

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Sondy blízkého pole pro měření v elektromagnetické
kompatibilitě**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Jakub KOPP**
Osobní číslo: **E14B0143P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Sondy blízkého pole pro měření v elektromagnetické kompatibilitě**
Zadávací 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 :

Seznamte se s problematikou elektromagnetické kompatibility a měření elektromagnetických polí.

1. Popište možnosti měření elektromagnetických polí pomocí antén. Vytvořte přehled antén pro měření v elektromagnetické kompatibilitě včetně jejich parametrů.
2. Vypracujte rešerši dostupných sond blízkých elektromagnetických polí.
3. Navrhněte a vytvořte vzorky sond pro měření blízkých polí. Poté s vytvořenými vzorky proveďte experimentální měření.
4. Porovnejte naměřené výsledky zhotovených sond s komerčními výrobky.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Kubík, Ph.D.
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 2. června 2016


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem antén pro měření v elektromagnetické kompatibilitě, převážně pak sondami blízkých polí. Teoretická část práce se věnuje obecně anténám pro měření a jejich vlastnostem, dále se pak zaměřuje na sondy blízkých polí. Praktická část se věnuje návrhu a realizaci sond pro měření magnetického rušivého pole. Následně je zde popsáno praktické měření s vyrobenými vzorky a s komerčními výrobky.

Klíčová slova

elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické rušení, měřicí anténa, sondy blízkých polí

Abstract

This thesis deals with the description of antennas used in electromagnetic compatibility measurements, moreover by near-field probes. In the theoretical part, the antennas and their parameters are described with further involvement in near-field probes. The practical part deals with the design of the probes for electromagnetic disturbance measurement. At last, the practical measurement with designed prototypes and bought probes is described.

Key words

electromagnetic compatibility, electromagnetic disturbance, measuring antenna, near-field probes

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 2. 6. 2016

Jakub Kopp

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Kubíkovi, Ph.D. za výborný přístup a pomoc během tvorby této práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	11
1.1 DŮVODY ZAVEDENÍ EMC.....	11
2 ANTÉNY PRO MĚŘENÍ V EMC.....	12
2.1 MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	12
2.2 MĚŘENÍ POMOCÍ ANTÉN.....	13
2.3 DRUHY ANTÉN PRO MĚŘENÍ V EMC	14
2.4 PARAMETRY MĚŘÍCÍCH ANTÉN	18
3 SONDY BLÍZKÝCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ	23
3.1 DRUHY SOND	23
3.2 H-SONDY	24
3.3 KONSTRUKCE SMYČEK H-SOND.....	24
4 NÁVRH A REALIZACE SOND BLÍZKÉHO POLE	25
4.1 POUŽITÝ MATERIÁL	26
4.2 REALIZACE VZORKU	27
5 MĚŘENÍ.....	28
5.1 KOMPONENTY MĚŘÍCÍ SESTAVY.....	28
5.2 POSTUP MĚŘENÍ	30
5.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY.....	32
6 ZÁVĚR	36
7 SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

Seznam symbolů a zkratk

U_r	rušivé napětí
I_r	rušivý proud
E_r	intenzita rušivého elektrického pole
H_r	intenzita rušivého magnetického pole
λ	vlnová délka
D	délka
AF	anténní faktor
Z_0	charakteristická impedance
P_r	rušivý výkon
P_v	výkon zdroje rušení
G_{VA}	zisk vysílací antény
G_{MA}	zisk přijímací antény
r	vzdálenost antény
ρ_A	napěťový činitel odrazu na vstupu antény
ρ_P	napěťový činitel odrazu na vstupu měřiče rušení
B	magnetická indukce
f	frekvence

Úvod

Předkládaná bakalářská práce byla vypracována z důvodu vytvoření přehledu antén pro měření v elektromagnetické kompatibilitě a vytvoření vzorků sond blízkých polí a jejich praktickému použití.

První kapitola stručně popisuje problematiku elektromagnetické kompatibility a důvody nutnosti ji respektovat v praxi i běžném životě.

Druhá kapitola obecně popisuje měření v elektromagnetické kompatibilitě, dále pak uvádí jednotlivé druhy měřících antén a jejich vlastnosti. Na konci této kapitoly jsou nastíněny parametry měřících antén.

Třetí kapitola je věnována sondám blízkých polí, převážně pak sondám pro měření magnetického rušivého pole. Jsou zde uvedeny typy měřících sond a jejich vlastnosti, dále pak tato kapitola rozebírá jednotlivé konstrukce sond pro měření magnetického pole.

Ve čtvrté kapitole je popsán návrh a realizace vzorků měřících sond blízkých magnetických polí. Nejdříve jsou popsány součástky a materiál vhodný ke stavbě a poté i samotná realizace vzorků.

Pátá kapitola rozebírá postup použitý při praktickém měření s vyrobenými sondami a s jejich zakoupenými alternativami.

V šesté kapitole jsou pak shrnuty naměřené hodnoty a vyhodnoceny pomocí vytvořených grafů.

1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost zařízení fungovat beze změny vlastností i v prostředí, kde na něj působí zdroje elektrických a elektromagnetických signálů, a to jak umělé tak přírodní. Dále pak samo zařízení nesmí svým vlastním vyzařováním ovlivňovat své okolí. [1]

Elektromagnetická kompatibilita je poměrně mladou vědeckotechnickou disciplínou, která vznikla teprve v šedesátých letech dvacátého století v USA. Dlouhou dobu (10-15 let) pak byla předmětem zájmu pouze vojenského vývoje, kosmického programu a úzkého okruhu vědců. V širokém měřítku se začala elektromagnetická kompatibilita rozvíjet až v druhé polovině sedmdesátých let s nástupem mikroprocesorové techniky a globálních komunikačních sítí. V dnešní době je nedílnou součástí světa kolem nás. [1]

1.1 Důvody zavedení EMC

Hlavním důvodem zkoumání elektromagnetické kompatibility byl vrůstající počet nehod, způsobených vzájemným ovlivňováním jednotlivých elektronických systémů. Zde je uvedeno několik případů, kdy nebyla kompatibilita dodržena [1]:

V roce 1982 se z neznámých důvodů nedaleko Mnichova zřítil stíhací letoun NATO. Později bylo zjištěno, že za havárii mohlo selhání automatického řídicího systému stroje z důvodu průletu nad vysílačem vysokého výkonu. Při tom letoun prolétal ve výšce 230 m rychlostí 800 km/h. [1]

Během války o Falklandy roku 1982 byl potopen britský křižník Sheffield argentinským letadlem. Plavidlo disponovalo rušícími zařízeními, které znemožňovalo raketě zasáhnout cíl vyřazením cílové navigace. Tento systém však rušil dálkovou komunikaci. Argentinské letectvo zaútočilo v okamžiku, kdy křižník komunikoval s velitelstvím ve Velké Británii, a rušící zařízení bylo tím pádem deaktivováno. Na palubě zahynulo dvacet lidí. [1]

Tyto události byly vybrány z mnoha případů nedodržení elektromagnetické kompatibility a i dnes se s nimi můžeme setkat jak v zahraničí, tak i u nás. [1]

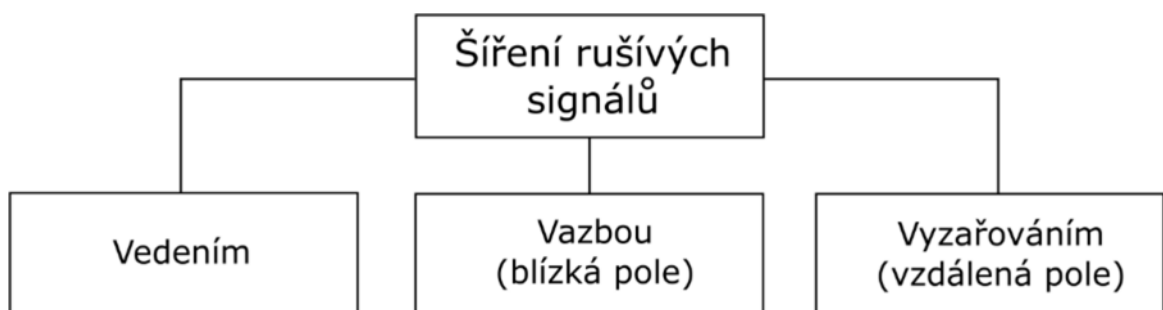
2 Antény pro měření v EMC

2.1 Měření rušivých signálů

Jednou z nejpodstatnějších součástí elektromagnetické kompatibility je měření rušivých signálů. Není to však snadné vzhledem k rozmanitosti funkcí a pracovních podmínek jednotlivých systémů a zařízení. Je třeba dodržet určité normy, aby bylo měření reprodukovatelné. Tyto normy se týkají měřících postupů, přístrojů i prostředí, ve kterém je měření prováděno. [2]

Pro užití správných postupů měření je rozhodující určit způsob šíření rušivých signálů. Jak můžeme vidět na obr. 1, šíření rušivých signálů je rozděleno do tří kategorií [2]:

1. Přenos vedením - Jedná se o rušení přenášené po metalických vedeních, např. napájecích nebo datových vedeních. Charakteristickými veličinami jsou zde rušivé napětí U_r a rušivý proud I_r . [2]
2. Přenos vazbou - Zde se jedná o elektromagnetické, bezkontaktní propojení dvou objektů na krátkou vzdálenost. Tuto vazbu charakterizuje intenzita rušivého elektrického pole E_r a intenzita rušivého magnetického pole H_r . [2]
3. Přenos vyzařováním - Posledním typem je přenos elektromagnetickými vlnami mezi vzdálenými objekty. Jedná se především o signály vyšších kmitočtů. Charakteristické veličiny jsou stejné jako v předchozím případě.



obr. 1: Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů [2]

Základním prvkem pro měření jakéhokoliv elektromagnetického rušivého signálu je měřič rušení. Jedná se o selektivní voltmetr, spektrální analyzátor, nebo měřicí přístroj pro požadovaný frekvenční rozsah. Měření vlastní rušivé veličiny pak obstará vhodný snímač, který ji převede na napětí. Měřič rušení pak měří toto napětí. [2]

Snímači vhodnými k měření rušivých signálů šířených vedením jsou nejčastěji umělá síť, napěťová či proudová sonda a absorpční kleště. Pro rušivé signály šířené vazbou a vyzařováním se využívají různé druhy měřících antén. U všech typů snímačů je nutné, aby snímaly pouze rušivý signál z měřeného objektu a nebyly ovlivněny okolními signály ani signály, které samy vytvářejí. [2]

