

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vysokofrekvenční rušivé signály v problematice EMC

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vít SLUKA**
Osobní číslo: **E10B0072K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Vysokofrekvenční rušivé signály v problematice EMC**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Zabývejte se zdroji a charakterem vf (rádiového) rušení.
2. Analyzujte zkušební postupy pro určení odolnosti proti vf rušení podle ČSN EN 61000-4-3 a 6. Podobnou analýzu proveďte pro postupy pro měření emisí.
3. Odvoďte vztahy pro měřicí řetězec EMI i EMS a pro vzájemnou vazbu mezi nimi.
4. Zabývejte se požadavky na používané antény a CDN.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

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

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

Seznam odborné literatury:

1. Soubor norem ČSN EN 61000 a ČSN EN 55016 - zapůjčí vedoucí práce
2. WWW.ets-lindgren.com
3. WWW.frankonia-emc.com
4. WWW.antenna-theory.com

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

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

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá zdroji a charakterem vysokofrekvenčního rušení v problematice elektromagnetické kompatibility. Konkrétně vazebními mechanismy přenosu rušivých signálů, měřením rušivých signálů, zkušebními postupy pro určení odolnosti a postupy pro měření emisí. Práce také popisuje vzájemnou vazbu mezi řetězci EMS a EMI. Dále jsou uvedeny základní typy antén používaných pro měření, jejich vlastnosti a několik základních parametrů, kterými antény disponují. V závěru je celkové shrnutí obsahu této práce a očekávaný vývoj problematiky EMC.

Klíčová slova

Radiofrekvenční rušení, EMC, elektromagnetická kompatibility, rušivé signály, měření emisí, měření odolnosti, antény, EMS, EMI, vazební mechanismy

Abstract

The bachelor thesis deals with sources and character of high frequency interference in the issue of electromagnetic compatibility. Specifically, with coupling mechanisms of interference signals transmission, measurement of interference signals, test procedures for the determination of resistance and processes for measuring emissions. The thesis deals also with mutual relation between EMS and EMI. The basic types of antennas used to measure, their properties and several other parameters which antennas have are also mentioned. In conclusion of the thesis there is overall summary of the thesis and an expected development of EMC issues.

Key words

Radiofrequency interference, EMC, electromagnetic compatibility, interference signals, emissions testing, measuring resistance, antennas, EMS, EMI, coupling mechanisms

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 13.5.2013

Vít Sluka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mé vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za pomoc a ochotu při psaní bakalářské práce a za cenné rady, které mi poskytla. Dále bych chtěl poděkovat přátelům a rodině za podporu při studiu.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	11
1 RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE.....	12
2 VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	13
2.1 GALVANICKÁ VAZBA.....	13
2.2 KAPACITNÍ VAZBA.....	14
2.3 INDUKTIVNÍ VAZBA	15
2.4 VAZBA VYZAŘOVÁNÍM.....	16
3 MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	16
3.1 MĚŘENÍ S UMĚLOU SÍTÍ	16
3.2 MĚŘENÍ S NAPĚŤOVOU SONDOU	19
3.3 MĚŘENÍ S PROUDOVOU SONDOU	20
3.4 MĚŘENÍ S ABSORPČNÍMI KLEŠTĚMI.....	22
3.5 MĚŘENÍ POMOCÍ ANTÉN	22
4 ZKOUŠKY ODOLNOSTI VŮČI VYSOKOFREKVENČNÍM ELEKTROMAGNETICKÝM POLÍM.....	23
4.1 ZKOUŠKY ODOLNOSTI VŮČI VYSOKOFREKVENČNÍM VYZAŘOVANÝM ELEKTROMAGNETICKÝM POLÍM.....	24
4.2 SPECIÁLNÍ ANTÉNY PRO SIMULACI ZKUŠEBNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ	27
4.3 ODOLNOST PROTI RUŠENÍM ŠÍŘENÝM VEDENÍM, INDUKOVANÝM VYSOKOFREKVENČNÍMI POLI	28
5 ANTÉNY	33
5.1 VZÁJEMNÁ VAZBA MEZI EMS A EMI.....	33
5.2 TYPY ANTÉN	39
ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45

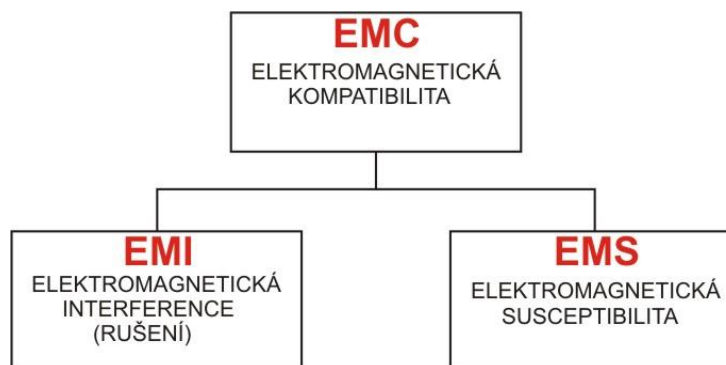
Seznam symbolů a zkratek

A_e	Účinný průřez antény [m ²]
A_{er}	Účinný průřez přijímací antény [m ²]
B	Magnetická indukce [T]
C_0	Zkratovací kondenzátor [F]
C_{VST}	Vstupní kondenzátor [F]
E_{kal}	Kalibrační intenzita elektrického pole [V/m]
E_t	Elektrické pole generované anténou [V/m]
E_r	intenzita elektrického pole ve vzdálenosti r [V/m]
f	Frekvence [Hz]
G	Elektrická vodivost [S]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
H_r	Intenzita magnetického pole ve vzdálenosti r [A/m]
I	Elektrický proud [A]
I_r	Rušivý proud sítě [A]
I_{rp}	Rušivý proud protékající měřicím zařízením [A]
L	Indukčnost [H]
P	Elektrický výkon [W]
P_d	Vyzářená výkonová hustota [W/m ²]
P_r	Výkon absorbovaný anténou [W]
P_t	Výkon vysílací antény [W]
P_V	Výkon nutný pro dosažení intenzity pole požadovaný normou [W]
P_{Vkal}	Výkon dodávaný do vysílací antény při kalibraci [W]
R	Elektrický odpor [Ω]
r	Vzdálenost [m]
S	Plocha smyčky [m ²]
t	Čas [s]
U_t	Vstupní napětí antény [V]
U_r	Rušivé napětí [V]
U_{rS}	Napětí na výstupu sekundárního vinutí sondy [V]
U_{max}	Maximální rušivé napětí [V]

U_r	Rušivé napětí [V]
Z_T	Přenosová impedance [dB Ω]
dt	Element času
$d\Phi$	Element magnetického toku
λ	Vlnová délka [m]
μ_0	Permeabilita vakua [H/m]
Φ	Magnetický tok [Wb]
AF	Anténní faktor [1/m]
AF _E	Anténní faktor antény měřící el. pole [1/m]
AF _H	Anténní faktor antény měřící mag. pole [S/m]
AMN	<i>Artificial Mains Network</i> – umělá síť
BCI.....	<i>Bulk Current Injection Clamp</i> - elektromagnetické kleště
CDN.....	<i>Coupling-Decoupling Network</i> - vazební/oddělovací síť
EUT.....	<i>Equipment under test</i> - testované zařízení
EMC	<i>Electromagnetic compatibility</i> - elektromagnetická kompatibilita
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i> - elektromagnetická interference
EMS	<i>Electromagnetic Susceptibility</i> - elektromagnetická susceptibilita
FET	<i>Field-Effect Transistors</i> - tranzistor řízený elektrickým polem
KZ.....	Kontrolní zařízení
L.....	Fázový vodič
LISN.....	<i>Line Impedance Stabilizing Network</i> – umělá zátěž vedení
MR	Měřicí zařízení
N.....	Nulový vodič
PS.....	Proudová sonda
TAF.....	Vysílacím anténní faktor [1/m]
TEM.....	Příčná transverzální vlna
R.....	Kalibrovaná vzdálenost [m]
ZG.....	Zkušební generátor
ZO	Zkoušený objekt

Úvod

Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů, a zároveň však svojí činností nesmí nepřípustně ovlivňovat své okolí. [1]



Obr. 1.1 Základní členění problematiky EMC

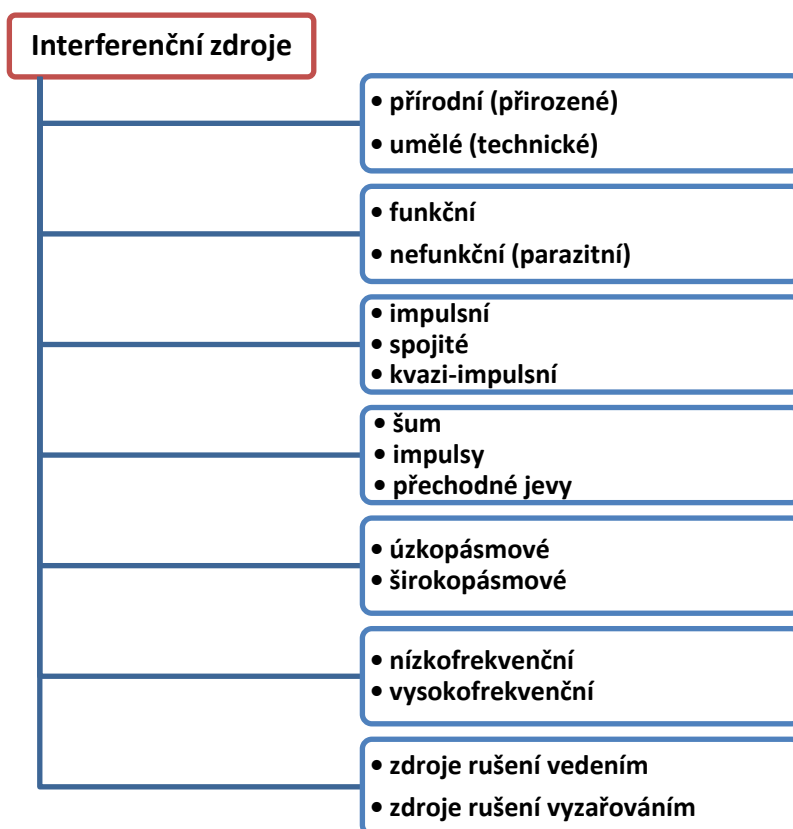
Problematiku elektromagnetické kompatibility lze rozčlenit do dvou základních skupin:

Elektromagnetická interference (EMI – *Electromagnetic Interference*) – neboli rušení je proces, při kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Kompatibility celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

Elektromagnetická susceptibilita (EMS - *Electromagnetic Susceptibility*) – neboli citlivost či odolnost, vyjadřuje schopnost zařízení a systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, které zvyšují u objektu (přijímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

1 Rušivé signály a jejich zdroje

Každý elektrotechnický systém můžeme pokládat za zdroj i za přijímač elektromagnetického rušení. U některých systémů převažuje proces generování rušivých signálů nad jejich nežádoucím příjmem. Tyto zdroje nazýváme interferenčními zdroji či zdroji elektromagnetického rušení. Klasifikaci rušení i jejich zdrojů lze uskutečnit podle mnoha různých hledisek. Možné případy jsou naznačeny pomocí Obr.2.1.



Obr.2.1 Klasifikace interferenčních signálů

Vysokofrekvenční neboli rádiové rušení leží dle Radiokomunikačního řádu v pásmu 10 kHz až 400 GHz. Z tabulky je patrné, že ke zdrojům rádiového rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, protože jejich rušivé signály sahají prakticky vždy až do toho pásma. [1]

Obecně se z každého zdroje rušení šíří rušivý signál jak vyzařováním, tak po vedeních. U různých zdrojů rušení však obvykle jeden z těchto způsobů šíření převažuje, a proto se interferenční zdroje někdy rozdělují na:

- Zdroje rušení šířené po vedení
- Zdroje rušení šířené vyzařováním (volným prostorem)

Avšak různé zdroje rušení se navzájem prolínají a navíc problém komplikuje velká složitost vztahů a vazeb. V *Tab.2.1* jsou popsány některé zdroje rušení a jejich způsob šíření.

