

Měření elmag. stínící účinnosti krytů v bezp. aplikacích

Measurement of electromagnetic shielding effectiveness of shields in safety applications

Bc. Vít Šimara

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vít ŠIMARA**

Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**

Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Měření elektromagnetické stínící účinnosti krytů
v bezpečnostních aplikacích**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte metodiky používané v oblasti EMC k měření stínící účinnosti materiálů.
2. Pro případ měření stínící účinnosti pomocí IEEE-Std-299 napište v prostředí HP VEE 7.5 ovládací program pro dvojici přístrojů SM300 a FS300 od firmy Rohde-Schwarz.
3. Pomocí programu z bodu 2 provedte měření stínící účinnosti planárních vzorků kompozitních materiálů s malou a střední stínící účinností.
4. Porovnejte výsledky dosažené v bodě 3 s teoretickou stínící účinností získanou pomocí programu FSSIR.
5. Pro kmitočtové pásmo 8 -- 12 GHz proveďte návrh vysoko-impedanční roviny, která bude sloužit k potlačení povrchových proudů na víku stíněné komory používané na UTB k měření stínící účinnosti.
6. Navržené planární vzorky vysokoimpedančních rovin realizujte pomocí PCB technologie.
7. Měření porovnejte stínící účinnost komory samotné a komory doplněné o tyto vysokoimpedanční roviny.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:


1. CLAYTON, R. Introduction to electromagnetic compatibility, 2006. Willey; New York. ISBN 978-0471-75500-5. 983 pg.
2. WILSSON, P. -- MARK, T., M. -- ADAMS, J., W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials: Part I: -Far-Field Source IEEE Transactions on EMC, Aug 1988, vol. 30, no.3, pg. 239--249.
3. WILSSON, P. -- MARK, T., M. -- ADAMS, J., W. Techniques for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Materials : Part 2-Near-Field Source Simulation. IEEE Transactions on EMC, Aug 1988, vol. 30, no.3, pg. 251--259.
4. WILSSON, P. -- MARK, T., M. -- ADAMS, J., W. Methods for Evaluating Shielding Effectiveness of Textiles. Fibres & Textiles in Eastern Europe, Jan-Dec 2006, vol. 14, no.5, pg. 239--249.
5. Agilent VEE Pro --user's guide (ver 7.5), 9th edition, May 2005. 627 pg.
6. SIEVENPIPER, D., F. High-Impedance Electromagnetic Surfaces, 1999. Dissertation thesis at UCLA. Ph.D supervisor Eli Yablonovitch.

Vedoucí diplomové práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **19. února 2010**

Termín odevzdání diplomové práce: **7. června 2010**

Ve Zlíně dne 19. února 2010


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je seznámit se s metodikou používanou v oblasti EMC k měření stínící účinnosti. Dále je cílem návrh vysokoimpedanční roviny, která bude sloužit k potlačení povrchových proudů na víku měřicí komory používané na UTB k měření stínící účinnosti. A na závěr se práce zabývá proměřením daných vzorků a jejich porovnání s teoretickým základem.

Klíčová slova: EMC, útlum, stínící účinnost, vysokoimpedanční rovina

ABSTRACT

The aim of this thesis is to introduce the methodology used in the EMC measurement of shielding effectiveness. Furthermore, the objective is to design high-impedance surface, which will be used to suppress surface currents on the lid shielded chambers used in the UTB to measure shielding effectiveness. Finally, the paper deals with the given sample by measuring and comparing them with theoretical basis.

Keywords: EMC, attenuation, shielding effectiveness, high-impedance surface

Zde bych chtěl poděkovat panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za vedení mé DP, dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Stanislavu Goňovi Ph.D. za odbornou pomoc při zpracování mé DP. A také bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu při práci na DP.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE	11
1.1 MAXWELLOVY ROVNICE	11
2 ELEKTROMAGNETICKÁ STÍNÍCÍ ÚČINNOST	13
2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	13
2.1.1 Elektromagnetická interference	13
2.1.2 Elektromagnetická susceptibilita	13
2.2 STÍNÍCÍ ÚČINNOST	14
2.2.1 Stínění	14
2.2.2 Stínící účinnost.....	15
2.3 METODY MĚŘENÍ STÍNÍCÍ ÚČINNOSTI.....	15
2.3.1 Měření pomocí stínící komory	15
2.3.2 Měření stínící účinnosti na vedení	16
2.3.2.1 Předpoklady pro použití této metody.....	18
3 VYSOKOIMPEDANČNÍ POVRCHOVÉ STRUKTURY	19
3.1 POVRCHOVÉ VLNY	19
3.2 VYSOKOIMPEDANČNÍ POVRCHOVÉ STRUKTURY	19
3.2.1 Typy vysokoimpedančních povrchových struktur	19
3.2.2 Vysokoimpedanční povrchové struktury – typ 1	21
4 POUŽÍVANÉ PROGRAMY A PŘÍSTROJE	24
4.1 CST MICROWAVE STUDIO	24
4.2 AGILENT VEE	24
4.2.1 Přednosti VEE Pro	25
4.3 ROHDE & SCHWARZ SM300	25
4.3.1 Technické údaje v kostce	26
4.4 ROHDE & SCHWARZ FS300.....	26
4.4.1 Technické údaje v kostce	26
II PRAKTICKÁ ČÁST	27
5 NÁVRH VYSOKOIMPEDANČNÍ ROVINY	28
5.1 VYSOKOIMPEDANČNÍ ROVINA	28
5.1.1 Tvorba 3D geometrie	29
5.1.2 Návrh vhodných rozměrů.....	30
5.1.3 Simulace navržených PBG.....	32
5.1.4 PBG 62x8 buněk	32
5.1.5 PGB 42x10 buněk	33
6 SIMULACE MĚŘÍCÍ KOMORY	35

6.1	ROZMĚRY MĚŘÍCÍ KOMORY	35
6.2	MODEL MĚŘÍCÍ KOMORY	36
6.3	NASTAVENÍ SIMULACE MĚŘÍCÍ KOMORY	36
6.4	SIMULACE MĚŘÍCÍ KOMORY	37
6.4.1	Simulace neobložené stínící komory	38
6.4.2	Simulace komory obložené ze dvou stran.....	38
6.4.3	Výsledky	40
6.4.4	Řešení.....	41
7	MĚŘENÍ STÍNÍCÍ ÚČINNOSTI KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU.....	43
7.1	NASTAVENÍ MĚŘENÍ A MĚŘENÍ	44
7.2	VÝSLEDKY	44
7.3	DISKUZE K VÝSLEDKŮM.....	45
	ZÁVĚR	46
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	47
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	48
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	51
	SEZNAM TABULEK.....	53
	SEZNAM PŘÍLOH.....	54

ÚVOD

V dnešní době, kdy máme možnost použití značného množství měřicí a detekční techniky již víme, že nás elektromagnetická pole obklopují i prostupují ve všech situacích a ve velkém počtu forem. Může jít o záření přírodní, přicházející z vesmíru nebo záření vytvořené člověkem, ať jde již o použití antén, elektrické vedení apod.

Ke snížení účinků elektromagnetických polí na různá elektronická zařízení se používají materiály s dobrou stínící účinností, dříve to byly kovové materiály, v dnešní době se používají plastové materiály se speciální kovovou texturou na povrchu a, nebo speciální kompozitní (textilní) materiály, do kterých jsou pro zvýšení stínící účinnosti přidány speciální složky např. materiály, které mají v sobě vetkány kovová či grafitová vlákna. Výhodou těchto materiálů je že mohou mít nižší hmotnost než kovové materiály srovnatelné, nebo lepší mechanické vlastnosti, při zachování dobré stínící účinnosti.

TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÉ POLE

Jednou ze dvou základních podob hmoty je fyzikální pole (druhou je látka). Jedním z druhů polí je pole elektromagnetické (EM), toto pole je nositelem energie, je schopno konat práci, má svoji hmotnost a hybnost.

Jako každá hmota má i EM pole svou hmotnost (EM sice přenáší nepatrnou hmotnost, zato však nejvyšší možnou rychlostí), která souvisí s energií pole a je dána vztahem:

$$W = mc^2$$

Kde c je rychlost šíření EM vln, například rychlost světla ve vakuu je $c = 300\,000$ km/s. [8] Tato rychlost je dána vztahem:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

Z mechaniky víme, že klid a pohyb jsou relativní pojmy (závisí na použité soustavě souřadnic) – a stejně relativní musí být pojmy „elektrické pole“ a „magnetické pole“ - jsou to zřejmě pouze dva projevy jediné obecnější reality, která byla nazvána EM pole.[7]

1.1 Maxwellovy rovnice

Protože toto předpokládané obecné pole se v různých konkrétních podmínkách projevuje jako již známé a dobře popsané pole elektrické nebo magnetické, bylo možné očekávat, že:

- k jeho popisu by se možná nemusely zavádět nové fyzikální veličiny a mohly by postačit veličiny již známé, definované v těchto dvou polích, tj. elektrická a magnetická intenzita a indukce ($\vec{E}, \vec{D}, \vec{H}, \vec{B}$).
- základní rovnice charakterizující EM pole by mohly být nalezeny zobecněním již známých vztahů z elektrického a magnetického pole.

Toto se podařilo ve druhé polovině 19. Století Jamesi C. Maxwellovi, který na základě Faradayových pokusů zformuloval rovnice, které v integrálním tvaru vypadají takto:

$$\oint H \cdot dl = I + \frac{d\Psi}{dt}$$

$$\oint_c E \cdot dl = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\oint_S D \cdot ds = Q$$

$$\oint_S B \cdot ds = 0$$

Pro regulární body můžeme rovnice psát v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} D = \rho$$

$$\operatorname{div} B = 0$$

K těmto čtyřem základním rovnicím se ještě přidávají dvě doplňkové rovnice:

$$D = \varepsilon \cdot E$$

$$B = \mu \cdot H$$

A tzv. diferenciální tvar Ohmova zákona:

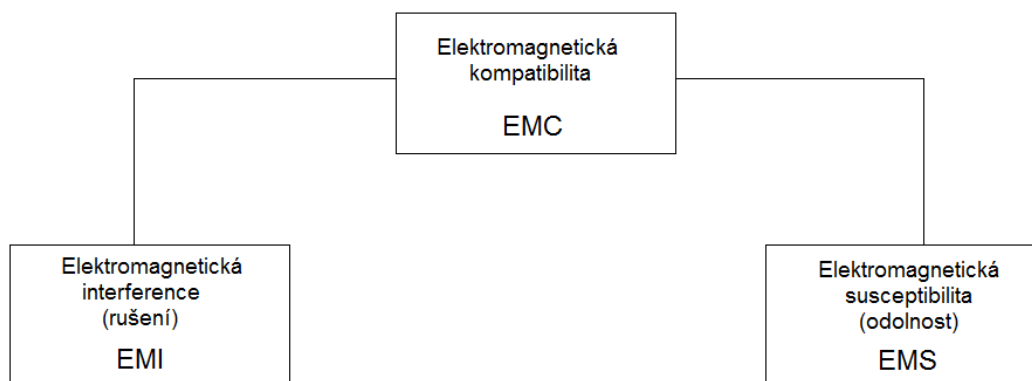
$$J = \gamma \cdot E$$

2 ELEKTROMAGNETICKÁ STÍNÍCÍ ÚČINNOST

Elektromagnetické stínění je u řady zařízení nutností, jelikož by vlivem elektromagnetického pole mohlo docházet k negativnímu ovlivňování činnosti zařízení, nebo by samo zařízení mohlo ovlivňovat další zařízení v jeho okolí.

2.1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetickou kompatibilitou (EMC) se rozumí schopnost elektrických a elektronických součástí, zařízení a systémů uspokojivě fungovat v prostředí, bez vytváření nepřijatelného rušení. Znamená to omezení rušení ze zařízení nebo systému, ale také určitou míru odolnosti proti rušení od zařízení, které se dají v daném prostředí očekávat. Problematika EMC se dá rozčlenit na dvě hlavní oblasti, viz. obrázek níže.



Obr. 1.: Členění problematiky EMC

2.1.1 Elektromagnetická interference

Elektromagnetická interference (EMI) neboli EM rušení je proces, při kterém se signál, generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím EM vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

2.1.2 Elektromagnetická susceptibilita

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) neboli EM odolnost vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje EM rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními které zvyšují u objektu (příjímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti

vlivu rušivých signálů. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

2.2 Stínící účinnost

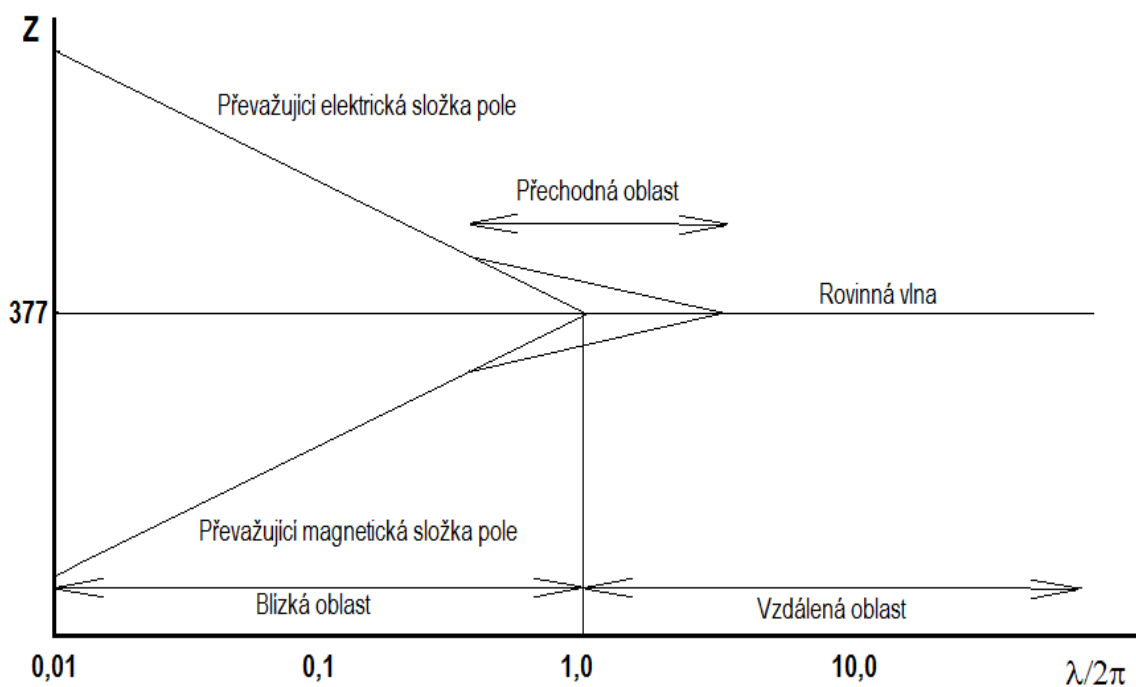
2.2.1 Stínění

Stínění je definováno jako poměr intenzity elektromagnetického pole před a za měřeným stínícím materiálem. Při předpokladu že stínící materiál je nekonečná rovina, která je umístěna mezi zdroj EM záření a měřící zařízení, můžeme oblast okolo zdroje EM záření rozdělit do tří oblastí:

- Oblast vzdáleného pole – zde pozorujeme povrchové vlny, vlastnosti pole závisí na prostředí kterým se šíří
- Oblast blízkého pole – zde vlastnosti pole závisí hlavně na parametrech zdroje EM záření a okolním prostředí
- Přejídná oblast – tato oblast se nachází na hranici výše uvedených oblastí.

Teoreticky je hranice mezi oblastí blízkého a vzdáleného pole dána vztahem:

$r = \lambda/2\pi$, v praxi ovšem tato vzdálenost odpovídá vztahu $r > 5\lambda/2\pi$, viz. obrázek níže.



Obr. 2.: Rozčlenění oblastí okolo zdroje EM záření[4]

Významným parametrem, jenž popisuje EM pole je poměr intenzit elektrického a magnetického pole, impedance vlny $Z = \frac{E}{H}$ [Ω], kde E je intenzita elektrického pole, H intenzita magnetického pole. V oblasti vzdáleného pole, platí pro rovinnou vlnu šířící se v otevřeném prostoru následující vztah $Z = \frac{E}{H} = Z_0 = 377\Omega$. Pro oblast blízkého pole impedance závisí na vlastnostech zdroje EM pole, vzdálenosti místa měření od zdroje záření a vlastnostech prostředí, v němž se vlny šíří.

