

ABSTRAKT

Dvojitá Crawfordova komora, někdy též nazývaná jako TEM komora, je zařízení používané pro měření elektromagnetické kompatibility (vyzařování a odolnost vůči záření) a také pro biologické aplikace. Tato bakalářská práce je zaměřena na použití a návrh dvojité Crawfordovy komory a na měření elektromagnetické kompatibility. Některé způsoby měření jsou popsány a poukázány jejich výhody a nevýhody. Tento typ komory je jednoduchý jak pro návrh tak pro konstrukci a vykazuje dobré rozdělení elektromagnetického pole uvnitř komory. Komoru jsme navrhovaly pro charakteristickou impedanci 50Ω a pro měření na frekvencích do 1GHz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Crawfordova komora

Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická odolnost

Simulace elektromagnetických polí

Účinky stínění

ABSTRACT

Dual Crawford cell is also known as dual TEM-cell (Transversal Electromagnetic Mode cell). It is device used for electromagnetic compatibility measurement (emission and immunity) and for biological application. This papers is focused on usage and design dual Crawford chamber and measuring of their electromagnetic compatibility. There are shown their advantages and disadvantages. This type of cell is simple for design and for the construction too. Construction of dual Crawford chamber with characteristic impedance of 50Ω for measure in 1GHz range was calculated.

KEYWORDS

TEM cell

Electromagnetic compatibility

Electromagnetic imunity

Simulation of electromagnetic fields

Shielding effectiveness

Haloda, Jiří. Návrh a konstrukce dvojité Crawfordovi komory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 30 s., 5 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zoltán Szabó.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh a konstrukce dvojité Crawfordovy komory jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing.Zoltánovi Szabó za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	v
Úvod	1
1 Elektromagnetická odolnost a její testování	2
1.1 Zkoušky odolnosti vůči elektromagnetickým polím	3
2 Měření vlastností stínících tkaniv	10
2.1 Metoda měření vložitelným útlumem	10
2.2 Měření stínící efektivity SE	11
3 Návrh a konstrukce crawfordovy komory	13
3.1 Návrh	13
3.2 Konstrukce	14
4 Vlastnosti crawfordovy komory	15
4.1 Charakteristická impedance komory	15
4.2 Změřená impedance komory	17
4.3 Měření různých stínících tkaniv	18
5 Závěr	21
Literatura	22
Seznam symbolů, veličin a zkratk	23
Seznam příloh	24

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1: Rozdělení elektromagnetické kompatibility	2
Obrázek 1.2 Průběh zkušebního signálu s amplitudovou modulací [1]	3
Obrázek 1.3 Pracoviště pro zkoušku odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu poli [1].....	3
Obrázek 1.4: Deskové vedení [1]	4
Obrázek 1.5: Crawfordova komora: boční řez	5
Obrázek 1.6: Crawfordova komora: podélní řez	5
Obrázek 1.7: Příklad provedení Crawfordovy komory [5]	6
Obrázek 1.8 Nákres dvojité Crawfordovy komory	6
Obrázek 1.9 Izolace kolem otvoru.....	7
Obrázek 1.10: Ukázka dvojité Crawfordovy komory	8
Obrázek 1.11 Boční náčrt GTEM komory s absorbátory [1]	8
Obrázek 1.12 Konstrukce GTEM komory [1].....	9
Obrázek 1.13 Boční a čelní nárys GTEM	9
Obrázek 2.1 Schéma pro měření vložitým útlumem	10
Obrázek 2.2 Model měřicího zařízení [6].....	11
Obrázek 2.3 Schéma zapojení s jednoduchou komorou pro měření efektivity stínění .	12
Obrázek 2.4 Měřicí pracoviště s dvojitou Crawfordovou komorou.....	12
Obrázek 3.1 Vysokofrekvenční konektor bez a se zakončenou impedancí	14
Obrázek 3.2 Postříbřená komora	14
Obrázek 4.1 Schéma pro měření impedance komory.....	15
Graf 4.2 Závislost Return Gain na frekvenci	17
Graf 4.3 Závislost impedance komory na frekvenci	17
Obrázek 4.4 Zapojení analyzátoru ke komoře.....	18
Obrázek 4.5 Ukázka měření textilií.....	19
Graf 4.6 Křídový papír.....	19
Graf 4.7 Stínící textilie od výrobce Electron	20
Graf 4.8 Netkaná textilie z uhlíkových vláken	20

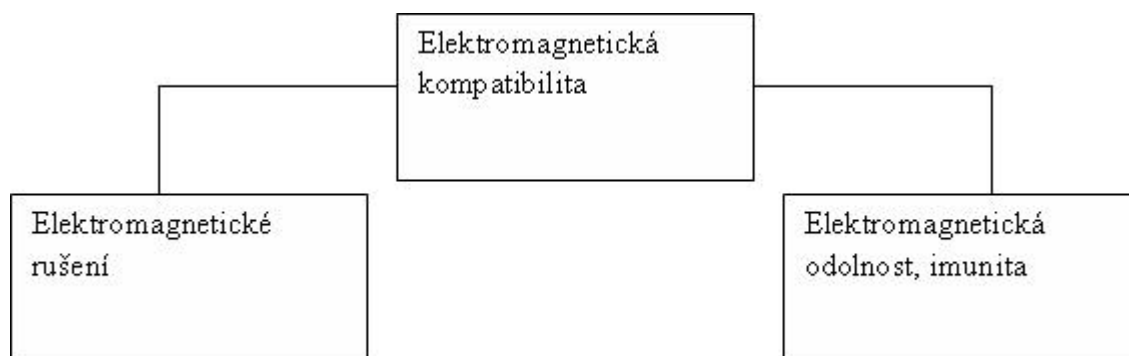
ÚVOD

Elektromagnetické stínění je jedním z vysoce efektivních způsobů ochrany před rušením vnějších vlivů. V této práci popíšeme vlastnosti Crawfordové komory, její způsoby konstrukce a využití v oblasti elektromagnetické kompatibility, ale také možnosti jejich měření. Navrheme a zkonstruujeme dvojitou Crawfordovu komoru, která slouží pro testování stínících textilií, využívaných ke stínění proti elektromagnetickým vlivům. Používá se také jako nástroj k měření určité absorpci energie ve vzorku. Využití má i pro biologické experimenty. Zaměříme se na měření vlastností stínících tkaniv a proměňování těchto způsobů stínění.

1 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST A JEJÍ TESTOVÁNÍ

V dnešní době, v době rozsáhlého a hojně využívaného vysílání veškerých radiokomunikačních a mobilních služeb, se takřka bezmála všechny přístroje a zařízení k těmto účelům používaných, vystavují rušení elektromagnetických polí. Tyto jednotlivá pole je potřeba co nejúčinněji odrušit popř. odstranit, protože působí jako nežádoucí. V dřívějších dobách bylo elektromagnetické pole často hlavní příčinou různých neúspěchů ve zdokonalování a rozšiřování možností v komunikaci a jiných podobných odvětvích. V dnešní době už máme modernější prostředky na vývoj a ochranu proti těmto polím, ale je nutné zajistit ochranu v celém spektru kmitočtu, čili i na vysokých frekvencích řádově GHz.

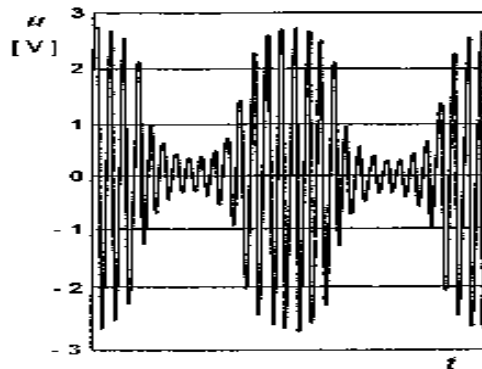
Celá problematika odrušování elektromagnetických polí se dá rozdělit do dvou základních skupin, viz obrázek 1.1, kde elektromagnetické rušení se zabývá zdrojem rušivých signálů, jejich měřením a popisem. Elektromagnetická odolnost se zabývá odrušením těchto nežádoucích signálů, a také zvýšením jejich odolnosti proti těmto vlivům.



Obrázek 1.1: Rozdělení elektromagnetické kompatibility.

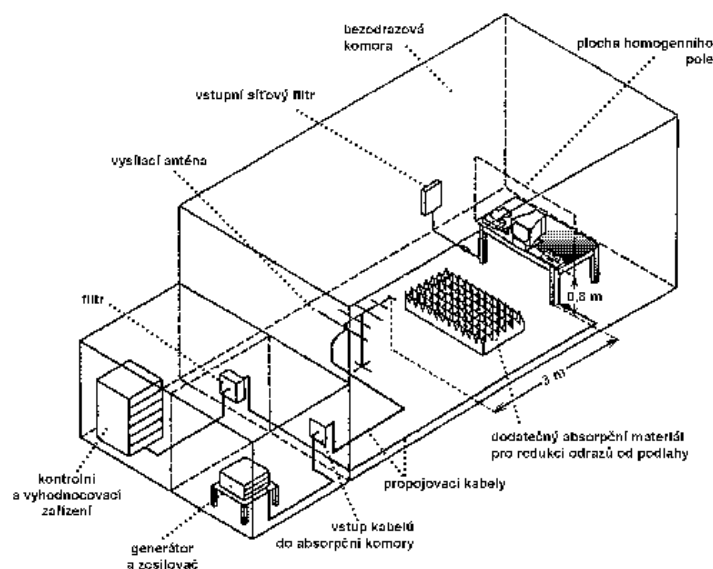
1.1 Zkoušky odolnosti vůči elektromagnetickým polím

Základní princip spočívá v namodulování rušivého signálu na užitečný signál. Tím se simuluje skutečné rušení, které si můžeme touto modulací představit, viz obrázek 1.2. Značná nevýhoda takto simulovaného rušení je nízký kmitočet. Ten je daný příslušnými normami od zhruba 9 kHz až do 230MHz. V praxi se ale až do tak vysokého kmitočtu tento způsob nevyužívá.