Tab.2.1 Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení

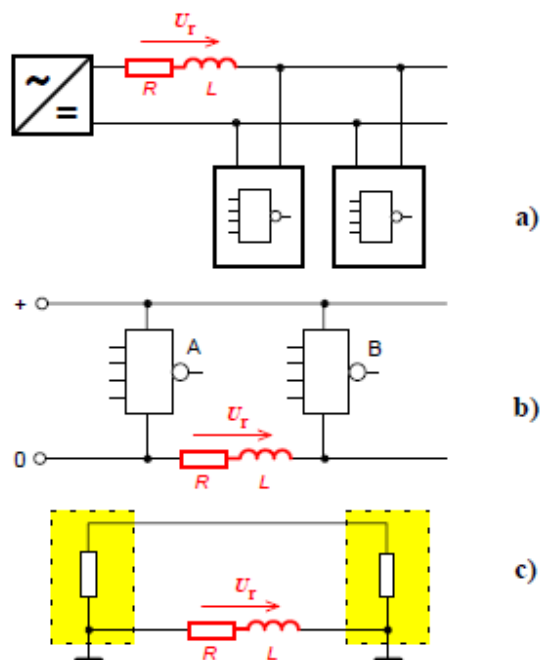
Zdroj rušivých signálů	Kmitočtové pásmo	Způsob šíření rušivého signálu
Zářivka	0,1 Hz – 3 MHz	Po vedení
	100 Hz – 3 MHz	Prostorem
Rtuťová výbojka	0,1 Hz – 1 MHz	Po vedení
Kolektorové motory	2 Hz – 4 MHz	Po vedení
	10 Hz – 400 kHz	Prostorem
Síťové vypínače	0,5 Hz – 25 MHz	Po vedení
Výkonové spínače	10 Hz – 20 MHz	Po vedení
	0,1 Hz – 20 MHz	Prostorem
Spínané síťové zdroje	0,1 Hz – 30 MHz	Po vedení
	0,1 Hz – 30 MHz	Prostorem
Korónový výboj	0,1 Hz – 10 MHz	Po vedení
Klopné obvody	15 kHz – 400 MHz	Prostorem

2 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

2.1 Galvanická vazba

Neboli **vazba společnou impedancí** je vazba dvou elektrických systémů, jejichž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovacích vedení, tedy přes společnou impedanci, která má nejčastěji charakter sériového RL obvodu, může být tvořena např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje (*Obr.3.1.1a*), společného přívodu řídicích obvodů (*Obr.3.1.1b*), nebo být impedancí společného zemnicího systému (*Obr.3.1.1c*). Společnou impedancí tečou proudy obou bloků, takže napětí U_r vznikající na této impedanci průtokem proudu prvního bloku představuje pro druhý blok rušivé napětí. Na nízkých kmitočtech (v pásmu kHz) je rozhodující část společné impedance tvořena odporovou složkou R . V oblasti

vyšších kmitočtů se uplatňuje především induktivní složka, na níž i poměrně malý proud prvního bloku může při rychlé časové změně vyvolat velké napětí, které je rušivé pro druhý blok zařízení. Indukčnost L společné impedance a kapacity spojů i součástí tvoří navíc rezonanční obvody, jejichž vlivem může být společná impedance (a tím i galvanická vazba) na některých vyšších kmitočtech dosti velká. [1]



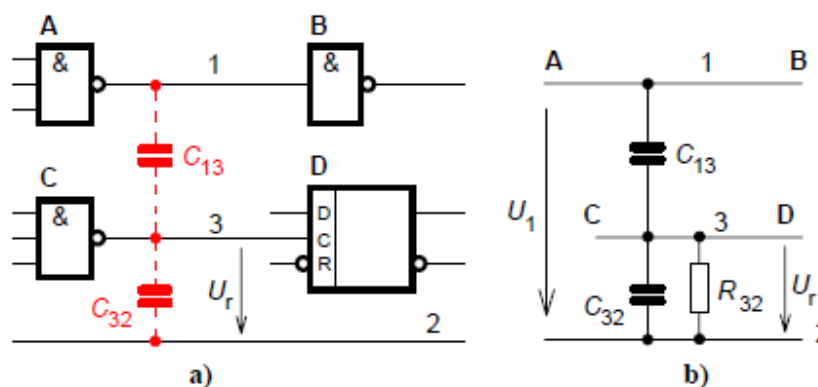
Obr.3.1.1 Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení napájecím(a), řídicím(b) a zemnicím(c)

[1]

2.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči (rušícím a rušeným) nebo mezi jednotlivými částmi obvodů či konstrukcí zařízení. Parazitní kapacitou modelujeme elektrické pole, které existuje mezi každými dvěma vodiči (vodivými částmi) s různým potenciálem. Tato situace typicky nastává např. při souběžném vedení energetických a signálových či datových kabelů a linek, příp. při paralelním vedení vodivých drah plošných spojů. [1]

Typickým a častým případem parazitní vazby v analogových a číslicových obvodech je kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem.



Obr.3.2.1 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem:

a) Možný vznik v číslicových obvodech

b) Náhradní schéma [1]

2.3 Induktivní vazba

Prochází-li obvodem elektrický proud, vzniká v jeho okolí magnetické pole, které je v závislosti na časovém průběhu konstantní nebo proměnné. Ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli, se indukuje napětí, jeho velikost roste se zvyšováním kmitočtu. Při časové změně magnetického toku Φ se v obvodu indukuje rušivé napětí dané Faradayovým indukčním zákonem jako:

$$U_{rmax} = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (3.2.1)$$

Kde S , je plocha smyčky, v níž je rušivé napětí indukováno. Je-li magnetické pole vytvářeno průtokem proudu I vodičem přibližně kruhového průřezu, lze pro jeho intenzitu H ve vzdálenosti r podle Ampérova zákona celkového proudu psát:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3.2.2)$$

Takže indukované rušivé napětí:

$$U_r = -\frac{\mu_0 \cdot S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.2.3)$$

2.4 Vazba vyzařováním

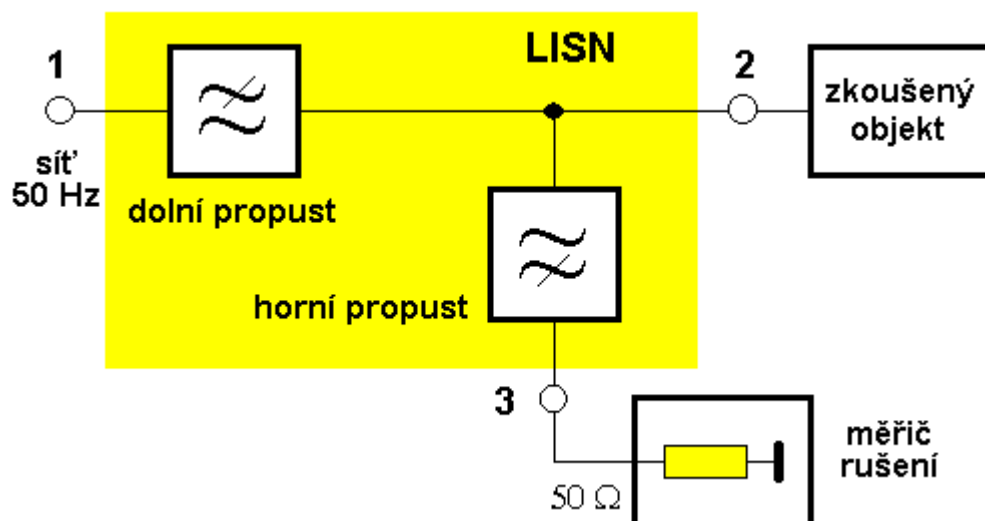
Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je prakticky vyloučena kapacitní i induktivní vazba, je možná vzájemná vazba obou objektů vyzářeným elektromagnetickým polem. K parazitním vazbám vyzařováním lze typicky počítat rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení i řadu průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v radiových přijímačích, do nichž se dostává anténou, případně jejím svodem. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečte s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce překryje. [3]

3 Měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů představuje praktické ověření dosaženého stupně EMC navrženého či testovaného zařízení z hlediska jeho rušivého vyzařování. Vzhledem k praktické nemožnosti dosáhnout dokonalé elektromagnetické kompatibility jakéhokoliv zařízení, je nutno stanovit a měřením ověřit dodržení maximálních přípustných hodnot rušivých signálů pro daný typ zařízení. [1]

3.1 Měření s umělou sítí

Umělá síť AMN (*Artificial Mains Network*), častěji označovaná jako umělá zátěž vedení LISN (*Line Impedance Stabilizing Network*) se užívá k měření rušivých signálů, které vznikají v zařízení napájeném z rozvodné elektrické sítě a které z tohoto spotřebiče vystupují právě tímto napájecím vedením. Umělá zátěž vedení, jejíž blokové schéma je na Obr.4.1.1, obsahuje tři druhy svorek: vstupní síťové svorky (1) pro připojení vnější napájecí sítě, výstupní síťové svorky (2) pro připojení zkoušeného objektu a výstupní přístrojové svorky (3) pro připojení měřicího zařízení - měřiče rušení. [3]

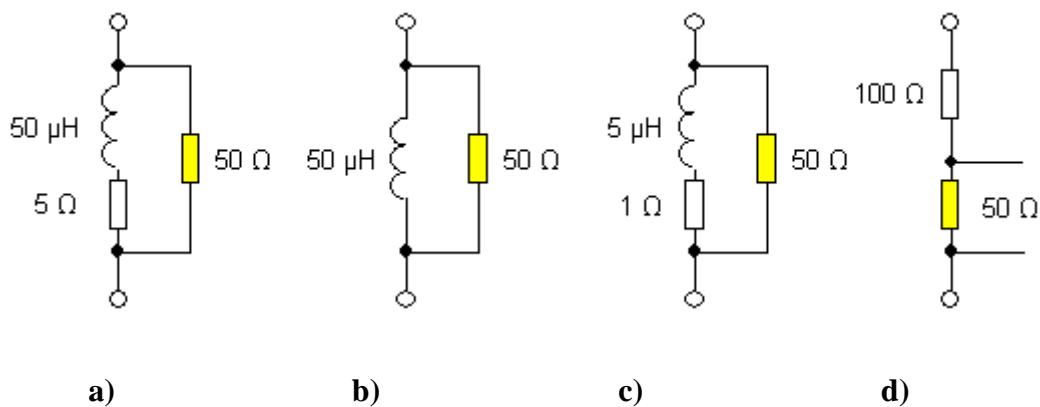


Obr.4.1.1 Blokové schéma umělé sítě LISN [3]

Umělá síť LISN plní při měření tři funkce:

- Zajišťuje připojení měřicího zařízení (měřiče rušení) k proměřovanému (zkoušenému) objektu pro celý rozsah měřených kmitočtů - **funkce horní propusti**. Tato propust je často tvořena pouze oddělovacím kondenzátorem o hodnotě několika set nF.
- Zajišťuje, že na vstup měřicího zařízení se dostanou jen měřené rušivé signály ze zkoušeného objektu, ale nikoli z vnější napájecí sítě - **funkce dolní propusti 50 Hz**. Tyto "vnější" rušivé signály se tak nedostanou ani k vlastnímu zkoumanému spotřebiči a neovlivňují tedy výsledky měření. Jejich zeslabení, tedy provozní útlum dolní propusti musí být v celém pracovním kmitočtovém pásmu nejméně 30 dB. Dolní propust je obvykle tvořena jednoduchým filtrem *LC*.
- Zajišťuje impedanční přizpůsobení měřicího zařízení k výstupním přístrojovým svorkám (3) umělé sítě LISN a současně zajišťuje definovanou hodnotu impedance na jejích výstupních síťových svorkách (2). Impedance LISN ze strany horní propusti je tedy v celém pásmu přibližně rovna vstupní impedanci měřicího přijímače, obvykle 50Ω , impedance LISN ze strany zkoušeného objektu - tzv. **impedance umělé sítě** - simuluje impedanci příslušné napájecí sítě v daném pásmu kmitočtů. Protože tato impedance je obtížně definovatelná, předepisují příslušné normy její hodnotu pro určitá kmitočtová pásma a pro určité druhy vnější energetické napájecí sítě. Přehled těchto impedancí podle normy ČSN-CISPR 16-1 je na Obr.4.1.2. Pro konkrétní měření pak použijeme takovou umělou síť, jejíž impedance simuluje impedanci vnější

