

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Specifikace přístrojů a metod pro měření
vysokofrekvenčního rušení a odolnosti**

Petr Tupý

2013

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

Jméno a příjmení: **Petr TUPÝ**
Osobní číslo: **E11N0152P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zabývejte se stručně zdroji a charakterem vysokofrekvenčního rušení.
2. Proveďte analýzu zkušebních postupů pro určení odolnosti zařízení proti vf rušení podle ČSN EN 61000-4-3 a podobnou analýzu proveďte pro postupy měření emisí anténami.
3. Zabývejte se v souvislosti se zpracovanými analýzami požadavky na měřicí stanoviště (bezodrazová komora) a jejich reálným ověřením.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. ČSN EN 61000-4-3
2. soubor norem ČSN EN 55016-1

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti

Anotace

Diplomová práce se zabývá komplexní elektromagnetickou kompatibilitou a to v úvodní části, kde jsou zmíněné zdroje a charaktery vysokofrekvenčního rušení, kde je dále navázáno na vazební mechanismy přenosu rušivých signálů. Dále je věnovaná pozornost analýze zkušebních postupů pro určení měření emisí anténami, kde je popsán a vysvětlen řetězec měření rušivých signálů a částí, které řetězec obsahuje, jako antény a měřicí přístroj. Následující část práce je zaměřena na analýzu zkušebních postupů pro určení odolnosti zařízení proti vysokofrekvenčnímu rušení. Zde jsou také zmíněny požadavky na prostředí a stanoviště pro měření. Závěr diplomové práce je věnován praktickému měření v bezodrazové komoře na půdě fakulty elektrotechnické v Plzni, kde byla analyzována závislost amplitudy na výšce antény pro horizontální a vertikální polarizaci.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická odolnost, antény, měřicí přijímač, špičkový detektor, kvazi-špičkový detektor, detektor střední hodnoty, bezodrazová komora.

Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods

Annotation

In its introductory section, the thesis is concerned with complete electromagnetic compatibility. This part discusses sources and characteristics of high-frequency noise and coupling mechanisms of a transfer of interference signals. Furthermore, this section deals with an analysis of testing procedures for measuring the noise by means of antennas. The procedure of measurement of the interference signals is explained, including the necessary equipment, such as antennas and measuring instrument. The following section of the thesis focuses on the analysis of testing procedures for determining the resistance of the equipment to high-frequency interference. In addition, this section of the thesis lists condition and location requirements for a successful measurement. The last part of the thesis is devoted to a practical measurement in a non-reflection chamber, which is one of the laboratories at the Faculty of Electrical Engineering in Pilsen. The equipment of the laboratory made it possible to analyze the dependence of the amplitude on the height of the antenna for horizontal and frontal polarization.

Key words

Electromagnetic compatibility, electromagnetic immunity, antenna, measuring receiver, peak detector, quasi-peak detector, average detector, dead-scattering chamber.

pages: 113

figures: 102

Prohlašuji, že jsem práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a zdroje informací.

V Plzni dne 3. 5. 2013

Bc. Petr Tupý

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. z katedry elektroenergetiky a ekologie FEL ZČU za cenné připomínky a za čas strávený konzultacemi nad mou prací.

Obsah

Úvod	9
Elektromagnetická kompatibilita.....	10
Elektromagnetická kompatibilita – EMC.....	10
Rozdělení EMC	11
Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů.....	14
Elektromagnetické rušení – EMI	24
Měřicí řetězec	24
Kritéria elektromagnetického rušení	25
Antény používané pro elektromagnetické rušení	32
Měřicí přijímač	38
Detektory	43
Elektromagnetická odolnost - EMS.....	47
Kritéria elektromagnetické odolnosti	50
Měřicí řetězec	52
Testování odolnosti	56
Vysokofrekvenční generátor	56
Stanoviště	58
Ověření metodiky měření emisí v bezodrazové komoře ZČU.....	74
Měření.....	77
Závěr.....	84
Přehled použité literatury	86
Seznam obrázků v textu.....	88
Seznam tabulek v textu.....	94
Příloha A – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz	96
Příloha B – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz	102
Příloha C – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz	108
Příloha D – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz	111

Úvod

Velké a trvale stoupající množství elektrických a elektronických zařízení a spotřebičů od druhé poloviny 20. století. Stále se rozšiřující využívané spektrum elektromagnetických signálů v kmitočtových pásmech prakticky od 0 Hz do stovek GHz.

Každý systém či zařízení, nebo jeho určitá část, může být současně jak vysílačem (zdrojem), tak i přijímačem elektromagnetického rušení. Přesto můžeme v praxi většinou označit element méně citlivý na rušení a generující vyšší úroveň rušení jako zdroj rušícího signálu a naopak, citlivější element s menší úrovní generovaného rušení za přijímač rušivých signálů. V obou směrech jsou přitom zdroj a přijímač vázány mezi sebou parazitní elektromagnetickou vazbou.

Elektromagnetická kompatibilita je velice zajímavá část elektrotechniky, která má široké spektrum rozsahu působnosti, a právě zde je obrovský potenciál pro rozvoj elektromagnetické kompatibility, které se chci věnovat ve své budoucí praxi.

Hlavní cíl mé práce spatřuji v analýze přístrojů a metod, které se využívají pro vyhodnocení elektromagnetické kompatibility. V oblasti přístrojů se zaměřuji jednak na rozsah frekvenčního pásma, tzn., ve kterých frekvenčních pásmech jsou přístroje závislé či nezávislé a dále na jednotlivé druhy, které se využívají v současné době. Volně navazuji na používané metody pro vyhodnocení elektromagnetické kompatibility, u kterých zmiňuji jejich využití a postupy. V této části práce se zmiňuji i o využívané technice, jako jsou například antény, které tvoří neméně důležitou část řetězce pro samotné měření a vyhodnocování. Uvádím přehled i teoretickou analýzu a rozbor využívaných antén pro měření jako jsou např. trychtýřové nebo širokopásmové. Zaměřím se hlavně na antény, které se využívají na katedře elektroenergetiky Západočeské univerzity v Plzni. V téměř samotném závěru práce uvedu příklad měření a následného vyhodnocení experimentu v bezodrazové komoře při různě nastavených parametrech využívané techniky, abych jednak prezentoval, jak velmi důležitá a zajímavá část elektrotechniky je elektromagnetická kompatibilita. Setkáváme se s touto oblastí denně, aniž bychom to sami tušili.

Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita – EMC

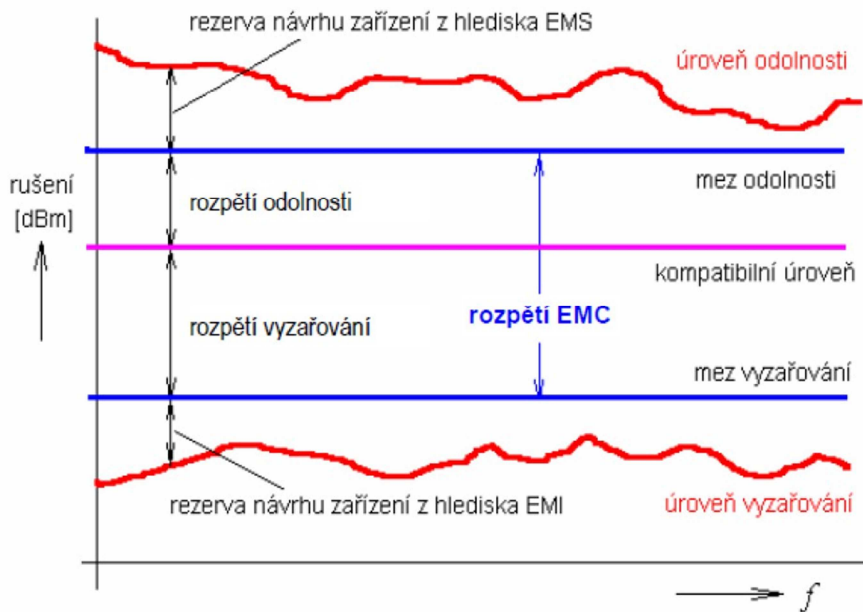
Je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a zároveň však svou vlastní elektromagnetickou činností nesmí nepřístupně ovlivňovat své okolí, tj. nesmí produkovat signály, jež by byly nepřipustně rušivé pro jiná zařízení (technická či biologická)

V důsledku neustále stoupajícího množství moderních elektrických zařízení a spotřebičů neúnosně stoupá úroveň rušení v kmitočtových pásmech prakticky od 0 Hz až do stovek GHz . Elektronická zařízení nebo přístroje mohou obsahovat generátory signálů pracující na několika různých několika kmitočtech, generátory obrazových a vysokofrekvenčních impulsů, řetězce výkonových vysokofrekvenčních, nízkofrekvenčních a impulzních zesilovačů. Všechny tyto díly pracují na poměrně vysokých výkonových úrovních měřitelných jak W , tak i MW . Ve stejných či sousedících zařízeních mohou být citlivé přijímače, citlivé zesilovače či mikroprocesorové obvody. Tyto části zpracovávají často extrémně nízké úrovně výkonu řádově až 10^{-14} W . Různé díly elektronického zařízení tak pracují na nejrůznějších výkonových úrovních s různými výkony signálů, které zpracovávají; maximální poměr těchto výkonů může dosáhnout až 200 dB , tj. 10^{20} . Pravděpodobnost vzájemného nežádoucího ovlivňování (rušení) je za těchto podmínek značně velká.

V praxi, kdy citlivá elektronická zařízení musí často pracovat v prostředí se silným rušením, vznikají mnohdy značně obtížné situace. Tak např. vstupní měřicí ústředna řídicího počítače se spojuje s výrobním technologickým procesem prostřednictvím množství čidel, k nimž často vedou i několik set metrů dlouhé přívodní kabely nesoucí signály nízkých úrovní mV a μA . Kabely jsou přitom často vystaveny působení silných rušivých polí ze svého okolí schopných do nich indukovat napětí, dosahující desítek až stovek voltů. Tyto parazitní signály pak mohou být chybně vyhodnoceny jako informace došlé z technologického procesu a mít za následek nesprávný (mnohdy automatický) zásah s možným rizikem hospodářských škod, havárií, ale i ohrožení života či zdraví lidí.

Rozdělení EMC

- Elektromagnetická interference - EMI (rušení)
- Elektromagnetická susceptibilita - EMS (odolnost, imunita)



Obr. 1. Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti.

Úroveň vyzařování je rušení vyzařované konkrétním spotřebičem či zařízením, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v [dBm] v závislosti na kmitočtu dle obr. 1. Mez vyzařování je předepsaná maximální (tj. normou povolená) úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje tzv. rezervu návrhu daného zařízení z hlediska EMI.

Úroveň odolnosti je maximální úroveň rušení působícího na dané zařízení, při němž je ještě zachována požadovaná kvalita provozu, a mez odolnosti je nejnižší normou předepsaná (požadovaná) úroveň odolnosti zařízení. Rozdíl těchto úrovní udává rezervu návrhu zařízení z hlediska jeho odolnosti. [1]

Rozdíl meze odolnosti a meze vyzařování daného zařízení určuje tzv. rozpětí EMC zařízení. Norma zavádí rovněž pojem tzv. (elektromagneticky) kompatibilní úrovně obr. 1 jako maximální předepsané úrovně celkového rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje či zařízení provozované v určitých podmínkách. Kompatibilní úroveň je volena tak, aby byla jen malá pravděpodobnost, že bude překročena skutečnou úrovní rušení. Kompatibilní úroveň může být pro dané zařízení časově a místně závislá. Rozdíly meze vyzařování a meze

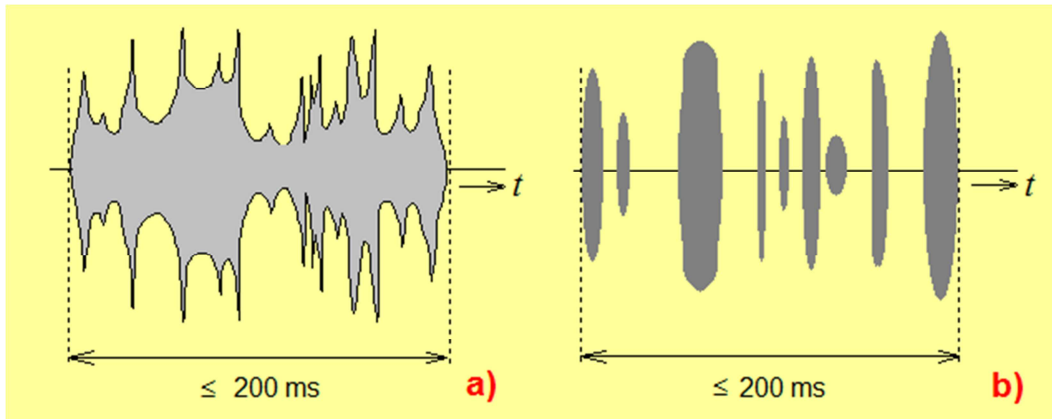
odolnosti vůči této kompatibilní úrovni určují tzv. rozpětí vyzařování a rozpětí odolnosti. Je zřejmé, že k tomu, aby zkoušené zařízení vyhovělo požadavkům EMC, musí být úroveň jeho vyzařování vždy nižší než maximální předepsaná úroveň, tj. než mez vyzařování. Podobně úroveň odolnosti zařízení musí být vždy větší než minimální požadovaná úroveň, tj. než mez jeho odolnosti. [1]

Rušivé signály se rozdělují

- a) Přírodní
Umělé
- b) Funkční
Nefunkční
- c) Impulsní (mžikové)
Spojité
Kvazi-impulsní
- d) Úzkopásmové
Širokopásmové
- e) Nízkofrekvenční
Vysokofrekvenční

Průběh rušivých signálů může být natolik rozličný, že posouzení toho, zda jde o spojitě či nespojitě (impulzní) rušení, nemusí být v praxi zdaleka jednoduché. Charakteristiky spojitých a nespojitých rušivých signálů jsou proto stanoveny mezinárodními technickými normami. V České Republice se k této problematice např. vztahuje Česká technická norma ČSN EN 55014 tak, aby při jejich vyhodnocování a určování přípustných mezí bylo dosaženo jednotného a vzájemně porovnatelného postupu. Norma definuje tzv. mžikovou (impulzní) poruchu jako poruchu s dobou trvání ne delší než 200 *ms*, která je oddělena od následující mžikové poruchy nejméně o 200 *ms*. Mžiková porucha se může skládat z nepřerušené řady impulzů nebo být tvořena seskupením jednotlivých impulzů kratších než 200 *ms* s celkovou dobou od počátku prvního do konce posledního impulzu kratší než 200 *ms*. [2]

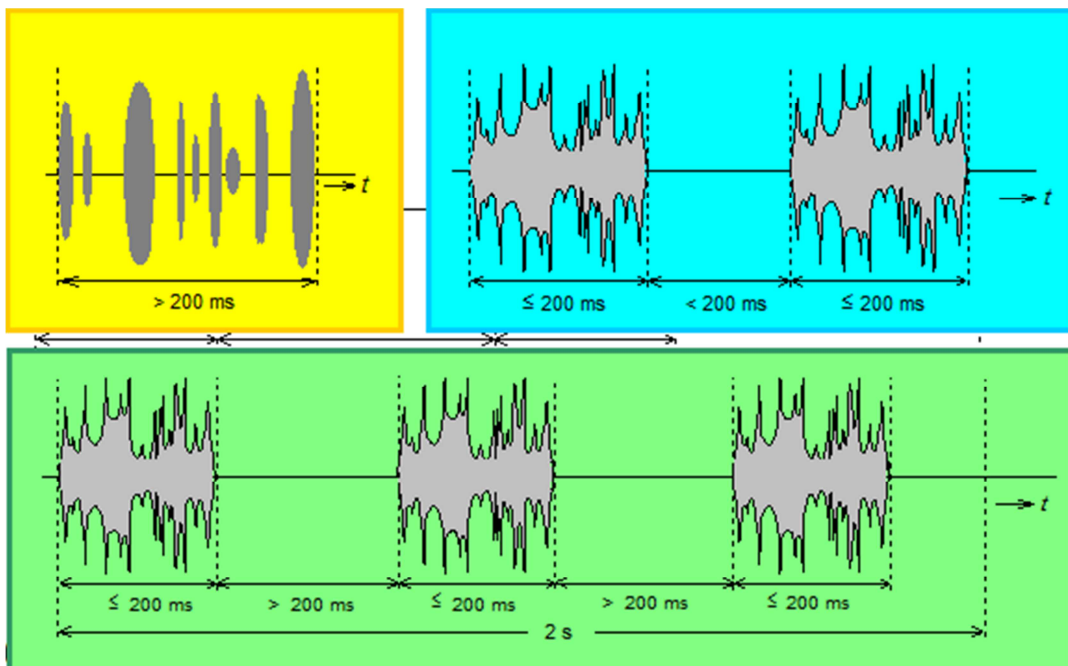
Při opakování poruch je důležitá tzv. četnost mžikových poruch. Je zřejmé, že pro posouzení je důležitá nejen doba trvání jednotlivých mžikových poruch, ale i časový interval jejich opakování a počet poruch v normou stanoveném intervalu 2 *s*.



Obr. 2. Jednorázová mžiková porucha

- a) jako nepřerušená řada impulzů s dobou trvání kratší než 200 ms.
- b) jako seskupení jednotlivých impulzů netrvajících déle než 200 ms.

Spojité rušení dle normy ČSN EN 55014



a)	b)
c)	

Obr. 3. Spojité poruchy:

- a) jedna mžiková porucha delší než 200 ms.
- b) dvě mžikové poruchy ve vzájemném odstupu menším než 200 ms.
- c) více než dvě mžikové poruchy v intervalu 2 s.

Úzkopásmové a širokopásmové rušení

Úzkopásmové rušení je produkováno zejména „užitečnými“ signály rozhlasových a televizních vysílačů.

Širokopásmové rušení produkuje většina průmyslových rušivých signálů (spojitých, impulzních či kvazi-impulzních). Rovněž všechna přírodní rušení jsou svou podstatou širokopásmová.

Nízkofrekvenční a vysokofrekvenční rušení

Nízkofrekvenční rušení:

- a) energetické (do 2 kHz), deformace napájecího napětí energetických sítí.
- b) akustické (do 10 kHz), ruší přenosové komunikační systémy.

Vysokofrekvenční (rádiové) rušení: od 10 kHz do 400 GHz , zahrnuje prakticky všechny existující interferenční zdroje. [3]

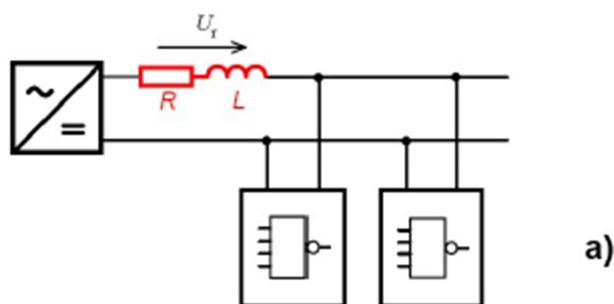
Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

Galvanická vazba

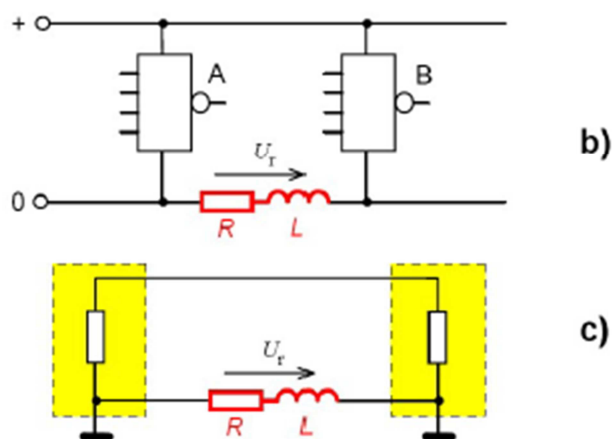
Galvanická vazba neboli vazba společnou impedancí je vazbou dvou elektrických systémů či bloků, jejíž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovaných vedení, tedy přes společnou impedanci. Tato impedance, která má nejčastější charakter sériového obvodu RL a může být tvořena např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje, viz obr 4a, společného přívodu řídicích obvodů, viz obr 4b). [4]

Nebo být impedancí společného zemnicího systému, jak je znázorněno na obr. 4c. Společnou impedancí tečou proudy všech (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 tvořená 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.

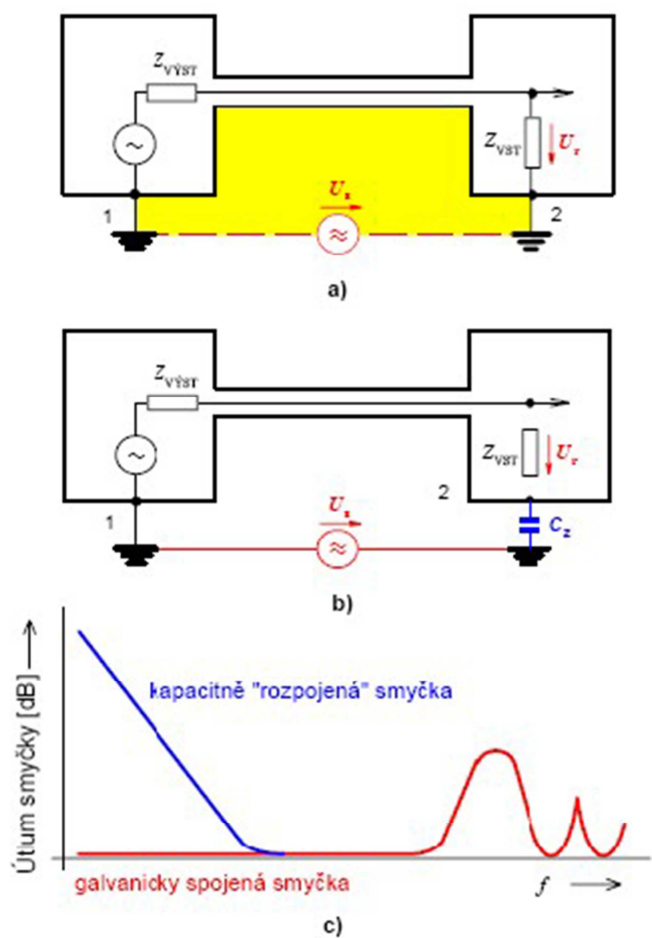
Častým případem parazitní galvanické vazby je vzájemná vazba dvou systémů či zařízení zapříčiněná tzv. zemní smyčkou, která vzniká v případě jejich separátního zemnění ve dvou různých bodech. Vlivem náhodných (bludných) zemnicích proudů vzniká mezi těmito body nahodilé rušivé zemní napětí U_z . Pak podle obr. 5a toto napětí přes uzavřenou zemní smyčku vyvolává na vstupu zařízení 2 (spotřebiče) rušivé napětí U_R . Základním principem zmenšení tohoto rušivého napětí je zvětšit celkovou impedanci zemní smyčky, zvýšit její útlum, případně ji elektricky zcela rozpojit. Nízkofrekvenční „přerušeni“ zemní smyčky lze realizovat jednobodovým uzemněním celého systému podle obr. 5b. Zemní smyčka je nyní galvanicky rozpojena malou zemní kapacitou zařízení 2 (přijímače) vůči společné zemi. Celkový přenosový útlum takto „rozpojené“ smyčky je na nízkých kmitočtech velmi vysoký, s rostoucím kmitočtem se však zmenšuje až na hodnotu galvanicky uzavřené smyčky obr. 5c. Na vysokých kmitočtech útlum smyčky (i galvanicky uzavřené) nejprve opět roste vzrůstem její vysokofrekvenční impedance vlivem povrchového jevu, dále však jeho hodnota periodicky klesá a opět roste tak, jak se zde uplatňuje periodická změna impedance spojovacích vedení obou systémů na velmi vysokých kmitočtech. [4]



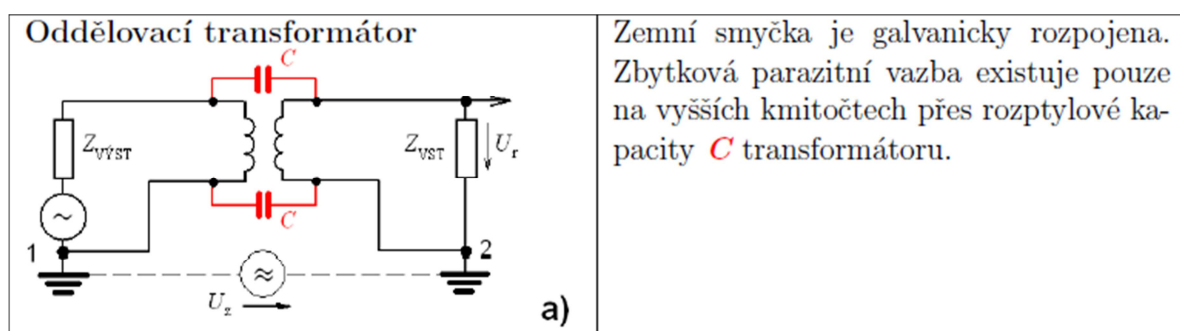
Obr. 4 a) Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení napájení.



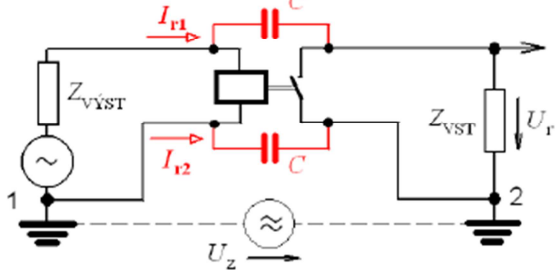
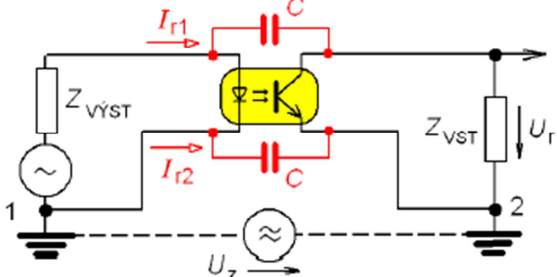
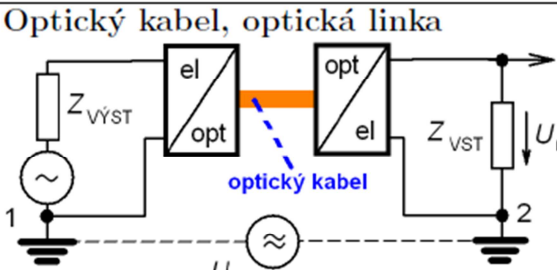
Obr. 4 b) Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení řídicím, c) zemním



Obr. 5. a) Parazitní vazba uzavřenou zemní smyčkou, b) rozpojení zemní smyčky na nízkých kmitočtech, c) kmitočtový průběh útlumu zemní smyčky.



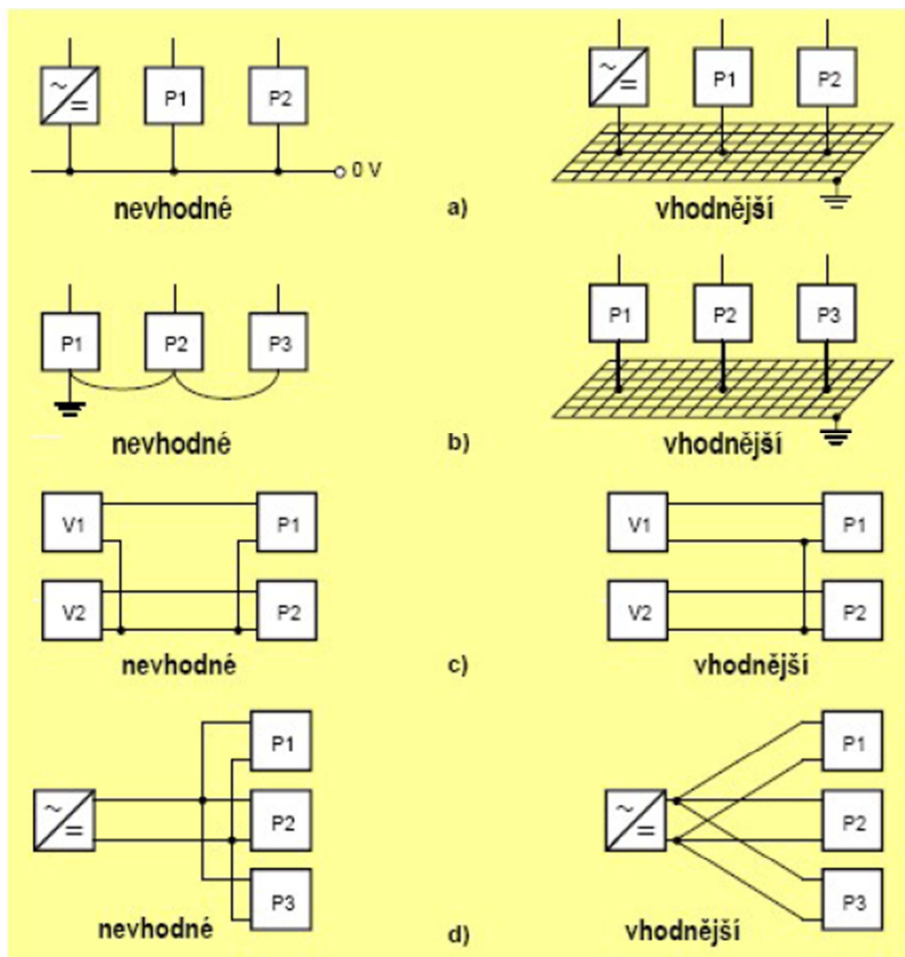
<p style="text-align: right;">b)</p>	<p>Vazbu přes rozptylové kapacity C transformátoru lze zmenšit zařazením stínícího „bočnicku“ pro rušivý proud mezi primární a sekundární vinutí transformátoru.</p>
<p>Neutralizační transformátor, BALUN</p>	<p>Závity n_1 a n_2 jsou navinuty na společném toroidním jádru ve stejném smyslu. Magnetické toky signálových proudů se vzájemně kompenzují, magnetické toky rušivého proudu se sčítají. Neutralizační transformátor tak zvyšuje impedanci zemní smyčky pro rušivé signály, aniž zvětší její impedanci pro pracovní signál.</p>
<p>Feritové kroužky, příp. feritové perličky</p>	<p>Jde vlastně o neutralizační transformátory s jediným závitem. Kroužky účinně zvyšují impedanci zemní smyčky hlavně na kmitočtech nad 1 MHz. Pozitivně se zde uplatňuje i vysoká ztrátovost feritu, který pohlcuje vysokofrekvenční elektromagnetické vlnění na vedení.</p>
<p>Vedení s útlumovým pláštěm</p>	<p>Účinek je stejný jako při použití feritových kroužků. Plášť vedení je vytvořen ze silně ztrátového materiálu (ztrátová pryž, ztrátové dielektrikum aj.) absorbujícího elektromagnetické rušivé signály.</p>

<p>Elektromechanické relé</p> 	<p>Lze použít jen pro přenos binárních signálů. Rozptylová kapacita C má hodnotu až 5 pF.</p>
<p>Optočlen</p> 	<p>Použití zejména při přenosu číslicových užitečných signálů. Rozptylová kapacita C má hodnotu až 1 pF, napěťová pevnost 0,5 až 10 kV.</p>
<p>Optický kabel, optická linka</p> 	<p>Pro analogové i číslicové signály. Velmi odolné vůči elektromagnetickému rušení.</p>

Tab. 1. Způsoby potlačení galvanické vazby zemní smyčkou.

Pro minimalizaci galvanických vazeb společnou impedancí napájecích, signálových či zemních obvodů je tedy zejména nutné:

- Dostatečně dimenzovat společný zemní vodič – zemní plochu a jednotlivé bloky k němu připojovat přímou cestou masivním vodičem. Těmito kroky se sníží velikost „vstupního“ rušivého zemního napětí U_z zemní smyčky
- U signálových vodičů neslučovat společný vodič
- Elektronická zařízení různých technologií vybavit samostatnými napájecími zdroji
- V možných případech zcela vzájemně galvanicky oddělit např. funkčně související signálové a výkonové obvody jednoho zařízení



Obr. 6. Způsoby minimalizace galvanických vazeb.

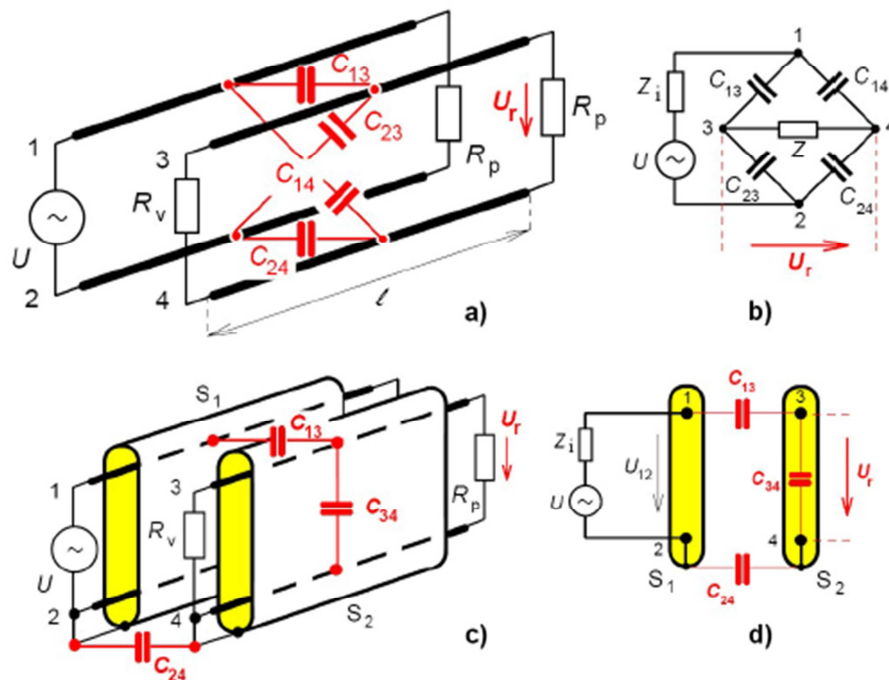
Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči nebo mezi jednotlivými částmi obvodů či konstrukce zařízení. Parazitní kapacitou modelujeme elektrické pole, které existuje mezi každými dvěma vodiči 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.

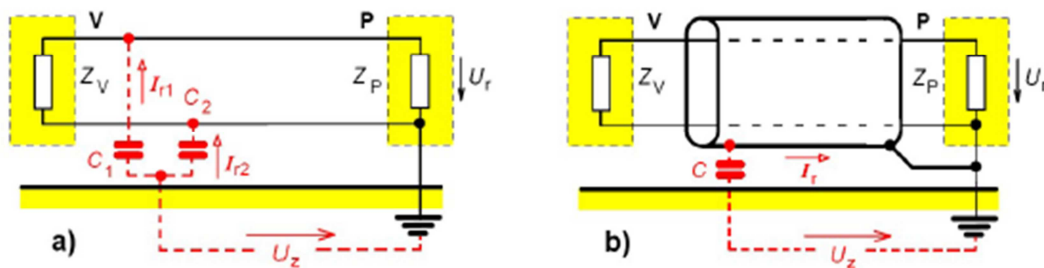
Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů

Vodiče 1 a 2 představují rušící vedení (obvod), vodiče 3 a 4 rušené vedení (obvod). V případě, že délka obou vedení (obvodů) l je podstatně kratší než vlnová délka rušivého signálu o nejvyšším uvažovaném kmitočtu, lze obvod a vazby v něm popsat náhradním schématem podle obr. 7. V něm náhradní impedance Z_1 je závislá na impedančních parametrech rušícího obvodu 1-2 a náhradní impedance Z závisí na impedančních parametrech rušeného obvodu 3-4. Ze schématu je zřejmé, že výstupní rušivé napětí U_r rušeného obvodu bude nejmenší při vyvážení příslušného kapacitního

můstku, tedy např. při $C_{13} \approx C_{23}$ a $C_{14} \approx C_{24}$. Toho lze dosáhnout zkroucením obou párů vodičů (vodiče 1 a 2 a také vodiče 3 a 4), příp. aspoň rušeného vedení, tj. vodičů 3 a 4. Touto úpravou se rovněž sníží parazitní indukční vazba obou vedení (obvodů). Dále kapacitní vazbu lze snížit užitím stíněných vodičů. [4]



Obr. 7. a) Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů, b) a její zmenšení užitím oboustranného stínění.