Obrázek 1.2 Průběh zkušebního signálu s amplitudovou modulací [1].

Další hlavní podstatou zkoušek odolnosti vůči elektromagnetickým polím je ozařování zkoušeného objektu příslušnými úrovněmi pomocí vhodných antén. Pro získání těchto příslušných úrovní je zapotřebí velké intenzity budícího pole – až několik desítek V/m. Tento způsob simulace nám umožňuje pracovat v kmitočtovém rozsahu 80MHz až 2GHz. Protože zde pracujeme z takto vysokými frekvencemi, je zapotřebí zabezpečit při testování okolí, zejména elektronické přístroje popř. obsluhu. Nejčastěji se tato zařízení umísťují do speciální stínící místnosti – komory. Samotné přístroje pak jsou umístěny zvlášť mimo komoru z důvodu ovlivnění silným zkušebním elektromagnetickým polem [1]. Na obrázku 1.3 je taková komora znázorněna.



Obrázek 1.3 Pracoviště pro zkoušku odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu poli [1].

Již výše jsme si řekli, že pro buzení zkušební komory elektromagnetického pole je zapotřebí velkého množství výkonu – řádově stovky wattů.

Pro vyzařovaný výkon P_V platí obecně:

$$P_V = \frac{E^2 \cdot r^2}{30 \cdot G_{VA}} \quad (1.1)$$

kde : E - intenzita pole vytvořená danou anténou

r - vzdálenost mezi anténou a vytvořeným polem

G_{VA} – zisk antény

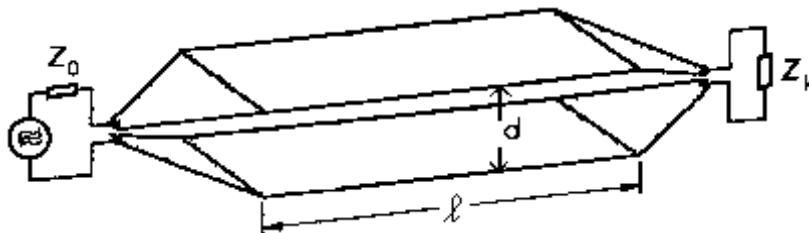
Ze vztahu 1.1 je vidět, že intenzita pole s rostoucí vzdáleností klesá

$$E \approx \frac{\sqrt{P_V}}{r} \quad (1.2)$$

čili je zapotřebí větší budící výkon.

Z důvodu vysokých nákladů na provoz zkušební komory a velké intenzity záření, se používají speciální antény, které přinášejí mnoho výhod. Jejich princip nespočívá ve vyzařování elektromagnetických vln na daný objekt, ale tvoří jakési samotné vedení příčné TEM vlny. Jsou rozměrově menší a budící výkon, při kterém intenzita elektromagnetických polí dosahuje řádově desítky V/m, je výrazně nižší. Proto se přešlo k tzv. *deskovému vedení*. Jsou to dvě rovnoběžné vodivé desky nad sebou, na každém konci zúžené k portům, obrázek 1.4 Měřící vzorek se dává na izolační podložku mezi tyto desky. Za předpokladu, že délka je podstatně větší než výška ($l \gg d$), dochází mezi jednotlivými deskami k šíření TEM vlny o intenzitě

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.3)$$

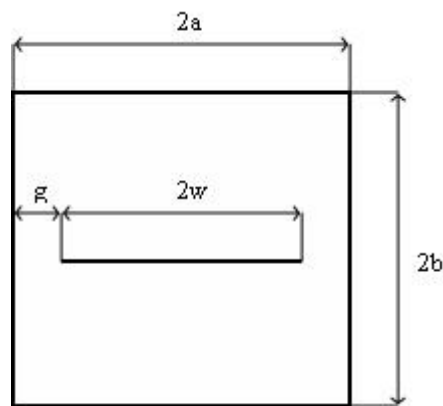


Obrázek 1.4: Deskové vedení [1].

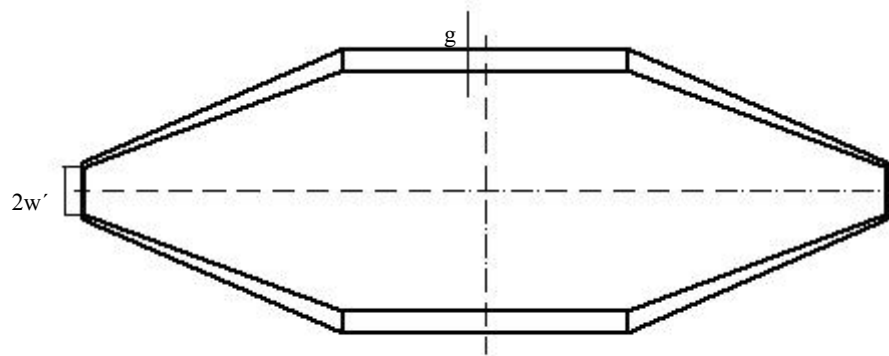
Vedení musí být také impedančně přizpůsobené jak na vstupu tak i na výstupu. Deskovým vedením se šíří postupná vlna s konstantním rozložením intenzity elektromagnetického pole po celé jeho délce. Výhodou tohoto zařízení je značná jednoduchost a malá rozměrovost oproti měřicím komorám.

Nevýhodou je pak jejich nehomogenost v krajních polohách, protože jsou boční strany neuzavřené, tudíž po bocích dochází k nežádoucímu vyzařování. Tento problém odstranil v r.1980 M.L.Crawford, když zkonstruoval svoji *Crawfordovu komoru*.

Crawfordova nebo-li TEM komora se skládá z hlavního obdélníkového vlnovodu, který následně přechází přílehlým zúženým přechodem, až ke konečným portům jak je na obrázku 1.5 a 1.6; obvykle jeden port je připojen k mikrovlnnému zdroji skrz koaxiální kabel a druhý je připojen k přizpůsobivé zatížené impedanci [2]. Uvnitř komory se vytváří homogenní elektromagnetické pole do frekvenci maximálně 2 GHz, pro kterou se začne šířit vyšší úrovně vidů.



Obrázek 1.5: Crawfordova komora: boční řez.



Obrázek 1.6: Crawfordova komora: podélní řez.

Vlna, která prochází skrze komoru, končí někde v oblasti rovinného šíření ve volném prostoru s impedancí $120\pi \approx 377\Omega$ – impedance volného prostředí. Zvláštní pozornost musíme dávat na zužující se přechod TEM komory, zde je třeba zajistit impedanční přizpůsobení. Pokud by komora nebyla impedančně přizpůsobena, způsobovalo by to stojaté vlnění v komoře, které by se mohlo projevit tak, že by na vstupu ani výstupu nebyla změřena žádná úroveň výkonu [3]. Hlavní nevýhodou komory je omezené použití na vyšších frekvencích.

Až do mezní frekvence f_m se uvnitř komory šíří elektromagnetické pole s videm TEM¹⁰ podle vzorce (1.3) v závislosti na šířce komory [1]:

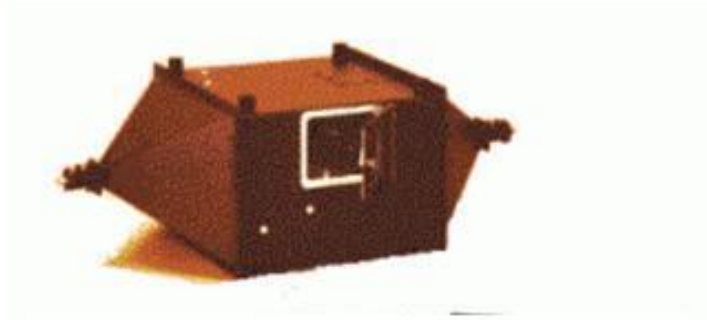
$$f_m = \frac{c}{4a} \quad (1.4)$$

S rostoucí frekvencí, se velikost komory zmenšuje. Záměr byl navrhnout TEM komoru pro frekvenci okolo 1GHz s rozsáhlou plochou pro testovací zařízení a dodržet standardní charakteristickou impedanci 50Ω nebo 75Ω, kterou lze také vypočítat podle vztahu 1.4

$$Z_0 = \frac{30\pi}{\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln\left(\sinh \frac{\pi g}{2b}\right)} \quad (1.5)$$

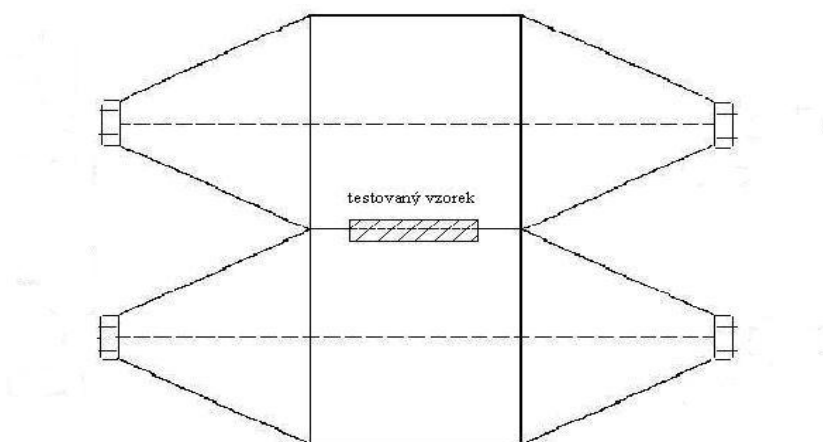
kde a , b a g jsou rozměry jejichž význam je patrný z obrázku 1.5 a 1.6.