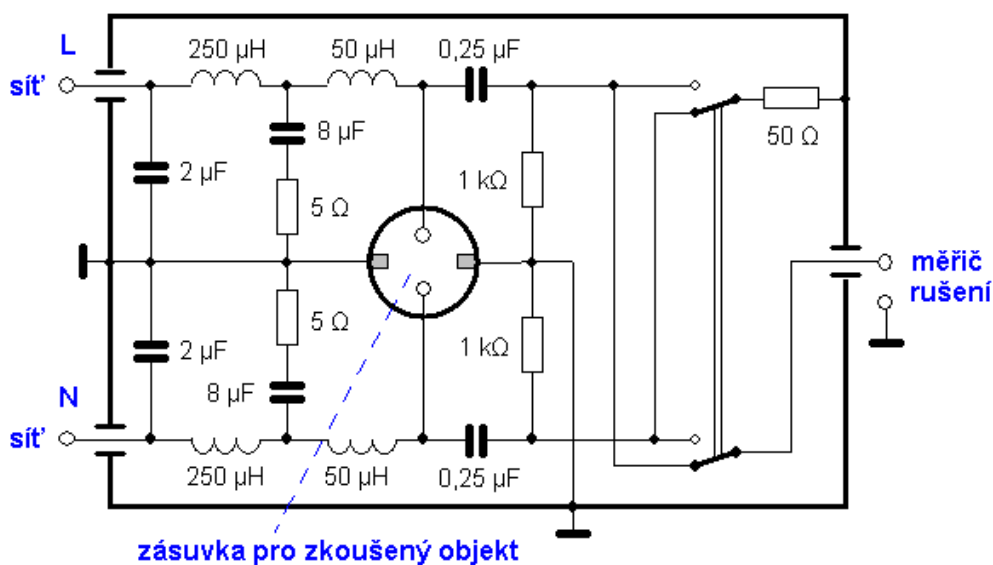
napájecí sítě, v níž se předpokládá budoucí činnost zkoušeného zařízení. Odpory $50\ \Omega$ v jednotlivých obvodech jsou v praxi tvořeny vstupním impedancí měřicího zařízení připojeného k LISN na přístrojových svorkách (3).



Obr.4.1.2 Impedance umělých sítí dle ČSN-CISPR 16-1:

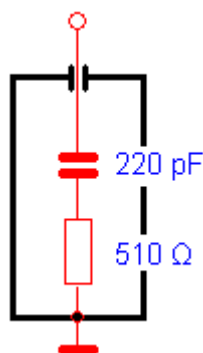
- a) $50\ W/50\ mH + 5\ W$ pro 9 kHz až 30 MHz (nízkonapěťové napájecí sítě)
- b) $50\ W/50\ mH$ pro 0,15 MHz až 30 MHz (průmyslové napájecí sítě)
- c) $50\ W/5\ mH + 1\ W$ pro 0,15 MHz až 100 MHz (palubní napájecí sítě)
- d) $150\ W$ pro 150 kHz až 30 MHz (klasické napájecí sítě). [3]

Na Obr.4.1.3 je uveden příklad konkrétní realizace jednofázové umělé sítě, která je určena pro měření v kmitočtovém pásmu 10 kHz až 30 MHz, na napájecím vedení.



Obr.4.1.3 Zapojení jednofázové umělé sítě [3]

Častým doplňkem umělých sítí je tzv. **standardní umělý operátor (umělá ruka)**. Je to (na LISN nezávislý) obvod, který při měření s umělou sítí simuluje vliv ruky uživatele u elektrických spotřebičů, které se při provozu drží v lidské ruce. Místo, v němž se uživatel dotýká přístroje, se při měření rušivých napětí ovine kovovou fólií, která se prostřednictvím obvodu umělého operátora spojí s referenční zemí měřicího systému. Obvod umělé ruky, uvedený na *Obr.4.1.4*, je tvořen sériovým spojením kondenzátoru $220 \text{ pF} \pm 20 \%$ a odporu $510 \Omega \pm 10 \%$. [3]



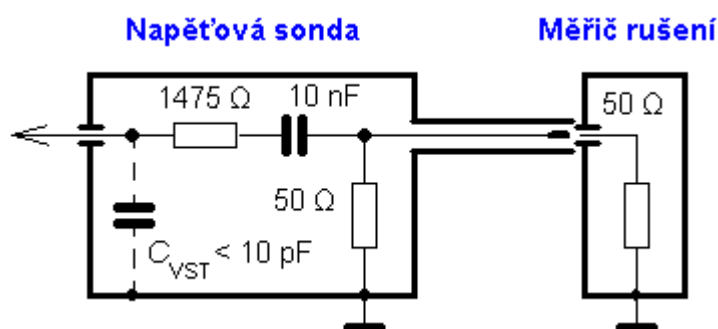
Obr.4.1.4 Standardní umělý operátor [3]

3.2 Měření s napěťovou sondou

Měření rušivých napětí napěťovou sondou se používá všude tam, kde nelze použít umělou síť nebo na jiných místech než na napájecích svorkách zkoušeného objektu. Napěťová sonda umožňuje přímé připojení do daného místa zkoumaného zařízení, takže je velmi vhodná zejména při diagnostických měřeních ve stádiu vývoje. Díky své vysoké vstupní impedanci je napěťová sonda nepostradatelná při měření rušivých signálů ve vysokoimpedančních obvodech, které by umělá síť svou příliš nízkou impedancí nepřipustně zatěžovala.

Jak plyne z příkladu zapojení jednoho typu napěťové sondy na *Obr.4.2.1*, jedná se o kapacitně vázaný odporový dělič napětí. Vstupní odpor sondy je větší než 1500Ω , vstupní kapacita menší než 10 pF , napěťové zeslabení $35,4 \text{ dB}$. Zemnicí konektor sondy musí být přímo spojen s referenční zemí zkoušeného zařízení nízkoimpedančním páskem. Důležitým parametrem každé napěťové sondy je maximální velikost vstupního provozního napětí, na něž smí být připojena. Tomu musí odpovídat napěťové dimenzování všech součástek sondy i její

celková konstrukce včetně izolační pevnosti apod. Drtivá většina dnes vyráběných napěťových sond pro potřeby EMC je určena pro maximální vstupní střídavé napětí 250 V.[3]



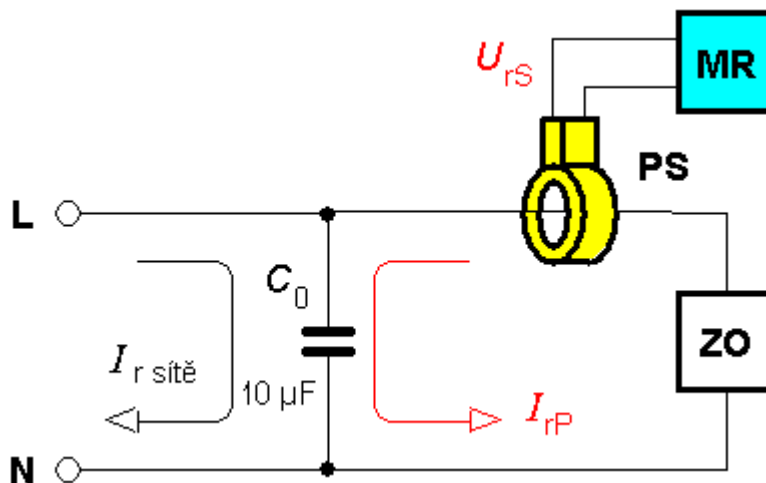
Obr.4.2.1 Schéma zapojení napěťové sondy [3]

Vzhledem k poměrně vysokému zeslabení a nepříliš vysokému vstupnímu odporu je sonda na Obr.4.2.1 použitelná pro měření rušivých napětí větších než asi 60 dBmV, a to v obvodech s nízkou impedancí, např. na napájecím síťovém vedení. Pro měření nízkých úrovní rušivých napětí ve vysokoimpedančních obvodech je většinou požadována vstupní kapacita sondy menší než 5 pF a vstupní odpor sondy větší než 1 MΩ. K dosažení takových parametrů je nutno použít aktivní napěťovou sondu osazenou na svém vstupu polem řízeným tranzistorem FET. Aktivní sondy vykazují napěťový zisk nebo jen malé napěťové zeslabení, velkou šířku kmitočtového pásma 300 MHz i více, vstupní kapacitu 3,5 pF a vysoký vstupní odpor řádu 10 MW. [3]

3.3 Měření s proudovou sondou

Proudová sonda (proudový transformátor, proudové kleště) slouží k měření rušivého elektrického proudu protékajícího vodičem, a to bez jeho přerušování. Princip měření proudovou sondou je naznačen na Obr.4.3.1. Proudová sonda obepíná vodič, jehož rušivý proud chceme měřit. Tento vodič představuje (jednozátvové) primární vinutí transformátoru sondy, sekundární vinutí, tj. vlastní proudová sonda, má tvar toroidního transformátoru. Tento toroid je přitom rozdělen na dvě rozevíratelné poloviny pro možnost vložení zkoumaného vedení (kabelu). Po uzavření kleští sondy (uzavření obou polovin toroidu) kolem měřeného vodiče je jím protékající rušivý (primární) proud I_{rp} převeden na napětí U_{rs} na výstupu sekundárního vinutí sondy. To se pak měří připojeným měřicím přijímačem. Zkratovací kondenzátor C_0 v Obr.4.3.1 jednak uzavírá vysokofrekvenční "cestu" měřeného rušivého

proudu produkovaného zkoušeným objektem ZO a brání jeho postupu do napájecí sítě, jednak zamezuje průniku rušivých signálů (proudů) z vnější napájecí sítě do proudové sondy a tím zkreslení výsledků měření.[3]



Obr.4.3.1 Schéma zapojení napěťové sondy [3]

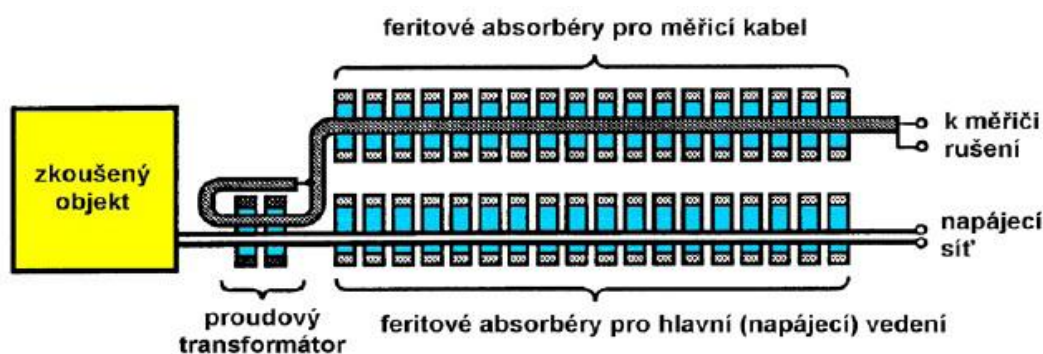
Základním parametrem proudové sondy je její přenosová impedance $Z_T = U_{rS}/I_{rP}$ vyjadřovaná obvykle v [dBΩ]. Její hodnota na nízkých kmitočtech klesá se směrnici 20 dB/dekádu, takže nejnižší pracovní kmitočet sondy je dán poklesem její citlivosti pod přípustnou mez. Zvýšit citlivost sondy lze zejména vysokým počtem závitů a použitím toroidního jádra s vysokou permeabilitou. Maximální pracovní kmitočet sondy je naopak určen vlastní rezonancí její indukčnosti a parazitních kapacit vinutí transformátoru. Proudové sondy pro potřeby EMC jsou dnes převážně používány v rozsahu 30 Hz až 100 MHz, mohou však být konstruovány až do kmitočtu 1000 MHz. Při těchto vysokých kmitočtech vznikají na měřeném vedení stojaté vlny rušivého vysokofrekvenčního signálu a proudovou sondu je nutno během měření umístit tak, aby byl vždy měřen maximální rušivý proud.[3]

Obvyklé proudové kleště používané v běžné měřicí technice k měření pracovních proudů na napájecích vedeních nelze použít pro potřeby EMC, protože tyto sondy jsou navrženy pro kmitočty 50 a 60 Hz, nikoli pro měření vysokofrekvenčních signálů. [1]

3.4 Měření s absorpčními kleštěmi

Absorpční kleště (absorpční transformátor, absorpční odbočnice) představují kombinaci širokopásmové vysokofrekvenční proudové sondy (proudového transformátoru) a feritového absorbéru (přízpusobené zátěže). Používají se v kmitočtovém pásmu 30 - 1000 MHz k měření výkonu rušivého signálu, který je vyšetřovaným zařízením vyzařován prostřednictvím přípojných kabelů a vedení.