2.2.2 Stínící účinnost

Stínící účinnost (SE), útlum, vyjádřený v dB je poměr elektrické, nebo magnetické intenzity, či výkonu před stínící rovinou a elektrickou, magnetickou intenzitou nebo výkonu za touto rovinou, viz. následující vztahy:

$$SE = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [dB]$$

$$SE = 20 \log \frac{E_1}{E_2} [dB]$$

$$SE = 20 \log \frac{H_1}{H_2} [dB]$$

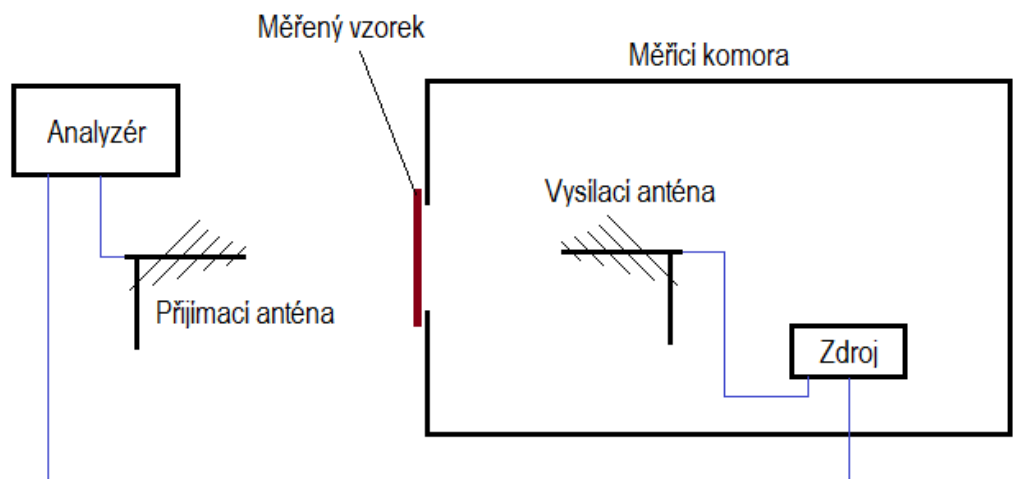
2.3 Metody měření stínící účinnosti

V praxi se nejčastěji setkáváme se dvěma metodami měření stínící účinnosti, je to metoda měření pomocí stínící komory a metoda měření stínící účinnosti na vedení.

2.3.1 Měření pomocí stínící komory

Tato metoda vychází ze standardu vyvinutého pro armádu USA, MIL-STD-285. Metoda popsaná v tomto standardu je pravděpodobně nejpoužívanější metodou pro měření pomocí stínící komory.

Měřicí rozsah u této metody se pohybuje od 100 kHz do 10 GHz. Tento standard definuje frekvence, požadavky na zařízení, konfiguraci antén. Při měření touto metodou je zdroj signálu umístěn dovnitř komory. Měřený materiál je umístěn do otvoru ve zdi komory. Příjímací anténa, měřicí a vyhodnocovací přístroje jsou umístěny vně měřicí komory. Viz. obrázek níže.



Obr. 3.: Měření SE pomocí stínící komory

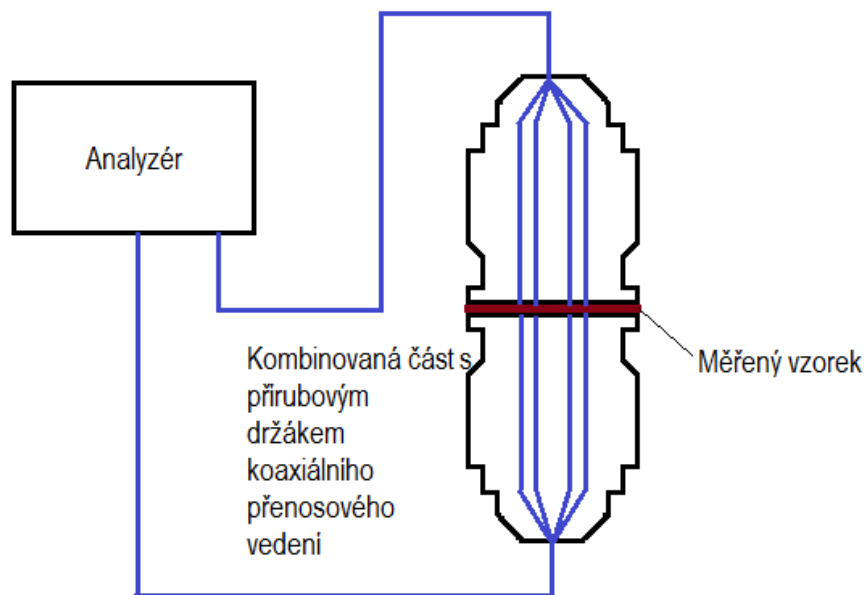
Standard MIL-STD-285 (který pochází z roku 1956), byl později nahrazen standardem IEEE-STD-299 (poslední verze tohoto standardu pochází z roku 2005, v roce 2010 má proběhnout revize tohoto standardu). V tomto standardu je měřicí rozsah rozdělen do tří pásem:

- Nízké kmitočty – od 9 kHz do 20 MHz, v tomto rozsahu je měřena magnetická složka pole (H)
- Rezonanční kmitočty – od 20 MHz do 300 MHz, v tomto rozsahu je měřena elektrická složka pole (E)
- Vysoké kmitočty – od 300 MHz do 18 GHz, v tomto rozsahu je měřena výkonová složka rovinné vlny (P).

2.3.2 Měření stínící účinnosti na vedení

Tato metoda vychází ze standardu ASTM D4935 (American Society for Testing and Materials), který byl vydán roku 1989, v současnosti je nejpoužívanější verze standardu pocházející z roku 1999.

V této měřicí metodě je použito 50Ω koaxiální vedení o vnitřním průměru 33 mm a vnějším průměru 76 mm a speciální adaptér o průměru 133 mm, vybavený přírubou, která spojuje obě části adaptéru. Viz. obrázek níže.



Obr. 4.: Měření SE na vedení

Měřicí rozsah u této metody se pohybuje od 30 MHz do 1,5 GHz. S řádně upevněnou přírubou se chyba měření pro výše rozsah pohybuje okolo ± 2 dB, dynamický rozsah se při použití této metody pohybuje okolo 100 dB.

Měření na frekvencích začínajících okolo 1 MHz, je sice možné, ale jsme omezeni tím, že se na nižších kmitočtech objevuje kapacitní vazba, která nám omezuje dynamický rozsah měřících zařízení, případně musíme použít přesnějších měřících přístrojů.

Pro frekvence nad 1,5 GHz, pole uvnitř zkušebního adaptéru nemá charakter TEM (příčně elektromagnetické) vlny. Horní frekvence by neměla překročit mezní frekvence pro režim TE (příčně elektrická) vlny.

Horní kmitočet je při použití této metody omezen vztahem $f_{MAX} < \frac{c}{D-d}$, kde c je rychlost světla, D a d jsou vnější a vnitřní průměr koaxiálního vedení. Ze vzorce uvedeného výše vyplývá, že horní kmitočet by neměl překročit 1,7 GHz.

Dále je před započítáním samotného měření zkoušeného vzorku, nutné provést kalibrační měření na vzorku referenčním.

2.3.2.1 Předpoklady pro použití této metody

Při použití této metody je dáno několik předpokladů, a to:

- Při použití této metody získáme parametry materiálu pro povrchovou vlnu (oblast vzdáleného pole)
- Rozsah měření je omezen na 30 MHz – 1,5 GHz
- Tloušťka testovaného materiálu nesmí překročit 1/100 vlnové délky EM ve volném prostoru (2mm pro 1,5 GHz; 3 mm pro 1 GHz)
- Pro homogenní materiály, jejichž elektrické a magnetické vlastnosti nesouvisí s frekvencí, stačí provést měření pouze pro několik vybraných frekvencí
- V případě relativně silných materiálů, případně materiálů na jejichž vlastnosti má frekvence vliv je třeba provést měření pro celé frekvenční spektrum
- Je nezbytné zajistit pevné spojení a pevnou vzdálenost mezi oběma polovinami adaptéru, kvůli konstantnímu tlaku na povrch vzorku
- Při frekvencích nad 200 MHz, je třeba provést kalibrační měření, kvůli kompenzaci kapacitní vazby mezi a částmi adaptéru a měřeným vzorkem
- Výsledek získaný pro materiály s různými vlastnostmi, závislými na polarizaci vlny, bude výsledek průměrný
- Odchylka při měření by po kalibraci, neměla překročit mez ± 5 dB. [4]

3 VYSOKOIMPEDANČNÍ POVRCHOVÉ STRUKTURY

3.1 Povrchové vlny

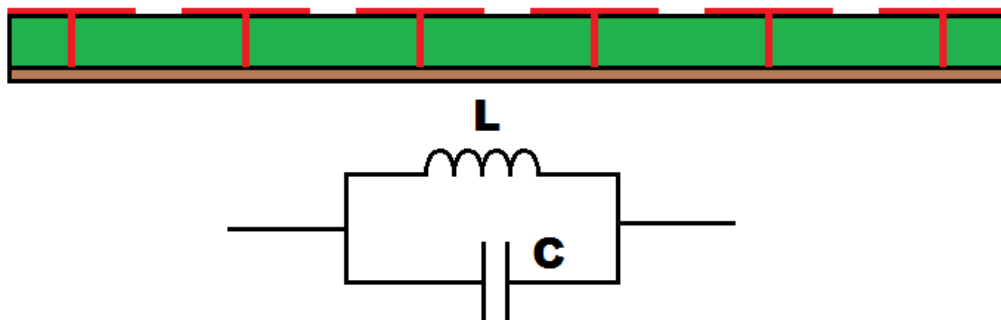
Povrchové vlny si lze představit různými způsoby, v optice je nazýváme povrchové plazmony, na rádiových frekvencích si je můžeme jednoduše představit jako povrchové proudy. Bylo zjištěno, že tyto vlny se vyskytují pouze na vodivých materiálech, resp. na rozhraní dvou materiálů s různou dielektrickou konstantou ϵ , např. kov-vzduch. V těchto případech můžeme vycházet ze stanoviska, že materiály mají danou povrchovou impedanci. V případě kovu povrchová impedance dána tloušťkou vrstvy. Bylo zjištěno, že tloušťka vrstvy je ekvivalentní s hloubkou průniku povrchové vlny, ty tedy nejsou ničím jiným než povrchovými proudy, kterým na těchto frekvencích dobře rozumíme.

3.2 Vysokoimpedanční povrchové struktury

Vytvořením speciální vodivé povrchové struktury na dielektrickém materiálu, je možno změnit radiofrekvenční vlastnosti povrchu, můžeme dosáhnout omezení, zamezení šíření povrchových vln.

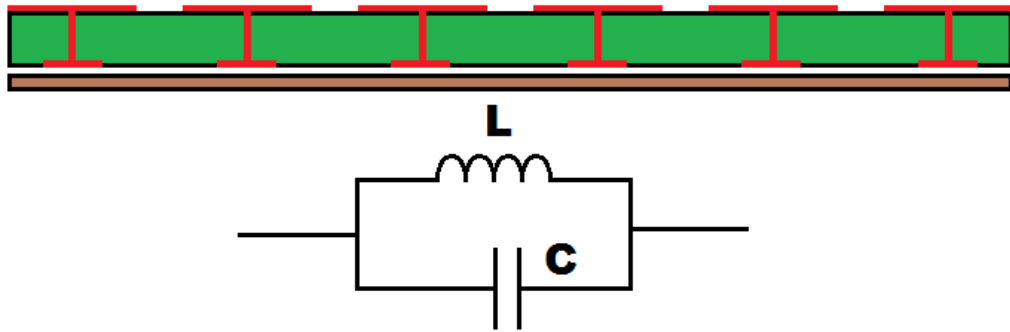
3.2.1 Typy vysokoimpedančních povrchových struktur

Typů vysokoimpedančních struktur existuje celá řada, níže uvádím 3 typy těchto struktur, i s vyjádřením těchto struktur pomocí obvodových prvků. Ve své diplomové práci jsem se podrobněji zabýval povrchovou strukturou 1. typu.



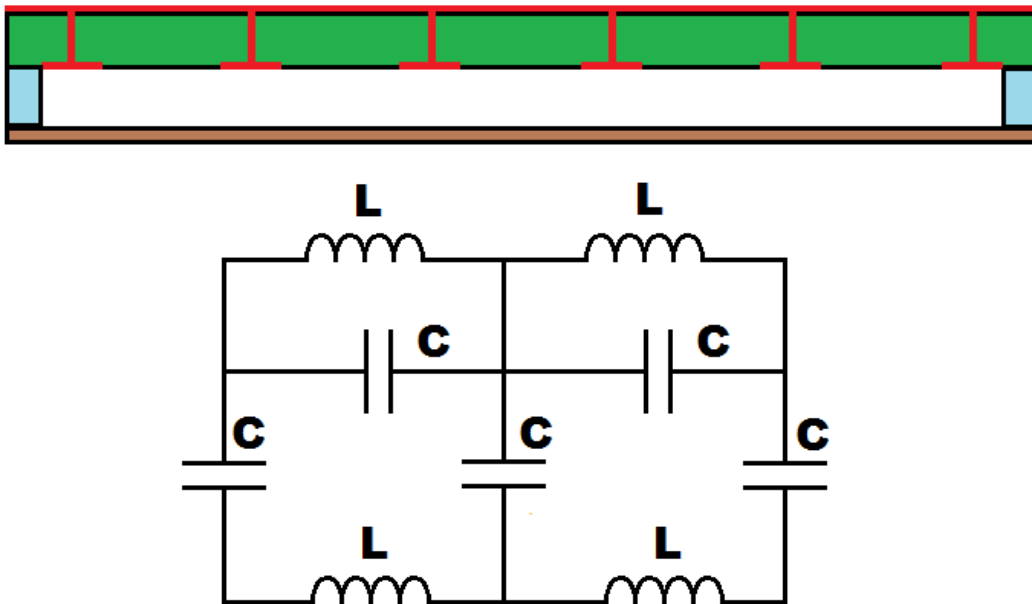
Obr. 5: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 1

Tuto strukturu si lze jednoduše představit jako řadu výčnělků z kovového materiálu, jenž se nachází na nevodivém substrátu, a skrze tento substrát jsou vodivě propojeny s nižší vrstvou. Zapojení pomocí obvodových prvků si lze představit jako rezonanční LC obvod.



Obr. 6: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 2

Tuto strukturu si lze představit jako strukturu uvedenou výše, pouze s tím rozdílem, že propojení povrchové textury se spodní vrstvou je realizováno stejně pouze je zakončeno také ploškou, což je rozdíl od předchozího. Zapojení u této struktury si lze rovněž, jako u struktury uvedené výše představit jako rezonanční LC obvod.



Obr. 7: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 3

Tato struktura má na povrchu celistvou kovovou vrstvu spojenou s nižší vrstvou, jako v předchozím případě je také zakončena ploškami, navíc jsou zde přidány podložky mezi

vysokoimpedanční rovinu a zem, tloušťka těchto podložek odpovídá tloušťce vysokoimpedanční roviny.

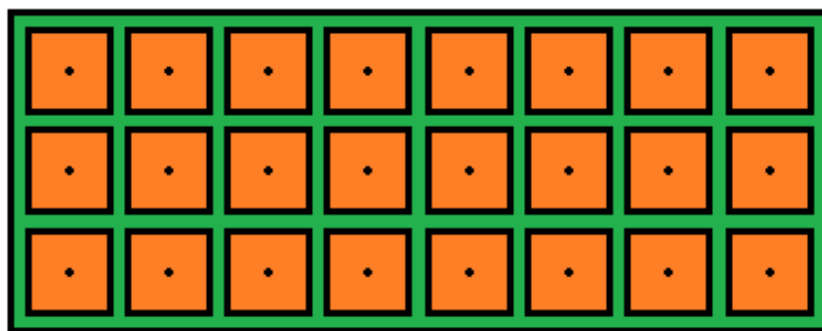
3.2.2 Vysokoimpedanční povrchové struktury – typ 1

Touto strukturou, jak jsem psal již výše jsem se zabýval ve své DP, proto se zde o ní rozepíši podrobněji.

