

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Měření elektromagnetických emisí

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2016/2017**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin LEVKO**

Osobní číslo: **E14B0034P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Měření elektromagnetických emisí**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište způsoby šíření elektromagnetického rušení.
2. Zpracujte postupy pro měření elektromagnetických emisí.
3. Změřte vyzařované emise vybraného zařízení v závislosti na výšce přijímací antény.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility.**
2. **ČSN EN 55022.**


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

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektromagnetické kompatibility. Čtenář je nejprve seznámen s pojmem elektromagnetická kompatibilita. Dále jsou v této práci uvedeny způsoby šíření elektromagnetického rušení. Následuje popis měřicích přístrojů a měřicích stanovišť používaných pro měření elektromagnetických emisí, včetně samotného postupu měření. Závěr práce je věnován uskutečněnému laboratornímu měření rušivého pole v bezodrazové komoře, jehož cílem je určit vliv měřicího stanoviště na hodnoty anténou zjištěného rušení, především v důsledku odrazu vln od zemní roviny.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická emise, šíření rušení, měřicí přístroj, anténa, bezodrazová komora, odraz vlny.

Abstract

The bachelor thesis presents issue of the electromagnetic compatibility. Reader is introduced to the idea of the electromagnetic compatibility first followed by description of the interference coupling mechanisms. Next part of the thesis presents measuring instruments and the measuring sites used for electromagnetic emission measurement including test methods. The finish part is dedicated to realized laboratory measurement of the electromagnetic field. This measurement takes part in the anechoic chamber. Its goal is to determine the influence of the test site setting on the measured data gained by antenna while the most relevant is expectend the wave reflection.

Key words

Electromagnetic compatibility, electromagnetic emission, interference coupling, measuring instrument, antenna, anechoic chamber, wave reflection.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

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

.....
podpis

V Plzni dne 7.6.2017

Martin Levko

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavovi Hromádkovi, Ph.D. za cenné odborné rady, připomínky a čas věnovaný vedení této práce.

Dále bych rád poděkoval rodině za dlouhodobou podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	12
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	12
1.2 STRUKTURA EMC	12
1.3 ZÁKLADNÍ POJMY EMC	13
2 ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ	14
2.1 GALVANICKÁ VAZBA	15
2.1.1 Vazba společnou impedancí napájecí sítě	15
2.1.2 Vazba společnou impedancí mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení.....	16
2.1.3 Vazba společnou impedancí zpětného vodiče.....	17
2.1.4 Vazba společnou impedancí zemnicí elektrody.....	17
2.1.5 Vazba zemní smyčkou	18
2.1.6 Způsoby potlačení galvanické vazby.....	19
2.2 KAPACITNÍ VAZBA	21
2.2.1 Vazba galvanicky oddělených obvodů	21
2.2.2 Vazba mezi obvody se společným vztažným vodičem.....	23
2.2.3 Vazba vůči zemi	24
2.3 INDUKTIVNÍ VAZBA	24
2.4 VAZBA ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM	26
3 MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH EMISÍ	27
3.1 MĚŘICÍ PŘIJÍMAČE.....	29
3.2 MĚŘICÍ SNÍMAČE.....	34
3.2.1 Sonda blízkého pole.....	34
3.2.2 Antény.....	35
3.3 MĚŘICÍ STANOVISŤE PRO ANTÉNNÍ MĚŘENÍ.....	41
3.3.1 Měření ve volném prostoru.....	41
3.3.2 Měření v elektromagneticky stíněném prostoru.....	44
3.3.3 Měření v bezodrazové stíněné komoře.....	46
4 LABORATORNÍ MĚŘENÍ	48
4.1 TEORETICKÝ ÚVOD.....	48
4.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	52
4.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ	55
ZÁVĚR	64
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	66
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na proces měření vyzařovaných elektromagnetických emisí elektrickými zařízeními.

Text je rozdělen do čtyř částí. První je věnována uvedení do problematiky elektromagnetické kompatibility, ve druhé části jsou rozvedeny způsoby šíření elektromagnetického rušení, ve třetí části je uvedena teorie o měření elektromagnetických emisí a čtvrtá část obsahuje zpracování laboratorního měření vyzařovaných emisí vybraného zařízení.

Seznam symbolů a zkratek

Seznam fyzikálních veličin

f	.....	frekvence [Hz]
U	.....	napětí [V]
U_p	.....	vrcholová hodnota napětí [V]
U_{QP}	.....	kvazivrcholová hodnota napětí [V]
U_{AV}	.....	střední hodnota napětí [V]
U_r	.....	rušivé napětí [V]
U_Z	.....	náhodné zemní napětí [V]
I	.....	proud [A]
I_r	.....	rušivý proud [A]
R	.....	odpor [Ω]
R_V	.....	odpor vysílače rušení [Ω]
R_P	.....	odpor přijímače rušení [Ω]
L	.....	indukčnost [H]
M	.....	vzájemná indukčnost [H]
C	.....	kapacita [F]
\vec{E}	.....	vektor intenzity elektrického pole [V/m]
\vec{H}	.....	vektor intenzity magnetického pole [A/m]
E_r	.....	velikost intenzity elektrického rušivého pole [V/m]
H_r	.....	velikost intenzity magnetického rušivého pole [A/m]
E_x	.....	velikost intenzity elektrického pole ve vzdálenosti od zdroje [V/m]
l	.....	délka vodiče [m]
l_{ef}	.....	efektivní délka antény [m]
t	.....	čas [s]
Z	.....	impedance [Ω]
Z_O	.....	impedance společného zpětného vodiče [Ω]
Z_Z	.....	impedance společného zemniče [Ω]
Z_S	.....	společná impedance sítě [Ω]

Z_V	impedance vysílače rušení [Ω]
Z_P	impedance přijímače rušení [Ω]
a	hranice blízkého pole [m]
r	vzdálenost od vodiče [m]
Φ	magnetický tok [Wb]
B	velikost magnetické indukce [T]
μ_0	permeabilita vakua [1/H]
S	plocha smyčky [m ²]
λ	vlnová délka [m]
x	vzdálenost antény od zdroje rušení [m]
AF	anténní faktor [1/m]
P	výkon [W]
P_o	výkon odražené vlny [W]
P_p	výkon přímé vlny [W]
P_r	rušivý výkon [W]
p_r	hustota rušivého výkonu [W/m ³]
N	velikost poyntingova vektoru [W/m ²]
A	útlum kabelu [dB]
AH	útlum atenuátoru [dB]
R	rozměr měřicího stanoviště [m]
SA	útlum měřicího stanoviště [dB]
ϵ	permitivita [F/m]
$tg\delta$	ztrátový činitel [-]
RL	útlum odrazu [dB]
L	absolutní výkonová úroveň [dBm]
h	výška přijímací antény [m]
RBW	šířka pásma [Hz]

Seznam zkratk

EMC	elektromagnetická kompatibilita (electromagnetic compatibility)
EMI.....	elektromagnetické rušení (electromagnetic interference)
EMS	elektromagnetická odolnost (electromagnetic susceptibility)
S	stínění
ESD.....	elektrostatický výboj (electrostatic discharge)
ZZ	zkoušené zařízení
MP	měřicí přijímač
US	umělá síť
NS	napěťová sonda
PS.....	proudová sonda
AK	absorpční kleště
P.....	vrcholová hodnota (peak)
QP	kvazivrcholová hodnota (quasi-peak)
AV	střední hodnota (average)
D	usměřňovací dioda
C	kapacitor
R	rezistor
F.....	feritový absorbér
Š	štěrbina antény
A	anténa
ITE.....	zařízení informační techniky (information technology equipment)
PZ	přidružené zařízení
ISN.....	impedančně stabilizační člen
MATLAB	Matrix laboratory

1 Elektromagnetická kompatibilita

1.1 Úvod do problematiky elektromagnetické kompatibility

Pojmem elektromagnetická kompatibilita (EMC) označujeme schopnost zařízení nebo systémů (včetně biologických) fungovat ve sdíleném elektromagnetickém prostředí. To znamená, že systémy musí být dostatečně odolné vůči působení okolních systémů a zároveň svým provozem nesmí závažně ovlivňovat jiné systémy.

EMC jako samostatný obor vznikl v 60. letech v USA. Uplatnil se jako součást vývoje nových technologií ve vojenství a astronautice. Na přelomu 70. a 80. let se EMC společně s těmito technologiemi rozšířila také do civilní sféry a dnes se EMC stala již neoddělitelnou součástí všech oblastí elektrotechniky.

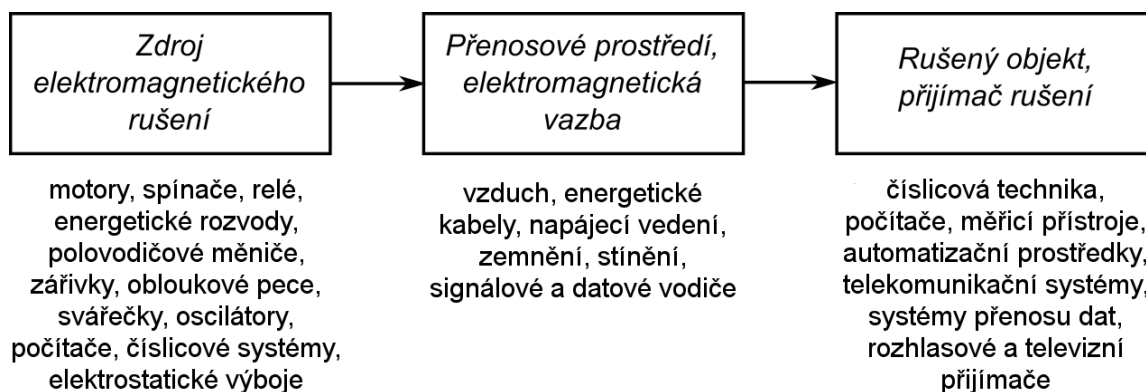
1.2 Struktura EMC

Elektromagnetickou kompatibilitu dělíme na dvě oblasti, na elektromagnetické rušení (interferenci) EMI a elektromagnetickou odolnost (susceptibilitu) EMS.

EMI je děj, při němž je zdrojem produkováno rušení, které se pomocí elektromagnetické vazby šíří k rušenému objektu. Obor zkoumá především příčiny elektromagnetického rušení, tj. popisuje zdroje rušivého signálu, charakter tohoto signálu a přenosové prostředí, jimiž signál prostupuje. Dosažení elektromagnetické kompatibility systému z pohledu EMI spočívá v zamezení produkování rušení zdrojem (jedná-li se o rušivý parazitní signál) a potlačení elektromagnetické vazby s rušeným objektem.

EMS lze popsat jako schopnost systému plnit předepsané funkce v prostředí rušeném, pro tento systém, nežádoucími signály. Obor se zabývá odolností rušeného objektu vůči rušivému signálu. Elektromagnetické kompatibility systému dosahujeme zvyšováním odolnosti vůči rušení bez omezování jeho příčin. Tento postup je uplatňuje zejména v případě, že je rušivý signál pro jiný systém zároveň signálem funkčním.

EMI i EMS jsou spolu neoddělitelně provázány, protože ve skutečnosti je libovolný systém jak zdrojem rušení, tak rušeným objektem. Zpravidla však významem převažuje chování jednoho z nich a podle toho jsou systémy označeny v řetězci EMC na *obr. 1.1*.

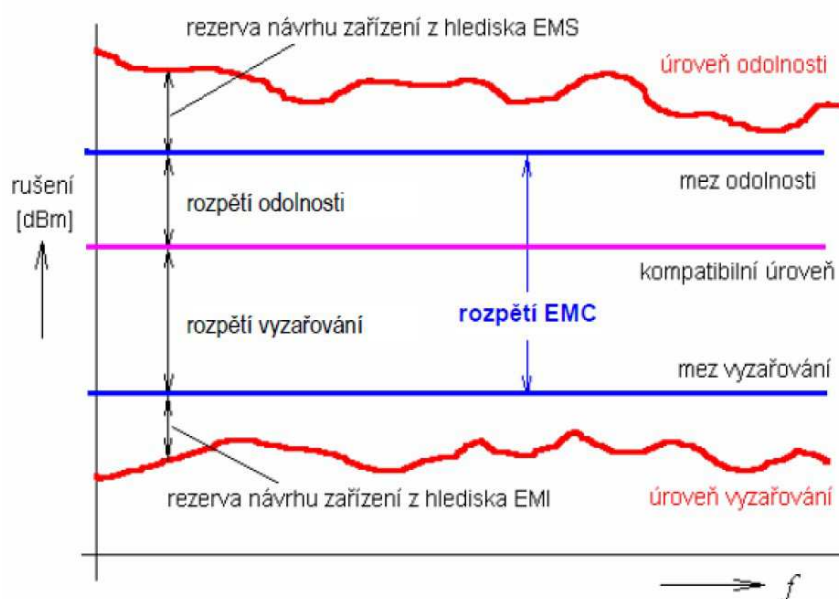


Obr. 1.1: Řetězec EMC s příklady [1]

Reálný řetězec neobsahuje pouze jeden zdroj a přijímač rušení, proto je při zkoumání EMC nutné určit všechny vzájemné vztahy. Toho dosáhneme tak, že každý systém nejprve uvažujeme jako zdroj, přičemž ostatní systémy uvažujeme naopak jako přijímače. Poté tento systém chápeme jako přijímač a zkoumáme vliv ostatních systémů, nyní jako zdrojů, tvořících tzv. obklopující elektromagnetické prostředí.

1.3 Základní pojmy EMC

Základní pojmy z oblasti elektromagnetické kompatibility jsou obsahem 161. kapitoly Elektromagnetická kompatibility normy ČSN IEC 50 s názvem Mezinárodní elektrotechnický slovník. Tyto pojmy vztahy k návrhu jednotlivých zařízení jsou vysvětleny na obr. 1.2.

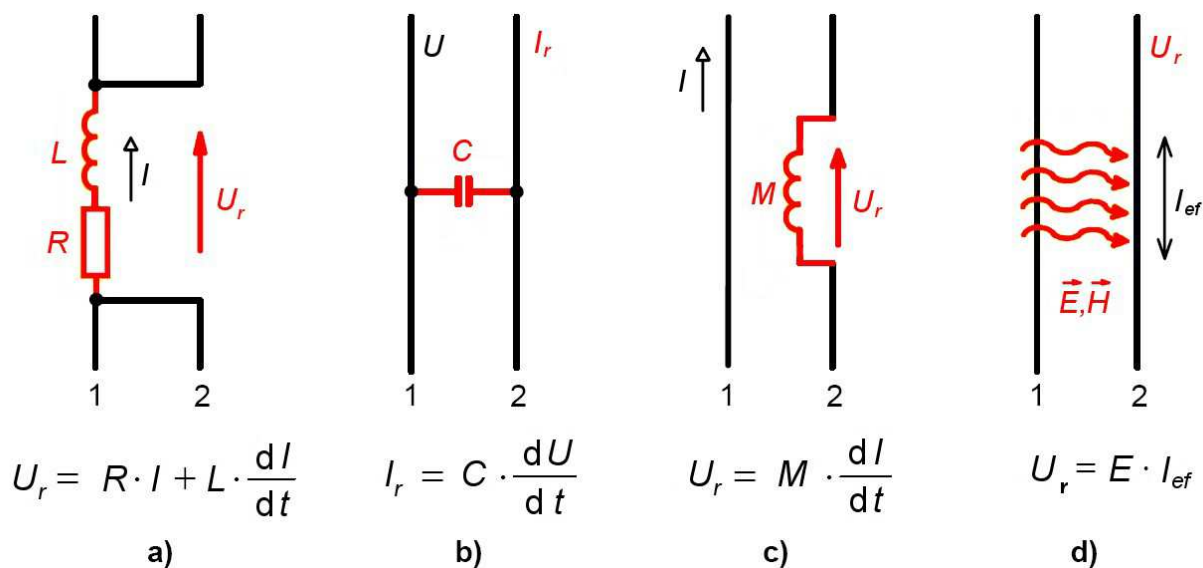


Obr. 1.2: Definice některých základních pojmů EMC [1]

Úroveň vyzařování je velikost rušivého signálu, který dané zařízení svým provozem generuje. Mez vyzařování je maximální přípustná velikost rušivého signálu, kterou smí zařízení dosáhnout. To znamená, že aby zařízení vyhovovalo požadavkům EMI, musí být úroveň vyzařování nižší než mez vyzařování. Rozdíl těchto dvou velikostí nazýváme rezervou návrhu zařízení z hlediska EMI. Úroveň odolnosti je nejvyšší velikost rušení, při jehož působení je dané zařízení schopné bezporuchového provozu. Mez odolnosti je minimální předepsaná hodnota rušení, při které musí zařízení fungovat. EMS vyžaduje, aby úroveň odolnosti přesahovala mez odolnosti. Rozdílem úrovně odolnosti a meze odolnosti je rezerva návrhu z hlediska EMS. Rozdíl meze odolnosti a meze vyzařování označujeme jako rozpětí EMC. Kompatibilní úroveň je maximální předepsaná velikost rušení, při které již očekáváme, že bude zařízení určitým způsobem ovlivňováno. Tuto úroveň volíme takovou, aby pravděpodobnost jejího překročení skutečnou velikostí působícího rušení byla minimální. Rozpětí vyzařování, resp. odolnosti jsou rozdíly mezi vyzařování, resp. odolnosti a kompatibilní úrovní. Úrovně vyzařování a odolnosti měříme normalizovaným postupem. Naměřené hodnoty jsou vždy frekvenčně závislé. Meze vyzařování a odolnosti se také mohou měnit s frekvencí. Rezervy volíme na základě technicko-ekonomického hlediska. Příliš velké rezervy dané zařízení zbytečně prodražují, volbou příliš malých rezerv riskujeme, že zařízení nevyhoví zkouškám EMC a následná náprava bude finančně ještě více nákladná.

2 Způsoby šíření elektromagnetického rušení

Ze základního řetězce EMC je zřejmé, že energie rušivého signálu putuje od zdroje rušení k přijímači rušení přes přenosové prostředí zprostředkované elektromagnetickou vazbou. Rozlišujeme několik typů vazeb. Na základě dělení dle technického provedení se setkáváme s přenosem rušení vzduchem, zemnicí soustavou, stíněním, napájecími kabely, datovými kabely atd. Podle fyzikálního principu vazbu dělíme na vazbu galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu elektromagnetickým polem (vazbu vyzařování). Princip přenosu rušivého signálu mezi systémy je společně s charakteristickými veličinami zobrazen na *obr. 2.1*.



Obr. 2.1: Princip přenosu rušivého signálu pro vazbu a) galvanickou, b) kapacitní, c) induktivní, d) elektromagnetickým polem [1]

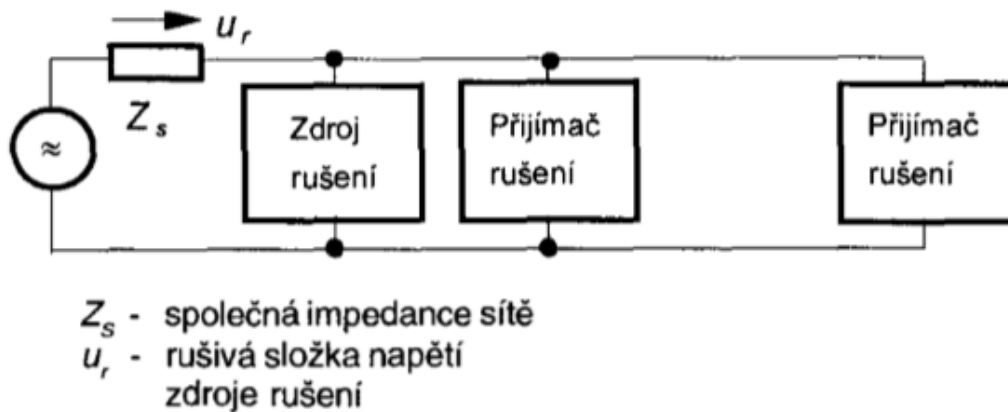
2.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba je realizována přímým vodivým propojením jednotlivých systémů s jednou nebo více společnými součástmi obvodu, kterými se uzavírají proudové smyčky. Vzájemné ovlivňování systémů je způsobeno reálnými parametry této společné součásti, které tvoří tzv. společnou impedanci. Uvažme, že je galvanická vazba uskutečněna společným vodičem. Díky činnému odporu R , indukčnosti L a kapacitě C vodiče dochází na vodiči k úbytku napětí průtokem proudu z prvního systému, přičemž toto napětí pro druhý systém působí jako rušivé. Při výpočtech obvykle reálné parametry společného vodiče vyjadřujeme sériovým spojením rezistoru a induktoru, majícím společnou impedanci. Pro nízké frekvence, do řádově kHz, se uplatňuje především parametr R a daný vodič je vzhledem ke své délce možné řešit jako obvod se soustředěnými parametry. Pro vyšší frekvence převažuje vliv parametru L a vodič je nutné reprezentovat pomocí rozložených parametrů. Díky výskytu L a C ve společné části obvodu dochází ke vzniku rezonančních obvodů, které mohou díky velké změně impedance v obvodu tvořit významnou galvanickou vazbu. Na základě skutečnosti, která společná součást galvanickou vazbu zprostředkovává, dospíváme k dalšímu členění. [2]

2.1.1 Vazba společnou impedancí napájecí sítě

O vazbě společnou impedancí napájecí sítě hovoříme, je-li více systémů napájeno společným vodičem. Pokud se uplatňuje vnitřní impedance zdroje, dochází k ovlivnění

systemů i v případě, že napájecí vodič nesdílejí. Mezi příklady společné impedance napájecí sítě patří impedance společného vedení, impedance napájecího či oddělovacího transformátoru, vnitřní impedance stabilizovaného stejnosměrného zdroje a přechodový odpor kontaktů spínače.



Obr. 2.2: Vazba společnou impedancí napájecí sítě [3]

2.1.2 Vazba společnou impedancí mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení

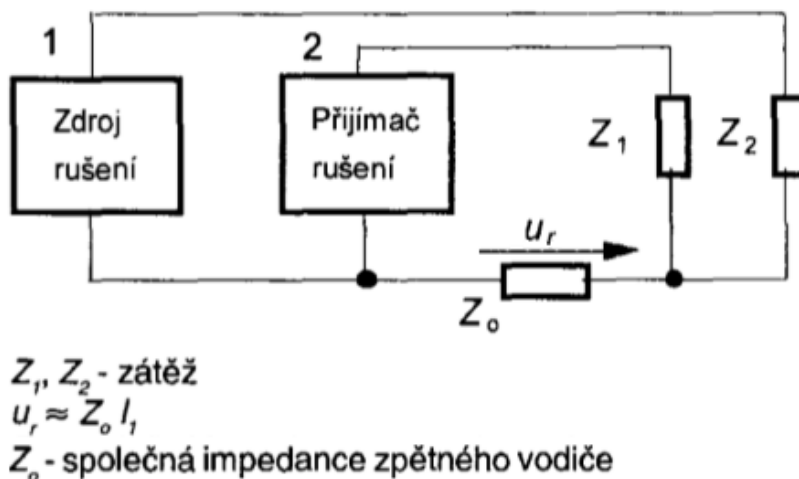
Důsledkem vazby společnou impedancí mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení bývá rušení obvodů sloužících ke zpracování signálu, například snímačů, převodníků, obvodů pro řízení měničů a obvodů pro realizaci matematických operací. Původcem rušení je nejčastěji napájecí síť pro tyto obvody.



Obr. 2.3: Vazba společnou impedancí mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení [3]

2.1.3 Vazba společnou impedancí zpětného vodiče

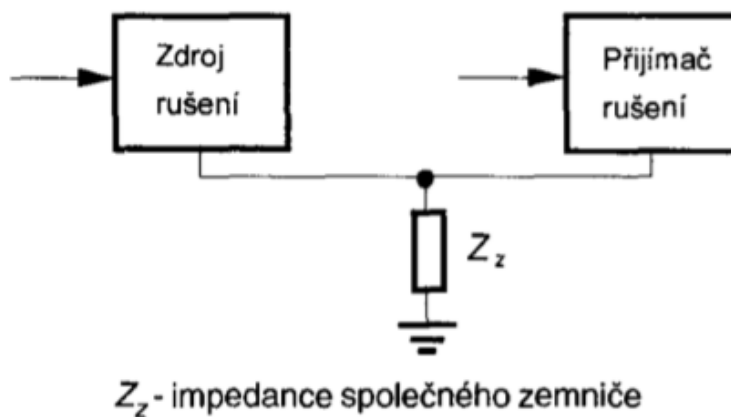
Vazba společnou impedancí zpětného vodiče je velice podobná vazbě společnou impedancí napájecí sítě. Proudové smyčky jednotlivých systémů se však uzavírají společným zpětným vodičem, který v různých aplikacích, např. měření a zpracování signálu, obvykle označujeme jako vztažný, tudíž požadujeme mezi oběma konci vodiče nulové napětí. Tento požadavek získává na důležitosti v případě, že je tento vodič používán jako ochranný. Ideálním způsobem omezení vazby společnou impedancí zpětného vodiče je oddělení zpětných vodičů napájecích, analogových a digitálních částí obvodu, a tedy jejich proudových smyček.



Obr. 2.4: Vazba společnou impedancí zpětného vodiče [3]

2.1.4 Vazba společnou impedancí zemnicí elektrody

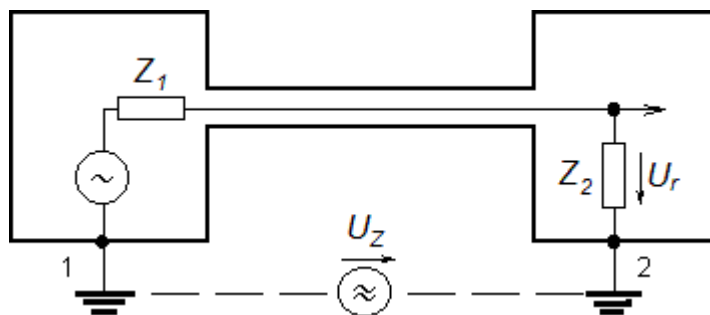
Vazba společnou impedancí zemnicí elektrody se projevuje v případě, že zdroj rušení postihne porucha a zemnicí elektrodou prochází proud. Úbytek napětí na společné impedanci pak ve formě rušení pronikne do přijímače rušení. V extrémním případě může rušivé napětí způsobit destrukci přijímače rušení, a tím lavinou šířit poruchu do všech připojených zařízení. Je-li součástí zdroje rušení stínění, může se tento typ vazby mimo stav poruchy projevit také tím, že jsou skrze zemnicí elektrodu odváděny nežádoucí signály.



