VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

Workplace for HF Radiated Immunity Testing

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S PROJECT

AUTOR PRÁCE Bc. Petr Slach
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.
SUPERVISOR

BRNO, 2009

VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student:	Bc. Petr Slach	***ID:***	54448
Ročník:	2	***Akademický rok:***	2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je návrh, realizace a funkční ověření kompaktního laboratorního pracoviště pro zkoušky odolnosti elektronických zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím.
Navrhněte konstrukci páskového vedení (parallel plate antenna) pro testování malých objektů v pásmu do stovek MHz při intenzitě elektrického pole několik desítek V/m. Ověřte parametry navrženého páskového vedení počítačovou simulací, vedení realizujte včetně vstupních a výstupních přizpůsobovacích a zatěžovacích obvodů a jeho funkčnost ověřte měřením.
Sestavte testovací pracoviště s realizovaným páskovým vedením a uskutečněte několik testů odolnosti vybraných elektronických zařízení. Posuďte výsledky dle platných norem EMC.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SVAČINA, J. Elektromagnetická kompatibilita - principy a metody. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Edice "Připojujeme se k Evropské Unii", svazek 2
[2] KOWALCZYK, K. R. Parallel-Plate Method for Creating Electric Fields from 1 MHz to 1000 MHz. In Proc. of the IEEE Int. Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC 2001, vol. 1, p. 425 - 428.

Termín zadání:	9.2.2009	***Termín odevzdání:***	29.5.2009

Vedoucí práce: prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práve třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Petr Slach
Bytem: Vlčnovská 16, Brno, 628 00
Narozen/a (datum a místo): 5. ledna 1984 v Brně

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

☐ disertační práce
☒ diplomová práce
☐ bakalářská práce
☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím
Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.
Ústav: Ústav radioelektroniky
Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.

2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.

3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti

   ☒ ihned po uzavření této smlouvy
   ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
   ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
   ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
   ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)

4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

4. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.

5. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.

6. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.

7. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

…….. ……

Nabyvatel Autor

Abstrakt:

Diplomová práce zkoumá možnosti návrhu pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím. Zabývá se metodami testování, popisuje výhody a nevýhody daných metod. Zkoumá možnosti testovacích zařízení, možné velikosti intenzit elekrického pole a konstrukční možnosti. Je zde přehled o způsobu testování vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem vysoké intenzity. Součástí práce je návrh konstrukce deskového vedení včetně praktické realizace.

This thesis investigates into possibilities of a design of a workplace for device endurance experiments against strong high-frequency electromagnetic field. It deals with testing methods, describes advantages and disadvantages of such methods. It investigates possibiities of testing devices, possible magnitudes of fieldstrenght. One can find in the thesis a review of a way of testing using a high-intensity electromagnetic field. A concept of a construction of a stripline including a practical example is a part of the thesis.

Slova CZ : TEM buňka, Crawfordowa buňka, Parallel plate antena, deskové vedení, GTEM buňka, Tri-plate stripline,elektromagnetické pole,intenzita elektrického pole,EMC, EMS

Slova ENG: TEM cell, Crawford cell, Parallel plate antena, plate conductor, GTEM cell, Tri-plate stripline, electromagnetic field, fieldstrength, EMC, EMS

SLACH, P. Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím: *Diplomová práce*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009. 47 s.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Pracoviště pro zkoušky odolnosti zařízení vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009 .....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Jiřímu Svačinovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009 .....

..

podpis autora

Obsah:

Úvod 8

Způsoby testování 9

1 1. Deskové vedení 10

1.1 Parallel Plate Antenna 10

1.2 E&H Field Generator 17

1.3 Tri-plate stripline 18

2 2.TEM buňky 18

2.1 Crawfordovy komory 18

2.2 GTEM buňky 20

3 3. Návrh deskového vedení 22

3.1 Impedance 22

3.2 Omezení při návrhu 23

3.3 Ověření normy 25

3.4 Rozměry vedení 27

4 4. Přizpůsobení 30

4.1 Přizpůsobovací obvody s drátovými rezistory 31

4.2 Metaloxidové vrstvové rezistory 33

4.3 Vrstvové rezistory 34

5 5. Konstrukce přizpůsobovacího a zakončovacího členu 36

6 6. Ovládání generátoru 40

7. 7. Realizace 40

8. 8. Měření intenzity pole mezi deskami 41

Závěr 46

Seznam použité literatury 47

Úvod

Zakladatel elektomagnetické kompatibility H. M. Schlike řekl:
"Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností".
Aby bylo možno ověřit podmínku elektromagnetické kompatibility, je třeba každé zařízení vhodně testovat. Nelze vyrobit výrobek, který by byl dokonale izolovaný od vnějších rušení a sám by do okolí rušení nevyzařoval. Lze se spokojit se zařízením, které by vyzařovalo rušení v omezeném rozsahu. Současně musí ostatní zařízení být dostatečně odolné proti rušení. Aby bylo možné testovat jak je zařízení odolné vůči rušení, musí se vyrobit vhodná aparatura na jeho testování. S rostoucím rozvojem elektrotechniky jsou zkoušky odolnosti stále důležitější.
Norma ČSN EN 50082 definuje přípustné funkční poruchy zařízení:

Funkční kritérium A - Zařízení musí během zkoušky pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce.

Funkční kritérium B - Zařízení musí po skončení zkoušky pokračovat ve své činnosti dle svého určení. Během zkoušky je dovoleno zhoršení činnosti zařízení, není však dovolena změna aktuálního provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. Po skončení zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce.

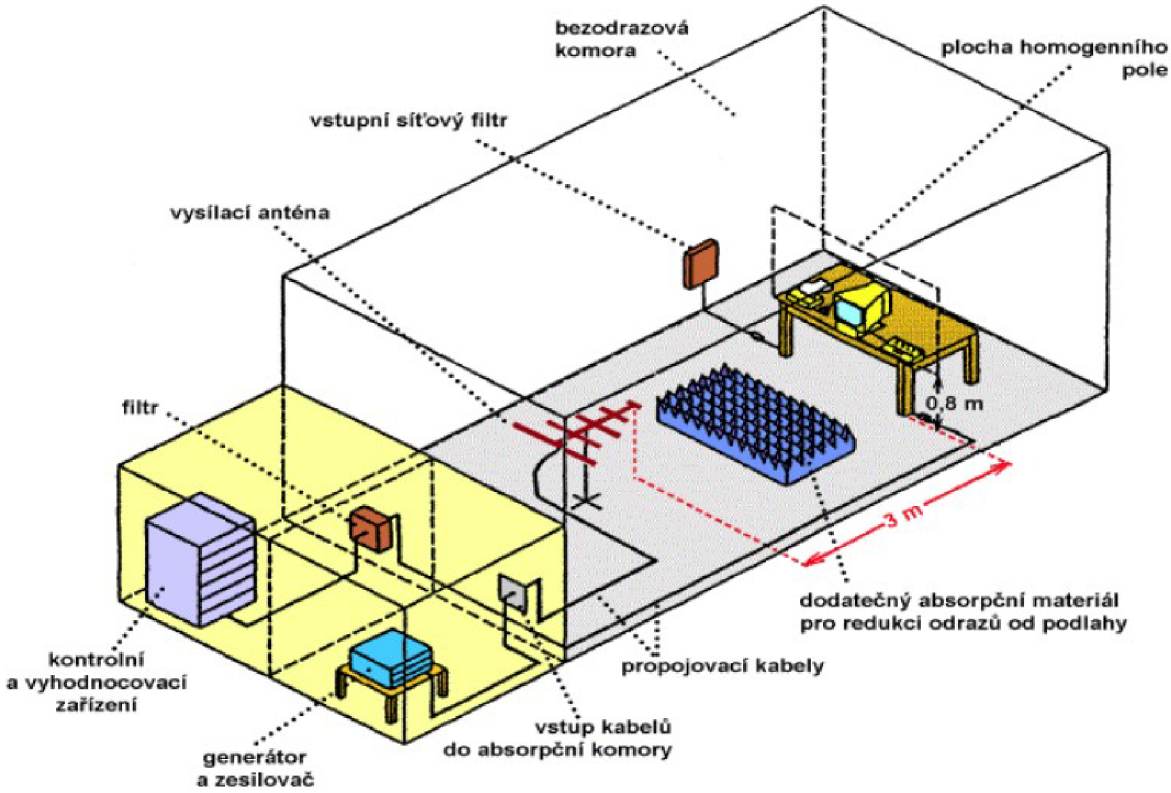
Funkční kritérium C - Je dovolena dočasná ztráta funkce zařízení za předpokladu, že se tato funkce po skončení zkoušky odolnosti obnoví sama, nebo může být obnovena činností řídicího systému, nebo zásahem operátora dle specifikace v návodu k použití zařízení.

Odolnost zařízení by teoreticky stačila posoudit v jeho pracovním prostředí. Prakticky je to ovšem nemožné. Pracovní podmínky se většinou mění v čase. Proto musíme vytvořit vhodné umělé podmínky na zkoušky odolnosti. Ty se provádějí v režimu kdy je zařízení nejodolnější.

V posledních letech se začal zvyšovat zájem o zkoušky odolnosti vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím. Je to dáno rozvojem komunikační techniky, množstvím pozemních a družicových vysílačů. Je žádoucí, aby bylo zařízení testováno, protože tyto komunikační prostředky nelze vypnout. Zamezí se tak možným poruchám, výpadkům zařízení v blízkosti těchto vysílačů.

Způsoby testování

Existuje několik způsobů jak lze zařízení testovat vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím.Jednou z nich je zkušební pracoviště, jehož uspořádání vidíme na obr.1. Zkoušený objekt je ozařován polem dané intenzity.



Obr.1 *Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu poli*

Uvnitř zkušební komory se nachází testované zařízení. Jako zdroj signálu slouží generátor, kterým je napájena vyzařovací anténa.Generátor stejně jako všechny kontrolní a vyzařovací zařízení se umisťují vně absorbční komory. Ta bývá obložena absorbčním materiálem, aby nedocházelo k odrazům od stěn. Vzdálenost vysílací antény a testovacího zařízení je dle normy 3m. Z toho plyne hned několik nevýhod tohoto testování. Absorbční materiály potřebné k obložení stěn v komoře jsou příliš drahé. Další nevýhodou jsou požadavky na uspořádání a rozměry místnosti.

Největší nevýhodou je potřeba velkého výkonu pro dosažení pole s intenzitou několik desítek V/m.

Pro vysílací výkon generátoru platí vztah

$$P_{\mathrm{V}} = \frac{E^2 \cdot r^2}{30\, G_{\mathrm{VA}}} \qquad (1.1)$$

kde Pv je vysílací výkon antény, E je intenzita pole vytvořeného anténou ve vzdálenosti r a G_{VA} je zisk vysílací antény.

Abychom dosáhli vysoké intenzity pole na vysokých frekvencích (okolo 1GHz případně více), je potřeba velkého výkonu budícího generátoru. Ten je jednou z nejnákladnějších součástí pracoviště. Pro testování vysokofrekvenčních polí velké intenzity není tato metoda příliš vhodná.

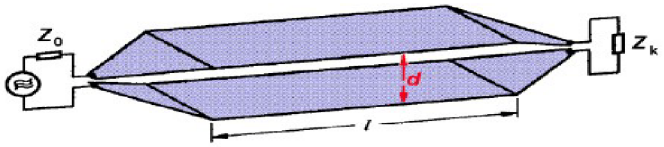
1. Deskové vedení

Řešením je použití speciální testovací antény. Tu si lze představit jako vysokofrekvenční vedení s příčnou vlnou TEM. Uvnitř tohoto vedení vzniká homogenní elektrické pole vysoké intezity (až desítek V/m). Budící výkony jsou přitom o několik řádů vyšší oproti předchozímu případu.Vyzařování pole do prostoru je velmi malé, takže se testování nemusí provádět ve speciálních absorbčních komorách. Tím se sníží finanční nároky na absorbční materiál a také na generátor.

Nejjednodušším typem takové antény je Parallel Plate Antenna u nás označovaná jako páskové (deskové) vedení.

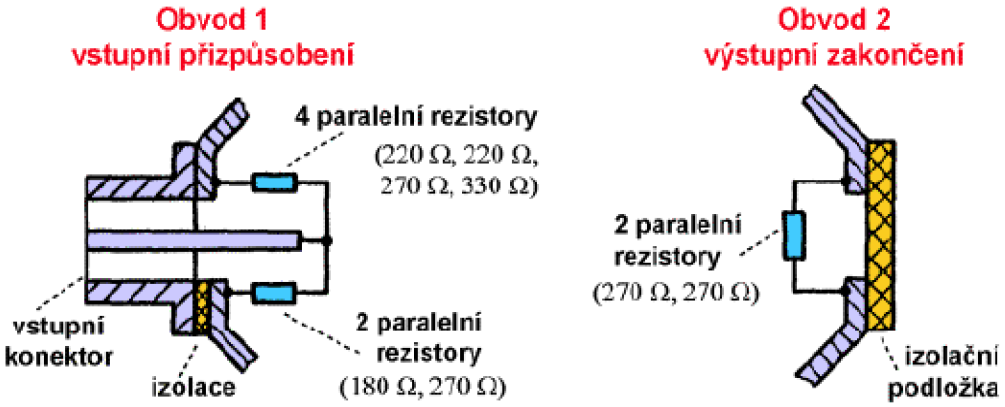
1.1 Parallel Plate Antenna

Předpokládá se příčné elektromagnetické pole TEM mezi dvěma deskami. Intenzita elektrického pole E lze pak vyjádřit jako E=U/d. Kde U je napětí mezi deskami a d je jejich vzájemná vzdálenost. Abychom zachovali pole dostatečně homogenní, lze zkoušet v tomto zařízení předměty, jejichž výška je rovna maximálně 1/3 vzdálenosti desek.Většinou se šířka desky volí stejná jako jejich vzájemná vzdálenost..

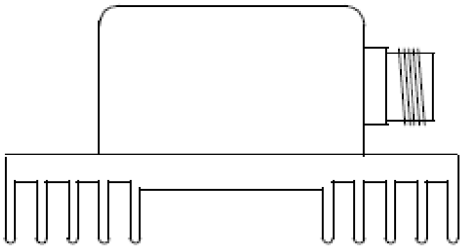


Obr.2 *Příklad realizace deskového vedení*

Důležité je impedanční přizpůsobení na vstupu i výstupu. Na přizpůsobeném vedení se šíří postupná vlna s konstantním rozložením intenzity pole podél celé jeho délky. Přizpůsobení musí být širokopásmové, proto se realizuje odporově.

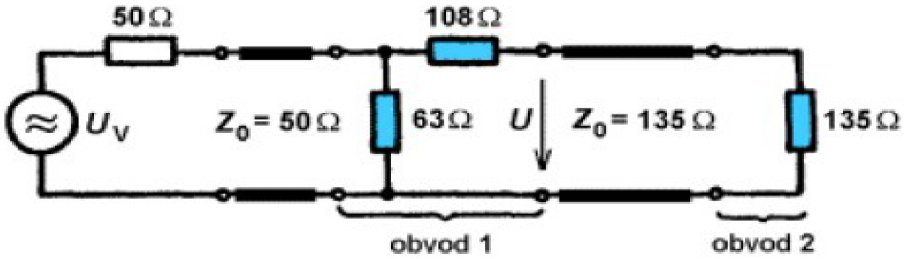


Obr.3 *Realizace vstupního a výstupního zakončovacího vedení*



Obr.4 *Praktická ukázka zakončovacího(přizpůsobovacího) odporu*

Náhradní schéma tohoto obvodu je na obr 5. Pracovní homogenní část má impedanci 135Ω. Na vstupu je pak přizpůsobení 50Ω napájecího vedení na tuto zátěž. Obvod 2 pak plní funkci bezodrazového zakončení na výstupu. Přizpůsobovací odpory musí být co nejpřesnější, proto se skládají z více rezistorů. Protože na rezistory působí poměrně velký výkon, musí být dostatečně výkonově dimenzovány.Ve většině případů se používají specielní konstrukce s pasivním chlazením.



Obr.5 *Náhradní schéma deskového vedení*

Pro zpevnění konstrukce se používají nevodivé výztuhy (často dřevěné). Horní deska bývá spojena se zemí měřícího systému. Zařízení se umísťuje alespoň 40cm nad podlahu. Protože je vedení po stranách otevřené, výrobci doporučují umístit testovací zařízení alespoň 2m od bočních stěn zkušebny a od větších kovových předmětů.

Takové uspořádání měřícího systému je rozměrově rozlehlé. Navíc pro testování větších předmětů jsou nutné velké rozměry deskového vedení. Přesto můžeme říct, že se jedná o konstrukčně nejjednodušší řešení.

Obr.6 *Praktická realizace deskového vedení.*

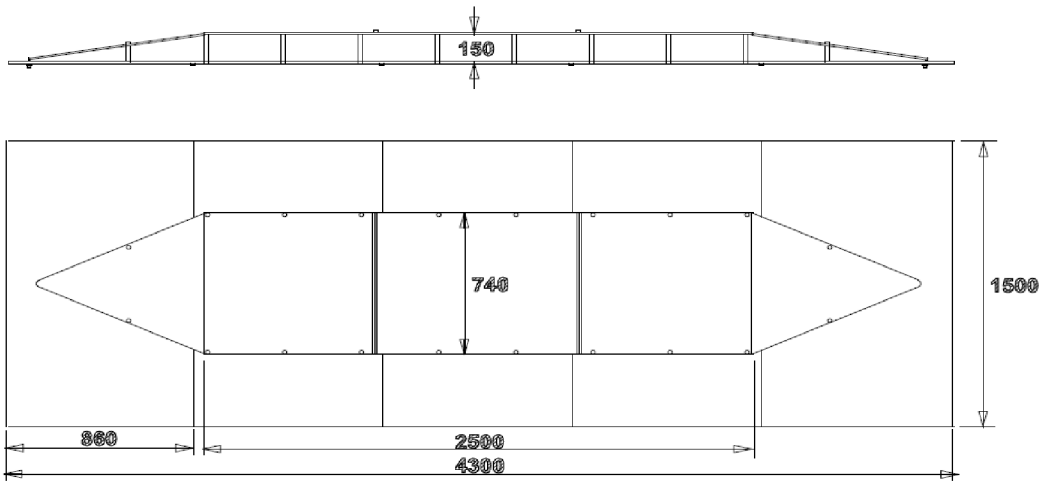
Na obr. 6 je deskové vedení SL 150 firmy Schaffner. Rozměry zařízení jsou 2,4x0,8x0,8 m. To znamená, že můžeme zkoušet objekty o rozměrech maximálně 26x26x26cm. Abychom toto měření mohli provádět, je třeba místnost široká minimálně 4,8m a dlouhá alespoň 3m.Ve větších prostorách stačí zajistit, aby byla splněna předchozí podmínka.

Často se také vyrábí tvarovaná pouze horní deska. Spodní je pak rovná připevněná většinou přímo ke stolu. Takové zařízení je na obr. 7.