Rovný vodivý povrch má nízkou povrchovou impedanci, zatímco materiály se speciální povrchovou strukturou mají povrchovou impedanci vysokou. Vysokoimpedanční povrch se skládá z řady plochých kovových výčnělků, umístěných na podkladu (např. Cuprexit – měď+substrát), které jsou pomocí vodivých spojek propojeny s nižší vodivou vrstvou. Pro představu obrázky níže znázorňují tuto strukturu v řezu (Obr. 5) a půdorys struktury (Obr. 6).



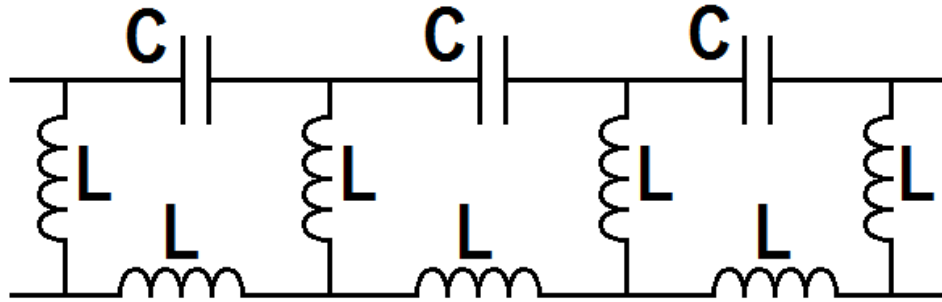
Obr. 8.: Vysokoimpedanční struktura - v řezu



Obr. 9.: Vysokoimpedanční struktura – půdorys

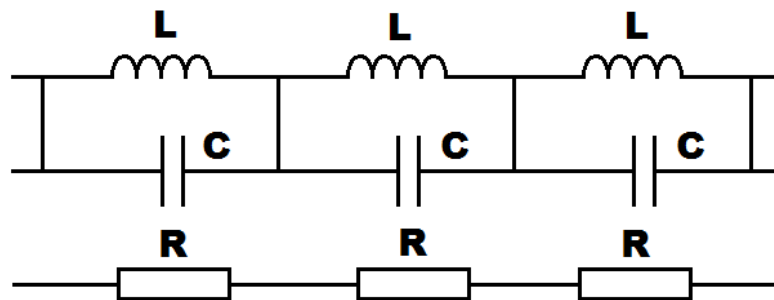
Struktura může být libovolná, já jsem, pro jednoduchost volil čtverec. V práci D. Sievenpiper, z které jsem vycházel a čerpal, můžeme nalézt např. šestiúhelník, či strukturu jenž má povrchovou strukturu ve dvou vrstvách.

Pokud je velikost výstupků v porovnání s vlnovou délkou menší, lze jejich elektromagnetické vlastnosti popsat použitím obvodových prvků – kondenzátorů a cívek, viz. schéma.



Obr. 10.: Vyjádření vysokoimpedanční struktury pomocí obvodových prvků

Blížkost, sousednost kovových výčnělků nám zprostředkovává kapacitu (C), propojení povrchové struktury s nižší vodivou vrstvou představuje indukčnost (L). Tento obvod (struktura) se potom chová jako paralelní rezonanční LC obvod, který působí jako pásmová zadrž.



Obr. 11: Zjednodušené schéma povrchové struktury

Při použití těchto struktur nejde o obvyklou impedanci, povrchové vlny se na těchto strukturách šíří odlišným způsobem než na rovných kovových površích. Těmito povrchy se také mohou šířit TM vlny, jejichž rychlost šíření je mnohem nižší než rychlost světla, a TE vlny které jsou na některých frekvencích vázány na povrchu a na některých jsou naopak ihned vyzářeny.

V případě TE povrchové vlny, je směr šíření elektrického pole rovnoběžný s povrchem, zatímco magnetické pole se šíří z povrchu jakoby ve smyčkách, viz obrázek níže.



Obr. 12.: Šíření TE vlny vysokoimpedanční strukturou

Pro případ šíření TM vlny touto strukturou by bylo znázornění podobné pouze šíření E a H by bylo prohozeno.

Ve frekvenčním pásmu, kde je povrchová impedance velmi vysoká, je velikost tečného magnetického pole malá, je rovnoběžné s velkým elektrickým polem. Takováto struktura bývá někdy popsána jako “magnetický vodič“, což je matematická představa, která je popisována v některých elektromagnetických problémech, ale ve skutečnosti neexistuje. Kvůli vysoké impedanci je téměř bezztrátový a pro určité frekvenční pásmo můžeme tento povrch považovat za druh magnetického vodiče.[5] Tohoto jevu můžeme využít při konstrukci antén, tím se však ve své DP nebudu zabývat.

4 POUŽÍVANÉ PROGRAMY A PŘÍSTROJE

4.1 CST MicroWaveStudio

CST MicroWaveStudio (CST MWS) je speciální nástroj pro 3D modelování vysokofrekvenčních EM komponent. CST MWS nám umožňuje rychlé a přesné analýzy vysokofrekvenčních zařízení jako jsou antény, filtry, planární a vícevrstvé struktury, EMC účinky.

CST MWS nám nabízí 6 různých modulů pro řešení našich úloh, jsou to:

- Transient solver,
- Eigenmode solver,
- Frequency domain solver,
- Resonant solver
- Integral equation solver
- Asymptotic solver

Ve své diplomové práci jsem se setkal pouze s Transient solver, a pouze okrajově jsem se zabýval Eigenmode solver.

Transient solver je univerzální nástroj pokud chceme simulovat šíření EM pole v reálném čase. Kromě specifických funkcí v časové oblasti pomocí Transient solveru také řešíme S-charakteristiky (přenosové charakteristiky) pro širokopásmové oblasti, ty jsem hojně využíval při návrhu vysokoimpedanční roviny a také při simulaci měření měřicí komory.“

Eigenmode Solver je určen k simulaci uzavřených rezonančních struktur, typicky se Eigenmode Solver používá k vytváření disperzních diagramů.

4.2 Agilent VEE

Software Agilent VEE Pro je graficky orientované vývojové prostředí pro tvorbu programových aplikací pro automatizaci měřicích procesů, zpracování dat a řízení. Tvorba programu zjednodušeně odpovídá vytváření vývojového diagramu automatizovaného měřicího procesu. Maximální důraz je kladen na jednoduchost propojení s měřicími přístroji prostřednictvím sběrnic GPIB, LAN, USB, RS-232 či VXI, k dispozici jsou ovladače pro více než 1000 měřicích přístrojů od 70 různých výrobců. Velká pozornost je věnována funkcím pro grafické zobrazení a matematické zpracování naměřených dat. Z tohoto důvodu je do prostředí VEE Pro integrován MATLAB Script od společnosti

MathWorks včetně The MathWorks Signal Processing Toolbox. Díky tomu má uživatel k dispozici pro zpracování výsledků měření více jak 500 analytických a vizualizačních funkcí z programu MATLAB. Pro snadnou komunikaci s ostatními aplikacemi a zdroji dat obsahuje VEE Pro Active X Automation Server a Microsoft .NET Framework, díky kterým je možné snadno získávat data z jiných aplikací, generovat automatická E-mailová hlášení či automaticky obnovovat data na webových stránkách. [3]

4.2.1 Přednosti VEE Pro

- Výrazně zvyšuje produktivitu práce. Uživatelé vykazují až 80-ti procentní zkrácení doby při vytváření programu.
- Široké možnosti použití. Jako například test funkčnosti, ověření návrhu, kalibrace, získávání dat a jejich kontrola.
- Nástroje pro vstupně-výstupní přenos. Umožňuje přenos a komunikaci po sériové lince, LAN, PC plug-in card. Umožňuje importovat knihovny od široké palety výrobců měřicí techniky.
- Používá prvek ActiveX pro automatické řízení jiných programů, např. MS Word, Excel a Access které používá k exportu a ukládání získaných dat a jejich následného použití.
- Zvyšuje výkonnost a usnadňuje tvorbu rozsáhlejších programů. VEE obsahuje vlastní kompilační program a pokročilé profesionální vývojové nástroje určené pro tvorbu rozsáhlých programů.
- Podpora textových jazyků Visual Studio .NET. Veškeré textové jazyky, které umožňuje Visual Studio .NET mohou být použity i ve VEE Pro. VEE Pro taktéž umožňuje i použití jiných textových jazyků jako například C/C++, Visual Basic, Pascal a Fortran. [3]

4.3 Rohde & Schwarz SM300

Přístroj R&S SM300 je signálový generátor pro aplikace v kmitočtovém pásmu od 9 kHz do 3 GHz. Vyznačuje se velkým rozsahem funkcí, vynikajícími technickými parametry a kompaktním provedením. Generátor nabízí široké možnosti použití pro laboratoře, servisní střediska nebo jako flexibilní měřicí přístroj v automatických výrobních systémech.

Generátor je také možno připojit k PC prostřednictvím rozhraní USB. Této možnosti jsem využil při vytváření ovládacího programu v prostředí Agilent VEE.

4.3.1 Technické údaje v kostce

Tab. 1: Technické parametry R&S SM300

Kmitočtový rozsah	vf: 9 kHz až 3 GHz; nf: 20 Hz až 80 kHz
Rozlišení kmitočtu	0,1 Hz
Doba astavení kmitočtu	< 10 ms
Režimy modulace	AM/FM/φM/impulzní/IQ
Rozlišení úrovně	0,1 dB
Neurčitost úrovně	< 1 dB (pro úrovně > -120 dBm)
Rozsah úrovní	-127 dBm - +13 dBm
Doba nastavení úrovně	< 200 ms
Fázový šum SSB	< -95 dBc (1 Hz) (při f = 1 GHz, Δf = 20 kHz)
Interní modulační generátor	20 Hz až 80 kHz

4.4 Rohde & Schwarz FS300

Přístroj R&S FS300 je velmi přesný spektrální analyzátor s kmitočtovým rozsahem 9 kHz až 3 GHz, využívá moderní digitální technologie zpracování signálů. FS300 je univerzální spektrální analyzátor pro rozsáhlá měření v laboratořích, servisních organizacích nebo ve výrobních provozech.

Spektrální analyzátor FS300 je stejně jako signálový generátor SM300 možno připojit k PC prostřednictvím rozhraní USB.

4.4.1 Technické údaje v kostce

Tab. 2: Technické parametry R&S FS300

Kmitočtový rozsah	9 kHz až 3 GHz
Rozlišovací šířka pásma (-3 dB)	200 Hz až 1 MHz
Šířka pásma videosignálu	10 Hz až 1 MHz
Průměrná zobrazovací úroveň šumu	< -110 dBm, typ. -115 dBm (300 Hz)
Rozsah bez intermodulace	< -70 dBc při vstupní úrovni -36 dBm
Fázový šum SSB, posuv 10 kHz	< -90 dBc (1 Hz)
Neurčitost úrovně	< 1,5 dB, typ 0,7 dB
Detektor	špičkový
Měřicí funkce	TOI, výkon TDMA, čítač kmitočtu, šumový kurzor

PRAKTICKÁ ČÁST

5 NÁVRH VYSOKOIMPEDANČNÍ ROVINY

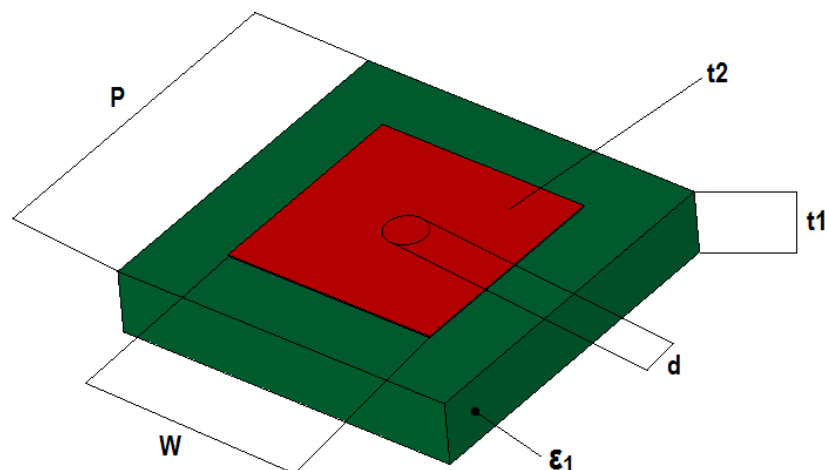
V praktické části své diplomové práce jsem se nejprve zabýval návrhem vysokoimpedanční roviny (Photonic Band Gap - PBG). Návrh roviny probíhal v programu CST MicroWaveStudio (CST MWS).

Jelikož by výroba PGB roviny zabrala velmi mnoho času, navrhoval jsem ji místo pro zádržné pásmo 8 - 12 GHz, pro zádržné pásmo 4,5 - 5,5 GHz, s přihlédnutím k tomu, že místo reálného měření proběhne simulace v CST MWS. Rozsah zádržného pásma jsem musel snížit s přihlédnutím k možnostem programu CST MWS. Program CST MWS při simulacích rozděluje simulovanou oblast do buněk, jejichž velikost je závislá na frekvenci (s rostoucí frekvencí nám roste počet buněk).

Dále pak byl další problém, že při simulaci stínící komory je vzdálenost mezi měřeným vzorkem a komorou 0,1 mm, kvůli takto nízké vzdálenosti bylo potřeba uměle navýšit hustotu sítě právě v této mezeře, návrhem komory se ještě ale budu zabývat níže.

5.1 Vysokoimpedanční rovina

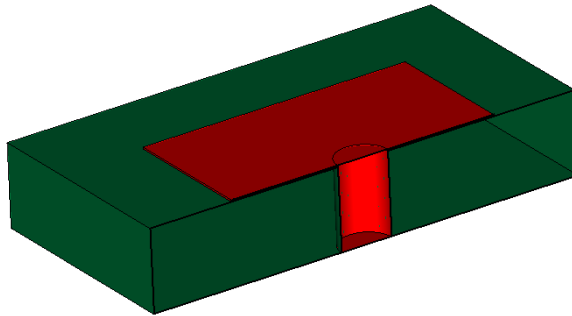
Kvůli relativně snadné dostupnosti jsme pro výrobu, simulaci PBG zvolili materiál Cuprexit. Na obrázku níže je, pro jednoduchost, zobrazena jedna buňka této struktury s patřičným popisem rozměrů.



Obr. 13: 1 buňka PBG buňky

P – perioda buněk, W – rozměr samotné buňky, t_1 – tloušťka substrátu, t_2 – tloušťka kovové vrstvy, d – průměr otvoru propojujícího povrchovou vrstvou s nižší vrstvou, ϵ_1 – permitivita substrátu.

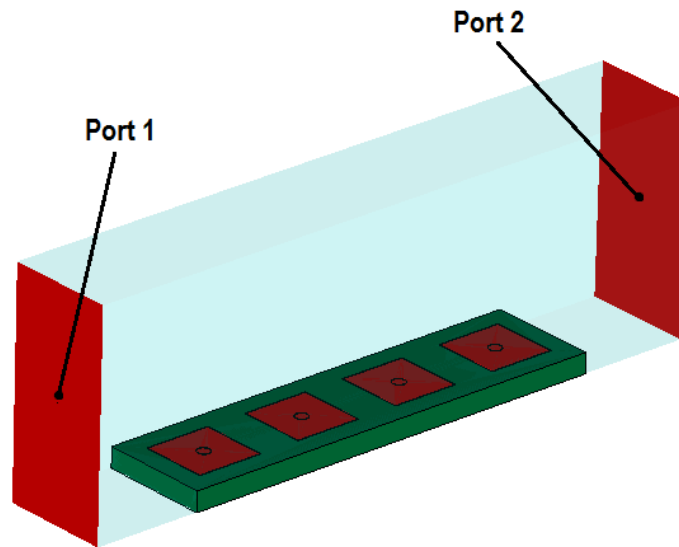
Dále zde pro ilustraci uvádím, jak tato buňka vypadá v řezu.