Obr. 2.5: Vazba společnou impedancí zemnicí elektrody [3]

2.1.5 Vazba zemní smyčkou

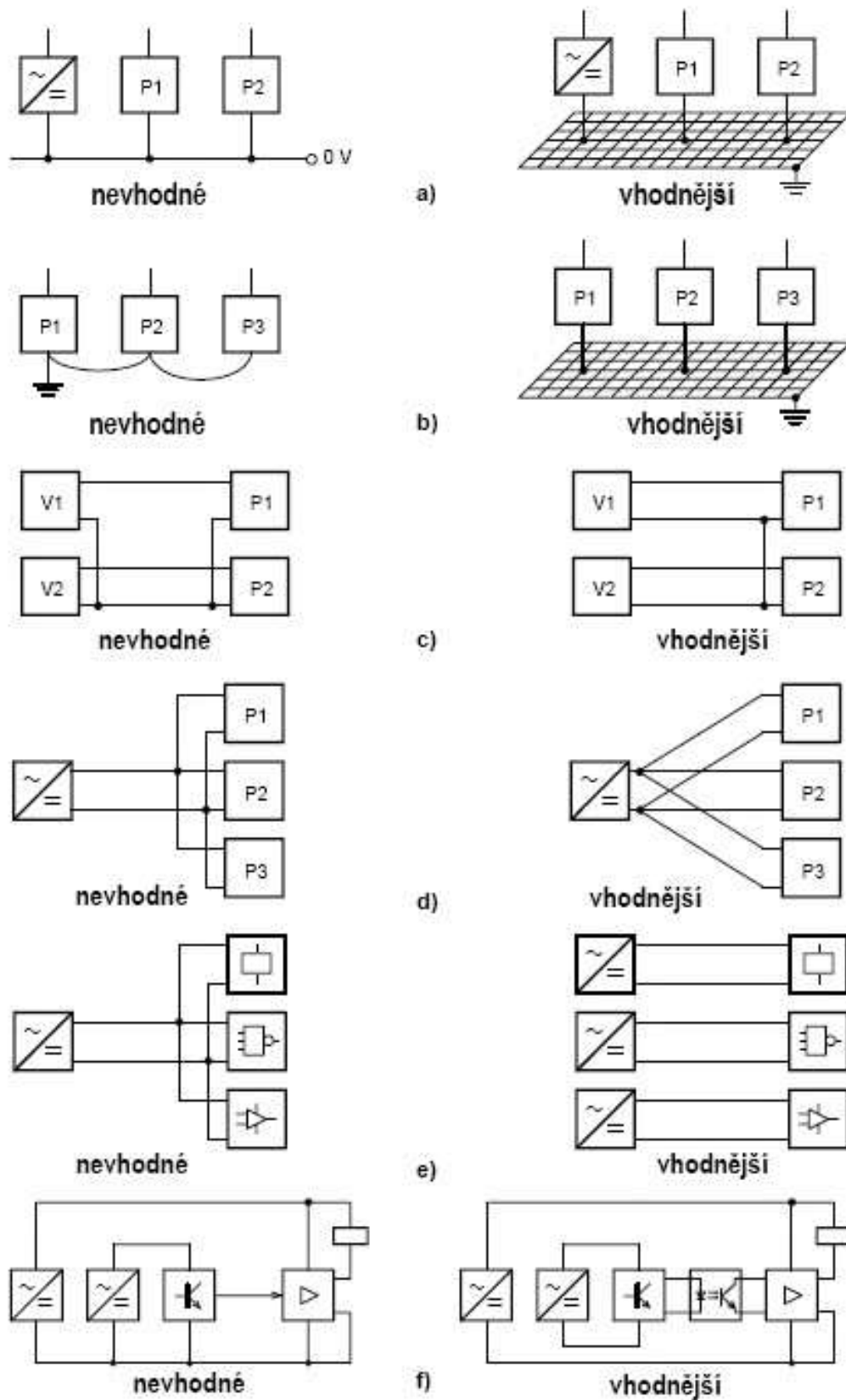
Vazba zemní smyčkou nastává v okamžiku, kdy jsou zdroj rušení a přijímač rušení odděleně uzemněny ve vzdálených bodech. Díky průchodu tzv. náhodných bludných proudů zemí dochází mezi zemnicími elektrodami zúčastněných systémů ke vzniku rušivého napětí, které se projeví na přijímači rušení. Potlačení vazby zemní smyčkou spočívá ve zvětšení impedance zemní smyčky. Úplným rozpojením zemní smyčky, provedením odzemněním přijímače rušení, zvýšíme impedanci pro nízké frekvence. Pro vysoké frekvence se uplatní parazitní kapacita přijímače proti zemi a impedance s narůstající frekvencí klesá. Oddělovací transformátor má obdobný účinek, protože pro vysoké frekvence se projeví parazitní kapacity mezi primárním a sekundárním vinutím. Možným řešením nežádoucích vysokofrekvenčních proudů je vložit mezi tato vinutí stínění. Neutralizační transformátor díky navinutí primáru a sekundáru ve stejném smyslu zvyšuje impedanci pro rušivé proudy. Pracovní proudy nejsou ovlivněny, protože magnetické toky jimi vyvolané se vzájemně kompenzují. Feritové kroužky jsou v principu neutralizační transformátory s jedním závitem. Navíc se v tomto případě využívá ztrátovosti feritu, schopnosti pohlcovat energii elektromagnetických vln vysoké frekvence. Vedení s útlumovým pláštěm spočívá v obklopení vodiče vysoce ztrátovým dielektrikem, který stejně jako ferit pohlcuje energii rušení. Velice účinným způsobem omezení zemní smyčky je použití optoelektronických vazebních členů.



Obr. 2.6: Vazba zemní smyčkou [1]

2.1.6 Způsoby potlačení galvanické vazby

Abychom omezili rušení galvanickou vazbou na minimum, je nutné při návrhu zařízení aplikovat následující elementární technická řešení. Pro snížení rušivého napětí zemní smyčky je potřeba použít rozsáhlou společnou zemnicí síť a dostatečně silné vodiče pro zemnění jednotlivých systémů (obr. 2.7a). Systémy připojujeme k zemnění přímo a nejkratší možnou cestou (obr. 2.7b). Vodiče navrhujeme tak, aby systémy společně nesdílely zpětný vodič (obr. 2.7c) a stejně tak i napájecí vodič (obr. 2.7d). V případě elektronických systémů pracujících na odlišném principu napájíme každý z těchto systémů samostatným zdrojem (obr. 2.7e). Galvanicky oddělujeme výkonové a řídicí obvody jednoho systému (obr. 2.7f).



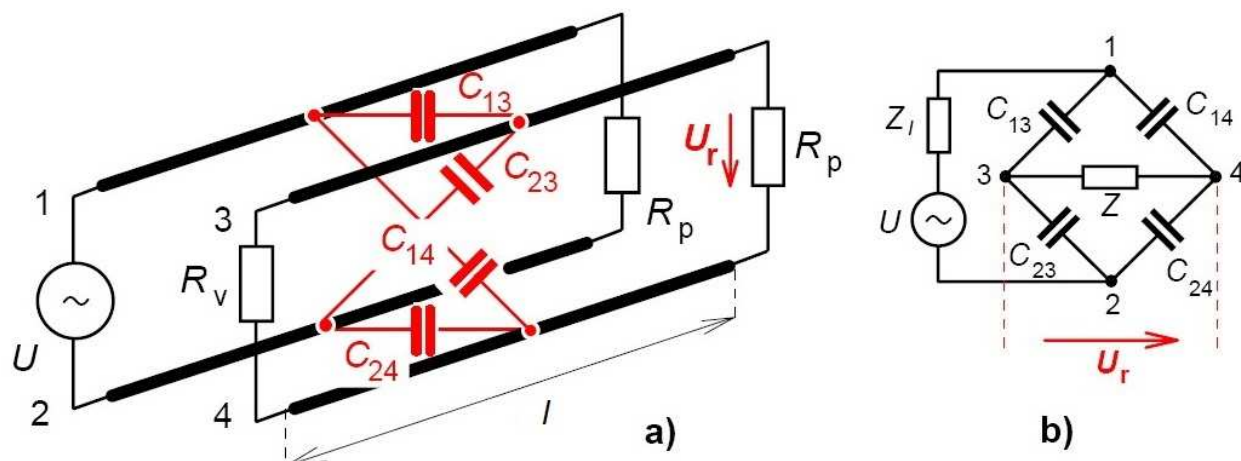
Obr. 2.7: Elementární technická řešení pro potlačení galvanické vazby [1]

2.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká mezi dvěma či více vodivými částmi, které na sebe vzájemně působí elektrostatickým polem. Příčinou vzniku elektrostatického pole je rozdílný potenciál těchto vodivých částí. Vztah mezi nimi, a tedy míru vazby, určuje parazitní kapacita. Rozlišujeme dvě základní parazitní kapacity - kapacitu mezi dvěma vodiči a kapacitu mezi vodičem a zemí. Pro válcové vodiče platí, že kapacita klesá s logaritmem vzdálenosti mezi vodiči a roste s průměrem a délkou vodičů. Dalším parametrem, popisujícím vliv jednoho vodiče (zdroje rušení) na druhý vodič (přijímač rušení) je derivace, tedy strmost změny napětí mezi nimi. Kapacitní vazba se proto uplatňuje zejména u signálů o vysoké frekvenci. Jelikož existuje nespočet různých typů obvodů a spolu s nimi náhradních schémat popisujících specifické vazby s parazitními kapacitami, dále budou popsány jen ty v praxi nejvýznamnější.

2.2.1 Vazba galvanicky oddělených obvodů

Modelové uspořádání vazby dvou galvanicky oddělených obvodů je na *obr. 2.8a*. Vodiče 1 a 2 jsou součástí obvodu uvažovaného jako zdroj rušení. Vodiče 3 a 4 tvoří přijímač rušení. Protože se parazitní kapacity uplatňují mezi galvanicky oddělenými vodiči, nastávají čtyři možné kombinace. Platí-li, že je vlnová délka rušivého signálu mnohem větší než délka l obou vodičů, můžeme uspořádání popsat jednoduchým náhradním schématem se soustředěnými parametry (*obr. 2.8b*). Jedná se o můstkové zapojení, proto nejnižší hodnotu rušivého napětí U_r na přijímači rušení dostaneme při vyvážení tohoto kapacitního můstku. V praxi vyvážení dosáhneme nejnadhěji tím, že vodiče 1, 2 a též 3, 4 společně zkroučíme. Všechny parazitní kapacity jsou pak totiž přibližně stejně velké. K vyvážení dojde i při zkroucení jen jednoho páru vodičů, protože platí $C_{13} \sim C_{23}$ a $C_{14} \sim C_{24}$ pro zkroucené vodiče zdroje rušení a $C_{13} \sim C_{14}$ a $C_{23} \sim C_{24}$ pro zkroucené vodiče přijímače rušení.

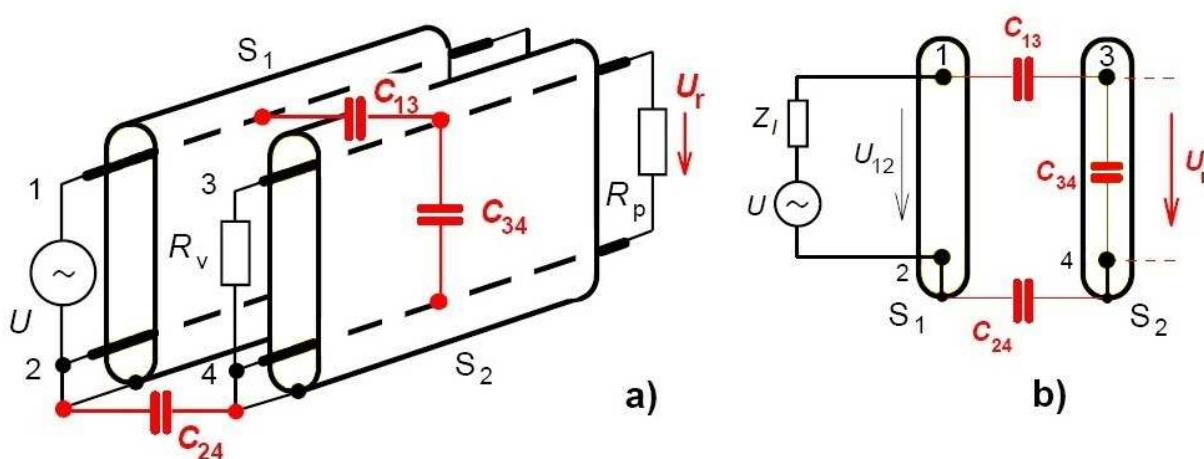


Obr. 2.8: Vazba galvanicky oddělených obvodů, a) model uspořádání, b) náhradní schéma [1]

Jinou variantou omezení vazby galvanicky oddělených obvodů je odstínění vodičů. Na obr. 2.9a je patrné, že se v tomto případě uplatňují jiné parazitní kapacity. Pro rušivé napětí U_r z náhradního schématu na obr. 2.9b platí [1]:

$$U_r = U_{12} \cdot \frac{1}{1 + \frac{C_{34}}{C_{13}} + \frac{C_{34}}{C_{24}}} \tag{2.1}$$

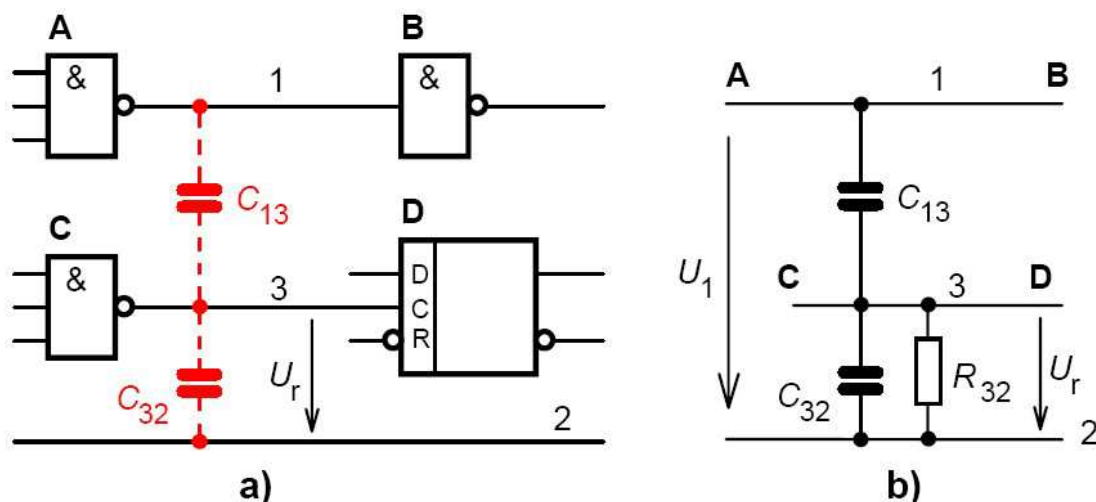
Ze vzorce plyne, že stínění je účinné, pokud je kapacita C_{34} podstatně větší než kapacity C_{13} a C_{24} .



Obr. 2.9: Užití stínění vodičů, a) model uspořádání, b) náhradní schéma [1]

2.2.2 Vazba mezi obvody se společným vztažným vodičem

S tímto typem vazby se nejčastěji setkáme ve vícežilových kabelech v obvodech pro zpracování signálu. Příklad takového obvodu je znázorněn na obr. 2.10. Díky přítomnosti parazitní kapacity C_{13} je vstupní signál prvku D ovlivněn výstupním signálem prvku A.



Obr. 2.10: Vazba mezi obvody se společným vztažným vodičem, a) modelové uspořádání, b) náhradní schéma [1]

Hodnotu rušivého napětí získáme vztahem [1]:

$$U_r = U_1 \cdot \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{32}} \quad (2.2)$$

Pro zmenšení rušení tedy vyžadujeme velkou hodnotu kapacity C_{32} a malou hodnotu kapacity C_{13} . Těch docílíme zkroucením vodičů 2 a 3 a naopak oddálením vodičů 1 a 3, popř. odizolováním těchto vodičů materiálem s nízkou relativní permitivitou. Velikost kapacit taktéž vhodně upravíme stíněním mezi vodiči 1 a 3.

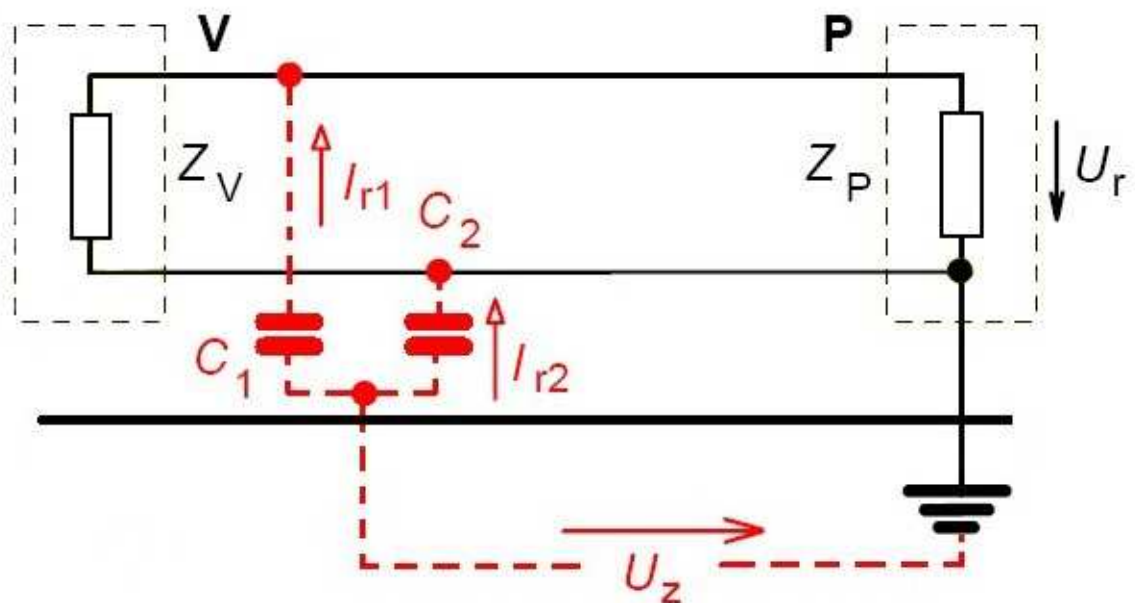
V číslicových obvodech, kde mívá signál tvar impulzu, se náhradní obvod chová jako derivační článek a rušivé napětí je dáno přibližným vztahem [1]:

$$U_r \approx R_{32} \cdot C_{13} \cdot \frac{\Delta U_1}{\Delta t} \quad (2.3)$$

V tomto případě pro omezení rušení požadujeme malou hodnotu odporu R_{32} , kapacity C_{13} a pomalou změnu napětí $\Delta U_1/\Delta t$.

2.2.3 Vazba vůči zemi

Tato vazba je způsobena parazitními kapacitami vodičů proti zemi. Přes tyto kapacity se uzavírá smyčka zemního proudu vyvolaná náhodným napětím U_z . Průchod proudu obvodem na přijímači rušení vyvolá nežádoucí napětí U_r . Užití stínění kolem vodičů umožní uzavření smyčky proudu mimo obvod, a tím brání vzniku rušivého napětí. Při aplikaci stínění v praxi se však u vysokých frekvencí projevuje nenulová impedance stínícího materiálu a vzniká na něm úbytek napětí, čímž klesá účinek tohoto opatření.

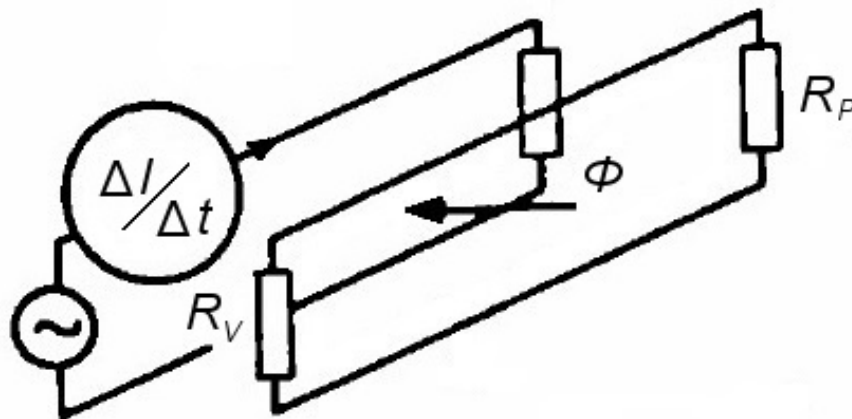


Obr. 2.11: Vazba vůči zemi [1]

2.3 Induktivní vazba

Induktivní vazba je založena na principu Faradayova indukčního zákona. Protéká-li jedním vodičem časově proměnný proud I , vytváří kolem sebe časově proměnné

magnetické pole charakterizované tokem Φ . Na blízkém vodiči pak působením tohoto pole vzniká rušivé elektromotorické napětí U_r .



Obr. 2.12: Induktivní vazba [1]

Faradayův zákon zní [1]:

$$U_r = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (2.4)$$

B je velikost magnetická indukce, S vyjadřuje plochu smyčky, kterou tvoří přijímač rušení. Uvažujeme-li dlouhý tenký vodič kruhového průřezu, velikost intenzity magnetického pole H je nepřímo úměrná vzdálenosti od vodiče r , jak udává vztah:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

Dosazením vzorce (2.5) do vzorce (2.4), získáme:

$$U_r = -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2.6)$$

Ze vztahu (2.6) vyplývá, že velikost rušivého napětí určuje plocha smyčky, vzdálenost vodičů a rychlost změny proudu. Všechny vyjmenované parametry se pro utlumení indukční vazby snažíme snížit. Problematická je rychlost změny proudu, tedy strmost

nárůstu či poklesu $\Delta I/\Delta t$, protože tu často nejsme schopni omezit. Nejvíce nebezpečnými zdroji rušení se pak stávají silné elektrostatické výboje. Například bleskové výboje dosahují strmosti až stovek kA/ μ s a lokální elektrostatické výboje ESD až desítek A/ns. [1]

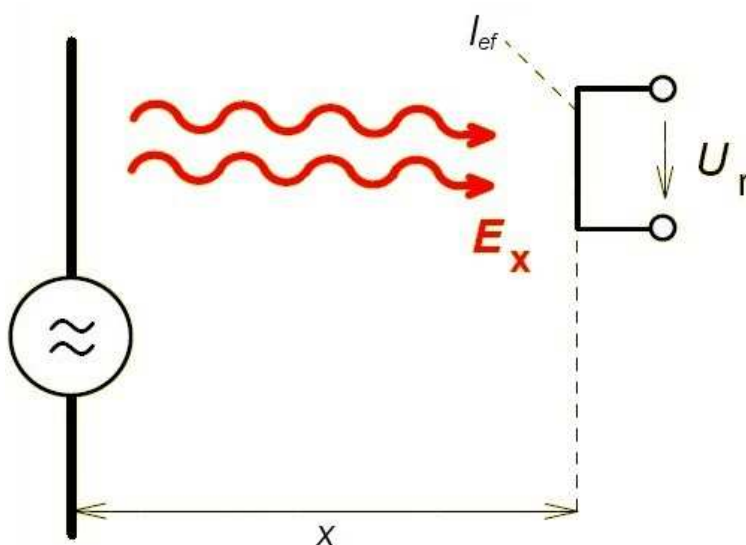
Nejčastějším případem induktivní vazby je souběžné umístění vodičů, např. kabelů v rozvodu budovy. Nežádoucímu rušení zabráníme vzájemným oddělením a odstíněním silových a signálových vodičů. Tj. vodiče namísto např. společné pokládky na lávku vložíme do dobře vodivých a uzemněných, zvláště uzavřených schránek. Dalšími praktickými opatřeními pro omezení indukční vazby je zkroucení vodičů rušeného obvodu, vložení závitů nakrátko do rušené smyčky nebo vykompenzování rušivého pole vhodným natočením smyčky.

2.4 Vazba elektromagnetickým polem

Vazba elektromagnetickým polem se uplatňuje pro větší vzdálenosti mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je již vyloučena vazba kapacitní či induktivní, tj. vazby blízkým polem. Tato vzdálenost a je definována vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.7)$$

Energie je přenášena ve formě vyzářeného a absorbovaného výkonu P . [2]



Obr. 2.13: Vazba elektromagnetickým polem [1]

Elektromagnetické pole je charakterizováno vektorem intenzity elektrického pole \vec{E} a vektorem intenzity magnetického pole \vec{H} . Pro zjištění velikosti intenzity elektrického pole E_x z vyzařeného výkonu P ve vzdálenosti x od zdroje rušení následující vzorec: [1]

$$E_x = 0,3 \cdot \frac{\sqrt{P}}{x} \quad (2.8)$$

Hodnotu vzniklého rušivého napětí U_r na přijímači rušení pak stanovíme:

$$U_r = E_x \cdot l_{ef} \quad (2.9)$$

Kde l_{ef} je efektivní délka přijímací antény. Tím není myšlena pouze anténa funkční, ale obecně jakýkoliv obvod, který se jako anténa chová. Efektivní délka závisí na rozměrech antény a frekvenci přenášené vlny. V anténní technice se často setkáme s veličinou anténní faktor AF , který je převrácenou hodnotou l_{ef} .

Specifickým typem vazby elektromagnetickým polem je tzv. vlnovodná vazba, která vzniká v případě, že je zdroj i přijímač rušení umístěn ve společném kovovém krytu o největším rozměru větším, než je polovina vlnové délky signálu. Kovový kryt se pak chová jako vlnovod, kterým se pole šíří.

Vazby elektromagnetickým polem omezujeme umístěním stínící přepážky mezi zdroj a přijímač rušení. Stínění zeslabuje intenzitu elektrického pole v důsledku pohlcení části energie vlny a také díky odrazu vlny zpět ke zdroji. Schopnost stínění přepážky závisí na tloušťce materiálu, vodivosti, permeabilitě a vlnové délce. Vlnovodnou vazbu odstraňujeme zmenšením společného kovového krytu tak, aby byla porušena podmínka vzniku této vazby.

