

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Antény používané pro testování elektromagnetické
kompatibility**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

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

Jméno a příjmení: **Michal VOSECKÝ**
Osobní číslo: **E10B0362P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Antény používané pro testování elektromagnetické kompatibility**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Uveďte jaké typy antén se používají v oblasti EMC, jejich charakteristiky a parametry.
2. Zpracujte zkušební postupy a doporučení pro správné měření anténami.
3. Doporučte typy antén, kterými by mělo být vybaveno zkušební pracoviště dle současných požadavků norem.
4. Zabývejte se předpokládanými změnami v normalizaci a doporučte typy antén pro měření podle těchto požadavků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility
2. Chatterton, Houlden: EMC - Electromagnetic Theory to Practical Design
3. Normy z oblasti EMC dle doporučení vedoucího práce

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


Konzultant bakalářské práce: **Ing. Miroslav Hromádka**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

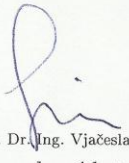
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**



L.S.


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


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zaměřuje na problematiku ohledně antén a elektromagnetické kompatibility (EMC) včetně měření EMC. Každé zařízení se totiž stává zdrojem rušivého signálu, a pokud by ostatní zařízení nebyla vůči němu imunní a zároveň toto vyzařování by nebylo kontrolováno, nemohly by zařízení společně fungovat v provozu. Toto je podstatou měření EMC, pro které se zde uvádí použití vhodných měřicích antén, příp. srovnání některých možností jejich volby. Toto se děje vždy na základě požadavku určité normy, příp. se rozšiřuje frekvenční rozsah této normy, přičemž jsou zde porovnávány antény, jimiž je vybaveno zkušební pracoviště katedry elektroenergetiky a ekologie (KEE), s dalšími anténami uvedenými od výrobce. Toto se děje za cílem vylepšení vybavení pracoviště katedry KEE a to v podobě nahrazení např. dvou typů antén pouze jedním anténním typem, což je pro měření výhodné. Výsledkem práce je tedy uvedení antén, kterými by mělo být vybaveno zkušební pracoviště pro splnění požadavku dle příslušné normy.

Klíčová slova

Anténa, anténní faktor, frekvenční pásmo, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická interference, elektromagnetická susceptibilita, měření ve volném prostoru, normalizace

Abstract

The presented document is focusing on the antennas and the electromagnetic compatibility (EMC). Each electronic device is becoming the source of the radiated power and if the other devices were not immune to this radiation, they would not work successfully in the surroundings of this source of radiation. In addition, this radiation of the electronic device has to be controlled and measured. And that's why the measurement of the EMC is very important for us. There are given the appropriate antennas for this measurement in the end of this bachelor's work and they may be also compared between each other. This is doing on a basis of the requirement of some standardization, whose frequency range can be increased by choosing the antennas with the additional frequency range. There are two kinds of the antennas and they are being compared with each other. It is the antennas, which are used as a measure equipment of the electroenergetic and ecology department (KEE) and the antennas, which are presented from the producer. The point is that there can be made some improvements in the equipment of the KEE department. As a typical improvement, can be for example replacement two antennas by the only one antenna, which has the same frequency range or bigger. This is a benefit for the measurement. The result of this documentation is a choosing the antennas, which should be ready at the workplace for the measurement as a requirement of some standardization.

Key words

Antenna, antenna factor, frequency range, electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic susceptibility, measurement in a free space, standard

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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 6.6.2013

Michal Vosecký

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za důležité podněty, cenné rady i připomínky, které mě inspirovaly a správně nasměrovaly, čímž výrazně přispěly k zhotovení této práce.

Obsah

Obsah	7
Seznam symbolů a zkratk	9
Úvod	13
1 Princip a parametry antén	14
1.1 Princip antény.....	14
1.2 Anténní systém.....	16
1.3 Rozdělení anténních systémů.....	16
1.4 Základní parametry antén.....	17
1.4.1 Rezonanční kmitočet.....	18
1.4.2 Šířka pásma.....	18
1.4.3 Zisk.....	19
1.4.4 Vstupní impedance a vyzařovací odpor.....	20
1.4.5 Činitel stojatých vln.....	21
1.4.6 Polarizace.....	22
1.4.7 Efektivně vyzářený výkon.....	24
1.4.8 Úhel záření a příjmu.....	24
1.4.9 Činitel zpětného příjmu a záření.....	25
1.5 Parametry antén pro měření elektromagnetické kompatibility.....	26
1.5.1 Anténní faktor.....	26
1.5.2 Činitel vyzařování.....	27
1.6 Pole antény.....	27
2 Antény používané pro testování elektromagnetické kompatibility	30
2.1 Smyčková anténa.....	30
2.2 Prutová anténa.....	32
2.3 Kónicko-logaritmická anténa.....	32
2.4 Logaritmicko-periodická anténa.....	32
2.5 Bikónická anténa.....	34
2.6 Složená širokopásmová anténa.....	34
2.7 Dipólová anténa.....	35
2.8 Trychtýřová anténa.....	35
2.8.1 Trychtýřová hřebenová anténa.....	36

3	Základní pojmy z teorie elektromagnetické kompatibility	37
3.1	Úvod do elektromagnetické kompatibility	37
3.2	Rozdělení elektromagnetické kompatibility	37
3.2.1	Elektromagnetická kompatibility technických systémů	37
3.3	Úrovně a meze elektromagnetické kompatibility.....	41
4	Měření elektromagnetické kompatibility	43
4.1	Měření elektromagnetického vyzařování anténami	43
4.1.1	Úvod do měření.....	43
4.1.2	Měřicí antény.....	45
4.1.3	Měření ve volném prostoru.....	50
4.1.4	Zkoušky emise a meze dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed. 2	54
4.1.5	Měření v elektromagneticky stíněných prostorech	57
4.2	Měření elektromagnetické odolnosti	61
4.2.1	Testování elektromagnetické odolnosti vůči vysokofrekvenčním polím.....	62
5	Normalizace a standardizace o elektromagnetické kompatibilitě	67
5.1	Druhy civilních norem o elektromagnetické kompatibilitě	68
5.2	Stručný seznam vybraných norem o elektromagnetické kompatibilitě	69
5.3	Česká technická norma ČSN EN 55016-1-4 ed. 3 (idt CISPR 16-1-4:2010)	71
5.3.1	Antény používané pro měření vyzařovaného rušivého signálu	71
	Závěr	74
	Seznam literatury a informačních zdrojů	76
	Přílohy	1

Seznam symbolů a zkratk

λ	Vlnová délka [m]
v	Rychlost šíření elektromagnetické vlny [m/s]
f	Frekvence [Hz]
f_{REZ}	Rezonanční frekvence [Hz]
f_{MAX}	Horní mezní frekvence přenášeného kmitočtového pásma [Hz]
f_{MIN}	Dolní mezní frekvence přenášeného kmitočtového pásma [Hz]
Δf	Šířka kmitočtového pásma [Hz]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
G	Zisk [dB]
l	Délka anténního vodiče [m]
E	Intenzita elektrického pole [V/m]
E_r	Intenzita elektrického rušivého pole [V/m]
P	Výkon [W]
P_1	Výkon měřené antény [W]
P_0	Výkon referenční antény [W]
P_{vyz}	Výkon vyzářený anténou [W]
P_p	Výkon přenášené (postupné) vlny [W]
P_o	Výkon odražené vlny [W]
P_{in}	Vstupní výkon [W]
U	Napětí [V]
U_1	Napětí měřené antény [V]
U_0	Napětí referenční antény [V]
U_{0°	Napětí ve směru maximálního příjmu v přední části vyzařovacího diagramu antény [V]

U_{180°	Napětí ve směru maxima postranního laloku v zadní části vyzařovacího diagramu antény [V]
U_r	Rušivé napětí [V]
dB	Jednotka zisku G, popř. útlumu SA
dB_i	Jednotka zisku měřeného vzhledem k izotropickému zářiči
dB_d	Jednotka zisku měřeného vzhledem k půlvlnnému dipólu
Z_{in}	Vstupní impedance [Ω]
R_{in}	Odporová (reálná) část vstupní impedance [Ω]
R_{vyz}	Vyzařovací odpor antény [Ω]
R_{ztr}	Ztrátový odpor antény [Ω]
X_{in}	Reaktanční (imaginární) část vstupní impedance [Ω]
Z_n	Impedance napáječe [Ω]
I	Napájecí proud antény [A]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
H_r	Intenzita magnetického rušivého pole [A/m]
AF	Anténní faktor pro elektrické pole [dB/m]
AF_H	Anténní faktor pro magnetické pole [dBS/m]
D_1	Největší rozměr antény [m]
R_1	Mezní vzdálenost od antény určující konec blízkého vyzařujícího pole [m]
R_2	Mezní vzdálenost od antény určující konec reaktivního pole [m]
R_3	Mezní vzdálenost od antény určující začátek vzdáleného pole [m], přičemž platí: $\lambda > D_1$
R_{n+1}	Vzdálenost příslušného prvku LP antény od jejího pomyslného vrcholu [m]
R_n	Vzdálenost nejbližšího delšího prvku LP antény od jejího pomyslného vrcholu [m]
l_{n+1}	Délka příslušného prvku LP antény [m]
l_n	Délka nejbližšího prvku LP antény, který následuje [m]

δ	Povrchový úhel kuželů bikónické antény [°]
X	Napájecí bod bikónické antény
J	Vektor proudové hustoty [A/m^2]
ϵ_0	Permitivita vakua [F/m]
μ_0	Permeabilita vakua [H/m]
ČSV	Činitel stojatých vln
VSWR	Voltage standing wave ratio
EIRP	Equivalent isotropically radiated power (efektivně vyzářený výkon)
EMC	Elektromagnetická kompatibility
ČZP	Činitel zpětného příjmu
ČZZ	Činitel zpětného záření
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
TAR	Transmit antenna factor (činitel vyzářování antény)
LP	Logaritmicko – periodická anténa
ZO	Zkoušený objekt
LISN	Umělá síť
AK	Absorpční kleště
PS.....	Proudová sonda
MR	Měřič rušení
BiLog	Bikónicko-logaritmicko-periodická (širokopásmová) anténa
OFTS	Open field test site (měření ve volném prostoru)
OATS	Open Area Test Site (měření ve volném prostoru)
ČSN	Česká technická norma
EN.....	Evropská technická norma
D	Měřicí vzdálenost

<i>SA</i>	Site attenuation (útlum zkušebního pracoviště)
<i>SA_t</i>	Teoretický útlum zkušebního pracoviště
<i>SA_m</i>	Naměřený útlum zkušebního pracoviště
<i>VA</i>,,,.....	Vysílací anténa
<i>MA</i>	Měřicí anténa
<i>SG</i>,,,.....	Signální generátor
<i>AM</i>	Amplitudová modulace
<i>PAM</i>	Pulzní amplitudová modulace
<i>PCM</i>	Pulzní kódová amplitudová modulace
<i>CENELEC</i>	European committee for electrotechnical standardization
<i>IEC</i>	International electrotechnical committee
<i>CISPR</i>	International special committee on radio interference
<i>ZIT</i>	Zařízení informační techniky

Úvod

Předmětem této bakalářské práce je uvedení jednotlivých typů antén, včetně jejich charakteristik a parametrů, které jsou v současné době používány pro testování elektromagnetické kompatibility (zkráceně EMC). Rovněž zde budou navrhovány předpokládané změny ohledně těchto antén a jejich frekvenčních pásem uvedených v normalizaci včetně doporučení nezbytného seznamu antén pro zkušební pracoviště dle současných požadavků norem. Zároveň zde budou popisovány některé zkušební postupy pro správné měření EMC.

V dnešní době, kdy je vývoj elektroniky na vysoké úrovni, lze nalézt elektronická zařízení téměř kdekoli. Pro jejich správnou funkci ve svém blízkém okolí je však nezbytné kontrolovat vyzařování těchto jednotlivých elektronických zařízení a současně i jejich dostatečnou odolnost vůči tomuto rušení. Tyto aspekty musejí splňovat určitá normami striktně stanovená kritéria za účelem zamezení jejich negativnímu vzájemnému ovlivňování a tím i jejich špatné funkce či dokonce destrukce. Touto problematikou se právě zabývá oblast nazývaná EMC.

Aby bylo možné tyto atributy EMC udržovat v přípustných mezích, musí být správně provedena jejich příslušná měření, pro což se potřebují vhodné antény a zkušební postupy, které budou v této práci shrnuty. Jedná se tedy o zvolení vhodných měřicích antén pro dané měření, příp. konzultování různých možností řešení s uvedením jejich nejlepší varianty, přičemž dochází k porovnání antén, kterými je vybaveno zkušební pracoviště EMC katedry elektroenergetiky a ekologie (KEE) s jinými anténami udávanými výrobcem.

1 Princip a parametry antén

1.1 Princip antény

Anténa tvoří hraniční prvek komunikačního řetězce a lze si ji představit jako takový transformátor elektromagnetického vlnění, který buď může mít na primární straně vysokofrekvenční vedení (koaxiální vedení popř. vlnovod) a na sekundární straně volný prostor (nejčastěji vzduch), pak se jedná o vysílací anténu, anebo tomu může být naopak, pak jde o anténu přijímací. Nároky na vysílací a přijímací anténu se mohou lišit. Anténa je tedy zařízení sloužící pro vyzařování, nebo příjem elektromagnetických vln radiového spektra. Při přenosu energie tedy vždy dochází ke 2 transformacím, a sice na přijímací a vysílací straně, mezi nimiž se signál šíří prostorem.

Pokud bude sestaven z cívky a kondenzátoru rezonanční obvod, který následně bude napájen vysokofrekvenční energií, vznikne vlastně generátor elektromagnetického pole. Mezi deskami kondenzátoru se bude vytvářet elektrické pole a okolo závitů cívky se bude generovat pole magnetické. Toto však nebude mít účinek na velkou vzdálenost. Anténa vlastně funguje na principu rezonančního obvodu, kdy je prostor působení elektrického pole kondenzátoru zvětšený tím, že se od sebe oddálí jeho desky, čímž se zmenší kapacita, která ale následně zvětšením ploch desek může růst. Takový kondenzátor si lze představit jako dva vodiče, z nichž je jeden na povrchu a druhý nad povrchem.

Jedná se vlastně o otevřený rezonanční obvod. Jelikož vodiči prochází proud, tak mají kromě kapacity také vlastní indukčnost. Avšak kapacita a indukčnost se zde nesoustředí pouze mezi deskami kondenzátoru a okolo cívky, jako tomu je u uzavřeného rezonančního obvodu, ale jsou rovnoměrně rozloženy podél celého vedení, pak se hovoří o tzv. vedení s rozloženými parametry.

Anténa je tedy otevřený rezonanční obvod. V praxi existuje poměrně široký rozsah frekvence (resp. vlnové délky) radiových vln, což ukazuje tab. 1.1. Pokud je požadováno, aby vznikla účinná anténa, tak vlnová délka, na kterou byl obvod navržen, musí být shodná s délkou antény. Vlnovou délku λ lze spočítat ze zadané frekvence jednoduše pomocí následujícího vztahu (1.1).

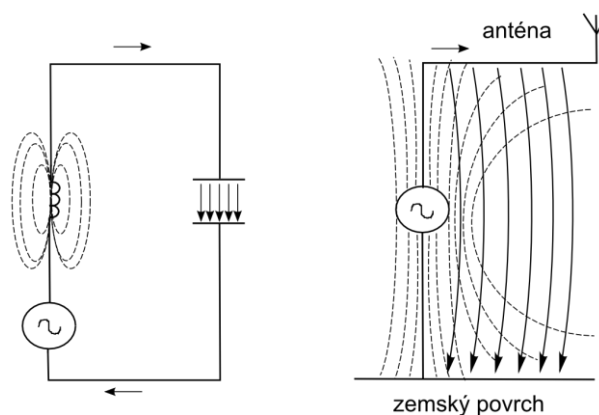
$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [m] \quad (1.1)$$

Kde jsou: v – rychlost šíření elektromagnetické vlny [m/s] (ve vakuu: $v = c = 3 \cdot 10^8 m/s$),
 f – frekvence [Hz].

Mezinárodní zkratka	Frekvenční pásmo	Pásmo vlnových délek	Anglický název
ELF	3 mHz – 3 kHz	1000 km – 100 km	Extremely Low Frequency
VLF	3 kHz – 30 kHz	100 km – 10 km	Very Low Frequency
LF	30 kHz – 300 kHz	10 km – 1 km	Low Frequency
MF	300kHz – 3 MHz	1 km – 100 m	Medium Frequency
HF	3 MHz – 30 MHz	100m – 10m	High Frequency
VHF	30 MHz – 300MHz	10 m – 1 m	Very High Frequency
UHF	300 MHz – 3 GHz	1 m – 10 cm	Ultra High Frequency
SHF	3 GHz – 30 GHz	10 cm – 1cm	Super High Frequency
EHF	30 GHz – 300 GHz	1 cm – 1 mm	Extremely High Frequency

Tab. 1.1 Dělení elektromagnetických vln dle frekvence, převzato z [1].

Na obr. 1.1 vlevo je znázorněn uzavřený rezonanční obvod, jehož kapacita a indukčnost jsou soustředěny uvnitř obvodu, nevyzařují tedy do okolí. Při představě antény jako dvojici vodičů, které mají mezi sebou kapacitu a které vzhledem k procházejícímu proudu mají i indukčnost, je možné anténu popsat jako otevřený rezonanční obvod, který představuje obrázek 1.1 vpravo. Kapacita a indukčnost otevřeného rezonančního obvodu jsou tedy rozloženy po vedení a vyzařují do okolí. Přičemž při průchodu vysokofrekvenční energie vznikají ztráty v rezonančním obvodu a navíc také ztráty způsobené vyzařováním elektromagnetických vln do prostoru. Anténa je schopna kromě vyzařování i efektivně přijímat elektromagnetické vlnění, proto lze tedy použít jako vysílací i přijímací anténa.



Obr. 1.1 Vlevo uzavřený a vpravo otevřený rezonanční obvod, převzato s úpravami z [2].

1.2 Anténní systém

Anténní systém se skládá z antén a jejich napáječů, dále z přizpůsobovacích obvodů, uzemňovacích systémů a z nosných konstrukčních prvků. Přizpůsobovací obvody tvoří tzv. symetrizační členy, které slouží k impedančnímu přizpůsobení resp. zamezení odrazů. Obecně platí, že anténa by měla mít stejný rozměr jako je vlnová délka přijímaného/vysílaného signálu, ale také může nabývat různých rozměrů a tvarů. Například dlouhý vodič může sloužit jako anténa, musí však platit: $L \gg d$, kde d – průměr vodiče, L – délka vodiče. Právě délka L ovlivňuje velikost indukovaného napětí, tedy sílu signálu. Čím větší je délka L , tím větší je velikost přijímaného signálu.

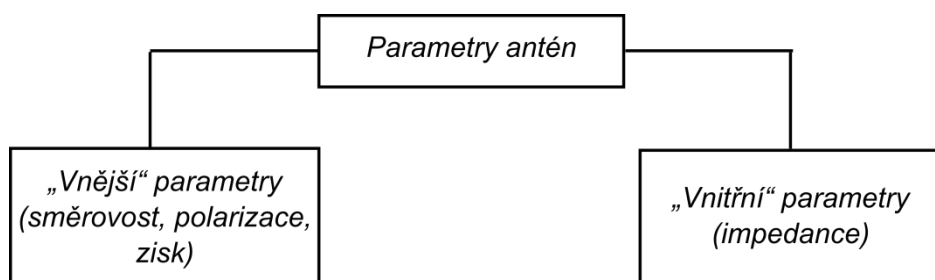
1.3 Rozdělení anténních systémů

V praxi existuje mnoho typů anténních systémů navržených za konkrétním účelem, podle něhož lze jednotlivé antény rozlišovat. Zde je uvedeno základní dělení antén:

- **Podle použití:**
 - *vysílací*
 - *přijímací*
- **Podle frekvenčních vlastností:**
 - *širokopásmové*
 - *úzkopásmové*
- **Podle směrových vlastností:**
 - *všesměrové*
 - *směrové*
- **Podle použití vestavěného zesilovače:**
 - *aktivní*
 - *pasivní*
- **Podle způsobu vytváření či přijímání pole:**
 - *elektrické*
 - *magnetické*
- **Podle provedení a zapojení:**
 - *elektricky zkrácené*
 - *elektricky nezkrácené*

1.4 Základní parametry antén

Každou anténu lze charakterizovat několika parametry, které určují jak je kvalitní a kde je vhodné ji použít. Můžeme si představit, že tyto parametry jsou složeny ze dvou podskupin znázorněných na obr. 1.2, a sice na první skupinu charakterizující anténu z hlediska jejího vnějšího chování (tj. úhel záření, polarizace) a na druhou skupinu, která popisuje vnitřní vlastnosti antény, které lze na anténě přímo změřit (tj. impedance). Parametry první zmíněné skupiny (označené jako tzv. „vnější“ parametry) jsou pochopitelně závislé na rozměrech (geometrii) antény, zatímco parametry druhé skupiny (tzv. „vnitřní“ parametry) jsou kromě rozměrů antény ovlivňovány i materiálem, z kterého je anténa vyrobena. Toto rozdělení je však nutno brát s rezervou, jelikož uvedené skupiny spolu jednoznačně souvisí a vychází ze stejné podstaty elektrických veličin tvořených na anténě, proto je vhodnější toto rozdělení vnímat z hlediska jednotlivých měření na anténě.



Obr. 1.2 Rozdělení parametrů antén.

Při vyhodnocování a řešení parametrů (vlastností) antén se vychází ze dvou úloh, přičemž jejich definice souvisejí s definicemi uvedených podskupin parametrů antén, a sice z tzv. vnitřní a vnější úlohy, přičemž se předpokládá jejich vzájemná nezávislost. To znamená, že se pro vysílací anténu neuvažuje vliv okolního prostředí (zátěže) a naopak pro přijímací anténu se neuvažuje odvádění přijímaného signálu k přijímači, ani jeden z uvedených případů ale v praxi není splněn (jde tedy pouze o idealizaci). Další zjednodušení při výpočtech je fakt, že se předpokládají lineární magnetické i elektrické vlastnosti prostoru, resp. vlastnosti prostoru se nemění s intenzitou elektromagnetického pole, což při výpočtu umožňuje použití principu superpozice.

Parametry pro směrové i všesměrové antény jsou v zásadě představovány těmito zástupci:

- **Rezonanční kmitočet**
- **Šířka pásma**
- **Zisk**

- *Vstupní impedance a vyzařovací odpor*
- *Činitel stojatých vln*
- *Polarizace*
- *Efektivně vyzářený výkon*

A navíc u směrové antény:

- *Úhel záření a příjmu*
- *Činitel zpětného záření a příjmu*

V následujících podkapitolách je vysvětlen význam těchto uvedených parametrů.

1.4.1 Rezonanční kmitočty

Jak již bylo uvedeno, anténa představuje otevřený rezonanční obvod, jehož indukčnost a kapacita představuje vodič o délce L (platí $L \gg d$). Pokud je délka vodiče antény ve „vhodném“ poměru k vlnové délce, například $1/2$ vlnové délky (jedná se o ekvivalent obvodu RLC), pak je anténa schopna účinně vysílat popř. přijímat signál. Pokud se však bude zvyšovat výška antény nad zemí, bude se měnit kapacita kondenzátoru. Při zadané indukčnosti a kapacitě lze podle Thompsonova vztahu vypočítat rezonanční frekvenci f_{REZ} obvodu RLC:

$$f_{REZ} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad [Hz] \quad (1.2)$$

Kde jsou: L – indukčnost [H],

C – kapacita [F].

1.4.2 Šířka pásma

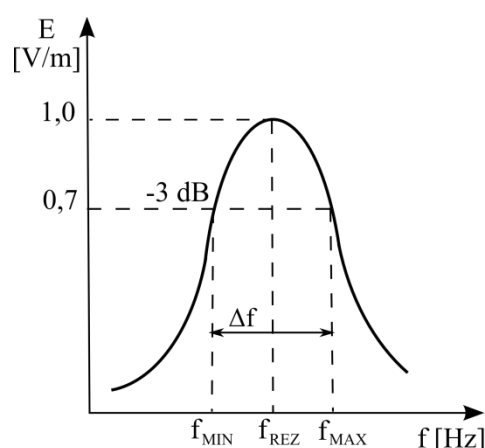
Anténa dokáže účinně pracovat v rozmezí frekvencí f_{MIN} a f_{MAX} , které společně ohraničují přenášené frekvenční pásmo. Tyto mezní hodnoty frekvence mohou být určeny z křivky popisující závislost intenzity elektromagnetického pole E (resp. napětí) na frekvenci, a to tak, jak lze vidět na obr. 1.3. Udělá se pokles maximální hodnoty (tj. rezonance) o 3dB, tedy 0,7 násobku maxima (70% maxima), což odpovídá 50% výkonu. Pokud je tedy vyžadováno určit hodnotu šířky přenášeného pásma Δf , jednoduše se dle vztahu (1.3) od sebe frekvence odečtou.

$$\Delta f = f_{MAX} - f_{MIN} \quad [Hz] \quad (1.3)$$

Kde jsou: f_{MAX} – horní (maximální) mezní frekvence přenášeného pásma [Hz],

f_{MIN} – dolní (minimální) mezní frekvence přenášeného pásma [Hz].

Šířka pásma vlastně určuje frekvenční oblast, kdy se anténa chová „přijatelným“ (standardním) způsobem z hlediska výkonového zisku antény. Šířka pásma může nabývat různých hodnot v hodně širokém rozmezí, což je dáno typem a konstrukcí antény. Pokud se uvažuje širokopásmová anténa, je možné přijímat široké spektrum frekvencí, což s sebou přináší i nevýhody, tak například se bude přijímat i široké spektrum rušení



Obr. 1.3 Příklad určení šířky pásma Δf , převzato s úpravami z [2].

Šířka pásma je především ovlivňována danými konstrukčními rozměry antény, tj. průměrem, výškou (štíhlostí). Pokud bude požadováno zvýšení šířky kmitočtového pásma Δf , bude nutné zmenšení délky a zvýšení průměru vodiče.

1.4.3 Zisk

Výkonový zisk (angl. gain) antény vlastně popisuje a charakterizuje její účinnost. Udává se jako logaritmus relativní hodnoty, tedy jako logaritmus poměru výkonů popř. napětí měřené antény vzhledem k anténě referenční, která je umístěna ve stejném místě. Pro výkonový zisk G v dB platí vztah (1.4).

Zisk antény vlastně říká, kolikrát musí být zvýšen výkon (resp. napětí) na referenční anténě, aby bylo dosaženo stejné intenzity elektromagnetického pole v daném (stejném) měřicím místě jako při použití měřené antény. Např. pro $G = 20$ dB lze jednoduše vypočítat, že napětí na měřené anténě je 10x větší a výkon 100x větší než na anténě referenční. Pro $G = 60$ dB je pak napětí větší 10^3 x a výkon 10^6 x, na toto poukazuje tab. 1.2.

$$G = 10 \cdot \log \frac{P_1}{P_0} = 20 \cdot \log \frac{U_1}{U_0} \quad [dB] \quad (1.4)$$

Kde jsou: P_1 – výkon měřené antény [W],

P_0 – výkon referenční antény [W],

U_1 – napětí měřené antény [V],

U_0 – napětí referenční antény [V].