Obr. 14: Buňka PBG – v řezu

5.1.1 Tvorba 3D geometrie

Nejprve bylo v CST MWS potřeba definovat jednotlivé rozměry (P , W , t_1 , t_2 a d). Následovalo vytvoření 3D modelu PBG, jenž spočívalo ve vytvoření jednotlivých objektů jako je okolní prostředí (vzduch – $\epsilon = 1$, výška okolní vzduchové vrstvy byla stanovena jako 10-ti násobek tloušťky substrátu, šířka shodná s velikostí buňky P a délka pro 4 buňkový model, jako 6-ti násobek P), substrát ($\epsilon = 5$, šířka P , délka $4xP$, tloušťka t_1), kovové výstupky (materiál – měď, $\gamma = 56 \text{ MS.m}^{-1}$, rozměr W , tloušťka t_2), „průchodka“ propojující horní vrstvou s podkladem (materiál – měď, $\gamma = 56 \text{ MS.m}^{-1}$, průměr d , tloušťka t_1+t_2). Po vytvoření 3D geometrie jsem provedl další nezbytná nastavení, okolních podmínek, budících portů a frekvenčního rozsahu. Na obrázku níže uvádím vytvořený 4 buňkový model s již definovanými budícími porty.



Obr. 15: Simulovaná PBG struktura (s budícími porty)

5.1.2 Návrh vhodných rozměrů

Výše uvedenou strukturu jsem se snažil naladit, tak aby se zádržné pásmo pohybovalo v rozmezí $f_{s1} = 4,5 \text{ GHz}$, $f_c = 5 \text{ GHz}$ $f_{s2} = 5,5 \text{ GHz}$.

Při volbě vhodných rozměrů jsem vycházel z parametrické studie analýzy chování. Postup při této metodě byl následovný. Měnil jsem pouze rozměry P a W, nejprve jsem zvolil rozměr P, a postupným měněním rozměru W jsem se pokoušel dosáhnout $f_c = 5 \text{ GHz}$. Pro každou dvojici rozměrů jsem si zapsal frekvenci f_c a vytvořil si tabulku, z hodnoty z této tabulky jsem si poté přenesl na milimetrový papír a určil nejvhodnější rozměry. Tabulku uvádím níže, grafické znázornění příkládám v příloze.

Rozměry t_1 , t_2 a ε – u substrátu – jsem vůbec neměnil, jelikož ty jsou již pevně dány, resp. t_1 a t_2 by se sice daly pouze zmenšit, ale tuto variantu jsem neuvažoval. Rozměr d jsem zachoval 1 mm, zkoušel jsem jej sice zmenšovat až na 0,75 mm, ale změna nebyla příliš markantní, při zvětšení nad 1mm, zkoušel jsem 1,5 mm a 2 mm, se stínící účinnost ve mnou definovaném rozsahu 1 – 6 GHz pohybovala v rozmezí 10-20 dB (-10 - -20 dB). Rozhodl jsem se proto d zachovat 1 mm.

Tab. 3: Parametrická studie analýzy chování

P [mm]	W [mm]	fc [GHz]
7,50	5,50	5,21
7,50	5,75	5,10
7,50	6,00	4,96

P [mm]	W [mm]	fc [GHz]
7,75	5,50	5,15
7,75	5,75	5,07
7,75	6,00	4,96

P [mm]	W [mm]	fc [GHz]
8,00	5,25	5,12
8,00	5,50	5,06
8,00	5,75	5,00
8,00	6,00	4,92

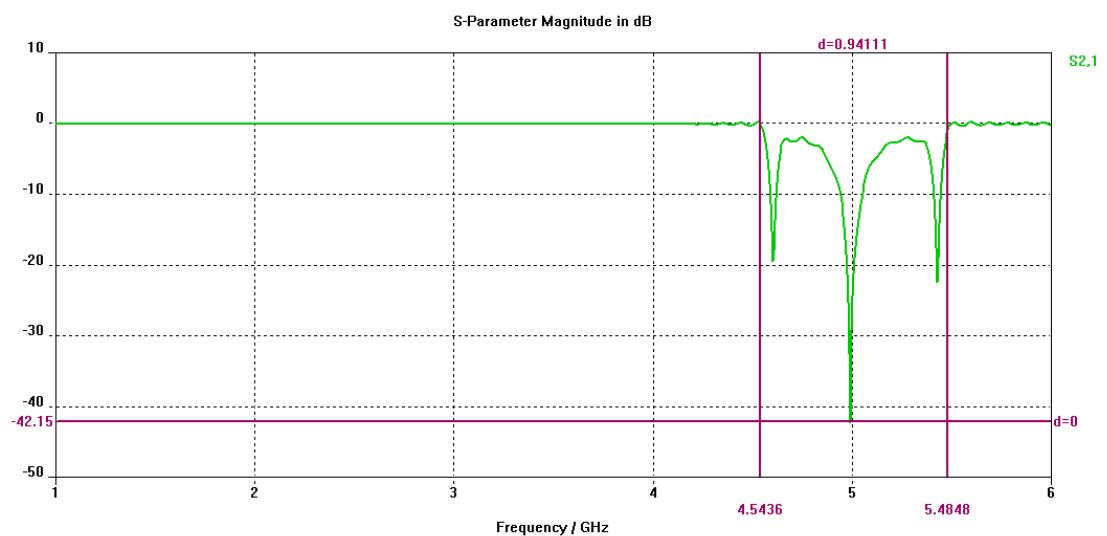
P [mm]	W [mm]	fc [GHz]
8,25	5,25	5,04
8,25	5,50	4,97
8,25	5,75	4,92

P [mm]	W [mm]	fc [GHz]
8,50	5,00	5,25
8,50	5,50	4,91
8,50	5,75	4,85

d [mm]	1
t1 [mm]	1,57
t2 [mm]	0,035
ϵ_1	5

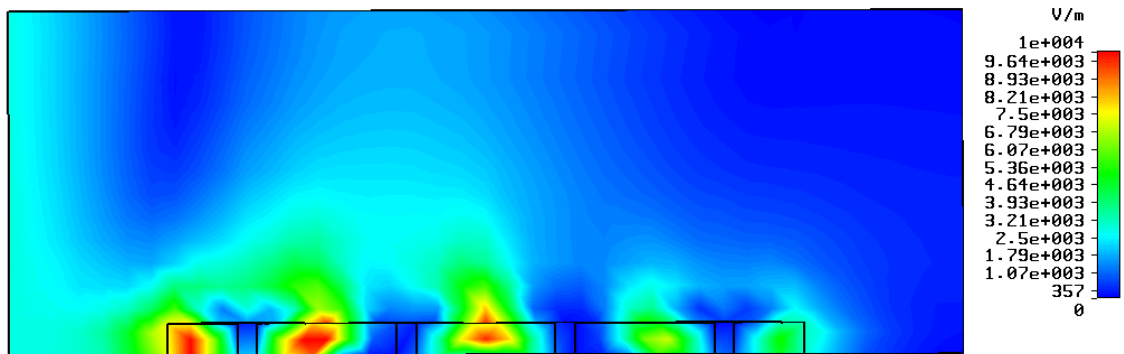
Výsledná velikost buňky $P = 8$ mm a $W = 5,75$ mm (v tabulce výše označeno červeně).

Získané frekvenční spektrum pro tuto strukturu, je uvedeno na obrázku níže.



Obr. 16: Frekvenční charakteristika PBG struktury – 4 buňky

Jak je z obrázku výše patrné, maximální stínící účinnosti tato struktura dosahuje na $f_c = 5$ GHz, a to $-42,15$ dB, rozsah pásma je $4,5436 - 5,4848$ GHz ($0,94111$ GHz), jsou tudíž rozměry této struktury dostatečné. Dále zde pro ilustraci přikládám řez strukturou, rovina řezu Y-Z, $x = 4,00$ (tj. středem struktury), na obrázku níže je znázorněno, jak se nám mění intenzita elektrického pole při průchodu EM vlny strukturou.



Obr. 17: Intenzita el.pole při průchodu PBG strukturou – 4 buňky

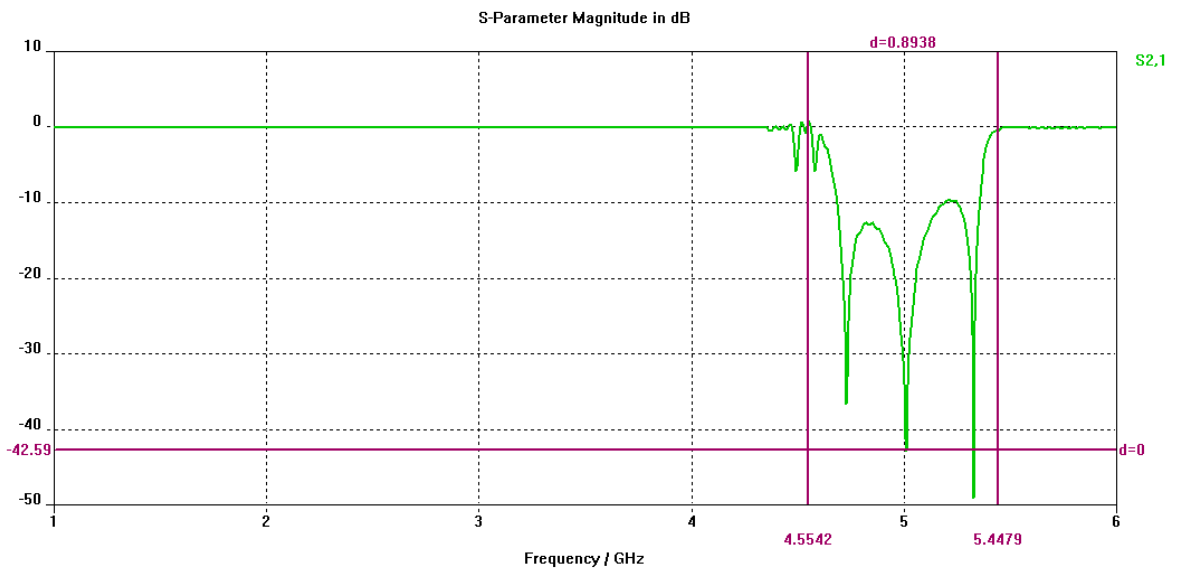
Pro představu a pro zkrácení času simulace byl rozměr 4×1 buňka dostačující, ovšem pro obložení vzorku na měřící komoře jsme raději uvažovali použít model, který bude mít těchto buněk více.

5.1.3 Simulace navržených PBG

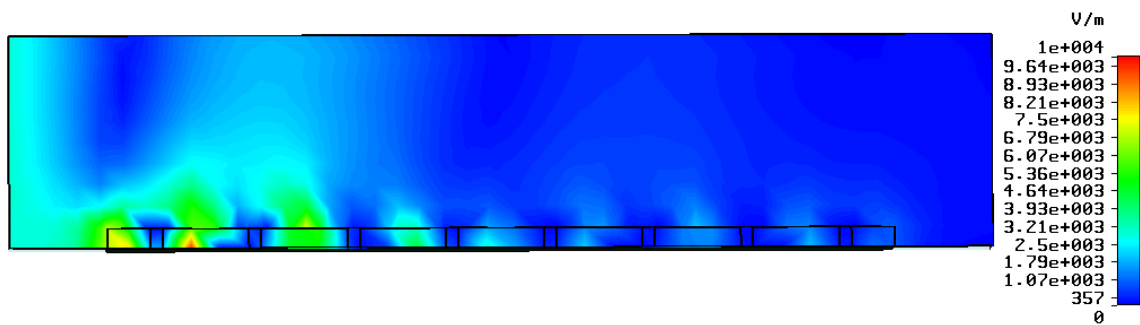
Pro obložení komory jsem uvažoval vrstvu 10 buněk, jelikož by mě tuhle strukturu nedovolily rozměry komory, rozhodl jsem se obložit horní+spodní část vzorku rovinou o rozměrech 62×8 buněk a pravou a levou stranu vzorku rovinou o rozměrech 42×10 buněk. Pro každou z uvedených rovin jsem dále provedl samostatnou simulaci.

5.1.4 PBG 62×8 buněk

V tomto případě jsem nesimuloval celou rovinu, 62×8 buněk, ale pouze 1 řadu o 8 buňkách, z níže uvedené charakteristiky je patrné, že šířka zádržného pásma se snížila na necelých $0,9$ GHz, stínící účinnost na $f = 5$ GHz, zůstává v podstatě stejná, zde je na $49,59$ dB.



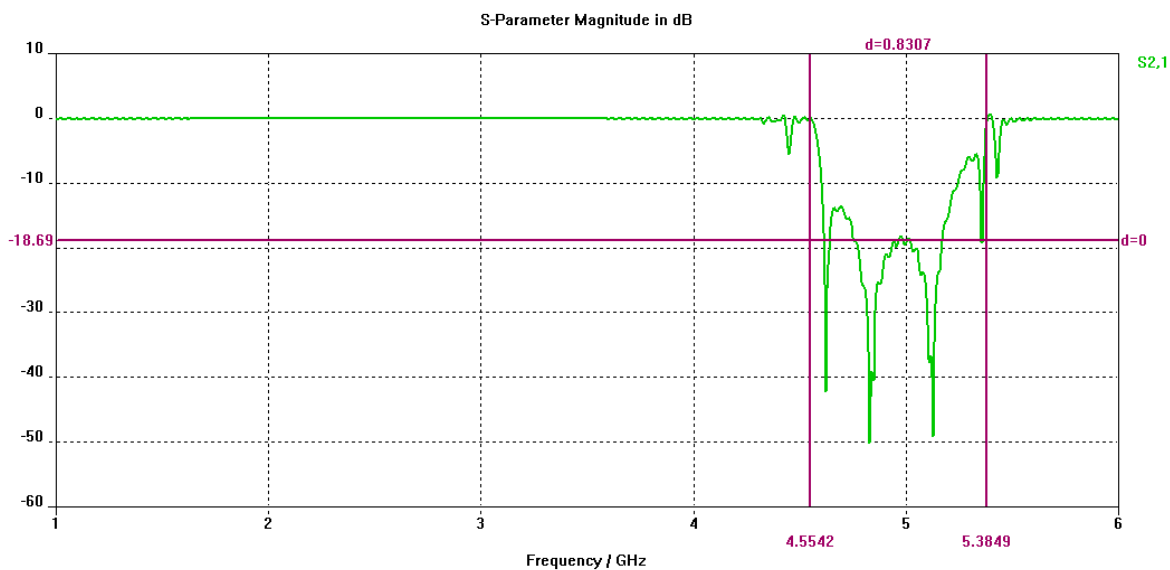
Obr. 18: Frekvenční charakteristika PBG struktury – 8 buňek



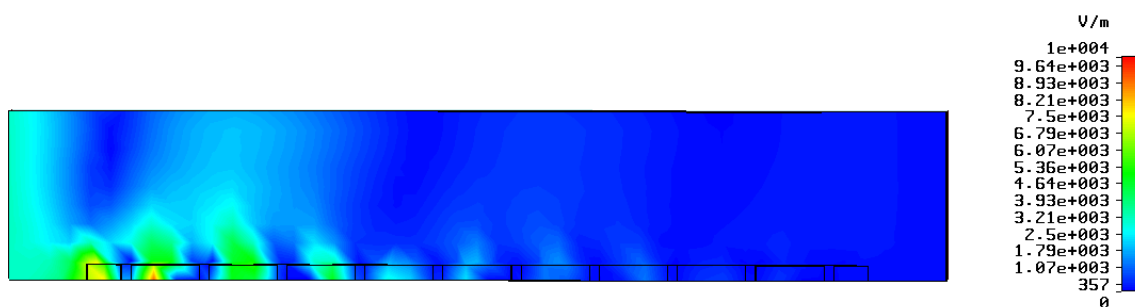
Obr. 19: Intenzita el.pole při průchodu PBG strukturou – 8 buňek

5.1.5 PGB 42x10 buněk

Simulace této roviny probíhala obdobným způsobem jako v předchozím případě, jak je patrné z níže uvedené charakteristiky, došlo nám při nárůstu buněk opět k dalšímu snížení šířky zádržného pásma a to na 0,83 GHz. Stínící účinnost na sledované frekvenci 5 GHz se nám ovšem rapidně změnila z cca 42 – 43 dB, v předchozích případech, na 18,7 dB, avšak i tato hodnota je pro nás dostačující, jak si můžeme všimnout na obrázku znázorňujícím intenzitu elektrického pole.