2.2 Měření pomocí antén

Jak již bylo řečeno, antény jsou využívány pro měření rušivých signálů šířených vazbou nebo vyzařováním. Jedná se především o signály s kmitočtem v rozsahu od 10 kHz do desítek GHz. Měření těchto signálů přímou metodou je velmi obtížné a často nemožné. [2]

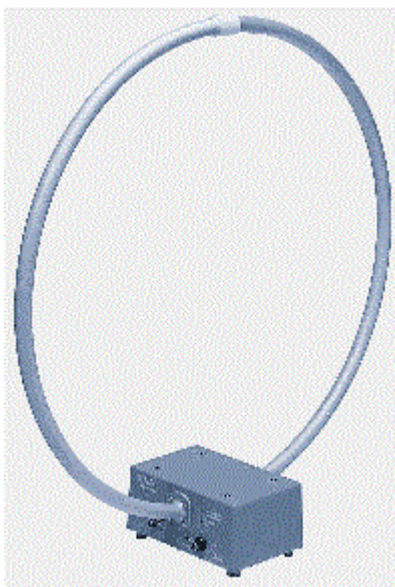
V ideálním případě by se pro měření v celém frekvenčním spektru použila pouze jedna anténa, reálně se však různé konstrukce antén hodí pro různé rozsahy kmitočtů. Přehled antén je uveden v tab. 1. [2]

Druh antény	Rozsah kmitočtů	Měří složku
Rámová (smyčková) anténa	9 KHz – 30 MHz	H
Prutová anténa (monopól)	9 KHz – 30 MHz	E
Symetrické (laděné) dipóly	30 MHz – 1000 MHz	E
Bikónická anténa	20 MHz – 300 MHz	E
Logaritmicko-periodická anténa	200 MHz – 3000 MHz	E
Kónicko-logaritmická anténa	200 MHz – 3000 MHz	E
Složená širokopásmová anténa	30 MHz – 2000 MHz	E
Trychtýřová anténa	1 GHz – 40 GHz	E, H

Tab. 1: Přehled měřících antén [2]

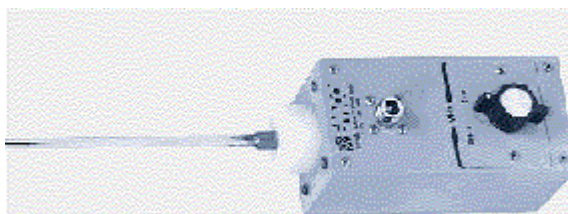
2.3 Druhy antén pro měření v EMC

Rámová (smyčková) anténa (obr. 2) – Většina rušivých jevů způsobených magnetickou složkou pole se objevuje v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 30 MHz. Pro tento rozsah se používá rámová anténa s maximálními rozměry 60 x 60 cm. Aby se zabránilo parazitnímu vlivu elektrické složky pole, umísťuje se cívka antény do kovového stínění. Ke zvýšení přesnosti se někdy k anténě přidává ještě zesilovač pro daný kmitočet. [2]



obr. 2: Rámová anténa [2]

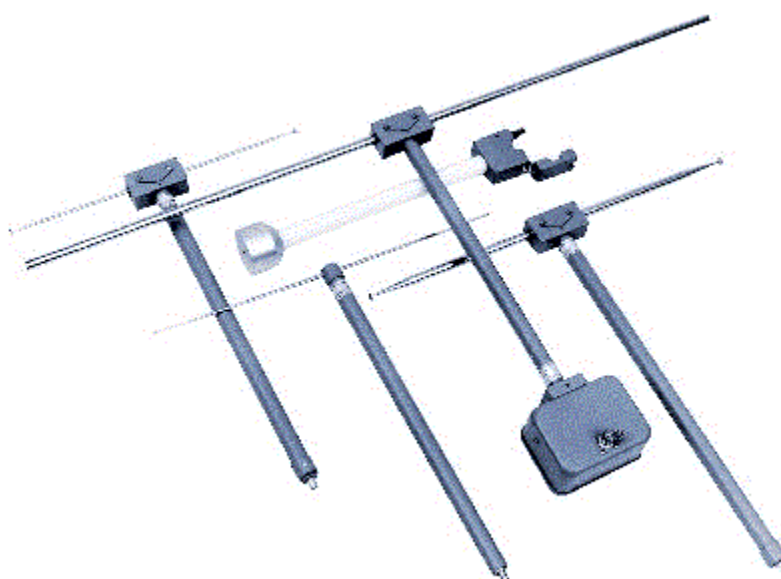
Prutová (tyčová) anténa (obr. 3) – Prutovými anténami, takzvanými monopóly, se také měří v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 30 MHz, tentokrát však elektrická složka rušivého pole. Doporučená délka antény je 1 m. Měření tímto druhem antény je především pro vzdálená pole. V blízkých polích je měření nepřesné, jelikož se zde objevuje i přímá kapacitní vazba mezi zdrojem rušení a anténou. Při přesně stanovených podmínkách jde však měření správně reprodukovat, tudíž se také používá. [2]



obr. 3: Prutová anténa [2]

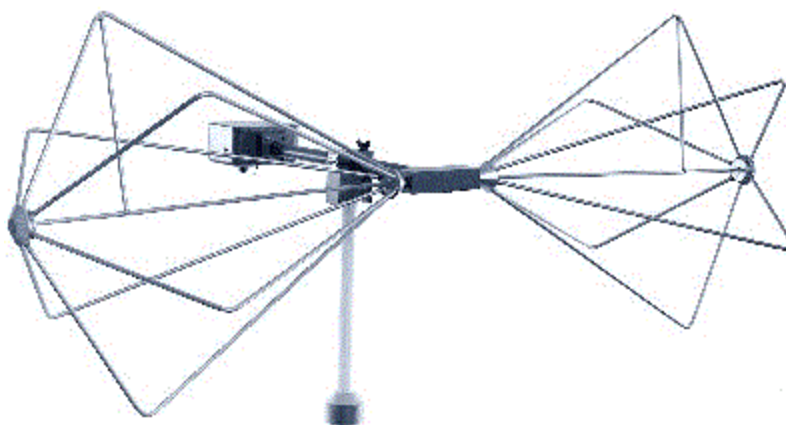
Chceme-li přesně určit intenzitu rušivého elektrického pole E_r v blízkém poli, je třeba použít symetrickou dipólovou anténu o malých rozměrech. Výhodou této antény je, že dokáže určit směr pole a průběh jeho siločar. Použití antény je však jen pro laboratorní podmínky, jelikož má velmi malou efektivní výšku. [2]

Symetrický půlvlnný dipól (obr. 4) – Tato anténa je nejpoužívanější pro kmitočtové pásmo 30 až 80 MHz a to s nastavenou rezonanční délkou pro 80 MHz. Anténu můžeme použít pro kmitočet až 1000 MHz, ale spíše jako referenční nebo kalibrační anténu. Příslušná frekvence se nastavuje délkou ramen dipólu a vyžaduje specifický přizpůsobovací obvod, což velmi komplikuje používání. [2]



obr. 4: Symetrický dipól [2]

Bikónická anténa (obr. 5) – Jedná se o širokopásmovou anténu, která je vhodná pro kmitočtové pásmo 20 MHz až 300 MHz a je tvořena kombinací předchozích typů antén. [2]



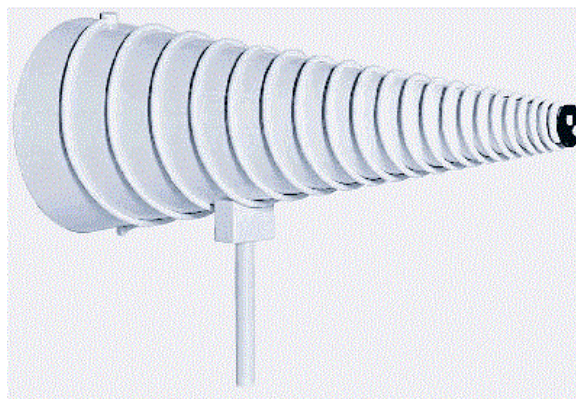
obr. 5: Bikónická anténa [2]

Logaritmicko-periodická anténa (obr. 6) – Dalším typem širokopásmové antény je logaritmicko-periodická anténa. Je to nejrozšířenější anténa pro měření rušivých signálů o frekvenci 200 MHz až 3000 MHz. Tvoří ji řada rezonančních unipólů. Délka unipólů a jejich vzájemná poloha je dána podílem logaritmů jejich rezonančních kmitočtů. Díky této konstrukci má anténa v celém pracovním pásmu téměř konstantní tvar vyzařovací charakteristiky. Anténa reaguje na elektrickou složku rušivého elektromagnetického pole s lineární polarizací. Měření se provádí v polarizační rovině, která vykazuje nejvyšší hodnotu rušivého pole. [2]



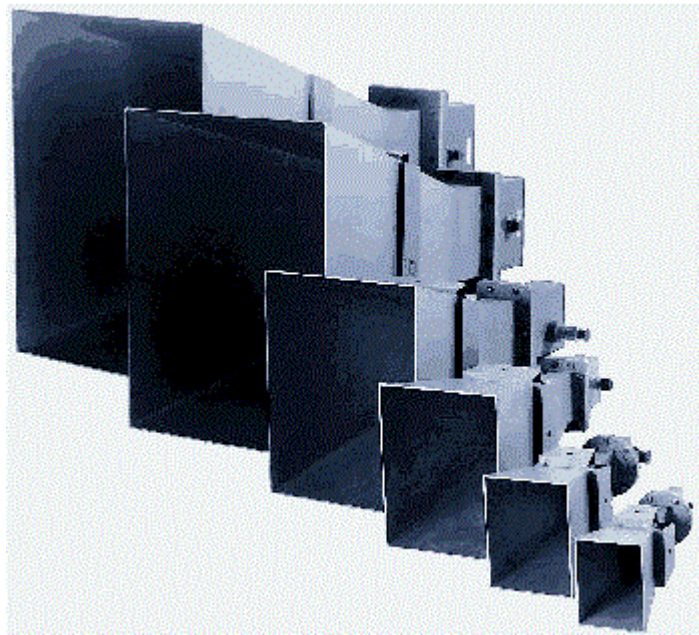
obr. 6: Logaritmicko-periodická anténa [2]

Konicko-logaritmická anténa (obr. 7) – Konicko-logaritmická anténa nebo také spirálová anténa je jednou ze speciálních širokopásmových antén, která je schopná měřit až do oblasti GHz. Její specifický tvar jí umožňuje přijímat kruhově polarizované elektromagnetické pole. Tím je dáno, že se nepoužívá pro běžná měření v EMC, jelikož civilní normy nařizují měření pouze s lineární polarizací daného signálu. Jiné je tomu ve vojenské oblasti, kde je řada měření v EMC založena na využití kruhově polarizovaných vln elektromagnetického signálu. [2]



