

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Faktory ovlivňující účinnost stínění

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Anna MALKUSOVÁ**
Osobní číslo: **E13N0019P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Faktory ovlivňující účinnost stínění**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Uveďte příčiny vzniku elektromagnetických emisí a způsoby jejich šíření.
2. Zhodnoťte možnosti stínění těchto signálů a jevy ovlivňující kvalitu stínění.
3. Navrhněte a realizujte experiment, kterým otestujete různé faktory ovlivňující účinnost stínění.
4. Diskutujte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- 1. Chatterton, Houlden: EMC, Electromagnetic Theory to Practical Design**
- 2. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility**
- 3. Paul: Introduction to electromagnetic compatibility**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou elektromagnetických emisí a elektromagnetického stínění. Teoreticky je zaměřena na příčiny vzniku elektromagnetických emisí, způsoby jejich šíření a možnosti stínění těchto signálů, pomocí konstrukčního opatření nebo použitím vlnovodů. Zabývá se i jevy, které ovlivňují kvalitu stínění. Jsou zde popsány měřicí metody, především na základě, jakých norem probíhá samotné měření. Hlavním cílem této práce je navrhnout a realizovat experiment, který otestuje různé faktory ovlivňující účinnost stínění. Experiment je proveden pomocí dvou druhů antén – trychtýřové a bikónicko-logaritmické, pro hodnoty intenzity elektrického pole $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ a $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, rušení, odolnost, elektromagnetické stínění, účinnost stínění, intenzita elektrického pole, kritická frekvence

Abstract

This thesis deals with issue of electromagnetic emissions and electromagnetic shielding. The thesis provides theoretical background concerning the causes of electromagnetic emissions, methods of spreading and the possibilities of shielding these signals using constructional treatment or using waveguides. It deals with the phenomena that affect the quality of shielding. The thesis describes the measurement methods mainly base on standards used for the measurement. The main aim of this thesis is design and realization of the experiment that tests the various factors affecting the shielding effectiveness. The experiment is carried out using two types of antennas – horn and biconical-logarithmic, for values of the electric field strength $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ and $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$.

Key words

Electromagnetic compatibility, interference, resistance, electromagnetic shielding, shielding effectiveness, electric field strength, critical frequency

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 6.5.2015

Anna Malkusová

Poděkování

Na tomto místě bych ráda poděkovala panu Ing. Miroslavu Hromádkovi, PhD., za jeho ochotu, cenné připomínky, trpělivost a za čas, který mi věnoval během měření a hodnocení závěrečné práce.

Anna Malkusová

OBSAH

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY EMC.....	11
1.1.1 Základní členění problematiky EMC.....	12
1.2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A PŘÍČINY JEJICH VZNIKU.....	13
1.3 ELEKTROMAGNETICKÉ VAZBY – PŘENOSOVÁ PROSTŘEDÍ.....	16
1.3.1 Induktivní vazba.....	16
1.3.2 Kapacitní vazba.....	17
1.3.3 Galvanická vazba.....	17
1.3.4 Vazba vyzářováním.....	18
1.4 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ.....	18
1.4.1 Základní pojmy, charakteristiky elektromagnetického stínění.....	18
1.4.2 Účinnost stínění obecně.....	19
1.4.3 Účinnost stínění v blízkosti elektromagnetického pole.....	21
1.4.4 Vliv otvorů a netěsností na účinnost stínění.....	22
1.4.5 Měření účinnosti stínění.....	25
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	39
2.1 POSTUP MĚŘENÍ.....	39
2.2 VYHODNOCENÍ TESTOVÁNÍ.....	39
2.2.1 Testování při intenzitě elektrického pole $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$	40
2.2.2 Testování při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$	44
2.2.3 Měření rezonančních frekvencí.....	45
ZÁVĚR.....	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	49
PŘÍLOHA A – VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	51

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A.....	Absorbtion (účinnost stínění útlumem)
ASTM	označení mezinárodních standard
ČSN.....	označení českých technických norem
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EMI	elektromagnetická interference (rušení)
EMS	elektromagnetická susceptibilita (odolnost)
EM kód.....	stupeň ochrany krytu proti vniku elektromagnetického pole
EN	označení evropských norem
IEEE	institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství
M	Multiple Reflection (účinnost stínění mnohonásobnými odrazy)
R	Reflection (účinnost stínění odrazem)
SE.....	Shielding Effectiveness (účinnost stínění)

ÚVOD

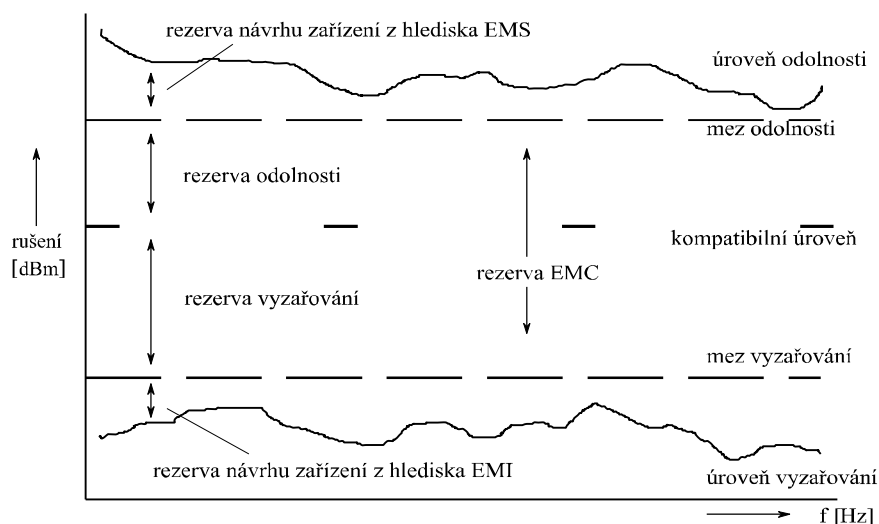
Diplomová práce je v teoretické části okrajově zaměřena na obecné základy elektromagnetické kompatibility. Ty vznikaly v šedesátých letech 20. století v USA. Původně byla využívána pouze ve vojenském, elektronickém a kosmickém průmyslu. Později se rozšířila do všech oblastí, jelikož se začala rozvíjet mikroprocesorová technika, osobní počítače a došlo i k celosvětovému rozvoji. Dnes je již nedílnou součástí života, jak z pohledu technického, bezpečnostního, ekonomického tak i zdravotního. Elektromagnetická kompatibilita neboli slučitelnost je schopnost zařízení a systémů fungovat v prostředí, kde působí zdroje elektromagnetických signálů (umělých a přírodních). Naopak nesmí ovlivňovat své okolí, technická či biologická zařízení, svou elektromagnetickou činností. Z větší části je teoretická část zaměřena na rušivé signály a příčiny vzniku. Způsoby šíření interferenčních signálů. V neposlední řadě je zaměřena na elektromagnetické stínění. Kde jsou projednávány základní pojmy, charakteristiky elektromagnetického stínění a účinnost stínění. Především jaká je účinnost stínění ve vzdáleném elektromagnetickém poli, jaký mají vliv otvory na účinnost stínění a jakým způsobem lze zvýšit účinnost stínění při různých netěsnostech. Tento negativní vliv otvorů na účinnost stínění je v práci popsán teoretickými vzorci. Poslední částí teoretické části jsou způsoby měření účinnosti. Měření probíhá na základě čtyř různých norem: MIL-STD-285, IEEE-STD-299, ASTM D4935 a ČSN EN 61000-5-7. V práci jsou popsány dvě měřicí metody. První je měření pomocí anténového setu a druhý pomocí systému pro měření elektromagnetické odolnosti.

Praktická část je zaměřena na vyhodnocení testování, které je provedeno pomocí systému pro měření elektromagnetické odolnosti. Úkolem je pomocí experimentální metody vylepšit tuto měřicí metodu. Tedy upustit od původního 1% frekvenčního kroku daného normou a místo toho použít konstantní frekvenční krok. U experimentu je využito kalibrace trychtýřové antény na testování účinnosti stínění při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Toto měření opět probíhá s konstantním frekvenčním krokem. Změřeny jsou i rezonanční frekvence pomocí uzavřeného krytu, kde jsou porovnány výsledky různě velikých krytů.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Základní pojmy EMC

Pojem elektromagnetická kompatibilita vznikl v šedesátých letech 20. století v USA. Na počátku byla v zájmu pouze lidí pracujících s elektronikou, ve vojenském a kosmickém průmyslu. Větší rozmach do všech oblastí nastal až v sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století. Začala se více rozvíjet mikroprocesorová technika, osobní počítače a především nastal celosvětový rozvoj elektronických komunikací. Dnes se jedná o rutinní oblast, jelikož se stala nedílnou součástí života ve všech směrech - technickém, zdravotním, bezpečnostním i ekonomickým. Název elektromagnetická kompatibilita pochází z anglického názvu Electromagnetic Compatibility, z něhož pochází zkratka EMC. Ta umožňuje koexistenci zařízení a systémů nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí. [1] H. M. Schlicke, jeden ze zakladatelů elektromagnetické kompatibility jako samostatného oboru, v roce 1968 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.“* Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost v prostředí, ve kterém působí na jiné zdroje elektromagnetických signálů a zároveň nesmí svou elektromagnetickou činností ovlivňovat své okolí, tedy nevyzařovat signály, které by byly rušivé pro jiná zařízení. Má zajistit správnou funkci (koexistenci) systémů a zařízení, která se nachází ve stejném elektromagnetickém prostředí, jelikož každé zařízení je zároveň zdrojem elektromagnetického rušení a jeho přijímačem. Vzájemný vztah základních pojmů EMC je uveden na obr. 1. [1]



Obr. 1: Znárodnění hladin EMC (Zdroj: [1])

Úroveň vyzařování je rušení vyzařované spotřebičem. Změřena předepsaným způsobem a v závislosti na kmitočtu vyjádřena např. v dBm.

Mez vyzařování je maximální úroveň vyzařování zařízení. Jejich rozdíl vyjadřuje právě rezervu návrhu zařízení z hlediska elektromagnetické interference (EMI) neboli elektromagnetického rušení.

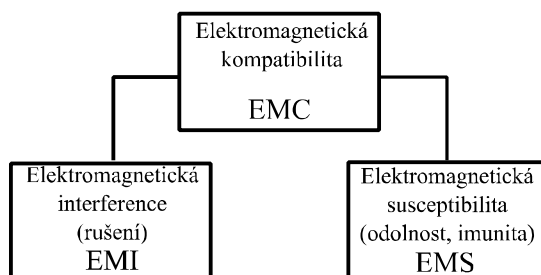
Úroveň odolnosti je maximální úroveň rušení, které může působit na zařízení, během kterého nedojde ke zhoršení jeho funkcí.

Mez odolnosti je nejnižší úroveň odolnosti zařízení, je předepsána normou. Jejich rozdíl udává rezervu návrhu zařízení z hlediska elektromagnetické susceptibility (EMS) neboli elektromagnetické odolnosti.

Rezerva neboli rozpětí EMC vyjadřuje rozdíl mezi odolnosti a vyzařování.

Kompatibilní úroveň je maximální předepsaná úroveň celkového rušení. Je volena tak, aby byla pouze minimální pravděpodobnost, že ji překročí skutečná úroveň rušení. Rozdíl mezi vyzařování a odolnosti vůči této kompatibilní úrovni udávají tzv. rezervu vyzařování a odolnosti.

1.1.1 Základní členění problematiky EMC



Obr. 2: Základní členění problematiky EMC (Zdroj: [1])

Elektromagnetická susceptibilita (EMS) neboli citlivost, odolnost je schopnost zařízení fungovat bez poruch v prostředí, kde se vyskytuje elektromagnetické rušení. Případně jsou dány přípustné vlivy prostředí, při kterých je zařízení ještě schopno pracovat. Zabývá se technickými opatřeními, která zvyšují u přijímače rušení elektromagnetickou odolnost vůči vlivu rušivých signálů. Dále se zaměřuje na odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

Elektromagnetická interference (EMI) neboli rušení je proces, během kterého je signál generovaný zdrojem rušení přenášen prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. Identifikuje zdroje rušení, popisuje a měří rušivé signály, identifikováním parazitních přenosových cest. Zabývá se příčinami rušení a jejich odstraňováním. [1]

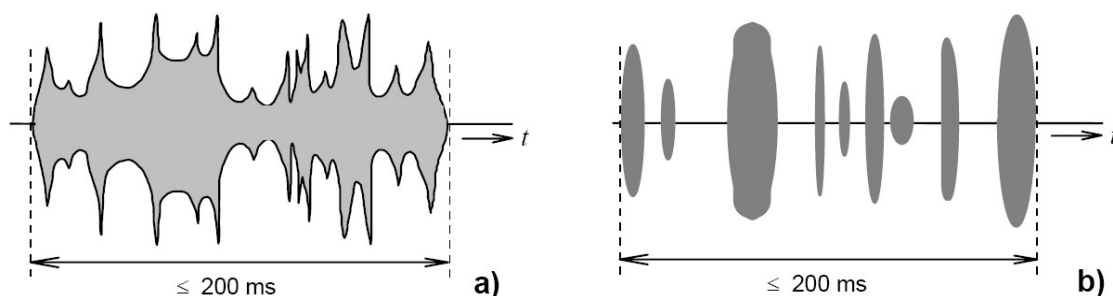
1.2 Rušivé signály a příčiny jejich vzniku

Každý elektrotechnický systém je zároveň zdrojem i přijímačem elektromagnetického rušení. Ale i tak lze vyčlenit skupinu systémů, u kterých převažuje generování rušivých signálů nad příjmem, jedná se o interferenční zdroje neboli zdroje elektromagnetického rušení. Jejich členění je vyznačeno na obr. 3. [1]



Obr. 3: Klasifikace interferenčních signálů (zdroj: [1])

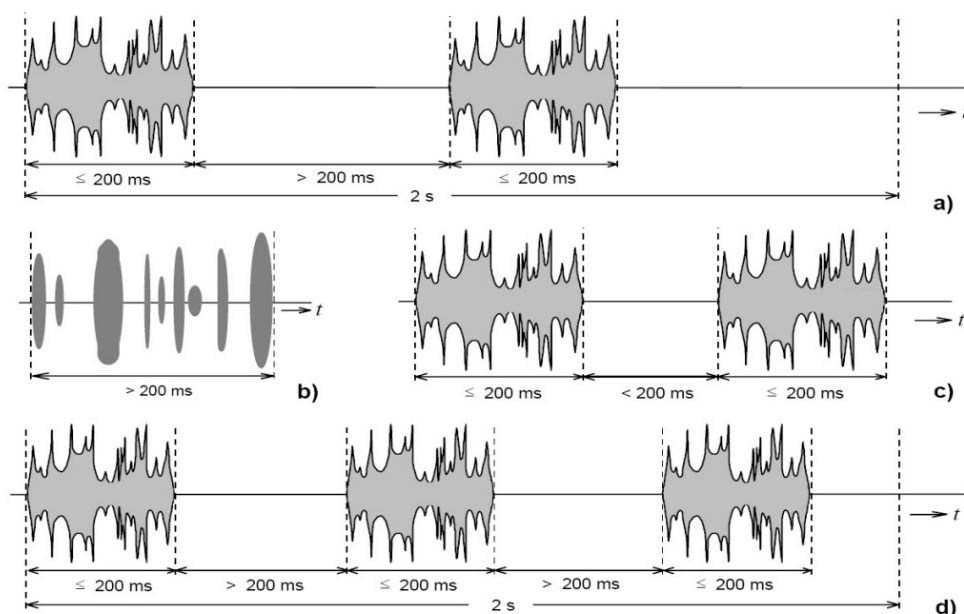
Tento obor se především zabývá umělými nebo uměle vytvořenými interferenčními zdroji, tedy zdroje vzniklé lidskou činností (man made noise). Z hlediska přírodních zdrojů rušivých signálů je nutné, abychom je brali jako fakt, jelikož jejich vznik nelze nijak ovlivnit, lze pouze předcházet jejich následkům. Ty zdroje, které jsou základem funkce jednoho systému a mohou ovlivnit funkce jiného a být vůči němu rušivé, jsou zdroje funkční či užitečné. Ostatní označujeme jako parazitní nebo nefunkční. Dále lze interferenční zdroje rozdělovat dle časového průběhu rušivého signálu. Prvním z těchto zdrojů je impulzní rušení, které má charakter jednotlivých impulzů nebo přechodných jevů. Druhým je spojitě rušení, které působí nepřetržitě na rušené zařízení a poslední je kombinace předchozích dvou kvazi-impulzní rušení. V praxi není úplně jednoduché posoudit, zda jde o spojitě či nespojitě rušení, jelikož průběhy signálů mohou být velmi rozličné. Charakteristiky těchto signálů jsou stanoveny mezinárodními technickými normami (např. ČSN EN 55014). Jsou stanovovány tak, že během jejich vyhodnocování a určování přípustných mezí je dosaženo jednotného a porovnatelného postupu. Normou je definována mžiková porucha s dobou trvání poruchy kratší než 200 ms. Dle obr. 4 může být tato porucha složena z nepřerušené řady impulzů (obr. 4a) nebo seskupením několika impulzů kratších než 200 ms a celkovou dobou trvání kratší než 200 ms (obr. 4b).



Obr. 4: Jednorázová mžiková porucha složena z nepřetržité řady impulzů a) a ze seskupení několika impulzů b).

(Převzato z:[2])

Při opakování poruch je důležitá tzv. četnost mžikových poruch. Další příklady pro vyhodnocení opakujících se mžikových poruch jako spojitěho či nespojitěho rušení jsou uvedeny na obr. 5. Pro jejich posouzení je důležitá doba trvání poruch, časový interval jejich opakování a počet poruch v intervalu 2 s.