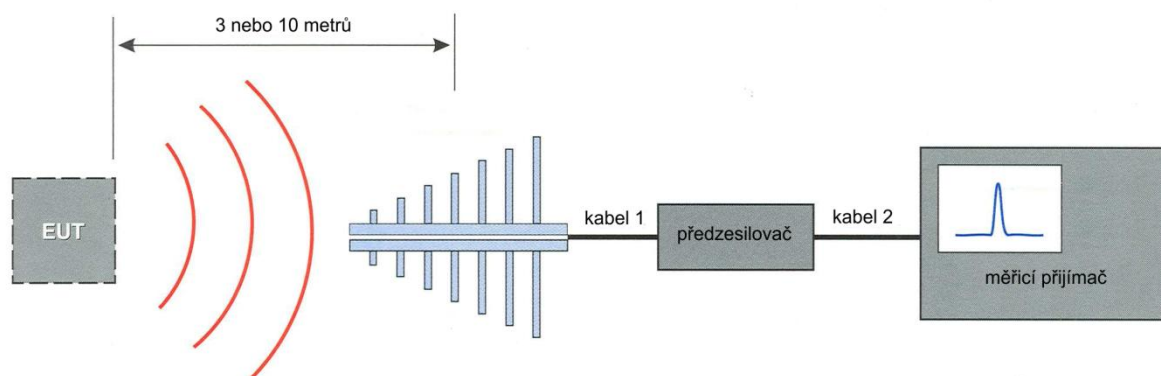
Na Obr.4.4.1 je znázorněna obvyklá konstrukce absorpčních kleští. Kromě proudové sondy pro daný rozsah kmitočtů (proudové vazební smyčky) jsou kleště tvořeny přibližně 60-ti feritovými kroužky umístěnými jak okolo zkoušeného kabelu, tak okolo měřicího kabelu, jímž je měřený signál veden k měřiči rušení. Feritové kroužky okolo zkoušeného kabelu působí jako širokopásmový absorbér výkonu rušivého signálu a tím jako stabilizátor vysokofrekvenční impedance kabelu. Soustava feritových kroužků, příp. feritový rukáv okolo měřicího kabelu omezuje parazitní vysokofrekvenční proud tekoucí po jeho povrchu do měřiče rušení. [3]



Obr.4.4.1 Konstrukce absorpčních kleští [1]

3.5 Měření pomocí antén

Rušivé signály vyzařované vyšetřovaným zařízením do okolního prostoru na kmitočtech od 10 kHz do 1000 MHz a výše jsou měřeny pomocí různých druhů měřicích antén. Měření rušivých elektromagnetických polí je zvláště významné v oblasti velmi vysokých kmitočtů (od 300 MHz výše), neboť realizace přímého měření rušivých napětí či proudů je na těchto kmitočtech velmi problematická, někdy zcela nemožná. Rušivé elektromagnetické pole se měří přístrojem pro měření rušení (měřicím přijímačem) doplněným vhodnou měřicí anténou.[3]



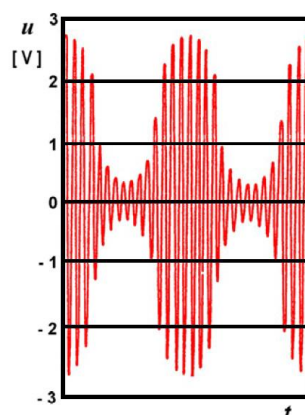
Obr.4.5.1 Měřicí řetězec [7]

Přehled používaných antén je dále popsán v samostatné kapitole.

4 Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

Kmitočtový rozsah zkušebních harmonických signálů pro uvedený typ zkoušek odolnosti je široký. Norma ČSN EN 61000-4-6 ed.3 je vymezuje od kmitočtu 9 kHz. Harmonická elektromagnetická pole o těchto „nízkých“ kmitočtech se přivádějí do zkoušeného zařízení pomocí vazebních obvodů nebo jsou injektována do přívodních kabelů pomocí kapacitních kleští. Přestože jsou zkoušky přípustné až do 230 MHz, dává se na kmitočtech vyšších než 26 MHz přednost simulaci rušivých elektromagnetických polí vyzařováním anténami. Tyto zkoušky odolnosti v nejčastěji využívaném kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 2 GHz popisuje česká norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3. [1]

Uvedená norma předepisuje v pásmu 80-2000 MHz zkušební úrovně intenzity elektrického pole 1, 3, 10 a 30 V/m, případně vyšší dle požadavků výrobce. Úrovně odpovídají efektivním hodnotám intenzity pole harmonického nemodulovaného signálu. Pro zkoušku odolnosti je však tento signál amplitudově modulován do hloubky 80 % harmonickým napětím 1 kHz. Časový průběh tohoto zkušebního signálu je na Obr.5.1.

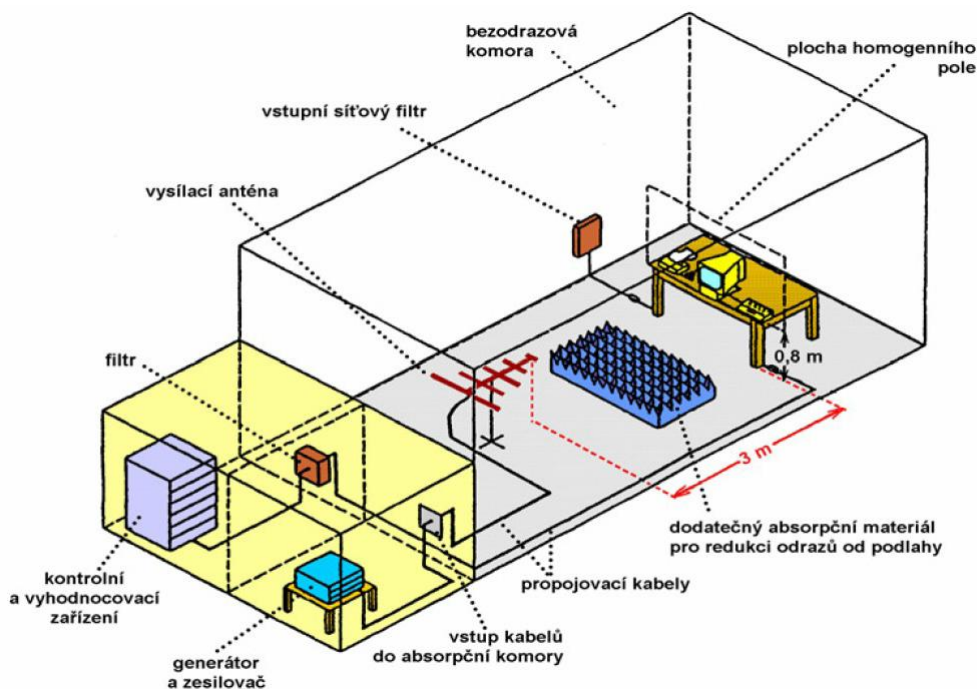


Obr.5.1 Průběh zkušebního signálu s 80 % AM (nemodulovaný signál má efektivní hodnotu 1V) [1]

Tento průběh simuluje skutečné rušivé vysokofrekvenční signály, které jsou vždy rovněž určitým způsobem modulovány. Takto zvolený typ modulace plně vyhovuje pro posouzení odolnosti zařízení i vůči jiným rušivým vysokofrekvenčním signálům.

4.1 Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním vyzařovaným elektromagnetickým polím

Základním principem zkoušek odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli je ozařování zkoušeného objektu příslušnými úrovněmi pole pomocí vhodných antén. Tato měření zpravidla probíhají ve stíněných absorpčních prostorech. Příklad profesionálního zkušebního pracoviště je uveden na Obr.5.2. Tím se odstraní vliv vnějších polí na zkoušený objekt a zároveň se chrání obsluhující personál a blízká elektronická zařízení před vlivem silného vysokofrekvenčního zkušebního signálu.



Obr.5.1.1 Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu poli (absorpční obložení stropu a stěn není naznačeno) [1]

K základnímu technickému a přístrojovému vybavení zkušebního pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním polím patří zejména:

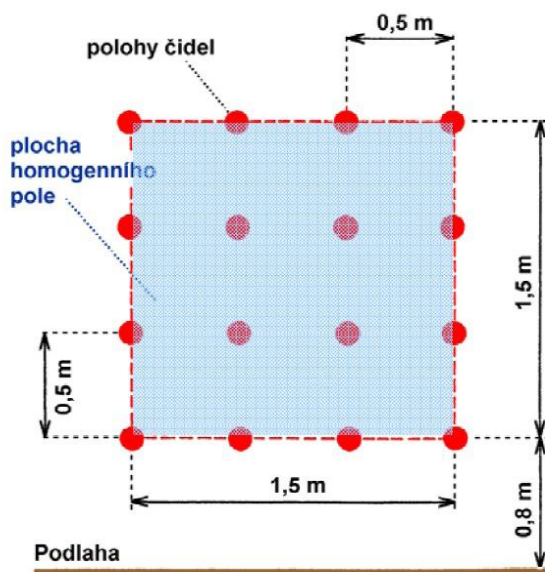
- **Vysokofrekvenční signální generátor** pokrývající vyšetřované kmitočtové pásmo s možností amplitudové modulace sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 %. Generátor musí být vybaven ručním a automatickým přeladováním (rozmítáním kmitočtu) přes celé pracovní kmitočtové pásmo s rychlostí $1,5 \cdot 10^{-3}$ dekády/s nebo nižší. Výstup generátoru může být opatřen filtrem typu dolní, příp. pásmová propust pro potlačení vyšších harmonických složek generovaného signálu.
- **Širokopásmový výkonový zesilovač** (či zesilovače) k dosažení příslušného výkonu zkušebního signálu.
- **Vysílací směrová anténa**, příp. několik antén, vyzařující zkušební elektromagnetickou vlnu. V zásadě lze použít všechny antény používané rovněž k měření rušivých elektromagnetických polí s přihlédnutím k jejich výkonové zatížitelnosti, tj. schopnosti vyzářit potřebný vysoký výkon pro dosažení předepsané úrovně pole v místě zkoušeného objektu. Obvyklými typy jsou bikónická anténa a logaritmicke-periodická anténa, příp. jiný typ antény s lineární polarizací.
- **Elektrické filtry** zapojené ve všech vstupech a výstupech kabelů a vedení do zkušební komory.

