

Diplomová práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektromagnetického pole

Interferometrický senzor pro měření ultrakrátkých vzdáleností

Bc. David Prudek

Studijní program: Elektronika a komunikace

Obor: Radiové systémy

Srpen 2020

Vedoucí práce: prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Prudek** Jméno: **David** Osobní číslo: **434914**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**
Specializace: **Rádiové systémy**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Interferometrický senzor pro měření ultrakrátkých vzdáleností

Název diplomové práce anglicky:

Interferometric Sensor for Ultra Short Distance Measurements

Pokyny pro vypracování:

Pomocí 3D simulátoru pole pro vlnovod R100 navrhnete a realizujete interferometrický skalární odrazný senzor pro měření ultrakrátkých vzdáleností. Použijte otevřené ústí vlnovodu s přírubou obsahující tlumivku a přidavný odrazný element umístěný ve vhodném místě vlnovodu. Požadovaný rozsah měřených vzdáleností minimálně 0 až 15 mm. Snažte se dosáhnout co největší dynamiky mezi maximy a minimy interferenční křivky koeficientu odrazu. Navrhnete vhodný algoritmus pro určení měřené vzdálenosti a pro kalibraci senzoru. Parametry senzoru experimentálně ověřte.

Seznam doporučené literatury:

[1] Karel Hoffmann, Zbyněk Škvor, „New method suitable for relative short distance measurement,“ Proceedings of the 40th European Microwave Conference, 28-30 September 2010, Paris, France, pp. 1524-1527.
[2] Aleksandra Baskakova, Karel Hoffmann, „Investigation of Waveguide Sensors for Ultra-Short-Distance Measurements,“ 2019 93rd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG), June 7th, 2019 Westin Boston Waterfront Hotel Boston, Massachusetts, ISBN: 978-1-7281-0506-2

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **12.02.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

prof. Ing. Karel Hoffmann, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Na tomto místě bych chtěl především velmi poděkovat vedoucímu své diplomové práce, panu prof. Ing. Karlu Hoffmannovi, CSc., za jeho ochotu a trpělivost při vedení mé diplomové práce. Bez jeho cenných rad a zkušeností by tato práce nikdy nemohla vzniknout.

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

V Praze dne

.....

Abstrakt / Abstract

V rámci diplomové práce byla navržena struktura použitelná jako vlnovodný senzor ultrakrátké vzdálenosti, pracující na principu interferometrického měření.

Práce obsahuje teoretický úvod do interferometrického měření, důležité vlastnosti použitého vedení nebo metody použitelné pro výsledný výpočet vzdálenosti.

Dále rozebírá několik návrhů možné podoby senzoru založených na simulacích a obsahuje výběr podoby nejvíce vhodné pro realizaci senzoru.

Další důležitou částí je výroba části senzoru, jeho sestavení a experimentální měření pro ověření skutečných vlastností.

Poslední částí je vyhodnocení vzdáleností z naměřených dat pomocí teoreticky rozebraných metod a vyhodnocení funkce senzoru.

Výsledkem práce je vlnovodná jednobraná struktura na vlnovodu R100 použitelná pro měření ultrakrátké vzdálenosti. Senzor využívá ústovou tlumivku pro zlepšení vyzařovacích vlastností otevřeného ústí a clonkovou diskontinuitu pro vytvoření referenčního kanálu.

Klíčová slova: vlnovod, interferometrie, 3D simulace, jednobran, měření ultrakrátké vzdálenosti, mikrovlnné měření, testovací a referenční kanál

In this diploma thesis, a structure usable as a waveguide sensor for ultra-short distance was designed. It works on the principle of interferometric measurement.

The thesis contains a theoretical introduction to interferometric measurement, important properties of the used lines and methods usable for the final calculation of the distance.

It also analyzes several proposals for a possible structure of the sensor based on simulations and selects the most suitable structure for the implementation of the sensor.

Another important part is the realization of one segment of the sensor, its assembly and experimental measurements to verify its actual properties.

The last part is the evaluation of the distances from the measured data and the evaluation of the sensor function.

The result of this diploma thesis is a structure based on the R100 waveguide usable for measuring ultra-short distances. The sensor uses a waveguide choke to improve the radiating properties of the open mouth waveguide and a discontinuity to create a reference channel.

Keywords: waveguide, interferometry, 3D simulation, ultra-short distance measurement, microwave measurement, test channel, reference channel

Obsah /

1 Úvod	1
2 Teoretický úvod	3
2.1 Interferometrické měření.....	3
2.1.1 Interferometrické měření pomocí vlnovodu.....	3
2.2 Důležité parametry vlnovodného vedení.....	5
2.2.1 Charakteristická impedance vlnovodu a změna impedance pro tvorbu diskontinuity	6
2.3 Určení vzdálenosti překážky pomocí interferometrického měření	6
2.3.1 Určení vzdálenosti výpočtem z experimentálních dat	7
2.3.2 Určení vzdálenosti metodou porovnání (korelace) experimentálních dat s modelem	7
2.3.3 Určení vzdálenosti metodou korelace experimentálních dat s analyticky vytvořenou křivkou ..	7
3 Modelovaná struktura	9
3.1 Požadované parametry struktury	9
3.2 Uvažované typy struktur	11
3.2.1 Srovnání struktury ústí vlnovodu s tlumivkou a bez tlumivky	11
3.2.2 Struktura s válcovou diskontinuitou	15
3.2.3 Struktura s clonkovou diskontinuitou	17
3.2.4 Tlumivka navržená pro 11 GHz	18
3.2.5 Tlumivka navržená pro 8 GHz	19
3.2.6 Zvolená struktura senzoru	20
4 Realizace vlnovodného senzoru a jeho měření	25
4.1 Realizace diskontinuity pro vlnovodný senzor.....	25
4.2 Experimentální měření	26
4.2.1 Kalibrace vektorového analyzátoru	27
4.2.2 Měření clonkové diskontinuity	28
4.2.3 Použití atenuátoru z útlumového materiálu ...	29
4.2.4 Použití proměnného atenuátoru	31
4.2.5 Vybrané experimentálně změřené výsledky	34
5 Vyhodnocení výsledků měření a výpočet vzdáleností	36
5.1 Vyhodnocení srovnáním simulací s experimentem	36
5.2 Určení vzdálenosti	40
6 Závěr	43
6.1 Zhodnocení výsledků práce....	43
6.2 Možná další vylepšení	44
Literatura	46
A Zdrojový kód	47
A.0.1 Vyhodnocení vzdálenosti pomocí korelace naměřených dat se simulacemi	47
A.0.2 Vyhodnocení vzdálenosti metodou výpočtu ..	49
B CD	52

Tabulky / Obrázky

5.1. Tabulka nastavených a určených hodnot vzdáleností pro 0 mm až 9 mm	41
5.2. Tabulka nastavených a určených hodnot vzdáleností pro 9,5 mm až 20 mm	42
2.1. Schéma principu metody.....	3
2.2. Schéma principu metody na vlnovodu	4
2.3. Příklad interference dvou signálů	5
3.1. Podoba požadované struktury .	10
3.2. Ústí vlnovodu	10
3.3. Obecná podoba tlumivky	12
3.4. Parametr S_{11} bez tlumivky	12
3.5. Rozložení el. pole bez tlumivky	13
3.6. Rozložení el. pole bez tlumivky (z boku)	13
3.7. Parametr S_{11} s tlumivkou	14
3.8. Rozložení el. pole s tlumivkou .	14
3.9. Rozložení el. pole s tlumivkou (z boku).....	15
3.10. Rozložení pole pro dvě vzdálenosti s tlumivkou a bez	15
3.11. Možná podoba válcové diskontinuity.....	16
3.12. Závislost koeficientu odrazu pro válcovou diskontinuitu	16
3.13. Možná podoba clonkové diskontinuity.....	17
3.14. Závislost koeficientu odrazu pro clonkovou diskontinuitu ...	17
3.15. Navržená clonková diskontinuita s rozměry	18
3.16. Závislost koeficientu odrazu pro otevřené ústí s tlumivkou 11 GHz	19
3.17. Simulovaná podoba tlumivky ..	19
3.18. Závislost koeficientu odrazu pro otevřené ústí s tlumivkou 8 GHz.....	20
3.19. Podoba zvolené struktury senzoru	21
3.20. Schéma spojení modelovaných úseků.....	21
3.21. Výsledný průběh bez atenuátoru	22
3.22. Vznik odrazů ve vlnovodu s diskontinuitou	23
3.23. Schéma spojení modelovaných úseků včetně atenuátoru .	23

3.24.	Výsledný průběh pro zapojení s atenuátorem	24
4.1.	Nákres a rozměry realizované diskontinuity	25
4.2.	Clonková diskontinuita	26
4.3.	Finální uspořádání měřicí sestavy	27
4.4.	Kalibrace vektorového analyzátoru	28
4.5.	Změřené S-parametry clonkové diskontinuity	29
4.6.	Atenuátor realizovaný útlumovým materiálem	30
4.7.	S-parametry atenuátoru z útlumového materiálu	30
4.8.	Výsledek měření s atenuátorem z útlumového materiálu ...	31
4.9.	Nákres principu proměnného atenuátoru	32
4.10.	Proměnný atenuátor	32
4.11.	S-parametry proměnného atenuátoru	33
4.12.	Výsledek měření s proměnným atenuátorem	33
4.13.	Výsledek měření 0 mm, 0,5 mm	34
4.14.	Výsledek měření 5 mm, 10 mm	35
4.15.	Výsledek měření 15 mm, 20 mm	35
5.1.	Schéma zapojení jednotlivých bloků pro simulaci experimentu	36
5.2.	Schéma zapojení pro zobrazení experimentálních dat	37
5.3.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 0 mm	37
5.4.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 0,5 mm	38
5.5.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 5 mm	38
5.6.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 10 mm	39
5.7.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 15 mm	39

5.8.	Srovnání simulovaných a experimentálních dat 20 mm	40
5.9.	Odchyly určených hodnot od nastavených	42
6.1.	Simulace pro negaci části atenuátoru	45

Kapitola 1

Úvod

Metod použitelných pro obecné měření vzdáleností se používá velké množství. Historicky byly využívány pro různé aplikace především metody založené na mechanickém měření. Rozvoj elektroniky a požadavky na aplikace, ve kterých není mechanické měření použitelné, umožnily vznik elektronických nebo elektronicko-optických metod.

Jedna z nejvíce rozšířených elektronických metod měření, která využívá přímo elektromagnetické vlnění, je metoda používaná radary. Ta je založena na vyslání elektromagnetického pulzu a vzdálenost překážky je pak zjištěna pomocí časového zpoždění jeho návratu. Tato metoda ale vyžaduje, aby k odrazu vlnění došlo až ve vzdálené zóně antény, což odpovídá obvykle několika násobkům vlnové délky. [1] [2]

V praxi ale mohou vznikat požadavky na měření velmi krátkých vzdáleností, kde by mohla být radarová metoda obtížně použitelná.

Jako vhodná se zde nabízí interferometrická metoda. Ta umožňuje při vzájemné interferenci referenčního signálu (signál, který prošel cestou se známými parametry) a testovacího signálu (signál, který prošel cestou s odrazem od vodivé překážky o neznámé poloze) určit vzdálenost překážky z polohy jednotlivých interferenčních minim. Tuto metodu měření popisují autoři v článku [3] a v článku [4] dále publikují experimentálně zjištěné výsledky. Pro interferometrické měření zde využívají vlnovodný prvek magického T, ten vytváří rozdělení signálu z jednoho zdroje testovací a referenční kanál.

Využití magického T jako prvku pro vytvoření referenčního a testovacího kanálu, vytváří stále poměrně složitou měřicí strukturu. Pro zjednodušení interferometrického senzoru by bylo vhodné navrhnout senzor tak, aby mohl testovací i referenční signál sdílet stejné přenosové médium (v tomto případě stejný vlnovod). Nabízí se zde konstrukce vhodné diskontinuity ve vlnovodu, která část signálu odrazí a vytvoří tak referenční kanál. Pro konstrukci takové struktury se zdá být vhodné použít i tlumivku v přírubě vlnovodu, která umožní měření vzdáleností otevřeným ústím. Možnost použití tlumivky pro interferometrické měření rozebírají autoři v článcích [1] a [2].

Tato diplomová práce je založena především na metodách popsanych v článcích [1], [2], [3], a [4]. Cílem práce je navrhnout a realizovat interferometrický vlnovodný senzor ultrakrátké vzdálenosti s použitím vlnovodu R100 s tlumivkou v jeho přírubě a vytvořit referenční kanál pomocí diskontinuity umístěné ve vlnovodném vedení.

Součástí práce je teoretický úvod (kapitola 2), kde je popsán princip použité interferometrické metody (sekce 2.1), důležité parametry vlnovodného vedení (sekce 2.2). Jsou zde zároveň popsány metody výsledného určení vzdálenosti (sekce 2.3).

Další kapitola práce (3) popisuje modelovanou strukturu senzoru. Zmiňuje požadované parametry struktury (sekce 3.1) a rozebírá jednotlivé typy struktur z hlediska použitelnosti (sekce 3.2). Sekce 3.2.6 obsahuje shrnutí zvolených částí senzoru a simulace senzoru jako celku.

Následuje realizace senzoru a jeho měření (kapitola 4), kde je popsána výroba diskontinuity (sekce 4.1) a samotný postup experimentálního měření (sekce 4.2) s výsledky.

Poslední kapitola 5 se zabývá celkovým vyhodnocením výsledků měření a výpočtem vzdáleností.

Senzor, kterým se práce zabývá, by mohl být využit k relativně přesnému měření krátkých vzdáleností od vodivých povrchů za použití standardního vlnovodu R100 s tlumivkou v přírubě jeho otevřeného ústí a relativně snadno vyrobitelné diskontinuity. Pro měření vzdálenosti touto metodou by mělo poté postačovat pouze skalární měření.

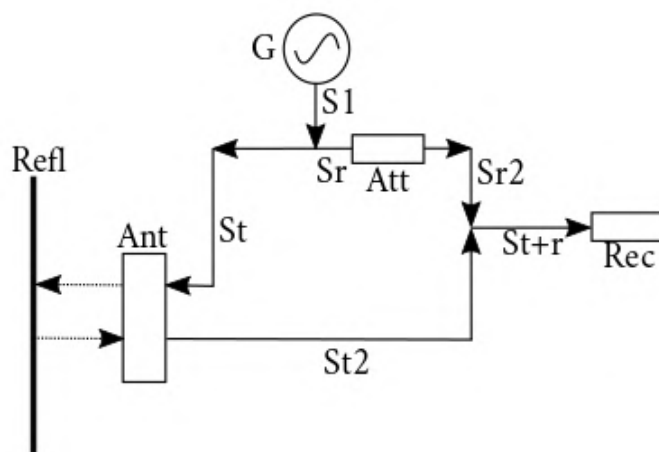
Kapitola 2

Teoretický úvod

2.1 Interferometrické měření

Základní princip interferometrické metody měření vzdálenosti spočívá v interferenci dvou signálů s různou fází.

Princip metody je možné popsat podle obr. 2.1. Generátorem (G) je vytvořený signál (S_1). Ten je rozdělen na testovací (S_t) a referenční (S_r). Signál S_t je dále přiveden do antény (Ant) a vyzářen k překážce (Refl), od té je odražen a při tom částečně utlumen. Následně se pak vrací anténou zpět do systému jako signál S_{t2} . Signál S_r je přiveden do atenuátoru, na kterém by mělo dojít ke stejnému útlumu jako při vyzáření signálu anténou a jeho opětovném příjmu. Výsledkem průchodu atenuátorem je signál S_{r2} . Signály S_{t2} a S_{r2} se pak sečtou a vznikne tak signál S_{t+r} , který je nakonec přijat přijímačem (Rec). Pokud mají signály S_{t2} a S_{r2} stejnou amplitudu, tak se vlivem rozdílně dlouhého referenčního a testovacího kanálu liší pouze ve fázi. Fázový rozdíl signálů S_{t2} a S_{r2} nese informaci o vzdálenosti překážky od antény. V signálu S_{t+r} , který vznikne interferencí S_{t2} a S_{r2} , budou pak znatelná interferenční minima. Ze vzájemné polohy jednotlivých minim je dále možné vypočítat rozdíl délek obou kanálů a z toho pak vzdálenost překážky od antény. [4]



Obrázek 2.1. Schéma principu interferometrické metody.

Z takového minima, kde se fáze obou signálů sejde s posunem právě π a se stejnou amplitudou, můžeme určit, že testovací kanál je vůči referenčnímu kanálu delší o lichý násobek délky půlny signálu o frekvenci odpojídající bodu interferenčního minima. [4]

2.1.1 Interferometrické měření pomocí vlnovodu

Důležitou aplikací interferometrického měření, kterou se práce především zabývá, je interferometrické měření pomocí vlnovodného vedení. Interferometrické měření vzdálenosti objektu pomocí vlnovodu bylo například využíváno pro měření vzdálenosti objektu

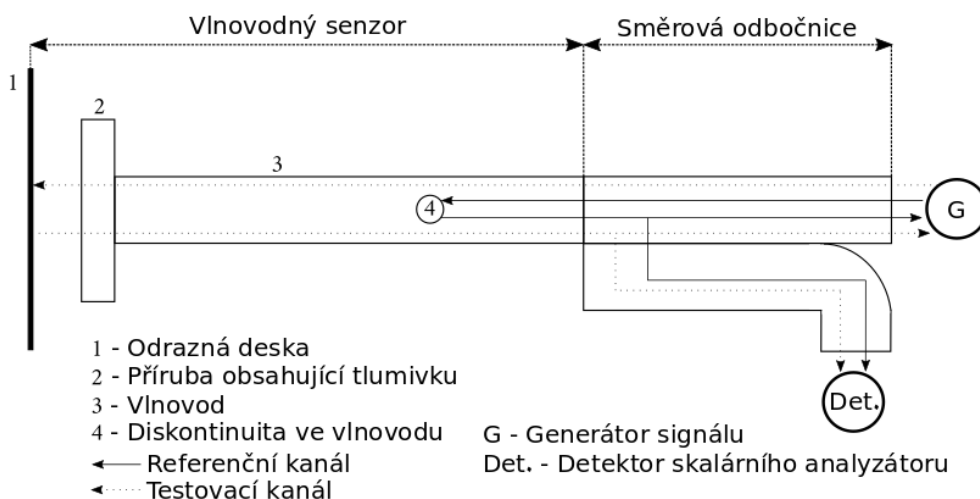
nacházejícího se přímo uvnitř vlnovodného vedení. Přítomnost měřeného objektu uvnitř vedení eliminuje vliv případného vyzařování signálu ven z vlnovodu a jeho opětovného návratu po odrazu od překážky. Pro případ měření vzdálenosti objektu nacházejícího se mimo vedení je třeba řešit problémy ztrát při vyzařování signálu otevřeným ústím vlnovodu. Pro účely co největší eliminace ztrát způsobených otevřeným ústím je v této práci využívána tlumivka v ústí vlnovodného vedení. Její dobré vlastnosti pro takovou aplikaci rozebírají autoři v článcích [1] a [2].

Princip popsany výše v sekci 2.1 je zde aplikován na vlnovodné vedení. Na obrázku 2.2 je zobrazeno schéma funkce interferometrického senzoru vytvořeného pomocí vlnovodu pro případ měření skalárním analyzátozem.

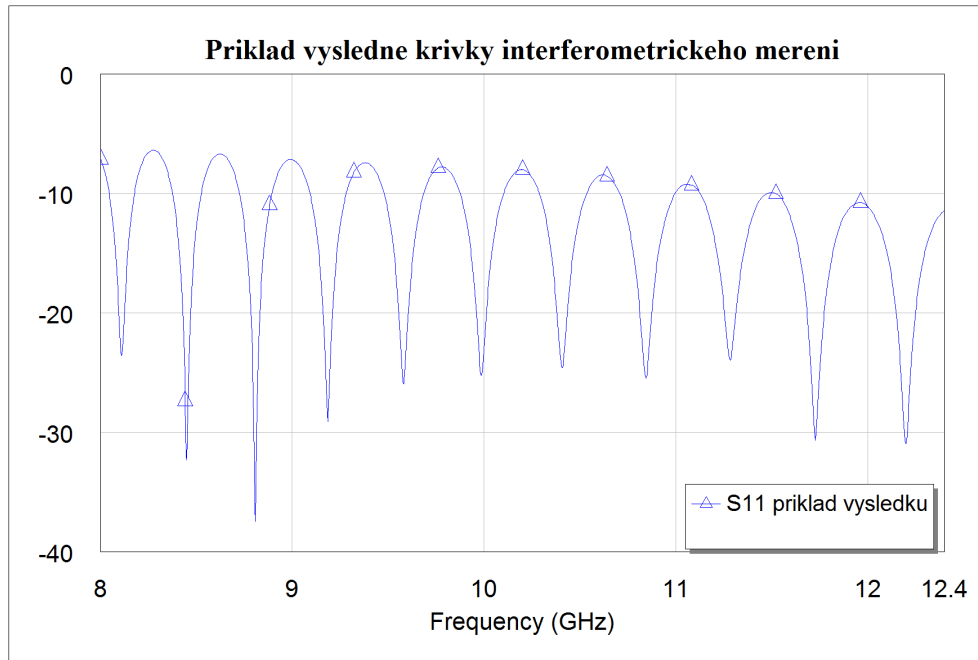
Referenční kanál je zde vytvořen pomocí diskontinuity umístěné ve vlnovodu na předem definovaném místě. Diskontinuita vytvoří odraz, který pak interferuje se signálem šířícím se dále k překážce testovacím kanálem.

Testovací kanál je tvořen delším vlnovodným vedením (než referenční kanál) zakončeným otevřeným ústím, které pro lepší parametry může obsahovat tlumivku (více o využití tlumivky v sekci 3.2.1) a překážku v neznámé vzdálenosti od ústí vlnovodu. Překážka vytvoří odraz vlny, která následně interferuje s vlnou z referenčního kanálu.

Příklad interference signálů šířících se referenčním a testovacím kanálem ve vlnovodu s diskontinuitou je zobrazen na obrázku 2.3



Obrázek 2.2. Schéma principu interferometrické metody pomocí vlnovodného vedení.



Obrázek 2.3. Příklad interference dvou signálů ve vlnovu s diskontinuitou.

Metoda interferometrického měření pomocí vlnovodu s diskontinuitou, která je zde popsána, je pouze jednou z možností takového měření pomocí vlnovodu. Další možností může být například použití vlnovodného vícebranu, kde by byl vytvořen referenční a testovací kanál bez nutnosti vložené diskontinuity.

2.2 Důležité parametry vlnovodného vedení

Vzhledem k tomu, že senzor využívá vlnovodné vedení, je vhodné uvést některé jeho důležité parametry. Jako první je uveden výpočet vlnové délky ve volném prostoru (vzorec (1)) a s ní související výpočet vlnové délky na vedení (vzorec (2)).