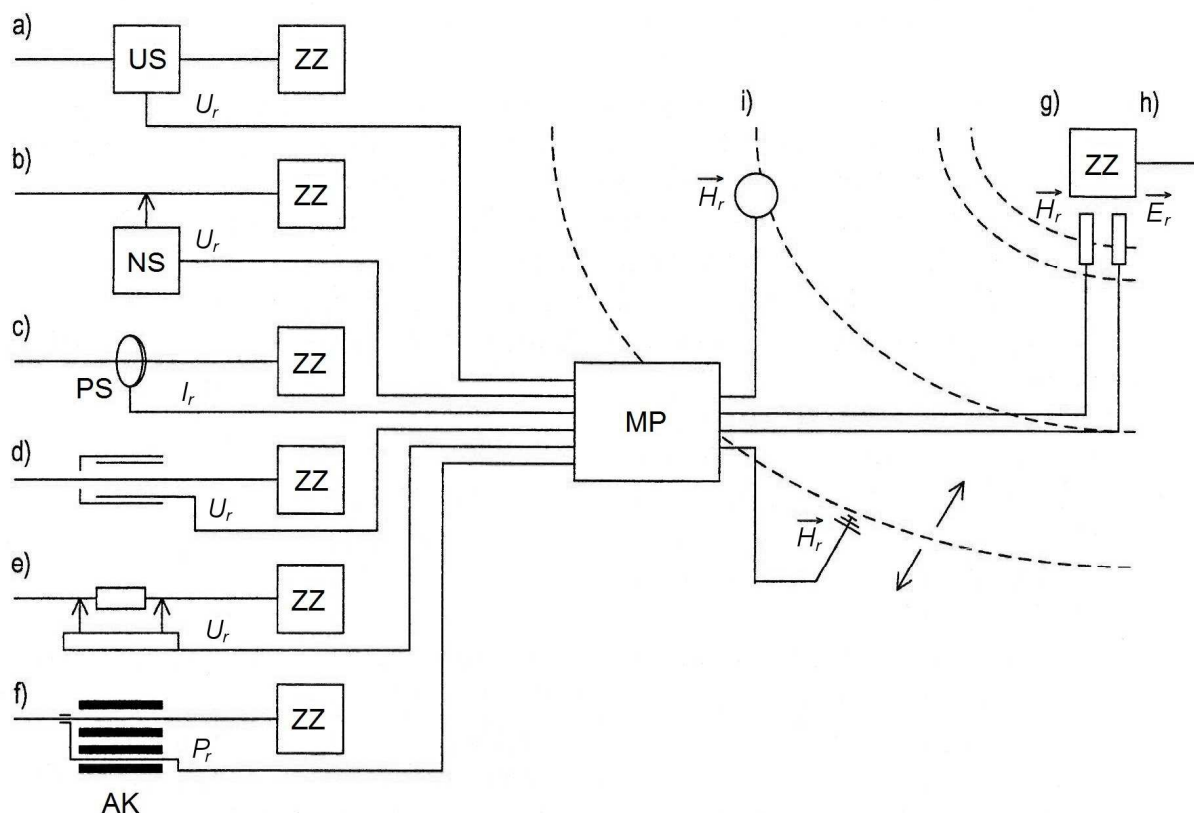
3 Měření elektromagnetických emisí

Pro dosažení požadovaného stupně elektromagnetické kompatibility je měření elektromagnetických rušivých emisí jednou z rozhodujících činností, proto je tomuto měření věnována odpovídající péče. Díky různorodosti zkoušených zařízení a různorodosti

provozních podmínek, v nichž zařízení pracují, není vždy možné využívat jeden sjednocený měřicí postup. Aby však výsledky měření měly svoji vypovídající hodnotu, je požadována reprodukovatelnost měření a porovnatelnost výsledků měření. Proto je oblast měření EMC předmětem normalizace, čímž jsou jednotlivé měřicí metody, postupy, podmínky a parametry použitých zařízení jednoznačně specifikovány příslušnými normami a dalšími předpisy. [4]

Před samotným měřením je vhodné položit si několik základních otázek. Byl vůbec zjištěn výskyt rušení? Jaký charakter má rušivý signál? Jakou metodu zvolit vzhledem k velikosti rušivého výkonu? Který parametr rušivého signálu bude předmětem měření? Bude měření probíhat ve specializované laboratoři či v provozním prostředí? Přístup k měření elektromagnetických emisí ale určuje především způsob šíření. Prvním je rušení přenášené vedením skrze galvanickou vazbu. Rušivý signál je charakterizován veličinami rušivé napětí U_r , rušivý proud I_r a rušivý výkon P_r . Rušení přenášené blízkým elektromagnetickým polem (kapacitní či induktivní vazbou) mezi dvěma blízkými objekty je popsáno veličinami intenzita rušivého elektrického pole \vec{E}_r a intenzita rušivého magnetického pole \vec{H}_r . Rušení elektromagnetickým polem mezi vzdálenými předměty skrze vazbu vyzařováním se uskutečňuje šířením elektromagnetických vln o vysoké frekvenci. Je dáno intenzitou rušivého elektrického pole \vec{E}_r , intenzitou rušivého magnetického pole \vec{H}_r a hustotou vyzářeného výkonu rušivého signálu p_r , popřípadě velikostí Poyntingova vektoru N .

Během měření je jedna či více veličin charakterizujících rušení zkoušeného zařízení ZZ snímána měřicím snímačem, který může jednotlivé veličiny mezi sebou také převádět. Tyto veličiny jsou následně vyhodnoceny měřicím přijímačem MP. Parametry převodu jednotlivých veličin pomocí měřicích snímačů musí být jednoznačně dány tak, aby měřicí přijímač mohl rušení správně vyhodnotit. Blokové schéma měření rušení je vyobrazeno na *obr. 3.1*.



Obr. 3.1: Princip měření elektromagnetických emisí pomocí a) umělé sítě, b) vysokoimpedanční napěťové sondy, c) proudové sondy, d) kapacitní napěťové sondy, e) rezistoru, f) absorpčních kleští, g) sondy blízkého magnetického pole, h) sondy blízkého elektrického pole, i) antény [4]

3.1 Měřicí přijímače

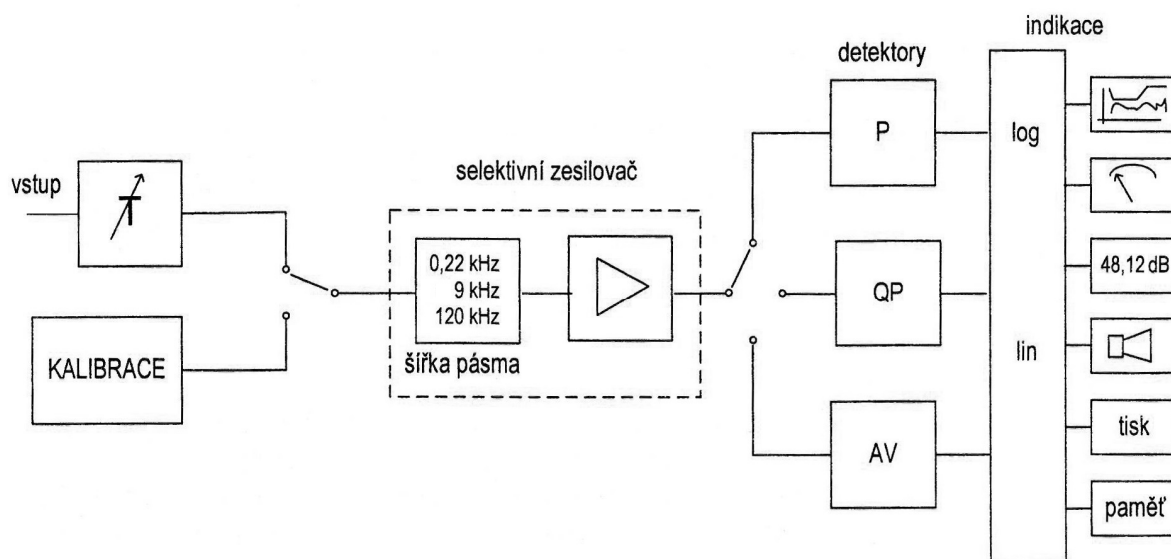
Měřicí přijímač slouží k detekci rušení a analýze jeho složek. Napětí vystupující z měřicího snímače je přiváděno na vstup měřicího přijímače, který napětí kvantifikuje a porovnává s hodnotou napětí odpovídající mezi vyzařování, jež je dána příslušnou normou pro každé zařízení. Z principu by bylo možné jako měřicí přijímač použít běžný rádiový přijímač s lineární charakteristikou a s citlivým voltmetrem na výstupu. Ve skutečnosti však rušení obsahuje mnoho harmonických složek a výsledky měření by pak závisely na parametrech měřicího přístroje, a byly by tudíž nereprodukovatelné. V případech, kdy je cílem měření pouze identifikovat zdroj rušení a hrubě stanovit vlastnosti rušení, lze použít jakýkoli, pro tento účel dostačující, měřicí přístroj pro vysokofrekvenční měření. Provádíme-li standardní měření s postupem stanoveným normami, je nutné, aby měřicí přijímač disponoval normou sjednocenými vlastnostmi.

Požadavky na měřicí přijímač jsou spolu s dalšími údaji o měření obsaženy v normě ČSN EN 55016-1-1. Norma rozlišuje čtyři frekvenční pásma: [4]

- A - 9 kHz až 150 kHz
- B - 150 kHz až 30 MHz
- C - 30 MHz až 300 MHz
- D - 300 MHz až 1 GHz
- E - 1 GHz až 18 GHz

Základním typem přijímače je selektivní mikrovoltmetr, norma dále určuje základní požadavky na tento přístroj: [4][1]

- spojitá přeladitelnost v pásmech A až D, popřípadě i v pásmu E
- nesymetrická vstupní impedance 50Ω
- vysoká citlivost (řádově desetiny μV) a nízká úroveň vlastního šumu
- velký dynamický rozsah (větší než 40 dB) a vysoká přebuditelnost
- přesně definovaná impulzní a amplitudová odezva
- šířka pásma mezifrekvenčního filtru při poklesu 6 dB: A - 0,22 kHz, B - 9 kHz, C a D - 120 kHz, E - 1 MHz
- volba typu detektoru pro vyhodnocení napětí v souladu s normou
- vestavěný zdroj napětí pro kalibraci
- volba indikace naměřených hodnot (obrazová, akustická, tisk, paměť)
- důkladné odstínění všech součástí přístroje a dosažení vysokého stupně EMS



Obr. 3.2: Blokové schéma měřicího přijímače [4]

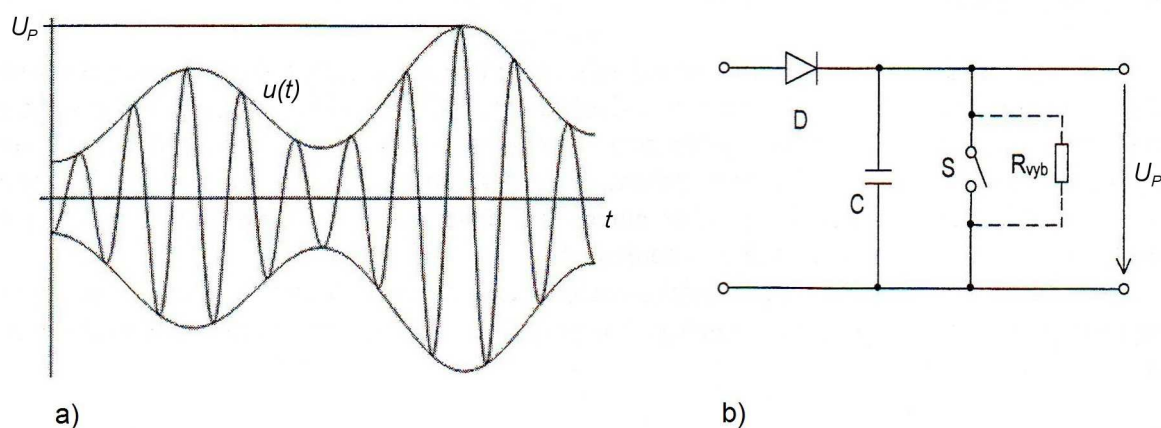
Na vstupu měřicího přijímače se nachází útlumový člen (atenuátor), který měřený napěťový signál zeslabuje. Pokud přístroj kalibrujeme, jako vstup použijeme vestavěný zdroj. Následuje selektivní zesilovač pracující na superheterodynním principu. Hodnota zpracovaného signálu je stanovena jedním ze zvolených detektorů. Jsou jimi detektor vrcholové hodnoty (P), detektor kvazivrcholové hodnoty (QP) a detektor střední hodnoty (AV). Logaritmické nebo lineární výstupní hodnoty mohou být číselně vyjádřeny pomocí displeje či analogového měřidla, zobrazeny graficky na monitoru nebo například signalizovány akusticky. Díky paměti a také díky tiskárně lze hodnoty uchovávat dlouhodobě.

V současnosti se často jako měřicí přijímač používá počítačem řízená sestava, jejíž jádro tvoří spektrální analyzátor. Samotný analyzátor je přístroj širokopásmový a nesplňuje specifikace stanovené normou, zejména požadovanou citlivost a dynamický rozsah. Výsledky měření pak mohou být zkruseny, nejvíce v případě rušení impulzního charakteru. Proto je spektrální analyzátor rozšířen o další bloky. Nejdůležitějším je preselektor, který omezuje signály o frekvencích, které nejsou součástí námi zkoumaného pásma. Použití spektrálního analyzátoru jako měřicího přijímače přináší nesporné výhody. Umožňuje rychlé grafické vykreslení celého spektra, čímž získáváme okamžitý přehled o měřených elektromagnetických emisích. Naměřené hodnoty jsou zpracovávány

počítačem, což dovoluje snadné vyhodnocení měření, například okamžitým porovnáním zjištěných hodnot s danými mezemi.

Vyhodnocení měření se odvíjí od typu použitého detektoru. Při měření využíváme detektory v závislosti na tom, jakými hodnotami jsou meze rušivých napětí definované normami. Zpravidla jsou meze určeny jako střední či kvazivrcholové hodnoty, výjimečně jako vrcholové hodnoty, a to v případě vojenských norem. Chceme-li při prvotním měření stanovit orientační hodnoty rušení, volíme detektor vrcholové hodnoty. Detektor efektivní hodnoty v problematice EMC uplatnění nenachází.

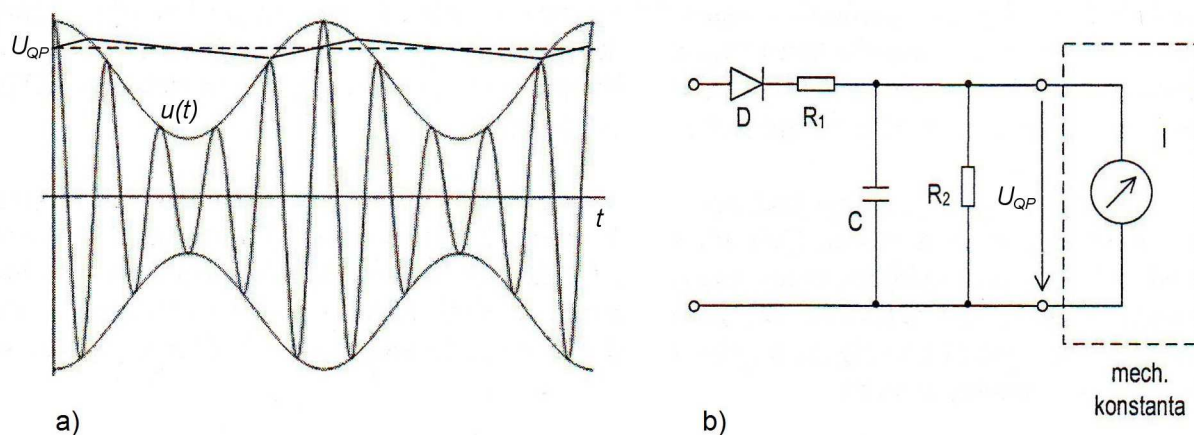
Detektor vrcholové hodnoty (špičkový detektor) zachycuje maximální amplitudu napětí U_P , která se během intervalu měření na vstupu detektoru vyskytla bez ohledu na frekvenci napětí. Detektor je tvořen usměrňovací diodou D , kondenzátorem C a vybíjecím spínačem S , který je v praxi obvykle nahrazován vybíjecím rezistorem R_{vyb} s velkým odporem. Nabíjecí časová konstanta detektoru je velmi malá, vybíjecí časová konstanta je naopak velmi velká.



Obr. 3.3: Detektor vrcholové hodnoty, a) průběh napětí, b) schéma [4]

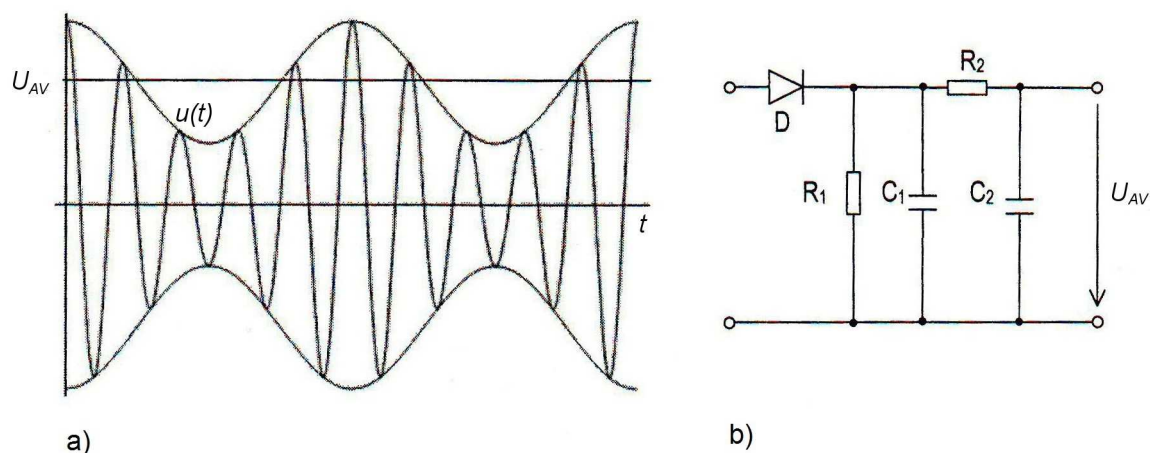
Výstupní napětí detektoru kvazivrcholové hodnoty je mimo amplitudy navíc závislé na frekvenci signálu. Díky tomu je možné, že signál o nízké frekvenci a s velkou amplitudou může mít stejnou kvazivrcholovou hodnotu jako signál o vysoké frekvenci s malou amplitudou. Tento princip je v souladu se sluchovými vjemy člověka. Napětí na výstupu detektoru U_{QP} vyplývá z velikosti nabíjecí časové konstanty R_1C a vybíjecí časové konstanty R_2C . Z požadavku na reprodukovatelnost měření je zřejmé, že poměr

časových konstant musí být standardizován. Časové konstanty jsou normou stanoveny v závislosti na frekvenci měřeného signálu. Obecně platí, že vybíjecí časová konstanta je větší než ta nabíjecí. Detektor kvazivrcholové hodnoty se používá k měření širokopásmového rušení.



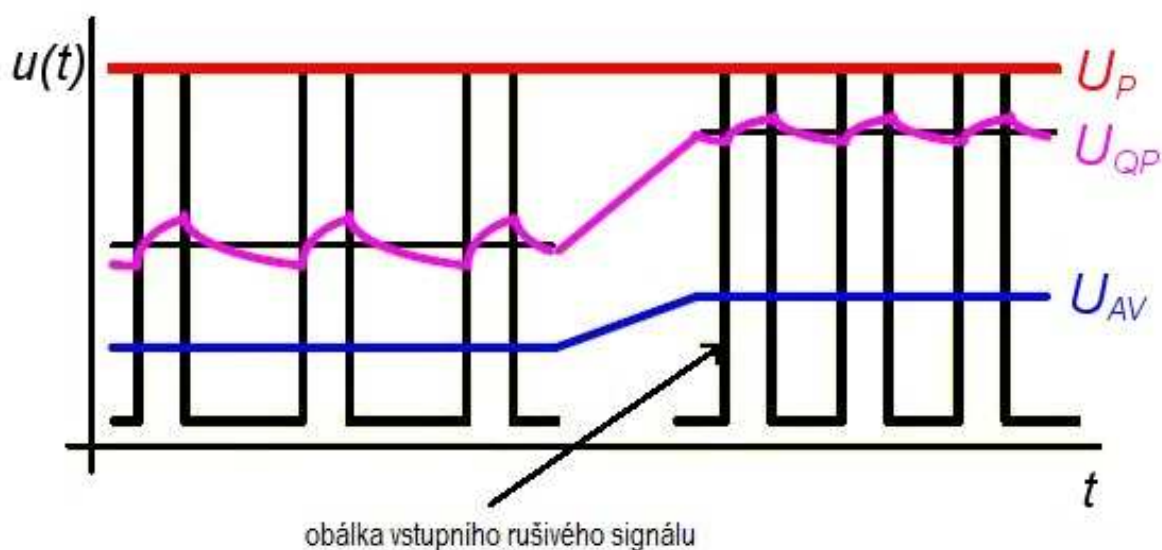
Obr. 3.4: Detektor kvazivrcholové hodnoty, a) průběh napětí, b) schéma [4]

Na výstupu detektoru střední hodnoty je aritmetická střední hodnota obálky detekovaného napětí U_{AV} . Princip detektoru je takový, že v důsledku malého odporu rezistoru R_1 napětí na kondenzátoru C_1 sleduje okamžitou hodnotu obálky detekovaného signálu. Následným vyhlazením pomocí členu R_2C_2 získáme na výstupu požadovanou střední hodnotu. Detektor střední hodnoty se používá k měření úzkopásmového rušení.



Obr. 3.5: Detektor střední hodnoty, a) průběh napětí, b) schéma [4]

Porovnáme-li tři zmíněné detektory na *obr. 3.6*, je zřejmé, že detektor vrcholové hodnoty vždy zachytí největší hodnotu rušení, kterou zkoušené zařízení produkuje. Pokud tedy při prvotním rychlém měření zjištěná vrcholová hodnota rušení nepřekročí normou stanovenou limitní hodnotu kvazivrcholovou nebo střední, je bez dalších měření možné prohlásit, že dané zařízení emisní limity splňuje. Je-li při prvotním měření vrcholová hodnota vyšší, je nutné provést déletrvající konečné měření s detektorem té hodnoty, kterou je emisní limit normou stanoven.



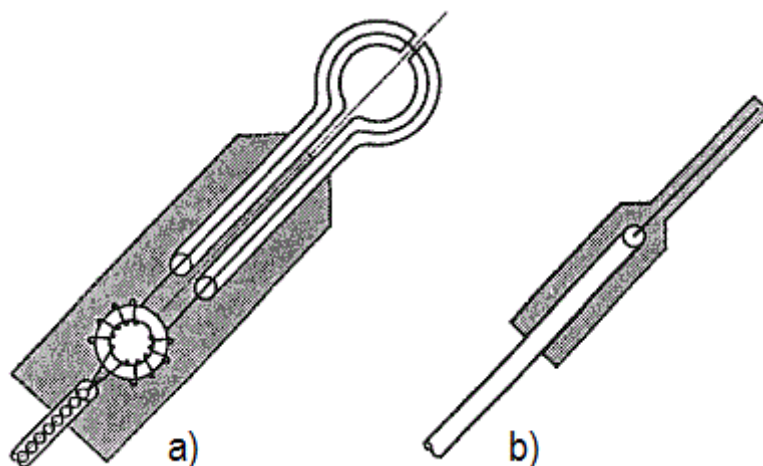
Obr. 3.6: Odezvy různých typů detektorů [1]

3.2 Měřicí snímače

Existuje několik typů měřicích snímačů. Lze je rozdělit na dva základní typy, na snímače rušení přenášeného po vodiči a na snímače rušení šířeného elektromagnetickým polem. S ohledem na zaměření práce jsou níže uvedeny pouze měřicí snímače rušivého elektromagnetického pole.

3.2.1 Sonda blízkého pole

Pro měření blízkého elektromagnetického pole, tj. na vzdálenosti menší než a podle vztahu (2.7), se používá sonda blízkého pole. Rozlišujeme dva typy, sondu elektrické složky elektromagnetického pole a sondu magnetické složky elektromagnetického pole. V obou případech se v principu jedná o malé antény vhodné pro uchopení do ruky. Vzájemně se liší konstrukcí. Sondu blízkého elektrického pole tvoří tyčová anténa, zatímco sonda blízkého magnetického pole má konstrukci malé smyčky.



Obr. 3.7: Sondy blízkého pole, a) sonda pro měření magnetické složky pole, b) sonda pro měření elektrické složky pole [1]

Jelikož jsou měření pomocí těchto sond obtížně reprodukovatelná, nelze jimi získané hodnoty intenzit elektrického či magnetického pole porovnávat s mezemi stanovenými normou. Výsledky měření totiž závisí například na vzdálenosti sondy od zdroje rušení nebo na orientaci sondy vůči zdroji rušení. Přesto se tyto sondy uplatňují při vyhledávání silných lokálních zdrojů rušení při vývoji a diagnostice elektrických zařízení, nejčastěji elektroniky sestávající z desek plošných spojů. Sondy blízkého pole se také používají ke kontrole těsnosti elektromagnetického stínění.