- **Pomocná elektronická zařízení** ke kontrole a spojitě vyhodnocování funkčnosti zkoušeného zařízení, příp. k zajištění dalších funkcí během zkoušky. Tato zařízení se umísťují zásadně vně absorpční stíněné komory a do jejího vnitřního prostoru jsou často navázána pomocí optočlenů či optických kabelů.[3]

Při vlastním měření je zkoušené zařízení (objekt) podle své velikosti umístěno v absorpční komoře buď na nevodivém (často otočném) stole o výšce 80 cm, nebo na podlaze na nevodivé podložce o výšce 10 cm. Normou preferovaná vzdálenost zkoušeného zařízení od vysílací antény je 3 m, nelze-li tuto vzdálenost realizovat, je nejmenší přípustná vzdálenost 1 m. Rovněž vzdálenost zkoušeného objektu od stěn měřicí komory by měla být větší než 1 m. [3]

Pro dosažení správných a reprodukovatelných výsledků zkoušek odolnosti je nutno zajistit, aby intenzita zkušební elektrického pole v celém objemu zkoušeného objektu měla normou požadovanou konstantní velikost, a to v celém pracovním kmitočtovém pásmu. Zkoušený objekt by tedy měl být ozařován homogenním polem o známé, přesně nastavitelné a konstantní intenzitě. Ke splnění tohoto požadavku je nutno příslušnou zkušebnu, příp. simulované zkušební pole před vlastní zkouškou nejprve kalibrovat. Podle ČSN EN 61000-4-3 se kalibrace provádí nemodulovaným harmonickým signálem, a to měřením velikosti generovaného pole v tzv. **ploše homogenního pole**. Jak je zřejmé z Obr.5.3 jde o pomyslnou vertikální plochu o velikosti 1,5 x 1,5 m ve výšce 0,8 m nad podlahou (nad zemní rovinou). Při kalibraci je tato plocha (bez zkoušeného zařízení) ozařována vysílací anténou a malou, nejlépe všesměrovou přijímací anténou (tzv. senzorem neboli čidlem pole) je měřena intenzita pole v 16 měřicích bodech plochy dle Obr.5.3. Pole v uvedené ploše je považováno za homogenní, kolísá-li jeho měřená velikost o méně než ± 3 dB na 75 % plochy, tj. alespoň ve 12 z celkových 16 měřicích bodů dle Obr.5.3. Vysokofrekvenční výkon P_{Vkal} dodávaný do vysílací antény je při kalibraci udržován na konstantní hodnotě, při níž je měřená kalibrační intenzita elektrického pole E_{kal} v ploše homogenního pole v rozsahu mezi 3 a 10 V/m. Ze známého výkonu P_{Vkal} a měřené intenzity E_{kal} pak můžeme určit potřebný výkon generátoru P_V pro dosažení normou požadované zkušební intenzity pole E_n (1, 3 či 10 V/m) jako:

$$P_V = P_{Vkal} \left(\frac{E_n}{E_{kal}} \right)^2 \quad (5.1)$$



Obr.5.1.2 Rozměry plochy homogenního pole dle ČSN EN 61000-4-3 [1]

Při vlastní zkoušce odolnosti se zkoušené zařízení umísťuje tak, aby jeho "čelní stěna" byla umístěna v kalibrované ploše homogenního pole, přičemž se takto postupně vystřídají všechny čtyři strany zkoušeného zařízení, a to při obou polarizacích testovacího pole. Je-li plocha některé "čelní" stěny zařízení větší než kalibrovaná plocha homogenního pole 1,5 x 1,5 m, je nutno uskutečnit řadu zkoušek odolnosti postupným ozařováním dílčích částí "čelní" plochy nepřesahujících rozměry použité kalibrované plochy. Při zkoušce musí být použita stejná anténa, stejné kabely a celkově stejná úprava zkušebny jako při její předchozí kalibraci. I malá přemístění antén, spojovacích kabelů a dalších částí uvnitř zkušebního prostoru mohou mít značný vliv na rozložení elektromagnetického pole ve zkušebně, a tím i na výsledky zkoušek odolnosti. [3]

4.2 Speciální antény pro simulaci zkušebních elektromagnetických polí

K testování elektromagnetické odolnosti zařízení jejich ozařováním vysokofrekvenčním polem o předepsané intenzitě je třeba značný budicí výkon signálu přiváděného k vysílací anténě. Tento vysoký výkon (stovky W až jednotky kW) v širokém pásmu pracovních kmitočtů (80 MHz až 1 GHz, případně i více) je dosahován v širokopásmovém výkonovém zesilovači, který tak tvoří jednu z nejnákladnějších součástí vybavení zkušebny pro tento typ zkoušek odolnosti. Snaha o zmenšení potřebné velikosti P_V vede ke změně celkové metodiky

zkoušek odolnosti, kdy zkoušený objekt nebude ozařován polem ve vzdálené zóně, ale elektromagnetické pole je k němu "přiváděno" jiným způsobem. K tomu slouží speciální typy antén, které již nejsou obvyklými "zářiči" elektromagnetických vln, ale vesměs představují určité druhy vysokofrekvenčních vedení s příčnou (transverzální) vlnou TEM. Těmito anténami (vedeními) lze vytvářet testovací homogenní elektrická pole s vysokou intenzitou několika desítek V/m při budicích výkonech o několik řádů nižších než v případě "volného ozařování" zkoušeného objektu. Navíc se takto realizované zkoušky odolnosti nemusí provádět uvnitř (drahých) absorpčních komor, neboť sama tato vedení představují vždy více či méně uzavřený prostor, jehož vyzařování je malé, v některých případech zcela nulové.[3]



Obr.5.2.1 Vzhled profesionální měřicí komory - GTEM 1500 Teseq [6]

4.3 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Problematikou rušení, šířeném po vedení a indukovaným vysokofrekvenčním polem se zabývá norma ČSN EN 61000-4-6. Principem měření je vědomé připojení vysokofrekvenčních vysílačů (9 kHz – 80 MHz), které působí na kabely připojené k instalovanému zařízení. Rozměry zařízení jsou ve srovnání s délkou vlny považovány za malé. Síťové přívody, komunikační vedení, propojovací kabely se chovají jako pasivní přijímací anténní sítě s délkou srovnatelnou nebo násobně větší než délka vlny, rušení je simulováno elektrickými a magnetickými blízkými poli. Rušivý signál je aplikován na jeden kabel a ostatní jsou použitím oddělovacích prostředků udržovány v nevybuzeném stavu. [4]

Tab.5.1 Zkušební úrovně (obvod naprázdno, nemodulovaný signál, efektivní hodnota) [4]

Kmitočtový rozsah 150 kHz – 80 MHz		
Třída	Úroveň napětí	
	U ₀ [dB μ V]	U ₀ [V]
1	120	1
2	130	3
3	140	10
x	x	x

Výběr zkušebních úrovní:

- **Třída 1:** nízká úroveň, místa vzdálená víc než 1 km od radiových a televizních stanic, vysílače nízkého výkonu
- **Třída 2:** nenáročné prostředí, přenosné vysílače nízkého výkonu (do 1W), ne v těsné blízkosti zařízení – obchodní prostředí
- **Třída 3:** náročné prostředí, přenosné vysílačky 2W a více ve vzdálenosti větší než 1 m od zařízení, výkonové rozhlasové vysílače, průmyslová, vědecká a lékařská zařízení v blízkosti – průmyslové prostředí

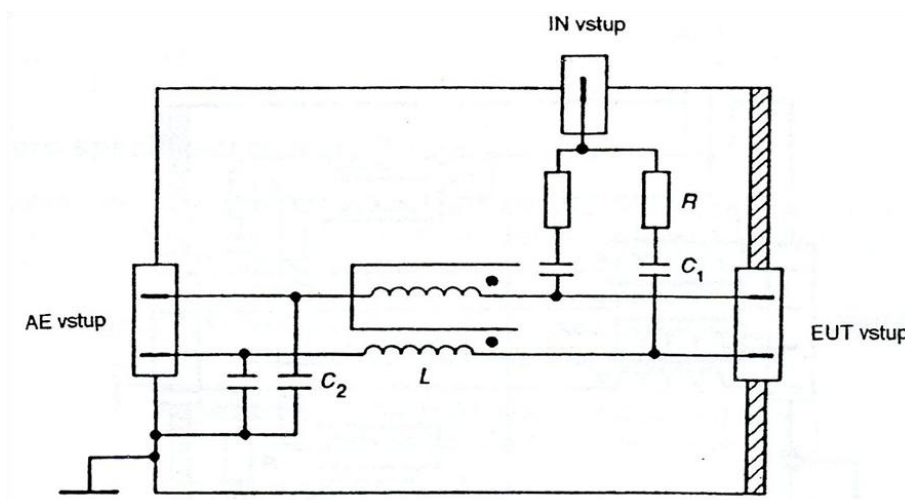
Volba závisí také na rozměrech, způsobu napájení a provozu zařízení, zařízení malých rozměrů mohou být zkoušena až do 230 MHz, pro počáteční kmitočty platí:

- Zařízení napájené z baterie (rozměr $< \lambda/4$), není spojeno se zemí ani s jiným zařízením a nebude použito během dobíjení baterie – nezkouší se
- Zařízení napájené z baterie (rozměr $\geq \lambda/4$), počáteční kmitočty zkoušky určí velikost zařízení včetně délky kabelů
- Zařízení připojené do sítě a nepřipojené k jinému zařízení, zařízení zatíženo umělou rukou, počáteční kmitočty 150 kHz
- Zařízení připojené do sítě a připojené ovládacími nebo telekomunikačními kabely k jinému zařízení, počáteční kmitočty 150 kHz

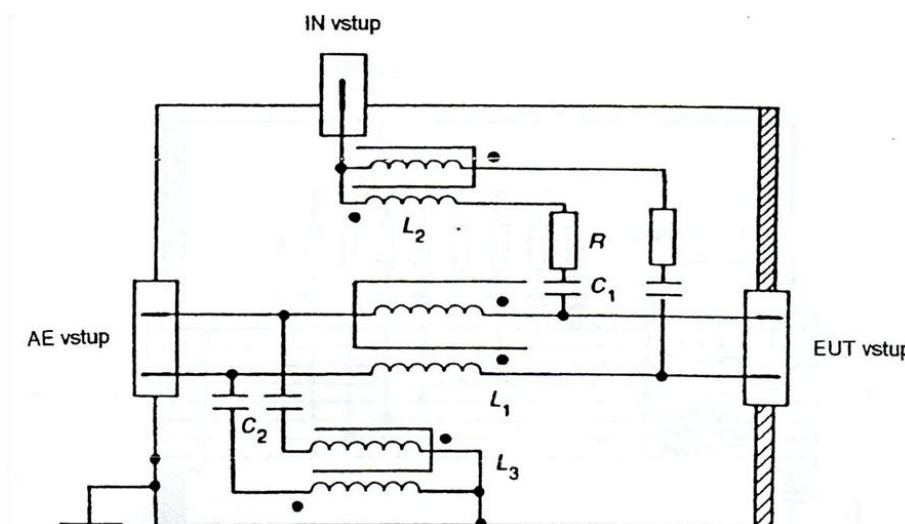
Pro vytvoření vhodné vazby rušivého signálu (v požadovaném kmitočtovém rozsahu s definovanou nesymetrickou impedancí proti referenční zemní rovině na vstupu/výstupu zkoušeného zařízení 150Ω) na různé kabely připojené ke zkoušenému zařízení a pro zabránění vlivu aplikovaného signálu na jiná nezkoušená zařízení se musí použít vazební a oddělovací prostředky – **vazební/oddělovací síť CDN** (*Coupling-Decoupling Network*). CDN jsou vazební a zároveň oddělovací obvody, které se používají při zkouškách měření rušivého vyzařování i elektromagnetické odolnosti.

- Funkce vazební umožňuje přenos zkušebního signálu z generátoru do energetických, ovládacích či dalších vstupů zkoušeného zařízení v požadovaném pásmu kmitočtů.
- Funkce oddělovací zabraňuje zpětnému šíření zkušebního (rušivého) signálu do vnější napájecí, signálové či datové sítě připojené ke zkoušenému zařízení.