Obr. 8. a) Kapacitní vazba vůči zemi, b) a její odstranění.

Induktivní vazba

Prochází-li obvodem elektrický proud, vzniká v okolí prostoru magnetické pole, a to konstantní nebo proměnné, v závislosti na časovém průběhu proudu. Ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli, se indukuje napětí, jehož velikost roste se zvyšováním kmitočtu, příp. s rostoucí rychlostí časových změn proudu v primárním obvodu. Při časové změně magnetického toku ϕ se v obvodu indukuje rušivé napětí dané Faradayovým indukčním zákonem jako

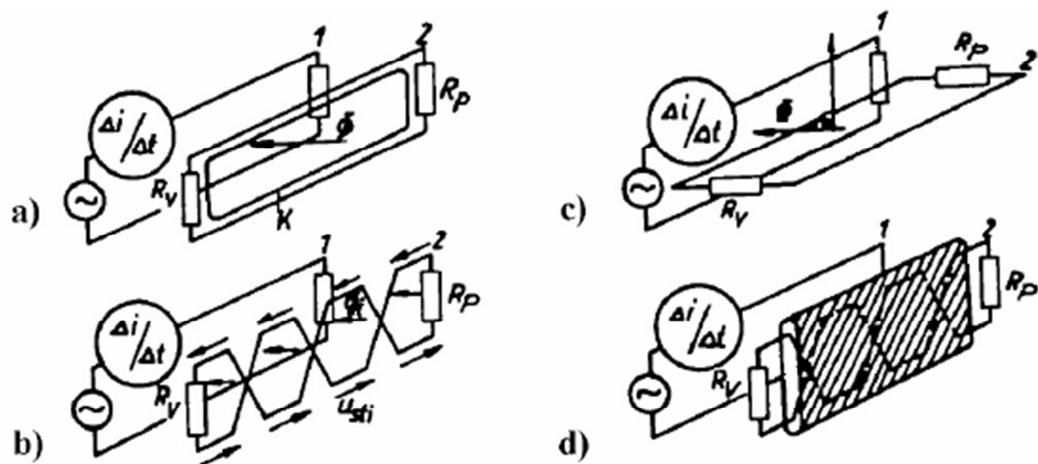
$$U_{rmax} = - \frac{d\phi}{dt} \approx - \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Delta = -S \times \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \times S \times \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

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

$$H = \frac{I}{2\pi r}, \text{ takže indukované rušivé napětí } U_r = -\frac{\mu_0 S}{2\pi r} \times \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2) \text{ a } (3)$$

Parazitní indukovaná vazba je nebezpečná zejména v případech změn primárního (rušivého) proudu velké velikosti. Tyto situace nastávají typicky při elektrostatických výbojích, ať již přírodních (blesk) či umělých lokálních výbojích (ESD). [4]

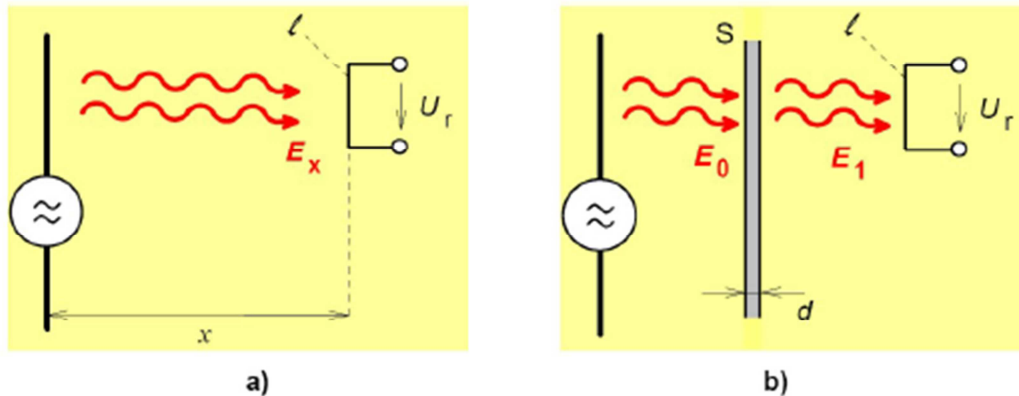
- Pro minimalizaci parazitní indukční vazby mezi obvody je třeba, aby:
- Délka souběžně probíhajících vodičů obou obvodů byla minimální
- Vzdálenost obou obvodů byla, co největší
- Velikost proudové smyčky rušeného obvodu (obou přijímačů) byla, co nejmenší



Obr. 9. Způsoby omezení indukční vazby: **a)** omezení indukční vazby závitem K nakrátko; **b)** kompenzace indukční vazby zkroucením vodičů obou přijímačů; **c)** minimalizace vazby kolmým natočením vazebních smyček; **d)** minimalizace vazby stíněním obvodu přijímače.

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 druhů průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích, do nichž se dostává anténou, příp. jejím svodem, což je charakteristické pro rušení vyzařováním. [4]



Obr. 10. a) Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním, b) a vliv vložené stínící přepážky.

Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje. Elementární situace při vazbě vyzařováním je naznačena na obr. 10. a).

Intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti x od „zdroje“, který vysílá signál s výkonem P , lze přibližně vyjádřit vztahem:

$$E_x = 0,3 \times \frac{\sqrt{P}}{x} [Vm^{-1}; kW; km]. \quad (4)$$

Jenž platí pro tzv. vzdálené elektromagnetické pole, tedy pro vzdálenosti $x \gg \lambda/2\pi$, kde λ je vlnová délka signálu. Toto elektrické pole pak indukuje ve vodiči „přijímače“ rušivé napětí:

$$U_r = E_x \times l_{2EF}, \quad (5)$$

kde: l_{2EF} je tzv. efektivní délka „antény“. Její hodnota závisí na tvaru a rozměrech „antény“ přijímače a na vlnové délce (kmitočtu) přijímaného signálu.

V anténní měřicí technice EMC se častěji používá převrácená hodnota této veličiny nazývaná anténní faktor (anténní činitel). [4]

Účinnou ochranou proti elektromagnetickému rušení vyzařováním lze realizovat pomocí stínícího krytu či přepážky umístěné mezi zdroj a přijímač rušení obr. 10 b). Stínící přepážkou je vyzářená intenzita E_0 zeslabena na hodnotu E_1 na jejím „výstupu“. Zeslabení nastává jednak vlivem odrazu elektromagnetické vlny od přepážky zpět směrem ke zdroji záření. Velikost zeslabení vlny přitom závisí na tloušťce přepážky, na její vodivosti a permeabilitě a rovněž na kmitočtu signálu. [4]

Přímo v samotném zařízení může dojít k parazitní vazbě vyzařováním na mikrovlnných kmitočtech s vlnovými délkami menšími, než jsou příčné rozměry přístroje. Kovový kryt přístroje lze za těchto podmínek považovat za úsek dutého kovového vlnovodu, kterým se mohou šířit různé vidy elektromagnetického vlnění.

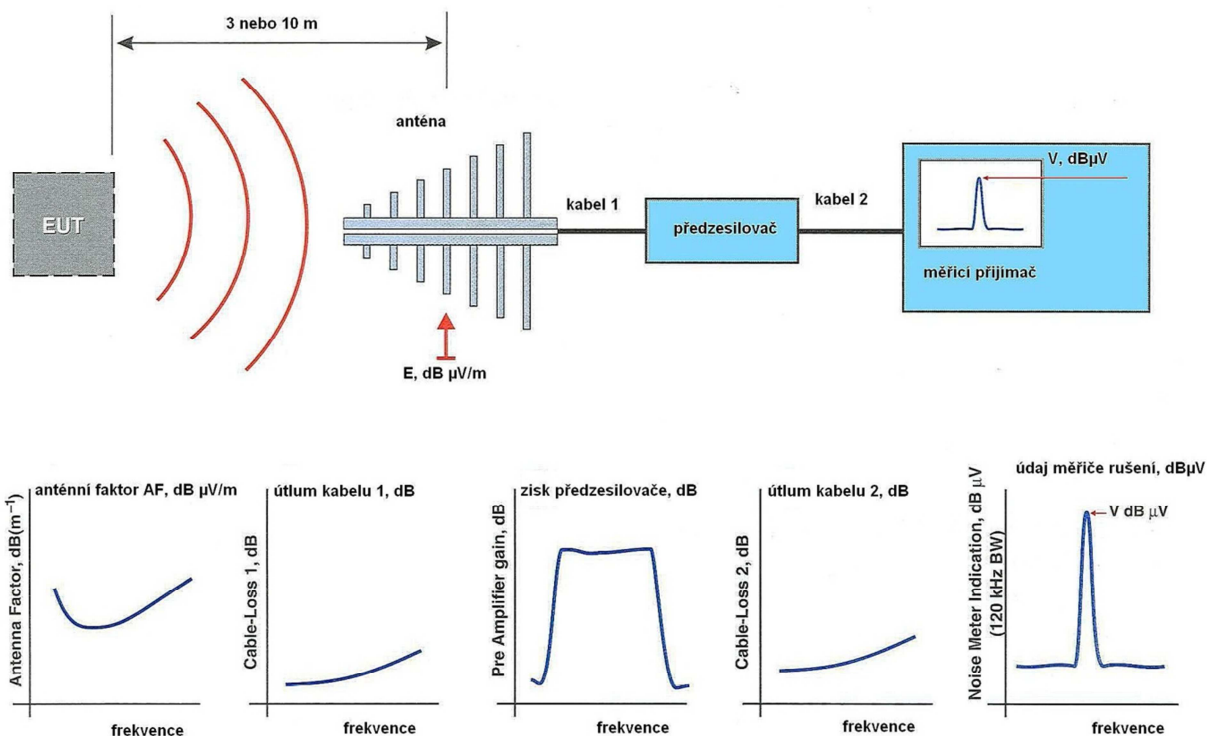
Odstranit tuto vazbu lze zmenšením příčných rozměrů „parazitního“ vlnovodu tak, aby vlnová délka nejvyššího kmitočtu rušivého signálu byla delší než dvojnásobek největšího rozměru.

Rušivý signál se pak tímto „vlnovodem“ nešíří, zůstává v něm pouze pole vybuzené v těsné blízkosti rušivého zdroje. Toto pole se pak velmi rychle tlumí s rostoucí vzdáleností od zdroje rušení. [4]

Elektromagnetické rušení – EMI

Měřicí řetězec

V testu měření vyzařování jsou měřeny elektromagnetické emise vycházející ze zařízení (EUT). Účelem této zkoušky je ověření úrovně elektromagnetického vyzařování zařízení (EUT) během provozu. Přijímací anténa je umístěna před zkoušeným zařízením ve vzdálenosti 3 nebo 10 metrů.



Obr. 11. Blokované zapojení při měření rušivých signálů.

Výpočet úrovně měření E-pole je dáno:

$$E[\text{dB}\mu\text{Vm}^{-1}] = U[\text{dB}\mu\text{V}] + CL_1[\text{dB}] - PAG[\text{dB}] + CL_2[\text{dB}] + AF[\text{dBm}^{-1}], \quad (6)$$

kde: E [$\text{dB}\mu\text{Vm}^{-1}$] je měřené E-pole

U [$\text{dB}\mu\text{V}$] je hodnota rušení

CL_1 [dB] jsou ztráty v kabelu 1

PAG [dB] je zisk předzesilovače

CL_2 [dB] jsou ztráty v kabelu 2

AF [dBm^{-1}] je anténní faktor [5]

Kritéria elektromagnetického rušení

Meze pro rušení zařízení jsou dány souborem norem:

Normy, které se danou problematikou zabývají, jsou např. ČSN EN 55016-2-3 ed.3., ČSN EN 55022

V tomto případě byla vybrána norma Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření ČSN EN 55022:

Třída A je kategorie všech ostatních ITE. V návodu k použití musí být uvedeno upozornění:

Toto je výrobek třídy A. V domácím prostředí může tento výrobek způsobovat vysokofrekvenční interferenci. V takovém případě se může vyžadovat, aby uživatel přijal příslušná opatření.

Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy A ITE v měřicí vzdálenosti 10 m	
Kmitočtový rozsah [MHz]	Kvazivrcholové meze dB[μ V/m]
30 až 230	40
230 až 1000	47

Tab. 2. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy A v měřicí vzdálenosti 10 m.

Třída B je určena především pro prostředí domácnosti a může zahrnovat zařízení bez pevného místa použití (například přenosné zařízení napájené z vestavěných baterií), telekomunikační koncové zařízení napájené z telekomunikační sítě, osobní počítače a připojená pomocná zařízení. [3]

Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy B ITE v měřicí vzdálenosti 10 m	
Kmitočtový rozsah [MHz]	Kvazivrcholové meze dB[μ V/m]
30 až 230	30
230 až 1000	37

Tab. 3. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy B v měřicí vzdálenosti 10 m.

Meze rušení šířeného záření pro zařízení třídy A ITE v měřicí vzdálenosti 3 m		
Kmitočtový rozsah [GHz]	Střední hodnota dB[μV/m]	Vrcholová hodnota dB[μV/m]
1 až 3	56	76
3 až 6	60	80

Tab. 4. Meze rušení šířeného záření pro zařízení třídy A v měřicí vzdálenosti 3 m.

Meze rušení šířeného záření pro zařízení třídy B ITE v měřicí vzdálenosti 3 m		
Kmitočtový rozsah [GHz]	Střední hodnota dB[μV/m]	Vrcholová hodnota dB[μV/m]
1 až 3	50	70
3 až 6	54	74

Tab. 5. Meze rušení šířeného záření pro zařízení třídy B v měřicí vzdálenosti 3 m.

Rozpis kmitočtů:

- Nejvyšší kmitočet interního zdroje EUT < 108 MHz – měří se do 1 GHz
- Nejvyšší kmitočet interního zdroje EUT > 108 MHz a < 500 MHz – měří se do 2 GHz
- Nejvyšší kmitočet interního zdroje EUT > 500 MHz a < 1 GHz – měří se do 5 GHz
- Nejvyšší kmitočet interního zdroje EUT > 1 GHz – měří se do pětinasobku tohoto kmitočtu nebo maximálně do 6 GHz

Antény pro měření EMC

Základními požadavky na antény užívané při měření EMI jsou širokopásmovost, zisk a kalibrace. Širokopásmové antény lze bez přeladování nebo výměny použít v rozsáhlém pásmu kmitočtů, což urychluje měření. Anténami s vysokým ziskem lze měřit i nízké intenzity pole. Navíc antény s vysokým ziskem mají vysoký předozadní poměr a úzký vyzařovací diagram, což omezuje příjem signálů z nežádoucích směrů a tím vliv okolí na měření. Pro určení intenzity pole z

napětí na svorkách antény je třeba antény kalibrovat – určit kmitočtově závislý převodní koeficient mezi intenzitou pole a napětím na svorkách antény, tzv. anténní faktor. [6]

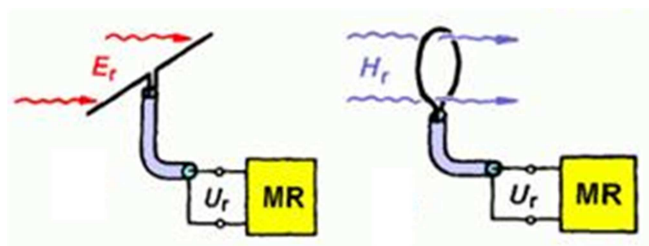
Anténní faktor

Při měření elektromagnetického rušení přijímá měřicí anténa elektrickou složku E_r či magnetickou složku H_r rušivého pole a lineárně ji převádí ve výstupní napětí U_r na svých výstupních svorkách, příp. na výstupu připojeného kabelu (vedení, napáječe). Toto napětí je pak měřeno a vyhodnocováno měřičem rušení.

Vztah mezi velikostí vstupní intenzity pole a velikostí výstupního napětí antény udává tzv. **anténní faktor** (činitel) AF [l/m] definovaný jako:

$$AF_e = \frac{E_r}{U_r}, \quad (7)$$

$$\text{nebo v logaritmické míře: } AF_e [dBm^{-1}] = E_r [dBVm^{-1}] - U_r [dBV]. \quad (8)$$



Obr. 12. K definici anténního faktoru AF .

Pro antény měřící magnetické pole (rámová nebo feritová anténa) je obdobně definován jejich anténní faktor pro magnetické pole:

$$AF_h = \frac{H_r}{U_r}, \quad (9)$$

$$\text{nebo v logaritmické míře: } AF_h [dBSm^{-1}] = H_r [dBAm^{-1}] - U_r [dBV]. \quad (10)$$

Pokud je magnetická anténa kalibrována pomocí ekvivalentního elektrického pole a protože ve vzduchovém prostředí jsou elektrická a magnetická složka rovinné vlny ve vzdáleném poli vázány charakteristickou impedancí Z_0 , pak

$$AF_e [dBm^{-1}] = AF_h [dBSm^{-1}] + 20 \log Z_0 = AF_h [dBSm^{-1}] + 51,5 \text{ dB}. \quad (11)$$

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

$$E_r [dBVm^{-1}] = U_r [dBV] + AF [dBm^{-1}]. \quad (12)$$

Anténní faktor AF (někdy označovaný jako přijímací anténní faktor, viz TAF pro ČSN EN 61000-4-3) je základním parametrem každé antény pro EMC a jeho kmitočtový průběh základním údajem dodávaným výrobcem antény. [3]

Odvození AF:

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

$$A_e [m^2] = \frac{P_r}{P_d} \left[\frac{W}{Wm^{-2}} \right], \text{ tedy } P_d = \frac{P_r}{A_e}. \quad (13)$$

Vztah mezi A_e a ziskem přijímací antény:

$$A_e = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}. \quad (14)$$

Výstupní napětí přijímací antény a výstupní výkon jsou vázány vztahem:

$$P_r = \frac{U_r^2}{Z}, \quad (15)$$

$$\text{a v decibelech pro } 50 \Omega: U_r [dB\mu V] = P_r [dBmW] + 107. \quad (16)$$

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

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi}. \quad (17)$$

Po dosazení dostaneme:

$$\frac{U_r^2}{Z} = \frac{E^2}{120\pi} \times \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}, \quad (18)$$

$$\text{tedy pro } 50\Omega \text{ systém } AF = \frac{E}{U_r} = \sqrt{\frac{480\pi^2}{ZG_r\lambda^2}} = \frac{9,73}{\lambda\sqrt{G_r}}, \quad (19)$$

nebo v logaritmickém měřítku:

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

kde: G_r je zisk přijímací antény a $f [MHz]$ je frekvence měřeného signálu.

Teoretická hodnota anténního faktoru tedy vzrůstá s rostoucím kmitočtem za předpokladu konstantního zisku a vstupní impedance antény. To je přibližně splněno např. u logaritmicko-periodické antény. [3]

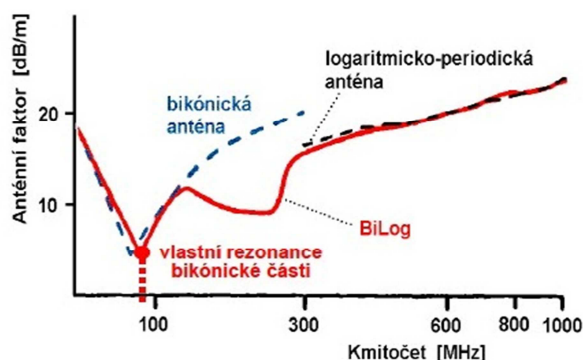
Do udávané hodnoty AF je některými výrobci zahrnován i útlum L dodávaného napájecího kabelu mezi anténou a měřičem rušení:

$$AF [dBm^{-1}] = 19,8 - 20 \log \lambda [m] - G_r + L [dB], \quad (21)$$

$$AF [dBm^{-1}] = 20 \log f [MHz] - 29,8 - G_r [dB] + L [dB]. \quad (22)$$

Anténní faktor AF (někdy označovaný jako přijímací anténní faktor) je základním parametrem každé antény pro EMC a jeho kmitočtový průběh základním údajem výrobce antény. Když $G_r [dB] = 10 \log G_r$ je zisk přijímací (měřicí) antény v dB a f je kmitočet měřeného (rušivého) signálu v MHz . Teoretická hodnota anténního faktoru tedy vzrůstá s rostoucím kmitočtem za předpokladu konstantního zisku a vstupní impedance antény. To je (alespoň přibližně) splněno např. u logaritmicko-periodické antény. U jiných typů antén je skutečná kmitočtová závislost AF složitější a nikoli monotónní.

Jednotka $[dBV]$, příp. $[dB\mu V]$, se čte jako „decibely nad voltem“, příp. „decibely nad mikrovoltem“ a udává počet dB dané veličiny (tj. napětí) nad hodnotou $1 V$, příp. $1 \mu V$. Podobně jednotka $[dBVm^{-1}]$, příp. $[dB\mu Vm^{-1}]$ udává počet dB nad hodnotou intenzity elektrického pole $1 Vm^{-1}$, příp. $1 \mu Vm^{-1}$.



Obr. 13. Kmitočtový průběh anténního faktoru BiLogické antény.

Typický průběh AF složené antény typu BiLog je naznačen na obr. 13 spolu s odpovídajícími průběhy pro bikónickou a logaritmicko-periodickou anténu. U bikónických a složených antén se projevuje výrazný pokles hodnoty AF v okolí kmitočtu vlastní rezonance základního dipólu antény (obvykle kolem 70 MHz). Kolísání hodnoty AF měřících antén se změnou kmitočtu není na překážku jejich použití, je jen třeba zajistit, aby tyto změny nebyly příliš strmé, tj. aby křivka $AF = AF[f]$ byla „hladká“.

Skutečná hodnota anténního činitele závisí na řadě dalších faktorů, z nichž některé jsou jen obtížně a ne vždy jednoznačně specifikovatelné: AF závisí na podmínkách měření a uspořádání měřícího pracoviště (např. výšce antény nad zemí, vodivosti a tedy odrazivosti země, přítomnosti jiných odražených signálů, polarizaci pole, vzdálenosti antény od zdroje rušení apod.), hodnota AF je ovlivněna i přítomností samého testovaného zařízení a závisí rovněž na impedančním přizpůsobení antény, napáječe a měřiče rušení. Každá měřicí anténa je proto individuálně kalibrována tj. je změřen její anténní faktor v celém pracovním kmitočtovém pásmu za přesně definovaných podmínek kalibrace. Zjištěné hodnoty AF pak platí jen pro tyto (tj. stejné) pracovní podmínky v procesu měření.

Obecnou praxí se stalo udávat tzv. ekvivalentní anténní činitel ve volném prostoru, tedy hodnoty AF platné pro anténu ve zcela „volném“ prostoru bez jakýchkoli překážek pro impedančně přizpůsobenou zátěž $50\ \Omega$. [6]

Antény pro měření rušivých signálů

Rušivé signály vyzařované zařízením do okolního prostoru na kmitočtech od 10 kHz do 6 GHz a výše jsou měřeny pomocí různých typů měřících antén. Měření rušivých elektromagnetických polí je významné zejména v oblasti vysokých kmitočtů (od 80 MHz výše), neboť realizace přímého měření rušivých napětí či proudů je na těchto kmitočtech velmi problematické až někdy zcela nemožné. Rušivé elektromagnetické pole se měří přístrojem pro měření rušení (měřícím přijímačem) doplněný vhodnou měřicí anténou.

Typ antény	Rozsah kmitočtů	Měřená složka pole
Aktivní elektricky stíněná smyčková anténa	9 kHz – 30 MHz	H
Aktivní prutová anténa (monopól)	9 kHz – 30 MHz	E
Laděné symetrické dipóly	30 MHz – 1000 MHz	E
Bikónická anténa	20 MHz – 300 MHz	E
Logaritmicko – periodická anténa	200 MHz – 3000 MHz	E
Kónická logaritmická anténa	200 MHz – 3000 MHz	E
Složená širokopásmová anténa	30 MHz – 2000 MHz	E
Trychtýřové antény	1 GHz – 40 GHz	E, H

Tab. 6. Přehled měřicích antén.

V nejnižším kmitočtovém pásmu 9 kHz až 150 kHz je většina rušivých jevů způsobována magnetickou složkou pole. K měření magnetického rušivého pole H_r se užívají v tomto kmitočtu feritové a především rámové (smyčkové) antény o maximálních rozměrech 60 x 60 cm.

Cívka je umístěna do kovového stínění pro vyloučení parazitního vlivu elektrické složky pole. Antény jsou buď pasivní, nebo aktivní vybavené měřicími zesilovači. Stejnými typy antén se měří rušivé magnetické pole v pásmu 150 kHz až 30 MHz. Rušivé elektrické pole E_r se zde měří vertikální prutovou (tyčovou) anténou, tzv. monopolem o doporučené délce 1 m.

Při měření v tzv. blízkém poli rušivého zdroje je měření elektrické intenzity E_r pomocí této antény nesprávné, neboť kromě vazby vysokofrekvenčním polem se zde uplatňuje i přímá kapacitní vazba mezi anténou a zdrojem rušení.

Antény používané pro elektromagnetické rušení

Druhy používaných antén

Aktivní elektricky stíněná smyčková anténa

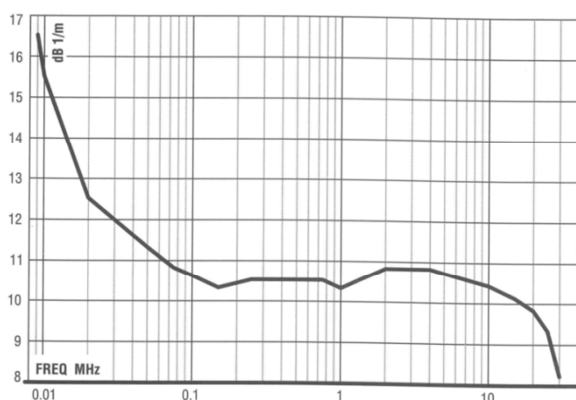
Ve frekvenčním rozsahu 9 kHz až 150 kHz je většina rušení způsobena magnetickou složkou pole → v podmínkách vzdáleného pole (vzdálenost antény od zdroje rušení je > než $\lambda/2\pi$) je poměr E a H dán impedancí **volného prostoru** $Z_0 = 120\pi$ (377 Ω). [3]

Elektrické parametry

Frekvence	Min.	10 kHz
	Max	30 MHz
Konektor	Typ	BNC
Impedance		50 Ω
Polarizace		Lineární
Výška		81,3 cm
Šířka		143,5 cm
Hmotnost		2,7 kg



Obr. 14. Smyčková anténa.



Obr. 15. Anténní faktor smyčkové antény.

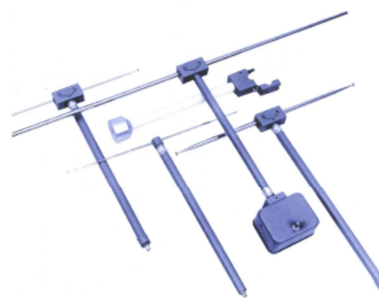
Laděné symetrické dipóly

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

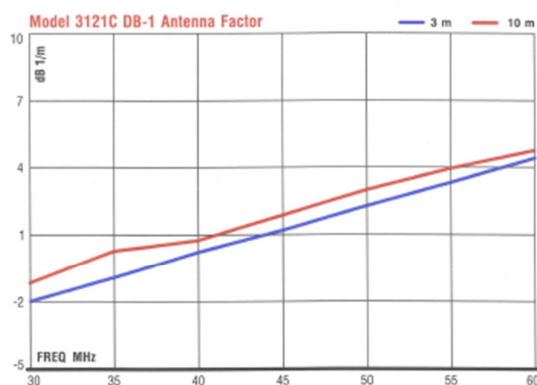
příliš vhodné z důvodu jejich pracnějšího nastavení, délka ramen dipólu musí být naladěna vždy na příslušný měřicí kmitočet, dipól musí být přizpůsoben k napájecí pomoci vhodného přizpůsobovacího obvodu a jeho připojení ke vstupu měřiče rušení musí být provedeno prostřednictvím symetrizačního obvodu. V důsledku nepřizpůsobení přechodu mezi symetrickou anténou a jejím kabelem vznikají v kabelu přijímací antény nesymetrické proudy, které vytvářejí elektromagnetické pole a ovlivňují měření. Symetrie se kontroluje u dipólů a bikónických antén. [3]

Elektrické parametry:

Frekvence	Min.	30 MHz
	Max	1 GHz
Konektor	Typ	N
Impedance		50 Ω
Polarizace		Lineární
Výška		55 cm
Šířka		5,2 m
Hmotnost		9,5 kg



Obr. 16. Laděné symetrizační dipóly.



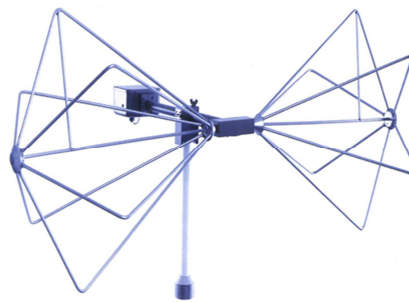
Obr. 17. Anténní faktor laděného symetrizačního dipólu.

Bikónická anténa

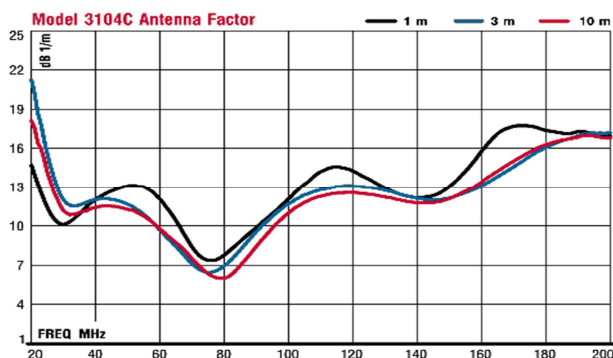
jsou širokopásmové antény užívané v ustálených kmitočtových pásmech 30–300MHz a 300–1000MHz – jejich výhodou je příznivá hodnota anténního faktoru v kmitočtovém rozsahu 30–100MHz. [6]

Elektrické parametry:

Frekvence	Min.	20 MHz
	Max	200 MHz
Konektor	Typ	N
Impedance		50 Ω
Polarizace		Lineární
Výška		81,3 cm
Šířka		143,5 m
Hmotnost		2,7 kg



Obr. 18. Bikónická anténa.



Obr. 19. Anténní činitel bikónické antény.

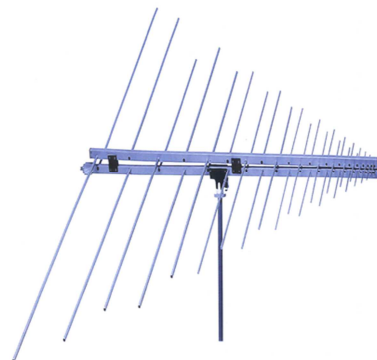
Logaritmicko - periodická anténa

je tvořena řadou protifázově napájených rezonančních monopólů, jejichž délky a vzájemné vzdálenosti jsou pro sousední prvky v pevném poměru daném podílem logaritmů jejich rezonančních kmitočtů → tvar vyzařovacího diagramu a hodnota vstupní impedance je ve většině pracovního pásma konstantní, reagují na elektrickou složku rušivého elektromagnetického pole s lineární polarizací (horizontální nebo vertikální). [3]

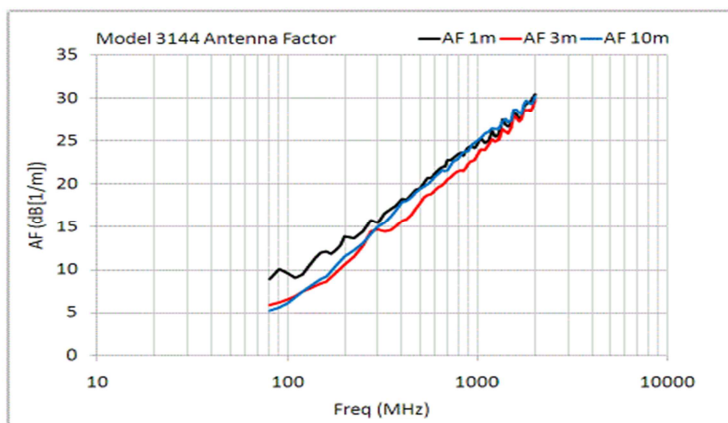
Logaritmicko-periodické antény jsou extrémně širokopásmové antény, jejichž vlastnosti se málo mění s kmitočtem; principem jejich činnosti je periodické opakování elektrických vlastností (impedančních a zářivých) s logaritmem kmitočtu. Ustálená kmitočtová pásma, pro která jsou tyto antény vyráběny, jsou 80 MHz – 1000 MHz, 180 MHz – 3000 MHz. [6]

Elektrické parametry:

Frekvence	Min.	80 MHz
	Max	2 GHz
Konektor	Typ	N
Impedance		50 Ω
Polarizace		Směrová
Výška		9,5 cm
Šířka		210,8 cm
Hmotnost		4,5 kg



Obr. 20. Logaritmicke - periodická anténa.



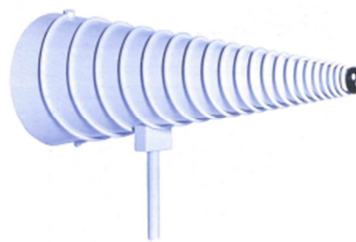
Obr. 21. Anténní činitel.

Kónická logaritmická anténa

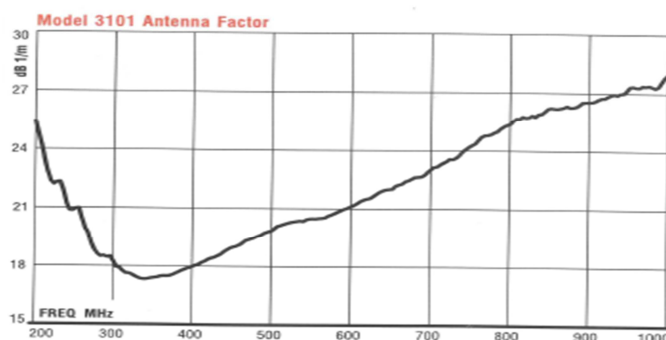
Je speciální typ širokopásmové antény. Na rozdíl od všech ostatních typů měřicích antén je určena pro příjem kruhově polarizovaného elektromagnetického pole → není vhodná pro testy EMC dle civilních norem IEC (předepisují testy s lineární polarizací). Řada testů EMC v oblasti vojenství (např. testy imunity dle amerických norem MIL-STD) je však založena na aplikaci kruhově polarizovaných vln. [3]

Elektrické parametry:

Frekvence	Min.	200 MHz
	Max	1 GHz
Konektor	Typ	N
Impedance		50 Ω
Polarizace		Kruhová
Výška		81,3 cm
Hmotnost		4,5 kg



Obr. 22. Kónicko - logaritmická anténa.



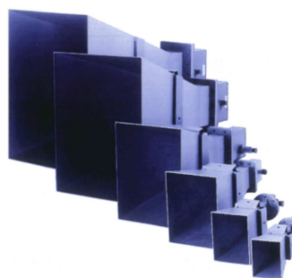
Obr. 23. Anténní faktor kónicko - logaritmické antény.