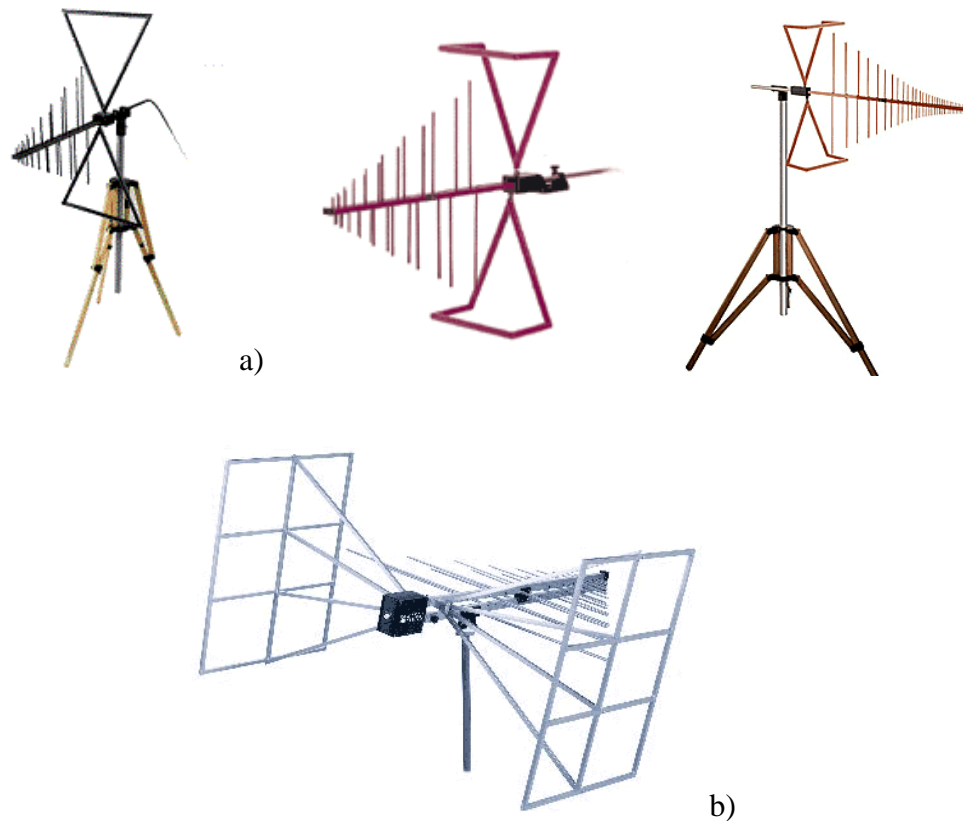
obr. 7: Konicko-logaritmická anténa [2]

Trychtýřová anténa (obr. 8) – Chceme-li provádět měření v oblasti GHz, je nejlepší volbou trychtýřová anténa. Konstrukčně se jedná o kovový trychtýř ve tvaru komolého čtyřbokého jehlanu. Nevýhodou je, že jde o relativně úzkopásmovou anténu. Rozsah je sice možné zvětšit různými tvarovými modifikacemi, jako jsou například vlnovody typu H nebo Π , ale bez výrazného efektu. K použití v požadovaném rozsahu jednotek až desítek GHz je nezbytné použít více velikostí trychtýřů, každý pro jednu část celkového pásma. Standardně se jedná o osm až deset kusů. [2]



obr. 8: Trychtýřová anténa [2]

Ani jedna z předešlých typů antén nepokrývá celé frekvenční pásmo nejčastěji využívané pro měření v elektromagnetické kompatibilitě, tedy rozsah od 30 MHz do 2 GHz. Z tohoto důvodu začali výrobci a výzkumníci hledat alternativní anténu, která by dovolila změřit celý rozsah. Koncem 90. let přišli s odpovědí v podobě kombinace dvou typů běžně užívaných antén. Jednalo se o bikónickou a logaritmicko-periodickou anténu. Výsledná anténa kombinovala frekvenční spektra obou dílčích konstrukcí. Spodní rozsah 30 až 300 MHz obstarávala bikónická část a horní spektrum od 300 MHz zajistila část logaritmicko-periodická. Ve výsledku byla anténa pod obchodním názvem BiLog (obr. 9. a) schopná obsáhnout celé požadované pásmo (30 – 2000 MHz). Postupem času se anténa stále zdokonalovala a vznikaly nové varianty, například BiConiLog a další (obr. 9. b). Cílem je ještě více zvětšit frekvenční rozsah a zlepšit jejich elektrické vlastnosti jako je tvar vyzářovacího diagramu, impedanční přizpůsobení a další. [2]



obr. 9: a) BiLog b) Další druhy kombinovaných antén [2]

Speciálním typem antén pro měření v elektromagnetické kompatibilitě jsou měřicí sondy. Jedná se o malé ruční antény využívané k měření jednotlivých součástí či funkčních bloků na daném zařízení. Tomuto typu antén se více věnuje kapitola 3. [2]

2.4 Parametry měřících antén

Na prvním místě je nutno si uvědomit, do jaké vzdálenosti musíme anténu umístit. Vzdálenost rozdělujeme do tří zón, jejichž jednotlivé hranice závisí na vlnové délce a rozměru antény [3]:

- 1) Reaktivní zóna – V této zóně se vytváří vlna vyzařovaného elektromagnetického rušení. Reaktivní zóna pokrývá oblast od měřeného objektu do vzdálenosti několika vlnových délek, obvykle však uvažujeme pouze jednu vlnovou délku. Pro měření není tato zóna vhodná, protože výsledky ovlivňuje samotná měřicí anténa. [3]
- 2) Blízká (Fresnelova) zóna – Po reaktivní zóně následuje zóna blízká neboli Fresnelova. V této oblasti se používají měřicí sondy. Tuto oblast ohraničuje vztah (1.1)

$$\lambda < R < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1.1)$$

kde λ je vlnová délka a D je největší rozměr vyzařovací plochy antény. [3]

- 3) Vzdálená (Fraunhoferova) zóna – Poslední zónou, navazující na zónu blízkou, je vzdálená zóna, také nazývaná Fraunhoferova. Tato oblast sahá až do nekonečné vzdálenosti. [3]

Dalším parametrem antény je takzvaný anténní faktor AF . Ten udává poměr mezi velikostí vstupní intenzity rušivého pole a velikostí napětí, které je na výstupu antény a směřuje do měřicího přístroje. Jednotkou je 1/m.

$$AF = \frac{E_r}{U_r} \quad (1.2)$$

Často se anténní faktor vyjadřuje v logaritmickém měřítku:

$$AF[dB/m] = E_r[dBV/m] - U_r[dBV] \quad (1.3)$$

U antén měřící magnetické pole pak vztah vypadá takto:

$$AF_H = \frac{H_r}{U_r}, \text{ čili } AF_H[dBS/m] = H_r[dBA/m] - U_r[dBV] \quad (1.4)$$

Uvažujeme-li, že magnetická a elektrická složka elektromagnetického rušivého pole jsou rovinné vlny a jsou ve vzduchovém prostředí, pak jsou spolu vázány charakteristickou impedancí Z_0 :

$$Z_0 = \frac{E_r}{H_r} = 120\pi \quad (1.5)$$

můžeme také psát

$$AF[dB/m] = AF_E[dB/m] = AF_H[dBS/m] + 20 * \log Z_0 = AF_H + 51,5dB \quad (1.6)$$

Hlavním účelem anténního činitele AF je snadné určení velikosti rušivého pole. Měřicí přístroj nám ukáže velikost rušivého napětí U_r . Z toho pak snadno zjistíme velikost

elektrického rušivého pole E_r v [dBV/m] prostým přičtením velikosti anténního činitele AF v [dB/m].

$$E_r[\text{dBV/m}] = U_r[\text{dBV}] + AF[\text{dB/m}] \quad (1.7)$$

Anténní faktor je kmitočtově závislou veličinou a je spjatý i s dalšími veličinami, například se ziskem antény. Teoretický výpočet lze pak provést následovně:

Činný výkon P_r rušivého signálu přijatý anténou lze vyjádřit vztahem:

$$P_r = P_V * G_{VA} * G_{MA} * \left(\frac{\lambda}{4\pi r}\right)^2 \quad (1.8)$$

kde P_V značí výkon zdroje rušení, G_{VA} a G_{MA} jsou hodnoty zisku vysílací a přijímací měřicí antény, λ je délka vlny signálu a r je vzdálenost měřicí antény od měřeného objektu. Z tohoto vztahu můžeme určit plošnou hodnotu výkonu p_r rušivé vlny v místě měřicí antény jako:

$$p_r = P_V \frac{G_{VA}}{4\pi r^2} = \frac{4\pi P_r}{G_{MA} \lambda^2} \quad (1.9)$$

Vztah můžeme také vyjádřit

$$p_r = \frac{E_r^2}{120\pi} \quad a \quad P_r = \frac{U_r^2}{Z_0} = \frac{U_r^2}{50} \quad (1.10)$$

kde Z_0 je přizpůsobená impedance na svorkách antény. Další úpravou pak můžeme vyjádřit vztah mezi intenzitou rušivého elektrického pole E_r na vstupu antény a napětím U_r na jejím výstupu:

$$E_r = 9,73 \frac{U_r}{\lambda \sqrt{G_{MA}}} \quad (1.11)$$

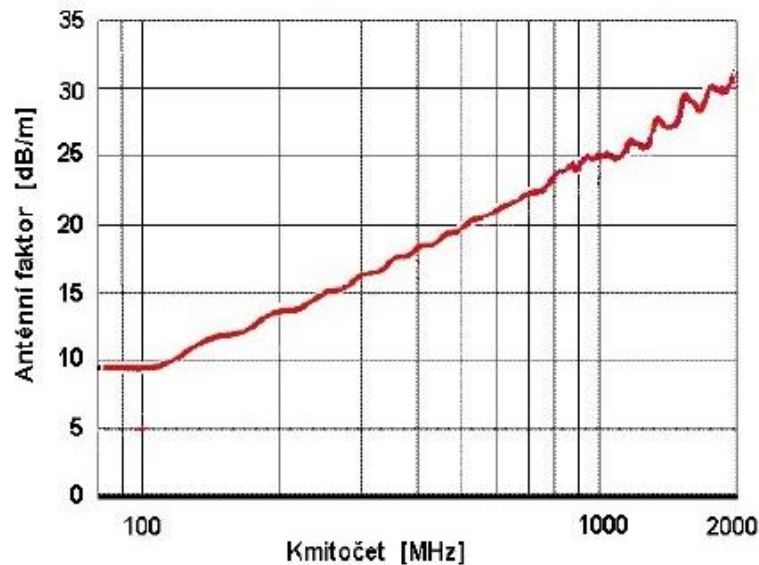
Když toto dosadíme do vztahu (1.2) vznikne nám vzorec:

$$AF = \frac{9,73}{\lambda \sqrt{G_{MA}}} \quad (1.12)$$

V logaritmickém vyjádření pak vztah vypadá takto:

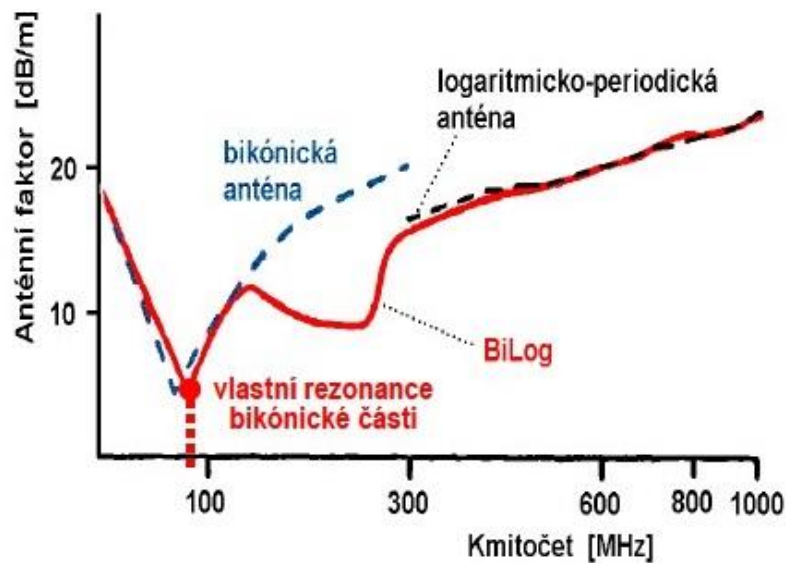
$$\begin{aligned}
 AF[dB/m] &= 19,8 - 20 \log \lambda [m] - G_{MA}[dB] \\
 &= 20 \log f [MHz] - 29,8 - G_{MA}[dB]
 \end{aligned}
 \tag{1.13}$$

Na obr. 10 vidíme příklad grafu závislosti anténního faktoru AF na frekvenci f pro logaritmicko-periodickou anténu.



obr. 10: Kmitočtový průběh anténního faktoru logaritmicko-periodické antény [4]

U dalších typů antén nebývá tvar kmitočtové závislosti přímý jako u logaritmicko-periodické antény, například složitá křivka pro BiLog na obr. 11. Zde je tvar zdeformovaný z důvodu kombinace dvou antén a jejich kmitočtových závislostí anténního faktoru. [4]



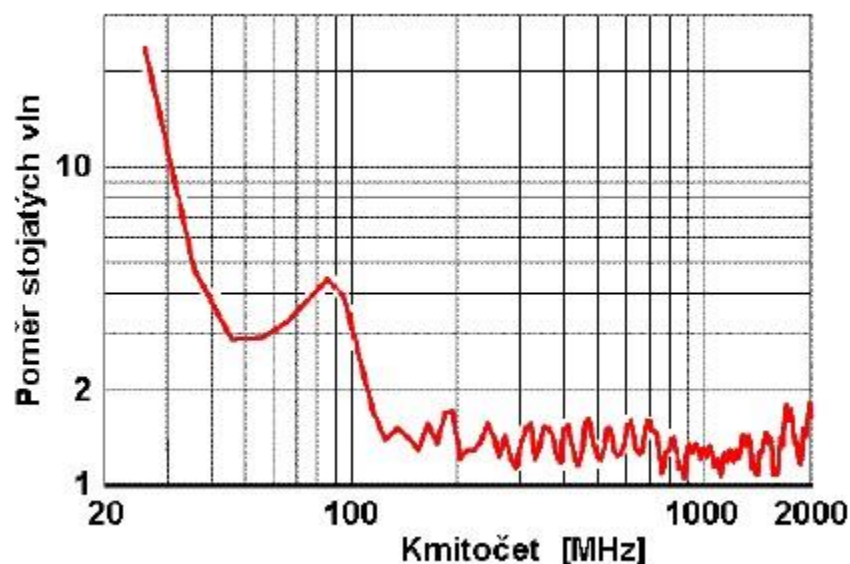
obr. 11: Kmitočtový průběh anténního faktoru BiLog [4]

Reálná hodnota anténního faktoru AF není závislá pouze na dříve zmíněných faktorech, ale i na mnohých dalších. Patří mezi ně například vzdálenost antény od měřeného objektu, polarizace pole, přítomnost dalších rušivých signálů, odrazy od země, výška antény nad zemí a mnohé další. Z těchto důvodů je třeba každou anténu kalibrovat, což znamená změřit anténní faktor dané antény v celém pracovním kmitočtovém rozsahu, a to za přesně daných podmínek měření. [4]

Jelikož jsou měřicí antény ovlivňovány mnoha vlivy, zavádí se takzvaná neurčitost měření udávaná v [dB]. Jedná se o maximální povolenou nepřesnost celé měřicí soustavy, včetně měřiče rušení. Podle českých norem nesmí tato neurčitost přesáhnout ± 3 dB. Neurčitost měření bývá nejvyšší na nižších frekvencích kolem 80 MHz a většinou nepřesáhne 1 dB, s rostoucí frekvencí pak klesá na 0,5 dB. Tuto frekvenční závislost nám dobře demonstruje obr. 12, kde je vidět kmitočtový průběh poměru stojatých vln pro BiLog. Pro určení maximální možné chyby měření rušivého napětí používáme následující vztah:

$$\Delta U_r [dB] = 20 \log(1 \pm |\rho_A| * |\rho_P|) = 20 \log\left(1 \pm \frac{PSV_A - 1}{PSV_A + 1} * \frac{PSV_P - 1}{PSV_P + 1}\right) \quad (1.14)$$

kde ρ_A je napěťový činitel odrazu na vstupu antény a ρ_P na vstupu měřiče rušení a PSV_A a PSV_P jsou příslušné poměry stojatých vln odpovídající hodnotám ρ_A a ρ_P . [4]



obr. 12: Poměr stojatých vln antény typu BiLog [4]

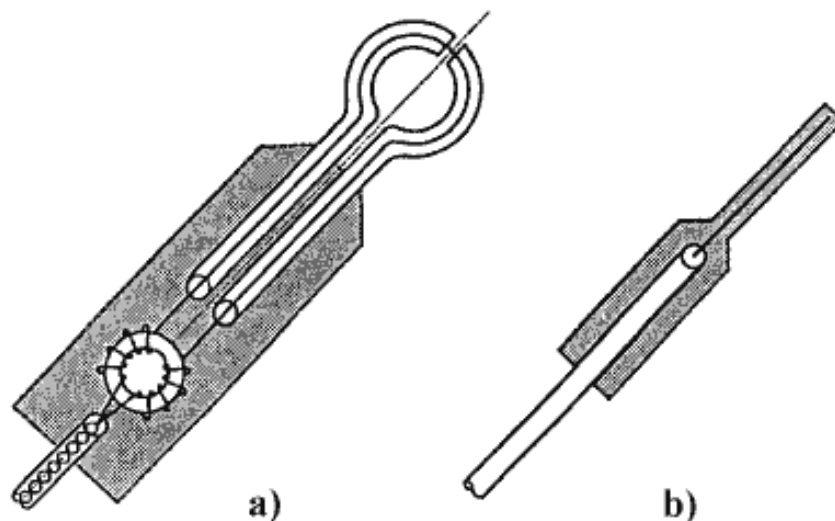
Dalším důležitým parametrem antén je tvar a šířka jejich polárního vyzářovacího diagramu. Jedná se o grafické znázornění směrůvosti antény a vyjadřuje prostorové vlastnosti antény. Při měření musí hlavní část diagramu směřovat k měřenému objektu, jinak se bude měnit zisk antény a naměřené hodnoty nebudou platné. [4]

3 Sondy blízkých elektromagnetických polí

3.1 Druhy sond

Chceme-li měřit elektromagnetické rušení dílčích bloků určitého zařízení nebo dokonce jednotlivé jeho součástky, je nejlepší variantou použít speciální měřicí sondy, takzvané sondy blízkých polí. Jak bylo již dříve řečeno, jedná se o malé ruční antény. Tyto sondy jsou nejčastěji využívány pro měření při vývoji zařízení, například měření desky plošných spojů, čili přímo u prvotního zdroje elektromagnetického rušení. Další využití nalézají při měření elektromagnetické těsnosti krytů pro stínění, popřípadě k nalezení místa úniku rušení v těchto krytech. [2]

Sondy blízkých polí rozdělujeme do dvou kategorií, a to na měřicí sondy blízkého magnetického pole a měřicí sondy blízkého elektrického pole. Sonda pro magnetické pole je typicky tvořena smyčkou o průměru několika centimetrů. Příklad této sondy můžeme vidět na obr. 13.a. Sondu pro elektrické pole v základním provedení tvoří přímý vodič, nejčastěji koaxiální kabel s obnaženým středním vodičem na konci, obvykle se jedná o 6 až 10 cm. Základní provedení sondy je znázorněno na obr. 13.b. [2]



obr. 13: Sonda blízkého a) magnetického pole b) elektrického pole [2]

Měření pomocí sond blízkých polí je spíše orientační, jelikož se nedá dobře reprodukovat. Naměřené hodnoty závisí na mnoha proměnných faktorech a dávají nám jen přibližnou představu o intenzitě rušivého záření. Hlavními faktory jsou míra přiblížení sondy ke zdroji rušení a natočení nebo úhel vůči měřenému objektu. Z těchto důvodů nejsou pro měření sondami stanovené žádné normy nebo předpisy. [2]