Obr.7 *Testovací zařízeni SL 50 od firmy Schaffner*

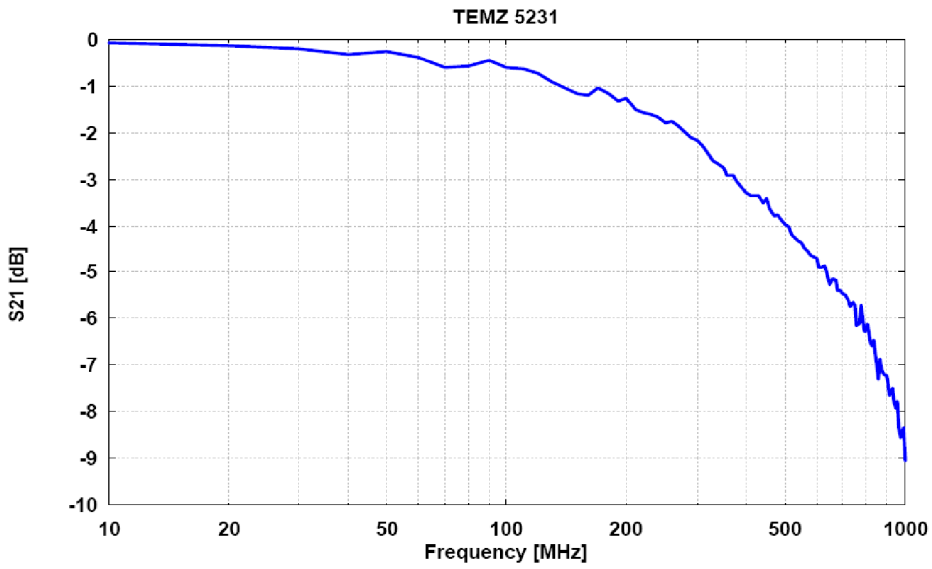
I zde platí, že rozměry testovaného zařízení smí být maximálně 1/3 vzájemné vzdálenosti desek. Spodní deska slouží jako zem, na horní desku je přiváděn signál.

Téměř stejné deskové vedení vyrábí německá firma Schwarzbeck Mess – Elektronik, která k modelu TEMZ 5231 dodává kompletní dokumentaci, včetně rozměrů. Snadno si pak můžu deskové vedení nakreslit v některém simulačním programu a ověřit svoje výsledky v porovnání s charakteristikami udávanými výrobcem. Jako vhodný simulační nástroj jsem si vybral program CST Microwave Studio. Další alternativou byl program Ansys, se kterým se mi nepracuje tak dobře. Program CST nabízí mnoho možností nastavení výpočtu přesnosti. Přesné výpočty trvají většinou několik hodin. Já jsem z časových důvodů volil méně přesný výpočet. Simulace jsou tak pouze orientační, ale na ověření parametrů a počáteční seznamování s programem a systémem deskového vedení dostatečné.

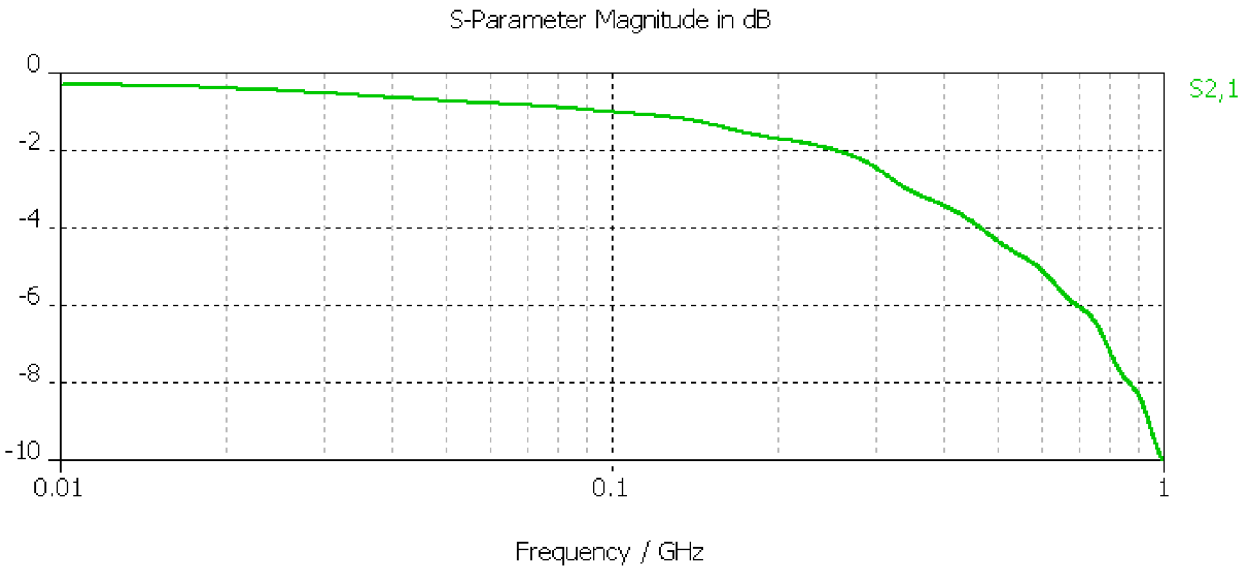


Obr.8 *Rozměry deskového vedení TEMZ 5231*

Výška mezi deskami je 150mm. To znamená, že můžeme testovat objekty do výšky maximálně 5cm. Tento výrobek je možno použít do frekvence maximálně 1000MHz. Maximální možný výkon dodávaný do deskového vedení je 500W. Poměr stojatých vln by neměl překročit 2 v celém pracovním rozsahu kmitočtů.

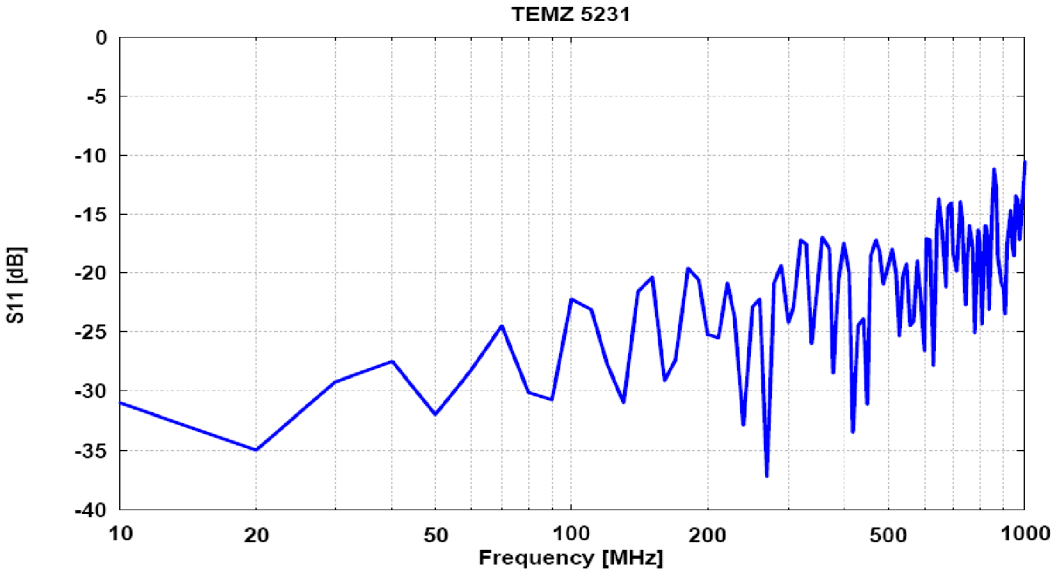


Obr.9 *Parametr S21 udávaný výrobcem*

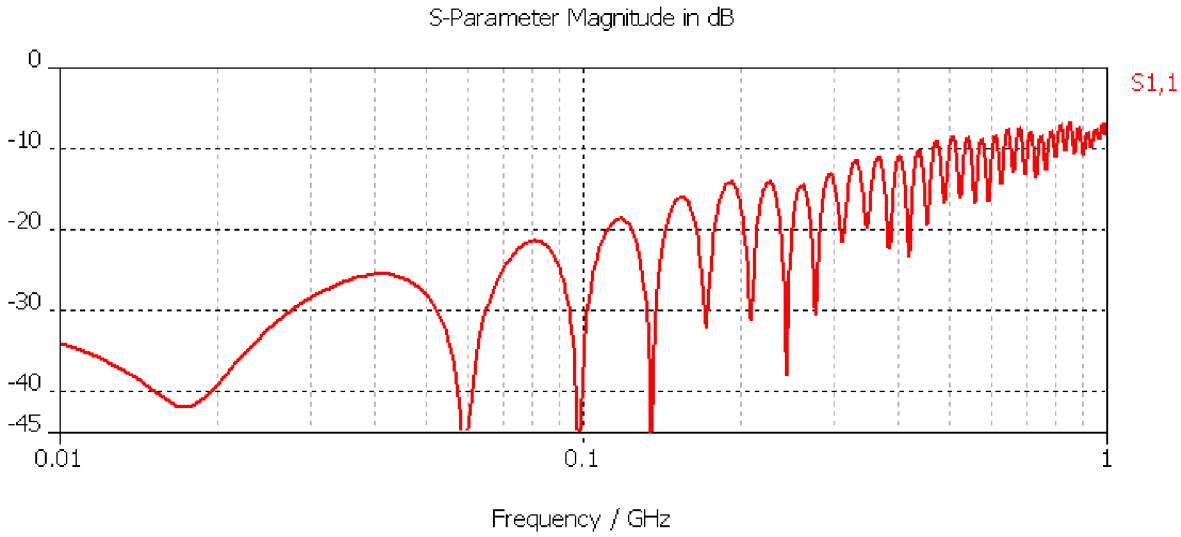


Obr.10 *Parametr S21 analyzovaný programem CST*

Parametr S21 odsimulovaný v CST se liší jen málo od udávaného výrobcem. Odchylky jsou pravděpodobně způsobeny nepřesným nastavením analýzy.



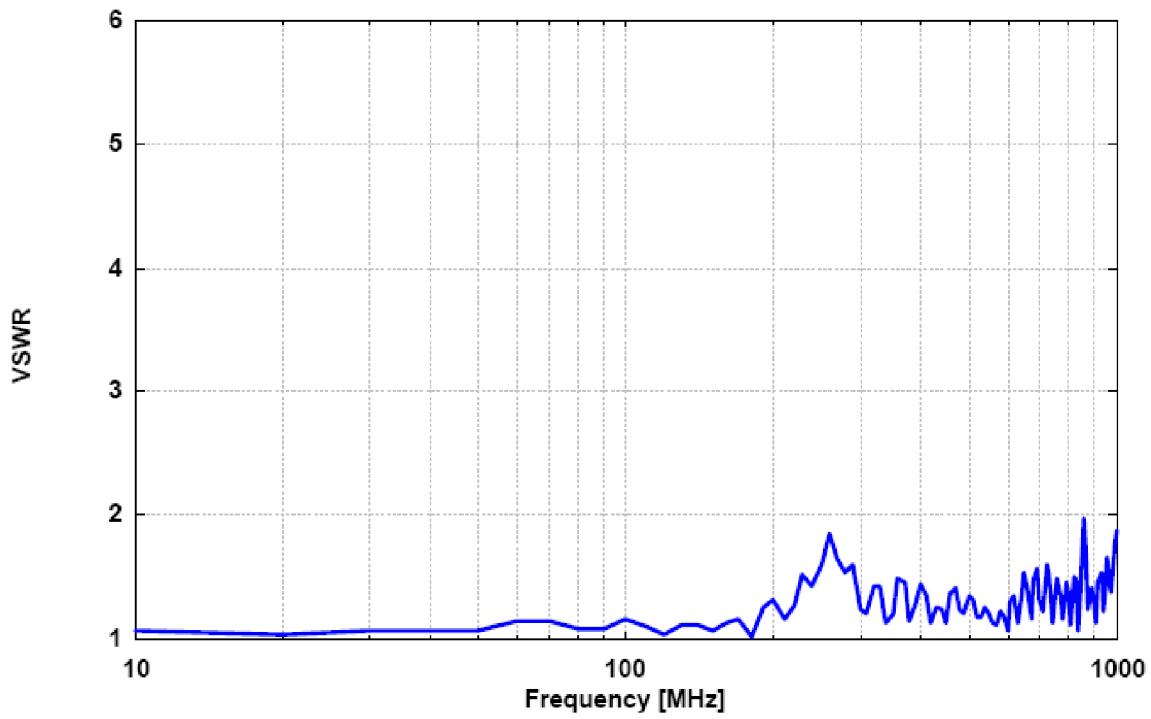
Obr.11 *Parametr S11 udávaný výrobcem*



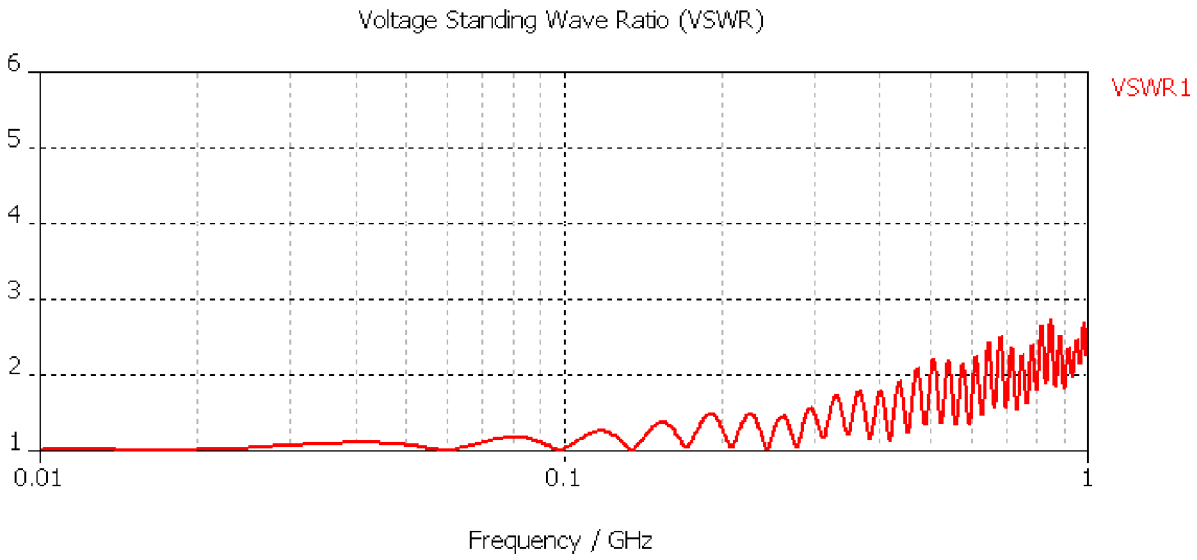
Obr.12 *Parametr S11 analyzovaný programem CST*

Zde se již projevuje zmíněná nepřesnost více. Navíc je pravděpodobné, že výrobce udává naměřené hodnoty. To by mohlo vysvětlovat moji pravidelně zvlněnou charakteristiku.

Z průběhu a z přibližných hodnot minim a maxim na simulovaném kmitočtu lze říct, že simulace odpovídá udávané charakteristice.



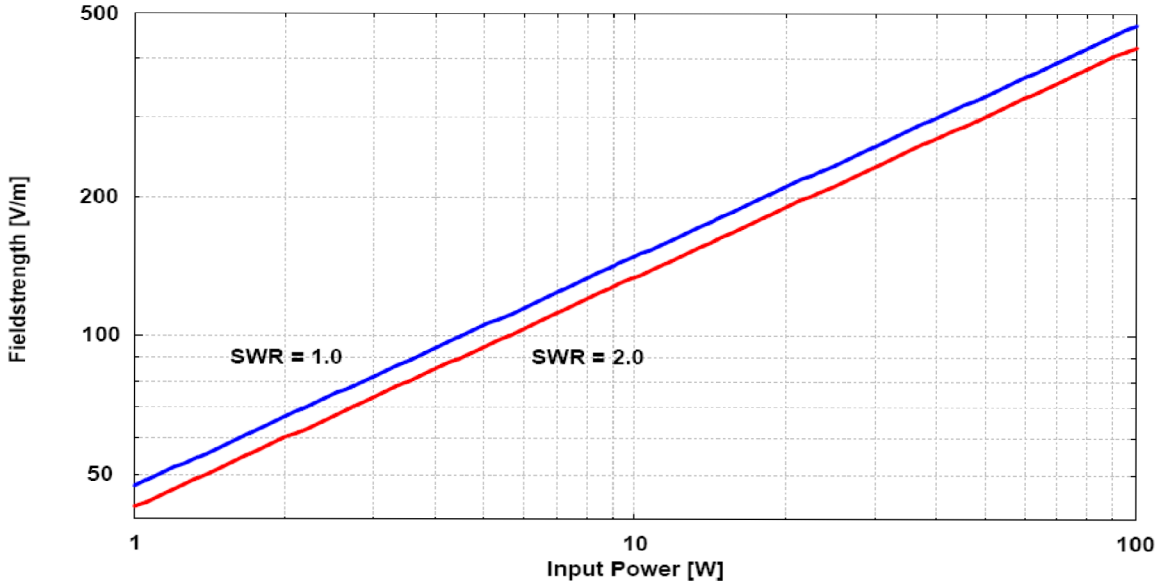
Obr.13 *Poměr stojatých vln (VSWR) udávaný výrobcem*



Obr.14 *Poměr stojatých vln (VSWR) analyzovaný programem CST*

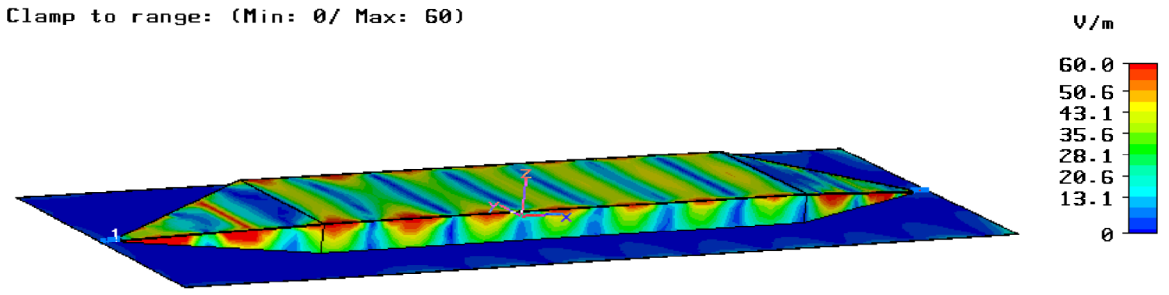
Průběh analyzovaný programem CST poměru stojatých vln se jen blíží udávaným hodnotám.Výrobce udává, že by neměl překročit hodnotu 2 v celém pracovním rozsahu. Moje charakteristika cca od 500MHz tuto hodnotu překračuje. Nejhorší výsledek je hodnota asi 2.7 na nejvyšších kmitočtech. Odsimulovaný průběh přesto sleduje průběh udávaný výrobcem. Přes všechny udávané nepřesnosti tato analýza trvala více než půl hodiny.

Výrobce také udává graf závislosti intenzity pole na potřebném příkonu.



Obr.15 *Intenzita pole a potřebný příkon*

Z grafu lze vyčíst, že kdybychom měli generátor o výkonu kolem 50W, mohli bychom dosáhnout intenzity až kolem hodnoty 300 V/m.
Testovací zařízení se dá využít i k měření EMI.