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} \quad (m) \quad (1)$$

$$\lambda_v = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r} * \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2}} \quad (m) \quad (2)$$

kde λ_0 je vlnová délka ve volném prostoru, c rychlost světla, f_0 frekvence ve volném prostoru, λ_v vlnová délka ve vlnovodu, μ_r a ε_r relativní permeabilita a relativní permitivita pro vlnovodné vedení, f_c je mezní frekvence (cut off) pro dominantní vid ve vlnovodu TE_{10} . Mezní frekvence f_c pro dominantní vlnovodný vid TE_{10} je možné určit podle vztahu (3).

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (Hz) \quad (3)$$

kde m a n jsou koeficienty definující vlnovodný vid (TE_{mn}), a a b jsou rozměry vlnovodu (a delší strana a b kratší strana vnitřního rozměru vlnovodu).

Důležitým parametrem je zde také fázová rychlost ve vlnovodu v_f , tu lze vypočítat podle vztahu (4).

$$v_f = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r} * \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f_0}\right)^2}} \quad \left(\frac{m}{s}\right) \quad (4)$$

Vztahy (1), (2), (3) a (4) jsou převzaty a popsány podle [5].

2.2.1 Charakteristická impedace vlnovodu a změna impedance pro tvorbu diskontinuity

Obecné určení impedance vychází již z Ohmova zákona, kde figuruje definice pomocí poměru napětí a proudu. Lehkou úpravou lze dostat také vztah, kde vystupuje místo napětí nebo proudu výkon. Podle vztahu (5) [6] lze určit charakteristickou impedanci vlnovodu pomocí permeability μ , permitivity ε , mezní frekvence vlnovodu f_c a frekvence ve vlnovodu f .

$$Z_{CH} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad (\Omega) \quad (5)$$

Výpočet (5) platí pro TE (transverzálně elektrickou) vlnu [6].

V literatuře ([6]) lze nalézt další vztahy pro výpočet charakteristické impedance vlnovodu pomocí různých veličin (napětí a proud, výkon a napětí, výkon a proud), ty ale nejsou pro účely této práce důležité.

Změna impedance pro tvorbu diskontinuity ve vlnovodném vedení

Změna impedance na vedení může způsobovat nežádoucí odrazy signálu a tím možné chyby v prováděných měřeních. Zásadní vliv mohou mít především skokové změny impedance, které mohou nastat například při změnách rozměrů vlnovodu, změně materiálu dielektrika nebo přechodech mezi typy vedení. V takových situacích je nutné impedanci transformovat vhodným impedančním transformátorem.

Pro účely této práce je ale efekt skokové změny impedance velmi důležitý. Skoková změna impedance vedení v určitém místě vytváří v definovaném bodě vedení diskontinuitu. Diskontinuita způsobuje odraz části vlnění zpět a tím umožňuje v rámci jediného vlnovodného vedení vytvoření referenčního i testovacího kanálu pro interferometrické měření. Více o interferometrickém měření pomocí vlnovodu je popsáno v sekci 2.1.1.

Činitel odrazu diskontinuity lze určit z poměru intenzity elektrického pole vlny dopadající na diskontinuitu (E_i) a intenzity elektrického pole vlny od diskontinuity odražené (E_r) [7]. Koeficient odrazu lze tedy určit podle vztahu (6) [7].

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (-) \quad (6)$$

2.3 Určení vzdálenosti překážky pomocí interferometrického měření

Určení vzdálenosti překážky pomocí interferometrického měření je možné mnoha různými způsoby. Pro účel této práce byly vybrány tři přístupy vyhodnocení s ohledem na jejich technickou realizovatelnost.

První přístup je založen pouze na experimentálním měření a následném zpracování naměřených dat. Výsledná vzdálenost je pak určena výpočtem. Dále je tento přístup popsán v sekci 2.3.1.

Druhým přístupem je vytvoření detailního simulačního modelu. Simulovaná data jsou pak porovnávána s experimentálně změřenými. Tento přístup je popsán dále v sekci 2.3.2.

Třetí metodou, pomocí které by mělo být možné vypočítat vzdálost, je metoda korelace experimentálních dat s křivkou vytvořenou analyticky. Princip metody je popsán v sekci 2.3.3.

■ 2.3.1 Určení vzdálenosti výpočtem z experimentálních dat

Určení vzdálenosti výpočtem z experimentálních dat je založeno na frekvenční poloze interferenčních minim v daném měření. Celá problematika je popsána v článkách [3] a [4]. Z těchto článků je převzat také vztah (7), který je základem výpočetního algoritmu vzdálenosti. Celý algoritmus je zobrazen v příloze A obsahující zdrojové kódy.

$$f_k = \frac{v_f(2k + 1)}{2(l_1 - l_2)} \quad (\text{Hz}) \quad (7)$$

Ve vztahu (7) je f_k frekvence minima s pořadím k (celé kladné), l_1 známá délka referenčního kanálu a l_2 neznámá délka testovacího kanálu, kterou hledáme. v_f je pak fázová rychlost vlnění.

V průběhu výpočtu je nutné řešit soustavu dvou lineárních rovnic pro neznámé l_2 a k (vycházející z dvou různých interferenčních minim). Po zjištění hodnoty k je pak možné vypočítat přímo délku l_2 opět ze vztahu (7). Pro správný výpočet je nutné provést korekci délky referenčního kanálu l_1 pomocí naměřených dat. S měnící se vzdáleností odrazné desky od ústí vlnovodu dochází ke drobným změnám koeficientu odrazu. Tyto změny je nutné zahrnout do korekce měření. Pro dostatečnou eliminaci této chyby je tedy vhodné použít ve vyhodnocení několik korekčních experimentálně změřených souborů.

■ 2.3.2 Určení vzdálenosti metodou porovnání (korelace) experimentálních dat s modelem

Určení vzdálenosti pomocí porovnání experimentálních dat s modelem je založeno na detailním teoretickém zmapování chování struktury senzoru. Naměřená data s neznámou hledanou vzdáleností překážky jsou porovnávána pomocí korelace s průběhy teoreticky vytvořenými pro různé definované vzdálenosti překážky. Křivka naměřených dat je tedy porovnávána se souborem křivek dat získaných pomocí simulace. Výsledná vzdálenost pak vychází ze simulované křivky s největší hodnotou vzájemné korelace s měřenou křivkou, odpovídá tedy vzdálenosti, pro kterou byla simulovaná křivka vytvořena. Tato metoda je bohužel zásadně závislá na množství provedených simulačních měření. Její přesnost vychází z kroku vzdálenosti, s jakým byla vytvářena simulovaná data. Tato metoda je tedy pro dosažení přesného interferometrického měření náročná na paměť, kde musí být uložena všechna simulovaná data. Výhodou je její relativně jednoduchá implementovatelnost. Algoritmus porovnávání změřených dat s modelem je zobrazen v příloze zdrojových kódů A.

■ 2.3.3 Určení vzdálenosti metodou korelace experimentálních dat s analyticky vytvořenou křivkou

Tato metoda výpočtu vzdálenosti je založena na teoretickém popisu koeficientu odrazu vzniklém odrazem od měřené překážky a znalosti koeficientu odrazu diskontinuity. Obecný vztah pro koeficient odrazu, jak je popsán v práci [8], je možno vyjádřit vztahem (8).

$$\Gamma(l) = \Gamma(0) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}2l} \quad (-) \quad (8)$$

kde $\Gamma(l)$ je koeficient odrazu ve vzdálenosti l od překážky, $\Gamma(0)$ je modul koeficientu odrazu a λ vlnová délka.

Výsledný koeficient odrazu Γ_{vys} , který je zjišťován při experimentálním měření se dá popsat podle vztahu (9).

$$\Gamma_{vys} = |\Gamma_d + \Gamma_o| \quad (-) \quad (9)$$

kde Γ_d je koeficient odrazu diskontinuity, ten je při umístění referenční roviny hned před diskontinuitu měřen přímo při experimentálním měření jejích parametrů. Γ_o je koeficient odrazu měřené překážky popsatelný podle (8), l je pak vzdálenost mezi bodem pro který se určuje koeficient a odraznou deskou.

Vztah (10) je pak lehkou úpravou vztahu (8) přímo použitelnou pro výpočet konkrétního Γ_o .

$$\Gamma_o = -|\Gamma_o|e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}2l_2} \quad (-) \quad (10)$$

Pro určení vzdálenosti je pak vhodné zvolit pole náhodných frekvenčních bodů (které ale budou pokrývat celé měřené pásmo). Ve vztahu (10) pak proměnné $|\Gamma_o|$ a l_2 iterovat ve stených frekvenčních bodech tak, aby bylo dosaženo co největší korelace mezi body vypočtenými a body získanými experimentálním měřením.

Modul $|\Gamma_o|$ je zde sice obecně závislý na frekvenci a vzdálenosti odrazné desky, jeho frekvenční závislost by ale pro účely zjištění vzdálenosti mělo být možné zanedbat.

Pro správnou funkci této metody by bylo vhodné vytvořit kalibrační křivku pomocí experimentálního měření. Tato křivka by pak měla být schopna korigovat chyby měření a zajistit vysokou přesnost vyhodnocení vzdálenosti.

Kapitola 3

Modelovaná struktura

Tato kapitola obsahuje požadované vlastnosti struktury a z toho vycházející její zkoumané typy. Na základě simulací zkoumaných typů struktur je zde popsán výběr jednotlivých částí s nejvhodnějšími parametry pro finální návrh senzoru. Pro představu jakým směrem se práce ubírala, jsou zde popsány i zkoumané ale dále nevyužité struktury.

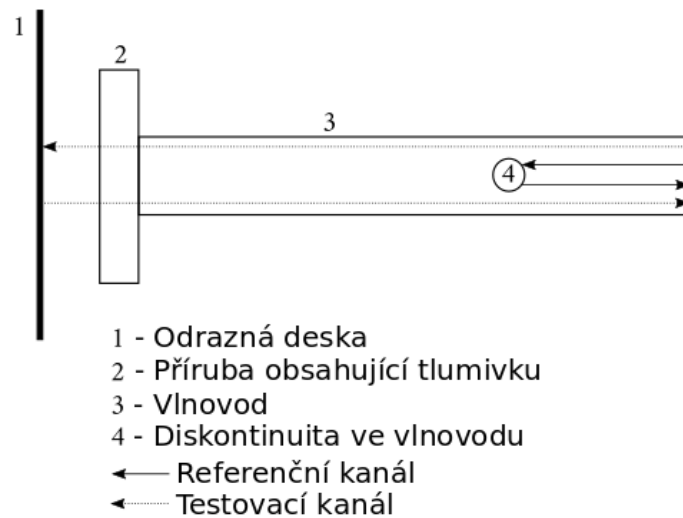
Všechny návrhy jednotlivých částí byly provedeny pomocí 3D simulátoru pole CST Studio Suite od společnosti Simulia. Návrh byl z největší části proveden ve studentské verzi CST, která je volně dostupná bez licence, ale omezena počtem buněk, pro které se simulace provádí.

Části struktur navržené v CST pak byly vyexportovány a dále s nimi bylo pracováno pomocí programu AWR Microwave Office od společnosti Cadence, jako s prvky mikrovlnného obvodu pro ověření vlastností celé struktury senzoru jako celku.

3.1 Požadované parametry struktury

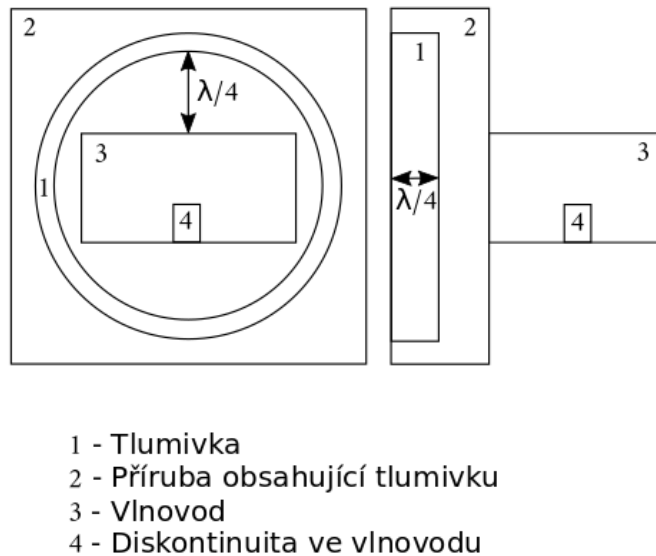
Základní požadavky na návrh vhodné struktury definuje již zadání diplomové práce. Požadavky jsou zde zaměřeny především na vlnovodné vedení typu R100 s vnitřními rozměry 22,86 mm a 10,16 mm. Takové vedení disponuje především velmi dobrými vlnovodnými vlastnostmi při zachování nízké pořizovací ceny. Typické pásmo využívané pro vlnovod R100 je 8,2 GHz až 12,4 GHz, s mezní frekvencí dominantního vidu 6,557 GHz [9]. Dalším požadavkem je použití otevřeného ústí vlnovodu obsahujícího tlumivku. Použití tlumivky je zde důležité především z hlediska vyzařovacích vlastností otevřeného ústí (podrobněji je rozdíl mezi ústím s tlumivkou a bez tlumivky popsán v sekci 3.2.1). Dále je nutné vytvořit diskontinuitu ve vlnovodu, která vytváří referenční kanál senzoru (interferometrické měření ve vlnovodu je popsáno v sekci 2.1.1). Výsledný požadavek je, aby struktura fungovala jako senzor vzdálenosti pro rozsah nejméně 0 - 15 mm.

Podoba požadované struktury je naznačena na obrázku 3.1.



Obrázek 3.1. Obecná podoba požadované struktury.

Další pohled na strukturu ze strany ústí vlnovodu je zobrazen na obr. 3.2. Zde je zobrazena také tlumivka a její hlavní parametry pro návrh. Parametry pro návrh vycházejí z tlumivky zobrazené v článku [10].



Obrázek 3.2. Obecná struktura ústí vlnovodu.

Podoba tlumivky a diskontinuity na obrázcích 3.1 a 3.2 je pouze ilustrativní, výběr konkrétní podoby je popsán v sekci 3.2.

3.2 Uvažované typy struktur

Pro vytvoření modelu bylo uvažováno několik typů struktur, které by mohly splňovat požadavky na výsledný senzor. Na základě simulací jednotlivých uvažovaných struktur byla pak vybrána ta nejvhodnější, která je dále popsána v sekci 3.2.6.

3.2.1 Srovnání struktury ústí vlnovodu s tlumivkou a bez tlumivky

Jedním z požadavků definovaným již v zadání práce je použití otevřeného ústí vlnovodu s přírubou obsahující tlumivku. Přítomnost tlumivky obecně umožnila zabývat se senzorem vzdálenosti na vlnovodném vedení s otevřeným ústím. Tlumivka zásadně zmenšila parazitní vyzařování (jinam než v ose vlnovodu) otevřeného ústí a způsobila, že se ještě v určité vzdálenosti od otevřeného ústí chová vlnění jako by bylo ve vlnovodu částečně odlišných rozměrů.

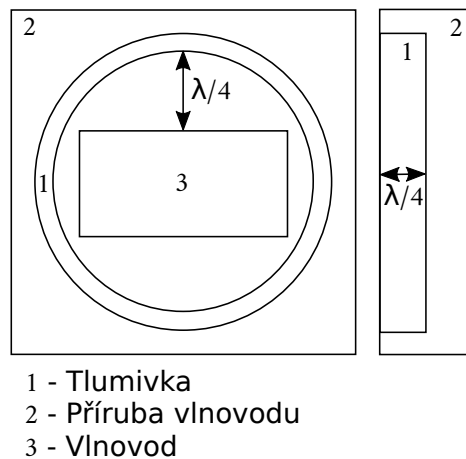
Problematikou využití otevřeného vlnovodu s tlumivkou pro měření vzdálenosti se zabývá již článek [1] a [2], tyto práce popisují chování otevřeného ústí s tlumivkou a odraznou deskou a předpokládají možnost využití takové sestavy pro interferometrické měření. Autoři se zde zmiňují o použitelnosti ústí tlumivky pro zlepšení vyzařovacích parametrů. Tlumivka v otevřeném ústí se ještě do vzdálenosti minimálně $\frac{\lambda}{2}$ chová jako by pokračoval dále jakýsi virtuální vlnovod jen lehce jiných parametrů. Je zde popsán vliv zvyšování vzdálenosti na zhoršování parametrů takového virtuálního vlnovodu. Práce [1] a [2] se využitím tlumivky zabývala v rozsahu 8 GHz až 12,4 GHz, takový rozsah se tedy zdá být vhodný i pro účely této Diplomové práce.

Tlumivka v přírubě vlnovodu

Tlumivka v přírubě vlnovodu se používá již několik desítek let pro účely spojení dvou přírub vlnovodů, kde by mohlo dojít ke špatné vodivosti vytvořeného spojení vlivem například nedokonalé výroby příruby nebo oxidace jejího povrchu. [10]

Při špatné vodivosti spojení obou přírub by mohlo vlivem vzniku lokálního vysokého napětí mezi částmi vedení dojít ke vzniku elektrického oblouku mezi přírubami. Tlumivku je zároveň možné použít například v případech, kdy je nutná elektrická izolace částí vlnovodu. [11]

Princip činnosti ústí tlumivky je v transformování zkratu do rovin širších stran vlnovodu. Transformace zkratu vzniká díky vhodné vzdálenosti středu delší strany vlnovodu od dna drážky tvořící tlumivku, která je zhruba $\frac{1}{2}\lambda$ (zobrazeno na obrázku 3.3). Funkce tlumivky je zachována i v případech, kdy je druhá příruba nahrazena například odraznou deskou a ústí je ponecháno otevřené. Drážka tvořící tlumivku vytváří na svém vstupu velmi vysokou impedanci, která velmi výrazně potlačuje proudy tekoucí drážkou. Tento jev brání vyzařování pole do postranních částí struktury. [1]

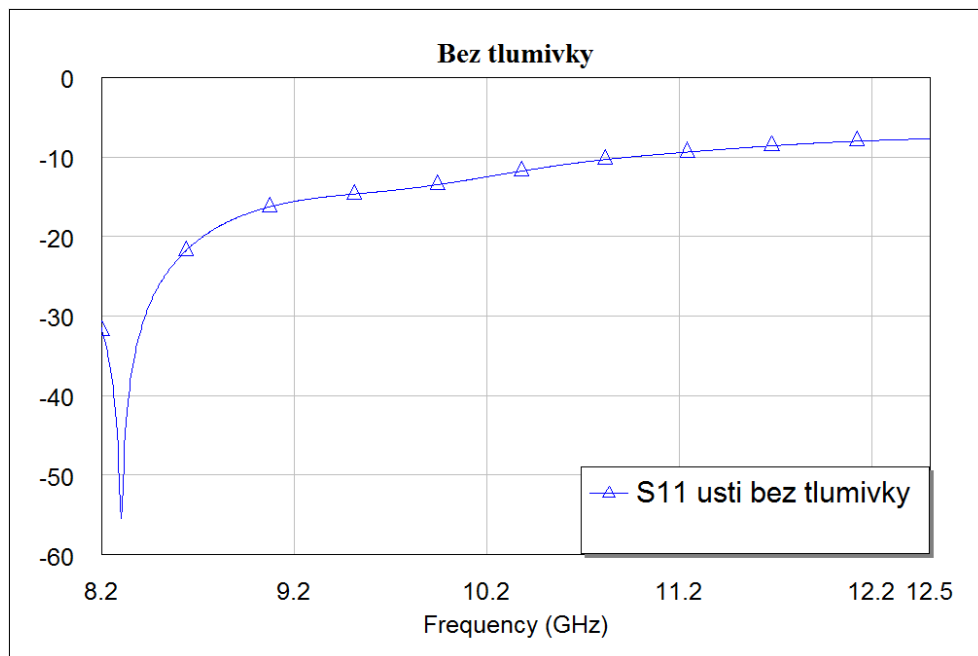


Obrázek 3.3. Obecná podoba tlumivky v přírubě vlnovodu.

Na obrázku 3.3 je zobrazena klasická cirkulární tlumivka v přírubě vlnovodu, tak jak ji zobrazují autoři v článku [10].

1. Bez tlumivky

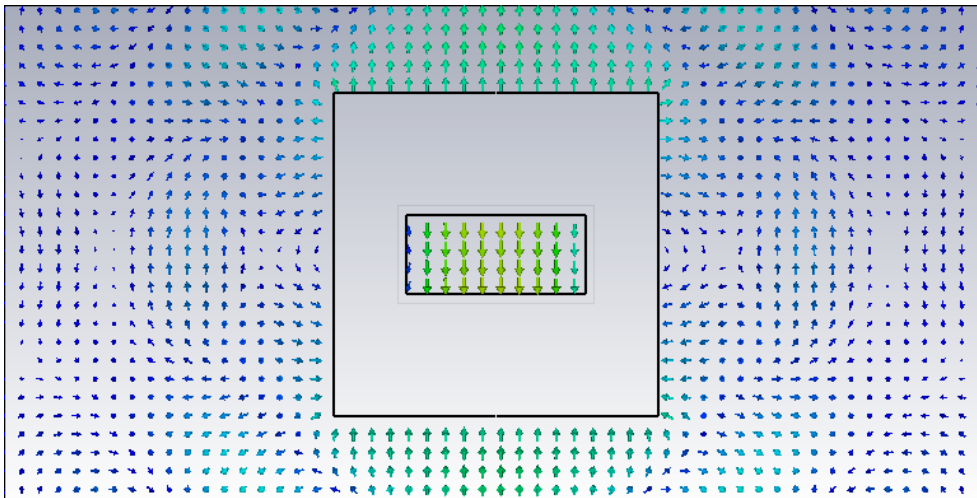
Na obrázku 3.4 je zobrazen S-parametr S_{11} pro případ testovacího kanálu bez tlumivky. Z průběhu je jasně znatelné, že oproti testovacímu kanálu s tlumivkou (jak je uvedeno dále) je zde signál podstatně více utlumen. Průběh je zobrazen pro vzdálenost odrazné desky 5 mm. Srovnání rozložení pole pro případ s tlumivkou i bez tlumivky a pro dvě různé vzdálenosti odrazné desky je zobrazeno v závěru sekce na obrázku 3.10.



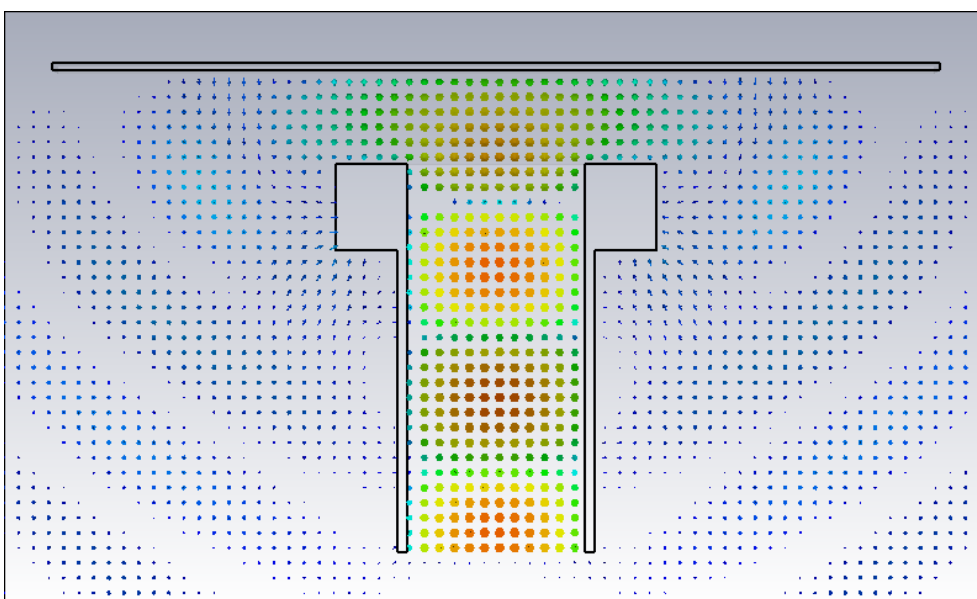
Obrázek 3.4. Parametr S_{11} pro ústí vlnovodu bez tlumivky, vzdálenost odrazné desky 5 mm.