Tuto vazbu CDN je možné navázat kapacitně nebo induktivně. V obou případech je však nutné rozlišit zda je zkušební signál k oběma fázovým vodičům síťového vedení přiveden symetricky (k oběma vodičům současně), nesymetricky (ke každému vodiči zvlášť) popřípadě asymetricky.



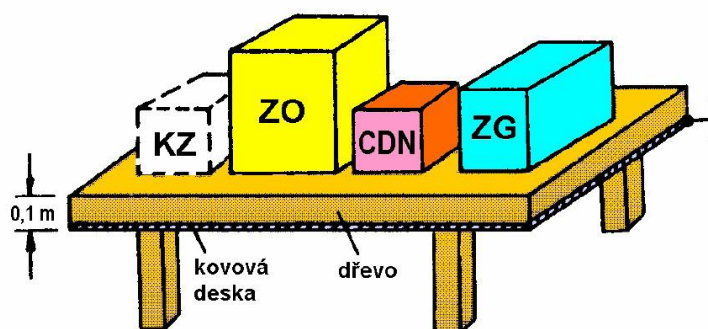
Obr.5.3.1 Příklad CDN, typ AF firmy Franconia, pro nestíněné nesymetrické vodiče [4]



Obr. 5.3.2 Příklad CDN, typ T firmy Franconia, pro nestíněné symetrické vodiče [4]

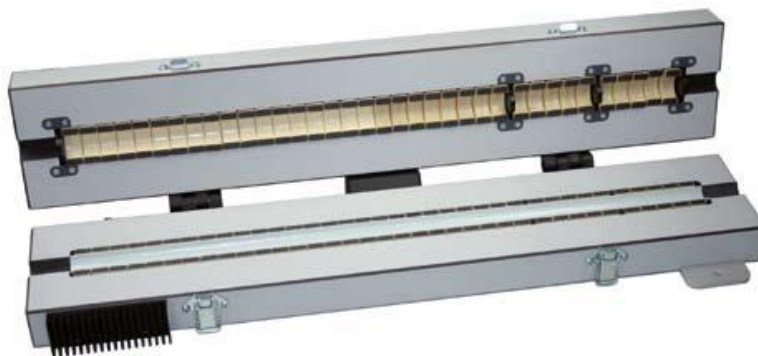
Norma IEC EN 61000-4-6 specifikuje návrh a provedení vazebních / oddělovacích sítí CDN. Pro každý typ kabelu a přenášeného signálu kabelem je specifikován jiný typ CDN. Základními parametry vazebních/ oddělovacích sítí CDN jsou frekvenční rozsah, maximální napětí, maximální proud a maximální napětí rušivého signálu.

U obou měření jak rušivého vyzařování, tak i u měření elektromagnetické odolnosti je také důležité prostorové uspořádání měřicího pracoviště. Toto je zobrazeno na Obr.5.2.3. Zkoušené zařízení a použité měřicí přístroje jsou umístěny 10 cm nad kovovou deskou (Cu, Al) s minimální plochou 1 m² na dřevěném stole. Kovová deska je přitom spojena s referenční zemí celého systému. Vzdálenost zkoušeného zařízení od všech ostatních vodivých stěn musí být větší než 0,5 m.



Obr. 5.3.3. Uspořádání pracoviště pro zkoušky EMS (ZG - zkušební generátor; CDN - vazební a oddělovací obvod; ZO - zkoušený objekt; KZ - kontrolní zařízení).

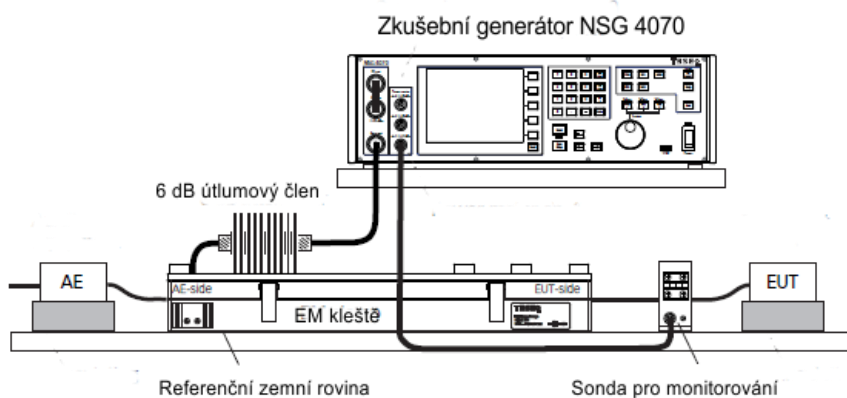
Pro zavedení zkušebních signálů do zkoušeného objektu se také používají **elektromagnetické kleště**, které využívají kapacitní a induktivní vazbu, nebo **proudové kleště** pro induktivní vazbu **BCI** (*Bulk Current Injection Clamp*).



Obr.5.3.4 Elektromagnetické kleště [5]



Obr.5.3.5 Proudové kleště [6]



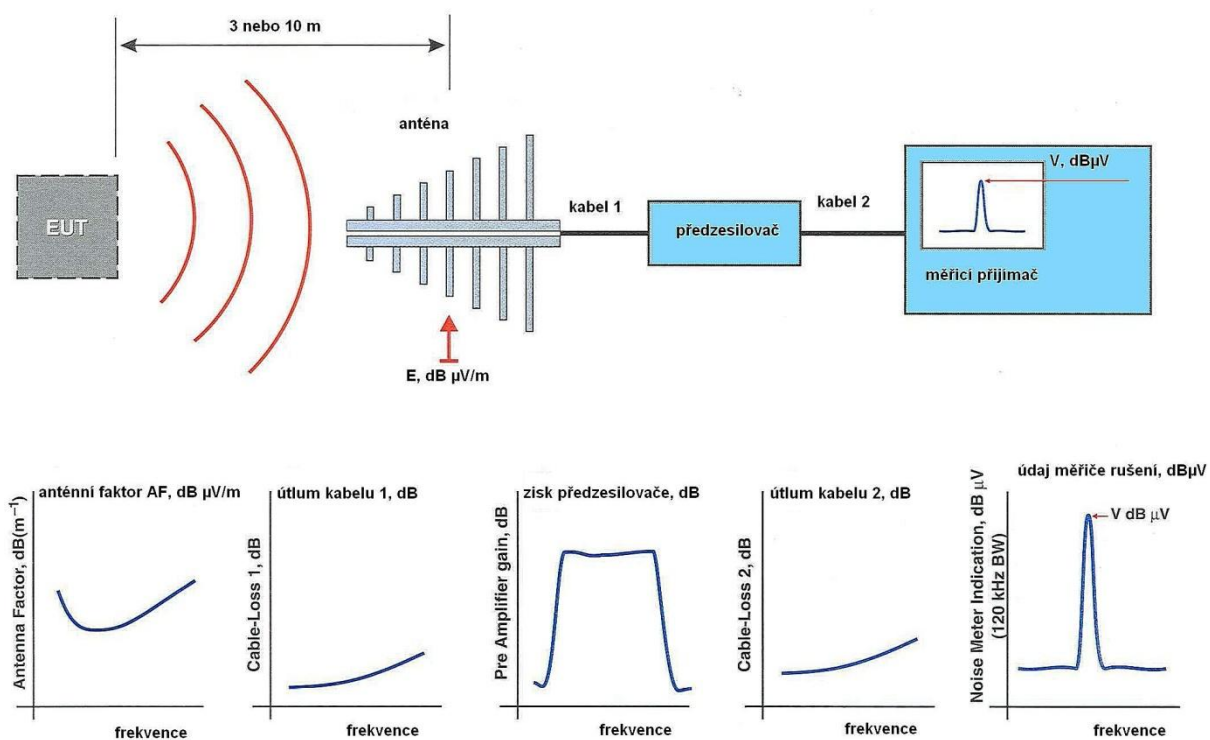
Obr.5.3.6 Příklad zkušební sestavy firmy TESEQ pro injektování kleštěmi [6]

5 Antény

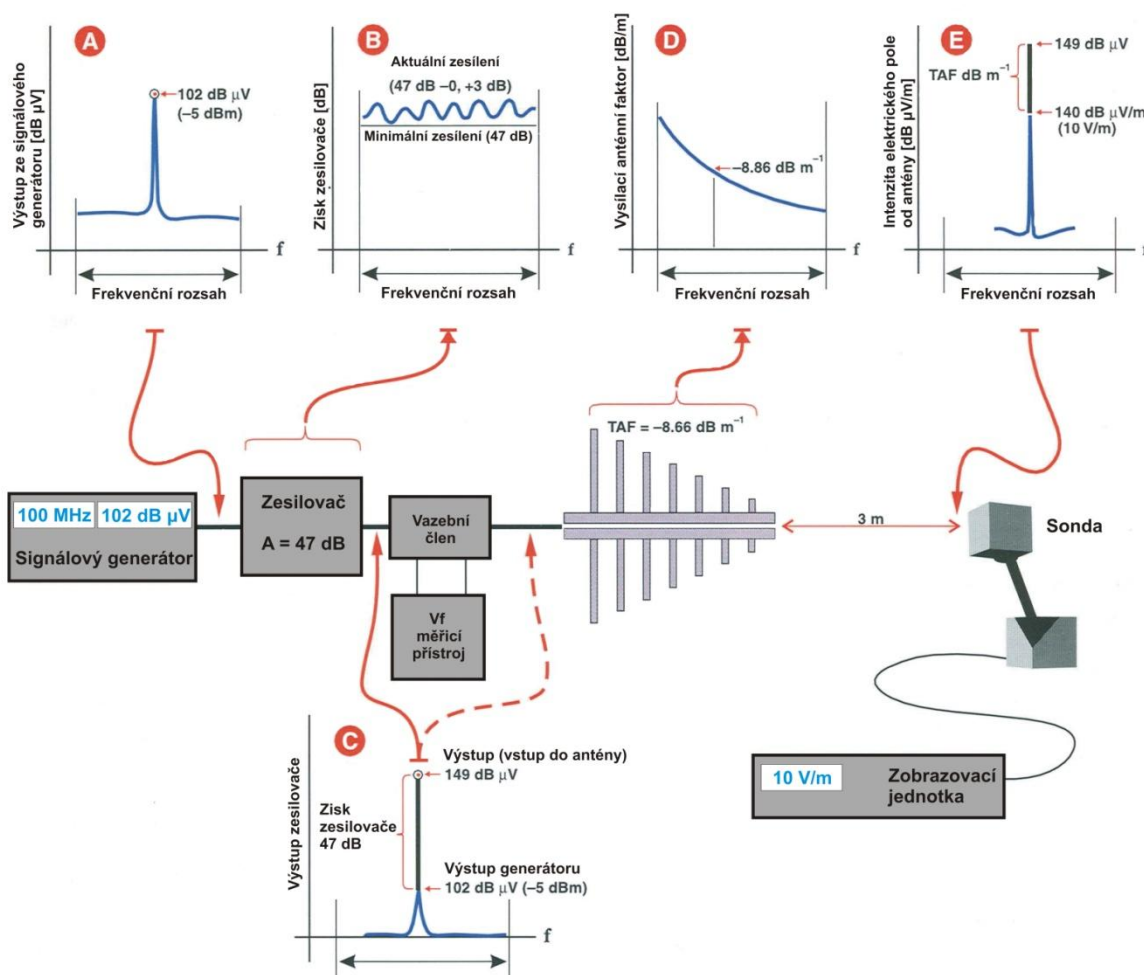
5.1 Vzájemná vazba mezi EMS a EMI

Vzájemná vazba mezi oběma řetězci je dána vztahem mezi přijímacím anténním faktorem AF a vysílacím anténním faktorem TAF.