Obr.16 *Rozložení elektrického pole na deskovém vedení (f=400MHz)*

1.2 E&H Field Generator

Další modifikaci je možno provést náhradou horní desky za několik vedle sebe vedených vodičů. Příkladem může být výrobek firmy ETS LINGREN *Model 5503-5m.*

Obr.17 *ETS LINGREN Model 5503-5m.*

Toto testovací zařízení lze použít v rozmezí frekvencí 10 kHz 30 MHz. Zařízení se skládá ze čtyř paralelních vodičů zapojených v jednom konci do zdroje a v druhém do zátěže. Mezi vodiči a zemí je kvazi-statický vid TEM elektrického pole. Rozměry jsou navrhnuté tak, aby se dal připojit zdroj signálu bez vstupního transformátoru. Kladky dovolují nastavení výšky pro různé velikosti testovacího zařízení. Celá stanice lze snadno rozkládat a přenášet.

Exitují 2 módy, ve kterých lze testovat:

- E-mód (běžný): proudy ve všech vodičích mají souhlasný směr. Vzniká tak vertikálně polarizované elektrické pole

- H-mód (diferenční): proudy ve dvou zářících elementech mají opačný směr.Vzniká vertikálně polarizované magnetické pole nebo vodorovně polarizované elektrické pole.

Nevýhodou tohoto zařízení jsou velké rozměry a malý rozsah testovacích frekvencí. Mimo pracovní rozsah se rapidně zvyšuje poměr stojatých vln. Oproti klasickému deskovému vedení je potřeba budit větším výkonem, aby se dosáhlo srovnatelné intenzity pole. Velkou výhodou je snadná konstrukce a rozebíratelnost testovacího zařízení. Rovněž zde platí, že velikost testovaného zařízení nesmí překročit 1/3 vzdálenosti vodičů od vodivé země. Vodiče lze výškově nastavit. Zvýšením vodičů nad vodivou zem dojde ke zvětšení pracovního prostoru, ale sníží se intenzita pole mezi „deskami“ .

1.3 Tri-plate stripline

Dalším typem deskového vedení je Tri-plate stripline. Je to vlastně modifikace parallel plate anteny. Mezi 2 deskami je umístěno ještě střední deskové vedení. Pracovní prostor se tak rozdělí na dvě poloviny.

Obě poloviny lze použít pro testované zařízení. Doporučuje se používat jen spodní. Zatížení střední desky by mohlo vést k deformaci testovacího zažízení a k nesprávným výsledkům.

Příkladem testovacího zařízení je Tri-plate stripline od firmy ETS LINGREN Model 5203.

Obr.18 *Tri-plate stripline od firmy ETS LINGREN Model 5203*

Jmenovitá impedance vedení je 75Ω. Zúžení na koncích přizpůsobuje vedení na 50Ω koaxiální konektory. Uživatel není před vyzařováním na bocích vedení nijak chráněn. Testování by mělo probíhat ve stíněné komoře. Protože v testovací místnosti může vzniknout stojaté vlnění, doporučuje se obložit stěny absorbčním materiálem. Zdroj signálu a monitorovací zařízení by měly být instalovány v externí odstíněné místnosti. Při maximálním výkonu generátoru 1 kW lze mezi deskami vytvořit pole až do velikosti 900 V/m. Rozsah pracovních kmitočtů je od 10kHz do 1GHz. Rozměry tohoto testovacího zařízení jsou 3m x 0,6m x 0,6m. Testovat lze objekty do velikosti, jejichž výška nepřesahuje 20cm.

2. TEM buňky

Testovací přístroj určený pro potřeby EMC k testování odolnosti vůči záření a pro měření rušivého vyzařování. Zkušební komora TEM umožňuje generování transverzálních homogenních polí bez nežádoucího vyzařování do okolí. Existuje několik variant tohoto přístroje.

2.1 Crawfordovy komory

Klasickým typem je tzv. Crawfordova komora obr.19. Zkoušený objekt je umístěn uvnitř v rozšířeném místě uzavřeného koaxiálního vedení. Vnější vodič má čtvercový nebo obdélníkový průřez.Vnitřní vodič je tvořen plochým páskem- ten je realizován deskou.Celá komora musí být na vstupu i výstupu bezodrazově přizpůsobena. V pracovním pásmu nesmí vznikat nežádoucí odrazy nebo následné rezonance.Charakteristická impedance Crawfordovy komory je konstantní.

Přibližně lze spočítat dle vztahu

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln\left(\sinh \frac{\pi g}{2b}\right)} \qquad (1.2)$$

Pole uvnitř komory má charakter vlny TEM až do prvního vlnovodového vidu.

$$f_{\mathrm{m}}^{\mathrm{TE}10} = \frac{c}{4a} = \frac{3 \cdot 10^8}{4a} \qquad (1.3)$$

Intenzita elektrického pole v pracovním prostoru tj. mezi horním a středním páskovým vodičem je E=U/b, kde b je právě výška pracovního prostoru.

Obr.19 *Crawfordova buňka od firmy SCHWARZBECK MESS – ELEKTRONIK model TEMZ 5233*

Intenzita elektrického pole uvnitř buňky lze také spočítat:

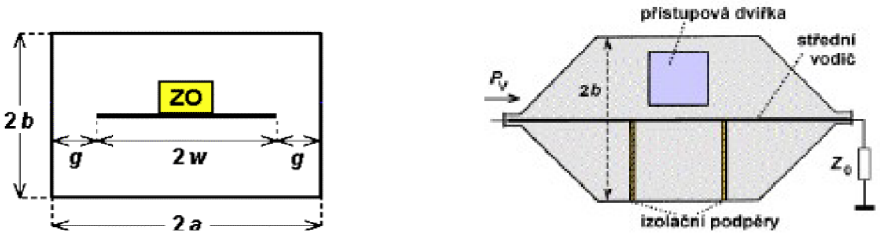
$$P_{in} = U^2 / Z \qquad (1.4)$$

$$E = U / h \qquad (1.5)$$

dosazením (1.5) do vztahu (1.4) dostaneme

$$E = \frac{1}{h}(P * Z)^{1/2} \qquad (1.6)$$

kde P_{in} je výkon dodávaný generátorem, Z je impedance vedení (50Ω) a h je vzdálenost od středního deskového vodiče.



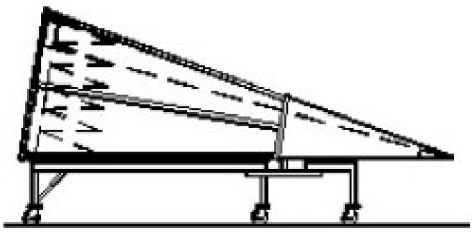
Obr.20 *Crawfordova komora-příčný a podélný průřez.*

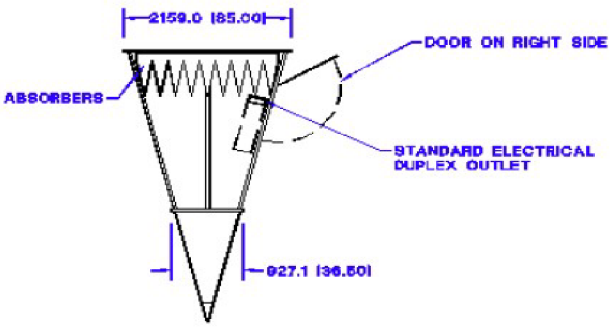
Testované zařízení může mít maximálně 1/3 výšky pracovního prostoru. Crawfordova komora s čtvercovým průřezem má větší pracovní prostor, ale zhorší se tím homogennost zkušebního pole. Maximální pracovní kmitočty u buněk malých rozměrů bývají až 900MHz. Pro větší testovací komory kolem 100 až 200MHz. Maximální intenzity elektrického pole se pohybují v rozsahu 100 až 500V/m. Americký výrobce INSTRUMENTS FOR INDUSTRY INC nabízí Crawfordowu komoru CC-110EXX pro kmitočty až do 2GHz. Výška středního vodiče od zemnící plochy je pouhých 6cm. To znamená, že testovaný předmět musí mít výšku maximálně 2cm.
Crawfordova buňka na obr.19 má pracovní výšku (vzdálenost zemnící plochy od středního deskového vodiče) 200mm, výška testovaného zařízení musí být maximálně 66mm. Buňka má impedanci 50Ω. Výkon dodávaný generátorem může být maximálně 1000W pro frekvence do 300Mhz. Výpočtem dle vztahů (1.6) snadno spočítáme maximální intenzitu elektrického pole uvnitř buňky, která činí 1118V/m. Pokud bychom měli generátor s výkonem 50W, můžeme dosáhnout intenzity elektrického pole 250V/m. Testovací zařízení se dá využít i k měření EMI.

2.2 GTEM

Crawfordovy komory lze použít do kmitočtů kolem 1 GHz. Na vyšších kmitočtech již není komora dokonale impedančně přizpůsobena.Vznikají tak nežádoucí odrazy a rezonance uvnitř vedení. Částečně lze tento jev omezit obložením vnitřních kovových stěn absorbčním materiálem. Takové opatření má jen malý efekt. Proto byl vyvinut nový typ GTEM (Gigahertz-Transversal-Electromagnetic Cell). Zkušební komora je tvořena koaxiálním vedením ve tvaru pyramidy. Buzení se umísťuje na její vrchol. Na opačném konci jsou přizpůsobovací jehlany. Ty jsou tvořeny z absorbčního materiálu. Jejich funkce širokopásmového impedančního přizpůsobení se projevuje až na vyšších kmitočtech. Bezodrazovost na nižších kmitočtech zajišťuje odporová síť umístěná na konci vnitřního páskového vedení.Vnitřní páskové vedení bývá nesymetricky umístěno. Vrcholový úhel pyramidálního vedení bývá okolo 15°. Charakteristická impedance vedení by měla být uvnitř pyramidy konstantní a rovna 50Ω.

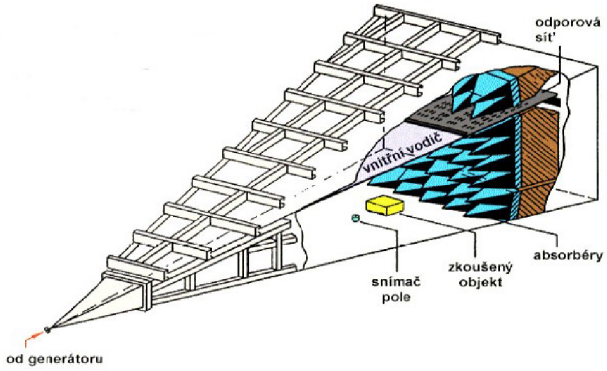
a)





Obr.21 *GTEM buňka ETS LINGREN 5402 a) boční pohled; b) pohled shora;*

Uvnitř komory se šíří postupná homogenní elektromagnetická vlna s mírně kulovou čelní vlnoplochou. Poměr stojatých vln profesionálních zařízení by neměl překročit 1,75 ve svém pracovním rozsahu. Maximální budící výkon je u velkých buněk až okolo 1kW. Většinou se ale pohybuje kolem 200-300W. U ETS LINGREN 5402 je dokonce jen 100W (CW).



Obr.22 *Průřez buňkou GTEM*

Metody testování:

Je možné použít jednu ze dvou metod testování: substituční a přímou.

Substituční metoda spočívá v umístění sondy pro zjišťování intenzity elektrického pole do zkušebního prostoru. Na generátoru nastavíme požadovanou frekvenci buzení. Výkon generátoru zvyšujeme tak dlouho dokud nedosáhneme požadované intenzity pole uvnitř komory. Hodnoty na generátoru si zaznamenáme (uložíme nastavení), vypneme generátor buzení. Místo měřící sondy umístíme do komory testované zařízení, připojíme generátor buzení a nastavíme zaznamenané hodnoty.

U přímé metody se do zkušební komory umístí jak měřící sonda, tak zkoušené zařízení. Na generátoru nastavíme požadovanou elektrickou intenzitu pole. Takto provádíme měření na všech požadovaných frekvencích.

Obr.23 *Měřící sonda od firmy NPL*

Profesionální buňky GTEM jsou vybaveny dveřmi s nožovými kontakty na dokonalé utěsnění elektromagnetického pole. Pole mezi deskami (uvnitř komory) není vždy zcela homogenní. Aby se

zařízení co nejlépe otestovalo, doporučuje se umístit do zkušební komory v několika směrech.

Dražší testovací komory můžeme vybavit speciálním zařízením, které zkoušený objekt otáčí.

3. Návrh deskového vedení

3.1 Impedance

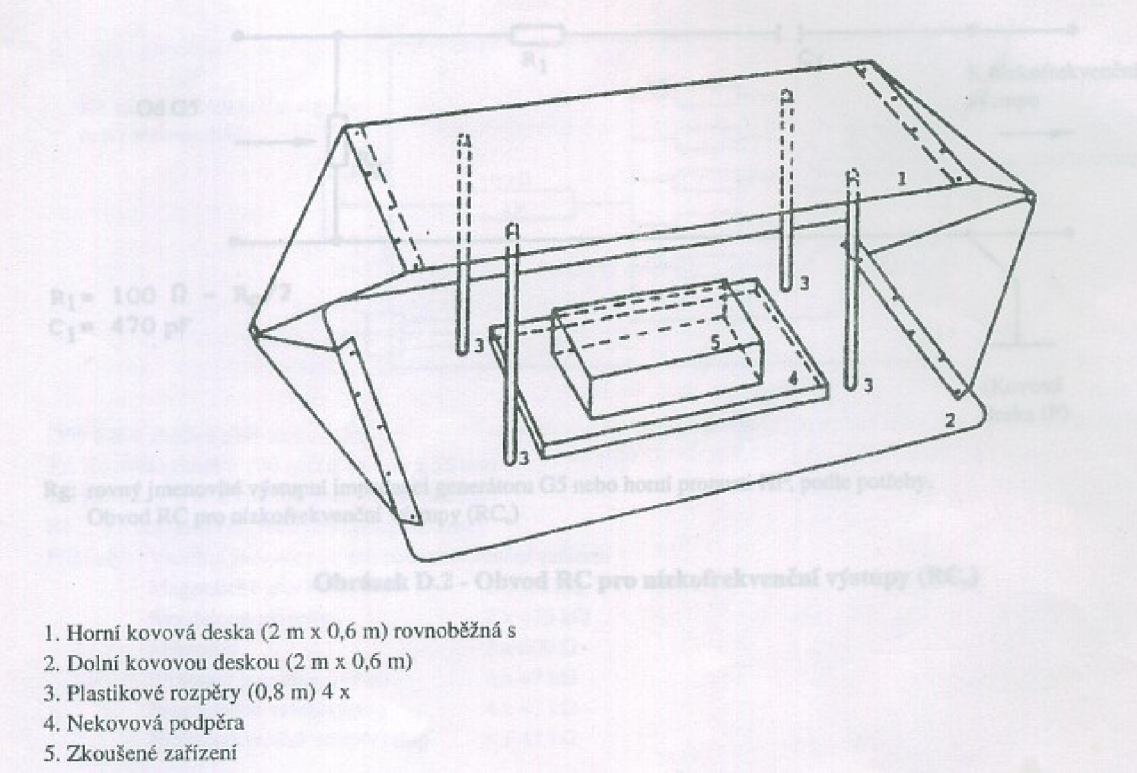
Z důvodu poměrné konstrukční jednoduchosti jsem si jako testovací zařízení pro zkoušky odolnosti vůči silným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím vybral deskové vedení.
To může být provedeno ve dvou modifikacích. První možností je široká spodní deska a nad ní poměrně úzká deska(vůči ní je spodní deska teoreticky nekonečně široká). Jako referenční z hlediska impedance se považuje ta horní. Impedanci tohoto vedení lze pak snadno spočítat dle vztahu

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\varepsilon_{ef\,r}}} \cdot \frac{h}{w_{ef}} \qquad (3.1)$$

Další realizace je pomocí dvou stejně širokých desek uspořádaných dle obr.25. Toto uspořádání je výhodnější svými rozměry. Komplikace nastává při výpočtu impedance.
Vztah 3.1 počítá právě s uspořádáním dle obrázku 24.

Obr.24 *Uspořádání deskového vedení při použití vzorce 3.1*

V případě dvou stejně širokých desek je třeba zohlednit rozložení pole na okrajích. V dostupné literatuře ani na internetu jsem vztahy pro výpočet vlnové impedance nenašel. Z dostupných materiálů jsem jako referenční model pro výpočet charakteristické impedance vzal normu ČSN EN 55020 Elektromagnetická odolnost rozhlasových a televizních přijímačů a přidružených zařízení. Na obr.25 jsou rozměry a uspořádání měřícího zařízení.