Obr. 5: Vyhodnocení mžikových poruch: nespojité rušení - a), spojité rušení - b), c) a d)

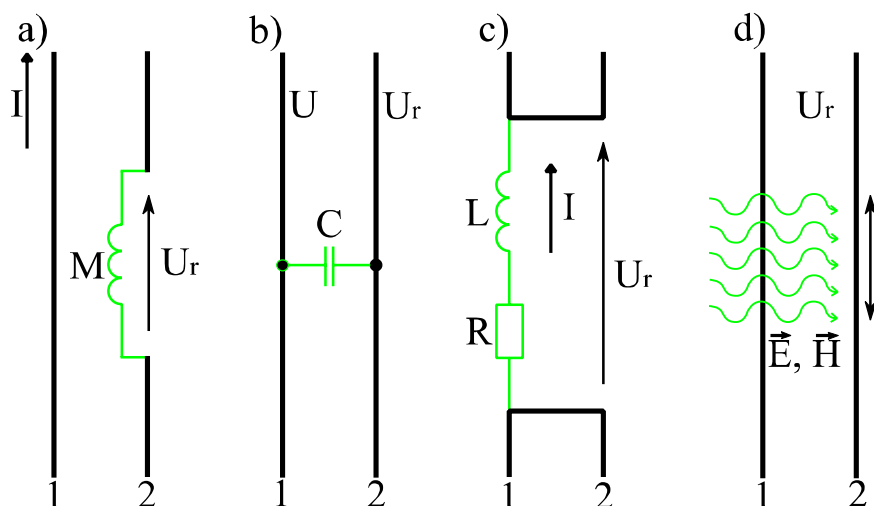
(Převzato z:[2])

S časovým průběhem rušivého signálu je spojována i šířka kmitočtového spektra. Jedná se o úzkopásmové rušení a širokopásmové rušení. Úzkopásmové rušení je produkováno především signály rozhlasových a televizních vysílačů, zatímco většina průmyslových rušivých signálů a všechna přírodní rušení jsou širokopásmovým rušením. Mezi často užívané klasifikace umělých rušivých signálů patří šum, impulzy a přechodné jevy. Šum je charakterizován jako signál ovlivňující především tvar užitečného signálu. Obvykle má periodický charakter. Impulzy jsou rušivé signály impulzního charakteru s velkým poměrem velikosti impulzů vzhledem k době jejich trvání. Superponují se na užitečný signál jako kladné nebo záporné špičky. Vznikají zejména spínacími pochody při kontaktním spínání elektrických a energetických obvodů a soustav. Přechodné jevy jsou náhodné jednorázové rušivé signály trvající od několika ms do několika sekund. Vznikají v energetické síti při náhlé změně jejího zatížení, při zapínání a vypínání spotřebičů velkých výkonů. Dále lze členit rušení z hlediska kmitočtového spektra a fyzikálního působení a nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Nízkofrekvenční rušení se dále dělí na energetické a akustické. Nízkofrekvenční energetické rušení způsobuje hlavně zkreslení (deformaci) napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. Projevuje se rušivě při provozu zařízení, jako jsou ovládací a sdělovací systémy, stroje či osvětlení. Zdrojem je v podstatě každá nelineární zátěž napájecí sítě. Toto rušení působí v pásmu do 2 kHz. Nízkofrekvenční akustické rušení ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů a to telefony, rozhlas, měřicí zařízení apod. Generováno je prakticky všemi energetickými

zdroji, radary či systémy přenosu dat. Působí v pásmu do 10 kHz. Vysokofrekvenční (rádiové) rušení působí v pásmu od 10 kHz do 400 GHz. Zdroji rádiového rušení jsou prakticky všechny interferenční zdroje. Rušivý signál se obecně šíří vyzařováním nebo po napájecích či sdělovacích vedeních. [1]

1.3 Elektromagnetické vazby – přenosová prostředí

Přenos interferenčních signálů závisí rozhodující měrou na elektromagnetickém vazebním prostředí neboli na druhu a způsobu vazby mezi zdrojem a přijímačem rušení. Jestliže se nepodaří ovlivnit vysílač ke snížení signálu nebo zvýšit odolnost přijímače, pak zajištění elektromagnetické odolnosti závisí na vazbě, ta se dá ovlivnit již při návrhu. Dělí se dle technické realizace, kam patří vzdušné prostory, stínící a absorpční materiály, napájecí kabely, apod. [1] Druhou možností dělení vazeb je z hlediska fyzikálního principu, kde se přenos vyzařované energie mezi jednotlivými zařízeními uskutečňuje pomocí indukční, kapacitní, galvanické vazby a vazby vyzařováním. [3]



Obr. 6: Druhy vazeb - indukční, kapacitní, galvanická, vyzařováním

(Zdroj: [4])

1.3.1 Indukční vazba

Typická magnetická vazba pro dvě galvanicky oddělené smyčky elektrického obvodu. Minimálně jednou z nich protéká časově proměnlivý proud, který vytváří časově proměnlivé magnetické pole v okolí smyčky. Velikostí, strmostí nárůstu nebo poklesu proudu, je dán vliv jednoho obvodu na druhý. Tento vliv je dán i magnetickým prostředím a geometrickým uspořádáním obou obvodů. [3] Indukční vazba vzniká v obvodech s malou impedancí nebo se společným magnetickým tokem. Parazitní indukční vazba vzniká především při rychlých změnách primárního proudu s velkou velikostí.

Minimalizace parazitní induktivní vazby je prováděna, tak že délka souběžných vodičů je minimální, vzdálenost obou obvodů je co největší, velikost proudové smyčky rušeného obvodu co nejmenší, stínění obvodu přijímače či jsou kolmo natočeny vazební smyčky. [1]

1.3.2 Kapacitní vazba

Způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči, jednotlivými částmi obvodů a částmi konstrukce. Těmito kapacitami je ovlivňováno elektrické pole, které existuje mezi každými dvěma vodivými částmi s různým potenciálem. Dochází k tomu při souběžném vedení energetických a signálových vodičů. [1] Typická je především uzly galvanicky oddělených vektorů E_i intenzit elektrostatického pole. Strmostí nárůstu nebo poklesu potenciálu příslušného uzlu je dán vliv jednoho obvodu na druhý. Vliv je též dán velikostí plochy elektrod a dielektrickými vlastnostmi prostředí, ve kterém se obvody nacházejí. Ovlivňovány jsou i geometrickým uspořádáním vodičů v příslušných uzlech. [3] Omezení kapacitní vazby je prováděno stíněním vodičů nebo zamezením souběžnosti vodičů. [1]

1.3.3 Galvanická vazba

Vazba dvou elektrických systémů, jejichž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovacích vedení neboli přes společnou impedanci. Proto se galvanická vazba nazývá vazba společnou impedancí. Impedance má většinou charakter sériového obvodu RL. Možností tvorby impedance jsou buď vnitřní impedancí společného napájecího zdroje, nebo impedancí společného zemnicího systému. Přes společnou impedanci tečou velké proudy dvěma bloky, kde napětí na této impedanci při průtoku proudu prvním blokem představuje pro druhý blok rušivé napětí. [1] Vždy musí být brána v potaz velikost pracovního kmitočtu každého zařízení a délka společných vodičů. [3] Při nízkých kmitočtech, v řádech kHz, rozhoduje odporová složka impedance. Zatímco při vyšších kmitočtech převažuje induktivní složka. U této složky již malý proud prvního bloku je schopen vyvolat velké napětí, které je rušivé pro druhý blok zařízení. [1] V případě elektromagnetického ovlivňování jiných zařízení galvanickou vazbou, musí být bráno v potaz, že elektrotechnické součásti nejsou ideální a obsahují parazitní kapacity, indukčnosti a reálné odpory. [3] Indukčnost a kapacity spojují i součástí společně tvoří rezonanční obvody, tudíž může být společná impedance na některých vyšších kmitočtech velká. Minimalizovat galvanické vazby je možné pomocí dostatečného dimenzování společného zemnicího vodiče, neslučováním společného vodiče u signálových vodičů,

nevytváření společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům, v některých případech vzájemným galvanickým oddělením funkčně souvisejících signálových a výkonových obvodů jednoho zařízení či vybavením elektronických zařízení různými technologiemi napájecích zdrojů. [1]

1.3.4 Vazba vyzařováním

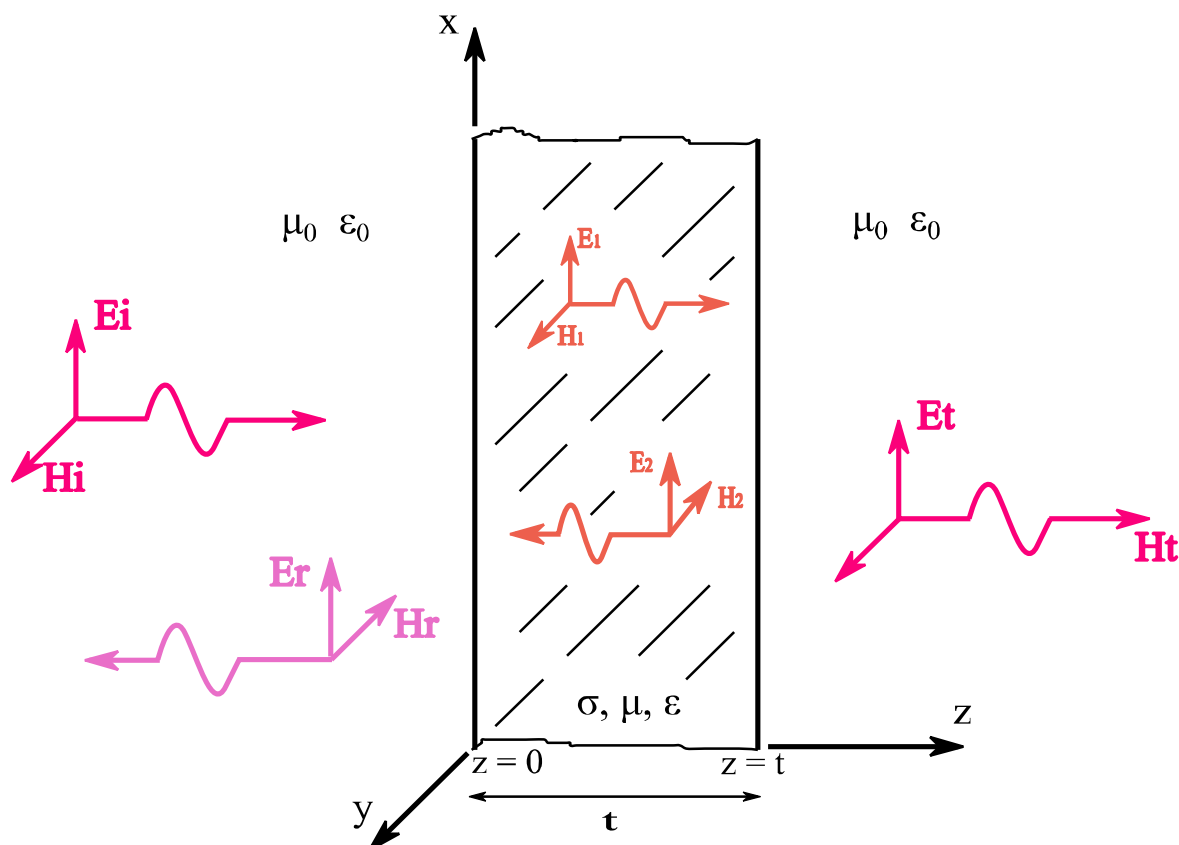
Typická pro galvanicky oddělené elektrické obvody. Mezi nimi dochází k výměně elektromagnetické energie. Jedná se o vzájemnou vazbu mezi zdrojem a přijímačem rušení vyzařeným elektromagnetickým polem. Vzniká při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy se vyloučí kapacitní a induktivní vazba. Mezi parazitní vazby vyzařování patří rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení a další průmyslové poruchy. Projevuje se především v rádiových přijímačích. Prochází do nich anténou nebo svodem. Ve vodičích se indukuje rušivé napětí působením elektromagnetické vlny. Toto napětí se v obvodech sčítá s užitečným signálovým napětím, případně jej zcela překryje. [1]

1.4 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetické stínění patří mezi nejdůležitější odrušovací prostředek elektromagnetické kompatibility. Umožňuje zmenšit rušivé vyzařování na straně zdrojů rušivých signálů a zvýšení elektromagnetické odolnosti na straně přijímačů rušivých signálů. Technickými prostředky pro zeslabení pole rušivých signálů v dané části prostoru se dosahuje pomocí krytů či stíněním. Používá se k ochraně jednotlivých součástí a i celých elektronických zařízení, která mohou zároveň být zdroji i přijímači elektromagnetického rušení. Jedná se o velmi efektivní způsob elektromagnetické ochrany před výkonovým rušením kontinuálního a impulzního charakteru. Tato metoda ochrany zařízení by měla být použita až v případě, že jsou vyčerpány ostatní metody zajištění elektromagnetické kompatibility. Mezi které patří konstrukce zařízení a optimální návrh z hlediska EMC. [1]

1.4.1 Základní pojmy, charakteristiky elektromagnetického stínění

Koeficient stínění je charakteristika působení elektromagnetického stínění jakožto lineárního systému. Koeficient stínění K_s je poměr intenzity elektrického pole E_t (nebo magnetického pole H_t) v určitém bodě stíněného prostoru k intenzitě pole E_i (H_i) dopadajícího na stínicí přepážku viz obr. 7. [1]



Obr. 7: Kolmý dopad rovinné elektromagnetické vlny na stínící přepážku

(Zdroj: [5])

Výpočet koeficientu stínění K_S :

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} \text{ nebo } K_S = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

V praxi je používána logaritmická míra koeficientu stínění K_S neboli efektivnost, účinnost stínění (Shielding Effectiveness).

$$SE = 20 \cdot \log \cdot \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log \cdot \left| \frac{E_t}{E_i} \right|, SE = 20 \cdot \log \cdot \left| \frac{H_t}{H_i} \right| \quad (2)$$

Rozbor účinnosti stínění rovinné kovové desky dle obr. 7, na kterou dopadá rovinná elektromagnetická vlna a šíří se ve směru osy z . Z hlediska stínění je nejhorší kolmý dopad vlny na kovovou desku. Při jiném úhlu je vlna procházející do stínící přepážky a do stíněného prostoru menší. Část vlny se odrazí a část pronikne do stínící vrstvy, kde se část změní na teplo a část se utlumí. [1]

1.4.2 Účinnost stínění obecně

Účinnosti stínění ve vzdáleném elektromagnetickém poli odpovídá vztah (3) odpovídající fyzikálním mechanismům vzniku stínícího efektu.

$$SE[dB] = R[dB] + A[dB] + M[dB] \quad (3)$$

Útlum odrazem R (4) závisí na vodivosti překážky, na velikosti impedance prostředí $Z_0 \gg$ impedance materiálu Z_M . Nezávisí na tloušťce t stínící kovové stěny, která může být velmi tenká. Odrazení R vzniká vlivem částečného odrazu energie vlny na impedančním rozhraní. Tato složka je dominantní pro nízké frekvence.

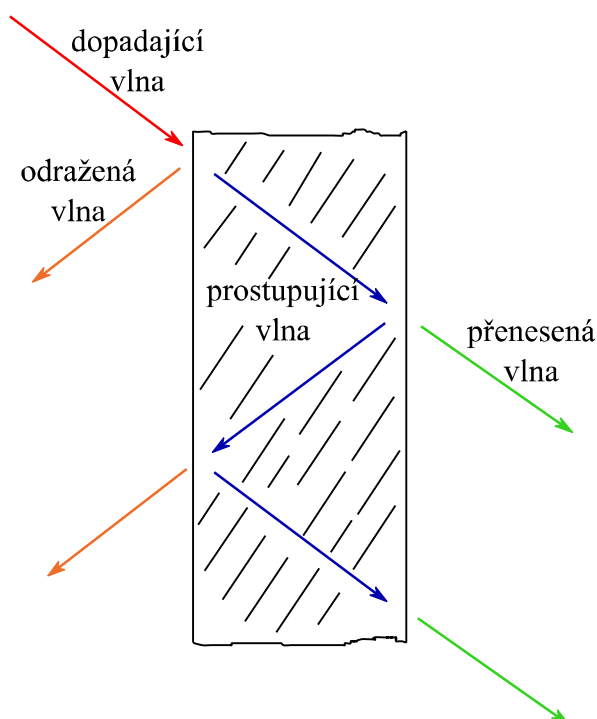
$$R = 20 \cdot \log \cdot \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4 \cdot Z_0 \cdot Z_M} \right| [dB] \quad (4)$$

Útlum absorpcí A (5) vzniká pohlcením části energie elektromagnetické vlny při průchodu stínící kovovou překážkou o tloušťce t vlivem tepelných ztrát. Závisí na tloušťce a hloubce vniku (6). Složka je dominantní pro vysoké frekvence.

$$A = 20 \cdot \log |e^{\gamma \cdot t}| = 20 \cdot \log e^{\alpha \cdot t} = 20 \cdot \log e^{\frac{t}{\delta}} [dB] \quad (5)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (6)$$

Mnohonásobný odraz M vzniká díky opakovaným odrazům na vstupu a výstupu stínící kovové překážky obr. 8.



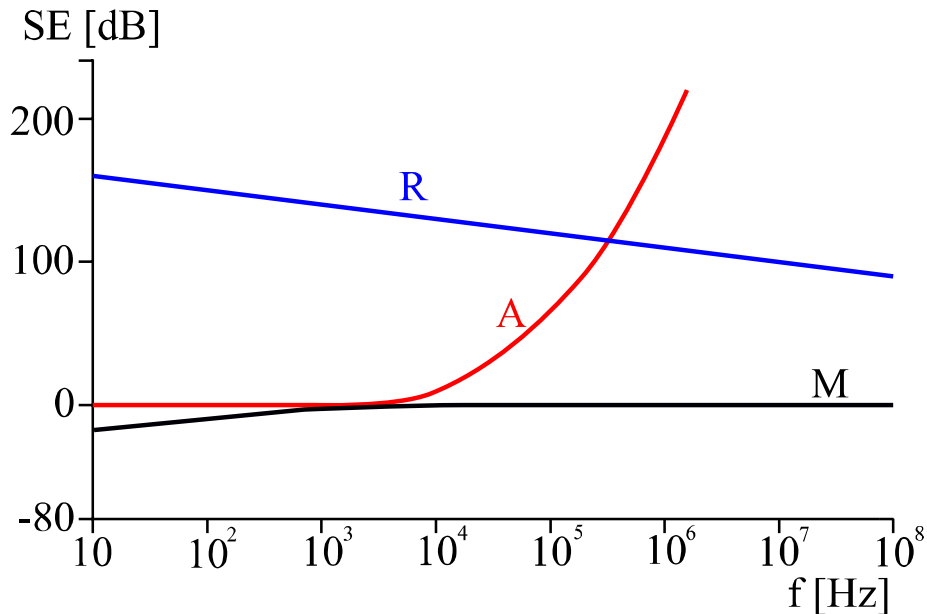
Obr. 8: Mnohonásobný odraz na vstupu a výstupu stínící přepážky

(Zdroj: [5])

Je-li tloušťka stínění $t \gg$ hloubka vniku δ a stínicí materiál z velmi dobrého vodivého materiálu ($Z_0 \gg Z_M$), tak lze vícenásobný odraz zanedbat.

$$SE = R + A \quad (7)$$

V případě že $t \ll \delta$, tak je útlum záporný a celková účinnost je nižší.