EMS



Obr.6.1.1 Měřicí řetězce EMS [7]

EMI

Obr.6.1.2 Měřicí řetězce EMI [7]

Anténní faktor AF

Tento parametr měřících (přijímacích) EMC antén uvádí ve vztah výstupní napětí U měřící antény s intenzitou pole E v místě antény produkující uvedené napětí na připojené zátěži antény. Anténní faktor roste s rostoucí frekvencí. [9]

$$AF_E = \frac{E_r}{U_r} \quad (6.1.1)$$

Nebo v logaritmické míře:

$$AF_E(\text{dBm}^{-1}) = E_r(\text{dBVm}^{-1}) - U_r(\text{dBV}) \quad (6.1.2)$$

Pro antény měřící magnetické pole je obdobně definován jejich anténní faktor pro magnetické pole.

$$AF_H = \frac{H_r}{U_r} \quad (6.1.3)$$

$$AF_H(\text{dBsm}^{-1}) = H_r(\text{dBAm}^{-1}) - U_r(\text{dBV}) \quad (6.1.4)$$

Výhoda zavedení anténního činitele AF je jeho jednoduché použití při vyhodnocování velikosti rušivého pole.

$$E_r(\text{dBVm}^{-1}) = U_r(\text{dBV}) + AF(\text{dBm}^{-1}) \quad (6.1.5)$$

Anténní faktor AF (někdy označovaný jako přijímací anténní faktor) je základním parametrem každé antény pro EMC a jeho kmitočtový průběh základním údajem dodávaným výrobcem antény. [8]

Odvození AF

Poměr mezi výkonem absorbovaným anténou a výkonovou hustotou dopadající vlny je účinný průřez antény:

$$A_e(\text{m}^2) = \frac{P_r}{P_d} \frac{(\text{W})}{(\text{Wm}^{-2})} \Rightarrow P_d = \frac{P_r}{A_e} \quad (6.1.6)$$

Vztah mezi A_e a ziskem přijímací antény.

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (6.1.7)$$

Výstupní napětí přijímací antény a výstupní výkon jsou vázány vztahem.

$$P_r = \frac{U_r^2}{Z} \quad (6.1.8)$$

V decibelech pro 50Ω :

$$U_r(\text{dB}\mu\text{V}) = P_r(\text{dBmW}) + 107 \quad (6.1.9)$$

Vztah mezi výkonovou hustotou dopadající vlny a intenzitou el. pole ve volném prostoru:

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi} \quad (6.1.10)$$

Pokud dosadíme vztahy (6.1.6), (6.1.7), (6.1.8) do vztahu (6.1.10), dostaneme vztah:

$$\frac{U_r^2}{Z} = \frac{E^2}{120\pi} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \quad (6.1.11)$$

a ze vztahu (6.1.11) je pak anténní faktor pro 50Ω systém:

$$AF = \frac{E}{U_r} = \sqrt{\frac{480\pi^2}{Z \cdot G_r \cdot \lambda^2}} = \frac{9,73}{\lambda \sqrt{G_r}} \quad (6.1.12)$$

Nebo v logaritmickém měřítku:

$$AF(\text{dBm}^{-1}) = 19,8 - 20 \log \lambda(m) - 10 \log G_r = 20 \log f(\text{MHz}) - G_r(\text{dB}) - 29,79 \quad (6.1.13)$$

Vysílací anténní faktor TAF

Tento parametr charakterizuje vysílací schopnosti EMC antén a uvádí ve vztah intenzitu pole E generovaného anténou v dané vzdálenosti d se vstupním napětím U na vstupu antény. [9]

Odvození TAF

TAF je vztah mezi velikostí intenzity pole generovaného anténou a velikostí vstupního napětí antény:

$$TAF = \frac{E_t}{U_t} \quad (6.1.14)$$

Vyjádřeno logaritmicky:

$$TAF(dBm^{-1}) = E_t(dBV/m) - U_t(dBV) \quad (6.1.15)$$

Odvození vychází z Frissovy přenosové rovnice.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (6.1.16)$$

Kde index r (receive) označuje parametry přijímací antény (zisk a přijímaný výkon) a index t (transmit) parametry vysílací antény (zisk a vysílaný výkon).

V případě zkoušky odolnosti není cílem vysílaného signálu přijímací anténa, ale místo v prostoru, kde je umístěno EUT. Ve vztahu tedy neuvažujeme efektivní aperturu přijímací antény:

$$A_{er} = \frac{\lambda^2 G_r}{4\pi} \quad (6.1.17)$$

Přenosová rovnice pak má tvar:

$$P_d = \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \quad (6.1.18)$$

Kde P_d (W/m^2) je vyzářená výkonová hustota ve vzdálenosti R od vysílací antény. Výkon ztracený na zatížení a napětí na ztrátovém prvku jsou vázány vztahem:

$$P_t = \frac{U_t^2}{Z} \quad (6.1.19)$$

Vztah mezi výkonovou hustotou dopadající vlny a intenzitou el. pole ve volném prostoru:

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi} \quad (6.1.20)$$

Dosazením vztahu (6.1.18) do vztahu (6.1.20) a dosazením vztahu (6.1.19) za P_t dostaneme:

$$TAF = \frac{E}{U_t} = \frac{1}{R} \frac{\sqrt{30G_t}}{\sqrt{Z}} = \frac{1}{R} \sqrt{0,6G_t}, \text{ pro } Z = 50 \Omega \quad (6.1.21)$$

V decibelech:

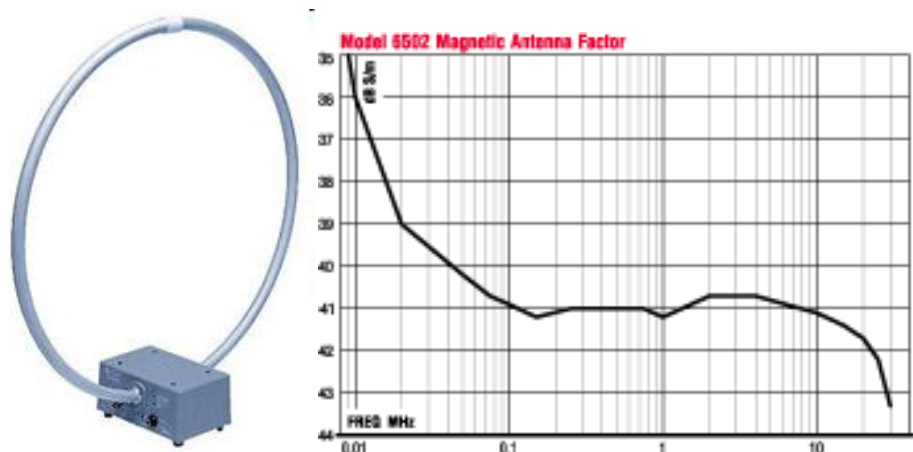
$$TAF(\text{dBm}^{-1}) = 10 \log G_t - 2,22 - 20 \log R \text{ (m)} = G_t(\text{dB}) - 2,22 - 20 \log R \quad (6.1.22)$$

Vzájemný vztah mezi AF a TAF v kalibrované vzdálenosti R :

$$TAF = 20 \log f - AF - 32 \quad (6.1.23)$$

5.2 Typy antén

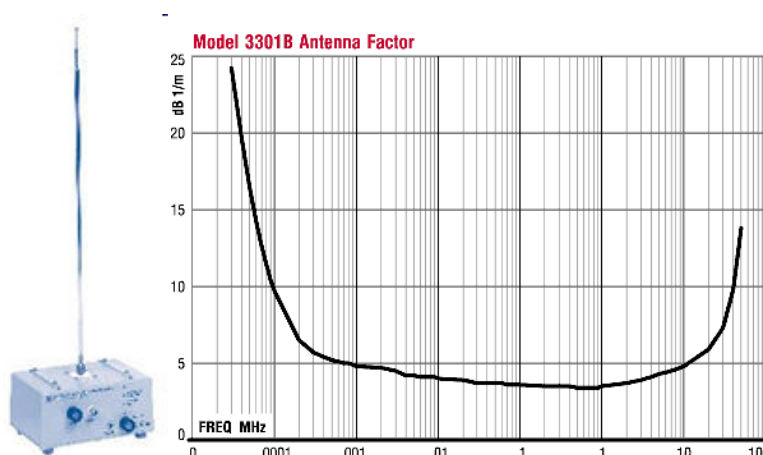
Aktivní elektricky stíněná smyčková anténa



Obr.6.2.1 Smyčková anténa a její typický anténní faktor [8]

V nejnižším kmitočtovém pásmu 9 kHz až 150 kHz je drtivá většina rušivých jevů způsobována magnetickou složkou pole. Pro měření se používají antény o maximálních rozměrech 60 x 60 cm. Antény jsou vybavené měřicími zesilovači pro dané pásmo kmitočtů.

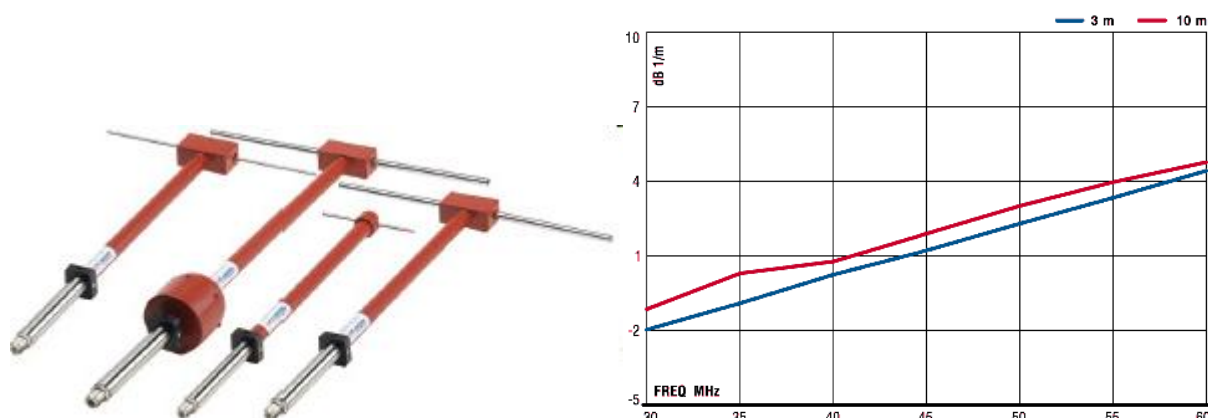
Aktivní prutová anténa (monopól)



Obr.6.2.2 Aktivní prutová anténa a její typický anténní faktor [8]

Antény měří elektrickou složku pole E . Doporučená délka antény je 1 m.