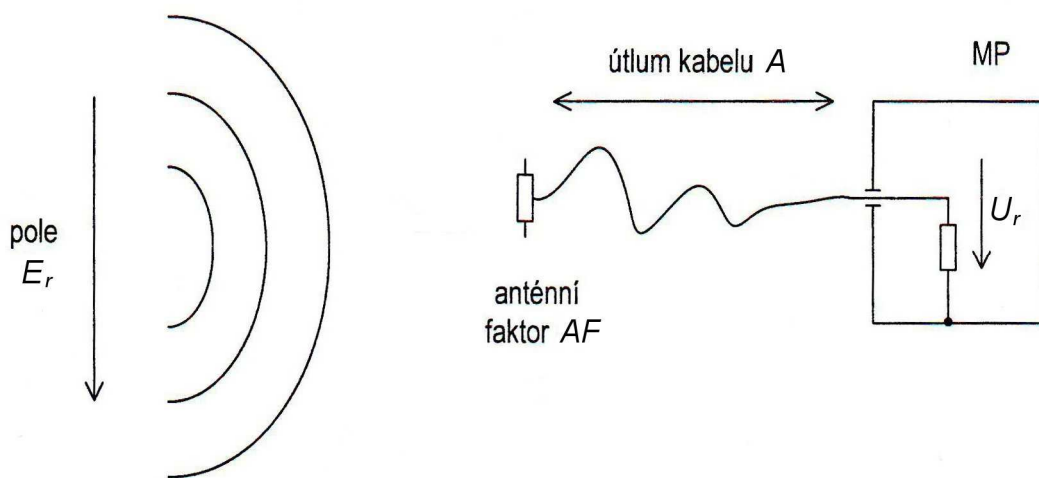
3.2.2 Antény

Antény jako měřicí snímače jsou používány především pro měření rušivých signálů o tak vysokých frekvencích, že je přímé měření rušivých napětí či proudů prakticky nerealizovatelné. V praxi antény umožňují měření již od frekvence 9 kHz do řádově jednotek GHz. Anténa zachycuje energii elektromagnetických vln a převádí jí na napětí, které je vyvedeno na měřicí přijímač. Antény lze podle veličin, se kterými pracují, rozdělit na antény měřící velikost intenzity elektrické složky E_r a na antény měřící velikost intenzity magnetické složky H_r rušivého elektromagnetického pole. Volba antény závisí na tom, v jakém frekvenčním pásmu bude měření probíhat. Rušení v jednotlivých pásmech totiž může být vyvoláno převážně magnetickou složkou nebo naopak elektrickou složkou. Na anténu jsou kladeny požadavky na širokopásmovost, směrovost, impedanci a zisk. Avšak hlavním parametrem antény je anténní faktor AF [1/m], který udává převod mezi vstupní velikostí intenzity elektrického pole E_r a výstupním napětím U_r . [1]

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \quad (3.1)$$

Anténní faktor je často udáván v [dB/m]. V tomto případě pak dosazujeme E_r v jednotkách [dB μ V/m] a U_r v jednotkách [dB μ V]. [1]

$$AF = E_r - U_r \quad (3.2)$$



Obr. 3.8: Princip měření pomocí antény [4]

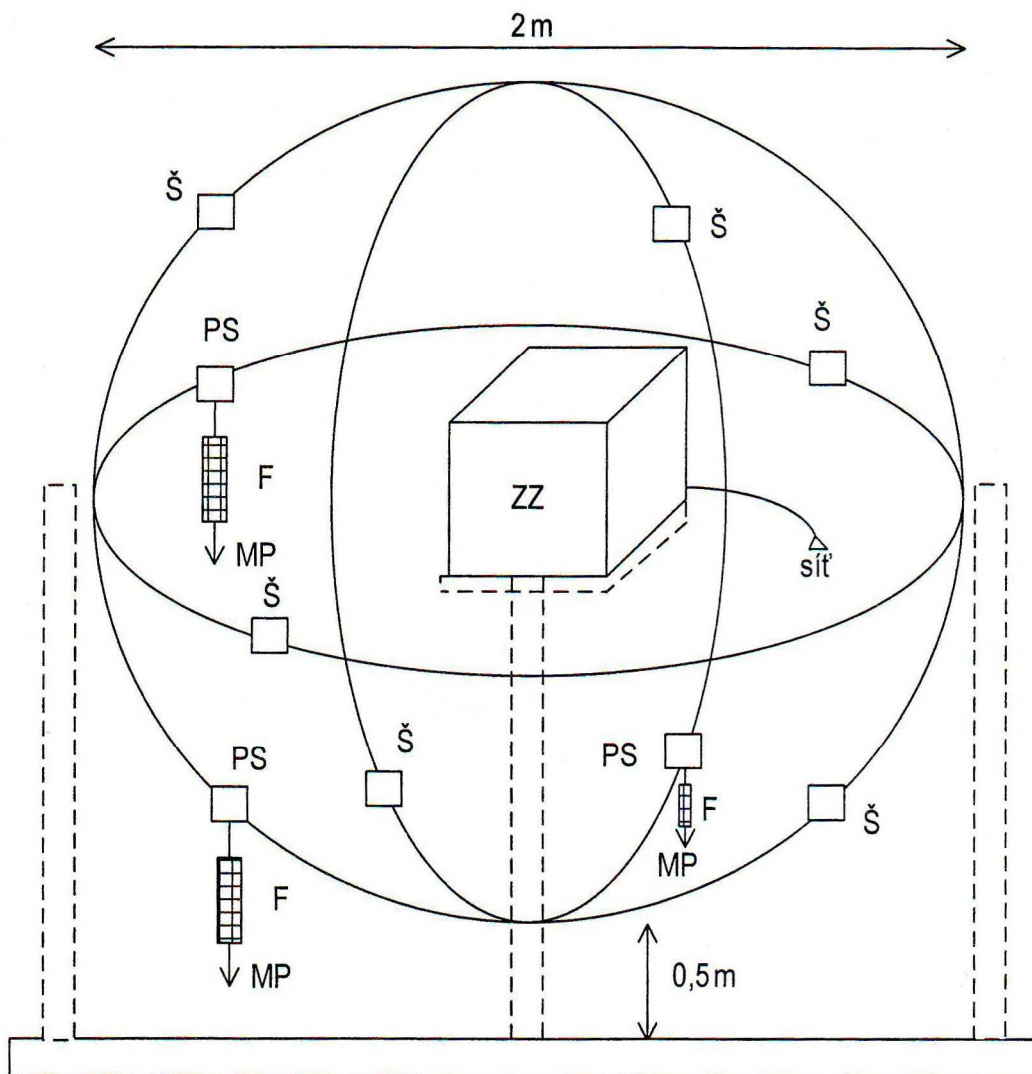
Při vyhodnocování naměřených hodnot je navíc nutné brát v úvahu útlum kabelu označovaný jako A [dB]. Výslednou zjištěnou velikost intenzity rušivého elektrického pole potom získáme níže uvedeným vztahem. [4]

$$E_r = U_r + AF + A \quad (3.3)$$

Analogicky lze vzorce (3.1), (3.2) a (3.3) aplikovat pro velikost intenzity rušivého magnetického pole H_r . Anténní faktor se mění s frekvencí. Výrobce je udáván frekvenční průběh tzv. ekvivalentního anténního faktoru. Ten odpovídá měření ve volném prostoru a impedančně přizpůsobené měřicí sestavě bez možnosti odrazu vln. Ve skutečnosti je hodnota anténního faktoru navíc závislá na měřicím prostředí, například na vzdálenosti antény od zdroje rušení, na výšce antény nad zemí a na odrazivosti země. Proto je při skutečném měření potřeba anténu zkalibrovat pro dané pracoviště a podmínky měření.

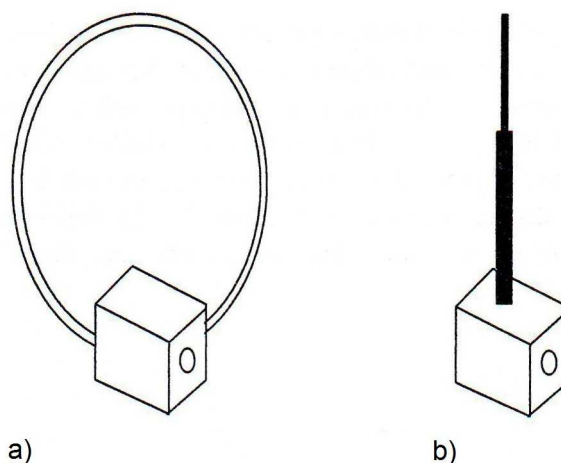
Chyba měření pomocí antén bývá pod 1 dB. S rostoucí frekvencí chyba dále klesá. Problém nastává při měření elektromagnetického pole s frekvencí nižší než 100 MHz, u něhož vlivem nedokonalého impedančního přizpůsobení antény, měřicího přijímače a kabelu dochází ke vzniku stojatého vlnění. Vzniklý jev negativně ovlivňuje přesnost měření. Řešením je vložení atenuátoru s útlumem AH [dB] mezi anténu a měřicí přijímač, bohužel jen za cenu snížení citlivosti měření. Velikost AH je potřeba při zpracování naměřených hodnot přičíst do vztahu (3.3). Anténní faktor je stanoven pro hlavní lalok vyzařovacího diagramu antény. Nachází-li se zdroj rušení v jiném směru, než kam směřuje hlavní lalok, zjištěná hodnota AF neplatí. Při měření EMI není žádoucí přílišná směrovost antény, aby nebyly utlumeny vlny odražené od zemní roviny. Antény musí být lineárně polarizované. Signál, který anténa zachytí kolmo ke směru polarizace musí mít alespoň o 20 dB nižší úroveň než signál zachycený ve směru polarizace. Jednotlivé typy antén jsou vhodné pro měření v různých frekvenčních pásmech.

V pásmu 9 kHz až 150 kHz měříme magnetickou složku rušivého elektromagnetického pole. K tomu slouží smyčková (rámová) anténa. Anténa má takové rozměry, že se vejde do čtverce o délce strany 0,6 m. Smyčka antény je ukryta ve stínění, které omezuje elektrickou složku rušivého pole. Jelikož je zkoušené zařízení natočeno k anténě jedním směrem, je nutné ho v průběhu měření otáčet. Použijeme-li soustavu tří vzájemně kolmých smyčkových antén o průměru 2 m, kde je zkoušené zařízení umístěno v jejich středu, nutnost otáčení odpadá.



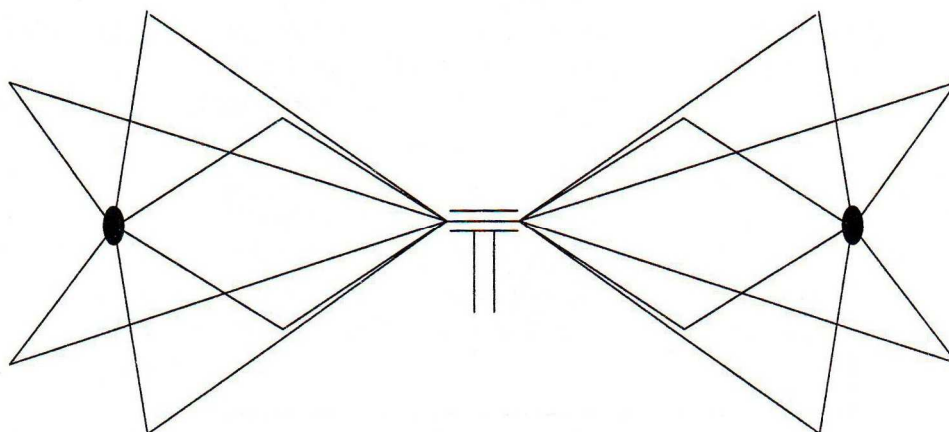
Obr. 3.9: Uspořádání soustavy smyčkových antén, F - feritový absorbér, Š - šterbina antény, MP - měřicí přijímač, ZZ - zkoušené zařízení [4]

V pásmu 150 kHz až 30 MHz se k měření magnetické složky pole používá smyčková anténa stejně jako v předchozím případě. V tomto pásmu však již měříme také elektrickou složku rušivého pole. Měření probíhá pomocí prutové antény (monopólu). Je tvořena vertikálně umístěnou tyčí o výšce 1 m. Při měření blízko zdroje rušení, tzn. v blízkém poli, může být prutová anténa ovlivněna kapacitní vazbou. V těchto případech se používá malý symetrický dipól, který na blízké pole nereaguje a navíc dokáže určit směr elektromagnetického pole.



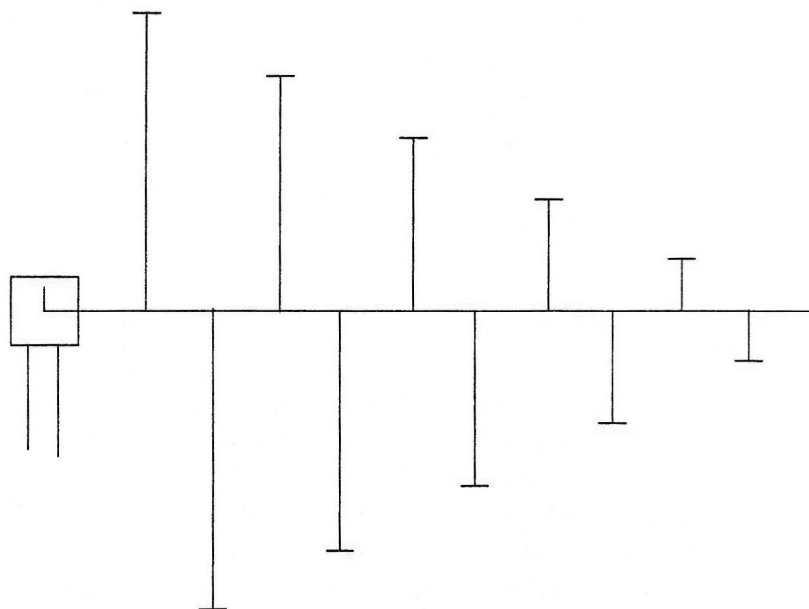
Obr. 3.10: Konstrukce antény a) smyčkové, b) prutové [4]

V pásmu 30 MHz až 300 MHz lze k měření využívat symetrický dipól. Stejně jako dále uvedené antény pro vyšší frekvence, i dipól měří elektrickou složku pole. Pro frekvence nad 80 MHz je nutné změnou délky ramen naladit rezonanci dipólu při měřené frekvenci. Pro frekvence nižší než 80 MHz je délka ramen nastavena na rezonanci při 80 MHz a navíc je anténa připojena ke vhodnému rezonančnímu a impedančně přizpůsobujícímu obvodu. [5] Z důvodu komplikovaného nastavení se symetrický dipól používá nejčastěji pouze jako referenční kalibrační anténa. Pro frekvence od desítek MHz až do 2 GHz je mnohem pohodlnější měření pomocí některé ze širokopásmových antén, pro rozsah frekvencí od 20 MHz do 300 MHz je vhodná zejména bikónická anténa. Je typem zkráceného dipólu pro měření širokého pásma frekvencí. Bikónická anténa se vyznačuje širokým vyzařovacím diagramem a malou hodnotou zisku.



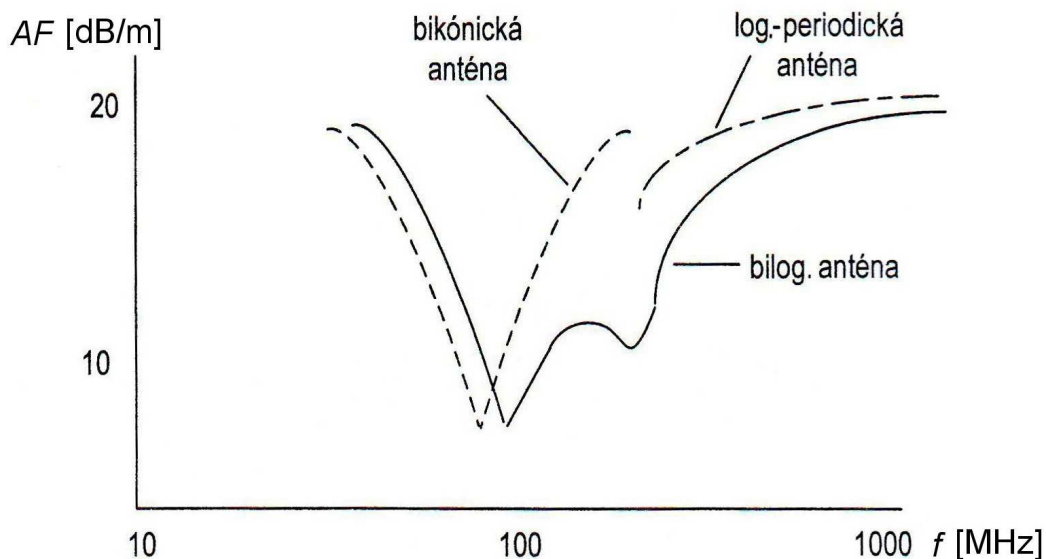
Obr. 3.11: Konstrukce bikónické antény [4]

V pásmu 200 MHz až 2 GHz se uplatňuje anténa s logaritmicko-periodickou strukturou. Anténa se skládá ze soustavy monopólů, jejichž délka a vzájemná vzdálenost odpovídá stálému poměru rezonančních frekvencí. Výhodou této antény je velký zisk.



Obr. 3.12: Konstrukce logaritmicko-periodické antény [4]

Nejčastěji probíhá měření EMI v pásmu 30 MHz až 2 GHz. Aby se měření usnadnilo, vyvstala snaha o zkonstruování antény vhodné pro celý tento rozsah frekvencí. Požadovaného rozsahu dosahují složené antény, které jsou kombinací výše uvedených typů antén. Pro oblast vysokých frekvencí je využívána logaritmicko-periodická anténa, klíčová je však konstrukce pro oblast nízkých frekvencí, a to hlavně z důvodu snahy o dosažení únosných rozměrů. Tzv. BiLog anténa je kombinací bikónické a logaritmicko-periodické antény. Na nízkých frekvencích vykazuje vlastnosti bikónické a na vysokých frekvencích pak vlastnosti logaritmicko-periodické antény. Na obr. 3.13 je situace znázorněna průběhem anténního faktoru. Existují také složené antény jejichž obě části tvoří logaritmicko-periodická struktura. Důvodem jsou výborné vlastnosti této struktury, které se díky této konstrukci uplatní v celém pracovním frekvenčním pásmu. Monopóly nízkofrekvenční části jsou různě tvarovány, aby anténa nenarůstala do přílišných rozměrů. Speciálním typem širokopásmových antén je kónicko-logaritmická anténa, která slouží k měření EMI podle některých vojenských norem. Pro standardní měření není použitelná, protože se vyznačuje kruhovou polarizací.



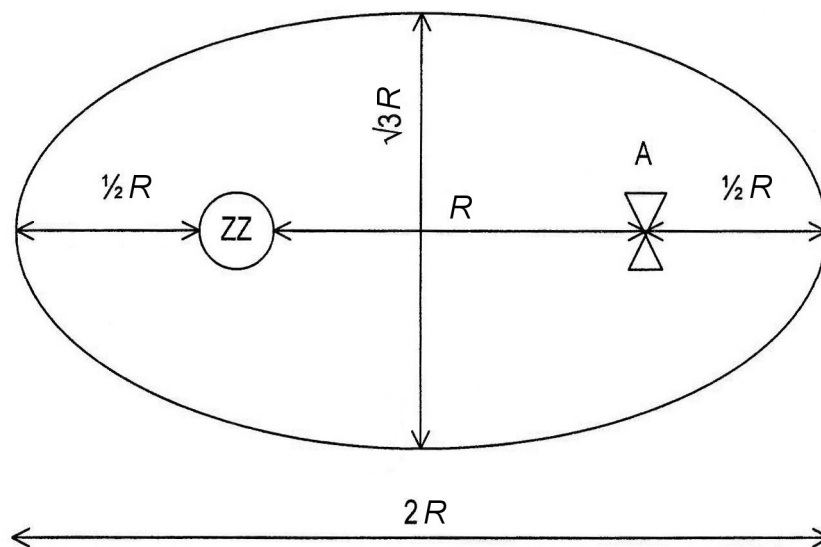
Obr. 3.13: Frekvenční závislost anténního faktoru pro různé typy antén [4]

V pásmu 1 GHz až 18 GHz se k měření využívají různé varianty trychtýřové antény. Nevýhodou je, že mají úzký vyzařovací diagram a také to, že mají poměrně úzké pracovní pásmo, takže pro pokrytí celého měřeného rozsahu bývá použito několik těchto antén, každá z nich pro své dané frekvenční pásmo. K měření je možné použít logaritmicke-periodickou strukturu, která těmito nedostatky netrpí. Pro vysoké frekvence řádu GHz má již ovšem dosti malý zisk.

3.3 Měřicí stanoviště pro anténní měření

3.3.1 Měření ve volném prostoru

Základním měřicím stanovištěm je otevřený venkovní prostor, na který jsou z důvodu reprodukovatelnosti měření kladeny následující požadavky. Musí se jednat o rovnou plochu eliptického půdorysu s předepsanými rozměry.

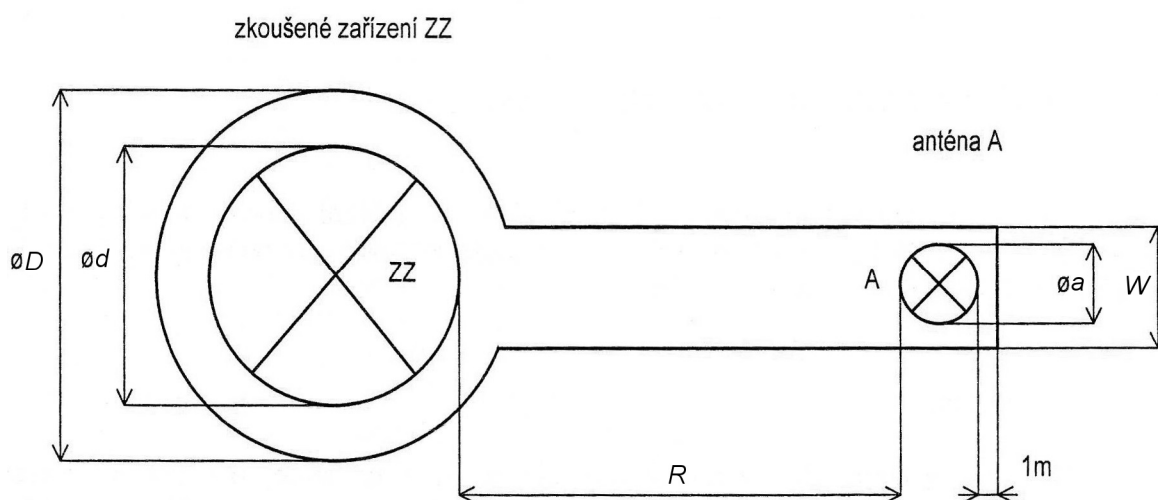


Obr. 3.14: Rozměry měřicího stanoviště eliptického půdorysu [4]

Zkoušené zařízení ZZ se nachází v jednom z ohnisek, anténa A je umístěna v druhém ohnisku. Hodnota délky R se měří od nejbližší hrany zkoušeného zařízení a antény, je volena největší možná z řady 100 m, 30 m, 10 m a 3 m. Uvnitř prostoru ohraničeného elipsou se nesmí nacházet žádný objekt, který by jakkoli ovlivňoval elektromagnetické pole. Stejně tak pod zemí nesmí být uložena potrubí a kabely, mimo kabelů potřebných pro provoz zkoušeného zařízení. Samozřejmostí je, že se v této vybrané lokalitě ani v jejím okolí nesmí vyskytovat pro měření nežádoucí zdroje elektromagnetického pole. Úroveň elektromagnetického pozadí by měla být o 20 dB nižší než úroveň měřeného rušivého signálu. Není-li tato podmínka splněna, je vhodné elektromagnetické pozadí proměřit a na základě zjištěného vlivu provést korekci naměřených hodnot. Eliptický tvar měřicího stanoviště se používá z toho důvodu, že vlna odražená k anténě od předmětu na jeho hranici urazí dvojnásobnou vzdálenost vůči vlně přímé. To zaručuje, že velikost této nežádoucí odražené vlny je nejvýše poloviční oproti vlně přímé. Ve skutečnosti na okolním předmětu, například na stromě, nedochází k dokonalému odrazu, takže odražená vlna je utlumena výrazně více.

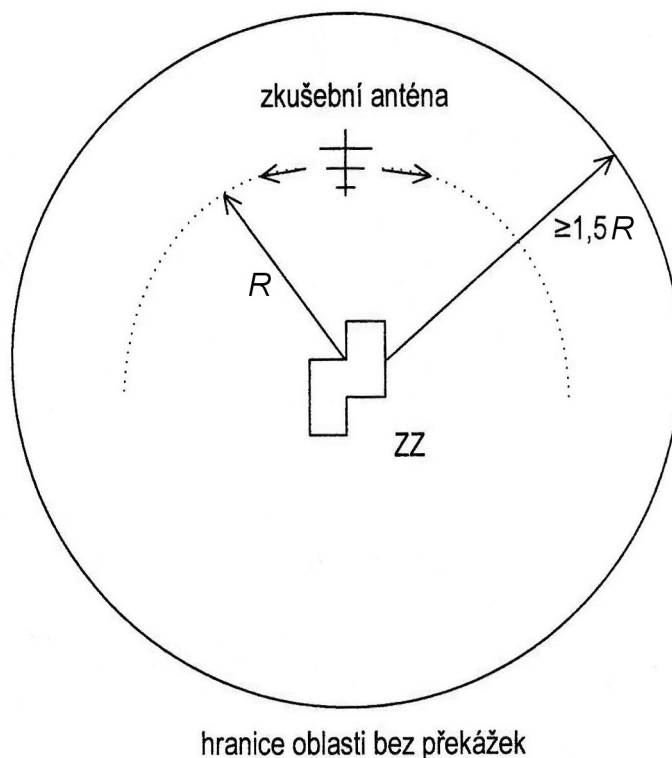
Při měření ve volném prostoru dochází také k odrazu od zemní roviny. Tento odraz je pro měření žádoucí, proto musíme zajistit stále odrazivé vlastnosti zemní roviny. Jako nejvhodnější se jeví položení kovové vodivé plochy do prostoru mezi zkoušeným zařízením a anténou. Uspořádání a rozměry jsou patrné z obr. 3.15. Vodivou plochu mohou tvořit kovové plechy, fólie, mříže, pletiva či koberce tkané z drátků. Vodivá plocha

může obsahovat malé otvory a mezery, jejich rozměry ale musí být vzhledem k vlnovým délkám měřeného rušivého pole zanedbatelné. Pokud jako zemní rovina slouží prostá zemina, musí být zaručeno, že se její odrazné vlastnosti nebudou měnit, například vlivem počasí. Výsledné naměřené hodnoty jsou dány superpozicí vln přímých a vln odražených od zemní roviny. Zda je pole zachycené přijímací anténou zesílené či zeslabené záleží na vzájemném fázovém posuvu těchto vln. Naměřené hodnoty závisí rovněž na výšce přijímací antény nad zemní rovinou.