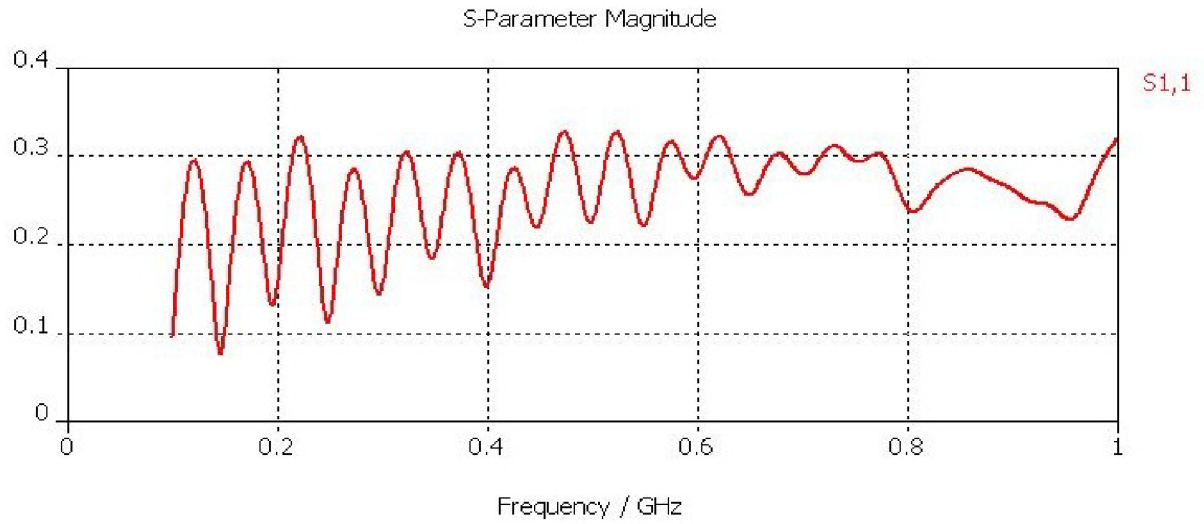


Obr.25 *Uspořádání testovacího zařízení dle normy ČSN EN 55020*

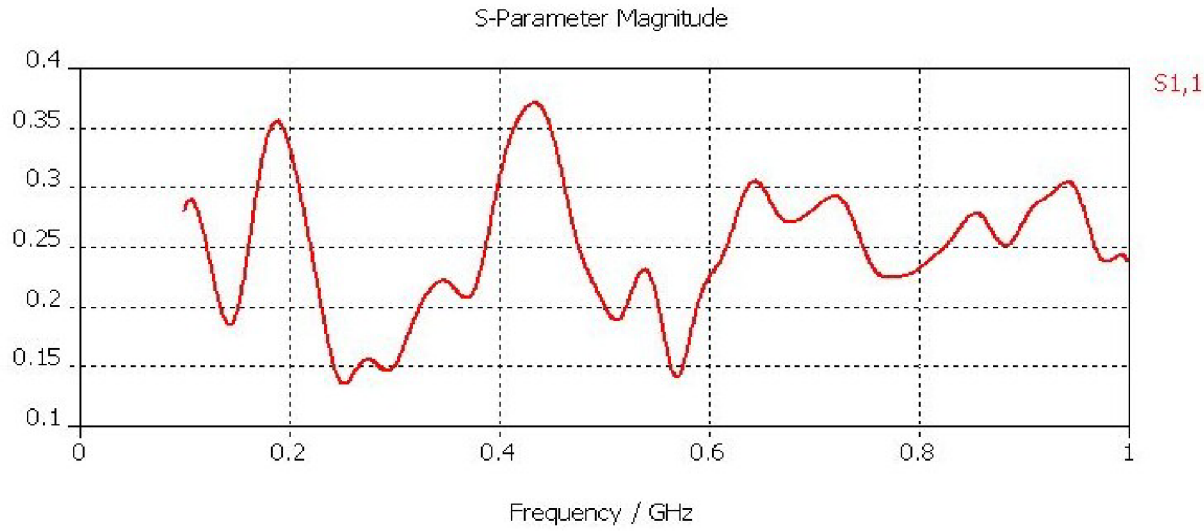
Pokud tyto rozměry dosadíme do vztahu 3.1, vyjde nám charakteristická impedance 143Ω. Norma ovšem uvádí charakteristickou impedanci 150Ω. Domnívám se, že rozdíl 7Ω je zohlednění jinak rozvrženého pole na okrajích desek. Rozdíl několika ohmů jsem si ověřil i pro jiné testovací zařízení. Z katalogů firem zabývajících se problematikou EMC jsem si vyzkoušel vypočítat impedanci z daných rozměrů deskového vedení.Ve všech případech byl rozdíl vypočtené hodnoty podle 3.1 od katalogové hodnoty několik ohmů. Impedance podle vzorce 3.1 vycházela vždy o tento rozdíl menší. Z těchto výsledků jsem usoudil, že použití vzorce je poměrně přesné a v konečné fázi jsem k vypočtené impedanci experimentálně připočetl několik ohmů.

3.2 Omezení při návrhu

Metoda návrhu spočívala v upřednostnění menších snadněji realizovatelných rozměrů. To je ovšem v rozporu s kvalitativními požadavky na deskové vedení. Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, testovaný předmět by měl mít výšku maximálně 1/3 vzdálenosti mezi deskami. Takže například pro 60cm vzdálenost desek lze testovat předmět o výšce pouze 20cm.Významnou roli hrají rozšiřující se (zužující se) konce vedení. Ty slouží jako přizpůsobovací obvod. Pro správné přizpůsobení vlny je důležitá délka rošiřujících se částí. Z mých poznatků lze říct, že čím jsou tyto části delší, tím lepší je přizpůsobení na požadovanou impedanci ve větším rozsahu kmitočtů. To úzce souvisí s výškou(vzdáleností) mezi deskami. Čím jsou desky dál od sebe, tím větší je potřeba délka přizpůsobovacích částí. V případě 60 cm vzdálenosti se jako ideální zdála být délka 1000mm. Pro délku 800mm střední části vedení by celková délka celého zařízení byla 2,8m. Při těchto rozměrech má vedení parametr S11 závislost na frekcenci dle obrázku 26.



Obr.26 *parametr S11 pro rozměry w=800mm; h=600mm; délka hlavní části vedení:800mm; délka náběhů:1000mm*



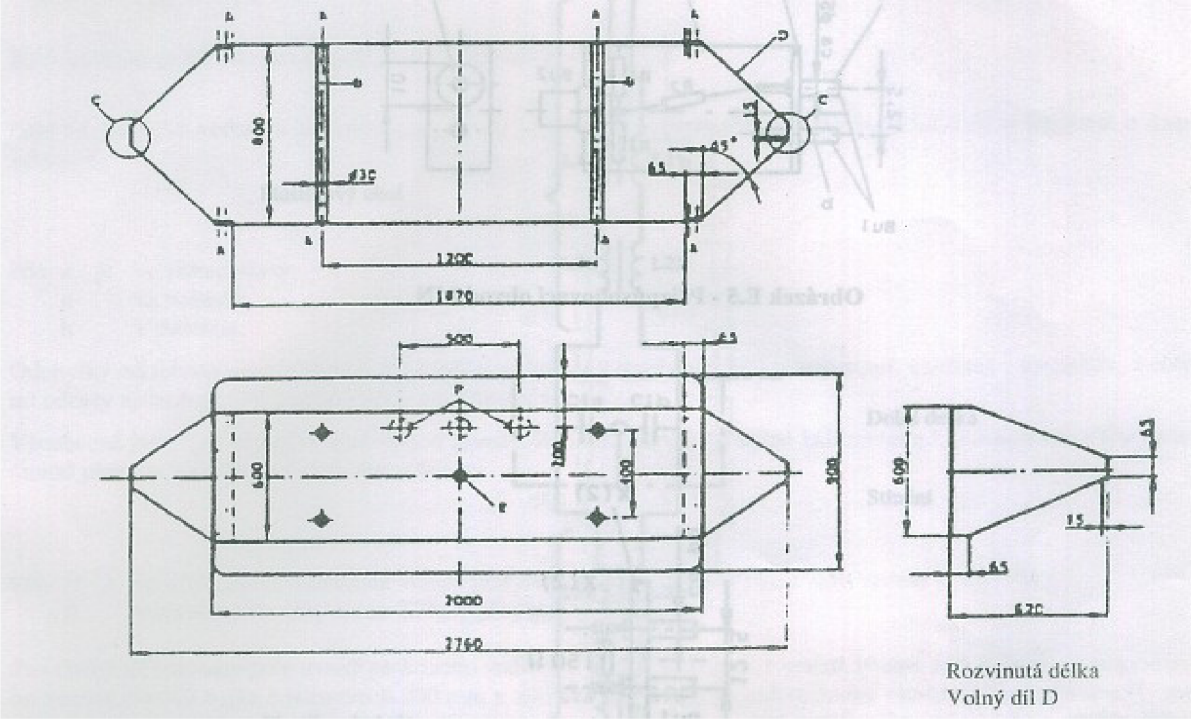
Obr.27 *parametr S11 pro rozměry w=800mm; h=600mm; délka hlavní části vedení:800mm; délka náběhů:300mm*

Takové zařízení je bezesporu kvalitní svými parametry, ovšem vzhledem ke svým rozměrům je nevyhovující pro školní laboratorní účely. Při kratší přizpůsobovací části se zhoršují parametry zařízení.

Jak již bylo zmíněno, nejvhodnější je navrhovat vedení pro impedanci 50 ohm. Velkou výhodou je snadné přizpůsobení na vstupu. A to bez použití přizpůsobovacích odporů. Tím se nám neztrácí žádný výkon na přizpůsobovacích odporech a mezi deskami můžeme vybudit pole větší intenzity za použití stejného výkonového generátoru než s použitím přizpůsobovacího obvodu(viz obr.39). Nevýhodou této komory je poměrně malý prostor pro využití testovacího předmětu.
Pro šířku vedení 800mm (cca šířka běžného psacího stolu) dosáhneme pro 50 ohmové vedení výšku pouze 165mm. Testovaný předmět by pak měl mít výšku maximálně 55mm. Zvětšením výšky prostoru nám výrazně vzroste šířka vedení. Například pro výšku 400mm by muselo být vedení široké 1936mm. Takové rozměry jsou pro nás nevyhovující.

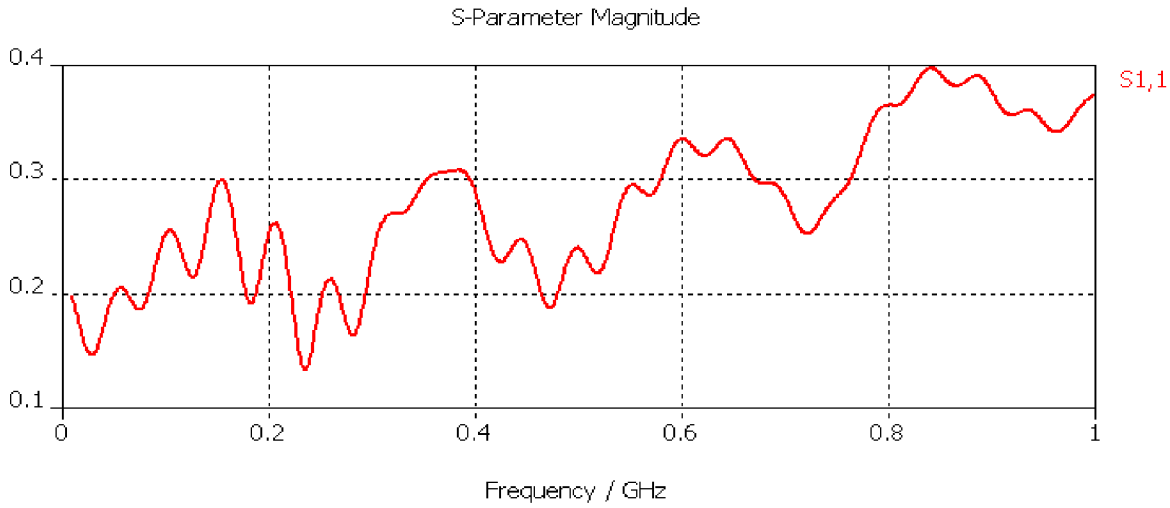
3.3 Ověření normy

Norma ČSN EN 55020 uvádí uspořádání deskového vedení jak je vidět na obr.25. Rozměry vedení jsou uvedeny na obr.28. Tento přístroj je dosti rozměrný, přesto jsem si ho vyzkoušel simulovat programem CST. Norma uvádí , že otevřené páskové vedení je použitelné v kmitočtovém rozsahu do 150 MHz a lze jej využít pro zkoušení zařízení při výšce do 0,7m. Simulace vykreslila charakteristiku uvedenou na obr.29. Z té lze usoudit, že zařízení lze použít i do vyšších kmitočtů než je uvedeno v normě. Nutno podotknout, že v simulaci se jedná o ideální případ. Skutečná charakteristika vyrobeného zařízení se může lišit a tím se zmenší frekvenční rozsah.



Obr.28 *Rozměry testovacího zařízení dle normy ČSN EN 55020*

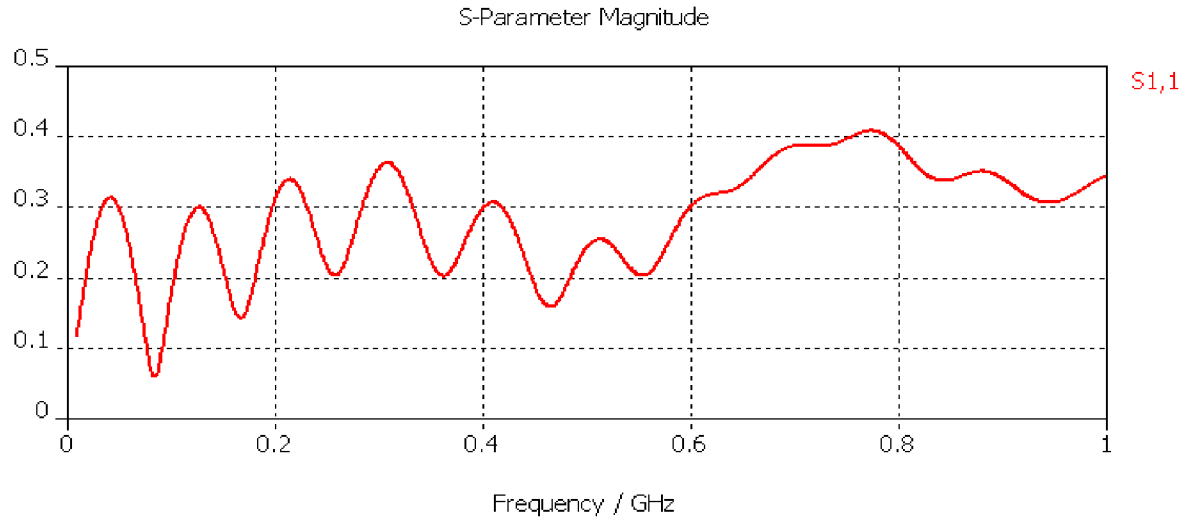
Poněkud zarážející je možná výška testovaného zařízení 0,7m. Při vzdálenosti desek 0,8m tak není splněna podmínka 1/3 výšky předmětu. Pole mezi deskami je s tak rozměrmým zařízením značně nehomogenní. Pro přesnější měření bych tuto výšku omezil alespoň na 0,5m. I přesto je to velký ústupek oproti 1/3 výšce (tj 26cm).



Obr.29 *Průběh parametru S11 zařízení dle normy ČSN EN 55020*

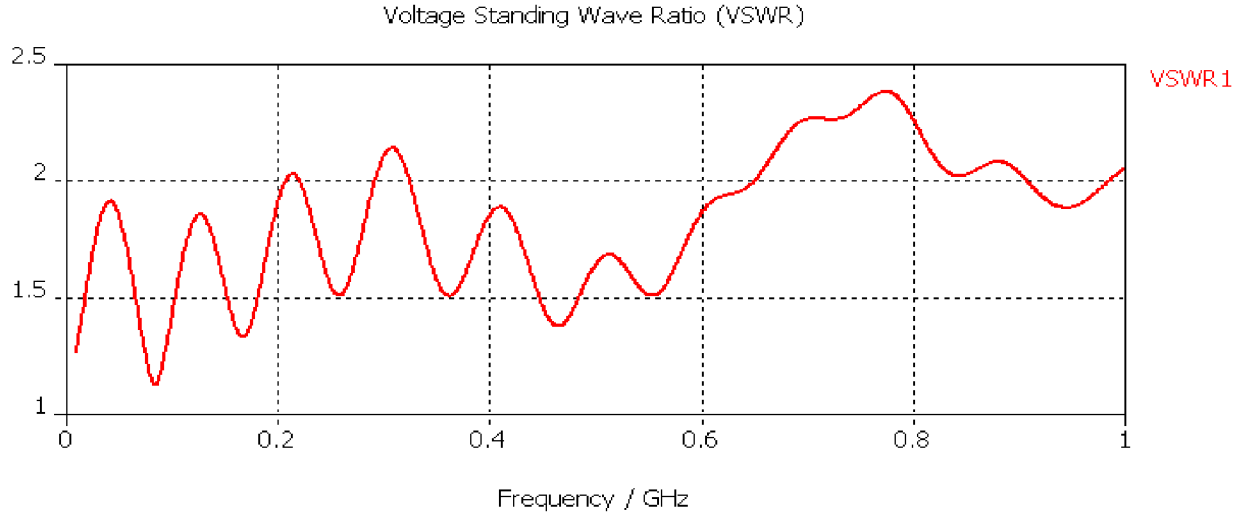
Možné řešení by bylo použít jako vzor vedení udávané normou pouze ve zmenšené podobě. V takovém případě by se charakteristická impedance nezměnila, protože poměr w/h by zůstal zachován. Zmenšil by se pouze prostor pro testovací zařízení.

Vyzkoušel jsem si model dle normy ČSN EN 55020 zmenšený na polovinu. To znamená, že délka střední části vedení by byla 1000mm, šířka vedení 300mm a výška 400mm. Zmenšil jsem i délku náběhů na polovinu. Protože se zmenšila vzdálenost mezi deskami na polovinu, mělo by se vytvořit pole dvakrát vyšší intenzity. Tato dobrá vlastnost je kompenzována možností použít poloviční výšku testovaného předmětu. Největší výška testovaného předmětu by tak měla být maximálně 133mm.



Obr.30 *Průběh parametru S11 zařízení dle normy ČSN EN 55020 zmenšený na polovinu*

Jak je z obr.30 patrné, zhoršilo se impedanční přizpůsobení. Nad frekvencí 600MHz se rapidně zvyšuje parametr S11 a tím zhoršuje impedanční přizpůsobení. Pro lepší představu využitelnosti frekvenčního pásma je uveden obr.31 , který zobrazuje frekvenční charakteristiku poměru stojatých vln.



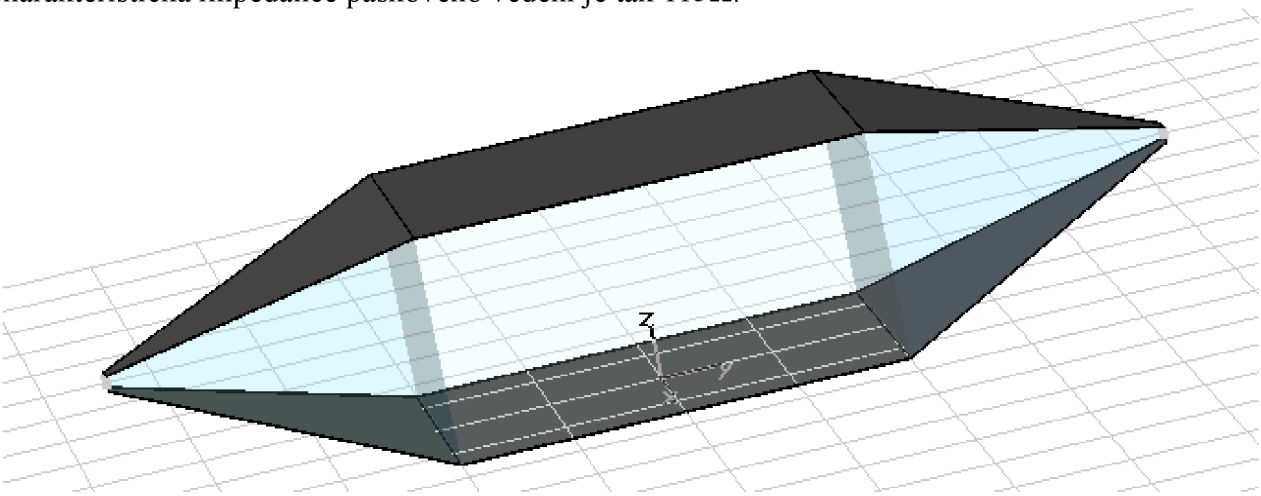
Obr.31 *Průběh parametru S11 zařízení dle normy ČSN EN 55020 zmenšený na polovinu*

3.4 Rozměry vedení

Možnosti, jak si zjednodušit návrh deskového vedení, mně nevyhovovaly. Vyzkoušel jsem proto jinou metodu návrhu.

Téměř nejdůleitější pro mě byl rozměr celého zařízení. Ten neměl přesáhnout 2 metry na délku. Na větší zařízení by se problematicky sháněl materiál a hlavně větší zařízení by se do školních laboratoří jen těžko umísťovalo.