Obr. 20: Frekvenční charakteristika PBG struktury – 10 buňek



Obr. 21: Intenzita el.pole při průchodu PBG strukturou – 10 buňek

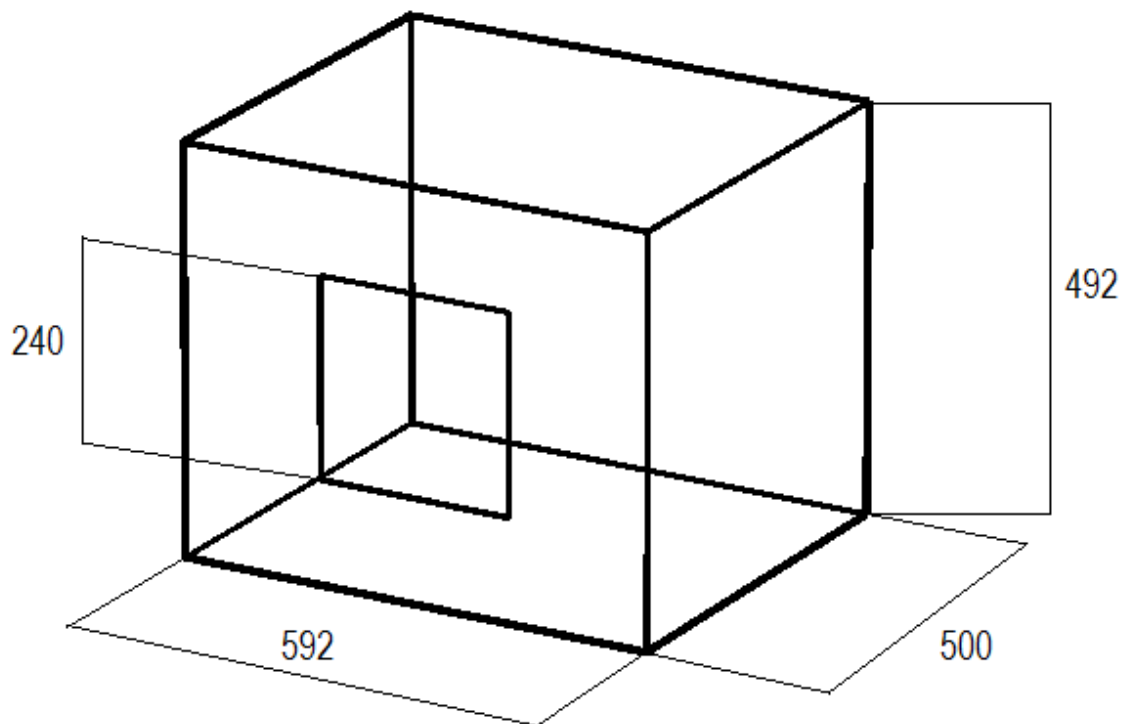
6 SIMULACE MĚŘÍCÍ KOMORY

Návrh stínící komory na níž se simulovalo mnou navržená vysokoimpedanční rovina jsem neprováděl, dostal jsem pouze rozměry již hotové měřicí komory a komoru jsem pouze převedl jako model do programu CST MWS.

6.1 Rozměry měřicí komory

Měřicí komora je vyrobena z 2 mm Fe nerez plechu ($\gamma = 9,93 \text{ MS.m}^{-1}$). V reálném provedení je krabice ještě opatřena úchyty, ale níže uvedený model byl pro moji simulaci dostačující, uvádím tedy jen nutné vnější rozměry, kompletní sestavu, jak jsem ji dostal od pana S. Goňi přikládám v přílohách na samostatném listu.

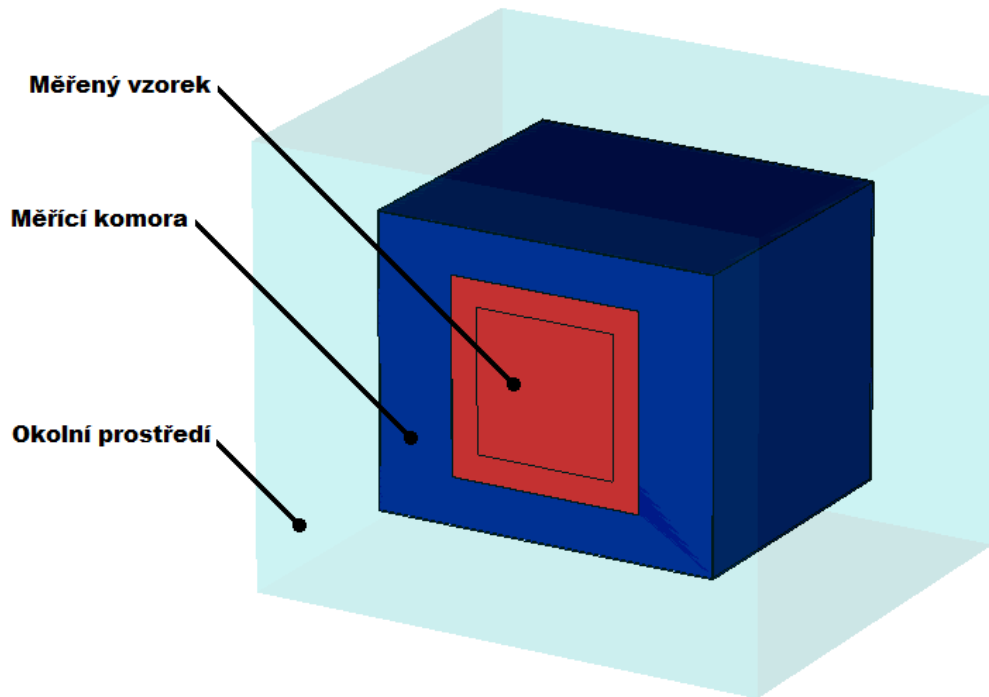
Další částí je měřený vzorek, ten na tomto výkrese není zanesen, na obrázku modelu komory již však je vidět. Vzorek je vyroben z duralu ($\gamma = 34 \text{ MS.m}^{-1}$) o tloušťce 1 mm a hraně 330 mm, umístěn je 0,1 mm před přední stěnou krabice (před otvorem).



Obr. 22: Nákres měřicí komory

6.2 Model měřící komory

Ze zadaných rozměrů jsem jako v případě PBG, vytvořil model měřící komory v programu CST MWS, výsledný model (neobložené měřící komory) i s okolním prostředím je na obrázku níže.



Obr. 23: Model měřící komory

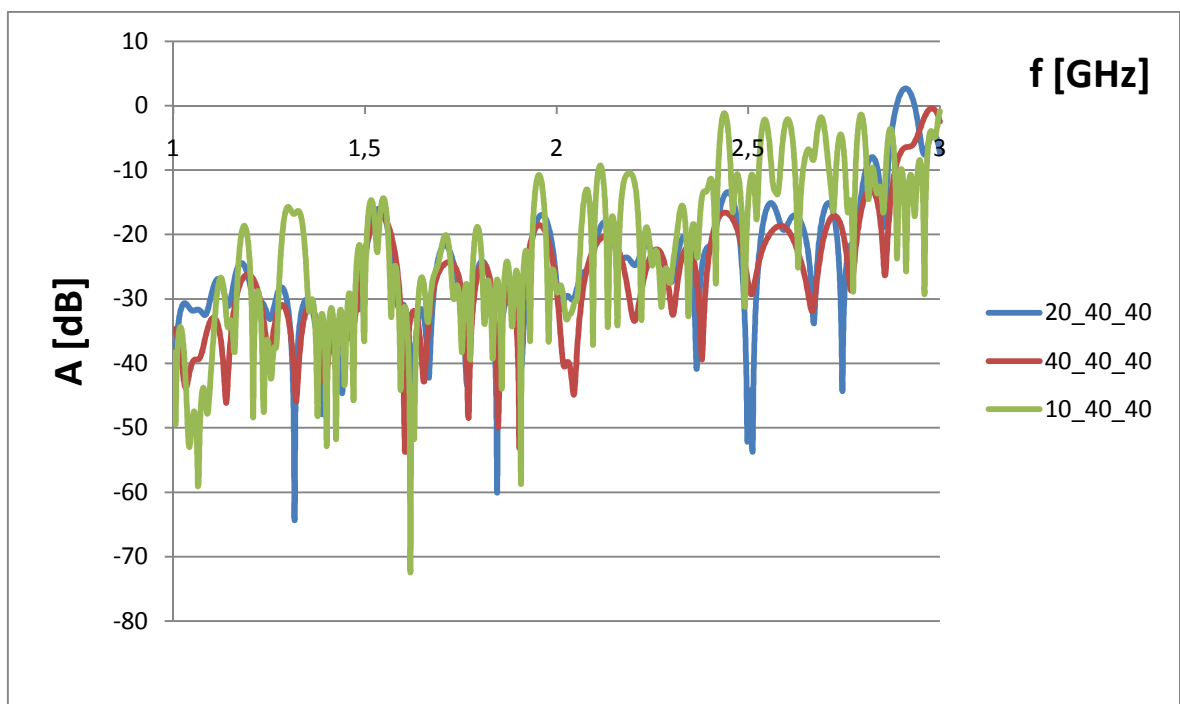
6.3 Nastavení simulace měřící komory

Po nastavení nutných podmínek pro provedení simulace, definování okrajových podmínek a rovin symetrie, frekvenčního rozsahu, budící rovinné vlny, a tzv. field monitors, jsem již mohl přistoupit k simulaci samotné

Při simulaci měřící komory jsem provedl nejprve pokusné měření pro frekvenční rozsah 1 – 10 GHz. Jelikož se při této simulaci uvnitř měřící komory neobjevovalo elektrické pole, a to i přes to že mezi měřeným vzorkem a měřící komorou byla mezera 1 mm. Musely se tedy do mezery mezi vzorek a komoru přidat tzv. FIXPOINTY po přidání fixpointů simulace proběhla již v pořádku a elektrické pole jsem již uvnitř komory detekoval.

V dalším kroku jsem mezeru měřeným vzorkem a měřící komorou zmenšil na 0,1 mm. Pro tento případ už jsem musel měnit parametry, jenž se týkají síťování, jsou to sice tyto hlavní

3 – Lines per wavelength, Lower mesh limit, Mesh line ratio limit – tedy – Počet buněk, nejmenší vzdálenost mezi buňkami, vzdálenostní poměr, vše je vztaženo k vlnové délce λ . Všechny tyto vlastnosti by se daly vyjádřit jako λ/X , kde za X dosazujeme patřičné hodnoty, defaultně je nastaveno 10-10-10. Na pokusném vzorku, kdy jsem frekvenci ponechal pouze v rozsahu 1 – 3 GHz, jsem zkoušel měnit jednotlivé parametry, v případě, že jsem změnil první parametr, narůstal nám počet buněk, v případě dalších 2 parametrů se sice počet buněk neměnil, pouze se nám měnil čas simulace. Nejideálnější se mi jevily hodnoty 40-40-40, při těchto hodnotách jsme ale nebyli schopni simulovat větší frekvenční rozsah, proto jsem pro simulaci zvolil hodnoty 20-40-40, simulace při těchto hodnotách je již celkem přesná a výsledky uspokojivé. Pro představu při tomto nastavení a frekvenčním rozsahu 1 – 6 GHz se počet buněk pohyboval okolo 8 100 000 a čas samotné simulace trval cca. 5 – 7 hodin. Pro zajímavost uvádím, jak se lišily charakteristiky pro jednotlivá nastavení.



Obr. 24: Studie nastavení limitu “meshování“

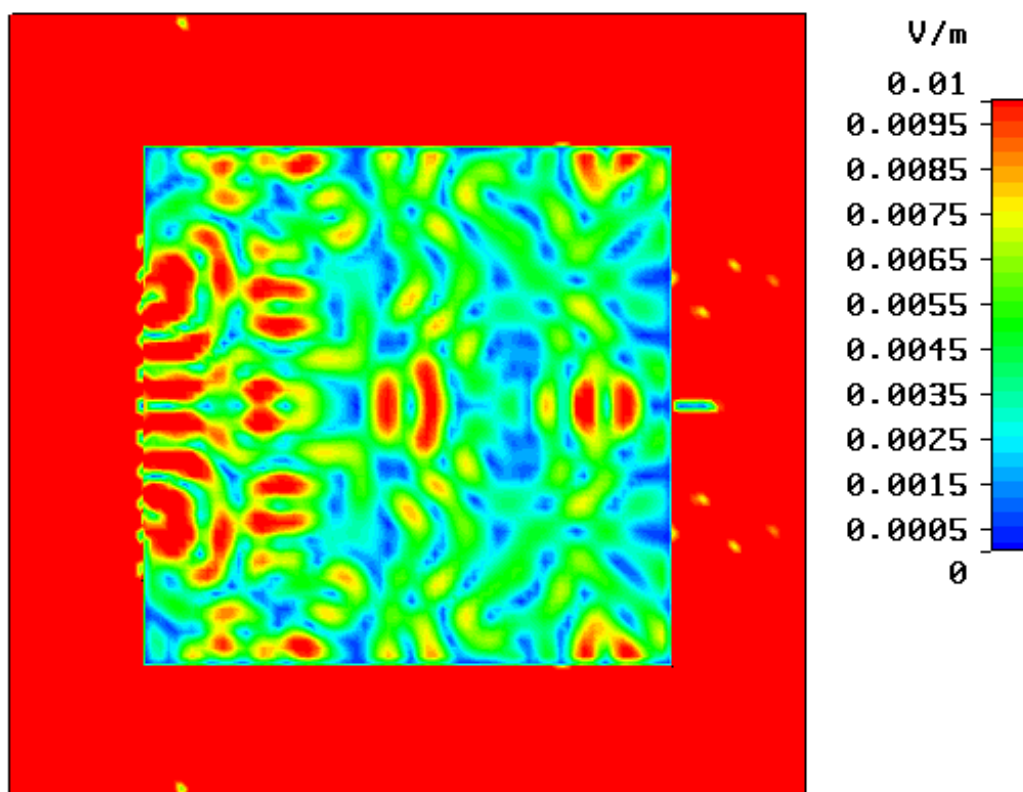
6.4 Simulace měřicí komory

Simulace měřicí komory probíhala ve 3 krocích, nejprve jsem simuloval samostatnou krabici, poté jsem na komoru umístil navrženou stínící rovinu, nejprve na horní a spodní okraj měřeného vzorku a jako poslední krok jsem měřený vzorek zcela obložil stínícími rovinami.

6.4.1 Simulace neobložené stínící komory

Po provedení všech potřebných nastavení jsem přistoupil k samotné simulaci neobložené měřící komory.

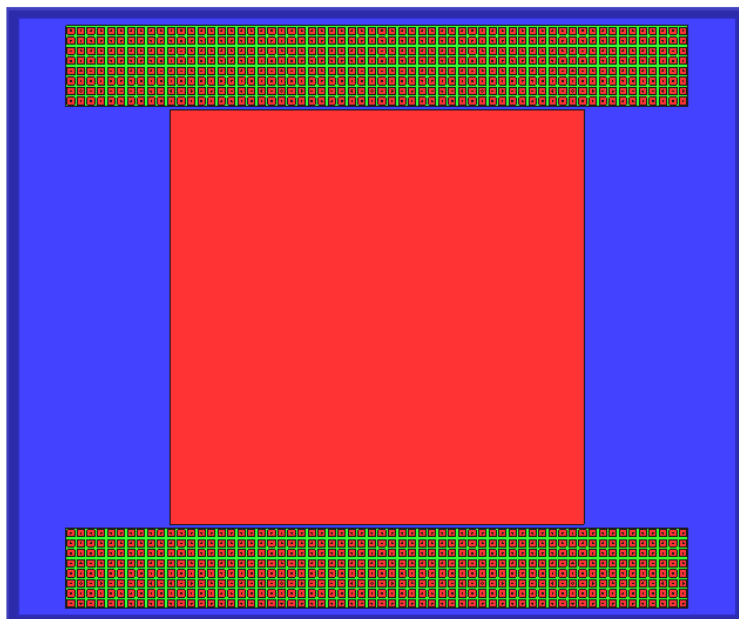
Na obrázku níže příkládám řez měřící komorou, na které můžeme vidět intenzitu elektrického pole uvnitř komory z obrázku jsou patrné pouze obrysy komory, simulovaný vzorek se nachází v levé části komory, stejně tak budící rovinná vlna je umístěna v levé části modelu.