Obr. 9: Průběh složek účinnosti stínění měděné desky o tloušťce $t = 1$ mm. (Zdroj: [1])

1.4.3 Účinnost stínění v blízkosti elektromagnetického pole

Účinek stínění se mění v případě, že se stínicí plocha nachází v blízkosti elektromagnetického pole. Vzdálenost zdroje vlnění od stínicí plochy r je mnohem menší než vlnová délka λ . Přesnější vyjádření je $r \ll \lambda/2\pi$. V blízké zóně existuje stacionární (prostorově omezené) pole. Buď blízké elektrické pole, nebo blízké magnetické pole.

Blízké elektrické pole elektrického dipólu má charakteristickou impedanci Z_{0E} . Její hodnota při $\lambda \gg 2\pi r$ je větší než impedance rovinné homogenní vlny Z_0 . Jedná se o vysokoimpedanční zdroj elektromagnetického pole.

$$Z_{0E} = \frac{1}{\omega \epsilon_0 r} = Z_0 \cdot \frac{\lambda}{2\pi r} \gg Z_0 \quad (8)$$

Blízké pole magnetického dipólu, proudové smyčky, je nízkoimpedanční a má charakteristickou impedanci Z_{0H} . Kde r je vzdálenost smyčky od stínicí přepážky. Při $r \ll \lambda/2\pi$ v blízké zóně, je Z_{0H} menší než charakteristická impedance Z_0 . [1]

$$Z_{0H} = \omega \cdot \mu_0 \cdot r = Z_0 \cdot \frac{2\pi r}{\lambda} \ll Z_0 \quad (9)$$

1.4.4 Vliv otvorů a netěsností na účinnost stínění

Stínící kryt musí splňovat technické požadavky jako je zajištění požadované účinnosti stínění, jeho správný tepelný režim – chlazení a větrání, technologičnost konstrukce, opravitelnost zařízení, rozebíratelnost krytu, přístup ke vstupům a výstupům. To vše bohužel nelze zajistit. Objevují se různé nehomogenity, netěsnosti a přerušení, které částečně zhoršují účinnost stínění.

Rozlišují se tři druhy:

1. Otvory, štěrby a další otevření stínící plochy – dveře, okna, netěsnosti mezi jednotlivými kovovými plochami stínění, vstupní otvory pro přípojné kabely a další.
2. Vnější přírodní kabely a přípojná vedení – napájecí, signálové a datové kabely, kterými se elektromagnetické rušivé signály mohou dostat do vnitřního prostoru stínícího krytu
3. Špatné vodivé (vysokoimpedanční) části stínění – vodivě nedokonalá spojení jednotlivých částí stínění

Největší vliv na účinnost mají otvory ve stínící ploše. Jestliže na otvor ve vodivé desce dopadá rovinná elektromagnetická vlna, tak následně tato vlna může pronikat do stíněného prostoru. Tudíž vůči stíněnému prostoru se otvor chová jako štěrbinová anténa s výkonovým ziskem G [-].

Výkonový zisk pro kruhový otvor o poloměru a [m]:

$$G = \frac{P_t}{P_i} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{2\pi a \cdot f}{c}\right)^2 \quad (10)$$

Výkonový zisk pro podélnou štěrbinu o délce l [m]:

$$G = \left(\frac{2l}{\lambda}\right)^2 \quad (11)$$

P_i v rovnici (10) je výkon dopadající na stínící plochu s otvorem a P_t výkon vlny prošlé do stíněného prostoru za otvorem.

Účinnost stínění pro kruhový otvor je tedy:

$$SE = 10 \cdot \log \cdot \frac{P_i}{P_t} = 10 \cdot \log \cdot \frac{1}{G} = 20 \cdot \log \cdot \frac{\lambda}{2\pi a} = 20 \cdot \log \cdot \frac{c}{2\pi a \cdot f} \text{ [dB]} \quad (12)$$

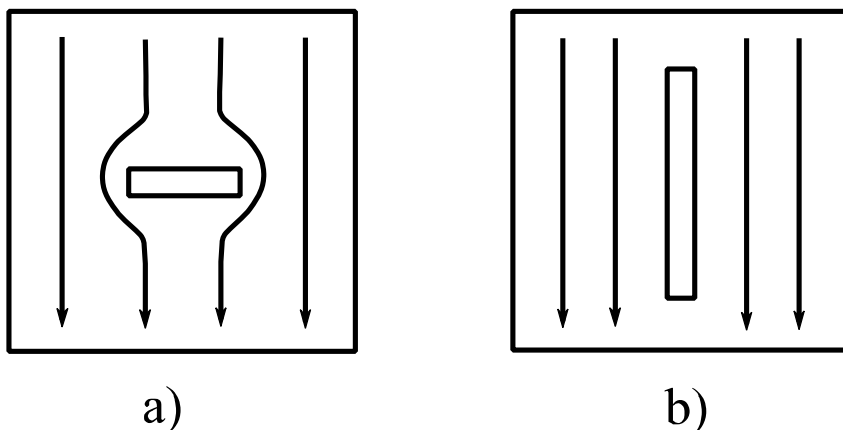
V případě, že je ve stínící přepážce n otvorů, tak je zisk úměrný jejich celkové ploše, tedy počtu otvorů n a účinnost stínění je:

$$SE = 20 \cdot \log \cdot \frac{\lambda}{2\pi a \cdot \sqrt{n}} = 20 \cdot \log \cdot \frac{c}{2\pi a \cdot f \cdot \sqrt{n}} \text{ [dB]} \quad (13)$$

Účinnost stínění pro podélnou štěrbinu je:

$$SE = 10 \cdot \log \cdot \frac{1}{G} = 10 \cdot \log \cdot \left(\frac{\lambda}{2l}\right)^2 = 20 \cdot \log \cdot \frac{\lambda}{2l} = 20 \cdot \log \cdot \frac{c}{2l \cdot f} \text{ [dB]} \quad (14)$$

Podélné štěrbinu mohou intenzivně vyzařovat a výrazně snižovat účinnost stínění viz obr. 10.



Obr. 10: Orientace vyzařující a) a nevyzařující b) podlouhlé štěrbinu v kovové přepážce
(Zdroj: [5])

V oblasti EMC je důležité předpokládat nejhorší možný případ, viz obr. 10a), jelikož neznáme orientaci vlny dopadající na stínící přepážku. V elektromagnetickém stínění se realizují průchody či otvory pomocí dutého kovového vlnovodu, které jsou potřebné pro zavedení kabelů či mechanických ovládacích prvků do vnitřku stíněného prostoru či pro zajištění větrání a denního světla.

Jestliže nelze zanedbat tloušťku stínící přepážky t vůči příčným rozměrům otvoru, např. $t \gg 2a$, je přenos signálu tímto otvorem jako přenos dutým kovovým vlnovodem o délce t . Pro kmitočty $f < f_c$ se jedná se o tzv. podkritický vlnovod, tedy stínící kryty působí jako vlnovody s kritickou frekvencí f_c :

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \text{ [Hz]} \quad (15)$$

Rozměry a, b [m] zde vyjadřují rozměry obdélníkového vlnovodu, rozměry m, n vyjadřují nezáporná celá čísla, tzv. vidy vlny. Pro podélnou štěrbinu o délce l se dosazuje dominantní vid ($m = 1, n = 0$). Výsledkem je nejmenší kritická frekvence tohoto uspořádání:

$$f_c = \frac{c}{2l} \text{ [Hz]} \quad (16)$$

Při vyšší $f > f_c$ se vlny procházející vlnovodem nezmění, zatímco vlnění nižších frekvencí bude tlumeno s faktorem $e^{-\alpha d}$, d je tloušťka stěny a α měrný útlum vlnovodu.

Vztah pro výpočet α :

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu\varepsilon} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 - 1} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (17)$$

Pro frekvence $f < f_c$ lze vztah (17) zjednodušit na:

$$\alpha \approx \omega \cdot \sqrt{\mu\varepsilon} \cdot \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 = 2\pi f \cdot \sqrt{\mu\varepsilon} \cdot \frac{c}{2lf} = \frac{\pi}{l} \text{ [m}^{-1}\text{]} \quad (18)$$

Účinnost stínění tohoto vlnovodu je:

$$SE \approx 8,686 \cdot |\alpha \cdot t| \approx 8,686 \cdot \frac{\pi t}{l} \approx 27,2 \frac{t}{l} \text{ [dB]} \quad (19)$$

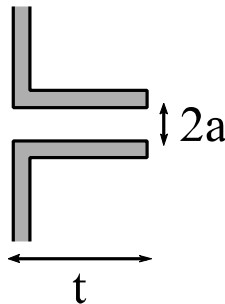
Kritická frekvence kruhového vlnovodu o poloměru a :

$$f_c = \frac{1,841 \cdot c}{2\pi a} \text{ [Hz]} \quad (20)$$

Účinnost stínění tohoto kruhového vlnovodu při $f < f_c$ je:

$$SE \approx 8,686 \cdot \left(\frac{1,841 \cdot t}{a}\right) \approx 15,991 \cdot \frac{t}{a} \text{ [dB]} \quad (21)$$

Rovnice (19) a (21) vyjadřují absorpční útlum vlnovodu. [1], [5], [10]



Obr. 11: Průchod v kovovém stínění na principu podkritického vlnovodu - základní provedení (Zdroj: [1])

Příslušné rozměry a a t je nutné volit tak, aby bylo dosaženo žádané velikosti účinnosti stínění. Na základě tohoto základního provedení pomocí kovového vlnovodu se vyrábějí celé větrací, průchodkové sekce. Používané vlnovody mají pravoúhlý, kruhový nebo hexagonální příčný průřez (tzv. honeycomb). Rozměry jsou dimenzovány pro nejvyšší předpokládaný kmitočet elektromagnetického rušení, kdy je zajištěna jejich činnost pod nejnižším mezním kmitočtem daného vlnovodu.

Konstrukční zlepšení účinnosti stínění je prováděno buď vzájemným dlouhým překrytím spojovaných částí, použitím elastických vodivých materiálů (např. silikon) nebo jsou použity pružinové, pérové nožové kontakty na pohyblivých částech (u dveří či často otvíraných přístupů do krytu). [1]

účinnost stínění [dB]	kategorie – hodnocení
0 ÷ 10	nedostatečné stínění
10 ÷ 30	stínění pro minimální požadavky
30 ÷ 60	stínění dostačující pro většinu běžných požadavků
60 ÷ 90	velmi dobré stínění
90 ÷ 120	vysoce kvalitní stínění

Tabulka 1: Hodnocení elektromagnetického stínění dle orientačních hodnot SE (Zdroj [1])

1.4.5 Měření účinnosti stínění

Měření účinnosti stínění lze provádět pomocí anténového setu nebo pomocí systému na měření elektromagnetické odolnosti. Obě měření podléhají normám. U první zmíněného měření se postupuje na základě norem MIL-STD-285 a IEEE-STD-299. Norma IEEE-STD-299 určuje přesnou velikost a umístění antén. Druhé měření splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-5-7 a bylo zvoleno jako stěžejní typ měření pro tuto diplomovou práci. Požadavky normy jsou splněny díky sondě elektrického pole a měřicího systému. Požadavky byly přizpůsobeny testování, kdy na základě návrhu byl zaměněn 1% frekvenční krok, krokem konstantním.

1.4.5.1 Dle norem (MIL-STD-285, IEEE-STD-299, ASTM D4935, ČSN EN 61000-5-7)

Prvním je vojenský standard MIL-STD-285 z roku 1956. V roce 1997 byl zrušen a nahrazen normou IEEE-STD-299. Je složen ze dvou kroků, z referenčního měření bez stínicího krytu a vlastního měření stínění. Při měření se nemění pozice vysílací a přijímací antény, zdroj zkušebního signálu je umístěn mimo zkoušený kryt a měřicí zařízení uvnitř. Normou jsou definovány tři frekvenční pásma, dle charakteru zkušebních polí.

1. Frekvenční rozsah, pro testování krytu proti působení nízkohybného magnetického pole, je od 150 kHz do 200 kHz. Měření se provádí na jedné frekvenci z daného pásma. Používány jsou kruhové antény o poloměru 30 cm, jejich vzdálenost od stínicí stěny je 30 cm. Stínicí útlum by měl být 70 dB.
2. Na frekvencích 200 kHz, 1 MHz a 18 MHz je zkoušen kryt proti působení vysokoimpedančního elektrického poli. Měření je prováděno pomocí elektrických monopólů o délce 104 cm a útlum by měl být v rámci splnění požadavků 100 dB.
3. Frekvence 400 MHz je stanovena pro měření útlumu vzdáleného elektromagnetického pole. Měření se provádí pomocí dipólů naladěných na danou frekvenci. Vysílací anténa

musí být vzdálena od stěny minimálně 183 cm a přijímací je vzdálena 5 cm. Účinnost by měla být minimálně 100 dB. [6]

Druhou normou, která nahradila předchozí vojenský standard, je IEEE-STD-299. Tato norma poprvé vyšla v roce 1969, v roce 1997 do ní byly začleněny některé koncepty z MIL-STD-285, v roce 2006 proběhla revize a zatím poslední revize byla v roce 2013. Původní dokument z roku 2006 obsahoval měřicí metody pro kryty, které nebyly větší než 2 m. V roce 2013 proběhla změna ohledně velikosti krytů, měření se zde provádí u krytů o velikosti od 0,75 m do 2 m a krytů menších než 0,75 m. Měřicí postupy z roku 2006 byly prováděny ve třech pásmech v rozsahu od 9 kHz do 18 GHz, tomu odpovídá tabulka 2. Měřicí postupy pro rok 2013 mají rozsah pásem rozdělen pouze do dvou pásem se stejným rozsahem tabulka 3, zde byly vyřazeny rezonanční frekvence. V normě z roku 2013 byly frekvence rozšířeny o tzv. rozšířené měřicí frekvenční rozsahy od 35 GHz do 100 GHz, kterým odpovídá tabulka 4.

Frekvenční rozsah	Typ antény
Pásmo nízkých frekvencí	
9 kHz - 16 kHz	Kruhová
140 kHz - 160 kHz	Kruhová
14 MHz - 16 MHz	Kruhová
Pásmo rezonančních frekvencí	
20 MHz - 100 MHz	Bikónická
100 MHz - 300 MHz	Dipólová
Pásmo vysokých frekvencí	
0,3 GHz - 0,6 GHz	Dipólová
0,6 GHz - 1,0 GHz	Dipólová
1,0 GHz - 2,0 GHz	Horn
2,0 GHz - 4,0 GHz	Horn
4,0 GHz - 8,0 GHz	Horn
8,0 GHz - 18 GHz	Horn

Tabulka 2: Rozdělení frekvenčních pásem v IEEE-STD-299 2006

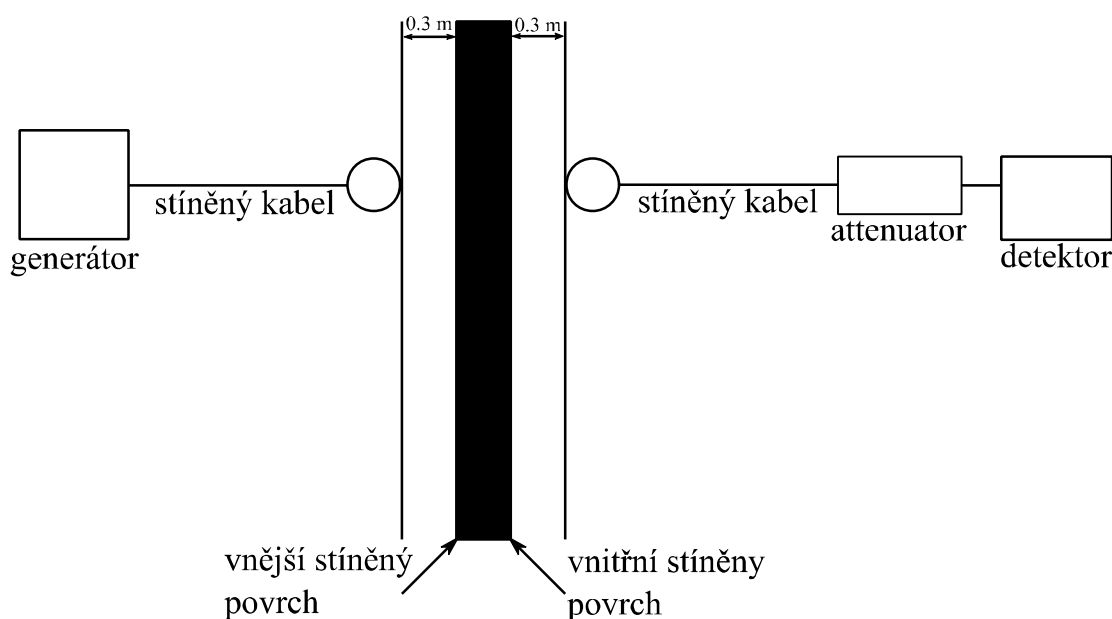
Frekvenční rozsah	Typ antény
Pásmo nízkých frekvencí	
9 kHz - 16 MHz	Kruhová
16 MHz - 20 MHz	Kruhová
Pásmo vysokých frekvencí	
0,3 GHz - 0,6 GHz	Dipólová
0,6 GHz - 1,0 GHz	Dipólová
1,0 GHz - 2,0 GHz	Horn
2,0 GHz - 4,0 GHz	Horn
4,0 GHz - 8,0 GHz	Horn
8,0 GHz - 18 GHz	Horn

Tabulka 3: Rozdělení frekvenčních pásem v IEEE-STD-299 2013

Frekvenční rozsah	Typ antény
35 GHz - 45 GHz	Horn
90 GHz - 100 GHz	Horn

Tabulka 4: Rozdělení doporučených rozšířených frekvenčních pásem v IEE-STD-299 2013

Norma popisuje velmi detailně přesné pozice měřicích antén, hlavně v oblasti dveří, ventilace nebo v rohu krytu. A také stanovuje, v kolika pozicích antény uvnitř krytu se provádí měření v závislosti na velikosti krytu. Tyto frekvence jsou pouze doporučené, testovanou frekvenci si volí vlastník. Měření je prováděno na jedné frekvenci z každého rozmezí dané tabulkou 3. Je možné rozšířit měření až na 50 Hz za předpokladu, že kruhová anténa bude uvnitř krytu. Normou jsou popisovány i pozice a velikost měřicích antén. Normou nejsou stanoveny potřebné limity pro splnění či nesplnění testu. Úroveň stínění je volena uživatelem krytu nebo stanovena výrobcem. Pro pásmo nízkých frekvencí od 9 kHz do 20 MHz se měření provádí pomocí 30cm kruhových antén. Vzdálenost antén od testované stěny má být 30 cm, viz obr. 12. Veškerá zařízení související s měřením musí být v souladu s obr. 12.