Jako vhodnou výšku pro testovací zařízení jsem si zvolil 400mm. Šířka vedení by měla být alespoň stejná jako výška. Pro šířku vedení 600mm vychází podle vzorce 3.1 charakteristická impedance 104Ω. Jak již bylo zmíněno, tento vztah nezohledňuje jiné rozložení pole na okrajích desek. Tuto skutečnost jsem vykompenzoval přidáním 11Ω k výpočítané impedanci. Celková charakteristická impedance páskového vedení je tak 115Ω.

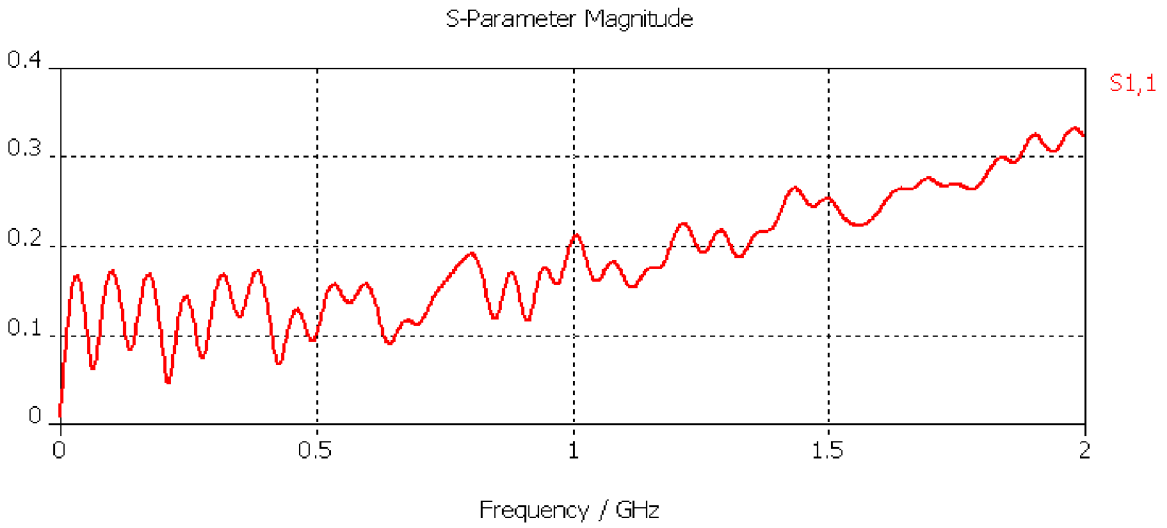


Obr.32 *Otevřené deskové vedení – vytvořený model v CST*

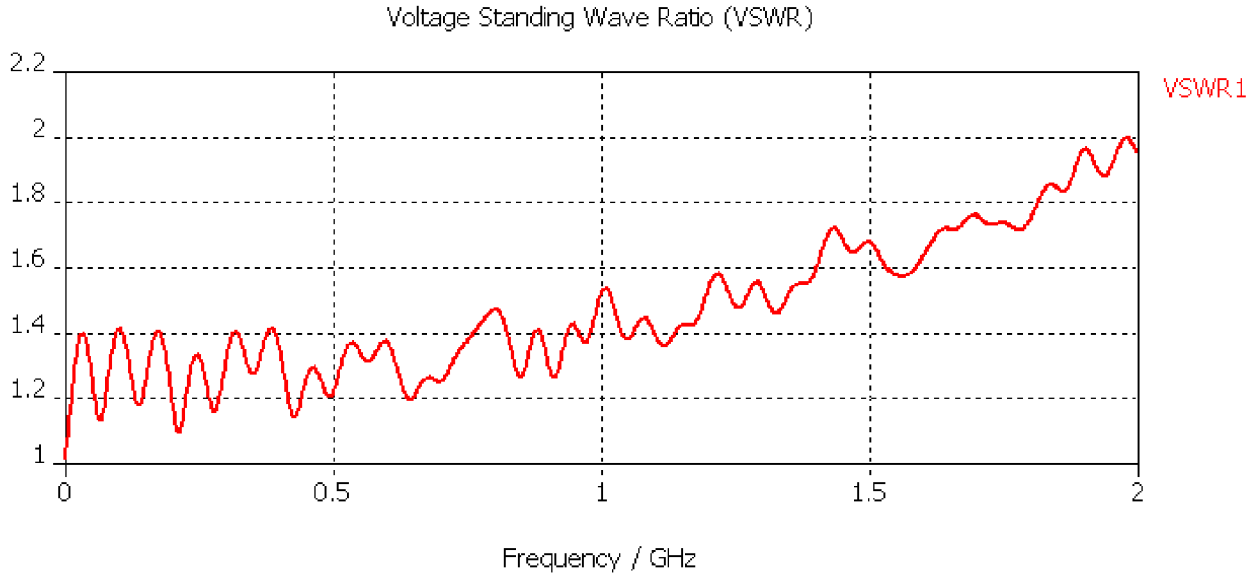
Délku přizpůsobovacích úseků jsem zjistil empiricky pomocí programu CST. Jejich délka má hodnotu 550mm. Na začátku přizpůsobovacího vedení je dobré dodržet stejný poměr w/h stejný jako ve střední části.Tím zajistíme stejnou impedanci po celé délce náběhů. Impedanční přizpůsobení na 50Ω je realizováno až externím obvodem.

Teoreticky by bylo možné začátek náběhu navrhnout na impedanci 50Ω a rozšířenou část na hodnotu impedance střední části. Tím by bylo možné vynechat přizpůsobovací obvod. Při takové realizaci by bylo nutno rozložit rovnoměrně změnu impedance na celou délku náběhu. To by pravděpodobně způsobilo prohnutí a výřez náběžných desek. Výroba by byla podstatně složitější a citlivá na nepřesnosti při výrobě, nehledě na velký vliv délky náběhů na impedanční přizpůsobení.

3D model vedení vytvořený pomocí programu CST je vidět na obr.32. Analýzou vedení v programu CST jsou frekvenční charakteristiky na obr.33 a obr.34. Simulaci jsem provedl v rozsahu frekvencí od 0,001 MHz do 2GHz. Až do frekvence 1,3Ghz je poměr stojatých vln pod hodnotou 1,6.



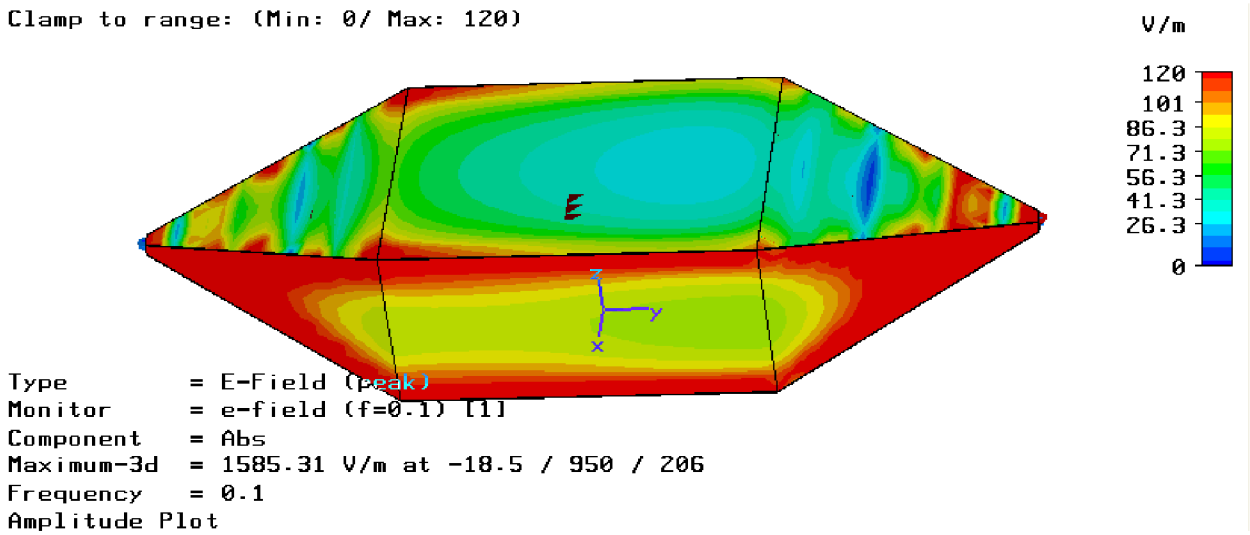
Obr.33 *Frekvenční charakteristika činitele odrazu*



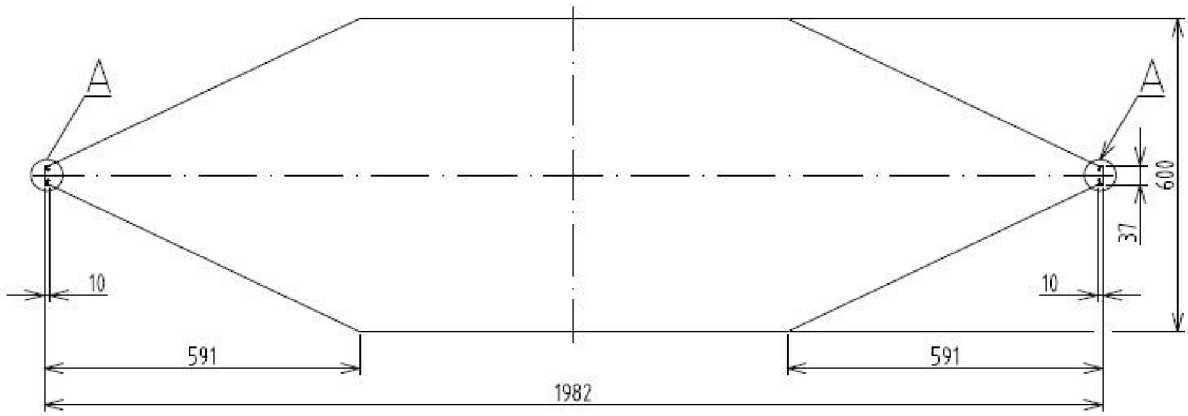
Obr.34 *Kmitočtová charakteristika činitele odrazu zakončovacího obvodu vyrobeného z drátových rezistorů*

Program CST umožňuje zobrazení elektrického pole uvnitř deskového vedení. V případě použití ideálních součástek zapojených dle schématu na obr.39 a použití generátoru o výkonu 75W bude napětí mezi deskami 49V. Pokud v programu CST vložíme tuto hodnotu jako parametr vstupního portu, můžeme vidět rozložení elektrického pole podél deskového vedení.

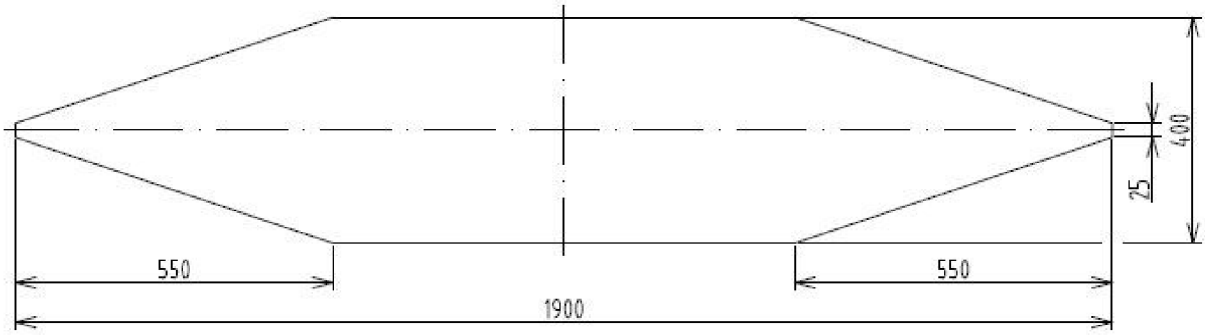
Takto navržené vedení jsem zadal do výroby ve školní dílně.



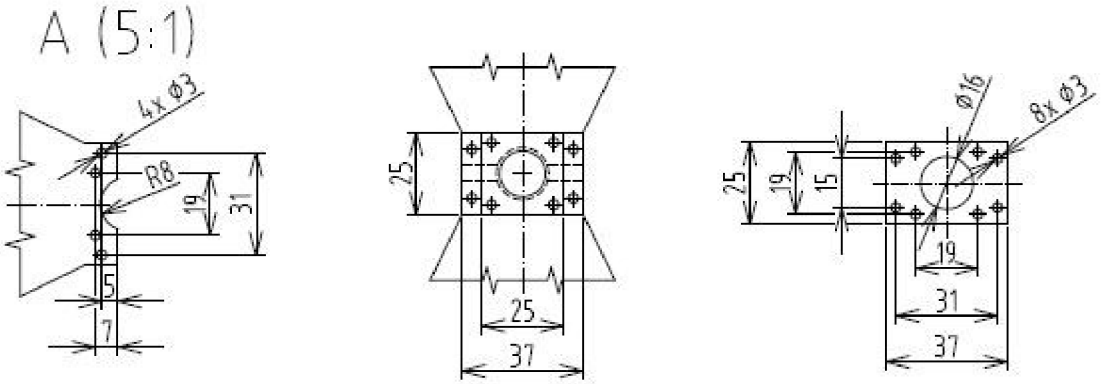
Obr.35 *Rozložení elektrického pole podél vedení*



Obr.36 *Rozměry desek vedení*



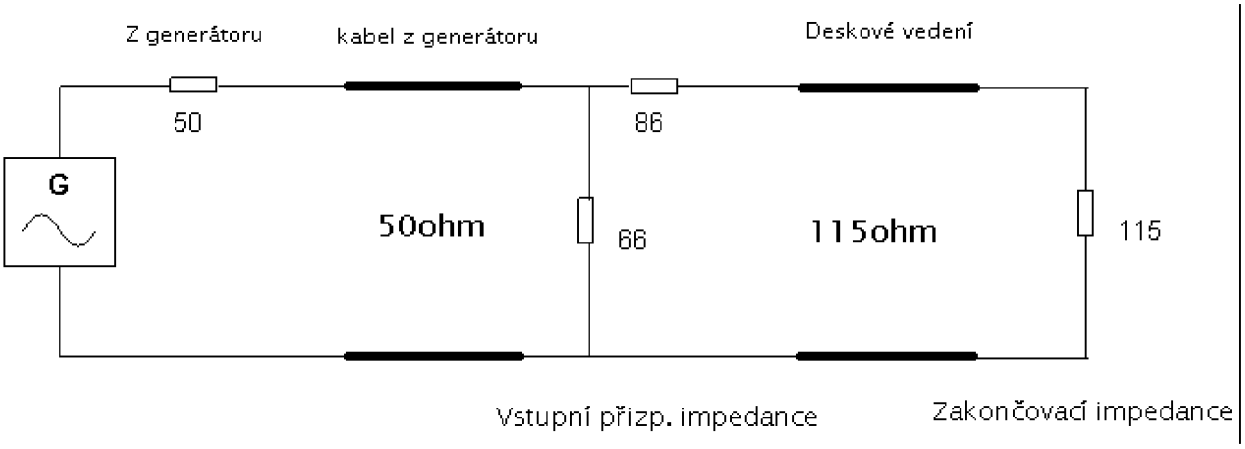
Obr.37 *Boční pohled na měřící zařízení*



Obr.38 *Detail připojení N-konektoru*

4. Přizpůsobení

Protože všechny používané přístroje ve VF technice mají normovanou impedanci 50Ω, je třeba toto zařízení přizpůsobit k impedanci generátoru. K tomu jsem využil náhradní schéma zapojení uvedené na obr.39.



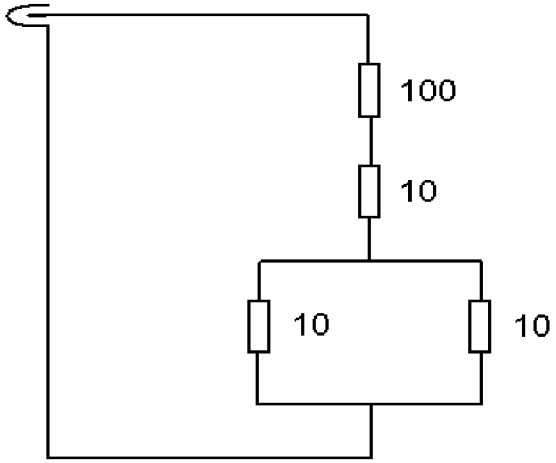
Obr.39 *Zjednodušené náhradní schéma deskového vedení*

Velmi těžkým úkolem je volba vhodných odporů pro přizpůsobovací obvody. Pro nejlepší výsledky by bylo vhodné použít bezindukční rezistory. Na internetu jsem našel několik firem zabývajících se výrobou výkonových rezistorů pro VF techniku. Na našem trhu jsem tyto produkty neobjevil. Jako nejvhodnější jsem našel pouze vrstvové rezistory a metaloxidové vrstvové rezistory. Jejich výkonové zatížení je pouze 1W, v případě metaloxidových 2W. Rezistory na vyšší výkony jsem nalezl pouze drátové a to do výkonu 20W. Je zřejmé, že takto realizované přizpůsobení bude hlavním omezujícím faktorem při použití zařízení na vyšších kmitočtech. Zátěž i přizpůsobovací obvod jsou na deskové vedení připevněny pomocí N-konektorů. Pokud by drátové odpory nesplňovaly kmitočtové požadavky, je možné vyrobit jinou zátěž a přizpůsobení s vrstvovými rezistory. Zvýšíme tím frekvenční rozsah zařízení za cenu nižšího vstupního výkonu a nižší intenzity pole mezi deskami.

4.1 Přizpůsobovací obvody s drátovými rezistory:

Předpokládám, že přizpůsobovací obvody složené z drátových rezistorů nebudou mít největší frekvenční rozsah. Zakončovací odpor je dán impedancí vedení tj 115Ω. Velikost parazitních indukčností drátových odporů jsem v dostupném katalogu nenašel. Nemám dostatek zkušeností, abych odhadl nejvyšší možný použitelný kmitočet rezistorů. Nezbývá, než zapojení vyzkoušet na přístroji Rhode&Schwarz ZVL Vectro Network Analyzer.

Jako generátor by měl být k dispozici generátor Teseq o výkonu 75W. Abychom mohli využít celý jeho potenciál, snažil jsem se navrhnout celé zařízení tak, aby vydrželo výstupní výkon generátoru. Tak velký výkon slibuje generování pole velké intenzity.