Na obrázku 3.5 je zobrazeno rozložení elektrického pole v řezu ústím vlnovodu. Na obrázku 3.6 je pak stejná situace zobrazena v podélném řezu. Z rozložení elektrického

pole je znatelné, že má v okolí ústí vlnovodu nezanedbatelnou intenzitu. Poměrně velká část energie se tak vyzáří i do jiných směrů než je osa vlnovodu.



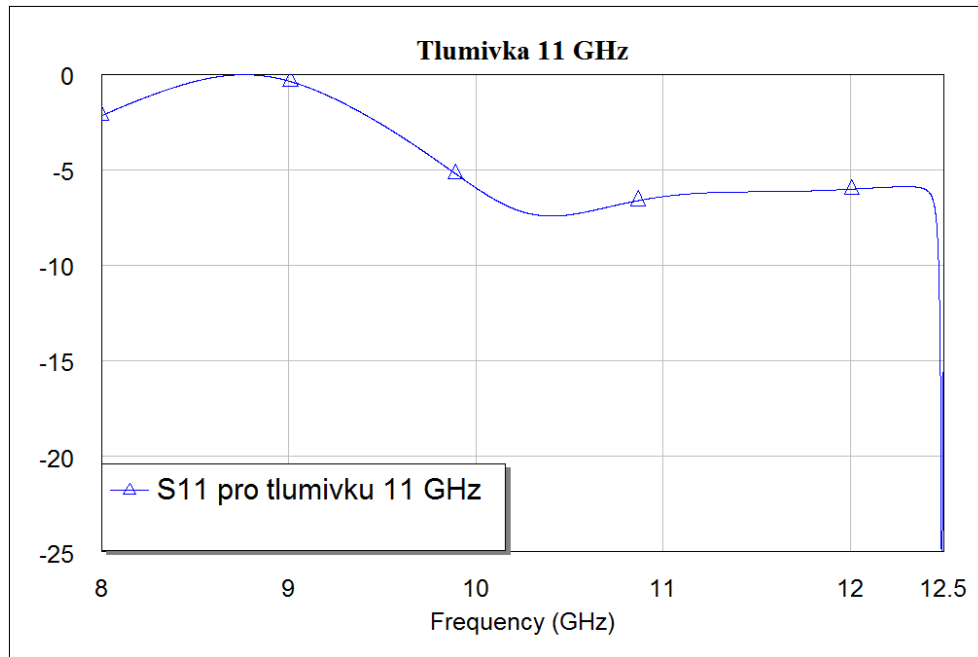
Obrázek 3.5. Rozložení elektrického pole pro ústí vlnovodu bez tlumivky, příčný řez v rovině ústí vlnovodu.



Obrázek 3.6. Rozložení elektrického pole pro ústí vlnovodu bez tlumivky, podélný řez vlnovodu.

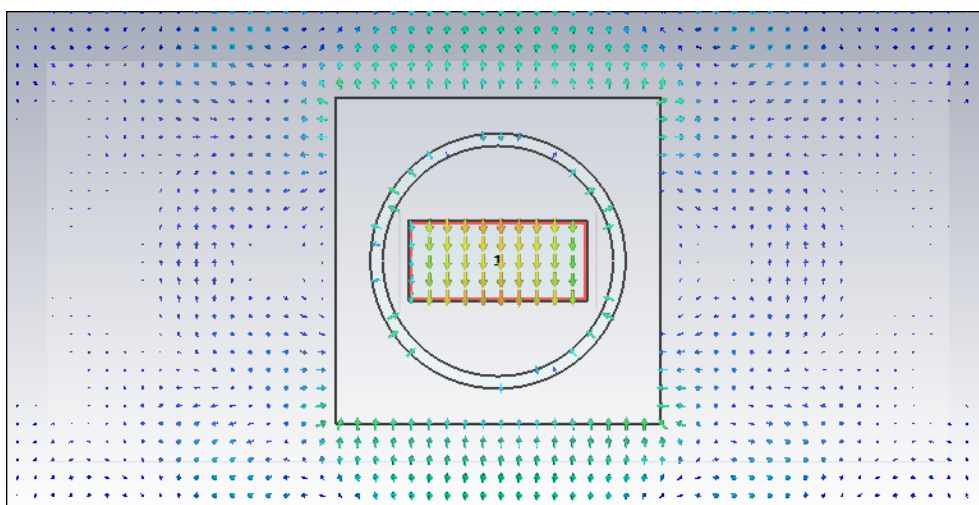
2. S tlumivkou

Na obrázku 3.7 je zobrazen S-parametr S_{11} pro případ testovacího kanálu s tlumivkou. Graf je zobrazen pro vzdálenost odrazné desky 5 mm. Z průběhu je znatelné, že oproti testovacímu kanálu bez tlumivky je zde signál utlumen podstatně méně. Obě situace (s tlumivkou i bez) jsou zobrazeny z hlediska rozložení pole pro dvě různé vzdálenosti odrazné desky v závěru sekce na obrázku 3.10.

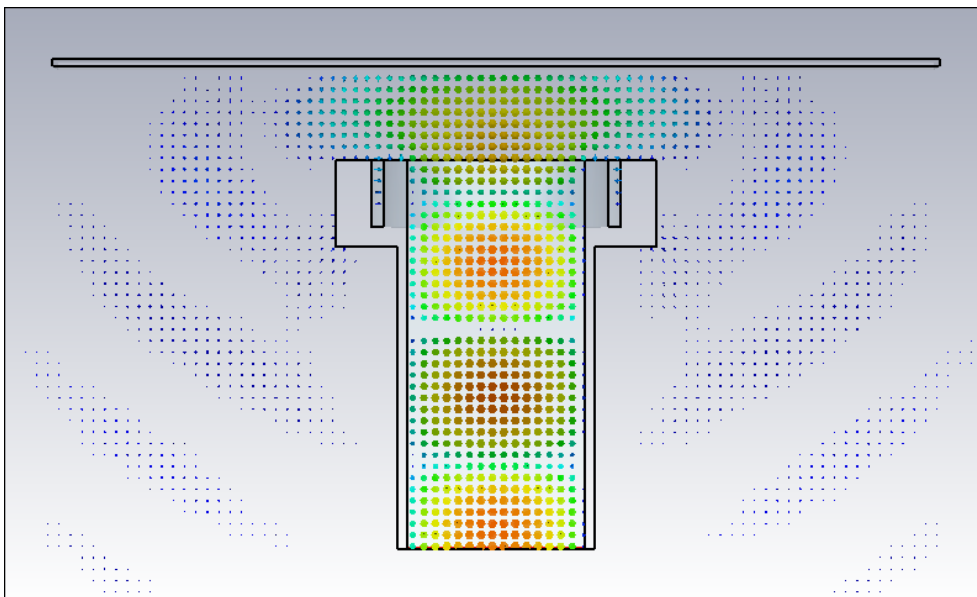


Obrázek 3.7. Parametr S_{11} pro ústí vlnovodu s tlumivkou navženou na 11 GHz, vzdálenost odrazné desky 5 mm.

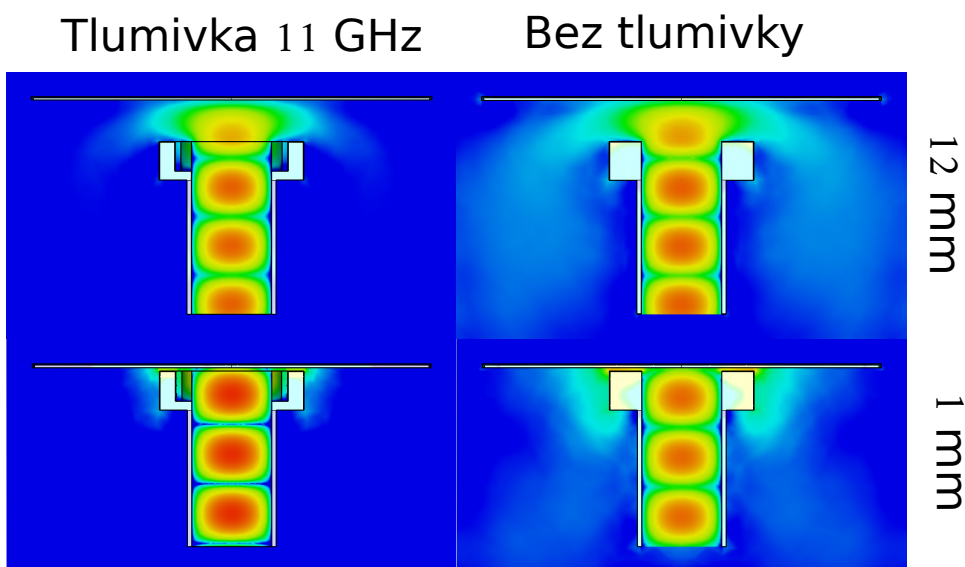
Na obrázku 3.8 je zobrazeno rozložení elektrického pole kolem ústí vlnovodu. Na obr. 3.9 je pak stejná situace zobrazena při pohledu na ústí z boku. Rozložení elektrického pole vypovídá o tom, že vlnovod s tlumivkou vyzařuje mimo osu vlnovodu podstatně méně, než vlnovod bez tlumivky.



Obrázek 3.8. Rozložení elektrického pole pro ústí vlnovodu s tlumivkou, příčný řez v rovině ústí vlnovodu.



Obrázek 3.9. Rozložení elektrického pole pro ústí vlnovodu s tlumivkou, podélný řez vlnovodu.



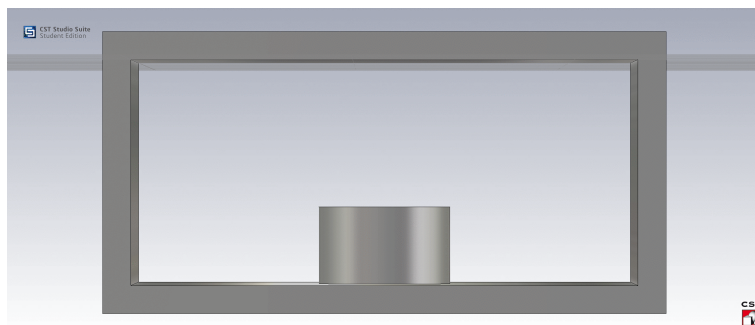
Obrázek 3.10. Rozložení elektrického pole pro vzdálenost odrazné desky 12 mm a 1 mm s tlumivkou a bez ní.

Ze zobrazených rozložení elektrického pole a především z průběhů na obrázcích 3.4 a 3.7 je jasné, že použití struktury bez tlumivky nepřichází pro vlnovodný senzor vzdálenosti téměř v úvahu. Struktura bez tlumivky má mnohem větší ztráty vlivem vyzařování do okolí než struktura s tlumivkou. Dále má pro tuto práci tedy smysl zabývat se pouze strukturou s tlumivkou.

■ 3.2.2 Struktura s válcovou diskontinuitou

Jak bylo již popsáno v sekci 2.2.1, skokovou změnou impedance vlnovodu lze v daném místě vytvořit diskontinuitu a tím zapříčinit odraz šířícího se vlnění. Tohoto efektu je využito při tvorbě diskontinuity pro vytvoření referenčního kanálu senzoru.

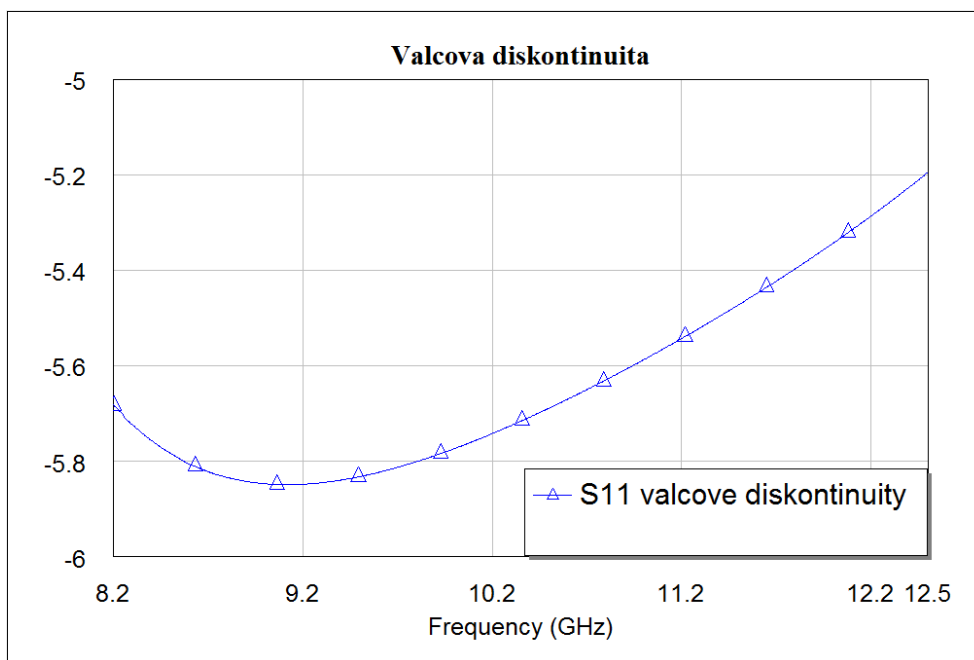
Jako první, především z důvodu snadné realizovatelnosti, byla uvažována struktura s válcovou diskontinuitou uprostřed delší strany vlnovodu. Příklad válcové diskontinuity ve vlnovodu je zobrazen na obrázku 3.11.



Obrázek 3.11. Možná podoba válcové diskontinuity uprostřed delší strany vlnovodu.

Jak již bylo zmíněno, motivací k použití takovéto diskontinuity by byla především její velmi snadná realizovatelnost. K jejímu vytvoření by stačilo do středu vlnovodu například našroubovat upravený šroubek, u kterého by pak šlo libovolně měnit jeho zasunutí a tím i koeficient odrazu diskontinuity. Válcová diskontinuita umístěná na delší straně vlnovodu má obvodově kapacitní charakter.

Frekvenční závislost koeficientu odrazu je zobrazena pro průměr válce 3 mm a jeho zasunutí 4 mm do středu vlnovodu na obrázku 3.12.



Obrázek 3.12. Frekvenční závislost koeficientu odrazu pro válcovou diskontinuitu.

Struktura obsahující válcovou diskontinuitu byla v průběhu tvorby senzoru dlouho považována za vhodnou. Frekvenční závislost koeficientu odrazu diskontinuity by měla mít ale pro správnou funkci senzoru co nejvíce podobný charakter jako frekvenční průběh koeficientu odrazu otevřeného ústí vlnovodu s tlumivkou. Příklad průběhu zobrazený na obrázku 3.12, který odpovídá průměru diskontinuity 3 mm, je nicméně charakterem výrazně odlišný od průběhů otevřeného ústí s tlumivkou naladěnou na 8 GHz i 11 GHz. Průběhy pro obě tlumivky jsou uvedeny dále v sekcích 3.2.4 a 3.2.5. Proto byla

hledána vhodnější struktura, která by lépe odpovídala charakteru frekvenční závislosti koeficientu odrazu otevřeného ústí s tlumivkou.

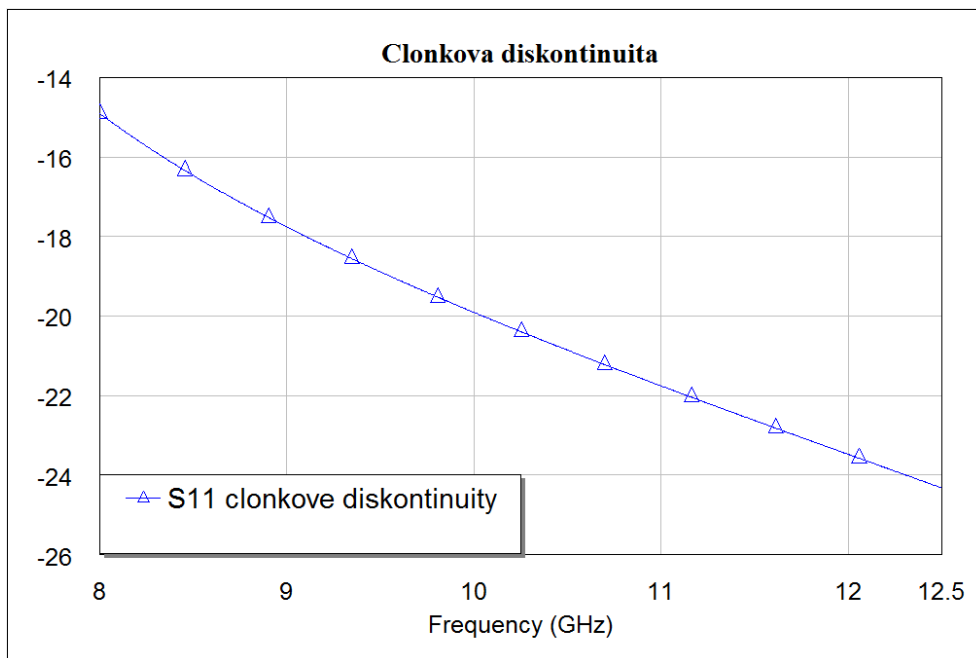
3.2.3 Struktura s clonkovou diskontinuitou

Dalším typem diskontinuity, který se jeví charakterem více vhodným pro konstrukci senzoru byl typ clonkové diskontinuity na kratších stranách vlnovodu. Příklad clonkové diskontinuity je zobrazen na obrázku 3.13. Nevýhodou tohoto typu diskontinuity však je nutnost vytvořit clonky pevně z tenkého plechu a vložit je mezi dvě příruby vlnovodu. Nelze tak libovolně měnit jejich koeficient odrazu a pro různé hodnoty je nutné vytvořit různě široké clonky z dobře vodivého plechu.



Obrázek 3.13. Možná podoba clonkové diskontinuity zužující z obou stran vlnovod.

Frekvenční závislost koeficientu odrazu pro clonky široké na obou stranách 3 mm je zobrazena na obrázku 3.14. Clonky zastíňující část vlnovodu od jeho kratších stran mají obvodově induktivní charakter.



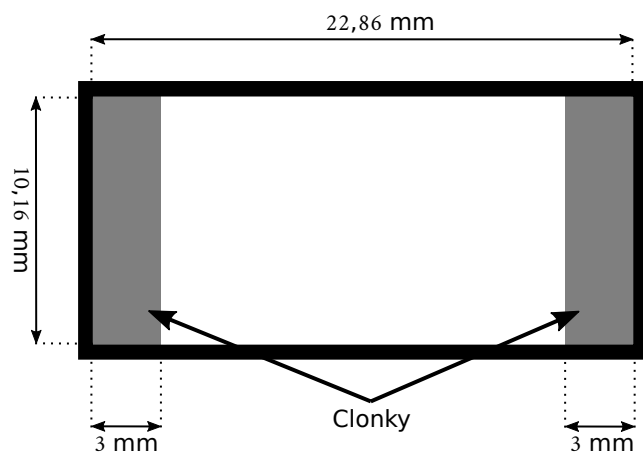
Obrázek 3.14. Frekvenční závislost koeficientu odrazu pro clonkovou diskontinuitu.

Clonková diskontinuita byla vybrána díky jejímu induktivnímu charakteru s předpokladem, že by mohla být vhodnější než válcová diskontinuita kapacitního charakteru (popsaná v sekci 3.2.2). Z porovnání frekvenčních průběhů koeficientu odrazu clonkové

diskontinuity (obrázek 3.14) s průběhy pro otevřené ústí s tlumivkou 8 GHz a 11 GHz (průběhy jsou uvedeny dále v sekcích 3.2.4 a 3.2.5) je zřejmé, že charakter průběhu clonkové diskontinuity je vhodnější pro konstrukci senzoru než charakter válcové diskontinuity. Dále bylo tedy pracováno jen s diskontinuitou ve tvaru clonek.

Šířka obou částí clonkové diskontinuity byla volena především s ohledem na co největší dynamiku výsledného měření. V průběhu návrhu bylo zjištěno, že je nutné v měřicí sestavě pro dosažení dostatečné dynamiky použít ještě atenuátor (dále je to popsáno v sekci zvolené struktury 3.2.6). Při návrhu šířky diskontinuity bylo nutné zároveň řešit velikost útlumu zařazeného atenuátoru. Pro většinu hodnot šířky clonek platilo, že se zmenšováním jejich šířek bylo nutné použít větší útlum atenuátoru (clonka odrazila menší část signálu a bylo nutné zmenšit i úroveň signálu šířícího se dál), ale docházelo ke zlepšení celkové dynamiky měření (pravděpodobně díky lepšímu potlačení multiodrazů, více v 3.2.6). Výsledná hodnota šířky clonek vycházela tedy z nalezení hodnoty, při jejímž zmenšení se již razantně nezlepšovala dynamika výsledných křivek a zároveň nebylo nutné vkládat příliš velký útlum.

Jako optimální byla tedy vybrána šířka obou částí clonky 3 mm a jako vhodný se pro takovou diskontinuitu jevil útlum 5,24 dB. Podoba s popsány rozměry clonkové diskontinuity je zobrazena na obrázku 3.15.



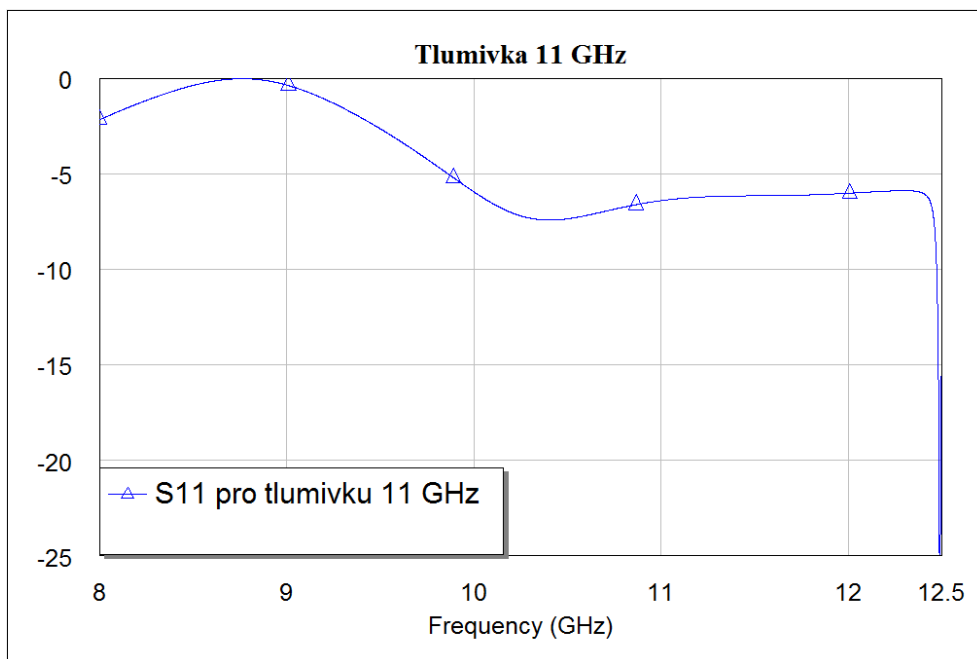
Obrázek 3.15. Navržená clonková diskontinuita ve vlnovodu R100 s rozměry.