Obr. 12: Rozměry vysílacích a přijímacích antén (Zdroj: [7])

V případě menších krytů může být nutností umístit přijímací anténu blíže ke stěně krytu než 30 cm. Magnetické pole může být generováno kruhovou anténou, kterou prochází proud. Napájení kruhové antény je obvykle zajištěno generátorem se zesilovačem, jestliže je použité adekvátní impedanční přizpůsobení. Přijímací anténa musí být připojena k měřicí intenzity pole, spektrálnímu analyzátoru či jinému podobnému zařízení. Pro

menší kryty je možné, že bude zapotřebí menší přijímací kruhová anténa, jelikož průměr antény by neměl překročit jednu třetinu rozměru krytu. V tomto případě by měla být smyčka umístěna ve středu krytu. Je doporučováno, testovat magnetické pole ve frekvenčním pásmu 14 MHz až 16 MHz, jelikož má v tomto rozsahu dobrou citlivost na vady stínění. Rezonanční frekvence, které se pohybují ve frekvenčním pásmu od 20 MHz do 300 MHz, nejsou zahrnuty v této normě. Měření vysokých frekvencí od 300 MHz do 18 GHz se jako vysílací anténa používá půlvlnný dipól, bionická, horn, yagi, logaritmicko-periodická nebo jiná lineární anténa. Pro přijímací antény jsou použity půlvlnné dipóly nebo horn antény. Měření se provádí na jedné frekvenci z každého pásma vysokých frekvencí daného tabulkou 3. [7]

Další normou je norma ASTM D4935, dle které je možné provádět testování materiálů. Vznikla v roce 1999 a o šest let později byla ukončena její platnost. I přesto je stále využívána v některých laboratořích pro měření stínicí účinnosti plochých materiálů. K měření je využit podélně rozdělený koaxiální držák, do kterého se vkládají vzorky testovaného materiálu. Při měření je zkoumáno, jak materiál ovlivní kapacitní vazbu mezi vodiči v držáku a referenčním vzorkem. Díky porovnání s referenčním vzorkem je možné spočítat účinnost stínění. Norma je používána pro frekvenční rozsah od 30 MHz do 1,5 GHz. Při nižších frekvencích by byla nedokonalá kapacitní vazba v magnetickém poli a při vyšších frekvencích je omezena kvůli buzení dalších módů vlnění. Účinnost lze spočítat porovnáním různého útlumu testovaného a kalibračního vzorku, případně je využit poměr intenzit elektrického pole nebo výkonů. Měřicí postup je díky své nenáročnosti a potřebě malého vzorku materiálu vhodný pro vývojová centra či výzkumné laboratoře, kde se vyvíjejí a testují nové stínicí materiály. [8]

Poslední norma, které se využívá pro měření účinnosti stínění, je norma ČSN EN 61000-5-7 – Elektromagnetická kompatibilita: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů - Stupně ochrany krytů proti elektromagnetickým rušením (EM kód). Tato norma obsahuje postup měření účinnosti stínění, zkušební podmínky a vyhodnocování zkoušek. Udává návod, jakým způsobem se má testovat účinnost stínění prázdných mechanických krytů a udává způsob reprezentace naměřených výsledků pomocí EM kódů, dle kterých si výrobce zařízení může vybrat kryt s požadovanou schopností odolnosti vůči elektromagnetickému poli. Tímto kódem je kryt označen po změření a vypočtení účinnosti stínění. Kód je zapisován ve formátu EMABCDEF. Značení A až F udává nejnižší změřenou stínicí účinnost na každém frekvenčním rozsahu daném tabulkou 5. Jestliže se v některém z daných frekvenčních rozsahů neměřilo, je dané místo kódu označeno písmenem x.

Například kryt, který byl zkoušen v rozsahu 1 MHz až 10 GHz a v pásmech *C* a *D* byla naměřena nejnižší účinnost stínění přes 60 dB a v pásmu *E* přes 30 dB bude označen EM kódem: EMxx663x. Jestliže má kryt několik možností konfigurace nebo uspořádání a v každém má jinou účinnost, tak musí být EM kód vyznačen pro každou variantu zvlášť.

Kmitočtové pásmo	Označovač stínění	Stínící účinnost SE [dB]	Hodnota označovače stínění
10 kHz - 100 kHz	A		
100 kHz - 1 MHz	B	nezkouší se	x
1 MHz - 30MHz	C	<10	0
30 MHz - 1 GHz	D	≥10	1
1 GHz - 10GHz	E	≥20	2
10GHz – 40 GHz	F	≥30	3
		≥40	4
		≥50	5
		≥60	6
		≥70	7
		≥80	8
		≥ 100	9

Tabulka 5: Frekvenční pásma a hodnoty označovače stínění EM kódu

Norma má několik technických požadavků. Prvním z nich jsou klimatické podmínky v laboratoři, které nesmí překročit dané meze pro provoz zkoušeného zařízení a vybavení laboratoře. Vlhkost vzduchu musí být taková, aby nedocházelo ke kondenzaci na zařízeních. Dalším požadavkem je čistota vzorků a každý vzorek by měl být nový. Případně je dobré zkoušet několik vybraných vzorků z většího množství výrobků. Zkušební frekvence by neměla mít větší rozestup než 1 % předcházející frekvence. Díky tomu nedochází k vynechání měření další frekvence a porovnáváním většího počtu měření se snadno rozpozná na jakých frekvencích je stínění nedostačující. Zkušební zařízení je natáčeno minimálně třemi stranami k vysílací anténě, která je umístěna v paralelní rovině, co nejbližší k povrchu krytu a měření je prováděno pro horizontální i vertikální polarizaci antény. V případě více nehomogenit na různých stranách testovaného objektu, je test prováděn na všech těchto stranách. Jestliže je kryt větší než 2,5 m x 2,5 m, je nutné rozdělit oblast objektu na jednotlivé zkoušené části o velikosti 2,5 m x 2,5 m a každou část zkoušet zvlášť. Anténa se nastavuje proti každému otvoru na zkoušené straně krytu. Testy jsou prováděny v bezodrazové komoře, kde jsou stěny pokryty absorpčním materiálem pro

zajištění homogenity pole od 10 MHz výše. Rozměry komory musí být alespoň trojnásobné oproti rozměrům testovaného zařízení, jestliže komora dispozičně nevyhovuje, může se testování provést na volném prostranství, kde nejsou žádné vysílací antény ani vodivé předměty v minimální vzdálenosti 5 m od testovaného zařízení. Pro spoj vysílací antény se používají optická vlákna nebo stíněné kabely, které mají účinnost minimálně o 10 dB větší než je požadovaná účinnost zkoušeného krytu. Přijímací anténa musí mít minimální délku kabelu, především jestliže je vystaven zkušebnímu poli. Pro zajištění dobrého přenosu se u kabelů využívají šroubové spoje. Neuzemněné kryty jsou umístěny na podstavec o výšce 0,8 m a v případě velkých krytů je snížena na 0,1 m. Vysílací anténa musí být umístěna od testovaného krytu dále než dvojnásobek vlnové délky zkušebního pole nebo 2,5 m a přijímací anténa 0,3 m od zkoušené strany. Zkušební protokol by měl obsahovat veškeré odchylky od daných požadavků na měření. [9]

1.4.5.2 Měření pomocí anténového setu

Anténový set MF-130D, který je určen pro testování účinnosti stínění, je vyráběn společností ETS-Lindgren. Skládá se ze dvou nástavců, vysílacího a přijímacího, na něž se montují antény. Pro každý nástavec se používají dvě antény, které umožňují měření na různých frekvencích. První je určena pro frekvence 10 kHz, 156 kHz, 1 MHz a 10 MHz. Druhá z antén je určena pro měření frekvencí 8 MHz, 16 MHz, 32 MHz a 64 MHz. Napájeny jsou nikl-kadmiovými bateriemi, které jsou umístěny v nástavcích. Na nichž jsou LCD displeje a tlačítka pro ovládání setu, pomocí kterých se nastavuje měření, odečítají a ukládají naměřené výsledky.

Postup měření

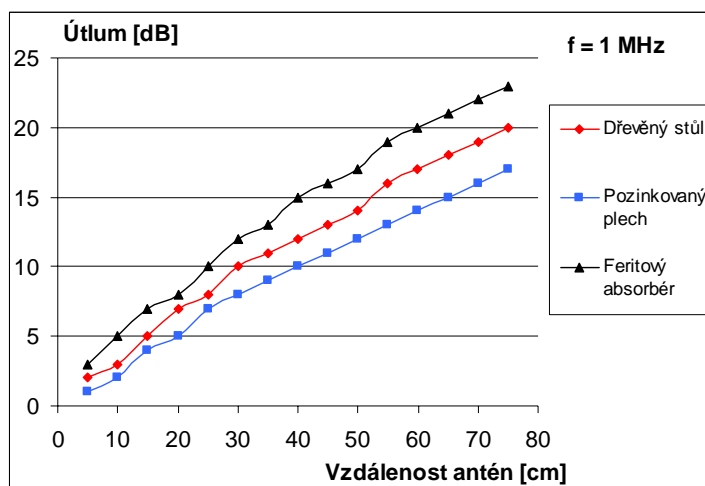
Antény si po zapnutí zkontrolují úroveň nabití baterií. Následně je přijímací anténou nabídnuta kalibrace měření, ta se provádí po každém startu. Lze jej provést dle norem IEEE STD-299, MIL-STD-285 či NSA 65-6. Během kalibrace jsou antény umístěny proti sobě do kalibrační vzdálenosti bez přítomnosti stínění. V okolí 0,5 m od antény nesmí být žádné vodivé předměty. Aby byly antény správně natočeny a byla správně nastavena vzdálenost je možné na antény připevnit plastové tyčky. Ty pomáhají s nastavením při kalibraci i při samotném měření.



Obr. 13: Kalibrace podle normy IEEE STD-299 a MIL-STD-285

(Převzato z: [10])

Dle údaje na displeji přijímací antény se nastaví kalibrační frekvence na vysílací anténě. Postupně prochází všechny 4 hodnoty a ukládá si hodnoty pole při kalibrační vzdálenosti. Na displeji se zobrazuje průběh kalibrace. Ve chvíli, kdy je dokončena kalibrace se může přejít k samotnému měření účinnosti stínění. Naměřené hodnoty jsou anténou automaticky přepočítávány na decibely. Útlum 0 dB je zobrazován při kalibrační vzdálenosti bez přítomnosti krytu. Po nastavení požadované frekvence na vysílací anténě, je umístěna do krytu. Umístění antény v krytu je nastaveno pomocí plastové tyčky, která má délku 30 cm, což odpovídá požadavku normy ČSN EN 61000-5-7 i požadavku normy IEEE-STD-299. Z druhé strany krytu se do stejné vzdálenosti umístí přijímací anténa. Na displeji přijímací antény je odečítána účinnosti stínění v decibelech a naměřené hodnoty se ukládají do paměti antény. Na každé měřené frekvenci je možné uložit až 63 hodnot. Pro nalezení nejnižší účinnosti lze využít funkci alarmu, kdy se do paměti uloží libovolná naměřená hodnota a následně se pohybuje anténou podél stěny krytu. Při naměření nižší úrovně SE než je uložená hodnota, anténa na to zvukovým signálem upozorní. Tato nová hodnota může nahradit původní a opět lze pokračovat v hledání místa s nejmenším útlumem. Následně se na vysílací i přijímací anténě přepne na další ze 4 frekvencí a měří se dle stejného postupu. Po proměření veškerých možných frekvencí, lze hodnoty z antény uložit do počítače přes RS-232 rozhraní pomocí softwaru dodávaného výrobcem. Anténa nesmí být vypnuta před stažením naměřených hodnot, hodnoty bychom tím vynulovali. Jestliže má kryt velkou tloušťku stěny je nutností počítat s tím, že se změní vzdálenost antén oproti kalibrační vzdálenosti. Se vzdáleností roste útlum, jehož závislost na vzdálenosti a materiálu je znázorněna v grafu pro frekvenci 1 MHz, viz obr. 14. Na ostatních frekvencích jsou průběhy podobné.



Obr. 14: Závislost útlumu na vzdálenosti antén a na materiálu okolí
(Převzato z: [10])

Při průmyslovém měření dochází k vlivu okolního elektromagnetického pozadí, kterým jsou ovlivňovány antény. Ty však neumožňují měření šumu, tak nelze vyhovět normě ČSN EN 61000-5-7, která toto měření požaduje. Výsledky tohoto měření by mohly být zkreslené. Zatímco při měření ve stíněné bezodrazové komoře to není problém. Zde by měl být vliv okolního elektromagnetického pozadí potlačen kalibrací, prováděnou před každým měřením. Měřicí rozsah je dán přímo výrobcem, který udává přesnost měření ± 2 dB.

Norma	10 kHz	Ostatní
NSA 65-6	120 dB	130 dB
IEEE STD-299	120 dB	130 dB
MIL STD-285	110 dB	120 dB

Tabulka 6: Měřicí rozsahy antén MF-130D na jednotlivých frekvencích (Zdroj: [11])

Výhody a nevýhody anténového setu MF-130D

Nevýhodou antén je možnost měření pouze na určeném počtu frekvencí. Tudíž podmínky měření jsou splněny pouze pro pásmo nízkých frekvencí z IEEE-STD-299. Dle původní normy z roku 2006 by pásmo měřených frekvencí zahrnovalo i rezonanční frekvence, ale z nového vydání normy z roku 2013 jsou rezonanční frekvence zcela vyřazeny. Proto měření zahrnuje pouze zmíněné pásmo nízkých frekvencí. Také není možné zaznamenat všechny jevy, které se mohou v krytu projevit. Dále není splněn požadavek normy ČSN EN 61000-5-7 na 1% frekvenční krok, tudíž nelze krytu přidělit žádný EM kód. Tyto proměřované kmitočty postihují převážně oblast rušení vznikající v průmyslovém prostředí. Nelze tedy otestovat kryt na signály vysílačů televizí a rádií, wi-fi sítí a mobilních telefonů. Jednou z dalších nevýhod je velikost antén. Anténa by totiž neměla zabírat více jak 90 % plochy nejmenší strany krytu a měla by být od měřené strany krytu

vzdálena 30 cm. Tudíž při měření krytu tvaru kvádra, by musely být rozměry kratších hran minimálně 55 cm. Mezi výhody patří snadné, levné a rychlé měření. Z tohoto důvodu jsou antény využívány již při vývoji zařízení pro rychlé orientační měření. V této fázi vývoje zařízení jsou změny v návrhu a konstrukci méně nákladné. Nejsou však vhodné pro finální otestování celkové stínicí účinnosti zařízení, díky malému frekvenčnímu rozsahu. [10]

1.4.5.3 Měření pomocí systému na měření elektromagnetické odolnosti

Zkoušené zařízení, při testování odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli, je vystavováno účinkům elektrického pole konstantní velikosti. To lze dosadit do vzorce pro účinnosti stínění (2) za E_t . Jedná se o pole, které dopadá na stěnu krytu. Pro výpočet účinnosti stínění je potřeba změřit velikost pole uvnitř krytu. Jelikož zkoušený kryt je menší než 2 m, musí být rozměrné měřicí antény nahrazeny jiným zařízením. Jiným zařízením je myšlena sonda elektrického pole HI-6005 od firmy ETS-Lindgren, která je podporována softwarem pro testování odolnosti. Je používána při kalibraci vysílaného pole a zprostředkovává měření elektrického pole.