Trychtýřové antény

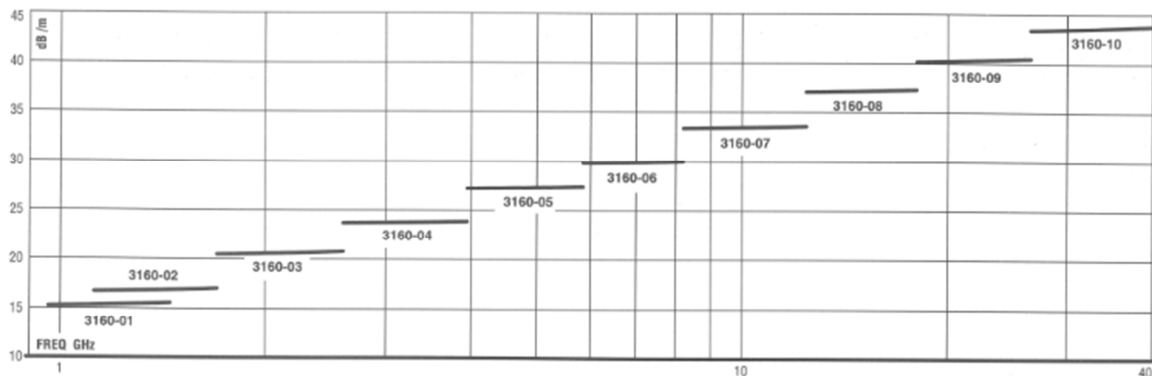
pyramidální kovové vlnovody) se využívají v GHz kmitočtových pásmech. Přestože lze některými konstrukčními úpravami rozšířit jejich pracovní kmitočtové pásmo, jsou trychtýřové antény svou podstatou relativně úzkopásmové. K pokrytí kmitočtů od jednotek do několika desítek GHz je proto třeba sada 8 až 10 antén. [3]

Elektrické parametry:

Frekvence	Min.	960 MHz
	Max	40 GHz
Konektor	Typ	N
Impedance		50 Ω
Polarizace		Lineární
Šířka		63,22 cm
Výška		103,25 cm
Hmotnost		25 kg



Obr. 24. Trychtýřová anténa.



Obr. 25. Antennní faktor trychtýřové antény.

Sondy blízkého pole

s frekvenčním rozsahem 100 kHz až 2 GHz jsou malé ruční antény užívané při vývoji a diagnostice elektronických zařízení, kdy je důležité sledovat nežádoucí vyzařování jednotlivých součástí a bloků přímo uvnitř vyvíjeného zařízení, a při kontrole elektromagnetické těsnosti stínících krytů. Měřicí sonda blízkého magnetického pole je obvykle tvořena malou smyčkou o průměru několika cm.

Základem měřicí sondy elektrického pole je volný konec středního vodiče koaxiálního kabelu o délce 6 ÷ 10 mm.

Měření pomocí měřicích sond blízkého pole není reprodukovatelné, výsledek závisí na mnoha neurčitých faktorech (míra přiblížení a úhel či natočení sondy vůči zdroji rušení apod.). Tato měření proto nejsou regulována žádnými normami. [3]



Obr. 26. Sondy blízkého pole.

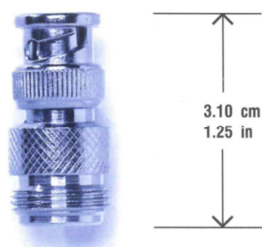
Koaxiálový kabel a BNC konektor

Parametry:

Frekvence	Min.	10 MHz
	Max	10 GHz
Příkon	Min.	3,7 W
	Max	37 W
Ztráty na 30,5 m délky kabelu	Min.	0,66 dB
	Max	47 dB



Obr. 27. Koaxiální kabel.



Obr. 28. Konektor BNC

Měřicí přijímač

Selektivní mikrovoltmetr se spojitým přeladováním v kmitočtovém rozsahu minimálně 9 kHz až 1 GHz (některé normy pro limity emisí určitých skupin zařízení však požadují měření na vyšších kmitočtech do 18 GHz nebo i vyšších), přijímač je vybaven různými typy detektorů (vrcholová, kvazivrcholová a střední hodnota), standardizovaná šířka mezifrekvenčního pásma měřiče. [3]

Každý snímač (senzor) rušivého signálu je připojen na vstup tzv. měřičího přístroje rušení. Tento měřič pak uskutečňuje vlastní měření výstupního rušivého napětí z výstupu snímače, jeho kvantitativní vyhodnocení a případné srovnání s mezemi vyzařování zkoušeného objektu podle příslušných norem. Pokud by měřené rušivé napětí mělo harmonicky časový průběh, bylo by možné k jeho měření použít běžný (radiový) přijímač pracující v lineárním režimu, k jehož výstupním svorkám by

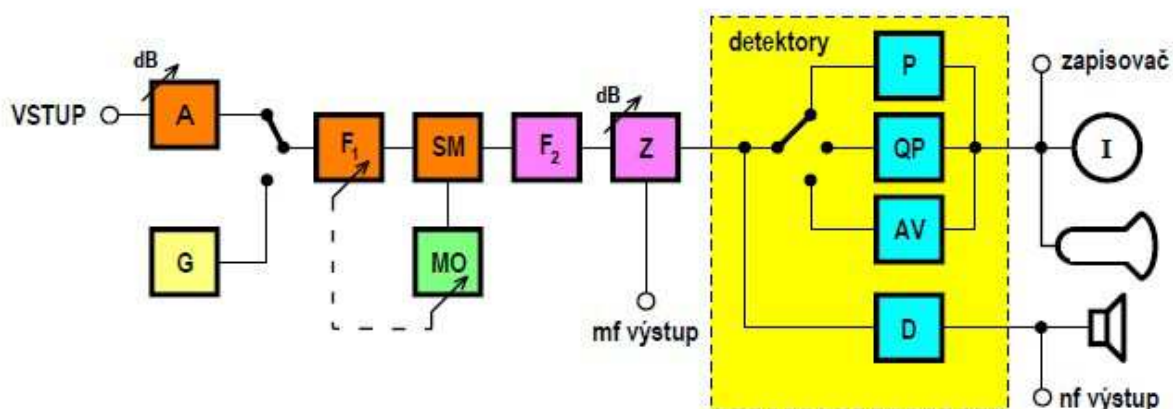
byl připojen vhodný indikátor např. nízkofrekvenční milivoltmetr. V praxi jsou však daleko častěji rušivé signály neharmonického průběhu, jejich kmitočtové spektrum obsahuje velké množství složek. Výsledky měření pak značně závisí na vlastnostech použitého měřiče (přijímače.), na jeho šířce pásma, na průběhu modulové a argumentové charakteristiky jeho vysokofrekvenční i nízkofrekvenční části, na elektrických a nabíjecích konstantách detektoru. V zájmu srovnatelnosti a reprodukovatelnosti měření musí být mezinárodně standardizovány. [4]

Obvyklý měřič elektromagnetického rušení (RFI meter) je koncipován jako speciální selektivní milivoltmetr na superheterodynním principu. Jeho vlastnosti jsou určeny příslušnými normami, hlavně ČSN EN 55016-1-1 ed. 2.

Na kvalitní měřič rušení jsou zde kladeny zejména tyto specifické požadavky:

- Možnost spojitého přeladování v širokém kmitočtovém rozsahu minimálně 9 *kHz* až 18 *GHz*, s výhledem k vyšším pásmům
- Vysoká citlivost a nízký vlastní šum pro možnost měřit i nízké úrovně rušivých napětí
- Velký dynamický rozsah (větší než 40 *dB*) a vysoká přebuditelnost umožňující v lineárním režimu měřit i vysoké úrovně rušivých napětí
- Různé typy detektorů pro různé způsoby vyhodnocení rušivých napětí v souladu s normami
- Výstupy, příp. obvody pro zvukovou a obrazovou analýzu a monitorování měřených signálů
- Kvalitní elektromagnetické stínění celého měřiče i jeho dílčích bloků pro dosažení jeho vysoké elektromagnetické odolnosti vůči vlastnímu i vnějšímu rušení. [4]

Blokové schéma typického měřiče rušení pro uvedené požadavky:



Obr. 29. Blokové schéma měřiče elektromagnetického rušení.

Velikost vstupního měřeného napětí je nejprve upravena v širokopásmovém děliči napětí (atenuátoru) *A*, poté signál prochází vysokofrekvenčním pásmovým filtrem *F₁* (preselektorem), který bývá často aktivní, tj. jde o laděný selektivní zesilovač. Po směšování se signálem místního oscilátoru *MO* ve směšovači *SM* prochází získaný mezifrekvenční signál o konstantním rozdílovém (mezifrekvenčním) kmitočtu mezifrekvenčním pásmovým filtrem *F₂* a několika stupňovým mezifrekvenčním zesilovačem *Z*. K jeho výstupu je připojen blok detektorů umožňující výběr z několika různých typů detektorů (viz dále). Celý měřič je vybaven několika výstupními indikátory: zvukovým (po demodulaci signálu v AM/FM demodulátoru *D*), obrazovým displejem a výstupním elektronickým μ Volt-metrem (indikátorem *I*). Důležité jsou i výstupy pro připojení vnějšího zapisovače, nahrávacího či jiného záznamového zařízení, číslicový záznam apod. Pro přesnou a současně operativní kalibraci měřiče je často přímo v něm zabudován kalibrační generátor *G* poskytující harmonický a pulsní kalibrační signál s přesnými elektrickými parametry.

Dalším přístrojem, který je v posledních letech často využíván pro měření EMI, je spektrální analyzátor. Jeho základní předností je rychlé vizuální zobrazení měřeného rušivého spektra na displeji, a tím získání celkového přehledu o elektromagnetickém rušení v daném kmitočtovém pásmu. Výhodou je obvykle i nižší cena. Kvalitní spektrální analyzátoři pro měření EMI – na rozdíl od analyzátorů pro obecné použití – však musí rovněž splňovat všechny hlavní požadavky normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 kladené na měřicí přijímače, tj. zejména šířku propustného

pásma, vstupní impedanci, impulsní odezvu, selektivitu, účinnost stínění a další. Protože spektrální analyzátoři jsou většinou širokopásmové (nejsou vybaveny vstupním preselektorem jako měřicí přijímače), nedosahují zdaleka tak velkého dynamického rozsahu měření a rovněž jejich citlivost je obvykle nižší než citlivost měřicích přijímačů superheterodynového typu. Tím dochází ke zkreslení až znehodnocení výsledků měření zejména impulsního rušení. Přední světoví výrobci elektronické měřicí techniky v poslední době kombinují výhodné vlastnosti obou přístrojů. Vznikají tak vysoce kvalitní měřicí přístroje se širokopásmovým rozmítáním kmitočtu a přesným zobrazením celého kmitočtového spektra, nebo naopak spektrální analyzátoři vybavené vstupním vysokofrekvenčním preselektorem schopné pracovat na diskretních kmitočtech s vlastnostmi plnohodnotného měřicího přijímače. [4]



Obr. 30. Vnější vzhled měřicího přijímače pro elektromagnetické rušení.

Technické údaje měřicího přístroje ESC17:

Frekvence

Rozsah 9 kHz - 3,6 GHz
 Frekvenční krok min. 1 Hz

Detektor

Špičkový detektor
 Kvazi-špičkový detektor
 Detektor střední hodnoty

Tab. 7. Technické údaje měřicího přístroje.

pásmo	rozsah kmitočtů	šířka propustného pásma měřiče rušení MR
A	9 ÷ 150 kHz	200 Hz
B	150 kHz ÷ 30 MHz	9 kHz
C	30 ÷ 300 MHz	120 kHz
D	300 kHz ÷ 1000 MHz	120 kHz
E	1 GHz ÷ 18 GHz	1 MHz

Tab. 8. Šířka pásma měřičů rušení dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2.

Pro získání jednoznačných, vzájemně srovnatelných a reprodukovatelných výsledků musí být šířky pásma měřičů rušení mezinárodně standardizovány. Hodnoty předepsané normou ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 jsou pro jednotlivá měřicí kmitočtová pásma uvedeny v Tab. 8.

Z obr. 31 *a*) i *b*) lehce výše můžeme též určit, jak lze uvedené signály jednoduše identifikovat. Budeme-li měnit šířku mezifrekvenčního pásma měřiče rušení (např. dle Tab. 8) bude údaj výstupního indikátoru měřiče zůstat konstantní, půjde-li o úzkopásmový rušivý signál. Bude-li se naopak údaj indikátoru při změně šířky pracovního pásma výrazně měnit, jedná se o širokopásmový signál (obr. 31 *b*) výše).

Základním rysem obvodové koncepce měřičího přijímače na obr. 29, je to, že v celém řetězci superheterodynu není zavedeno automatické vyrovnání citlivosti (AVC), neboť by tím byla narušena jeho linearita. Přitom přebuditelnost takového přijímače v lineárním režimu musí být vysoká (větší než 40 dB), aby bylo možné měřit rušivé signály v širokém rozmezí jejich velikostí. [4]

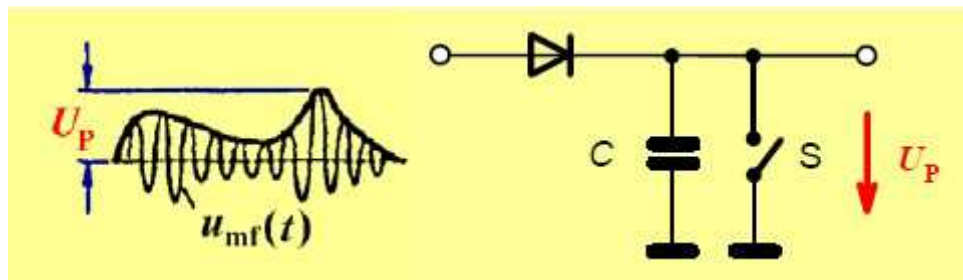
Jedním ze specifických rysů, jímž se měřiče rušení a spektrální analyzátoři EMI liší od selektivních mikrovoltmetrů pro běžná ve vysokofrekvenční technice, je volba různých druhů detektorů (viz obr. 29, Blokové schéma měřiče elektromagnetického rušení) a tedy indikace různých hodnot měřených signálů:

- Špičkové hodnoty, tzv. kvazi-špičkové hodnoty
- Střední hodnoty
- Příp. efektivní hodnoty

Detektory

Špičkový detektor

Výstupní napětí špičkového detektoru **P** (Peak detector) neboli detektoru vrcholové hodnoty je rovno maximální velikosti vstupního napětí, tedy maximální hodnotě obálky napětí na mezifrekvenčním výstupu měřiče rušení. Princip špičkového detektoru je nastíněn na obr. 32:

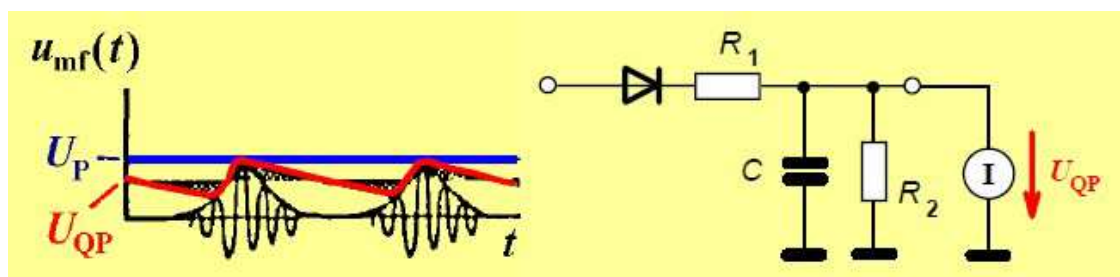


Obr. 32. Princip špičkového detektoru (detektor vrcholové hodnoty).

Dioda usměrňuje mezifrekvenční výstupní napětí $u_{mf}(t)$ a nabíjí kondenzátor C na maximální velikost napětí jeho obálky U_p , jíž toto napětí dosáhne v intervalu měření či v době trvání měřeného impulsu. Tuto hodnotu pak kondenzátor C udržuje tak dlouho, pokud není spínačem S vybit (manuálně či automaticky) po uplynutí intervalu měření, tj. doby potřebné k jejímu „načtení“ (zaznamenávání). Špičkový detektor má tedy velmi krátkou (nulovou) nabíjecí a velmi dlouhou (nekonečnou) vybíjecí časovou konstantu. Detektor proto reaguje rychle na růst velikosti obálky mezifrekvenčního signálu a udržuje na výstupu její maximální dosaženou hodnotu. Měření se špičkovým detektorem se užívá jako rychlé přehledové měření rušivých signálů v pásmu kmitočtu. [4]

Kvazi-špičkový detektor

Zatímco hodnota výstupního napětí špičkového detektoru závisí pouze na velikosti (obálky) rušivého vstupního napětí a není ovlivněna opakovacím kmitočtem rušivých impulsů, je hodnota výstupního napětí kvazi-špičkového detektoru QP (Quasi-Peak detector) úměrná napětově-časové ploše obálky vstupního mezifrekvenčního signálu a je tedy ovlivňována velikostí i opakovacím kmitočtem vstupních impulsů rušivého napětí.



Obr. 33. Principiální zapojení kvazi-špičkového detektoru.

kmitočet	10 ÷ 150 kHz	0,15 ÷ 30 MHz	30 ÷ 1000 MHz
šířka mf. pásma	200 Hz	9 kHz	120 kHz
nabíjecí časová konstanta R_1C	45 ms	1 ms	1 ms
vybíjecí časová konstanta R_2C	500 ms	160 ms	550 ms
časová konstanta mechanismu měřidla	160 ms	160 ms	100 ms

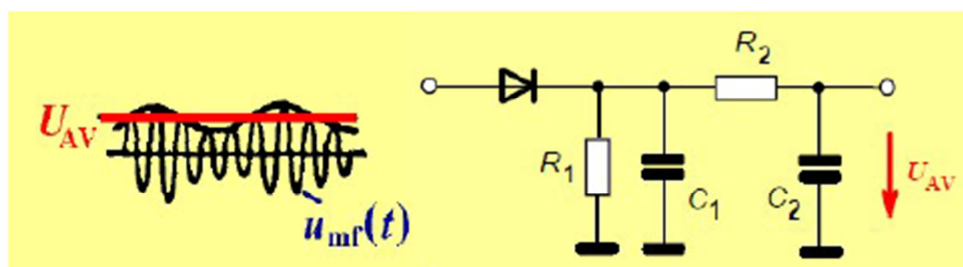
Tab. 9. Časové konstanty kvazi-špičkového detektoru dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2.

Efektu kvazi-špičkové detekce se dosahuje vhodnou volbou nabíjecí a vybíjecí časové konstanty R_1C a R_2C tak, že kondenzátor C se mezi sousedními impulzy vždy částečně vybije. Výstupní napětí U_{QP} kvazi-špičkového detektoru je proto vždy menší než odpovídající špičková (vrcholová) hodnota U_P a měření s tímto detektorem je „pomalejší“ (tj. musí trvat delší dobu) než měření se špičkovým detektorem.

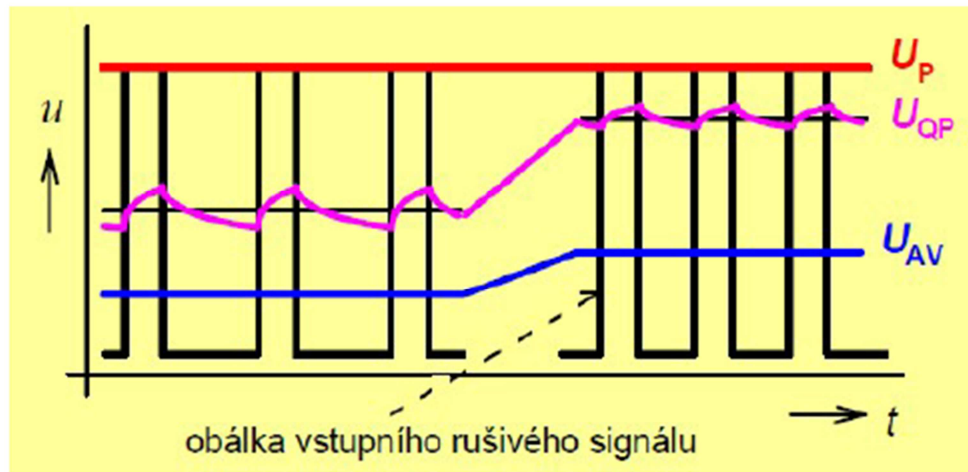
Aby kvazi-špičková měření byla jednotná, jsou hodnoty nabíjecích a vybíjecích konstant QP detektoru normalizovány. Hodnoty těchto konstant dle normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2. Jsou uvedeny v tabulce Tab. 9., a to v závislosti na kmitočtovém pásmu měření, a tedy i na šířce mezifrekvenčního pásma měřiče rušení (viz Tab. 8). Na velikost výsledného napětí U_{QP} má vliv i časová konstanta mechanického ústrojí výstupního indikátoru (měřidla) I . [4]

Detektor střední hodnoty

Výstupní napětí detektoru střední hodnoty AV (Average detector) čili tzv. průměrujícího detektoru je rovno aritmetické střední hodnotě obálky vstupního (rušivého) mezifrekvenčního napětí $u_{MF}(t)$. zdroj skriptu



Obr. 34. Detektor střední hodnoty.



Obr. 35. Odezvy různých druhů detektorů na signály s impulzní obdélníkovou obálkou o různé opakovací frekvenci.

Podobně jako u špičkového detektoru dioda usměrňuje mezifrekvenční napětí a nabíjí kondenzátor C_1 na okamžitou hodnotu obálky tohoto napětí. Díky poměrně malé vybíjecí hodnotě R_1 sleduje přitom napětí na kondenzátoru C_1 velikost obálky vstupního signálu. Napětí obálky je dále „vyhlazeno“ filtračním členem R_2C_2 , takže napětí na kondenzátoru C_2 se ustálí na aritmetické střední hodnotě obálky vstupního signálu. Detektor se užívá především k měření úzkopásmových rušivých signálů a není příliš vhodný pro měření impulzního širokopásmového rušení. [4]

Elektromagnetická odolnost - EMS

Obrovský rozmach sítí pozemních i družicových rozhlasových a TV vysílačů a zejména mohutný celosvětový rozvoj systémů mobilních radiokomunikačních služeb, radiotelefonů, občanských stanic pracujících na kmitočtech 0,8 GHz až 3 GHz, vedl k tomu, že výrazně v posledních letech nabývá na významu posuzování elektromagnetické odolnosti všech elektronických zařízení vůči vlivu rušivých elektromagnetických polí.

Protože tyto systémy nelze vypnout a nelze tedy ani odstranit jejich rušivé působení na jiná zařízení, je jedinou cestou zvyšovat elektromagnetickou odolnost elektronických zařízení vůči vysokofrekvenčním polím, s nimiž tyto systémy pracují.

Vysokofrekvenční neboli rádiové rušení leží podle Radiokomunikačního řádu v pásmu od 10 kHz do 400 GHz. Ke zdrojům rádiového rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, neboť jejich rušivé signály sahají prakticky vždy až do těchto kmitočtových oblastí.

Harmonická elektromagnetická pole o "nízkých" kmitočtech 10 kHz až 230 MHz se přivádějí do zkoušeného zařízení pomocí vazebních obvodů kapacitního či induktivního charakteru, případně jsou injektována do přívodních kabelů pomocí kapacitních kleští, viz ČSN EN 61000-4-6.

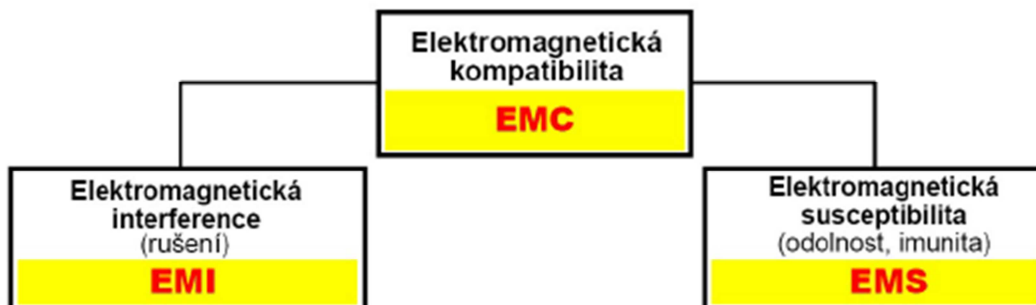
na kmitočtech vyšších než 26 MHz se nicméně dává přednost simulaci rušivých elektromagnetických polí vyzařováním anténami - tyto zkoušky odolnosti v nejčastěji využívaném kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 2000 MHz popisuje česká norma ČSN EN 61000-4-3.

Kmitočtové pásmo: 80 MHz - 1000 MHz	
Úroveň	Intenzita zkušebního pole V/m
1	1
2	3
3	10
x	zvláštní

Tab. 10. Zkušební úrovně vztahující se na všeobecné účely.

Poznámka: úrovně odpovídají efektivním hodnotám intenzity pole harmonického nemodulovaného signálu.

Elektromagnetická odolnost (imunita) či citlivost (susceptibilita) EMS tvoří druhou oblast celkové problematiky EMC (obr. 36).



Obr. 36. Základní členění problematiky EMC.

Protože nelze odstranit všechny skutečné či potenciální zdroje rušivých signálů (již proto ne, že řada z nich jsou signály funkční užitečné), je třeba zajistit, aby technická zařízení správně fungovala i za jejich přítomnosti, tj. aby zařízení byla dostatečně odolná vůči všem druhům rušení, která při jejich činnosti v daném čase a prostoru přicházejí v úvahu.

Z hlediska celkové EMS rozlišujeme interní a externí elektromagnetickou odolnost technického systému. Interní elektromagnetická odolnost je odolnost systému vůči rušivým zdrojům nacházejícím se uvnitř vlastního systému, externí elektromagnetická odolnost pak charakterizuje odolnost systému vůči vnějším zdrojům elektromagnetického rušení. Vymezení pojmů vnitřní a vnější zdroje rušení je však v těchto definicích jen relativní a závisí na vymezení zkoumaného systému. Z tohoto hlediska lze rozlišit tři druhy systémů.

První typ představují rozlehlé (distribuované) systémy, jejichž jednotlivé části (subsystémy) jsou od sebe geograficky vzdálené. Jednotlivé subsystémy mohou při provozu vnášet do signálových cest celého rozlehlého systému rušivé signály, jejichž působení se zkoumá v rámci zkoušek vnitřní (interní) elektromagnetické odolnosti systému. Vnější (externí) odolnost rozlehlých systémů tvoří zejména odolnost vůči atmosférickým elektromagnetickým vlivům, příp. vůči rušení vznikajícímu v napájecí energetické síti. Typickým příkladem rozlehlého elektronického systému jsou např.

systémy dálkového zpracování dat zahrnující dálková a místní vedení, přenosová zařízení, ústředny, datové měniče, koncová zařízení a další subsystemy. [7]

Druhým typem jsou lokální (místní) systémy, jejichž subsystemy jsou dislokovány v rámci jednoho místního areálu, budovy či místnosti. Zdrojem rušení zde jsou kromě vlastních signálových a napájecích rozvodů i další elektrické subsystemy v daném areálu (technologická zařízení, výtahy, osvětlení, ostatní stroje a přístroje apod.). Příkladem lokálních systémů jsou výpočetní střediska, informační systémy podniků, dispečerská pracoviště, řídicí centra apod.

Posledním třetím typem elektronických systémů jsou systémy přístrojového typu, které existují jako individuální kompaktní celky. Sem patří všechny přístroje spotřební elektroniky, elektrické a elektronické přístroje pro domácnost, měřicí přístroje, elektronické počítače apod.

U všech těchto systémů zkoumáme vždy jak vnitřní, tak i jejich vnější elektromagnetickou odolnost. Existuje velké množství různých zdrojů vnějšího elektromagnetického rušení. Proto při zkoumání externí elektromagnetické odolnosti systému uvažujeme obvykle jen některé, a to takové, které jsou v dané situaci nejpravděpodobnější a potenciálně nejnebezpečnější. Mez externí odolnosti vyšetřovaného systému je pak stanovena pro každý vybraný typ rušení zvlášť, a to v závislosti na druhu elektromagnetického prostředí, v němž systém pracuje. [7]

Interní elektromagnetická odolnost systémů přístrojového typu závisí na vlastnostech a technologické skladbě jednotlivých subsystemů, jako jsou:

- volba obvodového řešení a rozložení pasivních a aktivních elektronických prvků
- návrh desek plošných spojů, uspořádání spojů a jejich kabeláže
- volba typu napájení, vzájemné rozložení napájecích a signálových bloků přístroje
- návrh vnitřního stínění a zemnění
- volba a konstrukce stykových prvků na rozhraních k vnějším systémům apod.

Pro posouzení celkové elektromagnetické odolnosti systému platí tři základní systémová pravidla:

- Interní elektromagnetická odolnost systému je závislá na interní odolnosti jeho subsystémů.
- Výsledná interní elektromagnetická odolnost elektronického systému je určena odolností jeho nejslabšího článku, tj. subsystému s nejnižší vlastní elektromagnetickou odolností.
- Výsledná externí elektromagnetická odolnost systému může záviset na jeho interní odolnosti, neboť může dojít ke skládání rušivých vlivů a tím ke snížení celkové odolnosti systému. [7]

Kritéria elektromagnetické odolnosti

Při zjišťování elektromagnetické odolnosti určitého technického systému je třeba vždy předem znát či stanovit kritérium jeho elektromagnetické odolnosti, tj. definované meze narušení jeho funkcí. Obecně mohou být tyto meze definovány kvantitativně nebo kvalitativně.

Kvantitativní mez odolnosti je stanovena jako dosažení určité hodnoty (určitých hodnot) vybrané elektrické veličiny (veličin). Používá se zejména v etapě vývoje elektronického zařízení, kdy zjišťujeme velikost a tvar případných rušivých signálů ve vybraných bodech zapojení. Analyticky či empiricky pak stanovíme takovou hodnotu sledované veličiny, která by např. u číslicového zařízení právě ještě neměla vyvolat nežádoucí změnu užitečného signálu logických obvodů (tj. nežádoucí změnu jejich stavu). Takto určená hodnota je pak považována za kritérium elektromagnetické odolnosti pro všechna zařízení daného typu. [8]

Pro běžného uživatele elektronického zařízení se však důležitější a přijatelnější systémový přístup založený na stanovení kvalitativního kritéria elektromagnetické odolnosti, jakožto posouzení změny provozního stavu či ovlivnění funkčnosti daného zařízení.

Funkční porucha je přitom definována jako změna provozní způsobilosti zkoušeného zařízení, tj. zhoršení jeho funkce během působení rušivého signálu (tj. během zkoušky odolnosti) či jako důsledek rušení (důsledek zkoušky odolnosti), který trvá po odeznění rušivého signálu (po ukončení zkoušky odolnosti). V praxi se nejčastěji rozlišuje pět základních funkčních kritérií:

Funkční kritérium A - všechny funkce zařízení či systému jsou vykonávány správně dle specifikace jak během zkoušky, tak i po jejím ukončení. Stručně řečeno: elektromagnetické rušení nemá a nezanechalo žádný vliv na chod zařízení či systému.

Funkční kritérium B - zařízení/systém pracuje dle specifikace, některé jeho části však během zkoušky vybočí z povolených tolerancí (nenastane však změna provozního stavu zařízení či změna dat v paměti). Po skončení zkoušky se všechny funkce musí automaticky (tj. bez zásahu operátora) obnovit v původním rozsahu a kvalitě a ve vymezených tolerancích. V tomto případě elektromagnetické rušení kvalitativně změní chod zařízení či systému, po jeho odeznění se však správný chod zařízení automaticky obnoví.

Funkční kritérium C - jedna či více funkcí zařízení či systému během zkoušky (během rušení) není plněna vůbec či správně dle specifikace. Po skončení zkoušky se všechny funkce musí automaticky (tj. bez zásahu operátora) obnovit v původním rozsahu a kvalitě. Elektromagnetické rušení tedy naruší chod zařízení, po jeho odeznění se plná funkčnost zařízení automaticky obnoví.

Funkční kritérium D - jedna či více funkcí zařízení či systému během zkoušky (během rušení) není plněna vůbec či správně dle specifikace. Po skončení zkoušky se funkce zařízení neobnoví automaticky, ale musí být obnovena (jednoduchým) zásahem operátora (uživatele) dle návodu k použití zařízení. Rušení tedy naruší chod zařízení, po jeho odeznění je nutno plnou funkčnost zařízení obnovit zásahem operátora.

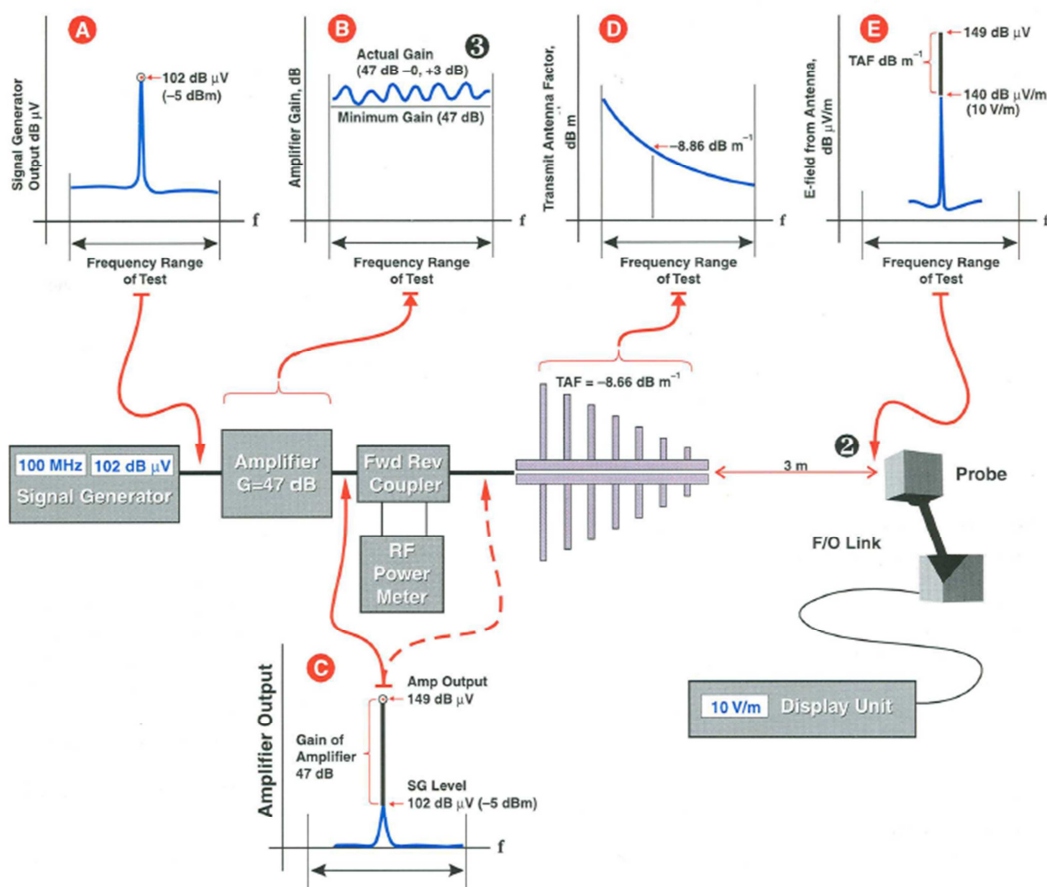
Funkční kritérium E - jedna či více funkcí zařízení či systému během i po skončení zkoušky (během i po ukončení působení rušivého signálu) není plněna správně dle specifikace. Všechny funkce zařízení lze následně obnovit jen profesionálním zásahem, tj. opravou či výměnou částí zařízení. Elektromagnetické rušení zde tedy narušilo chod zařízení, po jeho odeznění lze plnou funkčnost zařízení obnovit jen opravou. [9]

Výsledkem funkčního (kvalitativního) testování odolnosti tedy není změřená exaktní veličina, ale posouzení pokračující funkčnosti zařízení po provedené zkoušce. Předchozí obecné definice funkčních kritérií je samozřejmě třeba pro každé jednotlivé zařízení přesněji specifikovat, tj. upřesnit charakter a druh jednotlivých poruch, příp. ztrát funkce v jednotlivých stavech *A*, *B*, *C*, *D* či *E*.