$G[dB]$	0,10	0,20	0,50	1,00	3,00	5,00	6,00	10,00	20,00	40,00	60,00
$\frac{P_1}{P_0} [-]$	1,02	1,05	1,12	1,26	2,00	3,16	3,98	10,00	100,00	10^4	10^6
$\frac{U_1}{U_0} [-]$	1,01	1,02	1,06	1,12	1,41	1,78	2,00	3,16	10,00	100	10^3

Tab. 1.2 Vztah pro zisk G [dB] a relativní hodnoty výkonů a napětí.

Při uvádění relativního zisku antény je nutno také uvést vzhledem k jaké referenční anténě byl tento zisk měřen. Jako referenční anténa může být brán v potaz buď tzv. izotropický zářič, nebo půlvlnný dipól. V prvním případě se jedná o všesměrovou hypotetickou anténu, tj. anténa s vyřazovacími vlastnostmi nezávislými na směru. Tento zářič nelze fyzikálně realizovat, ovšem jako pomůcku pro určení zisku antény použít lze. Značení jednotek zisku měřené antény pak bude dB_i , kde právě index označuje použití izotropického zářiče. V případě půlvlnného dipólu je zisk značen jednotkou dB_d , přičemž platí, že při použití izotropického zářiče jako referenční antény bude hodnota zisku G o 2,14 dB větší než pro půlvlnný dipól, platí tedy $G = 0 \text{ dB}_d = 2,14 \text{ dB}_i$. Např.: Při použití půlvlnného dipólu bude naměřena hodnota $G = 5 \text{ dB}_d$, pak je ekvivalentní hodnota pro izotropický zářič rovna $G = 7,14 \text{ dB}_i$.

1.4.4 Vstupní impedance a vyzářovací odpor

Tak jako každý spotřebič i anténa zatěžuje svůj napájecí zdroj impedancí. Vstupní impedance antény Z_{in} je definována jako poměr napětí a proudu na svorkách antény a platí pro ni následující vztah (1.5).

$$Z_{in} = R_{in} + jX_{in} \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

Kde jsou: R_{in} – odporová (reálná) část vstupní impedance $[\Omega]$,

X_{in} – reaktanční (imaginární) část vstupní impedance (induktivní či kapacitní) $[\Omega]$.

A zároveň pro reálnou část vstupní impedance R_{in} platí vztah:

$$R_{in} = R_{vyz} + R_{ztr} \quad [\Omega] \quad (1.6)$$

Kde jsou: R_{vyz} – vyzařovací odpor antény $[\Omega]$,

R_{ztr} – ztrátový odpor antény $[\Omega]$.

Vstupní impedance antény je závislá jak na frekvenci, tak na výšce umístění antény nad zemí (se zvyšující se výškou klesá kapacita, tj. oddalují se desky kondenzátoru). Největší změny impedance probíhají v rozmezí výšek 0 až $\lambda/2$ nad povrchem země.

Ve větších výškách se jeví hodnota odporu R stabilní. Pokud tedy máme stanovit neměnnou hodnotu vyzařovacího odporu R_{vyz} musíme umístit anténu minimálně do výšky $\lambda/2$ nad zemí. Čím bude výška umístění antény nad zemí větší, tím stabilnější bude vyzařovací odpor. Vyzařovací odpor R_{vyz} lze určit ze vztahu:

$$R_{vyz} = \frac{P_{vyz}}{I^2} \quad [\Omega] \quad (1.7)$$

Kde jsou: P_{vyz} – výkon vyzářený anténou $[W]$,

I – napájecí proud antény $[A]$.

Pokud je známá impedance antény, tak je možné impedančně přizpůsobit anténu společně s jejím napáječem a vysílačem. Jako výstupní impedance se nejčastěji používá hodnota 50Ω , což je vlastně impedance koaxiálního kabelu. Pokud tedy budou napáječ antény, anténa a vysílač impedančně přizpůsobené, tak veškerý výkon vysílače je efektivně vyzářen (platí $\text{ČSV} = 1$). Potom nezáleží na tom, jak bude napáječ a koaxiální kabel dlouhý a parametry antény se nebudou měnit v závislosti na těchto délkách.

1.4.5 Činitel stojatých vln

Činitel stojatých vln (ČSV) nebo také poměr stojatých vln (PSV), někdy udávaný pomocí zkratky VSWR (angl. Voltage Standing Wave Ratio, tzn. napěťový ČSV), popisuje jak je anténa přizpůsobena vzhledem k napáječi a vysílači. Nabývá teoreticky hodnot od 1 do ∞ . Při

ČSV = 1 je veškerý výkon z napáječe přenesen do antény a efektivně vyzářen (tj. ideální stav). Jednotlivé hodnoty odraženého výkonu v [%] v závislosti na ČSV popisuje tab. 1.3.

ČSV [-]	1.0	1.2	1.5	1.9	2.3	3.0	4.0	5.7	9.0	19.0	∞
P_{odr} [%]	0.0	0.8	4.0	9.0	15.0	25.0	36.0	44.0	67.0	82.0	100.0

Tab. 1.3 Závislost odraženého výkonu P_{odr} [%] na činiteli stojatých vln ČSV [-], převzato z [2].

Při ČSV > 1 anténa není dokonale přizpůsobena a vzniká odražená vlna na napájecím vedení, která po odražení postupuje zpět do vysílače. Výsledná účinnost přenosu vysokofrekvenční energie do antény se tedy snižuje a může se tak vysílač poškodit popř. úplně zničit. Činitel stojatých vln ČSV lze vypočítat ze vztahu:

$$\text{ČSV} = \frac{1 + \sqrt{\frac{P_p}{P_o}}}{1 - \sqrt{\frac{P_p}{P_o}}} = \frac{Z_n}{Z_r} \left(\text{popř. } \frac{Z_r}{Z_n} \right) \quad [-] \quad (1.8)$$

Kde jsou: P_p – výkon přenášené (postupné) vlny [W],

P_o – výkon odražené vlny [W],

Z_n – impedance napáječe [Ω],

Z_r – reálná impedance antény (tedy R_{in}) [Ω].

Za mez mezi přijatelným a nepřijatelným výkonovým odrazem se považuje hodnota ČSV = 3, tedy 25% výkonu se odrazí zpět (viz tab. 1.3). V praxi se však požaduje lepší přizpůsobení antény, obvykle mezi hodnotami ČSV = 1,5 až 2.

ČSV se však mění podle průběhu rezonanční charakteristiky, zpravidla stoupá při jiném než rezonančním kmitočtu antény. Hodnota ČSV = 1 tedy platí pouze pro ideálně přizpůsobenou anténu, která navíc pracuje pouze na svém rezonančním kmitočtu.

1.4.6 Polarizace

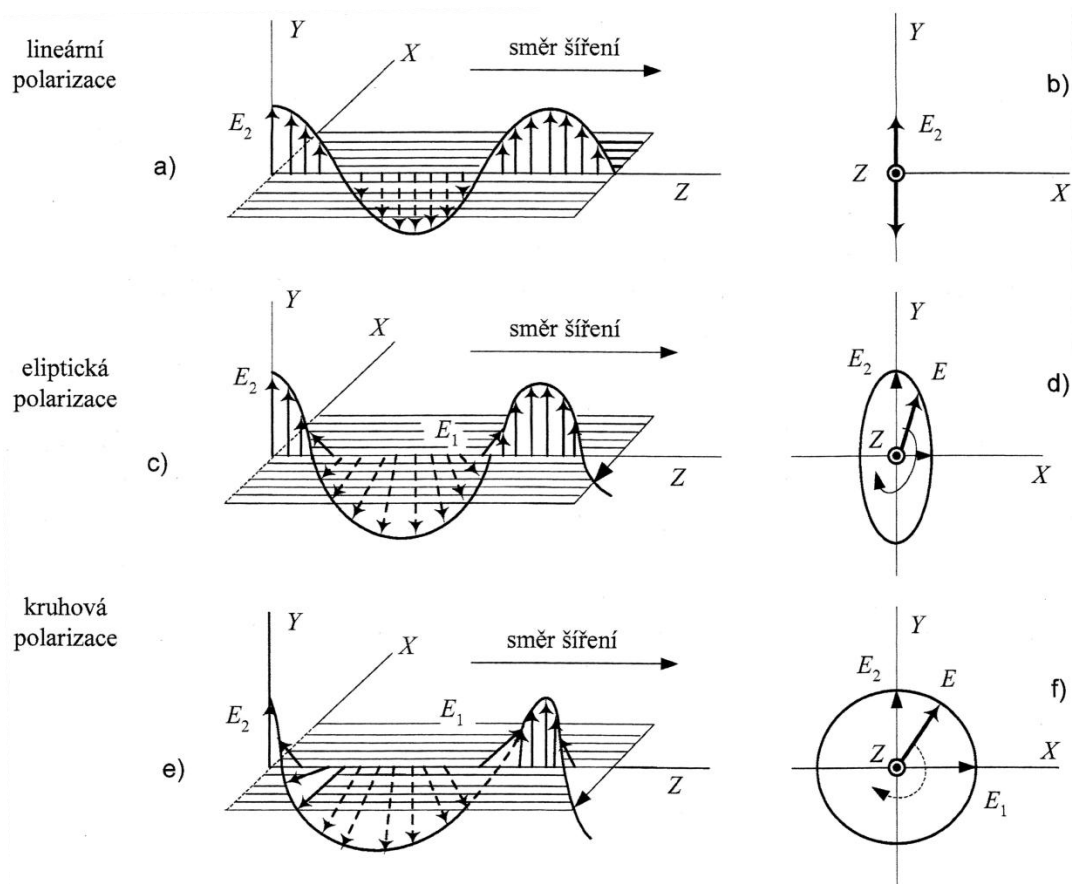
Polarizace antény vychází z polarizace elektromagnetických vln. Polarizace elektromagnetických vln je vždy popisována vektory intenzity elektrického pole E a intenzity magnetického pole H , které jsou na sebe kolmé. Často se vyšetřuje polarizace rovinné vlny, kdy stačí respektovat směr vektoru E , jímž je tvořena polarizační rovina. Rozlišují se tedy tyto následně uvedené druhy elektromagnetických polarizací.

• Lineární polarizace

U této polarizace vektor intenzity elektrického pole E nemění svoji orientaci (viz obr. 1.4a), tj. pouze se mění jeho velikost v kladném a záporném směru osy y (obr. 1.4b). Dále se hovoří o horizontální resp. vertikální lineární polarizaci v závislosti na tom, zdali je vektor elektrické intenzity E rovnoběžný resp. kolmý na zemský povrch.

• Eliptická polarizace

Tento případ polarizace vzniká, pokud jsou sčítány dvě elektromagnetické vlny se stejným směrem šíření, avšak s různou amplitudou a fází elektrických složek E_1 a E_2 navzájem kolmých. Vrchol výsledného vektoru elektrické složky pole E pak opisuje v prostoru elipsu (dle obr. 1.4d), která je definována poměrem hlavní a vedlejší osy. Směr otáčení vektoru E je pak nazýván smyslem polarizace.



Obr. 1.4 Přehled druhů polarizací antén, převzato z [3].

• Kruhová polarizace

O kruhové polarizaci se hovoří, pokud platí rovnost mezi jednotlivými vektory elektrických složek E_1 a E_2 a zároveň tvoří vzájemný fázový posuv 90° . Zde pak vrchol výsledného vektoru E opisuje v prostoru kružnici (obr. 1.4f).

Polarizace vysílací a přijímací antény by měly být stejné, alespoň při šíření vlny na krátkou vzdálenost, kdy většinou nedochází k odrazům. Pokud ovšem při šíření elektromagnetické vlny dojde k jejímu odrazu a následnému změnění polarizace, pak je možné, aby byly polarizace antén rozdílné.

1.4.7 Efektivně vyzářený výkon

Efektivně vyzářený výkon anténou – EIRP (angl. equivalent isotropically radiated power) představuje výkon, který je anténa se ziskem G [-] schopna vytvořit, přivede-li se na její vstup výkon P_{in} [W], platí tedy:

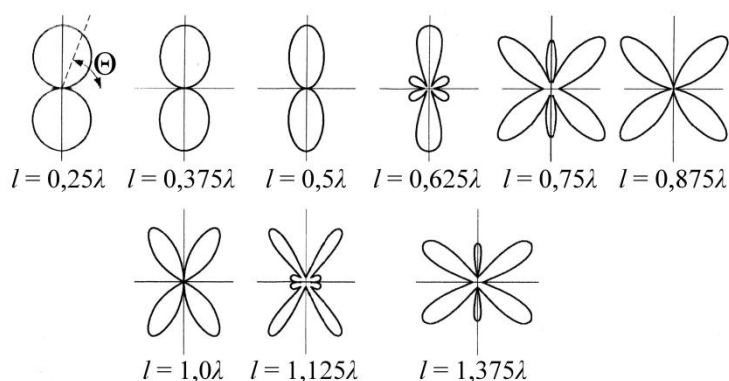
$$EIRP = P_{in} \cdot G \quad [W] \quad (1.9)$$

1.4.8 Úhel záření a příjmu

Úhel záření a příjmu antény, který se někdy nazývá také šířka hlavního svazku, vyjadřuje, do jakých směrů anténa efektivně vyzařuje výkon, resp. z jakých směrů přijímací anténa výkon efektivně přijímá. Tento úhel lze jednoduše zjistit z diagramu záření, který popisuje velikost vyzařovaného výkonu (nebo napětí) do okolního prostředí, a to vždy ve vertikální, nebo horizontální rovině. Úhel záření je tedy také vždy horizontální nebo vertikální a určí se jako úhel mezi dvěma mezními hodnotami diagramu záření. Tyto mezní hodnoty se určují stejně, jako tomu bylo u šířky pásma rezonančního obvodu. Pokud se jedná o výkonový diagram záření, určí se úhly záření jako pokles maxima o 3 dB. Naopak při diagramu záření vyjádřenému v jednotkách napětí, se odečte úhel jako násobek 0,7 hodnoty maximálního napětí.

Úhel záření ve vertikální rovině je úměrný vertikálnímu rozměru antény resp. konstrukci. Pokud se bude zvyšovat rozměr antény l (vzhledem k vlnové délce λ), bude se úhel záření zmenšovat, ale dosáhne se většího zisku antény, což umožní spojení na větší vzdálenosti. Toto ukazuje následující obr. 1.5. Vždy je tedy vhodné najít správný kompromis mezi úhlem vyzařování antény a vzdálenosti spojení a s ní spojeným vyzářeným výkonem.

Uvádí se také úhel maximálního vyzařování antény, který není totožný s úhlem záření antény, ale je to úhel, který udává maximální hodnotu vyzářeného výkonu antény v diagramu záření. Tento úhel se uvádí vždy ve vertikální rovině.

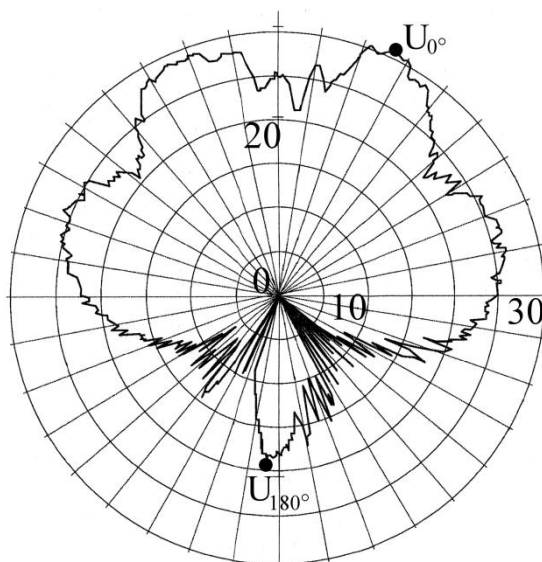


Obr. 1.5 Diagramy záření dipólové antény v závislosti na délce antény l vzhledem k vlnové délce λ , převzato z [3].

1.4.9 Činitel zpětného příjmu a záření

Činitel zpětného příjmu (ČZP), nazývaný také jako předozadní poměr, lze vypočítat jako poměr mezi napětím na výstupu antény ve směru maximálního příjmu U_{0° [V] (tj. maximální hodnota) a napětím naměřeném ve směru největšího postranního laloku (jeho maxima) v zadní části směrového diagramu U_{180° [V]. Toto reprezentuje následující vztah (1.10), přičemž indexy u jednotek značí obvyklé hodnoty úhlů pro odečítání těchto napětí z diagramu záření, což ale nemusí vždy platit (viz obr. 1.6).

$$\text{ČZP} = \frac{U_{0^\circ}}{U_{180^\circ}} \quad [-] \quad (1.10)$$



Obr. 1.6 Příklad určení hodnot napětí U_{0° a U_{180° z diagramu záření, převzato s úpravami z [3].

Pro činitel zpětného záření (ČZZ) platí stejný vzorec jako pro výpočet ČZP, pouze se nejedná o napětí přijímané, ale vyzařované.

1.5 Parametry antén pro měření elektromagnetické kompatibility

Pro elektromagnetickou kompatibilitu (EMC) jsou rozhodující dva základní parametry zařízení. První z nich vychází z vlastností zařízení vyzařovat rušivý signál a hovoří se o tzv. elektromagnetické interferenci (EMI) a druhý parametr vyjadřuje míru odolnosti zařízení proti vnějšímu elektromagnetickému rušení, zde se jedná o elektromagnetickou susceptibilitu (EMS) – podrobněji viz kap. č. 3. A právě na základě těchto aspektů jsou definovány následující dva anténní parametry využívané při měření EMC:

- *Anténní faktor*
- *Činitel vyzařování*

Význam těchto anténních parametrů bude podrobněji uveden v následujících dvou podkapitolách.

1.5.1 Anténní faktor

Tento anténní parametr (angl. Antenna Factor), v některé české literatuře nazývaný také jako anténní činitel, je definován z hlediska EMI a v podstatě vyjadřuje způsob převodu intenzity měřeného elektromagnetického (rušivého) signálu na napětí na svorkách měřicí antény. Podle typu antény se rozlišují dvě možné varianty anténního faktoru, může se totiž měřit magnetická složka pole H_r (rámovou, popř. feritovou anténou), pak se jedná o anténní faktor AF_H , či elektrická složka pole E_r (např. dipólem), pak jde o anténní faktor AF . Anténa tedy měří danou intenzitu rušivého pole a převádí ji přímo úměrně na napětí na svých svorkách, kde je napětí dále měřeno a na jehož základě je vyhodnocováno vyzařované rušení daného zařízení. Anténní faktor se tedy využívá při měření EMC (resp. EMI) pro stanovení dané intenzity elektromagnetického pole měřeného signálu při známém napětí na měřicí anténě. Při měření intenzity elektrického rušivého pole E_r [V/m] je anténní faktor AF tedy vyjadřován tímto vztahem:

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \quad [1/m] \quad (1.11)$$

Kde je: U_r – rušivé napětí na svorkách měřicí antény [V].

Případně pro vyjádření anténního faktoru AF v [dB] lze psát:

$$AF = E_r - U_r \quad [dB/m; dBV/m; dBV] \quad (1.12)$$

Dále pro měření magnetické složky pole platí pro anténní faktor AF_H následující vztah (1.13).

$$AF_H = \frac{H_r}{U_r} \quad [S/m] \quad (1.13)$$

Kde je: H_r – intenzita měřeného rušivého magnetického pole signálu $[A/m]$.

Případně také pro vztah v $[dB]$ platí:

$$AF_H = H_r - U_r \quad [dBS/m; dBA/m; dBV] \quad (1.14)$$

Použití anténního faktoru při měření je pak jednoduché. Pokud je požadováno například zjistit velikost intenzity elektrického rušivého pole $E_r[V/m]$, jednoduše se použije modifikace vztahu (1.12), lze tedy psát následující vztah (1.15).

$$E_r = AF + U_r \quad [dBV/m; dB/m; dBV] \quad (1.15)$$

1.5.2 Činitel vyzařování

Zde se jedná o problematiku stanovení intenzity elektromagnetického pole v určité vzdálenosti od jeho zdroje, tedy vysílací antény. Činitel vyzařování antény (angl. Transmit Antenna Factor TAF), neboli tzv. vysílací anténní faktor, se uvádí jako poměr intenzity elektrického pole $E(r)$ v určité vzdálenosti r od antény, která toto pole generuje, vzhledem k napětí U na svorkách této antény. Toto je vyjádřeno v následujícím vztahu:

$$TAF = \frac{E(r)}{U} \quad [1/m; V/m; V] \quad (1.16)$$

V logaritmickém vyjádření tento vztah přechází na tvar:

$$TAF = E(r) - U \quad [dB/m; dBV/m; dBV] \quad (1.17)$$

Tento anténní parametr se zpravidla využívá při měření elektromagnetické susceptibility (EMS) zařízení, kdy je požadováno vytvoření určité intenzity elektrického pole v místě testování odolnosti daného zařízení.

1.6 Pole antény

Anténní pole (viz obr. 1.7), tvořící anténní okolí, v němž je popisováno rozložení intenzity elektromagnetického pole, se člení podle vzdálenosti od antény v zásadě na tyto následně uvedené podskupiny.

- **blízké pole**

Toto anténní pole se nachází mezi anténou a vzdáleným vyzařujícím polem, přičemž se ještě dále rozděluje na následující dvě části:

- *blízké vyzařující pole*

Oblast tohoto pole, někdy označována za Fresnelovu oblast, je ohraničena reaktivním blízkým polem a začátkem vzdáleného vyzařujícího pole. Ve vzdálenosti R_1 toto pole přechází v pole vzdálené (Fraunhoferovo) a platí:

$$R_1 = \frac{2D_1^2}{\lambda} \quad [m] \quad (1.18)$$

Kde jsou: D_1 – největší rozměr antény [m], přičemž platí: $D_1 \gg \lambda$,

λ – vlnová délka antény [m].

- *reaktivní (indukční) pole*

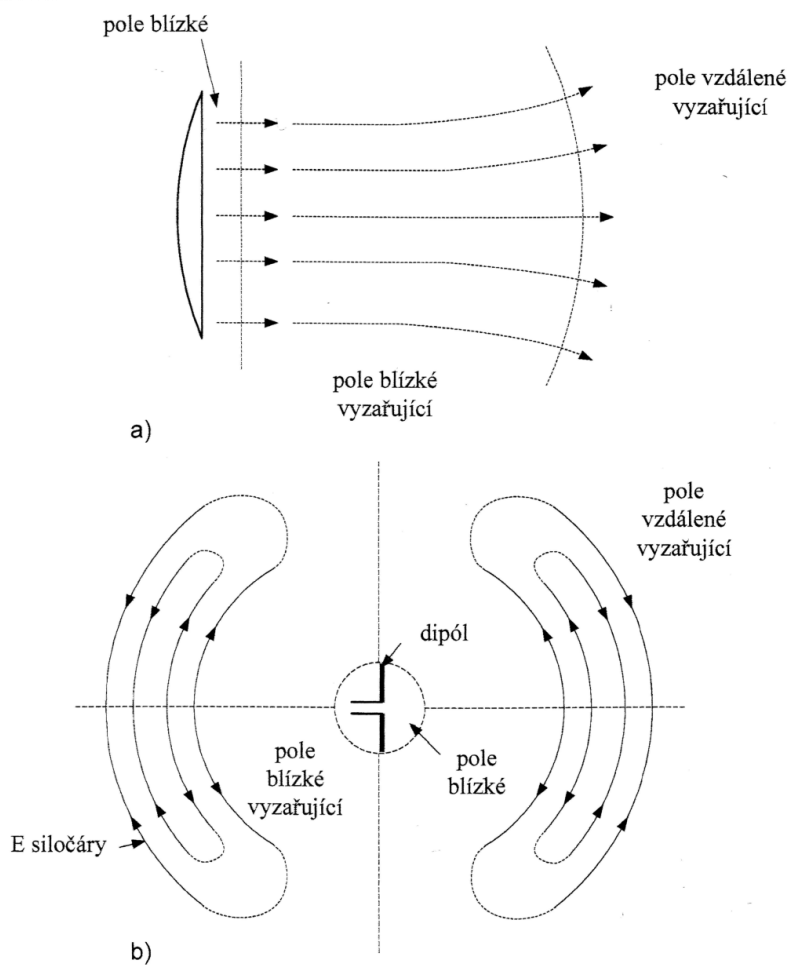
Reaktivní pole také spadá pod blízké pole a je zde charakteristickou vlastností elektrického a magnetického pole to, že periodická střední hodnota Poyntingova vektoru zde dosahuje téměř nulové hodnoty, tj. jalový výkon je mnohonásobně větší než činný. Toto indukční pole, někdy označované za Rayleighovo a tvořené oblastí mezi anténou a blízkým vyzařujícím polem, je definováno jako vnitřní prostor koule o poloměru R_2 v jejímž středu se nachází anténa. Toto popisuje následující vztah:

$$R_2 = 0,62 \sqrt{\frac{D_1^3}{\lambda}} \quad [m] \quad (1.19)$$

- **Vzdálené (radiační) pole**

Oblast vzdáleného vyzařujícího pole, někdy nazývaného jako Fraunhoferovo, je určena jako veškerý vnější prostor okolo koule definované vztahem (1.18), pokud stále platí $D_1 \gg \lambda$. Platí-li však nerovnice $\lambda > D_1$, přechází poloměr koule R_3 , jejíž vnější prostředí tvoří zónu radiačního pole, na velikost danou tímto vztahem:

$$R_3 = \frac{2D_1^2}{\lambda} + \lambda \quad [m] \quad (1.20)$$



Obr. 1.7 Anténní pole, převzato z [3].

2 Antény používané pro testování elektromagnetické kompatibility

Antény, ať již jsou tvořeny nejrůznějšími geometrickými tvary, lze nejprve rozlišovat a dělit podle několika hledisek, jejich stručný seznam je uveden v kapitole 1.3 – například je to vlastnost antény vyzařovat či přijímat v určitém směru, pak se anténa nazývá směrovou a naopak, pro anténu vyzařující či přijímací ve všech možných směrech se používá název všesměrová anténa. Dále je každý typ antény charakterizován určitými základními anténními parametry (viz kap. 1.4), které tvoří společně s anténním faktorem (viz kap. 1.5.1) základní kritéria použití antény při daném měření. Mezi tyto parametry se může řadit například frekvenční rozsah či impedance antény, která vychází z použitého konstrukčního materiálu při výrobě antény. Všechny zmíněná kritéria rozdělení antén a jejich charakteristické parametry tedy společně vytváří podrobné rozčlenění nejrůznějších typů antén do jejich úzkých podskupin s detailně definovanými vlastnostmi a charakteristikami. Existuje však ještě jedno členění, které antény dělí z nezákladnějšího hlediska, a sice je to nejčastěji z jejich geometrického tvaru, kterým je daná anténa schopna generovat či přijímat elektrickou či magnetickou složku pole. A právě tento geometrický tvar a jeho rozměry společně s použitým konstrukčním materiálem dále stanovují výsledné anténní parametry, které podrobněji charakterizují daný anténní typ.

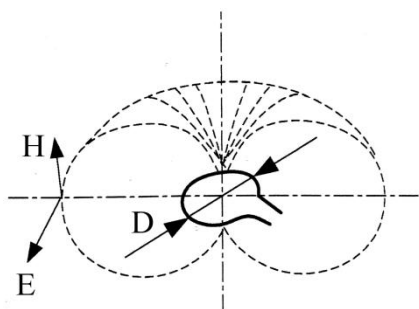
V následujících podkapitolách se tedy tato práce bude zabývat základním rozdělením používaných druhů antén včetně jejich stručné charakterizace, přičemž jejich konkrétní modely včetně charakteristik a parametrů jsou uvedeny v přílohách na konci práce. Tyto základní antény ilustruje obr. 4.3 v kap. 4.1.1.

