivost měření pro malé hodnoty L . To je zapříčiněno měřením malých výkonů při potřebě vysoké dynamiky měření výkonu. V grafu jsou pro každou hodnotu L dvě křivky popisující obě možnosti vztahu (32). Odtud je možné již najít vhodné L pro konstrukci šestibranu o velikosti mezi 1.6 dB a 3 dB. Změnou počtu bitů můžeme zvýšit rozlišení měření vždy 2 krát o jeden bit a získáme tak cca 6 dB v dynamice

měření S_{11} pro stejné rozlišení. Přehledný graf s vyjádřením vlivu počtu bitů převodníku na rozlišení je na obr. 14.



Obr.14 Vliv počtu bitů A/D převodníku na rozlišení měření při $L=1.6\text{dB}$

Pokud se budeme pohybovat v lineárních oblastech křivek na obr.14, pak pro dosažitelnou hodnotu S_{11} můžeme napsat

$$S_{11} = -6.02 \cdot n - 20 \cdot \log(f_{citlm}) + 0.0829 \cdot L^2 + 0.164 \cdot L + 24.6, \quad (33)$$

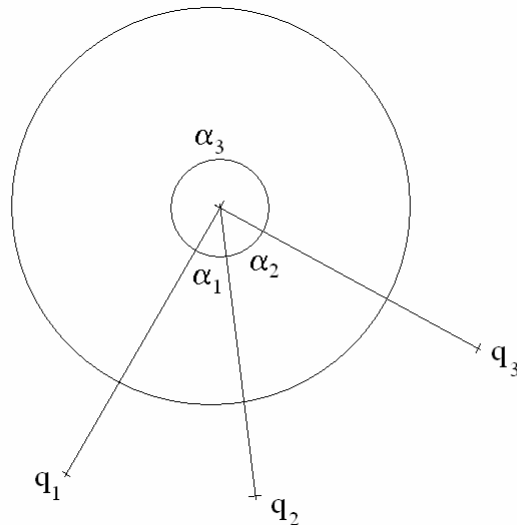
který platí s přesností cca ± 0.5 dB pro výsledky $S_{11} < -15$ dB.

V předchozí části byly popsány vlivy vzdáleností bodů q od středu jednotkové kružnice na měření. Toto nastavení lze provést jednoduše pomocí útlumového článku, který je širokopásmový. Samozřejmě při použití reálných materiálů dochází ke ztrátám, které se s kmitočtem mění a zejména na nejvyšších pracovních kmitočtech je tedy potřeba s nimi počítat.

2.6 Poloha bodů q okolo jednotkové kružnice

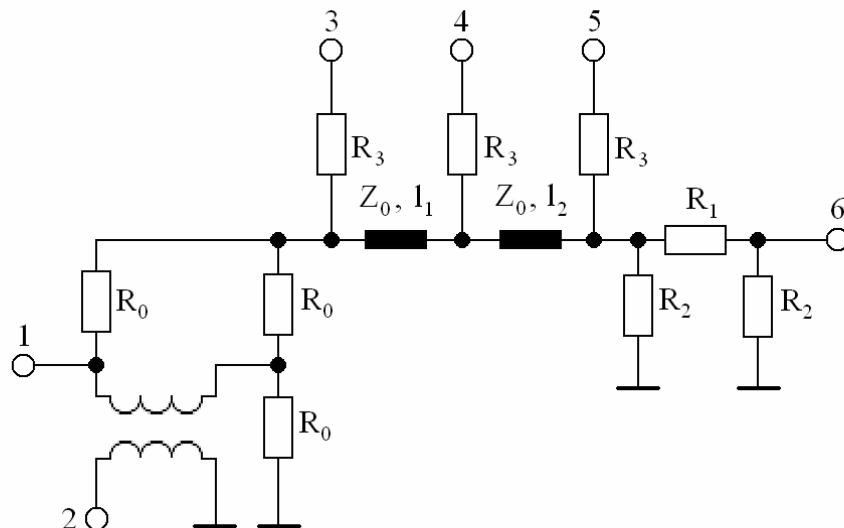
Pro správnou funkci šestibranu je nutné, aby body q byly vhodně rozmístěny kolem jednotkové kružnice. Toho lze docílit vložením vhodných dvojbranů mezi

jednotlivé detektory, nebo případně detektory umístit na brány nějakého složitějšího vícebranu. Typy řešení byly ukázány na obr.8., každý typ přináší jiné výhody, ale většinou jde o získání maximální šířky pásma.



Obr.15 Rozmístění bodů q okolo jednotkové kružnice

Cílem každého řešení šestibranu je udržet úhly α_1 , α_2 a α_3 ve vhodných mezích. Dle zkušeností publikovaných např. v [9] by měly být úhly větší, než 15° , aby kalibrační metody byly úspěšné. Optimální hodnota všech úhlů je 120° , což lze ovšem zpravidla splnit pouze na jediném kmitočtu.



Obr.16 Schéma zapojení nejjednoduššího šestibranu

Na obr. 16 je schéma nejjednoduššího šestibranu vycházejícího z [10], pouze převedené na technologii realizovatelnou na DPS. Na bránu 1 je připojen generátor

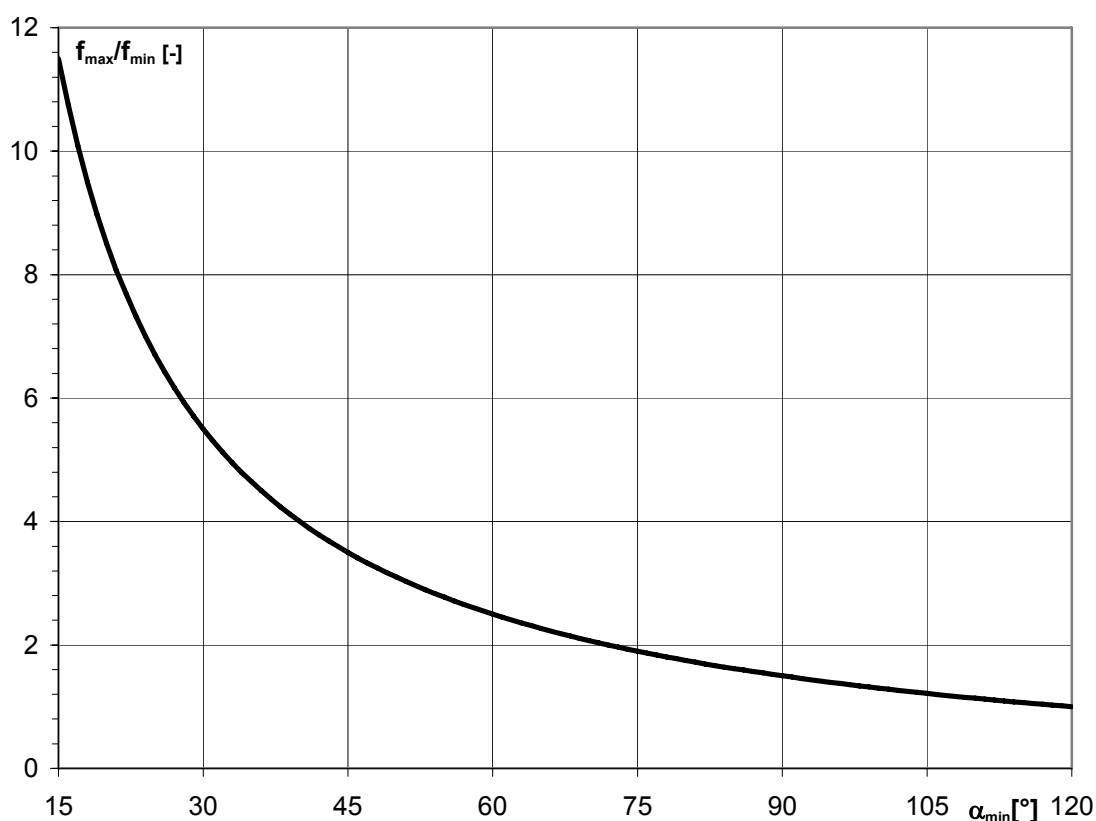
signálu, brána 6 je měřicí, na bráně 2 se měří referenční výkon generátoru a brány 3, 4, 5 jsou pro měření výkonu mezi vedeními délky l_1 a l_2 , která představují pootočení bodů q kolem středu o úhly α_1 a α_2 . Rezistory R_1 a R_2 pak tvoří útlumový článek pro vhodnou vzdálenost bodů q od středu. Pokud pro šestibran zvolíme jako minimální úhlový rozestup α_{\min} v rovině činitele odrazu, pak lze snadno odvodit za předpokladu, že $l_1=l_2$

$$\alpha_{\max} = 180^\circ - \frac{\alpha_{\min}}{2} . \quad (34)$$

Za předpokladu zanedbání disperze vedení lze pro rozsah činnosti šestibranu napsat

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \frac{180^\circ - \alpha_{\min} / 2}{\alpha_{\min}} = \frac{180^\circ}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{2} . \quad (35)$$

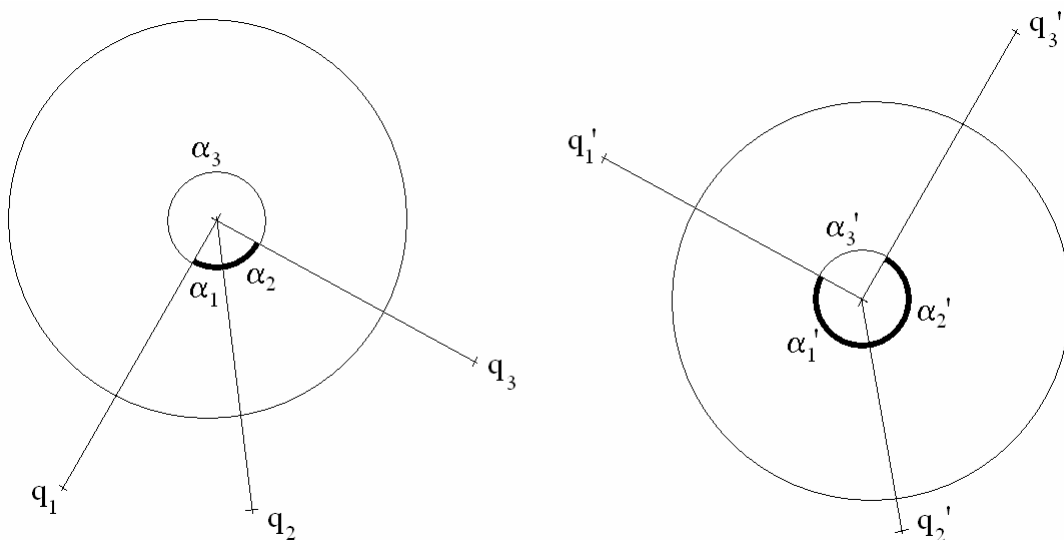
Na obr.18 je vidět situace rozložení bodů q pro minimální kmitočet, kdy α_1 a α_2 jsou rovny α_{\min} , a pro maximální kmitočet, kdy α_1' a α_2' vzrostly natolik, že α_3' je právě roven α_{\min} .



Obr.17 Rozsah činnosti jednoduchého šestibranu v závislosti na α_{\min}

Grafické znázornění vztahu (35) je vidět na obr.17. Průběh má dvě typické krajní hodnoty, pro $\alpha_{\min}=15^\circ$ je rozsah přeladění 1 : 11.5, na druhé straně pak pro $\alpha_{\min}=120^\circ$ je rozsah přeladění 1 : 1. Praktický návrh šestibranu se pohybuje mezi těmito

dvěma extrémy v závislosti na kompromisu požadavků mezi rozsahem přeladění a přesností měření.



Obr.18 Rozložení bodů q kolem jednotkové kružnice na nejnižším a nejvyšším pracovním kmitočtu

3 Cíle řešení

Cíle práce jsou shrnuty v následujících bodech:

1. Detailně analyzovat vliv základních vlastností šestibranu na jeho měřicí schopnosti, provést rozbor teoretický a ověřit jej následně praktickými experimenty.
2. Navrhnout řešení vhodné pro použití jako širokopásmový měřicí systém s šířkou pásma větší, jak jedna dekáda. Jeho provedení navrhnout tak, aby bylo kmitočtově nezávislé a schopné realizace na mikrovlnných kmitočtech.
3. Realizovat měřicí systém s jednoduchým šestibranem, na kterém bude možné demonstrovat jeho základní vlastnosti, ověřit funkčnost pomocných obvodů pro zpracování signálů a vytvořit potřebné obslužné, řídicí a vyhodnocovací programové vybavení. Pro měřicí systém navrhnout vhodnou kalibrační sadu, která vyhoví kmitočtovým rozsahem činnosti.
4. Na základě zkušeností z předchozího bodu navrhnout a realizovat širokopásmový měřicí systém, analyzovat jeho vlastnosti teoreticky i dostatečně je prakticky ověřit.
5. Oba navržené měřicí systémy porovnat jak mezi sebou, tak s dostupným měřicím zařízením, které je k dispozici pro srovnávací měření. Detailně analyzovat chyby měření obou systémů a provést jejich porovnání.
6. Provést zhodnocení navrženého měřicího systému jak z hlediska jeho praktických vlastností, tak z pohledu možného uplatnění při jeho realizaci pro mikrovlnná měření na vyšších GHz pásmech.

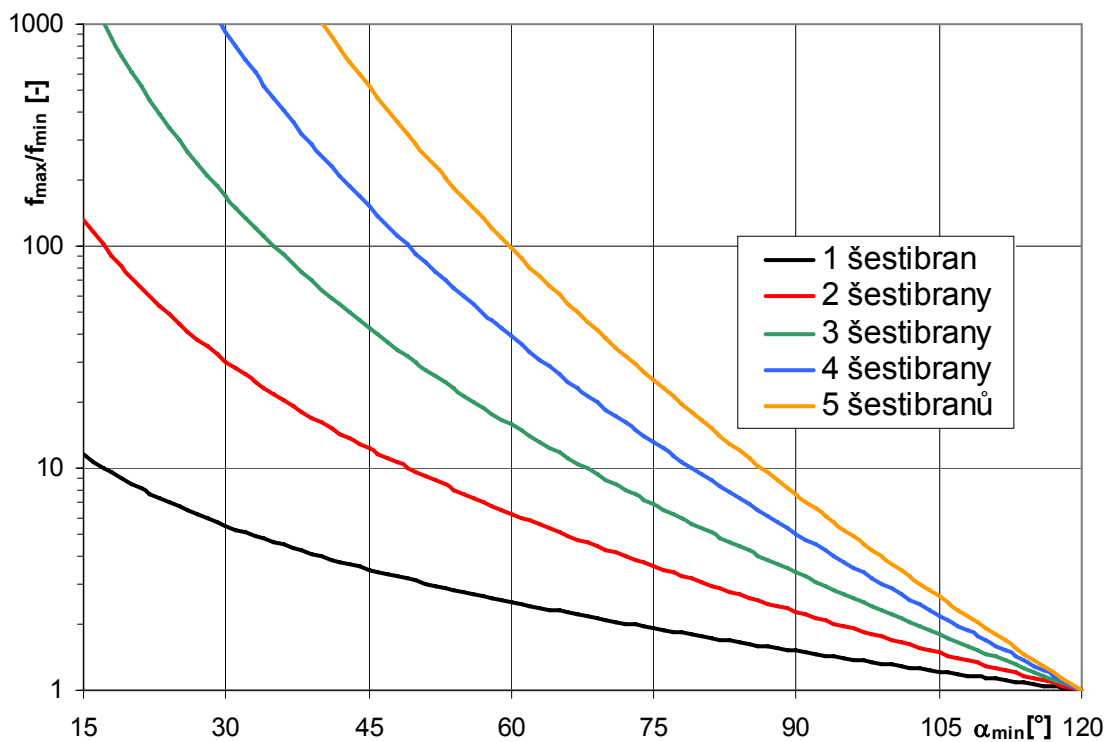
4 Vlastní řešení disertační práce

4.1 Návrh širokopásmového šestibranu

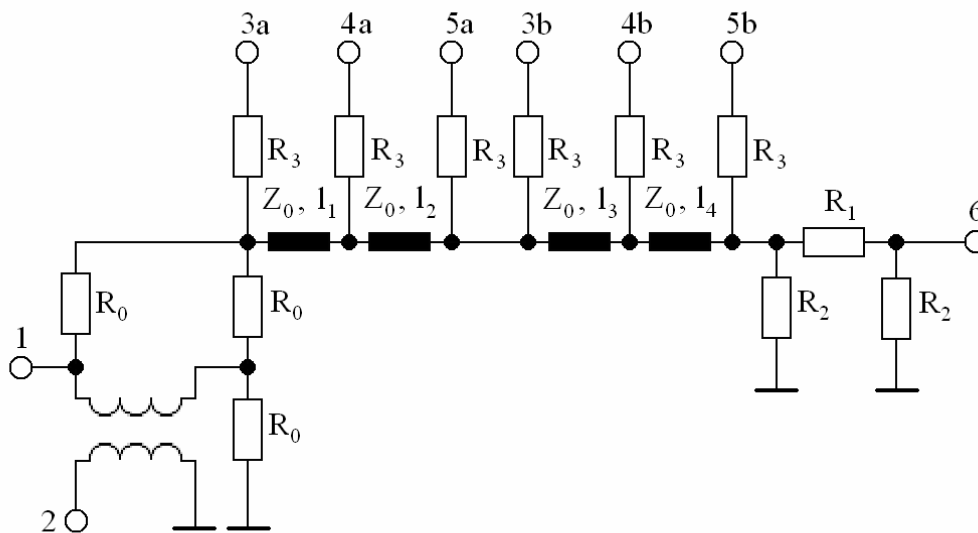
Při návrhu širokopásmového šestibranu je možné se ubírat více směry. Pokud je návrh určen pro nízké kmitočty, je možné jít cestou rezistivních můstků, publikovanou např. v [6], nebo [9]. Pro vyšší kmitočty se však tato řešení nehodí a je potřeba hledat jiné cesty. Přímočarou metodou pro zvýšení rozsahu může být např. zapojení dvou a více šestibranů do kaskády. Rozsah činnosti takového systému se zvýší na součin rozsahů jednotlivých šestibranů, za předpokladu návaznosti jednotlivých pracovních kmitočtových pásem. Šestibranu pro kaskádu musí být vytvořeny pomocí takové technologie, aby přes ně mimo jejich pracovní pásmo signál procházel bez velkých přídavných ztrát. Tímto jsou z řešení prakticky vyloučeny klasické vlnovodné konstrukce. Pokud zvolíme stejné α_{\min} pro všechny šestibranu a f_{\max} jednoho bude rovno f_{\min} druhého šestibranu (podmínka návaznosti), pak bude platit rozšíření vztahu (35)

$$\frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \left(\frac{180^\circ}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{2} \right)^h, \quad (36)$$

kde h je počet šestibranů v kaskádě. V grafickém vyjádření pak získáme rozšíření obr.17 zobrazené na obr.19, tentokrát s logaritmickou osou y . Je vidět, že již s kaskádou např. čtyř šestibranů je možno pro $\alpha_{\min}=45^\circ$ dosáhnout rozsahu pracovních kmitočtů v poměru větším, než 1 : 100. Za tento rozsah zaplatíme nutností použití minimálně třinácti detektorů (pokud použijeme jenom jeden detektor signálu z generátoru pro celý rozsah) a zvýšenými ztrátami, které budou způsobeny jednak zvýšenou délkou celého obvodu, jednak odbočením signálu do jednotlivých detektorů. Na obr.20 je zobrazeno schéma zapojení při kaskádě dvou šestibranů se společným detektorem pro výkon.



Obr.19 Kmitočtový rozsah kaskády šestičlunů v závislosti na zvoleném α_{\min} a počtu šestičlunů v kaskádě



Obr.20 Schéma zapojení kaskády dvou šestičlunů se sedmi detektory

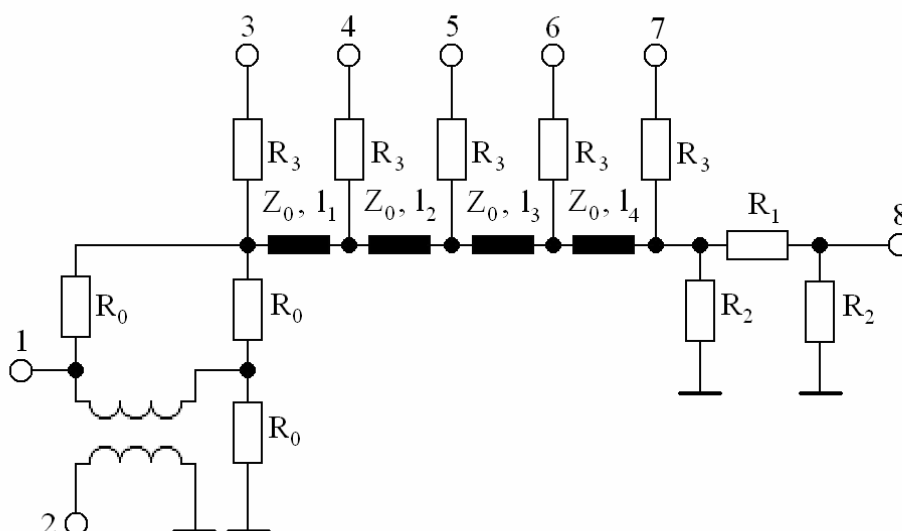
4.2 Návrh nového měřicího systému na principu šestibranu

V předchozí kapitole byla představena možnost, jak zvýšit šířku pásma měření pomocí více šestibranů v kaskádě. Hlavními nevýhodami této metody jsou:

1. Pro každé kmitočtové rozšíření je nutno přidat tři detektory.
2. Na každém kmitočtu získáme pouze jeden výsledek měření i přes množství šestibranů v kaskádě (kromě hranic kmitočtových rozsahů jednotlivých šestibranů).
3. Z velkého počtu detektorů vyplývá zvýšený útlum kaskády a také vzniká více odrazů v obvodu.

V následujícím textu se pokusím představit návrh metody, která tyto výše zmíněné nedostatky minimalizuje.

Pokud se podíváme na obr. 20, tak jako první jednoduché vylepšení předchozí metody se nabízí vypuštění měřicího portu 3b, protože z portu 5a získáváme identické hodnoty. Tedy ušetříme vždy jeden detektor na rozhraní dvou šestibranů. Při kalibraci a výpočtech výsledků pak jedno měření použijeme dvakrát. Pro případ uvedený v kapitole 4.1 (4 šestibrany v kaskádě, poměr pracovních kmitočtů větší, než 1 : 100) se tak může počet použitých detektorů zredukovat z původních 13 na 10 detektorů.



Obr.21 Schéma zapojení redukované kaskády dvou šestibranů

Pohledem na obr.21 již není možné určit, kde končí jeden šestibran a začíná druhý. Zapojení je možné zobecnit a říct, že pro měření je potřeba, aby pro každý

kmitočtů existoval šestibran splňující podmínky α_{\min} a α_{\max} podle vztahu (34). Počet existujících šestibranů v zapojení je možno určit jednoduše podle vztahu

$$C_m^3 = \frac{m!}{3!(m-3)!} = \frac{m!}{6(m-3)!}, \quad (37)$$

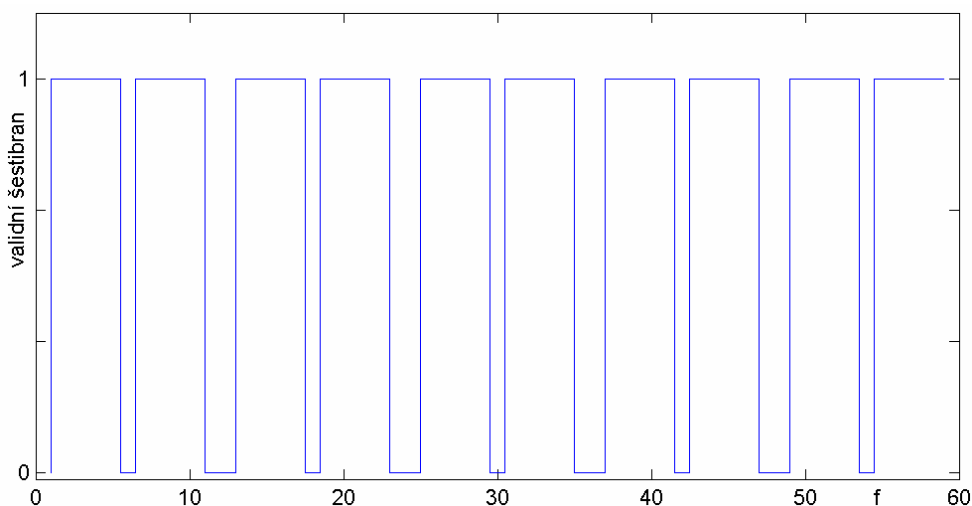
kde m je počet detektorů v zapojení pro měření fáze. Výsledné počty šestibranů v měřícím systému jsou pak 4, 10, 20 a 35 pro m 4, 5, 6 a 7 použitých detektorů. Tyto výsledky nabízejí vysoký potenciál pro návrh moderního měřícího systému.

4.3 Teoretický návrh měřícího systému

4.3.1 Tvorba kritériální funkce

Při návrhu systému popsaného v předchozí kapitole se nepodařilo jeho chování popsat jednoduše tak, aby bylo možné analyticky určit délky vedení l_1, \dots, l_{m-1} pro zadaný úhel α_{\min} , m detektorů a požadovaný kmitočtový rozsah $f_{\min} : f_{\max}$. Proto bylo nutné výpočet realizovat numericky. Pro výpočet pomocí numerických metod je potřeba vytvořit kritériální funkci, která stanovuje, jak konkrétní výsledek metody splňuje vstupní zadání. Srovnávání jednotlivých výpočtů kritériální funkce v konkrétní metodě pak umožňuje určit, který výsledek je lepší či horší. Výpočet pomocí konkrétní metody pak určí další hodnoty neznámých.

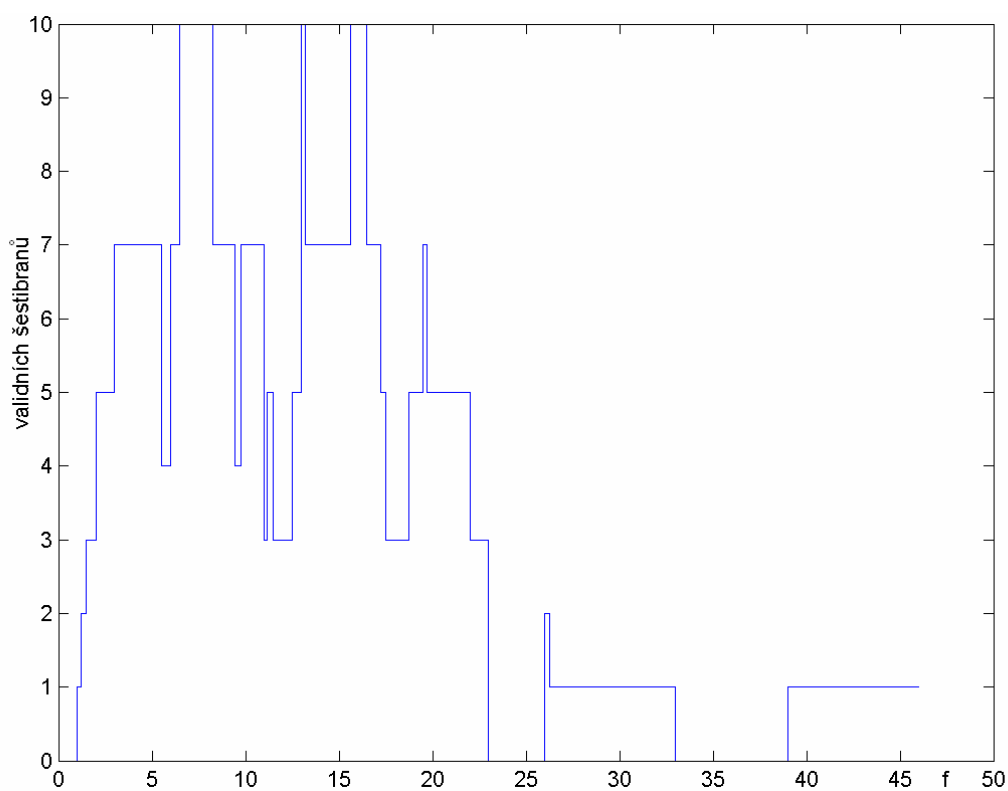
Tedy za předpokladu, že známe α_{\min} , m , l_1, \dots, l_{m-1} , f_{\min} , f_{\max} , můžeme určit nejdříve všechny šestibrany v systému dle vztahu (37). Pro každý šestibran je potřeba určit celkové délky úseků mezi zvolenými detektory a pro výslednou dvojici úseků pro každý šestibran pak určit, zda na zvoleném kmitočtu f v rozsahu $f_{\min} : f_{\max}$ splňuje podmínku α_{\min} . Takto je potřeba celý požadovaný rozsah kmitočtů prověřit. Prvním výsledkem je tedy informace o kmitočtech, na kterých zkoumaný šestibran pracuje viz. obr.22.



Obr.22 Průběh činnosti šestibranu v závislosti na kmitočtu pro $f_{\min}=1, f_{\max}=50$,
 $\alpha_{\min}=30^\circ, \alpha_1=30^\circ, \alpha_2=30^\circ$

Kmitočť je normován k f_{\min} a α_1, α_2 odpovídají l_1 a l_2 na tomto kmitočtu. Při použití nedisperzního vedení je vidět, že pásma činnosti a nečinnosti se s kmitočtem periodicky opakují.

Stejným způsobem je potřeba prozkoumat všechny existující šestibranu v měřicím systému a vytvořit celkový průběh počtu validních šestibranů s kmitočtem.



Obr.23 Průběh počtu funkčních šestibranů v závislosti na kmitočtu pro $f_{\min}=1, f_{\max}=50$,
 $\alpha_{\min}=30^\circ, \alpha_1=25^\circ, \alpha_2=5^\circ, \alpha_3=10^\circ, \alpha_4=20^\circ$

Průběh z obr.23 je potřeba vhodně přepočítat tak, abychom získali výsledek kritériální funkce. Je vhodné zohlednit nejdůležitější vlastnosti největší vahou, méně důležité pak vahou menší. Záleží na požadavcích zadání, zda je potřeba preferovat kmitočtový rozsah, či maximální počet funkčních šestibranů. Pro výpočet kritériální funkce byl navržen následující vztah

$$K = \sum_{i=2}^{f_{\max}} \left(\frac{f_i - f_{i-1}}{f_{i-1}} \cdot \frac{(n_{\text{celk}} - n_{\text{val}_i})^{k_1}}{n_{\text{celk}}} \right) + k_2 \cdot \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{posl}}} + k_3 \cdot (f_{\text{posl}+1} - f_{\text{posl}}), \quad (38)$$

kde n_{celk} je celkový počet šestibranů v obvodě (37), n_{val_i} je počet funkčních šestibranů v aktuálním kmitočtovém pásmu, f_{posl} je první kmitočet obvodu, kde není funkční ani jeden šestibran a $f_{\text{posl}+1}$ je kmitočet, kdy v obvodu opět funguje alespoň jeden šestibran.

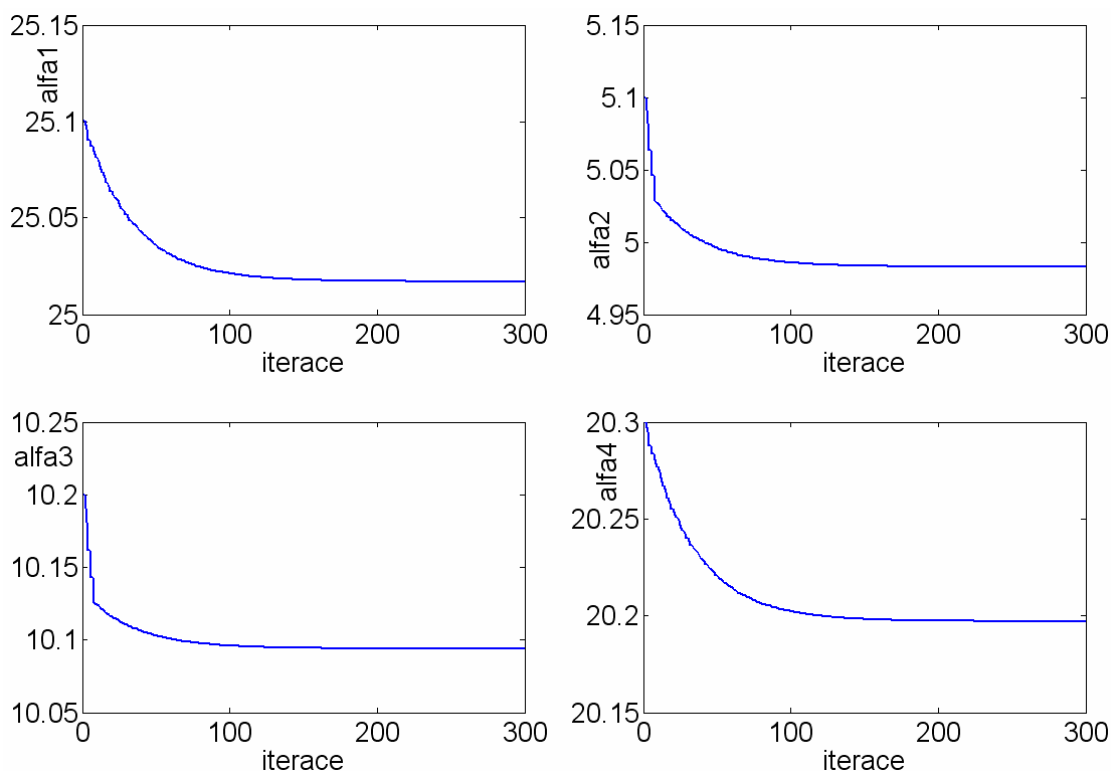
První člen v (38) vyjadřuje, jak obvod pracuje se změnou kmitočtu, tedy kolik šestibranů je validních a v jakých kmitočtových rozsazích. Druhý člen vyjadřuje, jaké pracovní šířky pásma v požadovaném rozsahu obvod dosahuje a třetí člen vyjadřuje první pásmo nefunkčnosti.

Mohlo by se zdát, že v kritériální funkci by postačoval pro výpočet pouze první člen, ve kterém je obsažen i rozsah činnosti, bohužel se v praxi ukázalo, že optimalizace pak sice hledala výsledky pro obvod pracující ve velkém rozsahu kmitočtů, ale pracovní pásmo bylo přerušováno úzkými pásmy nefunkčnosti, která nebyla tímto prvním členem dostatečně penalizována, a proto musel být přidán člen druhý. Třetí člen byl přidán pro případ, kdy je potřeba minimalizovat první pásmo nefunkčnosti a první dva členy pokrývají pouze nižší kmitočet tohoto pásma. Experimentálně byly zjištěny hodnoty váhovacích koeficientů $k_1=1$, $k_2=2$ a $k_3=0.1$ pro případ optimalizace na maximální kmitočtový rozsah.