Příklad takové Crawfordové komory je na obrázku 1.7



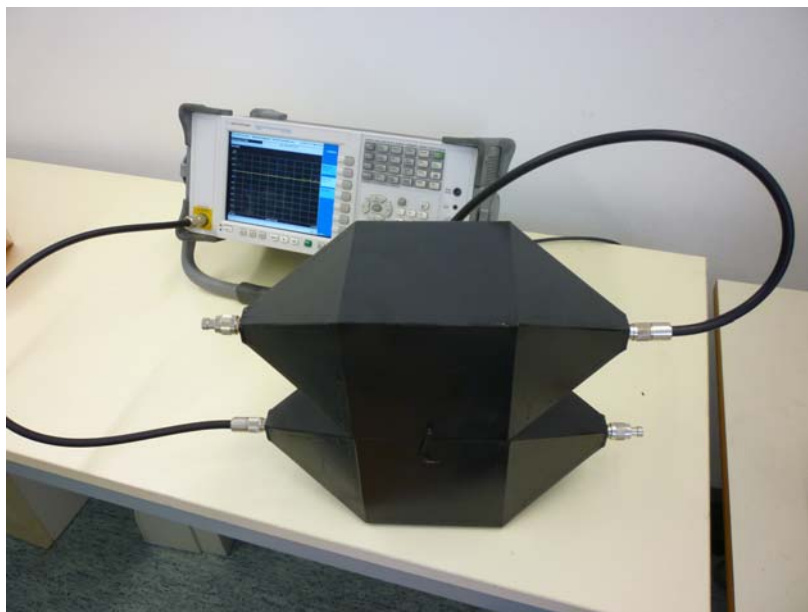
Obrázek 1.7: Příklad provedení Crawfordové komory [5].

Postupem času se po experimentování zkonstruovala *dvojitá Crawfordova komora*. Ta se od její jednoduché verzi liší hned na první pohled Jsou to totiž dvě stejně velké komory spojené jejich jednou společnou stěnou. Měřený vzorek se umísťuje do otvoru, který je v jejich společné stěně, obrázek 1.8.



Obrázek 1.8 Nákres dvojitě Crawfordovy komory.

Komoru napájíme vysokofrekvenčním generátorem kde na dolní port 1 přivádíme vstupní signál. Port 2 a port 3 jsou zakončené pomocí 50Ω impedance. Elektromagnetické pole, které se šíří nejprve ve spodní části komory se přes testovaný vzorek pak dostává do horní části komory, kde patřičné výsledky vyhodnocujeme pomocí spektrálního analyzátoru viz. obrázek 1.9.



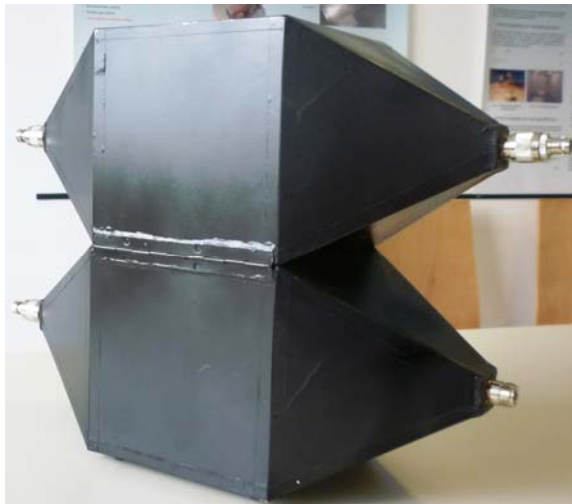
Obrázek 1.9 Měřící pracoviště komory.

V místě, kde šíření vlny přechází z jedné komory do druhé přes testovaný vzorek, by měla být zajištěna dostatečná izolace, která by zabránila vyzářování kolem otvoru. obrázek 1.10.



Obrázek 1.10 Izolace kolem otvoru.

U dvojité komory odpadá nutnost řešení problému s dvířkami, kdy je to nejnáchylnější místo na únik vyzařování. Za to je na konstrukci více náročnější než klasická jednoduchá komora. Jak taková komora vypadá v praxi je ukázáno na obrázku 1.11

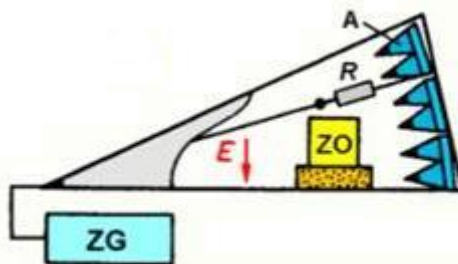


Obrázek 1.11: Ukázka dvojité Crawfordovy komory.

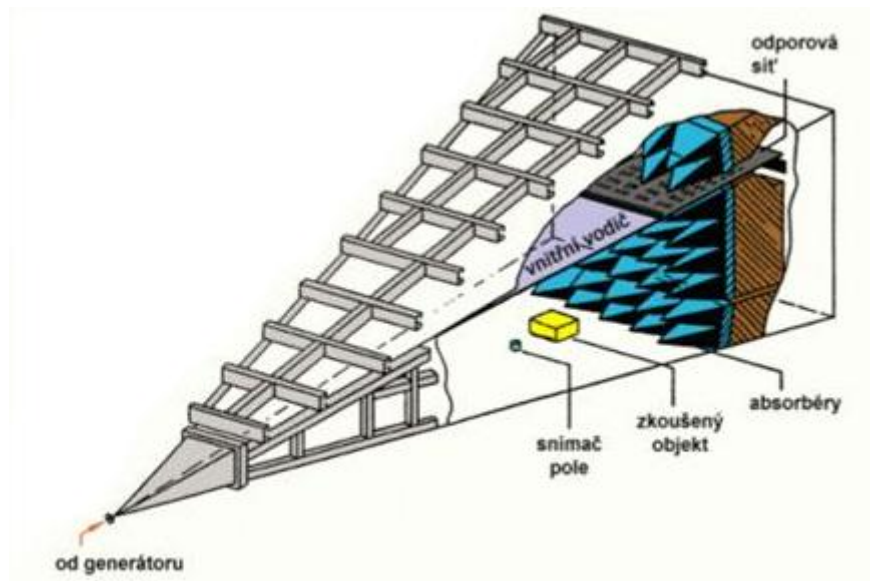
S postupem času docházelo ke zvyšování kmitočtů a komora začínala být nedostačující. Proto se vyvinula vylepšená verze Crawfordovy komory *GTEM*.

GTEM nebo-li Giga TEM komora, je obdoba Crawfordovy komory, která slouží pro testování elektromagnetické odolnosti zvláště na frekvencích v GHz. Obsahuje vnější vodič, ten je ve tvaru čtyřbokého jehlanu, a vnitřní vodič, který má tvar trojúhelníku. Jak elektrické tak i magnetické vlny musí vytvářet pole, které jsou kolmé na směr šíření. Elektrické pole se šíří z vnitřního vodiče směrem k okrajovému vodiči. Magnetické pole je vytvářeno kolem vnitřního vodiče.

K vyvarování se nežádoucím účinkům, které nastávají v klasické Crawfordově komoře, při vyšších frekvencích, je GTEM vybavena feritovými absorbátory viz obrázek 1.12 a také obrázek 1.13. Tím je komora použitelná pro frekvence i nad 2GHz. Naopak pro nižší kmitočty je zapotřebí zajistit bezodrazivost. Ta je zajištěna odporovou sítí $R=Z_0$ na konci páskového vedení [4].