Obr. 3.15: Minimální rozměry kovové zemní roviny, $D = d + 2 \text{ m}$, $W = a + 2 \text{ m}$, d - maximální rozměr zkoušeného zařízení, a - maximální rozměr antény [4]

Anténa je umístěna na nevodivém stožáru, který umožňuje její pohyb v rozmezí výšek 1 m až 4 m, popřípadě 2 m až 6 m pro měření, kde je R větší než 10 m. Polarizaci antény je možné měnit jejím natáčením do vertikální a horizontální polohy. Zkoušené zařízení se nachází na dřevěném stole ve výšce 80 cm nad zemí. Deska stolu nebo část vodivé podlahy (tzv. točna), na níž je stůl postaven, umožňuje natáčení zkoušeného zařízení vzhledem k anténě. Zařízení, které je provozováno na podlaze, při měření umístíme na vodivou podlahu přes 15 cm silnou izolaci. Nabývá-li zkoušené zařízení velkých rozměrů a jeho otáčení je problematické, měření probíhá v místě prostém odrazů o kruhovém půdorysu. Zkoušené zařízení se nachází ve středu kruhu a přijímací anténa se pohybuje kolem tohoto zařízení.



Obr. 3.16: Rozměry měřicího stanoviště kruhového půdorysu [4]

Není-li možné dodržet normalizované rozměry měřicího stanoviště, lze elektromagnetické emise měřit i na jiných místech. Zachován zůstává požadavek na vzdálenost zkoušeného zařízení a antény R , tato hodnota navíc určuje minimální vzdálenost okolních odrazivých předmětů od těchto dvou prvků. Dále je podstatný tzv. útlum měřicího stanoviště SA [dB], ten je dán jako rozdíl skutečného útlumu měřicího prostoru a teoretické hodnoty ideálního útlumu. Často je nutné měřit zkoušené zařízení přímo v pracovním prostředí. V tom případě není možné dodržet požadavky na měřicí stanoviště a pozornost je věnována zejména omezení vlivu okolních signálů a stanovení charakteru elektromagnetického pozadí, které je potřeba brát v úvahu při zpracování naměřených hodnot.

3.3.2 Měření v elektromagneticky stíněném prostoru

V současné době dochází k rozšíření zařízení využívajících ke své činnosti elektromagnetické pole, důsledkem toho může nastat problém při výběru měřicího stanoviště. Úroveň elektromagnetického pozadí často přesahuje požadované hodnoty, pokud se tato úroveň mění v čase, je při zpracování naměřených hodnot velice obtížné vliv okolních signálů eliminovat. V extrémních případech může elektromagnetické pozadí

úplně překrýt rušivý signál produkovaný zkoušeným zařízením. Abychom se takovým situacím vyhnuli, měření probíhá v elektromagneticky odstíněných komorách. Uvnitř kvalitně stíněné komory se okolní elektromagnetická pole prakticky neprojeví. Dosahuje se hodnoty útlumu 80 dB až 120 dB. Komora je tvořena kovovými plechy, jejichž spoje jsou dokonale utěsněné. Veškeré otvory, jako například dveře, vývody ventilačního systému a vývody kabelů jsou provedeny tak, aby nesnižovaly účinnost stínění. Stíněné komory bývají konstruované pro frekvence 100 kHz až 10 GHz. Rozměry stíněné komory musí být dostatečné pro měřicí uspořádání eliptického půdorysu a také pro pohyb přijímací antény do požadované výšky 4 m nebo 6 m. Anténní kabel, který přivádí napětí do měřicího přijímače umístěného mimo komoru, bývá realizován pomocí optických vláken, nebo je alespoň důkladně odstíněn. Napájení měřicího systému a zkoušeného zařízení by mělo být oddělené. Splnění těchto podmínek však není zárukou reprodukovatelnosti měření.

Stíněná komora je v principu dutý uzavřený kovový kvádr, proto se chová jako dutinový rezonátor. Ten má velkou hodnotu vlastního činitele jakosti a rezonance může nastat při teoreticky nekonečném množství frekvencí. Rezonance mohou nastávat i v měřeném pásmu frekvencí, a tak výrazně ovlivňují výsledky měření. Řešením je snížit vlastní činitel jakosti. Toho dosahujeme umístěním absorberů do míst v prostoru komory, kde se vyskytují maxima elektrického pole rezonančních vidů. Tím totiž docílíme nárůstu ztrát rezonátoru pro jednotlivé vidy a rezonance pak nenastává.

Jelikož je stíněná komora kovová, dochází na vnitřních stěnách k mnohonásobným odrazům elektromagnetických vln, navíc s minimálním útlumem. Výsledný signál přijatý anténou je superpozicí přímé vlny a množství odražených vln z různých směrů a s různými fázovými posuvy. Vlastnosti odražených vln nelze přesně stanovit, proto se ve výsledcích měření uplatňuje větší či menší chyba. Pokusy prokázaly, že chyba může dosahovat až 20 dB. Abychom snížili vliv odrazů na výsledky měření, doporučuje se měřit v rozměrných stíněných komorách, aby se prodloužila dráha, kterou vlny musí k anténě urazit. Tím se utlumí velikost odražených vln. Vhodným opatřením je použití antény s vysokou směrovostí. Taková anténa zachycuje téměř výhradně přímou vlnu ze směru od zkoušeného zařízení a odražené vlny z ostatních směrů potlačuje.

3.3.3 Měření v bezodrazové stíněné komoře

Nejefektivnějším způsobem potlačení vlivu odražených vln je obložit vnitřní stěny výše uvedené stíněné komory absorbéry, které pohlcují energii těchto nežádoucích vln. Tím pak vzniká tzv. bezodrazová komora, která je nejvhodnějším měřicím stanovištěm pro měření rušivých emisí pomocí všech typů měřicích snímačů. Rozlišujeme dva typy bezodrazových stíněných komor. Plně bezodrazové komory mají všechny stěny, strop i podlahu obloženy absorpčním materiálem. Částečně bezodrazové komory mají absorbéry obloženy jen stěny a strop. Podlaha zůstává vodivou plochou a svým chováním plní funkci odrazné zemní roviny.

Princip absorpčního obložení spočívá v tom, že energie dopadajících elektromagnetických vln se pohlcením přeměňuje na teplo. Jako absorpční materiál slouží ferit, u něhož se uplatňuje magnetická ztráta a pěnové materiály, u nichž se uplatňuje dielektrická ztráta. Druhá kategorie je výrazně levnější, a tedy používanější. Těmito materiály jsou například polyuretan nebo polystyren, hodnota jejich ztrátového činitele se reguluje pomocí grafitového plnidla. Ačkoli je žádoucí, aby hodnota ztrátového činitele použitého absorpčního materiálu byla co nejvyšší, umístit takový materiál samotný na vodivou stěnu nelze. Ztrátový materiál má totiž díky vysoké permitivitě mnohem menší vlnovou impedanci než volný prostor uvnitř komory a na přechodu impedancí by docházelo k částečnému odrazu vlny zpět do vnitřního prostoru komory. Tím vzniká požadavek na ideálně spojitou změnu parametrů absorbérů. V praxi se postupné změny parametrů dosahuje vrstvením až pěti absorbérů na sebe. Každá z těchto vrstev má odlišné absorpční vlastnosti.

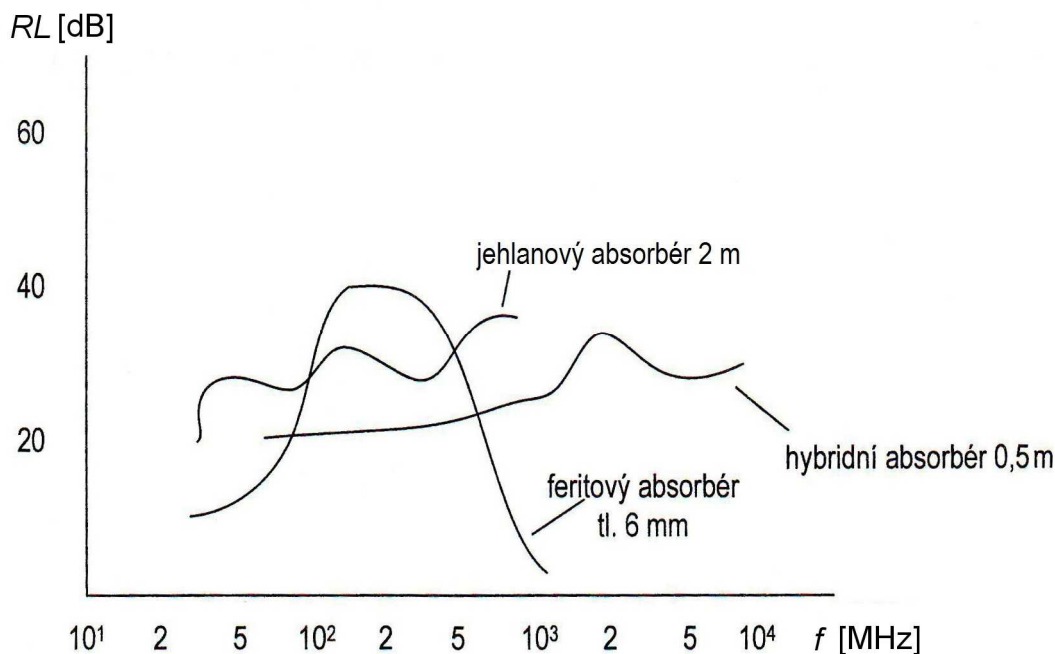


Obr. 3.17: Vrstvení absorbérů [4]

Permitivita první vrstvy ϵ_1 se blíží permitivitě vzduchu, se kterým je tato vrstva v kontaktu. V dalších vrstvách permitivita malými skoky narůstá až na maximální hodnotu ϵ_5 v poslední vrstvě, která je ve styku s vodivou deskou stínění. Stejná zákonitost platí i pro ztrátový činitel $tg\delta$. Je tedy patrné, že počáteční vrstvy slouží jako impedanční přizpůsobení a energie je z větší části pohlcena až poslední vrstvou. Tloušťka těchto absorbérů je závislá na rozsahu měřených frekvencí. Platí, že celková tloušťka obkladu by neměla být menší než čtvrtina vlnové délky při nejnižší měřené frekvenci. Pro praktická měření v řádu stovek MHz to znamená, že tloušťka obkladu se pohybuje kolem 50 cm. Použitím dražšího feritu lze obklad ztenčit. Ferit má velkou hodnotu ztrátového činitele a zároveň vhodný poměr permitivity a permeability, takže hodnotou vlnové impedance se blíží volnému prostoru.

Vytvarováním pěnového materiálu s dielektrickými ztrátami do plného či dutého jehlanu lze docílit spojitě změny vlnové impedance absorbéru i při konstantním sycení grafitem. Oblast špičky jehlanu je absorbérem zaplněna minimálně a vlnová impedance je blízká impedanci volného prostoru. Jak zaplnění absorbérem narůstá, roste i vlnová impedance a ztráty. Prostor základny jehlanu je absorbérem celý zaplněn, a proto je zde impedance minimální a přeměňuje se zde většina energie dopadající vlny. V praxi se špička jehlanu sytí grafitem méně než jeho zbytek pro dodatečné zvýšení bezodrazovosti. I zde platí, že tloušťka absorbéru, v tomto případě tedy výška jehlanu, by měla převyšovat čtvrtinu vlnové délky dopadajících vln. Ve skutečnosti ale jehlanové absorbéry dosahují dostatečně velkého útlumu i při svých menších výškách. To je dáno malým vrcholovým úhlem jehlanů. Pokud totiž na povrchu jehlanu dojde k částečnému odrazu vlny, směřuje odražená vlna vždy do sousedního jehlanu a nikoli zpět do volného prostoru. Tento problém řešíme pouze při nízkých frekvencích, pro vlny o vysoké frekvenci je bezodrazovost velmi vysoká. Často se setkáváme s hybridními absorbéry, které jsou kombinací feritových destiček a výše uvedených jehlanů. Tyto absorbéry dosahují požadované bezodrazovosti pro široké pásmo frekvencí, což je znázorněno na frekvenční závislosti útlumu odrazu RL (obr. 3.18). Útlum odrazu je definován jako podíl velikostí výkonu odražené a přímé vlny vyjádřen v [dB]. [4]

$$RL = 20 \log \frac{P_o}{P_p} \quad (3.4)$$



Obr. 3.18: Frekvenční závislost útlumu odrazu pro různé typy absorbérů [4]

4 Laboratorní měření

4.1 Teoretický úvod

Základním cílem měření elektromagnetických emisí je ověřit, zda zkoušené zařízení, které před uvedením na trh podstupuje certifikační testy, splňuje normou stanovené limity maximálních hodnot produkovaného rušení. Při vývoji daného zařízení je na požadavek EMC brán zřetel již od samého počátku, což má za následek množství vývojových měření emisí. Důležitým krokem je také měření elektromagnetické odolnosti, to však není předmětem této práce.

Měření elektromagnetických emisí bývá dnes obvykle automatizované a jako takové sestává z několika kroků. Prvním je předběžné měření spektra, tzv. prescan. Jedná se o rychlé orientační měření, jehož cílem je celý výsledný proces usnadnit. Nejčastěji se pro toto měření používá detektor vrcholové hodnoty. Prescan nám dává informaci, jaké přibližné úrovně rušení dosahuje, a tomu lze přizpůsobit metody a přístroje pro důkladné konečné měření. Pokud během prescanu zjistíme, že jsou hodnoty rušení výrazně nižší než přípustná mez, není následného konečného měření potřeba. Dalším důvodem pro provedení předběžného měření je zjištění frekvencí, při nichž dosahuje rušení špičkových hodnot. Na tyto frekvence je vhodné se dále zaměřit. Důležitým výstupem je časový odhad

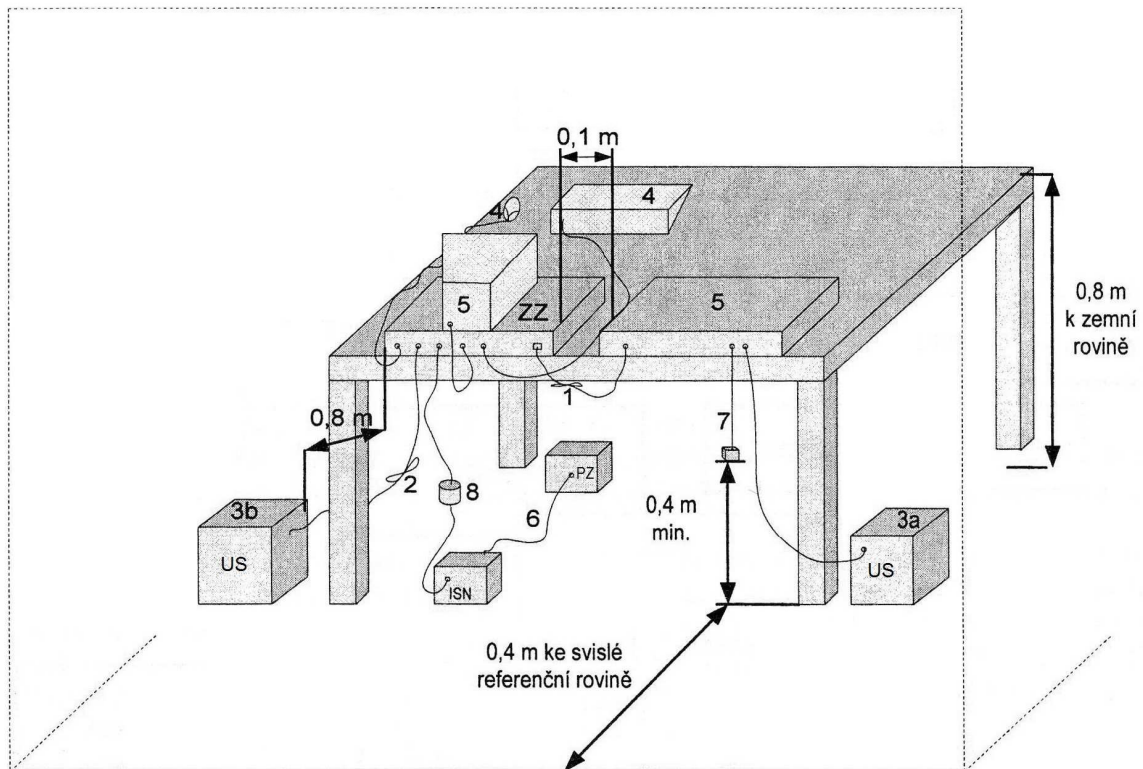
trvání konečného měření. Druhým krokem procesu měření je redukce dat. Při tomto kroku se snižuje počet dat naměřených během prescanu například oddělením signálů elektromagnetického pozadí od emisí zkoušeného zařízení. Třetím krokem je maximalizace emisí a konečné měření. Toto měření je důkladné a musí probíhat přesně dle normy. Zkoušené zařízení je před začátkem měření v provozním režimu nejméně 15 minut. Určují se nejvyšší hodnoty emisí v definovaných frekvenčních pásmech. Maximalizace rušení dosahujeme změnou provozních stavů, úpravou metod a změnou uspořádání měřicího stanoviště. Například u rušení šířeného vodičem měříme na různých místech kabelu a zkoušíme jednotlivé žíly tohoto kabelu. U rušení přenášeného elektromagnetickým polem měníme výšku přijímací antény a postupně měříme emise ve všech směrech od zkoušeného zařízení. Pro konečné měření volíme typ detektoru podle toho, jakými hodnotami jsou definovány přípustné meze. Posledním krokem je zpracování naměřených dat. Výsledkem celého procesu měření je vypracování zprávy. Tato zpráva musí obsahovat náležitosti dané Evropskou směrnicí 2001/108/ES. Součástí směrnice je dále například požadavek na archivaci dokumentace po dobu 10 let. [4]

Měření emisí probíhá na standardizovaných měřicích stanovištích, aby bylo docíleno reprodukovatelnosti měření. V některých případech to však není možné. Jedná se o zkoušky těch zařízení, která měřicí stanoviště není schopné pojmout nebo o zařízení, která pro svůj provoz vyžadují zázemí, jež na měřicím stanovišti nelze poskytnout. Pak měření probíhá u výrobce nebo v místě provozu. Jelikož mohou být výsledky měření ovlivněny nestandardními podmínkami měření, jsou platné jen v měřených prostředích. Pouze jsou-li výsledky shodné pro tři různá prostředí, lze je prohlásit za reprezentativní pro všechny prostředí, ve kterých panují obdobné podmínky.

Uvažujme, že zkoušené zařízení patří do kategorie zařízení informační techniky (ITE). Ta zahrnuje zařízení, jejichž primární funkcí je operace se zprávami datového a telekomunikačního charakteru, vyjma rádiového vysílání a příjmu. Vstupní napětí nepřesahuje 600 V. Měření emisí zařízení ITE specifikuje norma ČSN EN 55022 Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření. Vztahuje se na frekvenční pásmo 9 kHz až 400 GHz, avšak určuje meze pouze pro některé rozsahy frekvencí. Norma rozděluje ITE do dvou tříd. Třída A obsahuje zařízení, která splňují meze třídy A, ale nespĺňují meze třídy B. Zařízení třídy A musí ve vnitřním prostředí svým označením informovat o skutečnosti, že mohou být zdrojem rádiového

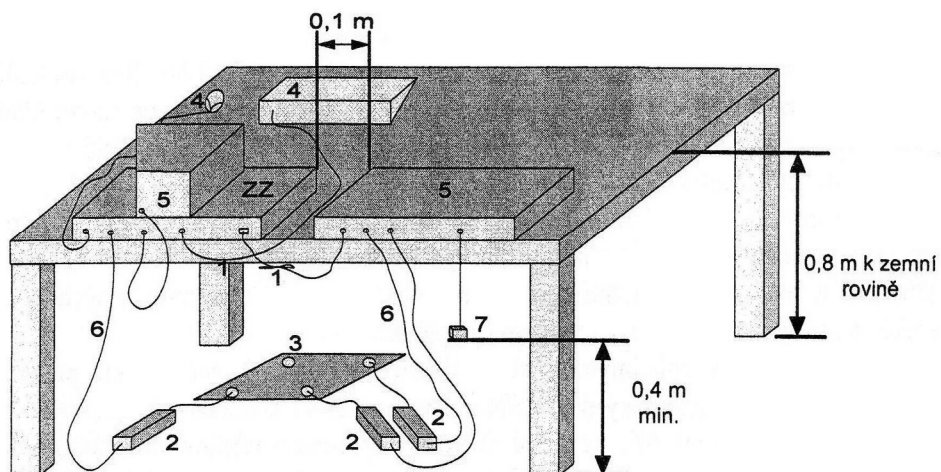
rušení. Třída B obsahuje zařízení, která splňují meze třídy B. Taková zařízení jsou primárně určena k provozu ve vnitřním prostředí, tj. v prostředí, v němž ve vzdálenosti do 10 m od ITE mohou být provozovány rozhlasové a televizní přijímače. Je pochopitelné, že meze třídy A jsou vyšší než meze třídy B. Meze rušivého napětí a proudu na svorkách ITE jsou stanoveny jako kvazivrcholové a střední hodnoty v rozsahu frekvencí od 150 kHz do 30 MHz. Meze rušivého pole jsou stanoveny jako kvazivrcholové hodnoty v rozsahu frekvencí od 30 MHz do 1 GHz.

Uspořádání měřicí sestavy pro měření rušivého svorkového napětí je závislé na tom, kde je zařízení při běžném provozu umístěno. Na *obr. 4.1* je uveden příklad uspořádání pro zkoušené zařízení (osobní počítač) provozované na stole. Počítač je umístěn na dřevěném stole o výšce 0,8 m nad zemní rovinou. Hrana počítače je zarovnána s hranou stolu. Ve vzdálenosti 0,4 m od počítače se nachází svislá kovová referenční rovina s minimálními rozměry 2 x 2 m. Periferie (5) jsou vzdáleny 10 cm, monitor může být umístěn přímo na počítači. Kably v perifériím (4) jsou vedeny v blízkosti počítače. Počítač je napájen z umělé sítě (3b) položené na zemní rovině. Periferie jsou napájeny z druhé umělé sítě (3a). Přidružená zařízení (6) jsou k počítači připojena přes impedančně stabilizační člen. V jeho blízkosti je možné měřit proudovou sondou (8). Dlouhé kably (1) a (2) jsou v polovině délky smotány tak, aby se nepřiblížily k zemní rovině a svislé referenční rovině na méně jak 40 cm. Připojené telekomunikační kably (7) jsou impedančně zakončeny. K uvedené sestavě je připojený měřicí přijímač. Síťové rušení měříme pomocí umělé sítě US, rušení na telekomunikačních svorkách měříme pomocí impedančně stabilizačního členu ISN.



Obr. 4.1: Uspořádání měřicí sestavy pro měření rušivého svorkového napětí [4]

Příklad uspořádání měřicí sestavy pro měření rušivého pole si ukážeme rovněž pro osobní počítač (obr. 4.2). Umístění počítače na stole je totožné s umístěním pro měření rušivých napětí. Liší se ale tím, že umělé sítě jsou ukryty v šachtě pod kovovou zemní rovinou (3). Veškeré kabely, které jsou do této šachty vyvedeny (6), musí být opatřeny feritovými kleštěmi (2).

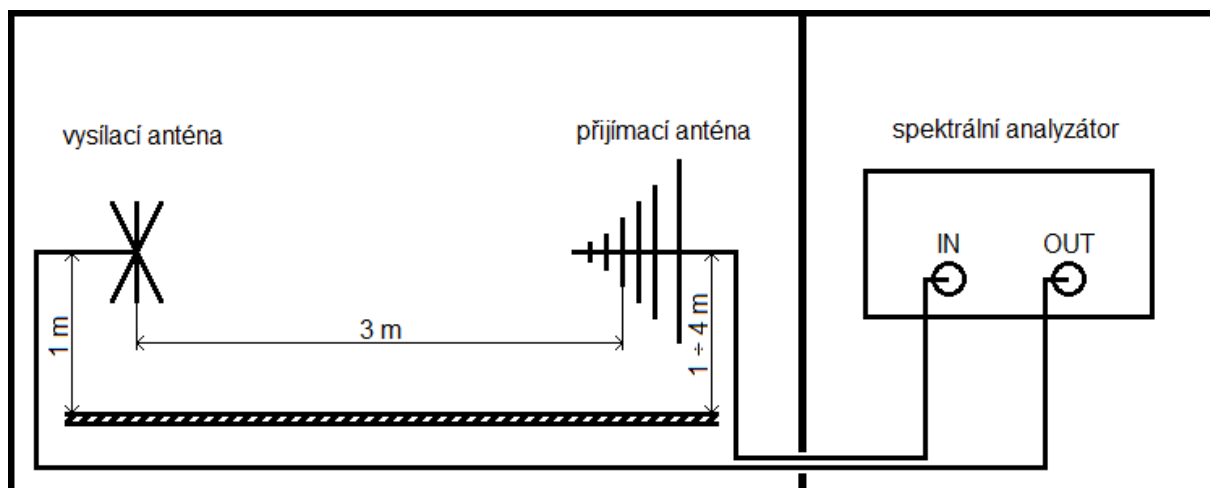


Obr. 4.2: Uspořádání měřicí sestavy pro měření rušivého pole [4]

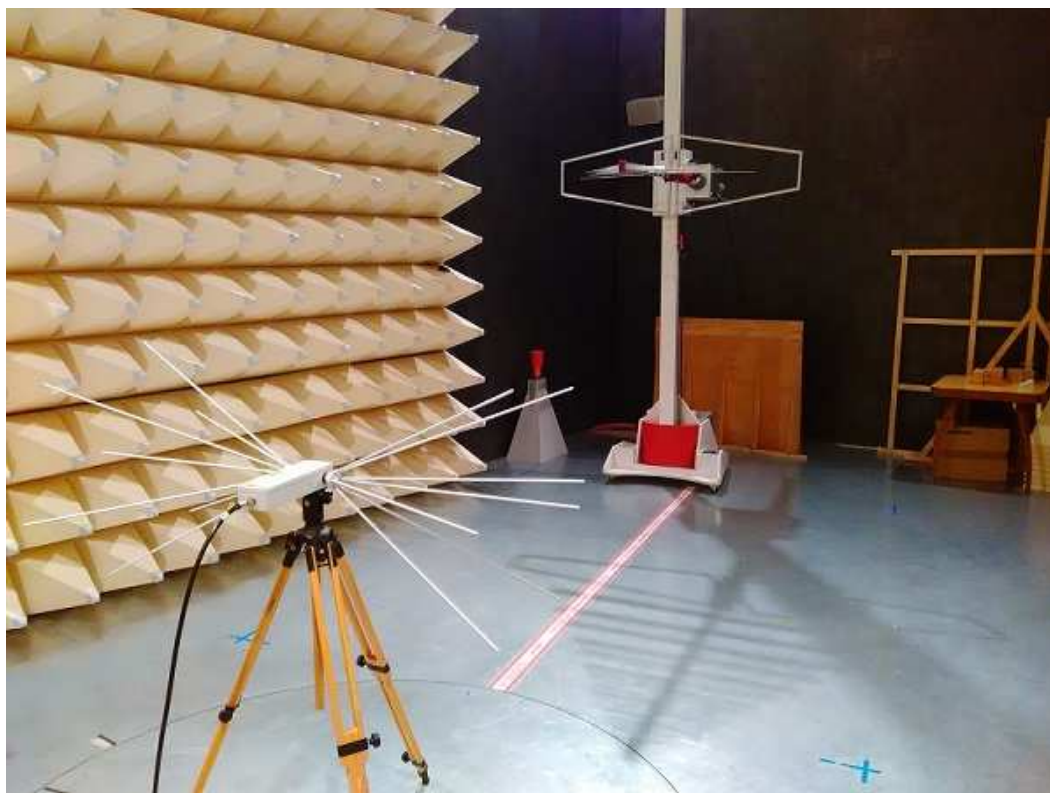
Je-li zkoušené zařízení tzv. multifunkčním zařízením a svými vlastnostmi se zařazuje do více kategorií zařízení, vztahuje se na něj více norem. Například počítač rozšířený o televizní příjem se pro měření dle normy ČSN EN 50022 měří jako ITE bez funkce televizního přijímače a pro měření dle normy ČSN EN 55013, týkající se rádiových přijímačů, naopak se zapnutou funkcí. Pokud nelze funkci oddělit, naměřené hodnoty se porovnávají s limity stanovenými základní normou ČSN EN 50022.