■ 3.2.4 Tlumivka navržená pro 11 GHz

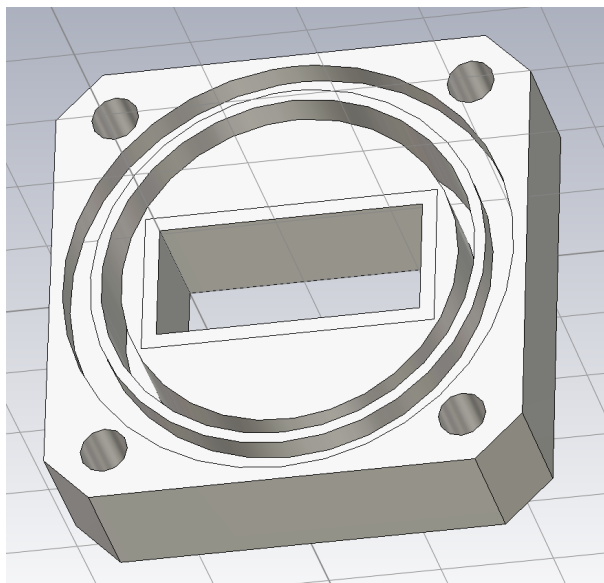
Jak bylo již rozebráno v sekci 3.2.1, dále má pro tuto práci význam zabývat se jen strukturou s tlumivkou. Jako ideální se zde jeví možnost využití standardně vyráběné a používané tlumivky v přírubě R100, která je navržená pro frekvenci 11 GHz, tedy relativně uprostřed pásma doporučeného pro vlnovod R100 (doporučený rozsah použitelných frekvencí je obvykle 8,2 GHz až 12,4 GHz [9]). Taková tlumivka je popsána například v katalogovém listu výrobce [12].

Závislost koeficientu odrazu na frekvenci pro otevřené ústí se standardně vyráběnou tlumivkou navrženou na 11 GHz a odraznou deskou vzdálenou 3 mm je zobrazena na obrázku 3.16.

Na obrázku 3.17 je zobrazena výsledná použitá podoba tlumivky, která byla navržená přesně podle dostupného prvku na Katedře elektromagnetického pole ČVUT.



Obrázek 3.16. Frekvenční závislost koeficientu odrazu pro otevřené ústí se standardně vyráběnou tlumivkou navrženou na 11 GHz.



Obrázek 3.17. Simulovaná podoba tlumivky, navržená přesně podle reálně dostupné tlumivky na Katedře elektromagnetického pole.

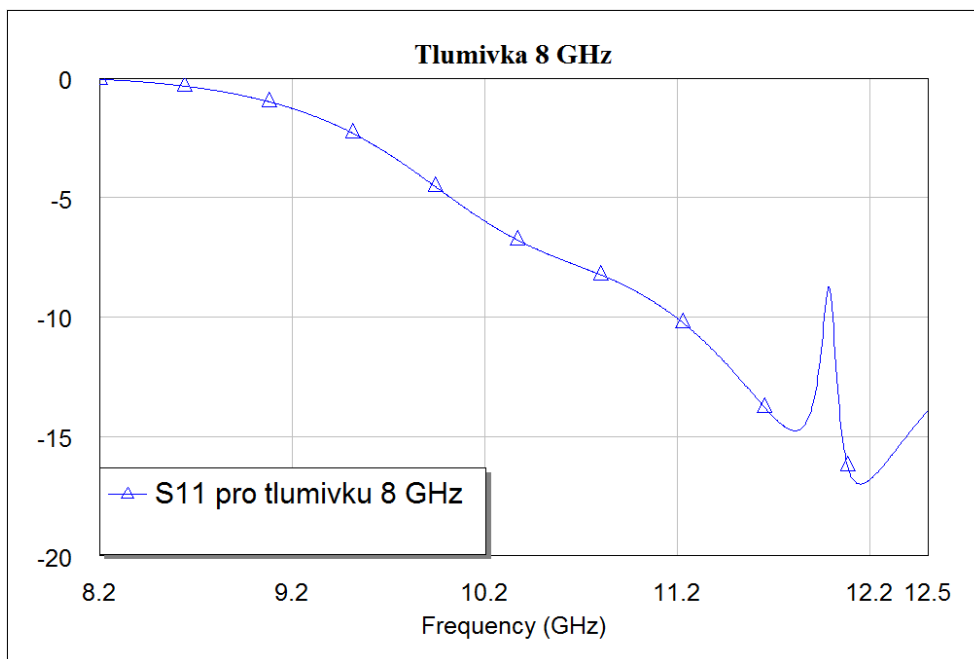
■ 3.2.5 Tlumivka navržená pro 8 GHz

Především pro úplnost byla zkoumána i struktura s jinou než běžně vyráběnou tlumivkou. Zkoumáno bylo několik struktur tlumivek v přírubě vlnovodu, navržených pro různé frekvence. V principu nevykazovala žádná ze zkoumaných tlumivek výrazně lepší parametry než vyráběná a tedy lehce dostupná tlumivka popsaná v 3.2.4.

Pro příklad jsou zde zobrazeny výsledky pro tlumivku navrženou na 8 GHz, tedy na okraji pásma určeného pro měření senzoru. Takováto tlumivka vykazovala podobný

charakter křivky jako tlumivka navržená pro 11 GHz, ale pro vyšší frekvence již nefungovala příliš dobře. Tlumivky navržené pro vyšší frekvence fungovaly pak hůře v nižších částech používaného pásma.

Závislost koeficientu odrazu na frekvenci pro otevřené ústí s tlumivkou navrženou na 11 GHz a odraznou deskou vzdálenou 3 mm je zobrazena na obrázku 3.18.



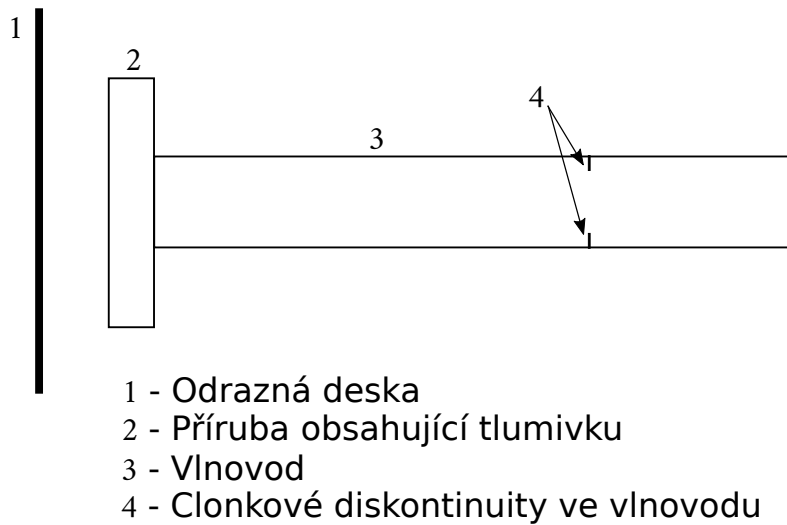
Obrázek 3.18. Frekvenční závislost koeficientu odrazu pro otevřené ústí s tlumivkou navrženou na 8 GHz.

Uvažovat o využití tlumivky navržené pro jinou frekvenci, než je tlumivka běžně vyráběná pro vlnovod R100, se tedy zdálo jako zbytečné. Takovou tlumivku by bylo nutné dále vyrobit, což by mimo jiné neprospělo ani jinak jednoduché konstrukci senzoru, který se tak dá (mimo diskontinuity) vyrobit snadno z běžně dostupných součástek.

3.2.6 Zvolená struktura senzoru

Tato sekce obsahuje shrnutí jednotlivých zvolených částí struktury ze sekcí 3.2.1 až 3.2.5. Jsou zde také zobrazeny výsledky simulací celého modelu senzoru.

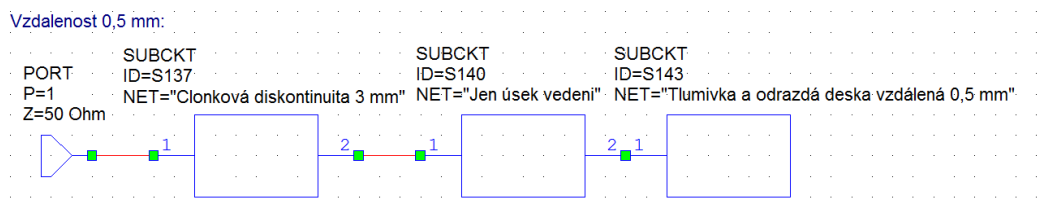
Jako nejvhodnější byla zvolena struktura s clonkovou diskontinuitou a běžně vyráběnou tlumivkou v přírubě vlnovodu navrženou na 11 GHz. Podoba zvolené struktury je zobrazena na obrázku 3.19.



Obrázek 3.19. Podoba zvolené struktury senzoru.

V programu CST byla zvolená struktura rozdělena na několik částí, které byly simulovány zvlášť. Důvodem rozdělení bylo jednak, že studentská licence programu CST neumožňovala dost velký počet simulačních bodů pro přesný výpočet celého modelu struktury a dále, že při vytváření simulací pro různé vzdálenosti odrazné desky by každá dílčí simulace zbytečně znovu počítala i části, kterých se změna nedotkla. Model byl tedy rozdělen na část obsahující odraznou desku a tlumivku v přírubě vlnovodu (v obrázku 3.19 čísla 1 a 2), dále pouze úsek vedení, který odpovídal reálně dostupnému úseku vedení s tlumivkou (zmněn dále v sekci týkající se měření 4.2, na obrázku 3.19 pod číslem 3) a část obsahující pouze clonkovou diskontinuitu s minimálním úsekem vedení nutným pro správnou funkci simulace (na obrázku 3.19 číslo 4).

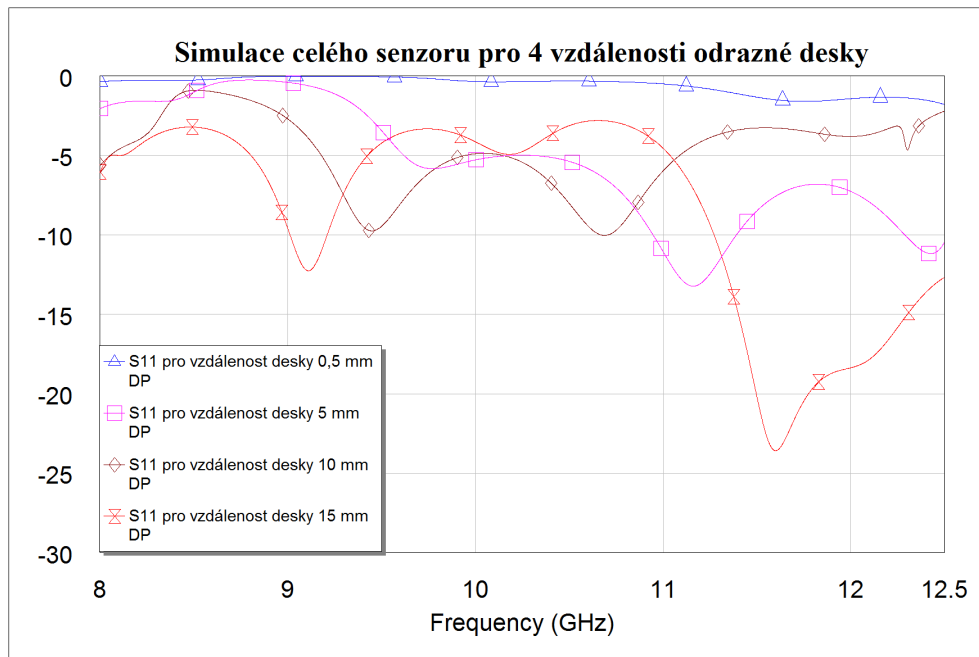
Všechny zvlášť modelované úseky byly pak spojeny pro výslednou simulaci v programu AWR. Schéma zapojení jednotlivých úseků dohromady je zobrazeno na obrázku 3.20.



Obrázek 3.20. Schéma spojení jednotlivých modelovaných úseků do sebe pro celkovou simulaci senzoru.

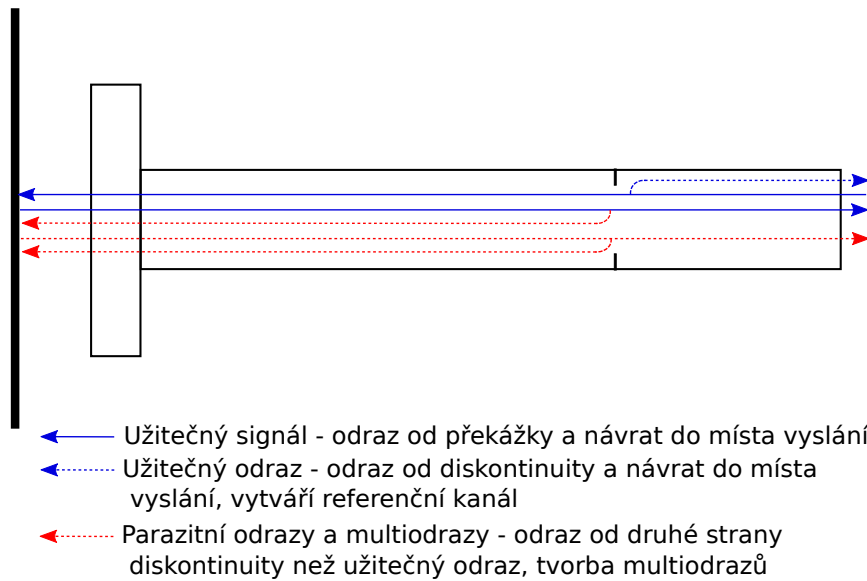
Průběh 3.21 je výsledkem z hlediska portu 1 ve schématu na obrázku 3.20. Ze zobrazeného průběhu by se dalo jen těžko odhadovat, že by se mělo jednat o výsledek interferometrického měření. Interferenční minima a maxima se zde naprosto ztrácí, pro měření by tedy takový výsledek nebyl absolutně použitelný. Deformace křivek výsledku je způsobena vlivem dalších odrazů přítomných ve struktuře senzoru. Tyto odrazy vznikají mezi odraznou deskou a diskontinuitou, kde se signál i mnohokrát odrazí (multi-odrazy). Vzniká tak mnoho dalších cest šíření s různými délkami a tedy s různými fázovými posuvy signálu, ty pak deformují výslednou křivku. Potlačení multiodrazů

je možné provést přidáním útlumového prvku do struktury senzoru nebo konstruovat diskontinuitu tak, aby z jedné strany podstatně méně odrazela vlnění.



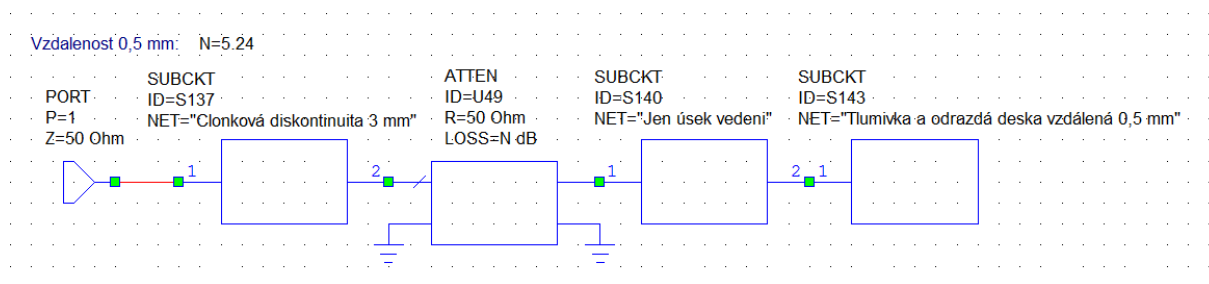
Obrázek 3.21. Výsledný průběh pro zapojení bez atenuátoru, vychází ze schématu 3.20.

Základní struktura, jak je zapojena ve schématu na obrázku 3.20, nebyla tedy pro simulace přímo použita. Pro lepší výsledné parametry byl do řetězce zapojen ještě atenuátor. Atenuátor zapojený mezi clonkovou diskontinuitou a zbytkem senzoru s otevřeným ústím vlnovodu a odraznou deskou má zásadní vliv na dynamiku výsledného měření. Signál vracející se po odrazu od překážky k diskontinuitě z druhé strany se na ní znovu odrazí a vytváří tak vícenásobné odrazy, které mají negativní vliv na výsledky měření. Přidáním atenuátoru do cesty se tyto vícenásobné odrazy po každém odrazu atenuátorem utlumí a jejich vliv je tak více potlačen. Tvorba multiodrazů ve vlnovodu s diskontinuitou je ilustrována na obrázku 3.22.

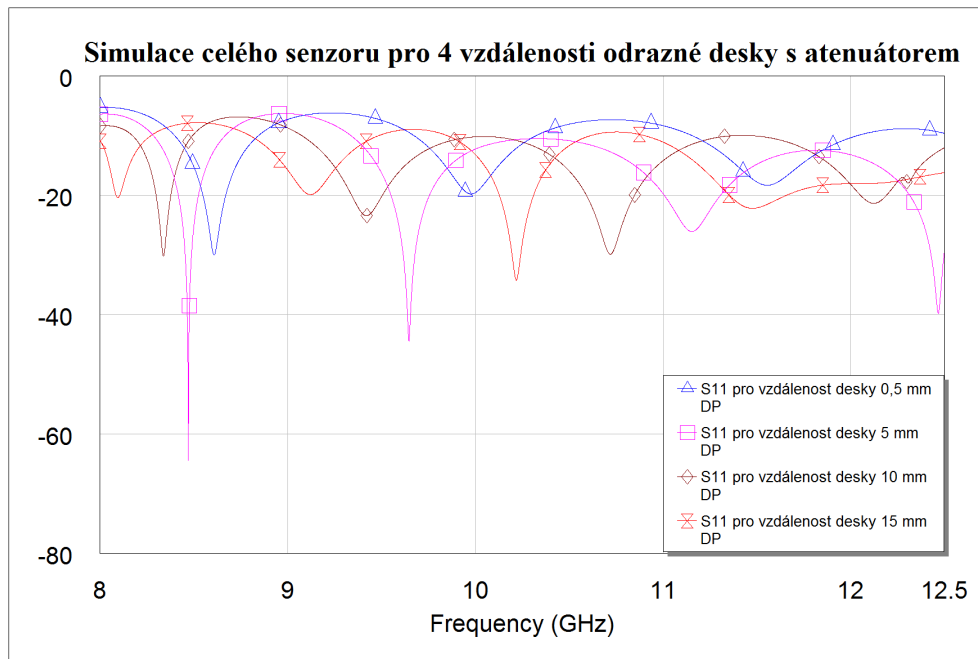


Obrázek 3.22. Vznik užitečných a neužitečných odrazů ve vlnovodu s diskontinuitou a odraznou deskou.

Schéma zapojení jednotlivých úseků dohromady včetně atenuátoru potlačujícího parazitní multiodrazy je zobrazeno na obrázku 3.23. Atenuátor je zde dokonalý obvodový prvek, nevznikají jeho vlivem tedy žádné další odrazy. Útlum je nastaven na 5,24 dB.



Obrázek 3.23. Schéma spojení jednotlivých modelovaných úseků do sebe pro celkovou simulaci senzoru, včetně zapojeného atenuátoru nastaveného na 5,24 dB.



Obrázek 3.24. Výsledný průběh pro zapojení s atenuátorem, vychází ze schématu 3.23.

Z průběhů 3.21 (bez atenuátoru) a 3.24 (s atenuátorem) je jasně vidět, že atenuátor zásadně vylepšil dynamiku výsledné křivky. Větší dynamika je zde pravděpodobně způsobena kromě potlačení odrazů také částečným vyrovnáním amplitud signálů šířících se referenčním a testovacím kanálem. Zvláště pro vzdálenost odrazné desky 0,5 mm byla nejspíše amplituda signálu odraženého od desky příliš vysoká.

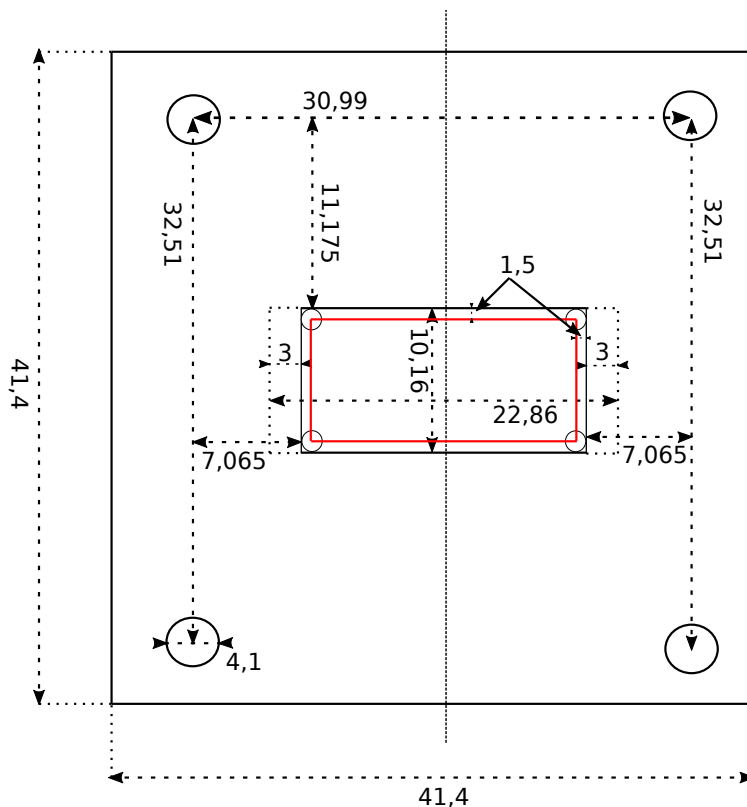
Kapitola 4

Realizace vlnovodného senzoru a jeho měření

Po vybrání vhodné struktury pro vytvoření senzoru (sekce 3.19) a dosažení dobrých výsledků simulací, bylo nutné fyzicky vyrobit navrženou diskontinuitu, sestavit celý vlnovodný senzor a ověřit jeho parametry experimentálním měřením.