Obr. 25: Intenzita el.pole – neobložená měřící komora

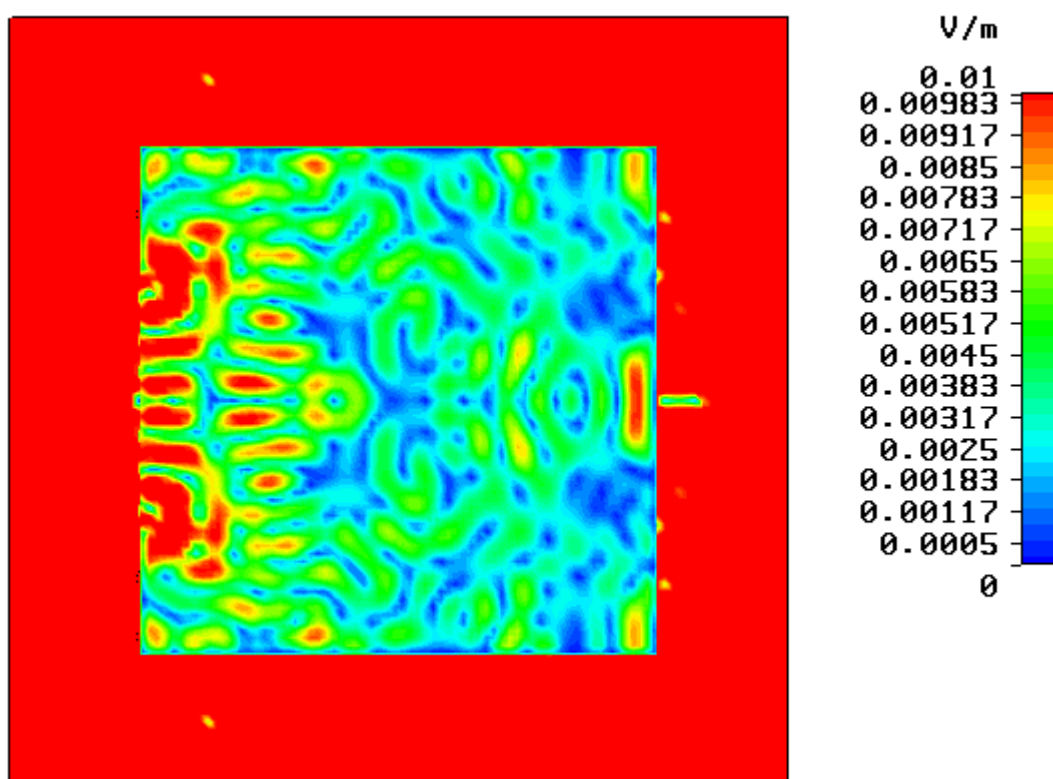
6.4.2 Simulace komory obložené ze dvou stran

Po úspěšném proběhnutí simulace neobložené komory, jsem na stěnu komory přidal navržené PBG, roviny jsem umístil pod a nad měřený vzorek s mezerou 3 mm, jak je vidět na obrázku níže.



Obr. 26: Obložená měřicí komora – čelní pohled

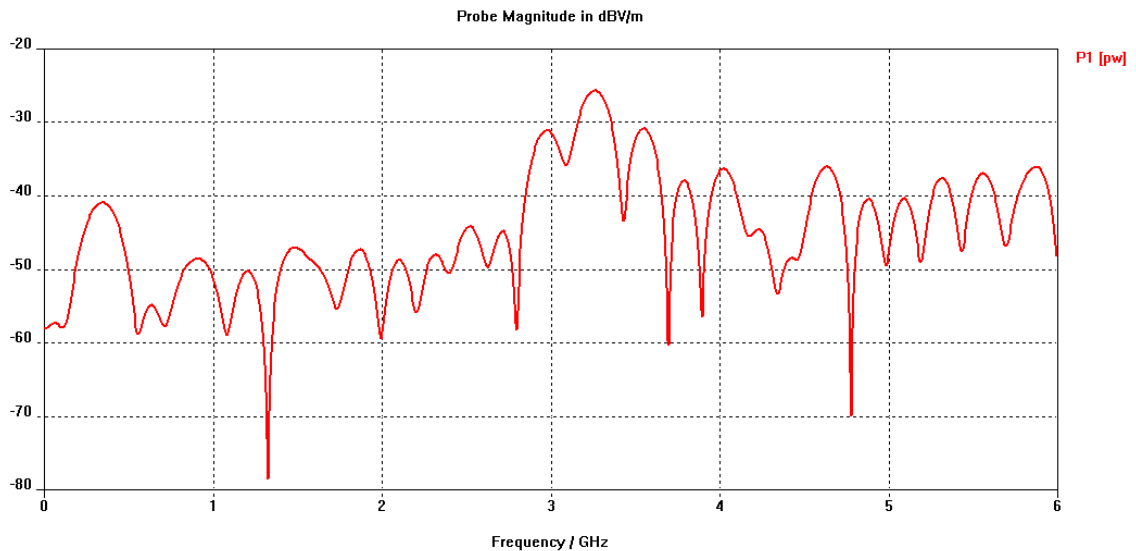
Na obrázku níže opět přikládám řez měřicí komorou, z obrázku je patrné, že použitím PBG se nám intenzita elektrického pole uvnitř měřicí komory snížila.



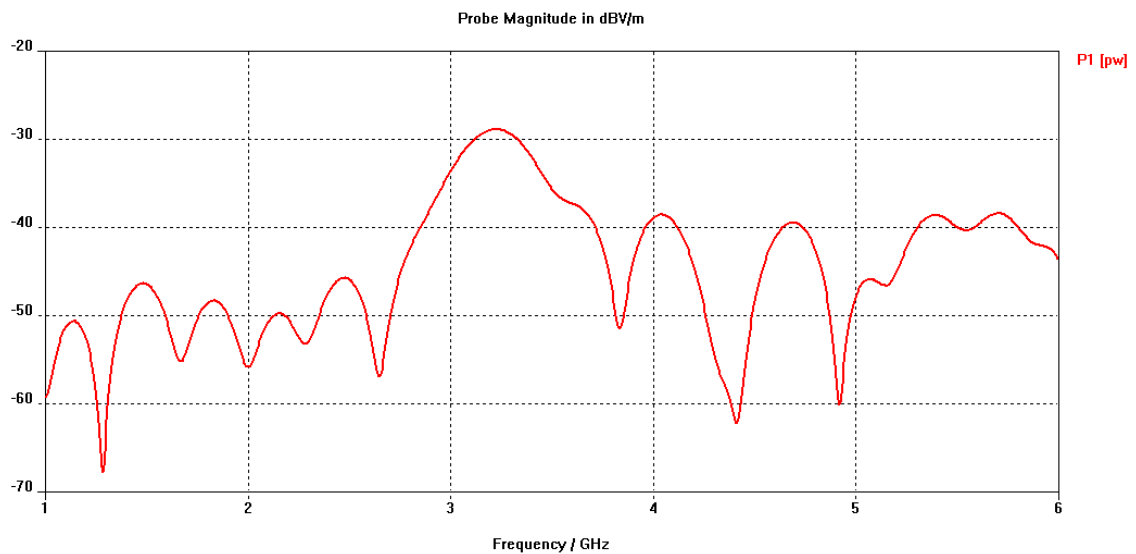
Obr. 27: Intenzita el.pole – obložená měřicí komora

6.4.3 Výsledky

Na výše uvedených obrázcích je sice určitá změna vidět avšak raději ještě přikládám výsledky ze sond jenž jsou umístěny ve středu měřící komory



Obr. 28: Stínící účinnost – neobložená měřící komora



Obr. 29: Stínící účinnost – obložená měřící komora

Jak je z grafů patrné k určitému zvýšení stínící účinnosti v pásmu 4,5 – 5,5 GHz došlo, avšak není až tak markantní jak by se dalo čekat. Možným vysvětlením je, že navržená PGB sice zabrání, aby nám dovnitř komory vnikaly proudy, které tečou po povrchu komory, ale již však nezabrání proudům tekoucím po měřeném vzorku (duralu), pro názornost, jsem na obrázku níže nakreslil řez čelní stranou komory. Dále je třeba uvést že při simulaci měřící komory je vzdálenost mezi komorou a měřeným vzorkem konstantní

(0,1 mm), ve skutečnosti však tato mezera může být v některých místech větší, někde menší. V našem případě kdy jsem simuloval celokovový duralový plech, by tím pádem došlo k vodivému spojení mezi komorou a měřeným vzorkem



Obr. 30: Proudý tekoucí po povrchu komory

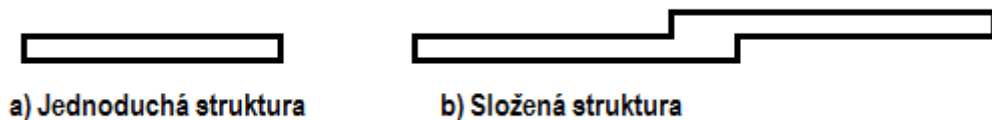
6.4.4 Řešení

Vyřešení tohoto problému by bylo asi následující, viz obrázek níže. V případě obložení jak měřící komory, tak měřeného vzorku navrženou PBG, by mělo dojít ke zvýšení útlumu, mělo by se nám podařit dosáhnout jak omezení proudů tekoucích po povrchu komory, tak i proudů tekoucích po povrchu vzorku



Obr. 31: Vyřešení problému povrchových proudů

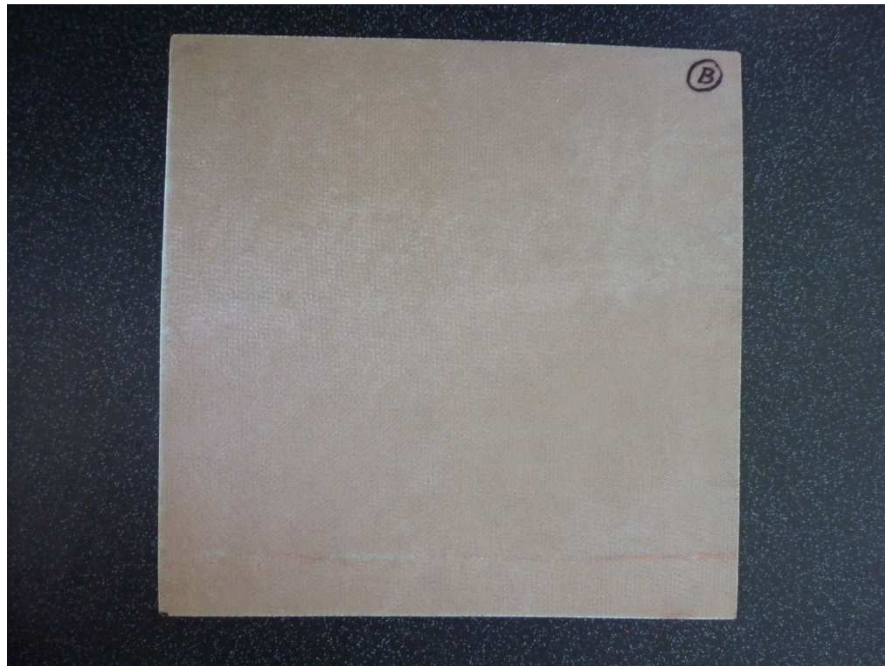
Na další diskuzi by pak bylo, zda by stačilo komoru obložit čtyřmi jednotlivými PBG po obvodu komory, kolem měřeného vzorku, a čtyřmi jednotlivými PBG po obvodu měřeného vzorku, zda by bylo potřeba, jak je uvedeno na obrázku níže jednoduchou strukturu (kterou jsem v této DP používal já), či strukturu ze dvou v určitém místě navzájem se překrývajících PBG. Tohle je již však téma na další diskuzi.



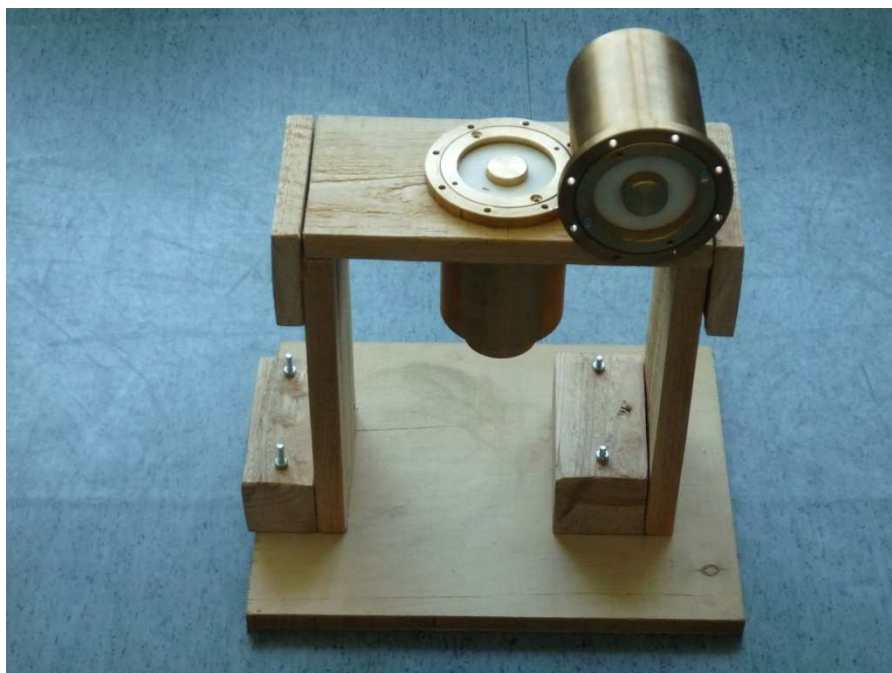
Obr. 32: Struktury pro obložení

7 MĚŘENÍ STÍNÍCÍ ÚČINNOSTI KOMPOZITNÍHO MATERIÁLU

Na závěr své DP jsem se zabýval měřením SE kompozitního materiálu. Jelikož výstup z programu VEE Pro 7.5 nebyl dostatečně důvěryhodný, musel jsem tento vzorek proměřit ručně. Fotografie měřeného vzorku a měřícího vedení (bez propojovacích kabelů), uvádím na fotografiích níže.