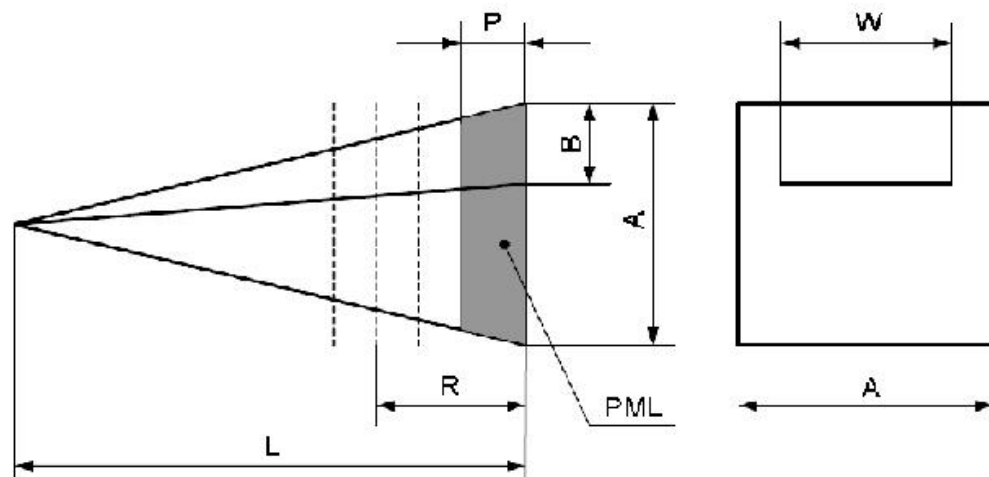


Obrázek 1.12 Boční náčrt GTEM komory s absorbátory [1].



Obrázek 1.13 Konstrukce GTEM komory [1].

Výhodou těchto GTEM komor je především v použití na frekvenci až do 10GHz, a také možnost dosahovat vysokých hodnot intenzity pole. Tato komora je oproti Crawfordově objemnější, takže zde můžeme testovat větší vzorky popř. zařízení. Boční a čelní nárys takovéto komory znázorňuje obrázek 1.14.



Obrázek 1.14 Boční a čelní nárys GTEM.

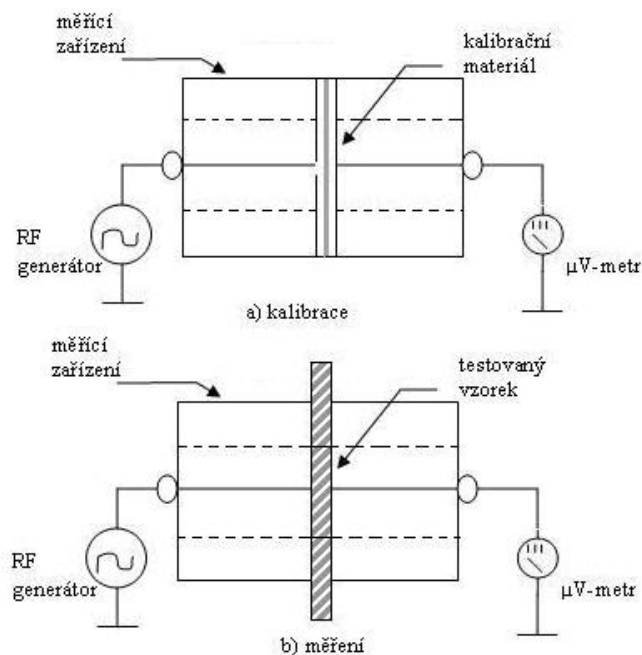
kde je L -délka komory, A - šířka a zároveň výška komory, P -šířka absorbérů, B -výška odporové sítě od vrchu, P -šířka odporové sítě, R -vzdálenost snímaného pole.

2 MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ STÍNÍCÍCH TKANIV

V dnešní době, kdy vzrůstá rozmach radiových komunikací a rozvoj elektronických zařízení, jsou způsoby elektromagnetického stínění jednou z hlavních priorit zabezpečování proti okolním rušením popř. ochrany lidského zdraví. Nejčastěji se pro stínění používají železo, případně jeho slitiny. Avšak v poslední době se zkoušejí nové materiály, které mají jisté výhody. Mají především menší hmotnost, jsou flexibilnější, nejsou náchylné např. na korozi atd. Nevýhodou může být jen nižší mechanická odolnost. Při vývoji těchto textilií vzniká potřeba testování jejich vlastností a proto se hledají nové, prostorově i cenově výhodnější metody měření

2.1 Metoda měření vložným útlumem

Jedna nová metoda pro testování vložného útlumu je speciální souosé koaxiální vedení, vzdálené od sebe několik mm, kdy na jednu stranu vedení připojíme generátor a na druhou měřicí přístroj (μ -voltmetr). Do malé mezery mezi těmito vodiči se vkládá testovaný vzorek, pak se přitlačí obě vedení s testovaným vzorkem. Přes testovaný vzorek přechází elektromagnetické vlny a vyhodnocují se ztráty v testovaném materiálu. Tato metoda spočívá v tom, že se příslušné měřicí zařízení nejdříve zkalibruje bez měřeného vzorku a poté se vloží testovaný vzorek a vyhodnotí se změna vodivosti systému, jak je ukázáno na obr.2.1.



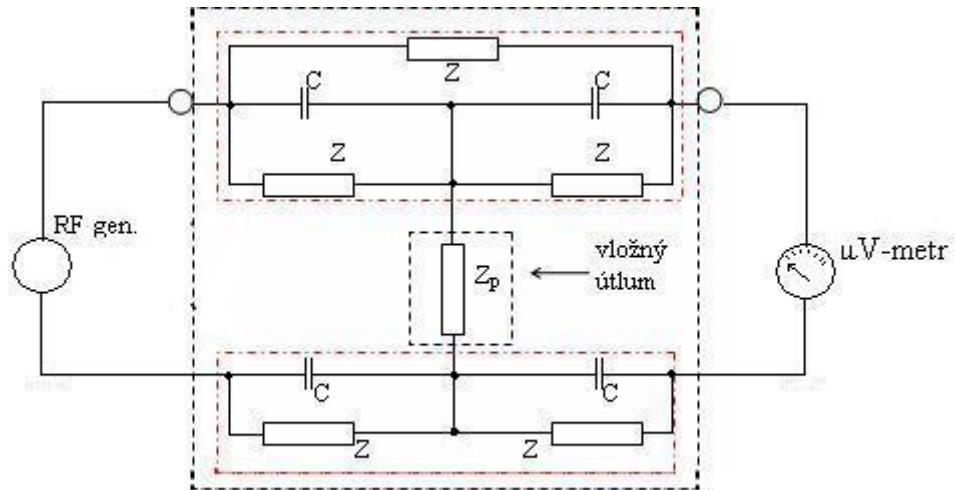
Obrázek 15 Schéma pro měření vložným útlumem.

Vychází se zde ze vzorce

$$A_{dB} = 20 \cdot \log \frac{U_0}{U_1} \quad (2.1)$$

kde U_0 je vstupní hodnota napětí, U_1 je výstupní napětí s testovaným vzorkem.

Měřicí zařízení z obrázku 2.1 si můžeme představit jako model složený z několika pasivních prvků jak je na obrázku 2.2.



Obrázek 16 Model měřicího zařízení [6].

Impedance Z_p představuje vložený útlum. Ostatní pasivní prvky charakterizují přechod mezi testovaným vzorkem a vodičem, odpor a kapacitu ve vodiči a další nežádoucí ztráty. Prvky Z, C jsou při kalibraci eliminovány [6].

2.2 Měření stínící efektivity SE

Pro tento způsob měření se používá Crawfordova komora a spektrální analyzátor viz obrázek 2.3. Při měření efektivity stínění se vychází ze vztahu 2.2 (2.3). Nejdříve se komora zkalibruje bez testovaného vzorku E_0 , a poté se změří intenzita pole se vzorkem E_1 . Testovaný vzorek se vkládá na střední vodič který je spojen s konektory. Vlastnosti komory byly popsány v kapitole 1.

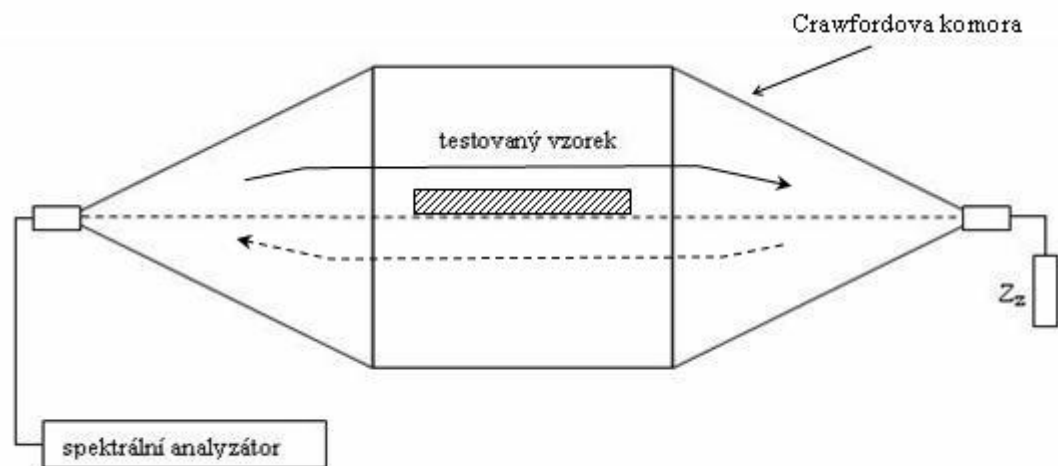
Efektivita stínění elektrického pole je definován jako