4.2 Postup měření

Laboratorní měření probíhalo v částečně bezodrazové komoře značky Frankonia, která je k měření elektromagnetických emisí vhodná. Podlahu tvoří odrazné kovové plechy, boční stěny a strop jsou pokryty absorpčními feritovými obklady o tloušťce 22 mm. Část povrchu tvořeného těmito obklady je navíc vybavena absorbéry z dutých jehlanů o délce 450 mm. Společně tvoří hybridní absorbér FrankoSorb H450-A2 vhodný pro měření v pásmu frekvencí 30 MHz až 40 GHz [6]. Jako zdroj emisí sloužila bikónická anténa PMM BC-01 určená pro pásmo 30 MHz až 200 MHz [7]. Její široký vyzařovací diagram simuloval reálné testované zařízení, které vyzařuje rušivé elektromagnetické pole do všech směrů. Vysílací anténa byla po celou dobu měření umístěna na trojnožce ve výšce 1 m a nacházela se v horizontální poloze. Jako přijímací anténa byla vybrána anténa Frankonia BTA-M. Jedná se hybridní širokopásmovou anténu, která je kombinací logaritmicko-periodické struktury pro vyšší frekvence a širokopásmového dipólu pro nižší frekvence. Výsledné frekvenční pásmo pak je 30 MHz až 3 GHz [8]. Anténa byla umístěna na stožáru polohovacího zařízení Frankonia FAM2-4 [9], které umožňuje anténu posouvat v rozmezí výšek h 1 m až 4 m. Polarizace antény se během měření měnila. Vzdálenost mezi referenčními body vysílací a přijímací antény byla 3 m.



Obr. 4.3: Schéma měření elektromagnetických emisí



Obr. 4.4: Skutečné uspořádání měřicího stanoviště

Obě antény byly vyvedeny do spektrálního analyzátoru ROHDE&SCHWARZ ESR7 umístěném v ovládací místnosti. Na výstup spektrálního analyzátoru byla připojena vysílací anténa. Analyzátor, pro vysílací anténu chovající se jako zdroj, na ni přiváděl signál o frekvenci 30 MHz až 1 GHz a výkonové úrovni -3 dBm. Na vstup analyzátoru byla připojena přijímací anténa. Signál, který zachytila, putoval do analyzátoru, nyní jako měřicího přijímače. Během měření byly nastaveny následující parametry.

- $f = 30 \text{ MHz} \div 1 \text{ GHz}$
- $RBW = 100 \text{ kHz}$
- sweep point = 10001
- $AH = 0 \text{ dB}$
- předzesilovač: vypnutý

Měřicí přijímač zaznamenával výkonovou úroveň L [dBm] v závislosti na frekvenci f [MHz]. Data byla vyjádřena graficky na displeji přístroje a zároveň ukládána ve formě textového souboru.

První měření probíhalo pro kovovou podlahu. Hodnoty byly zaznamenávány při výšce přijímací antény od 100 cm do 400 cm s krokem 25 cm. Posun antény a její orientace byly pomocí počítače dálkově řízeny z ovládací místnosti. Během vzestupu byla anténa polarizována horizontálně a během sestupu pak vertikálně. Zda je anténa v požadované výšce a zda je správně orientována bylo možné kontrolovat pomocí kamerového systému, který měřicí prostor monitoroval. Výstupem z tohoto měření jsou dvě sady hodnot: pro kovovou podlahu s horizontální polarizací přijímací antény a pro kovovou podlahu s vertikální polarizací přijímací antény.

Konfigurace pro druhé měření se změnila v tom, že na podlahu v prostoru mezi vysílací a přijímací anténou byly položeny desky s feritovými absorbéry. Celkově zaujímaly plochu 240 x 240 cm. Samotné měření pak sdílí postup s měřením předchozím. Získané další dvě sady hodnot jsou: pro feritovou podlahu s horizontální polarizací přijímací antény a pro feritovou podlahu s vertikální polarizací přijímací antény.

Před posledním třetím měřením byly na desky s ferity navíc položeny absorbéry z dutých jehlanů. Podlaha tedy byla pokryta tzv. hybridními absorbéry. Ani tentokrát se postup měření nezměnil. Byly naměřeny poslední dvě sady hodnot: pro feritovou podlahu s jehlany s horizontální polarizací přijímací antény a pro feritovou podlahu s jehlany s vertikální polarizací přijímací antény.

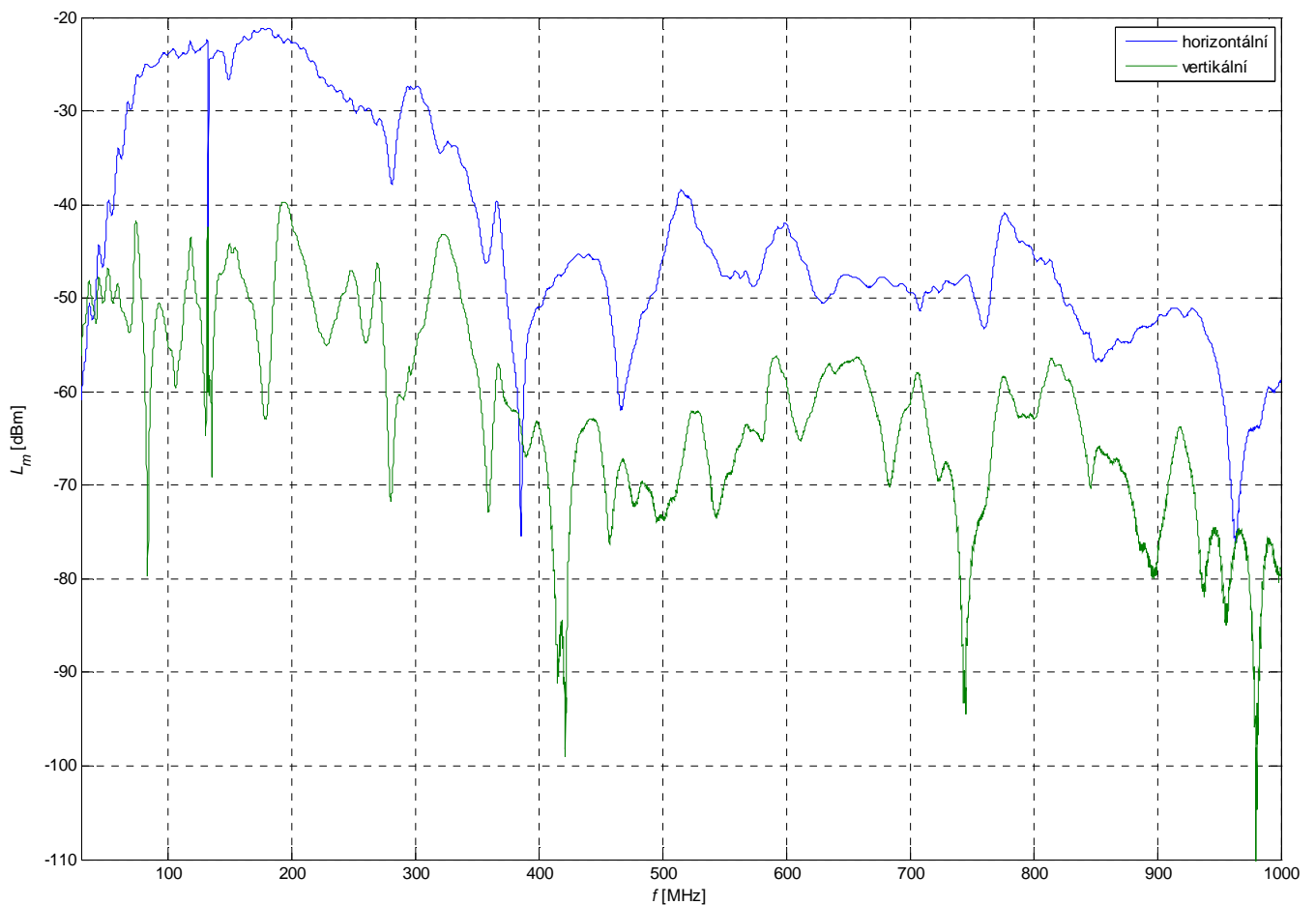
Cílem tohoto měření je určit vliv polarizace antény, výšky antény a odrazivosti zemní roviny na hodnoty naměřených rušivých emisí.

4.3 Výsledky měření

Výstupem měření jsou frekvenční závislosti absolutní výkonové úrovně rušivých emisí. Tyto závislosti jsou graficky vyjádřeny pomocí grafů zpracovaných softwarem MATLAB. Protože bylo naměřeno celkem 78 závislostí, tato práce obsahuje jen vzorek ze všech vytvořených grafů. Aby bylo možné naměřené závislosti porovnávat, obsahují jednotlivé grafy vždy několik závislostí (křivek).

Během celého měření zdroj rušení vyzařoval emise o konstantní velikosti. To znamená, že vzájemné rozdíly v naměřených závislostech jsou dány pouze uspořádáním měřicí sestavy.

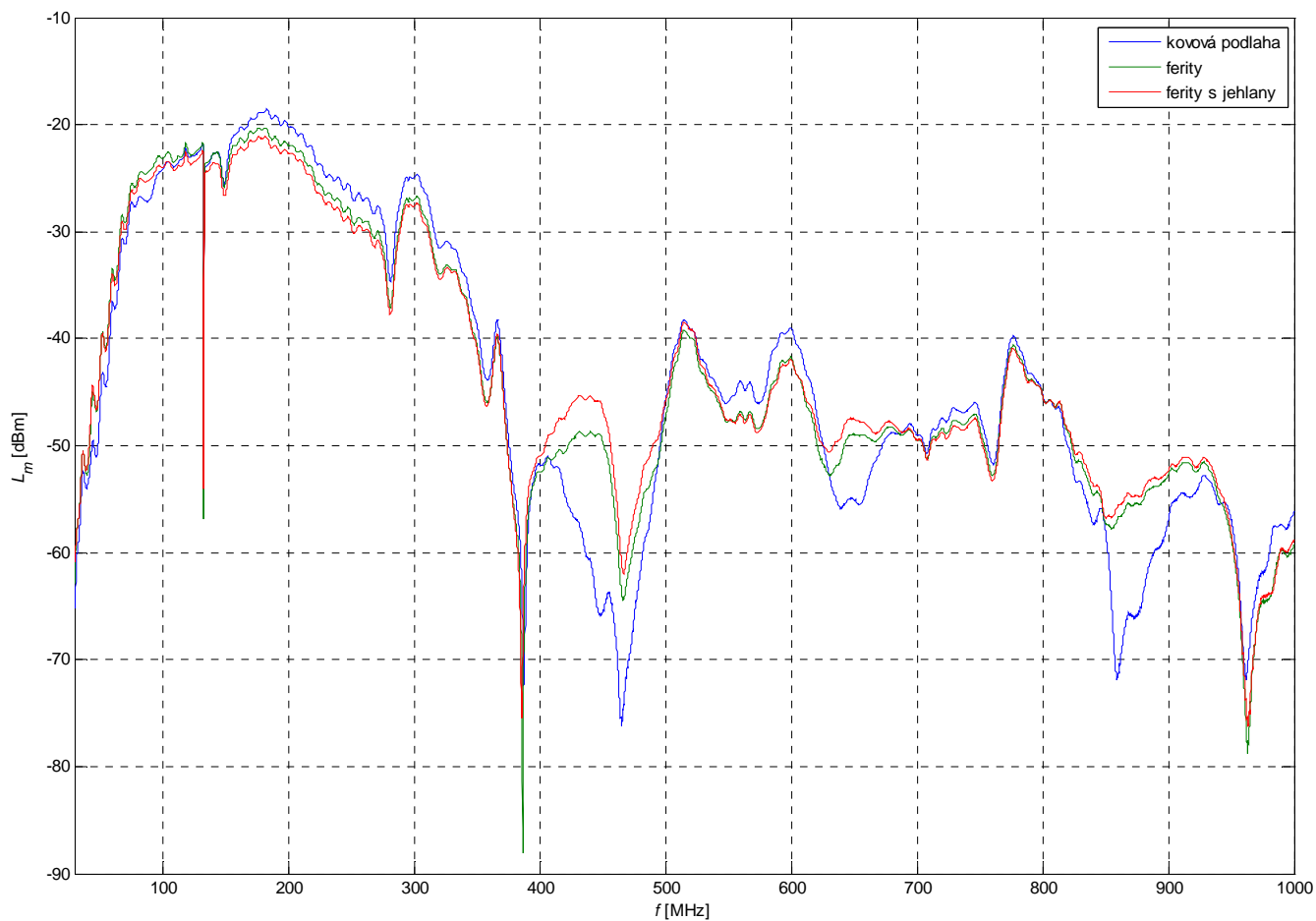
Pro zjištění vlivu polarizace na úroveň rušení zachycenou přijímací anténou byly použity hodnoty při měření v referenční výšce přijímací antény 100 cm a s podlahou pokrytou feritou s jehlami pro potlačení odrazu vln od zemní roviny. Vliv polarizace je zřejmý na *obr. 4.5*. Jelikož je vysílací anténa nahrazující zdroj rušení trvale polarizována horizontálně, podle očekávání jsme naměřili vyšší úroveň rušení při souhlasné polarizaci přijímací antény, tedy také při polarizaci horizontální. Při měření emisí libovolného výrobku před uvedením na trh pochopitelně nelze znát polarizaci zdroje rušení, proto se měří jak při horizontální, tak při vertikální polarizaci přijímací antény. Tím je zaručeno, že zachytíme maximální hodnoty rušení.



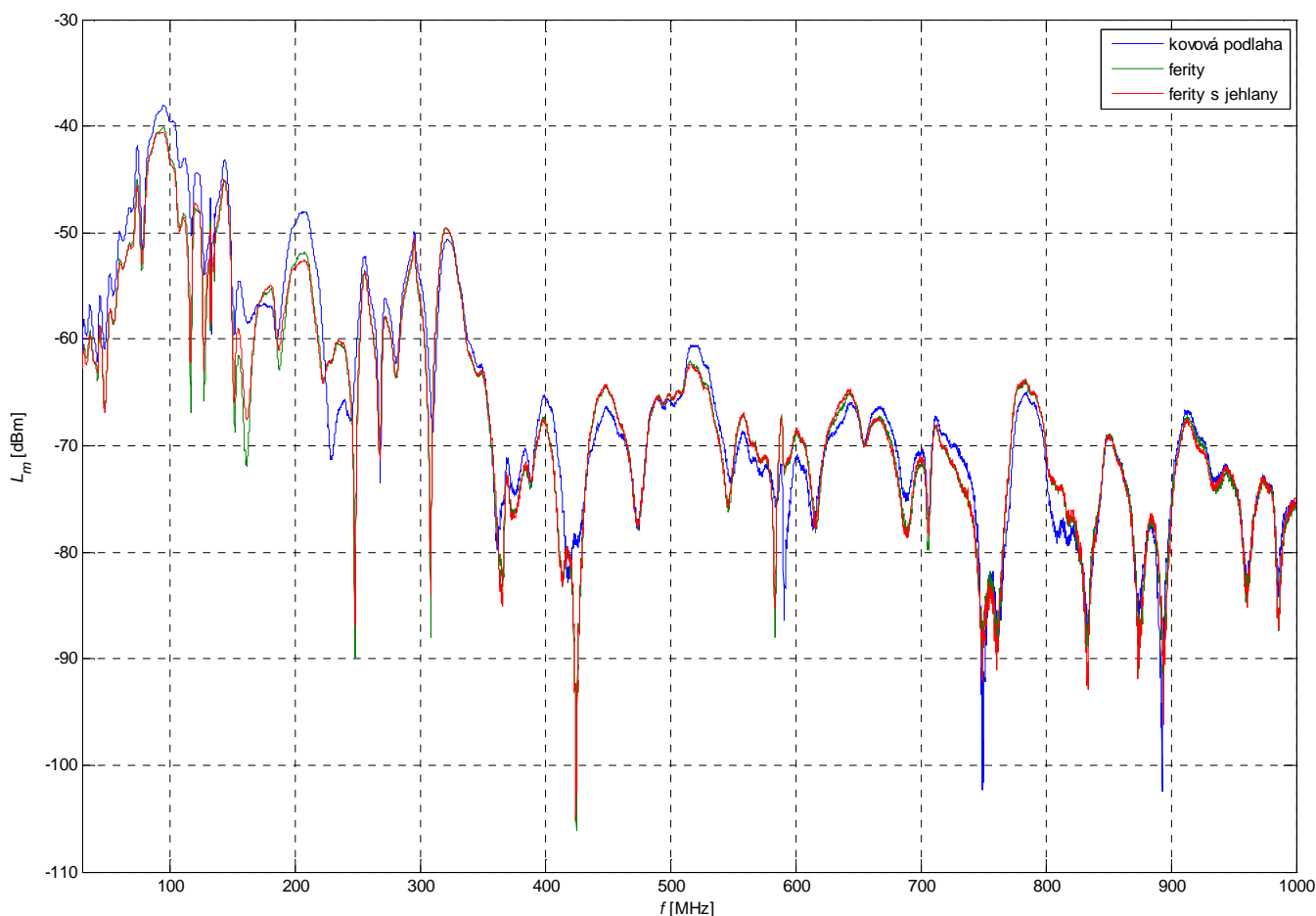
Obr. 4.5: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé polarizace přijímací antény, výška přijímací antény je 100 cm, podlaha je pokryta ferity s jehlany

Odrazivost zemní roviny je velmi důležitým faktorem při měření elektromagnetických emisí. Odražené vlny totiž mohou naměřené rušení zesílit i potlačit. Fázový posuv odražené vlny, tj. zda se k přímé vlně přičítá nebo odečítá, je v případě pevně daného uspořádání měřicího stanoviště závislé na vlnové délce, resp. na frekvenci vlny. Tento fakt lze ukázat na obr. 4.6, kde pro výšku přijímací antény 100 cm a horizontální polarizaci vidíme frekvenční průběhy výkonové úrovně pro tři různě odrazivé typy podlah. Je-li podlaha pokryta ferity s jehlany, dosahuje velmi nízké odrazivosti. Proto lze tento referenční průběh označit za téměř nezávislý na odražených vlnách, tudíž je dán přímou vlnou. Průběhy pro feritovou podlahu a plně odraznou kovovou podlahu jsou superpozicí odražené vlny k vlně přímé. V určitých frekvenčních pásmech (např. 149 MHz až 386 MHz) je průběh pro kovovou podlahu a feritovou podlahu vyšší a v jiných pásmech (např. 386 MHz až 515 MHz) naopak nižší než referenční průběh dle toho, jakou fázi má

odražená vlna. Rozdíl průběhu pro kovovou podlahu vůči referenčnímu průběhu je vždy větší než rozdíl pro feritovou podlahu, to odpovídá několikanásobně vyšší odrazivosti kovové podlahy.



Obr. 4.6: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různá provedení podlahy, výška přijímací antény je 100 cm, polarizace přijímací antény je horizontální



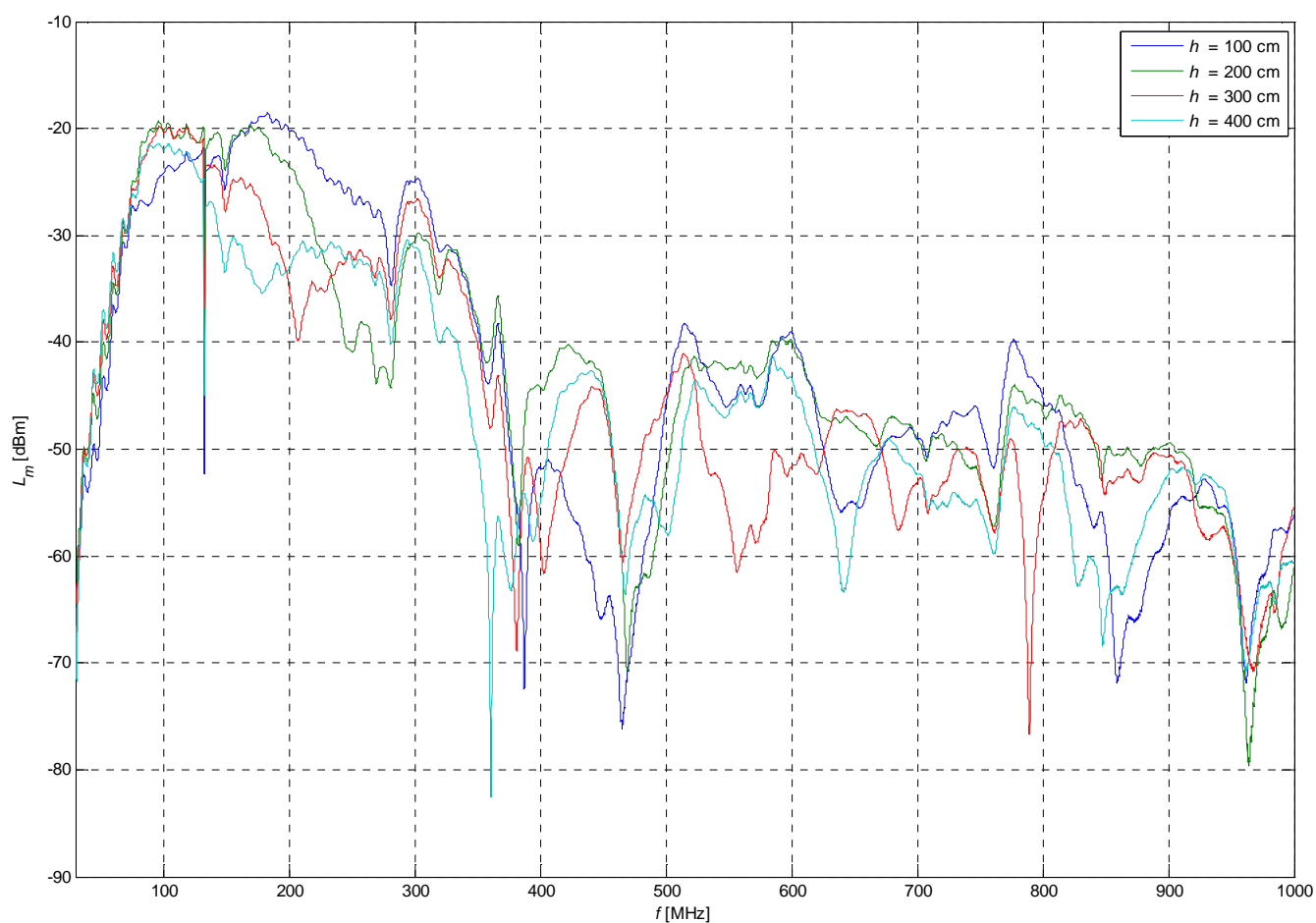
Obr. 4.7: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různá provedení podlahy, výška přijímací antény je 400 cm, polarizace přijímací antény je vertikální

Výška přijímací antény nad zemní rovinou hraje důležitou roli jak pro přímou, tak pro odraženou vlnu. V našem případě, kdy byla vysílací anténa umístěna ve výšce 100 cm, bychom mohli předpokládat, že pokud potlačíme vliv odražených vln, přijímací anténa zachytí nejvyšší úroveň rušení rovněž ve výšce 100 cm. Naopak pokud umožníme odrazy vln, nebude možné předpovídat, v jakých výškách zachytíme přímé a odražené vlny se společnou či opačnou fází. Skutečné měření ale ukázalo, že tyto předpoklady nelze potvrdit. Maximální úrovně rušení byly pro jednotlivá uspořádání zjištěny při následujících výškách přijímací antény.