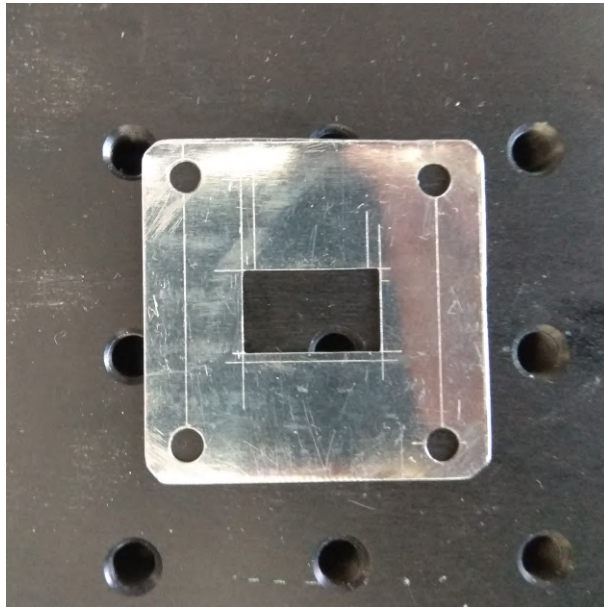
4.1 Realizace diskontinuity pro vlnovodný senzor

Jako první byla realizována clonková diskontinuita podle parametrů navržených v sekci 3.2.3, kde je návrh podoby také zobrazen. V principu jde pouze o zúžení vlnovodu zkrácením jeho delších stran z každé strany o 3 mm. Pro realizaci byl vybrán pocínovaný plech s tloušťkou 0,5 mm, který by měl být dobře vodivý. Diskontinuitu bylo nutné realizovat tak, aby se dala snadno vložit do vlnovodného vedení. Pro tyto účely se zdálo nejvhodnější realizovat clonkovou diskontinuitu tak, aby se dala vložit mezi příruby dvou úseků vlnovodného vedení a spojit celou strukturu šrouby. Nákres s rozměry realizované clonkové diskontinuity (v milimetrech) je zobrazen na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1. Nákres a rozměry (v mm) realizované clonkové diskontinuity.

Podoba clonkové diskontinuity již realizované z pocínovaného plechu je zobrazena na obrázku 4.2. Clonka byla rozměřena Prof. Hoffmannem pomocí nádrhu a průměrné desky s přesností setiny milimetru. Vyrobená byla s pomocí stojanové vrtačky a malých pilníků různé hrubosti s přesností kolem desetiny milimetru. Drobné nepřesnosti v realizaci diskontinuity by neměly mít vliv na výslednou funkci senzoru. Drobnou změnu rozměrů clonek by mělo být možné snadno doladit změnou hodnoty útlumu atenuátoru.



Obrázek 4.2. Realizovaná clonková diskontinuita.

4.2 Experimentální měření

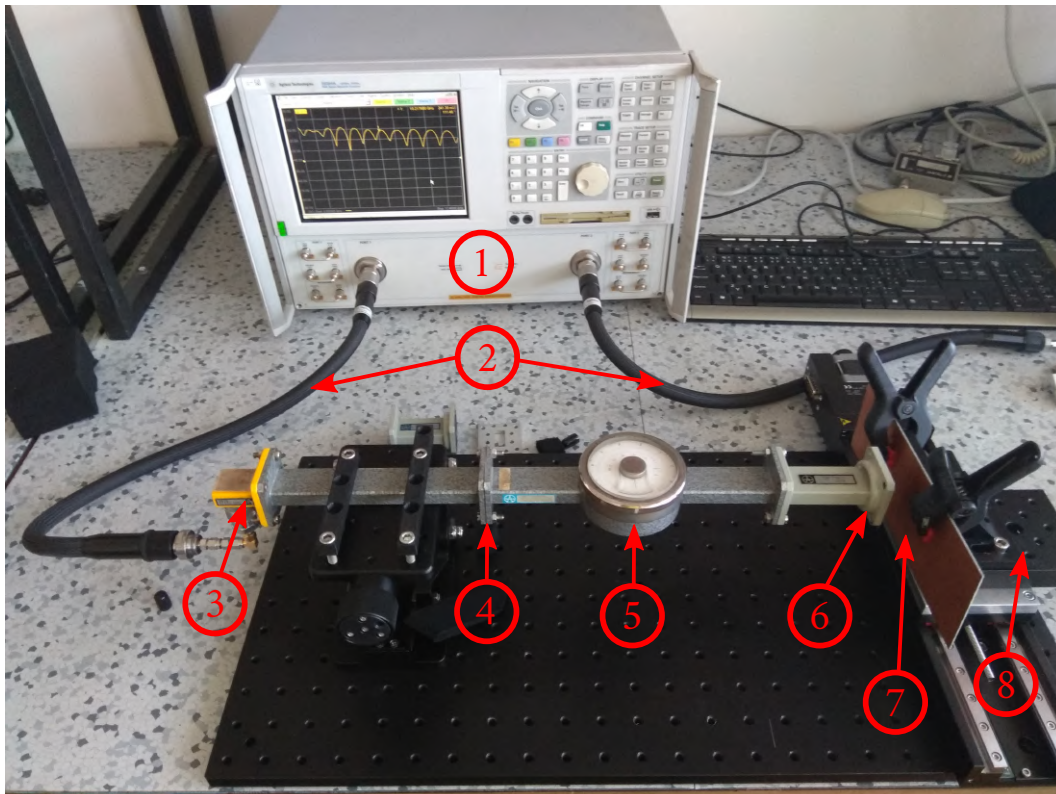
Pro experimentální měření vlnovodného senzoru vzdálenosti bylo realizováno několik měřicích sestav. Postupnou eliminací nežádoucích vlivů některých prvků vlnovodné sestavy byl nakonec realizován finální senzor. Ten byl změřen a data použita pro následné zpracování.

Měření bylo provedeno v laboratoři na Katedře elektromagnetického pole ČVUT, s použitím následujících komponent:

1. Vektorový analyzátor *Agilent Technologies E8364A*.
2. 2x Koaxiální kabely *Agilent* (pro měření použit jen jeden).
3. 2x Přechodka z koaxiálního vedení na vlnovodné vedení typu R100.
4. Clonková diskontinuita.
5. Kalibrovaný vlnovodný atenuátor dlouhý 200 mm.
6. Vlnovodné vedení R100 s přírubou obsahující tlumivku dlouhé 70 mm.
7. Odrazná vodivá deska.
8. Stolek s mikroposuvem 0 - 20 mm.
9. Další komponenty a pomůcky: Úsek vlnovodného vedení R100, stolek pro uchycení sestavy v určité výšce nad měřicím stolem, plastové úchyty, plastové držáky (kleště),

šroubky pro uchycení a smontování vlnovodné sestavy, útlumový materiál, měřidla délky.

10. Kalibrační set pro kalibraci metodou TRL.



Obrázek 4.3. Finální uspořádání měřicí sestavy.

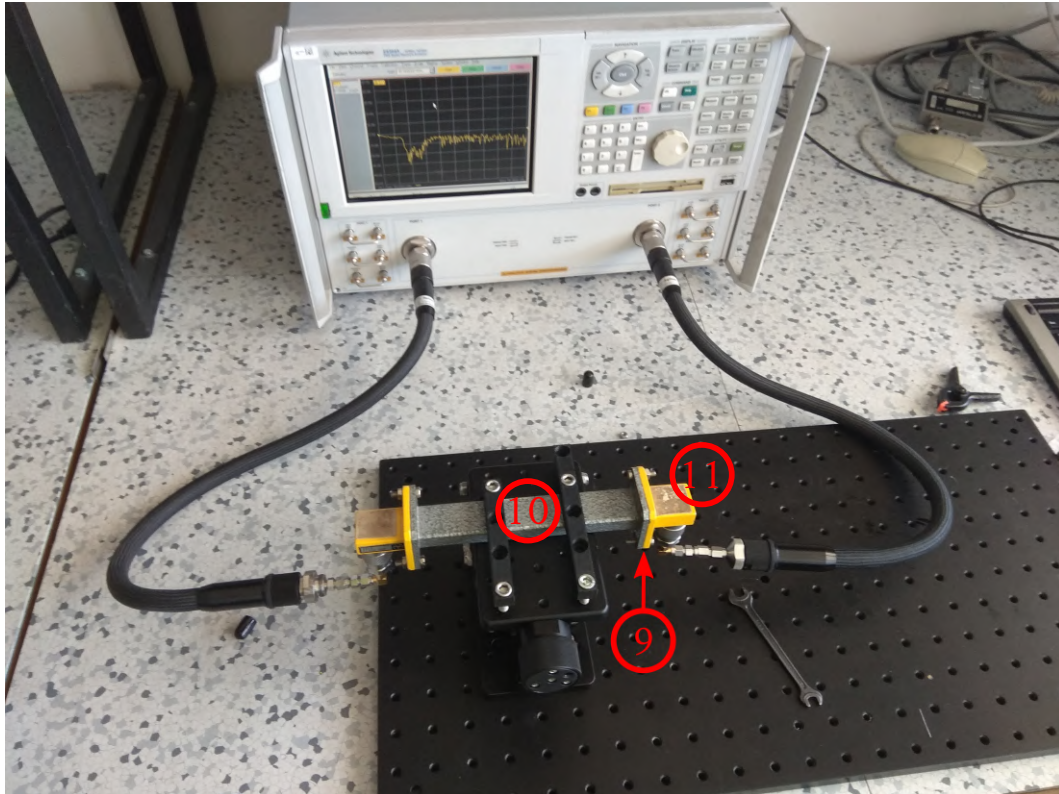
Celá finální sestava použitá pro měření je zobrazena na obrázku 4.3, kde je zobrazen vektorový analyzátor (1), koaxiální vedení pro připojení senzoru (2), přechodka mezi koaxiálním vedením a vlnovodem R100 (3), clonková diskontinuita vložená mezi příruby dvou vlnovodů (4), atenuátor s nastavitelným útlumem (5), úsek vlnovodu s tlumivkou v jedné přírubě (6), odrazná deska simulující překážku (7) a mikroposuvný stolec pro pohyb s odraznou deskou (8).

Mezi přechodkou z koaxiálního na vlnovodné vedením (3) a místem kde je zařazena diskontinuita (4) je zařazen úsek vlnovodu, který má význam jen pro snadné uchycení celé sestavy na měřicím stolku v dostatečné výšce nad stolem, vliv tohoto úseku byl potlačen kalibrací.

4.2.1 Kalibrace vektorového analyzátoru

Kalibrace vektorového analyzátoru byla pro účely měření provedena metodou TRL. Kalibrace byla pro kalibrační set uložena v paměti vektorového analyzátoru a definována pro frekvenční rozsah 7 GHz až 12,4 GHz. Kalibrováno bylo v rovině přímo před vloženou diskontinuitou (na obrázku 4.3 tedy v podstatě v bodě (4)). Část kalibrace je zobrazena na obrázku 4.4, kde je kalibrováno přímé spojení obou vedení (rovina kalibrace zobrazena jako bod (9)), dále je pak kalibrována zkratem zakončená část (10) a zkratem zakončená část (11), poslední částí kalibrace je vložení úseku vedení z kalibračního setu mezi částí (10) a (11).

Samotné měření bylo prováděno v rozsahu 8 GHz až 12,4 GHz (tento rozsah se zdál být vhodný pro využití vlnovodné tlumivky, zmíněno v 3.2.1, dále odpovídal rozsahu frekvencí použitelných pro vlnovor R100, zmíněno v 3.1).

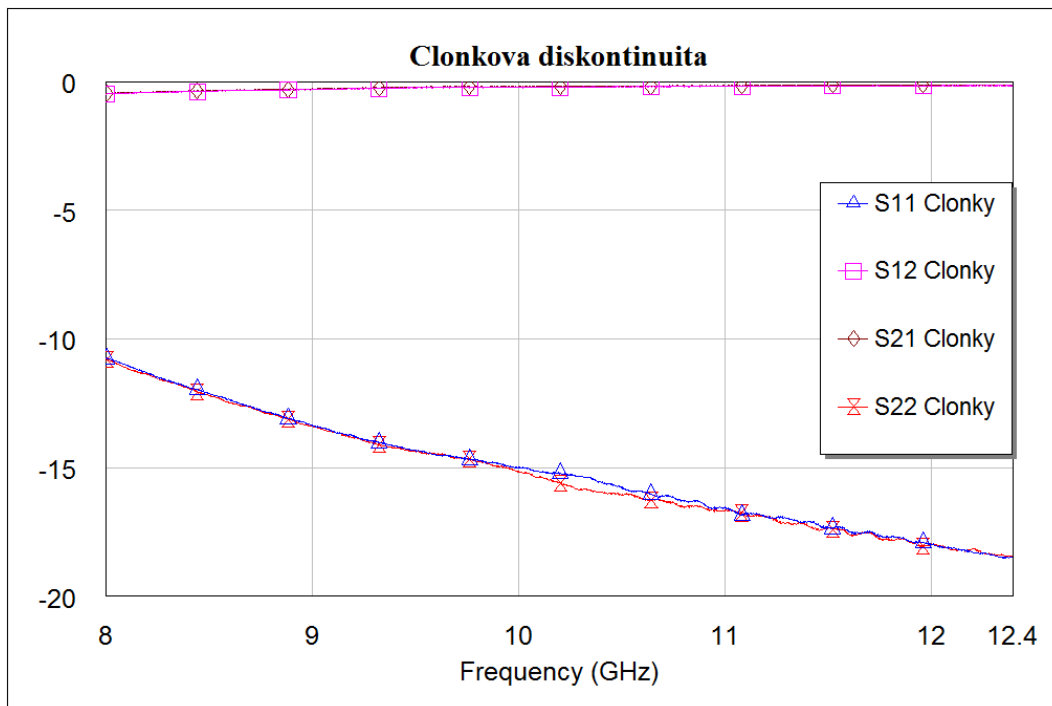


Obrázek 4.4. Kalibrace vektorového analyzátoru.

■ 4.2.2 Měření clonkové diskontinuity

První důležité měření bylo pro ověření vlastností realizované clonkové diskontinuity. Clonka byla vložena mezi příruby částí vedení zobrazené na obrázku 4.4 jako (10) a (11). Změřené S-parametry jsou zobrazeny na obrázku 4.5.

Z porovnání průběhu koeficientu odrazu simulované clonkové diskontinuity 3.14 a zde zobrazeného reálně změřeného průběhu 4.5 (porovnávaný parametr je zde především S_{11}) je zřejmé, že realizovaná diskontinuita se chová skutečně tak, jak byla navržena simulačními nástroji v sekci 3.2.3.



Obrázek 4.5. Experimentálně změřené S-parametry realizované clonkové diskontinuity.

4.2.3 Použití atenuátoru z útlumového materiálu

Jak se ukázalo při návrhu struktury pro vlnovodný senzor (3.2.3, 3.2.6), bylo pro co největší dynamiku výsledných křivek vhodné použít v měřicí sestavě atenuátor. Atenuátor lze ve vlnovodném vedení realizovat více způsoby. Jako nejjednodušší způsob, při kterém se zároveň do měřicí sestavy nemusí vložit žádný další úsek vedení, se zdálo být vložení útlumového materiálu přímo do použitého vlnovodu.

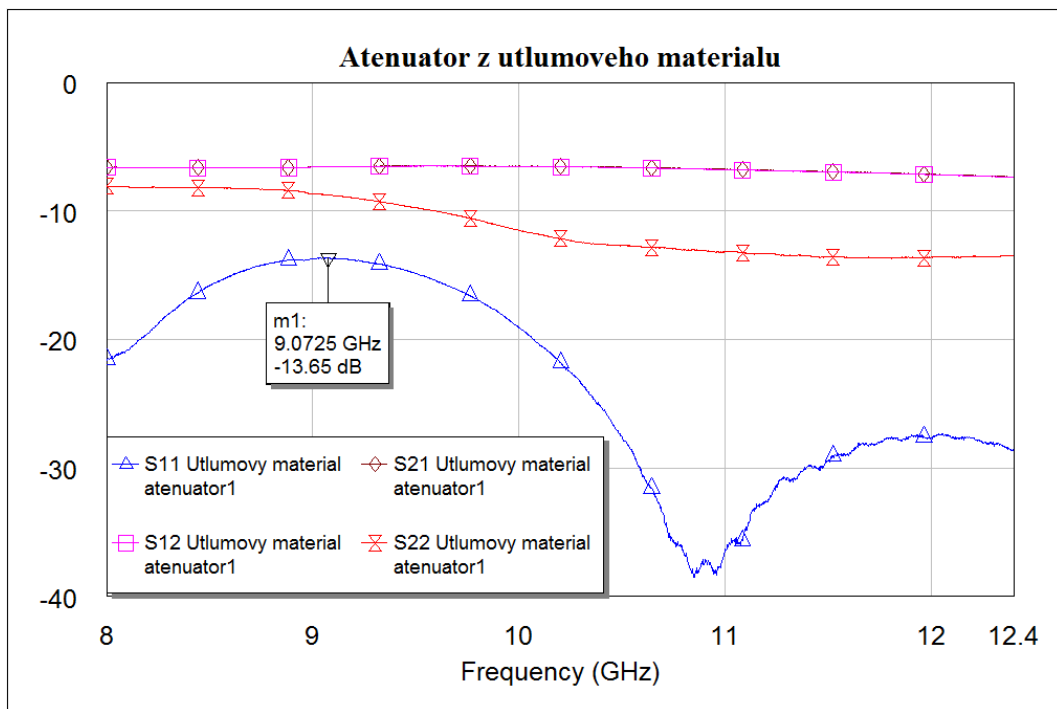
Realizace atenuátoru vložení útlumového materiálu do vlnovodu je zobrazena na obrázku 4.6. Útlumový materiál je vložen přímo před otevřené ústí úseku vlnovodu zakončené tlumivkou.

Použití útlumového materiálu jako atenuátoru se ale při zapojení do měřicí sestavy příliš neosvědčilo. Výsledné interferenční křivky, které měly sloužit pro měření vzdálenosti vykazovaly neočekávaný charakter a bylo zřejmé, že někde v měřicí struktuře dochází k parazitním odrazům. Jeden z experimentálně změřených výsledků s použitím atenuátoru z útlumového materiálu je zobrazen na obrázku 4.8, kde je z nepravidelnosti interferenčních minim znatelná přítomnost dalšího nezanedbatelného signálu. Průběh 4.8 je zobrazen pro případ vzdálenosti odrazné desky 18,5 mm. Tato vzdálenost je sice již relativně velká, v průběhu je zde ale dobře vidět nepravidelný charakter, který se projevoval i u nižších vzdáleností. Po eliminaci možných vlivů okolí mezi otevřeným ústím vlnovodu a odraznou deskou zbývalo jako jediné pravděpodobné vysvětlení špatné přizpůsobení realizovaného atenuátoru.

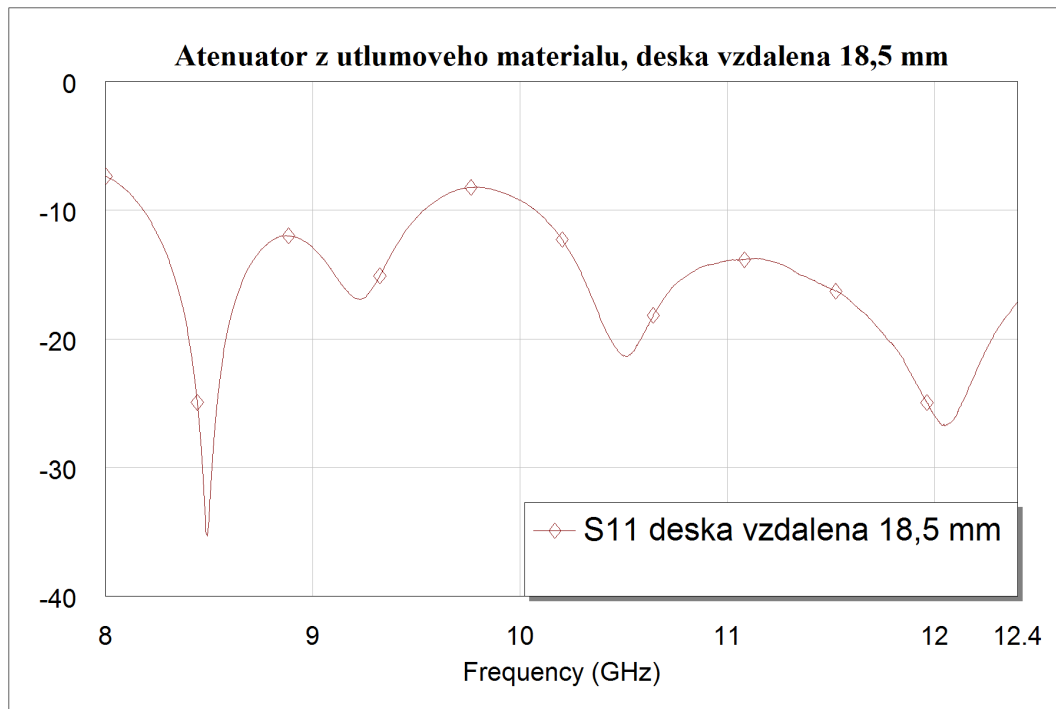
Atenuátor byl tedy samostatně změřen a bylo provedeno několik pokusů o lepší přizpůsobení. Pomocí různých tvarů a míst, do kterých byl ve vlnovodu útlumový materiál vložen, bylo sice dosaženo požadovaného útlumu procházejícího vlnění, ale odraz od atenuátoru byl dále příliš vysoký. Nejlepší dosažené parametry atenuátoru z útlumového materiálu jsou zobrazeny v průběhu na obrázku 4.7. Křivka odrazů od atenuátoru (parametr S_{11}) je v podstatné části křivky dokonce nad hodnotou -20 dB (v maximu je umístěn marker).



Obrázek 4.6. Atenuátor ve vlnovodu realizovaný útlumovým materiálem.



Obrázek 4.7. S-parametry atenuátoru realizovaného z útlumového materiálu.



Obrázek 4.8. Výsledek měření s atenuátorem z útlumového materiálu a odraznou deskou vzdálenou 18,5 mm.

Z průběhu zobrazujícího parametry atenuátoru z útlumového materiálu 4.7 a příkladu výsledné křivky s použitím tohoto atenuátoru 4.8 je jasné, že je nutné pro správnou funkci senzoru najít vhodnější atenuátor s lepším přizpůsobením. Efekt špatně přizpůsobeného atenuátoru se začne v měření projevovat především se zvětšující se vzdáleností odrazné desky, kdy klesá amplituda signálu odraženého od měřené odrazné plochy a přibližuje se tak amplitudě parazitních odrazů na nepřizpůsobeném atenuátoru.