Poznamenejme, že uvedených pět funkčních kritérií elektromagnetické odolnosti je plně využíváno jen v některých aplikačních oblastech EMC. Důvodem je zejména praktická obtížnost vzájemně rozlišit a posoudit, které kritérium dané zařízení při zkoušce splňuje. Např. je velmi obtížné (a často nemožné) rozlišit funkční kritérium *B* (vybočení funkce zařízení ze specifikované tolerance) a *C* (ztráta funkce zařízení), a to obojí během trvání zkoušky (během trvání rušení). Rušivý signál (testovací signál během zkoušky) může totiž na zařízení působit jen velmi krátkou dobu, během níž je posouzení funkčního stavu značně problematické.

V kmenové normě ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 jsou proto zavedena jen následující tři funkční kritéria *A*, *B* a *C*. Kritérium *A* v této normě je identické jako předchozí funkční kritérium *A*, kritérium *B* je identické jako předchozí funkční kritérium *B* a kritérium *C* zde slučuje předchozí funkční kritéria *C* a *D*. Trvalá porucha zařízení či systému není normou ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 považována za funkční kritérium elektromagnetické odolnosti (tedy neexistuje zde funkční kritérium *E*). [8]

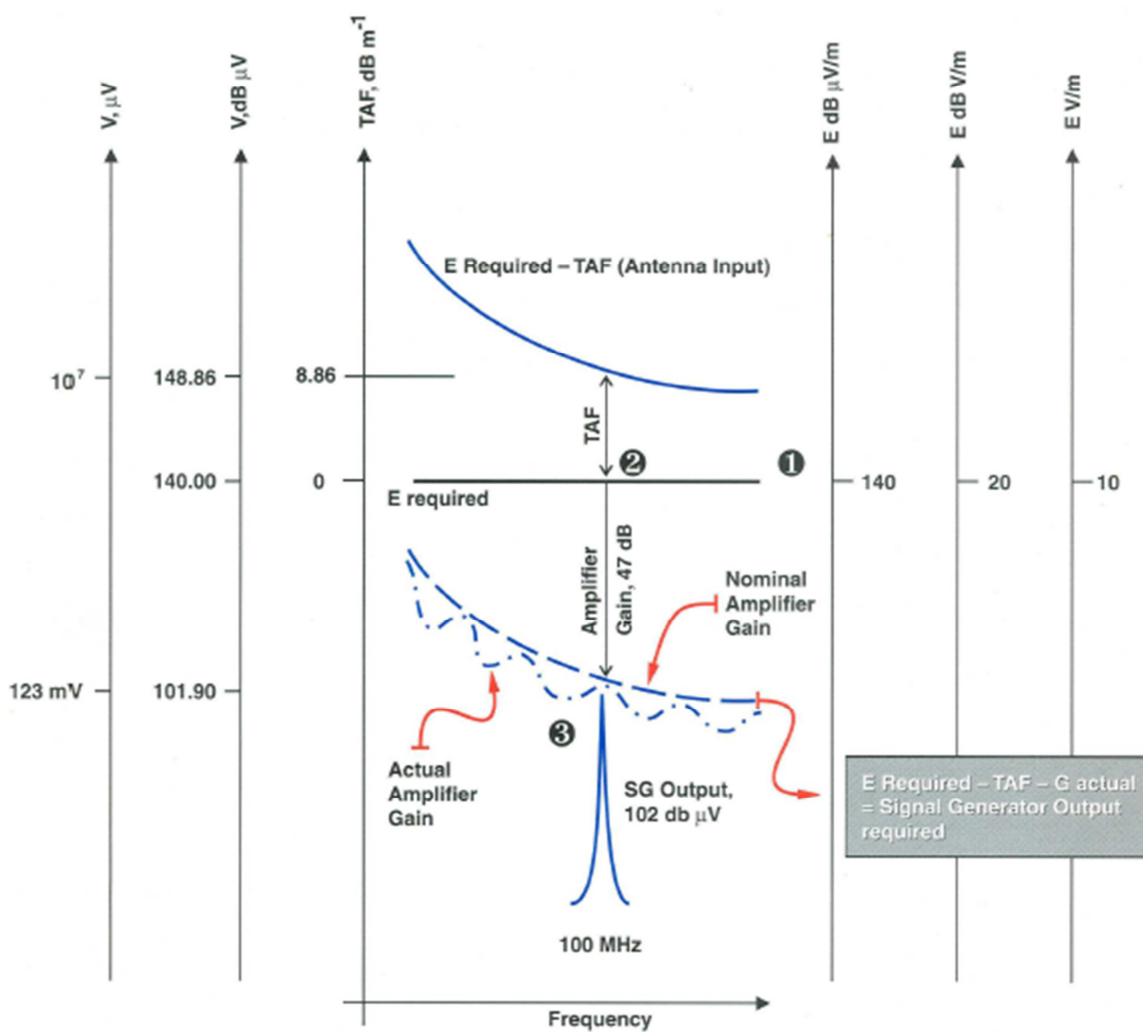
Měřicí řetězec



Obr. 37. Blokové zapojení při měření elektromagnetické odolnosti.

Popis blokového zapojení:

- *A* výstup signálového generátoru.
- *B* frekvenční závislost zisku zesilovače.
- *C* výstup signál. gen. + zisk zesilovače = úroveň signálu na vstupu do antény.
- *D* vysílací faktor antény TAF.
- *E* intenzita vyzařovaného pole = vstupní signál do antény + TAF. [5]



Obr. 38. Grafické zobrazení úrovně testovacího signálu.

Popis úrovně testovacího signálu:

- 1 - Požadovaná intenzita pole 10 V/m ($=20 \text{ dBV/m} = 140 \text{ dBmV/m}$).
- 2 - Na 100 MHz je $TAF = -8,66 \text{ dB}$ tedy U_{in} vstupní do antény bude:
 $140 - (-8,66) = 148,86 \text{ dBmV}$.
- 3 - Pro 100 MHz na výstupu signálového generátoru bude:
Vstupní U_{in} do antény + zisk zesílení = $148,86 - 47 = 101,86 \text{ dBmV} = 123 \text{ mV}$.

Výstupní úroveň je dána:

$$E [\text{dB}\mu\text{V}] = SG_{out} [\text{dB}\mu\text{V}] + AG[\text{dB}] + TAF [\text{dBm}^{-1}], \quad (23)$$

kde: $E [\text{dB}\mu\text{V}]$ je měřené E-pole

$SG_{out} [\text{dB}\mu\text{V}]$ je výstupní signál generátoru

$AG [\text{dB}]$ je zisk

$TAF [\text{dBm}^{-1}]$ je vysílací anténní faktor

Odvození vysílacího anténního faktoru TAF:

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

$$TAF = \frac{E_t}{U_t}, \quad (24)$$

$$\text{nebo v logaritmické míře } TAF[\text{dBm}^{-1}] = E_t [\text{dBVm}^{-1}] - U_t[\text{dBV}]. \quad (25)$$

Odvození vychází z Frissovy přenosové rovnice:

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2}, \quad (26)$$

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. [3]

Ve vztahu tedy neuvažujeme efektivní aperturu přijímací antény:

$$A_{er} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}. \quad (27)$$

Přenosová rovnice pak má tvar:

$$P_d = \frac{G_t P_t}{(4\pi R)^2}, \quad (28)$$

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:

$$P_t = \frac{U_t^2}{Z}. \quad (29)$$

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

$$P_d = \frac{E^2}{120\pi}. \quad (30)$$

Dosažením vztahu (28) do vztahu (30) a dosažením vztahu (29) za P_t dostaneme:

$$TAF = \frac{E}{U_t} = \frac{1}{R} \times \frac{\sqrt{30G_t}}{\sqrt{Z}} = \frac{1}{R} \sqrt{0,6G_t}, \text{ pro } Z = 50\Omega. \quad (31)$$

V decibelech:

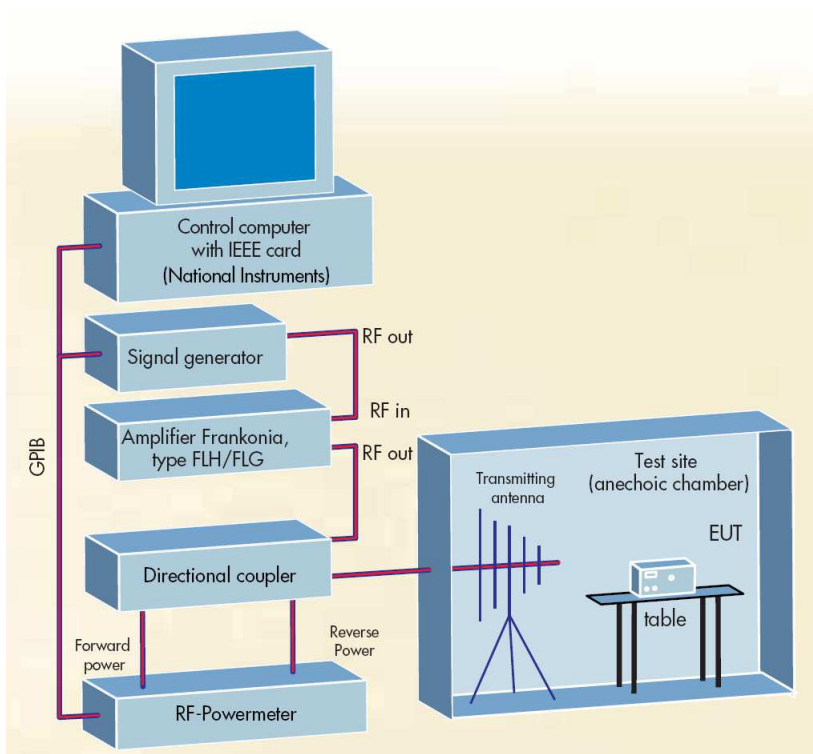
$$TAF [dBm^{-1}] = 10 \log G_t - 2,22 - 20 \log R(m), \quad (32)$$

$$TAF [dBm^{-1}] = G_t[dB] - 2,22 - 20 \log R, \quad (33)$$

$$AF [dBm^{-1}] = 19,8 - 20 \log \lambda[m] - 10 \log G_r = 20 \log f [MHz] - G_r[dB] - 29,79, \quad (34)$$

$$\text{pak } TAF = 20 \log f - AF - 32 \text{ v kalibrované vzdálenosti } R. \quad (35)$$

Testování odolnosti



Obr. 39. Zkušební sestava při testu odolnosti proti vysokofrekvenčnímu rušení.

Při 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 zařízení, a to při obou polarizacích testovacího pole.

Je-li plocha některé čelní stěny zařízení větší než kalibrovaná plocha homogenního pole $1,5 \times 1,5 \text{ m}$, 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]

Vysokofrekvenční generátor

Vysokofrekvenční generátor pokrývající žádané kmitočtové pásmo s možností amplitudové modulace sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 % (obr. 40). Generátor je vybaven ručním a automatickým laděním (rozmítáním kmitočtu) přes celé pracovní

kmitočtové pásmo s rychlostí $1,5 \times 10^{-3}$ dekády/s nebo nižší. Výstup generátoru může být opatřen filtrem typu dolní, příp. pásmová propust pro potlačení vyšších harmonických složek generovaného signálu.



Obr. 40. Vysokofrekvenční generátor.

Širokopásmový výkonový zesilovač k dosažení patřičného výkonu zkušebnímu signálu, a to jak nedomulovaného, tak i modulovaného.

Vysílací směrová anténa, příp. několik antén vyzařujících zkušební elektromagnetickou vlnu. Lze použít všechny antény používané k měření rušivých polí s přihlédnutím k jejich výkonové zatížitelnosti, tj. schopnosti vyzařit vysoký výkon k dosažení předepsané úrovně pole v místě zkoušeného objektu. Obvyklými typy jsou bikónická (obr. 18.) a logaritmicko-periodická anténa (obr. 20.) příp. jiné typy antén s lineární polarizací.

Elektrické filtry zapojené ve všech vstupech a výstupech kabelů a vedení do zkušební komory.

Pomocná zařízení ke kontrole a vyhodnocování funkčnosti zkoušeného zařízení, příp. k zajištění dalších funkcí během zkoušky. Tato zařízení jsou umístěna vně absorpční stíněné komory a do jejího vnitřního prostoru bývají navázána pomocí optočlenů či optických kabelů.

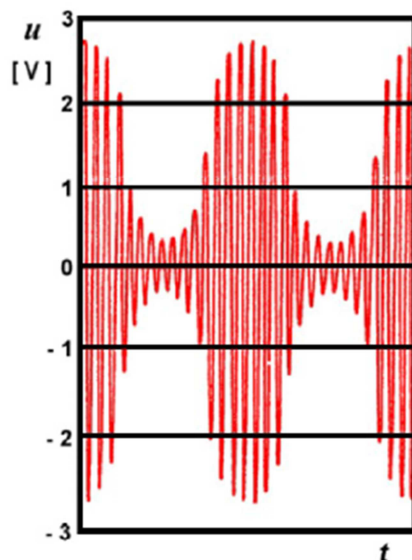
Stanoviště

Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím

V posledních deseti letech výrazně nabývá na významu posuzování elektromagnetické odolnosti všech elektronických zařízení vůči vlivu rušivých elektromagnetických polí. Tato skutečnost je dána současným obrovským rozmachem sítí pozemních i družicových rozhlasových a TV vysílačů a zejména mohutným celosvětovým rozvojem systémů mobilních radiokomunikačních služeb, radiotelefonů, občanských stanic apod. Protože tyto systémy nelze samozřejmě vypnout a nelze tedy ani plně odstranit jejich rušivé působení na jiná zařízení, je jedinou cestou zvyšovat elektromagnetickou odolnost elektronických zařízení vůči vysokofrekvenčním polím, s nimiž tyto systémy pracují. Ze všech těchto důvodů jsou zkoušky odolnosti vůči vyzařovaným polím předmětem mimořádného zájmu řady specialistů z oblasti EMC.

Kmitočtový rozsah zkušebních harmonických signálů pro uvedený typ zkoušek odolnosti je velmi 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 kapacitního či induktivního charakteru. Případně jsou injektována do přívodních kabelů pomocí kapacitních kleští. Přestože jsou tyto 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.

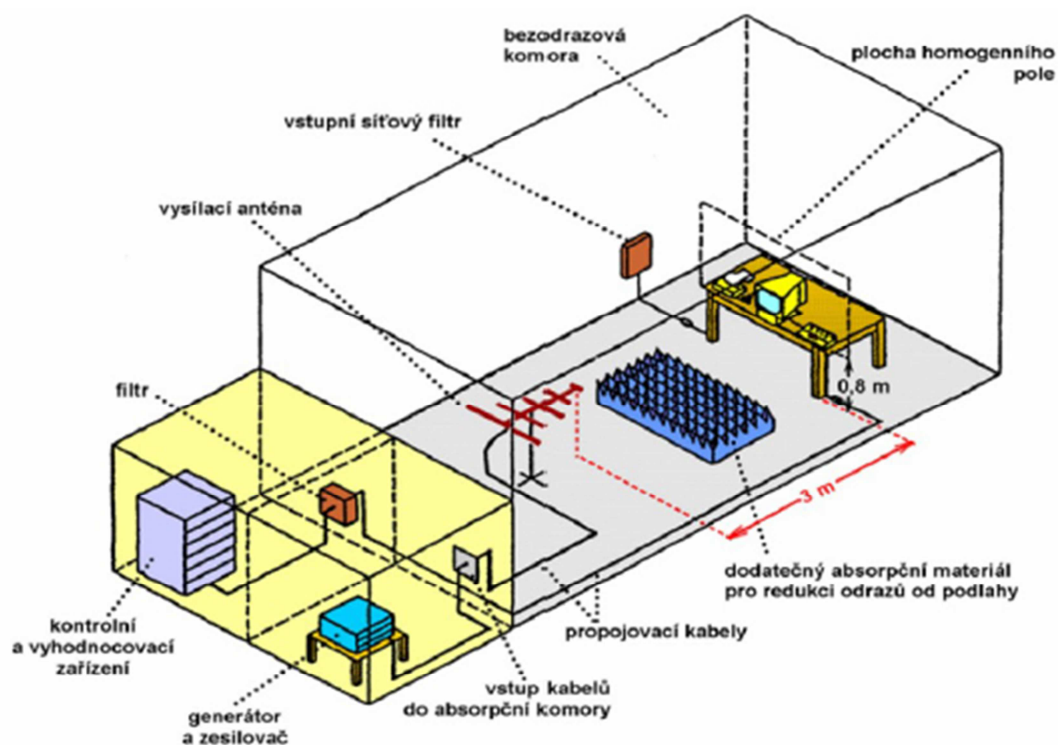
Uvedená norma předepisuje v pásmu 80 až 2000 MHz zkušební úrovně intenzity elektrického pole 1, 3, 10 a 30 V/m, příp. vyšší dle požadavků výrobce. Úrovně odpovídají efektivním hodnotám intenzity pole harmonického nemodulovaného signálu. Pro zkoušku odolnosti je však tento signál amplitudově modulován do hloubky 80 % harmonickým napětím 1 kHz. Časový průběh zkušebního vysokofrekvenčního signálu (zkušebního pole) je na obr. 41.



Obr. 41. Průběh zkušebního signálu s 80 % AM (nemodulovaný signál má efektivní hodnotu 1 V).

Tento průběh simuluje skutečné rušivé vysokofrekvenční signály, které jsou vždy rovněž určitým způsobem modulovány. V normě ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 je navíc ukázáno, že zvolený typ modulace (80 % AM) plně vyhovuje pro posouzení odolnosti zařízení i vůči jiným rušivým vysokofrekvenčním signálům, např. s pulzní amplitudovou modulací, PCM a dalšími typy. Amplitudová modulace vlnou 1 kHz je realizačně jednoduchá, univerzální a co do výsledků zkoušek odolnosti alespoň tak přísná jako jiné typy modulací, např. pulzních.

Základním principem zkoušek odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli je ozařování zkoušeného objektu příslušnými úrovněmi pole pomocí vhodných antén. Protože potřebná intenzita buzených zkušebních polí dosahuje až několika desítek V/m při kmitočtech sahajících do oblasti GHz pásem, doporučuje se měření přednostně provádět ve stíněných absorpčních prostorech. Tím se jednak odstraní vliv vnějších polí na zkoušený objekt, jednak se chrání obsluhující personál a blízká elektronická měřicí a vyhodnocovací zařízení před vlivem silného vysokofrekvenčního zkušebního signálu. Tato zařízení se zásadně umísťují do samostatné elektromagneticky stíněné místnosti vně vlastní měřicí absorpční komory. Příklad profesionálního zkušebního pracoviště je uveden na obr. 42. [10]

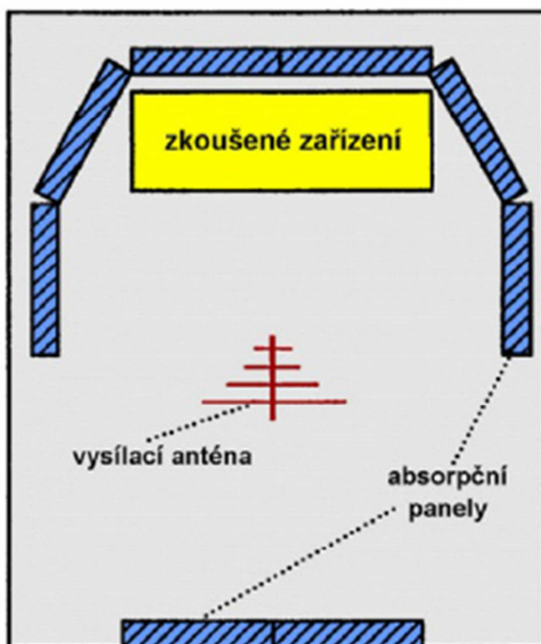


Obr. 42. Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzařovanému vysokofrekvenčnímu poli (absorpční obložení stropu a stěn není naznačeno).

Při vlastním měření je zkoušené zařízení 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 ji realizovat, je nejmenší přípustná vzdálenost 1 m. Rovněž vzdálenost zkoušeného objektu od stěn měřicí komory by měla být větší než 1 m.

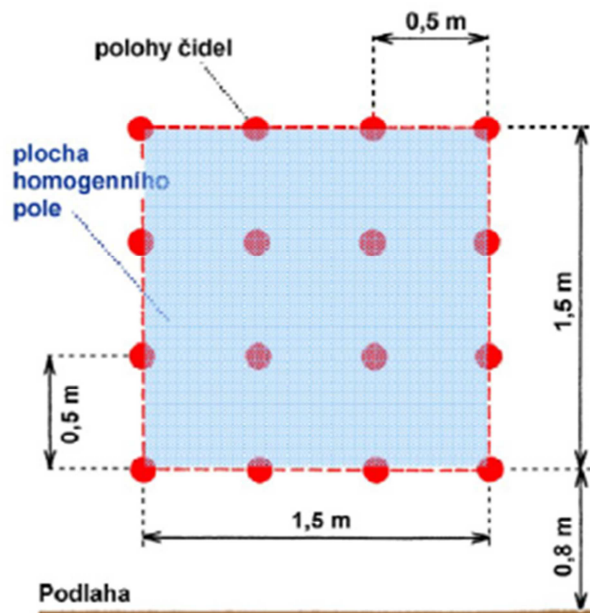
Vzhledem k vysoké ceně plně bezodrazových širokopásmových komor se praktické testy elektromagnetické odolnosti často realizují ve zkušebnách, které nejsou absorpčním materiálem obloženy úplně, ale jen částečně (tzv. částečně bezodrazové komory), tedy jen stěny a strop, nikoli podlaha. Pro utlumení odrazů od podlahy lze pak použít dodatečné absorbéry např. dle obr. 42.; jejich nejvhodnější polohu je nutno stanovit experimentálně. Stejně je nutno postupovat při spíše výjimečném provádění testů odolnosti v prostoru, který není vůbec vybaven absorpčními obklady stěn. V tomto případě je nutno obložit bezprostřední okolí zkušebního místa panely z absorpčního materiálu a tím alespoň částečně zajistit splnění normou stanovených

podmínek měření a též dosáhnout přijatelné ochrany okolí měřicího místa vůči silnému generovanému elektromagnetickému poli. Příklad je na obr. 43. [11]



Obr. 43. Provizorní zajištění bezodrazovosti zkušebního prostoru absorpčními panely.

Pro dosažení správných a reprodukovatelných výsledků zkoušek odolnosti je nutno zajistit, aby intenzita zkušební elektrického pole v celém objemu zkoušeného objektu měla normou danou konstantní velikost, a to v celém pracovním kmitočtovém pásmu. Zkoušený objekt by tedy měl být ozařován homogenním polem o známé 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 ed. 3 se kalibrace provádí nemodulovaným harmonickým signálem, a to měřením velikosti generovaného pole v tzv. ploše homogenního pole. Jak je zřejmé z obr. 42., jde o pomyslnou vertikální plochu o velikosti $1,5 \times 1,5 \text{ m}$ ve výšce $0,8 \text{ m}$ nad podlahou. Jsou-li uvažovány zkoušky menších zařízení, může být plocha homogenního pole menší, nesmí však klesnout pod $0,5 \times 0,5 \text{ m}$. 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. 44. [11]



Obr. 44. Plocha homogenního pole dle ČSN EN 61000-4-3 ed. 3. [11]

Pole v této ploše je považováno za homogenní, kolísá-li jeho měřená velikost o méně než ± 3 dB na 75 % plochy, tj. aspoň ve 12 z celkových 16 měřicích bodů dle obr. 44. Pro minimální přípustnou plochu homogenního pole $0,5 \times 0,5$ m musí být v této toleranci měření ve všech 4 měřicích bodech. Vysokofrekvenční výkon P_{Vkal} dodávaný do vysílací antény je při kalibraci udržován na konstantní hodnotě, při níž je měřená kalibrační intenzita pole E_{kal} v ploše homogenního pole mezi 3 a 10 V/m. Ze známého výkonu P_{Vkal} a měřené intenzity E_{kal} pak můžeme určit potřebný výkon generátoru P_V k dosažení normou požadované zkušební intenzity pole E_n (1, 3 či 10 V/m). Výkon P_V je tedy zřejmě roven:

$$P_V = P_{Vkal} \times \left(\frac{E_n}{E_{kal}} \right)^2. \quad (36)$$

Při vlastní zkoušce odolnosti se zkoušené zařízení umísťuje tak, aby jeho čelní stěna byla umístěna v kalibrované ploše homogenního pole (viz obr. 42), přičemž se takto postupně vystřídají všechny čtyři strany zařízení, a to při obou polarizacích testovacího pole (vertikální a horizontální). Je-li plocha některé čelní stěny zařízení větší než kalibrovaná plocha homogenního pole $1,5 \times 1,5$ 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

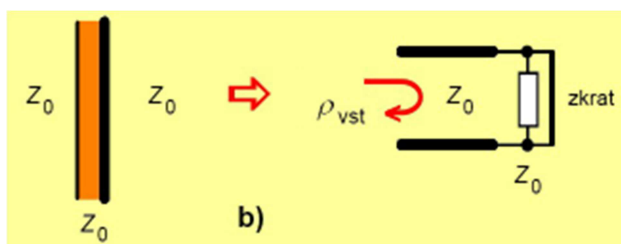
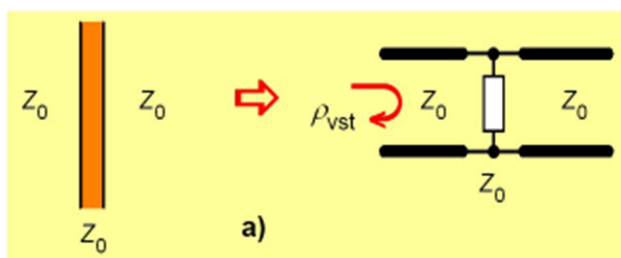
mít totiž značný vliv na rozložení elektromagnetického pole ve zkušebně a tím i na výsledky zkoušek odolnosti. [11]

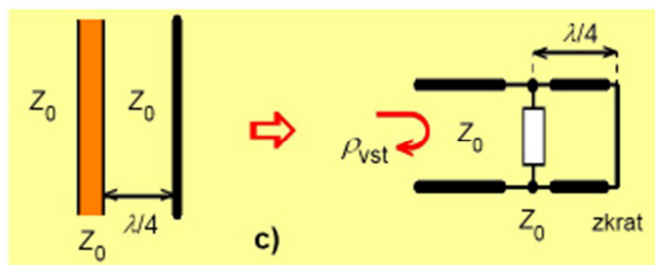
Bezodrazové (absorpční) komory

V současných podmínkách je nalezení vhodného zkušebního stanoviště na volném prostranství pro anténní měření elektromagnetického rušení velmi obtížné. Ani měření rušivého vyzařování ve stíněných komorách není však zdaleka optimální. Ideálním a pravděpodobně i jediným řešením je anténní měření v tzv. bezodrazové (absorpční) stíněné komoře. Je to elektromagneticky stíněný prostor potřebných rozměrů (půdorysně i výškově je opět třeba zajistit měřicí plochu dle obr. 51., pro měřicí vzdálenost $D = 3, 10$ nebo 30 m), jehož vnitřní stěny (včetně stropu a mnohdy i podlahy) jsou navíc obloženy elektromagneticky absorpčním (pohlcujícím) materiálem, který silně omezuje vnitřní odrazy v komoře v širokém pásmu kmitočtů.

Zajistit bezodrazovost uzavřeného prostoru je obdobný technický problém jako bezodrazové přizpůsobení přenosového vedení: vedení se zakončí svou charakteristickou impedancí Z_0 . Charakteristická (vlnová) impedance volného prostoru má hodnotu $Z_0 = 120\pi = 377\ \Omega$. Přestože materiál s touto impedancí skutečně existuje, jeho aplikace nepřinesla žádoucí výsledky. Zhotovit stěny místnosti (komory) z tohoto materiálu je jednak konstrukčně obtížné (materiál má charakter textilu), elektricky to však znamená totéž, jako dle obr. 45., a zapojit do vedení s charakteristickou impedancí Z_0 další impedanci o téže hodnotě. Je jasné, že vstupní činitel odrazu takového vedení (a tedy i této stěny v prostoru) není nulový, ale je roven:

$$\rho_{vst} = \frac{Z_0 || Z_0 - Z_0}{Z_0 || + Z_0} = \frac{1}{3}. \quad (37)$$





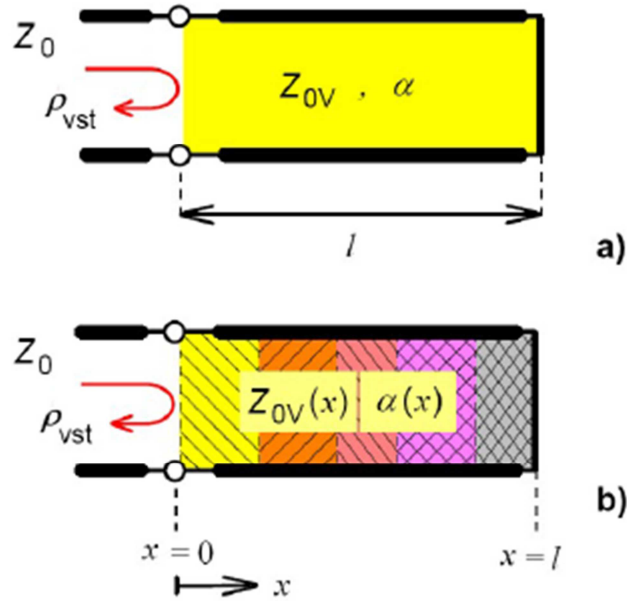
Obr. 45. a), b), c) K tvorbě bezodrazové stěny komory z materiálu o impedanci volného prostoru.

Protože velikost odraženého výkonu je úměrná hodnotě $|\rho|^2$, odráží se 1/9 výkonu dopadajícího signálu zpět do prostoru komory k měřicí anténě, ze zbývajících 8/9 výkonu se polovina pohlcuje v materiálu stěny a polovina postupuje do volného prostoru za stěnou, tedy ven z komory. Taková komora tedy není ani bezodrazová, ani nepropustná (stíněná) vůči vnitřním či vnějším signálům.

Elektromagnetickou propustnost stěn odstraníme umístěním materiálu s impedancí volného prostoru Z_0 na kovové nosné stěny komory. Tím jsme však de facto opět realizovali jen stíněný prostor, jehož stěny dle obr. 45 b) vykazují (téměř) stoprocentní odraz dopadajících vln s činitelem odrazu $\rho_{vst} = -1$. Je tedy jasné, že k tomu, aby materiál o impedanci volného prostoru Z_0 zajistil bezodrazovost stěn komory, by musel být zakončen prostorem s nekonečně vysokou charakteristickou impedancí. Taková hmota však není známa. Nekonečně velkou impedancí však lze simulovat pomocí zkratu, tj. vodivé kovové stěny umístěné ve vzdálenosti čtvrtiny vlnové délky za bezodrazovým materiálem Z_0 (obr. 45c). Takové stěny jsou elektromagneticky nepropustné a uvnitř komory vykazují skutečně nulový činitel odrazu, avšak pouze na jediném kmitočtu, kdy odstup materiálu s impedancí volného prostoru Z_0 od kovové základní stěny je právě roven $\frac{\lambda}{4}$. Taková konstrukce bezodrazové komory je tedy velmi úzkopásmová a pro potřeby širokopásmových měření v oblasti EMC nepoužitelná. Uvedené metody realizace bezodrazových obkladů stěn tedy evidentně nevedou k cíli.

Bezodrazová (absorpční) komora musí být současně i elektromagneticky nepropustná, tj. stíněná. Její základní vnější konstrukce musí proto být vyrobena z dobře vodivého kovového materiálu. Vzhledem k předchozím analogiím k přenosovému vedení půjde tedy opět o vedení na konci zkratované. Z klasické teorie vedení je známo, že dostatečně dlouhé ztrátové vedení je na vstupu vždy téměř

přizpůsobeno (tj. je bezodrazové) bez ohledu na kmitočet signálu i na zakončovací impedanci. Uvažme proto dle obr. 46a (dlouhé) vedení na konci nakrátko, které má nenulové vlastní ztráty, tj. nenulový měrný útlum α [dB/m]. [12]



Obr. 46. a), b) Princip užití ztrátového vedení nakrátko k realizaci bezodrazové stěny.

Velikost vstupního činitele odrazu tohoto vedení je

$$|\rho| = 10^{-2\alpha l} \quad (38)$$

a výkon vlny odražené od jeho vstupu zpět do prázdného (tj. bezeztrátového) vedení se stejnou charakteristickou impedancí $Z_0 \approx Z_{0V}$ je roven

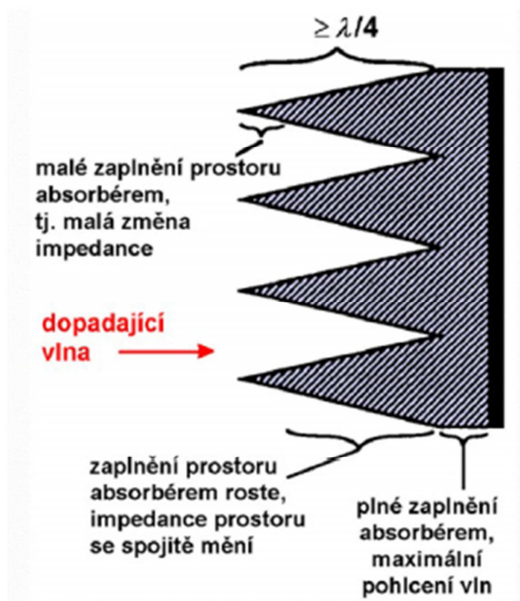
$$P_{odr} = P_{dop} \times |\rho_{vst}|^2 = P_{dop} \times 10^{-4\alpha l}. \quad (39)$$

Pro $l \rightarrow \infty$, příp. $\alpha \rightarrow \infty$, se odrazy i odražený výkon na vstupu vedení blíží k nule, a to nezávisle na kmitočtu signálu (za předpokladu, že měrný útlum α vedení je kmitočtově nezávislý). Na tomto principu lze tedy realizovat širokopásmové bezodrazové zakončení jak vedení, tak i prostoru. Dané vedení tedy musí především mít dostatečnou délku l , příp. příslušná část prostoru (materiál) před kovovou stěnou (zkratem) musí mít dostatečnou tloušťku. Zvětšovat l však nelze neomezeně; jsme limitováni realizovatelností daného obložení, jeho mechanickou konstrukcí a prostorovou omezeností komory. Výrazně zvýšit hodnotu měrného útlumu α celého vedení, příp. ztráty použitého materiálu však rovněž nelze. V tom případě by se totiž

výrazně (a skokem) změnila i hodnota charakteristické impedance vedení (materiálu) Z_{0V} , a byla výrazně odlišná od impedance vstupního bezztrátového vedení, příp. volného prostoru Z_0 . Na tomto impedančním skoku by samozřejmě vznikly další odrazy vlnění a bezodrazovost vstupu vedení by tak byla narušena. Je tedy jasné, že dané ztrátové vedení (ztrátový materiál) musí být podélně nehomogenní, a to tak, že jeho charakteristická impedance Z_{0V} a měrný útlum α se budou měnit od hodnot $Z_{0V} \approx Z_0$ a $\alpha \approx 0$ na počátku vedení až po hodnoty $Z_{0V\min} \approx 0$ a α_{max} na jeho zkratovaném konci. Tento princip je schematicky naznačen na obr. 46 b). Poznamenejme ještě, že délka vedení l (tloušťka obložení) hraje i nadále důležitou roli: musí být vždy srovnatelná s vlnovou délkou přenášeného (či lépe pohlcovaného) signálu, a to i na jeho nejnižším kmitočtu, tj. na nejdelší vlnové délce. Prakticky se požaduje, aby celková tloušťka ztrátového obložení (délka ztrátového vedení) činila aspoň čtvrtinu nejdelší vlnové délky rušivého signálu, jehož měření se v dané absorpční komoře předpokládá.