2.1 Smyčková anténa

Anténa smyčková neboli rámová je sestavena z jednoho či více závitů vodiče ve tvaru uzavřené křivky, tj. reaguje tedy na magnetickou složku pole. Tato anténa je někdy označována za magnetický dipól, a to pokud platí pro průměr smyčky D tvořené vodičem vztah: $D \approx 0,1\lambda$. Pro představu smyčkové antény o průměru D je zde uveden následující obr. 2.1.

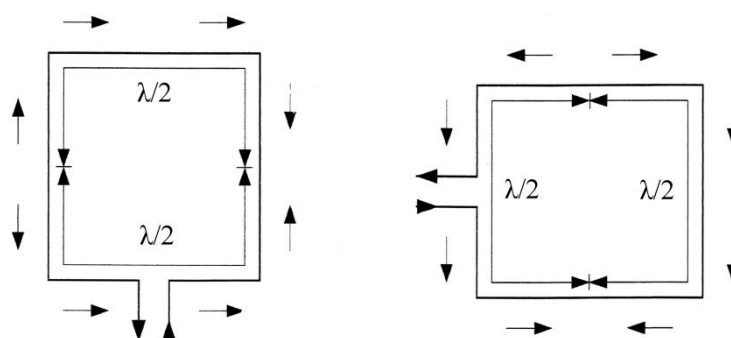
Smyčkové antény mohou být dále rozlišovány dle typu média, na které jsou jejich kovové závity smotané. Pokud je toto médium, tvořené kovovým či jiným materiálem, čtvercového

tvaru, jedná se o rámovou anténu. Další možnosti jsou například natočení vodiče na feritovou tyč, pak se hovoří o tzv. feritové anténě.



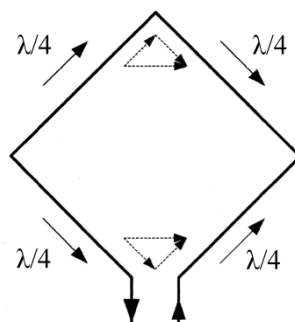
Obr. 2.1 Nákres smyčkové antény se znázorněním vektorů E a H , převzato z [3].

Dále existují různé typy těchto antén definované z hlediska vlnové délky λ , která obepíná uzavřenou křivku tvořící anténu, specifickým případem je zde např. smyčková celovlnná anténa. Tato anténa se skládá z rámu v nejčastějším případě čtvercového tvaru, který je tvořen vodičem o délce λ popř. je vodič na rám navinutý. Napájení antény se čtvercovým rámem je realizováno v polovině libovolné strany, jejíž délka odpovídá rozměru $\lambda/4$, přičemž volba napájené strany určuje anténní polarizaci, jak lze vidět na obr. 2.2. Šipky zde respektují směr tekoucích proudů při rezonanci, z čehož je patrné, že proudy tekoucí na napájené straně a straně jí protilehlé jsou ve fázi, tj. jejich účinky se sčítají, zatímco na ostatních dvou stranách je směr proudů proti sobě, což způsobuje vyrušení jejich vyzařovacích účinků. Vzniká tedy tzv. anténní řada mající dva prvky, jejichž délka a vzájemná vzdálenost je rovna $\lambda/4$.



Obr. 2.2 Rámová celovlnná anténa polarizovaná: a) horizontálně, b) vertikálně, převzato z [3].

Smyčkovou anténu lze rovněž napájet z jejího vrcholu, kdy vzniká stejné rozložení proudů jako již uvedené, zde jsou ovšem proudy ve vrcholech vektorově sčítány, jak naznačuje obr. 2.3 (pouze pro představu). Tyto proudy vytváří opět dvojici zářičů tvořící anténní řadu, přičemž tyto anténní řady lze dále znásobit jejich vhodným umístěním.



Obr. 2.3 Rámová celovlnná anténa s vrcholovým napájením, převzato z [3].

2.2 Prutová anténa

Přímá, neboli prutová či lineární anténa, je tvořena vodičem, jehož délka je mnohonásobně větší než jeho průměr. Konstrukce této antény je tedy značně jednoduchá, přičemž délka anténního vodiče se obvykle volí $l \approx \lambda$, $\lambda/2$, $\lambda/4$, kdy je řeč o tzv. celovlnné, půlvlnné nebo čtvrtvlnné anténě.

2.3 Kónicko-logaritmická anténa

Anténa kónicko-logaritmická, nebo také anténa logaritmická spirálová kuželová (angl. conical log-spiral antenna), se skládá ze dvou plechů smotaných na plochu kužele. Vyzařovací maximum této antény se nachází nad vrcholem kužele, přičemž směr vyzařování antény je dán směrem její osy. Funkce antény vychází z existence anténních oblastí obsahující proudy ve fázi, které protékají oběma rameny spirály. Tyto „aktivní“ místa se na anténě nachází průběžně od jednoho jejího konce směrem na druhý, kdy při průchodu proudů páskami na kuželu společně s klesajícím průměrem podstavy kužele roste frekvence vyzařovaného či přijímaného signálu – rozdíl průměrů spodní a horní podstavy kužele tedy určuje výsledné kmitočtové pásmo antény.

2.4 Logaritmicko-periodická anténa

Tento druh antén je tvořen vždy několika dipóly v závislosti na tom, jak velké frekvenční pásmo je požadováno přijímat. Každý anténní prvek (resp. dipól) je tedy nastaven na určitou přijímanou frekvenci, která odpovídá jeho délce, resp. vychází z určitého poměru jeho vlnové délky nejčastěji celým číslem a zároveň všechny dipóly společně tvoří výsledné přijímané kmitočtové pásmo. Anténa obsahuje dvě tzv. ráhna, kde jsou protější dipóly umístěny, a to vždy každý na jiném ráhne antény. Délka jednotlivých prvků na anténě logaritmicky roste směrem od nejkratšího dipólu, který je jako jediný napájen, k nejdelšímu, resp. je zachován konstantní poměr vzdálenosti k délce prvku τ , tímto se logaritmicko-periodická anténa

vyznačuje. Pro úplnost bude definována tato konstanta τ vztahem (2.1), který obsahuje všechny proměnné v jednotkách [m] dále ilustrované obr. 2.4. Tento obr. dále znázorňuje vrcholový úhel antény 2α a důležitou impedanci Z_0 .

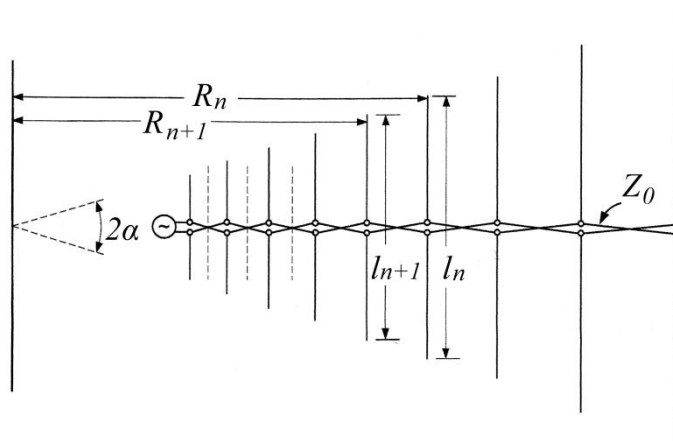
$$\tau = \frac{R_{n+1}}{R_n} = \frac{l_{n+1}}{l_n} \quad [-] \quad (2.1)$$

. Kde jsou: R_{n+1} – vzdálenost příslušného anténního prvku od pomyslného vrcholu antény,

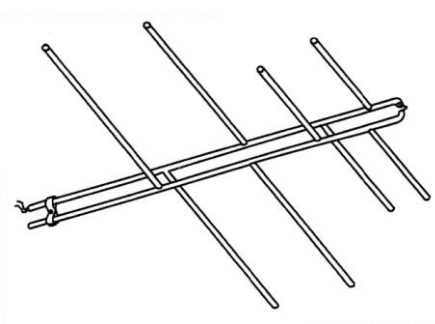
R_n – stejná vzdálenost pouze pro delší prvek, který následuje,

l_{n+1} – délka příslušného anténního prvku,

l_n – délka většího anténního prvku, který následuje (viz obr. 2.4).



Obr. 2.4 Konstrukční náčrt logaritmicko-periodické antény, převzato z [3].

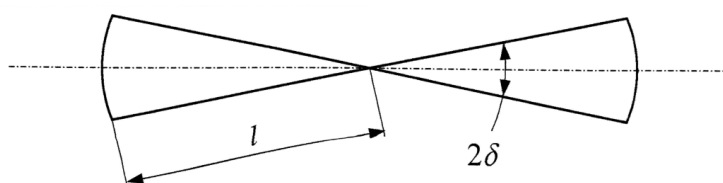


Obr. 2.5 Provedení logaritmicko-periodické antény, převzato z [3].

Na závěr popisování charakteristických vlastností logaritmicko-periodické antény je ještě pro představu uvedena její výsledná skutečná podoba dle obr. 2.5.

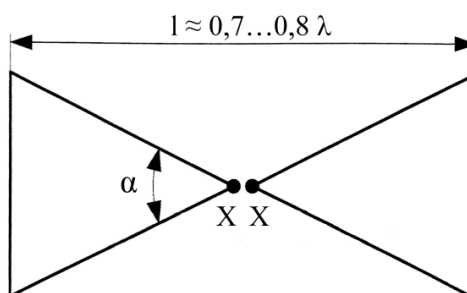
2.5 Bikónická anténa

Tato anténa, rovněž nazývána kuželovým dipólem, je (jak název vypovídá) složena ze dvou souměrných kuželů, jejichž vrcholy jsou umístěny proti sobě. Toto lze pozorovat na obr. 2.6, kde l je délka kuželů na povrchu a 2δ je jejich povrchový úhel. V závislosti na délce l vzhledem k vlnové délce λ se rozlišují různé druhy této antény. Platí-li vztah $l \gg \lambda$ a je-li úhel $\delta \approx 45^\circ$, tak se tato anténa nazývá trychtýřovou dvoukuželovou a zároveň pokud platí, že $l \ll \lambda$ a úhel je $\delta > 5^\circ$ hovoří se při symetrickém tvaru o kuželovém dipólu.



Obr. 2.6 Bikónická anténa (kuželový dipól), převzato z [3].

Dále existuje plochý, neboli trojúhelníkový dipól (angl. fan dipol či bow-tie antenna), který tvoří tzv. přibližně celovlnný dipól a skládá se z plochých trojúhelníkových vodičů mající shodný vrcholový úhel α a jejichž souměrné napájení je realizováno v místech jejich vrcholů (body X) – toto popisuje obr. 2.7.



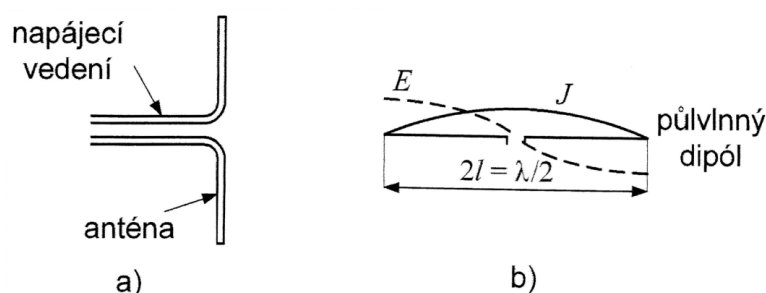
Obr. 2.7 Bikónická anténa (trojúhelníkový dipól), převzato z [3].

2.6 Složená širokopásmová anténa

Zde bude pouze stručně uvedeno několik nejdůležitějších informací, a sice do této anténní podskupiny patří zejména tzv. anténa BiLog současně s dalšími jejími modifikacemi (např. BiConiLog) – toto znázorňuje obr. 4.4 v kap. 4.1.1. Tento anténní typ vznikl sloučením bikónické a logaritmicko-periodické antény za specifickým účelem, který bude obeznámen v kap. 4.1.1 společně s dalšími informacemi týkajícími se této antény.

2.7 Dipólová anténa

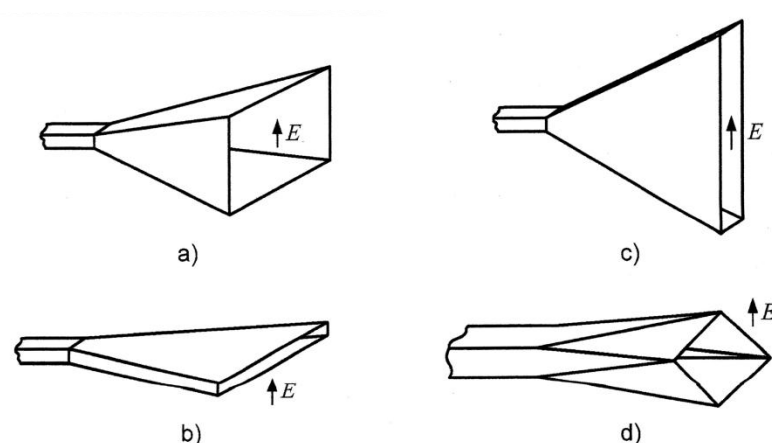
Dipólová anténa (neboli dipól) je tvořena dvěma vodiči stejné délky, přičemž jejich délka l je zvolena ve vhodném poměru k vlnové délce. Pokud je délka jednoho vodiče l rovna $\lambda/4$ resp. $\lambda/2$, hovoří se o půlvlnném resp. celovlnném dipólu, přičemž tvar a velikost vodičů dipólové antény určuje její výslednou impedanci a směrové vlastnosti. Tyto atributy tedy stanovují podobu výsledného impedančního přizpůsobení dipólu vzhledem k napájecímu vedení antény, jenž je znázorněno na obr. 2.8a. Zatímco obr. 2.8b ilustruje rozložení vektorů intenzity elektrického pole E a proudové hustoty J (resp. proudu) na půlvlnném dipólu.



Obr. 2.8 Dipólová anténa: a) struktura, b) rozložení vektorů E a J , převzato z [3].

2.8 Trychtýřová anténa

Trychtýřová anténa (angl. octave horn antenna) je de facto tvořena vlnovodem, jehož průřez se postupně zvětšuje až ke konci antény. Jak lze pozorovat na obr. 2.9, tyto trychtýřové antény nabývají nejrůznějších rozměrů, jejichž geometrie společně s konstrukčním materiálem stanovují výsledné specifické anténní parametry.

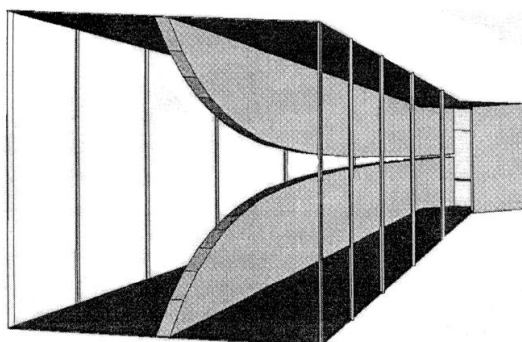


Obr. 2.9 Příklady provedení trychtýřových antén: a) jehlanová, b) a c) sektorové, d) úhlopříčná (diagonální), převzato z [5].

2.8.1 Trychtýřová hřebenová anténa

Hřebenová trychtýřová anténa neboli anténa ploutvová (angl. ridged horn antenna) je buzena pomocí hřebenového vlnovodu, přičemž tyto hřebeny přecházejí do trychtýřovitého tvaru. Tato anténa disponuje velmi dobrými širokopásmovými vlastnostmi.

Novější odlehčený typ trychtýřové hřebenové antény obsahuje boční stěny ve tvaru vodivých mříží namísto klasických stěn trychtýře, toto ukazuje následující obr. 2.10.



Obr. 2.10 Odlehčená trychtýřová hřebenová anténa, převzato z [5].

Mimo tento seznam základních antén používaných pro měření EMC existuje samozřejmě celá řada dalších anténních typů, které zde nebudou uvedeny.

3 Základní pojmy z teorie elektromagnetické kompatibility

3.1 Úvod do elektromagnetické kompatibility

Elektromagnetická kompatibility (EMC z angl. Electromagnetic Compatibility) je vlastnost zařízení popisující jeho správnou funkci v okolí jiných zařízení produkujících elektromagnetický signál, tj. jeho dostatečnou odolnost oproti ostatním zdrojům rušení, a současně jejich neovlivňování, resp. nesmí se ono samo stávat příliš velkým zdrojem rušení, a to ať už se jedná o technické či biologické systémy.

EMC jako taková vznikla v průběhu šedesátých let v USA, kdy však nevzbudila zájem mnoha odborníků. Ten se dostavil až při řešení problémů týkajících se EMC v běžném životě, což bylo způsobeno nárůstem rozvoje mikroprocesorů a elektroniky obecně. Již na konci sedmdesátých let H. M. Schlicke pronesl: „Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a EMC jsou neoddělitelné požadavky systému, který má správně fungovat v každé době a za všech okolností.“ [4]

3.2 Rozdělení elektromagnetické kompatibility

Kromě mnoha jiných hledisek dělení EMC lze tuto schopnost zařízení členit na dvě hlavní podoblasti:

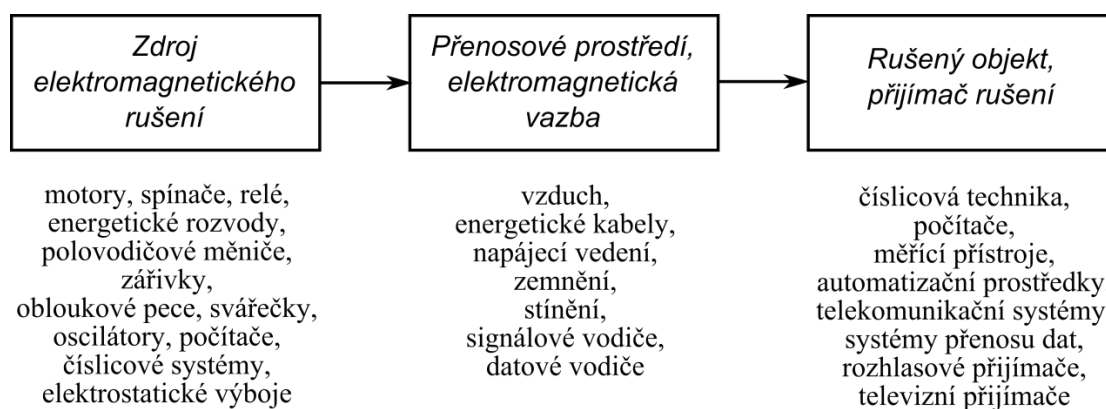
- *Elektromagnetická kompatibility biologických systémů*
- *Elektromagnetická kompatibility technických systémů*

Dále se bude tato práce zabývat pouze případem EMC technických systémů.

3.2.1 Elektromagnetická kompatibility technických systémů

Tato oblast EMC zkoumá vzájemné působení a ovlivňování jednotlivých technických prostředků, především různých elektronických zařízení. Důležité je si uvědomit, že v EMC se nejedná o aplikaci či vytváření nějakých nových principů, pouze se využívají znalosti již známé a společné pro oblasti různých oborů.

Na obr. 3.1 je uveden základní řetězec EMC s příklady jednotlivých bloků. Tento řetězec se právě využívá při vyšetřování EMC jednotlivých zařízení a systémů a to s kladeným důrazem na vyšetřování všech tří jeho bloků.



Obr. 3.1 Základní řetězec EMC s příklady jednotlivých částí, převzato z [4].

První blok základního řetězce EMC tvoří zdroj elektromagnetického rušení, který reprezentuje vznik tohoto rušení a jeho parametry, především jeho charakter a intenzitu. Tento zdroj rušení lze rozčlenit na dvě podskupiny, z jejichž příčin vzniká, a sice na tzv. přirozené zdroje (tj. Slunce, procesy v atmosféře) a na tzv. umělé zdroje (zdroje vyrobené člověkem), jejichž výřez je znázorněn na obr. 3.1 vlevo.

Další část řetězce EMC popisuje mimo jiné přenosové prostředí, tedy jakési přenosové médium, které zprostředkovává přenos elektromagnetického rušení mezi jeho zdrojem a cílem, tedy zařízením, které je rušeno. Zároveň tato část řetězce představuje druh vazby mezi zařízeními, tj. způsob jakým se signál mezi nimi přenáší. Rozlišuje se v zásadě několik těchto vazeb, ať už je to vazba induktivní, kapacitní, galvanická nebo vazba elektromagnetická.

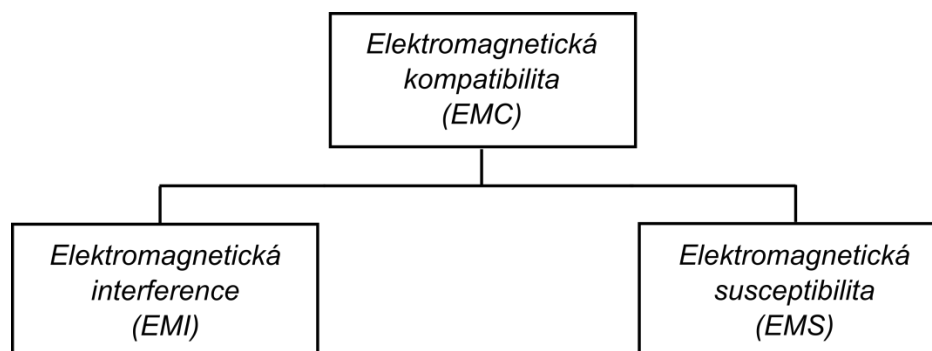
Poslední část uvedeného řetězce se zabývá především elektromagnetickou odolností rušených zařízení a jí odpovídajícím rozsahem elektromagnetických rušivých účinků na tyto rušené objekty. Velikost elektromagnetické odolnosti se zpravidla vyhodnocuje dle konstrukčních a technologických vlastností rušeného objektu, přičemž vždy musí být minimálně splněna hranice odolnosti.

Ve skutečnosti jsou však jednotlivé bloky základního řetězce EMC svázány daleko složitějším způsobem, protože každé elektronické zařízení se stává zdrojem a zároveň i přijímačem rušení. Nelze tedy uvažovat pouze jeden jednoduchý řetězec, který je uveden na obr. 3.1, protože výsledná rušení na jednotlivá zařízení jsou podstatně složitější, je tedy nezbytné na sebe superponovat jednotlivé dílčí základní řetězce EMC. Pro správné určení velikosti elektromagnetického rušení a odolnosti dílčího zařízení, tj. vyšetřování jeho EMC, se postupuje tak, že se vždy nejprve uvažuje pouze toto zařízení a zkoumá se jeho rušivý vliv na ostatní zařízení a následně se měří rušivý vliv těchto cizích zařízení vzhledem k zařízení,

kteří je vyhodnocováno. Tento postup je opakován pro jednotlivá další zařízení, které je požadováno vyšetřovat, jedná se tedy de facto o princip superpozice, přičemž v provozu pak probíhá dělení zařízení z hlediska velikosti jeho generovaného rušení a schopnosti jemu odolávat. Pokud vyzařování elektromagnetického rušení zařízení mnohonásobně převyšuje jeho elektromagnetickou odolnost, hovoří se o zdroji rušení a v opačném případě, kdy zařízení nezpůsobuje příliš velký rušivý signál, ale současně je více citlivé na ostatní rušení, stává se pak přijímačem rušení. Výsledky vyšetřování EMC zařízení mohou být různé, protože výsledný rušivý efekt se v provozu může projevit jako rušení, které pouze do jisté míry omezuje správnou funkci zařízení či úplně zamezuje její správné fungování a v některých krajních případech hrubého porušení pravidel EMC dokonce může způsobit až destrukci zařízení.

Uvažování pouze jednoho základního řetězce EMC lze tedy použít pouze tehdy, je-li pouze jeden zdroj rušení a také jeden jeho přijímač a do těchto objektů zároveň nezasahují žádné ostatní rušivé elektromagnetické signály. Jak již bylo uvedeno, toto v běžném provozu téměř nikdy nenastává, proto je nutno zmíněný řetězec EMC brát s patřičnou rezervou. Zároveň je důležité si uvědomit, že pokud v tomto řetězci EMC zanikne jeden ze tří uvedených bloků, tak vlastně společně s ním zanikne i smysl celé EMC, tj. systém bude naprosto elektromagneticky kompatibilní, a přesně tomu je v praxi snaha se přiblížit. Je tedy požadováno omezení rozsahu elektromagnetického rušení vlivem co největšího zamezení vlivu některé části řetězce EMC a právě volba této části závisí samozřejmě na vlastnostech a parametrech vyšetřovaného systému. Zejména je důležité vyhodnotit, zda rušivý signál je produkován jeho zdrojem jako součást užitečného signálu, tj. jeho rušivá složka, např. širokopásmový vysílač, nebo jestli se jedná o jeho vedlejší resp. parazitní efekt (vířivé proudy, jiskření na spojích). Podle těchto hledisek se pak lze zaměřit na jednotlivé části řetězce EMC, přičemž je snaha o jejich co možná největší zamezení, a to ať už se jedná o zdroj rušení nebo o jeho přijímač popř. o danou přenosovou cestu.

Jak již bylo řečeno, EMC je zejména charakterizována vyřazovaným rušením a odolností, z čehož vychází následující základní rozdělení EMC dle obr. 3.2. Rušení je zde reprezentováno elektromagnetickou interferencí (EMI) a odolnost elektromagnetickou susceptibilitou (EMS).



Obr. 3.2 Základní rozdělení elektromagnetické kompatibility.

- **Elektromagnetická interference (EMI)**

EMI (neboli elektromagnetické rušení) popisuje cestu rušícího signálu od jeho vzniku ve zdroji rušení přes přenášení přenosovým prostředím (například elektromagnetickou vazbou) až po rušené zařízení, přičemž se z hlediska EMC zkoumá především daná přenosová cesta a příslušný zdroj rušení popř. parametry daného rušivého signálu. V základním řetězci EMC se tedy EMI zabývá ovlivňováním parametrů prvních dvou částí (znázorněných na obr. 3.1 zleva), jinými slovy EMI má za úkol odstraňování důvodů vzniku rušení či znemožnění jeho přenosu daným prostředím a vazbou.

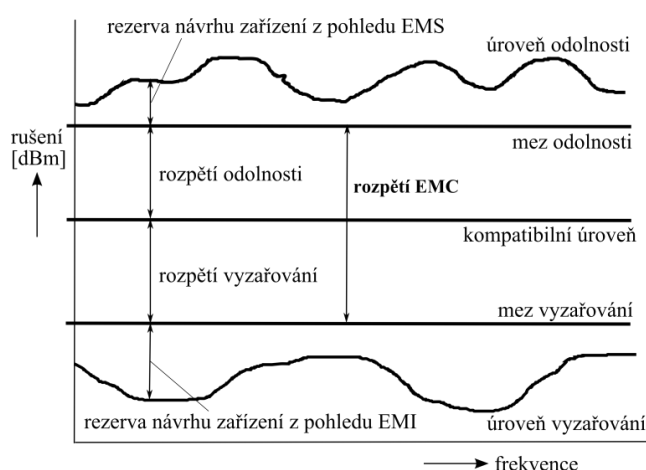
- **Elektromagnetická susceptibilita (EMS)**

EMS, nebo také elektromagnetická odolnost příp. imunita, vyjadřuje bezchybnou funkci zařízení, popř. s povolenými přesně určenými rušivými účinky, v tzv. elektromagnetickém vnějším prostředí, kdy je dané zařízení vystavováno vnějšímu rušivému elektromagnetickému signálu o přesně stanovené maximální povolené intenzitě dle norem EMC. EMS se tedy zabývá zpravidla omezováním následků rušivých signálů tím, že technickými prostředky snižuje elektromagnetickou citlivost, resp. zvyšuje odolnost, rušeného objektu či zařízení na rušení aniž by se zajímala o to, proč vlastně vzniká.