4.3.2 Použití numerických metod pro výpočet měřícího systému

Pro volbu vhodné numerické metody je potřeba si uvědomit, jaký typ kritériální funkce je k dispozici, tedy vztah (38). Vzhledem k tomu, že není k dispozici první ani druhá derivace této kritériální funkce, není možné použít při optimalizaci newtonovské metody [11]. Pro optimalizaci je možné použít kvazi-newtonovské metody, kde se jednotlivé derivace nahradí konečnými diferencemi. Tyto metody však mají tendenci nacházet pouze lokální minima, a jsou tedy vhodné spíše na zpřesnění hodnoty, která byla získána kvalifikovaným odhadem jako počáteční či byla vypočtena jinou numerickou metodou. K takovému účelu byla naprogramována metoda nejprudšího sestupu. Ovšem její výsledky optimalizace byly velmi závislé na volbě počátečního bodu i na volbě kroku. Nejhorších výsledků pak dosahovala v místech prohledávaného prostoru, kde docházelo ke skokové změně kmitočtu f_{posl} . Vzhledem k tomu, že k takovým stavům v průběhu kritériální funkce dochází často, metoda nejstrmějšího sestupu i po různých modifikacích nebyla schopna uspokojivé

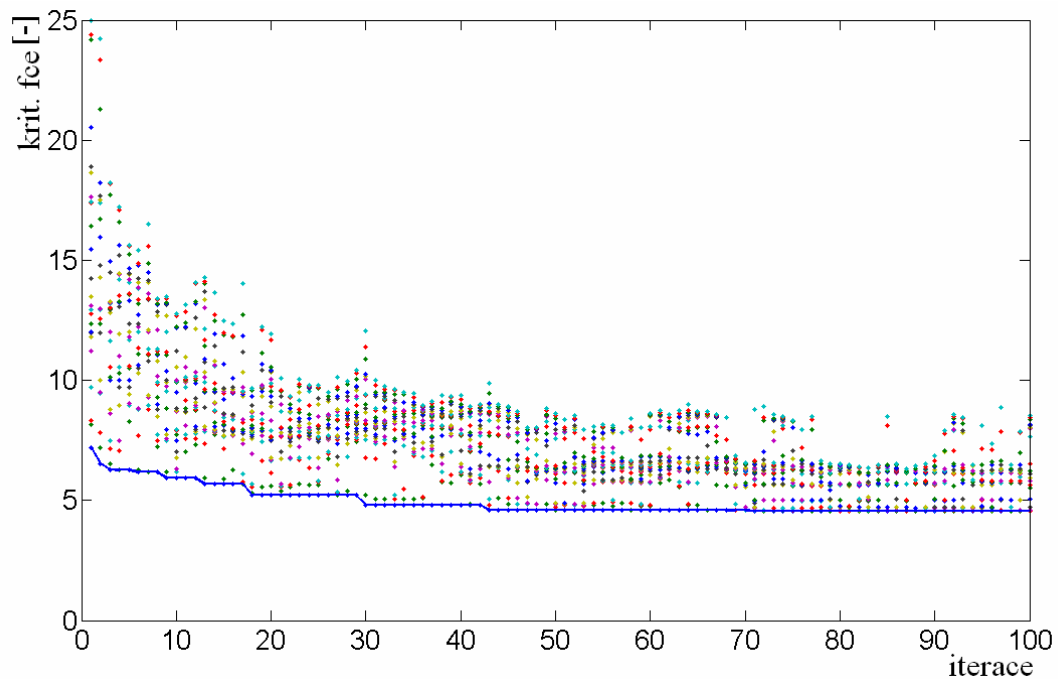
optimalizace. Na obr.24 je vidět průběh optimalizace pro 300 iterací, kde jako vstupní hodnoty byly vzaty modifikované údaje z obr.23, protože pro původní hodnoty optimalizace selhává.



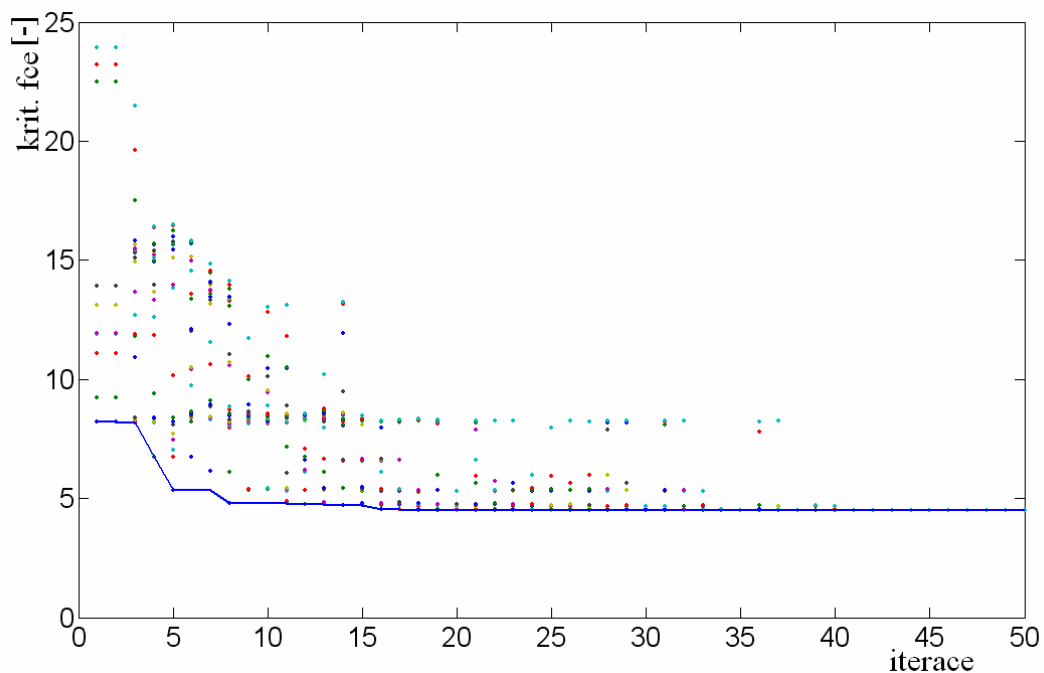
Obr.24 Průběh optimalizace pro počáteční hodnoty $f_{\min}=1, f_{\max}=50, \alpha_{\min}=30^\circ, \alpha_1=25.1^\circ, \alpha_2=5.1^\circ, \alpha_3=10.2^\circ, \alpha_4=20.3^\circ$

Nalezený bod v prostoru řešení je lokálním minimem kriteriální funkce a zde možnosti metody končí. Nejdůležitější údaj pro nalezený bod řešení, tedy normovaný kmitočet f_{posl} je 23, což odpovídá výsledku na obr.23 bez optimalizace.

Pro prohledání celého prostoru řešení jsou vhodnější metody globální. Mezi nejznámější metody patří genetické algoritmy. Pro optimalizaci byly implementovány genetické algoritmy s jejich typickými operacemi mezi generacemi, tedy s náhodným vytvořením první generace, křížením, mutací a elitismem. Po nastavení velikostí vlivů těchto jednotlivých operací na algoritmus pro konkrétní případ, je možné efektivně získat výsledky řešení, které jsou mnohem lepší (mají menší hodnotu kriteriální funkce), než výsledky získávané v předešlém případě s metodou nejstrmějšího sestupu. Experimentálně bylo zjištěno, že metoda optimalizuje i při malém počtu jedinců v generaci. Při použití padesáti jedinců je již optimalizace velmi úspěšná a po cca padesáti až sto generacích dospívá k výsledkům, které se již dále nezlepšují. Normovaný kmitočet f_{posl} v tomto případě dosahuje hodnoty 120. Zde je vidět, že s danými vstupními hodnotami lze nalézt hodnoty α_1 až α_4 pro činnost v rozsahu kmitočtů 1 : 120.



Obr.25 Průběh optimalizace pomocí genetických algoritmů pro vstupní hodnoty $f_{\min}=1$, $f_{\max}=150$, $\alpha_{\min}=30^\circ$, 4 neznámé α_1 až α_4 , 50 jedinců v generaci a 100 generací. Zobrazeno nejlepších 25 jedinců z každé generace



Obr.26 Průběh optimalizace pomocí včelího roje pro vstupní hodnoty $f_{\min}=1$, $f_{\max}=150$, $\alpha_{\min}=30^\circ$, 4 neznámé α_1 až α_4 , 50 jedinců v generaci a 50 generací. Zobrazeno nejlepších 25 jedinců z každé generace

I přes úspěšnost genetických algoritmů byla hledána další možnost výpočtu, protože pro malé hodnoty $\alpha_{\min} < 30^\circ$ a velký počet neznámých α optimalizace pomocí genetických algoritmů probíhala po dobu několika hodin.

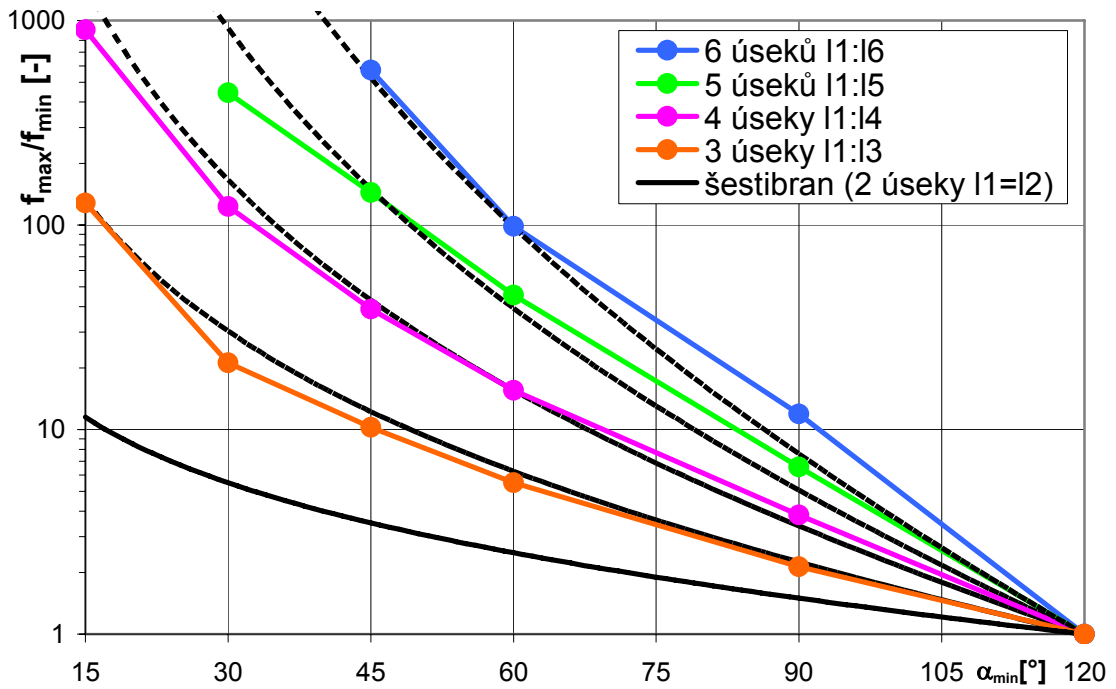
Jednou z moderních globálních optimalizačních metod je optimalizace pomocí včelího roje [12]. Zahrnuje v sobě náhodnou tvorbu první generace, určení lokálních minim a globálního minima, výpočet rychlostí jednotlivých včel a jejich směru. Ve smyčce se výpočet opakuje po zadaný počet generací. Oproti genetickým algoritmům jsou více zdůrazněna nalezená minima a není potřeba provádět převod jednotlivých jedinců do binární podoby a zpět. Na obr. 26 je vidět průběh takové optimalizace. Zobrazena je pouze polovina jedinců z každé generace stejně, jako u genetických algoritmů. Je jasné vidět, že při stejném počtu jedinců metoda včelího roje konverguje k výsledku mnohem dříve.

Pokud vezmeme jako referenční graf z obr.19, je možné do něj uvést výsledky optimalizací pomocí metody genetických algoritmů a metody včelího roje. Optimalizace byly postupně prováděny pro různé α_{\min} a různé počty detektorů v měřicím systému. Pro velké α_{\min} a menší počet detektorů probíhaly optimalizace rychle a výsledky byly získány v krátkém čase. Výpočty pro šest či sedm detektorů a menší hodnoty α_{\min} probíhaly již několik hodin. Protože v obou metodách vystupuje použití náhodných čísel, je potřeba pro každé vstupní hodnoty danou metodu optimalizace provést vícekrát, typicky alespoň desetkrát. Tím se konstrukce grafů na obr.27 a obr.28 stala velice výpočetně i časově náročnou. Je vidět, že ve většině případů byla metoda včelího roje úspěšnější a našla pro zadané vstupní podmínky lepší řešení s větší šířkou pásma. V obou případech je zřejmé, že výsledky pro pracovní rozsah 1 : 100 a vyšší byly pravděpodobně nalezeny pouze jako lokální minima a jejich hodnoty neodpovídají plně tendencím vyplývajícím z ostatních výpočtů.

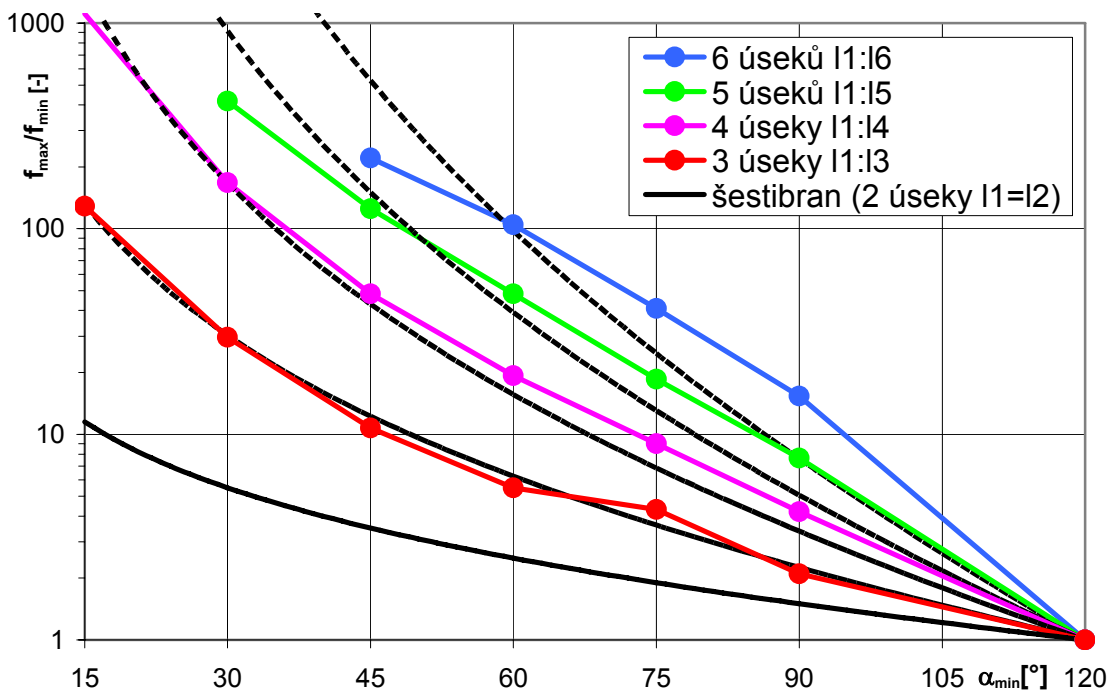
Grafy z obr.27 a obr.28 by jistě šlo spojit dohromady a využít lepších výsledků z každé metody, ale výsledek by se změnil minimálně.

V grafech je také vidět srovnání mezi kaskádami klasických šestibranů a měřicím systémem s více úseky vedení, kde např. kaskáda tří šestibranů (min. 8 detektorů) dosahuje stejné pracovní šířky pásma jako měřicí systém se čtyřmi úseky vedení (6 detektorů). Ne jenom, že tak lze ušetřit dva detektory v systému, ale také získáme až dvacet šestibranů na jednom kmitočtu, a tedy až dvacet výsledků měření na jednom kmitočtu.

Pro návrh měřicího systému je tedy potřeba zvolit požadovaný úhel α_{\min} na vodorovné ose a pracovní rozsah kmitočtů na ose svislé. V průsečíku zvolených hodnot, nebo dále od počátku souřadného systému je možné najít konstrukci, pomocí které lze měřicí systém realizovat. Takto získaný seznam požadavků je pak možné zadat do optimalizačního výpočtu a získáme konkrétní rozměry pro konstrukci měřicího systému.



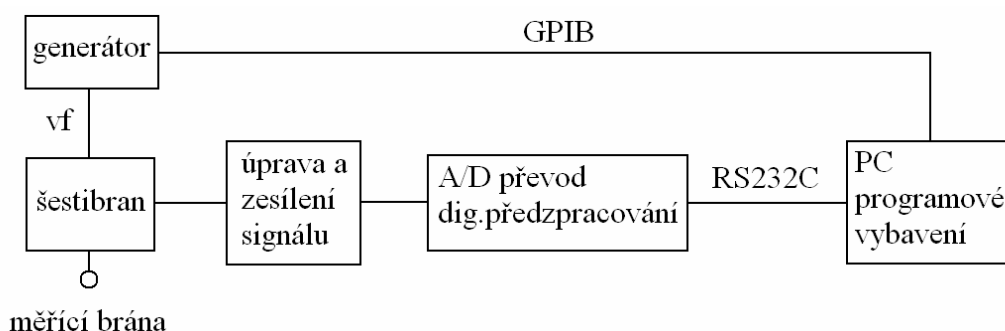
Obr.27 Šířka pásma měřicího systému v závislosti na zvoleném α_{\min} , kde parametrem je počet neznámých l_1 až l_{m-1} , optimalizováno pomocí metody genetických algoritmů. Černě jsou vyznačeny referenční výpočty jednoduchého šestibranu a čárkovaně jednotlivé kaskády dvou až pěti šestibranů



Obr.28 Šířka pásma měřicího systému v závislosti na zvoleném α_{\min} , kde parametrem je počet neznámých l_1 až l_{m-1} , optimalizováno pomocí metody včelího roje. Černě jsou vyznačeny referenční výpočty jednoduchého šestibranu a čárkovaně jednotlivé kaskády dvou až pěti šestibranů

4.4 Realizace jednoduchého měřicího systému na principu metody šestibranu

Pro získání zkušeností s chováním jednotlivých potřebných stavebních bloků pro měřicí systém pracující na principu mikrovlnného šestibranu byl nejprve navržen a realizován jednoduchý měřicí systém. Celý měřicí systém potřebuje ke své činnosti množství dalších stavebních bloků, které celkové měření a zpracování výsledků umožní. Na obr.29 je vidět blokové schéma, které bude v následujících kapitolách rozebráno podrobně.



Obr.29 Blokové schéma měřicího systému

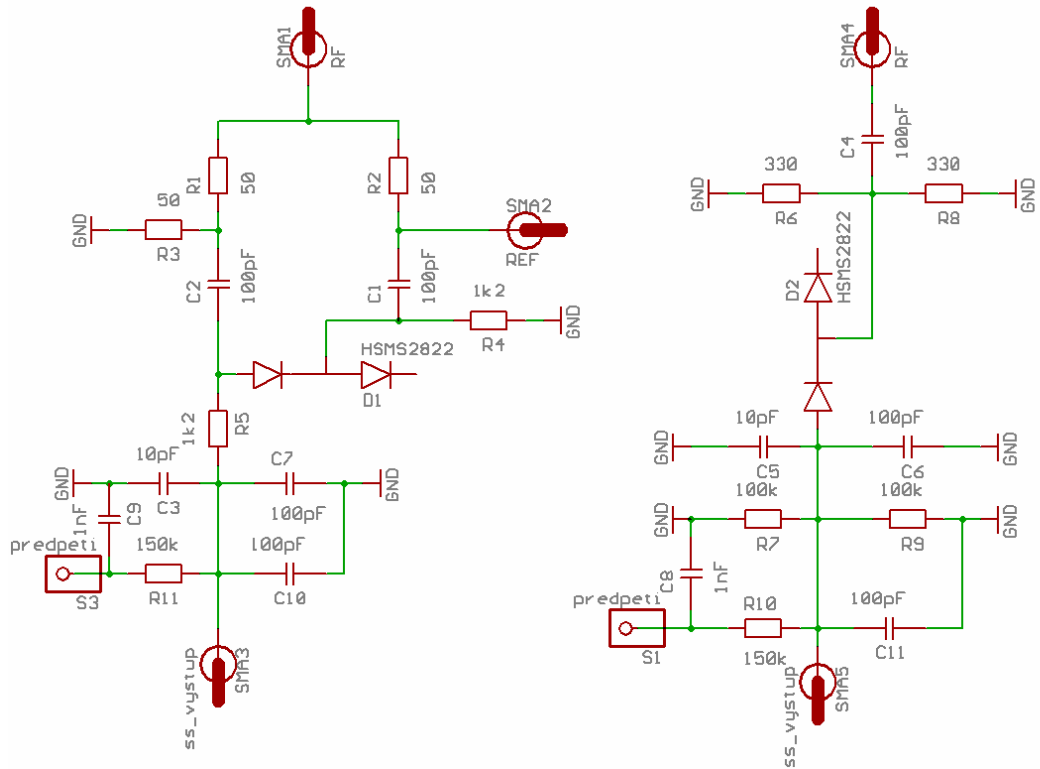
4.4.1 Realizace jednoduchého šestibranu

Jádrem měřicího systému je samotný šestibran umožňující měření impedance. Principiální schéma zapojení je identické s obr.16. Šestibran obsahuje následující bloky, které je potřeba navrhnout:

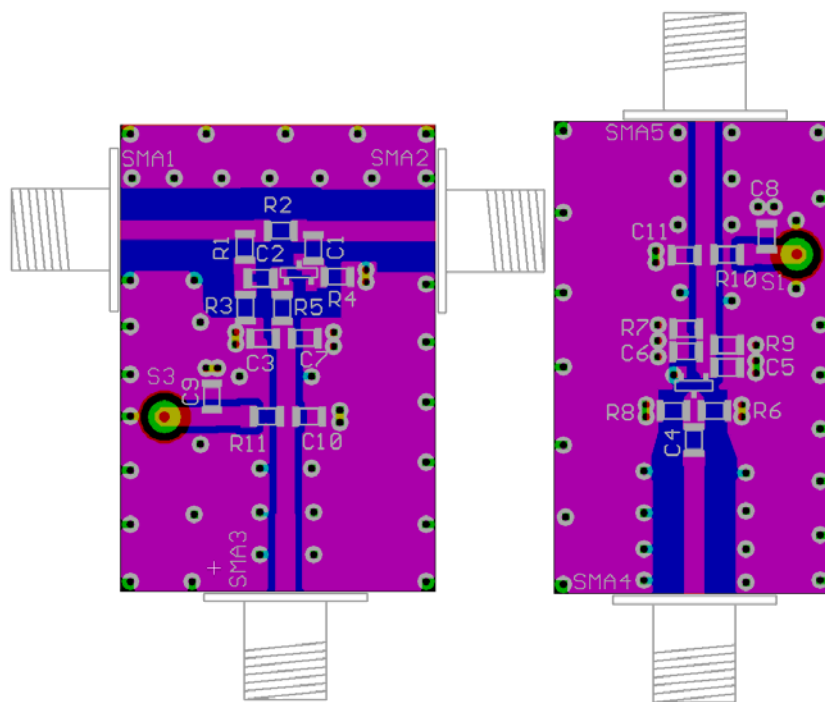
- rezistivní můstek
- diodový detektor
- vložené vedení
- vložený útlumový článek

Nejprve bylo navrženo detailní schéma zapojení můstku a detektoru a byly navrženy desky plošných spojů, tak aby se zjistily jejich dosahované parametry. Na obr.30a je vidět schéma zapojení obou bloků, na obr.30b pak jejich rozvržení na deskách plošných spojů. Jako materiál byl použit běžný typ FR4 o tloušťce 0.8 mm s relativní permitivitou 4.2.

Oba detektory byly navrhovány s ohledem na maximální pracovní šířku pásma, kladnou polaritu použitého předpětí a kladné výstupní napětí. Poslední podmínka je splněna jenom částečně, na detektoru je bez signálu klidové předpětí, při detekci se potom detekované napětí odečítá od klidového, nicméně výsledné napětí je pro používané výkony kladné.

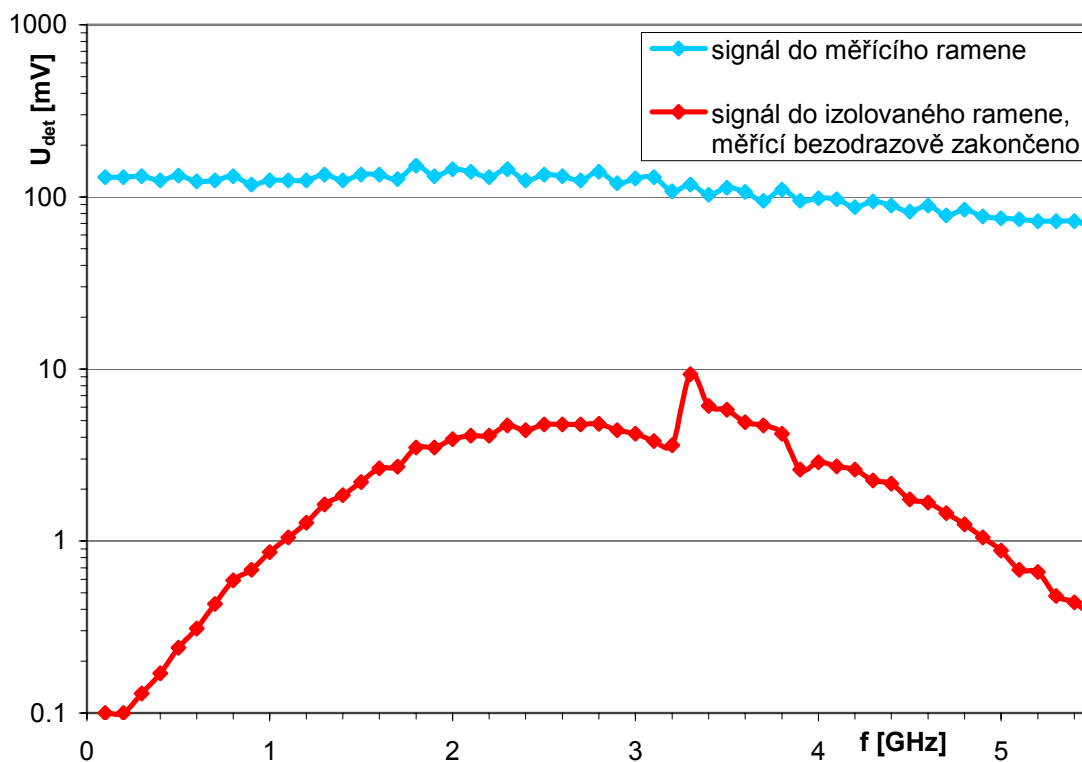


Obr.30a Schéma zapojení rezistivního můstku a diodového detektoru

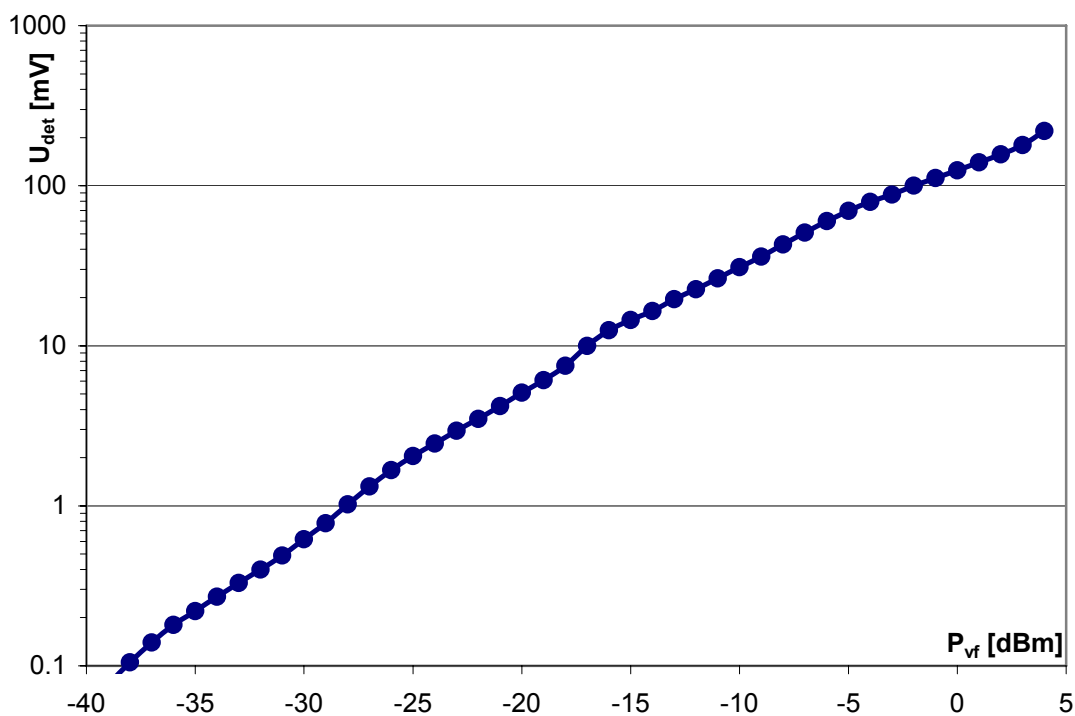


Obr.30b Rozložení součástek na deskách plošných spojů pro rezistivní můstek a diodový detektor

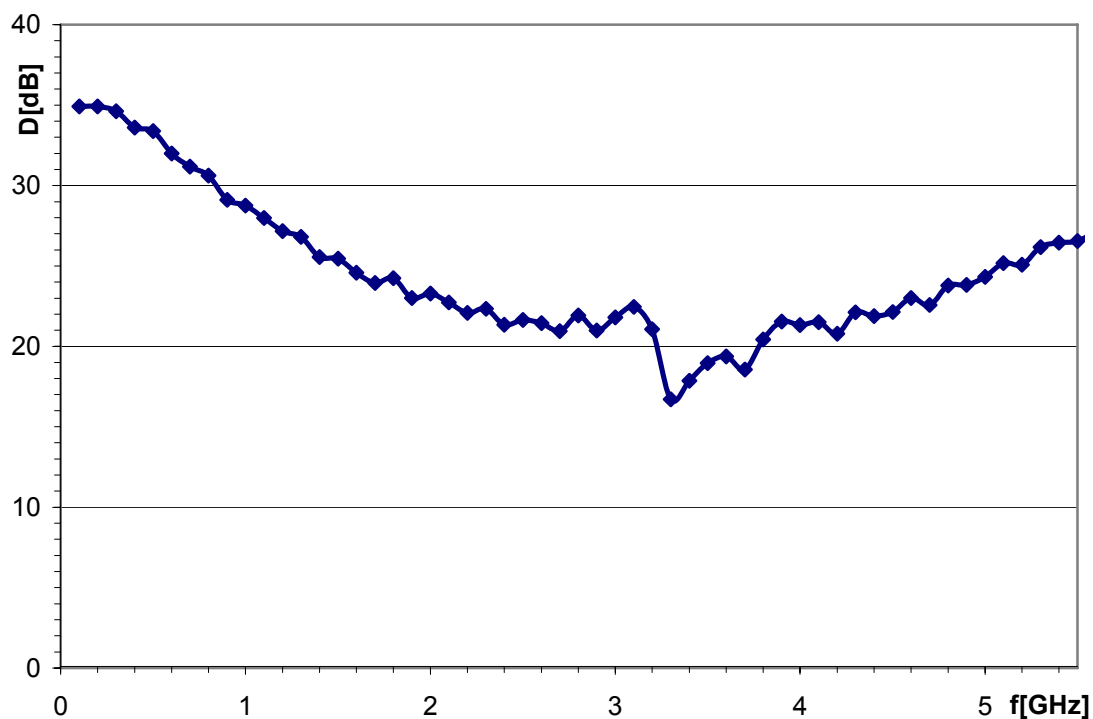
Oba bloky byly sestaveny na navržených deskách plošných spojů v SMT technologii, s převážnou velikostí součástek 1206. Následně byly proměřeny jejich vlastnosti, hlavně výstupní napětí v závislosti na kmitočtu a vstupním výkonu. Pro všechna měření byl použit generátor HP8350B se zapnutou vnitřní modulací 1 kHz a napětí z detektoru bylo měřeno nf milivoltmetrem BM579. Generátor nebyl nijak kontrolován pomocí přesného wattmetru, takže je potřeba brát měření kmitočtových charakteristik s ohledem na jeho přesnost výstupní úrovně, což je dle výrobce $\pm 0.9\text{dB}$. Pro měření přenosových charakteristik pak byl použit interní atenuátor, jehož chyba mohla způsobit některé nepravidelnosti na charakteristikách. Pomocí změřeného průběhu přenosové charakteristiky na obr.32 je možné převést průběh z obr.31 z výstupního detekovaného napětí na ekvivalentní vstupní vf výkon na detektoru. Následně je možné jednoduchým výpočtem určit hodnotu směrovosti rezistivního můstku, jako jeho nejdůležitějšího parametru. Na obr.33 je zobrazen průběh směrovosti v závislosti na kmitočtu vstupního signálu. Z uvedeného průběhu je vidět, že směrovost až po kmitočet cca 3 GHz klesá, nad ním nastává parazitní rezonance realizované konstrukce. Mohlo by se zdát, že by se rezistivní můstek dal použít i na vyšších kmitočtech mimo zmíněnou rezonanci, avšak měření zde již vykazovalo velké nestability měření. Použitelnost realizovaného rezistivního můstku je tedy v rozsahu do 3 GHz. Nejnižší pracovní kmitočet můstku je dán velikostí použitých oddělovacích kondenzátorů C_1 a C_2 , viz. schéma na obr.30a, v tomto konkrétním případě pokles citlivosti o jeden dB nastává na kmitočtu cca 3.3 MHz.