Tab. 4.1: Výška přijímací antény pro zachycení maximální emise

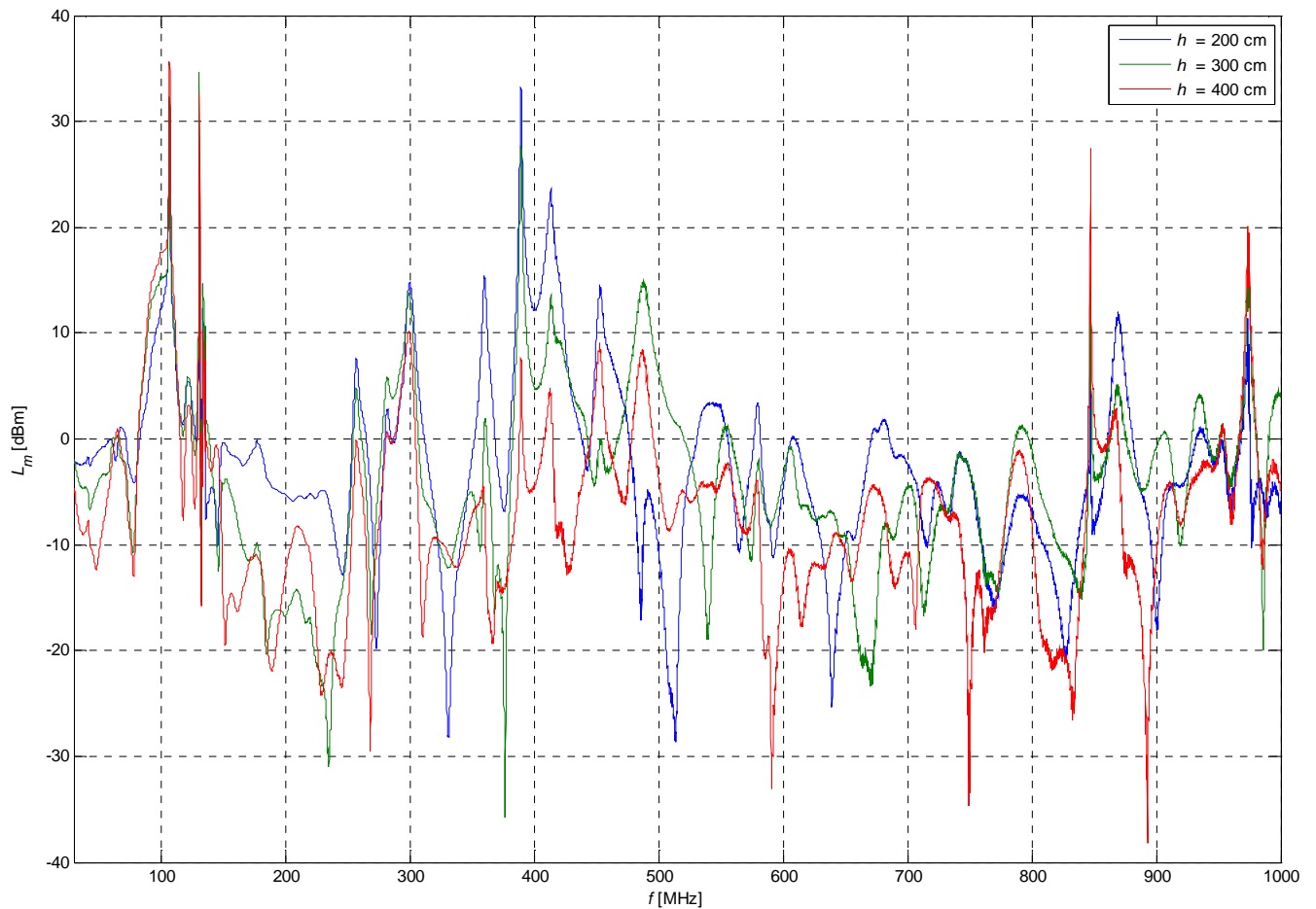
Uspořádání měřicí sestavy	Výška přijímací antény
Odrážná kovová podlaha, horizontální polarizace přijímací antény	125 cm
Odrážná kovová podlaha, vertikální polarizace přijímací antény	100 cm
Feritová podlaha, horizontální polarizace přijímací antény	200 cm
Feritová podlaha, vertikální polarizace přijímací antény	100 cm
Feritová podlaha s jehlany, horizontální polarizace přijímací antény	200 cm
Feritová podlaha s jehlany, vertikální polarizace přijímací antény	125 cm

Tyto výšky byly stanoveny z grafů, kde je společně vykresleno všech 13 křivek pro výšku antény od 100 cm do 400 cm s krokem 25 cm. Tyto grafy jsou již dosti nepřehledné, a proto jsou pouze součástí přílohy. Přehlednějším řešením je *obr. 4.8*, který vyjadřuje průběhy zjištěné úrovně rušení ve výšce přijímací antény celých stovek cm. Jednotlivé křivky se v mnoha frekvencích protínají, ale lokální maxima jsou téměř vždy tvořena průběhy pro nízko umístěnou anténu, tj. ve výšce 100 cm a 200 cm. Z toho vyplývá, že vliv odražené vlny je výraznější, když se přijímací anténa nachází blízko odrazné zemní roviny.

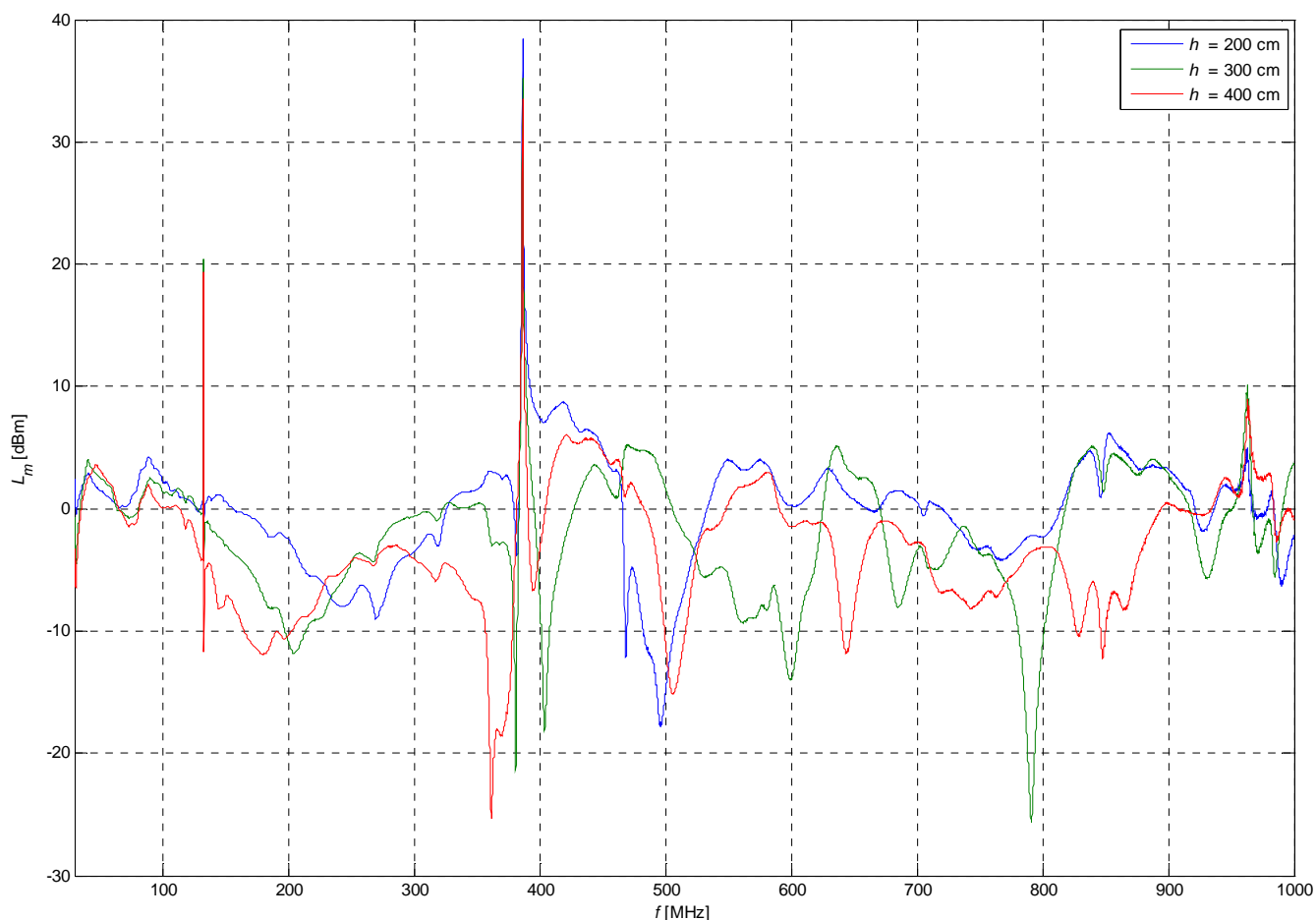


Obr. 4.8: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je odrazná kovová, polarizace přijímací antény je vertikální

Další grafy (obr. 4.9 a obr. 4.10) vyjadřují rozdíl průběhů výkonové úrovně v jednotlivých výškách antény vůči referenční výšce 100 cm.

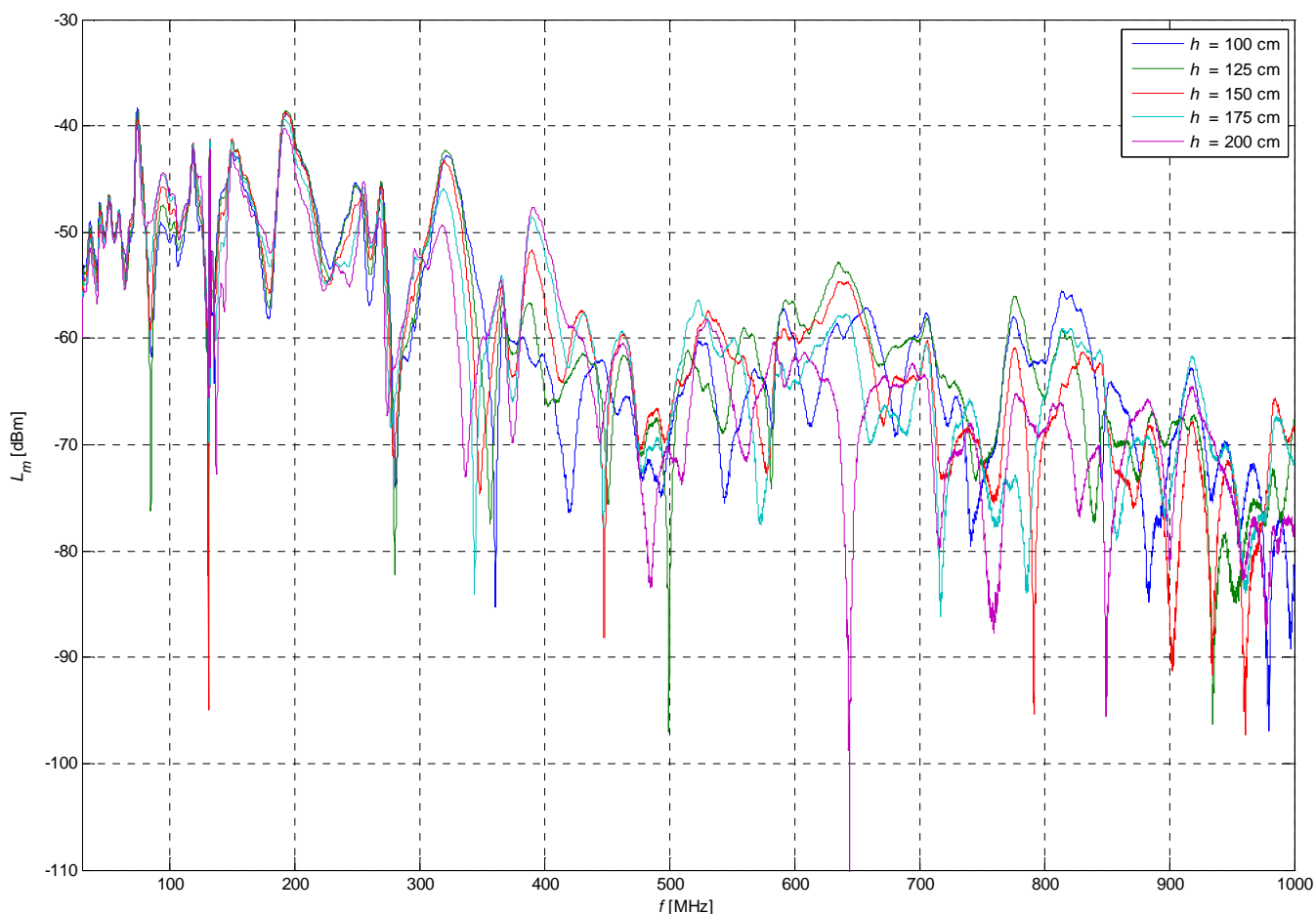


Obr. 4.9: Frekvenční závislost rozdílu absolutní výkonové úrovně pro různé výšky přijímací antény a absolutní výkonové úrovně v referenční výšce antény 100 cm, podlaha je odrazná kovová, polarizace přijímací antény je vertikální



Obr. 4.10: Frekvenční závislost rozdílu absolutní výkonové úrovně pro různé výšky přijímací antény a absolutní výkonové úrovně v referenční výšce antény 100 cm, podlaha je pokryta ferity, polarizace přijímací antény je horizontální

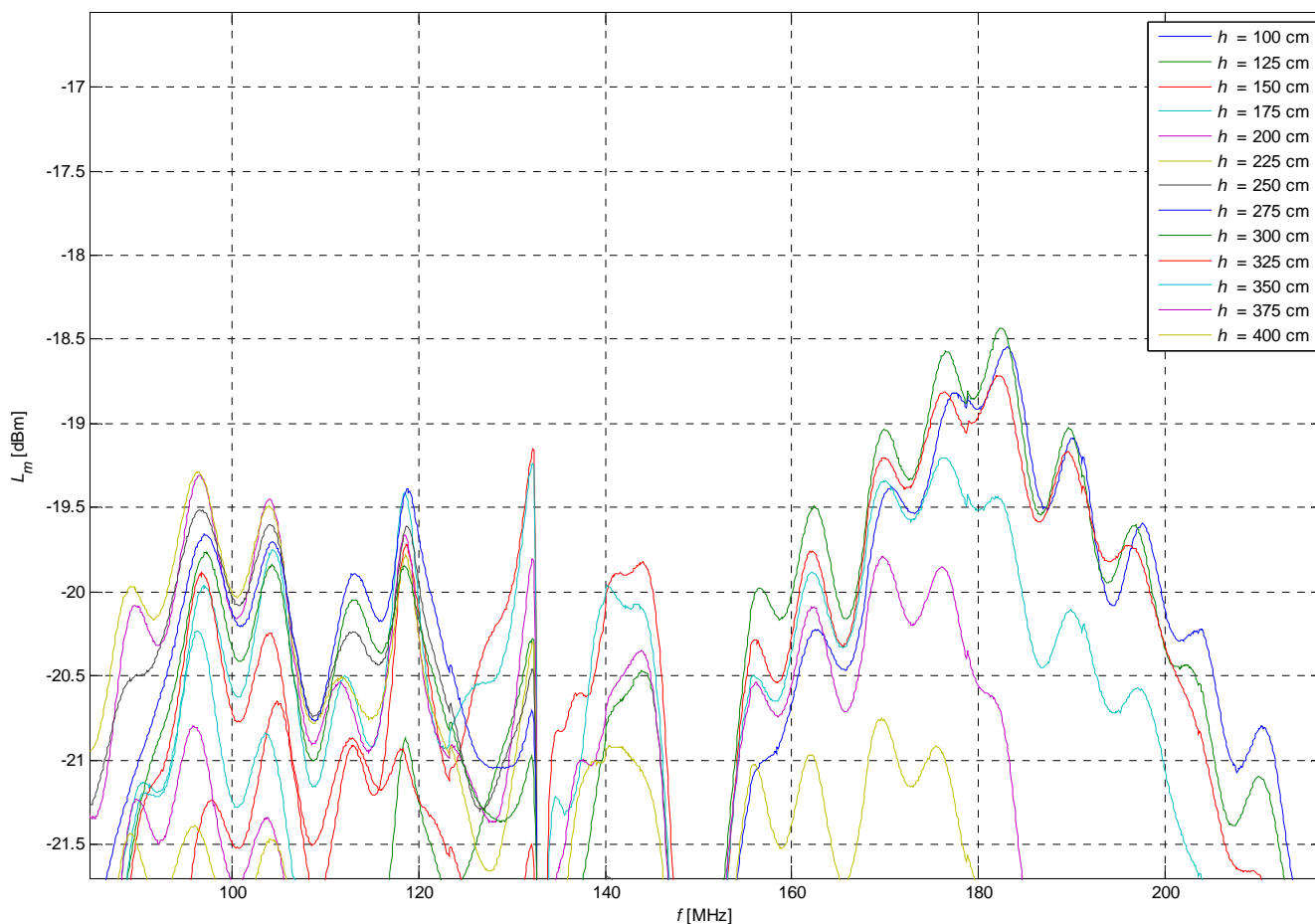
Při měření bylo pozorováno, že při určitých frekvencích měnících se v závislosti na výšce antény dochází k prudkým poklesům naměřené úrovně rušení. Více těchto minim bylo možné zjistit při vertikální polarizaci přijímací antény. Příklad je uveden na obr. 4.11. V tomto grafu dochází k největšímu poklesu při frekvenci 643,9 MHz, výkonová úroveň zde klesla až pod hranici -110 dBm, přesně na -112,1875 dBm. Jelikož k tomuto jevu dochází i při uspořádání, které potlačuje odražené vlny, příčinou tedy nejsou odrazy vln. Mechanismus vzniku těchto poklesů může být složitý, může se také jednat o soustavnou chybu. V našem případě, kdy zkoumáme především maxima rušení, není určení původu poklesů klíčové.



Obr. 4.11: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je pokryta ferity, polarizace přijímací antény je vertikální

Maximální hodnoty z celého měření jsme zaznamenali pro různá uspořádání ve frekvenčním pásmu 50 MHz až 200 MHz, což je zřejmě dáno zdrojem rušivého pole. Použitá bikónická anténa má totiž nejmenší anténní faktor právě v tomto pásmu. Maximální hodnoty byly vždy naměřeny pro kovovou odraznou podlahu. Důvodem je skutečnost, že právě při nižších frekvencích, při kterých vysílací anténa vyzařovala nejsilnější rušení, se odražená vlna převážně přičítala k přímé vlně. To může vyvolat mylný dojem, že chceme-li zaznamenat nejvyšší možnou úroveň rušení, kterou zkoušené zařízení působí na přijímač rušení, měli bychom měřit při uspořádání s kovovou odraznou podlahou. Pokud by se však odražená vlna v kritickém pásmu frekvencí odečítala od přímé vlny, měření s kovovou odraznou podlahou by nezachytilo maximální hodnoty rušení. Pro provozní prostředí daného zařízení nelze předpovídat, jaké má odrazivé vlastnosti. Absolutně nejvyšší úroveň rušení zjištěná během měření činí $-18,4326$ dBm,

a to pro frekvenci 182,3 MHz (obr. 4.12). Uspořádání měřicího stanoviště bylo následující: horizontální polarizace přijímací antény, výška přijímací antény 125 cm a odrazná kovová podlaha.



Obr. 4.12: Výřez závislosti absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je odrazná kovová, polarizace přijímací antény je horizontální

Závěr

Elektromagnetická kompatibilita je sice poměrně mladý vědní obor, i přesto je velice rozsáhlým tématem. Cílem práce bylo seznámit čtenáře se skutečností, že problematika elektromagnetické kompatibility se týká prakticky všech oblastí elektrotechniky. Zdrojem i přijímačem rušení jsou často běžně používaná elektrická zařízení, která významně ovlivňují lidskou společnost. Z toho důvodu je dosažení požadovaného stupně kompatibility věnována dostatečná pozornost.

Důležitým faktorem pro zvolení přístupu k řešení tohoto problému je rozlišení, zda je nežádoucí rušení šířeno prostřednictvím galvanické vazby, kapacitní vazby, induktivní vazby nebo vazby elektromagnetickým polem. Mechanismy těchto vazeb a typické příklady obvodů, u nichž se vazby vyskytují, jsou popsány v kapitole 2. Každý způsob šíření rušení vyžaduje odlišná technická opatření, jimiž elektromagnetické kompatibility dosahujeme. Příklad technických opatření pro omezení galvanické vazby je uveden na *obr. 2.7*.

Třetí kapitola je věnována principu měření elektromagnetických emisí a vybavení, které se při měření používá. Zde je vysvětlen účel měřicího přijímače včetně tří základních typů detektorů. V současnosti, kdy hraje důležitou roli počítačové zpracování dat, je důležitou součástí měřicího přijímače spektrální analyzátor. Popis jednotlivých měřicích snímačů je zúžen na ty, které převádí na napětí pouze veličiny elektromagnetického pole. V praxi se pro standardizované měření emisí používají výhradně antény. Vyjmenovány jsou základní typy včetně stručných charakteristik. Podstatný vliv na výsledky měření má volba měřicího stanoviště. Ze tří popsaných možností se jako nejlepší měřicí stanoviště jednoznačně jeví bezodrazová komora.

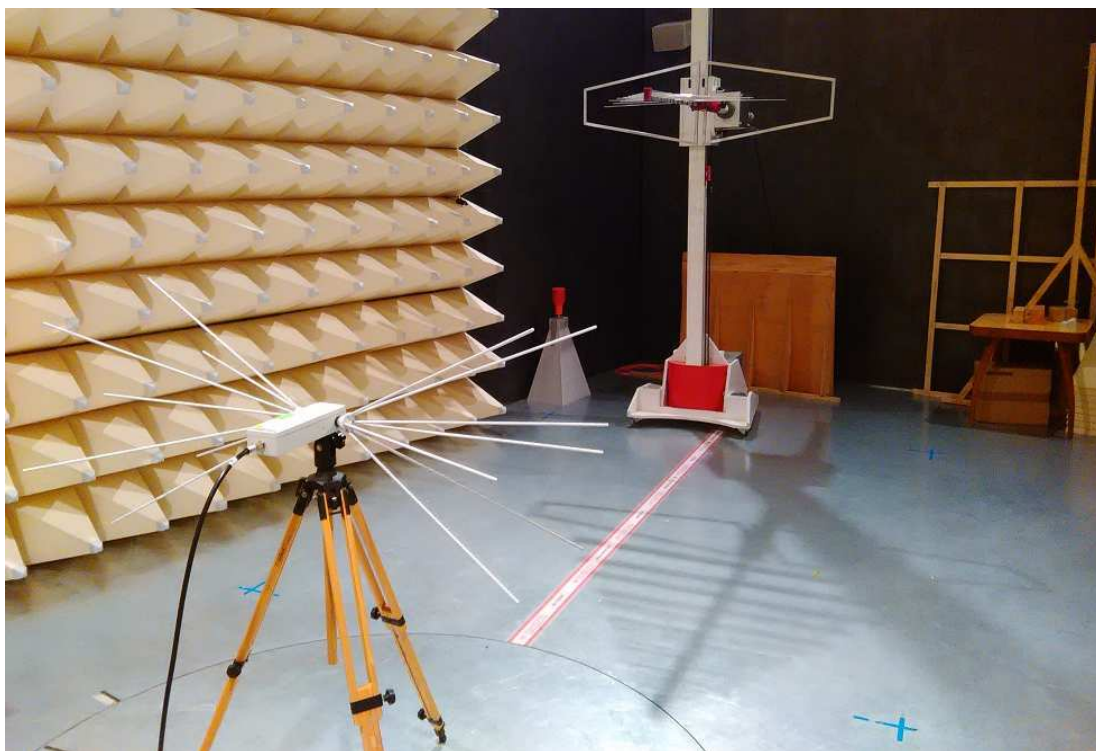
Konkrétní postup měření emisí je vysvětlen na příkladu, kde zkoušeným zařízením je osobní počítač. Laboratorní měření elektromagnetických emisí v bezodrazové komoře je věnováno zachycení vlivu odražených vln od zemní roviny na naměřené hodnoty rušení a také zjištění odlišnosti naměřených hodnot rušení při změně uspořádání měřicího stanoviště. Jako zdroj rušení, tzn. zkoušené zařízení, byla vybrána bikónická anténa. Přijímací širokopásmová anténa v průběhu měření měnila svoji polarizaci a výšku umístění nad zemní rovinou. Měření probíhalo v pásmu frekvencí 30 MHz až 1 GHz pro plně odraznou zemní rovinu tvořenou kovovou podlahou, následně pro podlahu pokrytou feritovými absorbéry a nakonec pro podlahu pokrytou hybridními absorbéry. Úkolem měření bylo stejně jako při certifikačních testech zachytit nejvyšší úroveň rušení produkovanou zkoušeným zařízením. V našem případě bylo nutné polarizovat přijímací anténu horizontálně. Maxima rušení byla zaznamenána pro odraznou podlahu, a to při souhlasném fázovém posuvu odražené vlny vůči vlně přímé. Význam odrazů byl nejvýraznější, nacházela-li se přijímací anténa ve výšce od 1 m do výšky 2 m.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno: UREL, 2009 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/>
- [2] KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ, Irena a KAŇUCH, Ján. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
- [3] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vf rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998. 487 s. ISBN 80-7169-568-8.
- [4] VONDRÁK, Miroslav. *Vybrané stati z elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 131 s. ISBN 80-01-03573-5.
- [5] JONES, Gordon Rees. *Electrical Engineer's Reference Book*. 15. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1993. 1376 s. ISBN 0-7506-1202-9.
- [6] FRANKONIA GmbH, 2013. *Hybrid Absorber Frankosorb H450-A2 datasheet* [online]. 9.7.2013 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Absorbers/FrankoSorb%20H450-A2.pdf
- [7] FRANKONIA GmbH, 2009. *EMC test instruments and components* [online]. 24.9.2009 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: http://www.enelec.es/web/pdfs/castellano/FRANKONIA_Catalogo_instrumentos_y_componentes.pdf
- [8] Narda Safety Test Solutions S. R. L, 2015. *PPM BC-01 datasheet* [online]. 11.6.2015 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: https://www.atecorp.com/ATECorp/media/pdfs/data-sheets/PMM-BC01_Datasheet.pdf
- [9] FRANKONIA GmbH, 2015. *Antenna mast - FAM2-4/FAM2-6 datasheet* [online]. 23.9.2015 [cit. 20.5.2017]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Accessories/FAM_01.pdf