Obě uvedené podoblasti základního dělení EMC hrají v praxi významnou roli, jsou to totiž z principu nejvíce měřené veličiny a signály celé problematiky EMC, na jejichž základě se pak vyhodnocuje celkový výsledek měření EMC zařízení. Zároveň se toto měření, popř. softwarová simulace, doporučuje provádět už v průběhu navrhování a sestavování elektronického zařízení, protože se tím, oproti zjištění nesplňování podmínek EMC až při dokončení návrhu zařízení, ušetří nezanedbatelné finance, což je způsobeno průběžným přizpůsobováním vývoje zařízení jednotlivým výsledkům měření EMC.

3.3 Úrovně a meze elektromagnetické kompatibility

Jak již bylo předesláno, téměř každé zařízení je dnes v praxi vystavováno rušivému elektromagnetickému signálu a zároveň se zdrojem tohoto rušivého signálu stává. Důležité však je, aby zařízení bylo elektromagneticky kompatibilní, resp. aby splňovalo přípustné hranice EMC. Tyto hranice stanovují, jaká musí být minimální úroveň odolnosti zařízení, aby bylo ještě dostatečně odolné proti rušení, tj. jeho správná funkce nebyla narušována povoleným elektromagnetickým vyzařováním vnějšího prostředí, a zároveň jaká může být maximální úroveň vyzařování signálu daného zařízení, při které ještě nenarušuje funkci ostatních dalších zařízení. Přičemž je pochopitelné, že pro správnou funkci zařízení musí být úroveň odolnosti z hlediska rušení větší než je mez odolnosti a současně úroveň produkovaných emisí musí být menší, než je mez vyzařování. Systém by teoreticky fungoval i při rovnosti dané meze a jí odpovídající úrovni, ale v praxi se to nedoporučuje. Rozdíly jednotlivých úrovní a mezí pak tvoří tzv. rezervu návrhu zařízení, a to buď z hlediska EMS, tj. rezerva odolnosti vůči rušení, anebo z hlediska EMI, tj. rezerva vyzařování rušení. Pro dodržení správné funkce různých elektronických zařízení pracujících ve svém okolí, tj. zařízení jejich koexistence, je nezbytné tyto stanovené přípustné hranice EMC bezpodmínečně respektovat. Navíc je zřejmé, že pro správnou funkci systému, nebo zařízení, je důležité, aby mez vyzařování byla menší než mez odolnosti, tj. systém tedy není schopen rušit sám sebe. Tyto důležité aspekty EMC, vyjádřené jako rušení v závislosti na frekvenci, jsou vyznačeny na následujícím obr. 3.3.



Obr. 3.3 Definice úrovní a mezí elektromagnetického vyzařování a odolnosti, převzato s úpravami z [5].

Velikosti rezerv pro EMS a EMI nejsou nikým předepisovány a je tak pouze na výrobci daného zařízení, jak velké je zvolí. Je však důležité jejich vhodné zvolení u

konkrétního systému, pokud se totiž přežene jejich velikost, musí se zbytečně vynakládat větší investice na odrušování zařízení, tj. cena zařízení tedy stoupá, a naopak, pokud se nezvolí dostatečně velké rezervy, zařízení nesplní dané požadavky EMC a pokud se toto zjistí až při zhotovení výrobku, pak bude oprava ještě nákladnější – doporučuje se vyvarování těmto oběma případům.

4 Měření elektromagnetické kompatibility

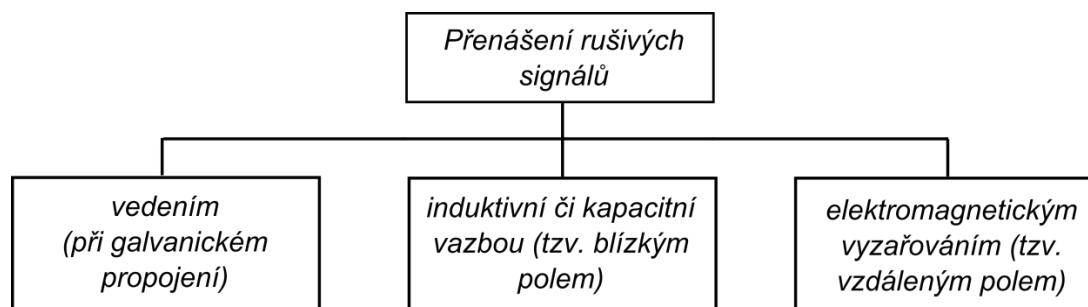
4.1 Měření elektromagnetického vyzařování anténami

4.1.1 Úvod do měření

Toto měření nabývá velkého významu, jelikož prakticky ověřuje, zdali testované zařízení splňuje příslušnou mez vyzařování, pro jejíž ilustraci slouží obr. 3.3, resp. zdali je jeho úroveň vyzařování menší než odpovídající mez. Bylo již vysvětleno, že prakticky není možné dosáhnout naprosté elektromagnetické kompatibility žádného zařízení, a to je právě důvodem vzniku měření rušivého vyzařování na zařízení jakožto testování jeho EMI.

Protože existuje mnoho druhů zařízení a také mnoho prostředí, v kterých je lze měřit, nebylo by přípustné jednotlivé výsledky měření EMC mezi sebou porovnávat, a tím by byly znehodnoceny. Proto musejí být nastaveny podmínky, při kterých lze dané zařízení testovat, a tím je míněno testovací prostředí, testovací metody i testovací zařízení, pouze pak lze jednotlivá měření navzájem komparovat. Zároveň je důležité zmínit, že také měřicí přístroje nejsou ideální, tj. naprosto elektromagneticky kompatibilní, a proto i tyto přístroje jsou generátorem rušivého signálu, na což je nutno při měření přihlížet.

Způsoby měření a měřicí přístroje pro testování EMI ve skutečnosti závisí na způsobu, jakým se daný rušivý signál šíří, což je představováno následujícím obr. 4.1.



Obr. 4.1 Způsoby přenášení elektromagnetických rušivých signálů.

V zásadě se hovoří o následujících třech možných způsobech přenášení elektromagnetického rušení, přičemž každý způsob je charakterizován příslušnými veličinami. Jedná se tedy o tyto následující možnosti.

- **Přenášení vedením**

Tento přenos napájecím či datovým vodičem je vyjadřován měřenými veličinami, jejichž charakter určuje výsledný elektromagnetický rušivý signál. Mezi tyto veličiny patří rušivý proud I_R , rušivé napětí U_R a popř. z nich vycházející rušivý výkon P_R .

- **Přenášení vazbou**

Zde se jedná o přenášení rušení mezi blízkými zařízeními buď induktivní (magnetickou) či kapacitní (elektrickou) vazbou vlivem tzv. blízkého elektromagnetického pole. Tyto parazitní vazby jsou charakterizovány intenzitou rušivého elektrického pole E_R v případě kapacitní vazby a intenzitou magnetického rušivého pole H_R v případě vazby induktivní.

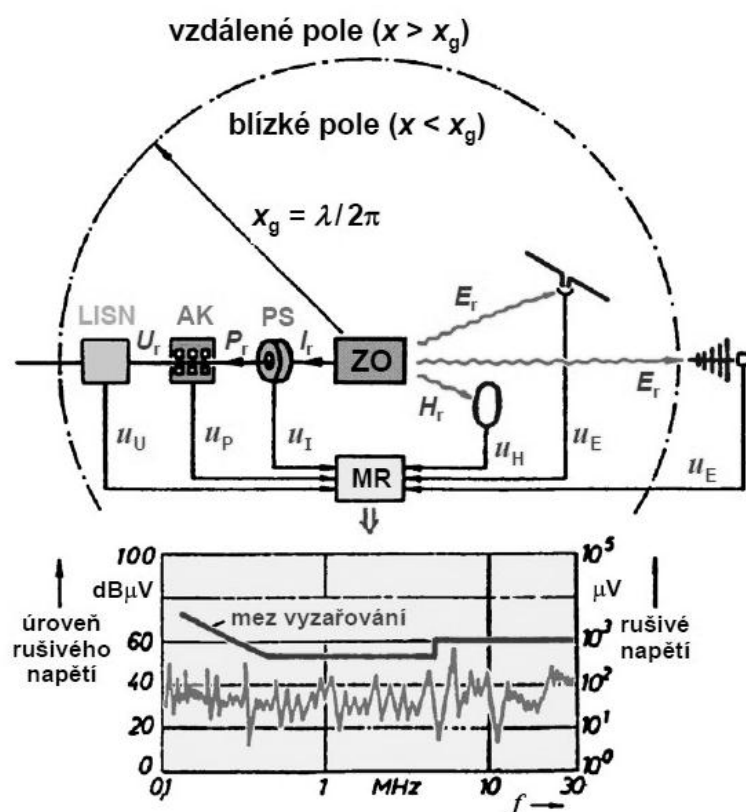
- **Přenášení vyzařováním**

Šíření rušivého signálu vlivem elektromagnetického vlnění (tzv. vzdáleného pole), které vzniká mezi vzdálenými objekty především na vysokých kmitočtech rádiového spektra, je charakterizováno stejně jako v předchozím případě intenzitami rušivého elektrického a magnetického pole E_R a H_R , popř. velikostí Poytingova vektoru p_R (hustotou výkonu) daného vyzařovaného rušivého pole.

Z uvedené problematiky je patrné, že existuje více druhů signálů charakterizujících dané rušení a tyto různé typy signálů zpravidla vycházejí z dané vazby (typu média) mezi zdrojem rušení a rušeným objektem. Tak například při šíření rušivého signálu vyzařováním je snímáno toto rušení vhodně zvolenou přijímací anténou a je tedy převáděno z intenzity rušivého magnetického pole H_r či elektrického pole E_r na rušivé napětí U_r na svorkách měřicí antény. Toto je ilustrováno na následujícím obr. 4.2, přičemž pro stanovení příslušné intenzity tohoto rušivého pole přijímaného anténou se využívá mimo jiné znalost tzv. anténního faktoru AF (viz kap. 1.5.1). Obecně při tomto měření rušivého signálu je využíván vhodný typ snímacího zařízení zvolený právě z hlediska formy (resp. média) v jaké se rušivý signál šíří a s tím související veličinou charakterizující signál, který je požadováno měřit. A to ať se již jedná o zmíněný případ využití měřicích antén při měření příslušné intenzity rušivého pole šířícího se vyzařovací vazbou či o případ použití např. napěťové sondy (NS) při měření rušivého napětí šířícího se vedením (také znázorněno na obr. 4.2).

Dalšími příklady použití měřicího zařízení při přijímání rušivého signálu je také tzv. umělá síť (resp. umělá zátěž LISN), proudová sonda PS či absorpční kleště AK. Přičemž následně po měření jakýmkoli zvoleným typem snímacího zařízení je signál zaveden do tzv. měřiče rušení MR, kde je signál vyhodnocován z hlediska EMC, z čehož následně vychází závěry o splňování či nespĺňování EMI či EMS zařízení (viz kap. 3.3). Dále je pro správnost měření nutno uvést několik důležitých faktorů, a sice měřicí zařízení musí striktně reagovat

pouze na rušivý signál vznikající a šířící se od zkoušeného objektu ZO (resp. zdroje rušení) a dále toto měřicí zařízení pokud možno nesmí ono samo generovat rušivý signál. V opačném případě musí být tento rušivý signál respektován a nějakým způsobem zohledněn při vyhodnocování výsledků daného měření rušení, jinak je totiž výsledek tohoto měření znehodnocen. Právě z těchto důležitých aspektů je nutno vycházet při sestavování měřicího pracoviště a jeho blízkého okolního prostředí, resp. je tedy nutné vhodně zvolit pozice jednotlivých měřicích přístrojů na tomto pracovišti, které nesmí být žádným jiným elektromagnetickým signálem rušeny.



Obr. 4.2 Různé metody měření rušivých elektromagnetických signálů vznikajících ve zdroji rušení (zkoušený objekt) a níže příklad vyhodnocení EMI zařízení – umělá síť (LISN), absorpční kleště (AK), proudová sonda (PS), zkoušený objekt (ZO), měřič rušení (MR), převzato z [5].

V následující kapitole se bude tato práce zabývat pouze předmětem měření rušivých elektromagnetických signálů pomocí měřicích antén. Ostatní uvedené měřicí přístroje zde již dále nebudou předmětem zájmu.

4.1.2 Měřicí antény

Měření elektromagnetického rušivého signálu pomocí nejrůznějších druhů antén se využívá pro frekvenční spektrum od přibližně 10kHz do řádově jednotek GHz. Hlavním

důvodem měření rušivých signálů anténami je zejména to, že je velice obtížné realizovat měření proudu či napětí rušivého signálu již na kmitočtech okolo 80MHz. Volba vhodných měřicích antén zpravidla závisí na kmitočtovém pásmu měřeného rušivého signálu a zároveň na převažující magnetické či elektrické intenzitě rušení. Při měření EMC se zejména používají následující typy antén (pro tyto frekvenční pásma):

- **Rámové antény (0,009 – 30 MHz)**
- **Prutové antény (0,009 – 30 MHz)**
- **Symetrické laděné dipóly (30 – 1000 MHz)**
- **Bikónické antény (20 – 300 MHz)**
- **Logaritmicko-periodické antény (200 – 3000 MHz)**
- **Kónicko-logaritmické antény (200 – 3000 MHz)**
- **Složené širokopásmové antény (20 – 2000 MHz)**
- **Trychtýřové antény (1 – 40 GHz)**

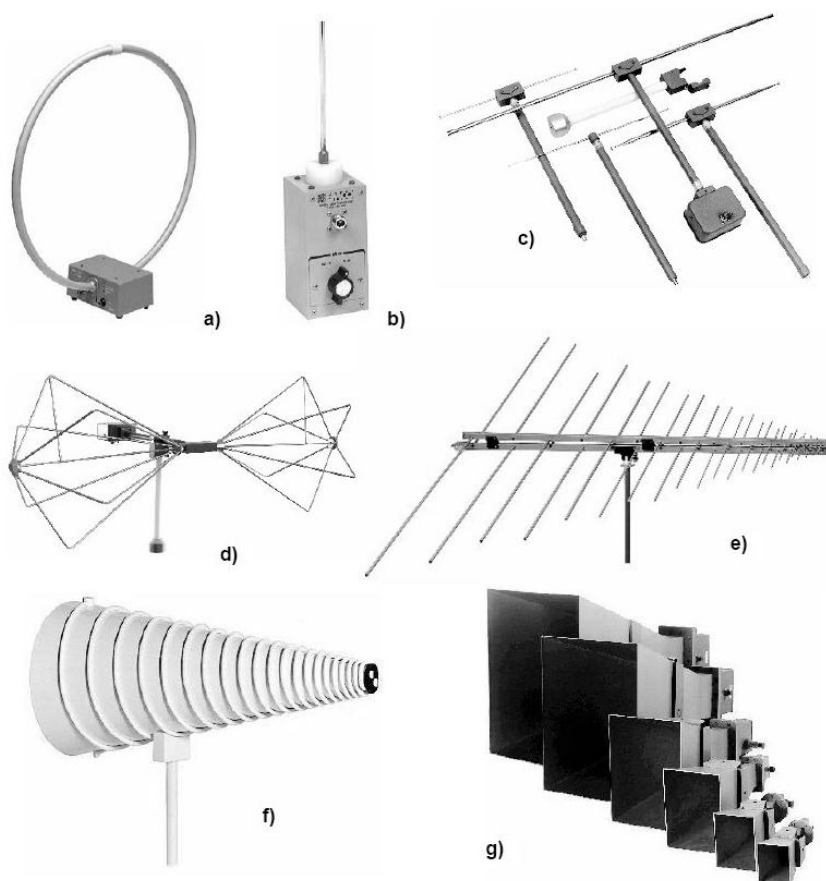
Všechny zde uvedené typy antén jsou podrobněji vysvětleny a popsány v kap. 2, proto se zde s výjimkou složené širokopásmové antény BiLog již tímto nebudeme více zabírat.

Parametry a charakteristiky těchto antén garantované výrobcí jsou uvedeny v přílohách na konci této práce.

V kmitočtovém pásmu od 9 kHz do 150 kHz ve většině případů výrazně převažuje intenzita magnetického rušivého pole H_R , proto je zde toto pole snímáno především rámovými (resp. smyčkovými) anténami (viz obr. 3.3a), používají se však také feritové antény, přičemž je stanoven maximální rozměr obou typů těchto antén na 60x60 cm. Cívka rámové antény je kovově stíněna z důvodu potlačení rušivého účinku intenzity elektrického rušivého pole. Antény mohou být navíc opatřeny měřicími zesilovači (tj. aktivní antény) či nikoliv (tj. pasivní antény). Přehled používaných měřicích antén pro měření různých frekvenčních pásem rušivých signálů je znázorněn na obr. 4.3.

Dále v kmitočtovém pásmu 150 kHz až 30 MHz se pro měření rušivého magnetického pole H_r využívají anténní typy shodné jako pro předešlé frekvenční pásmo, přičemž pro měření intenzity elektrického rušivého pole E_r se zde využívá prutová anténa (vertikální – viz obr. 4.3b) se stanovením doporučené délky 1m. Tato anténa se ovšem nepoužívá pro měření elektrické složky rušivého pole v tzv. blízkém poli od zdroje rušení, tam totiž společně s vysokofrekvenčním rušením vzniká také kapacitní vazba mezi tímto zdrojem a měřicí anténou, čímž by naměřené výsledky nemohly být platné. Proto se zde měří elektrická složka

rušivého pole výhradně dipólovou symetrickou anténou menší velikosti, která však obsahuje jednu nevýhodu. A sice vzhledem k anténní velikosti je totiž použitelná pouze při laboratorním (vnitřním) měřicím prostředí, to je důvodem používání prutových antén pro venkovní měření. Anténní velikost (resp. efektivní anténní výška) je definována jako vzdálenost středu vyzařování antény od zemského povrchu, kde tento střed tvoří anténní bod s maximální hodnotou rozloženého proudu, tj. při symetrickém rozložení proudu vodičem antény je to jeho střed.



Obr. 4.3 Antény pro měření rušivých signálů EMI: a) aktivní rámová anténa (magnetická měření), b) aktivní prutová anténa, c) sada laděných symetrických dipólů, d) bikónická anténa, e) logaritmicke-periodická anténa, f) kónicko-logaritmická anténa, g) sada trychtýřových antén, převzato z [5].

V dalším frekvenčním pásmu od 30 do 80 MHz jsou nejvíce využívány symetrické půlvlnné dipóly, které jsou ilustrovány na obr. 4.3c a jejichž zvolená rezonanční délka ($\lambda/2$) přísluší dle vztahu 1.1 frekvenci 80 MHz. Pro vyšší kmitočty až do 1GHz tyto antény slouží pouze jako referenční antény, kdy je však jejich použití při měření značně komplikováno. Je totiž nezbytné vhodné nastavení jejich délky vzhledem k používané měřicí frekvenci a dále pro jejich impedanční přizpůsobení je nutno do měřicího obvodu zakomponovat symetrizační

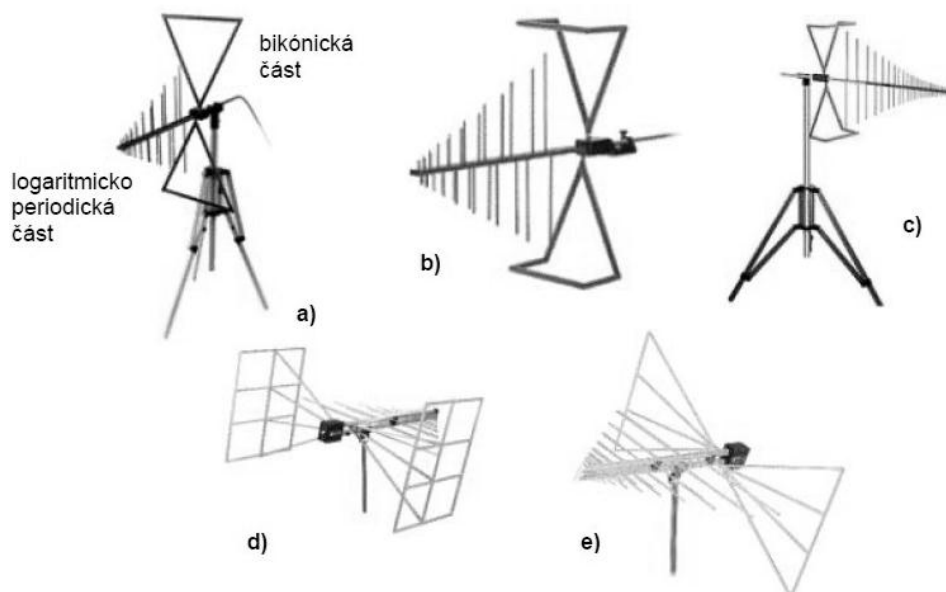
členy navíc (tzv. baluny). Jedině pak totiž bude signál procházet z anténního napáječe přes dipól až do měřiče rušení bez odrazů.

Je zřejmé, že během měření rušení vlivem elektromagnetického signálu o vyšších frekvencích, a sice v pásmu desítek MHz až 2000 MHz, je třeba použít širokopásmové antény. Mezi tento typ antén se řadí zejména logaritmicko-periodická anténa (obr. 4.3e), bikónická (obr. 4.3d) či kónicko-logaritmická anténu (obr. 4.3f), případně různé jejich kombinace za účelem sestrojení širokopásmové antény s požadovanými parametry (např. BiLog). Zároveň je nutno podotknout, že v kmitočtovém pásmu od 200 MHz do 6 GHz svými přednostmi logaritmicko-periodická anténa (zkráceně LP anténa) převýšila svoje konkurenceschopné antény a stala se tak v tomto pásmu nejpoužívanější. Mezi její hlavní výhody patří zejména téměř neměnná vstupní impedance a tvar vyzařovacího diagramu, přičemž tyto aspekty vychází ze specifické konstrukce LP antény. V tomto frekvenčním pásmu se u většiny antén používá lineární polarizace, a to takové roviny, při které dosahuje velikost měřené intenzity elektrického rušivého signálu nejvyšší hodnoty, přičemž tato polarizace se využívá pro civilní normy IEC, CISPR či EN (viz kap. 5). Zatímco výjimku z hlediska polarizace elektromagnetických vln tvoří případ kónicko-logaritmické antény, kdy je upřednostňována polarizace kruhová, a to v případě testování EMC zejména ve vojenském sektoru.

Při ještě vyšších kmitočtech než dosud uvedených, se zpravidla musejí využívat anténní vlnovody, a ty zde zastupuje skupina tzv. trychtýřových antén (obr. 4.3g). Z hlediska jejich poměrně úzkého pracovního frekvenčního pásma je nutné využívat více těchto trychtýřových antén, resp. celou sadu, kde příspěvky od jednotlivých dílčích antén společně vytváří výsledné pracovní kmitočtové pásmo. Zpravidla se zde pro dosažení požadovaného frekvenčního pásma v rozmezí 1 až 40 GHz využívá přibližně deset různých trychtýřových antén.

Za účelem zjednodušení měření byla v minulosti vyvíjena snaha sestrojít jednu anténu, která bude schopna pokrýt celý rozsah nejpoužívanějšího pásma frekvencí, a sice na kmitočtech 30MHz až několik GHz. Toto frekvenční spektrum je, jak již bylo uvedeno, pokrýváno dvěma typy antén, a sice na menších frekvencích je to bikónická anténa, zatímco u vyšších frekvencí se využívá anténa LP. Fakt, že toto kmitočtové pásmo bude pokryto jedním typem antény, představoval obrovské výhody při měření, neboť místo dvou antén nyní na dané měření stačí anténa pouze jedna. Tím by se cena, zahrnující veškeré financování daného měření, výrazně zmenšila. Tento cíl byl splněn během devadesátých let firmou CHASE, která

dokázala sestavit tzv. anténu BiLog, jenž byla vytvořena zkombinováním bikónické a LP antény, kde vlastnosti bikónické antény drtivě převládají pro nízké frekvence a naopak pro vysoké frekvence určuje anténní vlastnosti LP část. Další výhodou této antény je možnost získání antény s poměrně malými rozměry, a to i pro nízké kmitočty. Několik příkladů provedení této antény je uvedeno na následujícím obr. 4.4, kde je možné vidět nejdříve základní provedení (bod a) a dále postupně různé anténní úpravy za cílem dosažení požadovaných parametrů vhodných pro jednotlivá měření EMC (ostatní body).

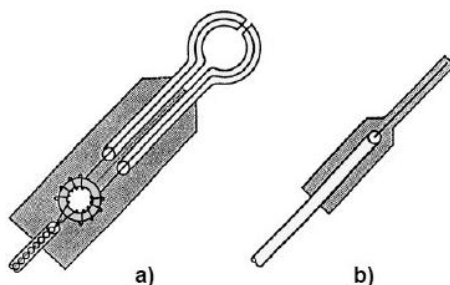


Obr. 4.4 Anténa BiLog a její modifikace, převzato z [5].

Cílem všech uvedených anténních konstrukčních úprav je zvyšování pracovního kmitočtového pásma antény, resp. vyrobit anténu co možná nejvíce širokopásmovou, čímž je snaha minimalizovat počet antén, které nutně musí být použity při daném měření. Dalším důvodem úpravy konstrukce je vylepšení anténních elektrických vlastností, které dále formují výsledné „vnitřní“ parametry antény. Tímto se upravuje např. impedance antény, zisk, směrovost apod. Toto úsilí je vyvíjeno zejména v oblasti nižších kmitočtů, z čehož vyplývá, že tyto konstrukční změny se budou nejvíce týkat bikónické části antény, zatímco LP část zůstane nedotčena. Kromě uvedené metody realizace antény BiLog, se nabízí ještě jedna varianta, a sice sestavit rovněž širokopásmovou anténu, ale s využitím pouze LP antény, resp. bikónická část antény BiLog bude nahrazena částí LP. A to takovým způsobem, že anténní prvky určené pro nižší kmitočty spektra, budou ohýbány a natáčeny do patřičných tvarů za účelem dodržení dané striktní délky jednotlivých dílčích anténních elementů. Tímto se získá specifický typ LP antény využívající svých příznivých anténních parametrů pro toto celé

kmitočtové pracovní pásmo. Zároveň je nutno podotknout, že pro správnou funkci této antény a důvěryhodnost naměřených výsledků je nutno anténu kalibrovat, a to v pravidelných intervalech, přičemž kalibrace se provádí srovnáním naměřených dat společně s daty získanými kalibrační (referenční) anténou, resp. dipólem.