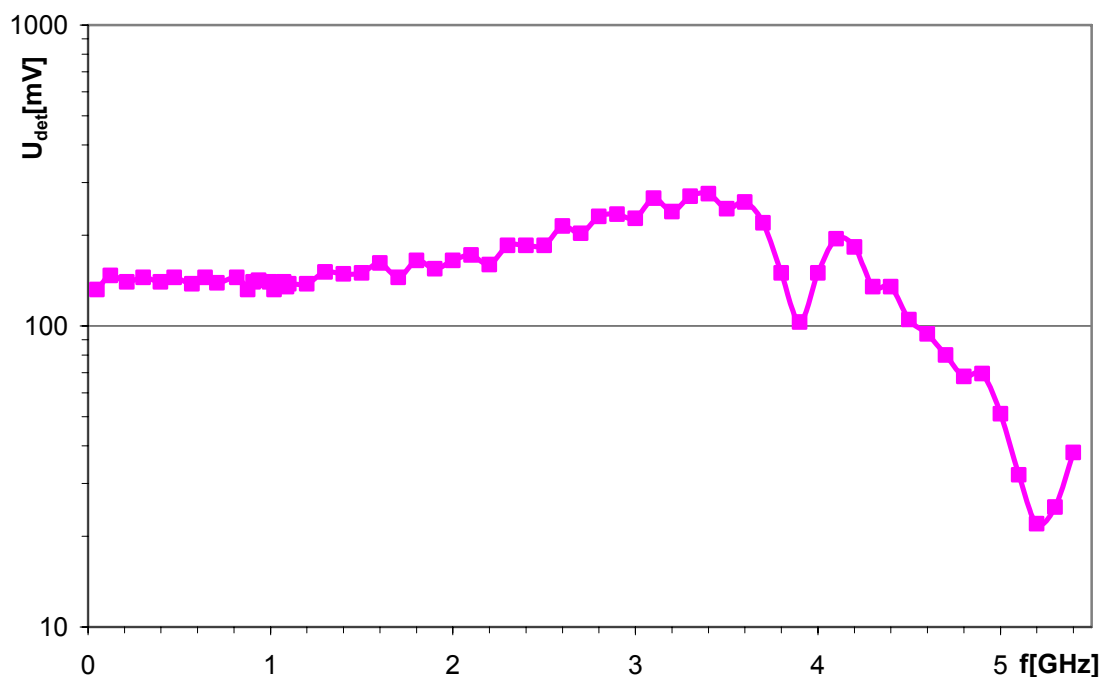
Obr.31 Kmitočtová charakteristika zkušebního rezistivního můstku pro výkon měřícího signálu 0 dBm



Obr.32 Přenosová charakteristika detektoru v rezistivním můstku pro kmitočet 1 GHz



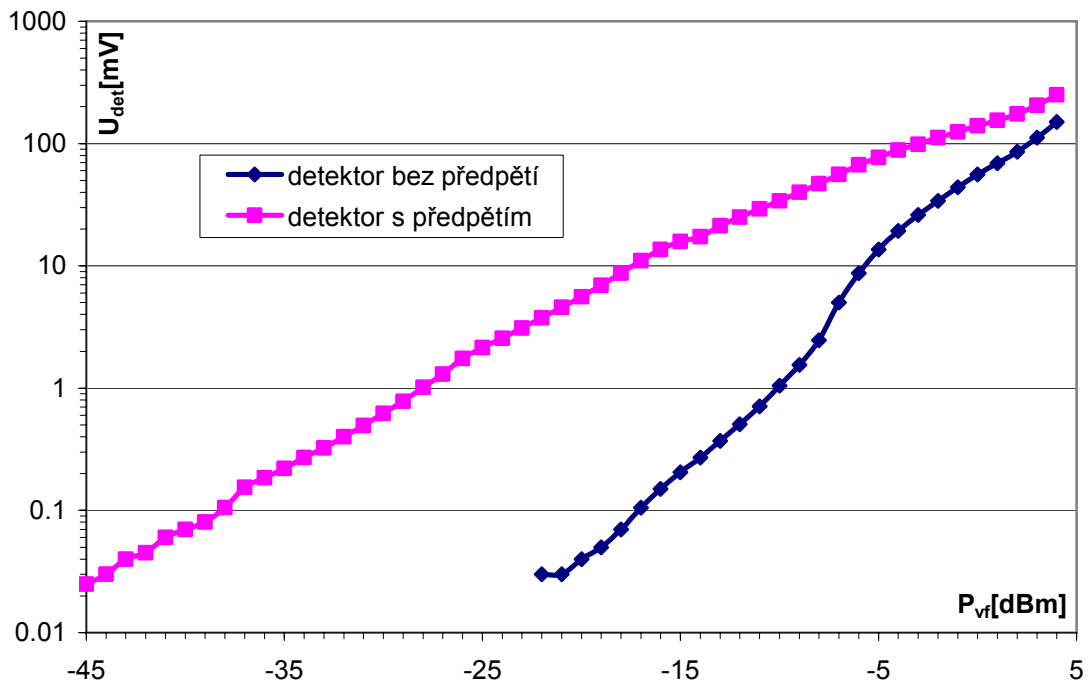
Obr.33 Směrnost rezistivního můstku v závislosti na kmitočtu



Obr.34 Kmitočtová charakteristika zkušebního detektoru pro výkon měřícího signálu 0 dBm

Následně byl měřením podroben i realizovaný diodový detektor. Na obr.34 je vidět jeho kmitočtová charakteristika a na obr.35 je pak přenosová charakteristika na

kmitočtu 1 GHz. Zároveň byla pro porovnání měřena tato charakteristika s i bez stejnosměrného předpětí detektoru.



Obr.35 Přenosová charakteristika diodového detektoru pro kmitočet 1GHz

Z výsledů měření je jednoznačně vidět, že detektor s předpětím umožňuje měření v daleko větším rozsahu vstupních výkonů a pro porovnatelný výkon dosahuje na výstupu až o dva řády vyššího výstupního napětí.

Pohledem na naměřené kmitočtové charakteristiky lze usoudit, že realizované detektory jsou vhodné pro stavbu šestibranu s kmitočtovým rozsahem maximálně do 3 GHz. Nejnižší pracovní kmitočet je opět dán velikostí oddělovacích a blokovacích kondenzátorů, v tomto případě cca 5 MHz.

Vložené vedení lze nejnázne navrhnout jako mikropáskové vedení s impedancí 50Ω , s ohledem na vlastnosti použitého materiálu FR4. Použitím návrhových vztahů z [13], nebo použitím volně dostupného programu [14] se určí šířka mikropáskového vedení 1.55 mm a činitel zkrácení $\xi=0.562$ na kmitočtu 1 GHz. Délku mikropásku určíme jako polovinu jeho minimální elektrické délky. Zvolím $f_{min}=100$ MHz a $\alpha_{min}=15^\circ$

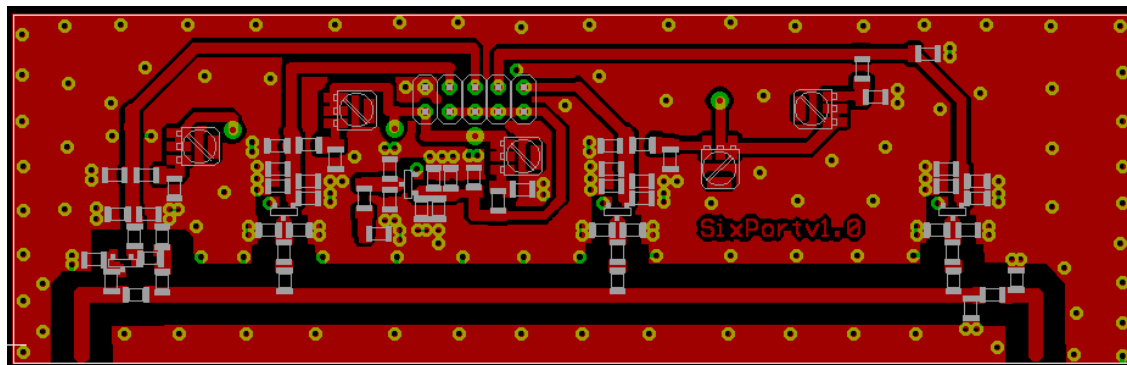
$$l = \frac{c}{f_{min}} \cdot \frac{0.5 \cdot \alpha_{min}}{360^\circ} \cdot \xi = \frac{2.997 \cdot 10^8}{100 \cdot 10^6} \cdot \frac{0.5 \cdot 15^\circ}{360^\circ} \cdot 0.562 = 0.0351 \text{ m} . \quad (39)$$

Ze zvolených hodnot f_{min} a α_{min} můžeme podle vztahu (35) určit

$$f_{max} = \left(\frac{180^\circ}{\alpha_{min}} - \frac{1}{2} \right) \cdot f_{min} = \left(\frac{180^\circ}{15^\circ} - \frac{1}{2} \right) \cdot 100 \cdot 10^6 = 1150 \text{ MHz} . \quad (40)$$

Zbývá určit hodnotu vloženého útlumu pro konstruovaný šestibran. Z grafu na obr.13 a následné diskuze vyplývá, že útlum L je vhodné volit v blízkosti hodnoty 1.6 dB. Odtud vyplynuly hodnoty pro útlumový článek takto: $R_1=8.2 \Omega$, $R_2=560 \Omega$.

Pro realizaci celého šestibranu jsou tak známy všechny jeho stavební bloky a může být vytvořeno kompletní schema zapojení šestibranu a následně pak deska plošných spojů.



Obr.36 Deska plošných spojů pro šestibran, strana spojů s rozložením jednotlivých součástek, druhá vrstva mědi je jednolitá zemní rovina

Na desce plošných spojů je možno si povšimnout přidaného páteho detektoru uprostřed pod výstupním konektorem. Další detektor nemá žádnou souvislost s principem funkce šestibranu a není na něj také připojen žádný vstupní signál. Je zde pro možnost odečítání jeho stejnosměrné složky od ostatních detektorů, což omezí teplotní závislost měření a zvýší se tak přesnost a opakovatelnost měření. Kompletní schéma zapojení a desku plošných spojů je možno nalézt v příloze.

4.4.2 Realizace bloku úpravy a zesílení signálu

Tento blok plní několik funkcí, které vyplývají z vlastností detektorů použitých v šestibranu a na druhé straně z možností použitého A/D převodníku v dalším bloku.

Diodové detektory v šestibranu mají vysokou výstupní impedanci, výstupní napětí z detektorů sestává z klidového předpětí, které se mění s teplotou detektorů a detekovaného napětí, které se od klidového odečítá. Hodnota výstupního napětí z detektorů se pohybuje v rozsahu od 200 mV bez signálu, až pod úroveň 0 mV při velkém vstupním vf signálu.

Výstup bloku je připojen na interní A/D převodník mikroprocesoru Cygnal (dnes Silabs) C8051F020 [15] se vstupním rozsahem 0 až 2.43 V s možností použití vstupního zesilovače s napětěovým zesílením 0.5 až 16. Zde by se zdálo, že stačí zapnout zesílení 8 a celý blok vypustit, bohužel tento interní zesilovač pro zesílení větší, než 2, není pro svůj vlastní vysoký šum prakticky použitelný.

Z předchozího vyplývají na blok následující požadavky. Pro každý měřicí kanál z šestibranu jeden zesilovací stupeň, odečtení klidového předpětí detektoru

a změnu polaritu detekovaného napětí. Všechny tyto body lze realizovat jedním rozdílovým zesilovačem, na jehož neinvertující vstup je připojen referenční detektor a na invertující detektor měřící. Zesílení je nastaveno na hodnotu 12. Kompletní schéma zapojení lze nalézt v příloze. Výběr použitého operačního zesilovače byl ztížen požadavkem na drift a offset vstupů s celkovou hodnotou menší, než jedna odpovídající úroveň následujícího A/D převodníku. Jedna úroveň převodníku odpovídá napětí cca 0.6 mV a s ohledem na zesílení zesilovače převodem na jeho vstup získáme chybové napětí max. 50 μ V. Takové parametry splňují pouze speciálně konstruované operační zesilovače s téměř nulovým driftem i offsetem, např. AD8551 firmy Analog Devices [16]. Tento typ nabízí offset o typické hodnotě 1 μ V a teplotní drift 0.005 μ V/°C.

Obvod je navržen tak, aby bylo možné všechny signály odečítat buď od klidového napětí referenčního detektoru, nebo odečítat od přesné reference a další korekce řešit až v dalších blocích.

4.4.3 Realizace bloku A/D převodu a komunikace s PC

Vstupními signály zde jsou zesílená napětí z detektorů v rozsahu 0 - 2.43 V až v osmi kanálech a ovládání pomocí sériové linky RS232C. Alternativně může být jeden signál z detektoru nahrazen rozmitacím napětím z generátoru při potřebě sledování volně běžícího rozmitání generátoru. Výstupem bloku jsou data z A/D převodníku posílána prostřednictvím sériové linky do řídicího počítače PC. Pro realizaci tohoto bloku byl s výhodou použit vývojový kit procesoru C8051F020, který nabízí MCS51 kompatibilní jádro procesoru a další periferie na čipu, kde je využit hlavně osmikanálový dvanáctibitový A/D převodník s předzesilovačem.

Program je vytvořen v assembleru a pracuje jako nekonečná smyčka, která vždy čeká na příkaz ze sériové linky.

Následuje popis jednotlivých příkazů a jejich funkcí:

Nastavení aktivních kanálů A/D převodníku - příkaz „C“ – po přijetí příkazu je na sériové lince očekáván další bajt, jehož jednotlivé bity odpovídají požadované aktivitě jednotlivých kanálů převodníku.

Nastavení počtu měření na jednom kanále převodníku - příkaz „L“ – po přijetí příkazu je na sériové lince očekáván další bajt, jehož hodnota 1 až 255 odpovídá požadovanému počtu opakovaných měření.

Nastavení zabezpečení přenosu dat - příkaz „Z“ – po přijetí příkazu je na sériové lince očekáván další bajt, jehož hodnota 0 či 1 rozhoduje o tom, zda bude při přenosu dat použito zabezpečení komunikace proti chybám.

Nastavení zisku předzesilovače převodníku - příkaz „G“ – po přijetí příkazu je na sériové lince očekáván další bajt, jehož hodnota 6, 0, 1, 2, 3, 4 odpovídá napěťovému zesílení předzesilovače 0.5, 1, 2, 4, 8, 16.

Nastavení volby měření teploty procesoru při měření na A/D - příkaz „H“ – po přijetí příkazu je na sériové lince očekáván další bajt, jehož hodnota 0 či 1 rozhoduje o tom, zda bude při přenosu dat zároveň vyslána i naměřená teplota procesoru.

Měření teploty procesoru – příkaz „T“ - na sériovou linku je odeslána naměřená hodnota interního snímače teploty procesoru o délce dvou bajtů.

Měření A/D převodníku - příkaz „S“ – na sériovou linku jsou odeslány naměřené hodnoty z převodníku o délce dvou bajtů pro každý měřený kanál, měření je provedeno s aktuálním nastavením všech parametrů.

Vývoj programu samozřejmě není možné považovat za ukončený, nicméně současná podoba umožňuje plnohodnotná měření s dostatečnou rychlostí, která je prozatím limitována rychlostí jiných bloků měřicí sestavy. Pro případné urychlení měření je možné provést vícenásobná měření a jejich zpracování provést přímo v procesoru. V případě potřeby urychlení komunikace je možné použít převodník sériová linka-USB a tak využít vyšších přenosových rychlostí. Další z možností může být např. použití některého z jednodušších kompresních algoritmů a pod.

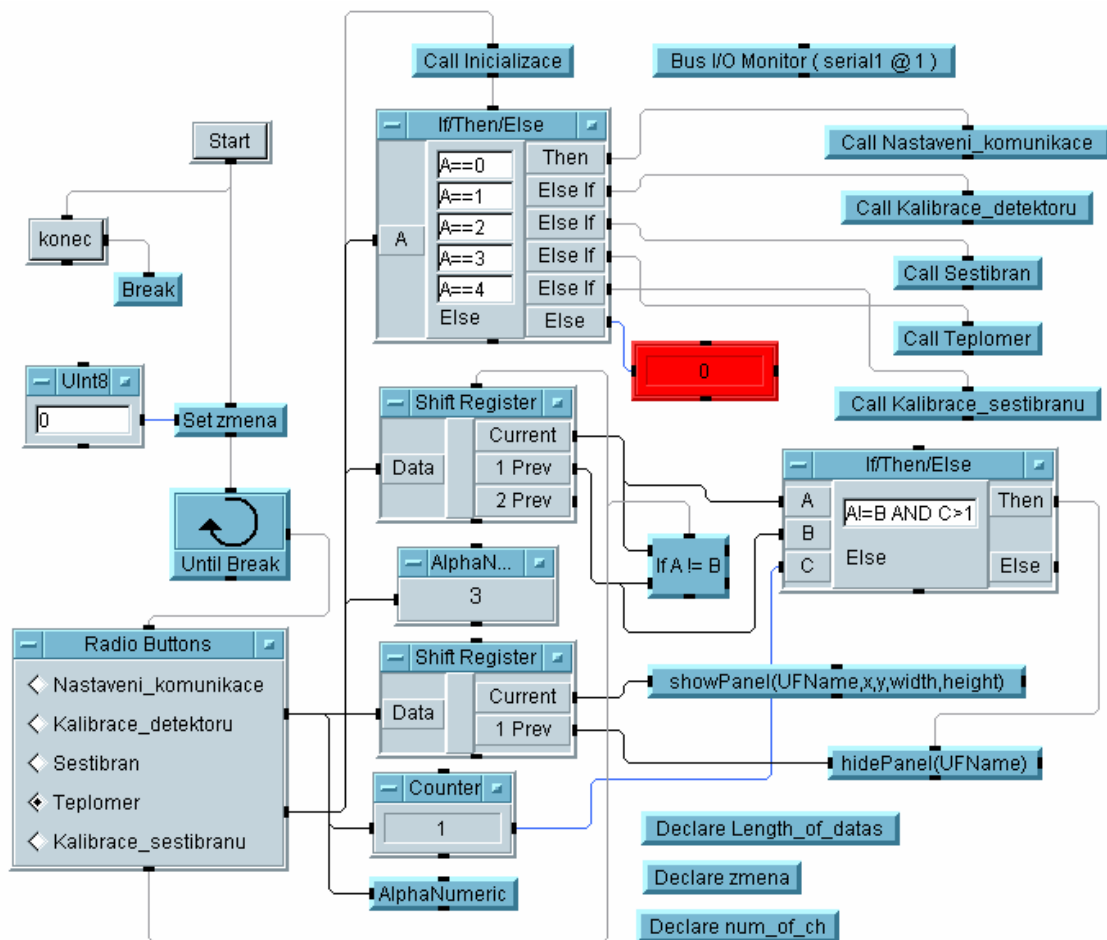
4.4.4 Programové vybavení pro PC

Programové vybavení bylo od počátku návrhu myšleno jako demonstrační, s úkolem maximální přehlednosti a jednoduchosti. Nebylo uvažováno o nasazení měření v praxi ani v komerčním prostředí. Veškeré programové vybavení je vytvořeno ve vývojovém prostředí Agilent VEE Pro [17]. Toto prostředí umožňuje plně grafické programování s kompletní nabídkou prvků pro komunikaci, zpracování dat, vizualizaci, řízení apod. Programování se provádí výběrem jednotlivých prvků a jejich položením na pracovní plochu, kde se následně pomocí datových a řídicích vodičů zapojí do celého programu. Pro matematicky náročné operace lze využít možnost vložení volání funkce napsané v prostředí Matlab.

Program je rozdělen do pěti bloků, které se logicky odlišují svou činností a typem použití. Následně bude popsána jejich činnost a principy funkce.

4.4.4.1 Hlavní blok programu

Tento blok má za úkol pouze volat jednotlivé bloky, které vykonávají různé funkce dle svého zaměření a zároveň je zobrazuje na pracovní ploše. Na obr.37 je vidět jeho celkové složení.



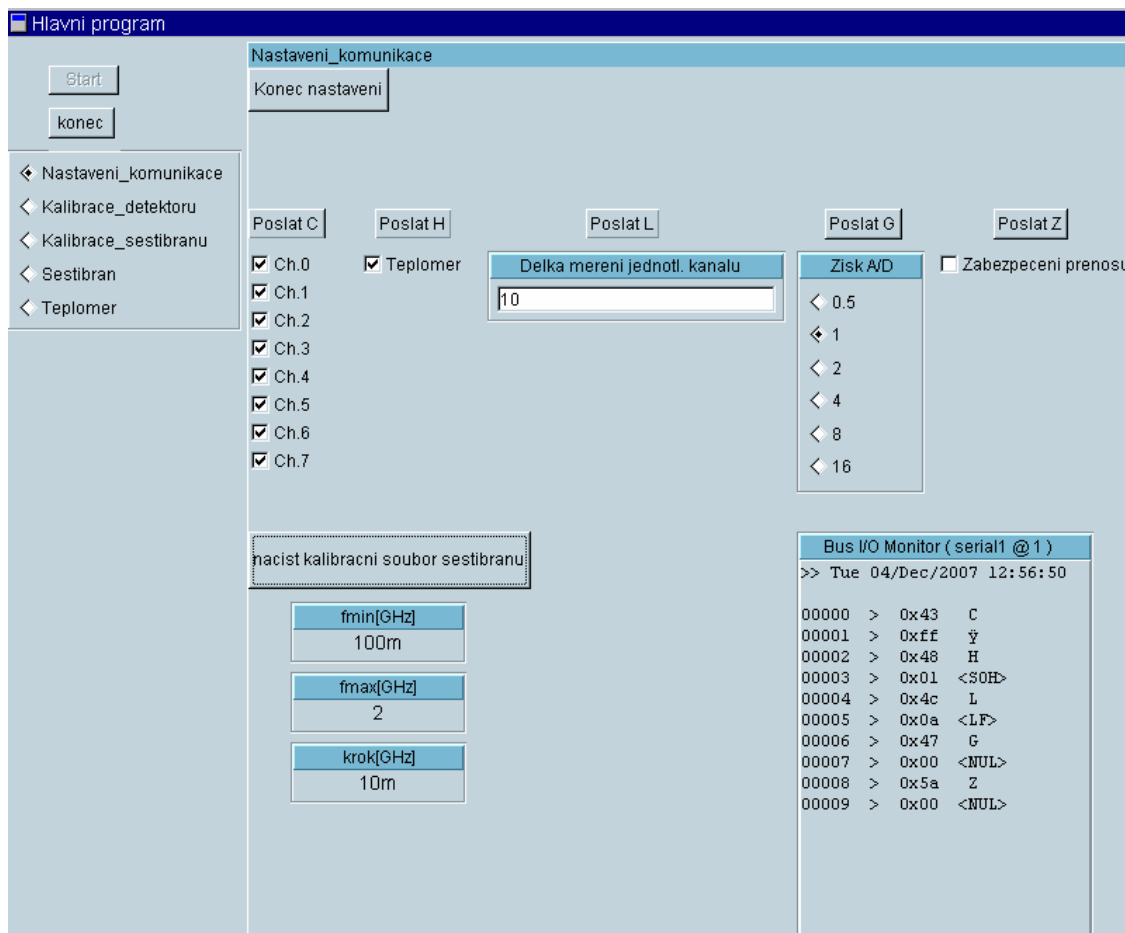
Obr.37 Jádro řídicího programu pro šestibran, vytvořené v prostředí VEE Pro

Celý program začíná tlačítkem *Start* a pokračuje směrem dolů přes všechny použité funkce. Je vidět, že pořadí činnosti funkcí jde shora dolů, tok dat jednotlivými bloky pak zleva doprava.

Uživatel programu při jeho spuštění vidí pouze zvolené bloky na tzv. panelu. V případě hlavního programu jsou vidět pouze tlačítka *Start* a *Stop* společně s výběrovým panelem *Radio Buttons* nabízených bloků ke spuštění. Tyto položky je vidět na obr.38 vlevo nahoře.

4.4.4.2 Nastavení komunikace

Zde je hlavním úkolem programu nabídnout možnosti konfigurace měření pomocí bloku A/D převodu s mikroprocesorem. Jak již bylo zmíněno výše, komunikace probíhá pomocí sériové linky. Na obr.38 je vidět celá nabídka nastavení.

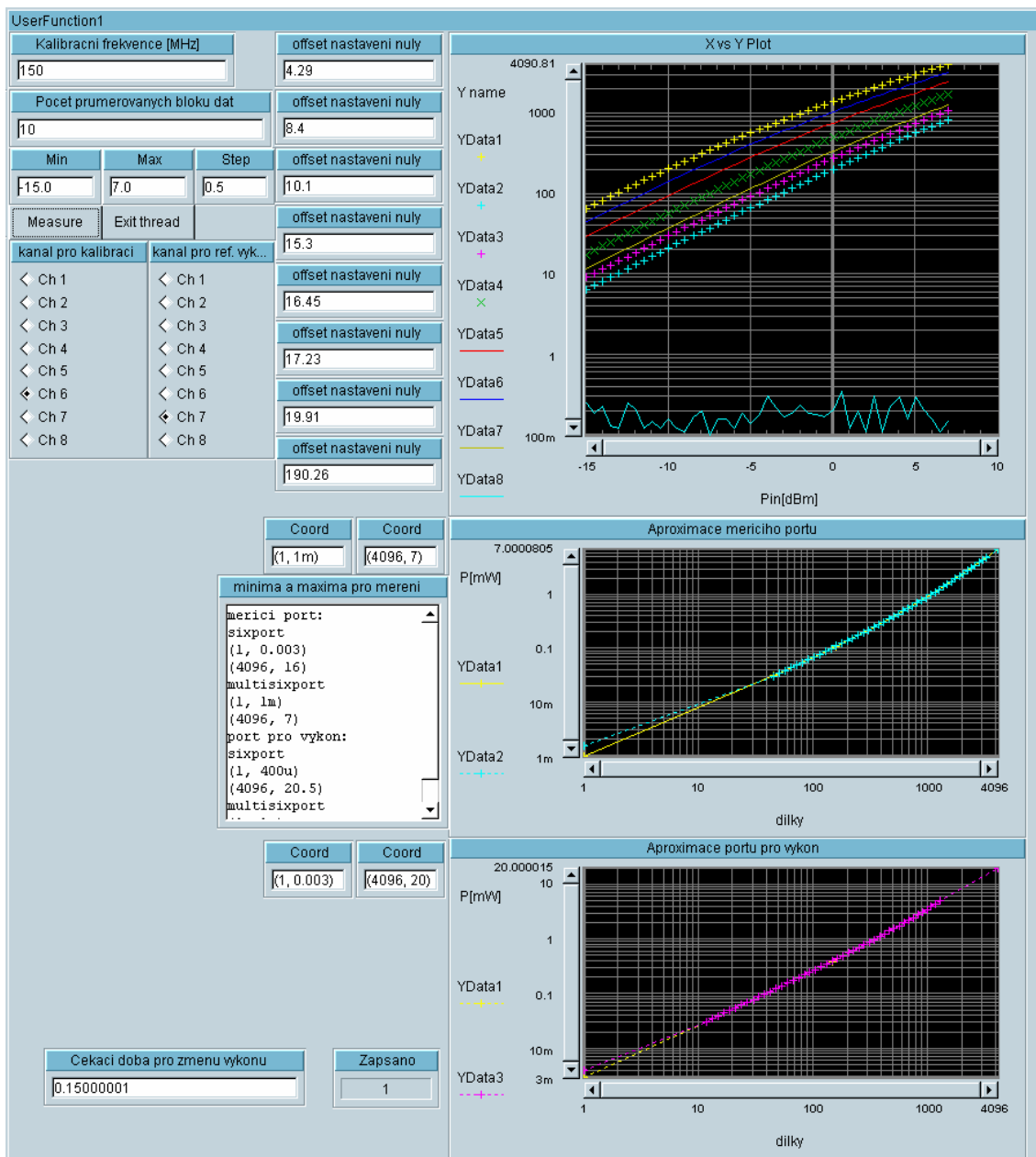


Obr.38 Blok nastavení komunikace

Kromě příkazů C, H, L, G, Z se v nabídce nachází také volba pro načtení kalibračního souboru šestibranu, jehož vytvoření probíhá v bloku kalibrace šestibranu. Pod touto volbou jsou zobrazeny základní parametry načteného kalibračního souboru. V pravém dolním rohu se nachází tzv. Bus I/O Monitor, ve kterém je možno sledovat komunikaci probíhající na sériové lince. V jeho okně je zobrazen stav po zápisu všech konfiguračních příkazů.

4.4.4.3 Kalibrace detektorů

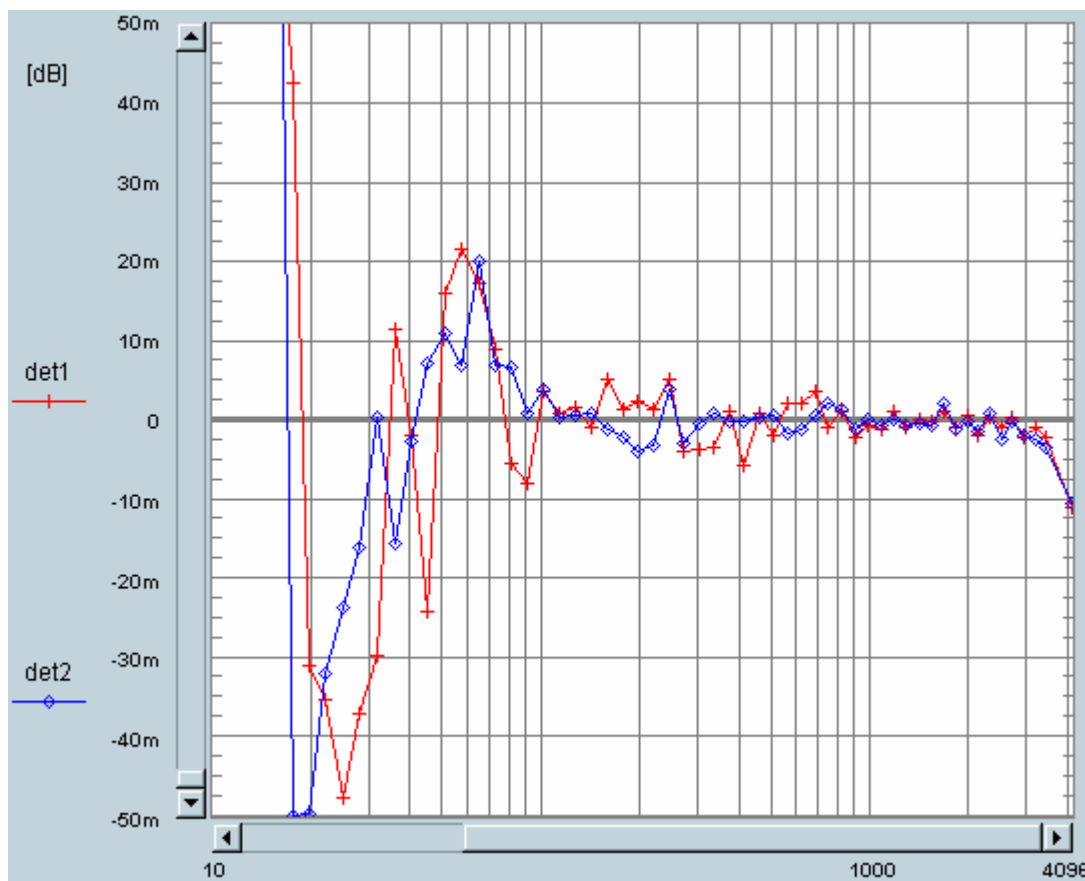
V kapitole 4.4.1 byly popsány použité diodové detektory pro šestibran a na obr.32 a obr.35 jsou vidět jejich přenosové charakteristiky, nicméně při měření v konkrétním šestibranu působí další vlivy, které tyto charakteristiky ovlivňují. Proto program umožňuje kalibraci detektorů přímo v šestibranu. Měření probíhá následovně. Nejdříve je potřeba zadat frekvenci, na které bude kalibrace probíhat. Dále se nastaví, přes kolik bloků dat se má provádět průměrování měřených dat a rozsah výkonů, přes které se má kalibrovat, včetně kroku v decibelech. V tomto okamžiku je možné provést první kalibraci. Program nejprve bez přítomnosti vf signálu změří hodnoty všech kanálů, což jsou reziduální pozůstatky stejnosměrné složky. Ty jsou pak v následném měření automaticky odečítány od měřených signálů. Dále program ovládá pomocí



Obr.39 Kalibrace detektorů v šestibranu

GPIB sběrnice generátor a postupně mění jeho výstupní výkon. Při každé hodnotě výkonu pak program provede měření všech kanálů A/D převodníku. Z naměřených výsledků je vidět na obr.39 vpravo nahoře graf. Po prvním provedení kalibrace je vidět, který detektor je nejcitlivější a je vhodné ho zvolit jako primární pro kalibraci. Druhý výběr nabízí kalibraci referenčního detektoru pro výkon. Dle těchto voleb jsou příslušné naměřené hodnoty použity k výpočtu aproximace přenosové charakteristiky. Vstupní hodnoty i výsledky aproximace jsou vidět v grafech napravo uprostřed a dole. Pro správný průběh kalibrace je vhodné, aby mezi vstupními hodnotami pro aproximaci byly i krajní body grafu a bylo tak možno lépe zajistit chování aproximační funkce v celém rozsahu vstupních hodnot. Tyto krajní hodnoty je nutno zadat manuálně, do oken vedle příslušných grafů. Pro samotnou aproximaci je použito polynomu šestého

a vyššího řádu, který je možno zvolit. Chyba aproximace je zobrazena na obr.40. Pro navržený šestibran je důležitý rozsah úrovní cca 100 - 4096, kde je chyba menší, než 0.005 dB. Zde bude přesnost kalibrace limitovat interní atenuátor generátoru, tedy jeho přesnost a opakovatelnost nastavených úrovní. Další možnosti kalibrací, které jsou popsány v literatuře, je možno nalézt v [18] či [19]. V případě [19] je uváděna chyba menší, než 0.02 dB.



Obr.40 Chyba aproximace přenosové charakteristiky pro dva detektory šestibranu

4.4.4.4 Kalibrace šestibranu

Výběr kalibrační sady a její konstrukce jsou popsány v kapitole 4.6. Jako kalibrační metoda byl vybrán nejjednodušší postup podle definice šestibranu vztahem (20), rozepsaným dále jako (21) a (22):

$$\sum_{i=1}^4 F_i \cdot P_i - r \cdot \sum_{i=1}^3 H_i \cdot P_i = r \cdot P_4 \quad , \quad (21)$$

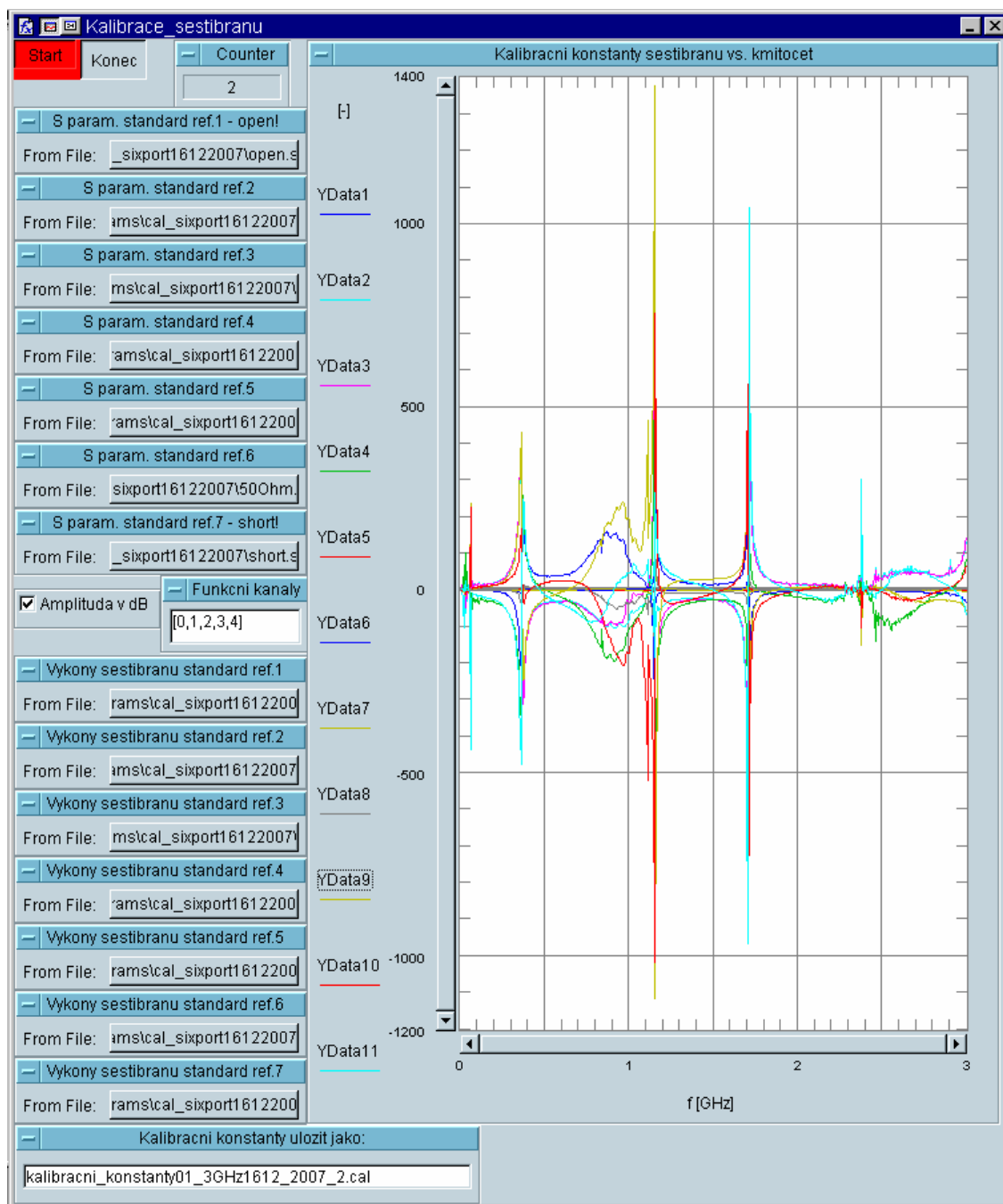
$$\sum_{i=1}^4 G_i \cdot P_i - x \cdot \sum_{i=1}^3 H_i \cdot P_i = x \cdot P_4 \quad . \quad (22)$$

Odtud lze vytvořit soustavu čtrnácti lineárních rovnic o jedenácti neznámých, kde P_{ik} znamená výkon na i -tém detektoru pro k -tou zátěž, $k=1$ až 7

$$F_1 P_{1k} + F_2 P_{2k} + F_3 P_{3k} + F_4 P_{4k} - r_k H_1 P_{1k} - r_k H_2 P_{2k} - r_k H_3 P_{3k} + 0 + 0 + 0 + 0 = r_k P_{4k}, \quad (41)$$

$$0 + 0 + 0 + 0 - x_k H_1 P_{1k} - x_k H_2 P_{2k} - x_k H_3 P_{3k} + G_1 P_{1k} + G_2 P_{2k} + G_3 P_{3k} + G_4 P_{4k} = x_k P_{4k}. \quad (42)$$

Řešení této soustavy rovnic je v programu realizováno jako volání externího výpočtu v programu Matlab, což prostředí VEE Pro plně podporuje.