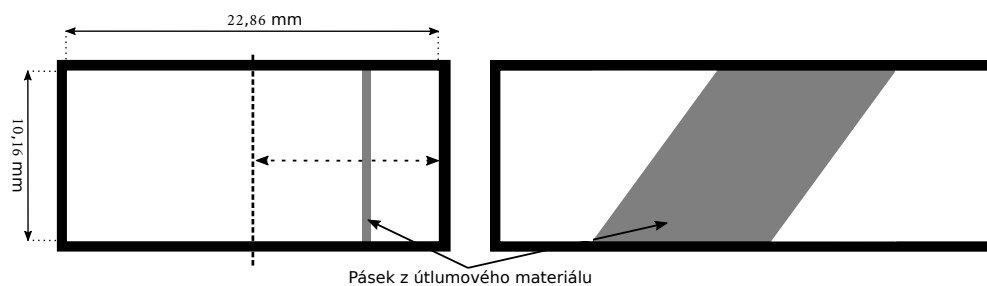
V sekci 4.2.4 je popsán a měřen atenuátor s lepším přizpůsobením, který by měl být pro účely senzoru lépe použitelný.

4.2.4 Použití proměnného atenuátoru

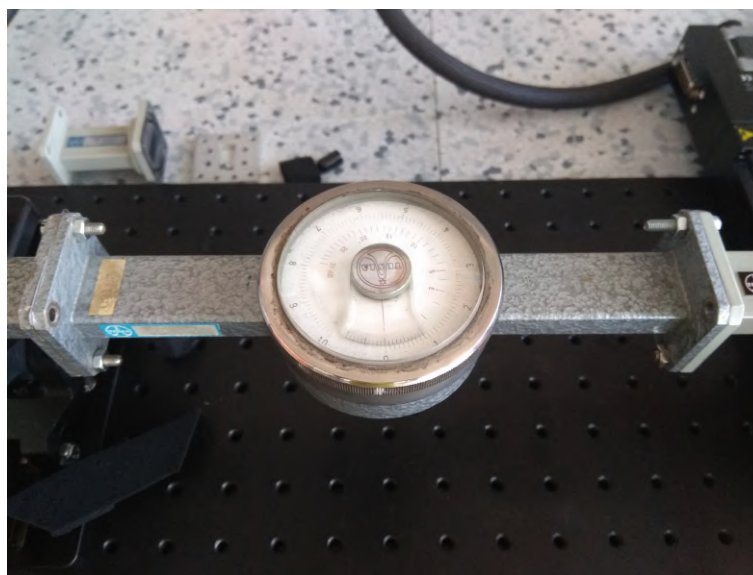
Jako vhodnější atenuátor pro použití ve struktuře senzoru se jevil proměnný atenuátor realizovaný na vlnovodném vedení s kalibrovanou stupnicí. Atenuátor ve 200 mm dlouhém úseku vedení, zapojený mezi dalšími vedeními je zobrazen na obrázku 4.10.

Tento atenuátor je konstruován pomocí vloženého tenkého pásku ze ztrátového materiálu do vlnovodu. Vložený materiál je orientován tak, aby byla jeho delší strana v ose šíření signálu a obdélníkový průřez vlnovodu nebyl prvkem příliš zakrýván. Ztrátový pásek je pak u proměnného atenuátoru možné posouvat po delší straně vlnovodu od jejího začátku (od menší stěny vlnovodu) do jejího středu. Pásek je tak možné posouvat od místa s minimem intenzity elektrického pole do místa, kde je intenzita maximální a realizovat tak různou hodnotu útlumu. [13] Tvar pásku je navržen tak, aby byl co nejlépe přizpůsoben a způsobil ve vlnovodném vedení co nejmenší odraz signálu.

Na obrázku 4.9 je zobrazen náčrt principiální podoby takového atenuátoru.



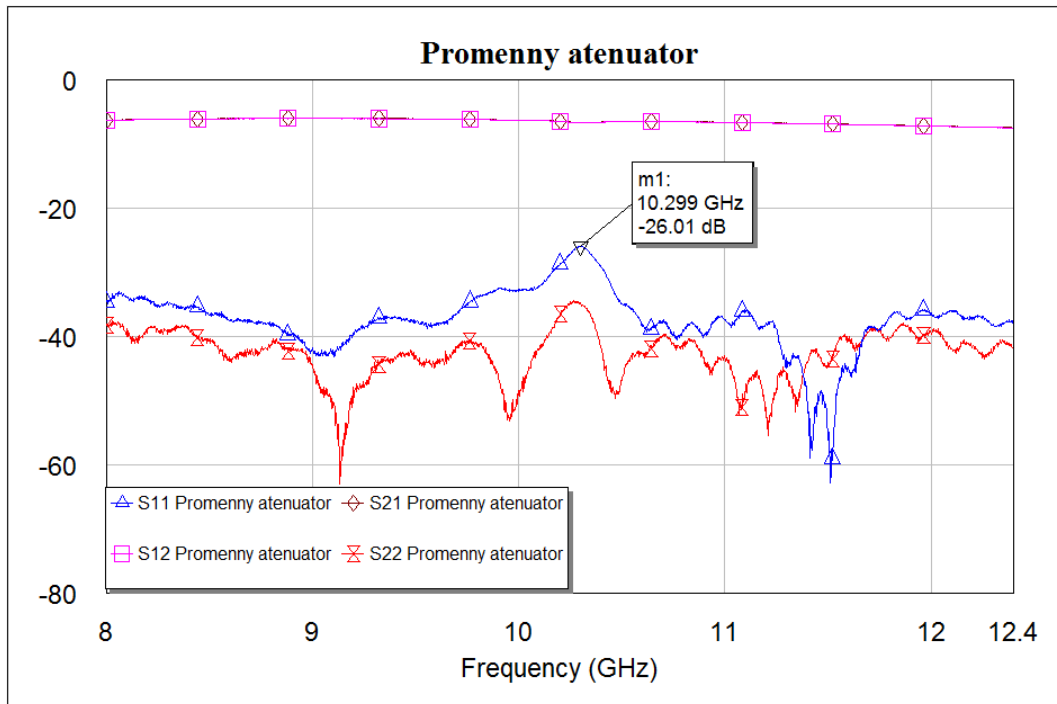
Obrázek 4.9. Nákres principiální podoby proměnného atenuátoru.



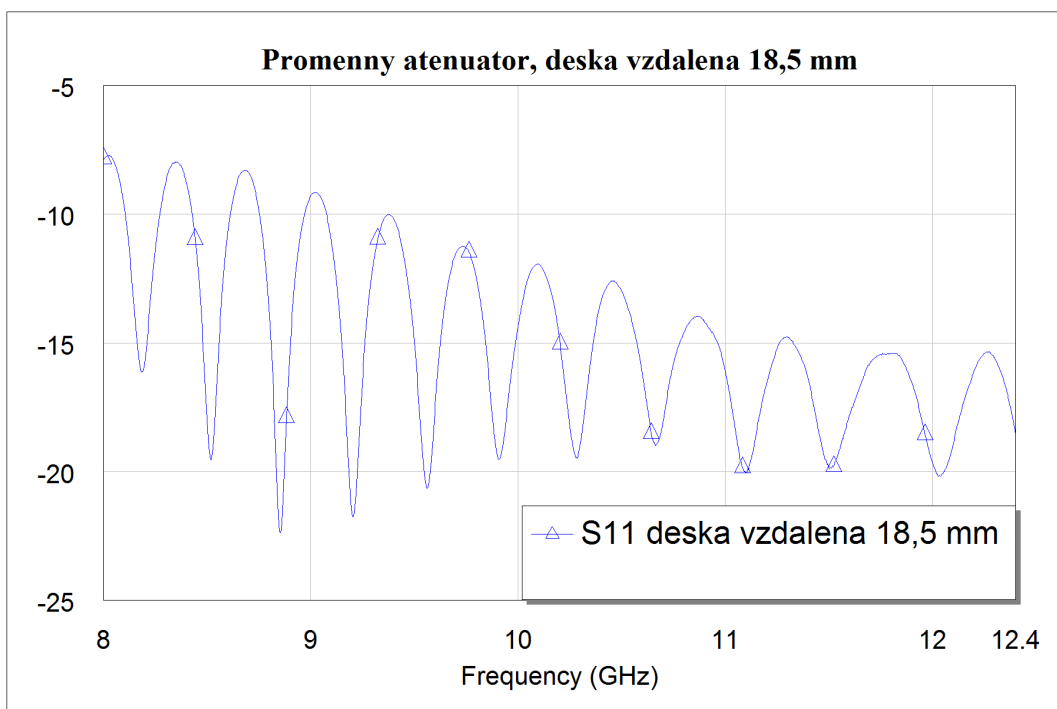
Obrázek 4.10. Podoba kalibrovaného proměnného atenuátoru.

Proměnný atenuátor vykazoval podstatně lepší vlastnosti než atenuátor z útlumového materiálu. Průběh na obrázku 4.11 zobrazuje změřené parametry jen samotného proměnného atenuátoru. Parametr S_{11} , který nás zde nejvíce zajímá a popisuje přímo odrazy způsobené atenuátorem, je zde téměř vždy pod hodnotou -26 dB. Proměnný atenuátor díky kalibrované stupnici ulehčoval práci i při nastavování samotného útlumu, kdy se útlum dal snadno ladit a nebylo nutné sestavu pro změnu útlumu rozebrat, jak tomu bylo u atenuátoru z útlumového materiálu. Jedinou nevýhodou proměnného atenuátoru je jeho relativně dlouhá fyzická délka. Ta způsobuje, že se ve výsledných průbězích objevuje více interferenčních minim, než by bylo pro měření nutné, což může mít vliv na výslednou přesnost měření (více zmíněno v sekci možných vylepšení 6.2, která je součástí závěru práce).

Příklad výsledku měření s proměnným atenuátorem je zobrazen na obrázku 4.12. Průběh je zobrazen pro vzdálenost odrazné desky 18,5 mm. Křivka má i pro tuto vzdálenost ještě dostatečnou dynamiku a určení vzdálenosti by nemělo být ani v tomto případě problém.



Obrázek 4.11. S-parametry kalibrovaného proměnného attenuátoru.



Obrázek 4.12. Výsledek měření s proměnným attenuátorem a odraznou deskou vzdálenou 18,5 mm.

Z porovnání výsledného průběhu pro attenuátor z útlumového materiálu a průběhu 4.12 pro proměnný attenuátor je jasné, že v případně proměnného attenuátoru mají parazitní odrazy podstatně menší vliv a měření s ním je tak použitelné pro určení vzdálenosti.

Výsledkem srovnání proměnného atenuátoru a atenuátoru z útlumového materiálu je především to, že dobré přizpůsobení použitého atenuátoru ve struktuře, kterou se tato diplomová práce zabývá, je velmi důležité a je nutné se jím při výběru atenuátoru zabývat. V opačném případě mohou mít velké parazitní odrazy destruktivní vliv na výsledky interferometrických měření.

4.2.5 Vybrané experimentálně změřené výsledky

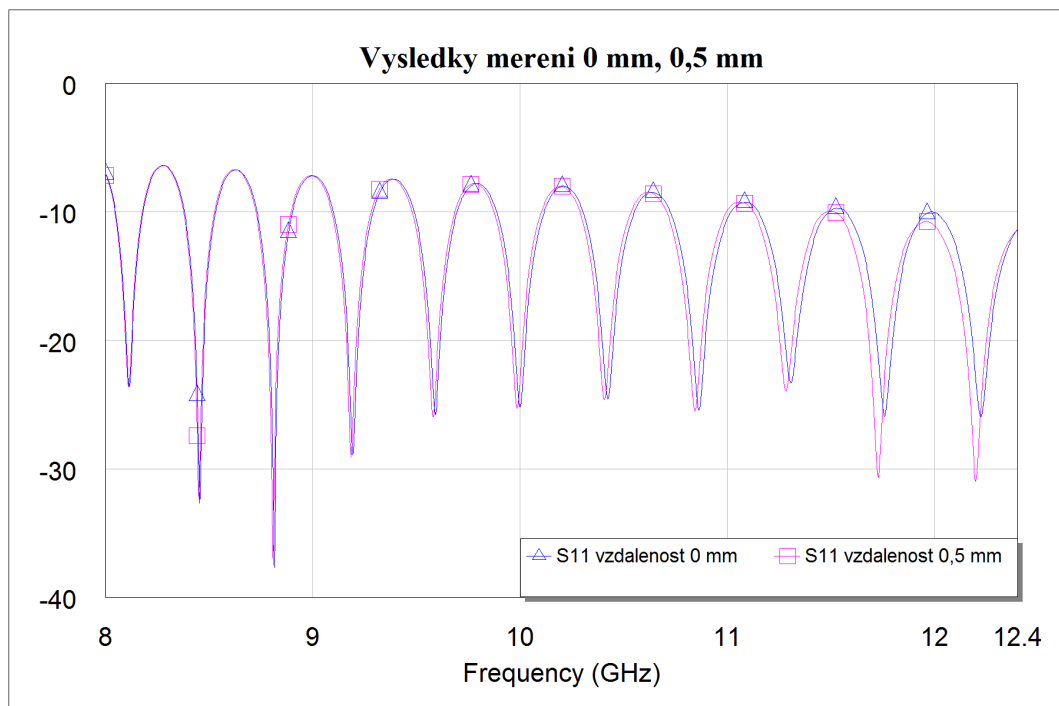
Výsledky zobrazené na obrázcích 4.13, 4.14 a 4.15 jsou vytvořeny s použitím měřicí sestavy zobrazené na obrázku 4.3 a popsané v úvodu sekce experimentálního měření 4.2 (tedy s použitím proměnného atenuátoru). Celé měření bylo provedeno v rozsahu 0 až 20 mm s krokem 0,5 mm. Tento rozsah měření byl dán předpokladem funkčnosti senzoru a zároveň rozsahem stupnice použitého mikrometrického šroubu. Rozsah byl zvolen také v závislosti na předpokladu správné funkce vlnovodné tlumivky minimálně do hodnoty $\frac{\lambda}{2}$ (pro 10 GHz 15 mm), který byl zmíněn již v sekci 3.2.1.

Hodnoty vzdáleností zobrazených experimentálních měření byly vybrány především tak, aby pokrývaly celé měřené spektrum vzdáleností.

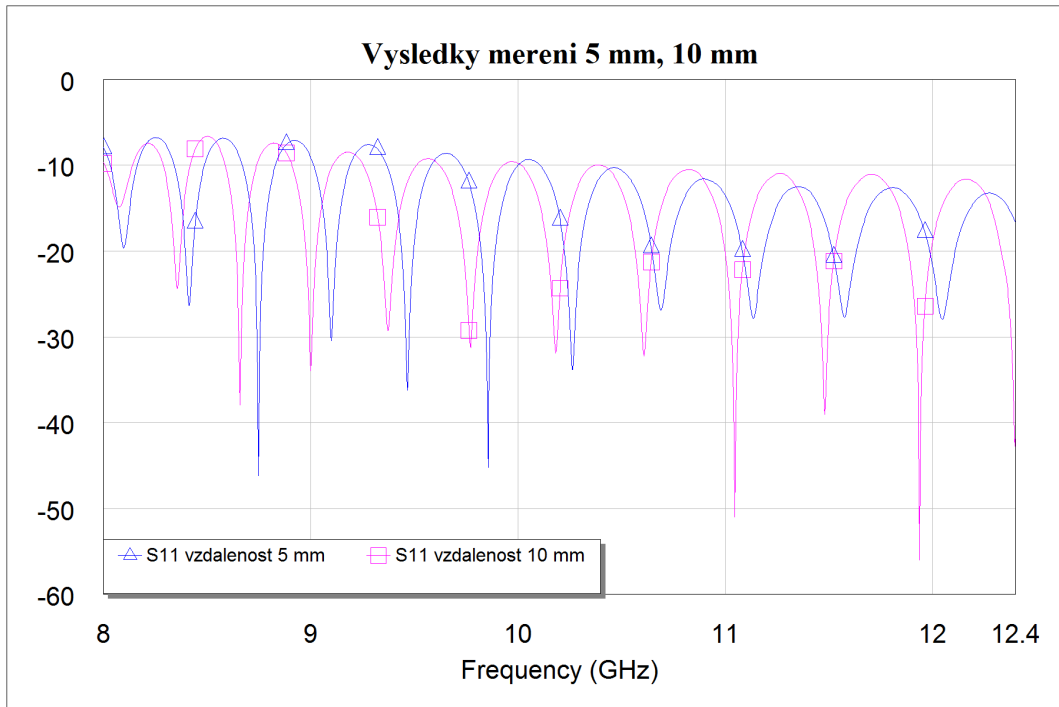
Na obrázku 4.13 jsou zobrazeny výsledky experimentálního měření pro vzdálenost odrazné desky 0 mm a 0,5 mm. Pro obě křivky je vidět, že jejich dynamika přesahuje v některých částech i výrazně 20 dB a bude tedy jistě dostačovat pro měření vzdálenosti.

Výsledky na obrázku 4.14 pro vzdálenosti odrazné desky 5 mm a 10 mm vykazují také dobré vlastnosti a dostatečnou dynamiku.

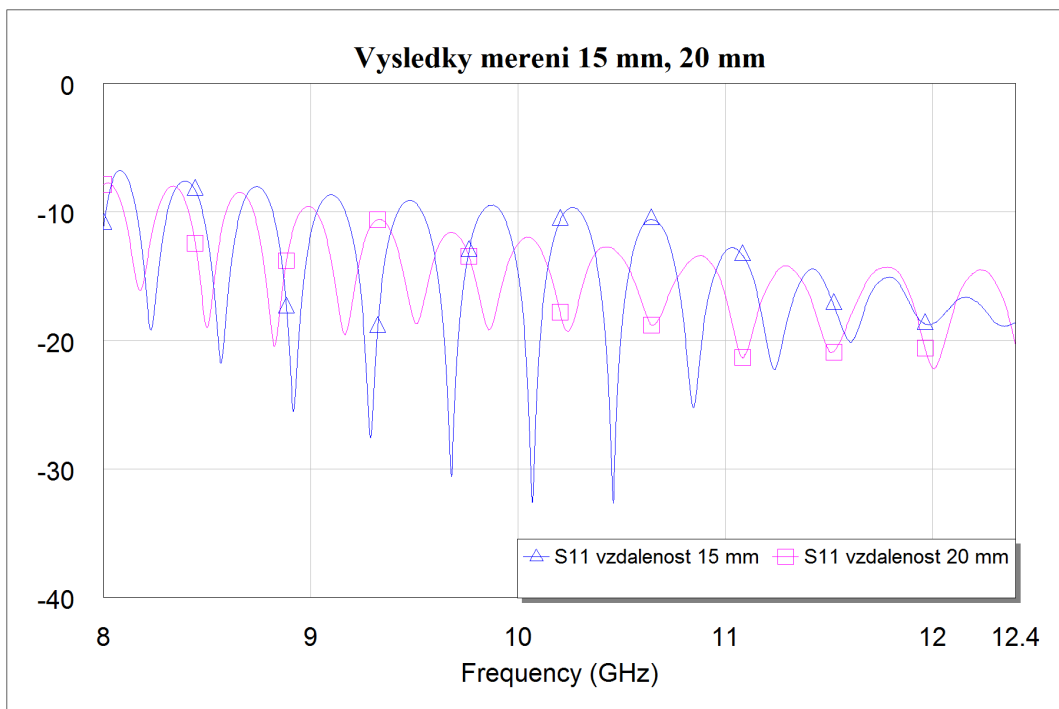
Poslední výsledky jsou zobrazeny na obrázku 4.15 pro měření se vzdáleností odrazné desky 15 mm a 20 mm. Křivka pro vzdálenost 15 mm má stále dynamiku i přes 20 dB a s určením vzdálenosti by tak neměl být problém. Křivka pro 20 mm má již dynamiku dosahující hodnot maximálně jen něco přes 10 dB, nicméně pro určení vzdálenosti by měla i tato hodnota dostačovat a senzor by měl být schopen i v této vzdálenosti správně fungovat.



Obrázek 4.13. Výsledky měření pro vzdálenost odrazné desky od otevřeného ústí 0 mm a 0,5 mm.



Obrázek 4.14. Výsledky měření pro vzdálenost odrazné desky od otevřeného ústí 5 mm a 10 mm.



Obrázek 4.15. Výsledky měření pro vzdálenost odrazné desky od otevřeného ústí 15 mm a 20 mm.

Kapitola 5

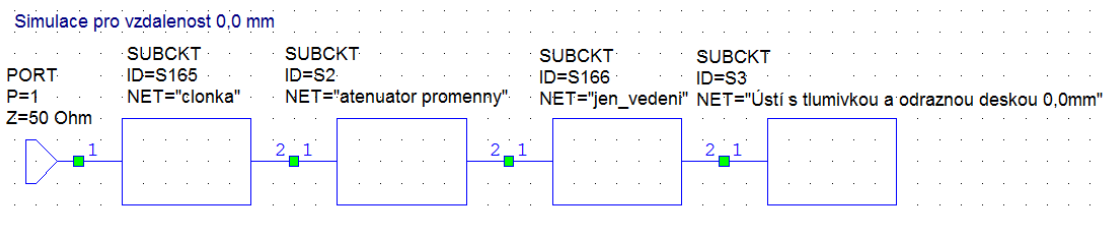
Vyhodnocení výsledků měření a výpočet vzdáleností

Na základě ještě dále upravených teoretických modelů rozebraných v kapitole 3, experimentálně změřených dat rozebraných v kapitole 4 a metod výpočtu vzdáleností v sekci 2.3 bylo provedeno vyhodnocení výsledků měření (5.1) a výpočet vzdálenosti (5.2).

5.1 Vyhodnocení srovnáním simulací s experimentem

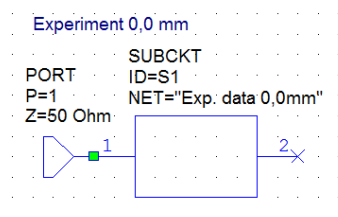
Pro vyhodnocení měření byly kromě samotných experimentálních průběhů, které byly již rozebrány v sekci 4.2.5 kapitoly experimentálního měření, použity i výsledky simulací vlnovodného senzoru. V průběhu experimentálního měření byla výsledná struktura v ohledu celkové délky a použitého atenuátoru několikrát změněna (postup a důvod změn je popsán v kapitole realizace a experimentálního měření 4). Tyto změny způsobily, že bylo nutné model struktury upravit tak, aby co nejpřesněji odrážel skutečnou strukturu senzoru. Provedené změny nijak nerozporují modelované struktury popsané v kapitole 3. Princip struktury se nijak nemění, pouze jsou zde nahrazeny některé simulované nebo idealizované prvky reálně změřenými daty.

Na obrázku 5.1 je zobrazeno schéma zapojení jednotlivých bloků senzoru dohromady pro věrnou simulaci podoby reálně měřeného senzoru. Blok na obrázku pojmenovaný jako "clonka" obsahuje reálně změřená data realizované clonkové diskontinuity (její měření je popsáno v sekci 4.2.2). Blok "atenuator promenny" obsahuje reálná data proměnného atenuátoru, jeho měření a popis obsahuje sekce 4.2.4. Blok "jen vedení" obsahuje simulaci úseku vlnovodného vedení, aby celková délka simulovaného vedení odpovídala reálně měřenému senzoru. Poslední blok "Ústí s tlumivkou a odraznou deskou 0,0mm" obsahuje simulovaná data ústové tlumivky a odrazné desky. Tento blok se jako jediný pro různé vzdálenosti liší (zde je zobrazen pro nulovou vzdálenost odrazné desky od ústí vlnovodu).