Obr. 33: Vzorek měřeného kompozitního materiálu



Obr. 34: Měřící vedení (bez propojovacích kabelů)

7.1 Nastavení měření a měření

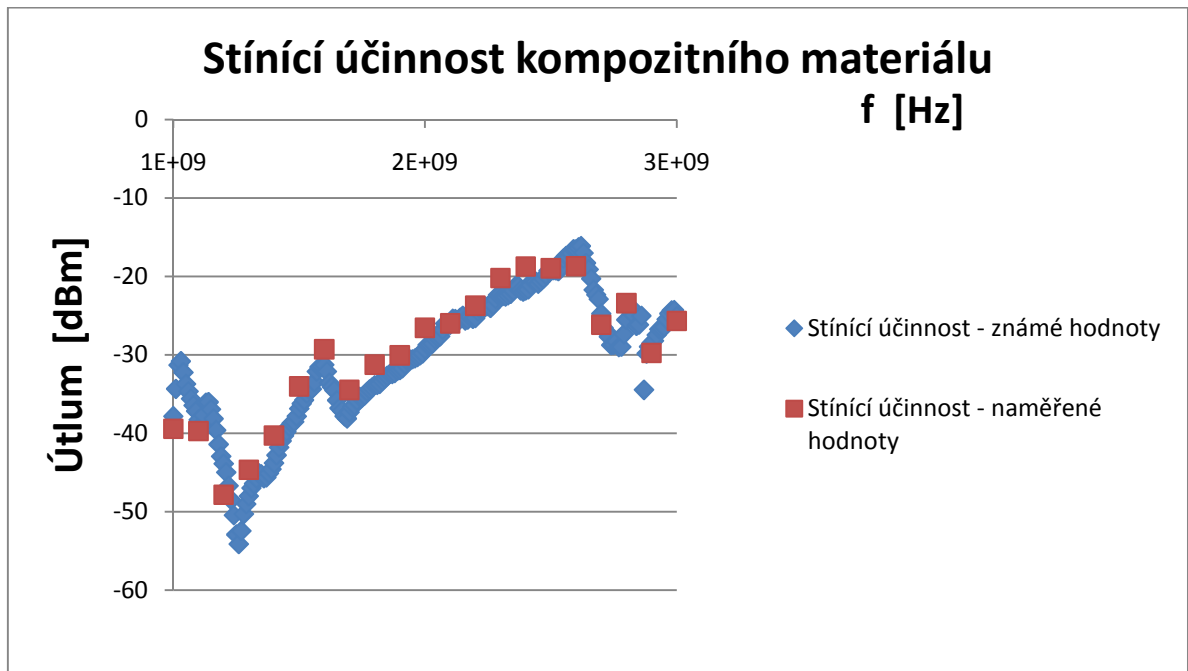
Nejprve bylo potřeba nastavit na generátoru (R&S SM300) frekvenci a úroveň výstupního signálu. Poté jsem na spektrálním analyzátoru nastavil RBW (resolution bandwidth) na hodnotu 5 kHz, span jsem nastavil na 10 kHz.

V průběhu samotného měření jsem pouze měnil na generátoru výstupní frekvenci a na analyzátoru center frequency, frekvenci jsem měnil s krokem 100 MHz. Poté jsem odečítal hodnoty útlumu v dBm.

Průběh měření byl následující, nejprve jsem proměřil měřící vedení bez vloženého vzorku a zaznamenal patřičné hodnoty a v druhém kroku jsem měřil již vzorek kompozitního materiálu (se stejným nastavením a frekvenčním krokem).

7.2 Výsledky

K dosažení hodnoty útlumu bylo nakonec potřeba odečíst od hodnoty útlumu vzorku hodnotu útlumu referenčního měření. Naměřené a vypočtené hodnoty příkládám v příloze. Zde uvádím pouze graf s již spočteným výsledným útlumem.



Obr. 35: Výsledky měření stínící účinnosti

7.3 Diskuze k výsledkům

Mnou dosažené hodnoty se mírně liší od hodnot, které jsem dostal k dispozici, což může být způsobeno použitými přístroji, podmínkami měření apod.

Jak už jsem uvedl výše, dosažené výsledky se téměř shodují s hodnotami, jenž, jsem dostal jako zadané. Avšak průběh není ideální, ideální průběh by pro tento materiál měl být asi takový, že s rostoucí frekvencí by měl útlum klesat.

Proč tomu tak není? Může to být způsobeno tím, jak je měřený vzorek vložen do měřícího vedení “volně“, tj. není v přírubě měřícího vedení uchycen pomocí šroubů a matek, vyřešení tohoto problému by bylo sice jednoduché, stačilo by do vzorku vyvrtat 8 děr, avšak vzorek by byl již nepoužitelný při měření stínící účinnosti pomocí měřící komory, proto bylo lepší drobnou odchylku při měření tolerovat. Dalším důvodem může být, že jednotlivé části měřícího vedení na sebe úplně přesně nedoléhaly. A na závěr je třeba také podotknout, že při obou měřeních byly použity různé přístroje, což může být také důvod.

ZÁVĚR

Během práce na své DP jsem se zabýval návrhem PBG pro účely měření stínící účinnosti materiálů a proměřením vzorku kompozitního materiálu.

Vysokoimpedanční rovinu se mě podařilo navrhnout, při simulaci tato rovina měla prokazatelné výsledky, avšak pro další zlepšení stínící účinnosti je třeba, pro případ měření pomocí měřící komory, použít jak obložení na měřící komoru, tak na měřený vzorek. To je však již téma na další práci a této problematice jsem se nevěnoval.

Důležitým poznatkem je že použitím těchto rovin při měření se eliminuje vliv proudů tekoucích po povrchu komory, tj, omezí se jejich průnik do vnitřní části komory, což je určitě kladné zjištění.

Dále jsem proměřoval vzorek kompozitního materiálu, mnou naměřené hodnoty korespondovaly s hodnotami naměřenými (dodanými) p. Goňou. Avšak za ideálních podmínek by se výsledná charakteristika od mnou získané lišila, ale i tak můžeme říct, že toto měření se zdařilo.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

While working on my DP, I dealt with a proposal for PBG measurement of shielding effectiveness of materials and measuring the sample of composite material.

High impedance plane with me was able to propose to simulate the plane had tangible results, but to further enhance the effectiveness of shielding is needed in case of measurement using the measuring chamber, used as lining in the measuring chamber and the measured sample. But this is already a topic for further work on this issue and I did not pay.

One important clue is that by using these planes for measurement eliminates the effect of currents flowing along the surface of the chamber, ie, limiting their penetration into the inner chamber, which is certainly a positive finding.

I also measuring sample composite material, my readings correspond with the values measured (supplied) Mr. Goňa. However, under ideal conditions, the resulting characteristic obtained differed from me, but I can say that this measure succeeded.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Signálový generátor R&S SM300*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 12 s. Dostupné z WWW: <http://www2.rohde-schwarz.com/file_11177/SM300_CZ.pdf>.
- [2] *Spektrální analyzátor R&S FS300/FS315*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 14 s. Dostupné z WWW: <http://www2.rohde-schwarz.com/file_3931/FS300_CZ.pdf>.
- [3] SLUŠTÍK, Radek. *Uživatelský manuál Agilent VEE Pro 7.5 : Učební texty vysokých škol*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 61 s.
- [4] WIĘCKOWSKI, Tadeusz W.; JANUKIEWICZ, Jarosław M. Methods for Evaluating the Shielding Effectiveness of Textiles. *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe* [online]. 2006, 5, [cit. 2010-06-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.fibtex.lodz.pl/archive.htm>>.
- [5] SIEVENPIPER, Daniel Frederic. *High-Impedance Electromagnetic Surfaces*. [s.l.] : [s.n.], 1999. 162 s.
- [6] *CST MICROWAVE STUDIO - 3D EM simulation software* [online]. 2010 [cit. 2010-06-07]. Dostupné z WWW: <<http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>>.
- [7] KLÁSEK, Tomáš Maxwellovy rovnice. In Maxwellovy rovnice [online]. [s.l.] : [s.n.], 2005 [cit. 2010-06-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.kfy.zcu.cz/Rusnak/otazky/elmg.pole/elmg.pole.pdf>>.
- [8] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole : Základy teorie*. 1. Praha : BEN - Technická literatura, 1998. 159 s. ISBN 80-86056-43-0.
- [9] SZÁNTÓ, Ladislav. *Maxwellovy rovnice*. 1. Praha : BEN - Technická literatura, 2003. 112 s. ISBN 80-7300-096-2.
- [10] SVAČINA, Jiří, et al. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. 2009 [cit. 2010-06-11]. Dostupné z WWW: <<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=encyclopedia>>.
- [11] MIL-STD-285. MILITARY STANDARD. [s.l.] : [s.n.], 1997. 17 s. Dostupné z WWW: <<http://www.wbdg.org/ccb/FEDMIL/std285.pdf>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

B	Magnetická indukce.
C	Kapacita.
CST MWS	CST MicroWave Studio.
D	Elektrická indukce.
E	Intenzita elektrického pole.
EM	Elektromagnetický/elektromagnetická.
EMC	Elektromagnetická kompatibilita.
EMI	Elektromagnetická interference.
EMS	Elektromagnetická susceptibilita.
f	Frekvence.
H	Intenzita magnetického pole.
I	Proud.
J	Plošná hustota proudu.
L	Indukčnost.
PBG	Photonic Band Gap.
SE	Stínící účinnost – Shielding effectiveness.
TE	Příčně elektrická vlna.
TM	Příčně magnetická vlna.
Z	Impedance.
ε	Elektrická permitivita.
λ	Vlnová délka.
γ	Měrná vodivost.
μ	Magnetická permeabilita.
ρ	Objemová hustota náboje.

Φ Magnetický indukční tok.

ψ Elektrický indukční tok.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.: Členění problematiky EMC.....	13
Obr. 2.: Rozčlenění oblastí okolo zdroje EM záření[4].....	14
Obr. 3.: Měření SE pomocí stínící komory.....	16
Obr. 4.: Měření SE na vedení	17
Obr. 5: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 1	19
Obr. 6: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 2.....	20
Obr. 7: Vysokoimpedanční povrchová struktura – typ 3.....	20
Obr. 8.: Vysokoimpedanční struktura - v řezu.....	21
Obr. 9.: Vysokoimpedanční struktura – půdorys	21
Obr. 10.: Vyjádření vysokoimpedanční struktury pomocí obvodových prvků	22
Obr. 11: Zjednodušené schéma povrchové struktury	22
Obr. 12.: Šíření TE vlny vysokoimpedanční strukturou	23
Obr. 13: 1 buňka PBG buňky.....	28
Obr. 14: Buňka PBG – v řezu	29
Obr. 15: Simulovaná PBG struktura (s budícími porty)	30
Obr. 16: Frekvenční charakteristika PBG struktury – 4 buňky	31
Obr. 19: Intenzita el.pole při průchodu PBG strukturou – 8 buňek.....	33
Obr. 20: Frekvenční charakteristika PBG struktury – 10 buňek.....	34
Obr. 21: Intenzita el.pole při průchodu PBG strukturou – 10 buňek.....	34
Obr. 22: Náčrt měřící komory	35
Obr. 23: Model měřící komory	36
Obr. 24: Studie nastavení limitu “meshování“	37
Obr. 25: Intenzita el.pole – neobložená měřící komora.....	38
Obr. 26: Obložená měřící komora – čelní pohled.....	39
Obr. 27: Intenzita el.pole – obložená měřící komora	39
Obr. 28: Stínící účinnost – neobložená měřící komora	40
Obr. 29: Stínící účinnost – obložená měřící komora	40
Obr. 30: Proudění tekoucí po povrchu komory	41
Obr. 31: Vyřešení problému povrchových proudů	41
Obr. 32: Struktury pro obložení.....	42
Obr. 33: Vzorek měřeného kompozitního materiálu	43
Obr. 34: Měřící vedení (bez propojovacích kabelů).....	43

Obr. 35: Výsledky měření stínící účinnosti 44

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Technické parametry R&S SM300	26
Tab. 2: Technické parametry R&S FS300.....	26
Tab. 3: Parametrická studie analýzy chování	31

SEZNAM PŘÍLOH

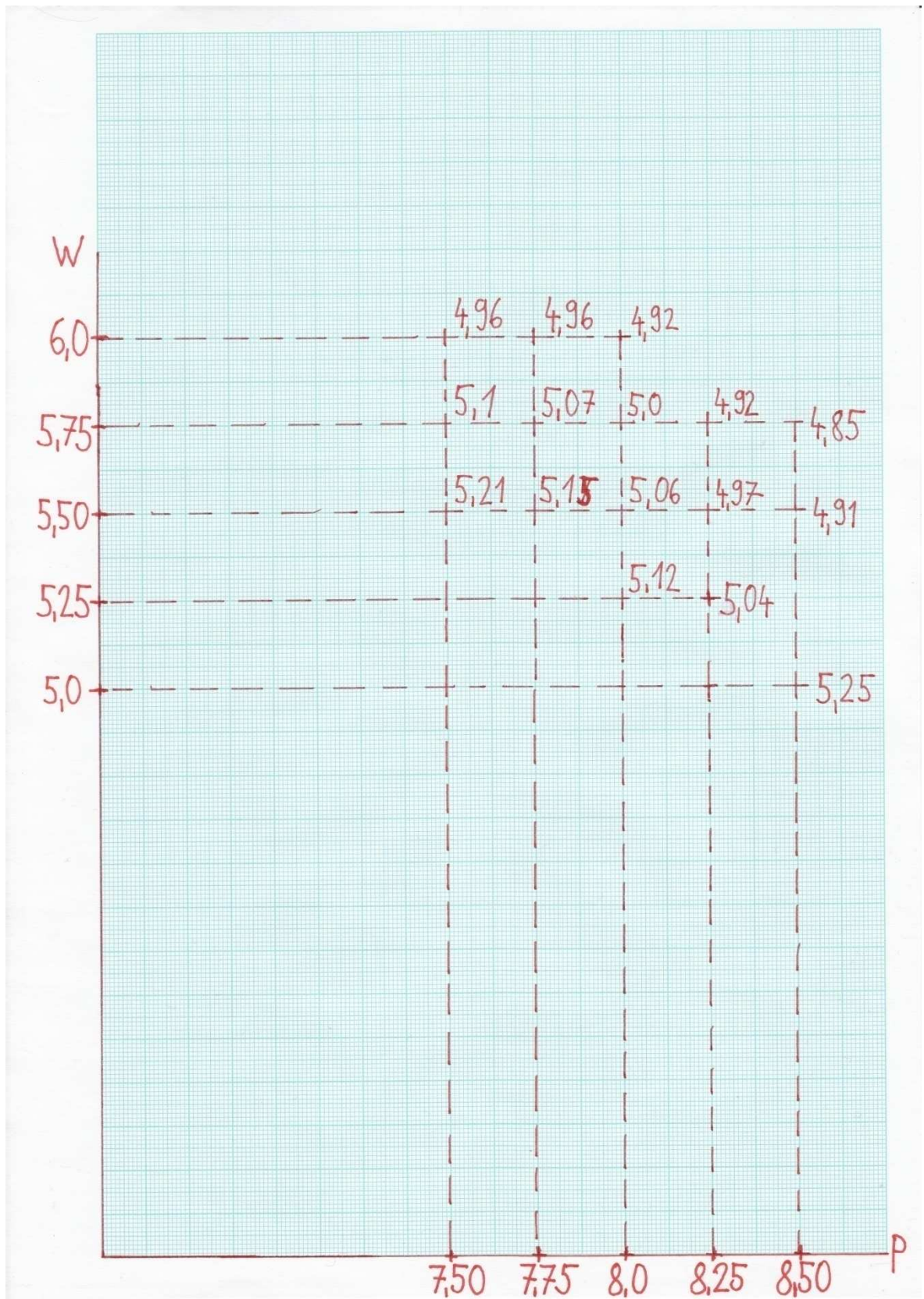
PŘÍLOHA PI: PARAMETRICKÁ STUDIE ANALÝZY CHOVÁNÍ

PŘÍLOHA PII: SESTAVA MĚŘÍCÍ KOMORY

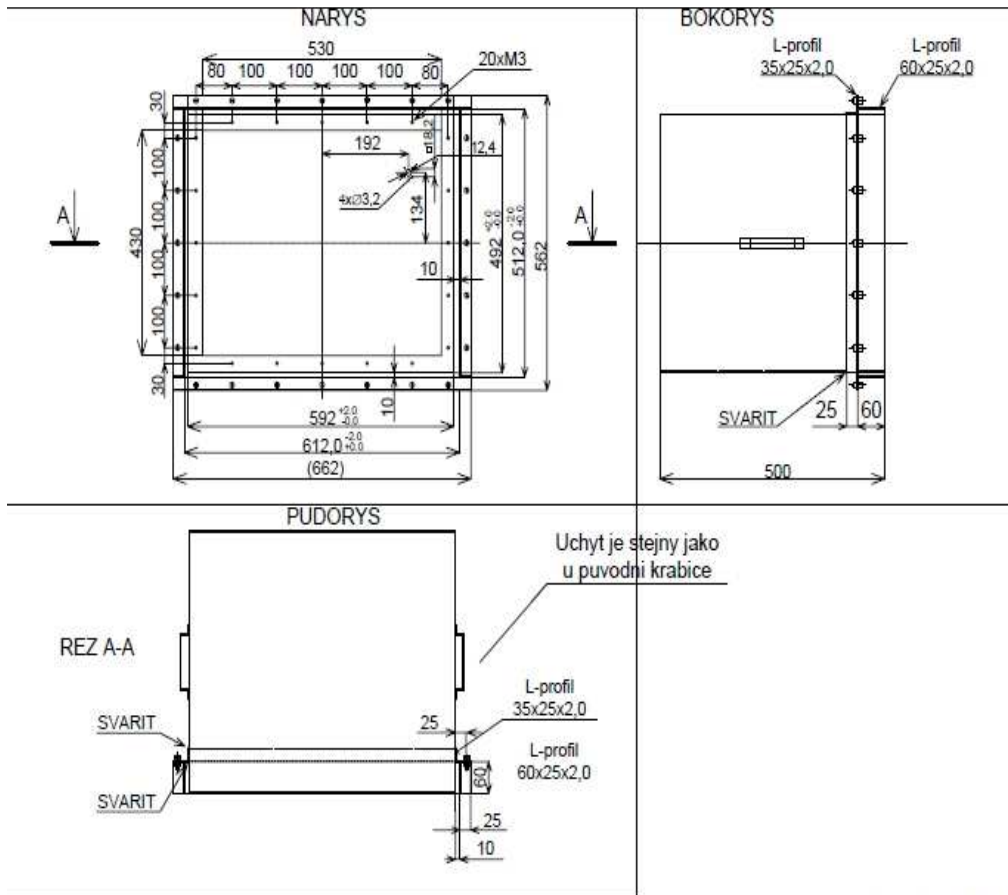
PŘÍLOHA PIII: STÍNÍCÍ ÚČINNOST – ZNÁMÉ HODNOTY