Obr.41 Kalibrace šestibranu v programu

Pro praktické provedení kalibrace je potřeba mít k dispozici S parametry referenčních zátěží pro požadovaný kmitočtový rozsah a krok. Dále je nutné změřit výkonové odezvy šestibranu na všechny tyto zátěže.

Spárováním jednotlivých souborů v programu lze spustit kalibraci a zvolit název souboru pro uložení kalibračních konstant. Na obr.41 je vidět program po vypočtení kalibračních konstant. Je vidět, že hodnoty kalibračních konstant se s kmitočtem mění a to s velkou dynamikou a zároveň i na některých kmitočtech mění znaménka. Všechna měření byla provedena v rozsahu 10 MHz až 3 GHz, aby bylo možné sledovat chování šestibranu i mimo jeho uvažované pracovní pásmo.

4.4.4.5 Měření metodou šestibranu

Samotné měření sestává z nabídky několika typů měření, kterými jsou:

- **měření úrovně** z A/D převodníku, vhodné pro sledování chování systému, nastavení optimální úrovně budícího signálu
- **měření výkonů detektorů** v šestibranu, data z převodníku jsou pomocí předem zjištěné kalibrace převedena na výkony na jednotlivých detektorech, používá se pro záznam referenčních měření pro kalibraci šestibranu
- **měření zpětného útlumu a fáze zátěže**, standardní zobrazení v dB a ve stupních
- **měření reálné a imaginární části impedance zátěže**
- **měření činitele odrazu ve Smithově diagramu**

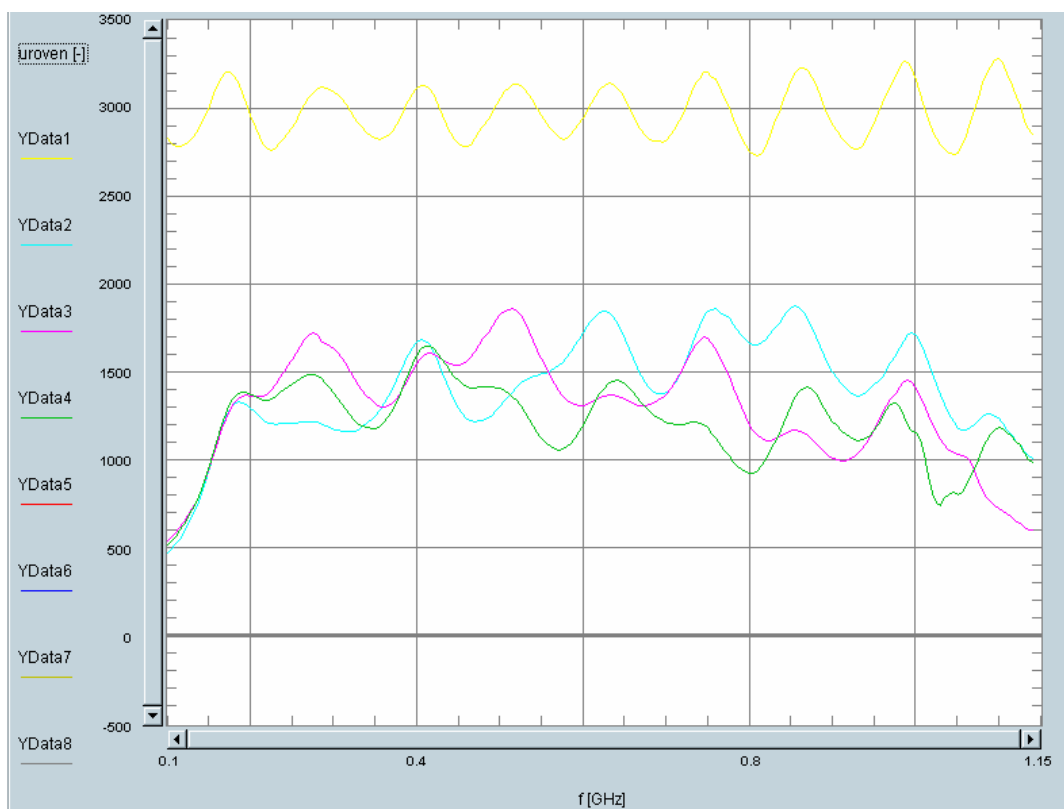
V případě posledních tří měření se impedance zátěže počítá pomocí aktuálně načtených kalibračních konstant šestibranu. Na následujících obrázcích jsou vidět jednotlivé typy zobrazení prakticky, při měření zátěže sestávající z 36 cm úseku vedení zakončeného SMT rezistorem o hodnotě 68 Ω .

Na obr.42 je vidět, jakých hodnot dosahují měřená data z A/D převodníku vzhledem k maximální úrovni 4095. Rozsah není využit zcela, protože při měření jiných zátěží by signály mohly být limitovány.

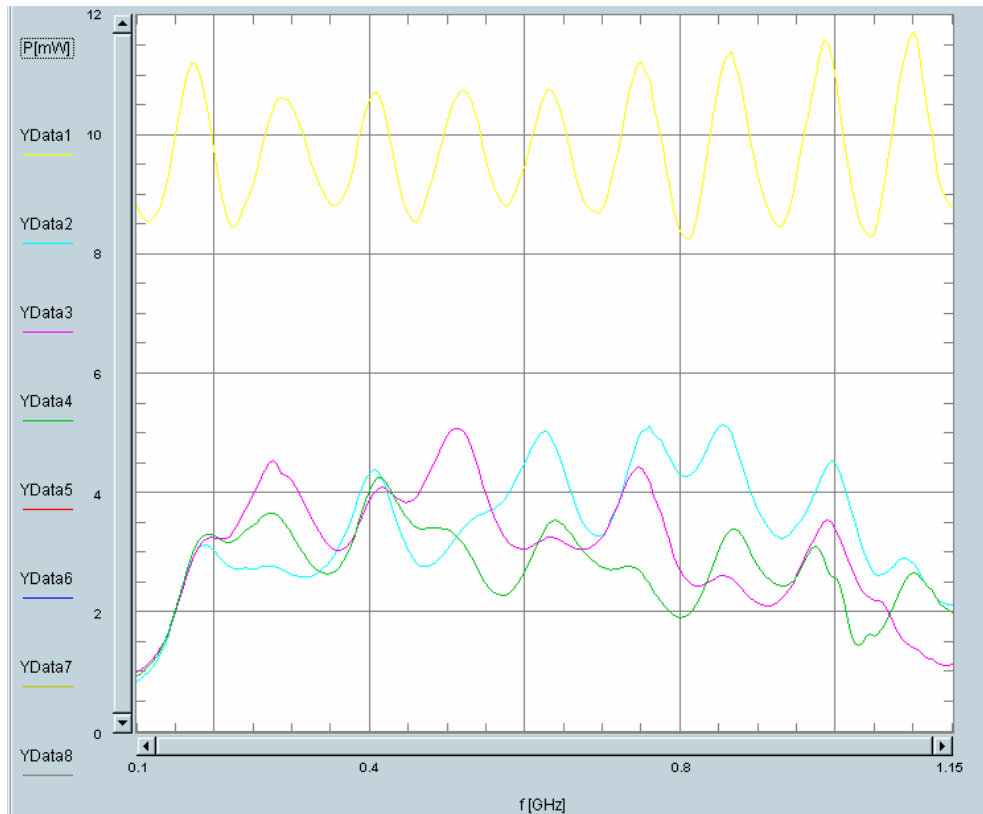
Na obr. 43 jsou signály z A/D převodníku již přepočteny pomocí dříve získané aproximace na výkon. V této podobě jsou data ukládána v případě, že je potřeba je použít při kalibraci šestibranu.

Na obr.44 až 46 jsou výše zmíněné typy zobrazení měřené zátěže. Je z nich vidět, že dochází k různým typům chyb měření. První typ chyby je na počátku a na konci měřené charakteristiky, tedy v blízkosti krajních kmitočtů šestibranu. Z toho vyplývá, že použitá metoda kalibrace není schopna pro takovou konfiguraci šestibranu správné kalibrace. Pracovní rozsah lze odhadnout mezi 170MHz a 950MHz, což představuje šířku pásma cca 1 : 5.3. Uprostřed tohoto pracovního pásma šestibranu pak lze nalézt druhý typ chyby, jsou to velké odchylky od měřené hodnoty na diskétních kmitočtech. První chyba nastává na kmitočtu 365 MHz. Na stejném kmitočtu dochází v kalibračních konstantách k hromadné změně znamének a kalibrační metoda je zde

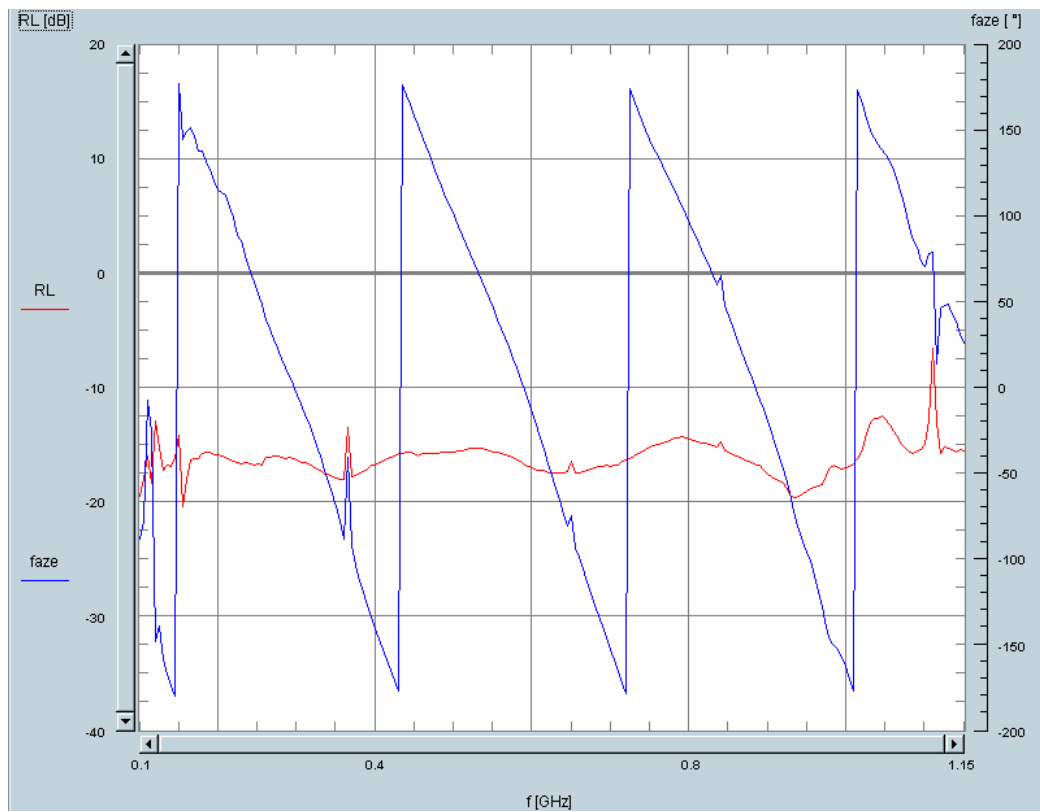
tudíž pravděpodobně nestabilní. Kmitočty 650 MHz a 840 MHz byly identifikovány jako chyby při měření referenčních zátěží a následně opraveny. Zde je nutné si uvědomit, že veškerá měření budou jen tak přesná, jako měření kalibračních zátěží. Jakékoliv chyby se pak přenášejí do vlastního měření.



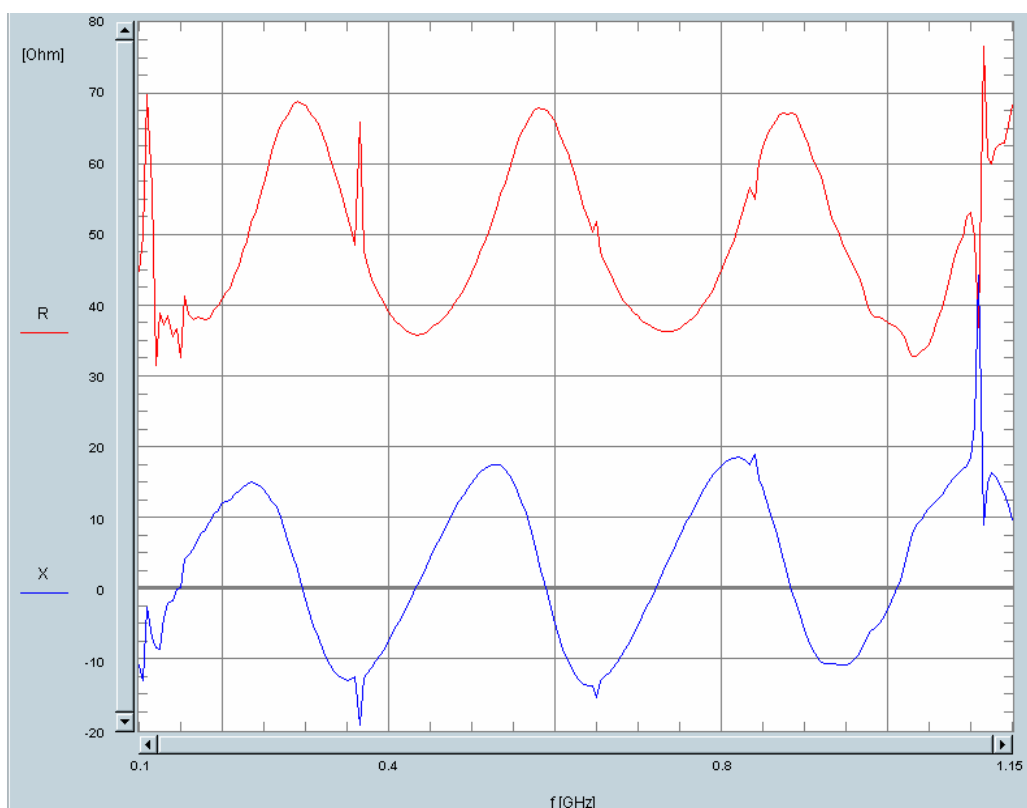
Obr.42 Měření úrovní na A/D převodníku při připojené zátěži 68Ω pomocí vedení 36 cm



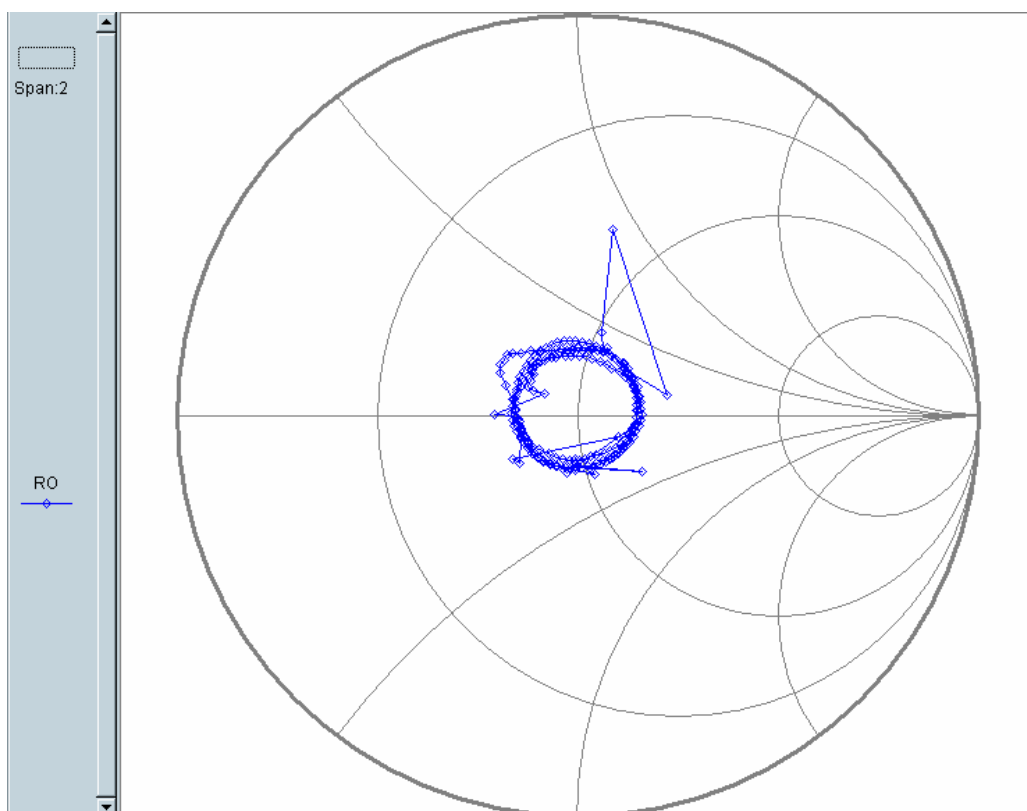
Obr.43 Měření výkonů na detektorech šestibranu při připojené zátěži 68Ω pomocí vedení 36 cm



Obr.44 Měření amplitudy zpětného útlumu a fáze při připojené zátěži 68Ω pomocí vedení 36 cm



Obr.45 Měření reálné a imaginární složky impedance připojené zátěže 68Ω pomocí vedení 36 cm



Obr.46 Měření činitele odrazu připojené zátěže 68Ω pomocí vedení 36 cm ve Smithově diagramu

4.5 Výsledky měření pomocí jednoduchého šestibranu

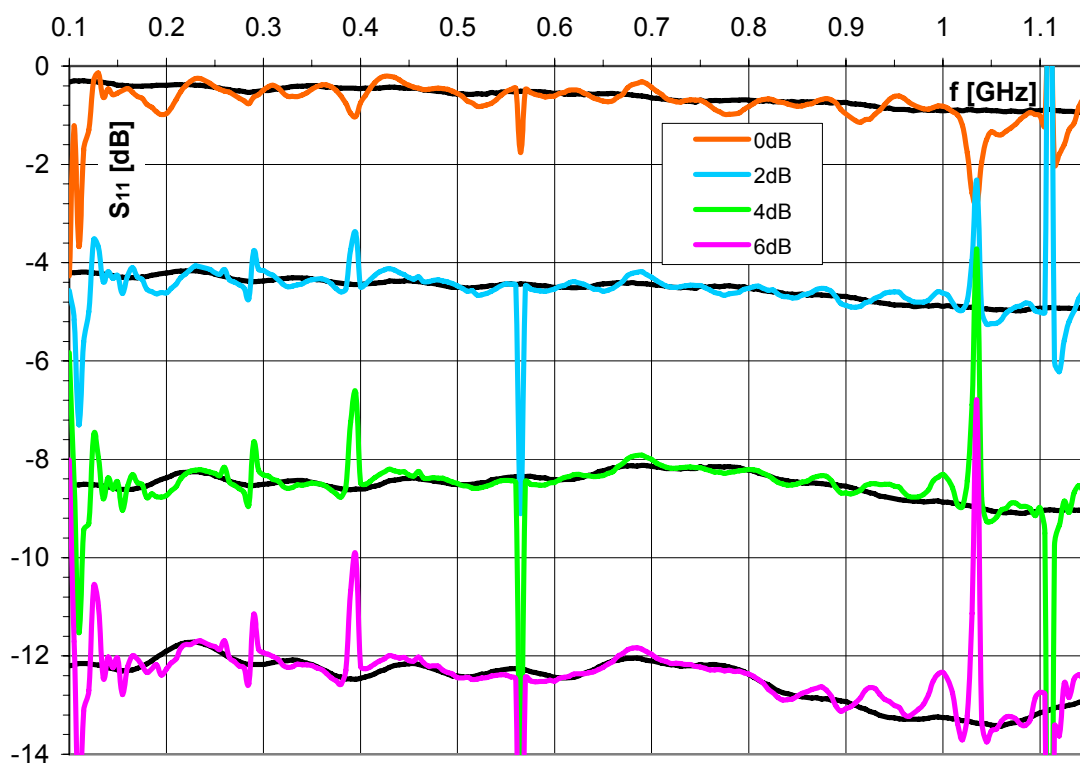
Pro zhodnocení vlastností celého systému bylo zvoleno měření přepínatelného útlumového článku HP 8494B s rozsahem 0 - 11dB, zakončeného zkratem. Útlumový článek je určen pro kmitočtový rozsah do 18 GHz a jeho nejdůležitějším údajem v tomto případě není aktuální útlum, ale jeho opakovatelnost, která je výrobcem udávána s chybou maximálně 0.01 dB [20]. Útlumový článek byl připojen k měřicímu systému pomocí koaxiálního vedení délky cca 26 cm, což umožnilo dostatečnou změnu fáze měřené impedance s kmitočtem. V případě potřeby většího útlumu, než 11 dB byl mezi vedení a přepínatelný útlumový článek navíc zařazen pevný útlumový článek PE 7005-10 s útlumem 10 dB, který umožnil rozšířit rozsah útlumů až na hodnotu 21 dB, což odpovídalo hodnotě $S_{11} \sim -42$ dB. Nižší hodnoty S_{11} touto metodou a použitými útlumovými články nelze realizovat, protože již převažuje nepřizpůsobení jejich vstupů a změna útlumu přepínatelného útlumového článku se již neprojevuje.

Na obr.47 až 50 lze nalézt výsledky měření pro nastavení útlumového článku na hodnoty 0, 2, 4 a 6 dB pomocí jednoduchého šestibranu ve srovnání s referenčními měřeními vektorového obvodového analyzátoru Agilent E8364B. Nejprve jsou uvedeny průběhy amplitudy zpětného útlumu a jejich chyby vůči referenčním měřením. Z nich je vidět již zmiňované kmitočtové pásmo, kde šestibran měří s malou odchylkou od referenčních hodnot zde 150 MHz až 1GHz.

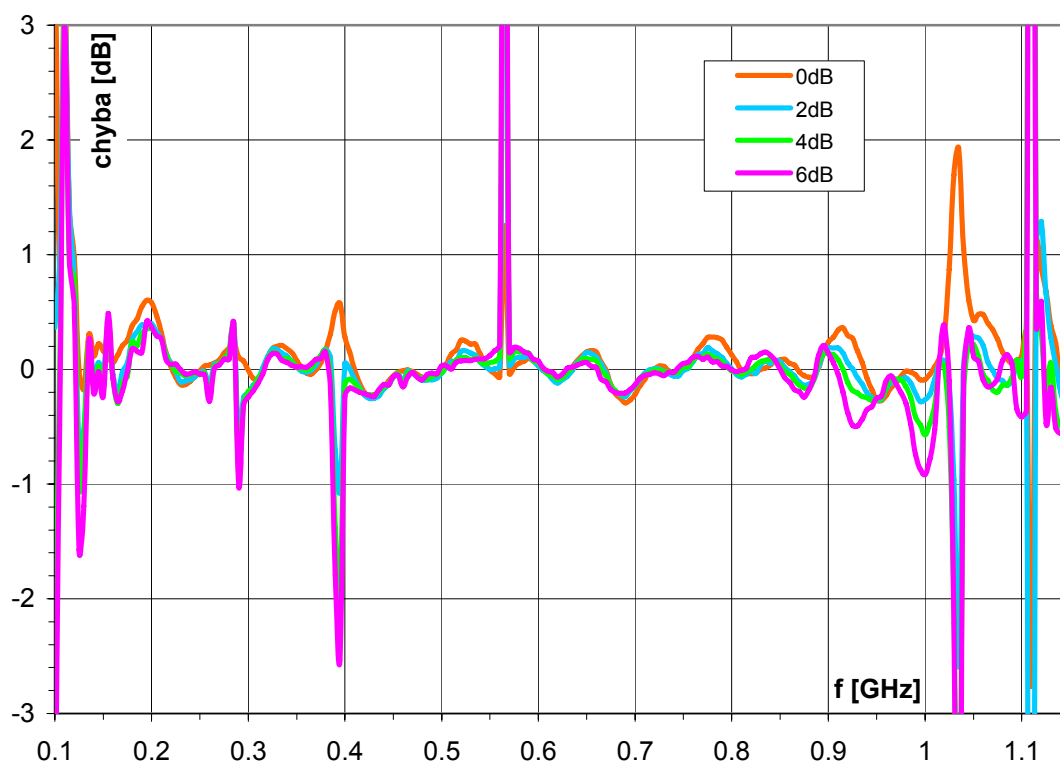
Chyba vůči referenčním měřením se pohybuje pod hodnotami 0.5 dB s výjimkou tří diskrétních kmitočtů, kde kalibrační metoda vytvořila změnu znamének v kalibračních konstantách a měření je zde zatíženo velkou chybou. V zobrazení měření fáze díky velkému rozsahu hodnot není vidět žádné detaily, dále budou uváděny pouze chyby od referenčního měření. Chyba ve fázi se pohybuje pod úrovní 2.5° se stejnými výpadky na diskrétních kmitočtech. Bližším pohledem na průběh chyb pro jednotlivé hodnoty zpětného útlumu je vidět, že chyba s klesajícím zpětným útlumem také klesá, což je překvapivé a ukazuje to spíše na chybu při měření referenčních zátěží, které leží na jednotkové kružnici.

Na obr.51 až 53 lze pak nalézt výsledky měření pro nastavení útlumového článku na hodnoty 8, 10, 12 a 14 dB. Z výsledků je zřejmé, že se zužuje kmitočtové pásmo měření šestibranu na rozsah od asi 200MHz do 900MHz. Zde již chyba měření s klesajícím zpětným útlumem roste jak v amplitudě, tak ve fázi, což odpovídá předpokladům teoretického rozboru.

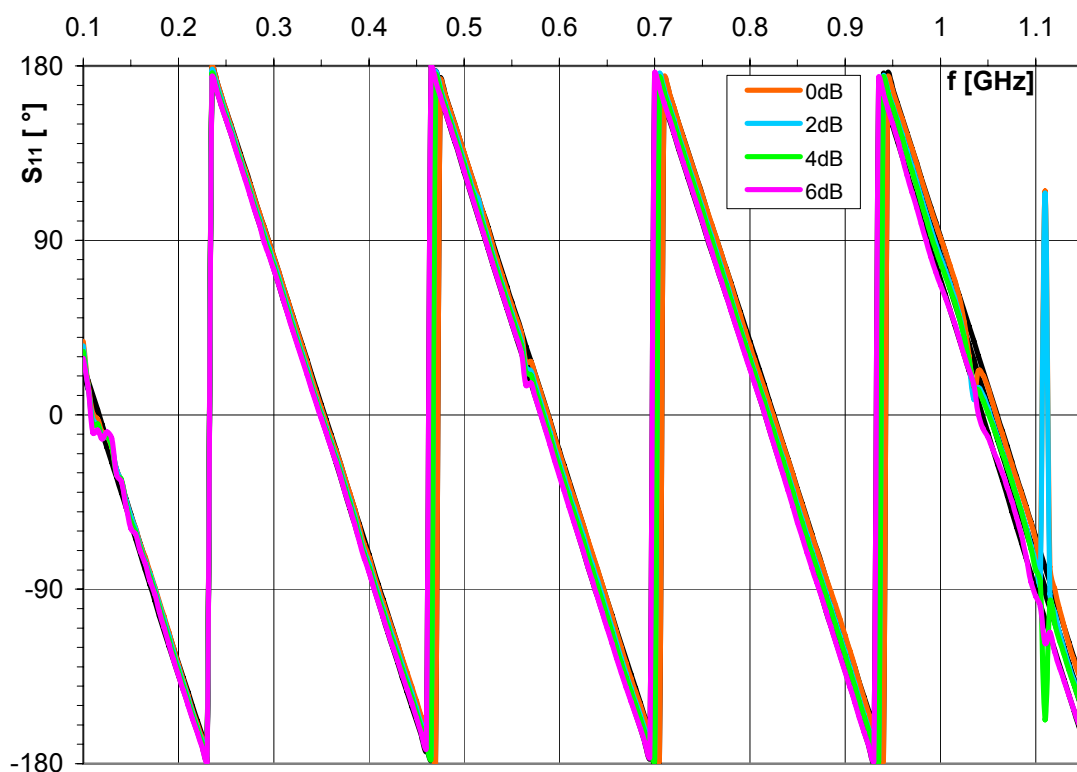
Na obr.54 a 55 je zobrazeno měření s nastaveným maximálním útlumem použitých útlumových článků o hodnotě 21 dB. Zde jsou již odchylky měření značné a jednoznačně patrné jak v amplitudě, tak i ve fázi i uprostřed měřicího kmitočtového rozsahu.



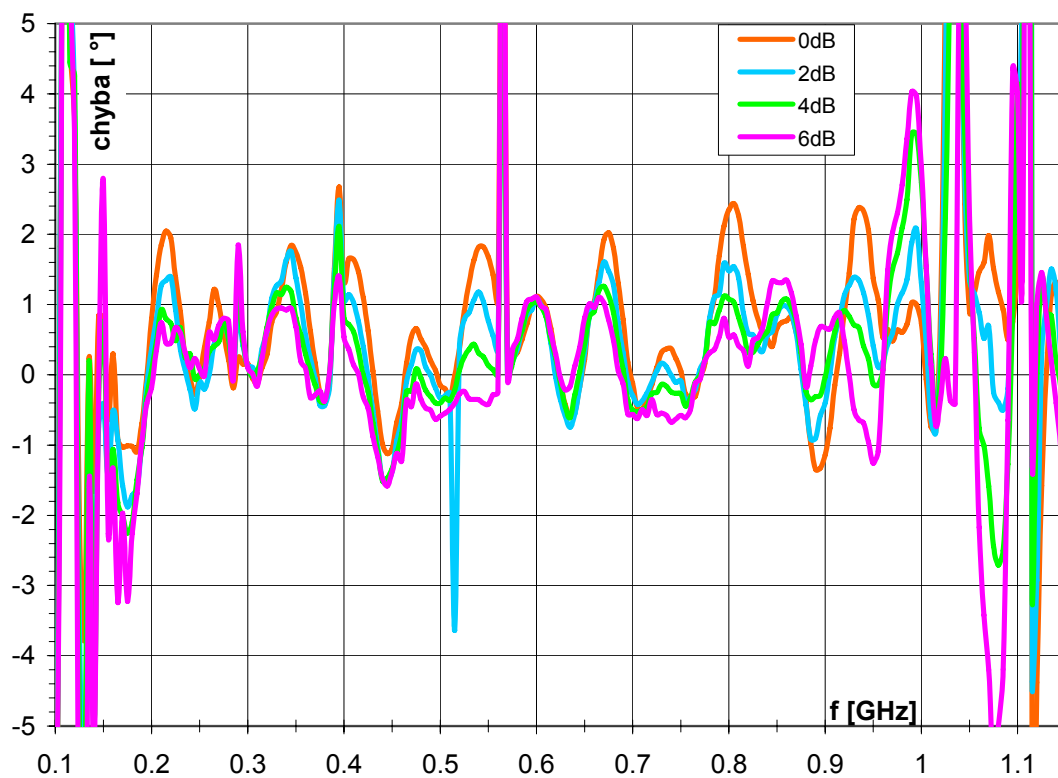
Obr.47 Průběhy měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB, černě referenční měření, barevně měření šestibranem



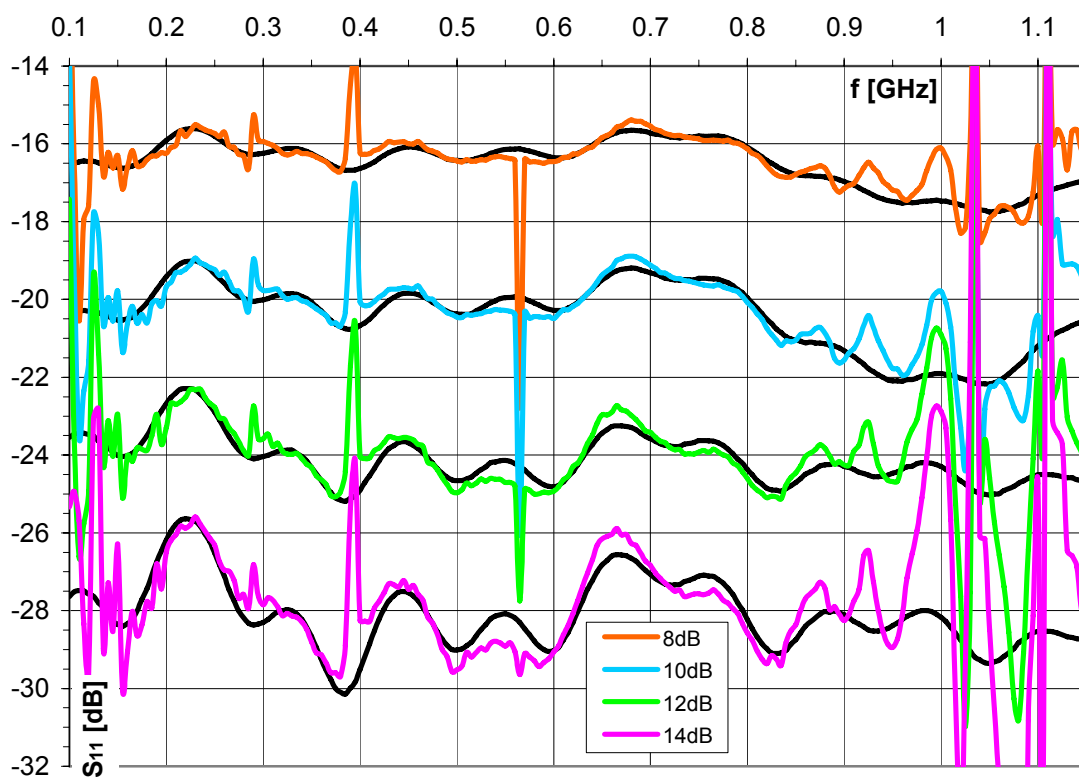
Obr.48 Průběhy chyby měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB



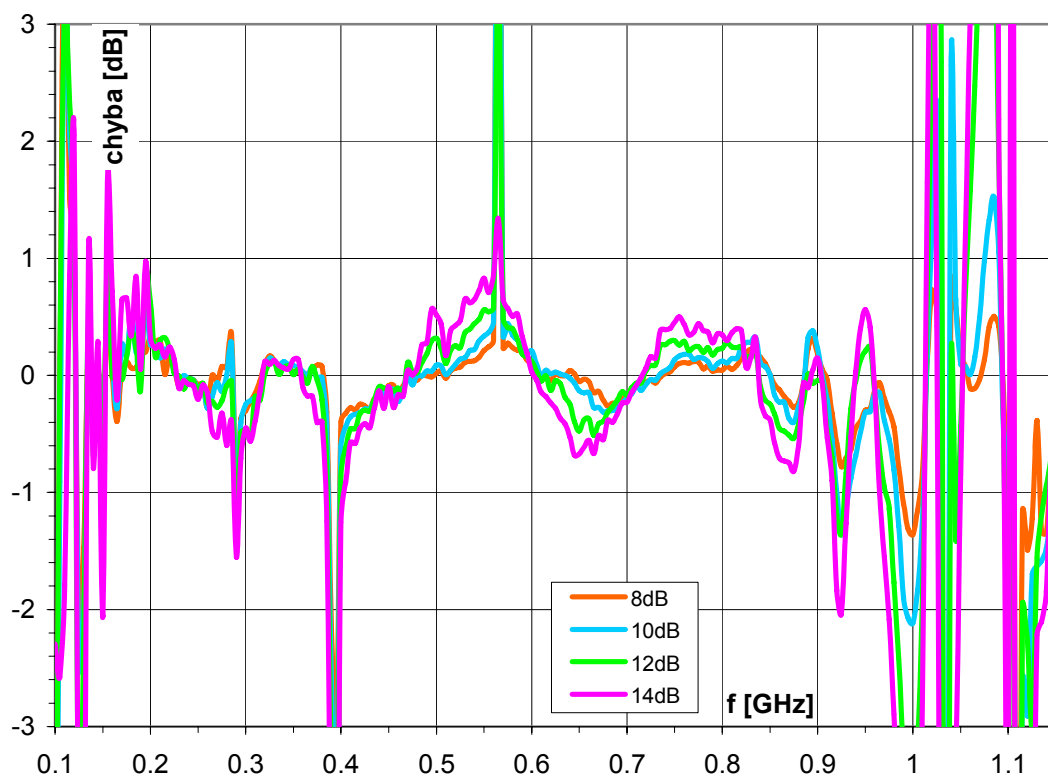
Obr.49 Průběhy měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB, černě referenční měření, barevně měření šestibranem



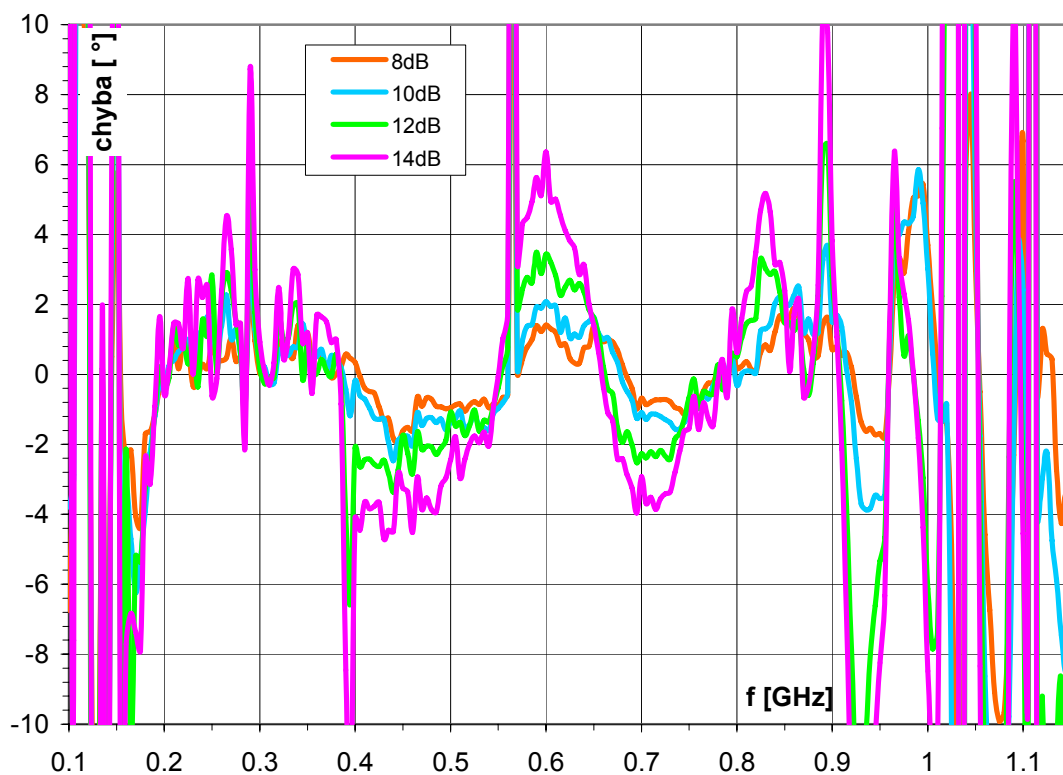
Obr.50 Průběhy chyby měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB



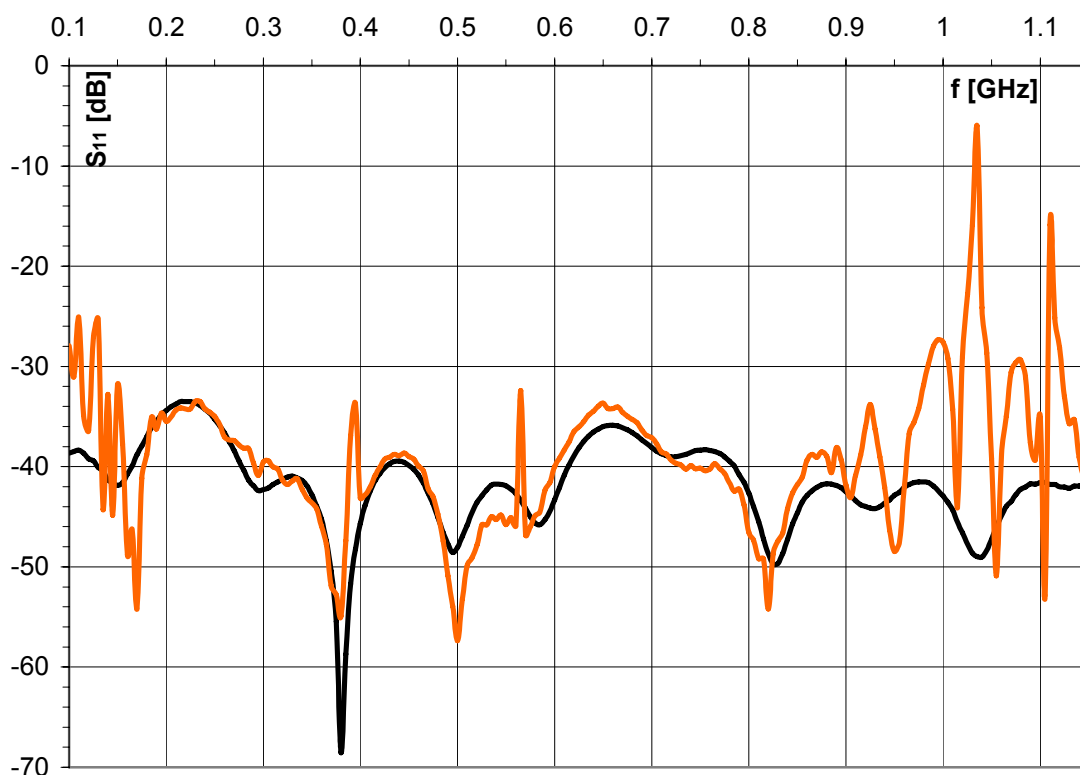
Obr.51 Průběhy měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB, černě referenční měření, barevně měření šestibrnem



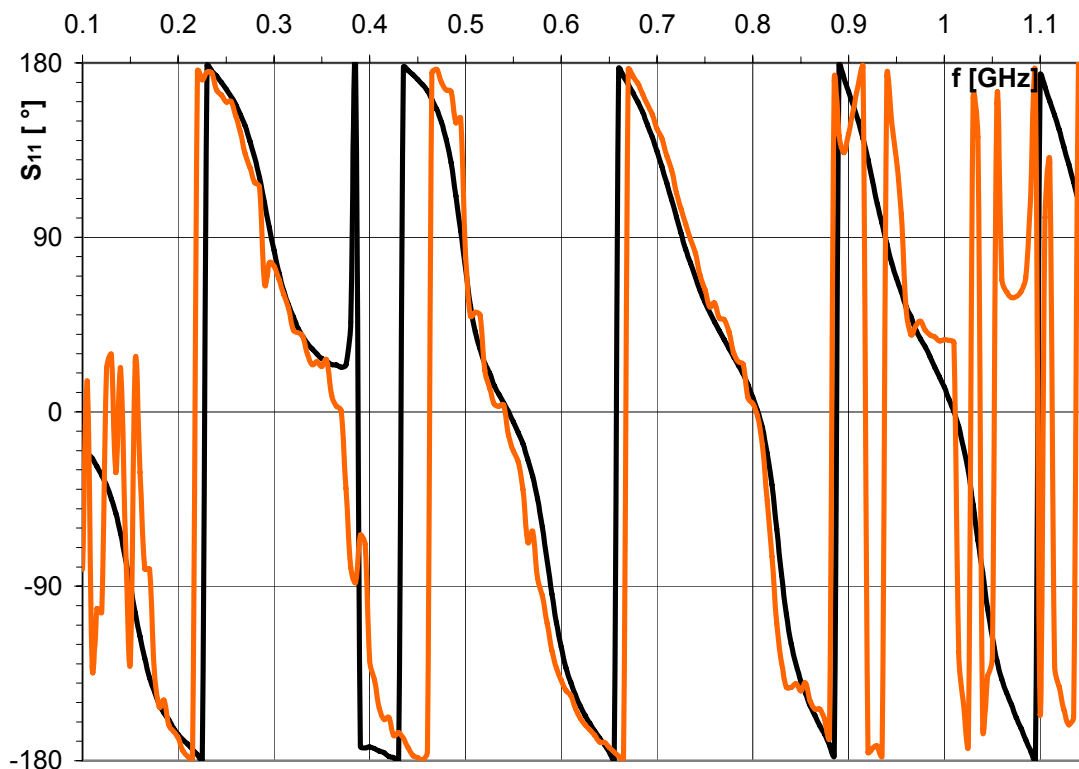
Obr.52 Průběhy chyby měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB



Obr.53 Průběhy chyby měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB

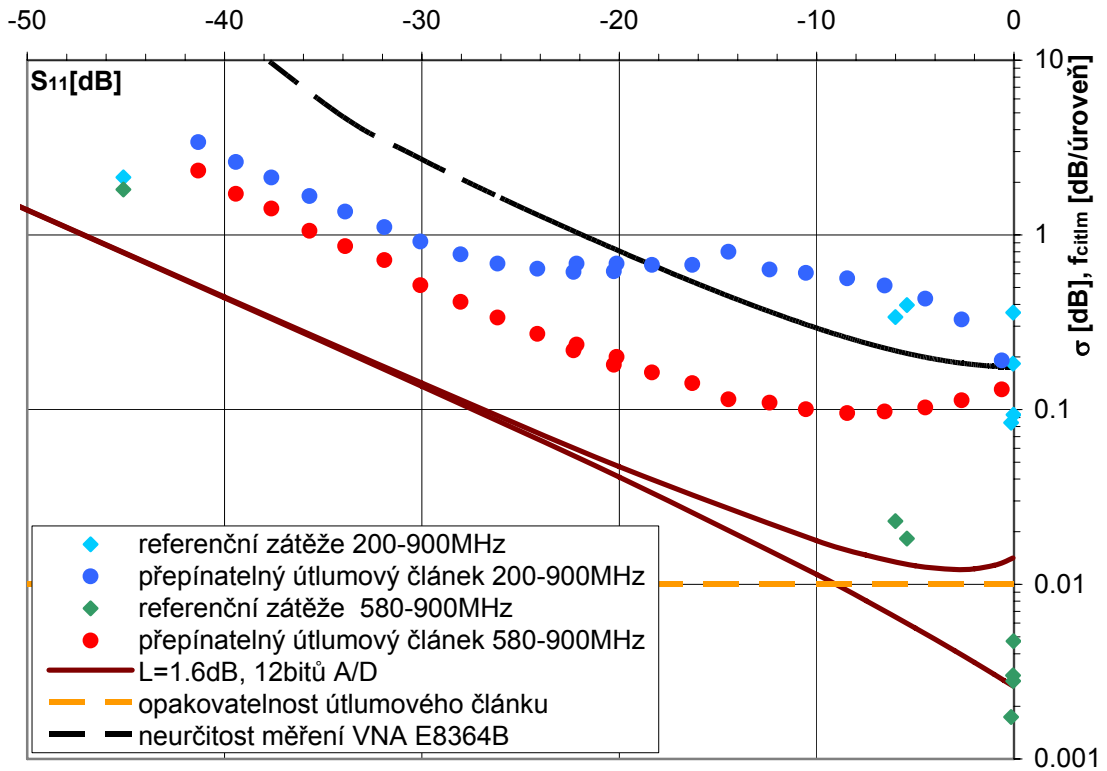


Obr.54 Průběh měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnoty útlumu 21 dB, černě referenční měření, červeně měření šestibranem

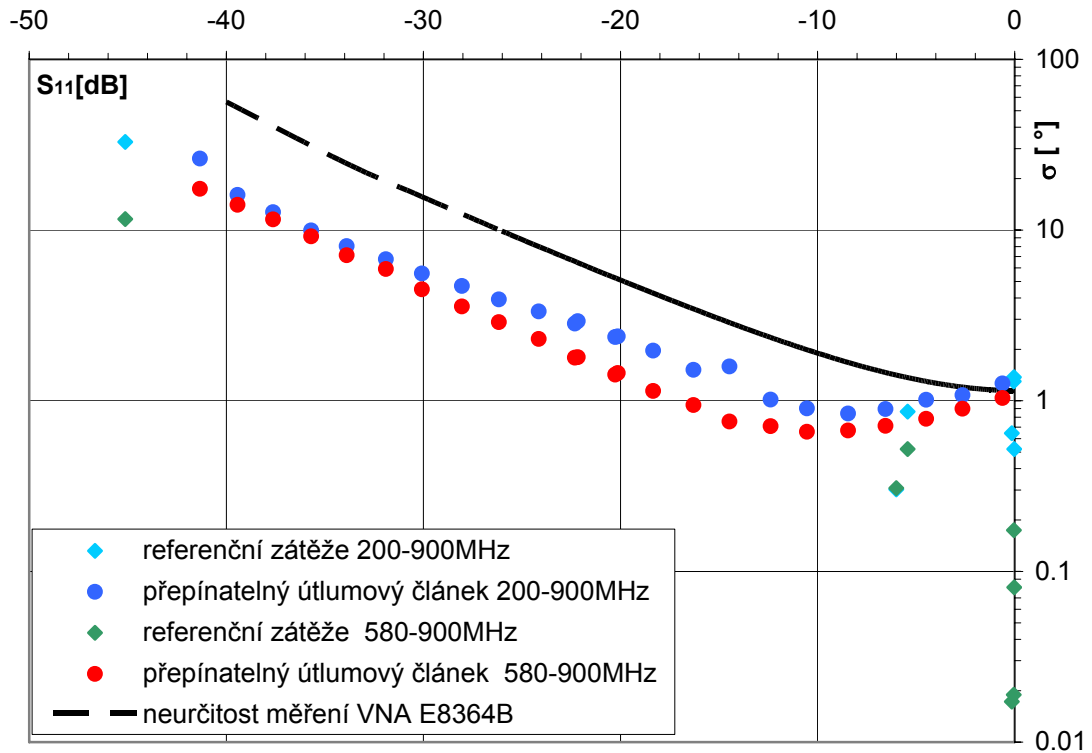


Obr.55 Průběh měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnoty útlumu 21 dB, černě referenční měření, červeně měření šestibranem

Z předchozích měření a jejich průběhů bylo možné určit pracovní kmitočtový rozsah šestibranu od 200MHz po asi 900MHz což na nejnižším kmitočtu odpovídá hodnotě $\alpha_{\min}=30^\circ$. Pokud z chyb měření vypočteme směrodatnou odchylku, získáme pohled na celkovou přesnost měření v uvažovaném rozsahu. Na obr.56 je zobrazena takováto závislost směrodatné odchylky měření amplitudy zpětného útlumu v závislosti na jeho průměrné hodnotě. Modře jsou zaneseny výsledky pro referenční zátěže a přepínatelný útlumový článek, pro kmitočtový rozsah 200 až 900MHz. V rozsahu 0 až -25 dB zpětného útlumu se hodnota směrodatné odchylky příliš nemění, její hodnota je dominantně dána velkými chybami na několika diskretních kmitočtech, jak je vidět na průbězích obr.48 a obr.52. Pokud zvolíme kmitočtový rozsah v pásmu měření, kde žádné výpadky kalibrační metoda nemá, např. 580-900MHz, získáme zelené hodnoty pro referenční zátěže a červené pro přepínatelný útlumový článek. Dalšími křivkami jsou zde určeny rozlišení použité konstrukce dle vztahu (32) a dále opakovatelnost hodnoty přepínatelného útlumového článku o velikosti max. 0.01 dB z údajů výrobce [20]. Poslední křivkou je hodnota neurčitosti měření vektorového obvodového analyzátoru E8364B [21], který byl použit pro všechna referenční měření. Podobně byla určena směrodatná odchylka měření fáze zpětného útlumu, uvedená na obr.57, kde je opět v obou případech pro referenční zátěže i přepínatelný útlumový článek, spolu s neurčitostí měření vektorového obvodového analyzátoru E8364B.



Obr.56 Závislost směrodatné odchytky měření amplitudy zpětného útlumu na jeho hodnotě



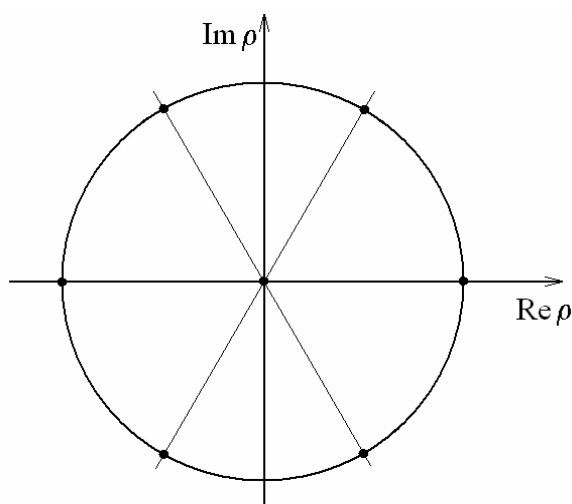
Obr.57 Závislost směrodatné odchytky měření fáze zpětného útlumu na hodnotě amplitudy zpětného útlumu

4.6 Návrh kalibrační sady pro šestibran

Pro činnost šestibranu je potřeba jej zkalibrovat, tedy vytvořit výpočetní postup, jak z naměřených výkonů získat hodnotu neznámé impedance na měřicí bráně. V literatuře lze nalézt nepřeborné množství kalibračních postupů, které se liší použitými referenčními zátěžemi, různou potřebou znalosti jejich impedancí i způsobem výpočtu.

Ze vztahu (20) je vidět, že při kalibraci je potřeba určit jedenáct reálných neznámých konstant. Pro jejich určení je potřeba nejméně pět a půl různých komplexních zátěží. Jiné postupy využívající jiných matematických popisů pro kalibraci používají čtyři [22] až sedm zátěží. Používanými zátěžemi jsou především referenční, které jsou k dispozici pro kalibraci standardních vektorových analyzátorů (otevřený konec, zkrat a přizpůsobená zátěž). Protože pro kalibraci šestibranu je potřeba zátěží více, bývají přidávány další, podle požadovaného počtu a vlastností, např. různé úseky vedení zakončené zkratem, posuvná přizpůsobená zátěž či zátěže s různě velkým modulem činitele odrazu. Metody jsou explicitní, nebo iterativní.

Pro kalibraci šestibranu byla zvolena nejjednodušší metoda kalibrace dle vztahů (21) a (22). Tato metoda vyžaduje měření pomocí sedmi různých známých zátěží. Nejprve byla kalibrace testována pomocí šesti různých úseků vedení naprázdno/nakrátko a přizpůsobené zátěže viz. obr.58. Zobrazená sada je realizována ze zkratu, otevřeného konce a úseků vedení naprázdno a nakrátko s elektrickou délkou 30° a 60° . Daného rozložení je možno dosáhnout pouze na jednom kmitočtu a šířka pásma použitelnosti takové sady je dána vlastnostmi použité metody. Pokud zvážíme jako minimální fázový rozdíl mezi jednotlivými zátěžemi např. 30° , pak využitelná šířka pásma bude pouze 1 : 2.5. Takto zkalibrovaný šestibran byl funkční, ale jeho činnost byla omezena zmíněnou úzkopásmovostí kalibrační sady (zátěže musí být různé a dostatečně vzdáleny okolo jednotkové kružnice).



Obr.58 Kalibrační sada z úseků vedení a přizpůsobené zátěže

Jako druhá možnost byla navržena kalibrační sada se stejným rozložením okolo jednotkové kružnice činitele odrazu, avšak s realizací pomocí součástek se soustředěnými parametry. Místo úseků vedení nakrátko byly použity indukčnosti, pro náhradu úseků naprázdno pak kondenzátory.

Pro požadovaný činitel odrazu o velikosti 1 a kladné imaginární části lze odvodit

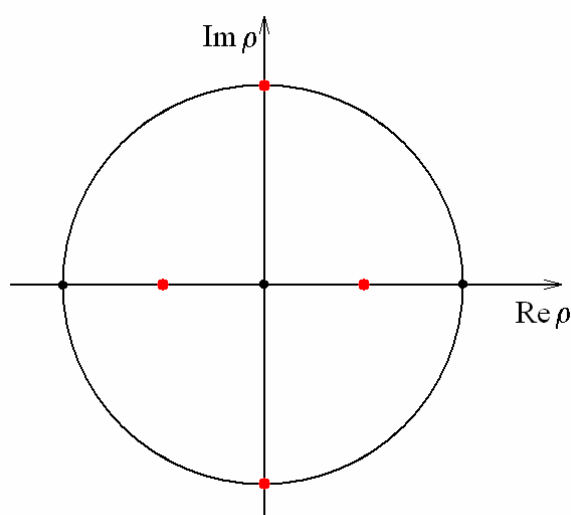
$$L = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \cdot \frac{Z_0}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (41)$$

Obdobně pro požadovaný činitel odrazu o velikosti 1 a záporné imaginární části lze odvodit

$$C = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \cdot \frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z_0} \quad (42)$$

Použitím diskretních součástek lze při stejné podmínce minimálního rozdílu fází 30° dosáhnout šířky pásma kalibrační sady 1 : 6.6.

Dalšího rozšíření pracovního pásma kalibrační sady pro stejný rozdíl fází lze dosáhnout použitím jiného rozložení kalibrační sady v rovině činitele odrazu. Pokud použijeme celkem pouze čtyři zátěže na obvodu jednotkové kružnice, rozšíří se pracovní pásmo sady v případě vedení na rozsah 1 : 5 a použitím součástek se soustředěnými parametry na rozsah 1 : 13.9, který již s rezervou pokryje celý pracovní rozsah jednoduchého šestibranu, navrženého v kapitole 4.4.1. Jeho šířka pásma byla vypočtena 1 : 11.5.



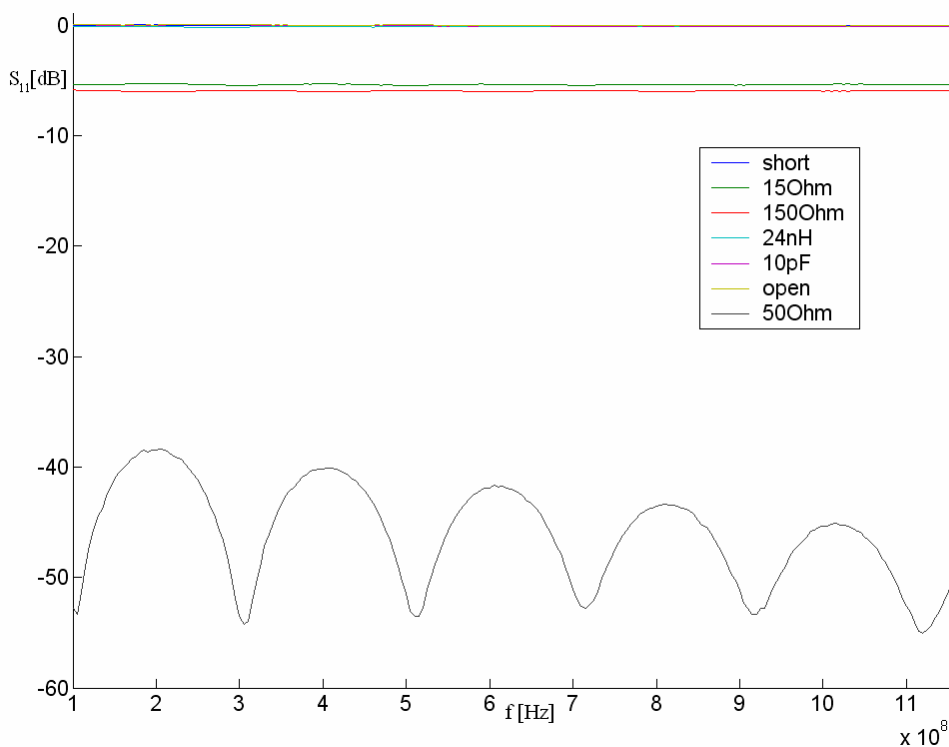
Obr.59 Rozložení modifikované kalibrační sady ze součástek se soustředěnými parametry

Při snížení počtu zátěží na jednotkové kružnici je potřeba vytvořit zbývající zátěže uvnitř jednotkové kružnice. Podle doporučení literatury např. [23], je vhodné

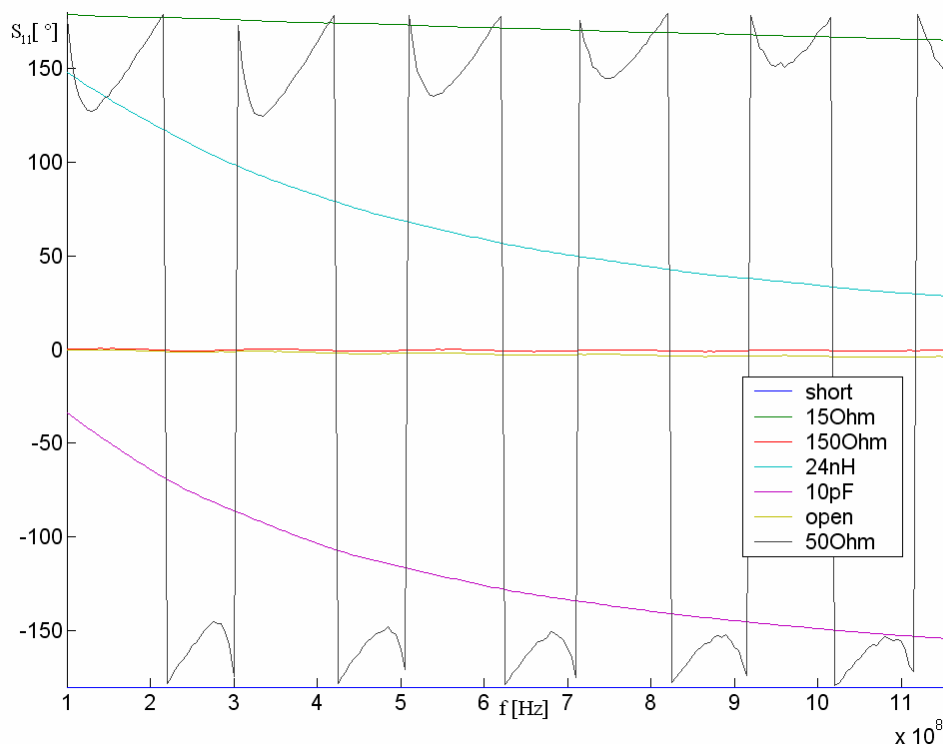
použít rezistivní zátěže s modulem činitele odrazu v rozsahu 0.3 - 0.7. V konkrétním případě byla zvolena hodnota 0.5. Pro kalibraci navrženého šestibranu byly tedy zvoleny následující zátěže, zobrazené rovněž na obr.59:

- **otevřený konec**
- **zkrat**
- **přizpůsobená zátěž 50Ω**
- **L=24nH**
- **C=10pF**
- **R₁=150Ω**
- **R₂=15Ω**

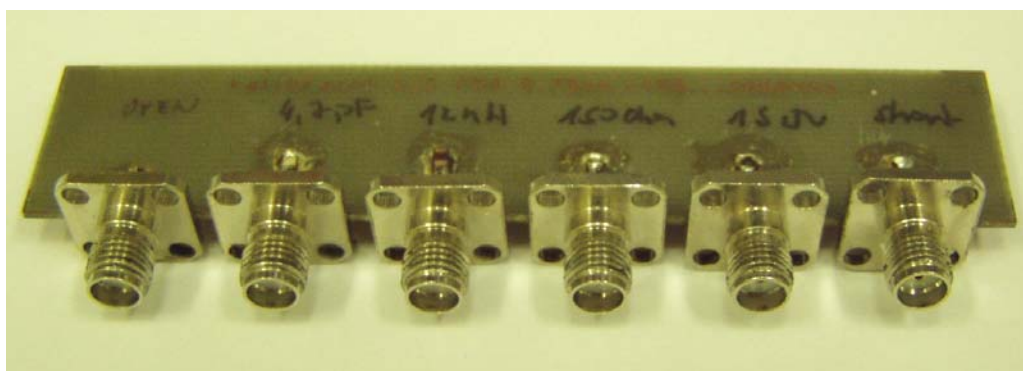
Na obr.60 a obr.61 jsou vidět naměřené průběhy amplitudy a fáze činitele odrazu pro realizované zátěže. Pro měření byl použit vektorový obvodový analyzátor Agilent E8364B. Z naměřených charakteristik je zřejmé, že zátěže nevykazují žádné parazitní rezonance, amplituda zůstává konstantní a fáze je v mezích, které byly stanoveny (rozdíl fází zátěží na jednotkové kružnici minimálně 30°).



Obr.60 Změřené amplitudy kalibrační sady zátěží



Obr.61 Změřené fáze kalibrační sady zátěží, normované ke zkratu

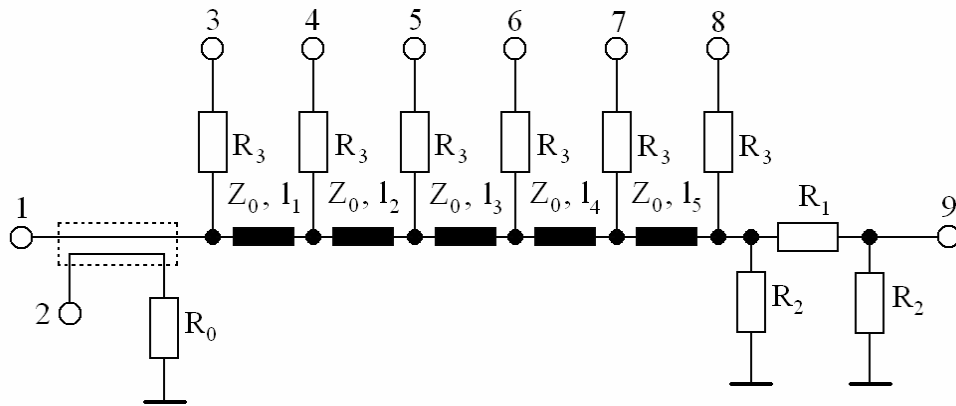


Obr.62 Ukázka realizace kalibrační sady

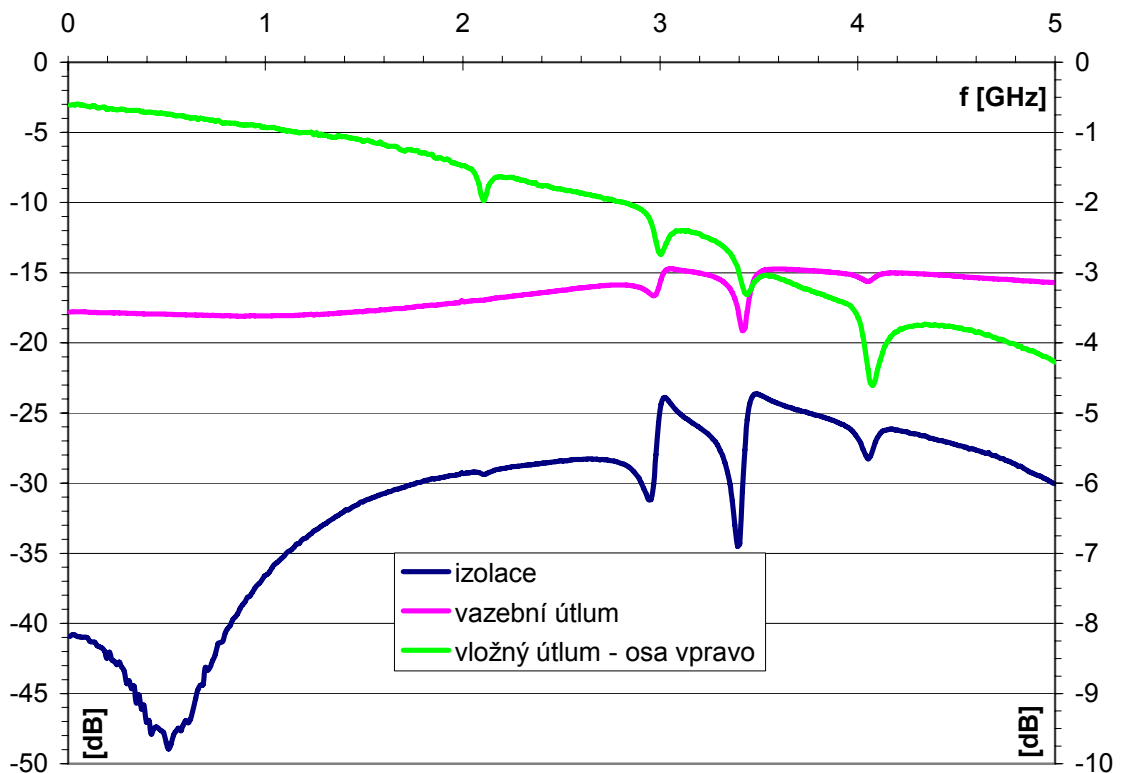
4.7 Realizace širokopásmového měřicího systému na principu šestibranu

Po získání zkušeností s praktickou činností jednoduchého měřicího systému bylo přikročeno k realizaci systému, který by byl navržen pomocí teorie, popsané v kapitolách 4.2 a 4.3. V předchozích kapitolách byl realizován měřicí systém, který nabízí měření osmi kanály A/D převodníku. Pokud jeden kanál ponecháme pro případné měření rozmítacího signálu generátoru, zbylých sedm je možno použít pro měřicí systém. Jeden kanál bude dále měřit signál z detektoru referenčního, sledujícího výkon z generátoru. Šest kanálů A/D převodníku tedy může být použito na snímání signálů

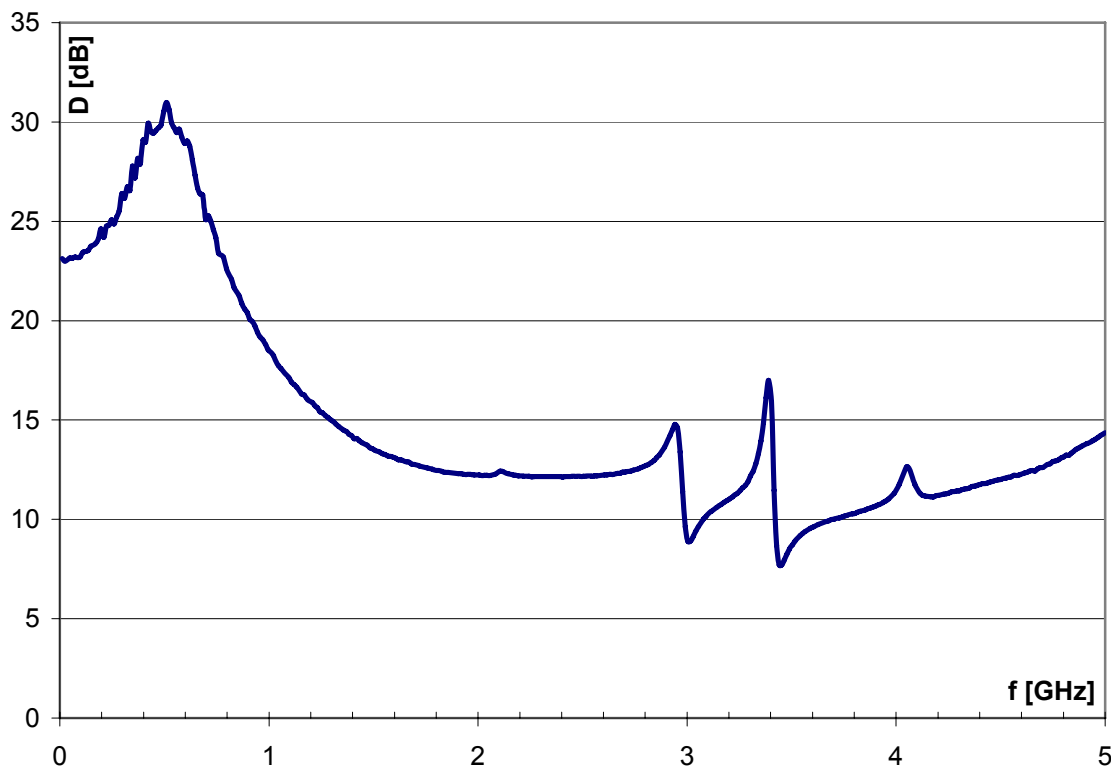
z detektorů podél vedení, jak je zobrazeno na obr.63. Je zde také možno si všimnout změny v referenčním kanálu, místo rezistivního můstku byla zařazena širokopásmová směrová odbočnice firmy Minicircuits, typu TCD-18-4. Hlavním důvodem této změny byla snaha o snížení útlumu signálu v šestibranu, který v případě jednoduchého šestibranu dosahoval hodnot okolo 8.5 dB. Útlum směrové odbočnice je uveden na obr.64 a pro kmitočty nižší, než 2GHz je max. -1.5dB. Hodnota směrovosti směrové odbočnice je přitom nižší, než bylo naměřeno v případě rezistivního můstku, viz. obr.65.