Absorpční materiály pro obložení stěn bezodrazových komor přeměňují energii dopadající vlny na teplo, a to s využitím buď dielektrických, nebo magnetických ztrát. V současné době se většinou dává přednost dielektrickým ztrátovým materiálům, neboť magnetické materiály jsou příliš těžké a také drahé. Z předchozího rozboru je jasné, že použitá ztrátová dielektrika by měla mít jen nízké hodnoty relativní permitivity ϵ_r , aby se svými dielektrickými vlastnostmi (nikoli ztrátovými vlastnostmi!) co nejvíce blížila vlastnostem vzduchu (volného prostoru). Používají se proto zejména různé tvrzené pěnové materiály z polystyrénu, polypropylénu či polyuretanu, které se sytí elektrovedivými či grafitovými (uhlíkovými) plnidly různé hustoty. Stupněm tohoto syčení lze tak účinně regulovat zejména ztrátové parametry výsledného materiálu. Kromě elektricky vhodných vlastností jsou dalšími výhodami těchto materiálů jejich nízká hmotnost, snadná mechanická opracovatelnost a snadné spojování lepením. Vhodnou technologií syčení lze přitom dosáhnout vysokou homogenost a reprodukovatelnost vlastností výsledného materiálu. Materiály lze obvykle použít do poměrně vysokých teplot ($90\div 160$ °C), a tím pro pohlcování vysokých intenzit elektrického pole (až 200 V/m), příp. vysokých hustot výkonu (až 100 W/m²). Materiály jsou většinou nevznětlivé, tj. v případě požáru jen doutnají, ale nehoří plamenem. [12]

V současnosti nejrozšířenější způsob realizace širokopásmových absorpčních obkladů jakožto podélně nehomogenního ztrátového prostředí je naznačen na obr. 47.



Obr. 47. Konstrukce pyramidálních absorbérů.

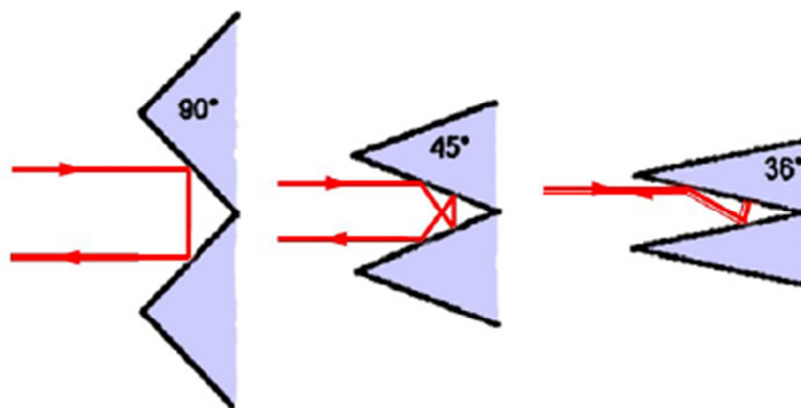
Obkladové absorpční prvky mají tvar jehlanů či kuželů zhotovených opět z polystyrenu či polyuretanu s grafitovým sycením. Lineárně se rozšiřující průřez jednotlivých jehlanů realizuje impedanční transformátor, který bezodrazově převádí impedanci volného prostoru na špičkách jehlanů na velmi nízkou impedanci prostoru zcela zaplněného absorbérem v zadní části jehlanů. Stejně tak se postupně zvyšují ztráty absorpčního obkladu (vedení), takže maximální pohlcení energie dopadající vlny nastává až v zadní (plné) části absorbéru. Bezodrazovost vstupu celého absorpčního obkladu se někdy dále zlepšuje tím, že špičky jehlanů mají menší sycení grafitem (a tedy menší ztráty) než jejich zadní široké části. Jak jsme zdůvodnili výše, musí být délka transformační části absorbéru (tj. výška jehlanů) minimálně $\frac{\lambda}{4}$ na nejnižším pracovním kmitočtu. Pro nejnižší kmitočty měřených signálů 30 MHz by tento požadavek znamenal délku 2,5 m (!), pro minimální kmitočty 100 MHz je teoretická potřebná výška jehlanů stále ještě značná 75 cm. Tyto rozměry však současně znamenají, že na vysokých kmitočtech (např. 1000 MHz) činí výška celého absorbéru již několikanásobek vlnové délky λ a bezodrazovost takového absorpčního obkladu na vysokých kmitočtech je tak velmi dokonalá. Kvantitativně se bezodrazovost absorbéru (ať již plošného či pyramidálního) obvykle posuzuje hodnotou tzv. útlumu odrazem RL (Return Loss) označovaném někdy jako reflektivita.

Tato veličina je definována vztahem:

$$RL = 10 \log \frac{P_{odr}}{P_{dop}} = 10 \log |\rho_{vst}|^2 = 20 \log |\rho_{vst}| [dB], \quad (40)$$

v němž ρ_{vst} značí vstupní činitel odrazu absorpčního obkladu na daném kmitočtu. Je-li výška jehlanů pyramidálního absorbéru rovna $\frac{\lambda}{4}$ na nejnižším pracovním kmitočtu, je útlum odrazem na tomto kmitočtu cca 20 dB, což ze vztahu (40) znamená, že pouze jedna setina výkonu dopadajícího signálu se od absorbéru odrazí zpět do vnitřního prostoru komory. [12]

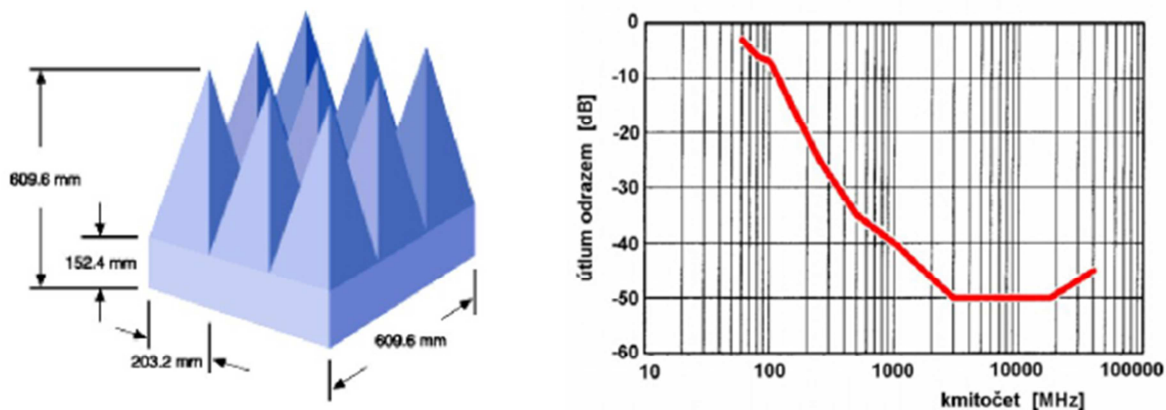
Pyramidální konstrukce absorbéru dle obr. 47. s sebou přináší ještě další výhodnou vlastnost. Jak je uvedeno na obr. 48., vlna dopadající na absorpční obklad vstupuje mezi jednotlivé absorpční jehlany a je na jejich povrchu částečně odražena.



Obr. 48. Násobné odrazy v pyramidálním absorbéru.

Vlivem zkosení jehlanů se však tyto odražené vlny nevracejí přímo zpět do vnitřního prostoru komory, ale směřují do sousedního jehlanu. Zde se opět částečně odrazí a celý děj se opakuje. Odražená vlna se vrací zpět do vnitřního prostoru komory až po několika částečných odrazech od absorpčních jehlanů. Protože při každém odrazu se část energie vlny absorbuje a jen část se odrazí, je celková energie odražené vlny po vícenásobném odrazu výrazně menší. Počet dílčích odrazů přitom dle obr. 48. závisí zejména na vrcholovém úhlu jehlanů, který se u praktických konstrukcí pohybuje kolem 25°. Tímto mechanismem se tak dále zlepšují bezodrazové vlastnosti celého absorpčního obložení stěn komory. Spokojíme-li se i na nejnižším pracovním kmitočtu s menší velikostí útlumu odrazem RL (v absolutní hodnotě) než 20 dB, lze použít jehlany i s nižší výškou než $\frac{\lambda}{4}$ nejnižšího pracovního kmitočtu. To je dokumentováno obr. 49., na němž je ukázka typická konstrukce a rozměrů širokopásmového absorpčního pyramidálního panelu včetně kmitočtového průběhu jeho útlumu odrazem. Je zřejmé, že velikost tohoto útlumu roste (v absolutní hodnotě)

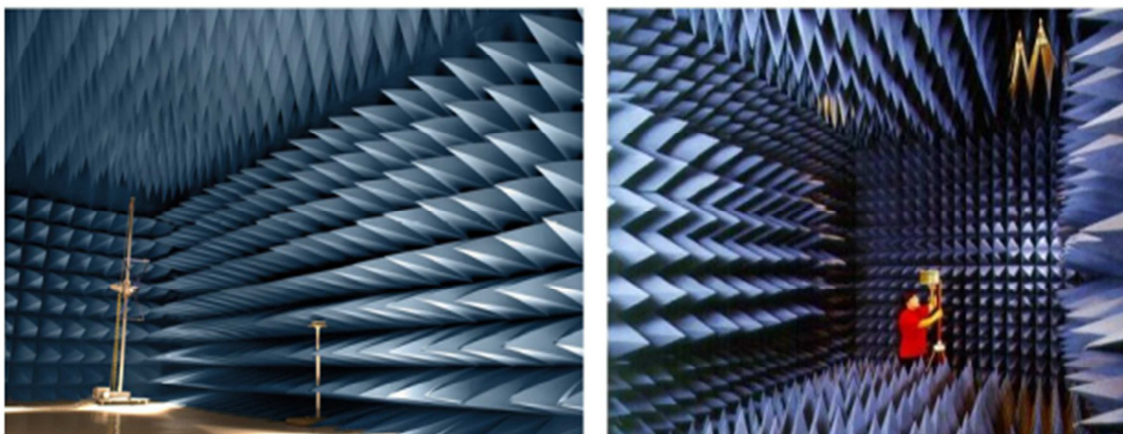
s rostoucím kmitočtem. Na vysokých kmitočtech, kdy výška jehlanů je několikanásobkem vlnové délky signálu, je bezodrazovost absorberu velmi dokonalá.



Obr. 49. Konstrukce, rozměry a absorpční vlastnosti širokopásmového pyramidálního absorberu pro kmitočtové pásmo 80 MHz až 40 GHz.

Bezodrazové absorpční komory (haly) představují v současné technice EMC téměř ideální měřicí a testovací prostor. Ve své konstrukci často kombinují pyramidální a ploché absorbéry, když na několikavrstvý plochý absorber se umísťují absorpční jehlany. Absorpční haly se realizují jako částečně nebo plně bezodrazové. Částečně bezodrazová hala je taková, v níž jsou absorpčním materiálem obloženy stěny a strop, nikoli však podlaha. Hala tak simuluje volné měřicí prostranství včetně odrazů od zemní roviny. V plně bezodrazové hale (Anechoic Room) jsou absorpčním materiálem obloženy stěny, strop i podlaha a hala simuluje volný neomezený prostor. Konstrukce kvalitní bezodrazové haly je technologicky velmi náročná. Jejím základem je realizace perfektního elektromagneticky stíněného prostoru včetně dokonalého ošetření všech možných vstupů a výstupů elektromagnetického rušení. Na tuto kovovou konstrukci jsou pak upevňovány absorpční obklady o příslušných rozměrech pro požadované kmitočtové pásmo měření. Absorpčními materiály jsou samozřejmě obloženy rovněž všechny dveře a větrací či jiné průchody a otvory.

Pro obložení podlahy v plně bezodrazové hale se buď využívají jenom ploché, mechanicky zpevněné absorbéry, nebo je nutno pyramidální absorbéry na podlaze vyztužit či překlenout laminátovými pochůznými můstky, které lze po instalaci měřicího zařízení před vlastním měřením z haly odstranit (vysunout). Ukázka vnitřního prostoru těchto komor je uvedena na obr. 50. [12]



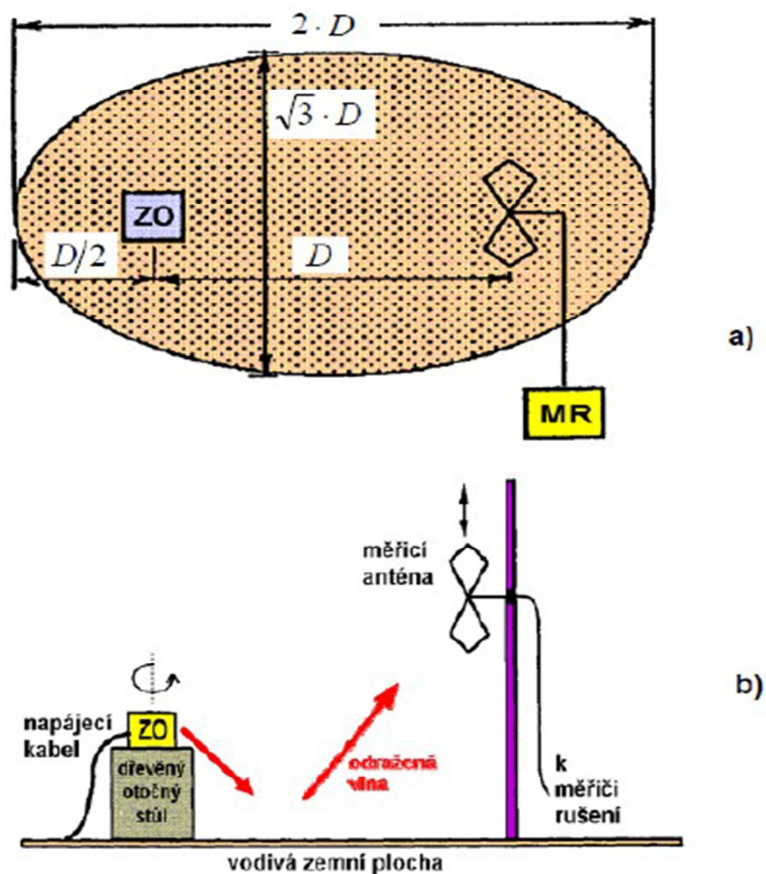
a)

b)

Obr. 50. a) Interiér částečně bezodrazové, b) plně bezodrazové absorpční haly EMC.

Měření na volném prostranství

Výsledky všech anténních měření závisí velmi podstatně na místě vlastního měření. Běžná anténní měření rušivých elektromagnetických polí se zdánlivě nejjednodušeji provádějí na volném prostranství. Volné zkušební stanoviště má mít dle normy ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 půdorysný tvar elipsy zobrazené na obr. 51 a).



Obr. 51. a) Půdorysný a boční pohled, b) na stanoviště pro měření na volném prostranství.

Její hlavní osa je rovna dvojnásobku vzdálenosti mezi zkoušeným objektem **ZO** a měřicí anténou, které se nacházejí v jejich ohniscích. Tato tzv. měřicí vzdálenost D je normou předepsána na hodnoty 3 m, 10 m, 30 m, příp. 100 m. Z hlediska kvality měření je profesionálními pracovišti preferována největší vzdálenost 100 m, pro běžná měření je však vytvoření tak velkého měřicího místa jen těžko uskutečnitelné a většinou se proto měří na vzdálenosti 30 m či 10 m, často i na vzdálenost 3 m. Uvedené zkušební stanoviště musí být na plochem a rovném terénu, nesmí na něm být budovy, elektrická vedení, stromy, keře, ploty či jiné elektromagneticky odrazivé plochy ani podzemní kabely či potrubí kromě nutných přívodů k napájení a provozu zkoušeného zařízení. V místě stanoviště by se neměla

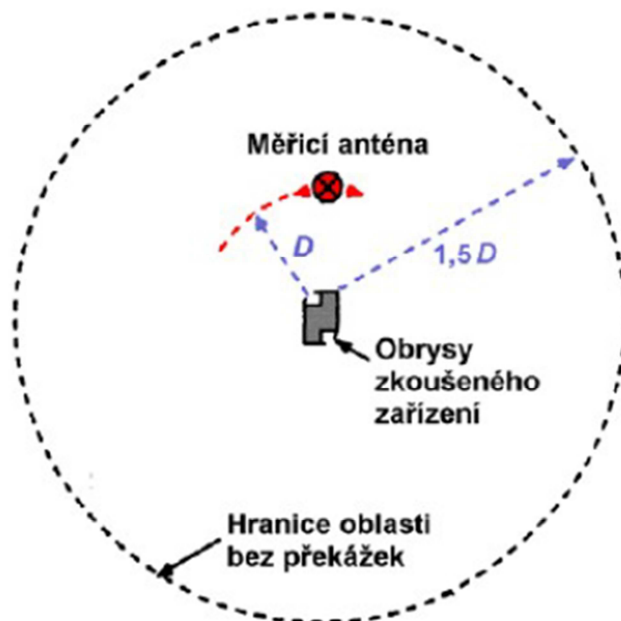
vyskytovat jiná silná elektromagnetická pole. Žádá se, aby okolní rušení bylo aspoň 20 dB pod měřenými úrovněmi od zkoušeného zařízení. Není-li tento požadavek splněn, je nutno kmitočty a intenzity vnějších polí zmapovat, aby bylo možno provést korekce naměřených výsledků rušení.

Vymezení plochy zkušebního stanoviště jakožto elipsy dle obr. 51 a) není náhodné. Známé geometrické vlastnosti elipsy totiž zajišťují, že každá vlna vyslaná zkoušeným objektem a přijatá měřicí anténou po odrazu od místa ležícího na kraji eliptické plochy urazí dvojnásobnou dráhu než vlna směřující k anténě přímo od zkoušeného objektu. Protože intenzita vzdáleného pole je nepřímě úměrná dráze vlny od jejího zdroje, je jasné, že i dokonalá odrazná plocha za okrajem dané elipsy způsobí v místě měřicí antény falešnou vlnu jen s poloviční intenzitou vůči vlně přímé, tj. je proti ní utlumena minimálně o 6 dB. Navíc, protože na okrajích skutečného eliptického měřicího místa nebývají umístěny žádné perfektní (kovové) odrazové plochy, je velikost těchto nežádoucích vln v místě antény ještě menší. Eliptické zkušební stanoviště dle obr. 51 a), tak poskytuje dostatečnou stranovou ochranu vůči nežádoucím odrazům měřeného vyzařování.

Jak je zřejmé z obr. 51 b), i na ideálním zkušebním stanovišti přijímá měřicí anténa pole od zkoušeného objektu ZO vždy minimálně po dvou drahách: kromě přímé vlny je zde vždy přítomna i vlna odražená od země stanoviště. Aby výsledky měření byly reprodukovatelné, je nutno pro tuto odraženou vlnu vytvořit stálé podmínky odrazu, tedy zejména konstantní hodnotu činitele odrazu vlny od země při všech měřicích kmitočtech. [13]

Eliptické zkušební stanoviště dle obr. 51 a) je vhodné ke zkoušení menších technických objektů do objemu cca 1 m³. Jak je ilustrativně naznačeno na obr. 51 b), je zkoušený objekt umístěn na dřevěném otočném stole o výšce 80 cm nad zemí. Při měření je nutno jej otočit do polohy, kdy je rušivé napětí měřené anténou maximální. V případě potřeby je nutno toto optimální natočení zkoušeného objektu nastavit znovu na každém kmitočtu při obou polarizacích měřicí antény. Veškeré přívodní kabely ke zkoušenému objektu i anténě se vedou po zemi, příp. pod zemí zkušebního stanoviště, aby nepůsobily jako parazitní antény. Měřič rušení a další zařízení jsou umístěna zásadně mimo eliptickou plochu stanoviště.

Pro velké zkoušené objekty je normou ČSN EN 55016-1-1 ed. 2 doporučen jiný tvar zkušebního stanoviště naznačený na obr. 52.



Obr. 52. Zkušební stanoviště pro stacionární zkoušené zařízení.

Měřicí oblast bez překážek je zde kruhová, přičemž radiální vzdálenost okraje zkoušeného zařízení od okraje oblasti je rovna 1,5 násobku měřicí vzdálenosti D . Při měření se anténa otáčí (obíhá) kolem zkoušeného zařízení v dané měřicí vzdálenosti až do místa, kde je měřené rušivé napětí při dané polarizaci antény maximální. [13]

Ověření metodiky měření emisí v bezodrazové komoře ZČU

Analýza byla provedena dle normy ČSN EN 55016-2-3 tj., Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Část 2-3: Metody měření rušení a odolnosti - Měření rušení šířeného zářením

Na pracovišti fakulty elektrotechnické, laboratoř EMC, bylo provedeno ověření vlastností měřicího stanoviště - bezodrazové komory při měření emisí. Uspořádání měřicího stanoviště zahrnovalo bezodrazové stěny a odrazovou podlahu. V průběhu měření emisí byla anténa posouvána vertikálně po stojanu s krokem 50 cm při polarizaci antény horizontální i vertikální. Cílem ověření bylo najít závislost amplitudy širokospektrálního rušivého signálu na výšce antény nad odrazovou podlahou.

Použité přístroje

Měřený rušivý signál, který sloužil k analýze vlastností měřicího stanoviště, byl generován referenčním zdrojem vyzařovaného rušení. Tento zdroj se skládal z funkčního generátoru, regulovatelného laboratorního zdroje a obvodu produkujícího vlastní rušení.

Funkční generátor

Při měření byl použit funkční generátor FG-8002 od firmy GoldStar, jehož výstupní frekvence je v rozmezí od 0,02 Hz až 2 MHz v 7 stupních a stabilita frekvence je 0,5 % rozsahu při teplotě v rozmezí 18 °C až 28 °C. Generuje základní tvary signálu, jako trojúhelník, pila, sinus, obdélník, TTL obdélník. Výstupní napětí generátoru je max. 20 V - plynule, ± 10 V offset plynule (naprázdno) a výstupní impedance 50 Ω. V případě měření byl nastaven sinusový výstupní tvar signálu s frekvencí 100 Hz.



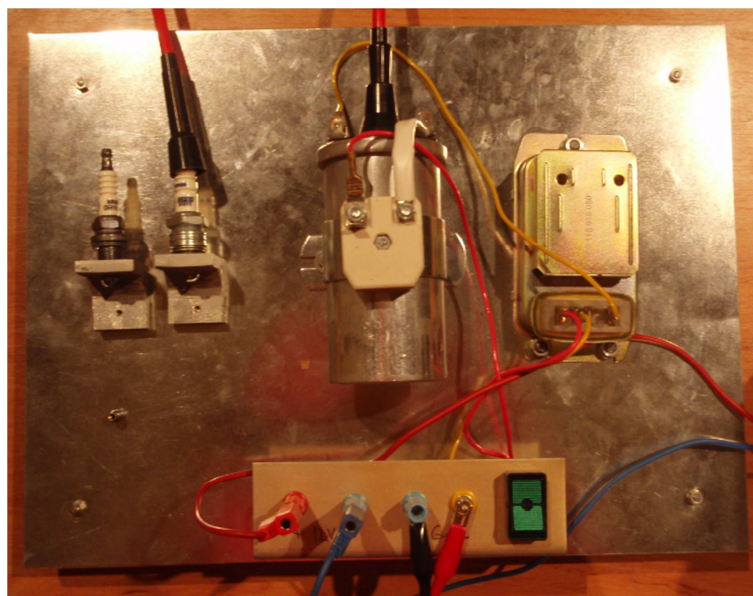
Obr. 62 53. Funkční generátor FG – 8002.

Regulovatelný laboratorní zdroj

Stejnoseměrný laboratorní zdroj německého výrobce Statron, který má regulovatelné napětí v rozsahu 0 až 32 V a proud v rozsahu 0 až 24 A. Při měření bylo nastaveno výstupní napětí na hodnotu 12 V a proudová pojistka byla nastavena na 2 A.

Měřený zdroj rušení

Vlastní obvod pro generování měřeného rušení byl tvořený bateriovým zapalováním, které se používá u osobních automobilů značky Škoda Favorit. Celek se skládal ze zapalovací elektronické jednotky, indukční cívky s rezistorem, vysokonapěťových kabelů a zapalovacích svíček. 12V akumulátor byl nahrazen regulovatelným laboratorním zdrojem a funkci přerušovače v rozdělovači automobilu převzal funkční generátor.

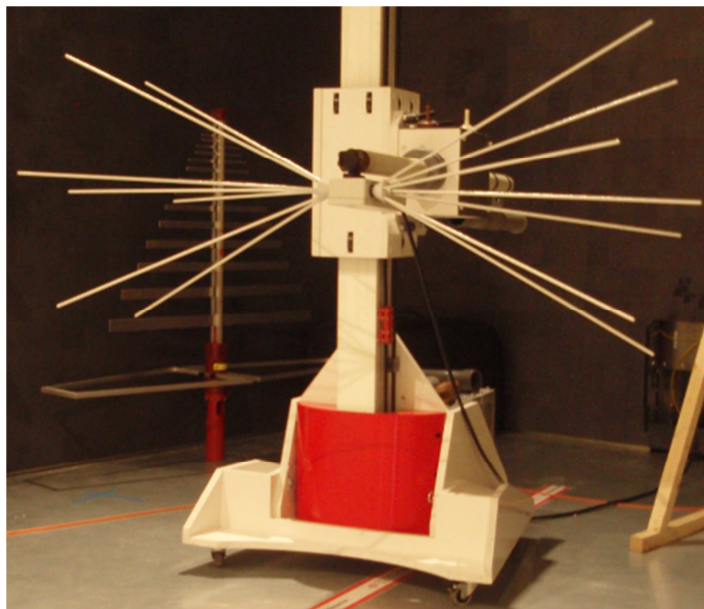


Obr. 63 54. Zdroj rušení.

Bikónická anténa BC-01

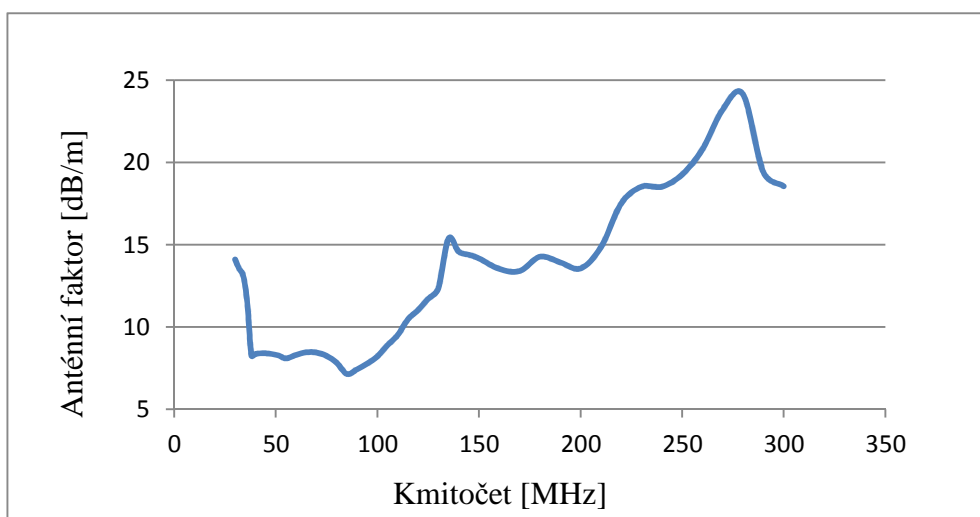
Jako přijímací prvek pro měření rušení byla použita bikónická anténa umístěná na stojanu, který umožňuje vertikální posuv antény v rozsahu od 80 cm do 400 cm. Výrobce bikónické antény BC-01 je firma PMM. Výrobní číslo je 0000J10105 a její parametry jsou:

- frekvence 30-200 MHz
- impedance 50 Ω
- konektor typu N
- výška 65 cm
- šířka 137
- hmotnost 1,8 kg



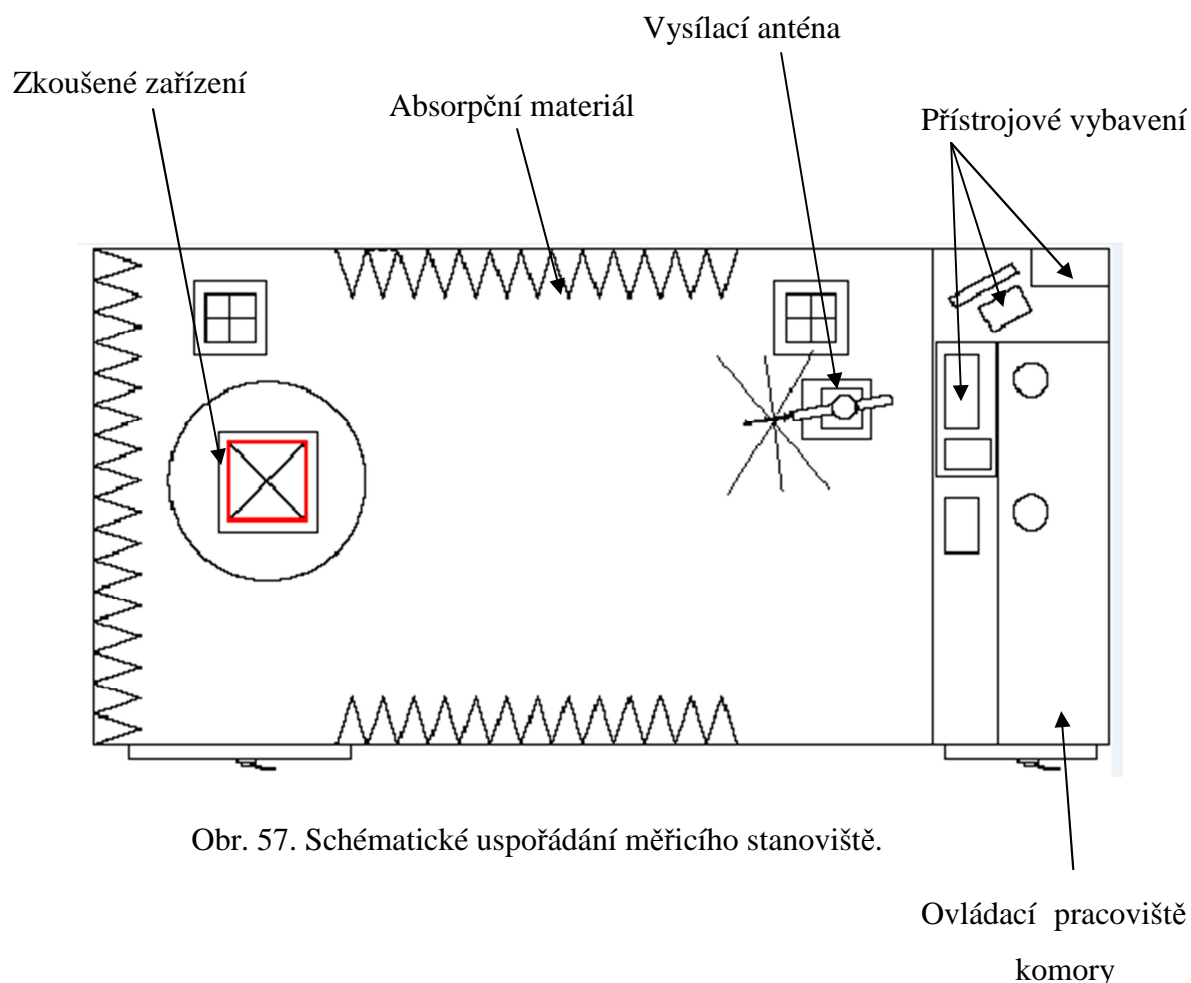
Obr. 64 55. Bikónická anténa BC-01.

Důležitou charakteristikou antény je anténní faktor, který v podstatě charakterizuje citlivost antény v daném frekvenční spektru. Anténní faktor použité antény je uveden na obr. 56. Křivka byla vytvořena podle předlohy kalibračního listu Českého metrologického insitutu TESTCOM Praha pro měřicí vzdálenost 10 m.



Obr. 56. Anténní faktor bikónické antény v bezodrazové komoře FEL ZČU.

Celkové uspořádání měřicího pracoviště je na obrázku obr. 57.

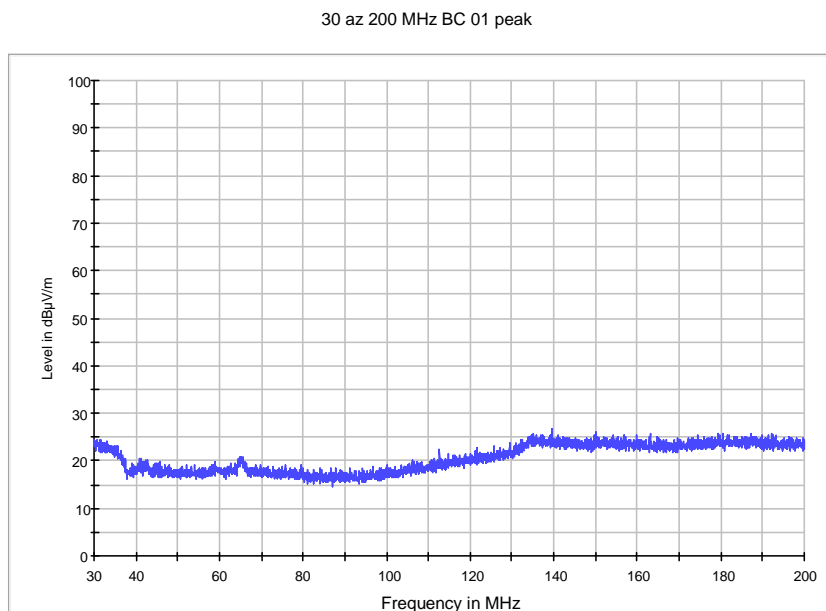


Obr. 57. Schématické uspořádání měřicího stanoviště.