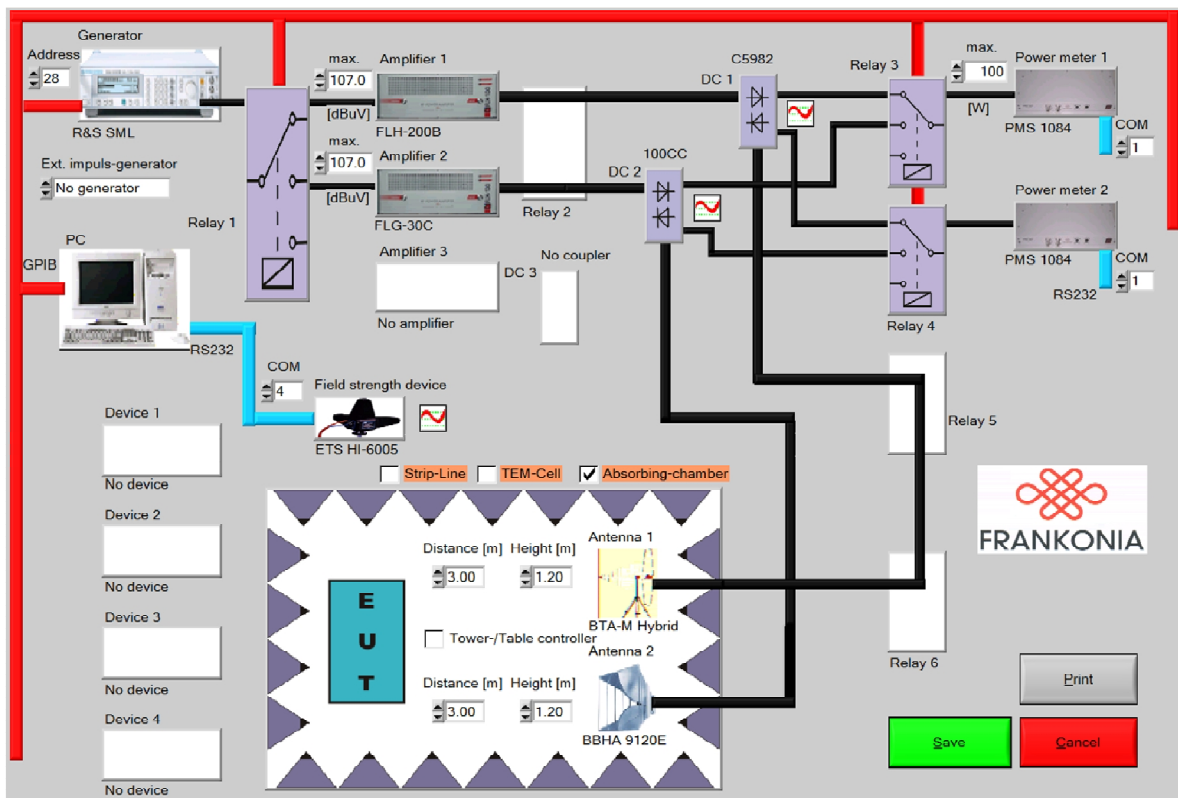
Obr. 15: Sonda elektrického pole HI-6005

Díky sondě a systému je možné splnit podmínky normy ČSN EN 61000-5-7 testování účinnosti stínění. Před samotným měřením se bez přítomnosti krytu pomocí sondy kalibruje systém, aby byla vysílaná požadovaná konstantní úroveň pole E_t . Následně se do zkoušeného krytu umístí sonda elektrického pole a změří se velikost pole E_i uvnitř krytu. Po dosazení do vzorce (2) zjistíme účinnost stínění. Na rozdíl od požadavků normy ČSN EN 61000-5-7, je účinnost počítána pouze z elektrického pole, ne z vyzařovaného a přijímaného výkonu. Opět nelze pomocí tohoto systému měřit šum, jelikož místo sondy by bylo do zkoušeného krytu umístěno stíněné zakončení kabelu a systém by bez sondy neukazoval žádné hodnoty. Úroveň šumu by neměla ovlivňovat měření, tudíž by měla být

dostatečně nízká a neměnná. Proto lze měření provádět pouze ve stíněné bezodrazové komoře, kde je sonda připojena optickým kabelem a všechna ovládací a měřicí zařízení jsou umístěna mimo zkušební prostor. [10]

Technické parametry systému

Systém pro testování odolnosti je zapojen dle schématu na obr. 16. Nastavení systému splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-5-7, kdy měření probíhá s 1% frekvenčním krokem. Toto nastavení bylo optimalizováno a nahrazeno konstantním frekvenčním krokem 2,5 MHz, viz kapitola 2.1 Postup měření. Tento postup je časově náročnější. Výhodou takto probíhajícího měření je jemnější krok měřených hodnot a větší názornost účinnosti stínění. Celý průběh je méně ovlivněn rezonančními frekvencemi. Které při původním měření „zastínily“ ostatní frekvence, ty pak nebyly tak výrazné jako při tomto měření.



Obr. 16: Schéma systému pro testování odolnosti [12]

Software Frankonia RF-LAB pro ovládání systému je umístěn v řídicím počítači. Ten s prvky systému komunikuje přes GPIB rozhraní. Softwarově se nastavují všechny potřebné parametry měření. Tedy frekvenční rozsah (maximálně od 80 MHz do 3 GHz), frekvenční krok (normou dán 1% krok), intenzita elektrického pole (většinou $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$), čas vysílání signálu na každé frekvenci, modulace signálu (pro testování odolnosti se používá 80% amplitudová modulace signálu s 1 kHz obálkou, při měření stínění modulaci

nepoužíváme). Počítač dle zadaných parametrů ovládá signální generátor R&S SML, ze kterého jde signál do spínacího pole, které přepíná mezi zesilovači. Používají se dva zesilovače, jelikož každý je schopen zesilovat v jiném frekvenčním rozsahu. První ze zesilovačů, zesilovač FLH-200B je pro signály od 80 MHz do 1 GHz a druhý zesilovač FLG-30C od 1 GHz do 3 GHz. Signál je ze zesilovače veden do měřiče výkonu PMS 1084 a přes stíněné průchodky kabelem do bezodrazové komory a do vysílacích antén BTA-M Hybrid nebo BBHA 9120E. Intenzita pole je měřena sondou pole ETS HI-6005, která zprostředkovává i zpětnou vazbu. Parametry vysílaného signálu jsou dány nastavením v ovládacím softwaru RF-LAB.

Frekvenční rozsah	9 kHz až 3.3 GHz
Rozlišení - nejnižší krok	0.1 Hz
Rozsah úrovní	- 140 dBm až 13 dBm
Rozlišení úrovně	0.1 dBm
Rychlost nastavení	< 10 ms
Vstupní impedance	50 Ω

Tabulka 7: Základní parametry R&S SML03 [13]



Obr. 17: Signálový generátor R&S SML03 [13]

Mezi zesilovači dle jejich frekvence je přepínán signál pomocí spínacího pole RSU (Relay Switching Unit) firmy Frankonia. Toto spínací pole se používá pro přepínání koncových zesilovačů, antén či výkonových měřicích přístrojů ve všech vysokofrekvenčních a EMC měřeních. Díky RSU je možné přepínat jeden vstup mezi dva až tři výstupy.

Frekvenční rozsah	do 40 GHz
VSWR	$\leq 1,14$
Vložný útlum	$\leq 0,1$ dB
Max. vstupní výkon	$\leq 0,44$ kW
Impedance	50 Ω
Spínací doba	≤ 60 ms
Počet operací	max. 10/min

Tabulka 8: Základní parametry RSU [14]

Zesilovače od firmy Frankonia jsou v systému použity pro zvyšování úrovně výstupního signálu z generátoru na požadovanou testovací úroveň. Při velkém frekvenčním rozsahu je požadován velký zisk zesilovačů, aniž by došlo k zarušení nebo zkreslení signálu.

Frekvenční rozsah	20 MHz - 1GHz
Max. výstupní výkon	200 W
Zisk	54 dB
Zvlnění	± 3 dB
Vstupní/výstupní impedance	50 Ω

Tabulka 9: Základní parametry zesilovače FLH 200B [15]

Frekvenční rozsah	1 GHz - 3 GHz
Max. výstupní výkon	30 W
Zisk	46 dB
Zvlnění	$\pm 1,5$ dB
Vstupní/výstupní impedance	50 Ω

Tabulka 10: Základní parametry zesilovače FLG 30C [16]

Výkon je měřen dvoukanalovým měřičem výkonu Frankonia PMS 1084. Ten měří výkon, který vychází ze zesilovače do antény i výkon odražený zpět do systému. Tyto hodnoty se ukládají do počítače.

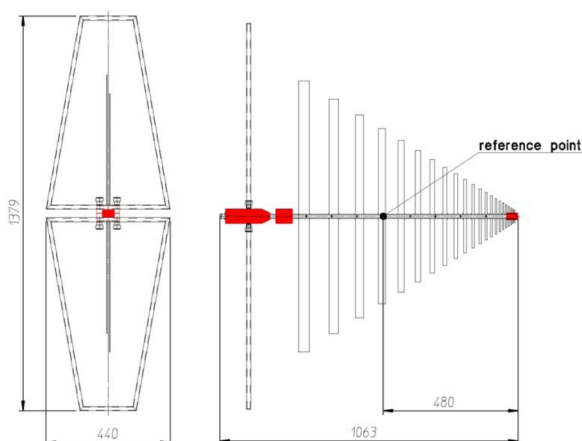
Frekvenční rozsah	100 kHz až 6 GHz
Měřicí rozsah	- 60 dBm až 20 dBm
VSWR	1,15
Vstupní impedance	50 Ω
Přesnost	± 1 dB (standardně 0,5 dB)
Rozlišení	0,1 dB

Tabulka 11: Základní parametry měřiče výkonu PMS 1084 [17]

V rámci měření jsou využívány dvě různé vysílací antény, jelikož každá je výhodnější pro jiné frekvenční pásmo. Kombinovaná širokopásmová bikónicko-logaritmická (bi-log) anténa Frankonia BTA-M je využívána pro pásmo do 1 GHz. Pro frekvence vyšší než 1 GHz se používá trychtýřová (horn) anténa BBHA 9120E od SchwarzbeckMessElektronik.

Frekvenční rozsah	30 MHz - 3 GHz
Impedance	50 Ω
Max. vstupní výkon	1000 W

Tabulka 12: Základní parametry antény BTA-M [18]



Obr. 18: Anténa BTA-M [18]

Frekvenční rozsah	0.5 - 6 GHz
VSWR	< 2
Impedance	50 Ω
Max. vstupní výkon	300 (500) W

Tabulka 13: Základní parametry antény BBHA 9120E [19]



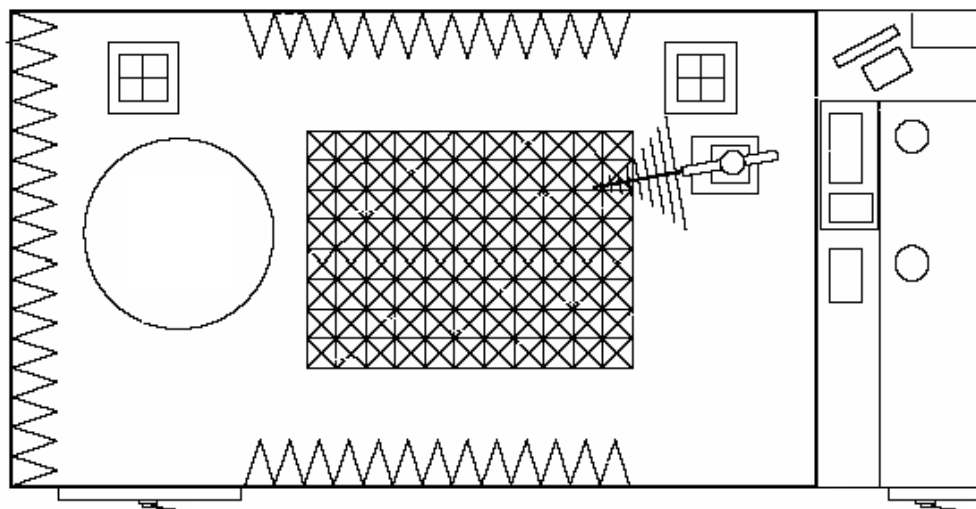
Obr. 19: Anténa BBHA 9120E [20]

Pro měření intenzit pole při kalibraci a testování stínění je využívána sonda elektrického pole HI-6005 od firmy ETS-Lindgren. V systému nahrazuje přijímací anténu, která je požadovaná normou ČSN EN 61000-5-7. U této sondy je výhodné její připojení pomocí optických vláken, díky kterým nemůže dojít k ovlivnění signálu, který je poslán do řídicího počítače. Výhodné jsou i malé rozměry sondy, lze tedy testovat stínění u menších krytů. Sonda umožňuje měření elektrického pole ve třech osách a výslednou intenzitu vyhodnotí jako vektorový součet měření.

Frekvenční rozsah	100 kHz až 6 GHz
Dynamický rozsah	0.5 až 800 $V.m^{-1}$
Rozlišení	0,01 $V.m^{-1}$
Přesnost	± 1 dB

Tabulka 14: Základní parametry sondy pole HI-6005 [21]

Bezodrazová komora, ve které probíhalo měření, byla postavena a vyrobena firmou Frankonia. Je dlouhá 8,84 m, široká 4,955 m a vysoká 5,75 m. Navržena je pro měření ve frekvenčním pásmu od 10 kHz do 18 GHz. Absorbéry, umístěné na všech stěnách, stropě a na podlaze mezi vysílací anténou a zkušebním polem, zajišťují homogenitu pole ve zkušebním prostoru komory, viz obr. 20.



Obr 20: Schematický náčrt bezodrazové stíněné komory s velínem [22]

Tyto absorbéry jsou vyrobeny buď z feritových destiček (typ Frankosorb F006) nebo kombinované feritové s pyramidovými (typ Frankosorb H450). Druhý typ je vyroben z tenké vodivé fólie nanesené na nosný polystyrénový materiál. Dle požadavků normy ČSN EN 61000-4-3 musí být homogenita pole pravidelně testována. [10]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Postup měření

Testování účinnosti stínění bylo provedeno na základě měřicí metody pomocí systému pro měření elektromagnetické odolnosti. Tento postup měření účinnosti byl na univerzitě testován. Cílem této diplomové práce bylo tento měřicí postup analyzovat a vylepšit. Účinnost stínění byla otestována na plechovém krytu, uvnitř kterého byla umístěna sonda elektrického pole HI-6005. Tento kryt má vnitřní rozměry 243 x 280 x 295 mm. Kryt byl upraven, aby bylo možné zachytit jevy ovlivňující účinnost stínění. Přední stěna krytu byla odstraněna a nahrazena různými plechy, které tam lze pomocí šroubů připevnit. Plechy jsou vyrobeny z hliníku a z mědi o tloušťkách 1 a 2 mm. Každý plech disponuje jiným druhem otvoru. Pro testování byly zvoleny dva druhy otvorů – kruh o poloměru 0,5 cm a podélná štěrbinu o délce 20 cm a šířce 0,5 cm. Plech s kruhovým otvorem byl z hliníku o tloušťce 2 mm a plech s podélnou štěrbinou byl z mědi o tloušťce 1 mm. Pro dokonalé vodivé spojení plechu s krytem, tak byla použita vodivá páska ze speciálního stínicího materiálu, která je umístěna mezi krytem a plechem. Z druhé strany přístrojového krytu je stíněný otvor pro průchod optických vláken sondy elektrického pole.

Frekvenční rozsah testování byl od 500 MHz do 2,5 GHz. Testování probíhalo s bi-log anténou a s trychtýřovou anténou. Pro celý frekvenční rozsah byla využita vždy jedna anténa. Což je změna oproti původnímu testování, kdy byla do 1 GHz použita bi-log anténa a nad 1 GHz trychtýřová anténa. Při kalibraci byla intenzita vysílaného elektrického pole pro oba druhy antén nastavena na $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ při vzdálenosti antén 3 m. V rámci testování účinnosti stínění byla pro zvětšení dynamického rozsahu měření provedena kalibrace na $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Měřicí vzdálenost však musela být snížena na 1 m, jelikož ze vzdálenosti 3 m nebylo možné nastavit intenzitu $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ pro celý frekvenční rozsah. Při testování objektu a následném porovnání výsledků, byl tento experiment taktéž využit. Doporučovaný 1% frekvenční krok byl nahrazen konstantním frekvenčním krokem 2,5 MHz. Důvodem této změny bylo vylepšení měřicího postupu. Kdy se díky této změně dosáhlo lepších výsledných hodnot. Zkušební signál byl na každém kroku vysílán po dobu 1 sekundy.

2.2 Vyhodnocení testování

Vyhodnocení je rozděleno do 3 částí. V první části bylo měřeno pomocí bi-log a trychtýřové antény při intenzitě elektrického pole $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. V druhé části se zařízení

testovalo trychtýřovou anténou při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Třetí část je zaměřena na rezonanční frekvence, které se nejlépe zachycují pomocí dutinového rezonátoru (uzavřený kovový kryt).

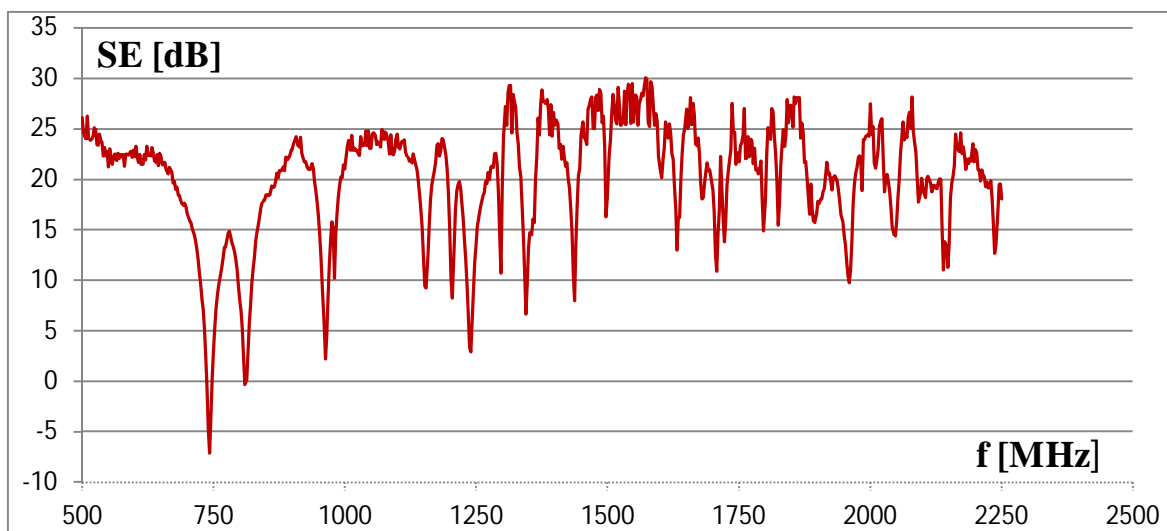
2.2.1 Testování při intenzitě elektrického pole $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$

V rámci prvního části měření byl využit plech s kruhovým otvorem o poloměru 0,5 cm a plech s úzkou podélnou štěrbinou o délce 20 cm a šířce 0,5 cm. Během vyhodnocování bylo důležité počítat se zhoršenou účinností stínění nad kritickými frekvencemi. Kritické frekvence pro otvory byly vypočteny dle vzorců (20) a (16)

$$\text{Kruh } 5 \text{ mm: } f_c = \frac{1,841 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{1,841 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 0,005} = 17,58 \text{ GHz}$$

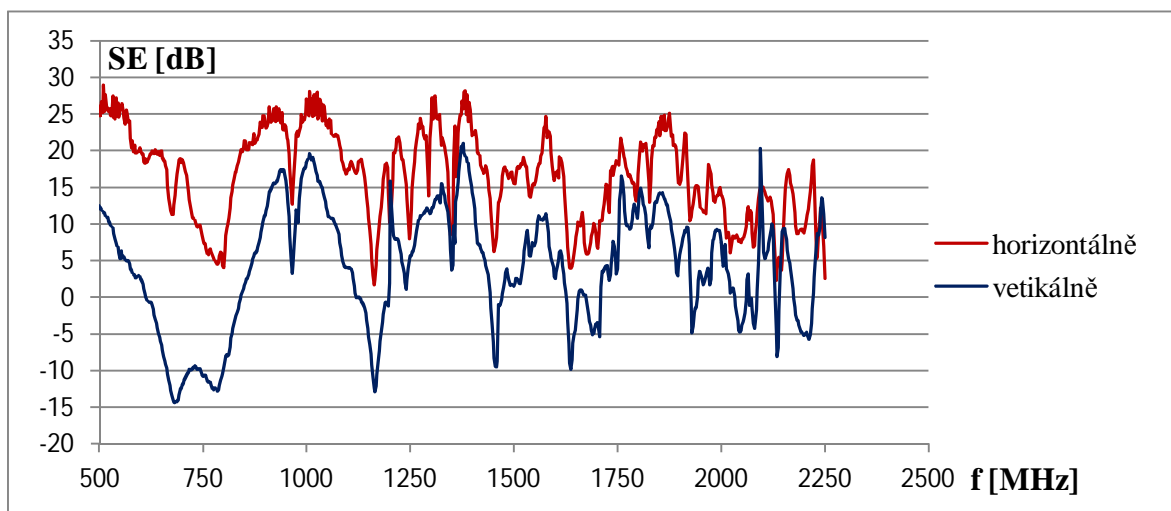
$$\text{Štěrba } 20 \text{ cm: } f_c = \frac{c}{2 \cdot l} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0,2} = 750 \text{ MHz}$$

Kritická frekvence kruhového otvoru je mnohem vyšší, než je rozsah měření. Otvor, u kterého by bylo možné dosáhnout kritické frekvence 2 GHz, by musel mít přibližně průměr 9 cm. Účinnost kruhového otvoru o poloměru 5 mm byla měřena horizontálně orientovanou bi-log anténou.