3.2 H-sondy

Již bylo řečeno, že sondy pro magnetické pole jsou tvořeny smyčkou, není však důležité, jaký tvar bude tato smyčka mít. Na čem však záleží, je její plocha. Jak smyčkou prochází magnetické pole, indukuje se v ní napětí podle Faradayova zákona:

$$U_i = 2\pi fBS \quad (1.15)$$

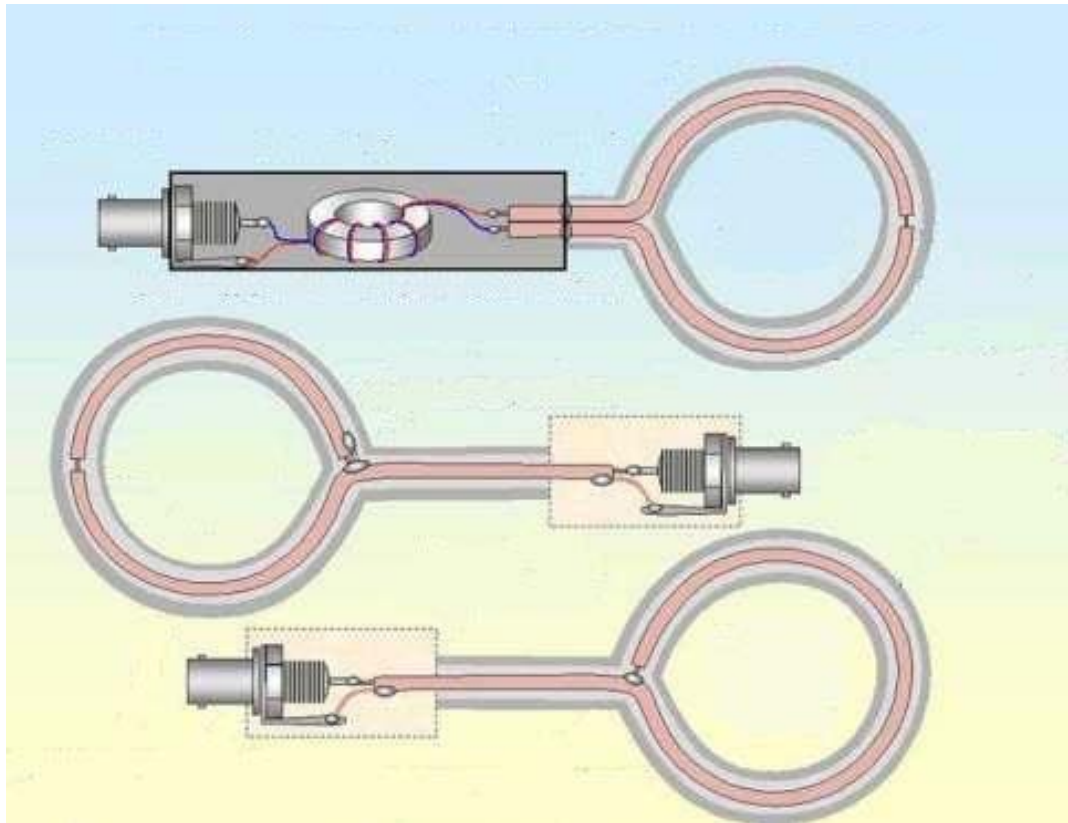
Z toho vyplývá, že čím větší smyčka bude, tím více siločar magnetického pole skrze ni projde, tudíž bude mít sonda lepší induktivní vazbu čili vyšší citlivost. S rostoucí velikostí smyčky však roste i její indukčnost, což způsobuje nižší rezonanční frekvenci a má za následek nižší použitelný rozsah. Menší smyčka má tedy vyšší frekvenční odezvu, ale hlavní výhodou je lepší prostorové rozlišení. [5]

3.3 Konstrukce smyček H-sond

U H-sondy blízkého pole je více možností konstrukčního provedení. Jelikož nezáleží na tvaru smyčky, je pouze na výrobci, jaký tvar zvolí. Nejčastěji se však jedná o kruhovou nebo čtvercovou smyčku. [5]

Dalším parametrem je stínění. Hlavním důvodem pro použití stínění je zabránění příjmu elektrického rušivého pole. Pokud smyčka není opatřena stíněním, dá se umístit blíže k měřenému obvodu, což zvyšuje její citlivost. [5]

V mnoha případech je smyčka tvořící přijímací část antény vytvořena z koaxiálního kabelu nebo z jiného prvku s podobným vnitřním uspořádáním. Máme pak několik variant jak smyčku propojit, tyto varianty jsou vyobrazeny na obr. 14.



obr. 14: Možnosti propojení smyčky [6]

Základní typ zapojení můžeme vidět ve spodní části obr. 14. Smyčka je po celém svém obvodu stíněná. Konec smyčky tvoří pouze středový vodič, který je připájen ke stínění na začátku smyčky. Další možnost zapojení vidíme ve střední části obr. 14. Zde je mezeru ve stínění uprostřed smyčky. Na stínění na začátku smyčky je pak napájen jak středový vodič, tak i povrchová izolace. Poslední možností je sonda v horní části obr. 14, která má stejně jako předchozí varianta mezeru ve stínění. Rozdíl je v tom, že konce smyčky nejsou spojené a středový vodič je na každém konci spojen s jedním pinem. Stínění koaxiálního kabelu je připájeno ke kovovému stínícímu krytu, který ukrývá filtrační toroid z měkkého feritu sloužící k odstranění šumu. [6]

4 Návrh a realizace sond blízkého pole

V této práci je věnována větší pozornost sondám pro měření magnetického rušivého pole z důvodu jejich větší všestrannosti s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu a větší míru používání.

4.1 Použitý materiál

Pro vytvoření hlavní části měřicí sondy, tedy smyčky, byl použit koaxiální kabel značky BELDEN s vlnovou impedancí 50Ω (obr. 15). Středový vodič je vyroben z mědi, vnitřní dielektrikum tvoří PE pěna, stínění je zde dvojité - první vrstvu tvoří Al folie a druhou oplet z Al drátu. Poslední vrstvou je plášť z PVC. Celkový průměr kabelu je 5 mm.



obr. 15: Použitý koaxiální kabel [7]

Dalším komponentem pro výrobu sondy byl BNC konektor pro koaxiální kabely. Přesněji se jednalo o konektor do panelu model UG1094/U ISO s impedancí 50Ω (obr. 16).



obr. 16: BMC konektor [8]

Pro zakrytí obnažených vodičů byla použita teplem smršťovací bužírka, přesněji KSS F0927F-10 (obr. 17). Tato bužírka je ve tvaru trubičky o průměru 10 mm a po zahřátí zmenšuje svůj průměr. Pro izolaci byla také použita elektrikářská lepicí páska.

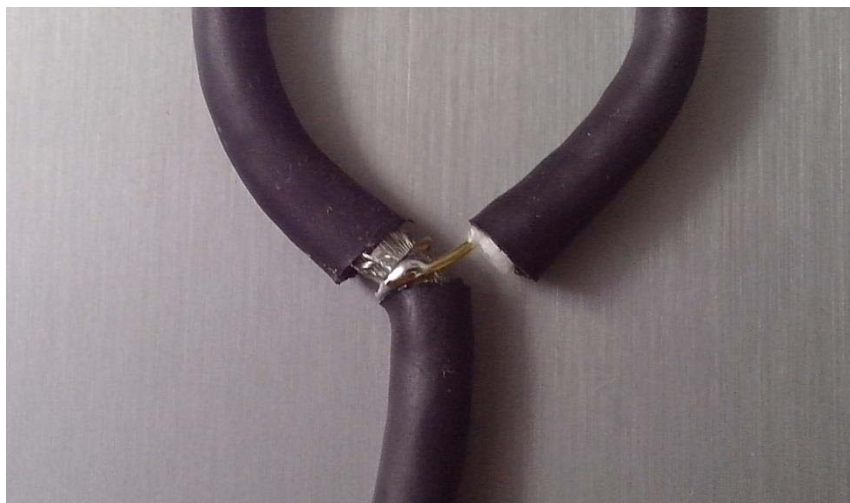


obr. 17: Teplem smršťovací bužírka [8]

4.2 Realizace vzorku

Pro měření byly vytvořeny tři různé vzorky sond magnetického pole. Prvním vzorkem byla sonda základní konstrukce, která byla zmíněna v kapitole 3.3.

Při výrobě byl nejprve koaxiální kabel zbaven pláště z důvodu lepší manipulace, poté bylo několik mm na konci kabelu očesáno až na středový vodič. Pro první sondu byl zvolen průměr přijímací smyčky 30 mm, tudíž bylo na smyčku použito 94 mm koaxiálního kabelu, který byl následně vytvarován do kruhu a opatřen stahovací bužírkou. Ta po zahřátí pevně obepnula kabel. V místě začátku smyčky byla bužírka odříznuta a na tomto místě byl připájen předem připravený středový vodič na konci kabelu (obr. 18).



obr. 18: Propojení smyčky

Tento spoj byl následně zakryt elektrikářskou lepicí páskou, která byla zpevněna kouskem stahovací bužírky. Na druhé straně koaxiálního kabelu, přibližně 60 mm od přijímací smyčky, byl připájen BNC konektor a spoj byl zakryt stahovací bužírkou.

Druhým vzorkem byla sonda s obnaženým kouskem stínění ve středu přijímací smyčky (obr. 19). Tento typ byl též zmíněn v kapitole 3.3.



obr. 19: Obnažená část stínění

Postup výroby byl velmi podobný jako u předchozího vzorku, rozdíl byl v tom, že u tohoto vzorku bylo odstraněno stínění v délce 5 mm. Druhým podstatným rozdílem je spojení začátku a konce přijímací smyčky. U této sondy nebyl připájen jen středový vodič, ale také stínění. Velikost smyčky je také stejná jako u předchozího typu.

Poslední vyrobený vzorek je totožný jako první, pouze má větší průměr přijímací smyčky, a to 50 mm. Všechny tři vzorky jsou zobrazeny na obr. 20.