Přílohy

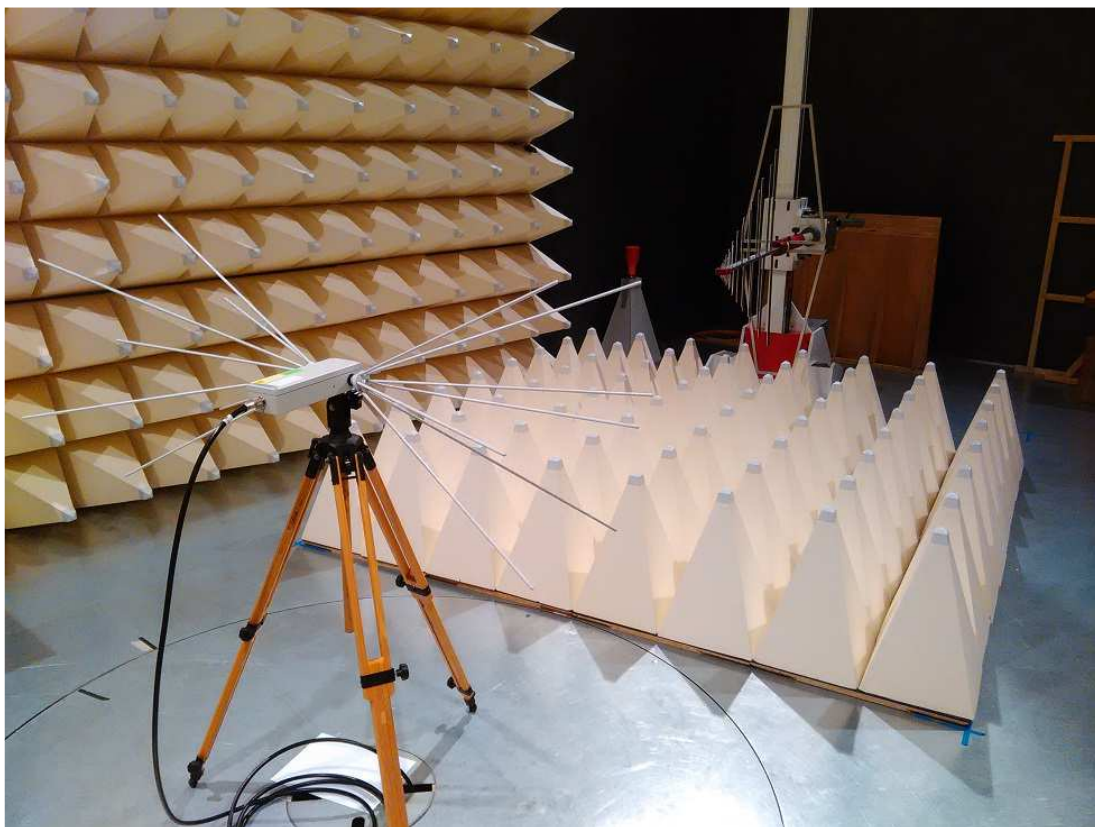
Příloha A – Fotografie



Obr. A.1: Měřicí stanoviště v uspořádání s odraznou kovovou podlahou



Obr. A.2: Měřicí stanoviště v uspořádání s feritovou podlahou

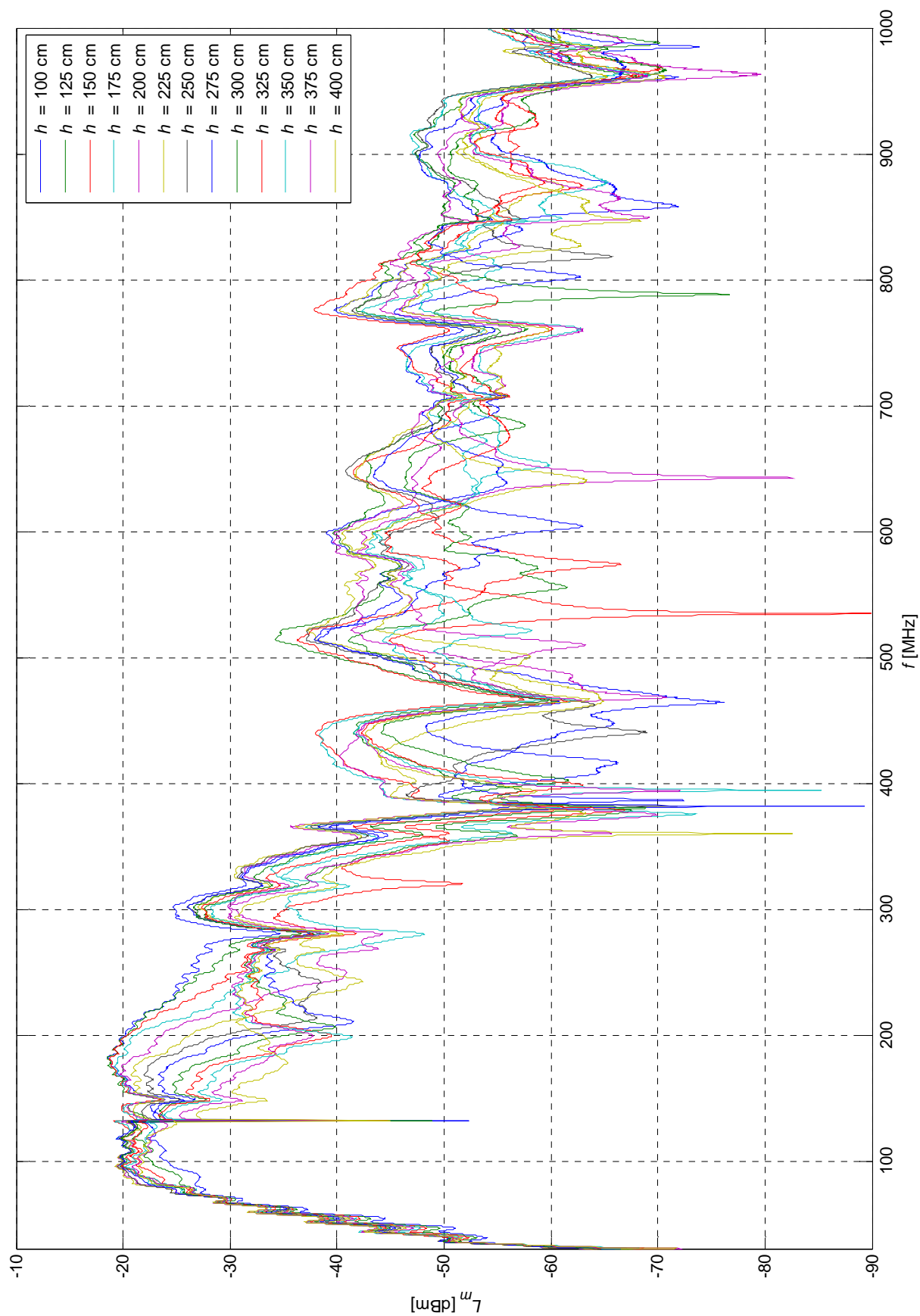


Obr. A.3: Měřicí stanoviště v uspořádání s feritovou podlahou s jehlany

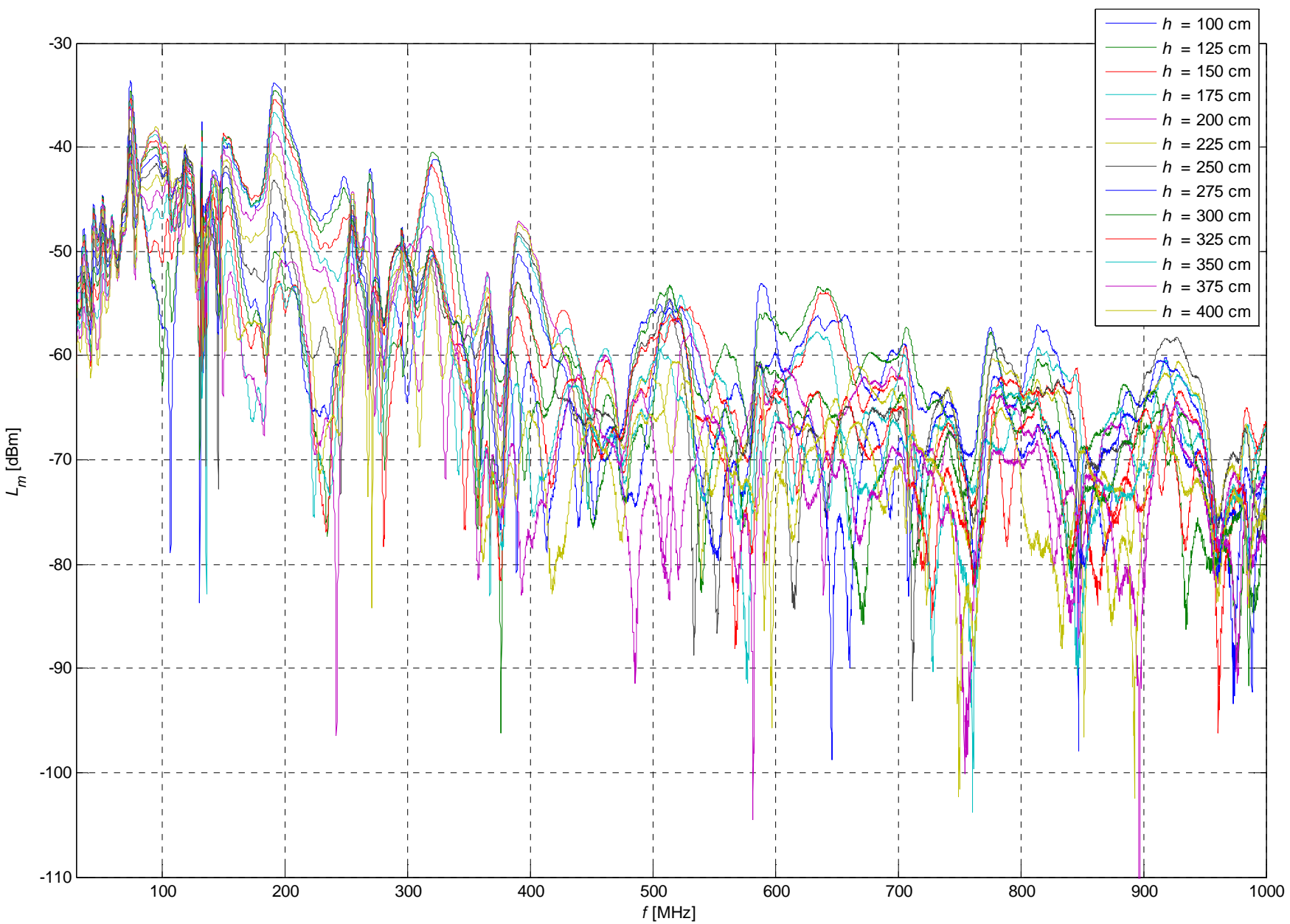


Obr. 4: Ovládací místnost bezodrazové komory

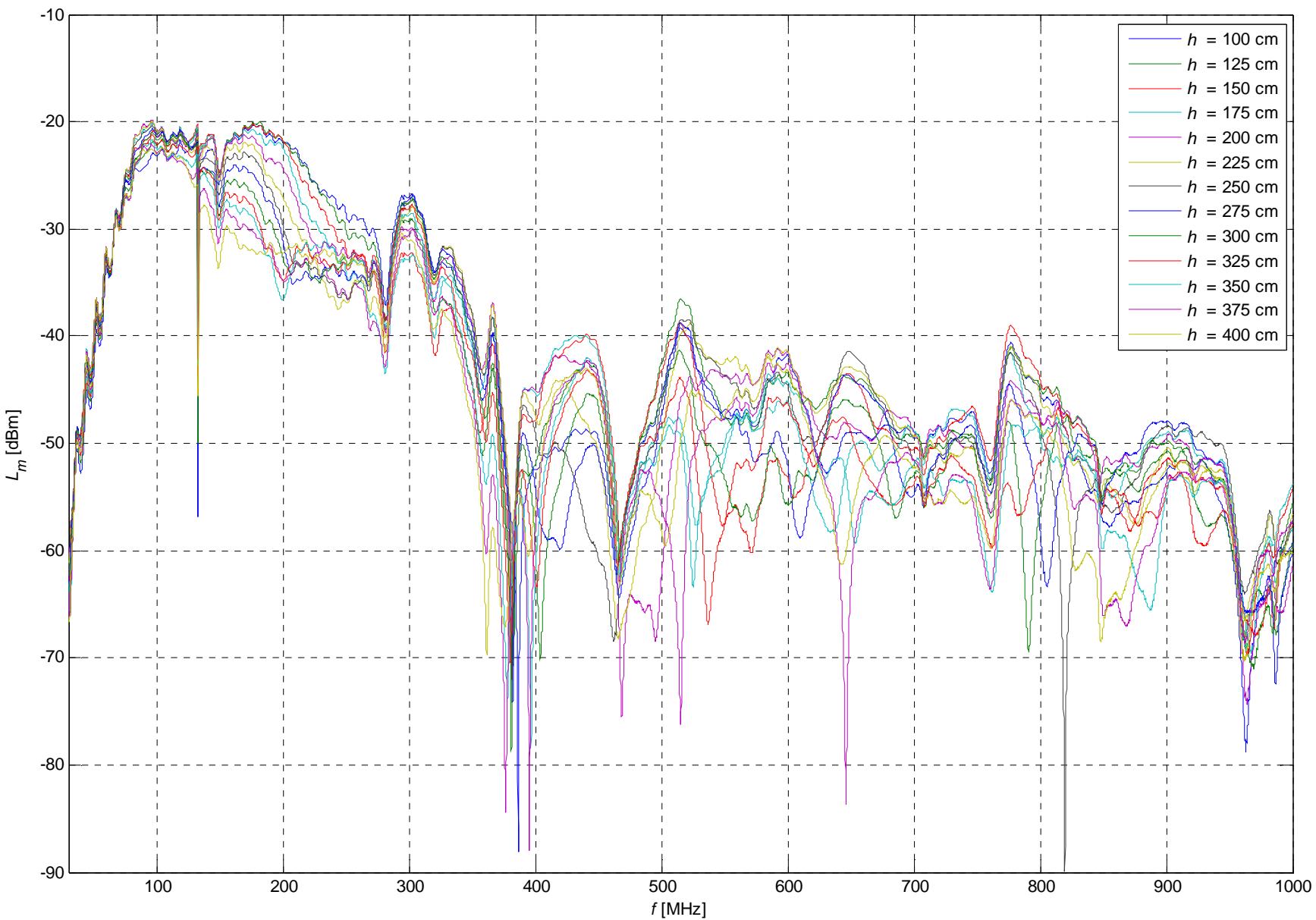
Příloha B - Graficky vyjádřené závislosti naměřených hodnot



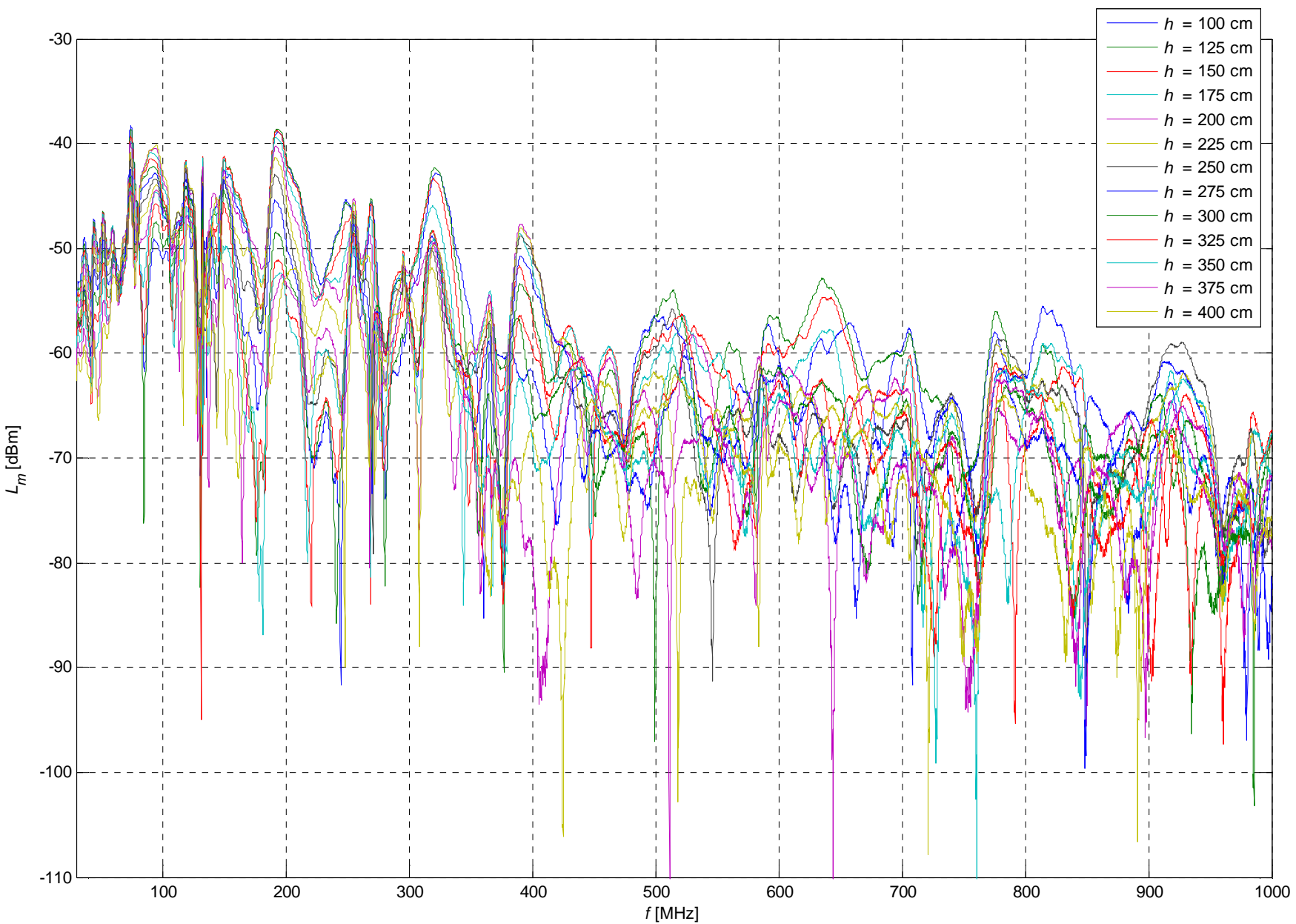
Obr. B.1: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je odrazná kovová, polarizace antény je horizontální



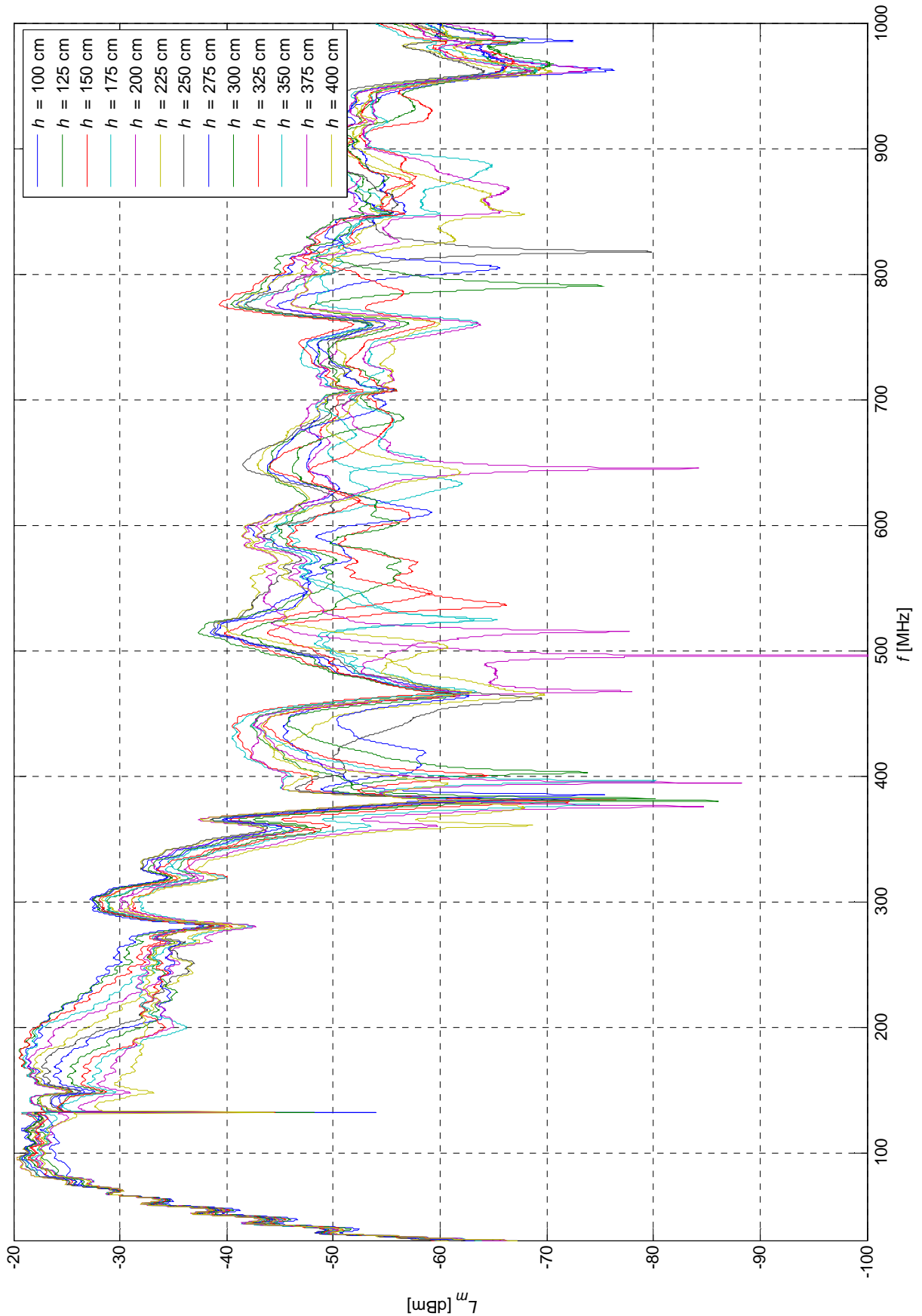
Obr. B.2: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlahu je odrazná kovová, polarizace antény je vertikální



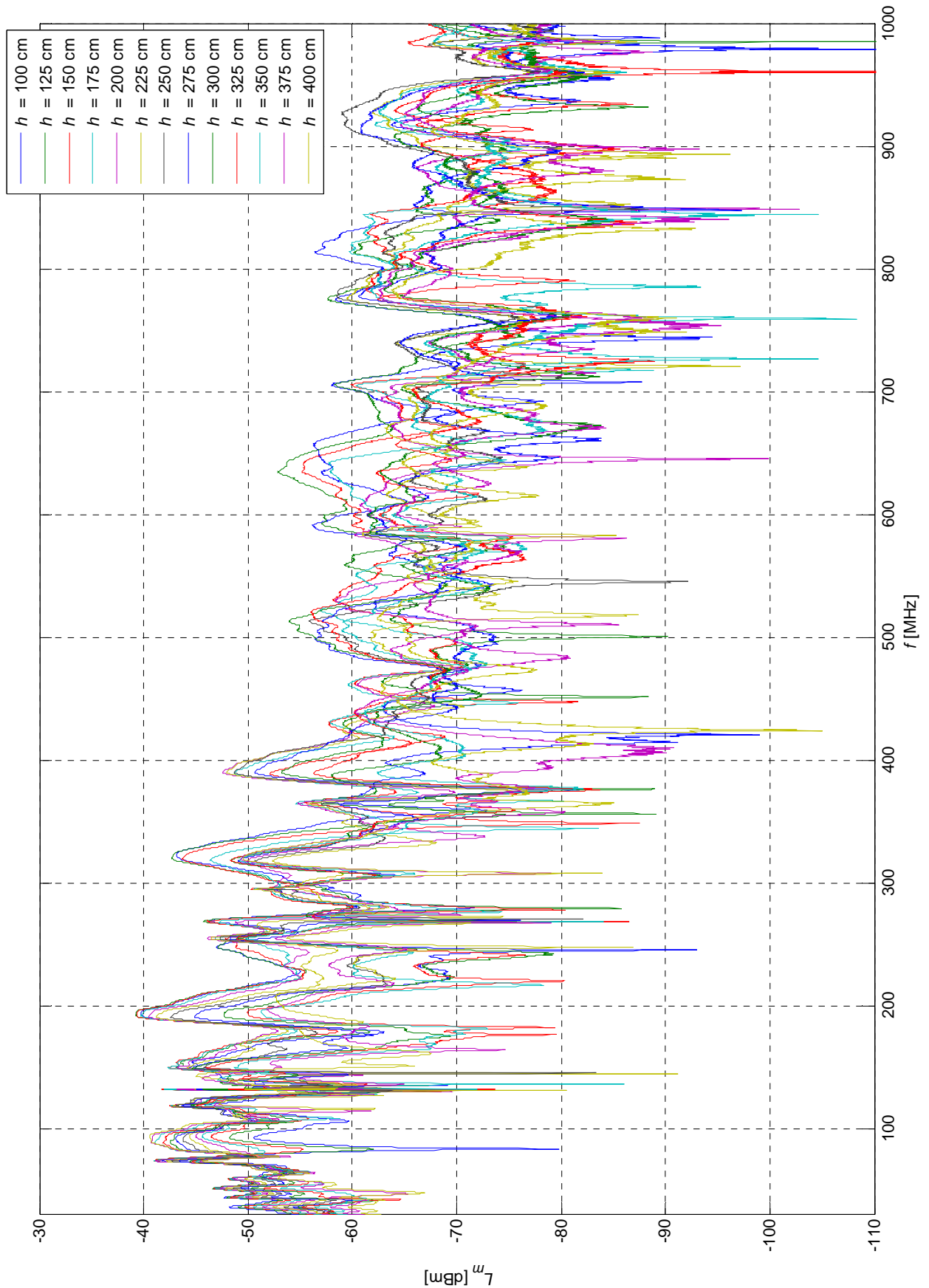
Obr. B.3: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je feritová, polarizace antény je horizontální



Obr. B. 4: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je keramická, polarizace antény je vertikální



Obr. B.5: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je feritová s jehlany, polarizace antény je horizontální



Obr. B.6: Závislost absolutní výkonové úrovně na frekvenci pro různé výšky přijímací antény, podlaha je feritová s jehlany, polarizace přijímací antény je vertikální