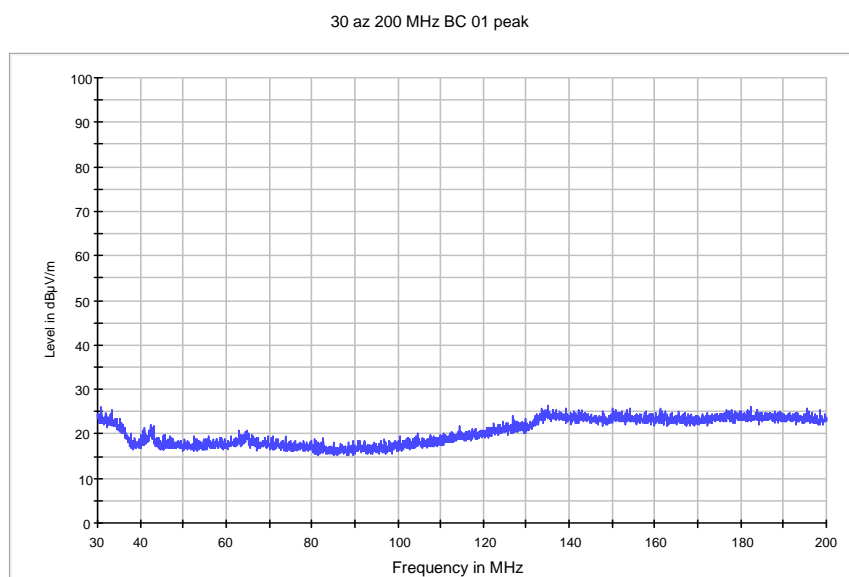
Měření

Zdroj vyzařovaného rušení, popis zdroje je uveden výše, generoval širokospektrální signál, který byl přijímán bikónickou anténou. Měřič rušení připojený na výstupu antény zaznamenával úroveň rušení a změny v úrovni rušení v závislosti na výšce antény. Anténa byla posouvána na stojanu pomocí pohonu ovládaného měřicím softwarem od 1 m do 3,5 m, měřeno od podlahy bezodrazové komory po 50 cm krocích. Uvedený postup byl aplikován pro anténu jak v horizontální tak vertikální polarizaci. U naměřených amplitud rušení byla sledována úroveň rušivého signálu v závislosti na výšce antény. Vzhledem k tomu, že naměřené záznamy představují závislost amplitudy zaznamenaného rušení na frekvenci, zaměřil jsem se při vyhodnocování signálů na frekvence, na kterých se nejvýrazněji projevila výše zmíněná závislost amplitudy na poloze antény. Po analýze všech grafických záznamů signálů (viz příloha) byly vybrány některé frekvence, kde se změna amplitudy v závislosti na výšce antény nad zemní rovinou projevovала nejvýrazněji.

Na následujících grafech viz obr. 58. a 59. jsou záznamy pozadí bezodrazové komory. Měření pozadí je nezbytnou podmínkou správného vyhodnocení měření rušivých signálů. Během záznamu signálu pozadí byla všechna zařízení v komoře v beznapětovém stavu včetně pohonu pro posuv antény. Grafy na obr. 58. a 59. byly naměřeny opět pro polarizaci vertikální a horizontální a jsou téměř totožné, co se týče velikosti úrovně.

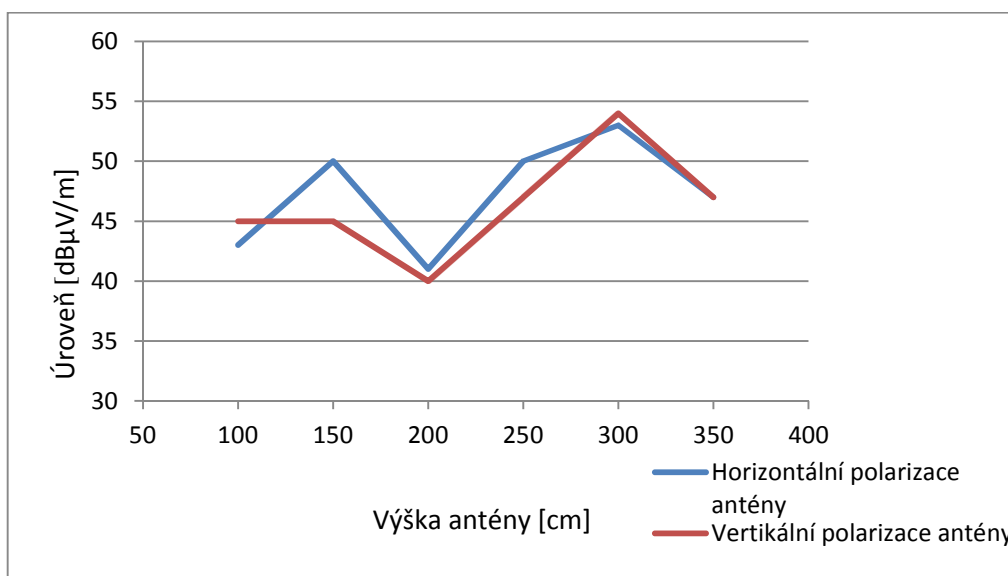


Obr. 58. Měřený průběh snímáný bikónickou anténou, kdy veškeré zařízení bylo vypnuté. Anténa umístěna v horizontální polarizaci ve výšce 150 cm.



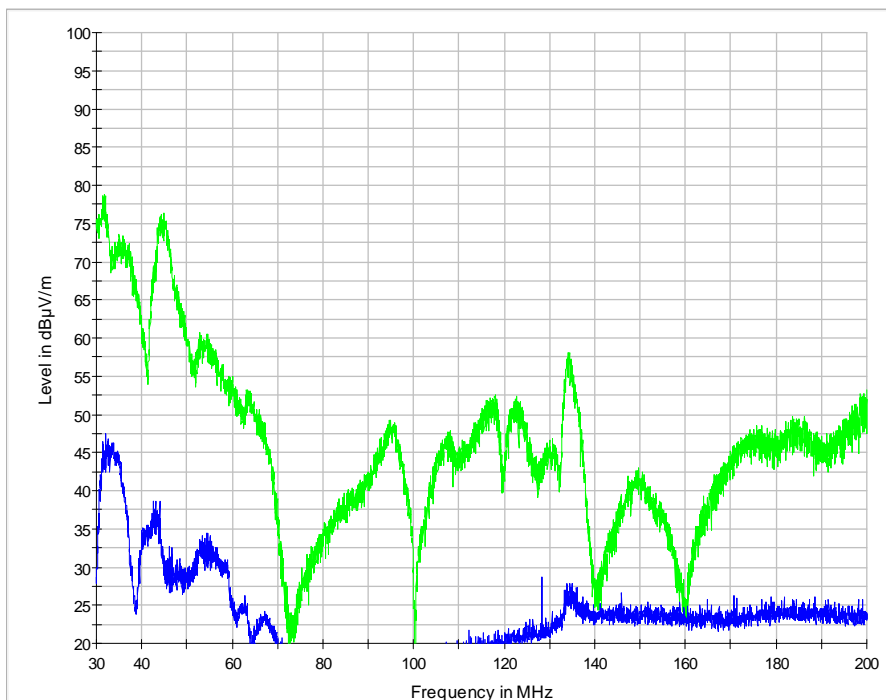
Obr. 59. Měřený průběh snímáný bikónickou anténou, kdy veškeré zařízení bylo vypnuté. Anténa umístěna ve vertikální polarizaci ve výšce 150 cm.

Na obrázku 61. a 62. jsou ukázky naměřených průběhů rušivého signálu. Celý soubor signálů je potom uveden v příloze. Záznam vlastního rušivého signálu produkovaného použitým zdrojem (zelený průběh) je ve všech provedených variantách měření doplněn záznamem pozadí měřicího stanoviště, ale na rozdíl od obr. 58. a 59. je v tomto případě pohon posuvu antény pod napětím (modrý průběh). Porovnání obou průběhů znázorňuje obr. 61. pro vertikální polarizovanou anténu a obr. 62. pro horizontálně polarizovanou anténu. Anténa byla umístěna ve výšce 350 cm. Na grafech je zřejmé, že pohon posuvu antény produkuje rušivý signál, který může být přijímán anténou nebo vzhledem k poloze pohonu jejími přívodními prvky. Na následujícím obr. 60. je uvedeno zpracování tohoto rušivého signálu. V grafu jsou zaznamenány maximální úrovně rušení vždy pro definovanou výšku antény. Pokud tedy byl signál produkovaný pohonem stojanu zaznamenán při výšce antény 1 m, byla maximální amplituda 45 dB při vertikální a 43 dB při horizontální polarizaci antény. Jak je následně patrné z dále uvedených obrázků 61. a 62., neliší se amplituda pro jednotlivé polohy antény v závislosti na její polarizaci nijak výrazně.

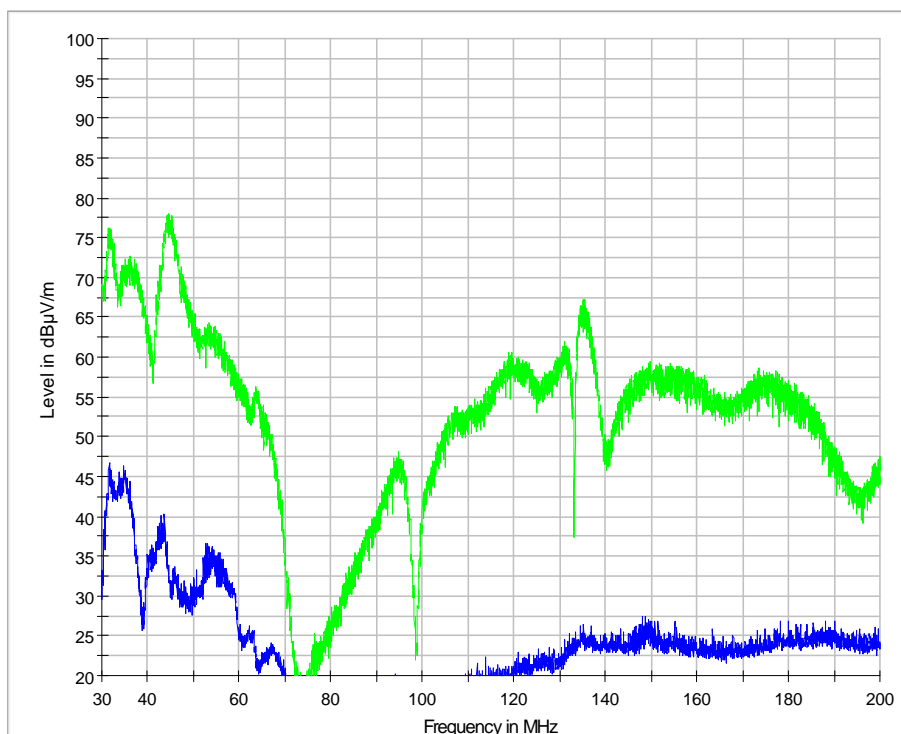


Obr. 60. Závislost úrovně na výšce antény.

Zmapování rušivých charakteristik vlastního stojanu je důležitou součástí provedené analýzy vlastností měřicího stanoviště, jak je zjevné ze srovnání obr. 58., 59. a obr. 61., 62. Využití takto získaných charakteristik rušení je součástí správné interpretace reálných rušivých signálů.



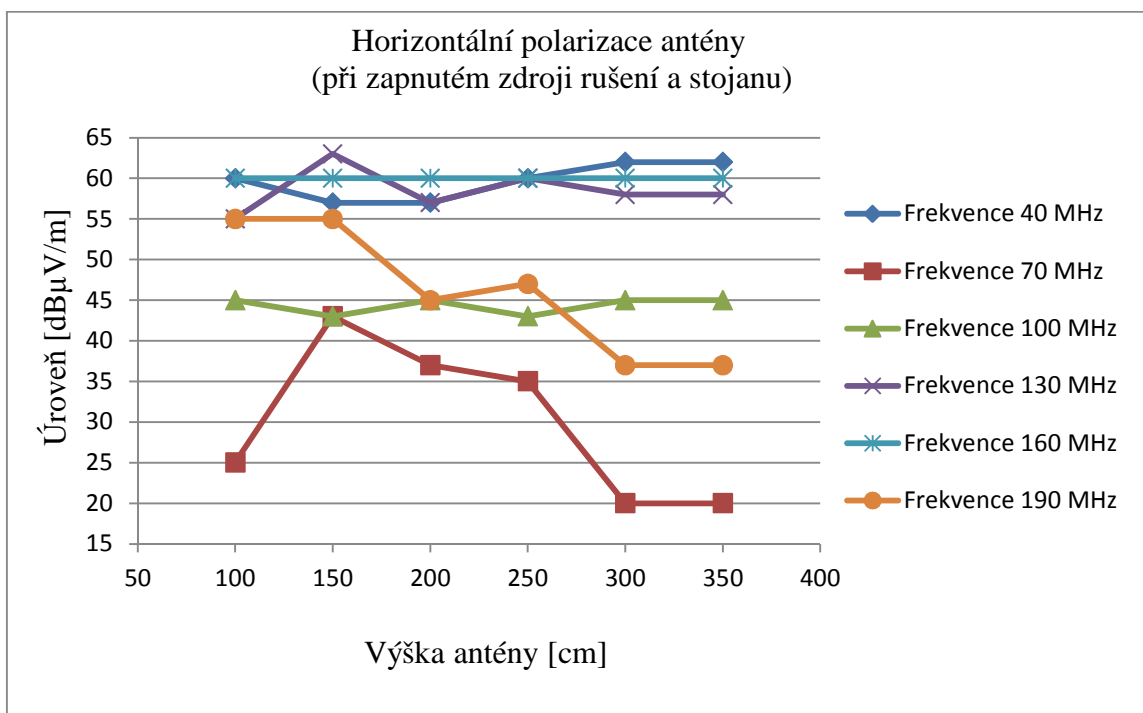
Obr. 61. Měřené průběhy vertikálně polarizované antény, umístěna ve výšce 350 cm. Pozadí bezodrazové komory a zdroje rušení.



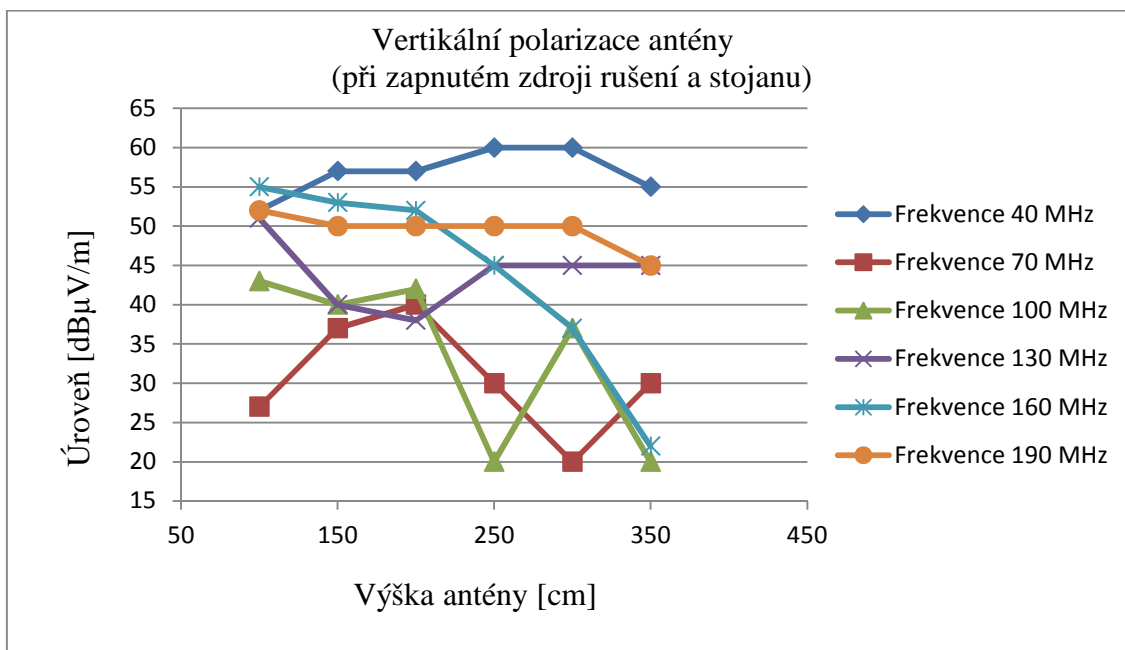
Obr. 62. Měřené průběhy horizontálně polarizované antény, umístěna ve výšce 350 cm. Pozadí bezodrazové komory a zdroje rušení.

U obou uvedených grafů je patrné, že polarizace antény se na rušení produkovaném pohonem stojanu (modrý průběh) výrazně neprojeví (viz také obr. 60., rušení je pravděpodobně přijímáno dalšími prvky antény). Naproti tomu rušivý signál produkovaný referenčním zdrojem (zelený průběh) vykazuje zejména ve vyšším frekvenčním pásmu výraznou závislost na polarizaci antény při konstantní výšce 350 cm. Horizontálně polarizovaná anténa zaznamenala v oblasti 120 MHz vyšší úroveň rušení.

Na následujících grafech jsou shrnuty záznamy amplitudy rušivého signálu pro vybrané frekvence a amplituda je zaznamenána v závislosti na výšce antény, frekvence je v tomto případě parametr. Výrazná změna v amplitudě naměřeného signálu se projevila na frekvencích 100 MHz a 160 MHz, kde je patrná značná rozdílnost v chování při horizontální a vertikální polarizaci, a pro frekvenci 70 MHz je charakteristická výrazná závislost amplitudy signálu na výšce antény pro obě polarizace. Výsledné zpracování dat je znatelné z obr. 63. a 64.

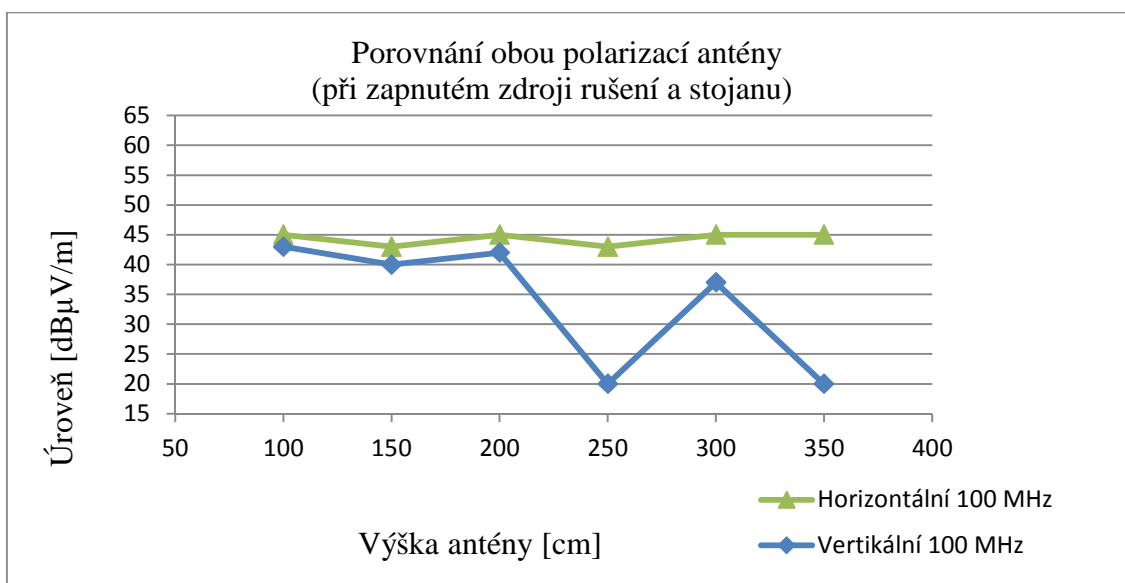


Obr. 63. Závislost amplitudy na výšce antény, horizontální polarizace.

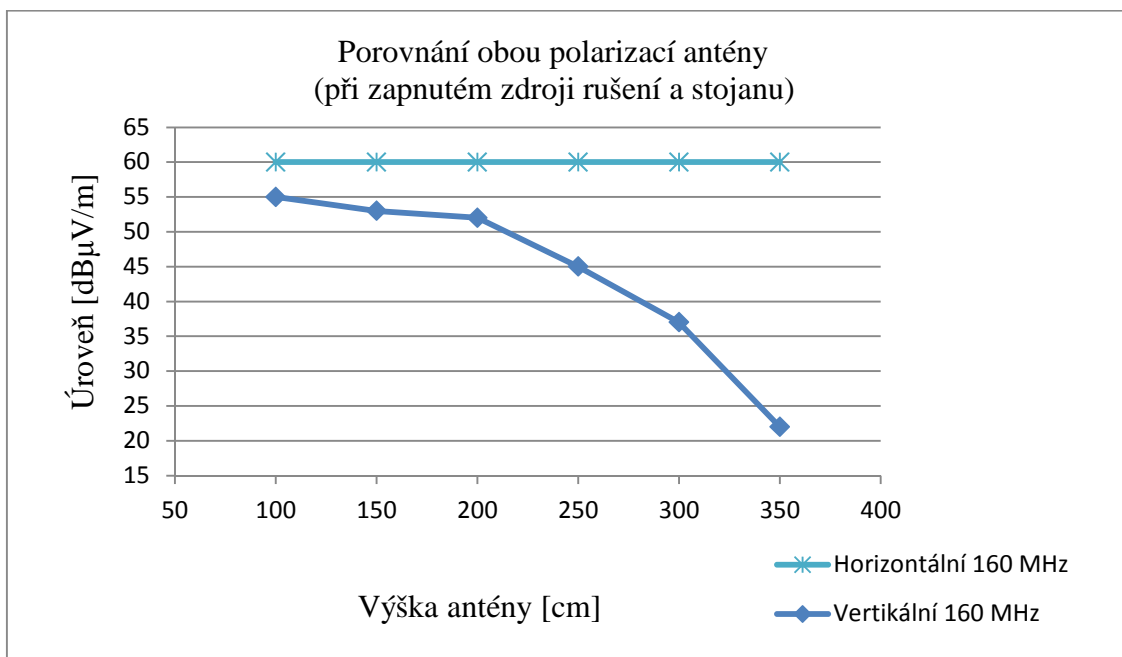


Obr. 64. Závislost amplitudy na výšce antény, vertikální polarizace.

Výše uvedená výrazná změna v chování antény na frekvencích 100 MHz a 160 MHz je dobře vidět na obr. 65. a 66. Na frekvenci 100 MHz anténa v horizontální polarizaci prakticky nevykazuje žádnou závislost amplitudy signálu na výšce antény. Při polarizaci vertikální se na průběhu amplitudy rušení projevují dva výrazné propady ve výšce 250 cm a 350 cm. Na frekvenci 160 MHz anténa opět v horizontální polarizaci zaznamenává prakticky konstantní amplitudu signálu bez ohledu na výšku nad podlahou komory. V polarizaci vertikální amplituda v závislosti na výšce antény klesá a ve výšce 200 cm má tento pokles i značnou strmost.



Obr. 65. Závislost amplitudy na výšce antény, horizontální polarizace.



Obr. 66. Závislost amplitudy na výšce antény, horizontální polarizace.

Frekvence 130 MHz se naopak vyznačuje nárůstem amplitudy signálu pro vyšší frekvenční pásmo a podobně, i když ne tak výrazně, se chová frekvence 40 MHz. Výraznější změna amplitudy se opět uplatňuje při vertikální polarizaci antény. Tento jev může být zapříčiněn přijímací charakteristikou antény. Dominantně ale o amplitudě signálu rozhoduje skládání přímého a odraženého rušení, což dokládá průběh amplitudy pro frekvenci 190 MHz, kde se výraznější závislost amplitudy na výšce antény uplatňuje pro horizontální polarizaci. Stejně tak na frekvenci 70 MHz je patrná velmi výrazná změna amplitudy jak pro horizontální, tak i vertikální polarizaci. Obecně lze konstatovat, že vyšší pozornost metodice zkoušky podle normy ČSN EN 55016-2-3 je třeba věnovat v případě měření s anténou ve výšce větší než 200 cm.

Závěr

Diplomová práce se zabývá částí elektromagnetické kompatibility, která se věnuje zdrojům, charakterům a analýzám při měření vysokofrekvenčního vyzařovaného rušení a testování odolnosti proti vysokofrekvenčnímu signálu. Jedná se o oblast, která je v současné době jednou ze stěžejních kapitol při posuzování shody elektrotechnických výrobků a zařízení. Zároveň se jedná po odborné stránce o značně rozsáhlou problematiku. Vlastní zkoušky, ať už měření emisí nebo testy odolnosti, vyžadují pro správné provedení i interpretaci výsledků zvládnutí širokého komplexu znalostí a jejich průběh ovlivňuje celá řada faktorů.

Jedním z podstatných vlivů pro průběh posouzení shody je znalost charakteristických rušivých signálů, které může zařízení produkovat nebo na něj naopak mohou působit. Proto je úvodní část práce věnovaná analýze typů rušivých signálů a vazebním mechanismům jejich přenosu.

Nejdůležitější částí analyzovaných zkoušek EMC je správné sestavení měřicích řetězců jednotlivých použitých prvků pro zpracování nebo generování vysokofrekvenčních rušivých signálů. Vzájemné vazby mezi prvky řetězce ovlivňují výslednou podobu signálu a je nutné je vzít v úvahu při interpretaci výsledků zkoušky. Tato problematika je zpracována v kapitole věnované přístrojovému vybavení pro oba měřicí řetězce (EMI i EMS) včetně uvedení nejdůležitějších vzájemných vztahů mezi oběma řetězci. Znalost těchto vztahů je nezbytná pro nastavení dostačující elektromagnetické odolnosti pro běžnou praxi.

Na problematiku měřicího vybavení jsem navázal rozsáhlou analýzou požadavků na měřicí stanoviště a podmínky, za kterých jsou zkoušky prováděny. Zejména v oblasti testování vysokofrekvenčními signály a jejich měření jsou vlastnosti a fyzické provedení měřicího stanoviště nejdůležitějším kritériem pro provedení zkoušek. Vlastní zkouška EMC vyžaduje splnění a ověření celé řady výchozích předpokladů, které právě v mnoha případech souvisí s vlastnostmi konkrétního měřicího pracoviště. Přínosem v práci provedené analýzy těchto požadavků je shrnutí a především vzájemné provázání obou měřicích řetězců pro EMI i EMS. Výsledná informace umožňuje usnadnění orientace v poměrně rozsáhlé problematice při návrhu a vývoji elektrotechnických zařízení.

Z výše uvedených důvodů byla experimentální část práce věnována dílčí problematice praktického ověřování vlastností bezodrazové komory fakulty elektrotechnické v Plzni v souladu s metodikou pro měření emisí podle ČSN EN 55016-2-3.

Měření probíhalo ve frekvenčním pásmu od 30 MHz až 200 MHz s použitím bikónické antény BC-01. Konkrétně se jednalo o ověření závislosti amplitudy přijímaného rušení na výšce antény nad podlahou komory. Ověřovaná metodika zkoušky požaduje odrazovou podlahu. Požadavek na měření emisí, který je v souladu s normou, zahrnuje v tomto případě nejen signál šířený přímo od zdroje rušení k anténě, ale i odrazy signálu od podlahy. Skládání signálů pak definuje amplitudu naměřeného rušení. Rozhodující je maximální úroveň z hodnot naměřených pro různou výšku a polarizaci antény. Výška antény byla zvolena od 50 cm do 350 cm s krokem 50 cm. Zvolený krok vycházel z rozměrů antény. Výsledky měření jsou uvedeny a vyhodnoceny v textu práce. Zdrojem rušení byl širokospektrální signál, který umožňoval vytipovat frekvence, na které je třeba se při měření podobného typu signálu zaměřit. Nejvýraznější změny v amplitudě naměřeného signálu se projeví na frekvencích 100 MHz a 160 MHz, kde je patrná značná rozdílnost v chování při horizontální a vertikální polarizaci, a pro frekvenci 70 MHz je charakteristická výrazná závislost amplitudy signálu na výšce antény pro obě polarizace. Z hodnocení výsledků vyplývá doporučení pro upřesnění metodiky měření.

Měření rušení bylo doplněno analýzou signálu produkovaného pohonem stojanu. Zajímalo mě vliv potenciálního rušení produkovaného pohonem stojanu na celkový naměřený signál a také zda stojan produkuje více rušivého signálu v horizontální nebo vertikální polarizaci. Maximální úrovně rušení vždy pro definovanou výšku antény jsou zaznamenány v práci na obr. 60. Pokud tedy byl signál produkovaný pohonem stojanu zaznamenán při výšce antény 1 m, byla maximální amplituda 45 dB při vertikální a 43 dB při horizontální polarizaci antény. Z podrobného zmapování rušení vyplývá doporučení, aby při měření vysokofrekvenčního rušení v kritickém pásmu amplitud byl stojan uveden do beznapětového stavu.

Přehled použité literatury

Internetové zdroje:

- [1] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node6>
- [2] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node7>
- [6] Červenka, D.: *Širokopásmové antény pro měření EMC, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií Ústav radioelektroniky, Brno 2008. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=9222
- [7] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node55>
- [8] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node56>
- [10] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66#o:08_26_zkusebni_am_signal
- [11] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66>
- [12] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:*
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48>

[13] *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].*
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:
<http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node46>

[14] *Rhode & Schwarz, Produkty: Řešení pro měření EMC a intensity pole [on-line].*
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: http://www.rohde-schwarz.cz/cz/products/test_and_measurement/emc_field_strength/ESCI-%7C-P%C5%99ehled-%7C-100-%7C-6397.html

Prezentace:

[3] *Müllerová, E.: Měření rušivých signálů, Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, Přednášky 2012.*

[9] *Laurenc, J.: Rázový impuls-„surge“, dle ČSN EN 61000-4-5, Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni, Přednášky 2012.*

Kniha:

[4] *Svačina, J.: Základy elektromagnetické kompatibility, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, Přednášky 2002.*

Katalog:

[5] *Emco.: Emc test systems, Antenna catalog, Austin, Texas, 1998.*

Seznam obrázků v textu

Obr. 1. Definice úrovní a mezí vyzářování a odolnosti.

(převzato z: Internetové zdroje [1]).

Obr. 2. Jednorázová mžiková porucha.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 3. Spojité poruchy.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 4. a) Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení napájecím, b) Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení řídicím, c) zemním.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 5. a) Parazitní vazba uzavřenou zemní smyčkou, b) rozpojení zemní smyčky na nízkých kmitočtech, c) kmitočtový průběh útlumu zemní smyčky.

(převzato z: Knihy[4])

Obr. 6. Způsoby minimalizace galvanických vazeb.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 7. a) Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů, b) a její zmenšení užitím oboustranného stínění.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 8. a) Kapacitní vazba vůči zemi, b) a její odstranění.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 9. Způsoby omezení induktivní vazby: a) omezení induktivní vazby závitem K nakrátko; b) kompenzace induktivní vazby zkroucením vodičů obou přijímačů; c) minimalizace vazby kolmým natočením vazebních smyček; d) minimalizace vazby stíněním obvodu přijímače.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 10. a) Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním, b) a vliv vložené stínící přepážky.

(převzato z: Knihy[4]).

Obr. 11. Blokové zapojení při měření rušivých signálů.

(převzato z: Katalog [5]).

Obr. 12. K definici anténního faktoru AF.

(převzato z: Prezentace [3]).

Obr. 13. Kmitočtový průběh anténního faktoru BiLogické antény.

(převzato z: Internetového zdroje [6]).

Obr. 14. Smyčková anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 15. Anténní faktor smyčkové anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 16. Laděné symetrizační dipóly.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 17. Anténní faktor laděného symetrizačního dipólu.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 18. Bikónická anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 19. Anténní činitel bikónické antény.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 20. Logaritmicko - periodická anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 21. Anténní činitel.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 22. Kónicko - logaritmická anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 23. Anténní faktor kónicko - logaritmické antény.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 24. Trychtýřová anténa.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 25. Anténní faktor trychtýřové antény.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 26. Sondy blízkého pole.

(převzato z: Prezentace [3]).

Obr. 27. Koaxiální kabel.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 28. Konektor BNC.

(Ets-Lindgren, EMC Antenna. [on-line]. [citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW: <http://www.ets-lindgren.com/EMCAntennas>).

Obr. 29. Blokové schéma měřiče elektromagnetického rušení.

(převzato z: Katalog [5]).

Obr. 30. Vnější vzhled měřicího přijímače pro elektromagnetické rušení.

(převzato z: Internetového zdroje [14]).

*Obr. 31. Definice a určování **a**) širokopásmových, **b**) rušivých signálů.*

(převzato z: Kniha [4]).

Obr. 32. Princip špičkového detektoru (detektor vrcholové hodnoty).

(převzato z: Kniha [4]).

Obr. 33. Principiální zapojení kvazi-špičkového detektoru.

(převzato z: Kniha [4]).

Obr. 34. Detektor střední hodnoty.

(převzato z: Kniha [4]).

Obr. 35. Odezvy různých druhů detektorů na signály s impulzní obdélníkovou obálkou o různé opakovací frekvenci.

(převzato z: Kniha [4]).

Obr. 36. Základní členění problematiky EMC.

(převzato z: Internetového zdroje [7]).

Obr. 37. Blokové zapojení při měření elektromagnetické odolnosti.

(převzato z: Katalog [5]).

Obr. 38. Grafické zobrazení úrovně testovacího signálu.

(převzato z: Katalog [5]).

Obr. 39. Zkušební sestava při testu odolnosti proti vysokofrekvenčnímu rušení.

(převzato z: Prezentace [3]).

Obr. 40. Vysokofrekvenční generátor.

(převzato z: Prezentace [3]).

Obr. 41. Průběh zkušebního signálu s 80 % AM (nemodulovaný signál má efektivní hodnotu 1 V).

(převzato z: Internetového zdroje [11]).

Obr. 42. Zkušební pracoviště pro zkoušky odolnosti vůči vyzářovanému vysokofrekvenčnímu poli (absorpční obložení stropu a stěn není naznačeno).

(převzato z: Internetového zdroje [11]).

Obr. 43. Provizorní zajištění bezodrazovosti zkušebního prostoru absorpčními panely.

(převzato z: Internetového zdroje [11]).

Obr. 44. Plocha homogenního pole dle ČSN EN 61000-4-3 ed. 3.

(převzato z: Internetového zdroje [11]).

Obr. 45. a), b), c) K tvorbě bezodrazové stěny komory z materiálu o impedanci volného prostoru.

(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].

[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:

http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).

Obr. 46. a), b) Princip užití ztrátového vedení nakrátko k realizaci bezodrazové stěny.

(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].

[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:

http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).

Obr. 47. Konstrukce pyramidálních absorbérů.

*(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).*

Obr. 48. Násobné odrazy v pyramidálním absorbérů.

*(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).*

Obr. 49. Konstrukce, rozměry a absorpční vlastnosti širokopásmového pyramidálního absorbérů pro kmitočtové pásmo 80 MHz až 40 GHz.

*(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).*

Obr. 50. a) Interiér částečně bezodrazové, b) plně bezodrazové absorpční haly EMC.

*(Encyklopedie elektromagnetické kompatibility, Ústav radioelektroniky, [on-line].
[citováno 21. 1. 2013] Dostupné z WWW:
http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node48#o:06_35_bezodrazove_steny_komory).*

Obr. 51. a) Půdorysný a boční pohled, b) na stanoviště pro měření na volném prostoru.

(převzato z: Internetového zdroje [13]).

Obr. 52. Zkušební stanoviště pro stacionární zkoušené zařízení.

(převzato z: Internetového zdroje [13]).

Seznam tabulek v textu

Tab. 1. Způsoby potlačení galvanické vazby zemní smyčkou.

(převzato z: Kniha [4]).

Tab. 2. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy A v měřicí vzdálenosti 10 m.

(převzato z: Prezentace [3]).

Tab. 3. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy B v měřicí vzdálenosti 10 m.

(převzato z: Prezentace [3]).

Tab. 4. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy A v měřicí vzdálenosti 3 m.

(převzato z: Prezentace [3]).

Tab. 5. Meze rušení šířeného zářením pro zařízení třídy B v měřicí vzdálenosti 3 m.

(převzato z: Prezentace [3]).

Tab. 6. Přehled měřicích antén.

(převzato z: Kniha [4]).

Tab. 7. Technické údaje měřicího přístroje.

(převzato z: Internetového zdroje [14])

Tab. 8. Šířka pásma měřičů rušení dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2.

(Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Část 1-1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Měřicí přístroje, Česká technická norma, 2007).

Tab. 9. Časové konstanty kvazi-špičkového detektoru dle ČSN EN 55016-1-1 ed. 2.