Obr 2.1: Účinnost stínění kruhového otvoru o poloměru 5 mm

Při měření úzké podélné štěrby byly využity obě antény. V prvním případě měření probíhalo pomocí bi-log antény, která byla horizontálně orientovaná. Změna během testování proběhla natočením testovaného krytu namísto změny orientace antény.



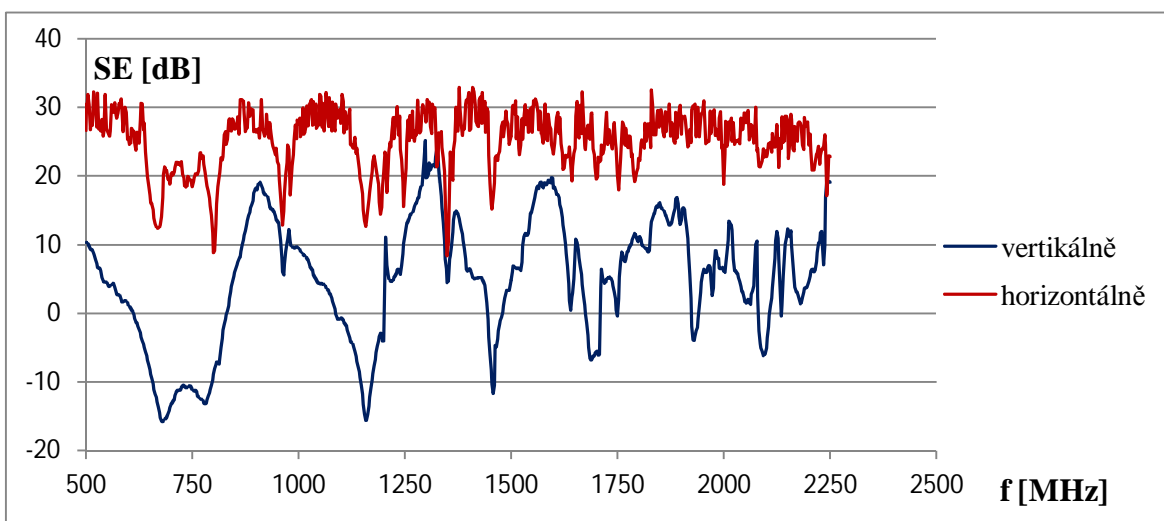
Obr. 2.2: Účinnost stínění podélné štěrby 20 cm orientované horizontálně a vertikálně

Z grafu na obrázku 2.2 je patrné, že při stejné orientaci antény a testovaného krytu účinnost stínění ani jednou nedosáhla hodnoty dostačující pro běžné požadavky. V tomto případě se pohybovala v mezích od 2 do téměř 30 dB. Kritická frekvence pro tuto štěrbinu je 750 MHz, kdy by nad ní mělo dojít ke zhoršení účinnosti. Z grafu na obrázku 2.2 je možné vypočítat postupné zhoršování účinnosti stínění čímž je potvrzen předchozí předpoklad. Účinnost stínění byla u horizontálně orientované antény a vertikálně orientované štěrby v mezích od -15 do 20 dB. Nejzápornějších hodnot účinnosti stínění bylo dosaženo ve frekvenčním pásmu od 600 MHz do 1200 MHz. A právě v okolí kritické frekvence došlo k nejvýraznějšímu zhoršení účinnosti stínění. V rozmezí od 850 MHz do 1000 MHz a od 1300 MHz do 1400 MHz bylo dosaženo až 20 dB, což by vyhovovalo pouze pro použití s minimálními požadavky.

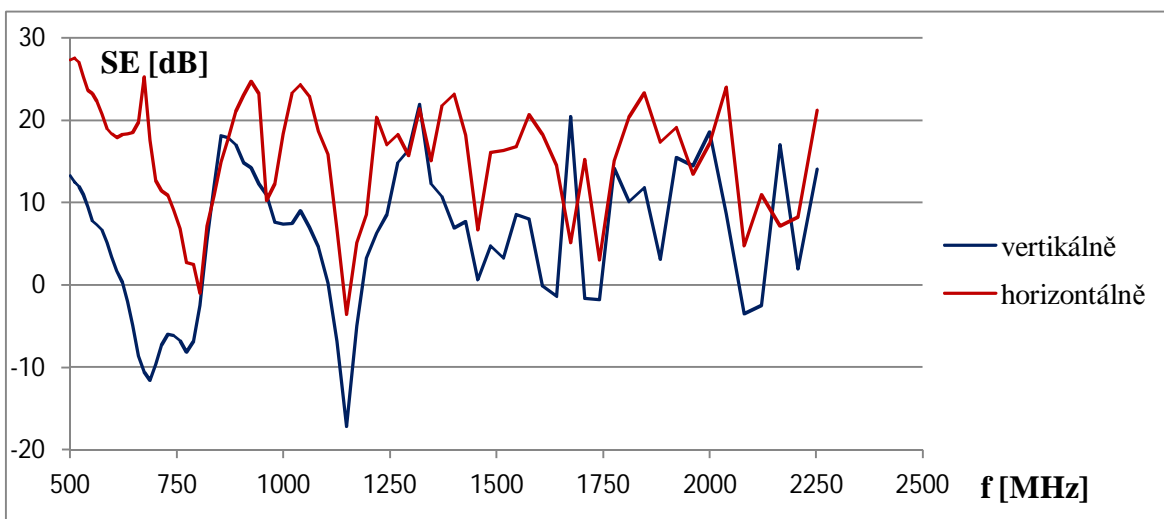
V druhém případě byla využita trychtýřová anténa, která byla též horizontálně orientovaná. Opět byl natáčen celý kryt namísto antény. V tomto případě již účinnost stínění přesahovala 30 dB, při stejné orientaci antény a štěrby. Při kritické frekvenci došlo k jedné ze špiček. Při horizontální orientaci antény a vertikální orientaci štěrby bylo opět dosaženo záporných hodnot. V okolí kritické frekvence 750 MHz došlo k podobnému zhoršení účinnosti stínění jako u měření bi-log anténou.

Pro porovnání byly použity i grafy z dizertační práce [10], se kterými byly porovnány průběhy naměřené v rámci této práce. V případě obr. 2.3 byl průběh měřen s konstantním krokem 2,5 MHz, zatímco u obr. 2.4 byl využit 1% frekvenční krok, díky tomu je průběh více vyhlazený. Důvodem je méně naměřených hodnot než v případě měření s konstantním krokem. Průběh při vertikální orientaci se víceméně shoduje. Shodného zhoršení účinnosti

stínění bylo dosaženo v okolí kritické frekvence 750 MHz a v okolí dalších rezonančních frekvencích, což bylo okolí 1250 MHz a 1500 MHz. Při horizontální orientaci se již průběh tolik neshodoval. Při měření s 1% frekvenčním krokem byla účinnost stínění poněkud horší. Výraznější byly i špičkové hodnoty frekvencí, při těchto frekvencích došlo k velkému zhoršení účinnosti stínění.

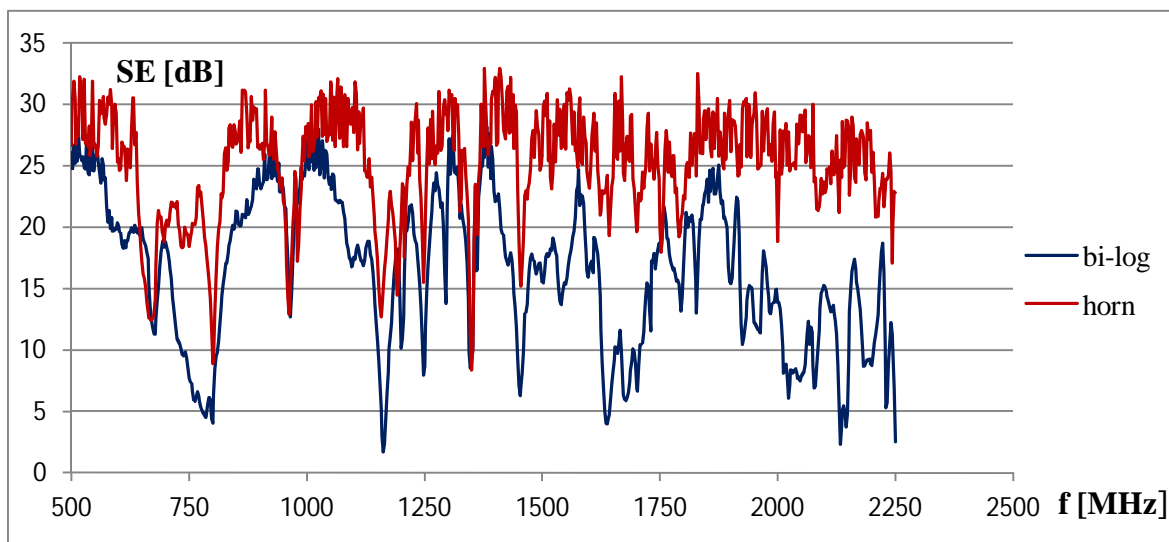


Obr. 2.3: Účinnost stínění podélné štěrby 20 cm orientované vertikálně a horizontálně



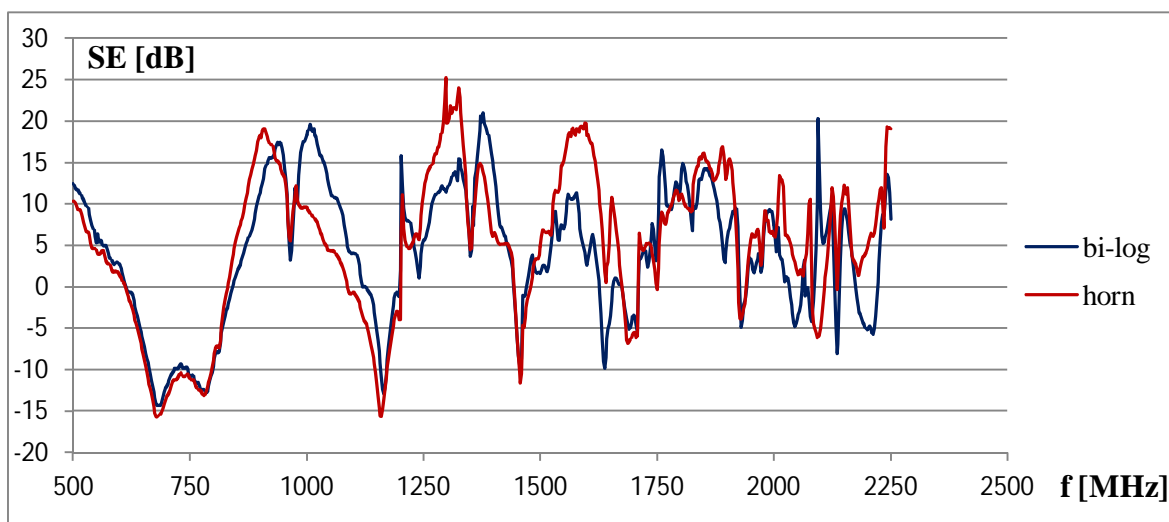
Obr. 2.4: Účinnost stínění podélné štěrby 20 cm (z dizertační práce)

K dalšímu porovnání byly využity hodnoty naměřené pro podélnou štěrbinu o délce 20 cm, která byla měřena dvěma druhy antén. První graf na obrázku 2.5 znázorňuje účinnost stínění v závislosti na frekvenci při testování pomocí antén bi-log a horn horizontálně orientovanými a štěrbinou též v horizontální poloze.



Obr. 2.5: Účinnost stínění podélné štěrby v horizontální poloze různými typy antén

Druhý graf na obrázku 2.6 znázorňuje účinnost stínění vertikálně orientované štěrby s působícími anténami bi-log a horn horizontálně orientovanými.

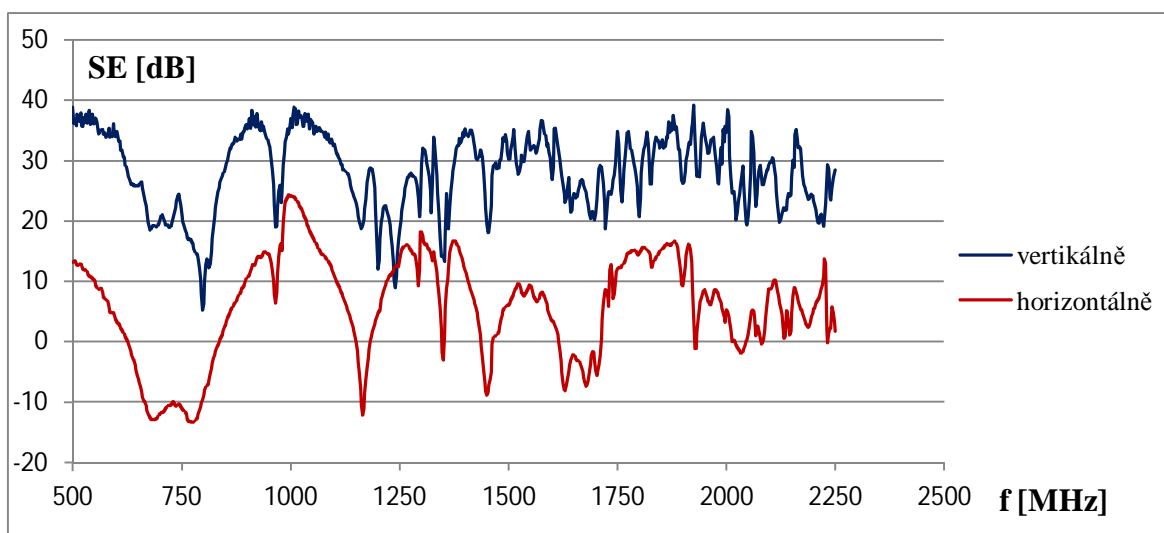


Obr. 2.6: Účinnost stínění podélné štěrby ve vertikální poloze různými typy antén

Průběhy účinnosti jednotlivých antén v grafu 2.4 jsou velmi rozdílné. V intervalu frekvencí od 1 GHz až po 1,3 GHz jsou průběhy podobné. U vyšších frekvencí je rozdíl účinnosti větší. Účinnost stínění při testování trychtýřovou (horn) anténou je mnohem vyšší. V grafu na obrázku 2.5 je možné vidět, že hodnoty naměřené rozdílnými anténami jsou si velmi podobné. Samozřejmě došlo k nějakým vychýlením, ale ta nebyla tak markantní jako v případě grafu na obrázku 2.4. Jak již bylo zmíněno, tak při měření s opačnou orientací antén a štěrby, nedosahuje účinnost ani zdaleka hodnot, které by byly přijatelné pro běžné požadavky na zařízení.

2.2.2 Testování při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$

Druhá část je zaměřena na testování účinnosti při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Vzdálenost testovaného krytu s podélnou štěrbinou o délce 20 cm byla 1 m od trychtýřové antény. Při kalibraci antény na hodnotu $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ byla zvolena tolerance od 40 do $42 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, aby nebyl problém s nalezením správného výkonu na generátoru. Anténa byla bohužel kalibrována ve vertikální poloze, tudíž není možné správně porovnat hodnoty naměřené pro intenzitu $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Jelikož by byly porovnávány hodnoty s různou orientací antén. K porovnání byly použity pouze naměřené hodnoty pro různou orientaci podélné štěrbiny vůči anténě. Opět zde byl problém ve chvíli, kdy byla anténa orientovaná vertikálně a štěrbina byla v horizontální poloze. V grafu 2.6 je znázorněna účinnost stínění, která vykazovala záporné hodnoty hned při kritické frekvenci 750 MHz a následně při vyšších frekvencích. Pouze v okolí 1000 MHz dosahovala účinnosti stínění dostačující pro běžné požadavky.



Obr. 2.7: Účinnost stínění podélné štěrbiny při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$

Při stejné orientaci antény a štěrbiny byla účinnost stínění v téměř celém měřeném pásmu frekvencí dostačující pro běžné požadavky. K větším výkyvům účinnosti došlo v okolí kritické frekvence 750 MHz, 1000 MHz a 1250 MHz.