Obrázek 5.1. Schéma zapojení jednotlivých simulovaných a naměřených bloků pro věrnou simulaci experimentálně měřené sestavy.

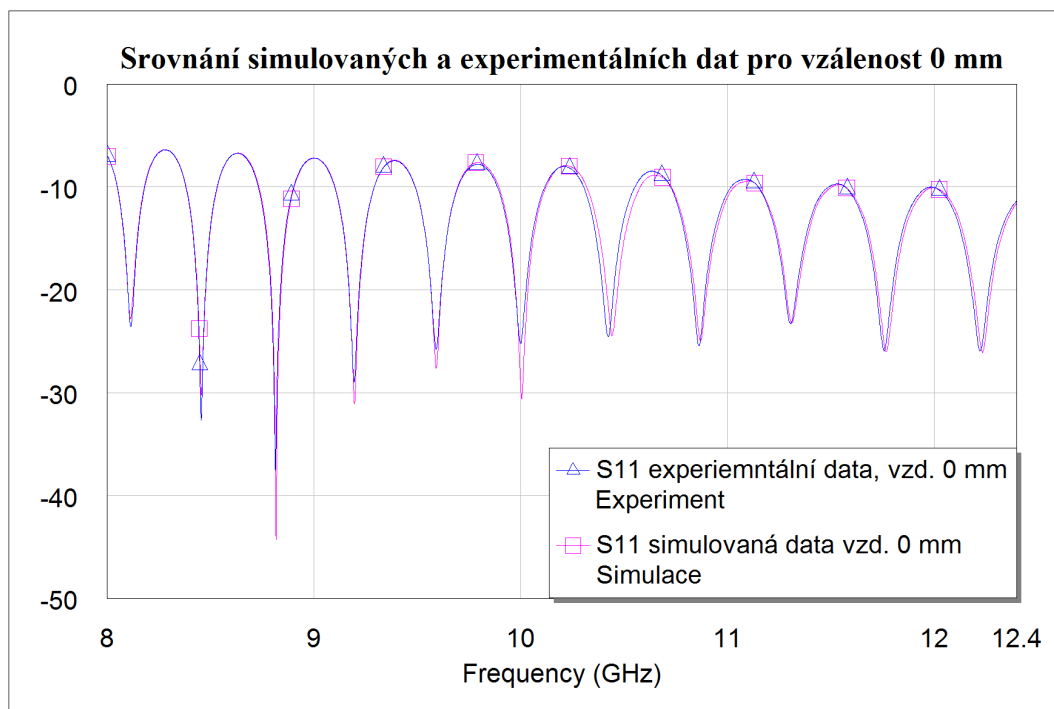
Na obrázku 5.2 je zobrazeno zapojení experimentálně změřených dat pro jejich zobrazení. V případě experimentálně změřených dat není nutné druhý port ani nijak bezodrazově nebo jinak zakončovat. Blok "Exp. data 0,0mm" obsahuje pouze naměřená data a připojený port pouze definuje která data budou zobrazena.



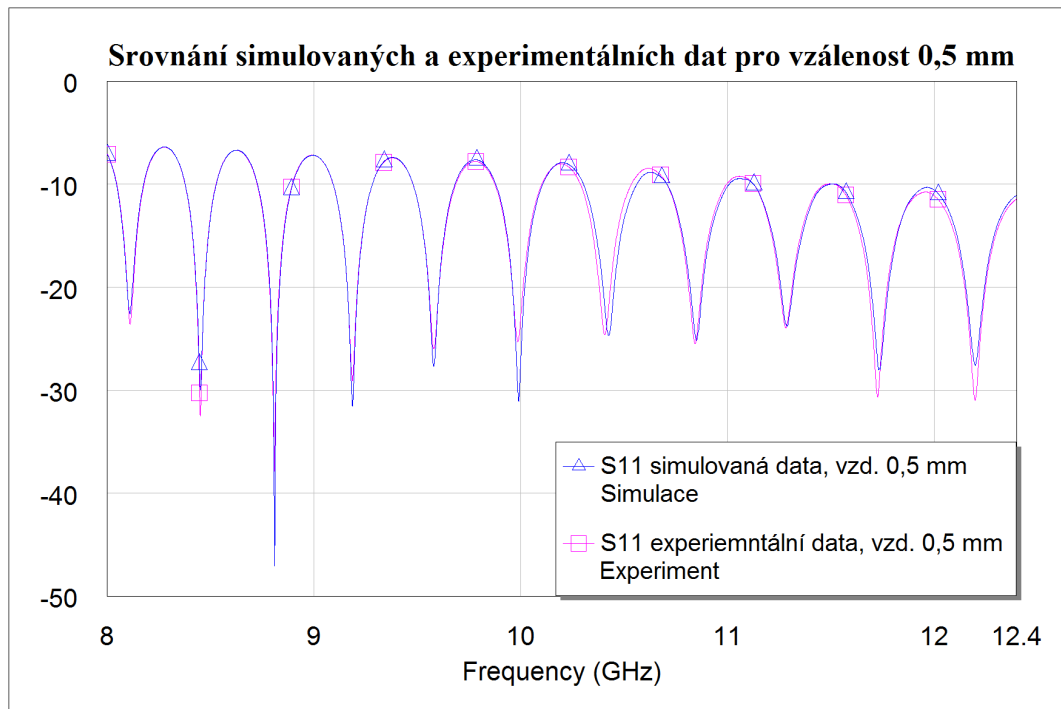
Obrázek 5.2. Schéma zapojení pro zobrazení experimentálně změřených dat.

Průběhy pro různé vzdálenosti odrazné desky, které jsou na obrázcích 5.3 (0 mm), 5.4 (0,5 mm), 5.5 (5 mm), 5.6 (10 mm), 5.7 (15 mm) a 5.8 (20 mm) zobrazují srovnání experimentálně naměřených dat s provedenými simulacemi podle schématu 5.1. Ze všech zobrazených průběhů je vidět, že simulace poměrně dobře vystihují experimentálně změřené křivky.

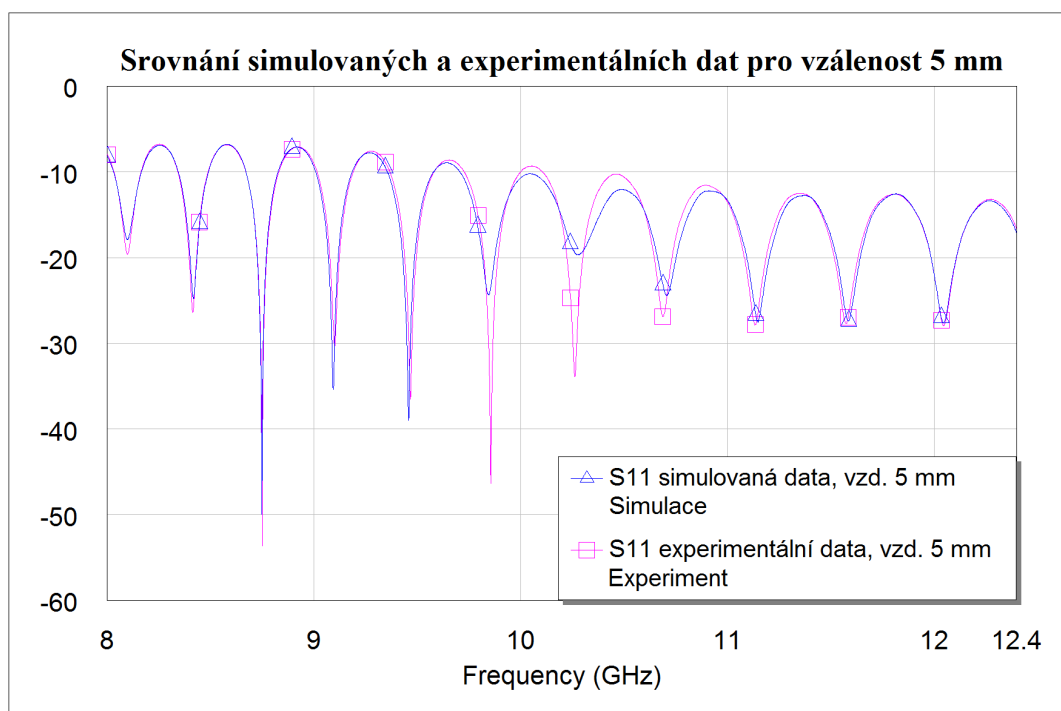
Jediné znatelné rozdíly, které se vyskytují u všech srovnání simulovaných křivek s experimentálně změřenými, jsou vzájemné posuny křivek typicky na frekvencích mezi 10 GHz a 11 GHz. Příčinu těchto posunů se nepodařilo s jistotou určit. S největší pravděpodobností jsou způsobeny rozdílnými vlastnostmi reálně měřeného otevřeného ústí vlnovodu s tlumivkou a simulací této části struktury s tlumivkou a odraznou deskou. Simulace uvažuje dokonale vodivé materiály tlumivky i odrazné desky. Reálně použité prvky ale mají vodivost i strukturu povrchu danou použitým materiálem. Frekvenční závislost tohoto posunu křivek ukazuje spíše na částečné rozdíly vlastností reálné a simulované tlumivky.



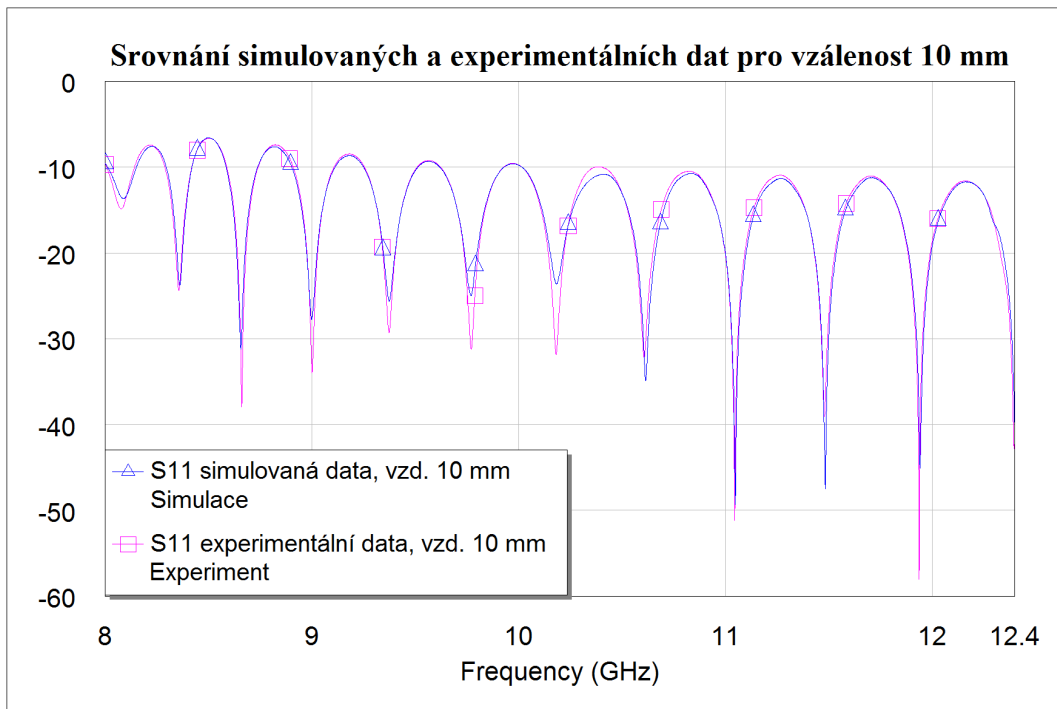
Obrázek 5.3. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 0 mm.



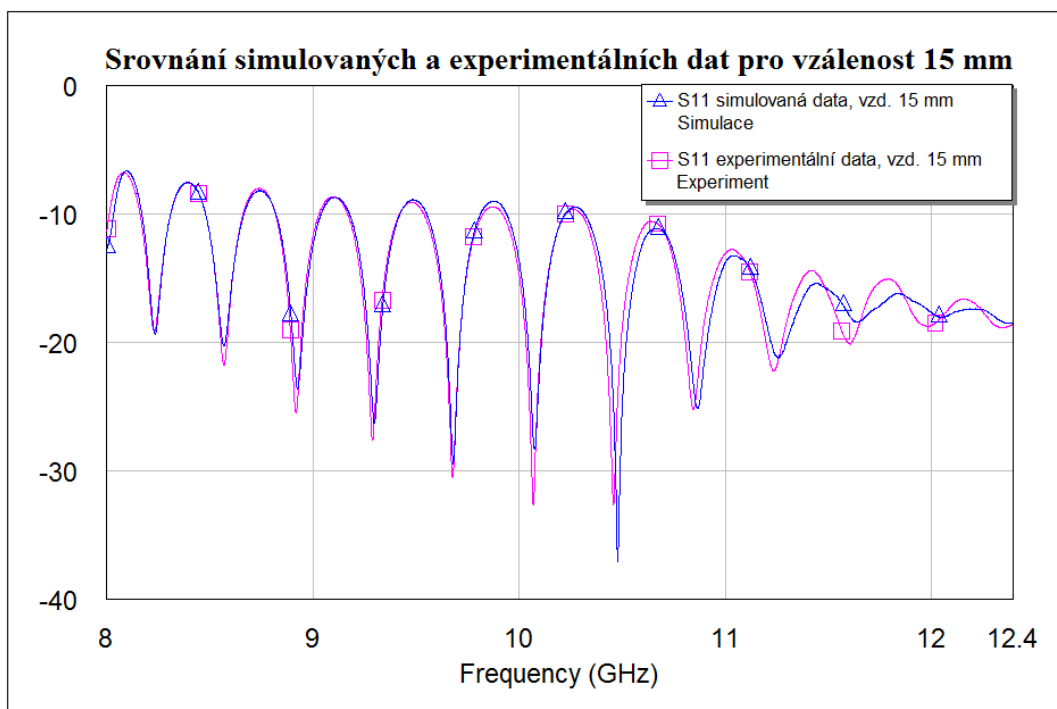
Obrázek 5.4. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 0,5 mm.



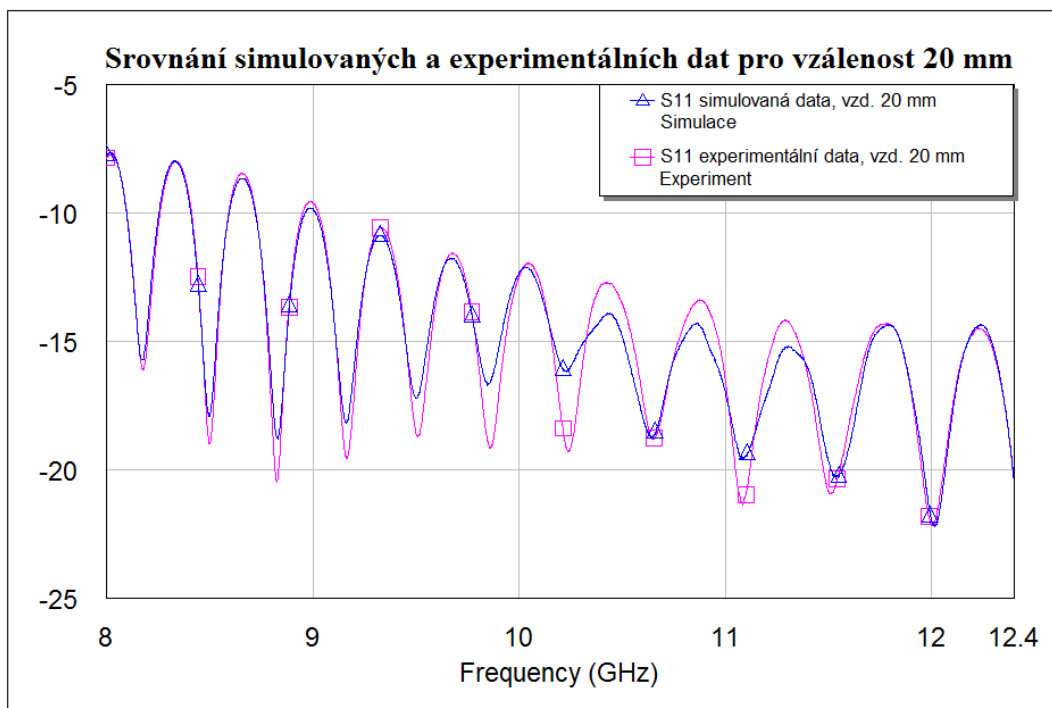
Obrázek 5.5. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 5 mm.



Obrázek 5.6. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 10 mm.



Obrázek 5.7. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 15 mm.



Obrázek 5.8. Srovnání simulovaných a experimentálně změřených dat pro vzdálenost 20 mm.

5.2 Určení vzdálenosti

Pro určení vzdálenosti odrazné desky byly použity dvě různé metody. Obě metody jsou popsány v teoretickém úvodu v sekci 2.3. Jde o metodu výpočtu, která počítá výslednou vzdálenost jen s použitím experimentálně změřených dat a metodu korelace experimentálně změřených dat s modelem. Nespornou výhodou metody výpočtu je její "spojité" vyhodnocování vzdálenosti, kdy není přesnost měření ovlivněna simulačním krokem. Nevýhodou ovšem je nutnost přesně definovaných poloh minim ze kterých je vzdálenost určována.

Metoda korelace experimentálních dat s analyticky vytvořenou křivkou (sekce 2.3.3) nebyla pro výsledné určení polohy použita. Metoda by měla dosahovat vysoké přesnosti, nicméně z časových důvodů a problémů vzniklých při vytváření kalibrační křivky nebyla metoda výsledně implementována. Bylo by vhodné ji doladit v případné navazující práci.

Pro určení vzdáleností jsou použité algoritmy implementovány v prostředí MATLAB, jejich zdrojové kódy jsou zobrazeny v příloze A.

Tabulky 5.1 a 5.2 obsahují hodnoty vzdáleností překážky nastavené při experimentálním měření mikrometrickým šroubem na posuvném měřicím stolku, hodnoty určené metodou výpočtu (2.3.1) a hodnoty určené metodou korelace experimentálních dat s modelem (2.3.2).

Pro hodnoty zjištěné korelací dat s modelem byly vytvořeny simulace vzdáleností odrazné desky s krokem 0,5 mm. Tato hodnota definuje také nejmenší rozdíl určených vzdáleností. Pro účely této práce byl vytvořen model s takovýmto krokem z důvodu časových a výkonnostních nároků na provedení jednotlivých simulací a jejich dalšího zpracování. Pro reálné přesné využití této metody by bylo třeba vytvořit modely s menším vzdálenostním krokem. Model s tímto krokem byl zvolen také v závislosti na

kroku provedených experimentálních měření, který měl stejnou hodnotu (více v sekci 4.2) a cílem bylo tedy především ověřit funkčnost modelu jako takového.

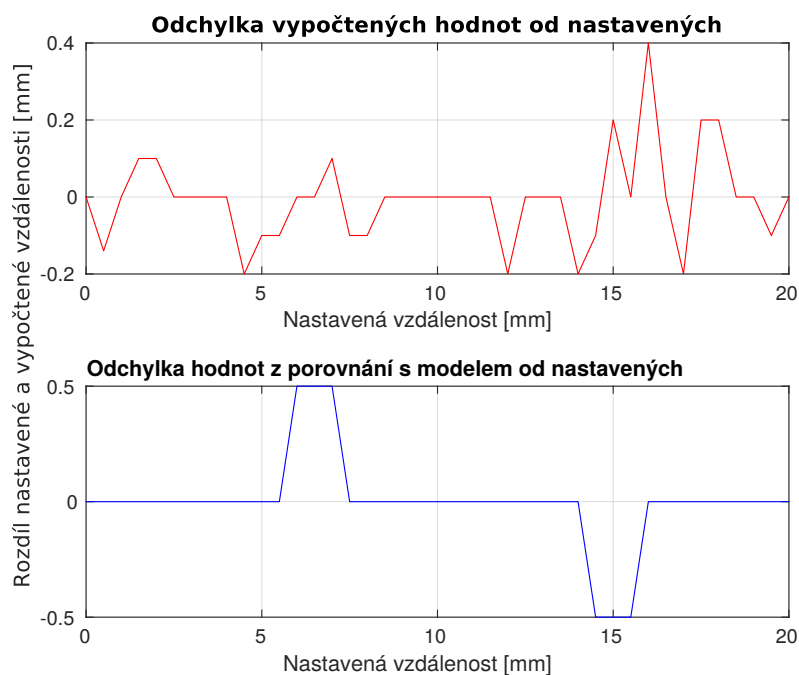
Odchytky určených hodnot vzdáleností od nastavených při experimentálním měření jsou pro obě metody určení zobrazeny v průbězích na obrázku 5.9 (průběhy vycházejí z tabulek 5.1, 5.2). Z průběhů je viditelné, že pro určení vzdálenosti metodou výpočtu se odchylka pohybuje většinou do 0,2 mm, v maximální hodnotě 0,4 mm. Takovéto chyby by bylo vhodné například odstranit použitím více korekčních změřených hodnot při výpočtu, případně korigovat nepřesnosti jinou metodou. Pro metodu určení vzdálenosti porovnáním (korelací) s modelem je hodnota odchylky nyní do 0,5 mm. Odchytky pro metodu porovnání s modelem vykazují v průběhu 5.9 charakter, kdy jsou zde tři hodnoty za sebou s odchylkou +0,5 mm a v další části průběhu tři hodnoty za sebou s odchylkou od nastavené hodnoty -0,5 mm. Tyto dvě skupiny hodnot zatížené chybou působí na první pohled jako chyba při ukládání hodnot při experimentálním měření, nebo vynechání některé hodnoty a její duplicitní uložení. Tato odchylka se ale u hodnot zjištěných výpočtem nevyskytuje. Pravděpodobný důvod odchylek hodnot zjištěných porovnáním experimentálních dat s modelem je tak v nedokonalém teoretickém popisu některých částí senzoru. Model senzoru, pomocí kterého jsou data vytvořena (popsán v kapitole 3), používá v pozdějších fázích sice některé bloky dat získané reálným měřením (například reálně měřená clonková diskontinuita nebo vlnovodný proměnný atenuátor), ale především ústí vlnovodu s tlumivkou a odraznou deskou je zde definované s ideálními vlastnostmi. Vhodné by bylo tedy vytvoření modelu respektujícího reálné vlastnosti především otevřeného ústí s tlumivkou a odraznou deskou. Například vliv reálného koeficientu odrazu použité odrazné desky nebo vliv reálných vlastností materiálu vlnovodu a ústí tlumivky.

Nastavená hodnota [mm]	Vypočtená hodnota [mm]	Korelace s modelem [mm]
0	$3 \cdot 10^{-14}$	0
0,5	0,64	0,5
1	1	1
1,5	1,4	1,5
2	1,9	2
2,5	2,5	2,5
3	3	3
3,5	3,5	3,5
4	4	4
4,5	4,7	4,5
5	5,1	5
5,5	5,6	5,5
6	6	5,5
6,5	6,5	6
7	6,9	6,5
7,5	7,6	7,5
8	8,1	8
8,5	8,5	8,5
9	9	9

Tabulka 5.1. Tabulka nastavených hodnot vzdáleností, vypočítaných z experimentálních dat a vyhodnocených podle metody korelace experimentálních dat s modelem. Vzdálenosti 0 mm až 9 mm.