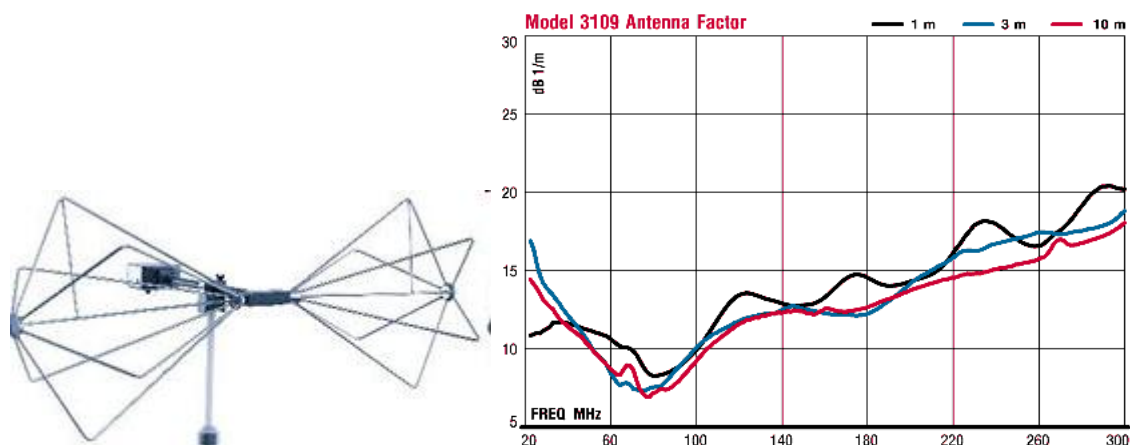
Laděné symetrické dipóly



Obr.6.2.3 Laděné symetrické dipóly a jejich typický anténní faktor [8]

V pásmu 30 - 80 MHz nastavené na rezonanční délku odpovídající kmitočtu 80 MHz. Ve vyšších pásmech až do 1000 MHz slouží rezonanční půlvlnné dipóly jako přesné referenční, příp. kalibrační antény. Pro běžná provozní měření však nejsou příliš vhodné z důvodu jejich pracnějšího nastavení, délka ramen dipólu musí být naladěna vždy na příslušný měřicí kmitočet.[8]

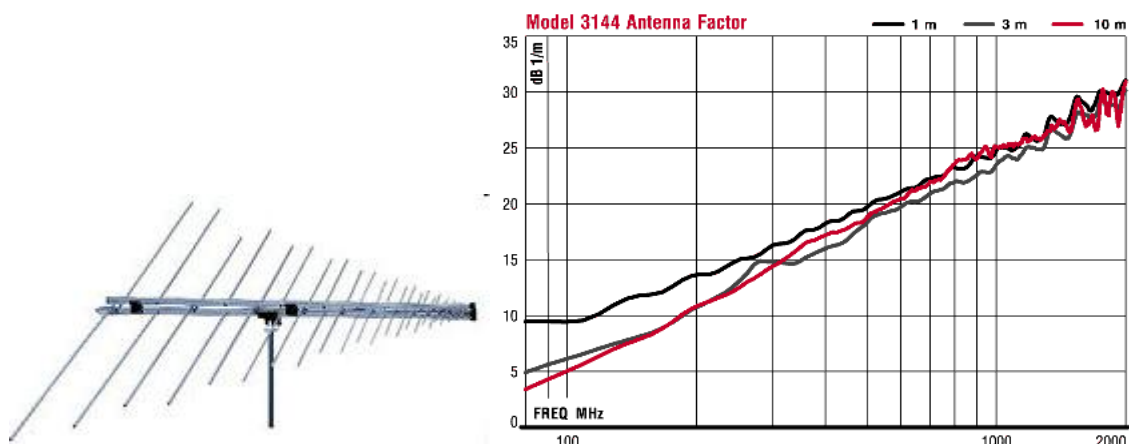
Bikónická anténa



Obr.6.2.4 Bikónická anténa a její typický anténní faktor [8]

Používá se pro měření v rozsahu 20 MHz – 300 MHz.

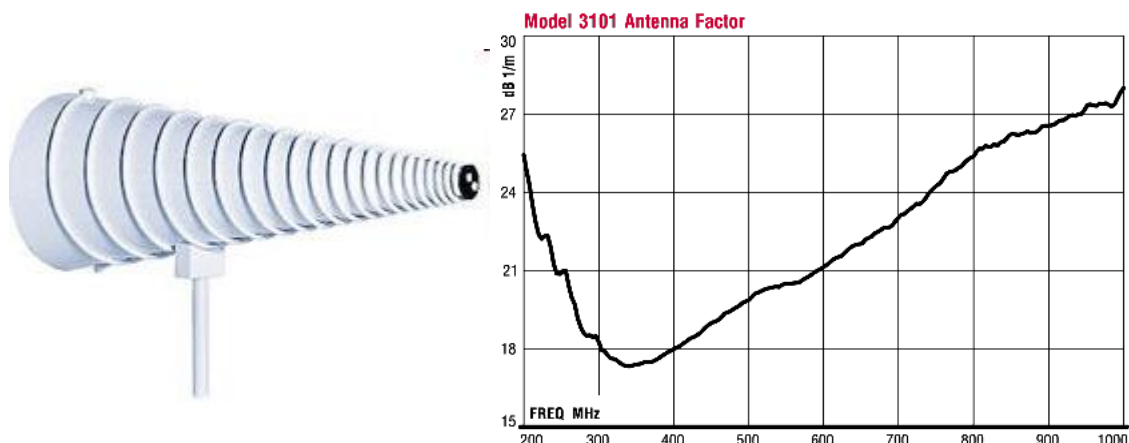
Logaritmicko – periodická anténa



Obr.6.2.5 Logaritmicko – periodická anténa její typický anténní faktor [8]

Nejrozšířenější měřicí anténa pro měření rušivých signálů v pásmu od 200 MHz až do cca 3000 MHz.

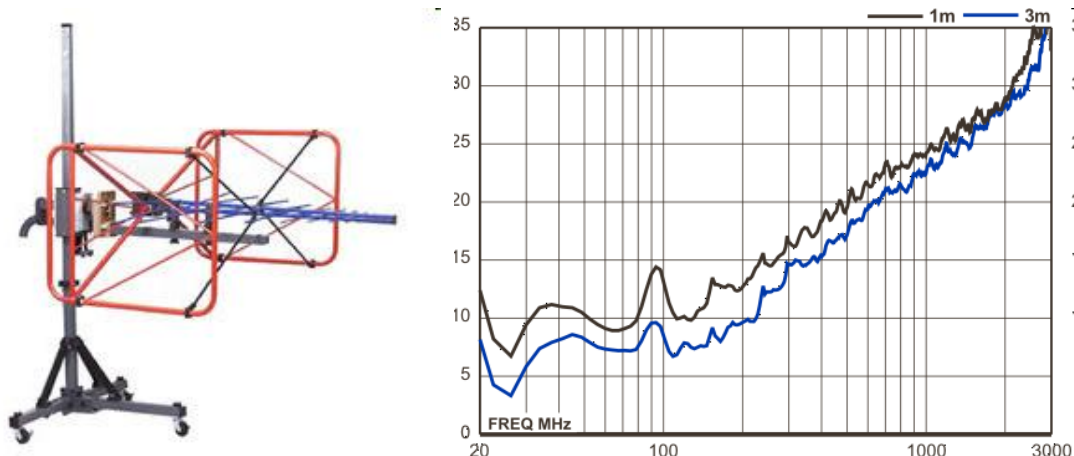
Kónická logaritmická anténa



Obr.6.2.6 Kónická logaritmická anténa a její typický anténní faktor [8]

Je speciální typ širokopásmové antény. Na rozdíl od všech ostatních typů měřicích antén je určena pro příjem kruhově polarizovaného elektromagnetického pole. Využívají se při vojenských testech.

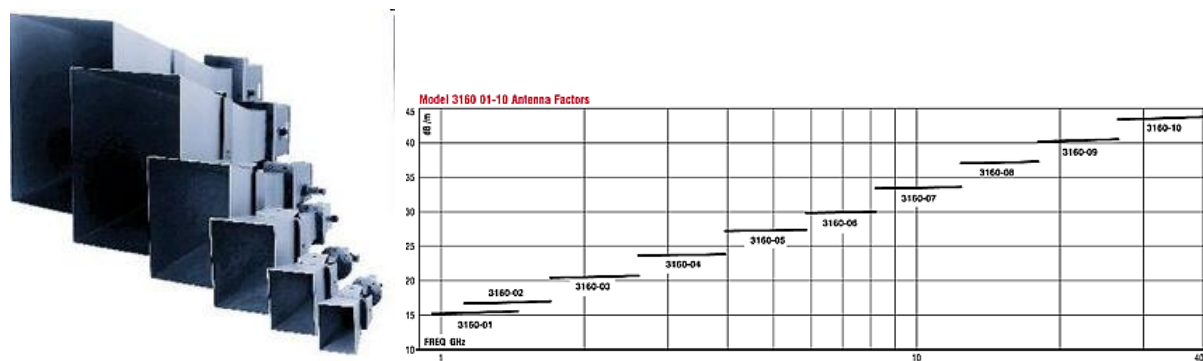
Složená širokopásmová anténa



Obr.6.2.7 Složená širokopásmová anténa a její typický anténní faktor [8]

Složení bikónické a logaritmicko-periodické antény vzniká širokopásmová anténa určená pro měření velkého rozsahu kmitočtů.

Trychtýřové antény



Obr.6.2.8 Trychtýřové antény a jejich typický anténní faktor [8]

Trychtýřové antény (pyramidální kovové vlnovody) se využívají v GHz kmitočtových pásmech, jsou relativně úzkopásmové a k pokrytí kmitočtů od jednotek do několika desítek GHz je proto třeba sada 8 až 10 antén.

Tab.6.2.1 Přehled měřících antén pro systémy EMI [8]

Typ antény	Rozsah kmitočtů	Měřená složka pole
aktivní elektricky stíněná smyčková anténa	9 kHz – 30 MHz	<i>H</i>
aktivní prutová anténa (monopól)	9 kHz – 30 MHz	<i>E</i>
laděné symetrické dipóly	30 MHz – 1000 MHz	<i>E</i>
bikónická anténa	20 MHz – 300 MHz	<i>E</i>
logaritmicko – periodická anténa	200 MHz – 3000 MHz	<i>E</i>
kónická logaritmická anténa	200 MHz – 3000 MHz	<i>E</i>
složená širokopásmová anténa	30 MHz – 2000 MHz	<i>E</i>
trychtýřové antény	1 GHz – 40 GHz	<i>E, H</i>

Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsání zdrojů a charakteru vysokofrekvenčního (rádiového) rušení, analýza zkušebních postupů pro určení odolnosti proti vysokofrekvenčnímu rušení podle normy ČSN EN 61000-4-3 a 6, a analýza postupů pro měření emisí.

Tato práce představuje ucelený studijní materiál, kde je možné vidět postupy i vzájemné vazby mezi oběma oblastmi problematiky vysokofrekvenčního rušení. Takto zaměřený zdroj informací není v běžné literatuře dostupný. Je tedy možné jej využít jako pomůcku pro výrobce a vývojáře elektronických zařízení a systémů.

Jak bylo v této práci popsáno, vysokofrekvenční neboli rádiové rušení leží dle radiokomunikačního řádu v pásmu 10 kHz až 400 GHz. Z čehož vyplývá, že k vysokofrekvenčním zdrojům rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, protože jejich rušivé signály sahají téměř vždy, až do tohoto definovaného pásma.

Vzhledem k rychlému nárůstu bezdrátových technologií lze do budoucna velmi pravděpodobně očekávat růst těchto interferenčních zdrojů, proto také můžeme očekávat nárůst požadavků na elektromagnetické interference a elektromagnetickou susceptibilitu. A tedy i nárůst požadavků na obor EMC.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Prof. SVAČINA, Jiří, Jiří DŘÍNOVSKÝ Ph.D., Tomáš FRÝZA Ph.D., Ing. Zdeněk KEJÍK a Ing. Václav RŮŽEK. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky* [elektronická skripta]. Brno, 2010 [cit. 2013-01-20].
- [2] Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *EMC - EMI* [elektronická prezentace]. [cit. 2013-01-20].
- [3] Prof. SVAČINA, Jiří. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Základy elektromagnetické kompatibility* [online]. 2001 [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html#kap1>
- [4] Doc. Ing. MÜLLEROVÁ Eva, Ph.D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Elektromagnetická odolnost a její testování* [elektronická prezentace]. [cit. 2013-01-20].
- [5] FRANKONIA. [online]. [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/EMC%20Test%20Equipment%201%20Komplett.pdf
- [6] TESEQ. [online]. [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: http://www.teseq.com/products/downloads/datasheet/NSG_4070.pdf.
- [7] ETS-LINDGREN. *Common EMC Measurement Terms* [online]. [cit. 2013-01-20]. Dostupné z: <http://www.tmworld.com/file/4676-Ant11.pdf>
- [8] Doc. Ing. MÜLLEROVÁ Eva, Ph.D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Měření emise antény* [elektronická prezentace]. [cit. 2013-01-20].
- [9] Ing. Petr Martínek, Ph.D. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. *Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – zkouška odolnosti* [elektronická prezentace]. [cit. 2013-01-20].