Měření při intenzitě $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ bylo využito pro zvýšení dynamického rozsahu. Výrobce sice udává měřicí rozsah sondy $0,5 - 800 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ s citlivostí $0,01 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Na datech z testování je však vidět, že sonda měří i hodnoty nižší než je udávaný rozsah. Pokud bychom uvažovali hodnotu $0,01 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ jako nejnižší měřitelnou, tak při vyzařované intenzitě $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ je dynamický rozsah 60 dB. Zvýšením vyzařované intenzity na $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ se dynamický

rozsah zvýší na 72 dB. Pokud bychom chtěli dosáhnout rozsahu 100 dB, musela by být vyzařovaná intenzita $800 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, což není při metodě ozařování anténou reálné.

Příklad výpočtu:

$$SE = 20 \cdot \log \cdot \left| \frac{E_t}{E_i} \right| = 20 \cdot \log \cdot \left| \frac{800}{0,01} \right| \cong 100 \text{ dB}$$

2.2.3 Měření rezonančních frekvencí

Třetí měření je zaměřeno na měření rezonančních frekvencí. Pro účely měření rezonančních frekvencí byl využit kryt ve tvaru krychle o stranně $a = 25 \text{ cm}$. U tohoto krytu bylo možné jednu stranu roztáhnout až na 45 cm. Uvnitř krytu byla umístěna sonda elektrického pole. Tento uzavřený kovový kryt může působit jako dutinový rezonátor. Skrze stěny nebo otvory (netěsnosti) se dovnitř dostanou elektromagnetické vlny, které se na vnitřních stěnách krytu odrážejí. Při rezonančních frekvencích dochází ke sčítání vlnění ve vnitřním prostoru krytu. [23]

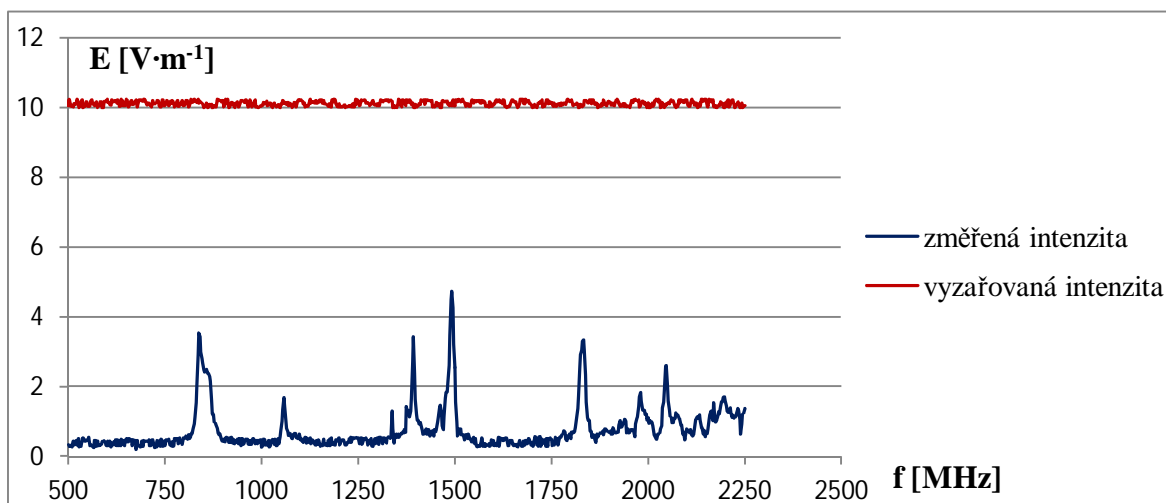
Vztah pro výpočet rezonančních frekvencí:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (22)$$

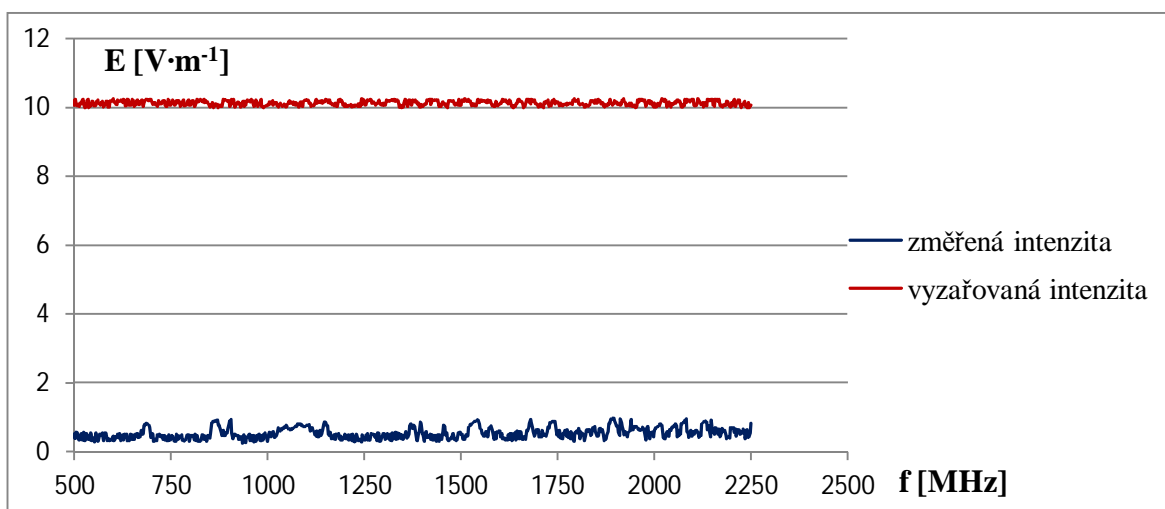
Celá nezáporná čísla se dosazují za vidy vlnění m , n , p a za a , b , c vnitřní rozměry krytu v metrech. Při rezonanční frekvenci je intenzita pole uvnitř krytu několikanásobně vyšší než intenzita vně krytu. Nemělo by se tedy umísťovat do krytu zařízení, které je citlivé nebo pracuje na rezonanční frekvenci či na jejích násobcích. Resonanční frekvence je možné zaznamenat při měření účinnosti stínění celokovového krytu, případně je možné je spočítat ze vzorce (22). V tabulce 2.1 jsou uvedeny rezonanční frekvence u krytů 25 a 45 cm, spočítané na základě různých kombinací hodnot vidů vlnění a pro porovnání i naměřené hodnoty rezonančních frekvencí. Důvodem vynechané řádky pro vidy 0,2,2 u krytu 25 cm je nenaměření odpovídající rezonanční frekvence. Pro kryt 45 cm bylo vypočteno více rezonančních frekvencí, což je způsobeno tvarem krytu, který byl ve tvaru kvádru. Vypočtené rezonanční frekvence pro menší kryt je možné vidět i na obrázku 2.8, kde jsou zobrazeny naměřené rezonanční frekvence při vyzařované elektrické intenzitě $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Pro větší kryt jsou rezonanční frekvence zobrazeny na obrázku 2.9. Zde nejsou tak výrazné rezonanční frekvence, jelikož intenzita nedosahovala tak vysokých hodnot.

kryt 25 cm		kryt 45 cm		vidy vlnění		
frekvence [MHz]		frekvence [MHz]				
naměřená	vypočtená	naměřená	vypočtená	m	n	p
837,5	848,36	685	686,24	1	0	1
-	-	870,00	848,36	0	1	1
1 057,50	1 039,02	905,00	911,47	1	1	1
1 392,50	1 341,37	1147,5	1 245,18	1	0	2
-	-	1 370,00	1 341,37	0	1	2
1 492,50	1 469,40	1 395,00	1 382,15	1	1	2
1 832,50	1 799,64	1455	1 497,84	2	1	2
-	-	1680	1 696,71	0	2	2
-	-	1740	1 729,13	1	2	2
2 047,50	2 078,04	1895	1 822,94	2	2	2

Tabulka 2.1: Naměřené a vypočítané hodnoty rezonančních frekvencí



Obr. 2.8: Změřená a vyzařovaná intenzita elektrického pole uzavřeného kovového krytu pro rozměr 25 cm



Obr. 2.9: Změřená a vyzařovaná intenzita elektrického pole uzavřeného kovového krytu pro rozměr 45 cm

ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo navrhnout a realizovat experiment, který otestuje různé faktory ovlivňující účinnost stínění. V teoretické části jsou popsány příčiny vzniku elektromagnetických rušivých signálů a způsoby jejich šíření. Způsoby šíření závisí na elektromagnetickém vazebním prostředí neboli na způsobu vazby mezi zdrojem a přijímačem rušení. Dále je v teoretické části popsáno elektromagnetické stínění. Jsou zde diskutovány základní pojmy a charakteristiky elektromagnetického stínění. Důležitými faktory ve značné míře ovlivňující účinnost stínění jsou různé otvory a netěsnosti. Aby nedocházelo k takovému ovlivnění, tak se kryty konstrukčně vylepší pomocí vzájemného dlouhého překrytí spojovaných částí nebo se použijí elastické vodivé materiály. Na pohyblivých částech (dveře, často otevírané přístupy do krytů) se používají pružinové nožové kontakty. Poslední důležitou částí teorie jsou metody měření účinnosti stínění. V rámci této práce byla využita metoda měření pomocí systému na měření elektromagnetické odolnosti, při splnění podmínek dané normou ČSN EN 61000-5-7. Oproti původním podmínkám daných normou, kdy měření probíhalo s 1% frekvenčním krokem, bylo měření vylepšeno o měření s konstantním frekvenčním krokem 2,5 MHz. Zlepšení bylo znát v průběhu účinnosti stínění, jelikož bylo naměřeno více hodnot a tudíž nebyly hodnoty jednotlivých frekvencí zkreslovány rezonančními frekvencemi. Dalším vylepšením metody bylo měření celého průběhu pouze jednou anténou místo původních dvou, kdy byla použita bikónicko-logaritmická anténa pro frekvence do 1000 MHz a pro frekvence nad 1000 MHz trychtýřová anténa. Díky tomu bylo měření plynulejší a nedocházelo ke schodům v hodnotách, které je možné nalézt v některých průbězích dizertační práce (viz seznam literatury [10]).

První měření bylo zaměřeno na testování při intenzitě elektrického pole $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Měření byl kruhový otvor o poloměru 5 mm a podélná štěrbina o délce 20 cm a šířce 0,5 cm. Účinnost stínění kruhového otvoru měla rostoucí charakter. Nejhorší účinnost stínění byla zaznamenána v okolí 750 MHz. Obecně bylo měření více zaměřeno na účinnost stínění podélné štěrby. Kde byly navzájem porovnávány účinnosti stínění u podélné štěrby v horizontální a vertikální poloze při měření bikónicko-logaritmickou anténou nebo trychtýřovou anténou. Následně byla účinnost stínění porovnána i mezi měřeními bikónicko-logaritmickou a trychtýřovou anténou, při stejné orientaci podélné štěrby. Výrazně horší účinnost byla vyhodnocena v případě, kdy byla orientace antény kolmo k orientaci štěrby. Zde vůbec nezáleželo na typu antény, v obou případech dosahovala

účinnost stínění záporných hodnot. Jednalo se především o frekvence v okolí kritické frekvence 750 MHz, dále v okolí frekvencí 1100 MHz a 1400 MHz. Ačkoliv při stejné orientaci antény i štěrbinu nebyla účinnost stínění vysoká, tak dosahovala mnohem lepších hodnot než v předchozím případě, konkrétně až 30 dB.

Druhé testování probíhalo při intenzitě elektrického pole $40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, kvůli zvýšení dynamického rozsahu měřicí metody. Zde opět došlo k výraznému zhoršení účinnosti stínění při orientaci antény kolmo k orientaci podélné štěrbinu. Z tohoto hlediska velmi záleží na orientaci antény a daného otvoru, který zhoršuje účinnost stínění. Pro další zvýšení dynamického rozsahu a zlepšení měřicí metody bych místo dalšího zvyšování intenzity navrhovala nahradit sondu pole citlivějším zařízením.

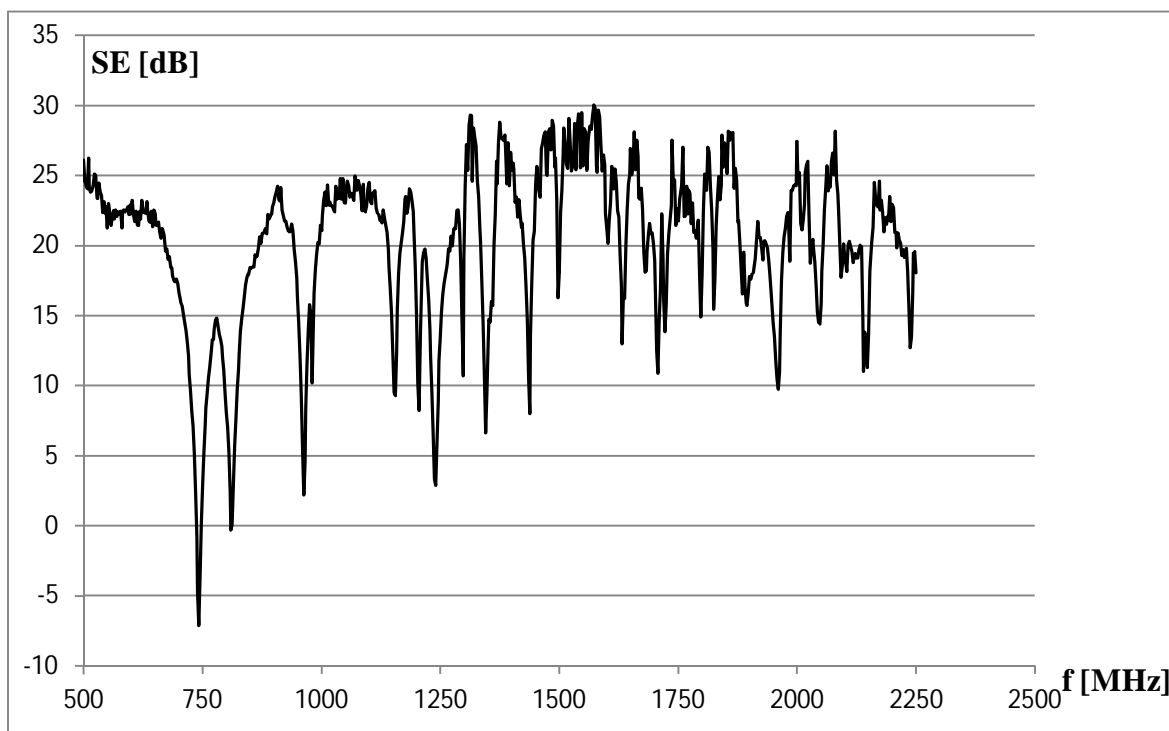
Posledním typem měření bylo měření rezonančních frekvencí pomocí uzavřeného kovového krytu. Zde byly porovnány hodnoty naměřených a vypočtených rezonančních frekvencí pro kryt o velikosti 25 cm a pro kryt o velikosti 45 cm. Mezi porovnávanými hodnotami naměřených a vypočtených hodnot byly minimální rozdíly. Pro kryt 25 cm křehlového tvaru se některé vypočtené hodnoty opakovaly. Pro kryt 45 cm z důvodu rozdílných rozměrů existuje více rezonančních frekvencí. Vše je zaznamenáno v tabulce 2.1. V průběhu naměřené intenzity elektrického pole u krytu 45 cm nebyly tyto frekvence tak výrazné, jelikož hodnoty naměřené intenzity byly nízké.

Seznam literatury a informačních zdrojů

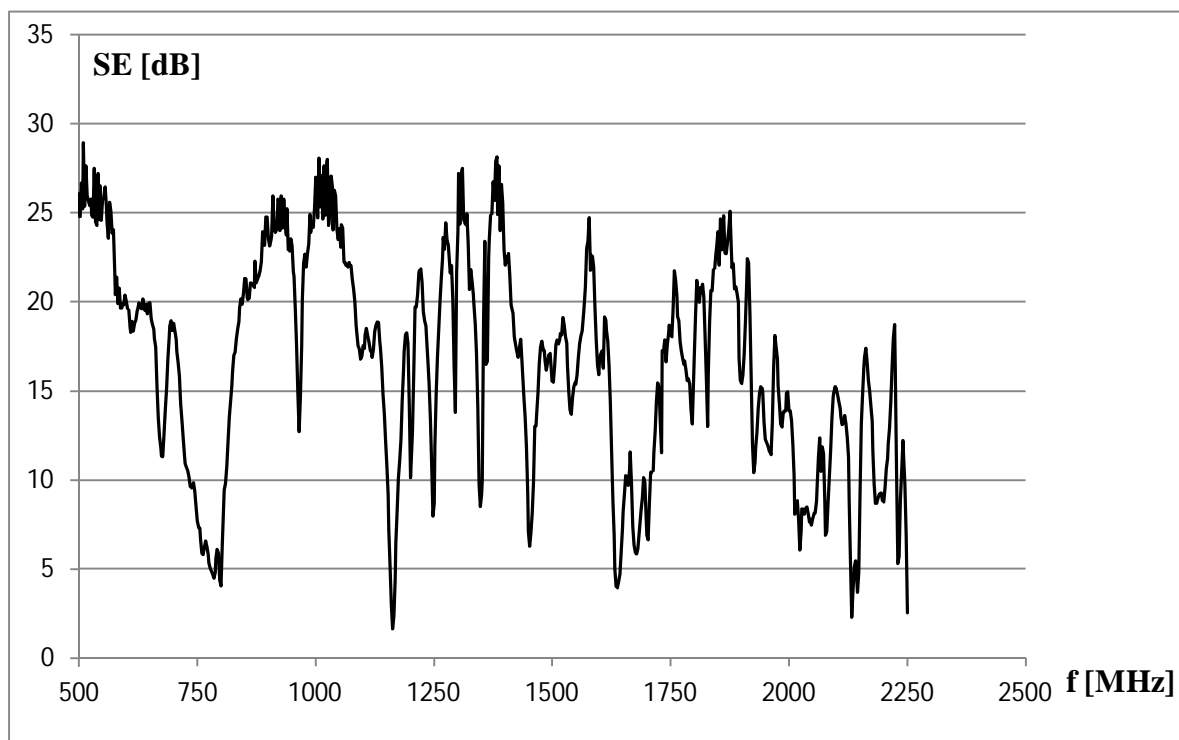
- [1] SVAČINA, Jiří. Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. Brno: Vysoké učení technické.
- [2] ENCYKLOPEDIE EMC. Emc. *Radio.feec.vutbr.cz* [online]. 2009- [cit. 2014-12-10]. Dostupné z:<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node7>
- [3] KOVÁČ, D., KOVÁČOVÁ, I. a KAŇUCH, J. EMC z hlediska teorie a aplikace. Praha 2006: BEN Technická literatura, ISBN 80-7300-202-7
- [4] ZÁKLADY EMC. *Elektrorevue.cz* [online]. 2000- [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00031/index.html>
- [5] PAUL, R. CLAYTON Introduction to electromagnetic compatibility. John Wiley & Sons Ltd, USA, 2006. ISBN 978-0-471-75500-5
- [6] MIL-STD-285 - Military Standard Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes, Method of. United States Government Printing Office, Washington, USA, 1956
- [7] IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m. New York, USA, 2013
- [8] ASTM D4935 - Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. ASTM International, West Conshohocken. PA, 2010. DOI: 10.1520/D4935-99, Dostupné z: www.astm.org
- [9] ČSN EN 61000-5-7 - Elektromagnetická kompatibilita: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů – Stupně ochrany kryty proti elektromagnetickým rušením (EM kód). Praha: Český normalizační institut, prosinec 2001
- [10] ING. HROMÁDKA, Miroslav. Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů. V Plzni, 2012. Disertační. ZČU. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.
- [11] ETS-Lindgren: Operational manual (Model MF-130D Attenuation Meter), 2009
- [12] Frankonia GmbH: Frankonia RF Lab – měřicí software
- [13] Rohde & Schwarz: Signal Generator SML. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/sml-productstartpage_63493-7567.html
- [14] Frankonia GmbH: RF Relay-Switching-Unit – RSU. [cit. 2015-03-14]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RFRelay%20SSwitchin%20Unit.pdf