Pro měření rušivých složek elektromagnetických signálů se využívá ještě jeden typ antén, dosud neuvedený. Jedná se o tzv. měřicí sondy, a to buď magnetického pole (obr. 4.5a), nebo pole elektrického (obr. 4.5b). Zásadní výhodou těchto miniaturních měřicích antén a hlavním důvodem jejich využívání je jejich vysoká dostupnost v měřicím obvodu, tj. lze se s nimi dostat na místa, kam se s jinými anténami dostat nelze. Tímto je možné lépe lokalizovat jednotlivé zdroje rušení. Sondy se tedy využívají zpravidla při vývoji zařízení, kdy jsou na daném plošném spoji měřicí „očíhávací“ anténou snímány rušivé vyzařované signály od jednotlivých bloků tohoto zařízení, čímž se vlastně testuje zařízení z hlediska EMI. Tato měření se však musejí brát s patřičnou rezervou, jelikož naměřené hodnoty jsou podstatně závislé na několika faktorech, největší z nich je samotné umístění sondy v měřicím obvodě, které nemusí být vždy stejné, měřicí anténa je pak blíže na jeden či druhý směr a snímá menší či větší hodnotu závislou na pozici daného zdroje vyzařovaného rušení. Toto je důvodem pro neexistenci příslušných norem, které by dané měření dále specifikovaly.

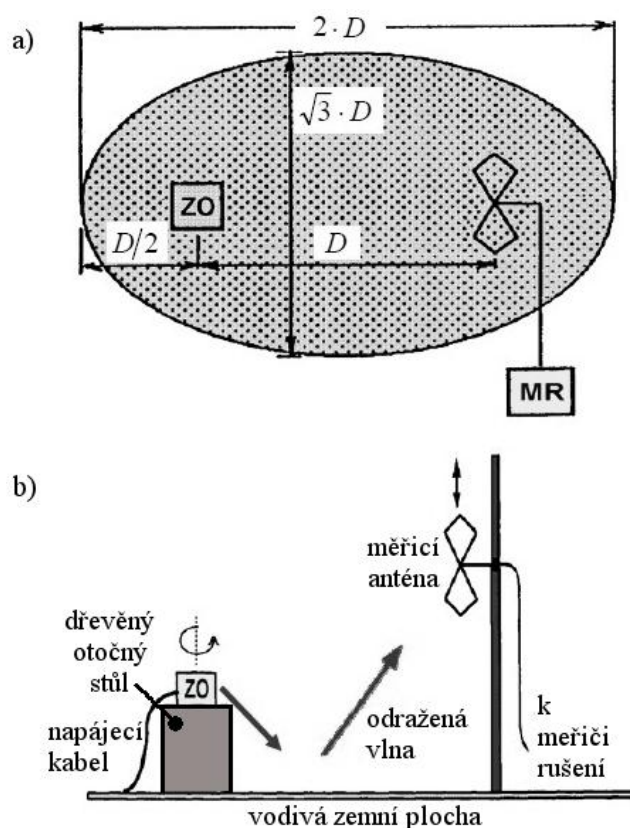


Obr. 4.5 Měřicí sondy: a) magnetického pole, b) elektrického pole, převzato z [5].

4.1.3 Měření ve volném prostoru

Relativně jednoduché měření rušivých signálů je prováděno ve volném prostoru (angl. OFTS – Open Field Test Site, popř. OATS – Open Area Test Site), a jak je možno vidět na obr. 4.6, zde se definuje měřicí plocha jako oblast půdorysu ohraničena elipsou (dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2, tj [6]). Jako u všech anténních měření, tak i zde toto prostředí výrazně ovlivňuje naměřené hodnoty a charakteristiky. Proto je důležité, aby místo měření bylo tvořeno co možná nejvíce rovnou plochou, bez nerovností a zároveň zde nesmí být žádný objekt, který by jakkoli zasahoval do měření, a tím ho znehodnotil, ať už se jedná o jakékoliv

elektrické vedení, budovy a vůbec cokoliv co by způsobovalo odraz elektromagnetických vln. V podstatě je snaha o eliminování veškeré elektromagnetické energie v okolí měřicího pracoviště, a to i pod zemským povrchem, přičemž jedinou výjimkou je nezbytné napájení měřicích přístrojů a antén. Pokud však okolnosti nedovolují toto učinit, je nutno vhodně změřit a analyzovat okolní rušivý elektromagnetický signál za účelem jeho následného respektování a na jehož základě budou naměřená data upravena, jedině tak můžeme zajistit důvěryhodné naměřené výsledky. Hranice akceptovatelného okolního rušení je představována hodnotou 20 dB, při nesplnění musí tedy být naměřené výsledky korigovány.



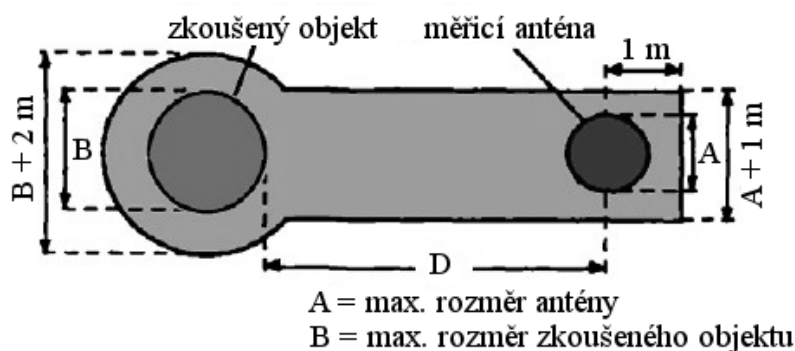
Obr. 4.6 Zkušební pracoviště pro měření ve volném prostoru: a) půdorys, b) bokorys, převzato z [4].

Jak ilustruje obr. 4.6a, vzdálenost D mezi zkoušeným zařízením (ZO) a měřicí anténou činí polovinu délky hlavní osy elipsy, přičemž oba tyto objekty jsou v ohniskách elipsy. Tato vzdálenost je pevně stanovena příslušnými normami na hodnoty 3, 10, 30 popř. 100 metrů, přičemž s vzrůstající vzdáleností stoupá i kvalita naměřených údajů. Někdy ovšem je třeba jít s touto vzdáleností poněkud níže, mnohdy totiž nelze tak velkou plochu zajistit a zrealizovat.

Zvolení plochy měřicího pracoviště eliptického tvaru nese svoje opodstatnění. Tato plocha se totiž vyznačuje tím, že případná odražená vlna od jejího okraje urazí minimálně

přesně dvojnásobnou vzdálenost než vlna šířící se po přímé dráze od zkoušeného objektu (ZO) k anténě. Toto zajišťuje dvojnásobný pokles intenzity odražené vlny oproti vlně přímé, a jelikož na okraje elipsy se neumísťují žádné odrazné plochy s dobrými vlastnostmi, docílí se ještě menší intenzity odražené vlny, která tím pádem v místě měření způsobuje menší zkreslení.

Zároveň je doporučeno mezi zkoušený objekt a měřicí anténu pokládat kovovou zemnicí plochu, a to z důvodu zajištění shodných podmínek pro odrazy elektromagnetických vln celého měřeného kmitočtového spektra. Jak ukazuje obr. 4.6b, k měřicí vlně totiž mimo vlny přímé vždy dorazí také vlna odražená, které je tímto zajištěno prostředí s neměnnými podmínkami, čímž je dané měření zpřesněno a je ho možno pokládat za platné. Obr. 4.7 znázorňuje tuto vodivou plochu s definovanými rozměry, které stanovuje norma ČSN EN 55022 (tj. [7]).



Obr. 4.7 Kovová plocha a její doporučené rozměry, převzato z [5].

Pokud bude pro plochu na obr. 4.7 použit jiný materiál než kov, je nezbytné nějakým způsobem zabezpečit shodné časem neměnné vlastnosti této plochy v celém jejím obsahu, a to za všech možných podmínek. Toto zaručuje věrohodnost naměřených dat. V opačném případě totiž dochází při odrazu elektromagnetických vln ke změně jejich parametrů vlivem proměnného útlumu této plochy.

Při měření se usiluje o docílení maximálního rušivého měřeného napětí, což souvisí i s anténní výškou nad zemí. Protože v anténě dochází k sčítání přímé vlny i vlny odražené, závisí výsledná intenzita elektromagnetického pole v anténě na tom, jakou danou hodnotu obsahuje fáze odražené vlny v místě sčítání s vlnou přímou. Touto fází, resp. vzdáleností antény od země, je tedy možno regulovat rušivý účinek odražené vlny. Toto je důvodem možnosti nastavení anténní výšky na měřicím pracovišti, rozsahy bývají 1 až 4 m, popř. 2 až 6 m, pro měřicí vzdálenosti $D = 30$ a $D = 100$ m, přičemž je nutno nastavovat tuto délku při

každé změně měřicího kmitočtu. Zároveň je omezena velikost antény v závislosti na vzdálenosti zkoušený objekt – anténa, tato anténní velikost nesmí přesahovat 10% z uvedené vzdálenosti. Při měření antény s většími rozměry je tedy nutno zvolit delší její vzdálenost od zkoušeného objektu odpovídající její velikosti.

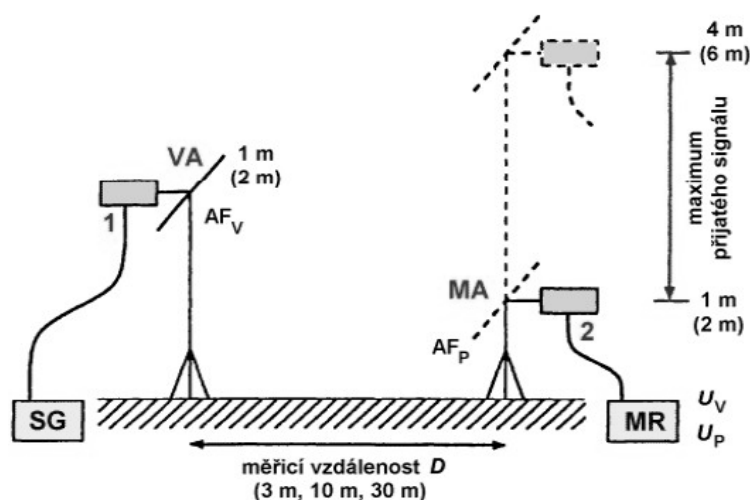
Dalším způsobem zvýšení rušivého napětí na anténě až na maximální hodnotu je realizován otočným stolem znázorněným na obr.4.6b. Toto jeho natočení do pozice maximálního rušení je nutno rovněž provádět při každé změně kmitočtu, a to společně s volbou dané polarizace, vertikální či horizontální, příp. s oběma případy. Nezbytné napájení měřicích přístrojů je realizováno kabelovými vodiči, které procházejí po zemi, příp. pod zemí, pokud to okolnosti dovolují. Umístění měřicích přístrojů (tj. měřiče rušení apod.) je voleno tak, aby se tyto přístroje nestávaly dalšími rušivými zdroji a nezasahovaly do měření, resp. jsou umísťovány mimo měřicí eliptickou plochu.

Charakter zkušebního pracoviště je popisován jeho daným útlumem SA (z angl. Site Attenuation), který vlastně popisuje, zdali je dané stanoviště vyhovující či nikoliv. Při stanovování těchto faktů se vychází z porovnání naměřeného útlumu SA_m s jeho teoretickým výpočtem SA_t dle normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 (tj. [6]), která definuje mez přijatelnosti jako maximální rozdíl uvedených útlumů rovný 4 dB, každý lepší výsledek se pak stává vyhovujícím, resp. musí platit následující vztah:

$$|SA_t - SA_m| \leq 4 \quad [dB] \quad (4.1)$$

Při měření útlumu zkušebního stanoviště dle obr. 4.8 se nejprve nahrazuje zkoušený objekt vysílací anténou (VA), která je napájena ze signálového generátoru o příslušné frekvenci a konstantní napěťové úrovni signálu. Nejčastější výška vysílací antény nad měřicí plochou je 1 m, příp. 2m, přičemž je nezbytné, aby polarizace této antény byla shodná s polarizací antény měřicí (MA). V první fázi měření se koaxiální kabely vedoucí původně k anténám od nich odpojí, spojí se do zkratu a změří se hodnota U_V [V] měřičem rušení. Následně se kabely opět připojí k anténám a MA se nastaví do vhodné pozice, kde měřič rušení změří nejsilnější rušivý signál U_P [V]. Výsledný měřený útlum stanoviště SA_m se pak vypočte z následujícího vztahu (4.2).

$$SA_m = 20 \log \frac{U_V}{U_P} \quad [dB] \quad (4.2)$$



Obr. 4.8 Měření útlumu SA zkušebního stanoviště, převzato z [5].

4.1.4. Zkoušky emise a meze dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed. 2

Mezi příklady měření ve volném prostranství se mimo jiné řadí zkoušky emise a meze dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed. 2 (tj. [8]). Podstata těchto zkoušek tkví v zamezení drážního vozidla vystavovat se interferencím mezi ním a instalacemi v blízkosti drážní soustavy, a to v maximální možné míře. Uvedená norma definuje následující faktory pro zkoušky emise a meze:

- **Zkušební místo**

Zkušební místo pro elektromagnetické rušení šířené zářením zde musí splňovat určité podmínky „volného prostoru“, které obsahují omezení drážního prostředí:

- V blízkosti měřicího místa se nesmí nacházet stromy, stěny, mosty, tunely nebo vozidla. Minimální vzdálenosti jsou:
 - 30 m pro vozidla hlavní železniční sítě
 - 10 m pro drážní vozidla městských drah
- Protože nelze vyloučit podpěry trakce, měřicí místo musí být uprostřed těchto podpěr, a to na opačné straně koleje, přičemž pokud se jedná o dvoukolejnou trať, tak na straně použité koleje. Při napájení drážního systému z přívodní kolejnice musí být anténa na stejné straně trati (jedná se o nejhorší případ).
- Trolejové vedení a přívodní kolejnice by měly tvořit „nekonečnou přímku“ směrem na obě strany od měřicího místa. Minimální délka obou těchto stran by měla být následující:
 - 3 km pro vozidla hlavní železniční sítě
 - 500 m pro drážní vozidla městských drah

Neměly by se vyskytovat nespojitosti v trolejovém vedení či v přívodní kolejnici, stejně tak jako v napájecí stanici, transformátorech, neutrální sekci, oddělovacích izolátorech apod.

Z důvodu existence rezonancí v oblasti vysokých frekvencí, musí být zaznamenáno provedení venkovního vedení s někdy nezbytnou změnou místa zkoušky. Zaznamenat se tedy musí přesná lokalizace zkušebního místa společně s charakteristikami místa i vedení.

Příspěvek trakční napájecí stanice lze vzít v úvahu při vyhodnocování emisí z vozidla. Je však nutné podotknout, že příspěvek od stejnosměrné trakční napájecí stanice je závislý na jejím proudovém zatížení a pokud se jedná o provoz naprázdno, nelze řádně naměřit.

- Je nutno se vyhnout případu blízkých venkovních přenosových vedení, a to včetně těch uložených v zemi, dále rozveden apod.

- Ve stejné napájené sekci by nemělo být provozováno žádné další drážní vozidlo ve vzdálenosti:

- 20 km pro vozidla hlavní železniční sítě
- 2 km pro drážní vozidla městských drah

Pokud nelze splnit tyto uvedené podmínky, je nutno zaznamenat šum na pozadí měřicího místa, a to před a po každém měření emisí zkoušeného vozidla. V jiném případě jsou dostatečné pouze dvě měření šumu pozadí, a to na začátku a na konci celé zkušební série.

Jestliže na určitých frekvencích je vyšší šum na pozadí než je přijatelná mez minus 6 dB, měření na těchto frekvencích se pak nemusí brát v úvahu, přičemž je nutno zaznamenat patřičné frekvence do zkušebního protokolu.

• *Zkušební podmínky*

Je nezbytné, aby uvedené zkoušky zahrnovaly všechny dílčí systémy v drážním vozidle, které se mohou stát zdrojem emisí záření.

Tažená vozidla musí být zkoušena stojící při provozovaném svém zařízení, tj. jsou v provozu měniče, nabíječe baterií apod., přičemž nejvhodnější umístění antény je proti zařízení, u kterého se očekává nejintenzivnější vyzářované rušení.

Hnací vozidla se musejí zkoušet jednak stojící (tj. stacionární zkouška) tak také při pomalé jízdě. Během stacionární zkoušky je nezbytné, aby pomocné měniče byly v provozu, přičemž není nutné jejich maximální zatížení při maximální emisi. Zároveň trakční měniče nepracují, ale musejí být pod napětím. Pokud se nepředpokládá místo s největšími emisemi, anténa by měla být umístěna proti středové ose vozidla.

Rychlost pro zkoušku při pomalé jízdě musí být tak nízká, aby nemohlo dojít k hoření oblouku a odsakování kluzkého kontaktu. Zároveň však tato rychlost musí být dostatečně vysoká, aby umožňovala elektrodynamické brzdění. Doporučuje se rozsah rychlostí

$20 \pm 5 \text{ km/h}$ pro drážní vozidla městských drah a $50 \pm 10 \text{ km/h}$ pro vozidla hlavní železniční sítě. Zároveň je nutné, aby vozidlo při průjezdu kolem antény zrychlovalo nebo zpomalovalo s přibližně jednou třetinou maximální tažné síly v příslušném rozsahu rychlostí.

Stacionární zkouška může nahradit zkoušku při pomalé jízdě, vozidlo však musí vyvinout jednu třetinu maximální tažné síly proti mechanickým brzdám při splnění následujících podmínek:

- Trakční zařízení umožňuje provoz ve stojícím stavu.
- Zkoušky elektrického brzdění nejsou vyžadovány, jestliže během brzdění nejsou používány jiné obvody.

Pokud je zkouška při pomalé jízdě nahrazena zkouškou stacionární s tažnou silou, musejí se použít mezní hodnoty pro zkoušku při pomalé jízdě. Je nezbytné, aby se rozhodnutí o provedení stacionární zkoušky s tažnou silou zdůvodnilo ve zkušebním protokolu.

• **Mezní hodnoty emise a doporučení vhodných antén pro měření**

- *Pro stacionární zkoušku*

Příloha B zahrnuje mezní hodnoty emise pro stacionární zkoušku graficky vyjádřené. Z uvedeného grafu na obr. B1 lze tedy vyčíst přípustné meze anténního faktoru ve frekvenčním rozsahu od 10 kHz do 1 GHz, přičemž jednotlivé části tohoto rozsahu jsou měřeny různými anténami.

Pro frekvence od 10 kHz do 30 MHz výrazně převažuje magnetické pole, proto se zde pro měření ve venkovním prostoru používá smyčková anténa, konkrétně anténa popsaná v příloze C (model 6502), jejíž frekvenční pásmo (10 kHz až 30 MHz) je plně vyhovující a anténní faktor (viz obr. C1) v porovnání s grafem v příloze B rovněž splňuje požadavky. Při požadování rozšíření frekvenčního spektra z pohledu nižších frekvencí, navrhuji využít smyčkovou anténu uvedenou v příloze D (model 6507), která zahrnuje větší kmitočtové pásmo (1 kHz až 30 MHz) a zároveň splňuje požadavek na anténní faktor dle obr. D1.

V pásmu frekvencí od 30 MHz do 200 MHz je při měření používána bikónická anténa (model BC-01) uvedená v příloze E. Nad tímto pásmem je měřeno s logaritmicko-periodickou anténou, a sice modelem LP-02 s frekvenčním rozsahem od 200 MHz do 3 GHz, jejíž parametry popisuje příloha F, měření tedy probíhá až do frekvence 3 GHz.

Dále se nabízí možnost nahradit bikónickou (30 až 200 MHz) a logaritmicko-periodickou anténu (500 až 6000 MHz) pouze jedním anténním typem, a sice složenou širokopásmovou anténou (viz příloha CH) s pásmem 30 až 6000 MHz, toto je při měření vítáno jednak z důvodu transportu na měřicí místo pouze jedné antény místo dvou a jednak z důvodu

urychlení měření. Při měření ve venkovním prostoru se totiž může měnit vnější elektromagnetický rušivý signál na pozadí měřicího místa a zpravidla se to děje neustále, proto je nutné provést měření co nejrychleji a tím zamezit velké změně tohoto signálu, což omezí zkreslení měření. Tato anténa zároveň může sloužit pro zvětšení frekvenčního rozsahu této normy, což může být v budoucnosti prospěšné. S přihlédnutím na anténní faktor této antény dle obr. CH1 lze tento návrh akceptovat, jelikož anténní faktor nedosahuje příliš vysokých hodnot.

Další variantou jak rozšířit frekvenční spektrum je navržení kromě smyčkové antény v příloze I také kombinace složené širokopásmové antény (příloha CH) a trychtýřové antény popsané v příloze I, která je teoreticky schopna měřit až do frekvence 8 GHz. Je zde však komplikace ohledně anténního faktoru, který v obr. I1 mírně roste a lze tedy předpokládat jeho růst i při vyšších frekvencích než ukazuje obr. I1, což lze pokládat za nevýhodu tohoto návrhu. Je však nezbytné toto respektovat a sledovat průběh anténního faktoru v porovnání s mezí přijatelnosti dle obr. B1 v příloze B.

- *Pro zkoušku při pomalé jízdě*

Mezní hodnoty pro tuto zkoušku udává graf na obr. J1 v příloze J, přičemž je zde možné využít obdobné antény jako u zkoušky v předešlém případě. V přílohách B a J jsou totiž udány velice podobné závislosti s pouze nepatrnými rozdíly.

4.1.5 Měření v elektromagneticky stíněných prostorech

Měření ve volném prostoru s sebou přináší jisté nevýhody, jednou z nich je náchylnost na rušení od jiných zdrojů než požadovaných, tak např. to mohou být veškeré radiotelefonní sítě, rozhlasové a TV vysílání, WiFi sítě a spousta dalších rušivých elektromagnetických signálů. Tyto signály mohou způsobit značné zkreslení s následkem znehodnocení naměřených údajů nebo při jejich velké intenzitě mohou vyšetřovaný signál překrýt a tím ho úplně zamaskovat a zabránit tak jeho změření.

Je několik způsobů jak lze toto omezit, a sice lze před započítím daného měření zmapovat výsledné rušivé pole nacházející se v prostoru zkušební stanoviště. Toto se provádí měřičem rušení, kdy se výsledné okolní rušivé pole změří v celém frekvenčním pásmu a výsledek se uchová do paměti měřiče rušení. Následně se při každém daném měření na určité frekvenci odečte od změřeného rušení generovaného zkoušeným objektem. Toto lze akceptovat za podmínky, že se výsledné rušivé pole vznikající od okolních zdrojů časově

příliš nemění, resp. mění se zanedbatelným způsobem. Toto však dnes z důvodu velmi časté radiokomunikace většinou není splněno, a proto je nutno vyhledat jiný způsob řešení.

Jedním z účinnějších způsobů jak přípustně změřit elektromagnetické rušení od zkoušeného objektu je možnost, spočívající v zamezení nežádoucímu rušivému signálu průchod do prostoru zkušebního stanoviště. Jinými slovy měření bude probíhat v elektromagneticky stíněných prostorech (v tzv. komorách). Realizace stínění těchto prostor je však poměrně obtížná a rozhodně finančně náročnější než předešlé způsoby, a to např. z důvodu nutnosti jistých prvků v měřicí komoře (dveře, okna, větrání apod.). Stínění, realizované většinou ocelovými plechy, je pak tímto komplikováno, přičemž je nutné počítat i s přívodními napájecími kabely pro zkoušený objekt a měřicí anténu. Tyto kabely musí být dostatečně odstíněny, aby nevyzařovaly další rušivý signál, popř. lze toto vedení realizovat v optické formě, čímž je problém vyřešen. Omezení platí i pro osvětlení, kdy komora nesmí být osvětlena např. zářivkovým světlem. Zároveň je požadováno co nejméně nábytku a jiných těles v prostorách stíněné komory za účelem co největšího omezení odrazů a útlumu elektromagnetických vln. Za dobře provedené stíněné komory jsou považovány takové, které způsobují útlum pro vnější signály 80 až 120 dB, přičemž použitelná měřicí frekvence je přibližně v rozmezí pěti dekad.

Navíc kromě těchto kritérií provedení je další požadavek na konstrukci komory, a to z hlediska vytvoření potřebné plochy pro měření (dle obr. 4.6a), která musí být dostatečně velká a musí zajišťovat správnou polohu měřících antén ve výškách 1 až 4 m, popř. 2 až 6 m, komory proto běžně dosahují rozměrů např. 20x10x10 m.

Další problém elektromagneticky stíněného zkušebního pracoviště je fakt, že kovem stíněný prostor ve tvaru kvádrů představuje de facto rezonátor, resp. rezonanční obvod s vysokým činitelem jakosti. Rezonance tohoto obvodu se zde mohou negativně projevit na značném počtu různých frekvencí, čímž by docházelo ke zkreslení naměřených dat, příp. jejich úplnému znehodnocení. Tyto rezonanční frekvence f_{REZ} lze vypočítat, je-li známa šířka (a), délka (b) a výška (c) komory v jednotkách [m] při respektování nezáporných celých čísel m , n , p , která představují rezonanční vid charakterizující rozložení pole v komoře. Výpočet se tedy provádí podle vztahu:

$$f_{REZ} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad [Hz] \quad (4.3)$$

Kde jsou: $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – permitivita vakua [F/m],

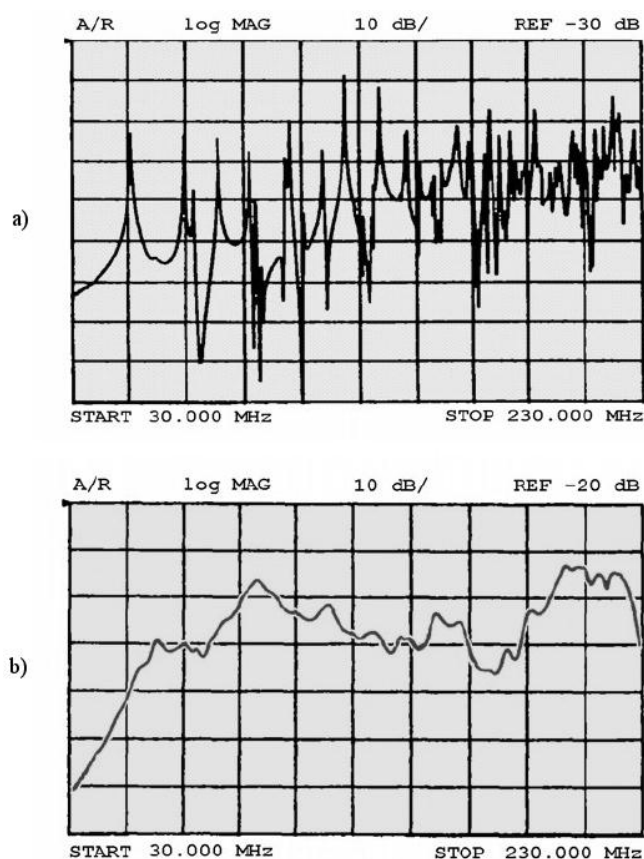
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ – permeabilita vakua [H/m].}$$

Mezi vypočtenými a skutečnými rezonančními kmitočty vznikají odchylky vlivem nedokonalosti stíněné komory, která je způsobena například tím, že se uvnitř nachází měřicí přístroje (anténa, zkoušený objekt) a nezbytná okna, dveře apod. způsobující další elektromagnetické netěsnosti. Tyto odchylky lze však vzhledem k jejich velikosti zanedbat.