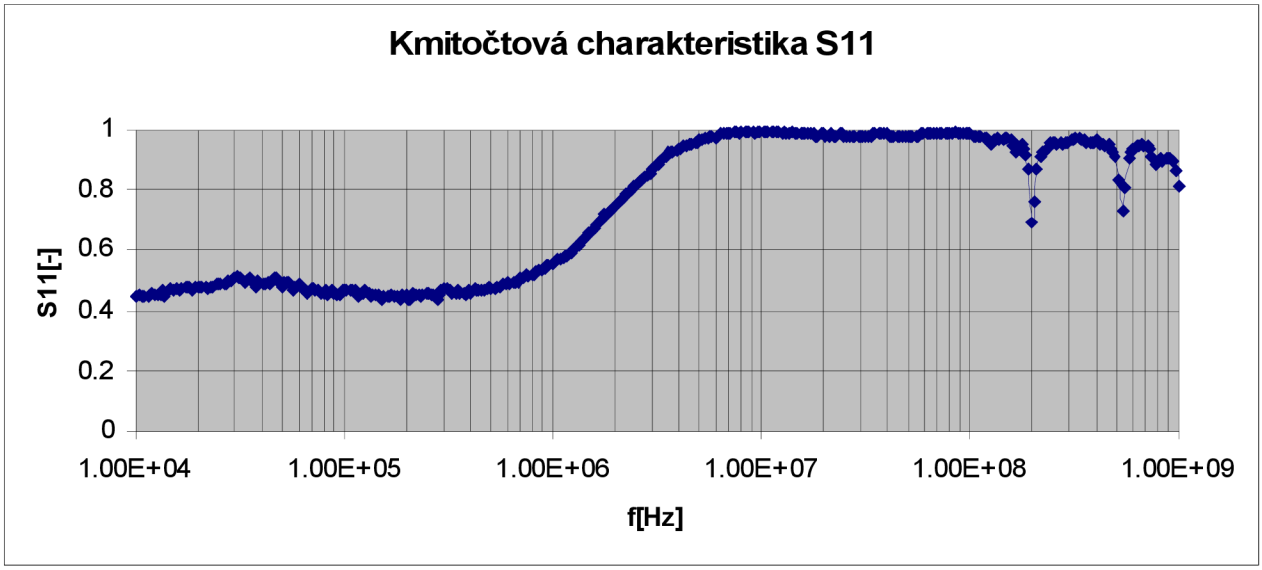


Obr.40 *Schéma výstupní přizpůsobovací části*

Obr.41 *Praktická realizace zakončovacího obvodu*

Pro vedení s přizpůsobením dle obr.39 a generátor o výkonu 75 W pak napětí na výstupu generátoru je 61V. Výkon pohlcený v zatěžovací impedanci 115Ω je pak cca 21W. Výkony se sice ještě rozdělí na jednotlivé odpory, ze kterých je složena hodnota 115Ω. I tak jsou na jednotlivé rezistory kladeny vysoké výkonové požadavky. Je jasné, že tak obrovské výkonové zatížení bude nezbytné dobře chladit.

Vyzkoušel jsem proměřit frekvenční charakteristiku zátěže vyrobenou z výkonových drátových odporů. Nejnižším možným kmitočtem analyzátoru bylo 9kHz. Maximální analyzovaný kmitočet jsem si zvolil 1GHz. Je sice možné, že vlastnosti konečného výrobku deskového vedení se budou blížit simulovanému modelu, ale nepředpokládám, že by drátové odpory zvládly pracovat do vyšších kmitočtů. První pokus byla analýza zakončovacího obvodu podle obr.41.

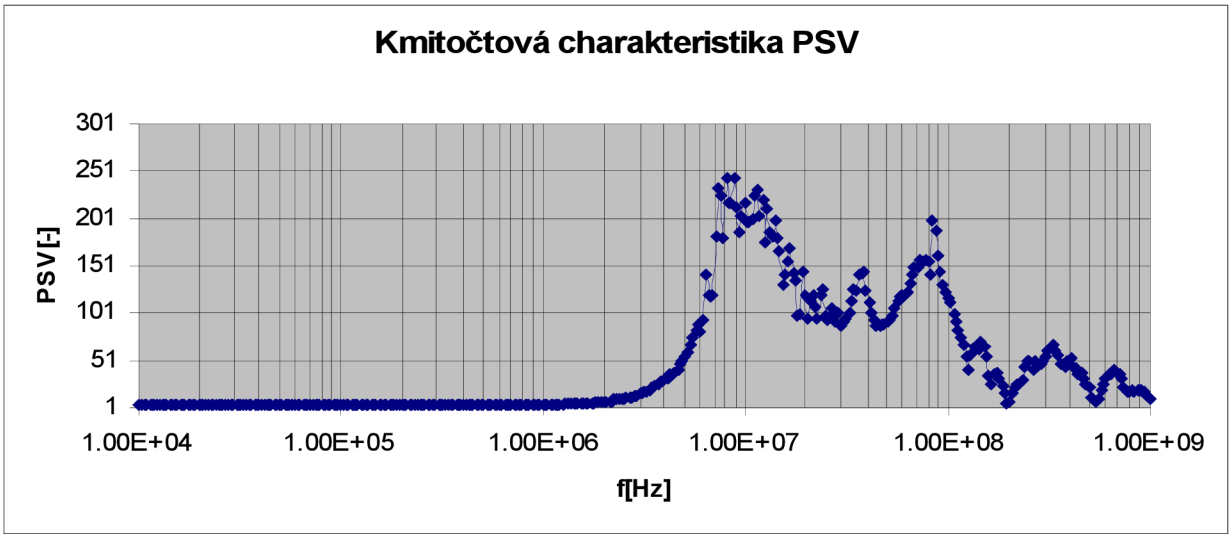


Obr.42 *Kmitočtová charakteristika činitele odrazu zakončovacího obvodu vyrobeného z drátových rezistorů*

Frekvenční charakteristiku jsem z důvodu nezkušenosti s analyzátorem nezvládl uložit ve správném formátu. Tato charakteristika byla velmi špatná, od 1MHz se poměr stojatých vln z původní hodnoty cca 2,7 vyšplhal až na několik set po zbytek frekvenčního pásma. Tuto situaci jsem zkoušel vyřešit experimentální kompenzací indukčnosti přidáváním různých kapacitorů a velkého odporu zapojeného paralelně k zakončovacímu obvodu. Nejlepšího zlepšení jsem dosáhl přidáním paralelního rezistoru 8M2 a kondenzátorů 3,3pF, 18pF a 330pF. Na obr.43 je vidět frekvenční závislost činitele odrazu S11 „vykompenzovaného“ obvodu. Nad frekvencí 1MHz hodnota činitele odrazu strmě stoupá a po zbytek frekvenční charakteristiky se blíží hodnotě 1. To je nejhorší případ, kdy se výkon dodaný do zátěže téměř celý odrazí zpět. Charakter impedančního přizpůsobení je ještě lépe vidět z obr.44, který zobrazuje kmitočtovou závislost poměru stojatých vln. Poměr stojatých vln σ je ve vztahu s činitelem odrazu ρ podle:

$$|\rho| = \frac{\sigma - 1}{\sigma + 1} \qquad (3.2)$$

Nad frekvencí 20MHz poměr stojatých vln výrazně klesl oproti předchozímu případu i tak jsou hodnoty kolem 100 neuspokojivé.



Obr.43 *Kmitočtová charakteristika poměru stojatých vln zakončovacího obvodu vyrobeného z drátových rezistorů*

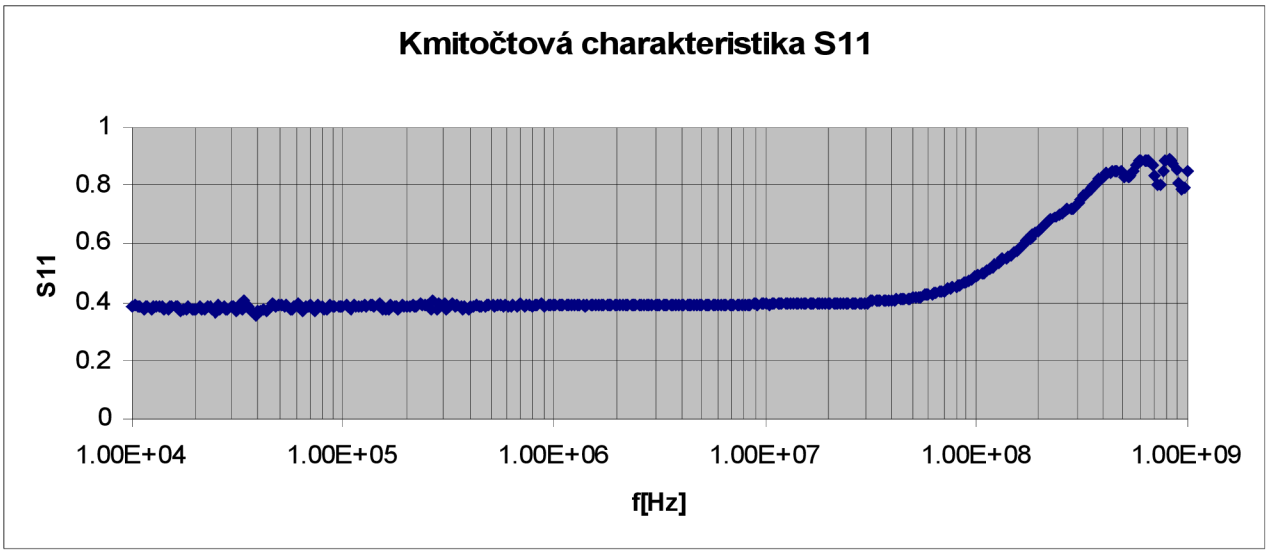
Po několika dalších marných pokusech zlepšit průběh PSW jsem měření ukončil s následným závěrem: pokud bychom chtěli vybudit mezi deskami pole vysoké intenzity, musíme se spokojit s maximálním kmitočtem 1MHz. Vyšší frekvenční rozsah je možný použitím přizpůsobovacích obvodů s jinou technologií výroby rezistorů. Vstupní přizpůsobovací část jsem zatím nesestrojil. Prioritou je nalezení kmitočtových hranic zátěží s různými druhy rezistorů.
U vstupního přizpůsobovacího obvodu nepředpokládám výrazné frekvenční změny. Ty jsou dány hlavně technologií výroby rezistorů.

Testování kmitočtového rozsahu dostupných rezistorů

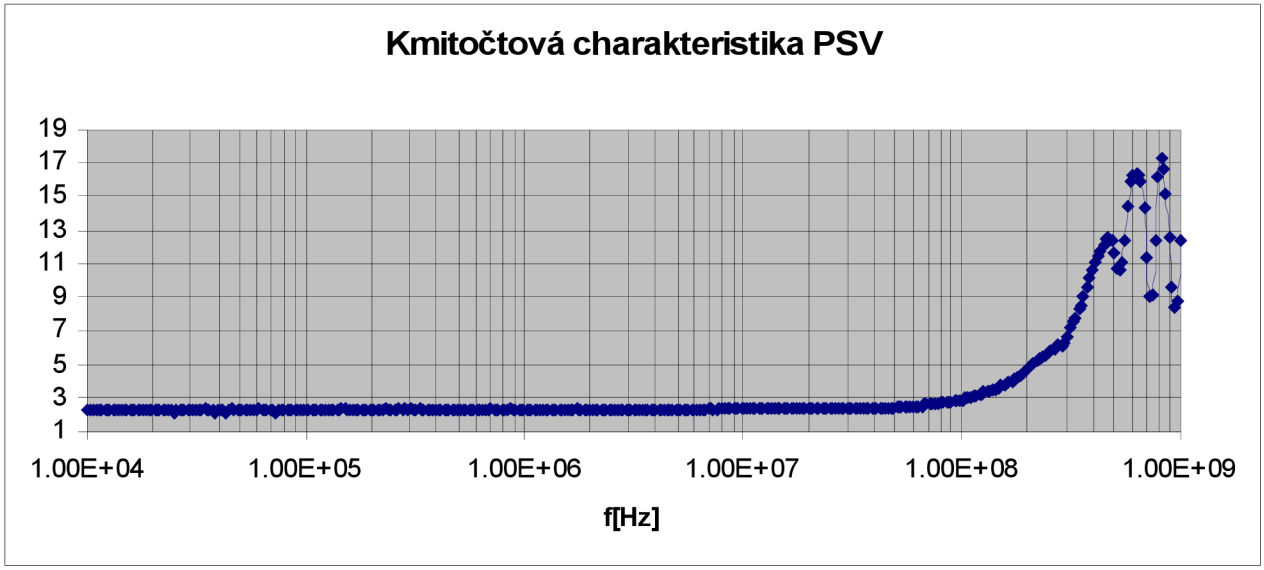
Po předchozím neúspěšném pokusu s drátovými rezistory jsem se rozhodl otestovat na spektrálním analyzátoru rozsah použitelných kmitočtů pro běžně dostupné typy rezistorů. Předpokládám, že parametry výsledného obvodu složeného z několika takto testovaných rezistorů se jistě změní. Pro mou informaci, které z běžně dostupných rezistorů jsou nejvhodnější pro mou aplikaci testování postačí. Je třeba vzít v úvahu, že následné porovnávání bylo jen orientační, avšak postačující k získání uceleného přehledu o daných typech rezistorů.

4.2 Metaloxidové vrstvové rezistory

Vyzkoušel jsem změřit kmitočtovou charaktristiku metaloxidových vrstvových rezistorů. Na stránkách GME jsou sice v nabídce rezistory pro výkony až do velikosti 20W, ale nejsou k dispozici skladem. Vyzkoušel jsem alespoň rezistor s povoleným zatížením 2W o hodnotě 110ohmů. Poměr stojatých vln by měl být 2,2 po celém frekvenčním rozsahu Z charakteristiky poměru stojatých vln lze říct, že se hodí do kmitočtu max 30MHz. Nad tímto kmitočtem už poměr stojatých vln přesahuje hodnotu 2,35.



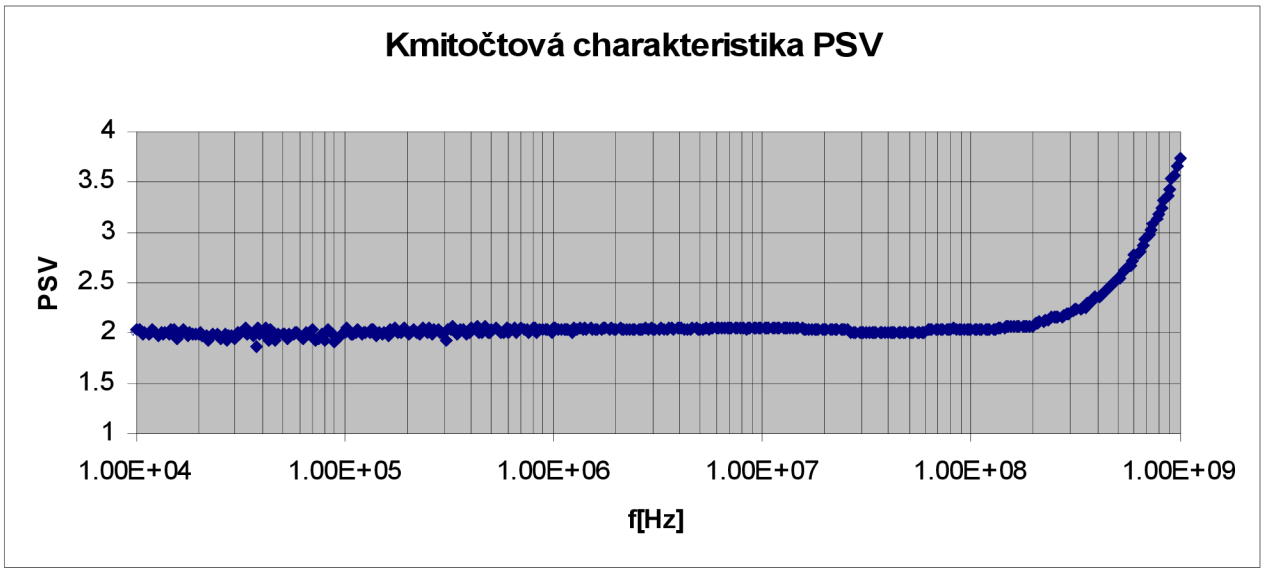
Obr.44 *Kmitočtová charakteristika poměru stojatých vln drátových rezistorů*



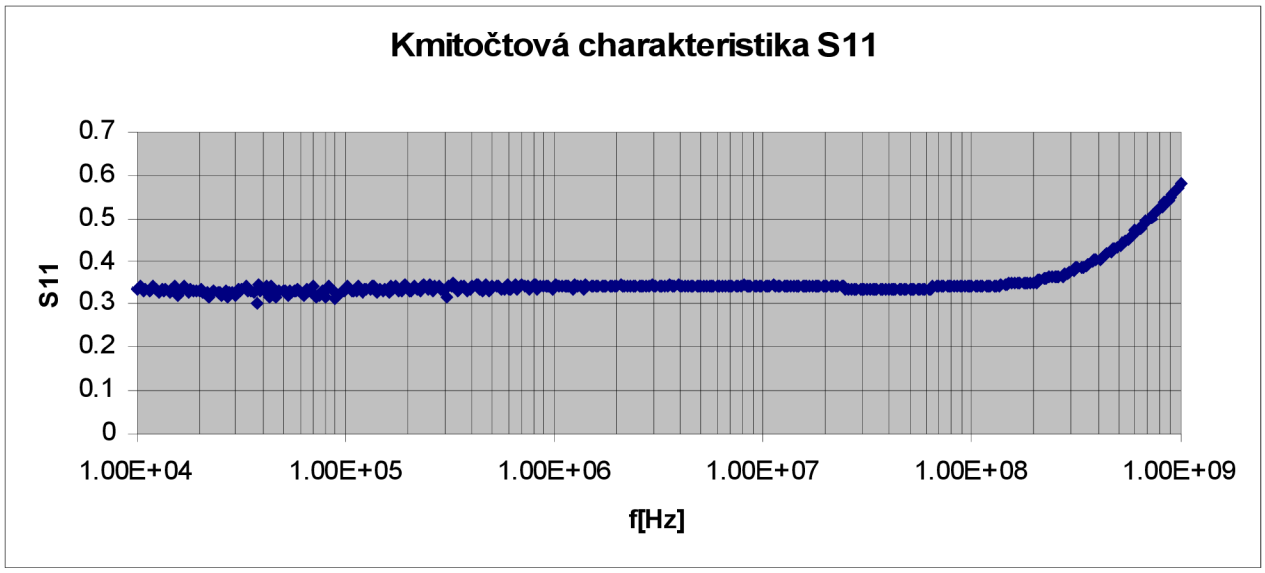
Obr.45 *Kmitočtová charakteristika poměru stojatých vln drátových rezistorů*

4.3Vrstvové rezistory:

Jako testovací vzorek jsem použil rezistor 100ohm. Výkonová zatížitelnost je bohužel jen 1W. Poměr stojatých vln je 2. Z kmitočtové charakteristiky poměru stojatých vln je vidět největší možný rozsah z testovaných rezistorů. Rezistory jsou použitelné do frekvence cca 300MHz. Při vyšším kmitočtu je PSV větší než 2,2.