Obr.63 Schéma zapojení navrhovaného širokopásmového měřicího systému



Obr.64 Naměřené hodnoty hlavních parametrů směrové odbočnice TCD-18-4



Obr.65 Směrnost širokopásmové směrové odbočnice TCD-18-4

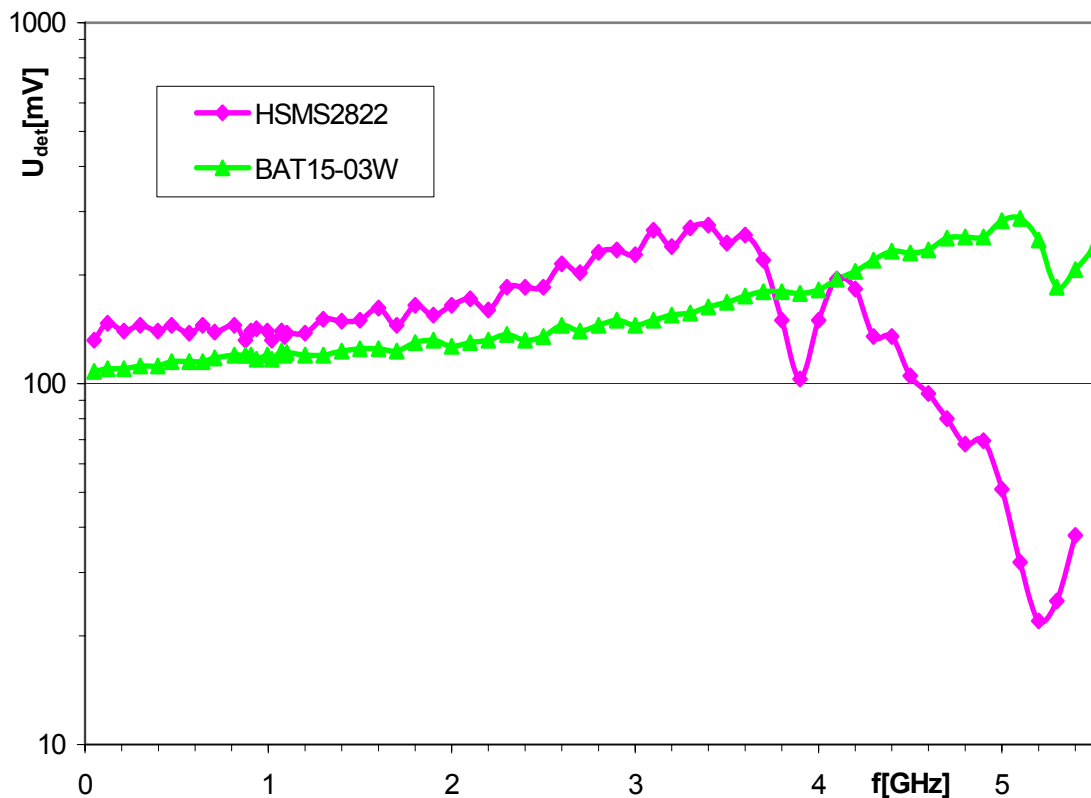
V detektorech jsou použity diody BAT 15-03W, jejichž kmitočtovou charakteristiku ve srovnání s diodami použitými v jednoduchém šestibranu je možno vidět na obr.66. Na obr.67 je pak srovnání přenosových charakteristik obou detektorů. Z charakteristik je vidět na jedné straně nepatrně větší citlivost detektoru s HSMS2822, na druhé straně vyrovnanější kmitočtová charakteristika u druhého detektoru s BAT 15-03W. Útlumový článek na výstupu měřicího systému byl použit identický s předchozím případem. Do numerických metod pro výpočet elektrických délek jednotlivých vedení byla zadána hodnota sedm jako celkový počet detektorů v systému.

Volba velikosti α_{\min} byla motivována zjištěným rozsahem činnosti jednoduchého šestibranu, což bylo 1 : 4.5. Z grafu na obr.17 tomu odpovídá hodnota $\alpha_{\min}=36^\circ$. Na obr.28 pro případ pěti úseků vedení můžeme pak pro tuto hodnotu nalézt možnou šířku pásma až 1 : 250. Vzhledem k potřebě rezerv pro výrobní tolerance a možnostem délek vedení na desce plošných spojů byla hodnota α_{\min} zvolena raději o velikosti 60° . Pro tuto volbu pak vychází šířka pásma cca 1 : 50. Výsledkem numerické metody vcelého roje jsou hodnoty elektrických délek jednotlivých vedení:

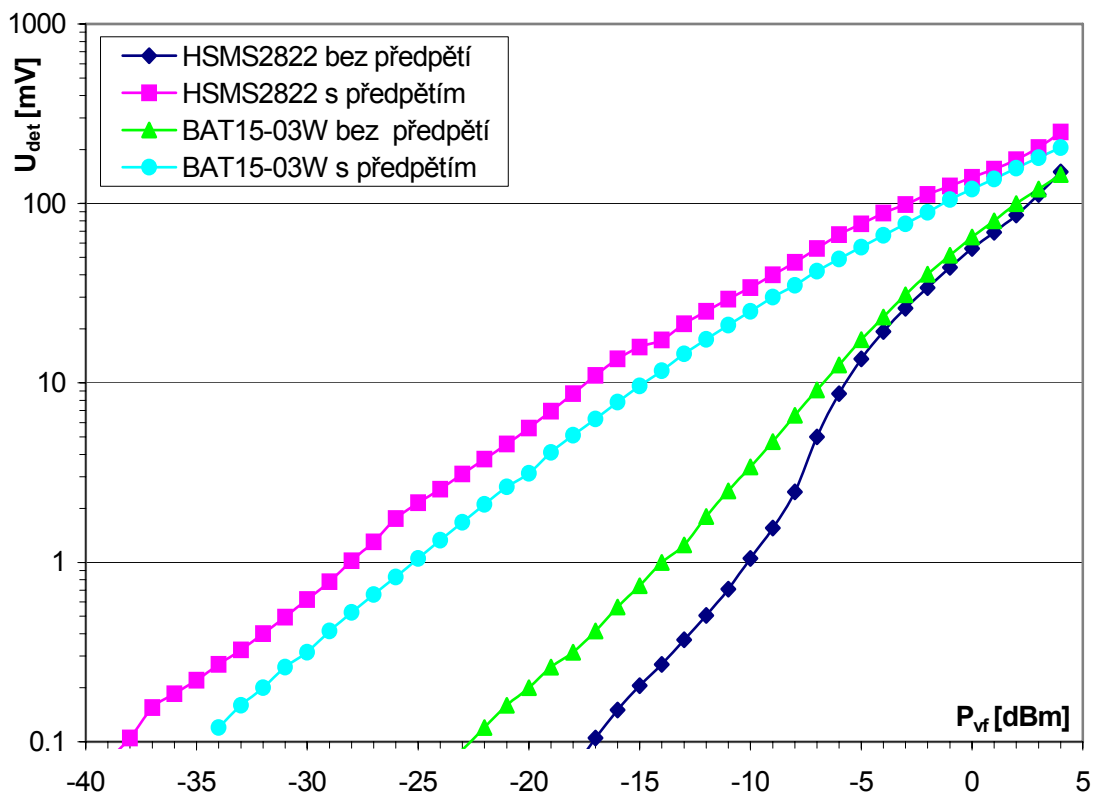
$$\alpha_1=39.160^\circ, \alpha_2=22.822^\circ, \alpha_3=7.830^\circ, \alpha_4=6.139^\circ, \alpha_5=50.529^\circ, \quad (43)$$

a šířka pásma 1 : 53.63. Fyzické délky je možné pomocí volby $f_{\min}=50$ MHz a vztahu (39) určit

$$l_1=183.2 \text{ mm}, l_2=106.8 \text{ mm}, l_3=36.6 \text{ mm}, l_4=28.7 \text{ mm}, l_5=236.4 \text{ mm}. \quad (44)$$

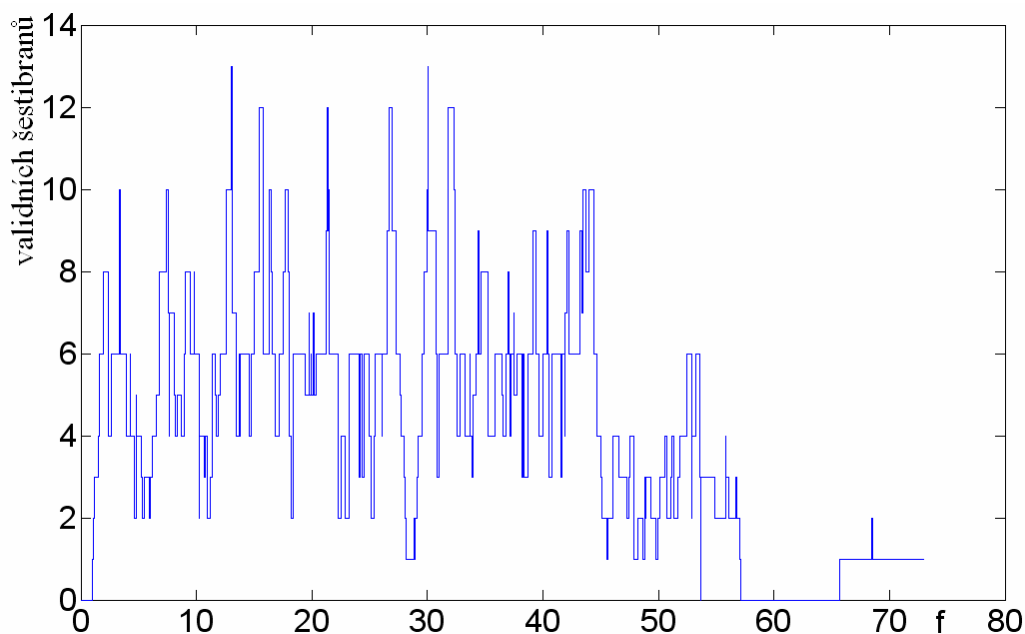


Obr.66 Kmitočtová charakteristika diodových detektorů

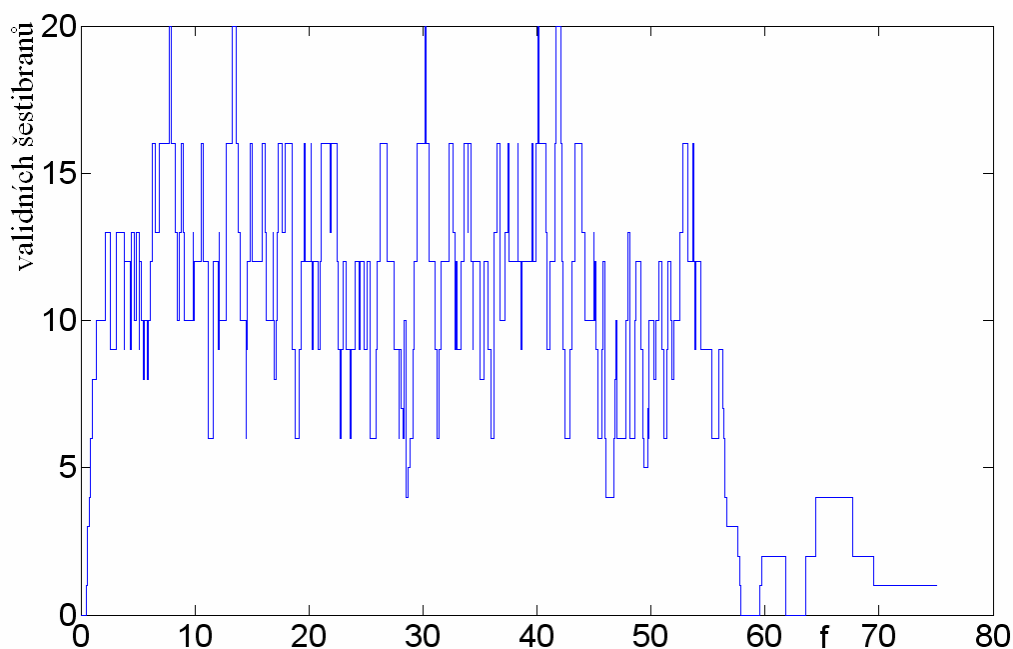


Obr.67 Přenosová charakteristika diodových detektorů

Horní pracovní kmitočet vychází jako $f_{\max}=2680\text{MHz}$. Jak vypadají průběhy počtu validních šestibranů ve stejném navrhovaném systému pro různá α_{\min} lze vidět na obr.68 a obr.69. Z druhého obrázku je vidět, že pro menší α_{\min} získáváme více validních šestibranů na jednom kmitočtu, zde v převážné většině případů pět a mnohdy i deset šestibranů najednou. Toho bude možno využít při zpřesňování výpočtů.



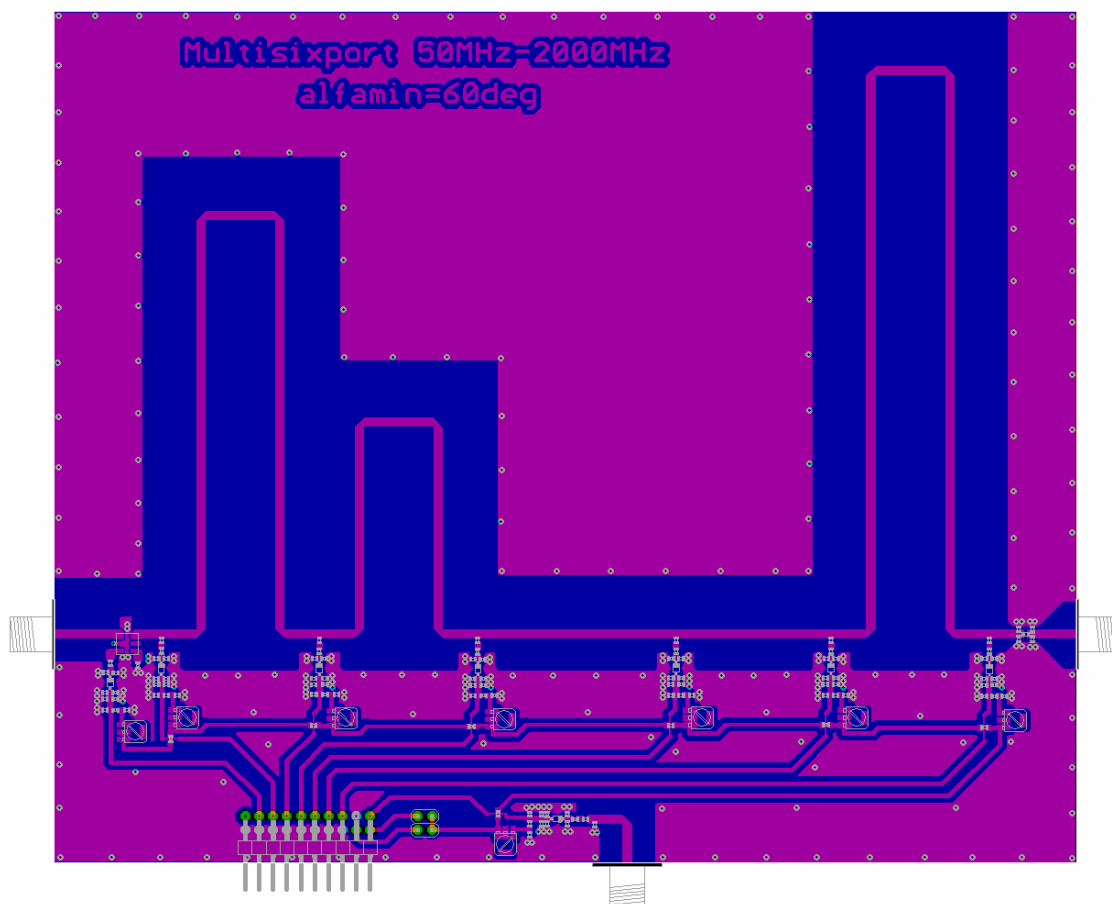
Obr.68 Průběh počtu validních šestibranů vůči normovanému kmitočtu pro $\alpha_{\min}=60^\circ$



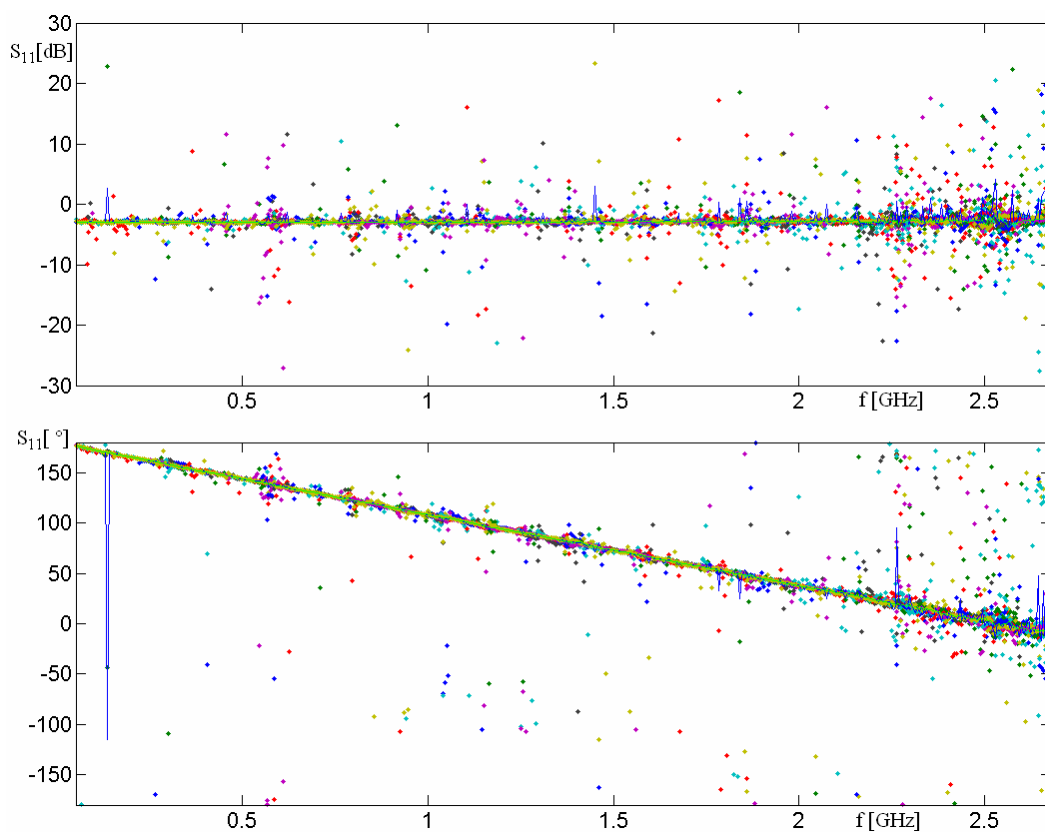
Obr.69 Průběh počtu validních šestibranů vůči normovanému kmitočtu pro $\alpha_{\min}=30^\circ$

Rozložení součástek na desce plošných spojů je vidět na obr.70, schéma zapojení a předlohy pro výrobu plošných spojů lze nalézt v příloze.

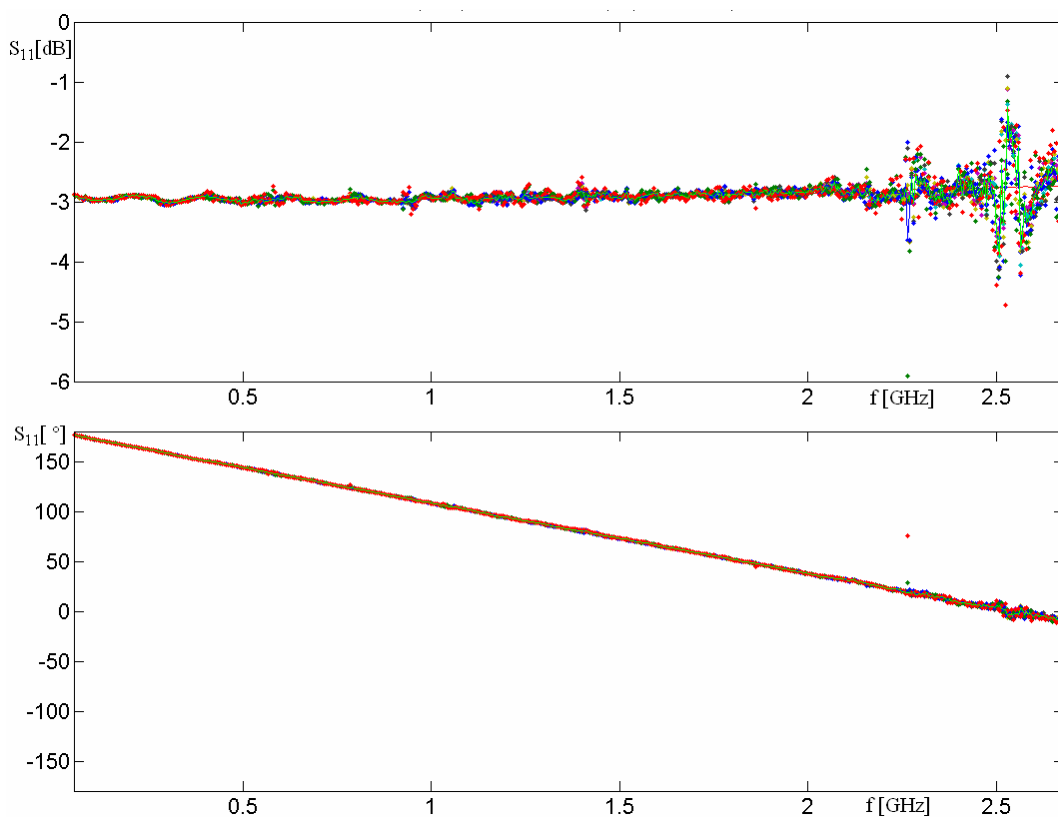
Pro kalibraci detektorů je použit program popsáný v kapitole 4.4.4. Pro kalibraci šestibranů je také použit identický postup, jako v předchozím případě jednoduchého šestibranu, s následujícím rozšířením. Jako kalibrační sady bylo použito zátěží navržených pro jednoduchý šestibran, které však nad kmitočtem 2 GHz již nesplňují podmínky dostatečného fázového rozestupu a měření bude z tohoto důvodu nepřesné či kalibrační metoda zde může případně selhat. Měřicí systém se zvoleným počtem detektorů obsahuje celkem dvacet různých šestibranů, proto jsou po změření všech referenčních zátěží vypočteny kalibrační konstanty pro všechny tyto šestibranu. Z návrhu je sice možné určit, který šestibran má být na právě měřeném kmitočtu validní, avšak vzhledem ke zkušenostem s jednoduchým šestibranem, kde se i uprostřed pracovního pásma šestibranu objevovaly výpadky měření, tato metoda nebyla implementována. Na obr.71 je vidět příklad měření zátěže 8.2Ω , jednotlivými body jsou zobrazeny výsledky jednotlivých šestibranů a červenou křivkou referenční měření. Je vidět, že mnoho řešení je evidentně nesprávných, od správného výsledku se lišících o desítky dB. Proto byl hledán způsob, jak určit celkový správný výsledek z množství získaných.



Obr.70 Rozložení součástek na desce plošných spojů měřícího systému

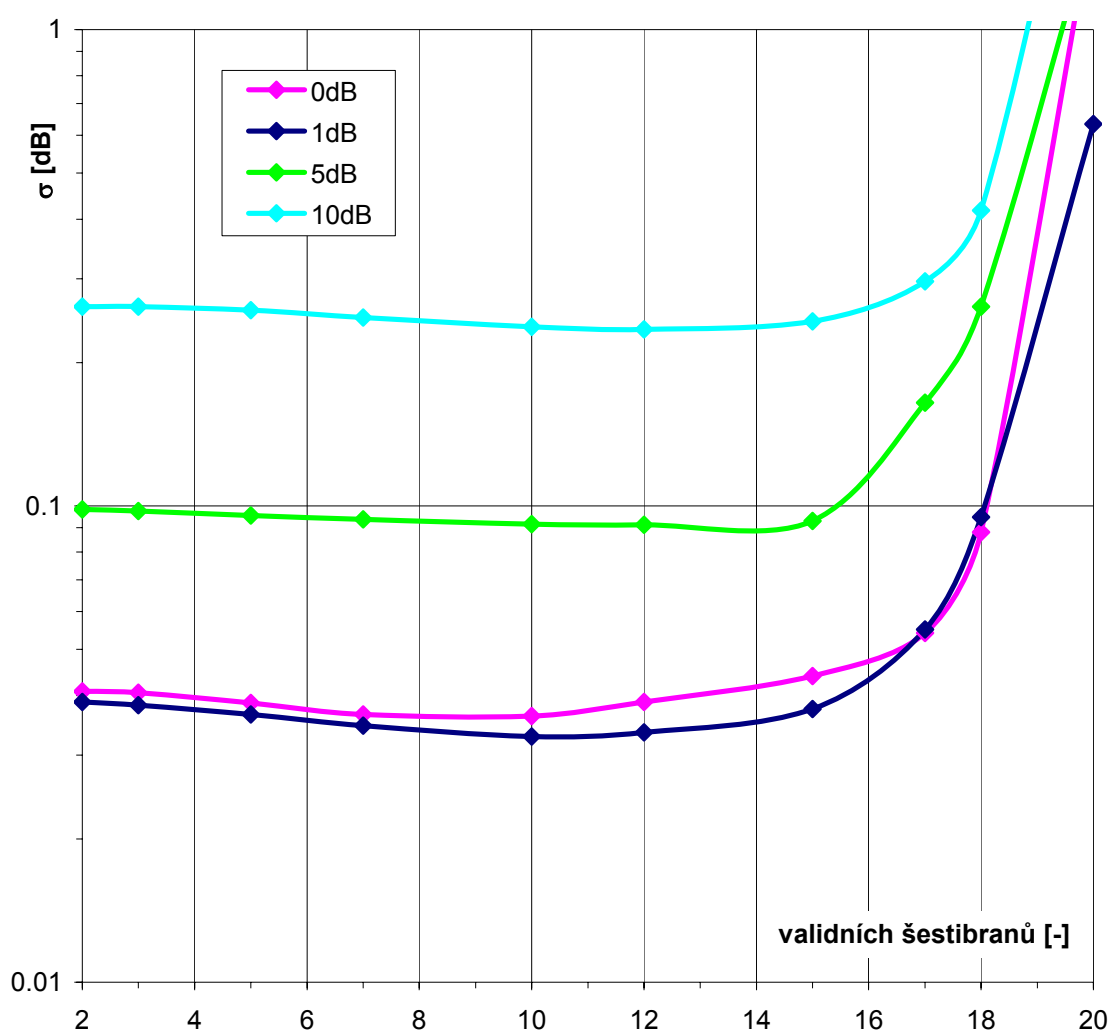


Obr.71 Měření zátěže 8.2Ω širokopásmovým měřicím systémem, výsledky všech šestibranů v systému, jejich průměr-modře, jejich medián-zeleně



Obr.72 Měření zátěže 8.2Ω širokopásmovým měřicím systémem, výsledky deseti šestibranů v systému pro každý kmitočet

Nejjednodušší průměrování je v grafu znázorněno modrým průběhem a dosahuje velké chyby, díky započtení nesprávných řešení. Lepší výsledky přináší použití mediánu všech hodnot, ten je znázorněn zeleným průběhem. Nejlepší výsledky ovšem přináší metoda znázorněná na obr.72, kde je znázorněno stejné měření, ovšem pouze pomocí deseti měření na každém kmitočtu. Jejich výběr byl proveden pro každý kmitočet tak, že postupně byl počítán průměr výsledků a nejvzdálenější od něj byl z dalšího výpočtu vyřazen. Postup končí, když zůstane předem daný počet výsledků, v případě obr.72 je to deset výsledku z dvaceti původních. Z těchto redukovanych výsledků je již konečný výsledek určen jako průměrná hodnota. Na obr.73 jsou vidět výsledky měření s různým počtem průměrovaných řešení, kde je vidět, že minimum chyby je velmi ploché a leží v okolí hodnoty deseti měření pro výsledný průměr.



Obr.73 Závislost střední kvadratické odchylky výsledku měření zátěže na počtu měření, ze kterých se počítá výsledek, zbytek je vyřazen, zátěž je přepínatelný útlumový článek zakončený zkratem

4.8 Výsledky měření pomocí širokopásmového měřicího systému na principu šestibranu

Pro zhodnocení vlastností celého měřicího systému bylo použito stejných zátěží, jako v případě jednoduchého šestibranu v kapitole 4.5, tedy přepínatelného útlumového článku zakončeného zkratem a výsledky měření byly srovnávány s referenčními měřeními, které byly získány pomocí vektorového obvodového analyzátoru E8364B.

Na obr.74 až 76 lze nalézt výsledky měření pro nastavení útlumového článku na hodnoty 0, 2, 4 a 6 dB pomocí širokopásmového měřicího systému ve srovnání s referenčními měřeními vektorového obvodového analyzátoru Agilent E8364B. Nejprve jsou uvedeny průběhy amplitudy zpětného útlumu a jejich chyby vůči referenčním měřením. Z nich je vidět, že pracuje v celém rozsahu navržených kmitočtů 50 MHz až 2.68 GHz s chybou v rozsahu -1.4 až +0.7 dB. Větší chyba, jak 0.3 dB se vyskytuje pouze na diskrétních kmitočtech a převážně nad kmitočtem 2 GHz. Jedinou výjimkou je měření na kmitočtu 75 MHz, kde chyba dosahuje velikosti až 1dB. Původ této chyby zatím nebyl uspokojivě vysvětlen a příčinou není ani chyba v referenčních měřeních, ani v měření kalibračních zátěží. Zvýšení chyby měření nad kmitočtem 2 GHz je dáno nevhodným rozložením kalibrační sady, a také poklesem detekovaných napětí na detektorech s kmitočtem.

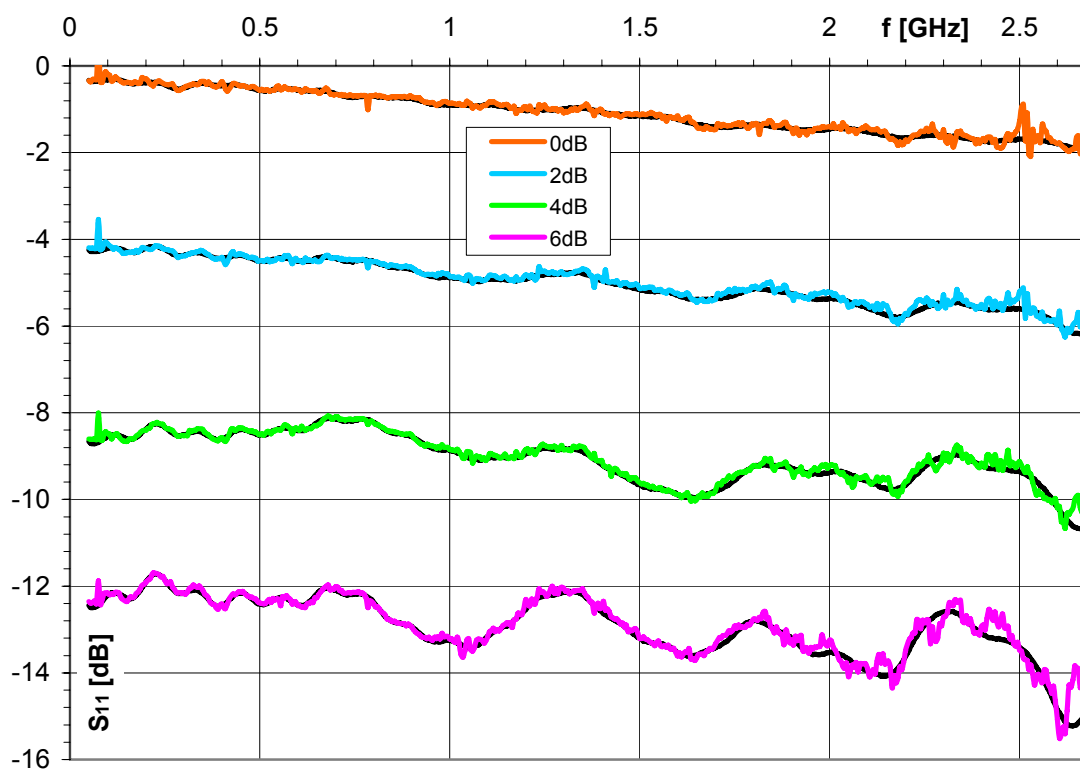
Chyba ve fázi se pohybuje v rozsahu -10° až $+6^\circ$ v celém rozsahu kmitočtů, s řádově menší chybou v rozsahu -2.5° až $+1.5^\circ$ na kmitočtech do 2 GHz.

Na obr.77 až 79 lze pak nalézt výsledky měření pro nastavení útlumového článku na hodnoty 8, 10, 12 a 14 dB. Z výsledků je zřejmé, že chyba měření s kmitočtem opět roste a pro kmitočty nad 2 GHz je mnohem větší, než pro kmitočty nižší. Chyba měření amplitudy dosahuje hodnoty až 5 dB, chyba měření fáze pak až 20° .