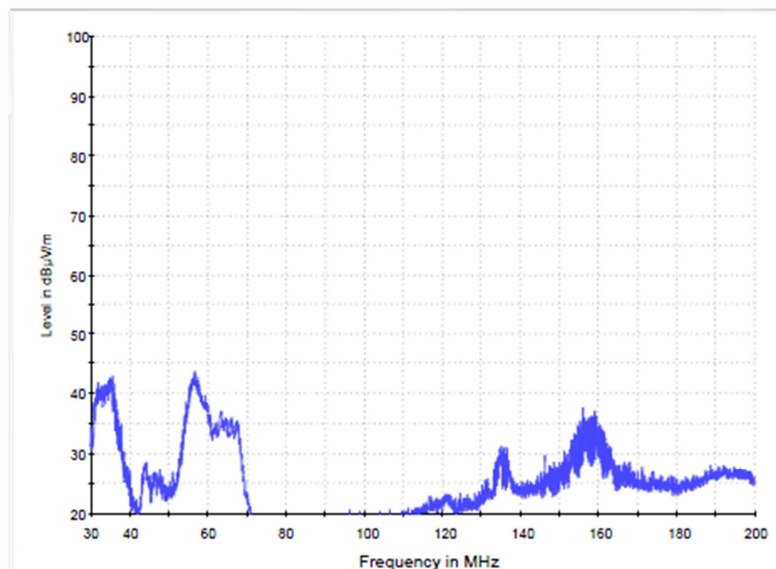
(Specifikace přístrojů a metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Část 1-1: Přístroje pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti - Měřicí přístroje, Česká technická norma, 2007).

Tab. 10. Zkušební úrovně vztahující se na všeobecné účely.

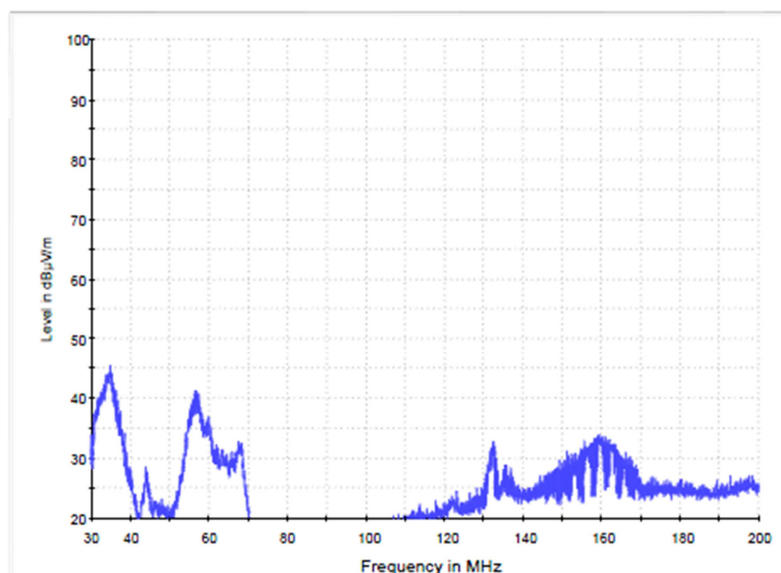
(Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-3: Zkušební a měřicí technika - Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti, Česká technická norma, 2006).

Příloha A – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz

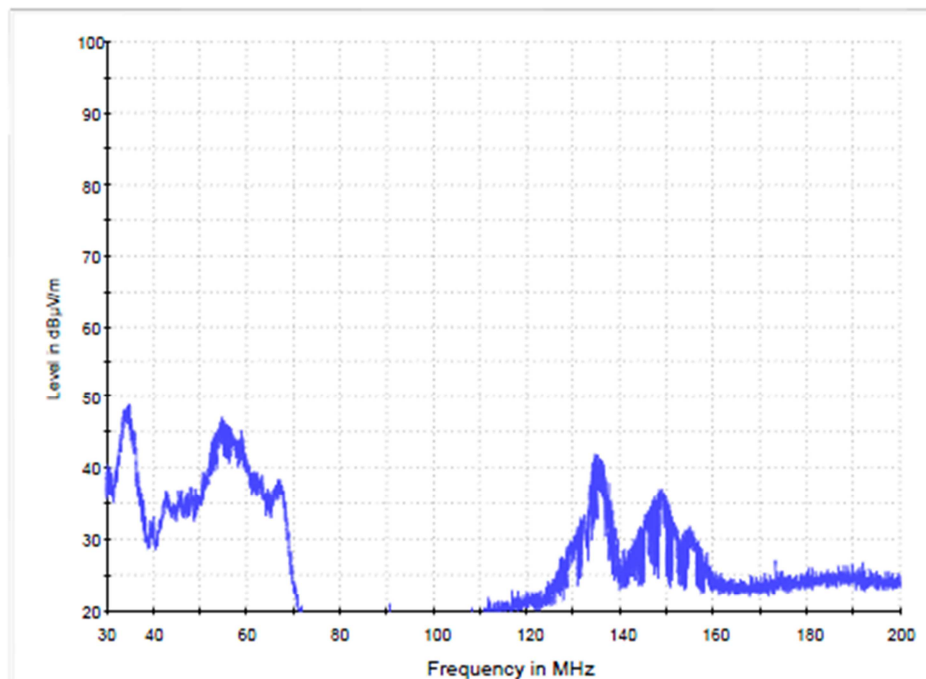
Měření probíhalo v bezodrazové komoře při vypnutém zdroji rušení a při zapnutém napájení stojanu pro posuv bikónické antény. Celé měření probíhalo od vzdálenosti 100 cm od podlahy bezodrazové komory do výšky 350 cm a to v polarizaci horizontální a vertikální.



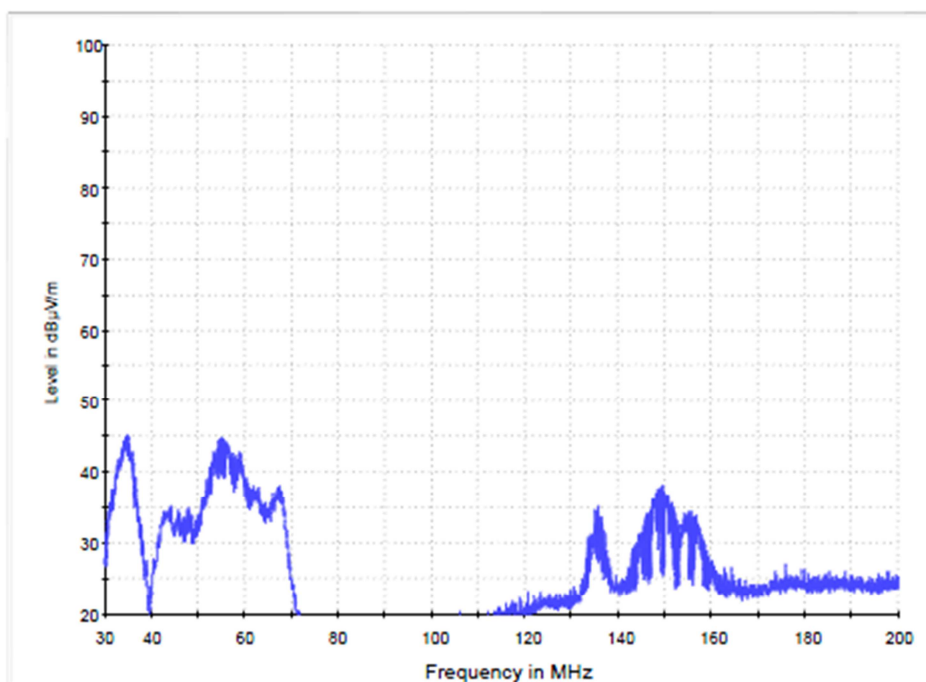
Obr. 67. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



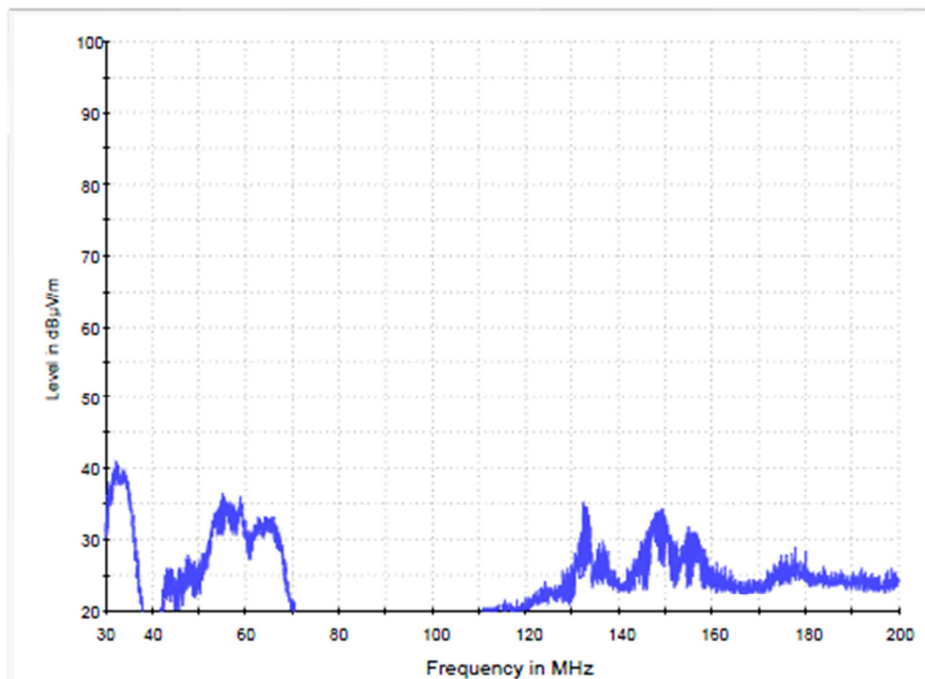
Obr. 68. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



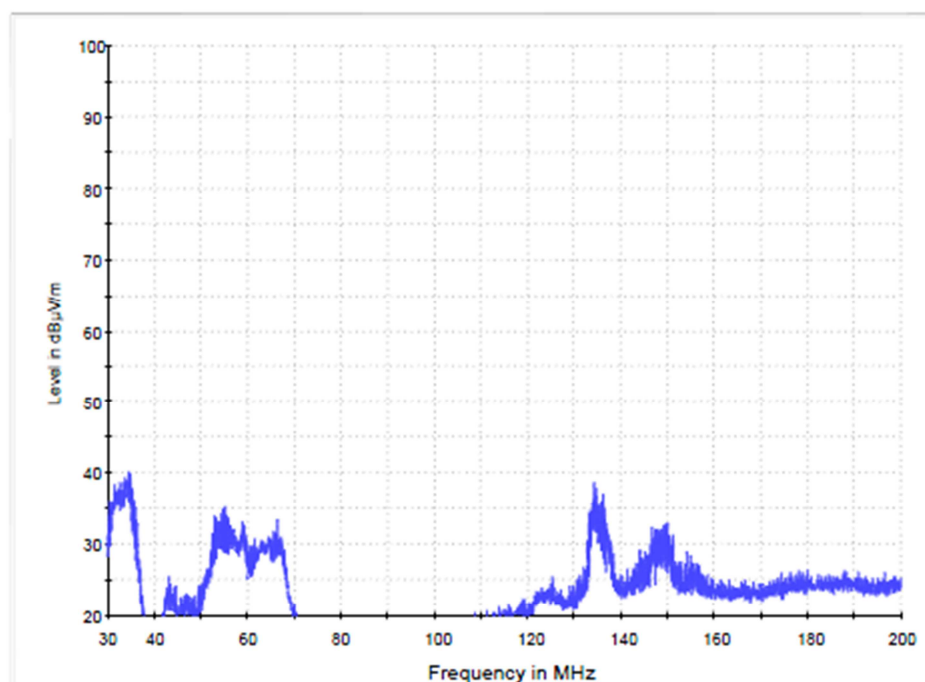
Obr. 69. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



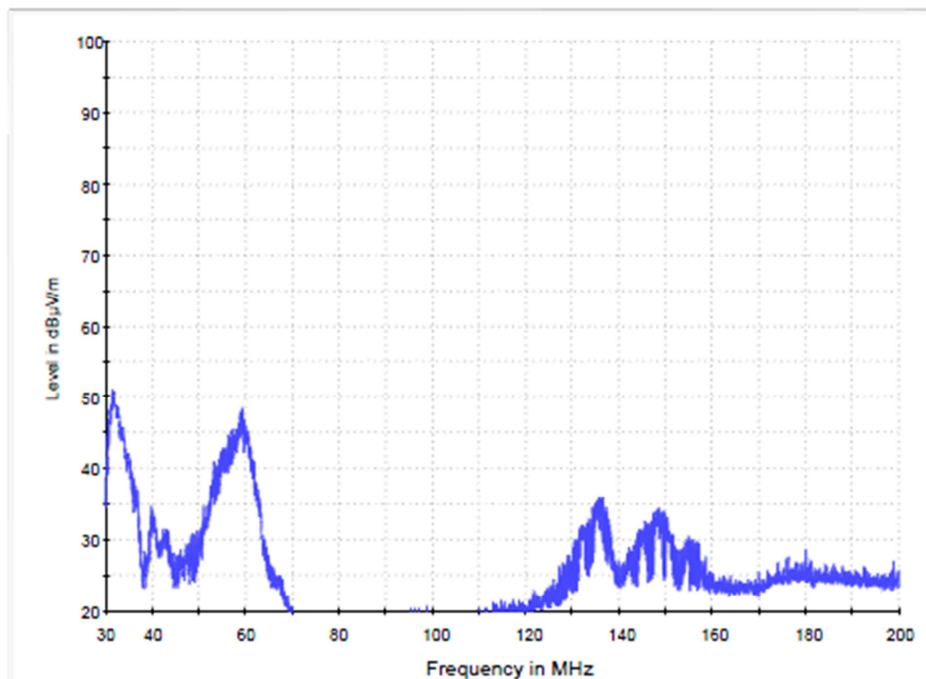
Obr. 70. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



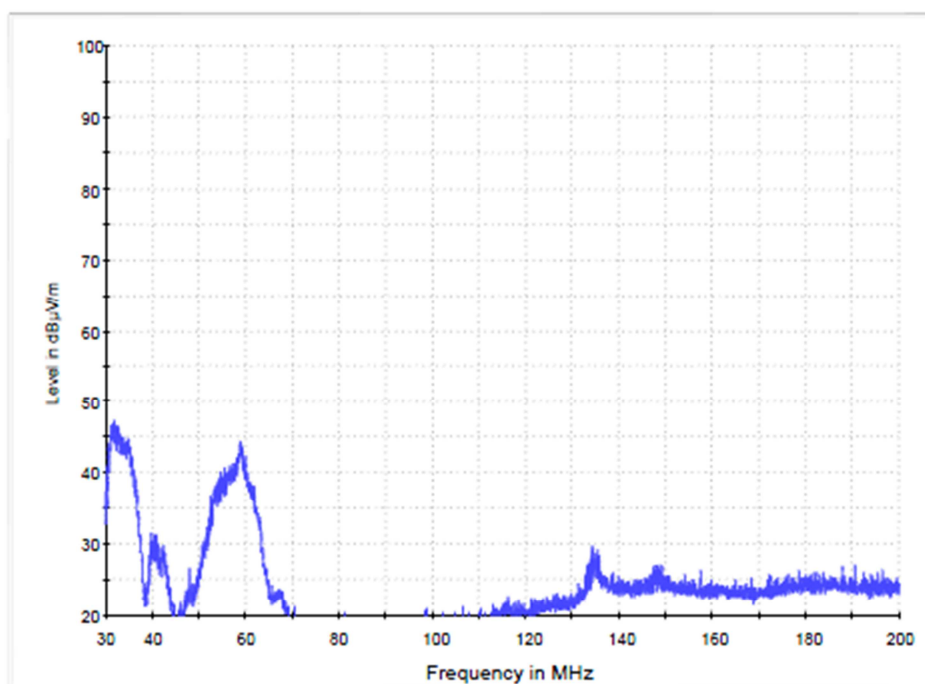
Obr. 71. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 200 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



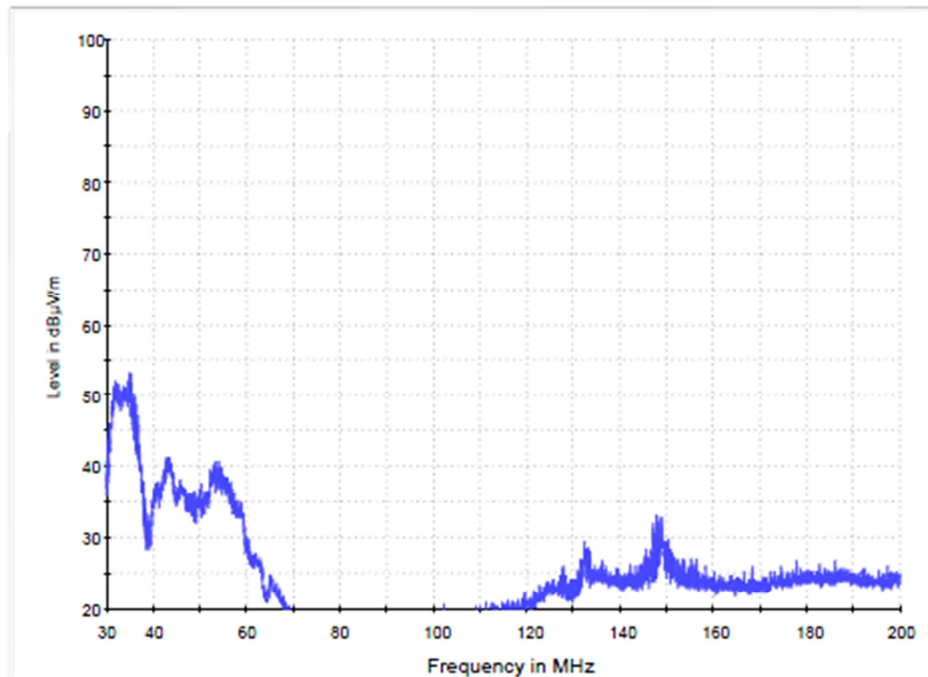
Obr. 72. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



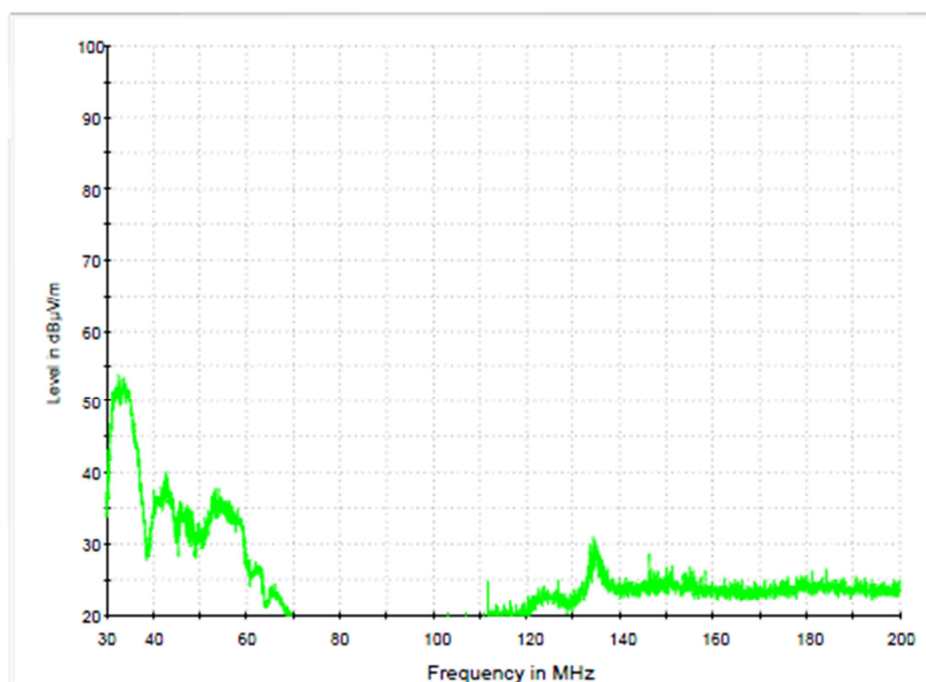
Obr. 73. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



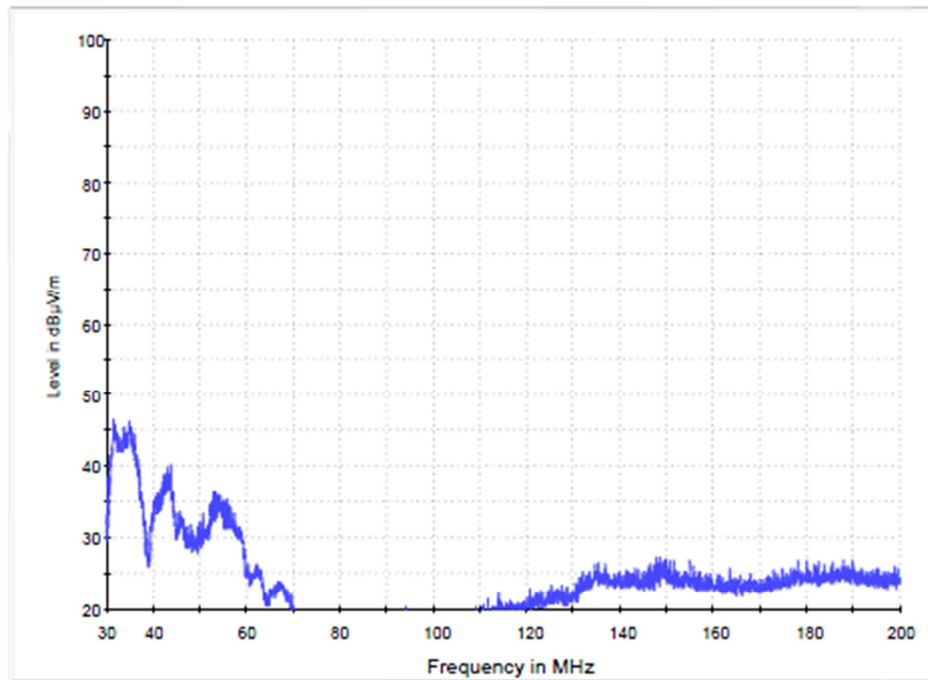
Obr. 74. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



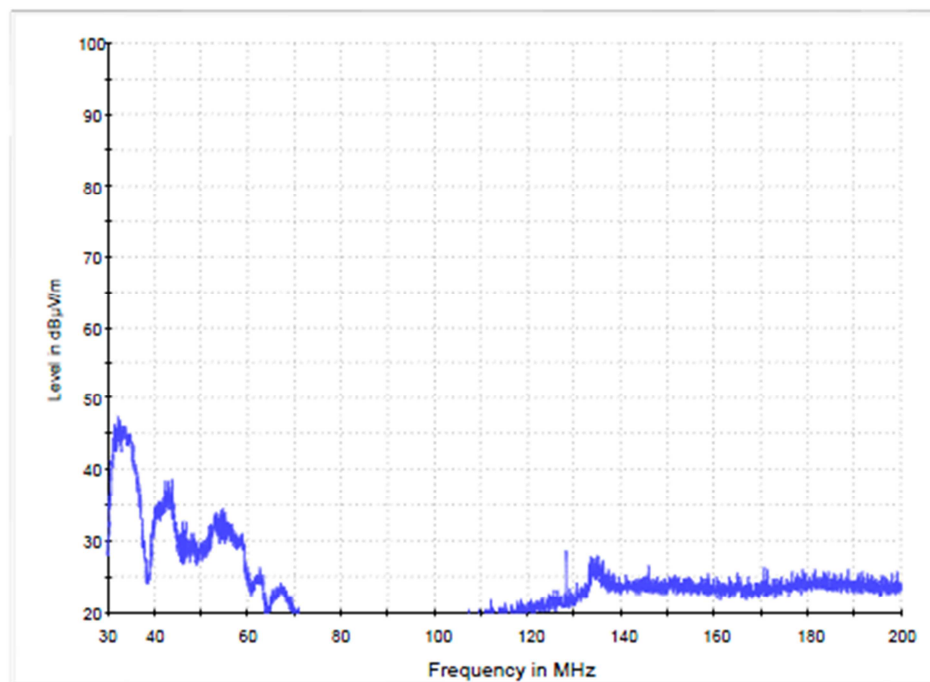
Obr. 75. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



Obr. 76. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



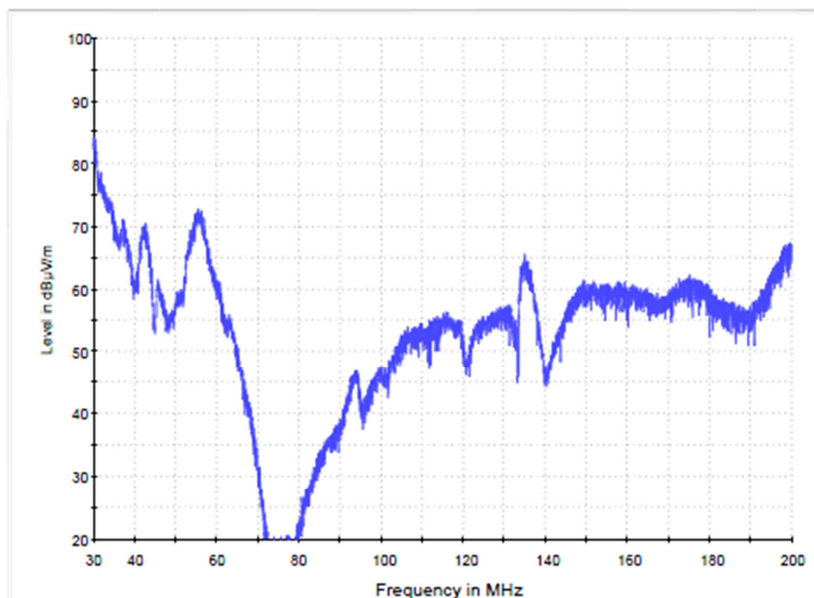
Obr. 77. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



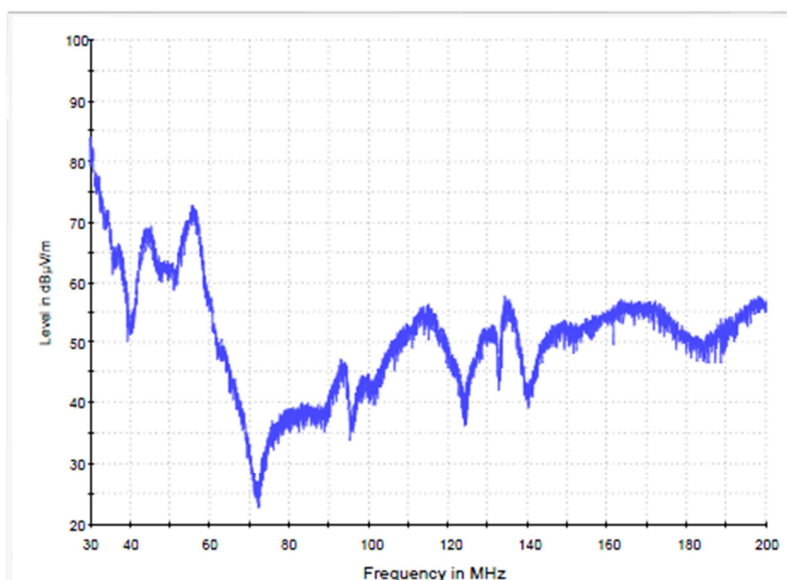
Obr. 78. Test posuvu stojanu, kdy anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.

Příloha B – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz

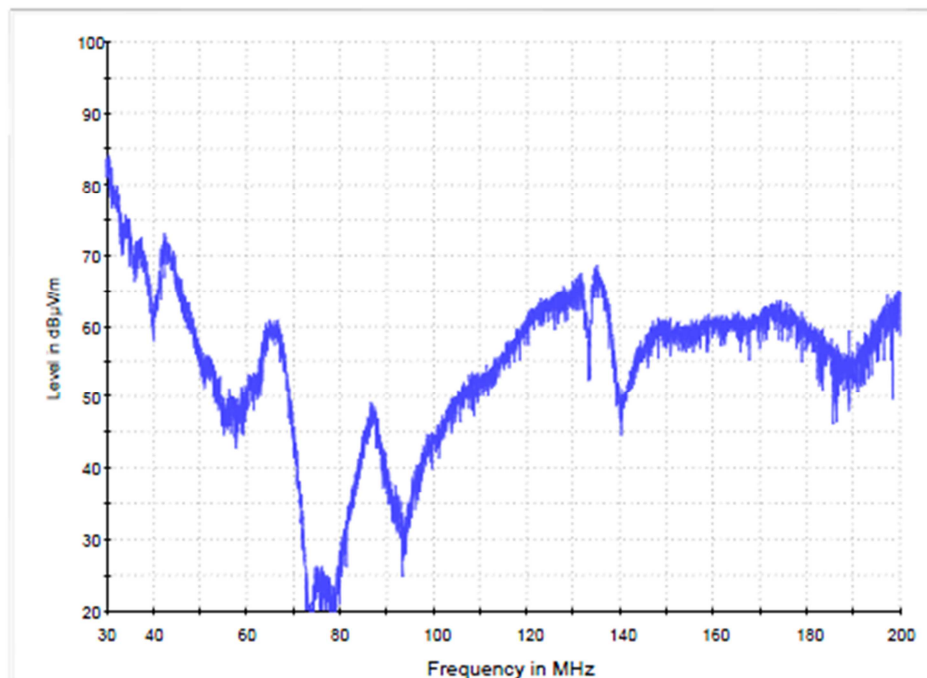
Měření probíhalo v bezodrazové komoře při zapnutém zdroji rušení a při zapnutém napájení stojanu pro posuv bikónické antény. Celé měření probíhalo od vzdálenosti 100 cm od podlahy bezodrazové komory do výšky 350 cm a to v polarizaci horizontální a vertikální.



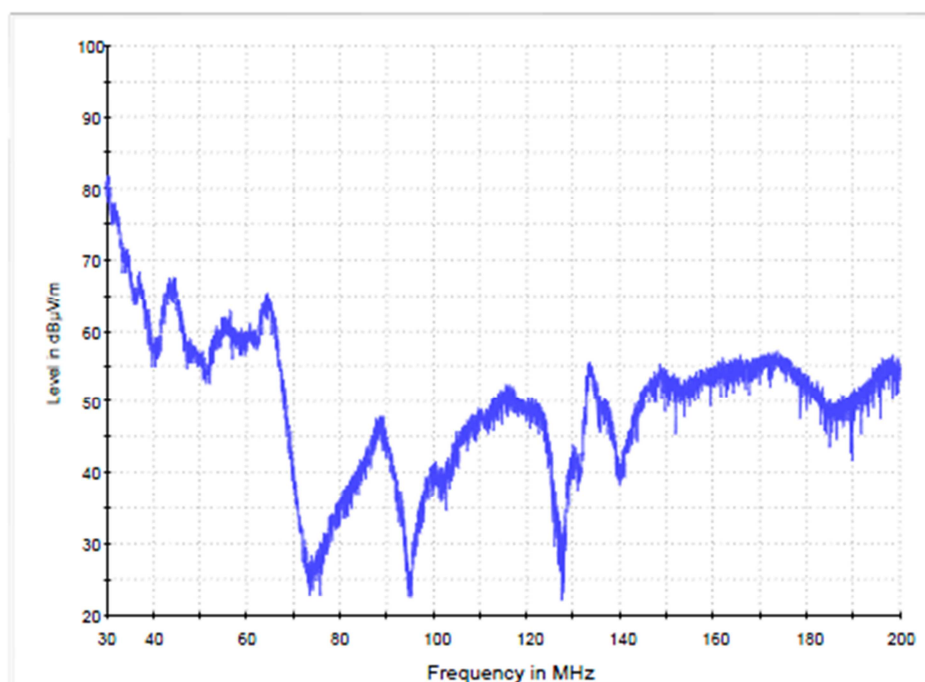
Obr. 79. Anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



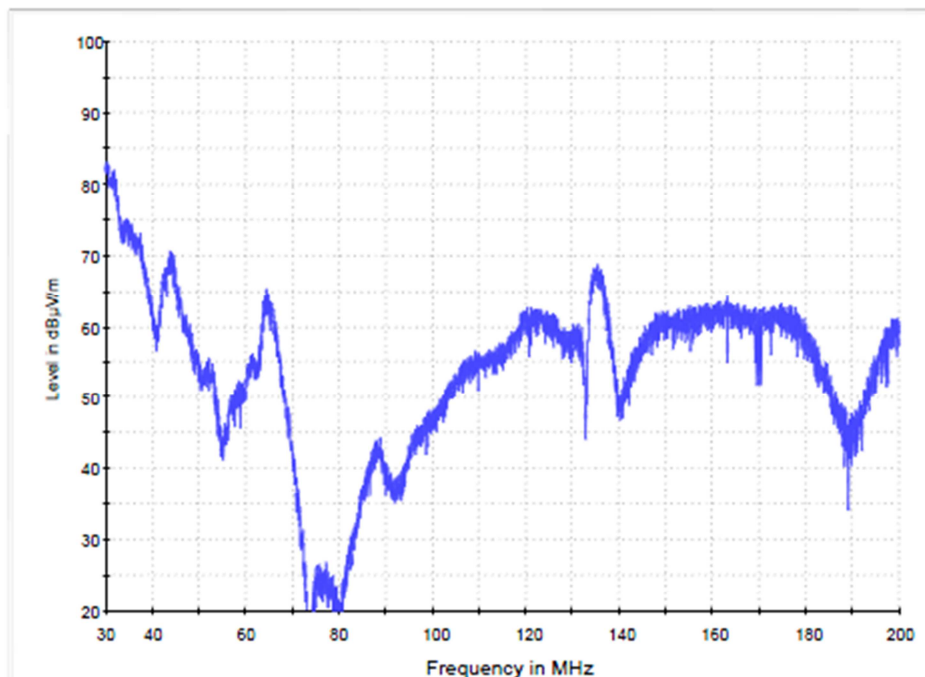
Obr. 80. Anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



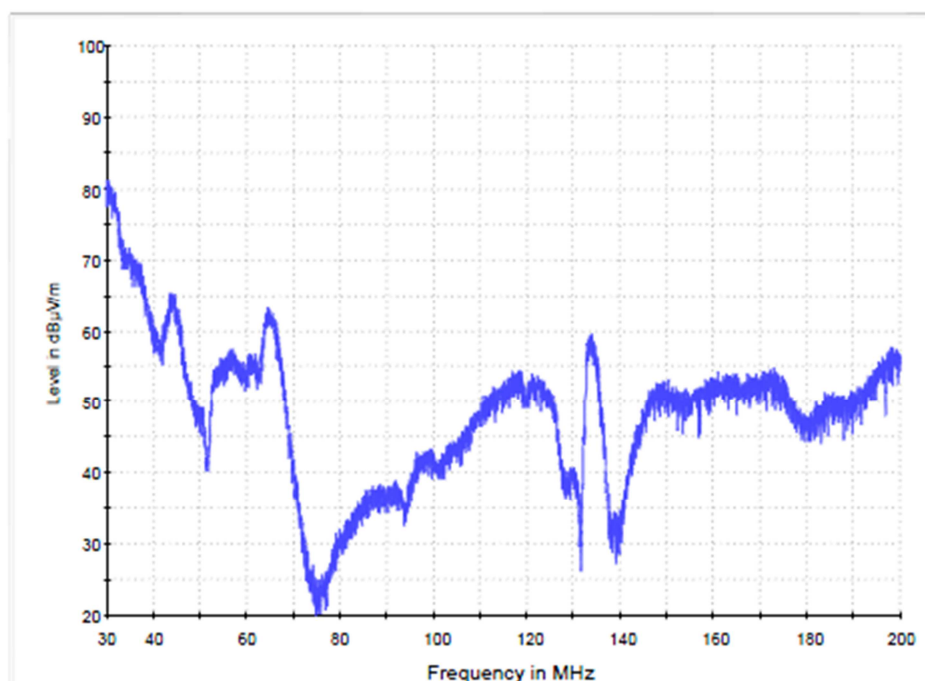
Obr. 81. Anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