$$SE_{dB} = 20 \log \frac{E_0}{E_1} \quad (2.2)$$

a pro magnetické pole

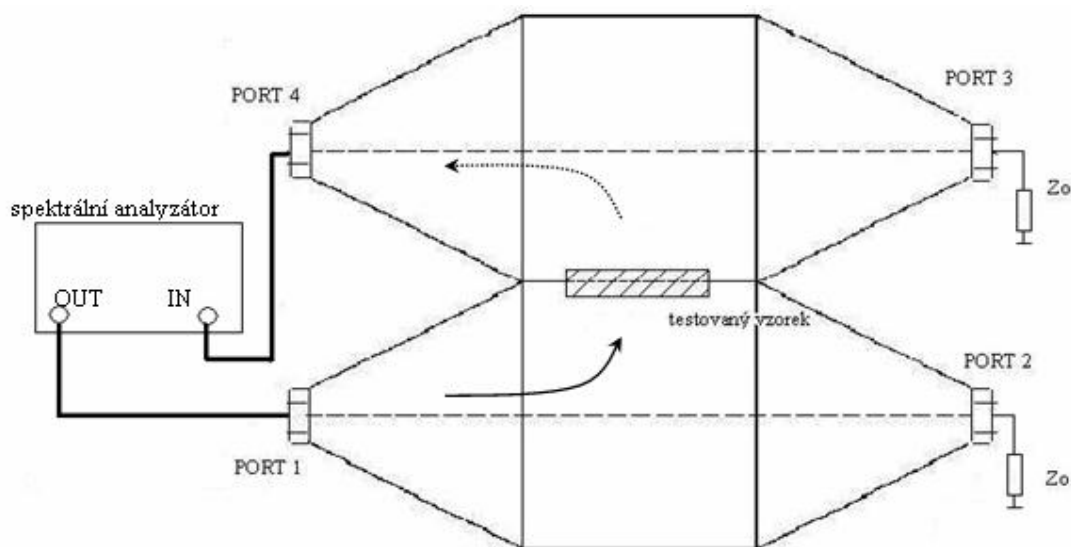
$$SE_{dB} = 20 \log \frac{H_0}{H_1} \quad (2.3)$$

kde $E_0(H_0)$ je intenzita pole bez měřeného vzorku a $E_1(H_1)$ je intenzita pole se vzorkem.



Obrázek 17 Schéma zapojení pracoviště s jednoduchou komorou pro měření efektivity stínění.

Další způsob měření je s použitím dvojitě Crawfordovy komory a spektrálního analyzátoru viz obrázek 2.4. Komora se nejdříve zkalibruje bez testovaného vzorku, poté se vzorek vkládá mezi dvě komory. Analyzátor zde měří vložný útlum mezi dvěma porty, kdy na jeden připojíme výstup z generátoru a na druhém portu přijímáme získanou intenzitu. Rozdíl mezi těmito intenzitami je způsobena vloženým materiálem, a tím pádem je zjištěna jeho účinnost stínění.



Obrázek 18 Zapojení měřícího pracoviště s dvojitou Crawfordovou komorou.

3 NÁVRH A KONSTRUKCE CRAWFORDOVY KOMORY

3.1 Návrh

Komora byla navrhována pro 50Ω charakteristickou impedanci. Podle 1.3 vypočítáme mezní frekvenci pro šíření vidu TEM. Komora byla navržena pro frekvenci 1GHz, proto šířka bude:

$$a = \frac{c}{4 \cdot f_m} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot 1 \cdot 10^9} = \underline{\underline{75mm}} \quad (3.1)$$

Budeme-li uvažovat, že rozměry $a=b$, čili čtvercový průřez, pak ze vzorce (2.3) pro charakteristickou impedanci Z_0 , vyjádříme vhodnou úpravou neznámou g , která nám vyjadřuje šířku mezery v nejširším místě komory, čili v místě mezi středním vodičem a okrajem, jak je znázorněno na obrázku 2.3.

$$g = \frac{\sinh^{-1} \left[e^{\left(\frac{a}{b} \frac{30\pi}{Z_0} \right) \frac{\pi}{2}} \right] \cdot 2b}{\pi} \quad (3.2)$$

a následně dosadíme

$$g = \frac{\sinh^{-1} \left[e^{\left(\frac{0,075}{0,075} \frac{30\pi}{50} \right) \frac{\pi}{2}} \right] \cdot 2 \cdot 0,075}{\pi} = \underline{\underline{11,7mm}} \quad (3.3)$$

Protože je komora symetrická ve všech směrech, šířku středního vodiče „ $2w$ “ získáme odečtením mezery po obou stranách, od celkové šířky komory.

$$2w = 2a - 2g = 2 \cdot 75 - 2 \cdot 11,7 = \underline{\underline{126mm}} \quad (3.4)$$

Tímto máme hlavní úsek komory. Dále je zapotřebí spočítat mezeru mezi středním vodičem a krajem v místě největšího zúžení. Protože zde budou připojeny konektory, budeme uvažovat na koncích komory otvory $20 \times 20 \text{mm}$. Potom bude mezeru g' ze vztahu (5.3) rovna:

$$g' = \frac{\sinh^{-1} \left[e^{\left(\frac{0,075}{0,075} \frac{30\pi}{50} \right) \frac{\pi}{2}} \right] \cdot 2 \cdot 0,015}{\pi} = \underline{\underline{1,6mm}} \quad (3.5)$$

a následná šířka středního vodiče v nejužším místě w

$$2w' = 2a - 2g' = 2.0,01 - 2.0,0016 = \underline{\underline{16,8}} \text{ mm} \quad (3.6)$$

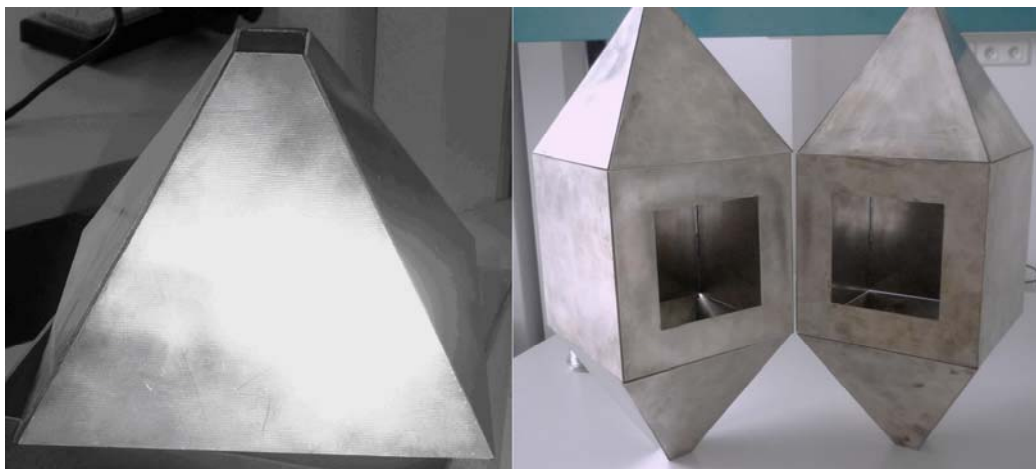
Tímto jsme spočítali všechny důležité rozměry jednoduché Crawfordovy komory, která reálně bude vypadat jak je uvedeno v příloze A.

3.2 Konstrukce

Celá Crawfordova komora je zkonstruována z cuprexitových oboustranných desek o tloušťce 1,5mm. Po jednotlivých částí se plochy nejdříve důkladně vyleštily a následně odmastily. Protože se vlna šíří v komoře po povrchu, bylo dobré zajistit dostatečnou vodivost, proto jsme desky postříbřily. Střední vodič jsme připojili k vysokofrekvenčním konektorům. Mezi obě komory jsme také zařadili dveřní pant pro lepší manipulaci při měření.



Obrázek 19 Vysokofrekvenční konektor bez a se zakončenou impedancí.

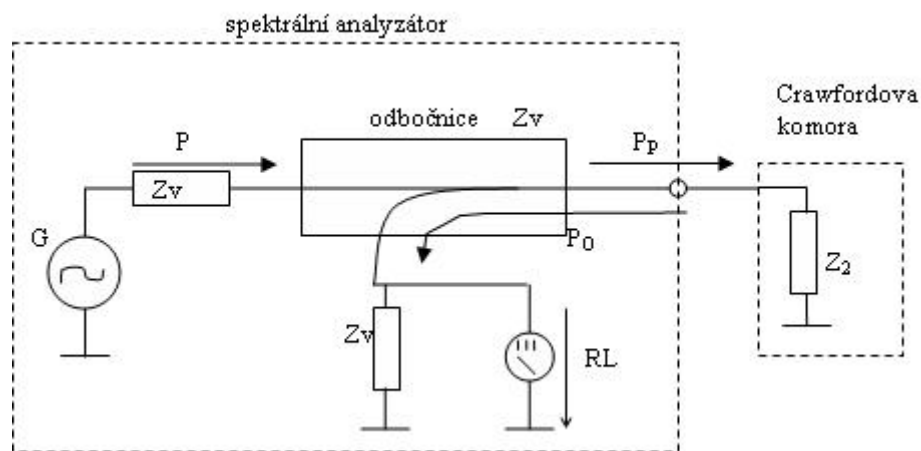


Obrázek 20 Postříbřená komora.