PŘÍLOHA PIV: STÍNÍCÍ ÚČINNOST – NAMĚŘENÉ HODNOTY

PŘÍLOHA PI: PARAMETRICKÁ STUDIE ANALÝZY CHOVÁNÍ



PŘÍLOHA PII: SESTAVA MĚŘÍCÍ KOMORY



SESTAVA: KRABICE+LIMCE
 Material Krabice: Plech Fe 2mm NEREZ

Kreslil: S.Gona
 UTB Zlín, 15. srpen 2008

PŘÍLOHA PIII: STÍNÍCÍ ÚČINNOST – ZNÁMÉ HODNOTY

Frekvence [Hz]	Útlum - REF [dBm]	Útlum - VZ [dBm]	Útlum - Celkový [dBm]
100000000	-3,887555122	-41,7161293	-37,82857418
101000000	-3,834105253	-38,17548752	-34,34138227
102000000	-3,739893198	-35,04282379	-31,30293059
103000000	-3,782608986	-34,593647	-30,81103802
104000000	-3,94573164	-36,18540573	-32,23967409
105000000	-4,031065941	-37,7482605	-33,71719456
106000000	-3,985522985	-38,65869141	-34,67316842
107000000	-3,972787619	-39,57115173	-35,59836411
108000000	-3,925316572	-40,3696785	-36,44436193
109000000	-3,900938749	-41,07351303	-37,17257428
110000000	-3,923635006	-42,20077133	-38,27713633
111000000	-4,015852928	-42,96379852	-38,94794559
112000000	-3,998267651	-41,70796204	-37,70969439
113000000	-4,076530933	-40,17279816	-36,09626722
114000000	-4,004278183	-40,02944183	-36,02516365
115000000	-3,945347786	-40,88409042	-36,93874264
116000000	-3,865632772	-42,01208115	-38,14644837
117000000	-3,799151659	-43,41330338	-39,61415172
118000000	-3,830979109	-45,2458725	-41,41489339
119000000	-3,895677805	-46,85296249	-42,95728469
120000000	-3,811642408	-47,70088196	-43,88923955
121000000	-3,839378595	-48,83201599	-44,9926374
122000000	-3,702050924	-50,39863586	-46,69658494
123000000	-3,622563839	-52,14372253	-48,5211587
124000000	-3,526999474	-53,9782486	-50,45124912
125000000	-3,576453447	-56,50740814	-52,93095469
126000000	-3,593855619	-57,71944809	-54,12559247
127000000	-3,594804287	-56,05527878	-52,46047449
128000000	-3,578943968	-53,88615417	-50,30721021
129000000	-3,501154661	-52,53530502	-49,03415036
130000000	-3,448603153	-51,46754456	-48,0189414
131000000	-3,492950439	-50,49556351	-47,00261307
132000000	-3,47931838	-49,91838074	-46,43906236
133000000	-3,571198225	-49,33789825	-45,76670003
134000000	-3,601536989	-48,73752975	-45,13599277
135000000	-3,703043699	-48,96110535	-45,25806165
136000000	-3,729679823	-49,46419907	-45,73451924
137000000	-3,757550716	-49,39639664	-45,63884592
138000000	-3,707527876	-48,82888412	-45,12135625
139000000	-3,737706661	-48,30313873	-44,56543207
140000000	-3,897926807	-47,68859482	-43,79066801
141000000	-3,881182671	-46,68447113	-42,80328846
142000000	-3,926939011	-45,72780228	-41,80086327
143000000	-3,998516321	-44,96461487	-40,96609855
144000000	-3,923867941	-44,25837708	-40,33450913
145000000	-3,995581115	-43,77516556	-39,77958441
146000000	-3,932219028	-43,05806732	-39,12584829
147000000	-3,964956284	-42,69721603	-38,73225975
148000000	-4,073894978	-42,60752106	-38,53362608

Frekvence [Hz]	Útlum - REF [dBm]	Útlum - VZ [dBm]	Útlum - Celkový [dBm]
1490000000	-4,029887199	-41,87797546	-37,84808826
1500000000	-3,991949558	-40,85849762	-36,86654806
1510000000	-3,975358009	-40,20435333	-36,22899532
1520000000	-3,949131727	-39,70586395	-35,75673223
1530000000	-3,954518795	-38,88935471	-34,93483591
1540000000	-3,900399685	-38,35610199	-34,4557023
1550000000	-3,877696037	-38,2379303	-34,36023426
1560000000	-3,962894917	-37,42769623	-33,46480131
1570000000	-3,902927637	-36,02692795	-32,12400031
1580000000	-3,955506563	-35,52399063	-31,56848407
1590000000	-4,019050121	-35,4702034	-31,45115328
1600000000	-3,970110655	-35,24943924	-31,27932858
1610000000	-4,016672134	-36,13948441	-32,12281227
1620000000	-4,026083469	-37,60734558	-33,58126211
1630000000	-4,013101578	-38,08784103	-34,07473946
1640000000	-4,119868279	-38,65064621	-34,53077793
1650000000	-4,22900486	-40,02767181	-35,79866695
1660000000	-4,295707703	-41,09363937	-36,79793167
1670000000	-4,389797211	-41,54051208	-37,15071487
1680000000	-4,371943474	-42,19739532	-37,82545185
1690000000	-4,42002821	-42,53439713	-38,11436892
1700000000	-4,486611366	-41,81271362	-37,32610226
1710000000	-4,512593269	-41,17955399	-36,66696072
1720000000	-4,49943924	-40,903965	-36,40452576
1730000000	-4,517156601	-40,33775711	-35,82060051
1740000000	-4,456557751	-39,80593491	-35,34937716
1750000000	-4,499127388	-39,91057968	-35,41145229
1760000000	-4,467316628	-39,65139389	-35,18407726
1770000000	-4,448470592	-39,15791702	-34,70944643
1780000000	-4,482564449	-38,90314865	-34,4205842
1790000000	-4,577720642	-38,74417496	-34,16645432
1800000000	-4,508839607	-38,39786911	-33,8890295
1810000000	-4,618388653	-38,46724701	-33,84885836
1820000000	-4,645731449	-38,34049225	-33,6947608
1830000000	-4,628447533	-37,93861771	-33,31017017
1840000000	-4,599234104	-37,56848907	-32,96925497
1850000000	-4,640228271	-37,31754303	-32,67731476
1860000000	-4,655815125	-37,11732101	-32,46150589
1870000000	-4,624099731	-37,06034851	-32,43624878
1880000000	-4,761800766	-37,07784271	-32,31604195
1890000000	-4,731575489	-36,77872086	-32,04714537
1900000000	-4,791912556	-36,72502136	-31,93310881
1910000000	-4,894169331	-36,61537552	-31,72120619
1920000000	-4,91825676	-36,1112709	-31,19301414
1930000000	-4,875500679	-35,59454727	-30,71904659
1940000000	-4,824877739	-35,4249115	-30,60003376
1950000000	-4,873437881	-35,45125198	-30,5778141
1960000000	-4,842685223	-35,29418564	-30,45150042
1970000000	-4,816567898	-35,08263779	-30,26606989
1980000000	-4,811056614	-34,89812088	-30,08706427
1990000000	-4,883298397	-34,69329071	-29,80999231

Frekvence [Hz]	Útlum - REF [dBm]	Útlum - VZ [dBm]	Útlum - Celkový [dBm]
200000000	-4,818439484	-34,08000565	-29,26156616
201000000	-4,882576466	-33,61656189	-28,73398542
202000000	-4,765272617	-33,45988083	-28,69460821
203000000	-4,663682461	-33,22335434	-28,55967188
204000000	-4,708298683	-32,72001266	-28,01171398
205000000	-4,631254673	-32,40664291	-27,77538824
206000000	-4,785511971	-32,41814423	-27,63263226
207000000	-4,820531845	-31,60523224	-26,78470039
208000000	-4,795699596	-30,79483986	-25,99914026
209000000	-4,66668129	-30,94354057	-26,27685928
210000000	-4,800628185	-30,94319153	-26,14256334
211000000	-4,765077114	-30,15315819	-25,38808107
212000000	-4,769031525	-30,21899414	-25,44996262
213000000	-4,897032261	-30,65078735	-25,75375509
214000000	-4,924581528	-30,19693947	-25,27235794
215000000	-4,830740929	-29,86896896	-25,03822803
216000000	-4,823364735	-30,43638802	-25,61302328
217000000	-4,929071426	-30,43815613	-25,5090847
218000000	-4,728447914	-29,89769936	-25,16925144
219000000	-4,619122505	-30,03160858	-25,41248608
220000000	-4,648241043	-29,95270538	-25,30446434
221000000	-4,549780369	-28,99951363	-24,44973326
222000000	-4,383827209	-28,56403351	-24,1802063
223000000	-4,329773426	-28,49982643	-24,17005301
224000000	-4,278712273	-28,14572906	-23,86701679
225000000	-4,185642242	-27,98981094	-23,8041687
226000000	-4,203391552	-28,21622086	-24,0128293
227000000	-4,039470673	-27,69287109	-23,65340042
228000000	-4,076163292	-26,9230423	-22,84687901
229000000	-4,007077217	-26,38331985	-22,37624264
230000000	-4,142066479	-26,44131851	-22,29925203
231000000	-4,277287483	-26,75282669	-22,47553921
232000000	-4,325862408	-26,90860748	-22,58274508
233000000	-4,292850494	-26,69657516	-22,40372467
234000000	-4,301947594	-26,52081299	-22,21886539
235000000	-4,315946579	-26,15876579	-21,84281921
236000000	-4,34023571	-25,56825256	-21,22801685
237000000	-4,618347168	-25,84264374	-21,22429657
238000000	-4,739875317	-26,51602173	-21,77614641
239000000	-4,717870235	-26,65094757	-21,93307734
240000000	-4,712654114	-26,49349594	-21,78084183
241000000	-4,681180954	-26,35895157	-21,67777061
242000000	-4,498685837	-25,59483337	-21,09614754
243000000	-4,561967373	-25,0754528	-20,51348543
244000000	-4,759195805	-25,4457283	-20,6865325
245000000	-4,740856171	-25,66531563	-20,92445946
246000000	-4,883306503	-25,49518204	-20,61187553
247000000	-4,746314049	-25,03910637	-20,29279232
248000000	-4,777774334	-24,56665611	-19,78888178
249000000	-4,720205784	-23,98200607	-19,26180029
250000000	-4,853294849	-24,04802895	-19,1947341

Frekvence [Hz]	Útlum - REF [dBm]	Útlum - VZ [dBm]	Útlum - Celkový [dBm]
251000000	-4,830434322	-24,059021	-19,22858667
252000000	-5,05964613	-24,29331398	-19,23366785
253000000	-5,028940678	-24,3677063	-19,33876562
254000000	-4,956588745	-23,81540108	-18,85881233
255000000	-5,176870346	-22,89243889	-17,71556854
256000000	-5,353333473	-22,74695206	-17,39361858
257000000	-5,237916946	-22,79365349	-17,55573654
258000000	-5,376329422	-22,42235184	-17,04602242
259000000	-5,554711819	-22,07852936	-16,52381754
260000000	-5,573162079	-22,12547493	-16,55231285
261000000	-5,517591476	-21,83119202	-16,31360054
262000000	-5,731637478	-21,86191559	-16,13027811
263000000	-5,674824715	-22,69672394	-17,02189922
264000000	-5,649989605	-23,93664932	-18,28665972
265000000	-5,708591461	-24,80755997	-19,09896851
266000000	-5,746803284	-26,02741623	-20,28061295
267000000	-5,786156654	-27,51033401	-21,72417736
268000000	-6,04775095	-28,38316727	-22,33541632
269000000	-6,508457184	-29,3961277	-22,88767052
270000000	-6,473825455	-31,23439026	-24,7605648
271000000	-6,123137951	-32,70031357	-26,57717562
272000000	-6,003814697	-33,02193069	-27,018116
273000000	-5,781312943	-33,45471191	-27,67339897
274000000	-5,342344284	-34,10301971	-28,76067543
275000000	-5,248105526	-33,96199417	-28,71388865
276000000	-5,324192524	-33,63082123	-28,3066287
277000000	-5,201413155	-34,20380402	-29,00239086
278000000	-5,141600609	-34,12686539	-28,98526478
279000000	-5,25487709	-32,61946487	-27,36458778
280000000	-5,166762352	-30,70108986	-25,53432751
281000000	-5,03861475	-29,31890678	-24,28029203
282000000	-4,998749256	-29,02201843	-24,02326918
283000000	-5,044152737	-29,96673203	-24,92257929
284000000	-4,859273911	-31,16981888	-26,31054497
285000000	-4,954399109	-31,11117172	-26,15677261
286000000	-5,096682549	-30,11281586	-25,01613331
287000000	-5,051407337	-39,5214653	-34,47005796
288000000	-4,994956493	-34,83031464	-29,83535814
289000000	-5,004623413	-33,96773148	-28,96310806
290000000	-5,008855343	-33,52258301	-28,51372766
291000000	-5,031297207	-33,23631668	-28,20501947
292000000	-5,16523838	-32,63793182	-27,47269344
293000000	-5,175669193	-31,90142632	-26,72575712
294000000	-5,290462017	-31,89765739	-26,60719538
295000000	-5,119189739	-31,55913734	-26,43994761
296000000	-4,98122263	-30,46522713	-25,4840045
297000000	-4,956132412	-29,7068882	-24,75075579
298000000	-5,039152622	-29,38326645	-24,34411383
299000000	-5,035020828	-29,34612465	-24,31110382
300000000	-4,428719044	-29,5045166	-25,07579756

PŘÍLOHA P IV: STÍNÍCÍ ÚČINNOST – NAMĚŘENÉ HODNOTY

Frekvence [Hz]	Útlum - REF [dBm]	Útlum - VZ [dBm]	Útlum - Celkový [dBm]
1000000000	3,73	-35,72	-39,45
1100000000	4,84	-34,9	-39,74
1200000000	5,69	-42,17	-47,86
1300000000	5,33	-39,35	-44,68
1400000000	5,03	-35,26	-40,29
1500000000	6,44	-27,6	-34,04
1600000000	5,98	-23,32	-29,3
1700000000	5,83	-28,65	-34,48
1800000000	6,35	-24,91	-31,26
1900000000	6,08	-24	-30,08
2000000000	5,25	-21,32	-26,57
2100000000	5,3	-20,7	-26
2200000000	5,36	-18,39	-23,75
2300000000	5,42	-14,8	-20,22
2400000000	5	-13,74	-18,74
2500000000	4,5	-14,48	-18,98
2600000000	4,81	-13,89	-18,7
2700000000	5,29	-20,9	-26,19
2800000000	5,16	-18,26	-23,42
2900000000	4,87	-24,9	-29,77
3000000000	4,95	-20,75	-25,7