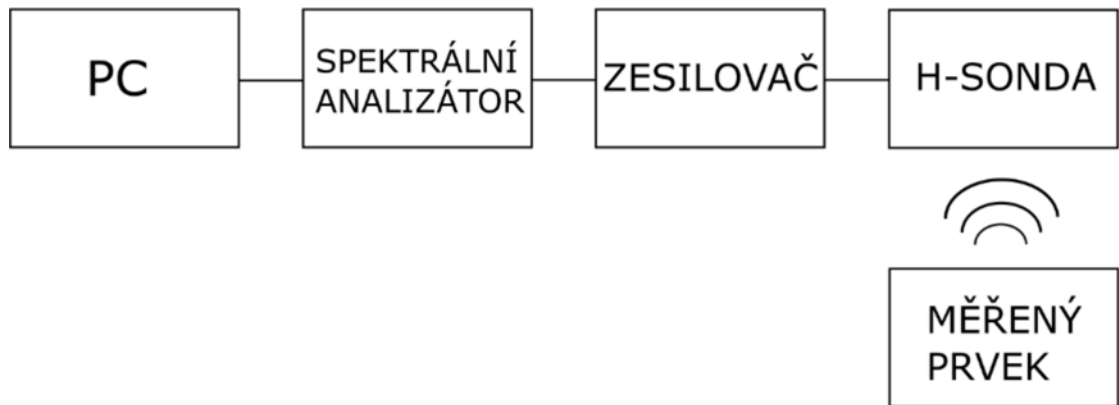


obr. 20: Vyrobené vzorky H-sond

5 Měření

5.1 Komponenty měřící sestavy

Pro měření je důležité nejdříve určit, jaké přístroje a prvky bude potřeba použít. Jak je patrné z blokového schématu měřící sestavy na obr. 21, k měření pomocí sond blízkého pole je třeba spektrální analyzátor, který zde představuje měřič rušení. K němu je připojena měřící sonda přes zesilovač, který zesiluje naindukované napětí ze sondy. Sonda je pak umístěna v blízkosti měřeného zařízení. Aby bylo možné dále pracovat s naměřenými hodnotami, je spektrální analyzátor přes USB kabel propojen s počítačem.



obr. 21: Blokové schéma měřicí sestavy

Použitý spektrální analyzátor je vyroben společností HP a jedná se o model E4411B. Tento přístroj je schopen měřit v rozsahu od 9 kHz do 1,5 GHz.

Pro toto měření byl použit zesilovač pro zesílení signálu od společnosti HP model 8447F OPT H64. Jedná se o rozšiřující příslušenství k použitému spektrálnímu analyzátoru.

K měření bylo použito několik typů měřících H-sond. Tři sondy byly vyrobené pro toto měření (kapitola 4), dalšími sondami byly HP 11941A a HP 11940A (obr. 22). Model 11941A je sonda určená pro rozsah 9 kHz až 30 MHz a je specifická malou obdélníkovou smyčkou na špičce sondy. Model 11940A je stejný jako předchozí, pouze pro rozsah 30 MHz až 1 GHz. Posledním typem je dvojice sond LANGER RF-R 400-1 a RF-R 50-1 (obr. 23). Jsou to typické kruhové sondy s dvěma rozměry. RF-R 400-1 má průměr 25 mm a rozsah 30 MHz až 3 GHz. RF-R 50-1 má průměr 10 mm a je určena pro stejný rozsah.



obr. 22: HP 11941A a HP 11940A [9]

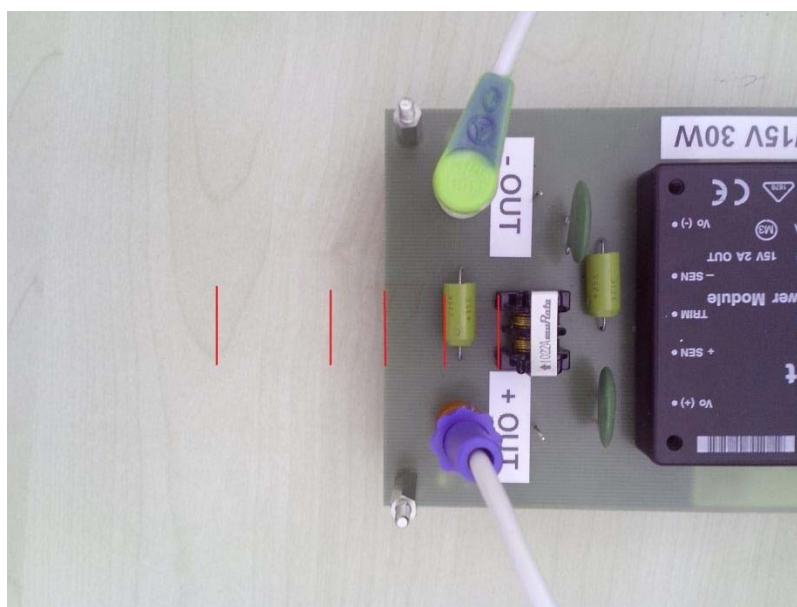


obr. 23: RF-R 400-1 a RF-R 50-1 [10]

Posledním komponentem měřicí sestavy byly měřené prvky. Prvním měřeným prvkem byl DC/DC měnič. Jelikož tento prvek vykazoval na vyšších frekvencích jen minimální rušení, byl použit ještě druhý, a to generátor rušení.

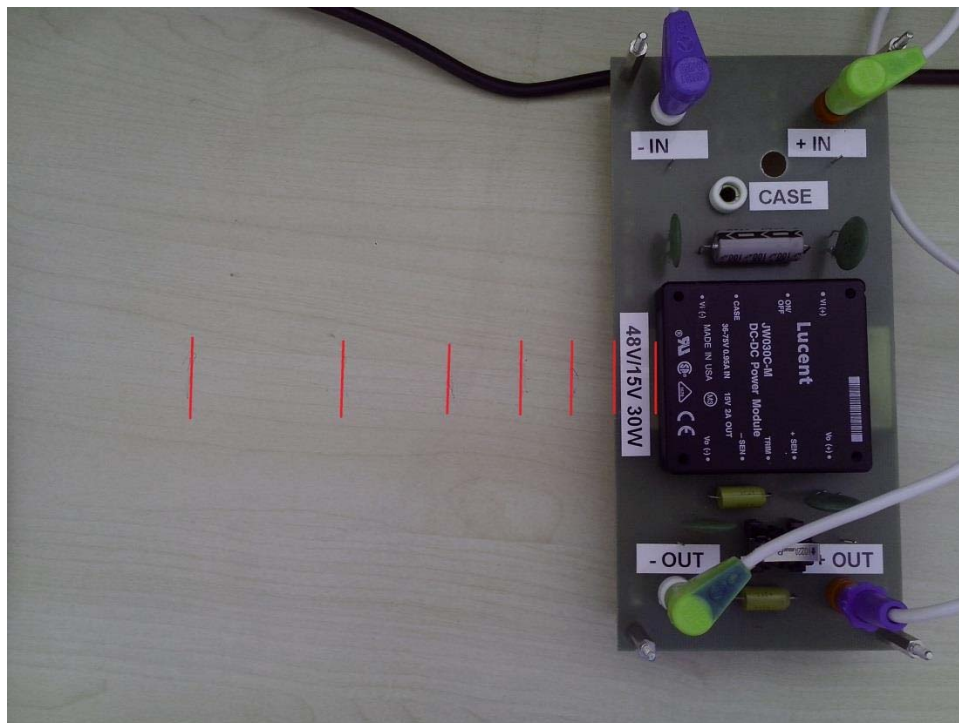
5.2 Postup měření

Měření bylo prováděno pro dva frekvenční rozsahy, nejdříve 150 kHz až 30 MHz a poté 30 MHz až 1 GHz. U DC/DC měniče byly zvoleny dvě místa s potencionálně nejvyšším rušivým vyzařováním. Do každého tohoto místa byly umísťovány jednotlivé sondy a postupně se oddalovaly na předem vybrané pozice. První místo a další body odstupu jsou znázorněna na obr. 24.



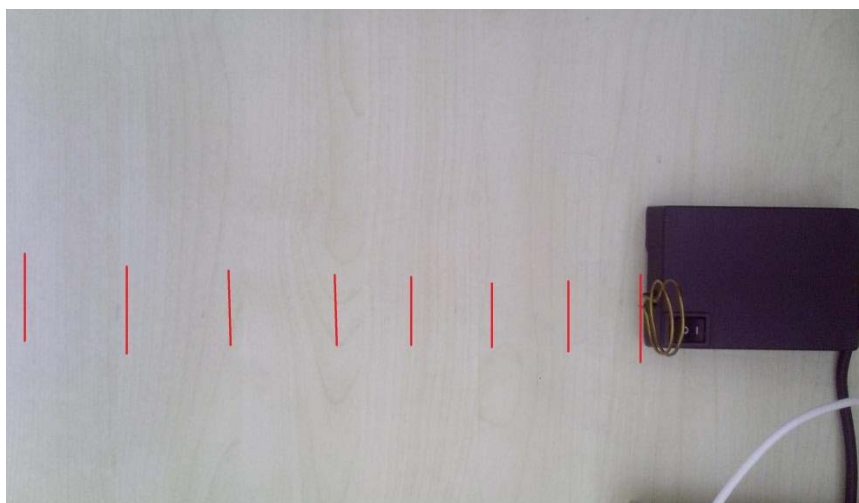
obr. 24: První pozice DC/DC měnič

Jednotlivé pozice byly v následujících vzdálenostech od zdroje rušení: 0 mm, 10mm, 25 mm, 40 mm a 65 mm. Druhé místo a následné pozice jsou znázorněny na obr. 25 s těmito odstupy: 0 mm, 12 mm, 24 mm, 36 mm, 60 mm, 90 mm a 130 mm.



obr. 25: Druhá pozice DC/DC měnič

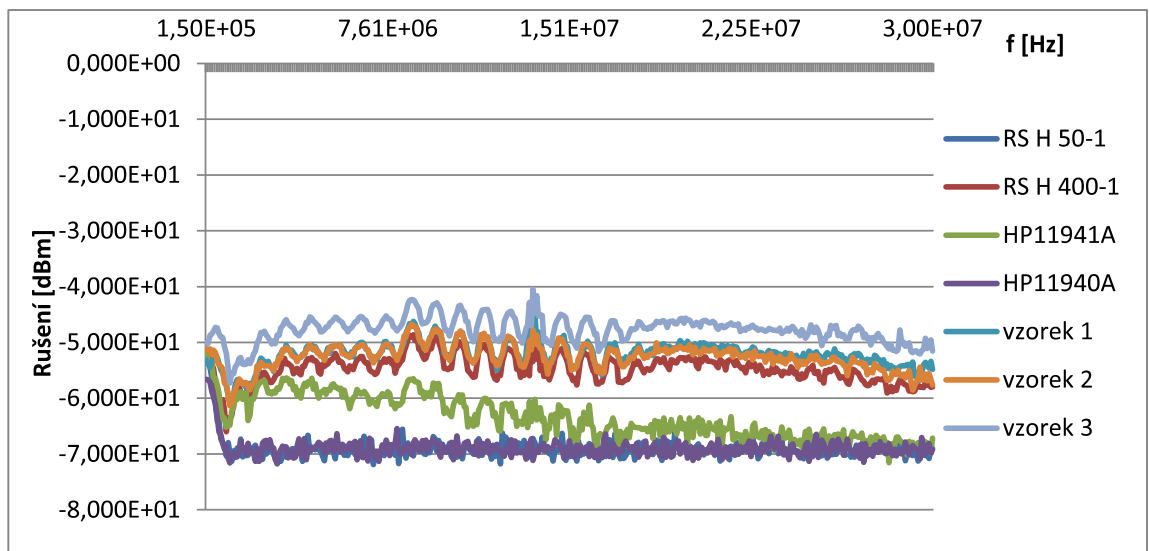
Generátor rušení vytvářel rušení pomocí vyzařovací smyčky, tudíž v místě smyčky byla ideální pozice pro první odečtení hodnot, vzdalování pak postupovalo v ose smyčky. Rozestupy jednotlivých odečtů byly následující: 0 mm, 40 mm, 80 mm, 120 mm, 160 mm, 200 mm, 240 mm a 280 mm. Toto je znázorněno na obr. 26.