Obr.46 *Kmitočtová charakteristika poměru stojatých vln vrstvových rezistorů*



Obr.47 *Kmitočtová charakteristika poměru stojatých vln vrstvových rezistorů*

V případě požadavku buzení generátorem na maximální výkon bych musel vytvořit celou síť rezistorů, tak aby se na každém z nich neztrácelo víc než 1W.
S ohledem na počet rezistorů se spokojíme s maximální hodnotou intenzity 30V/m.
Pak napětí mezi deskami

$$Uv = E * l = 30 * 0{,}4 = 12\text{V} \qquad (3.3)$$

Výkon absorbovaný zakončovací impedancí 115 ohm

$$P = \frac{U_3^2}{Z} = \frac{12^2}{115} = 1{,}25\,W \qquad (3.4)$$

Proud procházející zakončovací impedancí

$$I_3 = \frac{U_3}{R_3} = \frac{12}{115} = 0{,}104\,A \qquad (3.5)$$

Napětí na vstupních svorkách přizpůsobovacího obvodu

$$U_2 = (R_2 * I_3) = 86 * 0{,}104 = 8{,}97\,V \qquad (3.6)$$

Výkonové zatížení rezistoru R2

$$P_2 = R2 * I^2 = 86 * 0{,}104^2 = 0{,}936\,W \qquad (3.7)$$

Napětí na rezistoru R1

$$U_1 = U_1 + U_3 = 8{,}97 + 12 = 20{,}97\,V$$

Výkonové zatížení rezistru R1

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R1} = \frac{20{,}97^2}{66} = 6{,}66\,W \qquad (3.8)$$

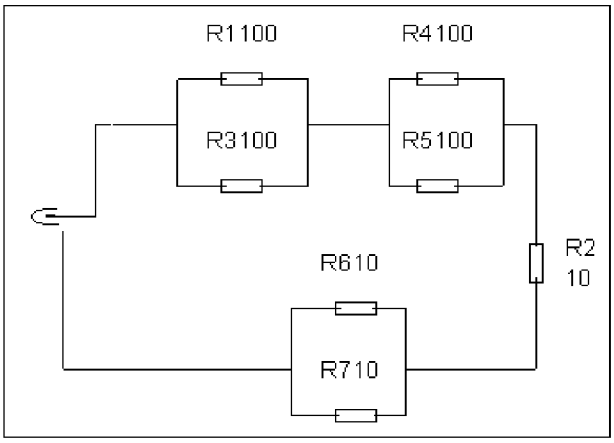
Sériovou a paralelní kombinací rezistorů lze snadněji absorbovat výkon okolo 7W.

Z předchozích vztahů vyplývá, že celkový výkon vstupující do celého systému je 6,66+1,25+0,936=8,846W
To odpovídá výkonu cca 40dBm, což je maximální možný výkon, který lze nastavit na budícím generátoru.

Na internetových stránkách www.rftechniques.com jsem našel rezistory určené pro frekvence až 6GHz s výkonovým zatížením 20W. V případě funkčnosti s klasickými metalizovanými rezistory lze celou soustavu vylepšit přizpůsobovacími obvody s těmito specielními rezistory.

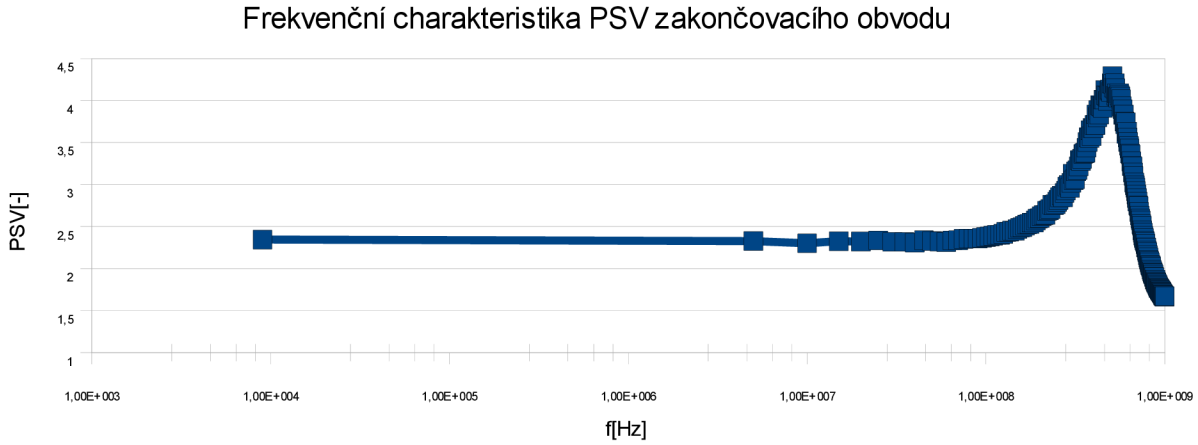
5. Konstrukce přizpůsobovacího a zakončovacího členu:

Jako první jsem z důvodu konstrukční jednoduchosti vyrobil zakončovací člen. Abych dodržel předchozí požadavky na požadovanou intenzitu pole zakončovací odpor jsem složil sériovou a paralelní kombinací rezistorů se zatížitelností 1W, které se mi po předchozím orientačním testování zdály nejvhodnější. Schéma zapojení je na obr.48



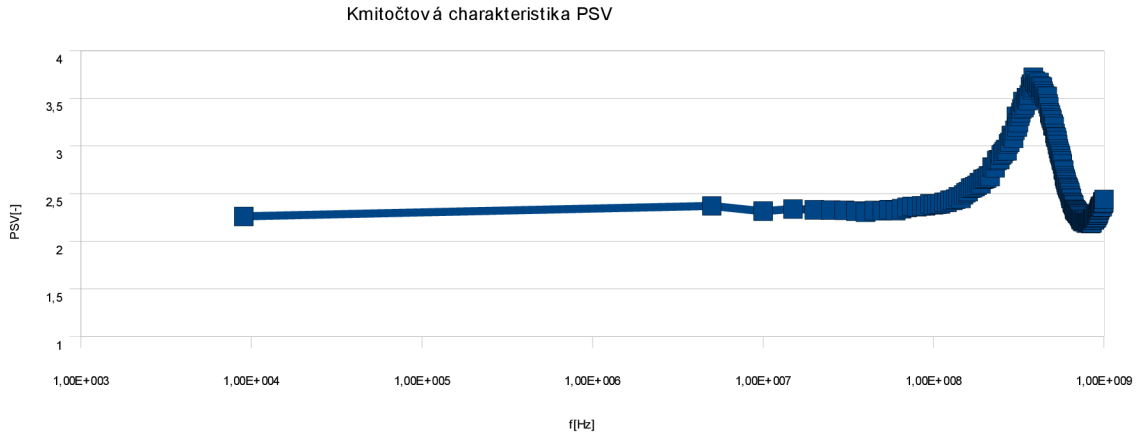
Obr.48 *Schéma zapojení zakončovacího odporu*

Tento obvod jsem si nechal vyrobit ve školní dílně, z pocínovaného plechu jsem si vyrobil stínící kryt a opatřil jej N konektorem. Kmitočtovou charakteristiku obvodu jsem proměřil na analyzátoru Rhode&Schwarz ZVL Vectro Network Analyzer. Frekvenční charakteristika poměru stojatých vln je na obr.49.



Obr.49 *Frekvenční charakteristika PSV zakončovacího obvodu*

Dozvěděl jsem se, že pro zlepšení parametrů obvodu se používá guma, která se umistí do stíněné krabičky a slouží jako absorbér. Po experimentálním vyplnění krabičky gumou se zlepšily parametry obvodu jak je vidět na obr.50.



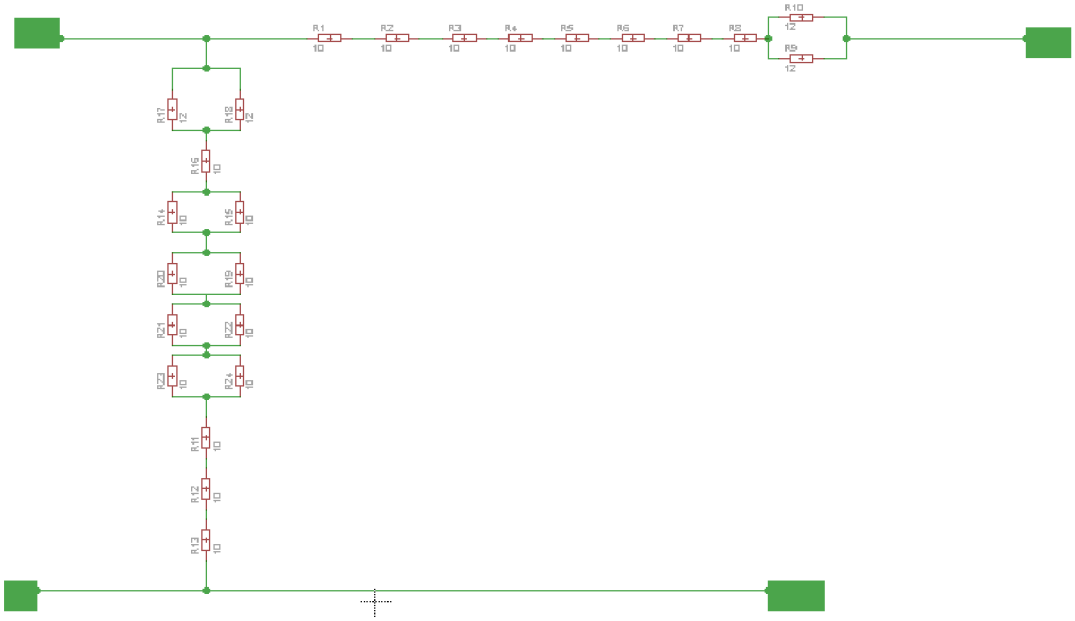
Obr.50 *Frekvenční charakteristika PSV zakončovacího obvodu s gumou*

Nejvíce je zlepšení vidět na kmitočtech kolem 300MHz, kdy klesl poměr stojatých vln z hodnoty 4,5 na hodnotu cca 3,5. Z charakteristiky lze usoudit, že obvod je použitelný do kmitočtu cca 150MHz. Hodnota je poloviční oproti hodnotě udávané v předchozí kapitole. Nutno říct, že se jednalo pouze o orientační měření, které mělo vybrat pouze nejvhodnější rezistory s danou technologií výroby. V tomto druhém případě se jedná o finální zapojení několika rezistorů umístěných na DPS v pokovené krabiččce.Generátor, který bude použit pro tuto úlohu disponuje výkonem 75W pouze do frekvence 230MHz.

Vstupní přizpůsobovací člen

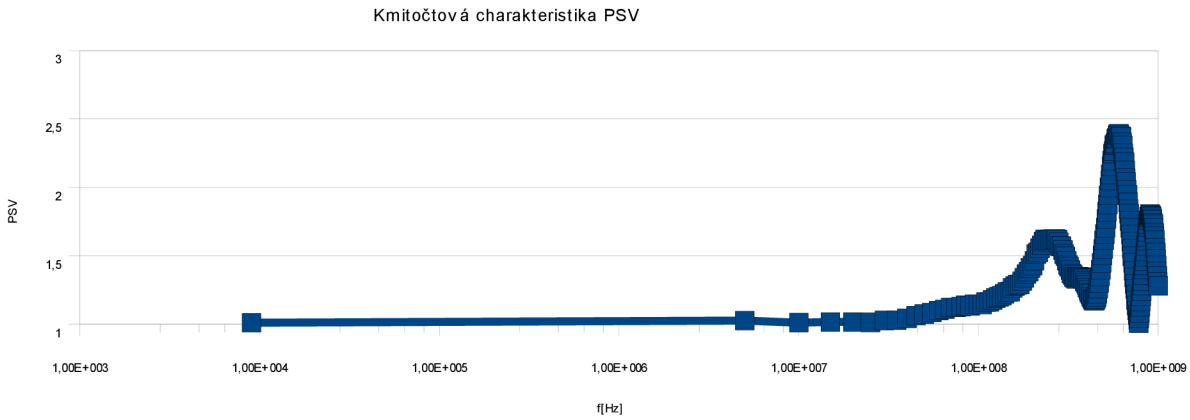
Obdobně jsem realizoval i vstupní přizpůsobovací člen. V souladu se vztahy 3.7 a 3.8 jsou odpory R1 a R2 ze schématu na obr.39 složeny sériovou a paralelní kombinací rezistorů. Pro

požadavek elektrické intenzity 30V/m by stačil menší počet odporů než je uvedeno ve schématu. Počítal jsem záměrně s větší výkonovou rezervou pro případné pozdější požadavky na vyšší intenzitu pole mezi deskami.



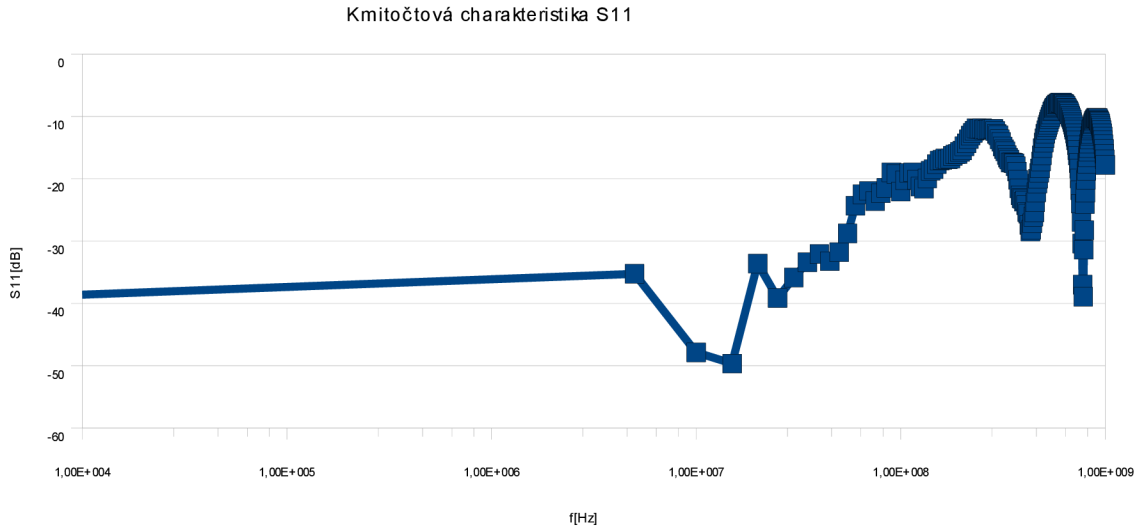
Obr.51 *Schéma vstupního přizpůsobovacího členu*

Frekvenční charakteristika realizovaného obvodu opatřeného N konektory a umístěného ve stíněné krabičce je vidět na obr.52. Tato charaktristika je nejlepší, které jsem dosáhl po vyplnění krabičky gumou.

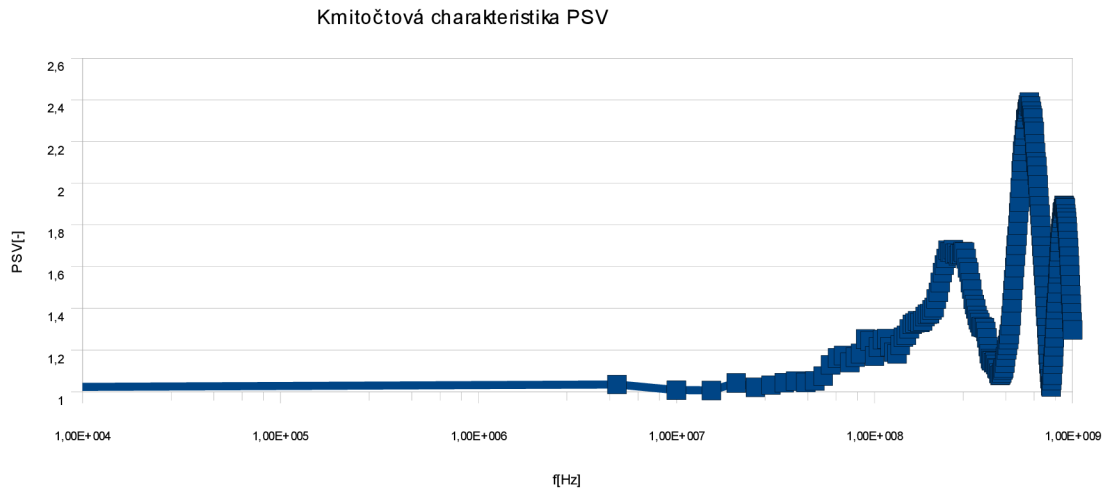


Obr.52 *Frekvenční charakteristika PSV přizpůsobovacího obvodu s gumou*

Před samotným testováním provozu zařízení jsem vyzkoušel proměřit frekvenční charakteristiku celého systému tj. deskového vedení se zakončovací impedancí a na vstupu zapojeným přizpůsobovacím obvodem.



Obr.53 *Frekvenční charakteristika S11 sestaveného deskového vedení*

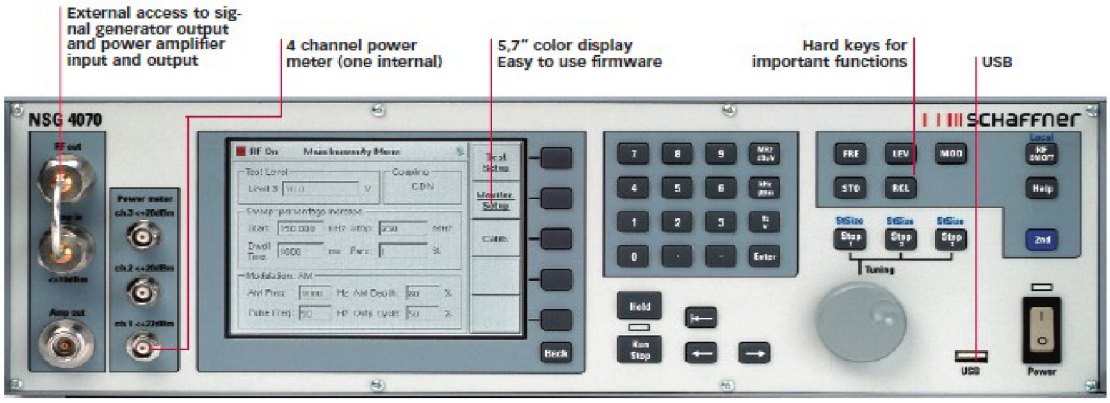


Obr.54 *Frekvenční charakteristika PSV sestaveného deskového vedení*

Z charakteristiky na obr.54 vidíme, že hodnota poměru stojatých vln je do kmitočtu 150MHz pod 1,3. Pro nejvyšší kmitočet budícího generátoru 230 MHz je hodnota PSV 1,64.
Z těchto hodnot je možné usoudit, že deskové vedení i přizpůsobovací odpory jsou poměrně dobře navrženy. Každý z těchto obvodů jsou mírně výkonově překompenzovány oproti vypočteným hodnotám. Je to z důvodu možnosti mírně překročit 40dBm hranici na generátoru. Je zřejmé, že systém nebude zcela dokonalý a malé nelinearity mohou způsobit potřebu vyššího dodávaného výkonu k dosažení určité intenzity elekrického pole.

6. Ovládání generátoru

Jako budící generátor jsem použil TESEQ NSG 4070. Jeho vnitřní zesilovač disponuje výkonem 75W až do frekvence 230 Mhz.
Před použitím generátoru je třeba zkalibrovat měřící systém generátoru s jeho interním zesilovačem. To se provádí tak, že se na jeho výstup připojí atenuátor 6dB, který je dodáván s přístrojem. Druhý výstup atenuátoru se přivede zpět na měřící vstup generátoru č.1 (ch.1 <+27dBm). Nikdy se nesmí připojit výstup přímo na vstup. Došlo by ke zničení generátoru.
Kalibrace se provede v menu Immunity mode>Calib. Stisknutím tlačítka Start Cal. se provede kalibrace. Na obrazovce se vykreslí křivka výstupního výkonu na frekvenci. Návrat do menu se provede stisknutím tlačítka Back. Pro funkci běžného generátoru zvolíme v hlavním menu položku Generat.Mode. Přístroj poskytuje mnoho možností testování včetně modulací a jejich kompletního nastavení, rozmítání frekvence, výkonu a mnoho dalších funkcí. Ty jsou k dispozici pod položkou Immunity Mode v hlavním menu.