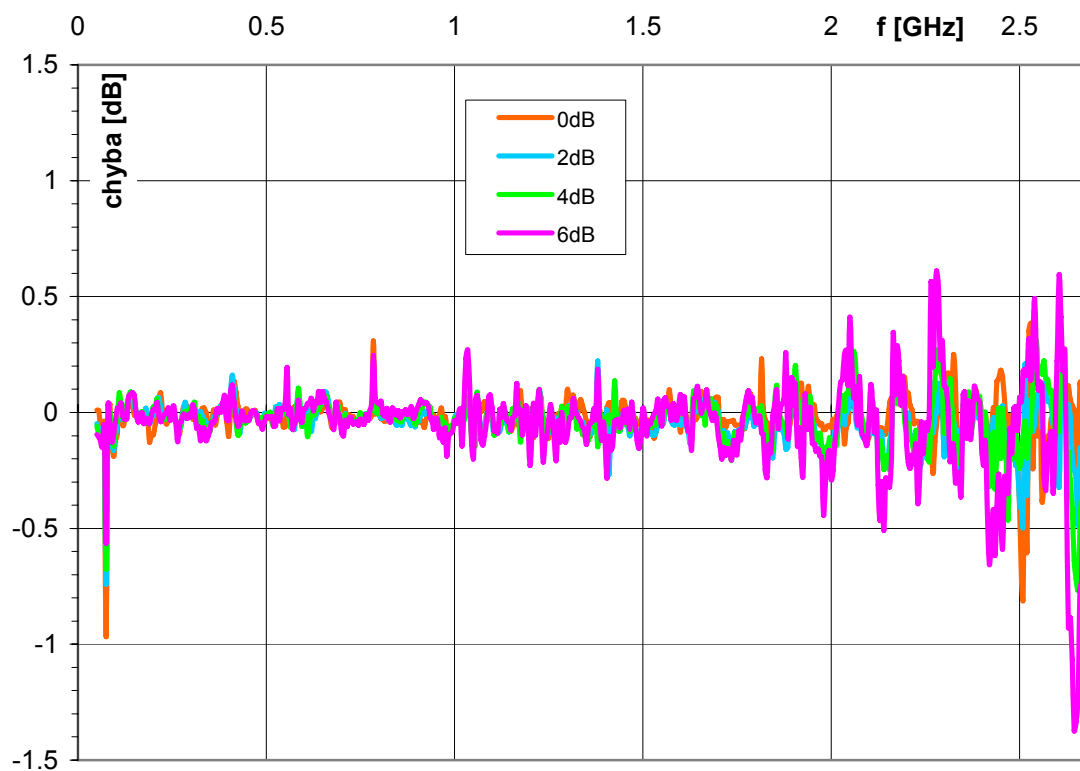
V případě měření širokopásmovým měřicím systémem chyba v amplitudě i ve fázi roste s klesajícím zpětným útlumem tak, jak předpokládal teoretický rozbor.

se zužuje kmitočtové pásmo měření šestibranu na rozsah od asi 200MHz do 900MHz. Zde již chyba měření s klesajícím zpětným útlumem roste jak v amplitudě, tak ve fázi, což odpovídá předpokladům teoretického rozboru.

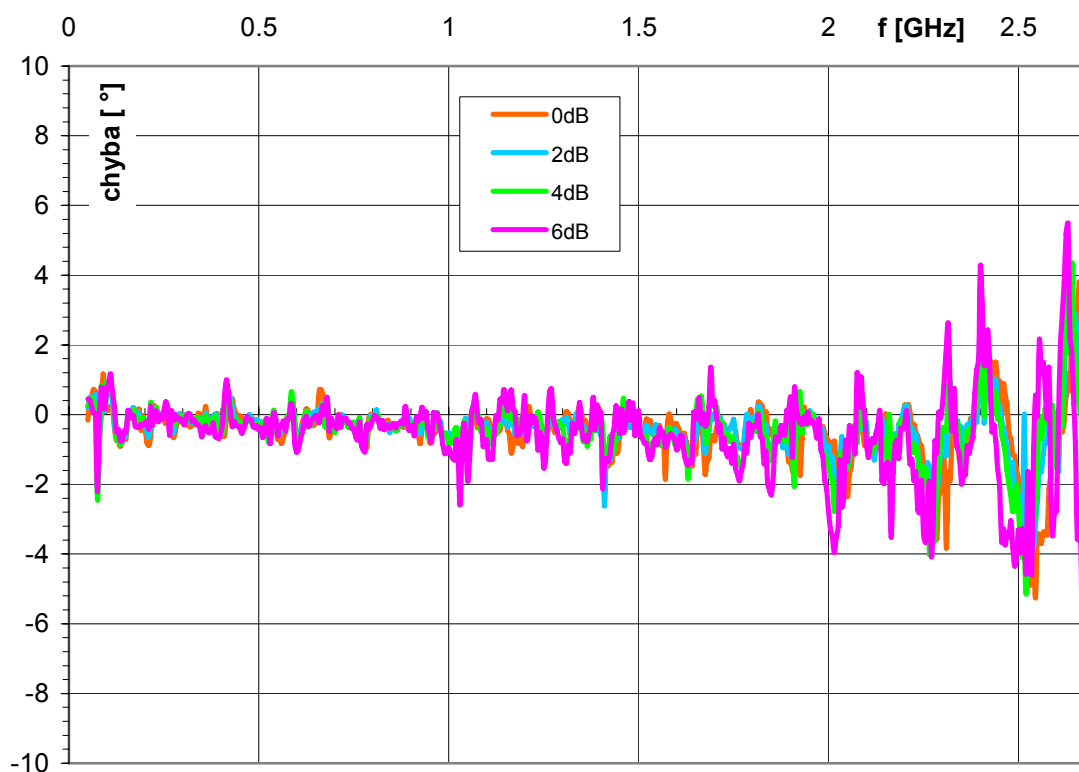
Na obr.80 a 81 je zobrazeno měření s nastaveným maximálním útlumem použitých útlumových článků o hodnotě 21 dB. Zde jsou již odchylky měření značné a jednoznačně patrné jak v amplitudě, tak i ve fázi. I přesto je vidět schopnost vcelku věrně charakteristiku změřit v celém kmitočtovém rozsahu.



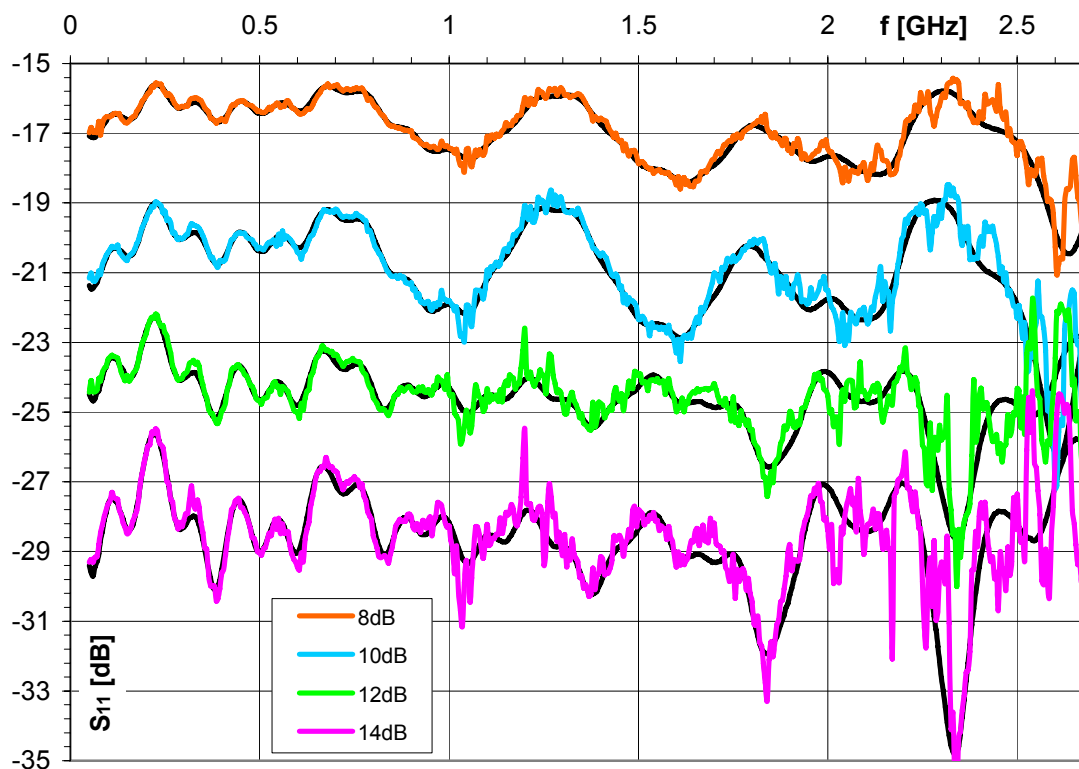
Obr.74 Průběhy měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB, černě referenční měření, barevně měření širokopásmovým systémem



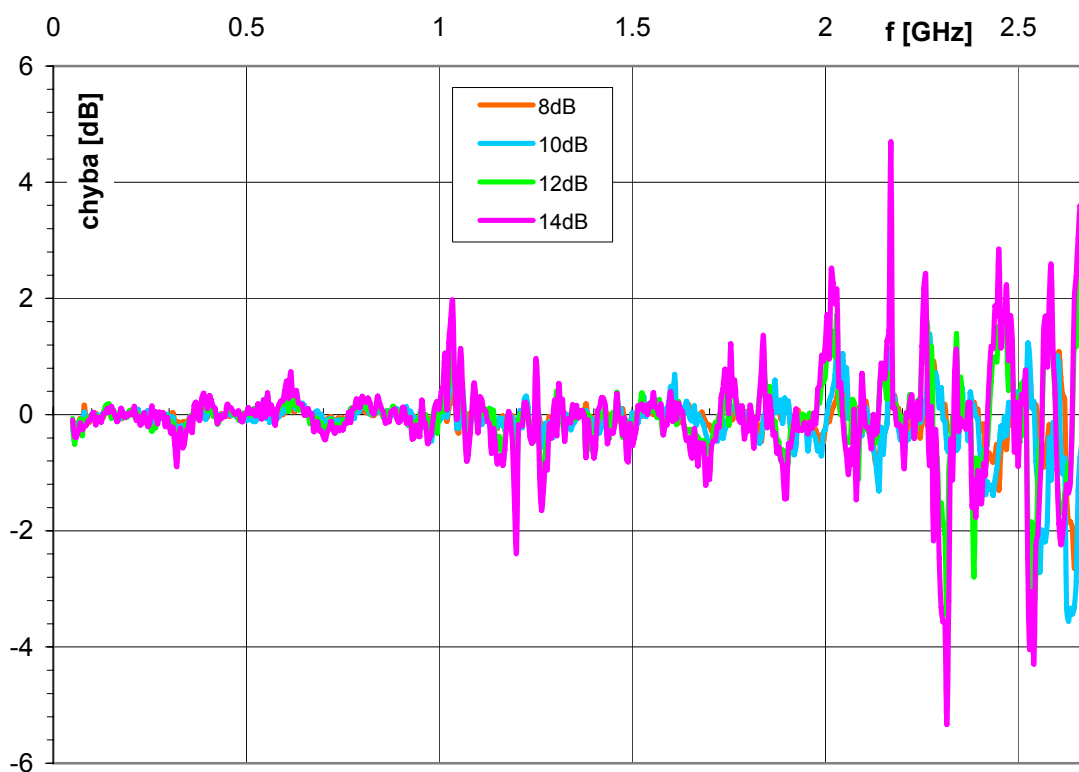
Obr.75 Průběhy chyby měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB



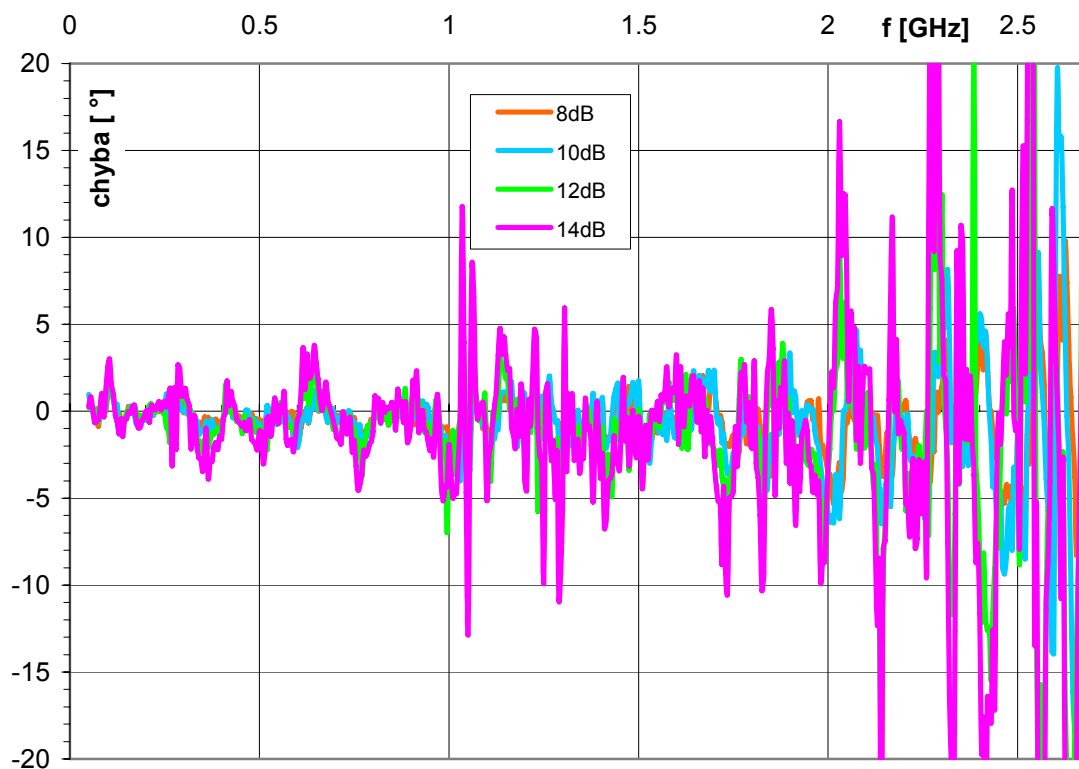
Obr.76 Průběhy chyby měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 0 až 6 dB



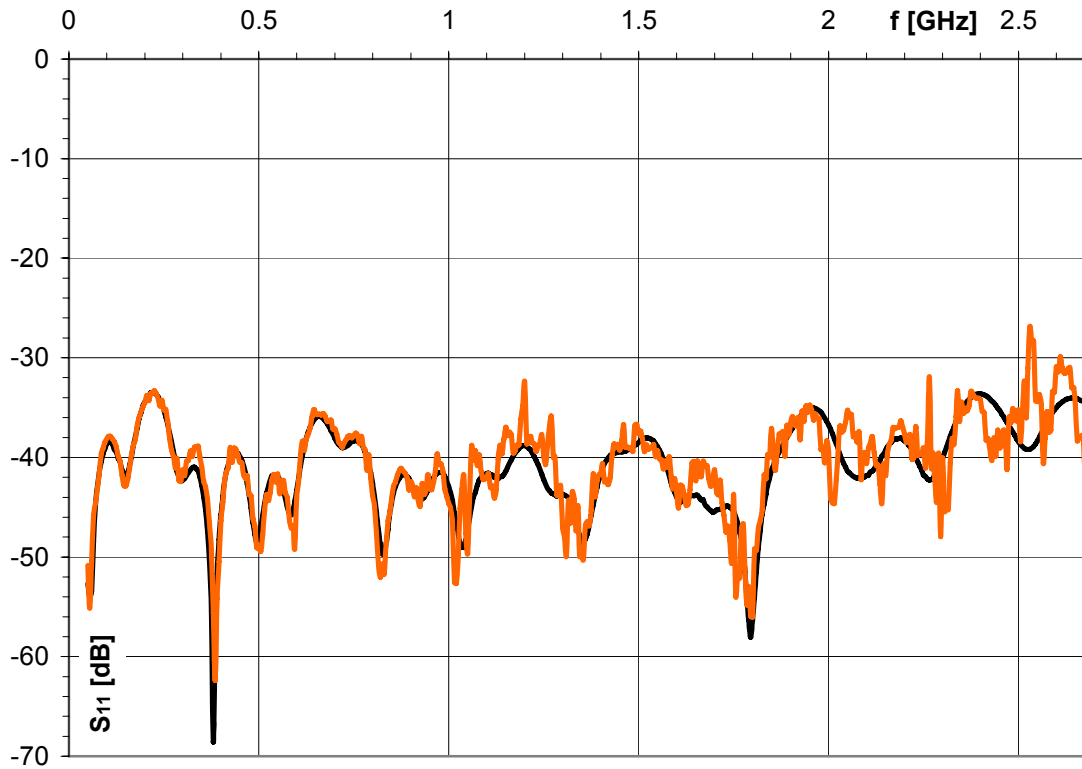
Obr.77 Průběhy měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB, černě referenční měření, barevně měření širokopásmovým systémem



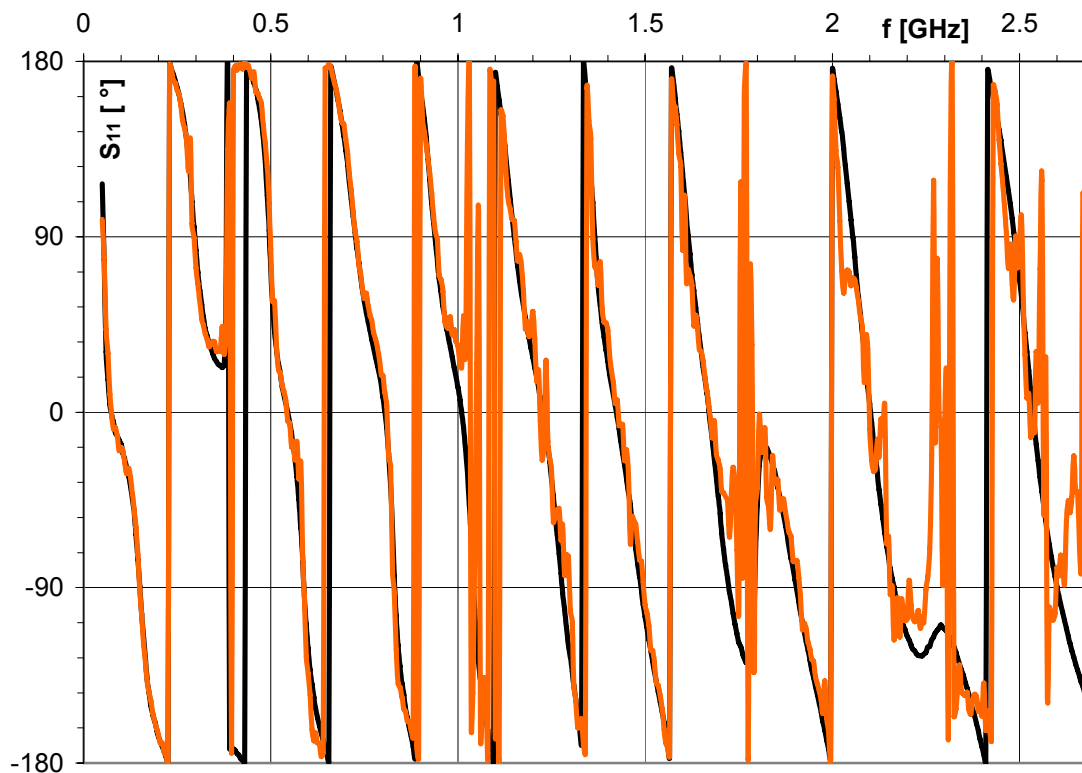
Obr.78 Průběhy chyby měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB



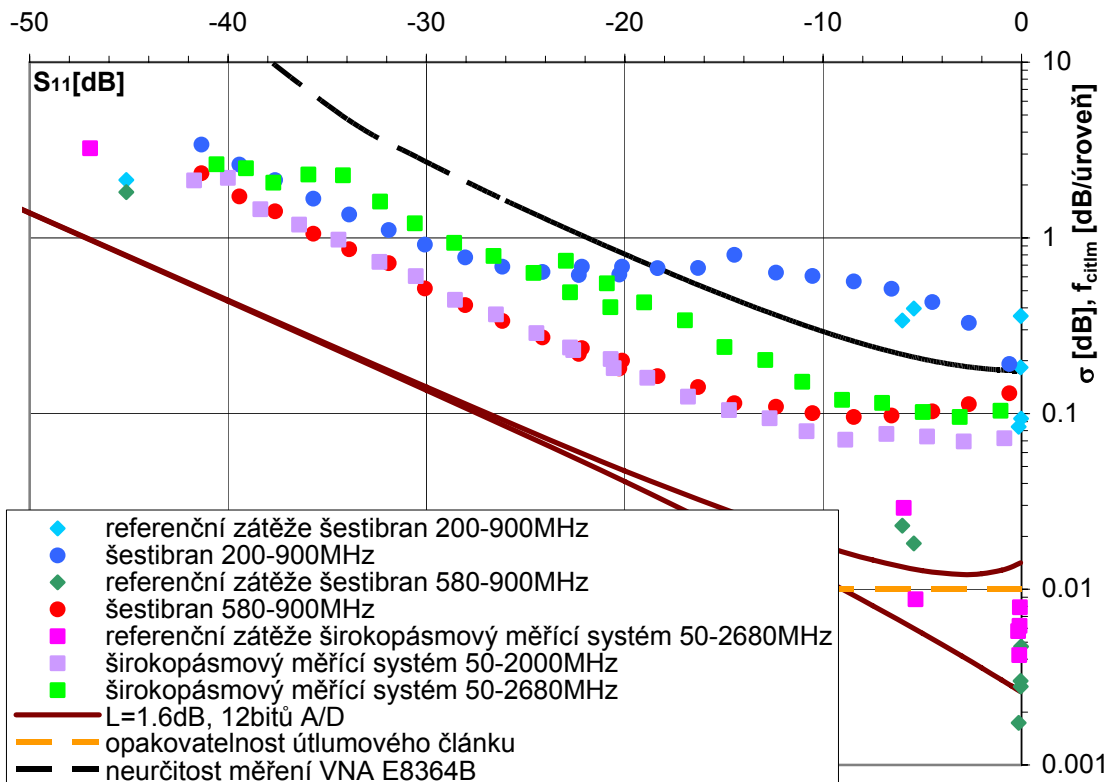
Obr.79 Průběhy chyby měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnot útlumu 8 až 14 dB



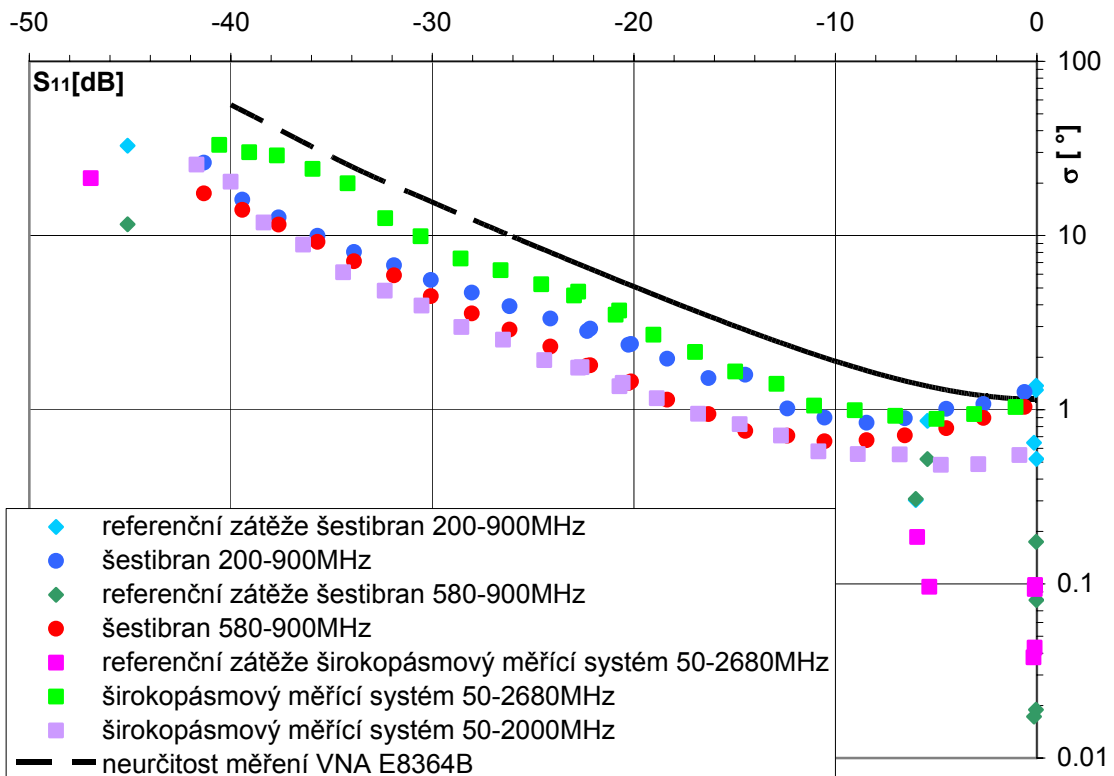
Obr.80 Průběh měření amplitudy zpětného útlumu pro nastavení hodnoty útlumu 21 dB, černě referenční měření, červeně měření širokopásmovým systémem



Obr.81 Průběh měření fáze zpětného útlumu pro nastavení hodnoty útlumu 21 dB, černě referenční měření, červeně měření širokopásmovým systémem



Obr.82 Závislost směrodatné odchytky měření amplitudy zpětného útlumu na jeho hodnotě



Obr.83 Závislost směrodatné odchytky měření fáze zpětného útlumu na hodnotě amplitudy zpětného útlumu

Na obr.82 a 83 je zobrazeno výsledné shrnutí výsledků měření pomocí vyjádření směrodatné odchyly amplitudy a fáze jednotlivých měření. V grafech jsou pro srovnání uvedeny výsledky měření jednoduchého šestibranu v jeho pracovním i zúženém rozsahu a také jeho referenční zátěže. Dále jsou zobrazeny průběhy maximálního rozlišení systému s použitým A/D převodníkem a opakovatelnost nastavení hodnoty útlumu přepínatelného útlumového článku. Samostatně je vyjádřena směrodatná odchylna širokopásmového měřicího systému v celém pracovním rozsahu 50-2680MHz a ve zúženém do kmitočtu 2 GHz. Je vidět, že vyloučení nejvyšších kmitočtů způsobí velký pokles směrodatné odchyly, což se shoduje s vlastnostmi měřicího systému popsanými v předchozím textu. Zúžený kmitočtový rozsah širokopásmového měřicího systému nabízí směrodatnou odchylnu menší, nebo srovnatelnou s odchylkou jednoduchého šestibranu v úzkém kmitočtovém rozsahu 580-900 MHz. Vlastnosti měření tak rozšířením systému o více detektorů nijak neutrpěly a oproti rozsahu 1 : 1.55 je se stejnou chybou pokryt rozsah cca 1 : 40. Další křivkou v grafech je neurčitost měření vektorového obvodoého analyzátoru Agilent E8364B, který byl použit jak pro měření impedancí referenčních zátěží, tak pro měření přepínatelného útlumového článku. Měření obou realizovaných systémů jsou tak závislá na přesnosti měření analyzátoru a nelze je přímo srovnávat. Vzhledem k získaným hodnotám lze snad jen říci, že realizované měřicí systémy chybu analyzátoru již významně nezhoršují. Celková chyba měření realizovaných systémů by měla být určena i se započtením neurčitosti měření vektorového obvodoého analyzátoru.

Závěr

V úvodu práce byl vytvořen přehled metod vhodných pro mikrovlnná vektorová měření. Další část práce se pak zaměřila na vlastnosti a možnosti měřicí metody šestibranu, které byly částečně převzaty z literatury a částečně je jejich odvození původní.

Poté následoval teoretický návrh nové metody měření, respektive modifikace měřicího systému šestibranu. V textu byly popsány jeho základní vlastnosti a výhody, kterými jsou širokopásmovost řešení v principu $1 : 100$ či více. Dále je výhodou popsaného systému jeho možnost získání více výsledků pro jedno měření, kterou je možno využít pro potlačení měřicích chyb, rušení přítomného při měření, či zpřesnění měřených výsledků.

V praktické části byl nejprve navržen měřicí systém s jednoduchým šestibranem, jehož hlavním cílem bylo umožnit konstrukci pomocných obvodů pro zpracování signálů z šestibranu a vytvořit potřebné programové vybavení pro řídicí počítač PC. I přes jednoduchost konstrukce měřicího systému bylo dosaženo stabilních měřicích parametrů v rozsahu 200 - 900 MHz, což odpovídá šířce pásma $1 : 4.5$. Vlastnosti měření v celém kmitočtovém rozsahu byly vyhodnoceny statisticky a pro měření amplitudy zpětného útlumu v rozsahu 0 až -30 dB byla vyhodnocena střední kvadratická odchylka menší, než 0.8 dB, při měření fáze pak menší, než 5° .

Nejdůležitějším výsledkem práce je návrh a realizace širokopásmového měřicího systému na principu šestibranu, který přidáním dalších detektorů k jednoduchému systému umožnil zásadní rozšíření šířky pásma, zde u konkrétního návrhu na $1 : 53.6$ mezi kmitočty 50 - 2680 MHz. Další vlastnost, tedy více měření na jednom kmitočtu, byla vyhodnocena pro daný systém a nejlepších výsledků bylo dosaženo při započítávání deseti měření z dvaceti možných. Jednoduchá výběrová metoda je v práci také popsána. Praktickými měřeními byla ověřena činnost měřicího systému v celém navrhovaném rozsahu s tím, že pro kmitočty vyšší, než 2 GHz dosahuje měřicí systém větších chyb jak v amplitudě, tak i ve fázi, což je připisováno použité kalibrační sadě zátěží, která pro takový kmitočtový rozsah nebyla konstruována. Vyhodnocením měření pomocí širokopásmového systému bylo zjištěno, že pro kmitočtový rozsah 50 - 2000 MHz dosahuje pro měření amplitudy zpětného útlumu v rozsahu 0 až -30 dB jeho střední kvadratická odchylka hodnot menších, než 0.6 dB, při měření fáze pak menších, než 4° . Pro hodnoty amplitudy zpětného útlumu v rozsahu 0 až -15 dB pak dosahuje střední kvadratická odchylka hodnot menších, než 0.1 dB, při měření fáze pak menších, než 0.9° . Tyto hodnoty ukazují na vysokou přesnost měření realizovaného systému při šířce pásma měření $1 : 40$.

Další vlastnosti měření, jako dlouhodobá stabilita výsledků měření či odolnost vůči teplotním změnám zatím nebyla měřena, nabízí se tak jako další pokračování této práce. Další důležitým úkolem bude samotná realizace měřicího systému pracujícího z větší části v mikrovlnných kmitočtech, k čemuž tato práce dala solidní základ a zbývá tak vyřešit pouze technologické problémy při návrhu a realizaci vhodných rezistivních můstků a diodových detektorů pro zvolený rozsah. Zpracování signálů i programové vybavení je na aktuálním měřeném kmitočtu nezávislé.

Vhodnou integraci by dále zasloužila některá ze složitějších kalibračních metod, která nepožaduje detailní znalosti impedancí kalibračních zátěží, ovšem je potřeba k ní přistupovat obezřetně z hlediska specifických požadavků měřicího systému, zejména jeho extrémní širokopásmovosti, což ve vlastní práci vylučovalo použití např. posuvné zátěže.