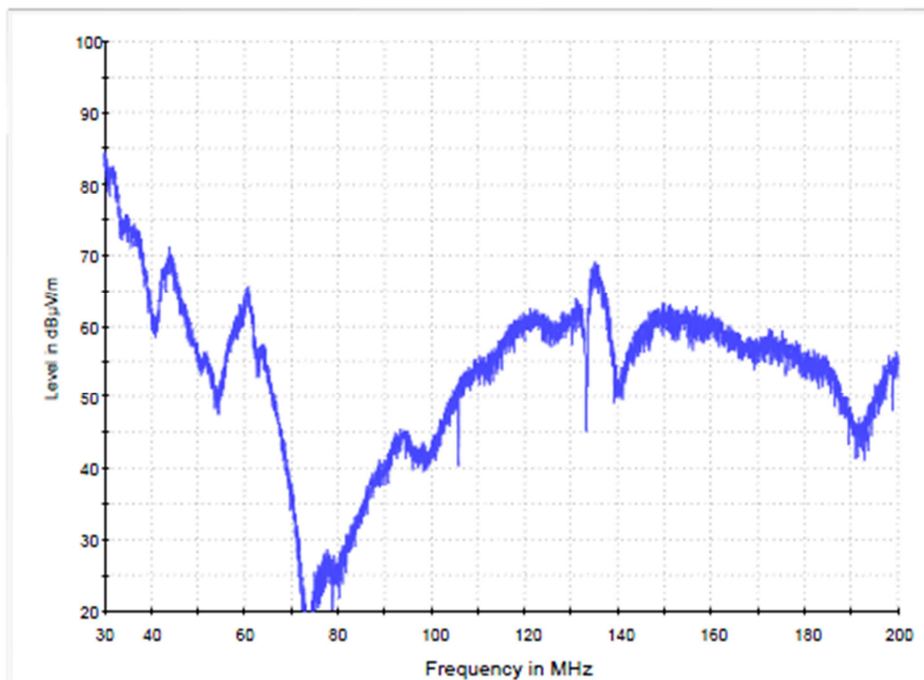
Obr. 82. Anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



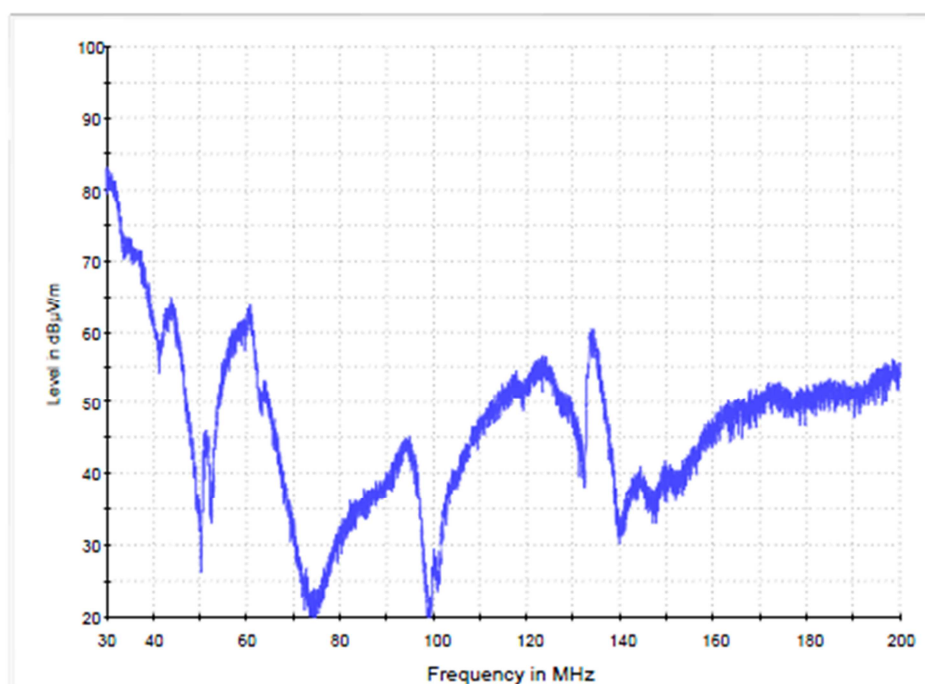
Obr. 83. Anténa byla umístěná ve výšce 200 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



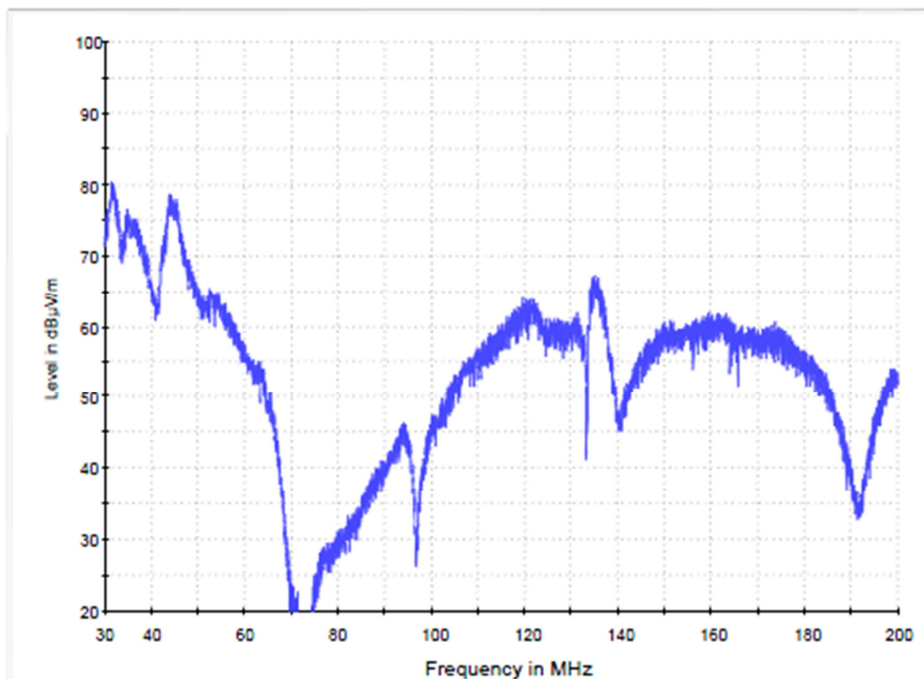
Obr. 84. Anténa byla umístěná ve výšce 200 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



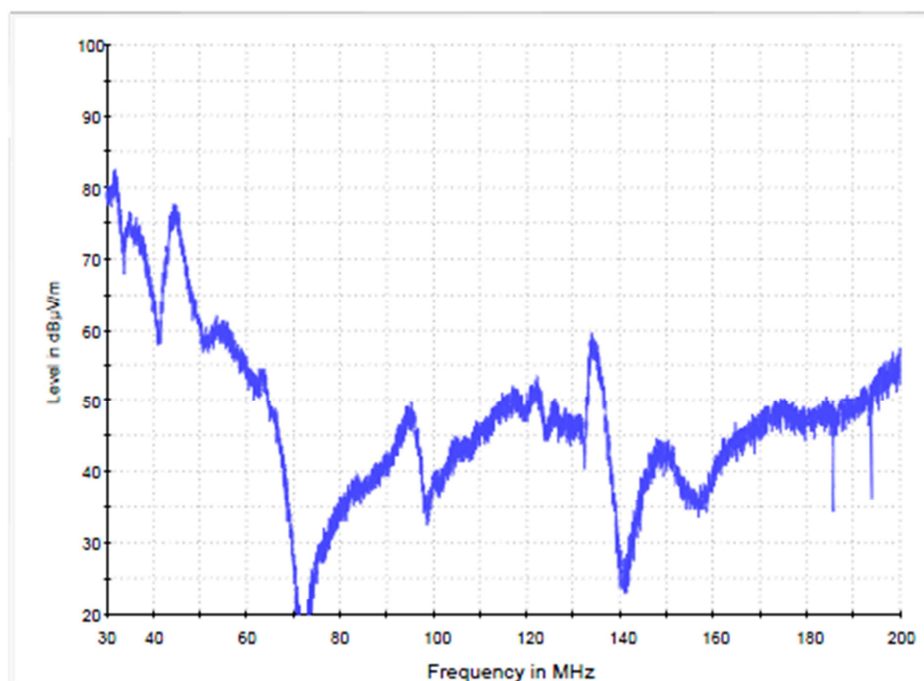
Obr. 85. Anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



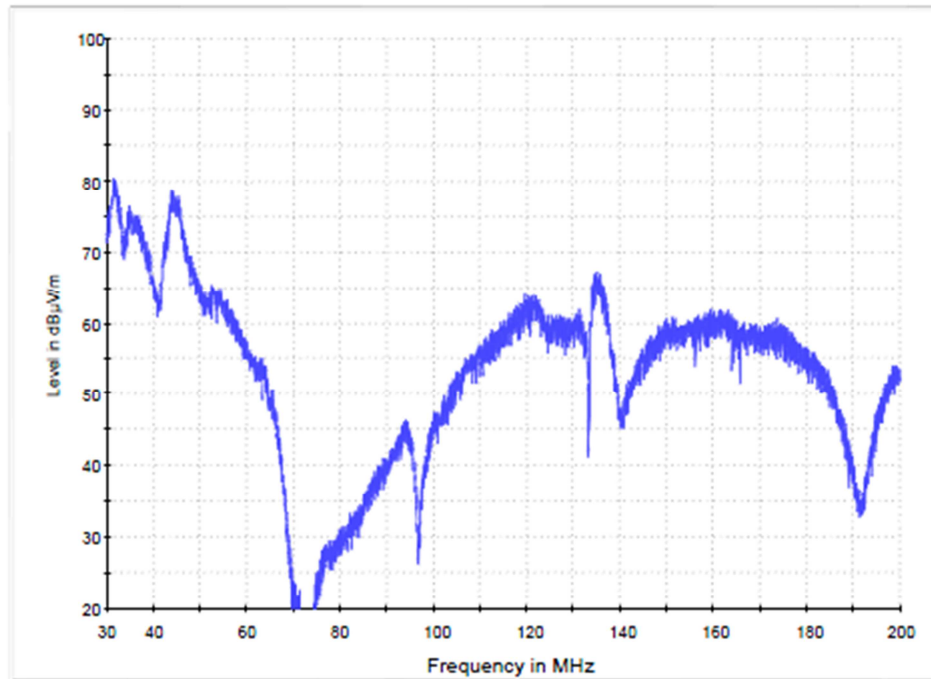
Obr. 86. Anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



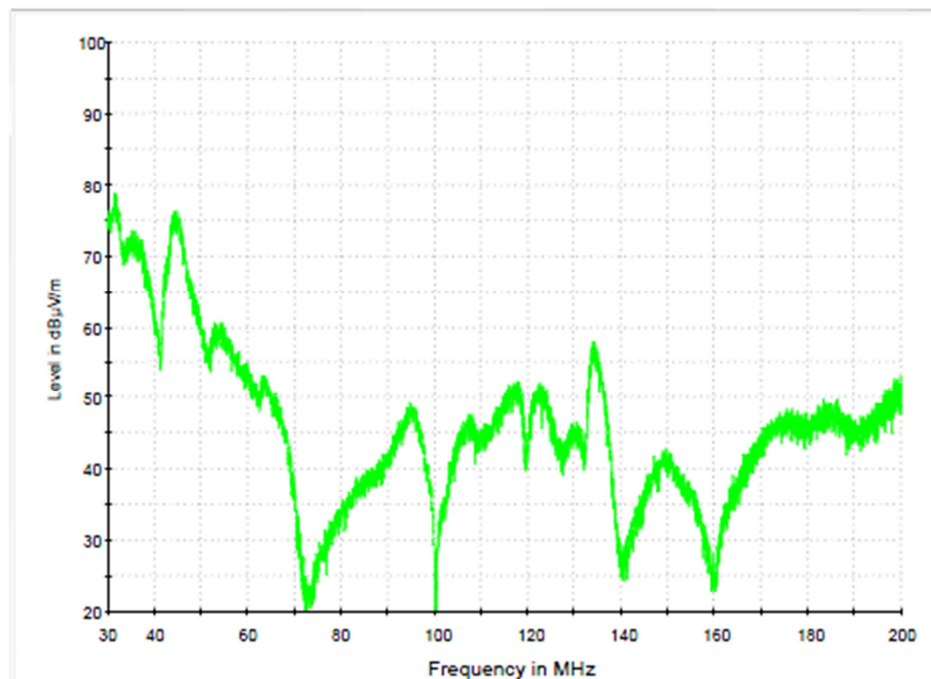
Obr. 87. Anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



Obr. 88. Anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.



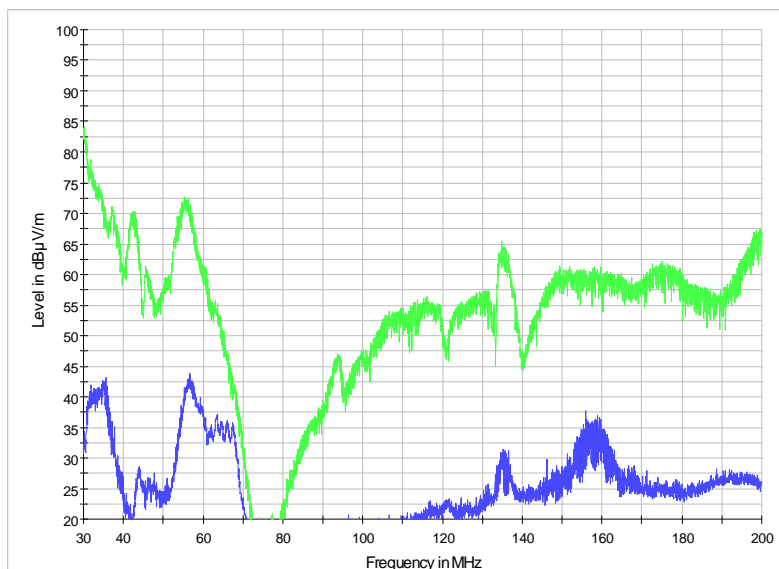
Obr. 89. Anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory a při horizontální polarizaci.



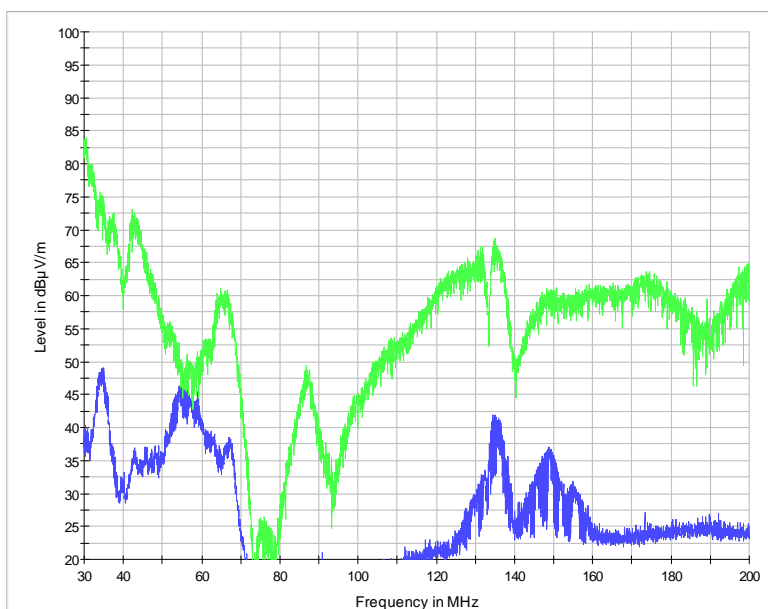
Obr. 90. Anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory a při vertikální polarizaci.

Příloha C – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz

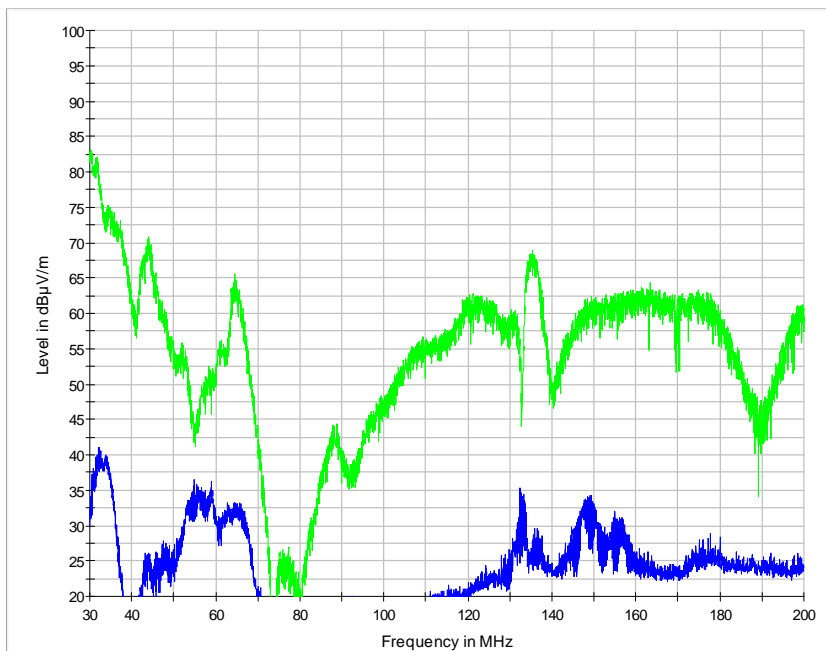
Porovnání grafů při horizontální polarizaci antény, kde je zapnutý zdroj rušení a také zapnuté napájení stojanu pro posuv antény v porovnání vypnutého zdroje rušení.



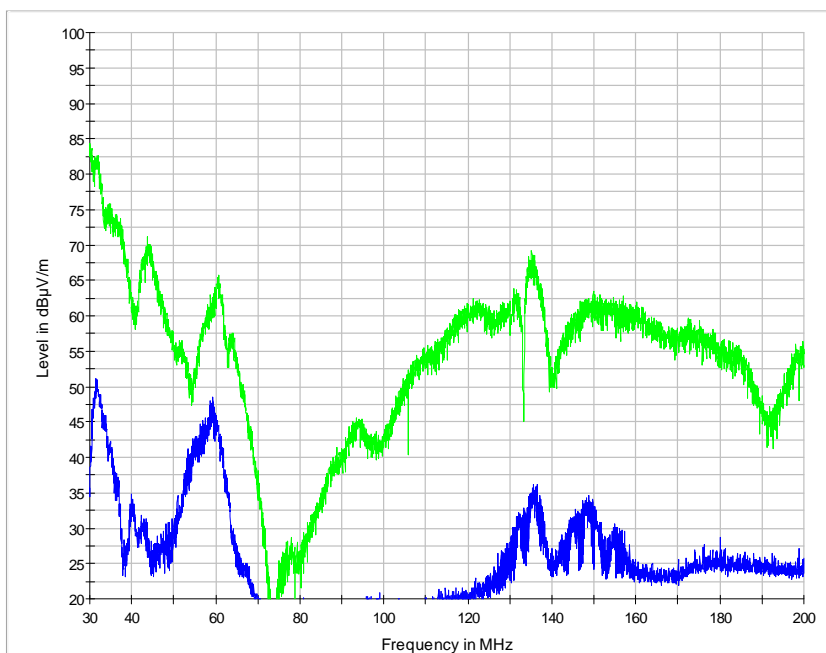
Obr. 91. Anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory.



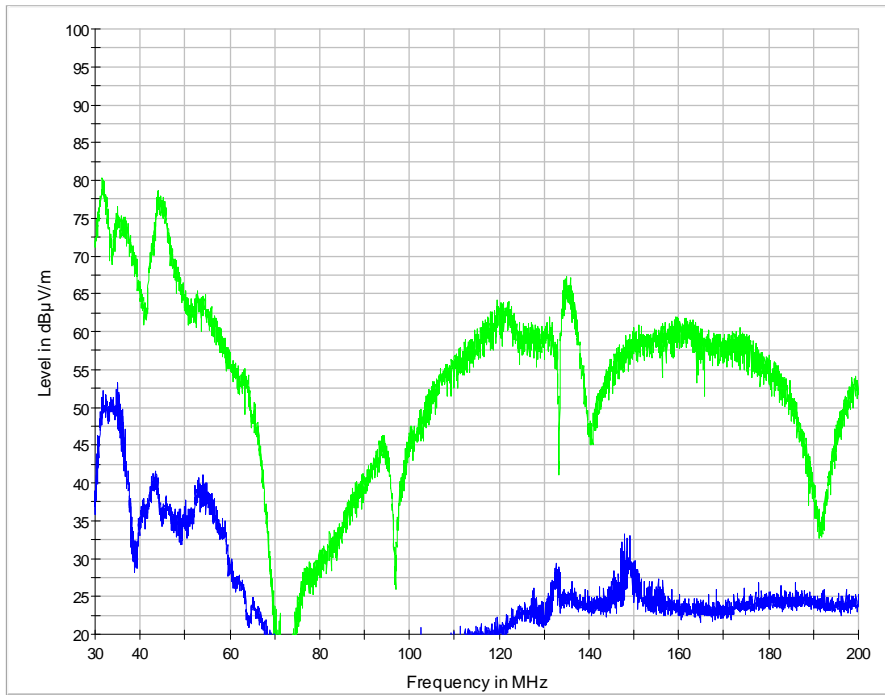
Obr. 92. Anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory.



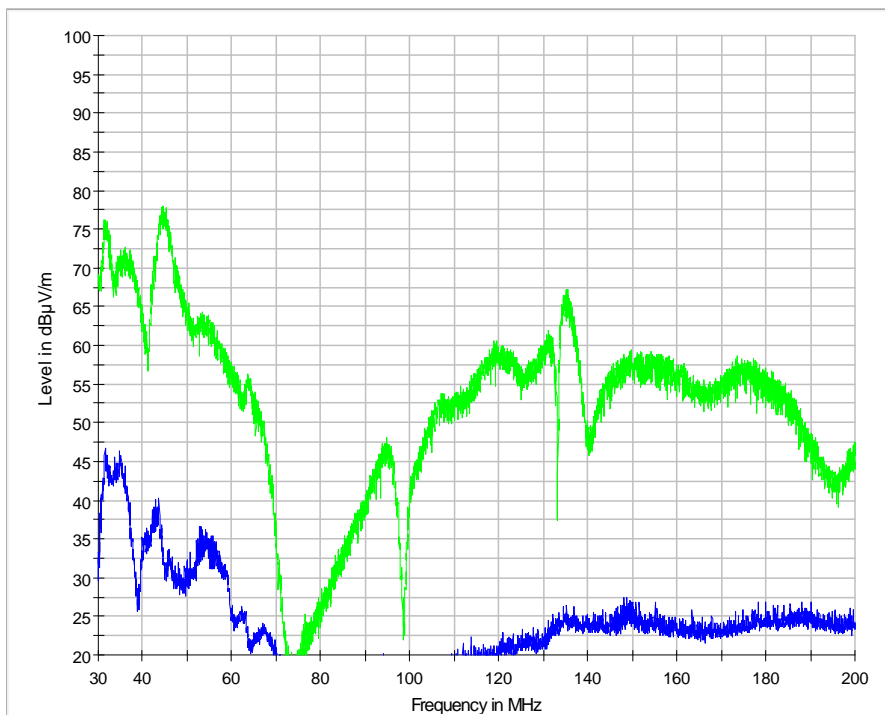
Obr. 93. Anténa byla umístěná ve výšce 200 cm od podlahy komory.



Obr. 94. Anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory.



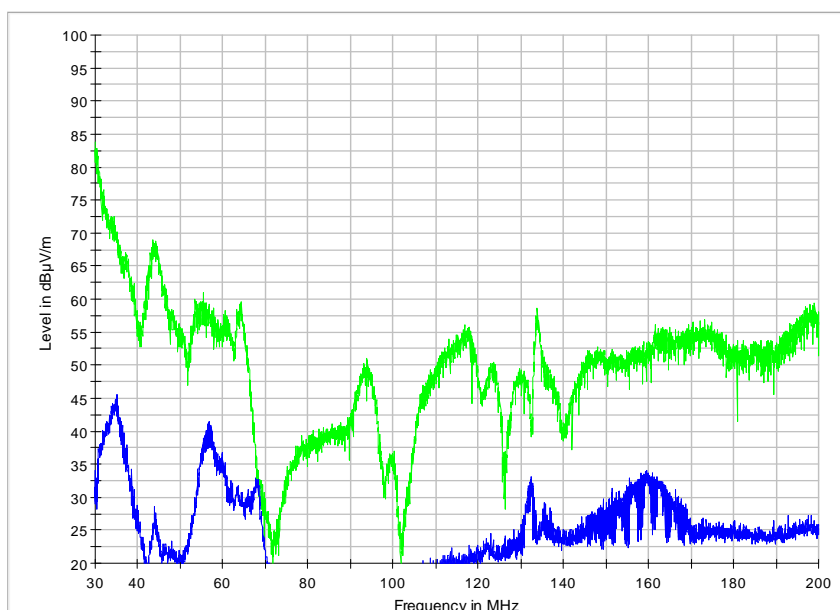
Obr. 95. Anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory.



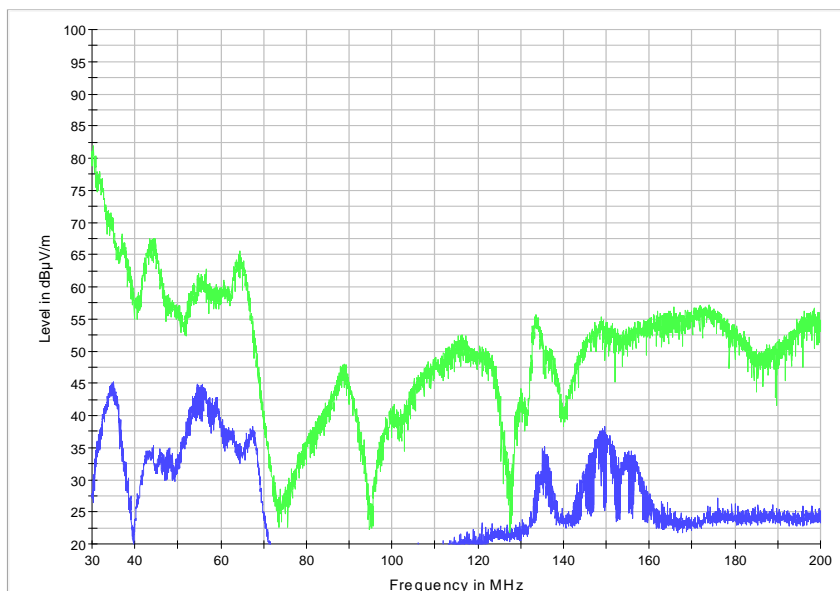
Obr. 96. Anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory.

Příloha D – měření v kmitočtovém pásmu 30 až 200 MHz

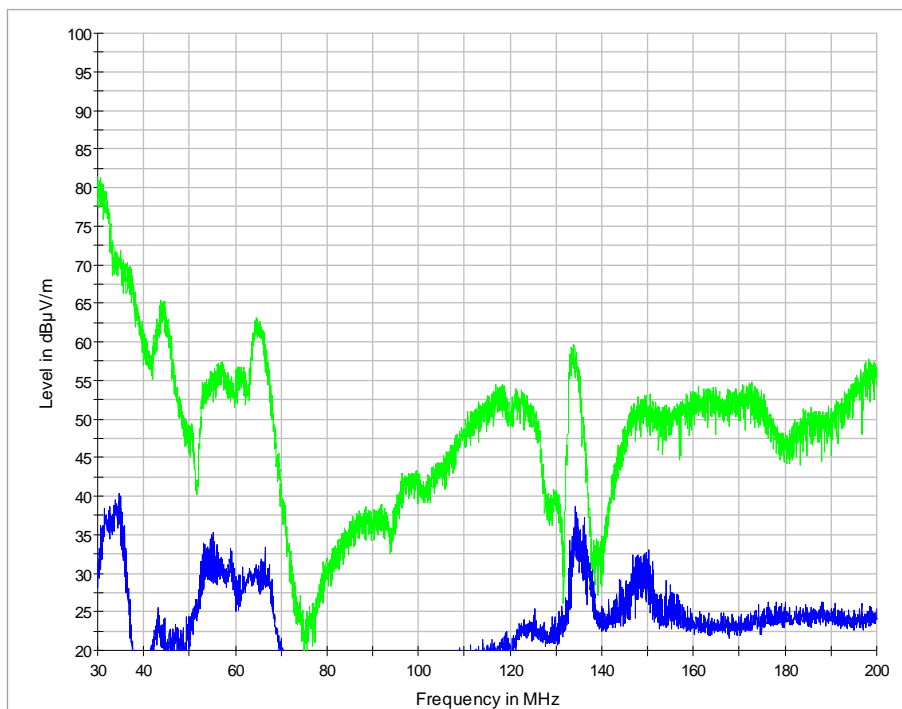
Porovnání grafů při vertikální polarizaci antény, kde je zapnutý zdroj rušení a také zapnuté napájení stojanu pro posuv antény v porovnání vypnutého zdroje rušení.



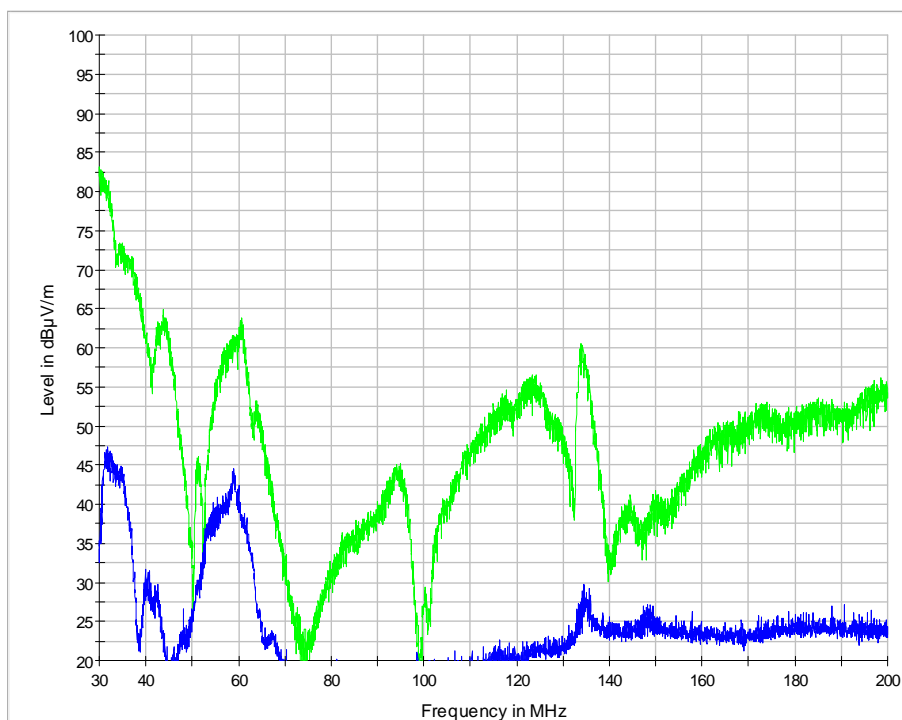
Obr. 97. Anténa byla umístěná ve výšce 100 cm od podlahy komory.



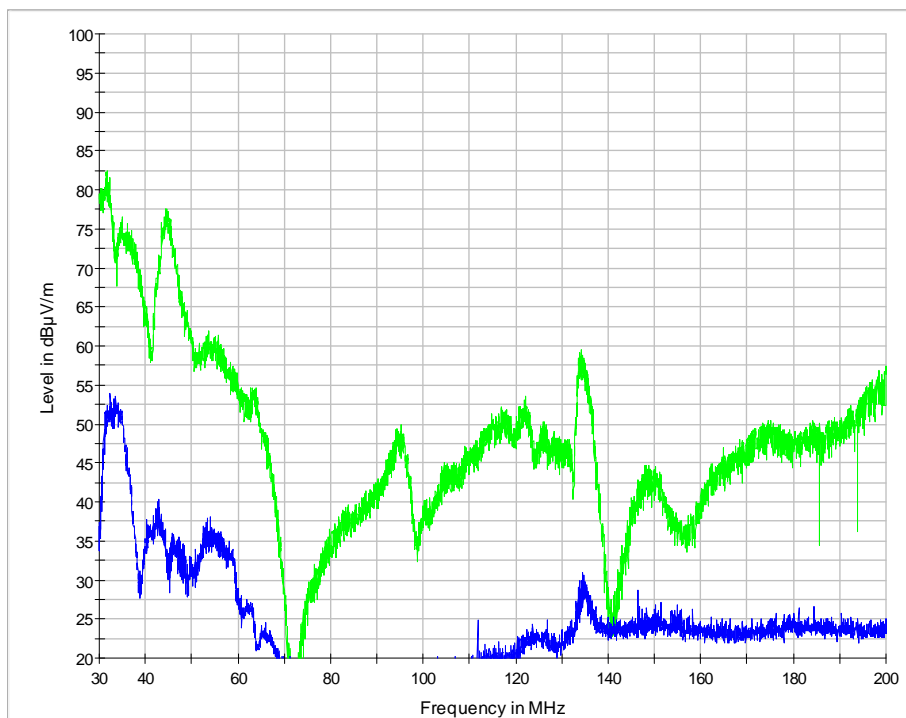
Obr. 98. Anténa byla umístěná ve výšce 150 cm od podlahy komory.



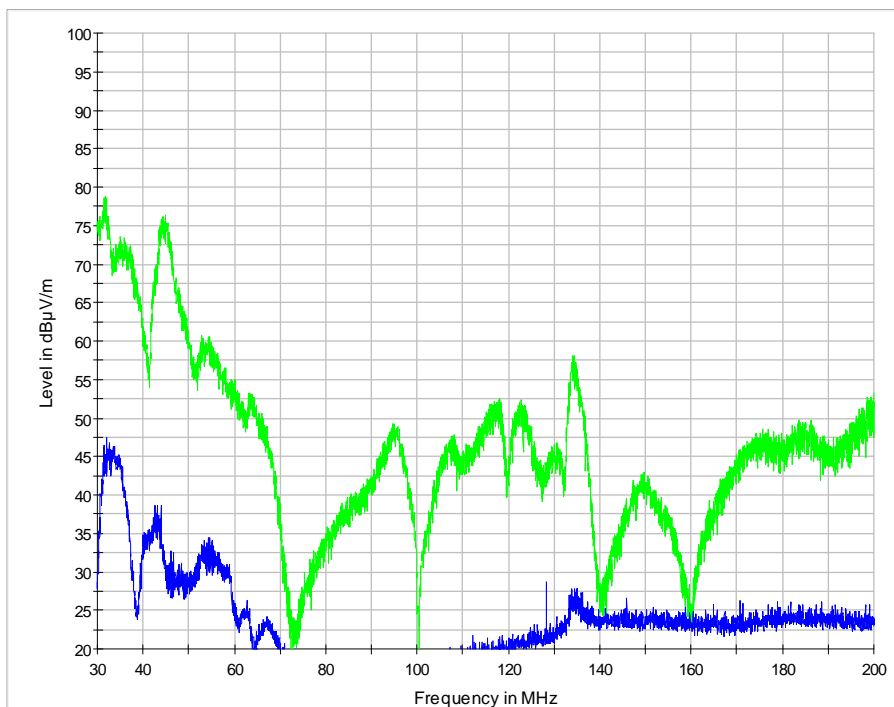
Obr. 99. Anténa byla umístěná ve výšce 200 cm od podlahy komory.



Obr. 100. Anténa byla umístěná ve výšce 250 cm od podlahy komory.



Obr. 101. Anténa byla umístěná ve výšce 300 cm od podlahy komory.



Obr. 102. Anténa byla umístěná ve výšce 350 cm od podlahy komory.