4 VLASTNOSTI CRAWFORDOY KOMORY

4.1 Charakteristická impedance komory

Protože je komora navržena na impedanci 50Ω , je třeba si to ověřit prakticky. Na obr.6.1 je přibližné schéma pro měření této impedance. Spektrálního analyzátor zde vyhodnocuje parametr *Return Loss* – RL [dB], který udává jaký poměr výkonu se odrazilo od měřené komory. V neideálnějším případě by se neodrazilo nic, komora je dokonale přizpůsobena a hodnota útlumu $RL \rightarrow \infty$. V reálném případě tomu však tak není. Protože potřebujeme znát hodnotu Z_2 , musíme nejdřív odvodit vztah mezi impedancí komory a parametrem RL .



Obrázek 21 Schéma pro měření impedance komory.

obecně se RL spočítá v dB

$$RL = 10 \log \frac{P_p}{P_o} \text{ (dB)} \quad (4.1)$$

kde P_p - je výkon přímé vlny a P_o – je výkon odražené vlny.

činitel odrazu je definován [5]:

$$\hat{\rho} = \frac{\hat{U}_o}{\hat{U}_p} \quad (4.2)$$

výkon P se vypočítá jako

$$\begin{aligned} P_o &= \frac{U_o^2}{Z_v} \Rightarrow U_o = \sqrt{P_o \cdot Z_v} \\ P_p &= \frac{U_p^2}{Z_v} \Rightarrow U_p = \sqrt{P_p \cdot Z_v} \end{aligned} \quad (4.3)$$

do rovnice 4.2 dosadíme vztahy 4.3

$$\rho = \frac{U_O}{U_P} = \frac{\sqrt{P_O \cdot Z_V}}{\sqrt{P_P \cdot Z_V}} = \sqrt{\frac{P_O}{P_P}} \quad (4.4)$$

vyjádříme-li si poměr P_P/P_O z rovnice 4.1

$$\frac{P_P}{P_O} = 10^{\frac{RL}{10}} \Rightarrow \frac{P_O}{P_P} = \frac{1}{10^{\frac{RL}{10}}} = 10^{-\frac{RL}{10}} \quad (4.5)$$

dosadíme-li do 4.4 rovnici 4.5

$$\rho = \sqrt{\frac{P_O}{P_P}} = \sqrt{10^{-\frac{RL}{10}}} \quad (4.6)$$

činitel odrazu se spočítá pomocí impedancí Z_2 , Z_V [5]

$$\rho = \frac{Z_2 - Z_V}{Z_2 + Z_V} \quad (4.7)$$

po jednoduchých úpravách dostáváme, že

$$Z_2 = Z_V \cdot \frac{1 + \rho}{1 - \rho} \quad (4.8)$$

dosadíme-li 4.6 do 4.8

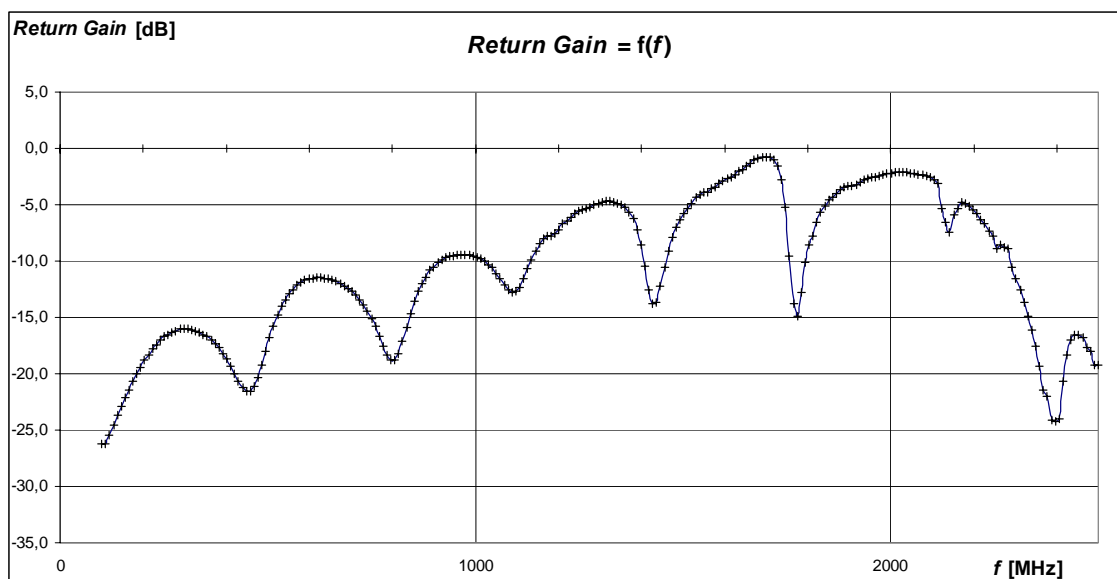
$$Z_2 = Z_V \cdot \frac{1 + \sqrt{10^{-\frac{RL}{10}}}}{1 - \sqrt{10^{-\frac{RL}{10}}}} \quad (4.9)$$

kde Z_V je impedance vedení, popř. odbočnice, v našem případě 50Ω , Z_2 je impedance komory.

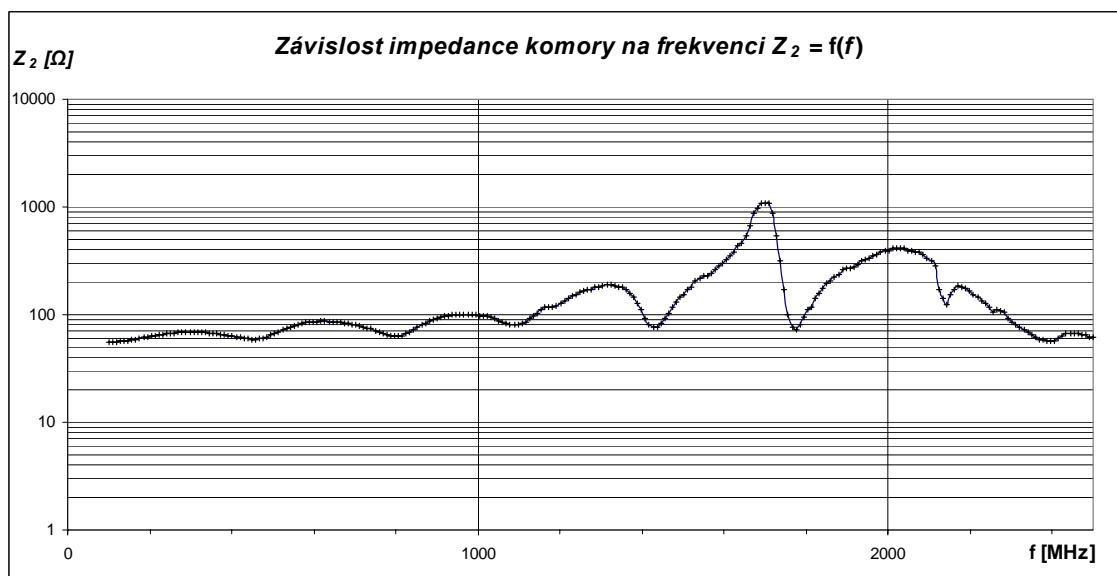
Parametr RL je udáván v kladných hodnotách, pokud ho budeme brát v úvahu jako útlum. V ideálním případě je impedance komory Z_2 konstantní pro celou šířku měřeného pásma, pro kterou je komora navržena. (Někdy se používá také parametr *Return Gain* - RG , který vyjadřuje zisk. Platí $RG = -RL$.)

4.2 Změřená impedance komory

Prakticky jsme měřili impedanci pomocí spektrálního analyzátoru. Výstup z analyzátoru jsme nejdříve zkalibrovali (zakončení kabelu nakrátko, naprázdno a s normovanou zátěží). Poté nastavili měřicí frekvenci (100MHz – 2,5GHz) a změřili útlum RL (v našem případě zisk RG) viz Graf 22. Výslednou impedanci Z_2 jsme vypočetli podle 4.9 a vynesli do grafu 4.3



Graf 222 Závislost Return Gain na frekvenci.



Graf 23 Závislost impedance komory na frekvenci.

Z grafu 4.2 je vidět, že jsou zde nežádoucí odrazy. Pro zjištění příčiny si nejdříve určíme oblast odražení. Frekvenční rozsah mezi dvěma uzly (mezi dvěma odrazy), je přibližně 350MHz. Podle vztahu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (4.10)$$

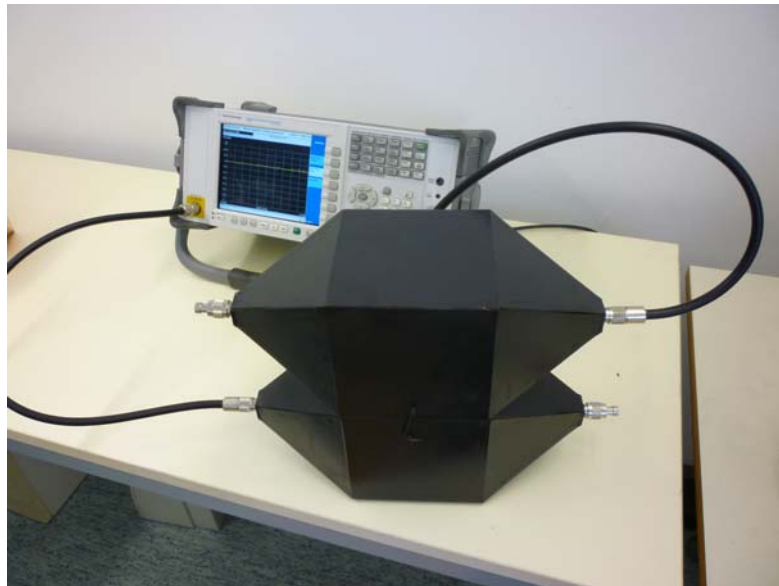
kde c je rychlost světla $3 \cdot 10^8$ m/s a f je frekvence je vlnová délka rovna

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{350 \cdot 10^6} = 0,85m \quad (4.11)$$

Čili odrazy jsou způsobeny na 0,85m délky vedení, tudíž v oblasti připojení kabelu ke konektoru. Podíváme-li se na výsledky měření z grafu 4.3 je vidět, že impedance Z_2 je až do frekvence $f=1$ GHz přibližně 50Ω , takže komora i při nežádoucích odrazech funguje. Při dalším zvyšování frekvence pak v komoře nastávají mnohonásobné odrazy.