Při měření nastává problém ve chvíli, kdy jsou rezonanční frekvence obsaženy v rozsahu měřicích frekvencí, potom totiž vybuzení těchto frekvencí zkoušeným objektem způsobuje zkreslení v naměřených údajích (obr. 4.9a) a v krajním případě jejich nereprodukovatelnost. V tomto případě by se podle polohy antény a měřicí frekvence v komoře měnilo zkreslení naměřených dat vlivem rezonančních frekvencí rezonátoru, resp. stíněné komory, což je neakceptovatelné.

Tento nežádoucí jev je minimalizován snížením velmi vysokého činitele jakosti rezonátoru, resp. stíněné komory. Toto je realizováno vložení objektů (tzv. absorbérů) např. kvádrového tvaru, které obsahují vhodné materiálové vlastnosti, jimiž způsobují ztráty nežádoucímu elektrickému poli rezonátoru představovaného stíněnou komorou. Tyto objekty se vkládají do vhodných výpočtem určených míst, kde se tvoří maxima elektrických polí příslušných rezonančních vidů. Po této aplikaci absorbérů lze získat již přijatelný tvar naměřené charakteristiky znázorněný na obr. 4.9b, který dále slouží jako tzv. měřicí šablona dané komory.

Dalším problémem, s kterým je nutno počítat, jsou pochopitelně odrazy zkoušeným objektem generovaných vln od stěn stíněné komory. Signál šířící se od zkoušeného objektu do všech stran se odráží od stěn, čímž přicházejí různé signály k měřicí anténě. Vlivem jejich různé uražené vzdálenosti se totiž liší jejich fázový posuv a následně se na měřicí anténě vyskytuje nepředvídatelný vektorový součet těchto dílčích elektromagnetických signálů, což je prakticky nepřijatelné.



Obr. 4.9 Výsledky měření ve stíněných prostorách: a) bez absorbérů, b) včetně absorbérů, převzato z [5].

Jednou z možností řešení této problematiky je vytvoření dostatečně velké stíněné komory, kdy vzdálenost od zkoušeného objektu ke stěně stíněné komory je dostatečně velká na to, aby signál, který se zde odrazí, byl dostatečně utlumen předtím, než dorazí k měřicí anténě. Odražené signály způsobující neurčitost měření budou tímto dostatečně utlumeny a měření bude tímto pokládáno za platné. Další variantou omezení odrazů vln je použití antény s dostatečně velkou směrovostí, kdy vyzařovaný signál se vlivem neexistence postranních laloků antény nebude odrážet od bočních stěn komory. Toto však vyžaduje přesné nastavení antény ve směru jejího maxima. Třetí možností je vytvoření tzv. bezodrazové absorpční komory, kdy je realizováno ideálně 100% pohlcení vyzařovaného rušení na stěnách stíněné komory, čímž je zabráněno jeho odrazům.

V tomto dokumentu dále ovšem nebude popisováno měření v těchto bezodrazových absorpčních komorách, jelikož zde na to již nezbyvá patřičný prostor.

4.2 Měření elektromagnetické odolnosti

Elektromagnetická susceptibilita EMS (odolnost), příp. imunita či citlivost, reprezentuje druhou velkou podskupinu EMC. EMS je definována v postatě kvůli skutečnosti, kdy každé zařízení vyzařující užitečný signál nelze jednoduše eliminovat, a proto problematika EMC musí být řešena z druhého pohledu, resp. musí být zajištěna dostatečná odolnost okolních zařízení vůči tomuto signálu. Proto každé elektronické zařízení z důvodu jeho správné funkce musí splňovat určité požadavky z hlediska EMS (dle obr. 3.3).

V zásadě se rozděluje EMS na dvě podskupiny, a sice na vnitřní a vnější elektromagnetickou odolnost. Příslušná EMS se pak rozlišuje podle destinace jednotlivých zdrojů rušení. Pokud se vyšetřuje elektromagnetická odolnost systému vzhledem ke zdroji rušení nacházejícím se uvnitř tohoto systému, hovoří se o vnitřní, neboli interní EMS. Zatímco pokud se rušivý zdroj nachází mimo daný systém, jedná se o EMS vnější (externí). Pochopitelně mez, kdy se mluví o interní či externí EMS, závisí na volbě velikosti příslušného systému. V zásadě existují tři následující typy systémů definovaných dle těchto atributů.

První druh je představován systémy s rozsáhlým uspořádáním, které se dělí na jednotlivé části, tzv. subsystémy. Tyto subsystémy mohou generovat rušení na jednotlivé jejich vzájemné spoje, které je řazeno a vyhodnocováno dle skupiny vnitřní EMS. Externí EMS zde reprezentují například zásahy elektrostatických polí z atmosféry či rušivý signál vycházející z rozvodné napájecí soustavy. Zástupcem těchto systémů je například jakýkoliv datový spoj realizovaný na větší vzdálenosti.

Dalším druhem jsou lokální, neboli místní systémy, které se zde rozdělují na jednotlivé subsystémy situované uvnitř například místnosti, patra či celé budovy. Tyto subsystémy jsou vystavovány rušivým vlivům nejenom od svých rozvodů napájení a informačních signálů, ale také od různých dílčích zařízení uvnitř daného objektu (např. stroje, výrobní elektronická zařízení apod.). Příkladem jsou zde např. firemní počítačové sítě, oblasti výpočetní techniky ve firmě apod.

Závěrečným druhem systémů z hlediska EMS jsou veškerá elektronická zařízení tvořící jeden funkční celek, resp. jedno diskrétní a kompaktní zařízení (tzv. přístrojové zařízení). Do této kategorie jsou zařazovány např. počítače, domácí elektronika, jakékoliv přístroje pro měření apod.

U těchto třech systémových druhů je vždy vyšetřována EMC jak z pohledu vnějšího prostředí, tak i z pohledu prostředí vnitřního. Pochopitelné je, že na každý dílčí systém působí rušivé účinky od různých zdrojů, ať už větších či menších. V zásadě však jsou brány v úvahu pouze některé zdroje, jejichž potenciální hrozba generovaného rušení je nejrozsáhlejší a jejichž existenční pravděpodobnost dosahuje nejvyšší hodnoty. V závislosti na těchto faktorech jsou pak stanoveny odlišné meze odolnosti pro jednotlivé systémy z pohledu EMS, přičemž tyto hranice logicky vyplývají ze sumarizace vybraných dílčích zdrojů rušení nacházejících se v příslušném prostředí, v němž bude systém provozován.

Výslednou a potřebnou vnitřní elektromagnetickou susceptibilitu EMS (odolnost) diskrétního zařízení, které tvoří jeden funkční celek, může ovlivňovat několik výrobních faktorů, jako jsou např. tyto:

- *zvolení lokací jednotlivých el. obvodů včetně pasivních a aktivních částí*
- *návrh desky plošných spojů, umístění jednotlivých spojů a jejich charakter*
- *zvolení způsobu napájení a vzájemná poloha napájecích a datových částí*
- *návrh interního zemnění a stínění*
- *zvolení typu konektorů a jiných prvků zajišťujících připojení k externím obvodům a systémům*

Při posuzování celkové EMS systému se vychází z těchto základních třech pravidel:

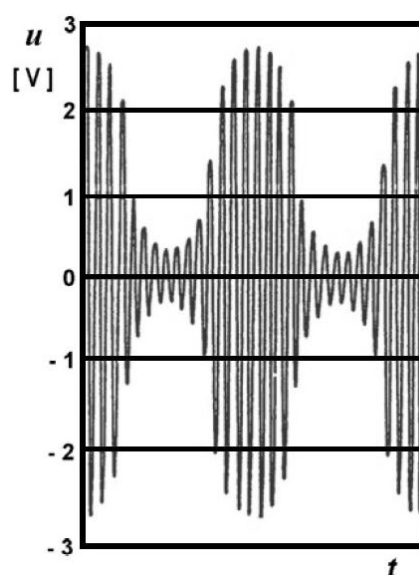
- *vnitřní EMS systému je ovlivňována vnitřní EMS jeho daných subsystémů*
- *výsledná EMS systému je stanovena dle EMS jeho nejhoršího dílčího celku, tj. elektromagnetickou odolností tohoto nejnepříznivějšího členu*
- *výsledná, vnější EMS systému může být ovlivňována vnitřní EMS, jelikož může dojít k superponování vnitřního rušení na rušení vnější*

4.2.1 Testování elektromagnetické odolnosti vůči vysokofrekvenčním polím

V uplynulých deseti letech význam provádění elektromagnetických zkoušek odolnosti výrazně pokročil a dnes je toto provádění již samozřejmostí. Jelikož vývoj zejména radiových spojení (TV, rozhlas, satelitní vysílání apod.) významně pokročil až na takovou úroveň, kdy by nebylo možné realizovat koexistenci jednotlivých zařízení z hlediska jejich vyzařování, musí být každé zařízení vybaveno schopností být elektromagneticky odolné. Pokud se toto učiní správným způsobem, dané zařízení se stane imunní oproti vnějšímu rušivému signálu a bude schopno svoji správné funkce i v blízké lokalitě jiných vyzařovacích zařízení (viz kap. 3). Toto jsou hlavní aspekty tvořící důvody existence zkoušek elektromagnetické odolnosti.

Jelikož zařízení mohou obecně vyzařovat rušivý signál na mnoha různých kmitočtech, je nutno i při zkouškách tohoto daného vyzařování respektovat široké pásmo kmitočtů. Tento frekvenční rozsah pro zkušební harmonické signály je zde od 9kHz do až 230 MHz, přičemž frekvenční minimum je zde stanoveno normou ČSN EN 61000-4-6 ed. 3 (tj. [9]). Zkušební signál na nejnižších frekvencích tohoto pásma je zde zaveden do zkoušeného zařízení dvěma hlavními způsoby, a to buďto pomocí induktivních či kapacitních vazebních obvodů, anebo využitím kapacitních kleští, kdy je signál aplikován jejich přicvaknutím na přívodní kabely. Zároveň od hodnoty přibližně 26 MHz výše se pro vytváření elektromagnetického rušení pro měření odolnosti využívají především antény, přičemž norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (tj. [10]) specifikuje tyto zkoušky odolnosti v nejužívanějším frekvenčním rozsahu 80 až 2000 MHz.

Tato norma ve frekvenčním pásmu 80 MHz až 2 GHz stanovuje úrovně elektrických intenzit pro zkušební měření na 1, 3, 10 nebo 30 V/m, popř. ještě vyšší pokud to výrobce vyžaduje. Tyto úrovně vyjadřují efektivní hodnoty intenzity elektrického pole harmonického nemodulovaného signálu, ovšem při zkouškách odolnosti je signál modulován amplitudovou modulací (zkráceně AM) s hloubkou 80% harmonickým nosným signálem o kmitočtu 1 kHz, přičemž výsledný modulovaný signál pak dokumentuje obr. 4.10.



Obr. 4.10 Zkušební signál po amplitudové modulaci s hloubkou 80 %, převzato z [5].

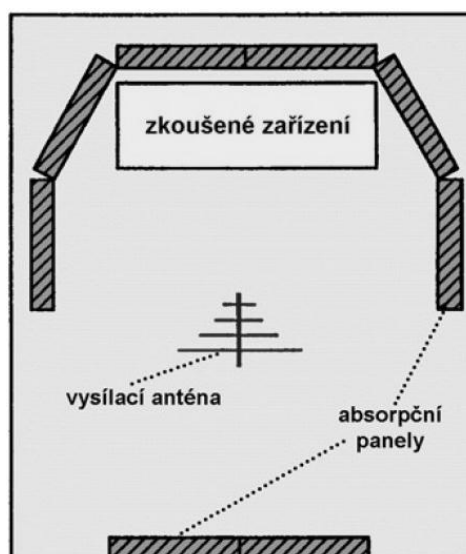
U reálných rušivých signálů vždy také dochází k modulaci, proto průběh signálu na obr. 4.10 může být pokládán za příkladný pro tyto signály. Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (tj. [10]) zároveň říká, že tento ilustrovaný signál rovněž reprezentuje rušivé signály modulované

jinými způsoby (např. pulzní amplitudovou modulací PAM či pulzní kódovou modulací PCM apod.). Navíc tato AM obsahuje další výhodné atributy, a sice konstrukčně pro kmitočet 1kHz je velice jednoduchá a zároveň její požadavky na přesnost odpovídají jiným typům modulací.

Zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu signálu tkví v jednoduchém principu, a sice zkoušený objekt je v daném zkušebním stanovišti ozařován požadovanou úrovní simulovaného rušivého signálu, který je vysílán příslušnou anténou. Z důvodu generování vysoké intenzity elektromagnetických polí je při těchto zkouškách vhodné a doporučené pro simulování polí zvolit elektromagneticky stíněné prostory (podkapitola 4.1.1.2). Nejenom, že se touto správnou volbou zajistí ideálně nulový vliv od nežádoucích vnějších rušivých elektromagnetických signálů, ale navíc se vůči silnému elektromagnetickému poli ochrání i obsluha měření a rovněž měřicí přístroje. Přičemž tato měřicí technika je umístěna do jiné elektromagneticky stíněné komory, která leží za měřicími absorpčními prostory, což ukazuje obr. A1 v příloze A, kde je ilustrována podoba zkušebního pracoviště pro profesionální měření.

Před započítím daného měření je zkoušený objekt položen na nevodivý zpravidla otočný stůl o výšce 80 cm, pokud však vzhledem ke své velikosti nedosahuje povolené vzdálenosti 1m od stropu komory, umísťuje se na nevodivou podložku o výšce 10 cm nad zemí. Normou upřednostňovaná vzdálenost zkoušeného objektu od vysílací antény je 3m, pokud to z jistých důvodů nelze realizovat, je striktně stanovena minimální vzdálenost mezi těmito objekty na 1m. Zároveň je doporučeno, aby vzdálenost zkoušeného objektu od stěn a stropu stíněné komory byla pokud možno větší než 1m.

Pokud není k dispozici dostatek financí pro obložení kompletně celých ploch zkušebního pracoviště, lze absorbéry opatřit pouze některá místa. Často se pak měření provádí v komorách, které jsou obloženy absorpčním materiálem všude kromě podlahy, tímto vznikají tzv. částečně bezodrazové komory. Pro omezení odrazů od podlahy lze použít dodatečné (přídavné) absorbéry, což ukazuje obr. A1 v příloze A. Ty pokryjí podlahu pouze na určitých místech určených zpravidla experimentováním během měření. Stejným způsobem se rovněž určuje nejvhodnější umístění dodatečného absorpčního materiálu při měření v prostorách, kde nejsou stěny ani strop či podlahy pokryty absorbéry. V takovém případě je nezbytné obložit blízké okolí zkoušeného objektu materiálem s absorpčními vlastnostmi (tzv. absorpčními panely) a minimalizovat tím vliv odražených elektromagnetických vln a zároveň zajistit potřebnou ochranu pro okolní měřicí vybavení stanoviště, resp. vytvořit podmínky pro měření, které korespondují s příslušnou normou. Příklad tohoto zkušebního pracoviště nastiňuje obr. 4.11.

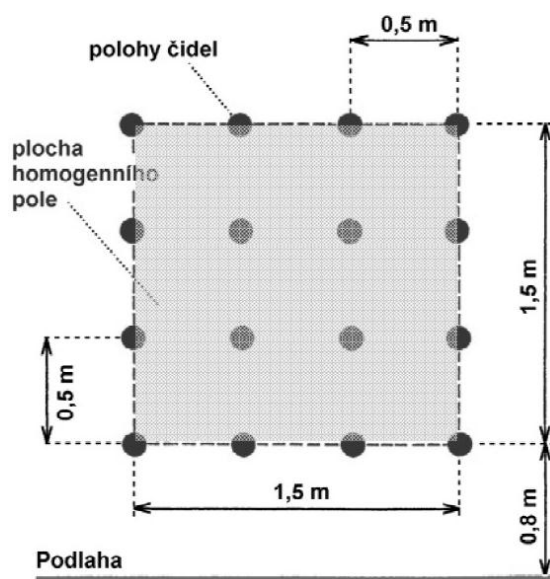


Obr. 4.11 Částečně bezodrazové zkušební prostory, převzato z [5].

Při provádění zkoušky odolnosti musí být zajištěno, aby byl zkoušený objekt vystavován elektromagnetickému poli o konstantní velikosti, která koresponduje s normou, resp. je požadováno vytvoření homogenního pole o neměnné hodnotě v místě zkoušeného objektu. Z tohoto důvodu je nezbytné, aby dané měřicí stanoviště bylo před zahájením zkoušky kalibrováno. Tato kalibrace je popisována normou ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (tj. [10]), která pro kalibraci stanovuje použití harmonického nemodulovaného signálu, jehož elektromagnetické pole je snímáno v tzv. ploše homogenního pole. Jak ilustruje obr. 4.12, jedná se o imaginární plochu ve vertikálním směru umístěnou 0,8 m nad zemí a tvořící čtverec o straně 1,5 m, přičemž tato plocha může být menší v ohledu na rozměry zkušebního objektu. Minimální plochu však tvoří čtverec o straně 0,5 m. Během kalibrace je tento pomyslný čtverec vystavován elektromagnetickému signálu vysílací antény a menší všesměrovou anténou (čidlem) je snímána hodnota tohoto pole v 16 bodech měření na ploše, což ukazuje obr. 4.12, přičemž zkoušený objekt se prozatím nenachází na pracovišti.

O homogenním poli se hovoří, pokud intenzita měřeného pole nekolísá o více než $\pm 3\text{dB}$ na 3/4 uvedené plochy (dle obr. 4.12), tzn. alespoň na 12 bodech z celkových 16. Pokud bude zvolena nejmenší možná plocha (0,5 x 0,5 m), musí uvedená podmínka platit ve všech 4 měřicích bodech.

Při zkoušce odolnosti se vždy nastaví čelní strana zařízení tak, aby vertikálně byla v pomyslném homogenním poli popisovaném obr. 4.12, které bylo kalibrováno a toto se provede pro každou ze 4 stran zkoušeného objektu při vertikální i horizontální polarizaci.



Obr. 4.12 Plocha představující homogenní pole dle ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, převzato z [5].

Pokud však je některá ze 4 stran tohoto objektu rozměrnější než uvedená plocha (1,5 x 1,5 m), postupuje se po částech a vždy jsou jednotlivé dílčí sektory plochy této jedné strany postupně proměřovány, až je nakonec změřená celá jedna strana. Navíc je nezbytné, aby se po ukončení kalibrace neměnily podmínky na pracovišti před následujícím měřením, tj. při tomto měření se používají všechny přístroje stejné jako při kalibraci (anténa apod.) a zároveň je nutné brát ohled i na jejich jednotlivá rozmístění, které se stejně jako u kabeláže nesmí měnit. Jakákoliv změna jejich pozic totiž může způsobit odlišné pole, než bylo při kalibraci, což způsobí zkreslení měření a naměřené výsledky mohou být znehodnoceny.

Těchto měření pochopitelně existuje daleko více typů, které ovšem z důvodu nedostatečného místa nebudou v tomto dokumentu uváděny.

5 Normalizace a standardizace o elektromagnetické kompatibilitě

S obrovským nárůstem vývoje a použitím elektroniky a současně požadavkem na splňování EMC se dostavil i požadavek na vytváření patřičných technických norem, jejich harmonizaci, a to jak v národní tak také v celosvětové úrovni. Z tohoto důvodu vznikla evropská komise CENELEC (angl. European Committee for Electrotechnical standardization), která sjednocuje 28 národních elektrotechnických výborů především států Evropské unie (navíc také Norsko a Švýcarsko), přičemž se v této komisi normami v oblasti EMC zabývá především technická komise TC 110. Pro celosvětové působení existuje Mezinárodní elektrotechnická komise – IEC (angl. International Electrotechnical Committee), jejíž výsledné normy nesou označení EN, tj. jedná se o evropskou normu, a jejíž oblasti zájmu jsou de facto shodné jako v případě CENELEC. Podle vzájemné dohody mezi uvedenými dvěma komisemi, pak CENELEC přebírá již vytvořené normy od IEC, aniž by tvořila jejich jakékoliv změny, a zároveň předává komisi IEC požadavky na vytvoření jednotlivých dalších norem. Proto normy od CENELEC vychází z norem tvořených IEC, kromě těch týkajících se přípustných mezí vyzařování, ty jsou založeny na normách CISPR (angl. International Special Committee on Radio Interference).

Protože prakticky není možné navrhnout a sestrojít zařízení, které bude naprosto elektromagneticky kompatibilní, tj. bude v provozu naprosto imunní na rušení a samo se nebude stávat jeho zdrojem, musí se stanovit příslušné normy, standardy a. předpisy, které definují určité přípustné úrovně signálu z hlediska EMC. Toto je důležité pro zajištění správného celoplošného fungování různých elektronických zařízení, tj. dodržení jejich EMC, přičemž výrobky, které nesplňují dané normy anebo to měření neprokázaly, nemohou a nesmějí být uvedeny na trh pod výhrůžkou peněžité sankce – toto bylo poprvé zavedeno v zemích EU Směrnicí č. 89/336/EEC v roce 1996. Tyto nařízení je třeba vždy respektovat, a to ať už se jedná o normalizaci v civilní, vojenské, medicínské, automobilové či jiné oblasti EMC, kde pochopitelně jednotlivé směrnice nebudou klást stejné požadavky na EMC daných zařízení. V zásadě se normy a další formy normalizace mohou lišit podle:

- *důvodu proč vznikly (např. z důvodu bezpečnosti)*
- *cíle, pro který byly vytvořeny (např. charakterizace daného výrobku)*
- *různých požadavků kladených při vývoji (např. dohoda se zákazníkem)*
- *charakteru své aplikace (např. doporučené nebo závazné normy)*

- **dopadu (důsledků) aplikace** (např. od téměř žádných přes mírné až po značné důsledky aplikace, popř. lze uvažovat následky nedodržení norem a předpisů)

Normy lze všeobecně rozčlenit, což lze pozorovat v tab. 5.1.

Všechny normy pro oblast EMC		
Normy pro oblast EMI	Normy pro oblast EMS	Normy pro odrušovací prostředky
definice meze vyzařování	definice meze odolnosti	parametry odrušovacích prostředků
přístroje a metody pro měření EMI	přístroje a metody pro testování EMS	přístroje a zkoušky pro měření

Tab. 5.1 Rozdělení norem a předměty jejich zájmu v oblasti elektromagnetické kompatibility.

5.1 Druhy civilních norem o elektromagnetické kompatibilitě

Norem, zabývajících se EMC, je dnes poměrně hodně, avšak všechny jsou důležité (méně či více) a všechny mají nějaký svůj cíl, který je buď nutný dodržet, anebo se to pouze doporučuje. V zásadě, co se týče normalizace EMC, se normy rozdělují na tyto tři druhy:

- **Základní normy**

Tyto normy zpravidla určují problém EMC a říkají, za jakých základních všeobecných podmínek a pravidel lze testovat EMC konkrétního zařízení. Tyto normy se tedy nezabývají definicí mezí elektromagnetických emisí ani odolnosti. Jsou především zaměřeny na tyto oblasti:

- prostředí
- názvosloví
- *nf* vyzařování
- *nf*, *vf* a impulzní odolnost
- *vf* vyzařování a odolnost

- **Všeobecné normy**

Zde se normy uvádí vždy vzhledem k danému prostředí a určují, jaké jsou minimální požadavky a metody testování, které lze použít pro všechny výrobky a systémy, které jsou provozovány v uvedeném prostředí. Tyto normy, někdy také nazývané kmenovými normami, tedy kladou základní požadavky pro stanovení kvality zařízení z hlediska jeho EMC. Z těchto norem vychází následující normy výrobků, přičemž všeobecné normy by měly zastupovat normy výrobků pouze za předpokladu, že pro daný typ zařízení neexistuje jeho odpovídající norma výrobku. Všeobecné normy se odkazují na základní normy, a to v případě, že jde o

popisování různých zkoušek popř. zkušebních metod a zkušebních uspořádání. Tyto normy se soustředí na tyto následující atributy:

- *vyzařování (EMI)*
- *odolnost vůči rušení (EMS)*
- *obytné, obchodní a lehké průmyslové prostory*
- *průmyslové prostředí*

- **Normy výrobků**

Tyto normy bývají také označovány za předmětové normy a říkají, jaké mají být detailní požadavky a metody testování vzhledem k jednotlivým druhům či skupinám zařízení, a to z jakýchkoliv hledisek. Zároveň tyto normy musí vždy korespondovat s odpovídajícími základními a všeobecnými normami. Předmětové normy se věnují především:

- *spotřebičům a elektronice pro domácnost*
- *průmyslovým zařízením (kromě zařízení informační techniky – ZIT)*
- *telekomunikačním zařízením a ZIT*
- *vědeckým a lékařským zařízením*
- *motorovým vozidlům a zařízením se zážehovými motory*
- *televizním, rozhlasovým a jim podobným zařízením*
- *zařízením pro dopravu a přepravu*
- *testovacím a měřicím zařízením*

5.2 Stručný seznam vybraných norem o elektromagnetické kompatibilitě

Samotný vývoj jednotlivých norem o EMC a jejich plnění nařizované zákony prošly od vzniku v minulém století dlouhou cestu k dnes již propracovaným formám. Seznam norem je dnes poměrně rozsáhlý, proto v následujících řádcích budou uvedeny pouze normy vycházející z členění EMC na EMS, které mají nejvyšší pozornost. Tento stručný výřez z norem EMC je tedy uveden v následujících tab. 5.2, tab. 5.3 a tab. 5.4.

Označení normy	Název normy	Rok vydání
ČSN EN 55011 ed. 2	Průmyslová, vědecká a lékařská (ISM) vysokofrekvenční zařízení - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření	11/2007
ČSN EN 55013	Rozhlasové a televizní přijímače a přidružená zařízení - Charakteristiky rádiového rušení - Meze a metody měření	9/2002
ČSN EN 55014-1 ed. 3	Elektromagnetická kompatibilita - Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Emise	6/2007
ČSN EN 55015 ed. 3	Meze a metody měření charakteristik vysokofrekvenčního rušení způsobeného elektrickými svítilny a podobným zařízením	6/2007
ČSN EN 55022 ed. 2	Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření	4/2007
ČSN EN 55012 ed. 2	Vozidla, čluny a spalovací motory - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření pro ochranu přijímačů, které jsou mimo tato zařízení	6/2008

Tab. 5.2 Výběr z harmonizovaných českých norem EMC pro oblast vysokofrekvenčního rušení, převzato z [5].

Označení normy	Název normy	Rok vydání
ČSN EN 55016	Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti	
ČSN EN 55016-1-1 ed. 2	Část 1-1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Měřicí přístroje	9/2007
ČSN EN 55016-1-2	Část 1-2: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Pomocná zařízení - Rušení šířené vedením	8/2005
ČSN EN 55016-1-3 ed. 2	Část 1-3: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Pomocná zařízení - Rušivý výkon	7/2007
ČSN EN 55016-1-4 ed. 2	Část 1-4: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Pomocná zařízení - Rušení šířené zářením	2/2008
ČSN EN 55016-1-5	Část 1-5: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Zkušební stanoviště pro kalibraci antény pro 30 MHz až 1 000 MHz	8/2005
ČSN EN 55016-2-1 ed. 2	Část 2-1: Metody měření rušení a odolnosti - Měření rušení šířeného vedením	12/2009
ČSN EN 55016-2-2	Část 2-2: Metody měření rušení a odolnosti - Měření rušivého výkonu	9/2005
ČSN EN 55016-2-3 ed. 2	Část 2-3: Metody měření rušení a odolnosti - Měření rušení šířeného zářením	9/2007
ČSN EN 55016-2-4	Část 2-4: Metody měření rušení a odolnosti - Měření odolnosti	9/2005
ČSN EN 55016-4-2	Část 4-2: Nejistoty, statistické hodnoty a stanovování mezí - Nejistoty při měřeních EMC	9/2005

Tab. 5.3 Výběr z harmonizovaných českých norem EMC pro společnou oblast odolnosti a vysokofrekvenčního rušení, převzato z [5].