Nastavená hodnota [mm]	Vypočtená hodnota [mm]	Korelace s modelem [mm]
9,5	9,5	9,5
10	10	10
10,5	10,5	10,5
11	11	11
11,5	11,5	11,5
12	12,2	12
12,5	12,5	12,5
13	13	13
13,5	13,5	13,5
14	14,2	14
14,5	14,6	15
15	14,8	15,5
15,5	15,5	16
16	15,6	16
16,5	16,5	16,5
17	17,2	17
17,5	17,3	17,5
18	17,8	18
18,5	18,5	18,5
19	19	19,5
19,5	19,6	19,5
20	20	20

Tabulka 5.2. Tabulka nastavených hodnot vzdáleností, vypočítaných z experimentálních dat a vyhodnocených podle metody korelace experimentálních dat s modelem. Vzdálenosti 9,5 mm až 20 mm.



Obrázek 5.9. Odchylky určených hodnot od nastavených pro obě metody.

Kapitola 6

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout a realizovat interferometrický vlnovodný senzor pro měření ultrakrátkých vzdáleností na vlnovodném vedení R100. Bylo nutné použít vhodnou diskontinuitu pro vytvoření referenčního kanálu a ústovou tlumivku v testovacím kanálu.

V první části práce je teoreticky popsáno interferometrické měření a konkrétně pak interferometrické měření pomocí vlnovodu. Dále jsou zde popsány důležité parametry vlnovodného vedení, včetně impedance a tvorby diskontinuity pomocí její skokové změny. V první části jsou popsány také metody určení vzdálenosti pomocí interferometrického měření.

Další kapitola obsahuje detailní popis modelované struktury senzoru. Shrnuty jsou zde požadavky na parametry struktury a rozebrány její jednotlivé části. Popsány jsou i části, které nebyly výsledně použity, ale jejich zmínka je důležitá pro představu, kudy se práce při jejím vzniku ubírala a definuje "slepé uličky". Závěr této kapitoly shrnuje výsledně vybranou strukturu, která obsahuje především clonkovou diskontinuitu, atenuátor a běžně vyráběnou ústovou tlumivku na vlnovodu R100.

Realizace vlnovodného senzoru a jeho měření je rozebráno v další kapitole. Popsána je nejdříve realizace clonkové diskontinuity z pocínovaného plechu. Dále kapitola obsahuje samotné experimentální měření, tedy soupis použitých komponent nutných pro měření, popis kalibrace a samotný popis měření jednotlivých částí. Proměřena je zde samostatně clonková diskontinuita, atenuátor z útlumového materiálu a proměnný atenuátor na vlnovodném vedení. Na srovnání měřených atenuátorů je popsána nutnost využití dobře přizpůsobeného atenuátoru pro eliminaci parazitních odrazů. Závěr kapitoly obsahuje několik experimentálně změřených výsledků pro různé vzdálenosti překážky. Výsledky ukazují, že realizovaný senzor by měl být pro interferometrické měření použitelný.

Poslední kapitola se věnuje vyhodnocení měření a výpočtu vzdáleností. Zobrazeno je pomocí několika průběhů srovnání experimentálního měření se simulací, kde je viditelné, že simulace experimentálnímu měření relativně dobře odpovídají. Dále je zde samotné určení vzdálenosti pomocí dvou vyhodnocovacích metod. Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v tabulkách, ke kterým je vytvořen průběh odchylek zjištěných hodnot od nastavených při měření.

6.1 Zhodnocení výsledků práce

Zadáním diplomové práce byl definován především požadavek na funkčnost senzoru v rozsahu nejméně 0 až 15 mm. Realizovaná sestava pro ověření parametrů senzoru umožňovala rozsah vzdáleností odrazné desky 0 až 20 mm.

Vzdálenost odrazné desky byla měřena v celém možném rozsahu 0 až 20 mm a nepřesnost obou metod byla v maximální hodnotě 0,5 mm. Lepších výsledků bylo dosaženo pomocí metody výpočtu, kde se nepřesnost pohybovala kolem 0,2 mm a v jedné maximální hodnotě 0,4 mm. Metoda korelace s modelem se dopustila v několika bodech chyby 0,5 mm.

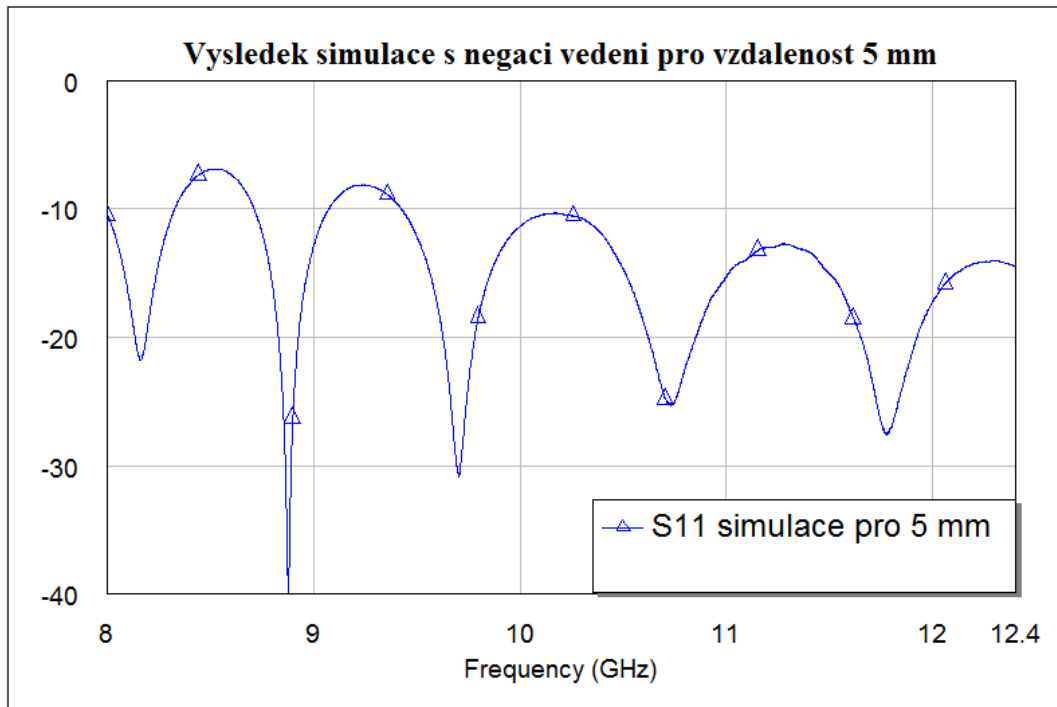
Nepřesnosti provedených měření mohly vzniknout například vlivem uchycení měřicí sestavy pouze na jejím začátku. To mohlo (zvláště po přidání úseku vlnovodu s atenuátorem) způsobit drobné prověšení a tím ne zcela dokonalou kolmost měřicí tlumivky na odraznou plochu. Dalším vlivem, uplatňujícím se především pro větší vzdálenosti odrazné desky, mohly být i odrazy signálu od jiných objektů měřicí sestavy než byla odrazná deska.

Zcela dokonalé nejsou ani obě použité metody určení vzdáleností z interferenčních průběhů. Metoda korelace měřených křivek s modelem je zásadně závislá na jemném kroku vzdálenosti vytvořených simulací a na co nejlepším teoretickém popisu použitých komponent. V praxi se pro tuto metodu objevují odchylky vlivem především ideálních vlastností simulovaných komponent a prostředí. Metoda výpočtu zase bohužel závisí na přesném měření frekvencí interferenčních minim. Přesné určení minim ale zásadně závisí na co nejpodobnější amplitudě testovacího a referenčního signálu. Pokud nejsou amplitudy dostatečně podobné, nebo se v sestavě objeví další parazitní odrazy, nebudou minima dostatečně hluboká nebo se v průběhu objeví další minima nesouvisející s interferencí jen dvou hlavních signálů.

6.2 Možná další vylepšení

V průběhu návrhu a realizace vlnovodného senzoru bylo simulováno a při experimentálním měření také vyzkoušeno několik různých struktur senzoru. Některé problémy těchto struktur bylo nutné řešit až v průběhu realizace a měření senzoru a nebylo tak možné jejich negativní vliv úplně eliminovat. Na základě především řešení těchto problémů se vyskytlo několik návrhů na fyzické vylepšení senzoru a jeho případné použití, kterými se zabývá tato část práce.

V průběhu experimentálního měření (popsáno v kapitole 4) bylo zjištěno, že atenuátor vytvořený pomocí vložení útlumového materiálu do vlnovodu nesplňuje, především z hlediska přizpůsobení, požadavky na použití ve struktuře senzoru (popsáno v sekci 4.2.3). Atenuátor bylo tedy nutné nahradit lépe přizpůsobeným. Jako takový byl nalezen proměnný vlnovodný atenuátor, který byl podstatně lépe přizpůsoben (popsán v sekci 4.2.4). Nutnost rychle nalézt jiný, lépe přizpůsobený atenuátor ale způsobila, že byl nyní do sestavy místo prvku využívajícího přímo již zařazený úsek vlnovodu (tedy vlastně nulové délky) zařazen prvek dlouhý 200 mm. Tento prvek způsobil zásadní změnu rozdílu délek referenčního a testovacího kanálu. Pro srovnání byl původní testovací kanál tvořen úsekem vlnovodu s tlumivkou dlouhým 70 mm a vzdáleností mezi otevřeným ústím a odraznou deskou (tedy 0 - 20 mm). Jak vychází již ze závěrů práce [3], zvětšení vlnového rozdílu délek referenčního a testovacího kanálu má negativní vliv na přesnost interferometrického měření. Vhodné by bylo tedy použít dobře přizpůsobený atenuátor kratší délky. Simulovaný výsledek pro použití kratšího atenuátoru s jinak stejnými parametry (simulace vychází z použité v sekci 5.1 pro srovnání simulací s experimentálními daty) je zobrazen na obrázku 6.1 (zobrazeno pro příklad vzdálenosti odrazné desky 5 mm). Simulace zkrácení atenuátoru bylo docíleno v programu AWR pomocí přidání dvou úseků negace vedení vlnovodu délky 80 mm (tedy zkrácení atenuátoru z 200 mm na 40 mm), jde v principu o přidání virtuálního záporně dlouhého vedení.



Obrázek 6.1. Simulovaný průběh možného výsledku s kratším atenuátorem, vzdálenost odrazné desky 5 mm.

Ve srovnání s původním výsledkem simulace na obrázku 5.5 má průběh na obrázku 6.1 menší dynamiku. To je způsobeno nejspíše tím, že je provedena negace ideálního úseku vlnovodu, který dokonale neodpovídá reálnému vedení ve kterém je realizován atenuátor.

V navazující práci by bylo také vhodné doladit metodu korelace analyticky vytvořené křivky s experimentálně změřenou (popsána v sekci 2.3.3). Tato metoda by mohla dosahovat ještě podstatně lepších výsledků.

Literatura

- [1] A. Baskakova a K. Hoffmann. *Investigation of Waveguide Sensors for Ultra-Short-Distance Measurements*. In: *2019 93rd ARFTG Microwave Measurement Conference (ARFTG)*. Boston, MA, USA, 2019. 1-4.
- [2] K. Hoffmann a A. Baskakova. *Simple sensors for ultra-short distance measurements*. In: *2019 European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE)*. Prague, Czech Republic, 2019. 158-161.
- [3] K. Hoffmann a Z. Škvor. *New method suitable for relative short distance measurement*. In: *The 40th European Microwave Conference*. Paris, 2010. 1524-1527.
- [4] K. Hoffmann a Z. Skvor. *Contactless distance measurement method*. In: *77th ARFTG Microwave Measurement Conference*. Baltimore, MD, 2011. 1-4.
- [5] V. Tysl a V. Růžička. *Teoretické základy mikrovlnné techniky*. SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, Praha. ISBN 80-03-00141-2.
- [6] J. Vrba. *Měření na centimetrových vlnách*. 1. vydání vydání. Státní nakladatelství technické literatury, 1958, Praha.
- [7] D. Prudek. *Modelování bezdrátového spojení mezi družicí a říční lodí*. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromagnetického pole, Praha, 2018.
<https://dspace.cvut.cz/handle/10467/73833>.
- [8] D. M. Pozar. *Microwave Engineering*. 4. vydání. Wiley, Hoboken, N.J., 2012. ISBN 978-0-470-63155-3.
- [9] everythingrf.com. *WR90 — WG16 — R100 - Rectangular Waveguide Size*.
<https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes/wr90>.
- [10] B. Pyne, R. Naruse, H. Saito, J. Hirokawa, V. Ravindra a P. R. Akbar. Robust Contactless Noncircular Choke Flange for Wideband Waveguide Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2019, 67 (3), 861-867.
- [11] C. T. Iatrou a M. Cavenago. Field analysis of rectangular waveguide open junction. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1997, 45 (2), 165-172.
- [12] rflambda.com. *WR90 Flange Standard: UG-Choke*.
www.rflambda.com/pdf/wgflangedrawing/WR90_UG_CHOKE.pdf.
- [13] rfwireless-world.com. *Microwave Coaxial and Waveguide attenuator*.
<https://www.everythingrf.com/tech-resources/waveguides-sizes/wr90>.

Příloha A

Zdrojový kód

A.0.1 Vyhodnocení vzdálenosti pomocí korelace naměřených dat se simulacemi

```
1 clear all
2 %% Experimentalni data
3
4 % Nacteni zmerenych dat pro vyhodnoceni
5 S_fileE=sparameters('data/experiment/ex15.s1p');
6
7 % Vytazeni parametru z S-filu
8 freqE=S_fileE.Frequencies;
9 parametryE=S_fileE.Parameters;
10
11 fE=[]; % Vystup frekvence z nacteneho experimentalniho souboru
12 pE=[]; % Vystup parametru z nacteneho experimentalniho souboru
13 for a=1:1:length(freqE)
14     fE(a)=freqE(a,1);
15     pE(a)=20*log10(abs(parametryE(1,1,a)));
16 end
17
18 %% Nacteni vseh simulovanych dat
19
20 krok = 5; % Krok v desetinach mm, pro který jsou dostupna simulovana data
21 posledni_vzorek = 200; % Posledni vzorek který ma byt nacten
22
23 % Cyklus nacistajici postupne vsechna simulovana data
24 for a=0:krok:posledni_vzorek
25
26     % Definice jmena souboru postupne podle kroku promenne a
27     name = sprintf('data/simulace/%dmm.s1p', a);
28     pomocna=sparameters(name); % Nacteni souboru S-parametru
29
30     freqSx=pomocna.Frequencies; % Vytazeni frekvence ze souboru
31     parametrySx=pomocna.Parameters; % Vytazeni parametru ze souboru
32
33     % Prevedeni frekvence a parametru na jednotlivé promenne
34     fSx=[];
35     pSx=[];
36     for b=1:1:length(freqSx)
37         fSx(b)=freqSx(b,1);
38         pSx(b)=20*log10(abs(parametrySx(1,1,b)));
39     end
40
41     % Uložení promenných do objektu se jmény podle vzorku vzdálenosti
```

```
42     temp_var1 = strcat('fS',num2str(a));
43     variablef.(temp_var1)=fSx;
44     % Vystup objekt frekvenci z nacteného simulovaného souboru
45     % (prístup variablep.fSx) x v desetinách milimetru
46
47     temp_var2 = strcat('pS',num2str(a));
48     variablep.(temp_var2)=pSx;
49     % Vystup objekt parametru z nacteného simulovaného souboru
50     % (prístup variablep.pSx) x v desetinách milimetru
51 end
52
53 %% Korelace Experimentálne zmerených dát se souborem simulací
54
55 % Zavedení promenných
56 Maximum_korelace = 0; % Na začátku nulová korelace
57 Misto_max_kor = 0; % Jen zavedení, nemuselo byt definováno
58
59 % Cyklus postupně načítající simulace z objektu variablep pro korelaci
60 for c = 0:krok:posledni_vzorek
61
62     % Definice jména souboru v objektu variablep pro přístup v cyklu
63     name2 = sprintf('pS%d', c);
64
65     % Částečně jednoduché normování amplitudy podle nulového vzorku,
66     % empirický drobný vliv na přesnost, ale není nutné
67     if c<150
68         h1E=pE(1);h1S=variablep.(name2)(1);korekce=h1E-h1S;
69         for d=1:1:length(variablep.(name2))
70             variablep.(name2)(d)=variablep.(name2)(d)+korekce;
71         end
72     end
73
74     % Korelace experimentálních dat pE se simulovanými daty v objektu
75     % variablep s nulovým posuvem
76     [c2,lag2]=xcorr(10*log10(abs(pE)),...
77     10*log10(variablep.(name2)),0,'coeff');
78
79     % Vezme maximální hodnotu korelace z proměnné c2
80     % (pro nulový posuv není třeba, v c2 bude jen jedna hodnota
81     % a v lag2 pouze 0)
82     M=abs(max(c2));
83
84     % Porovnání hodnoty korelace s maximální uloženou hodnotou, když je
85     % aktuální hodnota korelace větší, tak se proměnná přepíše novou
86     if M>Maximum_korelace
87         Maximum_korelace=M;
88         Misto_max_kor=c;
89     end
90 end
91
92 % VÝSTUP SKRIPTU, říká jaká je vyhodnocená vzdálenost
93 % v desetinách milimetru
94 Misto_max_kor
```

■ A.0.2 Vyhodnocení vzdálenosti metodou výpočtu

Hlavní skript:

```
1 %Zadani korekci a jejich parametru vzdalenosti
2 kor(1).A = 'data/experiment/ex0.s1p'; % 1. k
3 kor(1).B = 0;
4 kor(2).A = 'data/experiment/ex100.s1p';
5 kor(2).B = 10*1e-3;
6 kor(3).A = 'data/experiment/ex200.s1p';
7 kor(3).B = 20*1e-3;
8
9 % vytvoreni nuloveho pole pro nacteni korekci
10 k = zeros(length(kor),2);
11 %vytazeni dat z korekcnych souboru do k
12 for a = 1:1:length(kor)
13     p = korekce(kor(a).A, kor(a).B);
14     k(a,1) = p(1);
15     k(a,2) = p(2);
16 end
17 a = (1:1:max(k(:,2)));
18
19 %interpolace pro ostatni body
20 interpol_kalibr = interp1(k(:,2),k(:,1),a,'pchip');
21
22 % zadani mereni pro nalezeni
23 S_file = 'data/experiment/ex25.s1p';
24
25 %zadani parametru do funkce urceni hledane vzdalenosti
26 hledana_vzd = vzd_vyp(S_file,interpol_kalibr)
```

Funkce určení vzdálenosti:

```
1 function[vyp_vzd] = vzd_vyp(Sfile, kor)
2
3 c0 = 299792458; %rychlost svetla
4 f_mez = 6.55e9; % mezni kmitocet dominantniho vidu
5
6 %nacteni zmerenych dat pro vyhodnoceni
7 S_fileE=sparameters(Sfile);
8
9 %vytazeni parametru z S-filu
10 freqE=S_fileE.Frequencies;
11 parametryE=S_fileE.Parameters;
12
13
14 fE=[]; %vystup frekvence z nacteneho experimentalniho souboru
15 pE=[]; %vystup parametru z nacteneho experimentalniho souboru
16 for a=1:1:length(freqE)
17     fE(a)=freqE(a,1);
18     pE(a)=20*log10(abs(parametryE(1,1,a)));
19 end
20 %hledani minim v prubehu
21 [tr,pol] = islocalmin(pE,'MinProminence',2,'FlatSelection','center');
```

```

22 %hledani nejvetsiho minima
23 ind = max(pol);
24 %nalezeni bodu s minimem
25 body = find(tr);
26 %nalezeni bodu s nejvetsim minimem
27 bod_nejh = find(body==ind);
28 %prirazeni frekvenci k bodum si minimem
29 min_f = fE(tr);
30
31 l_1 = kor(length(min_f)); % zpracovani korekce
32
33 v_faz = (c0)./(sqrt(1-((f_mez./min_f).^2))); %urceni fazove rychlosti
34
35 vedle = -1;
36 if bod_nejh == 1
37     vedle = 1; % definice dalsich minim podle nejhlubsiho
38 end
39 syms kk l_2
40 eqn = -l_2+l_1-((v_faz(bod_nejh)*(kk))/(2*min_f(bod_nejh))) ==...
41     -l_2+l_1-((v_faz(bod_nejh+vedle)*(kk+vedle))/...
42     (2*min_f(bod_nejh+vedle)));
43 %reseni rovnice pro kk
44
45 vys = solve(eqn,kk); vys = double(vys);
46 zao = round(vys); % zaokrouhlovani
47 zao = zao-bod_nejh+1; % poradí nejhlubsiho minima v prubehu
48 vzorky= zeros(length(min_f),1);
49 % vypocet l_2 podle minim
50 for vys=1:1:length(min_f)
51     vzorky(vys) = -l_1+((v_faz(vys)*(zao+vys-1))/(2*min_f(vys)));
52 end
53
54 soucet_l_2 = sum(vzorky); % soucet urcenyh vzdalenosti
55
56 vyp_vzd = ((soucet_l_2) / length(min_f)); % urceni prumerne vzdalenosti
57 % navratova hodnota vyp_vzd
58 end

```

Funkce určení korekce:

```

1 function[kor] = korekce(Sfile,zad_vzd)
2 %nacteni s-parametru z kalib. souboru ve formatu .s2p
3 S_fileE=sparameters(Sfile);
4
5 %vytazeni parametru z S-filu
6 freqE=S_fileE.Frequencies;
7 parametryE=S_fileE.Parameters;
8
9 fE=[]; %vystup frekvence z nacteneho experimentalniho souboru
10 pE=[]; %vystup parametru z nacteneho experimentalniho souboru
11 for a=1:1:length(freqE)
12     fE(a)=freqE(a,1);
13     pE(a)=20*log10(abs(parametryE(1,1,a)));
14 end

```

```
15 min = islocalmin(pE,'MinProminence',2); %hledani interf. minim
16 min_frekvence = fE(min); %hledani frekvenci minim
17 vzd_kor = vzd_vyp(Sfile, 0); %hledani vzdlenosti vypoctem pro korekci
18 kor = zeros(2,1);
19 kor(1) = vzd_kor - zad_vzd; %korekce hodnot rozdilem vypoctu a zadani
20 kor(2) = length(min_frekvence); %pocet minim v korekc. souboru
21 end
```



Příloha B

CD

Součástí přiloženého CD jsou následující položky:

- Text této práce `F3-DP-2020-Prudek-David`.
- Modely vytvořené v CST v adresáři `CST_model/`.
- Simulovaná data v adresáři `Simulation_data/`.
- Měřená data v adresáři `Experimental_data/`.
- Zdrojové kódy v adresáři `Code/`.