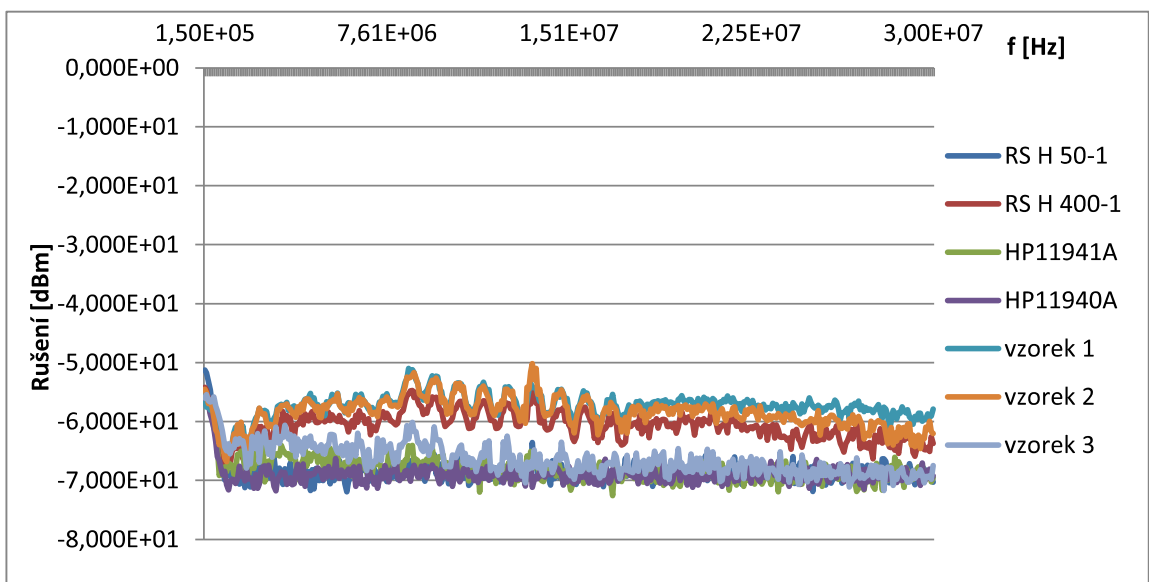
obr. 26: Generátor rušení

5.3 Naměřené hodnoty

Podle naměřených hodnot je z grafu patrné, že v kmitočtovém rozsahu 150 kHz až 30 MHz nejlépe měří vyrobené vzorky, což je způsobené značně větší velikostí oproti ostatním sondám. Z grafu číslo 1 je toto tvrzení patrné a platí i pro větší vzdálenosti, což zobrazuje graf číslo 2

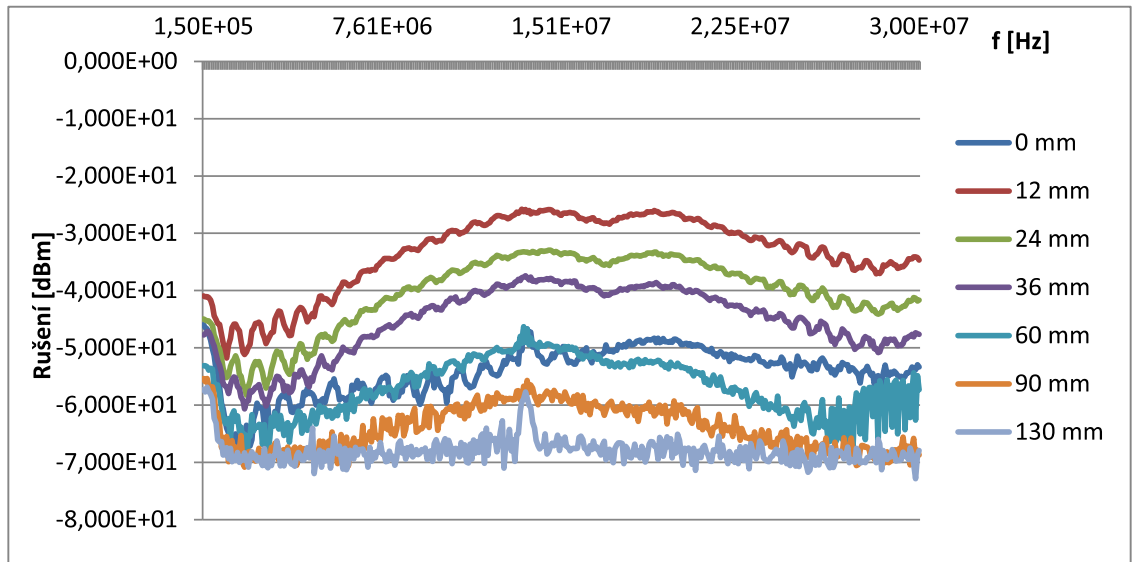


graf 1: Porovnání sond za stejných podmínek

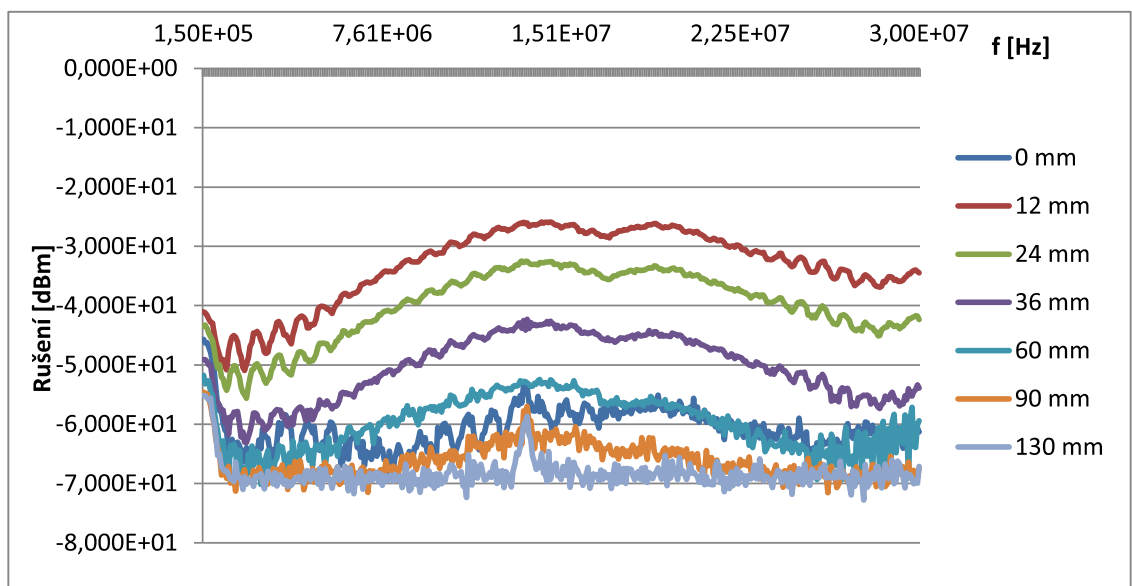


graf 2: Porovnání sond při větší vzdálenosti

Nejvíce se k vyrobeným sondám, co se citlivosti týče, blíží sonda RF-R 400-1. Je to způsobeno podobnou konstrukcí a velikostí smyčky. Graf 3 zobrazuje naměřené hodnoty pro celou škálu vzdáleností vyrobeného vzorku číslo 1, zatímco graf 4 ukazuje hodnoty získané pomocí sondy RF-R 400-1. Je zjevné, že grafy jsou si velmi podobné.