Označení normy	Název normy	Rok vydání
ČSN EN 61000-4-3 ed. 3	Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti	11/2006

Tab. 5.4 Úzký výběr z harmonizovaných českých norem EMC pro oblast odolnosti proti rušení, převzato z [5].

5.3 Česká technická norma ČSN EN 55016-1-4 ed. 3 (idt CISPR 16-1-4:2010)

Tato norma (tj. [11]), která byla vydána v prosinci 2010, se věnuje měření vyzařovaného rušení ve frekvenčním pásmu od 9 kHz do 18 GHz a stanovuje zde vlastnosti a provoz měřicího zařízení pro toto měření, a to včetně údajů antén a zkušebních pracovišť. Předmětem zájmu jsou také měřicí metody a jejich nejistoty, přičemž uvedené skutečnosti platí pro všechny frekvence a úrovně vyzařovaného signálu v rozsahu měřicího zařízení CISPR.

Tato práce se ovšem bude zabývat pouze vybranou částí této normy, která koresponduje s tématem měřicích antén, příp. bude uvedena drobná modifikace normy.

5.3.1 Antény používané pro měření vyzařovaného rušivého signálu

- **Frekvenční rozsah od 9 kHz do 150 kHz**

Zde je prakticky ověřeno, že hlavní zdroj rušení představuje magnetické pole, proto je zde měřeno pomocí magnetických antén.

- *Magnetická anténa*

Pro měření magnetické složky vyzařovaného pole je zde normou doporučena buďto smyčková anténa takových rozměrů, aby tato anténa (resp. její kruh tvořený vodičem) mohla být kompletně uzavřena do čtverce o straně 60 cm, anebo lze použít odpovídající feritovou anténu.

Pro toto měření nelze doporučit smyčkovou anténu v příloze C vzhledem k jejím rozměrům (viz tab. C2). Navrhují proto anténu uvedenou v příloze D (model 6507) s frekvenčním pásmem od 1 kHz do 30 MHz, která dle tab. D2 již rozměrově vyhovuje. Navíc lze touto smyčkovou anténou rozšířit frekvenční rozmezí než je výše uvedené.

- **Frekvenční rozsah od 150 kHz do 30 MHz**

- *Elektrická anténa*

Zde je pro snímání elektrické složky pole normou stanoveno použití prutové (tyčové) antény (tzv. monopólu dle obr. 4.3b) s doporučenou délkou 1 m.

Navrhují zde použít prutovou anténu popsanou v příloze K, která zaujímá frekvenční pásmo od 1 kHz do 30 MHz, tedy širší pásmo než je zde normou požadováno měřit.

- *Magnetická anténa*

Pro tento frekvenční rozsah norma doporučuje použít anténu se stejnými parametry jako v případě předešlého rozsahu frekvencí

Lze tedy navrhnout také shodnou anténu, jako tomu bylo v předchozím rozsahu. Tato smyčková anténa (viz příloha D) s rozsahem 1 kHz až 30 MHz tedy zaujme obě uvedená frekvenční pásma, což je podstatná výhoda.

- ***Frekvenční rozsah od 30 MHz do 1 000 MHz***

- *Elektrická anténa*

V tomto frekvenčním rozsahu převládá elektrická složka pole, což je důvodem pro absenci magnetických antén. Je možno zde použít více anténních druhů, a sice dipólové antény, bikónické antény, logaritmicko-periodické antény a také širokopásmové skládané antény.

Pro menší nejistotu měření je normou doporučeno používat bikónickou či logaritmicko-periodickou anténu, přičemž by se měly používat pouze kalibrované antény. Zejména ve frekvenčním rozmezí od 300 MHz do 1 000 MHz je citlivost dipólové antény nízká, proto by se měl použít jiný druh antény, který by měl podstoupit test tzv. křížové polarizace a zároveň jeho přizpůsobovací člen (tzv. balun) by se měl podrobit testovací proceduře z hlediska jeho výkonu. Toto rovněž platí pro širokopásmové antény menší frekvence než je 200 MHz.

Pro měření v tomto frekvenčním rozsahu se ze současného vybavení pracoviště nabízí možnost využít kombinaci bikónické antény uvedené v příloze E (30 až 200 MHz) a logaritmicko-periodické antény popsané v příloze F (0,2 až 3GHz). Toto však není příliš vhodná varianta, jelikož lze uvedené frekvenční pásmo pokrýt pouze jednou anténou, a to buďto dipólovou anténou v příloze L, která však není moc vhodná z důvodu neurčitosti měření, anebo širokopásmovou BiConiLog anténou udávanou v příloze CH (model 3142E-PA), jejíž frekvenční spektrum (30 až 6 000 MHz) zde bohatě vystačí a zároveň mohou být změřeny ještě vyšší frekvence, než zde norma vyžaduje, čímž lze rozšířit frekvenční pásmo normy.

- ***Frekvenční rozsah od 1 GHz do 18 GHz***

Měření vyzařovaných emisí v tomto rozsahu frekvencí by dle normy mělo být prováděno kalibrovanými anténami s lineární polarizací. Jako příklad lze zde uvést logaritmicko-periodickou anténu či trychtýřovou hřebenovou anténu, popř. sadu trychtýřových antén pro pokrytí širšího frekvenčního pásma.

Vhodná anténa pro měření v tomto pásmu frekvencí je například trychtýřová hřebenová anténa v příloze M, jejíž frekvenční pásmo je shodné s normou požadovaným.

Při požadavku doplnění ještě vyššího frekvenčního pásma pro tuto normalizaci lze navrhnout jako měřicí anténu opět trychtýřovou hřebenovou anténu tentokrát však z přílohy N. Tato anténa pokryje frekvenční pásmo od 18 GHz do 40 GHz, což při uvedeném požadavku lze považovat za případnou novou normou stanovenou měřicí frekvenční oblast, která by mohla být využívána v budoucnosti.

Závěr

Cílem této bakalářské práce je uvedení základních antén, které jsou používány pro měření EMC, a to včetně jejich charakteristik a parametrů. Přičemž po uvedení antén využívaných pro měření EMC na katedře elektroenergetiky a ekologie (KEE) je přínosem této práce doporučit vhodnou náhradu některých těchto anténních typů jinými anténami od výrobce, čímž by došlo k vylepšení vybavení pracoviště uvedené katedry. Zpravidla k tomuto dochází v podobě náhrady dvou měřicích antén pouze jednou anténou od výrobce, což s sebou přináší podstatné výhody při měření (např. snazší doprava, rychlejší měření). Zároveň je zde přínosem stanovení měřicích antén pro frekvenční rozsahy mimo rámce příslušných norem, to se děje za účelem zvětšení těchto rozsahů pro možné budoucí využívání.

Tyto všechny anténní typy byly nejprve stručně vysvětleny v kap. 2. Následně byly společně s problematikou týkající se měření podrobněji popsány v kap. 4, a to včetně jejich použití v příslušné frekvenční oblasti, což respektuje body č. 1 a č. 2 zadání. Následně jsou zde uváděny antény, kterými by mělo být vybaveno zkušební pracoviště za účelem splnění požadavků příslušných norem, jejichž parametry a charakteristiky jsou sepsány a znázorněny v jednotlivých přílohách této práce, což splňuje bod č. 3 a doplňuje bod č. 1 zadání práce.

Při vybavení zkušebního pracoviště seznamem měřicích antén uvedených v tab. Z1, tab. Z2 či tab. Z3 bude splněn požadavek na jeho vybavení v souladu s normou ČSN EN 50121-3-1 ed.2 z hlediska antén pro měření pásma 10 kHz až 1 GHz. Přičemž anténami dle tab. Z1 je vybaveno zkušební pracoviště KEE, zatímco užší a tedy lepší výběr dle tab. Z2 je sestaven z antén od výrobce. Zároveň anténní výběr dle tab. Z2 navíc zahrnuje větší pásmo frekvencí, což lze v budoucnu využít. Pro ještě větší rozšíření pásma uvedené normy lze použít výběr dle následující tab. Z3. Tyto tabulky Z2 a Z3 tedy respektují bod č. 4 zadání.

<i>Typ antény</i>	<i>Model antény</i>	<i>Frekvenční pásmo</i>	<i>Uvedena v příloze</i>
<i>Smyčková</i>	<i>6502</i>	<i>10 kHz až 30 MHz</i>	<i>C</i>
<i>Bikónická</i>	<i>BC-01</i>	<i>30 MHz až 200 MHz</i>	<i>E</i>
<i>Logaritmicko-periodická</i>	<i>LP-02</i>	<i>200 MHz až 3 GHz</i>	<i>F</i>

Tab. Z1 Varianta č. 1 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed.2.

<i>Typ antény</i>	<i>Model antény</i>	<i>Frekvenční pásmo</i>	<i>Uvedena v příloze</i>
<i>Smyčková</i>	<i>6502</i>	<i>10 kHz až 30 MHz</i>	<i>C</i>
<i>Širokopásmová BiConiLog</i>	<i>3142E-PA</i>	<i>30 MHz až 6 GHz</i>	<i>CH</i>

Tab. Z2 Varianta č. 2 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed.2.

Typ antény	Model antény	Frekvenční pásmo	Uvedena v příloze
Smyčková	6502	10 kHz až 30 MHz	C
Širokopásmová BiConiLog	3142E-PA	30 MHz až 6 GHz	CH
Trychtýřová	3161	1 GHz až 8 GHz	I

Tab. Z3 Varianta č. 3 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed.2.

Co se týče požadavku na anténní vybavení zkušebního pracoviště dle normy ČSN EN 55016-1-4 ed.3, tak při plném respektování frekvenčního rozsahu této normy, tj. 9 kHz až 18 GHz, lze doporučit dvě možné varianty potřebných antén vhodných pro měření EMC, které udávají tab. Z4 a tab. Z5. Zde pro normou požadovaný výběr nestačí pouze antény katedry KEE, tj. přílohy E, F, ale je nutné je doplnit zbylými anténami od výrobce. Pro rozšíření pásma normy lze použít anténní výběr dle tab. Z6.

Typ antény	Model antény	Frekvenční pásmo	Uvedena v příloze
Smyčková	6507	1 kHz až 30 MHz	D
Prutová	3303	1 kHz až 30 MHz	K
Bikónická	BC-01	30 MHz až 200 MHz	E
Logaritmicko-periodická	LP-02	200 MHz až 3 GHz	F
Trychtýřová hřebenová	3117-PA	1 GHz až 18 GHz	M

Tab. Z4 Varianta č. 1 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 55016-1-4 ed.3.

Typ antény	Model antény	Frekvenční pásmo	Uvedena v příloze
Smyčková	6507	1 kHz až 30 MHz	D
Prutová	3303	1 kHz až 30 MHz	K
Širokopásmová BiConiLog	3142E-PA	30 MHz až 6 GHz	CH
Trychtýřová hřebenová	3117-PA	1 GHz až 18 GHz	M

Tab. Z5 Varianta č. 2 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 55016-1-4 ed.3.

Typ antény	Model antény	Frekvenční pásmo	Uvedena v příloze
Smyčková	6507	1 kHz až 30 MHz	D
Prutová	3303	1 kHz až 30 MHz	K
Širokopásmová BiConiLog	3142E-PA	30 MHz až 6 GHz	CH
Trychtýřová hřebenová	3117-PA	1 GHz až 18 GHz	M
Trychtýřová hřebenová	3116C-PA	18 GHz až 40 GHz	N

Tab. Z6 Varianta č. 3 pro vybavení zkušebního pracoviště anténami dle normy ČSN EN 55016-1-4 ed.3.

Na úplný závěr lze pro zkoušky EMS (dle kap. 4.2.1) doporučit jako vhodné antény právě ty, které jsou uvedeny v přílohách G a H a jimiž také disponuje vybavení katedry KEE.

Seznam literatury a informačních zdrojů

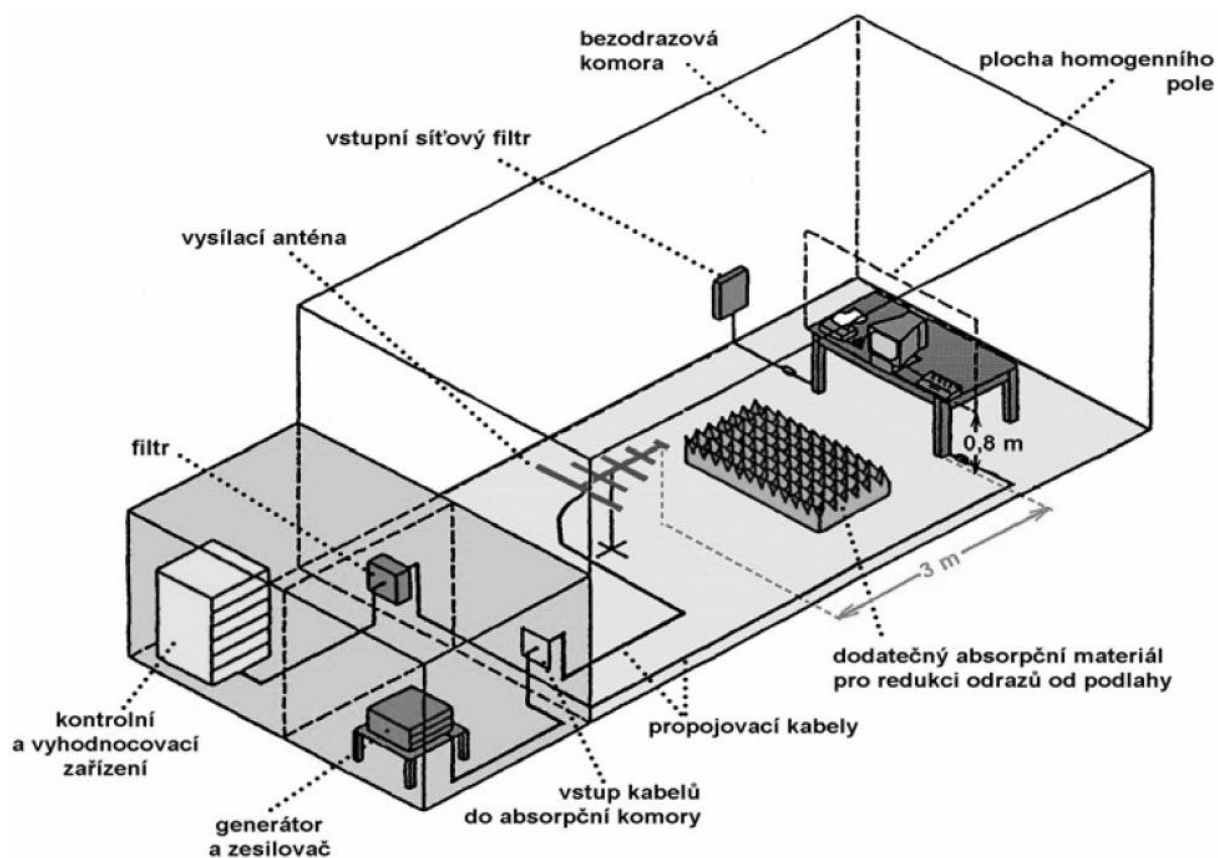
- [1] MAZÁNEK, Miloš; PECHAČ, Pavel. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2005. 259 s. ISBN 80-01-03032-6.
- [2] MATUSZCZYK, Jacek. *Antény prakticky*. 3. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 239s. ISBN 80-7300-178-0.
- [3] PROCHÁZKA, Miroslav. *Antény – encyklopedická příručka*. 3. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 383 s. ISBN 80-7300-166-7.
- [4] KOVÁČ, D.; KOVÁČOVÁ, I.; KAŇUCH J. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
- [5] DŘÍNOVSKÝ, Jiří; FRÝZA, Tomáš; SVAČINA, Jiří; KEJÍK, Zdeněk; RŮŽEK, Václav. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno. [Cit. 10.5.2013]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc>
- [6] ČSN EN 55016-1-1 ed.2, 2007. *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Část 1-1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Měřicí přístroje*. Praha: Český normalizační institut.
- [7] ČSN EN 55022, 1999. *Zařízení informační techniky – Charakteristiky rádiového rušení – Meze a metody měření*. Praha: Český normalizační institut.
- [8] ČSN EN 50121-3-1 ed. 2, 2007. *Drážní zařízení – Elektromagnetická kompatibilita – Část 3-1: Drážní vozidla – Vlak a celkové vozidlo*. Praha: Český normalizační institut.
- [9] ČSN EN 61000-4-6 ed. 3, 2009. *Zkušební a měřicí technika – Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli*. Praha: Český normalizační institut.
- [10] ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, 2006. *Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Český normalizační institut.
- [11] ČSN EN 55016-1-4 ed. 3, 2010. *Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Část 1-4: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti – Antény a zkušební pracoviště pro měření rušení šířeného zářením*. Praha: Český normalizační institut.
- [12] TESTOVACÍ TECHNIKA s.r.o. [online]. Poděbrady [Cit. 10.5.2013]. Dostupné z: <http://www.teste.cz>
- [13] ETS LINDGREN, An ESCO Technologies Company [online]. [Cit. 10.5.2013]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com>

- [14] SCHWARZBECK Mess Elektronik [online]. Schönau, Německo [Cit. 10.5.2013].
Dostupné z: <http://www.schwarzbeck.de>

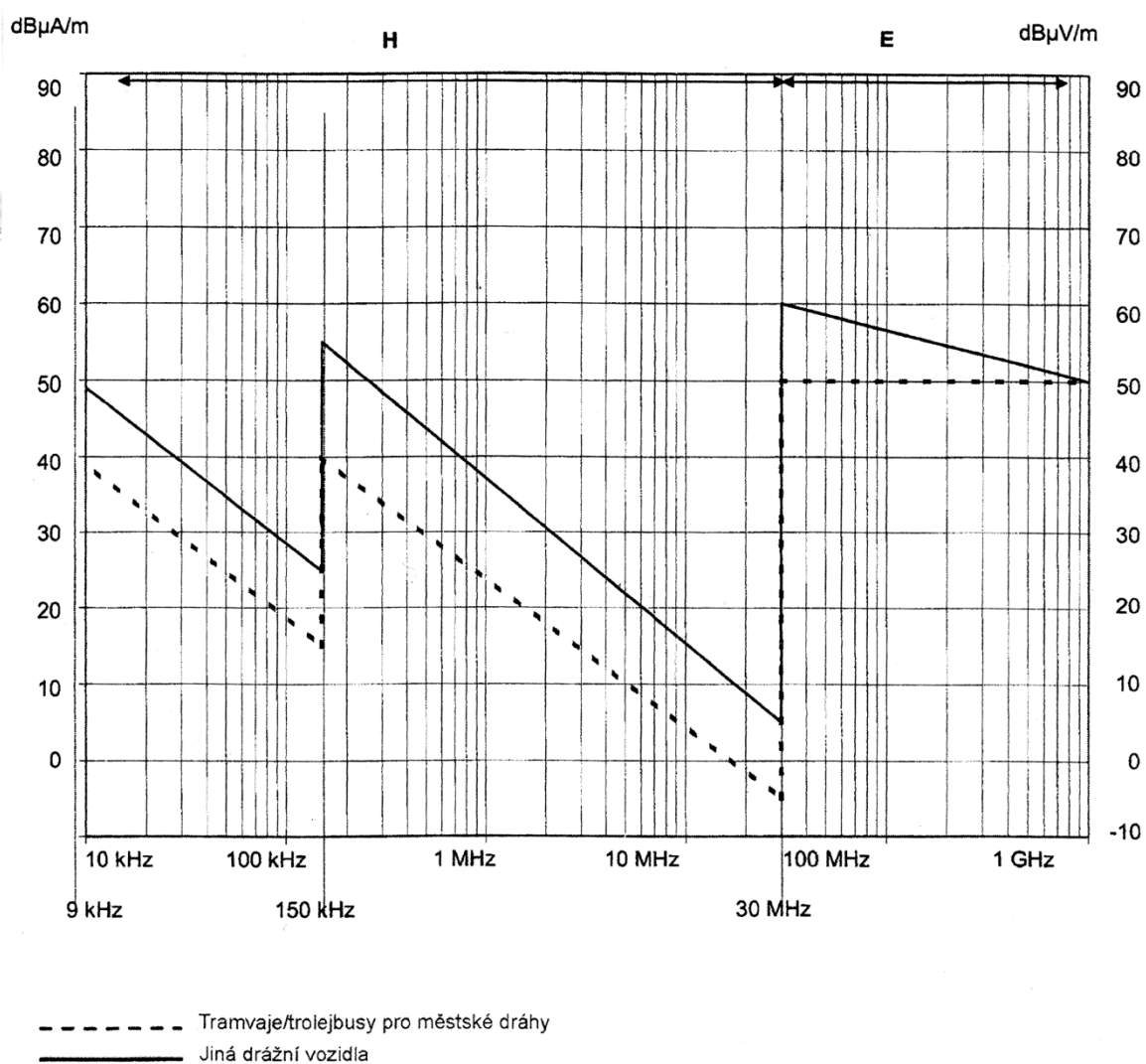
- [15] FRANKONIA GmbH, Německo [Cit. 10.5.2013]. Dostupné z:
<http://www.frankoniagroup.com>

Přílohy

Příloha A – Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu rušivému poli (absorpční obložení stropu a stěn již není znázorněno).



Obr. A1 Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu poli, převzato z [5].

Příloha B – Mezní hodnoty emise pro stacionární zkoušku dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed. 2.

Obr. B1 Mezní hodnoty emise pro stacionární zkoušku, převzato z [8].

Příloha C – Parametry smyčkové antény (model 6502).• **parametry antény**○ *elektrické parametry*

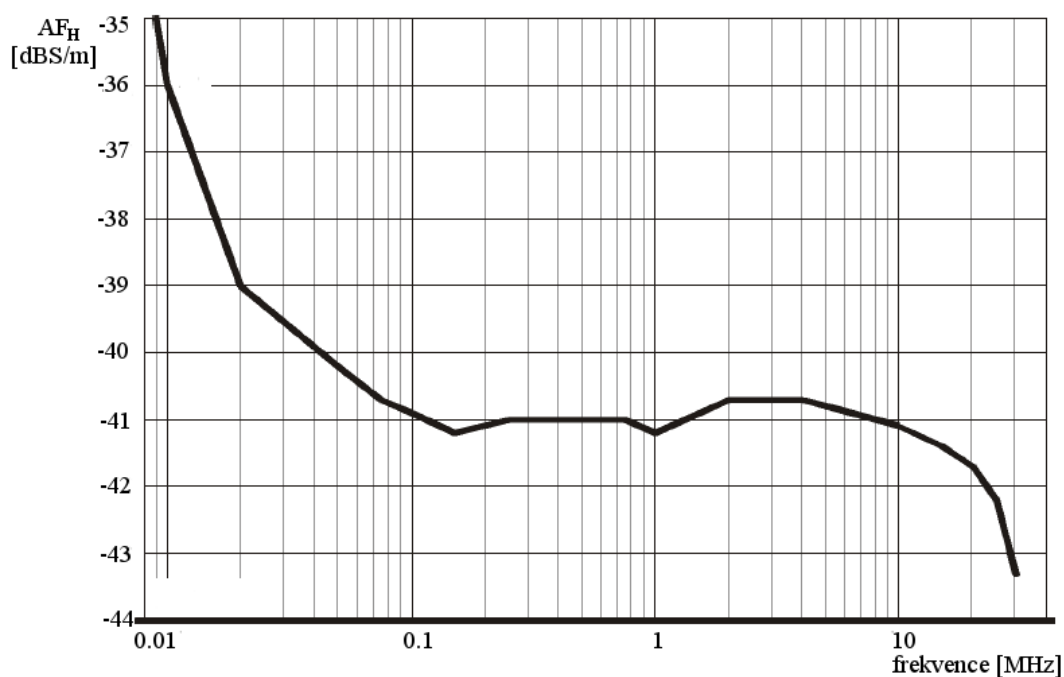
Minimální frekvence	10,0 kHz
Maximální frekvence	30,0 MHz
Hraniční bod detekce 1 dB	5,0 V/m
Dynamický rozsah	125,0 dB při 1,0 MHz
	85,0 dB při 10,0 kHz
Impedance	50,0 Ω
Druh antény	všesměrová
Polarizace	lineární
Napájecí napětí	13,8 V stejnosměrné

Tab. C1 Elektrické parametry smyčkové antény – model 6502, převzato z [12].

○ *fyzické parametry*

Výška	67,3 cm
Délka	12,0 cm
Hmotnost	2,0 kg
Šířka	19,0 cm

Tab. C2 Fyzické parametry smyčkové antény – model 6502, převzato z [12].

• **anténní charakteristika**

Obr. C1 Závislost anténního faktoru smyčkové antény na frekvenci – model 6502, převzato z [12].

Příloha D – Parametry smyčkové antény (model 6507).

- *parametry antény*

- *elektrické parametry*

Minimální frekvence	1 kHz
Maximální frekvence	30 MHz
Dynamický rozsah	116 dB při 1 MHz
	76 dB při 10 kHz
Impedance	50 Ω

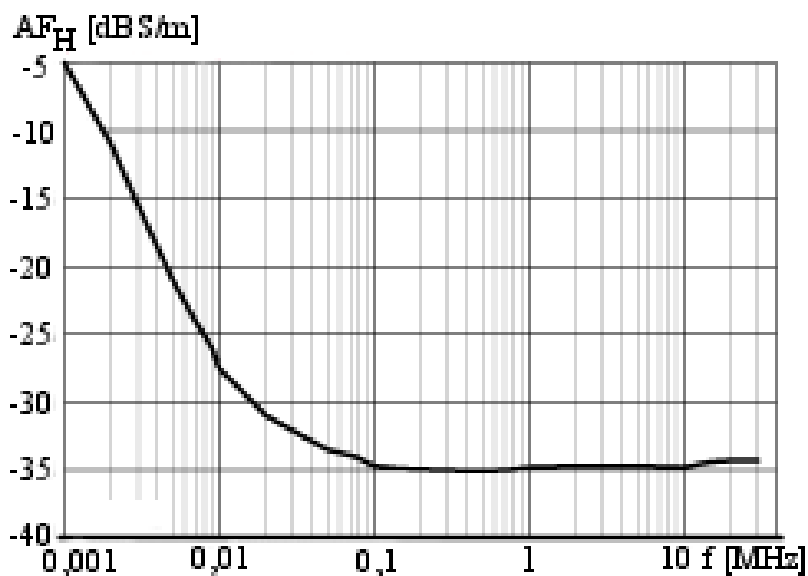
Tab. D1 Elektrické parametry smyčkové antény – model 6507, převzato z [13].

- *fyzické parametry*

Výška	37,8 cm
Délka	12,0 cm
Šířka	19,0 cm
Hmotnost	1,8 kg

Tab. D2 Fyzické parametry smyčkové antény – model 6507, převzato z [13].

- *anténní charakteristika*



Obr. D1 Závislost anténního faktoru smyčkové antény na frekvenci – model 6507, převzato z [13].