Obr.55 *Přední panel výkonového generátoru*

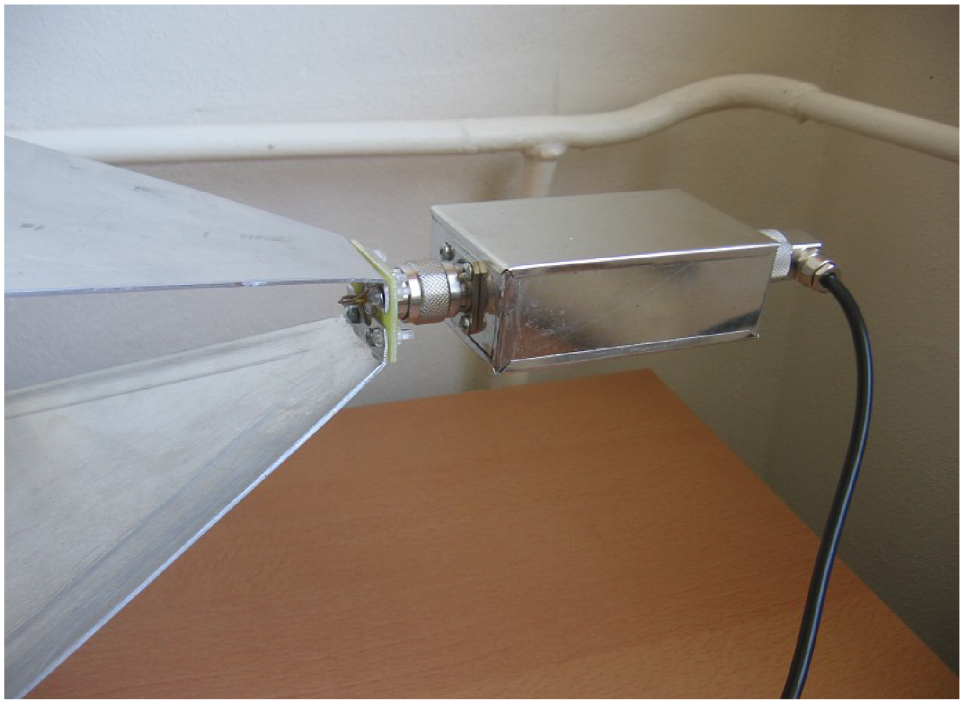
Při použití Generat.Mode je třeba aktivovat vnitřní zesilovač přístroje stisknutím tlačítka AMP. Na spodní části displeje se pak aktivuje položka Output, která udává výstupní výkon generátoru v dBm. Toto je nejdůležitější hodnota. Na displeji je pak ještě položka REF.LVL která udává úroveň generátoru bez iterního zesilovače. V tomto režimu pak měníme pouze kmitočet tlačítkem FRQ a úrověň signálu LVL. Zvyšování a zmenšování hodnot provádíme otočným kolečkem.
Důležitým tlačítkem je RF ON/OFF , kterým aktivujeme výstupní signál. To nám oznamuje kontrolka vlevo nahoře RF ON- zelená barva RF OFF- červená. Bez zapnutí tohoto tlačítka z generátoru nejde žádný signál a jakékoliv jiné nastavování nemá na jeho výstup vliv.

7. Realizace

Konce vedení jsou opatřeny N- konektorem, který je k deskovému vedení připojen pomocí 2mm cuprexitové desky. Ta zajišťuje nevodivé spojení horní a spodní desky a celkovou stabilizaci. Je připevněna k deskám polykarbonátovými šrouby průměru 3mm. Vodivé spojení zajišťují kovové šrouby stejného průměru. Horní deska je napojena na střední vodič N konektoru pomocí měděného vodiče jak lze vidět na obr.56. Ten je propojen s horní deskou vodivě pomocí kovové podložky.

Stabilitu vedení zajišťuje dřevěná konstrukce, v níž nesmí být použito žádných kovových spojů (hřebíků,vrutů).

Obr.56 *Připojení přizpůsobovacího obvodu (detail)*



Obr.57 *Připojení přizpůsobovacího obvodu*

8. Měření intenzity pole mezi deskami

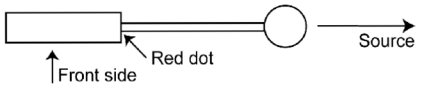
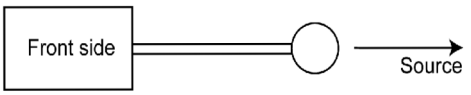
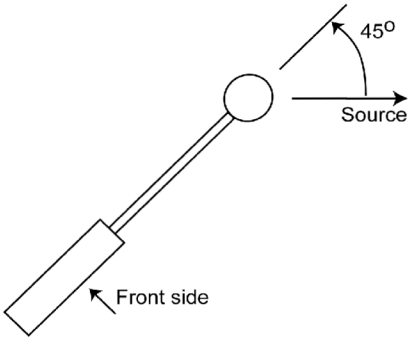
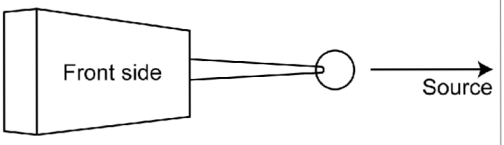
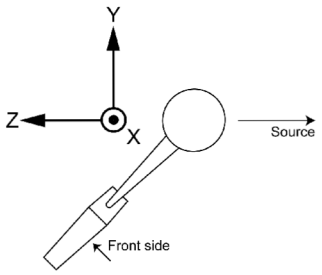
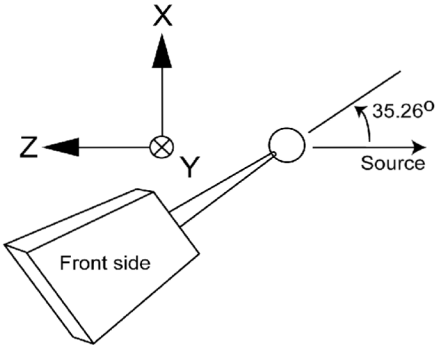
Zařízení bylo navrženo tak, aby generovalo pole mezi deskami o intenzitě 30V/m do frekvence maximálně 150MHz. Tomu pro dané rozměry deskového vedení a vypočtené přizpůsobovací a zakončovací impedance odpovídá maximální nastavený výkon na generátoru 40dBm. Z předchozích charakteristik je zřejmé, že nelinearita poměru stojatých vln způsobí i nelineární závislost vstupního výkonu. Hranice 40dBm tak nebude moci být zcela přesně dodržena při požadavku generovat pole o intenzitě 30V/m v celém pracovním rozsahu kmitočtů. To jsem v návrhu zohlednil vhodným složením vypočtených rezistorů R1,R2 a R3. Je třeba rovněž brát v úvahu nastavované jednotky dBm. Přestože jsou obvody navrženy na výkonovou zátěž o několik watů vyšší nastavováním výkonu v dBm na generátoru může dojít i k překročení těchto hodnot.

Intenzitu pole jsem měřil širokopásmovým měřičem pole Narda NBM 550. Slouží k měření intenzity elektrického i magnetického pole. Přístroj umožňuje měřit intenzitu elektrického pole ve třech směrech (x,y,z) v rozsahu intenzit 0.01 V/m až 100 kV/m. Frekvenční rozsah přístroje určuje použitá měřící sonda. Pro moje účely byla dostačující sonda pro rozsah kmitočtů 100 kHz až 3 Ghz.

Obr.58 *Přístroj měřící intenzitu elektrického pole Narda NBM 550*

Ovládání přístroje je velice jednoduché a intuitivní. Umožňuje ukládání měřených výsledků do paměti, připojení k PC pomocí sběrnice USB, časové průměrování hodnot, připojení GPS modulu a mnoho dalších funkcí.

Pole mezi deskami jsem měřil ve všech třech směrech X,Y, Z. K tomu je třeba vhodné natočení sondy. Návod na uspořádání měřícího přístroje ukazuje následující tabulka

	Pohled shora	Pohled ze strany
1. Umístění přístroje do měřeného pole dle obrázku		
2. Natočení o úhel 45°		
3.Natočení o úhel 35.26°		

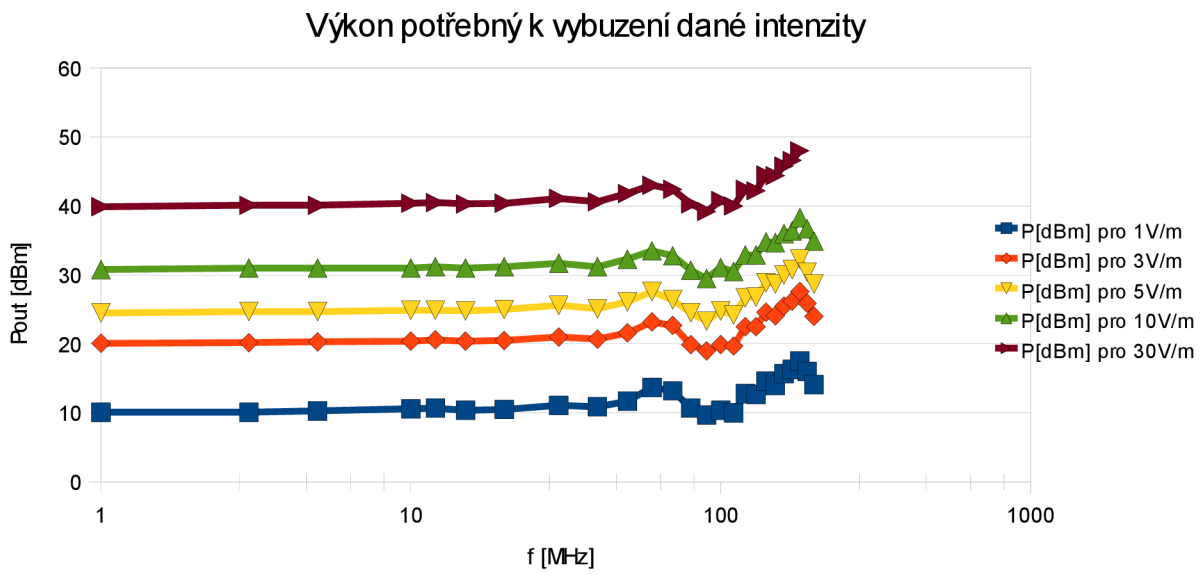
Tab.1 *Uspořádání měřící sondy*

Změřil jsem závislost požadovaného výkonu generátoru pro intenzity pole 1, 3 ,5, 10, 30 V/m. Intenzita pole je udávána jako hodnota RSS - Root sum square – geometrický součet.
Vzorec použitý pro výpočet celkovou intenzitu pole ze tří prostorových prvků X, Y a Z:

$$RSS = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

f[MHz]	P[dBm] pro 1V/m	P[dBm] pro 3V/m	P[dBm] pro 5V/m	P[dBm] pro 10V/m	P[dBm] pro 30V/m
1	10,1	20,1	24,5	30,8	39,9
3	10,1	20,2	24,7	31	40,1
5	10,3	20,3	24,7	31	40,1
10	10,6	20,4	24,9	31	40,4
12	10,7	20,6	24,9	31,2	40,5
15	10,4	20,4	24,8	31	40,3
20	10,5	20,5	25	31,2	40,4
30	11,1	21	25,6	31,7	41,1
40	10,9	20,7	25,1	31,2	40,6
50	11,7	21,6	26,1	32,3	41,8
60	13,7	23,2	27,6	33,5	43
70	13,2	22,7	26,4	32,8	42,4
80	10,7	19,9	24,5	30,7	40,3
90	9,7	19	23,3	29,5	39,2
100	10,4	19,9	24,8	31,1	40,8
110	10	19,7	24,2	30,5	40
120	12,8	22,5	26,7	32,9	42,4
130	12,7	22,5	26,8	32,9	42,2
140	14,6	24,6	28,9	34,8	44,5
150	14	24,1	28,7	34,7	44,4
160	15,7	25,5	30	36	45,8
170	16,3	26,2	30,8	36,4	46,6
180	17,5	27,6	32,3	38,3	48
190	16	25,9	30,4	36,7	
200	14,1	24	28,7	34,9	

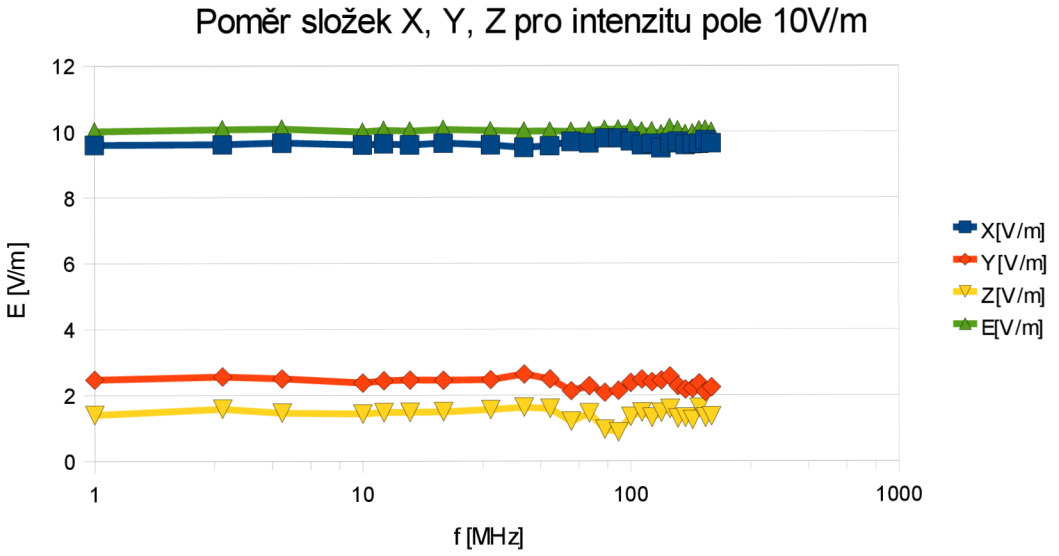
Tab.2 *Změřené hodnoty*



Obr.59 *Kmitočtová závislost výkonu potřebného k vybuzení pole dané intenzity*

Měřící sonda byla během měření umístěna v geometrickém středu deskového vedení. Charakteristiku z obr.59 jsem získal tak, že jsem se snažil udržet intezitu pole na požadované úrovni v celém rozsahu kmitočtů a to nastavováním výkonu generátoru. Z grafu na obr.59 je vidět, že všechny charakteristiky mají shodný tvar. Liší se pouze rozdílem velikosti výkonů. Hodnoty intenzity pole jednotlivých složek (X,Y,Z) a jejich grafy jsou součástí elektronické verze diplomové práce. Lze z nich usoudit, že Uvádět zde všechny grafy a změřené tabulky by nemělo smysl.

Pro ilustraci uvádím pouze obr.60 , který zobrazuje rozdělení jednotlivých změřených složek výsledné intenzity pole. Z něj je patrné, že převládá X-ová složka.



Obr.60 *Přístroj měřící intenzitu elektrického pole Narda NBM 550*

Závěr:

Z uvedených způsobů testování se můj zájem soustředil především na deskové vedení a na Crawfordovu komoru. Oba přístroje měly svoje výhody a nevýhody. Deskové vedení jednoznačně vede v jednoduchosti konstrukce. Naproti tomu je zařízení poměrně velké. Někteří výrobci doporučují umístit testovací zařízení alespoň 2m od bočních stěn zkušebny a od větších kovových předmětů. Crawfordova buňka tyto nevýhody odstraní. Z konstrukčního hlediska je ovšem složitější.

Pro praktickou realizaci jsem si proto vybral návrh deskového vedení. Jako vhodnou variantu jsem si vybral vedení, které má obě desky stejných rozměrů. Tato konstrukce je výrobně nejjednodušší. K ověření návrhu jsem používal program Microwave CST Studio, který je určen i pro profesionální návrhy těchto vedení.

Zajímavým úkolem bylo navržení vstupního přizpůsobovacího a zakončovacího obvodu. Jako generátor signálu mi sloužil TESEQ NSG 4070, který disponuje výkonem 75W do kmitočtu 230MHz. Navržené vedení pracuje spolehlivě do kmitočtu 150MHz. Jako nejvyšší intenzita pole, kterou lze mezi deskami vedení vybudit je 30V/m. Při této intenzitě je potřeba dodávat do vedení výkon cca 45dBm. Na tento výkon bylo třeba navrhnout i přizpůsobovací obvody. To byl nejtěžší úkol díky protichůdným požadavkům na použité rezistory. Při použití specielních výkonových vysokofrekvenčních rezistorů lze dosáhnout zvětšení kmitočtového rozsahu.

Seznam použité literatury:

[1] SVAČINA,J. *Základy elektromagnetické kompatibility - přednášky.* Skripta FEKT VUT v Brně. Brno : MJ Servis, 2005. 155s.

[2] MALARIC, K., BARTOLIC,J. *Design of a TEM-Cell with Increased Usable Test Area.*
In: Scientific Journals.
dostupné na URL:
http://journals.tubitak.gov.tr/elektrik/issues/elk-03-11-2/elk-11-2-5-0301-1.pdf

[3] GARBE, H., TEM Waveguides. *An Evaluation of Their Applicability for EMI Testing.*
In: Compliance Engineering
dostupné na URL: http://www.ce-mag.com/archive/2000/sepoct/garbe.html

[4] WEINZIERL, D., DOMÍNGUEZ, H., SILVEIRA, J., KOST, A., RAIZER, A. *The Transmission Line Modelling Method (TLM) Applied to the Simulation of TEM Cells and Shielded Enclosures.*
In: Departamento de Enenharia Electrica
ISSN 1516-7399
dostupné na URL:
http://www.sel.eesc.usp.br/jmo/issues/vol_5/vol5_n1/v5_n1_paper_pdf/v5n1a6.pdf

[5] Dokumentace a katalogy firem
ETS LINDGREN
CPR Technology
INSTRUMENTS FOR INDUSTRY INC.
Schwarzbeck Mess - Elektronik
Schaffner Holding AG
National Physical Laboratory

[6] http://www1.sphere.ne.jp/i-lab/ilab/tool/ms_line_e.htm , internetové stránky určené pro návrh deskového vedení

[7] ČSN EN 55020 (33 4288). *Elektromagnetická odolnost rozhlasových a televizních přijímačů a přidružených zařízení.* 1996

[8] SANDEEP M. Satav, *Do-it-Yourself Fabrication of an Open TEM Cell for EMC Pre-compliance.* EMC, Summer 2008. Issue No.218, p.66-71. ISSN 1089-0785.

[9] POZAR, David M. *Microwave engineering.* 2. edition. Wiley, 1997. 736 pages. ISBN 0471170968