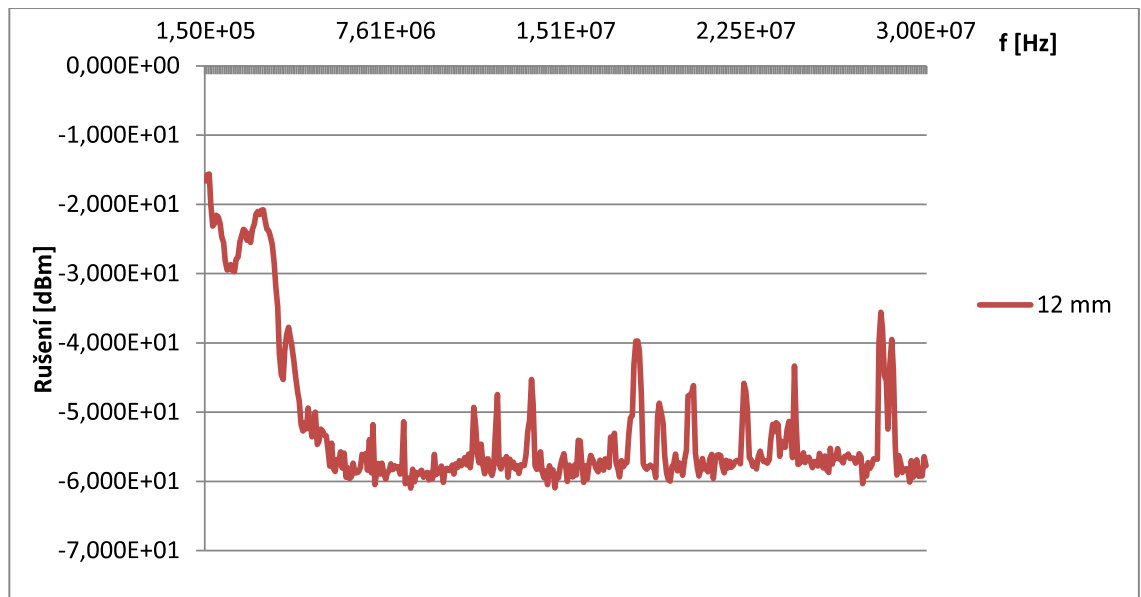


graf 3: Vyrobená sonda číslo 1



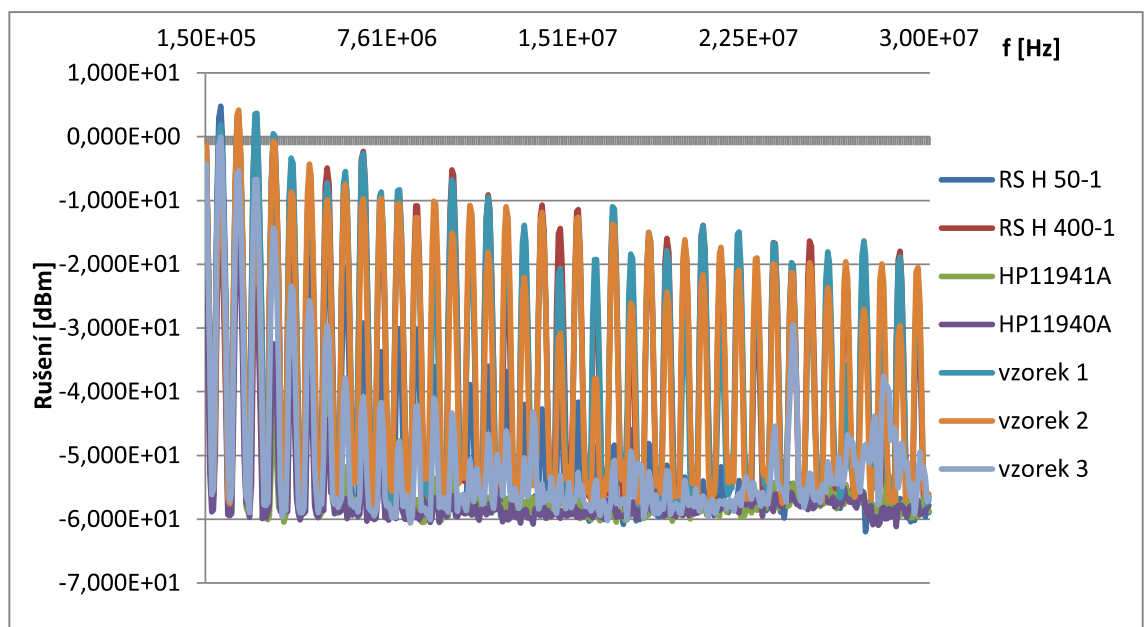
graf 4: Sonda RF-R 400-1

Při měření v druhém rozsahu od 30 MHz do 1 GHz bylo zjištěno, že vyrobené vzorky nejsou pro tento rozsah vhodné, neboť vykazují velký šum. To lze vyčíst z grafu 5, na kterém jsou hodnoty naměřené vzorkem číslo 2 a stejně je tomu i u zbylých vzorků. U ostatních sond tomu tak nebylo.

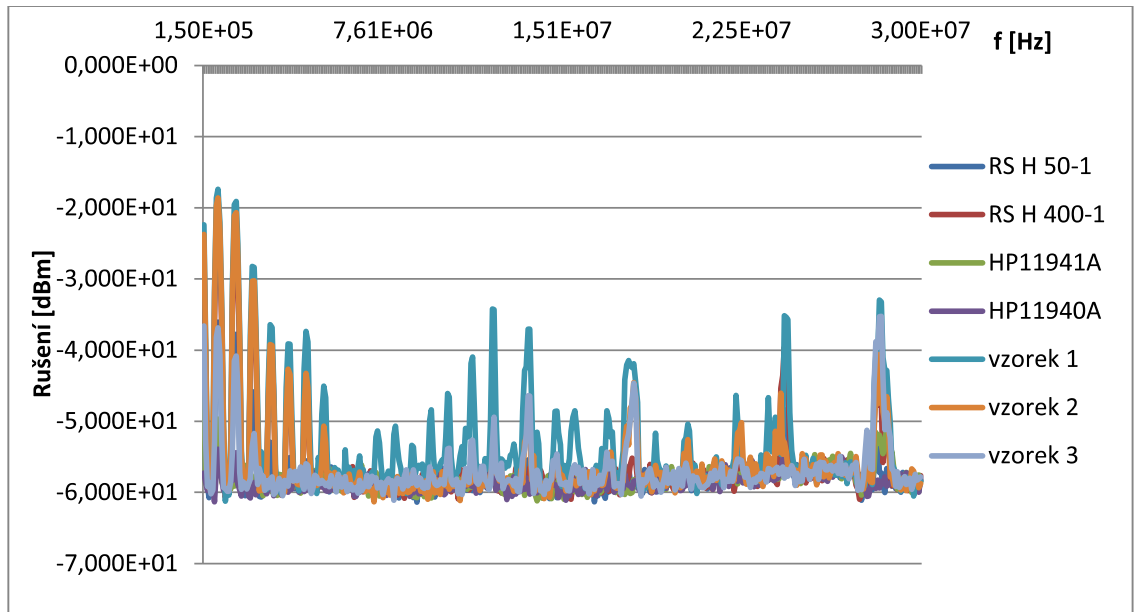


graf 5: Šum vzorku 2 v rozsahu 30 MHz – 1 GHz

Zhodnotíme-li dosah sond, jsou na tom nejlépe vyrobené vzorky. To bylo ověřeno při měření na generátoru rušení, který měl dostatečný výkon rušivého pole. Na krátkou vzdálenost všechny sondy ukazyvaly velkou výchytku relativně ke své citlivosti. Na větší vzdálenost již znatelnou výchytku ukazyvaly pouze vyrobené vzorky, a to až do vzdálenosti 500 mm. K tomuto závěru dospějeme porovnáním grafu 6, který ukazuje hodnoty pro nulovou vzdálenost, a grafu 7 pro vzdálenost 80 mm.

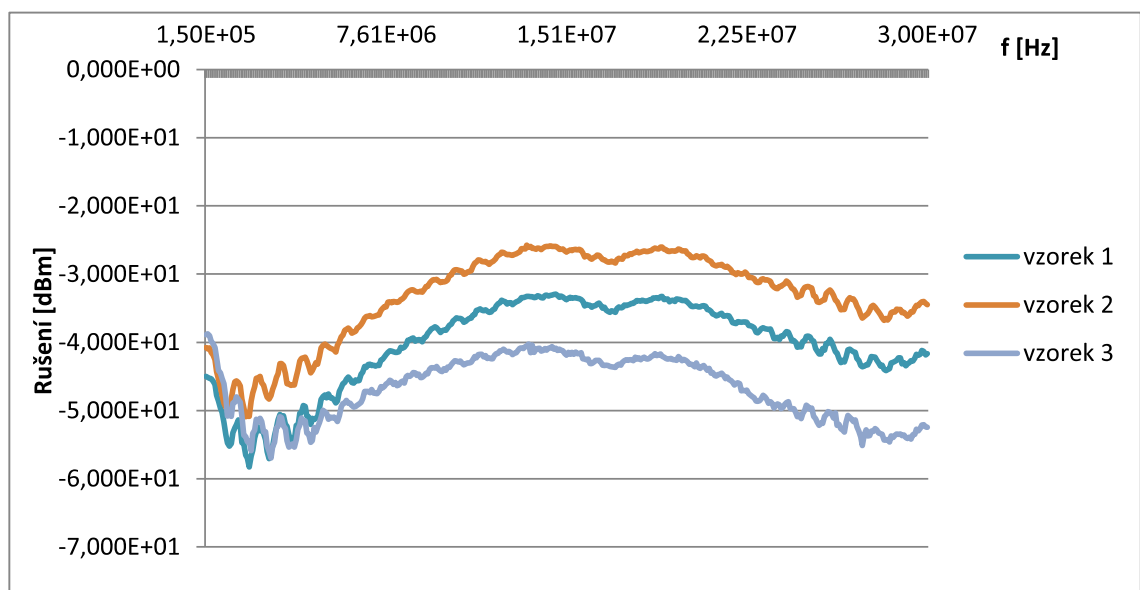


graf 6: Nulová vzdálenost od generátoru rušení



graf 7: 80 mm od generátoru rušení

Na závěr je třeba také porovnat vyrobené vzorky mezi sebou. Z grafu číslo 8 vyplývá, že nejmenší citlivost má sonda číslo tři, na druhém místě je vzorek 1 se stejnou konstrukcí, jako vzorek 3. Největší citlivost má tedy vzorek číslo 2, což je sonda s mezerou ve stínění.



graf 8: Porovnání vyrobených vzorků

6 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala měřením elektromagnetické kompatibility pomocí měřících antén. V práci byly popsány jednotlivé typy těchto antén a uvedeny jejich vlastnosti.

Větší pozornost byla věnována sondám blízkých polí. Tyto sondy byly nejprve teoreticky popsány a následující kapitola se věnovala jejich návrhu a praktické realizaci.

Pomocí vyrobených sond bylo provedeno experimentální měření, které umožnilo výrobky porovnat s dalšími sondami dostupnými na trhu. Z tohoto měření bylo zjištěno, že vyrobené vzorky sond jsou vhodné pro nižší rozsahy frekvencí v rámci elektromagnetické kompatibility. V pásmu od 150 kHz do 30 MHz překonaly komerční sondy. Také v pásmu 30 MHz až 1 GHz vykazovaly vysokou citlivost, ale zároveň vytvářely velký šum, který by nejspíše běžné měření znehodnotil.

Z pokusného měření bylo také zjištěno, že vhodnou konstrukcí pro sondy magnetických rušivých polí je konstrukce, která má částečně odstraněnou izolaci uprostřed přijímací smyčky.

Všechny stanovené cíle byly splněny.

7 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DŘÍNOVSKÝ, Jiří a kol. *Elektromagnetická kompatibilita*. Brno: Vysoké učení technické, 2010. 118 s ISBN 978-80-214-4202-3.
- [2] Elektrorevue. [online]. [cit. 2016-06-02].
Dostupné z: <http://elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html#kap5.1>
- [3] MACHÁČEK, Ivan. *Měření rozložení pole v blízké zóně*. Brno, 2010. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [4] Encyklopedie EMC. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z:
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node45#eq:06_15
- [5] K. A. Zainal, „Magnetic Field Probes: What it is and how to make it“, *Marquette University Microwave Seminar*, May 2014.
- [6] EMC Testing Part 1 - Radiated Emissions. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z:
http://www.compliance-club.com/archive/keitharmstrong/emc_testing1.html
- [7] Belden. Koaxiální kabel Belden. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z:
<http://www.belden.com>
- [8] GME. BNC konektor. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://www.gme.com>
- [9] HP 11941A, HP 11940A. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z:
<http://www.alldatasheets.com>
- [10] RF-R 400-1, RF-R 50-1. [online]. [cit. 2016-06-02]. Dostupné z: <http://www.langer-emv>.