Obr. D2 Smyčková anténa – model 6507, převzato z [13].

Příloha E – Parametry bikónické antény (model BC-01).

- *parametry antény*
 - *elektrické parametry*

<i>Minimální frekvence</i>	<i>30 MHz</i>
<i>Maximální frekvence</i>	<i>200 MHz</i>
<i>Impedance</i>	<i>50 Ω</i>
<i>Anténní faktor</i>	<i>8 / 14 dB</i>
<i>Max. vstupní výkon</i>	<i>100 W</i>

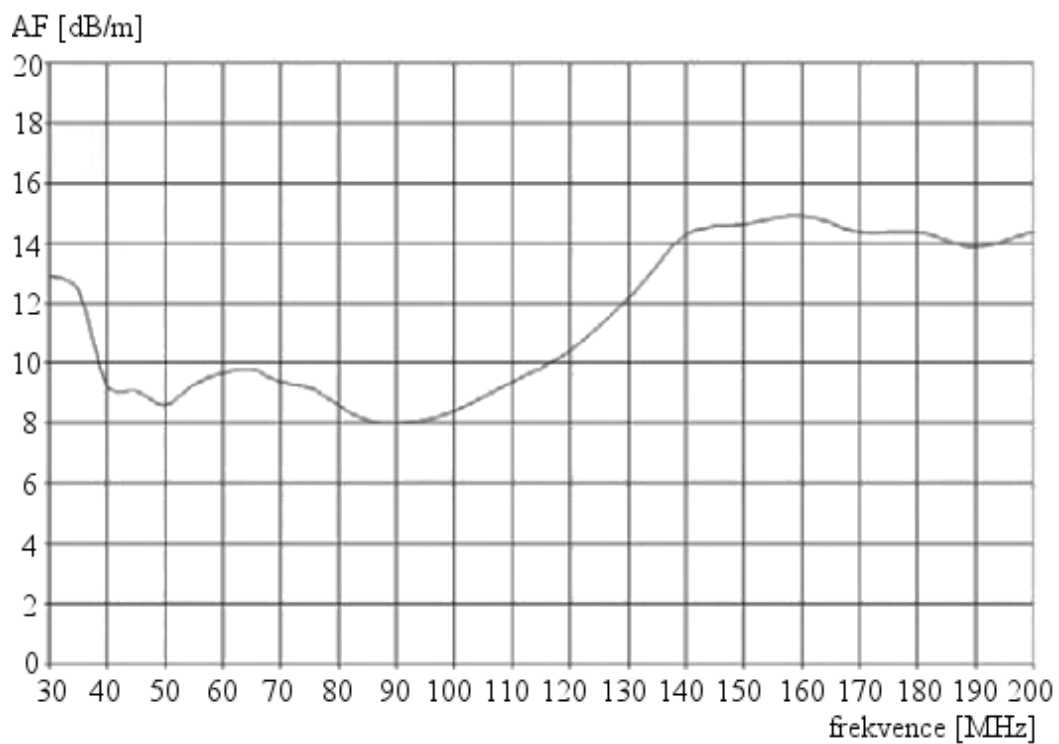
Tab. E1 Elektrické parametry bikónické antény – model BC-01, převzato z [12].

- *fyzické parametry*

<i>Šířka</i>	<i>137,0 cm</i>
<i>Délka</i>	<i>65,0 cm</i>
<i>Výška</i>	<i>65,0 cm</i>
<i>Hmotnost</i>	<i>1,8 kg</i>

Tab. E2 Fyzické parametry bikónické antény – model BC-01, převzato z [12].

- *anténní charakteristika*



Obr. E1 Závislost anténního faktoru (10m) bikónické antény na frekvenci – model BC-01, převzato z [12].



Obr. E2 Bikónické anténa – model BC-01, převzato z [12].

Příloha F – Parametry logaritmicko-periodické antény (model LP-02).

- **parametry antény**

- *elektrické parametry*

Minimální frekvence	200 MHz
Maximální frekvence	3 GHz
Impedance	50 Ω
Zisk	6 dB
Anténní faktor	13 / 36 dB
ČSV	< 2:1
Max. vstupní výkon	100 W až do 1 GHz
	50 W až do 3 GHz

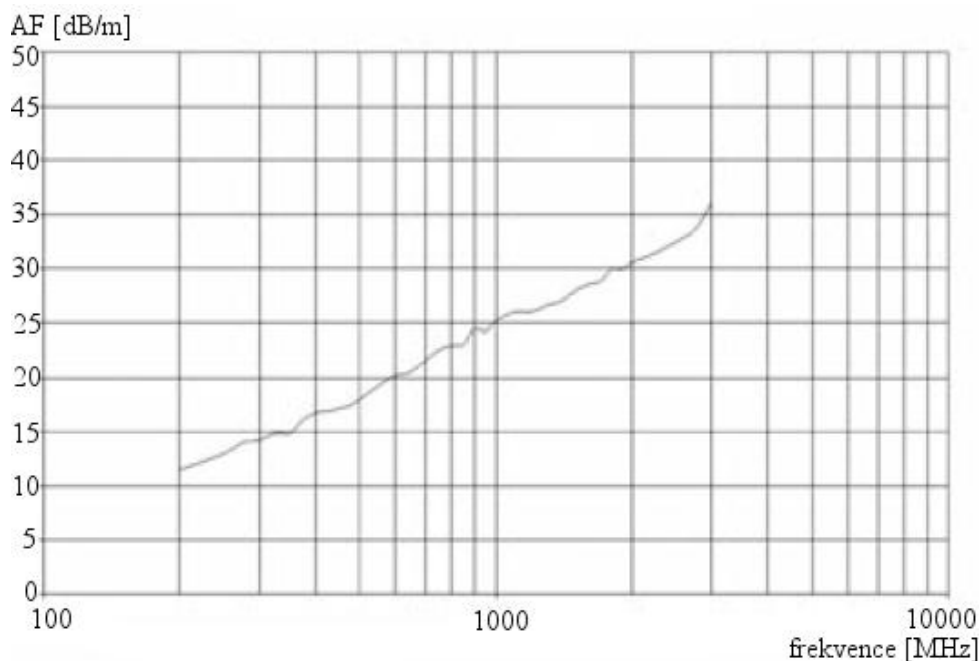
Tab. F1 Elektrické parametry logaritmicko-periodické antény – model LP-02, převzato z [12].

- *fyzické parametry*

Šířka	86,0 cm
Délka	70,0 cm
Výška	10,0 cm
Hmotnost	1,1 kg

Tab. F2 Fyzické parametry logaritmicko-periodické antény – model LP-02, převzato z [12].

- **anténní charakteristika**



Obr. F1 Závislost anténního faktoru (10m) logaritmicko-periodické antény na frekvenci – model LP-02, převzato z [12].



Obr. F2 Logaritmicke-periodická anténa – model LP-02, převzato z [12].

Příloha G – Parametry trychtýřové antény (model BBHA 9120E).

- *parametry antény*

Minimální frekvence	0,5 GHz
Maximální frekvence	6,0 GHz
Impedance	50,0 Ω
Maximální vstupní výkon	300,0 W

Tab. G1 Elektrické parametry trychtýřové antény – model BBHA 9120E, převzato z [14].



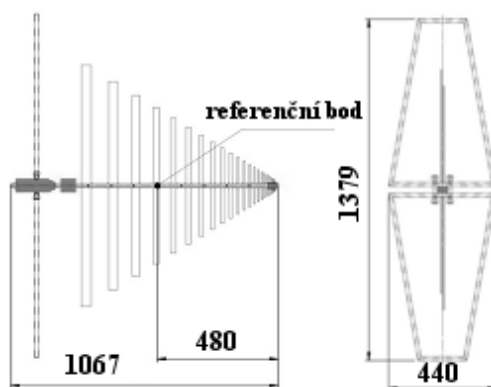
Obr. G1 Trychtýřová anténa – model BBHA 9120E, převzato z [14].

Příloha H – Parametry širokopásmové bikónicko-logaritmické antény (model Frankonia BTA-M)

- *parametry antény*

Frekvenční minimum	30 MHz
Frekvenční maximum	3 GHz
Impedance	50 Ω
Maximální vstupní výkon	100 W

Tab. H1 Elektrické parametry bikónicko-logaritmické antény – model Frankonia BTA-M, převzato z [15].



Obr. H1 Bikónicko-logaritmická anténa s konstrukčními rozměry [mm] – model Frankonia BTA-M, převzato z [15].

Příloha CH – Parametry širokopásmové BiConiLog antény (model 3142E-PA).

Tato anténa je opatřena předzesilovačem.

- *parametry antény*
 - *elektrické parametry*

Minimální frekvence	30 MHz
Maximální frekvence	6 GHz
Impedance	50 Ω

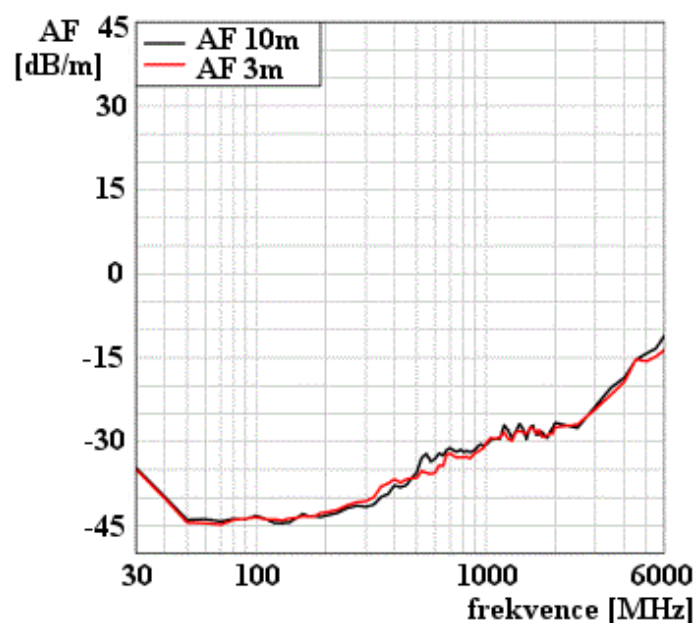
Tab. CH1 Elektrické parametry BiConiLog antény – model 3142E-PA, převzato z [13].

○ fyzické parametry

	Anténa	Předzesilovač (skříňka)
Hmotnost	5,7 kg	0,5 kg
Šířka	133,9 cm	8,9 cm
Délka	139,2 cm	3,9 cm
Výška	76,2 cm	3,9 cm

Tab. CH2 Fyzické parametry BiConiLog antény – model 3142E-PA, převzato z [13].

• anténní charakteristika



Obr. CH1 Závislost anténního faktoru a zisku antény BiConiLog na frekvenci pro dvě různé kalibrace – model 3142E-PA, převzato z [13].



Obr. CH2 Anténa BiConiLog – model 3142E-PA, převzato z [13].

Příloha I – Parametry trychtýřové antény (model 3161).

Zde výrobce udává model 3161 obsahující tři dílčí trychtýřové antény (modely 01, 02 a 03), které dohromady vytváří výsledné kmitočtové pásmo.

- **parametry antény**

- *elektrické parametry*

Minimální frekvence	1 GHz
Maximální frekvence	8 GHz
Druh antény	směrová
Polarizace	lineární

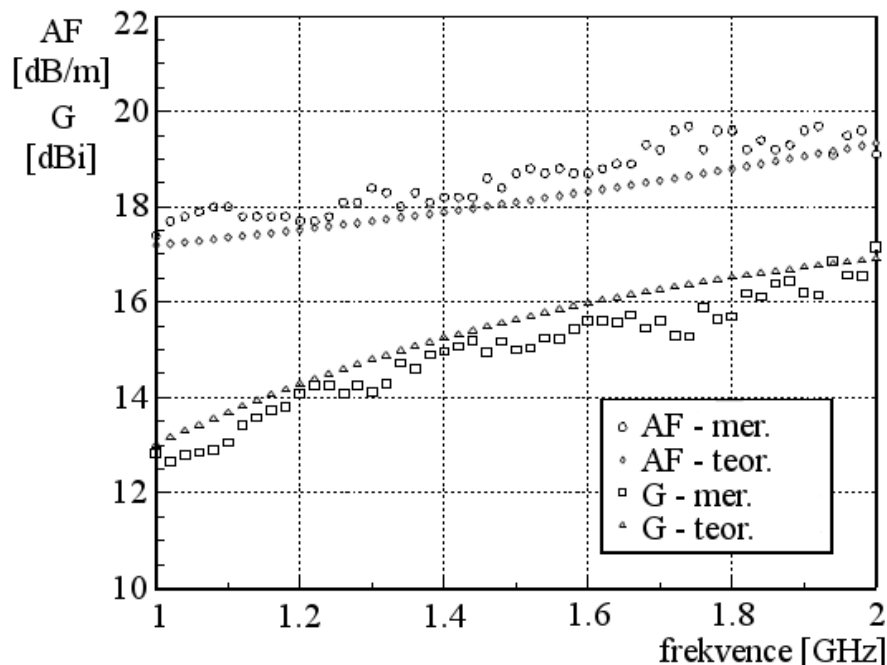
Tab. I1 Elektrické parametry trychtýřové antény – model 3161, převzato z [13].

- *fyzické parametry*

Model	Hmotnost [kg]	Šířka [cm]	Hloubka [cm]	Výška [cm]
3161-01	8,00	53,14	88,05	39,86
3161-02	5,00	34,61	59,34	23,17
3161-03	2,00	17,47	31,88	11,74

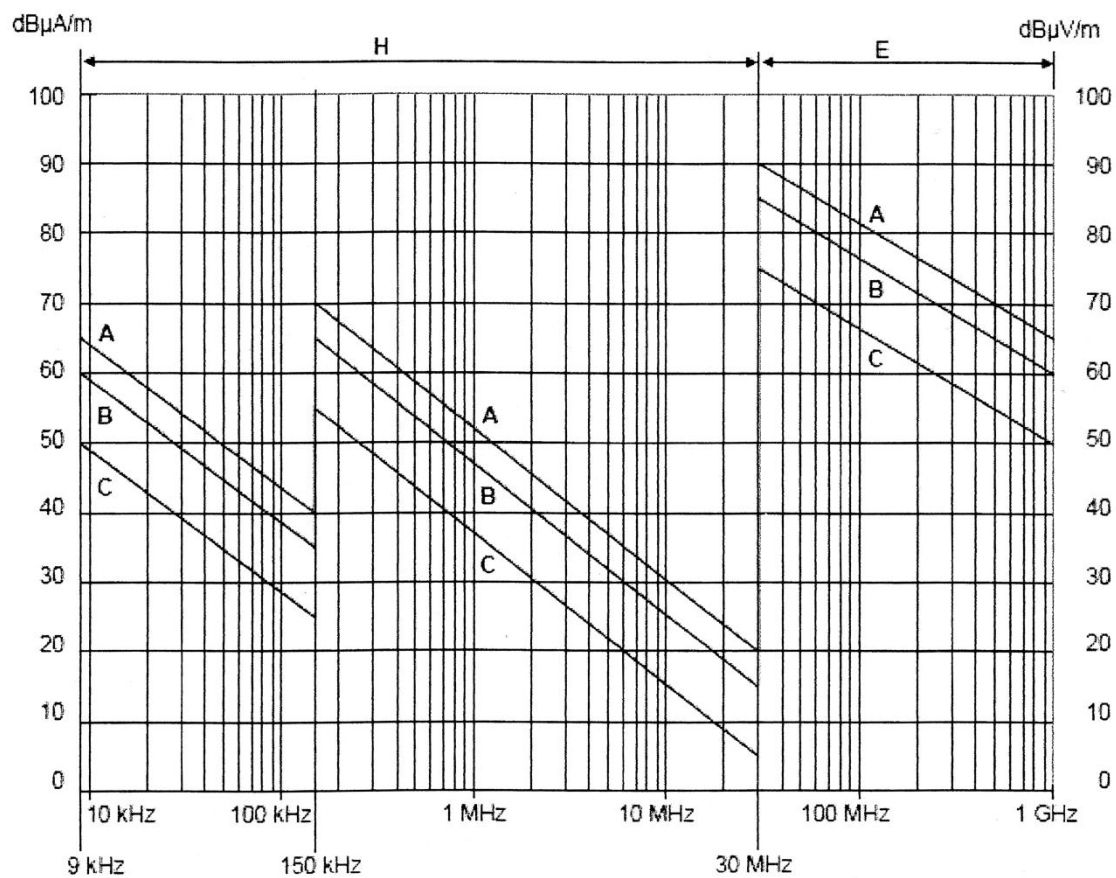
Tab. I2 Fyzické parametry jednotlivých prvků trychtýřové antény – model 3161, převzato z [13].

- **anténní charakteristiky**



Obr. I1 Závislost anténního faktoru a zisku trychtýřové antény na frekvenci – model 3161, převzato z [13].

Příloha J – Mezní hodnoty emise pro zkoušku při pomalé jízdě dle normy ČSN EN 50121-3-1 ed. 2.



Mezní hodnoty emise

A = 25 kV AC

B = 15 kV AC, 3 kV DC a 1,5 kV DC

C = 750 V a 600 V DC včetně tramvají/trolejbusů používaných v městských dráhách*.

Obr. J1 Mezní hodnoty emise pro zkoušku při pomalé jízdě, převzato z [8].

Příloha K – Parametry prutové antény (model 3303).

Tato výrobcem udávaná anténa disponuje manuálním přepínačem mezi frekvenčními rozsahy 0,001 až 5 MHz a 5 MHz až 30 MHz.

- **parametry antény**
 - *elektrické parametry*

Minimální frekvence	1 kHz
Maximální frekvence	30 MHz
Impedance	50 Ω
Druh antény	všesměrová
Špičkový výkon	1 W
Polarizace	lineární

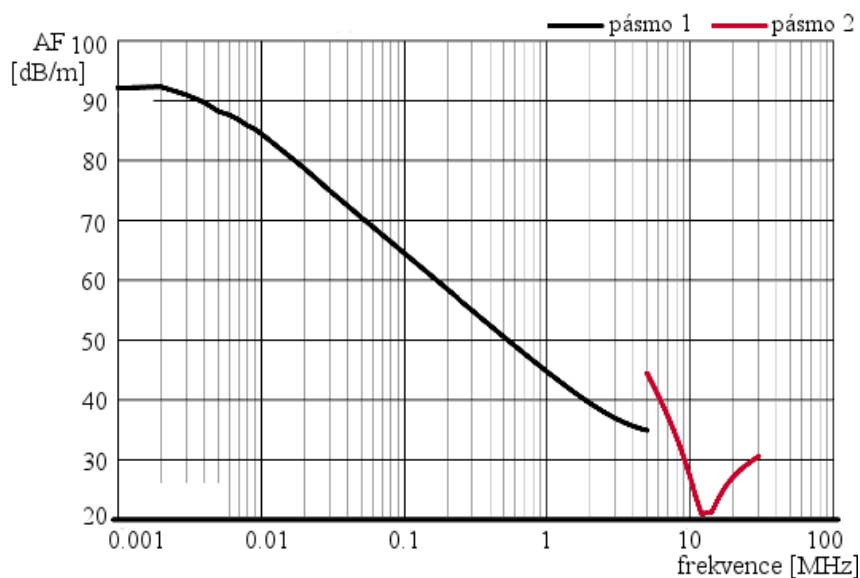
Tab. K1 Elektrické parametry prutové antény – model 3303, převzato z [13].

- *fyzické parametry*

Hloubka podstavy	7,6 cm
Výška podstavy	15,2 cm
Šířka podstavy	7,6 cm
Nejmenší nastavitelná výška anténní tyče	50,8 cm
Největší nastavitelná výška anténní tyče	127,0 cm
Hmotnost	1,3 kg

Tab. K2 Fyzické parametry prutové antény – model 3303, převzato z [13].

- **anténní charakteristika**



Obr. K1 Závislost anténního faktoru prutové antény na frekvenci pro pásmo 1 (0,001 až 5 MHz) a pásmo 2 (5 až 30 MHz) – model 3303, převzato z [13].



Obr. K2 Prutová anténa – model 3303, převzato z [13].

Příloha L – Parametry dipólové antény (model 3121D).

Tato anténa se skládá ze 4 dílčích dipólů označených DB-1 až DB-4.

- *parametry antény*
 - *elektrické parametry*

Minimální frekvence	30,0 MHz
Maximální frekvence	1,0 GHz
Impedance	50,0 Ω
Maximální nepřetržitý výkon	50,0 W – 260,0 W
Druh antény	Všesměrová
Polarizace	Lineární
ČSV	<1,6:1,0

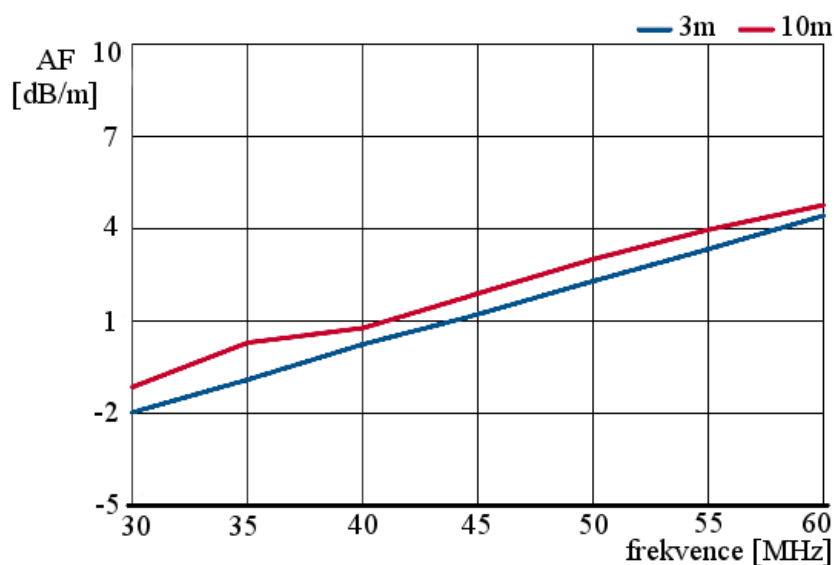
Tab. L1 Elektrické parametry dipólové antény – model 3121D, převzato z [13].

- *fyzické parametry*

Parametr	DB-1	DB-2	DB-3	DB-4
Délka	68,25 cm	55,88 cm	52,07 cm	48,89 cm
Minimální šířka	41,91 cm	41,91 cm	35,56 cm	13,97 cm
Maximální šířka	426,72 cm	327,66 cm	124,46 cm	45,72 cm
Hmotnost	1,07 kg	0,76 kg	0,68 kg	0,39 kg

Tab. L2 Fyzické parametry dipólové antény – model 3121D, převzato z [13].

- **anténní charakteristiky**



Obr. L1 Závislost anténního faktoru dipólové antény na frekvenci pro dvě různé kalibrace – model 3121D (DB-1), převzato z [13].



Obr. L2 Dipólová anténa – model 3121D, převzato z [13].

Příloha M – Parametry trychtýřové hřebenové antény (model 3117-PA).

Tato anténa je opatřena předzesilovačem.

- **parametry antény**
 - *elektrické parametry*

Minimální frekvence	1 GHz
Maximální frekvence	18 GHz
Impedance	50 Ω

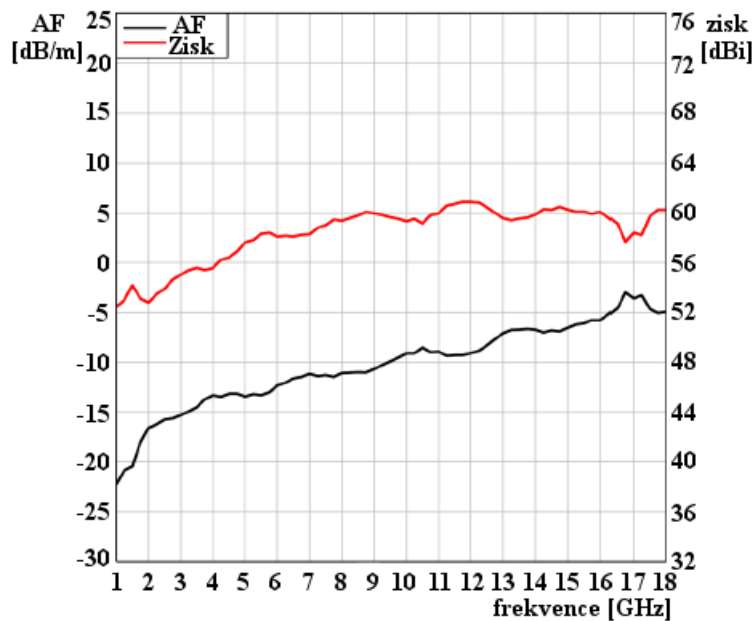
Tab. M1 Elektrické parametry trychtýřové hřebenové antény – model 3117-PA, převzato z [13].

○ fyzické parametry

Hmotnost	1,4 kg
Šířka	17,5 cm
Délka	33,0 cm
Výška	19,7 cm

Tab. M2 Fyzické parametry trychtýřové hřebenové antény – model 3117-PA, převzato z [13].

• anténní charakteristika



Obr. M1 Závislost anténního faktoru a zisku trychtýřové hřebenové antény na frekvenci – model 3117-PA, převzato z [13].



Obr. M2 Trychtýřová hřebenová anténa – model 3117-PA, převzato z [13].

Příloha N – Parametry trychtýřové hřebenové antény (model 3116C-PA).

Tato anténa je opatřena předzesilovačem.

- **parametry antény**

- *elektrické parametry*

Minimální frekvence	18 GHz
Maximální frekvence	40 GHz
Impedance	50 Ω

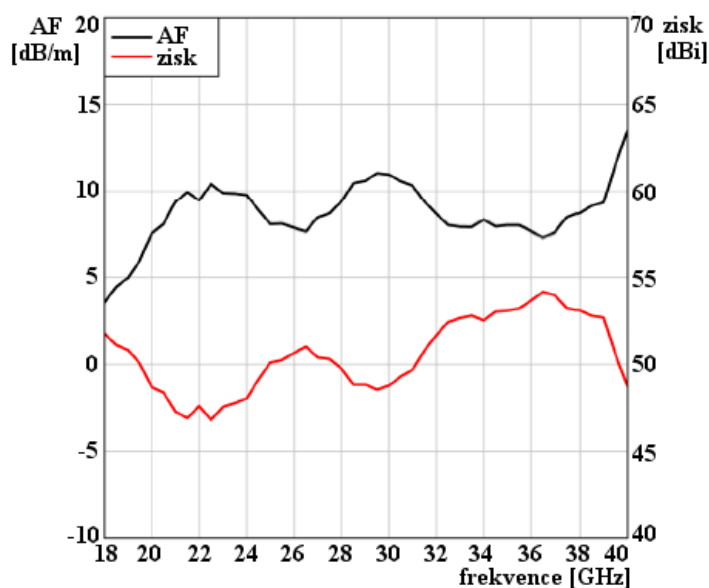
Tab. N1 Elektrické parametry trychtýřové hřebenové antény – model 3116C-PA, převzato z [13].

- *fyzické parametry*

Hmotnost	1,4 kg
Šířka	26,9 cm
Délka	14,2 cm
Výška	22,1 cm

Tab. N2 Fyzické parametry trychtýřové hřebenové antény – model 3116C-PA, převzato z [13].

- **anténní charakteristika**



Obr. N1 Závislost anténního faktoru a zisku trychtýřové hřebenové antény na frekvenci – model 3116C-PA, převzato z [13].