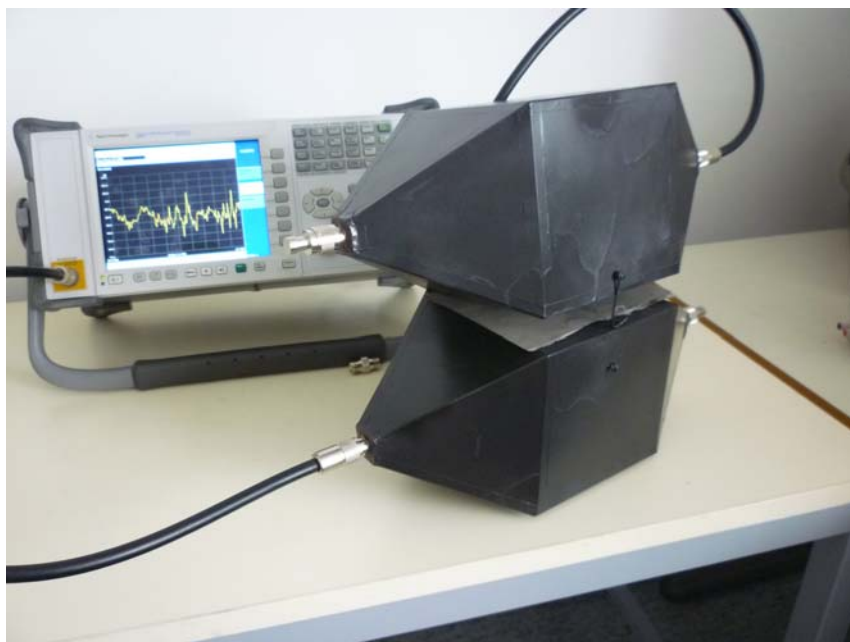
4.3 Měření různých stínících tkaniv

Pomocí dvojité Crawfordovy komory jsme měřili různé stínící materiály. Na dolní port jsme připojili výstup analyzátor, na horní port komory jsme připojili vstup analyzátoru. Na zbylé dva porty jsme připojili impedance 50Ω , obrázek 4.2.



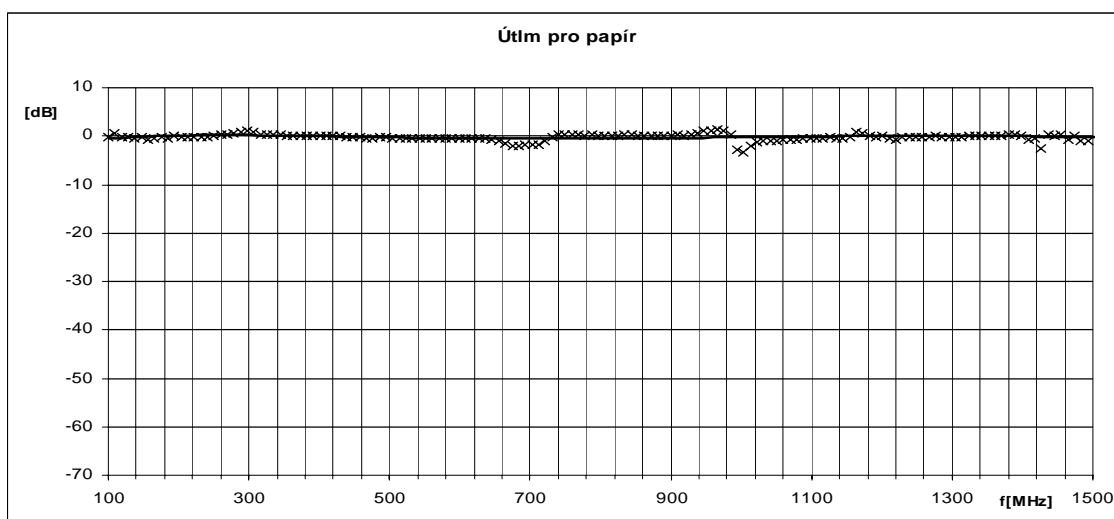
Obrázek 24 Zapojení analyzátoru ke komoře.

Stínící textilie jsme vkládali mezi dvě komory, jak je ukázáno na obrázku 4.3.

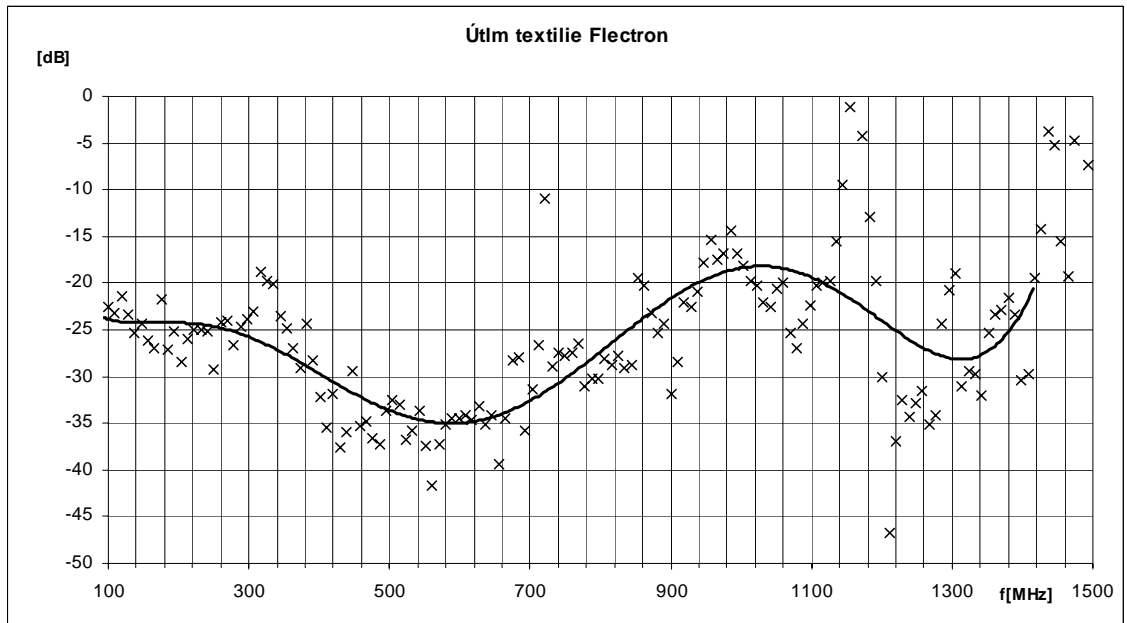


Obrázek 25 Ukázka měření textilií.

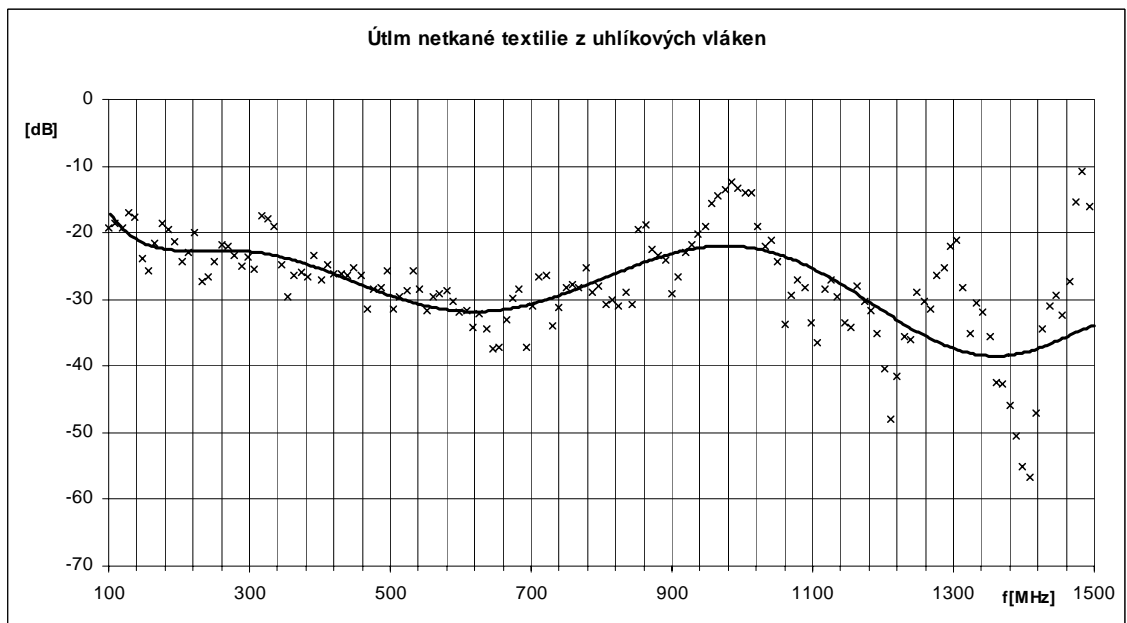
Po kalibraci měřící aparatury jsme získaly následující výsledky pro různé materiály



Graf 26 Křídový papír



Graf 27 Stínící textilie od výrobce Flectron.