Literatura

- [1] Hoffmann, K. and Škvor, Z.: A novel vector network analyzer. *MTT-S International Microwave Symposium Digest* 98.2 (1998 Vol. II [MWSYM]): 953-956.
- [2] Golio M.: *The RF and Microwave Handbook*. CRC Press, New York, 2000, ISBN 0-8493-8592-X
- [3] Engen, G. F.: Determination of Microwave Phase and Amplitude from Power Measurements. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, PP. 414-418, Dec. 1976.
- [4] Collier, R.J. and El-Deeb, N.A.: On the Use of a Microstrip Three-Line System as a Six-Port Reflectometer. 1979 *Transactions on Microwave Theory and Techniques* 27. (Oct.1979 [T-MTT]): 847-853.
- [5] Riblet, G.P., Hansson E.R.B.: The Use of a Matched Symmetrical Five-Port Junction to Make Six-Port Measurements. 1981 *MTT-S International Microwave Symposium Digest* 81.1 (1981 [MWSYM]): 151-153.
- [6] Hesselbarth, J.; Wiedmann, F., Huyart, B.: Two New Six-Port Reflectometers Covering Very Large Bandwidths. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 46, No. 4, August 1997
- [7] Engen, G. F., Hoer, C. A.: Application of arbitrary six-port Junction to power measurement problems. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-21, pp 470–474, Nov. 1972
- [8] Somlo, P. I. and Hunter, J.D.: *Microwave Impedance Measurement*. Peter Peregrinus Ltd., England, 1985, ISBN 0-86341-033-2
- [9] Bilík, V.: Six-port Measurement Technique: Principles, Impact, Applications. Invited paper at the *International Conference RADIOELEKTRONIKA 2002*, [online], www.s-team.sk
- [10] Bilík, V., Bezek, J., Raffaj, V.: Three-probe X-band waveguide six-port reflectometer. *Elektrotechnicky casopis*, 1990, vol. 41, no. 5, p. 329-342 (in Slovak).
- [11] Černohorský, D., Raida, Z., Škvor, Z., Nováček, Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur (Analysis and Optimization of Microwave Structures)*. Brno: VUTIUM Publishing, 1999. 284 pages. ISBN 80-214-1512-6.
- [12] Robinson, J., Rahmat-Samii, Y.: Particle Swarm Optimisation in Electromagnetics. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 52, No. 2, February 2004
- [13] Hoffmann, K. *Planární mikrovlnné obvody*. Skripta FEL ČVUT v Praze. Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [14] AppCAD for Windows. Avago Technologies, v3.0.2, 2002, [online], www.avagotech.com
- [15] C8051F020/1/2/3 8K ISP FLASH MCU Family. Silabs, 2003, [online], www.silabs.com
- [16] Zero-Drift, Single-Supply, Rail-to-Rail Input/Output Operational Amplifiers AD8551, AD8552, AD8554. Analog Devices, 1998, [online], www.analog.com
- [17] Agilent VEE Pro – Test&Measurement Software. Agilent Technologies, 2007, [online], www.agilent.com

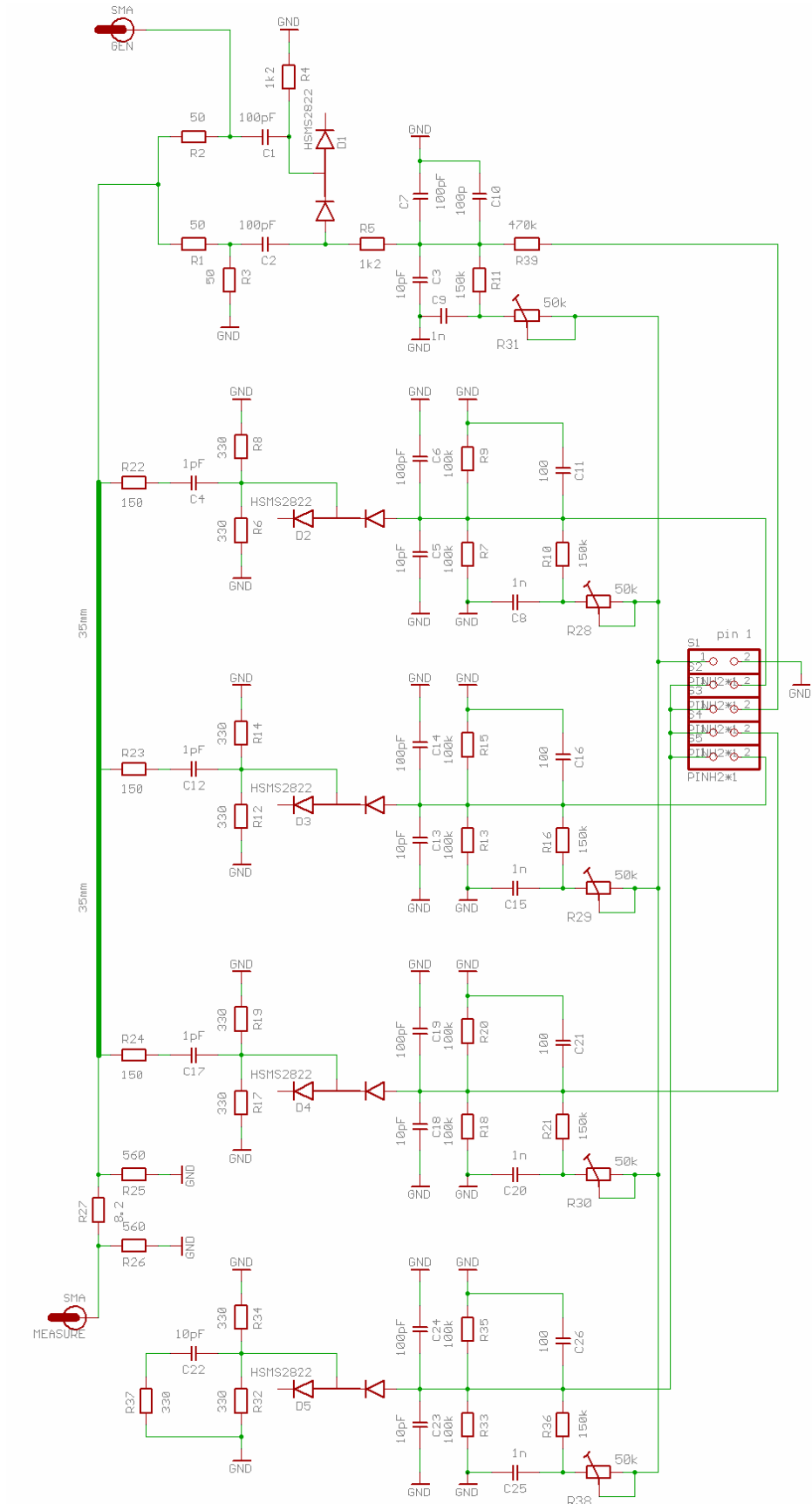
- [18] Hoer, C. A., Roe, K. C., Allred C. M.: Measuring and minimizing diode detector nonlinearity. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. IM-25, pp. 324-329, Dec. 1976.
- [19] Zhaowu, C., Binchun, X.: Linearization of Diode Detector Characteristics. 1987 *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*. June 1987. vol. 1, pp. 265-267.
- [20] Agilent Technologies 8494A/B, 8495A/B, and 8496A/B Attenuators Operating and Service Manual. Agilent Technologies, 2002, [online], www.agilent.com
- [21] Agilent PNA Microwave Network Analyzers E8361A, E8362/3/4B Data Sheet. Agilent Technologies, 2007, [online], www.agilent.com
- [22] Li, S, Bosisio, R. G.: Calibration of multiport reflectometers by means of four open/short circuits. *IEEE Trans.on MTT*, 1982, vol. MTT-30, pp.1085-1090.
- [23] Somlo, P. I., Hunter, J. D.: A Six-Port Reflectometer and its Complete Characterization by Convenient Calibration Procedures. *IEEE Trans.on MTT*, 1982, vol. MTT-30, pp.186-192.
- [24] Urbanec, T.: *Počítačově řízený skalární obvodový analyzátor pro kmitočty do 26 GHz*. Diplomová práce. ÚREL 1999
- [25] Urbanec, T.; Svačina, J.: Počítačově řízený skalární obvodový analyzátor. In *Proceedings of the IEEE & IEE Workshop CAD & CAE 2000*. Praha 2000, p. 34-36
- [26] Urbanec, T.: Návrh planárních mikrovlnných filtrů a mikrovlnná měření. In *Sborník příspěvků a prezentací akce Odborné semináře 2002*, ev.č. REL01V. Brno, UREL FEKT VUT v Brne. 2002. p. 232 - 247.
- [27] Urbanec, T., Svačina, J.: Simple Six Port Measurement System Design. In *Proceedings of the 13th International Czech-Slovak Scientific Conference RADIOELEKTRONIKA 2003*. Brno, FECC VUT Brno. 2003. p. 100 - 103.
- [28] Urbanec, T., Svačina, J.: Microwave Vector Measurements with Six-Port Technique. In *4th International Conference of PhD Students. Engineering Sciences I*. Miskolc, Hungary. 2003. p. 459 - 463. ISBN 963661590X.
- [29] Urbanec, T., Svačina, J.: Software Support for Six Port Measurement System. In *Conference Proceedings of the 14th International Czech-Slovak Scientific Conference*. Bratislava, Slovak Republic, Department of Radio&Elektronics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology. 2004. p. 44 - 47. ISBN 80-227-2017-8.
- [30] Urbanec, T., Svačina, J.: Software Support for Six-Port Measurement System. In *Measurement Science Review*. Journal of the Institute of Measurement Science, Slovak Academy of Sciences, 2004. 2004(4). p. 1 - 5. ISSN 1335-8871.
- [31] Urbanec, T.: From Sixport to Multisixport Measurement Principle - Wideband VNA . In *Proceedings of 36th European Microwave Conference*. Manchester, Great Britain, European Microwave Association. 2006. p. 1563 - 1565. ISBN 2-9600551-6-0.
- [32] Urbanec, T., Doseděl, M.: 0-2.5GHz Generator Based on ADF4360 Controlled by Microprocessor. In *Proceedings of the 17th International Conference RADIOELEKTRONIKA 2007*. Brno, Czech Republic, Department of Radio Electronics, Brno University of Technology. 2007. p. 83 - 86. ISBN 1-4244-0821-0.
- [33] Urbanec, T. Wideband VNA Design by the Multisixport Principle. In *Proceedings of the Sixteenth International Electrotechnical and computer Science Conference ERK 2007*. Ljubljana, Slovenia, Slovenia Section IEEE. 2007. p. 405 - 408. ISSN 1581-4572.

- [34] Urbanec, T. Novel Approach for Wideband VNA by Sixport Principle. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*. Venice, Italy, WASET. 2007. p. 30 - 33. ISSN 1307-6884.
- [35] Kneppo, I.: *Microwave Measurement by Comparison Methods*. VEDA Publishing House of the Slovak Academy of Sciences, Bratislava, 1988, ISBN 0-444-98928-5
- [36] Weber, R. J.: *Introduction to Microwave Circuits*. IEEE Press, New York, 2001, ISBN 0-7803-4704-8
- [37] Bahl, I., Bhartia, P.: *Microwave Solid State Circuit Design*. John Wiley&Sons, Canada, 2003, ISBN 0-471-20755-1

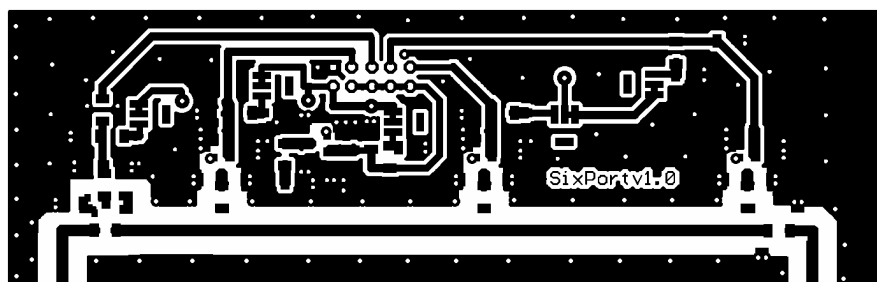
Seznam příloh

<i>Příloha 1 Jednoduchý šestibran – schéma</i>	80
<i>Příloha 2 Jednoduchý šestibran – DPS</i>	81
<i>Příloha 3 Blok zesílení a úpravy signálů - schéma</i>	82
<i>Příloha 4 Blok zesílení a úpravy signálů-DPS</i>	83
<i>Příloha 5 Širokopásmový měřicí systém – schéma</i>	84
<i>Příloha 6 Širokopásmový měřicí systém – DPS</i>	85
<i>Příloha 7 Širokopásmový měřicí systém – DPS</i>	86
<i>Příloha 8 Měřená zátěž - přepínatelný útlumový článek</i>	87
<i>Příloha 9 Konfigurace při měření jednoduchým šestibranem a širokopásmovým měřicím systémem</i>	88

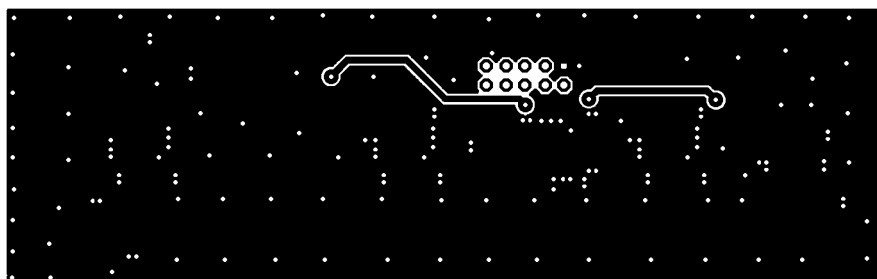
Příloha 1 Jednoduchý šestibran – schéma



Příloha 2 Jednoduchý šestibran – DPS

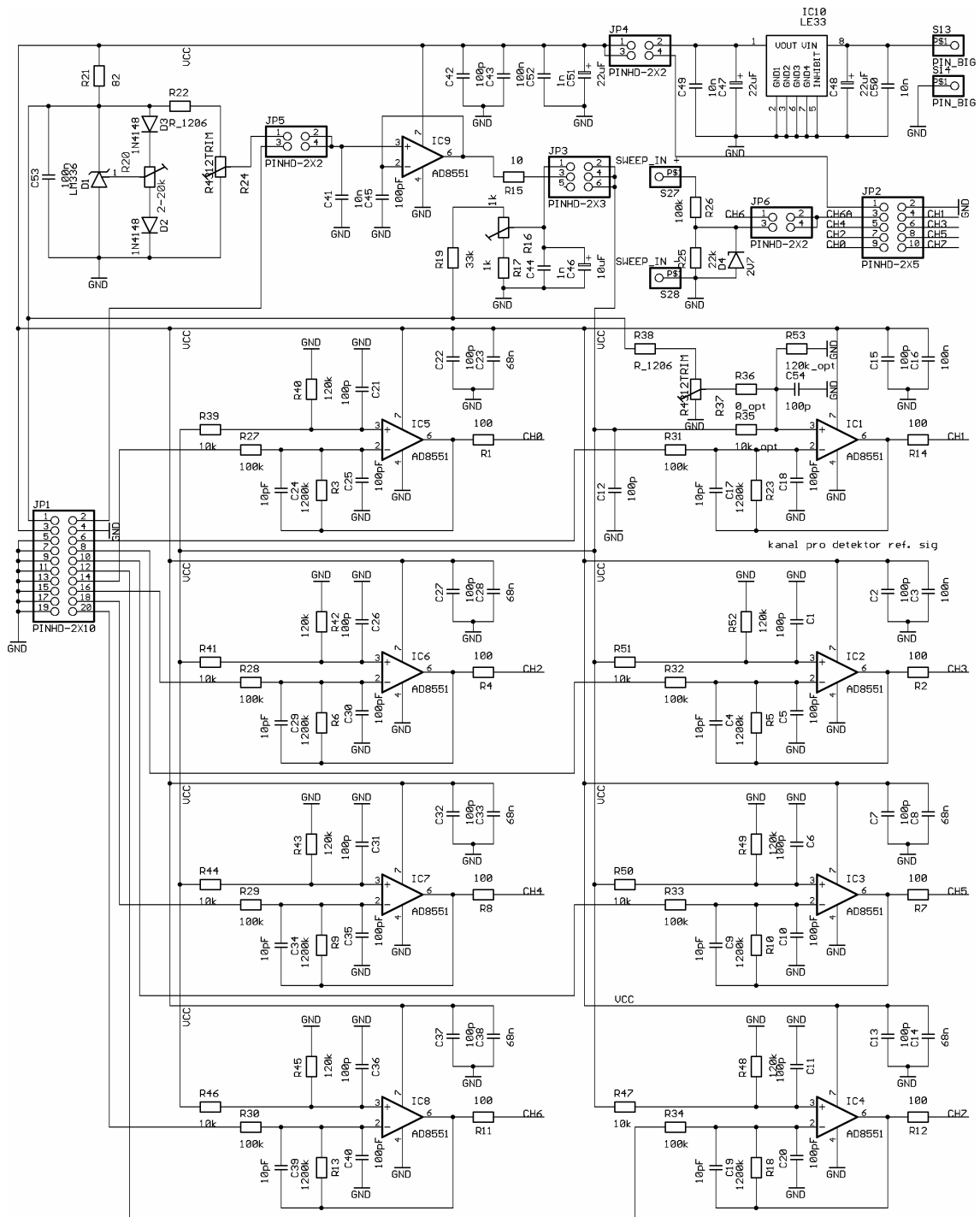


Horní strana desky plošných spojů 1:1, použitý materiál 0.8 mm FR4

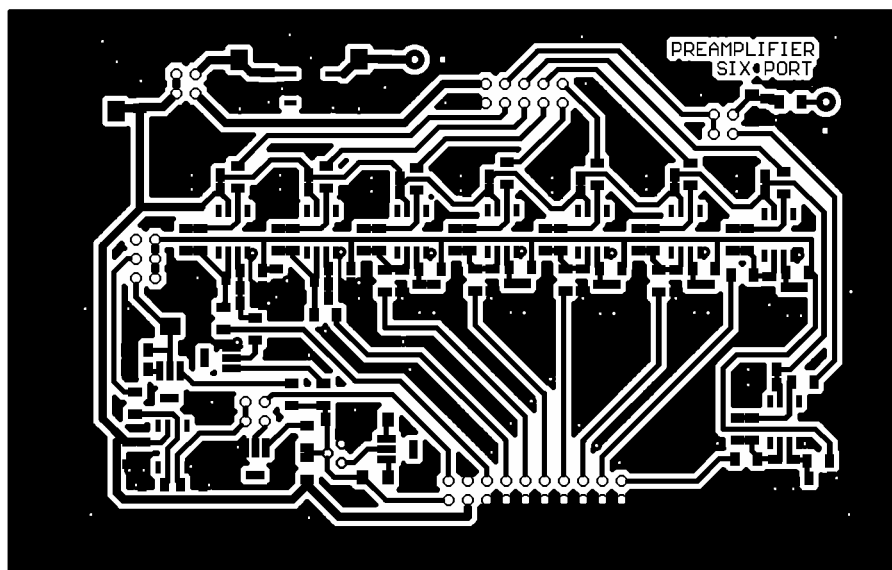


Spodní strana desky plošných spojů 1:1

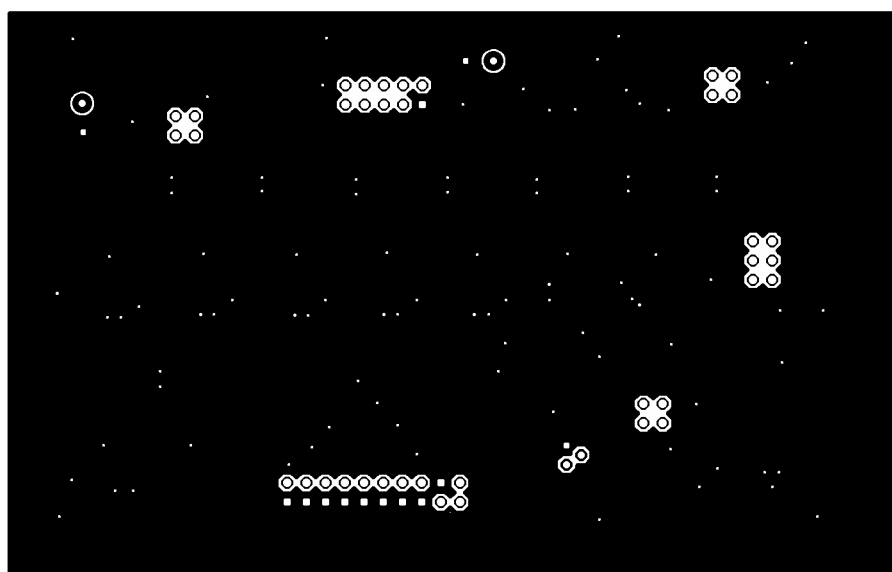
Příloha 3 Blok zesílení a úpravy signálů - schéma



Příloha 4 Blok zesílení a úpravy signálů-DPS

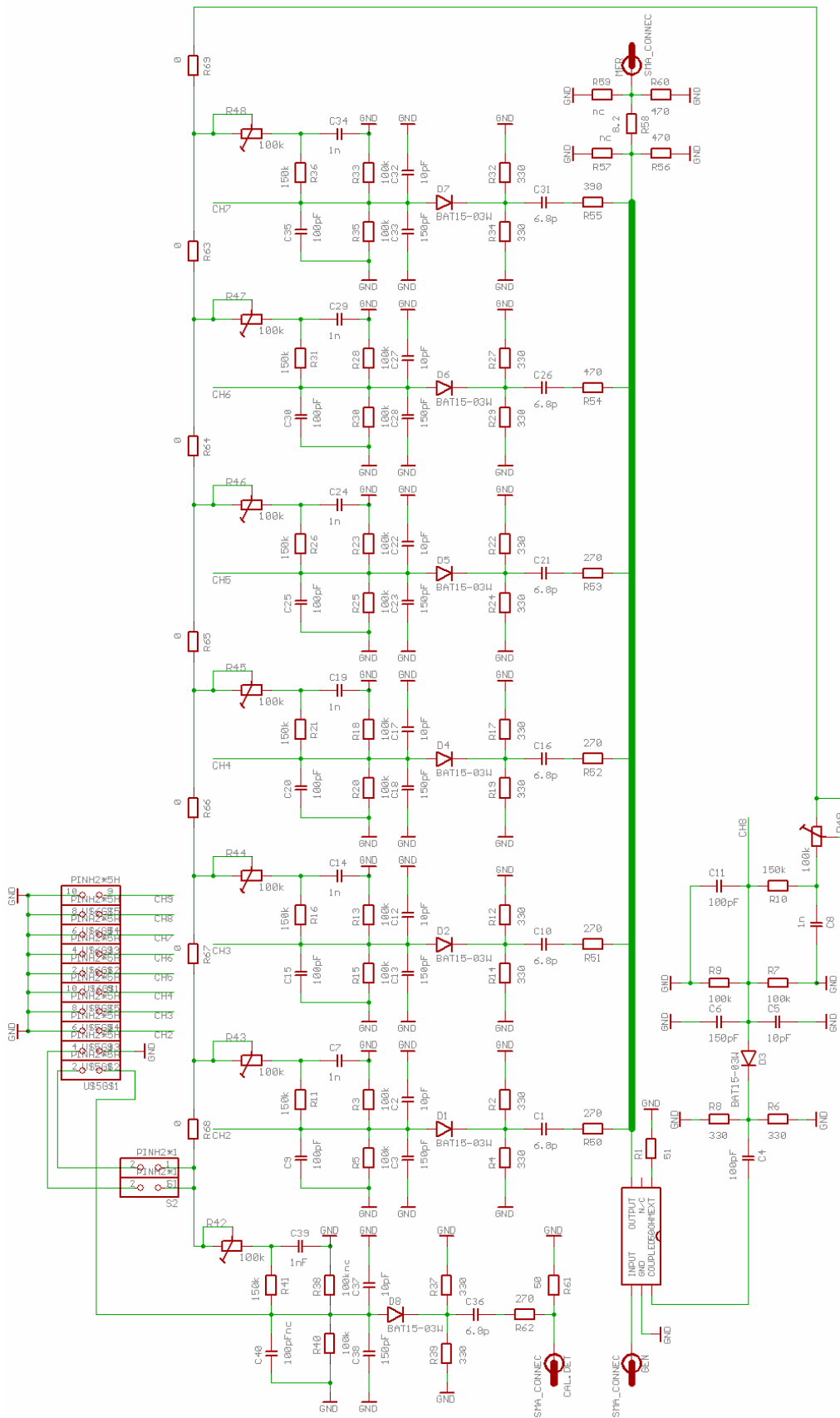


Horní strana desky plošných spojů 1:1

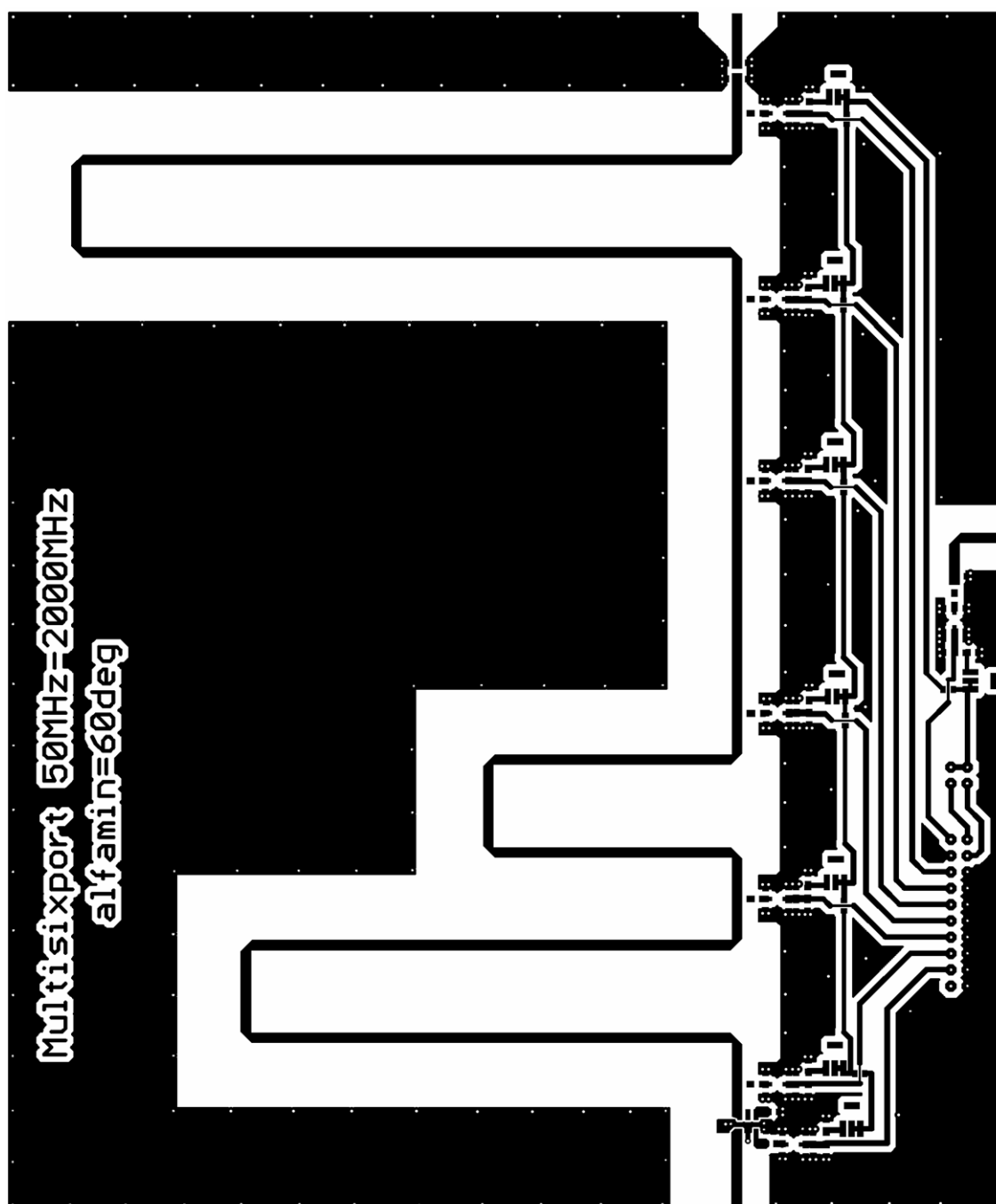


Spodní strana desky plošných spojů 1:1

Příloha 5 Širokopásmový měřicí systém – schéma

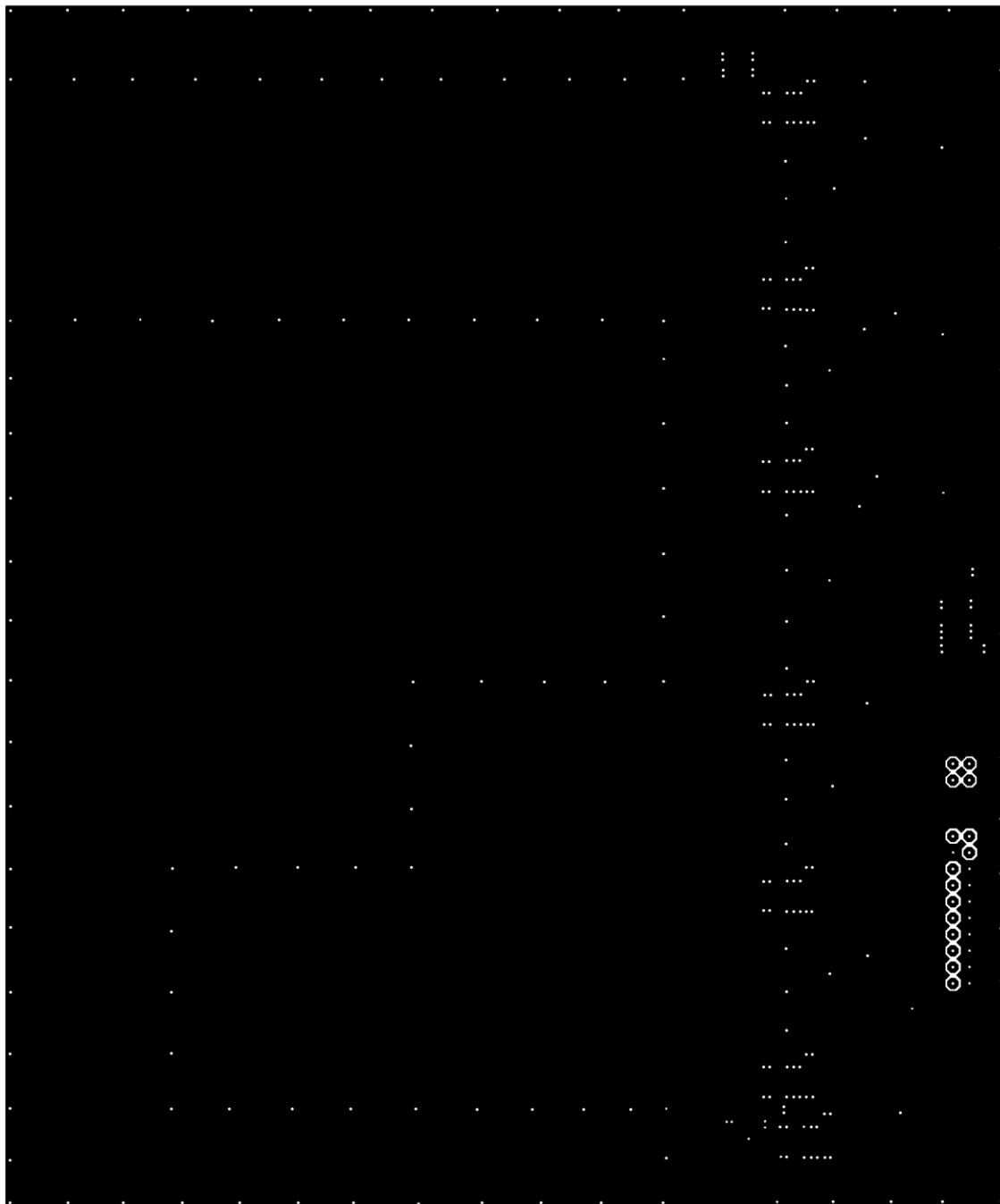


Příloha 6 Širokopásmový měřicí systém – DPS



Horní strana desky plošných spojů se skutečnými rozměry 186.6*155 mm, použitý materiál 0.8 mm FR4

Příloha 7 Širokopásmový měřicí systém – DPS



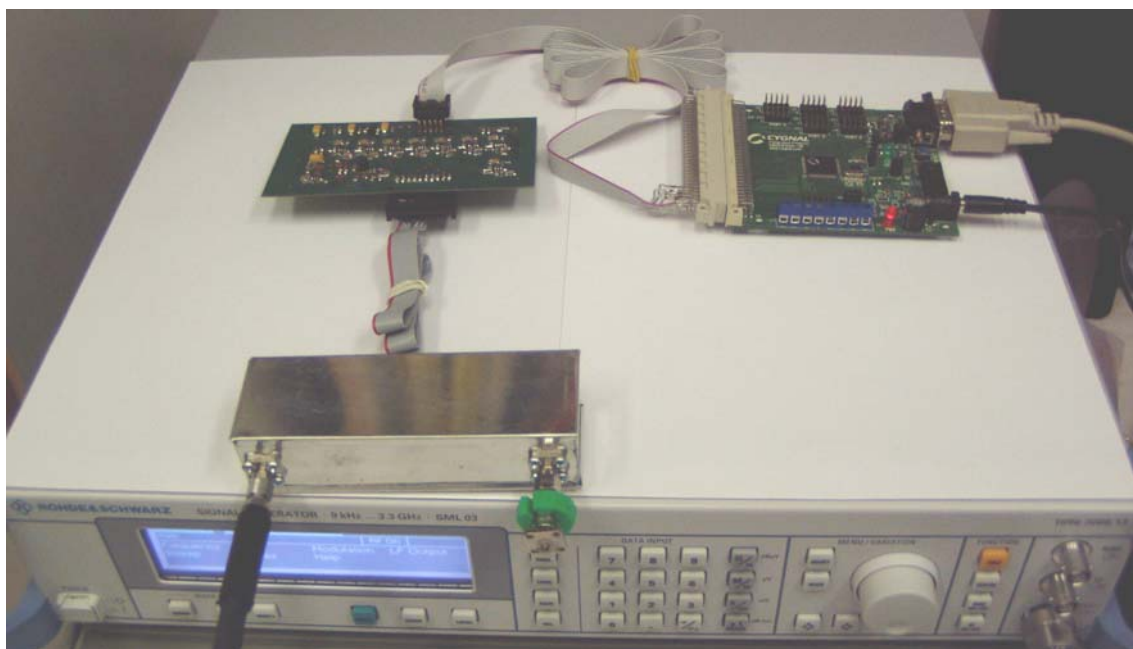
Spodní strana desky plošných spojů se skutečnými rozměry 186.6*155 mm

Příloha 8 Měřená zátěž - přepínatelný útlumový článek

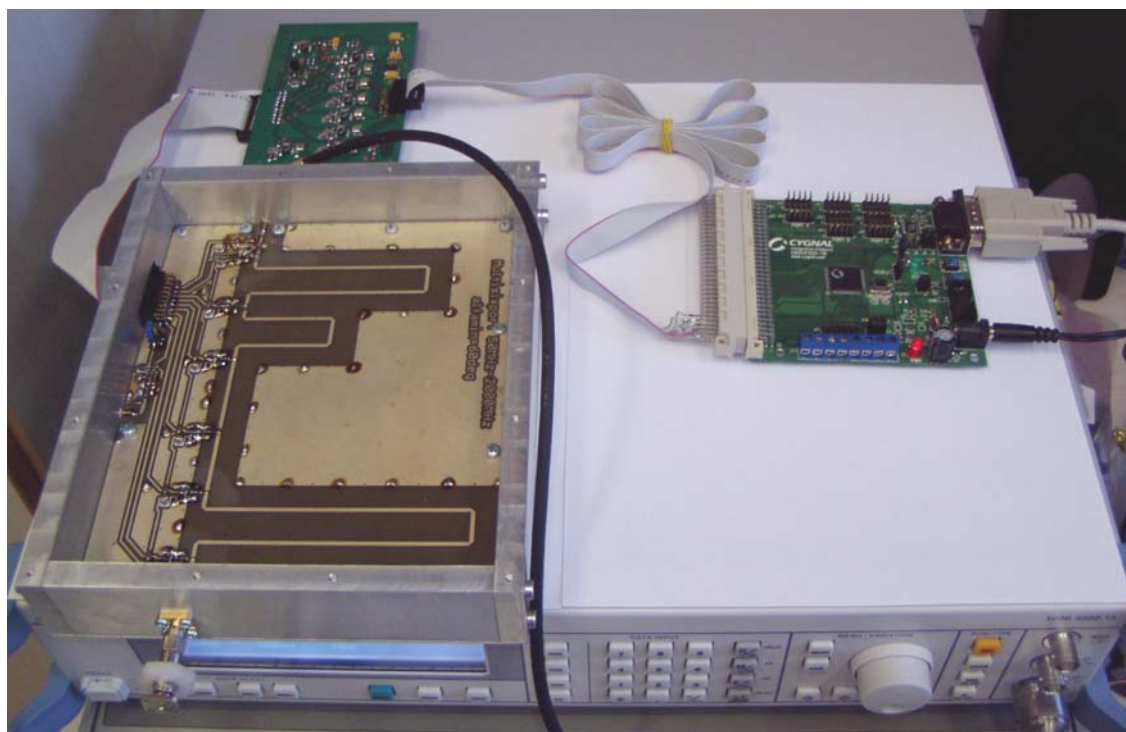


Fotografie měřené zátěže, sestávající z úseku vedení, předřadného útlumového článu PE 7005-10 s útlumem 10 dB a přepínatelného útlumového článu HP 8494B s rozsahem 0 - 11 dB, zakončeného zkratem

Příloha 9 Konfigurace při měření jednoduchým šestibranem a širokopásmovým měřícím systémem



Měření pomocí jednoduchého šestibranu



Měření pomocí širokopásmového měřícího systému

Curriculum Vitae

Jméno a příjmení: Ing. Tomáš Urbanec

Adresa: Nová 377

683 35 Letonice

Telefon: +420 604 280 472

E-mail: urbanec@feec.vutbr.cz

Datum narození: 7.června 1976

VZDĚLÁNÍ:

2000 – dosud Vysoké učení technické v Brně

fakulta Elektrotechniky a informatiky

(od 1.1.2002 fakulta Elektrotechniky a komunikačních technologií)

PhD. studium v oblasti mikrovlnných vektorových měření

1994 – 2000 Vysoké učení technické v Brně

fakulta Elektrotechniky a informatiky

magisterské studium Elektronika a sdělovací technika

1990 – 1994 gymnázium Mikoláše Koperníka, Bílovec, třída se zaměřením na matematiku

2006 získán grant „Inovace laboratorních úloh předmětu Speciální elektronické součástky a jejich aplikace“, financovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy

2004 účast na grantu „Buzení a snímání elektromagnetických polí při měření útlumu stínění“, financovaný Národním bezpečnostním úřadem ČR

2003 získán grant „Vektorová měření metodou šestibranu“, financovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy

2003 účast na grantu „Metodika měření účinnosti elektromagnetického stínění malých kovových boxů v oblasti nízkých kmitočtů“, financovaný Národním bezpečnostním úřadem ČR

2002 účast na 12. putovní letní škole mikrovln&optiky, Minsk, Bělorusko

2002 získán grant „Návrh a realizace skalárního obvodového analyzátoru“, financovaný Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy

2001 účast na grantu „Vývoj metodiky měření datových a síťových odrušovacích filtrů“, financovaný Národním bezpečnostním úřadem ČR

PRAXE:

2001-2004 TheNet s.r.o., místní pobočka švýcarské TheNet AG, internet services; návrh a příprava výroby příslušenství pro WLAN (sektorové antény, integrovaný předzesilovač a výkonový zesilovač, dělič výkonu, konzultace VF problematiky)-externí spolupráce

2001 Romill s.r.o., průmyslový mikrovlnný ohřev; návrh a realizace přenosného měřiče pole pro pásmo 915 MHz –externí spolupráce

JAZYKOVÉ ZNALOSTI:

anglický jazyk středně pokročilý

německý jazyk mírně pokročilý

ruský jazyk základní znalost abecedy a jazyka

polský jazyk středně pokročilý, pouze slovem

ODBORNÉ ZAMĚŘENÍ:

Vysokofrekvenční a mikrovlnná měření, návrh a konstrukce mikrovlnných obvodů.