- [15] Frankonia GmbH: Frankonia Broadband RF-Power-Amplifiers. [cit. 2015-03-16].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/CatCatalog/Amplifiers/20MHz_1000MHz.pdf
- [16] Frankonia GmbH: Frankonia Broadband RF-Power-Amplifiers. [cit. 2015-03-16].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Amplifiers/1GHz_3GHz.pdf
- [17] Frankonia GmbH: Frankonia Multi-Channel RF-Power-Meter. [cit. 2015-03-20].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RFPower%20Meter.pdf
- [18] Enelec: Frankonia Catalog – bikónicko-logaritmická (bi-log) anténa Frankonia BTA-M. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z:
http://enelec.es/web/pdfs/castellano/FRANKONIA_Catalogo_instrumentos_y_componentes.pdf
- [19] Schwarzbeck - Mess Elektronik e.K.: Calibrated Double Ridged Broadband Horn Antenna BBHA 9120 E. [cit. 2015-04-05].
Dostupné z: <http://schwarzbeck.de/Datenblatt/p9120e.pdf>
- [20] Schwarzbeck - Mess Elektronik e.K.: Calibrated Double Ridged Broadband Horn Antenna BBHA 9120 E. [cit. 2015-04-05].
Dostupné z: <http://schwarzbeck.de/en/antennas/broadband-horn-antennas/double-ridged-horn-antenna.html#BBHA9120E>
- [21] ETS Lindgren: HI-6005 Electric Field Probe. [cit. 2015-04-07]. Dostupné z:
<<http://www.ets-lindgren.com/pdf/HI-6005.pdf>>
- [22] ŠLIK, Ondřej. EMC parametry rozvaděče pro řízení a chránění v energetice. Plzeň 2009. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická
- [23] CHATTERTON, Paul A., HOULDEN, Michael A., EMC: Electromagnetic Theory to Practical Design. Chichester 1992. John Wiley & Sons Ltd, ISBN 0-471-92878-X

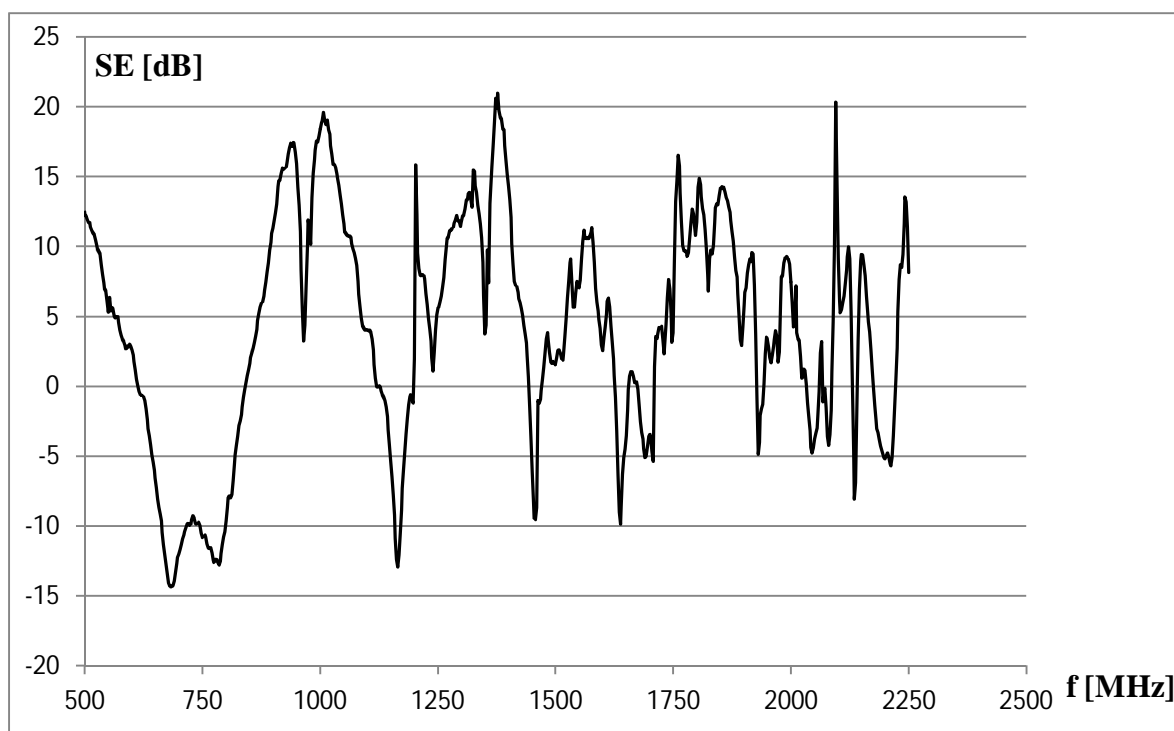
PŘÍLOHA A – Výsledky měření



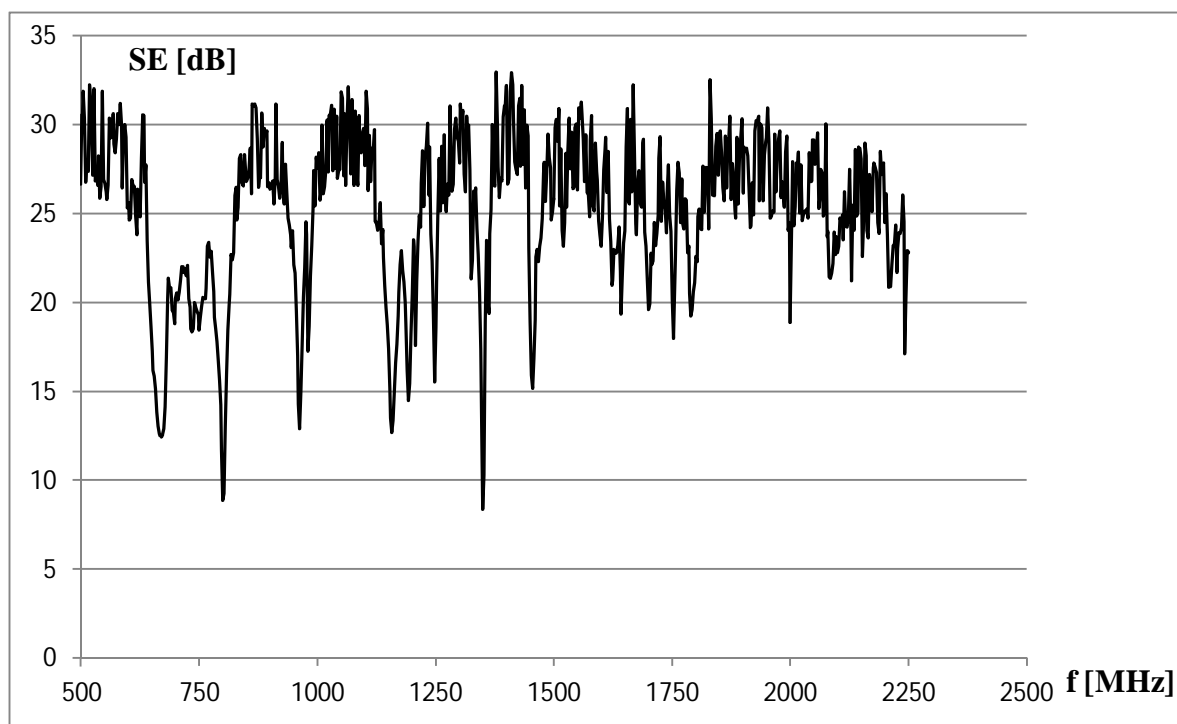
Obr. A.1 Účinnost stínění hliníkové desky s kruhovým otvorem (\varnothing 10 mm), bi-log anténa (horizontálně), $E = 10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



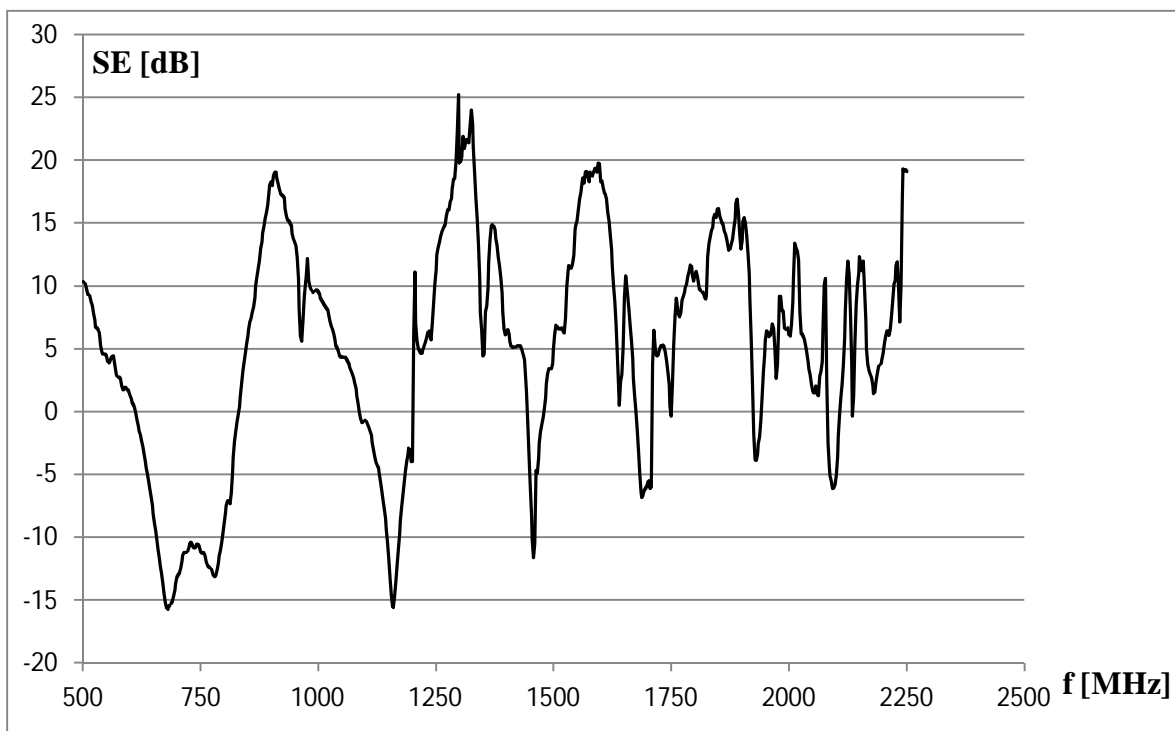
Obr. A.2 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l = 20 \text{ cm}$, horizontálně), bi-log anténa (horizontálně), $E = 10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



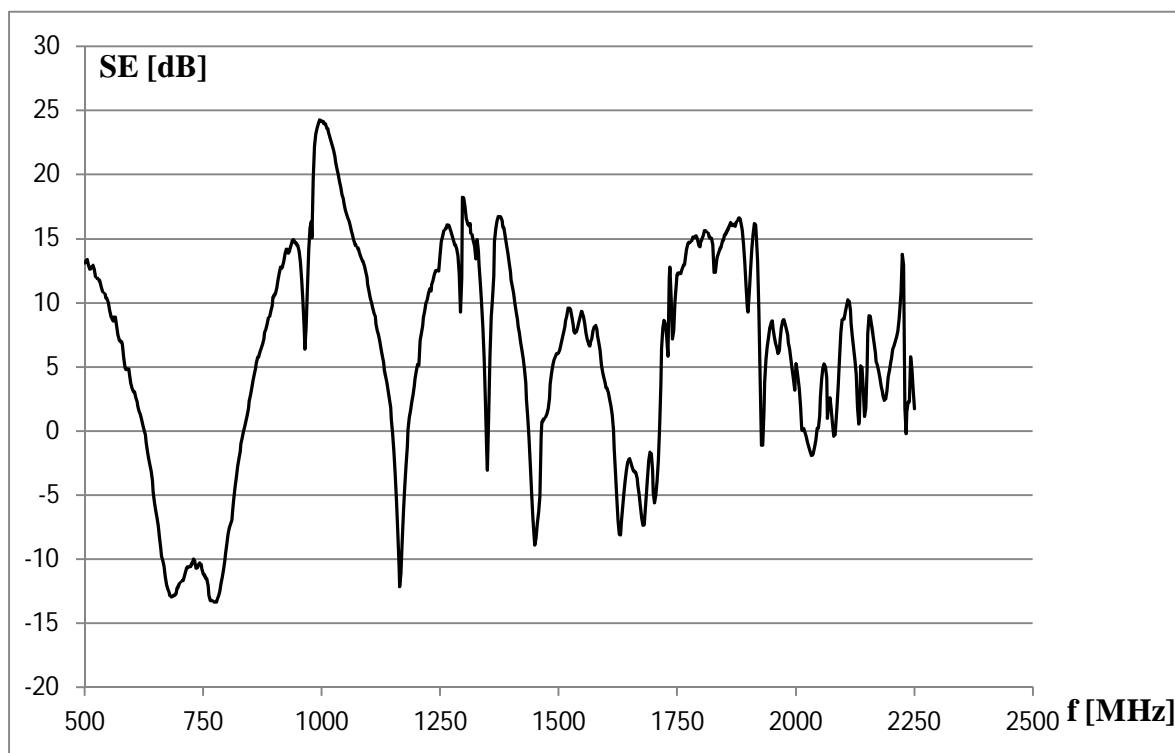
Obr. A.3 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l=20$ cm, vertikálně), bi-log anténa (horizontálně), $E = 10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



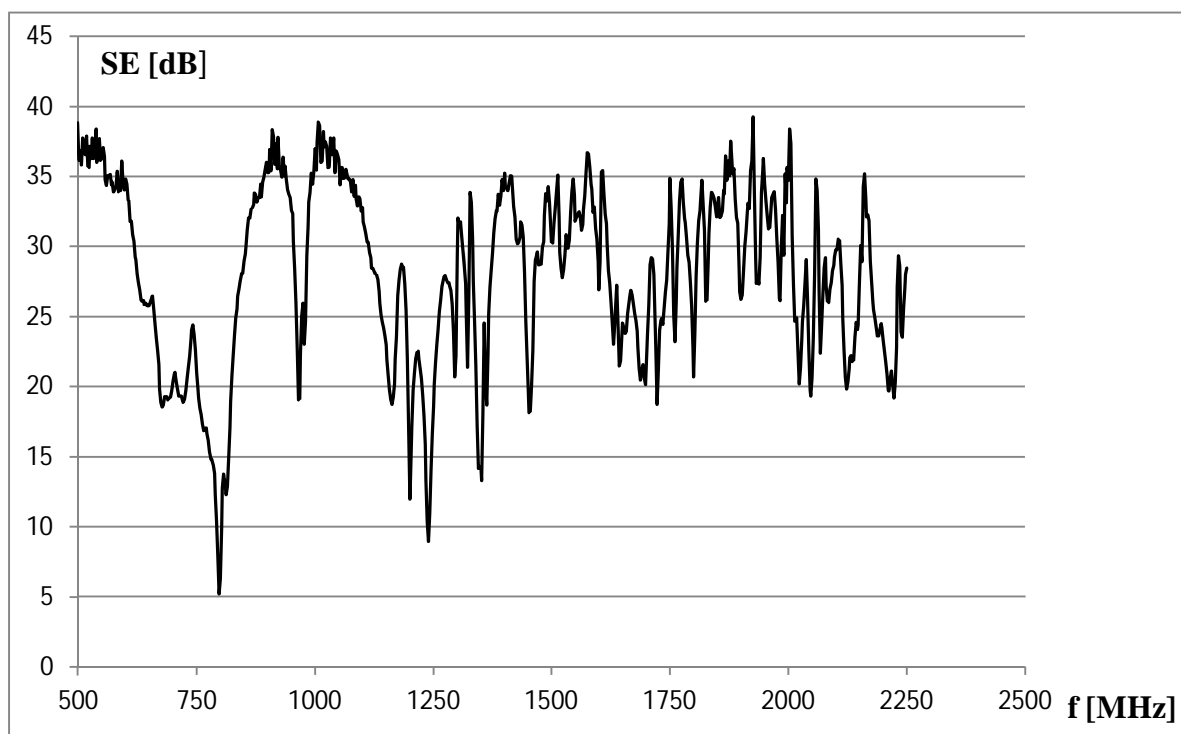
Obr. A.4 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l=20$ cm, horizontálně), trychtýřová anténa (horizontálně), $E = 10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



Obr. A.5 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l=20\text{cm}$, vertikálně), trychtýřová anténa (horizontálně), $E = 10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



Obr. A.6 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l=20 \text{ cm}$, horizontálně), trychtýřová anténa (horizontálně), $E = 40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$



Obr. A.7 Účinnost stínění měděné desky se štěrbinou ($l=20$ cm, vertikálně), trychtýřová anténa (horizontálně), $E = 40 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$