Graf 28 Netkaná textilie z uhlíkových vláken.

Z grafů je vidět, že křídový papír nemá žádný vliv na stínění. Naproti tomu textilie od výrobce Flectron má útlum stínění velmi velký, hlavně v okolí 600MHz, kdy jsme naměřily největší útlum. U další textilie, netkaná z uhlíkových vláken, byly velké hodnoty útlumu ve vyšších frekvencích, okolo 1,4GHz. Výsledky tohoto měření ukazují, jak kvalitní jsou jednotlivé stínící materiály. Nutno podotknout, že výrobci jsou zahraniční.

5 ZÁVĚR

Testování odolnosti proti rušení, je v dnešní době odvětví elektrotechniky, se kterou v budoucnu bude muset i nadále počítat, protože rozvoj radiových a mobilních komunikací rapidně roste a s ním i také rostou náklady na požadavky co nejmenšího rušení a ovlivňování signálu. V této části bakalářské práce jsme se teoreticky zaměřili na způsoby měření materiálů pro odstranění nebo předejití různých rušivých vlivů, která působí v okolí na radiové a mobilní komunikace. Uvedli jsme si základní speciální antény pro simulaci zkušebních elektromagnetických polí, jejich výhody a nedostatky, které mají. Cílem práce bylo navrhnout a zkonstruovat dvojistou Crawfordovu komoru. Změřili jsme vlastnosti zkonstruované komory a provedli jsme testování měření útlumu stínících textilií. Otestovali jsme komoru a jsme potvrdili teoretické výpočty a je schopna bez problému pracovat do kmitočtu 1GHz na který byla navržena. S měřením jsme ověřili impedanci komory v pásmu do 1GHz, která vycházela blízko navržené impedance 50Ω . Dále jsme zkoušeli komoru pro testování vložného útlumu stínících tkaniv. Výsledky testování jsou vyneseny do grafů 4.6 až 4.8, z kterých vidíme dobrou schopnost odstínění elektromagnetického rušení v měřeném pásmu.

LITERATURA

- [1] Prof. Ing. Jiří Svačina CSc.: *Základy elektromagnetické kompatibility*, Vysoké učení technické v Brně (2001).
- [2] M.L.Crawford, *Generation of Standart EM Fields Using TEM Transmission Cells*, IEEE Transmission on Elektromagnetic Compatibility.1974, vol 16, pp 189-195.
- [3] K.Malaric, J.Bartolic *Design of a TEM-Cell with Increased Usable Test Area*.Faculty of Electrical Engineering and Computing. 2003, vol. 11, no. 2.
- [4] C.Icheln, *The Construction And Application of GTEM Cell*, Technical University of Hamburk 1995,pp 11-16.
- [5] Doc.Ing.Zdeněk Nováček CSc. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*, Vysoké učení technické v Brně (2002)
- [6] J.Koprowska, M.Pietranik, W.Stawski *New Type of Texiles with Shielding Properities*, FIBRES & TEXTILES in Easten Europe,, July 2004

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

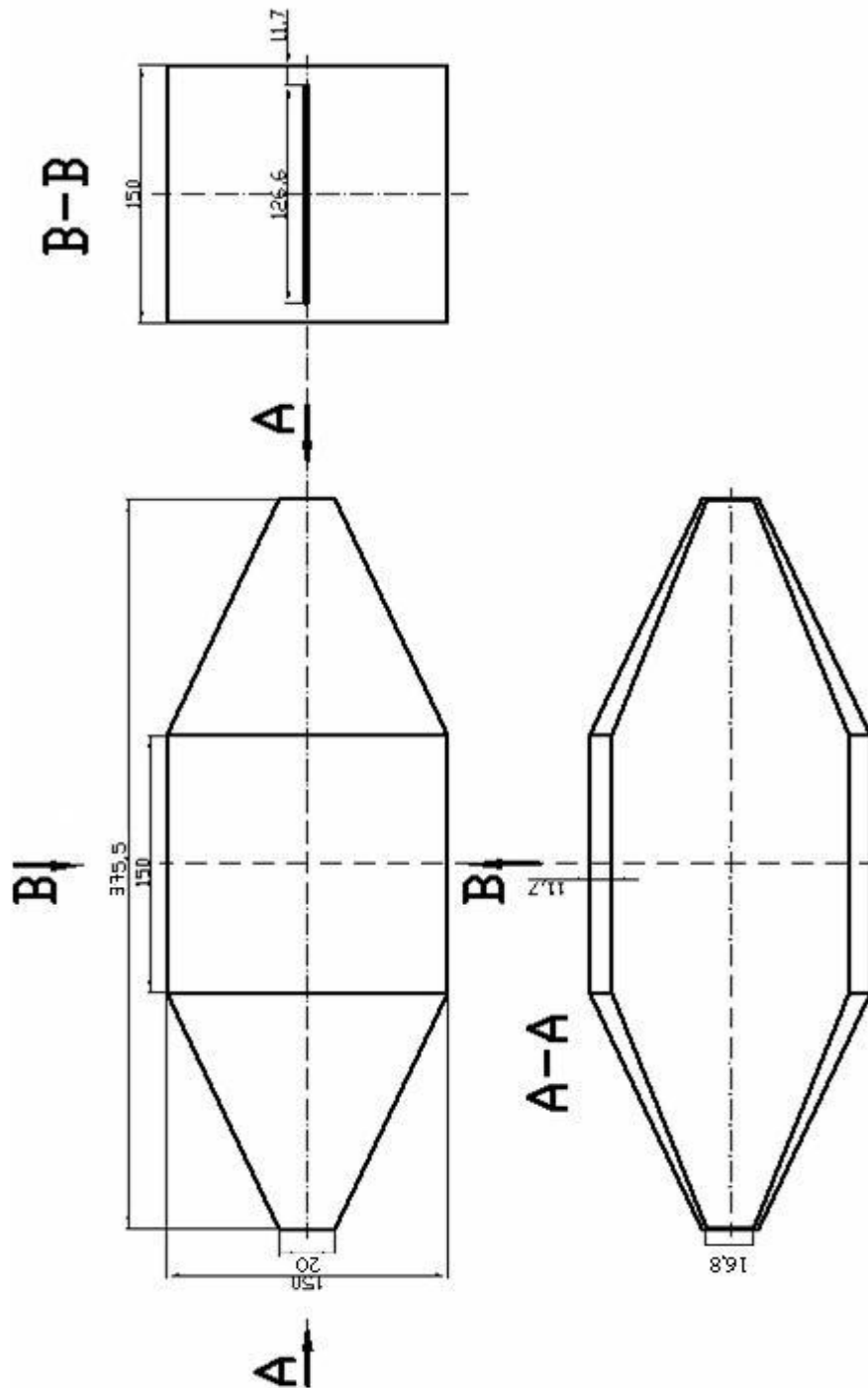
a	[m]	Šířka komory
b	[m]	Výška komory
d	[m]	Vzdálenost mezi jednotlivými deskami
E	[V/m]	Intenzita elektrického pole
f_m	[Hz]	Mezní frekvence
g	[m]	Šířka mezery mezi středním vodičem a okrajem
G_{VA}	[-]	Zisk vyzařované antény
l	[m]	Délka deskového vedení
P_v	[W]	Výkon vyzařované antény
r	[m]	Vzdálenost mezi anténou a elektromagnetickým polem
U	[V]	Elektrické napětí
w	[m]	Délka středního vodiče uvnitř komory
Z_0	[Ω]	Charakteristická impedance
E_0	[V/m]	Intenzita elektrického pole nestíněného materiálu
E_1	[V/m]	Intenzita elektrického pole stíněného materiálu
H_0	[A/m]	Intenzita magnetického pole nestíněného materiálu
H_1	[A/m]	Intenzita magnetického pole stíněného materiálu
SE	[-]	Efektivita stínění
A	[-]	Zisk / Přenos
U_0	[V]	Vstupní napětí
U_1	[V]	Výstupní napětí
RL	[dB]	Return Loss – odražený útlum
RG	[dB]	Return Gain – odražený zisk
ρ	[-]	Činitel odrazu
P_0	[W]	Výkon odražené vlny
P_P	[W]	Výkon přímé vlny
Z_2	[Ω]	Impedance komory
Z_V	[Ω]	Impedance vedení, přizpůsobivá impedance
c	[m/s]	Rychlost světla

SEZNAM PŘÍLOH

A	ROZměry crawfordovy komory	25
B	Výkresová dokumentace	26

A ROZMĚRY CRAWFORDOVY KOMORY

Návrh jednoduché komory. Měřítko 1:4



B VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE