

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Zajištění homogenity zkušebního vysokofrekvenčního
elektrického pole**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Michal VOSECKÝ**
Osobní číslo: **E13N0118P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Telekomunikační a multimediální systémy**
Název tématu: **Zajištění homogenity zkušebního vysokofrekvenčního elektrického pole**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Zpracujte možné způsoby testování odolnosti proti vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli.
2. Popište metody kalibrace zkušebního pole v bezodrazové komoře.
3. Proveďte měření uniformity zkušebního pole podle popsanych metod.
4. Vyhodnoťte dosažené výsledky.

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

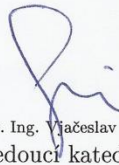
1. Technická norma ČSN EN 61000-4-3
2. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Pro elektronická zařízení používaná po celém světě je podstatné, aby splňovala požadavky z hlediska elektromagnetické kompatibility. Problematika elektromagnetické kompatibility se rozděluje na dvě větší části, a to na elektromagnetickou interferenci (neboli rušení) a elektromagnetickou odolnost. V tomto dokumentu je rozebráno, jak a kde je možné testovat zařízení z pohledu elektromagnetické odolnosti, která je kritickým parametrem pro zařízení ve smyslu dostatečně odolávat dalším elektromagnetickým polím, která se nachází v jeho okolí a zabraňovat jim tak v narušení správné funkce tohoto zařízení. Pro bezchybné a publikovatelné výsledky měření elektromagnetické odolnosti v bezodrazové komoře je nezbytné udržovat některé parametry této komory v přijatelných mezích. Jedním z těchto parametrů je homogenita elektrického pole, která musí být kontrolována ve specifických bodech prostoru bezodrazové komory dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, přičemž pro zajištění této homogenity doporučuje daná norma dvě metody kalibrace, a to kalibraci konstantního výkonu a kalibraci konstantní intenzity pole. Předmětem této práce je zároveň uskutečnění měření homogenity elektrického pole uvnitř bezodrazové komory na ZČU v Plzni a výsledky tohoto měření zobrazit a vyhodnotit na konci tohoto dokumentu. S ohledem na výsledky tohoto měření, je možné klasifikovat bezodrazovou komoru z hlediska dostatečné kvality homogenity elektrického pole, a pokud tato komora splňuje požadavky normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, pak je uvnitř z tohoto pohledu oprávněna k testování elektromagnetické odolnosti. Při provádění tohoto měření byla aplikována pouze metoda kalibrace konstantního výkonu, a to z důvodu vysoké časové náročnosti druhé popisované metody. Z naměřených výsledků vyplynulo, že nároky uvedené normy bezodrazová komora splňuje a je tedy z hlediska uniformity elektrického pole oprávněna k testování elektromagnetické odolnosti ve frekvenčním pásmu od 80 MHz do 3 GHz pro vertikální či horizontální polarizaci vysílací antény, a to nejdéle jeden rok ode dne provádění měření, tj. do 26. 3. 2016.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická odolnost, homogenní (uniformní) elektrické vysokofrekvenční pole, zkoušené zařízení, bezodrazová komora, polo-bezodrazová komora, zkušební úroveň, sonda elektrického pole, kalibrace elektrického pole, metoda kalibrace konstantního výkonu, metoda kalibrace konstantní intenzity pole

Abstract

It is important for electronic devices used in a whole world to meet the requirements of an electromagnetic compatibility. The issue of the electromagnetic compatibility consists of two main groups called an electromagnetic interference and an electromagnetic susceptibility. In this document will be described how and where is it possible to test the electromagnetic susceptibility of a device, which is critical parameter for testing device in order to sufficiently resist the another electromagnetic fields, which are in its surroundings and prevent them to interrupt the correct function of this device. For right and publishable results of the electromagnetic susceptibility measurement in an anechoic chamber is necessary to maintain some parameters of this chamber in acceptable values. One of these parameters is an uniformity of the electric field, which has to be controlled in specific points in the space inside the anechoic chamber according to the standard ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 and also this standard recommends two methods how the uniform field area can be created and they are the constant power and the constant field strength uniform field testing methods. The object of this work is also the electric field uniformity measurement in the anechoic chamber at the University of West Bohemia in Pilsen, evaluate and publish the results of this measurement in the end of this document. Based on these results it is possible to classify the anechoic chamber from a position of the sufficient electric uniform field quality and if this chamber fulfills the requirements of the standard ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, then it will get an approval from the uniform electric field point of view to test the electromagnetic susceptibility inside itself. During the execution of this measurement inside the anechoic chamber was applied only the constant power uniformity testing method, that was because of time consuming second described method. The results of the uniform field measurement in anechoic chamber confirmed, that the requirements of described standard were met and it means, that this anechoic chamber is authorized to electromagnetic susceptibility testing in a frequency range from 80 MHz to 3 GHz with horizontal or vertical polarization of a transmitting antenna and this is valid mostly to the period of one year from the measurement made, that is until 26. 3. 2016.

Key words

Electromagnetic compatibility, electromagnetic susceptibility, uniform field area, equipment under test, fully anechoic chamber, semi-anechoic chamber, testing level, electric field probe, constant power uniform field testing method, constant field strength uniform field testing method

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 28.4.2015

Bc. Michal Vosecký

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za velmi včasné, vstřícné a užitečné reakce ve smyslu udílení rad a připomínek, které společně přispěly k zhotovení této práce.

Obsah

1	Elektromagnetická odolnost	1
1.1	Úvod do elektromagnetické odolnosti a její testování.....	1
1.2	Kritéria elektromagnetické odolnosti	3
1.3	Obecná metodika zkoušek elektromagnetické odolnosti.....	5
1.4	Typy zkušebních signálů pro zkoušky elektromagnetické odolnosti	8
2	Prostory používané pro testování elektromagnetické odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli	11
2.1	Volné prostranství.....	11
2.2	Elektromagneticky stíněné prostory	12
2.2.1	Princip obložení stěn bezodrazové stíněné komory	15
2.2.2	Plně bezodrazová, polo-bezodrazová a modifikovaná polo-bezodrazová komora	23
2.2.3	Odrazová komora	24
2.2.4	Speciální zkušební komory	27
2.2.5	Porovnání jednotlivých typů měřicích komor	33
3	Zkoušky elektromagnetické odolnosti proti rušivému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli.....	34
3.1	Zkušební úrovně	34
3.1.1	Zkušební úrovně pro všeobecné účely	35
3.1.2	Zkušební úrovně pro zkoušky odolnosti zařízení vůči vysokofrekvenčně vyzařujícímu rušení z digitálních radiotelefonů a dalších vysokofrekvenčně vyzařujících přístrojů.....	36
3.2	Vybavení zkušebního pracoviště	36
3.3	Popis zkušebního pracoviště.....	38
3.4	Kalibrace měřicího pole.....	39
3.4.1	Kalibrace měřicího pole metodou konstantní intenzity pole.....	44
3.4.2	Kalibrace měřicího pole metodou konstantního výkonu.....	46

3.4.3	Další metoda částečného ozáření nazývaná „metodou nezávislých oken“	49
3.5	Kalibrace měřicí sondy elektrického pole	52
3.5.1	Požadavky kladené na sondu elektrického pole	52
3.6	Sestava zkušebního pracoviště	53
3.6.1	Uspořádání zařízení umístěného na stole	54
3.6.2	Uspořádání zařízení umístěného na podlaze	55
3.6.3	Uspořádání kabeláže	56
3.6.4	Uspořádání zařízení určeného k upevnění na lidském těle	56
3.7	Postup zkoušky	56
3.7.1	Laboratorní referenční podmínky	57
3.7.2	Realizace zkoušky	57
3.8	Vyhodnocení naměřených výsledků	59
3.9	Protokol zkoušky	59
4	Měření homogenity zkušebního vysokofrekvenčního elektrického pole v bezodrazové komoře	60
4.1	Schéma měřicího řetězce a popis jednotlivých bloků	60
4.1.1	Technické parametry jednotlivých měřicích prvků	61
4.2	Postup měření homogenity pole metodou konstantního výkonu	65
4.3	Naměřené závislosti uniformity pole metodou konstantního výkonu	66
	Závěr	71
	Seznam literatury a informačních zdrojů	72
	Přílohy	74
	Příloha A - Bezodrazová měřicí komora	74
	Příloha B - Polo-bezodrazová měřicí komora	75
	Příloha C - Vibrující intrinzická odrazová měřicí komora	76
	Příloha D - Transportní intrinzická odrazová měřicí komora	77
	Příloha E - Zkušební měřicí komora GTEM	79

Příloha F - Požadavky na plochu homogenního pole.....	81
Příloha G - Bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni.....	82
Příloha H - Bezodrazová měřicí komora firmy Frankonia.....	86
Příloha CH - Příklady naměřených průběhů	87

Seznam symbolů a zkratk

EMSelektromagnetická odolnost (susceptibilita)

EMIelektromagnetické rušení (interference)

EMCelektromagnetická kompatibilita

λ vlnová délka [m]

c rychlost šíření elektromagnetické vlny [m/s]

f frekvence [Hz]

f_0 rezonanční frekvence [Hz]

ε_0 permitivita vakua [F/m]

ε relativní permitivita [-]

μ_0 permeabilita vakua [H/m]

a, b, c rozměry vnitřního prostoru komory [m]

m, n, p vidová čísla

Z_0 charakteristická impedance [Ω]

Z_k zakončovací impedance [Ω]

ω_0 úhlová frekvence [rad/s]

T perioda [s]

t čas [s]

X_0 amplituda [V]

τ šířka impulsu [s]

x časová oblast

Cfrekvenční oblast

P_{odr} odražený výkon [W]

P_{dop} dopředný výkon [W]

ρ_{vst}	.....vstupní činitel odrazu [Ω]
α	..... útlum [dB]
$\tan \delta$	.....dielektrický ztrátový činitel [-]
RL	.....útlum odrazu [dB]
S	..... Poytingův vektor [W/m^2]
E	..... intenzita elektrického pole [V/m]
H	..... intenzita magnetického pole [A/m]
U	..... napětí [V]
d	..... vzdálenost elektrod [m]
l	..... délka vodiče [m]
SF	.....síťový filtr
ZO	.....zkoušený objekt
b, g, w, a	.....konstrukční rozměry Crawfordovy komory
R	.....elektrický odpor [Ω]
V_{p-p}	.....amplituda špička-špička [V]
V_{rms}	.....efektivní hodnota [V]
E_K	..... intenzita elektrického pole pro provádění kalibrace [V/m]
E_T	..... intenzita elektrického pole pro testování odolnosti [V/m]
E_{K_dB}	.....intenzita elektrického pole pro provádění kalibrace v logaritmických jednotkách [dBV/m]
E_{T_dB}	..... intenzita elektrického pole pro testování odolnosti v logaritmických jednotkách [dBV/m]
X	.....otevřená kalibrační úroveň
Y	.....intenzita elektrického pole pro otevřenou kalibrační úroveň [V/m]
PC	.....počítač
EUT	.....testované zařízení (Equipment Under Test)
RSU	.....spínací pole (Relay Switching Unit)

Úvod

Aby bylo možné v praxi provozovat více elektronických zařízení, mezi kterými nebude docházet k nepřípustné interferenci, která by narušila jejich správnou funkci, musejí být tato zařízení elektromagneticky kompatibilní. Jinými slovy zařízení nesmí nepřiměřeně svým signálem ovlivňovat ostatní zařízení v jeho okolí a zároveň toto zařízení musí být schopné vzdorovat určité povolené velikosti rušivého pole na něho působící. Z této skutečnosti de facto vyplývá dělení elektromagnetické kompatibility na elektromagnetickou odolnost a elektromagnetickou interferenci.

Bezodrazová měřicí komora je jeden typ zařízení, které umožňuje testovat elektromagnetickou odolnost. Aby však tato komora byla způsobilá k tomuto testování, musí splňovat určitá kritéria požadovaná normou ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, mezi které patří rovněž homogenita vysokofrekvenčního elektrického zkušebního pole.

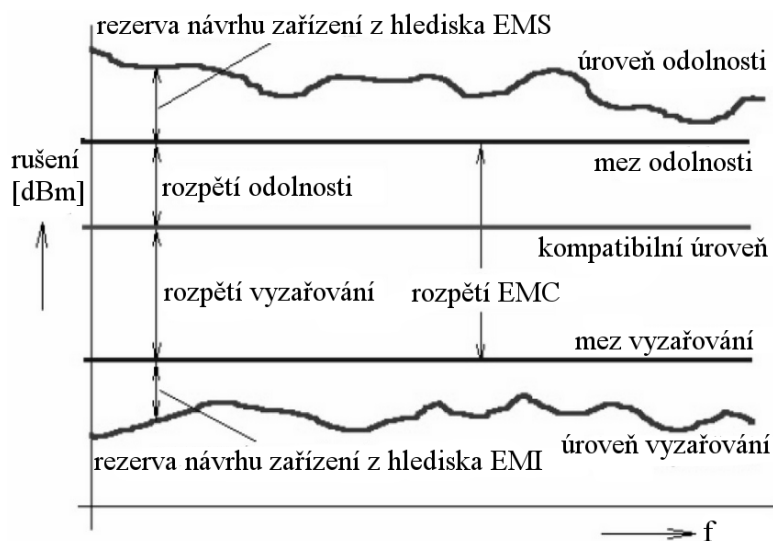
Předmětem této práce je zajištění uvedené homogenity uvnitř bezodrazové komory na ZČU v Plzni. K vytvoření a ověření homogenity pole uvnitř bezodrazové komory slouží dvě metody kalibrace, a to kalibrace konstantního výkonu a kalibrace konstantní intenzity pole, přičemž obě tyto kalibrace jsou uvedené v normě ČSN EN 61000-4-3 ed. 3. Jinými slovy tato práce si klade za cíl zajistit a změřit velikost odchylek elektrického pole v ploše homogenního pole v bezodrazové komoře a vyhodnotit, zdali tyto odchylky splňují nároky uvedené normy. Toto měření bude prováděno ve frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 3 GHz a zároveň pro vertikální i horizontální polarizaci antény, přičemž pro kalibraci měřicího pole bude využita metoda konstantního výkonu.

1 Elektromagnetická odolnost

1.1 Úvod do elektromagnetické odolnosti a její testování

Elektromagnetická odolnost EMS, někdy nazývaná také jako susceptibilita či imunita, tvoří společně s elektromagnetickou interferencí EMI (vyzařováním či emisemi) dvě základní podskupiny elektromagnetické kompatibility EMC.

Z důvodu nemožnosti úplnému zamezení rušivému vyzařování elektronických přístrojů používaných v reálném prostředí je nezbytné, aby každé v praxi používané elektronické zařízení disponovalo určitou mírou úrovně elektromagnetické odolnosti. Tato vlastnost zařízení pak zajistí jeho bezchybnou funkci z hlediska jeho vystavování přípustně vysokému elektromagnetickému rušení. Na tento fakt poukazuje obr. 1.1, který zobrazuje požadované meze odolnosti a vyzařování ohraničující akceptovatelné oblasti, ve kterých se úrovně odolnosti i vyzařování mohou nacházet, pokud má být zachována elektromagnetická kompatibilita zařízení. Tato práce zkoumá zejména problematiku testování elektromagnetické odolnosti, proto zde oblast elektromagnetického vyzařování nebude nadále popisována.



Obr. 1.1 Definice mezí a úrovní elektromagnetické odolnosti a vyzařování, převzato z [1].

Elektromagnetická odolnost se ještě dále rozčleňuje na dvě své podskupiny:

- **Interní elektromagnetická odolnost**
- **Externí elektromagnetická odolnost**

Interní elektromagnetická odolnost v sobě zahrnuje určitou míru imunity vůči zdrojům elektromagnetického rušení situovaných uvnitř daného technického systému, jenž je z hle-

diska elektromagnetické susceptibility vyšetřován. A naopak externí elektromagnetická odolnost pak představuje schopnost systému odolávat rušivému signálu, jehož zdroj se nachází mimo tento vyšetřovaný technický systém. Určení zdali se jedná o interní či externí elektromagnetickou odolnost pak pochopitelně závisí na definici meze ohraničující daný technický systém. Tato hranice může být volena různými způsoby, na základě nichž pak vznikají tři typy technických systémů definovaných z hlediska elektromagnetické susceptibility.

Zástupce první skupiny takových technických systémů v sobě obsahuje několik subsystémů, které jsou od sebe navzájem velmi vzdálené. Jedná se tedy o rozlehlý systém obsahující několik subsystémů, které mohou být zdrojem elektromagnetického rušení indukovaného například do přenosových vedení spojující tyto dané subsystémy. Tento uvedený typ rušení je pak vyšetřován z hlediska interní elektromagnetické susceptibility. V případě externí elektromagnetické susceptibility je testován například vliv atmosférických výbojů na celý technický systém. Pro představu lze do této kategorie technických systémů například zařadit zařízení pro dálkové zpracování dat, která jsou propojena delšími úseky přenosového vedení.

Technický systém spadající do druhé skupiny, který je označován také jako místní systém, je tvořen subsystémy nacházejícími se v jednom objektu (např. budově). Tyto subsystémy, resp. jejich napájecí či signálové vodiče, mohou působit na sebe navzájem, pak se jedná o interní odolnost. Za případ testování externí elektromagnetické odolnosti takového systému lze považovat stanovení vlivu rušivého vyzařování, které vzniká v různých dalších okolních systémech umístěných v celém uvažovaném objektu a působí na tento vyšetřovaný systém, popř. některý jeho subsystém. Příkladem tohoto systému by mohla být například počítačová síť, která je umístěna uvnitř jednoho podniku a je vystavena vlivu rušivého signálu od dalších zařízení uvnitř budovy.

Třetí skupina se skládá ze systémů představovaných měřicí, komerční a další technikou, která v sobě zahrnuje přístroje menšího provedení, jakými jsou například různé typy počítačů či měřicích přístrojů. Interní elektromagnetická odolnost těchto systémů potom úzce souvisí s několika následujícími faktory:

- *obvodové řešení systému zahrnující mj. polohu aktivních a pasivních prvků,*
- *návrh desky plošného spoje, kabeláž a rozložení spojů,*
- *typ napájení, uspořádání napájecích a signálových vodičů přístroje,*

- *kvalita vnitřního stínění a uzemnění,*
- *kvalita provedení prvků na rozhraní představující kontakt s vnějšími systémy.*

Při stanovení celkové elektromagnetické odolnosti daného systému jsou uvažovány tyto tři aspekty:

- *Interní elektromagnetická odolnost systému je dána interní odolností jeho jednotlivých dílčích subsystémů.*
- *Celková interní elektromagnetická odolnost systému je stanovena dle nejmenší odolnosti jeho určitého subsystému.*
- *Externí elektromagnetická odolnost může být ovlivňována interní odolností systému vlivem superponování jednotlivých příspěvků rušení.*

1.2 Kritéria elektromagnetické odolnosti

Při zkoumání elektromagnetické odolnosti zařízení se posuzuje vliv rušícího signálu na testovací zařízení a možný vznik jeho nefunkčnosti, případně míra této nefunkčnosti. Pro stanovení výsledků zkoušky je nutné určit mez rušivého signálu, kdy dochází k definovanému zhoršení funkčních vlastností zařízení. Právě za tímto účelem je definováno kritérium elektromagnetické odolnosti daného zařízení. Toto kritérium může být stanoveno dvěma odlišnými způsoby, a to kvantitativním či kvalitativním.

Kvantitativní způsob určení kritéria odolnosti vychází z průběhu elektrické veličiny naměřené na daném zařízení. Stanoví se určitá hodnota této elektrické veličiny, při které je velikost rušivého signálu taková, že testované zařízení ještě pracuje přijatelným způsobem. Tato hodnota veličiny tedy respektuje kritérium elektromagnetické odolnosti, a pokud se překročí, zařízení je zásadně ovlivněno rušícím signálem tak, že nepracuje správně (například se překlopí klopný obvod).

Elektromagnetické kritérium určené kvalitativním způsobem je posuzováno výhradně dle stavu testovaného zařízení. Sleduje se tedy správný provozní stav testovaného zařízení a případná jeho změna, tj. vznik funkční poruchy. Tato porucha je popisována jako zhoršení funkčnosti zařízení vlivem působení rušivého signálu během zkoušky, anebo po zkoušce, tj. po odstoupení rušivého signálu. Stav testovaného zařízení je pak posuzován podle několika definovaných provozních stavů známých jako funkční kritéria, která de facto popisují stav chování daného zařízení během a po působení rušivého signálu. Tato funkční kritéria jsou následující.

- **Funkční kritérium A** – testované zařízení pracuje naprosto správným způsobem, tj. rušící signál během zkoušky neměl na zařízení žádný efekt.
- **Funkční kritérium B** – testované zařízení pracuje požadovaným způsobem, avšak některé jeho obvodové části během zkoušky překročí toleranční meze. Tyto změny však neovlivní stav provozu zařízení (tj. např. nezmění se 0 v 1 a naopak) a zároveň se tyto změny po skončení zkoušky odolnosti automaticky vytratí, tj. zařízení se po zkoušce samo uvede do původního funkčního stavu, který zajišťuje jeho správný chod.
- **Funkční kritérium C** – některé funkce zařízení během působení rušivého signálu nevyhovují požadavkům, tj. jedna či více funkcí zařízení nabývá nesprávných či dokonce žádných hodnot během zkoušky. Po odeznění rušivého signálu se všechny funkce zařízení uvedou do správného funkčního stavu. Jinými slovy zařízení se po skončení zkoušky samo stává opět funkčním.
- **Funkční kritérium D** – jedna nebo i více funkcí zařízení jsou plněny nesprávným způsobem během působení rušivého signálu. Po ukončení zkoušky odolnosti se zařízení samo nevrátí do správného funkčního stavu, ale obsluha musí manuálně uvést zařízení do tohoto stavu. Tento zásah obsluhy je však jednoduchý (např. stisknutí tlačítka).
- **Funkční kritérium E** – jedna nebo i více funkcí zařízení nejsou plněny správným způsobem, a to během i po ukončení zkoušky. Po odeznění rušivého signálu zařízení dále nepracuje správně a musí být vráceno do svého funkčního stavu zásahem obsluhy. Obsluha však musí vykonat složitější činnost (např. výměnu některých celých komponentů zařízení).

Určení narušení funkčních mezí zařízení kvalitativním způsobem tedy není spojené s měřením nějakého typu elektrické veličiny, ale jedná se o vyhodnocení provozního stavu zařízení během a po zkoušce odolnosti a jeho možné samovolné opětovné vrácení. Jednotlivé typy poruch jsou pochopitelně různé pro různá testovaná zařízení, na což je nutné brát při testování ohled. Výsledkem je pak jeden z možných funkčních stavů zařízení.

Všechna uvedená funkční kritéria, tj. A, B, C, D a E jsou však využívána zřídka (např. v automobilové technice). Nastává zde totiž problém důvěryhodně od sebe rozlišit některá tato kritéria, a to zejména B a C. Tento fakt je způsoben velkou praktickou náročností či dokonce nemožností určení rozdílu nefunkčnosti zařízení či pouze vykolejení z tolerančních mezí zařízení během působení rušivého signálu, přičemž po zkoušce už toto zjištění není možné, jelikož v obou uvedených typech funkčních kritérií se zařízení automaticky vrátí do funkčního stavu. Z tohoto důvodu je v některých oblastech zúžený výběr z funkčních kritérií na pouhá A, B a C, kde kritéria A a B zůstávají beze změny a kritérium C

je tvořené spojením kritérií C a D, přičemž kritérium E zde pak neexistuje, jinými slovy trvalé poškození zařízení zde není uvažováno jako funkční kritérium. Tato uvedená funkční kritéria pak v sobě zahrnuje norma ČSN EN 61000-6-1 ed. 2.

1.3 Obecná metodika zkoušek elektromagnetické odolnosti

Pro testování elektromagnetické odolnosti zařízení je důležité zvolit vhodné prostředí, v kterém bude dané zařízení testováno. Prakticky ideálním případem prostředí pro testování odolnosti by bylo takové prostředí, v kterém dané zařízení bude v praxi provozováno. Ovšem jak bude podrobněji vysvětleno v následující kap. 2, reálné volné prostranství pro testování odolnosti zařízení představuje z hlediska naměřených hodnot nereprodukovatelné výsledky. Proto je nutné zajistit jiná měřicí prostranství (viz kap. 2) v kterých se bude měřicí elektromagnetické pole vhodným způsobem generovat. Pro správné a porovnatelné výsledky měření elektromagnetické odolnosti je důležité se řídit dle několika postupů. Nejprve je nezbytné udržet několik následujících faktorů v pokud možno stejných mezích. Tyto uvedené faktory vlastně popisují samotné měřicí prostory a jsou následující:

- *obvodové, skupinové a prostorové uspořádání měřicího pracoviště,*
- *kvalitativní a kvantitativní parametry zdroje elektromagnetického signálu,*
- *provozní stav a nastavení testovaného objektu.*

Dále je před započítáním samotné zkoušky odolnosti zařízení nezbytné zajistit jeho patřičný stav a některá jeho nastavení. Tyto skutečnosti jsou reprezentovány několika následujícími body:

- ***Určení vlivů elektromagnetického pole, kterým bude pravděpodobně vystavováno testované zařízení v provozu.***

V závislosti na charakteru provozního prostředí zařízení a jeho vlastnostech se stanoví výhradně převyšující rušivá působení, která s největší pravděpodobností budou vznikat na daném zařízení v jeho praktickém využití a budou tak mít největší vliv na změnu jeho vlastností. Prakticky totiž většinou není možné změřit všechny rušivé vlivy a rušivé signály na zařízení působící, a to z důvodu například nedostatečného množství času či finančních prostředků na celé měření. Základní typy elektromagnetického rušivého ovlivňování daného zařízení byly pochopitelně objeveny v jeho provozním prostředí. Tyto druhy ovlivňování zařízení jsou tedy de facto způsobeny určitými jevy elektromagnetismu, které se nachází v provozním prostředí uvažovaného zařízení, přičemž do těchto druhů rušivých vlivů na zařízení se řadí následující body.

- *rušení na nízkých frekvencích v napájecí síti nízkého napětí,*
- *přechodné jevy a rušení na vysokých frekvencích,*
- *nízkoenergetické a vysokoenergetické elektrostatické výboje,*
- *rušení magnetických polem,*
- *rušení vyzařujícím elektromagnetickým polem.*
- ***Nastavení požadované konfigurace testovaného zařízení a jeho funkčního stavu.***

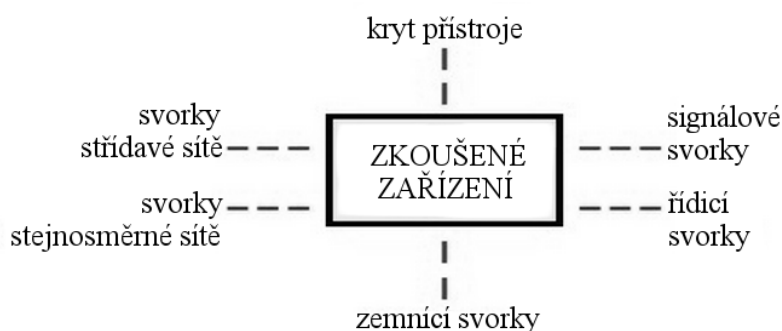
Před zahájením zkoušky odolnosti zařízení je rovněž nutné zajistit patřičný funkční (neboli provozní) stav zařízení, který vystihuje fungování zařízení v jeho budoucím provozu. Pokud zařízení disponuje více provozními stavy, musí být ověřena jeho dostatečná odolnost ve všech těchto stavech. Výjimku lze udělat v případě, kdy nastavení určitého stavu zařízení zabere velmi krátký časový interval, a tudíž by test odolnosti v tomto krátkém čase nebyl proveditelný. Z tohoto důvodu je odolnost zařízení testována v jeho nejnáchylnějším stavu na rušení. Zároveň je nutné nastavit frekvenci zařízení na předpokládanou hodnotu, na které bude zařízení v praxi provozováno. Dále konfigurace zařízení musí respektovat jeho maximální elektromagnetickou citlivost, a pokud je testované zařízení součástí bloku více různých zařízení, tak musí být testováno v jejich zapojení tak, jak bude fungovat v provozu.

- ***Nalezení polohy možných vstupních bran pro pronikání elektromagnetického rušení do testovaného zařízení.***

Dalším důležitým faktorem pro správnou realizaci zkoušky je zjištění možných vstupů do zařízení, kterými může dovnitř pronikat elektromagnetické rušení. Vstupem je myšleno dané rozhraní zařízení s jeho vnějším prostorem, kde se nachází elektromagnetický rušivý signál. Soubor těchto vstupů zařízení je ilustrován na následujícím obr. 1.2, přičemž jednotlivé uvedené vstupy pochopitelně může dané zařízení obsahovat vícekrát. Jak je patrné z obr. 1.2, rozhraní zařízení s vnějším prostředím, které zprostředkovává styk s rušivým signálem, může tvořeno také jeho krytem.

Při vyšetřování odolnosti jednotlivých uvedených rozhraní zařízení (dle obr. 1.2) se postupuje podle těchto třech obecných pravidel:

- *zkoušky odolnosti se předepisují pro každé nalezené vstupní rozhraní,*
- *zkoušky jsou realizovány na normálně přístupných vstupních rozhraních,*
- *zkoušky jsou uskutečňovány na jednotlivých vstupních rozhraních samostatně a v libovolném pořadí.*



Obr. 1.2 Základní typy rozhraní zkoušeného zařízení představující vstupní brány pro rušící elektromagnetický signál, převzato z [1].

- **Určení kategorií požadovaných úrovní odolnosti testovaného zařízení.**

Soubor norem označovaných jako ČSN EN 61000-4- se zabývá standardizací kategorií pro odolnosti zkoušených zařízení. Pro požadovanou odolnost zařízení je zejména směrodatné provozní prostředí, v kterém se bude testované zařízení při používání nacházet, a to výhradně z hlediska elektromagnetického rušení v tomto prostředí se vyskytující. Uvedené normy rozdělují provozní prostředí do několika následujících tříd odolnosti:

- *Třída odolnosti 1* – je požadována pro zařízení, u kterých se předpokládá provoz v takových prostorách, kde působí elektromagnetický rušivý signál s menší intenzitou, tj. jedná se o prostředí dobře chráněné.

- *Třída odolnosti 2* – charakterizuje zařízení, jehož fungování se předpokládá v prostředí s mírnou velikostí elektromagnetického rušení. V tomto případě se tedy jedná o prostředí mírně chráněná či nechráněná. Do této třídy spadá např. kancelář podniku.

- *Třída odolnosti 3* – tuto třídu musí splňovat zařízení, které bude vystaveno v provozním prostředí elektromagnetickému rušení vysoké intenzity. Tato třída tedy respektuje náročná provozní prostředí, která jsou běžná v průmyslu.

- *Třída odolnosti 4 (popř. x)* – touto třídou musí disponovat zařízení, které je odkázáno k pracování v prostředí s větší úrovní interference než v minulých třech případech. Jinými slovy jde tedy o provozní prostředí zařízení s velmi vysokou hodnotou elektromagnetického rušení. Tyto prostředí jsou nechráněná a navíc pod vlivem rušivého elektromagnetického pole o vysoké intenzitě. Tato třída odolnosti reprezentuje tedy nejnáročnější případ pro zařízení z hlediska jeho elektromagnetické odolnosti.

- **Stanovení povolených důsledků elektromagnetického rušení, jemuž bude testované zařízení vystavováno (tzn. určení jeho povoleného funkčního kritéria – viz kap. 1.2).**

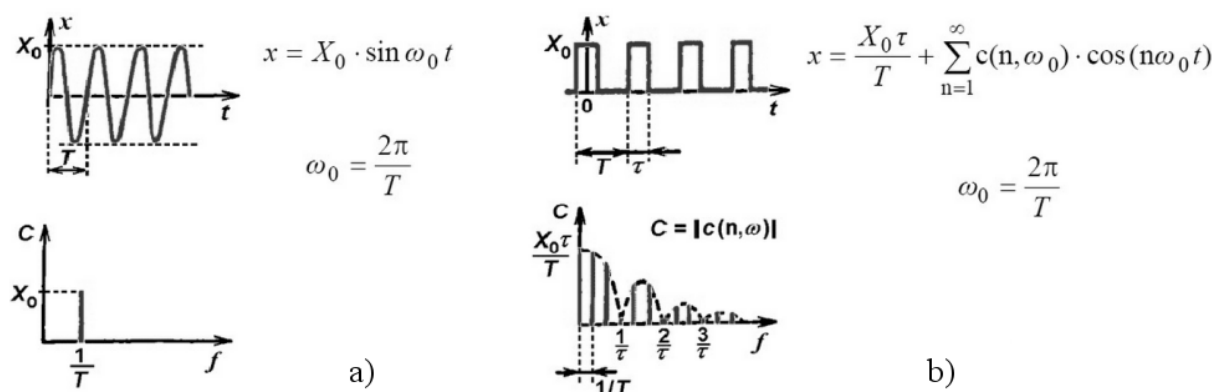
Po vyřešení několika uvedených otázek je možné přistoupit k samotnému provádění testu elektromagnetické odolnosti zařízení. Tento test se skládá z několika po sobě následujících částí:

- *vytvoření měřicího pole a jeho aplikace na testované zařízení,*
- *realizace specifikovaných zkoušek a testů na daném zařízení,*
- *jednotlivá vyhodnocení výsledků vždy po každé dílčí zkoušce,*
- *zhotovení detailní dokumentace týkající se všech provedených zkoušek na zařízení.*

1.4 Typy zkušebních signálů pro zkoušky elektromagnetické odolnosti

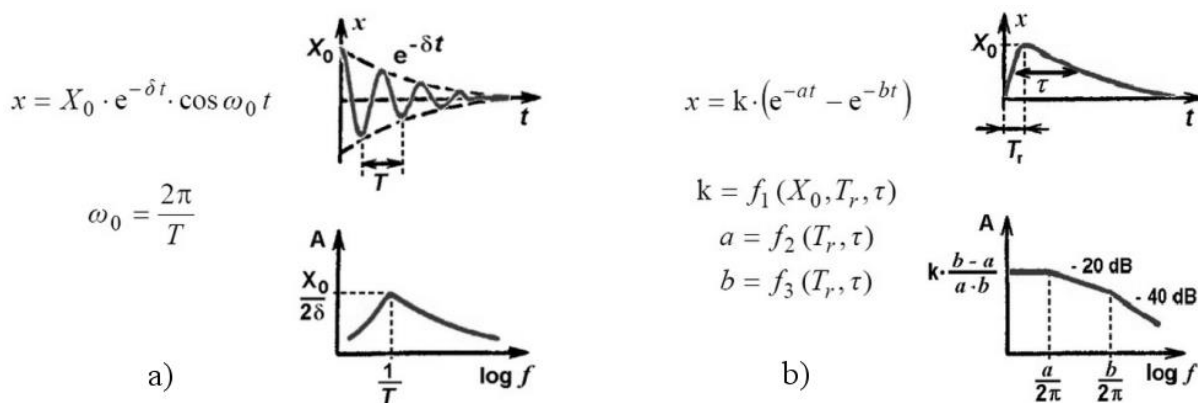
Generování zkušebních signálů pro zkoušku odolnosti zařízení představuje důležitý faktor celé této zkoušky. Tyto zkušební signály musí vhodně nahradit skutečné rušivé signály působící na zařízení v jeho provozním prostředí. Pouze v tomto případě pak zkouška odolnosti dostává smysl. Pro generaci těchto zkušebních signálů slouží generátor umístěný uvnitř měřicích prostor, kde je dané zařízení testováno. Zároveň je nezbytné, aby zkušební signály produkované generátorem nabývaly přesně definovaných hodnot z hlediska jejich časového (resp. frekvenčního) a amplitudového charakteru. Všechna tato nastavení v sobě tedy musí použítý generátor zahrnovat. Podrobným zkoumáním rušivých signálů existujících v různých prostředích se došlo k závěru, že všechny tyto rušivé signály lze simulovat použitím následujících čtyř druhů zkušebních signálů (jejich tvar s popisem funkce zobrazují obr. 1.3 a 1.4):

- Harmonická funkce sinus simuluje úzkopásmový periodický signál (viz obr. 1.3a), přičemž jako zdroj pro tento signál se využívají harmonické oscilátory pro nízké či vysoké frekvence.
- Obdélníkový signál pak reprezentuje širokopásmový periodický zkušební signál. Tento typ signálu a jeho frekvenční spektrum ilustruje obr. 1.3b, kde pro popis signálu se využívá Fourierova řada a tvar spektra je dán známou funkcí $\text{sinc}(x)$. Zdroj tohoto signálu představují astabilní klopné obvody.
- Dalším zkušebním signálem je úzkopásmový neperiodický signál, který je zde zastupován časově omezeným harmonickým signálem s klesající exponenciální obálkou. Jde tedy de facto o signál typu tlumená funkce sinus, kde tlumící faktor δ koresponduje se šířkou frekvenčního spektra. Tento signál a jeho frekvenční spektrum lze pozorovat na obr. 1.4a. Jako zdroj uvedeného signálu se využívá LC rezonační obvod, který je vybuzen úzkým pulzem.



Obr. 1.3 Časové průběhy (výše) a frekvenční spektra (níže) základních periodických zkušebních signálů pro měření elektromagnetické odolnosti: a) úzkopásmový signál, b) širokopásmový signál, převzato z [1].

• Posledním zkušebním signálem je širokopásmový neperiodický signál, který je představován kombinací dvou exponenciálních signálů. Tento signál v časové a frekvenční oblasti je ilustrován na obr. 1.4b společně s matematickým popisem. Z tohoto matematického popisu lze vypočítat, že koeficienty a , b de facto určují dobu náběhu impulzu τ_r a dobu trvání impulzu τ . Realizace uvedeného signálu je založena na využití přechodových jevů respektovaných jednotlivými průběhy napětí a proudu při vybíjení či nabíjení induktoru popř. kondenzátoru.



Obr. 1.4 Časové průběhy (výše) a frekvenční spektra (níže) základních neperiodických zkušebních signálů pro měření elektromagnetické odolnosti: a) úzkopásmový signál, b) širokopásmový signál, převzato z [1].

Vhodnou superpozicí uvedených čtyř průběhů signálů lze tedy simulovat jakýkoliv zkušební signál potřebný pro zkoušku elektromagnetické odolnosti, přičemž jak uvádí následující dva body, tato zkouška může být z hlediska provedení dvojího druhu.

- ***Přímá zkouška elektromagnetické odolnosti (resp. simulace primárních účinků rušení)***

Zde dochází k přímé náhradě skutečného rušivého signálu, tj. zkušební signál při zkoušce odolnosti působí na testované zařízení stejným způsobem jako skutečný zdroj rušení v provozu.

- ***Nepřímá zkouška elektromagnetické odolnosti (resp. simulace sekundárních účinků rušení)***

V tomto případě dochází k vytvoření napětí či proudů v testovaném zařízení takových hodnot, jaké v provozu svým nežádoucím působením vytvoří rušivý zdroj signálu v tomto zařízení.

Při psaní této kapitoly bylo čerpáno ze zdroje [1].

2 Prostory používané pro testování elektromagnetické odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli

Testování elektromagnetické odolnosti (resp. susceptibility) je možno provádět v různých měřicích prostorech. Tyto prostory lze nejprve rozdělit na dvě základní měřicí prostranství, tj. volné a elektromagneticky stíněné, přičemž elektromagneticky stíněná prostranství mohou být ještě dále členěna na různé varianty provedení elektromagneticky stíněných komor:

- *Volné prostranství*
- *Elektromagneticky stíněné prostory*
 - *Bezodrazová komora*
 - *Polo-bezodrazová komora*
 - *Modifikovaná polo-bezodrazová komora*
 - *Odrazová komora*
 - *Speciální zkušební komory (Crawfordovy komory TEM, GTEM)*

2.1 Volné prostranství

Je zřejmé, že každý možný návrh prostranství pro měření elektromagnetické susceptibility v sobě zahrnuje určité výhody a nevýhody. Na základě nichž se provádí rozhodnutí, která z uvedených variant bude vhodná pro testování odolnosti v daném konkrétním případě.

Co se týče volného prostranství, tak zde mezi největší komplikace patří zejména to, že při měření elektromagnetické susceptibility na zkušební zařízení působí společně se signálem zkušebního pole také okolní rušivý elektromagnetický signál. Úroveň tohoto rušivého signálu způsobeného různými okolními zdroji elektromagnetického pole může být srovnatelná, ba dokonce i větší než úroveň zkušebního pole, což následně může znamenat nemožnost realizace daného měření ve volném prostranství. Jinými slovy zkušební elektromagnetické pole se stává nehomogenním v případě, že okolní rušivý elektromagnetický signál nelze zanedbat. Kromě tohoto rovněž však může generování zkušebního pole ve volném prostranství negativně ovlivňovat vnější elektromagnetický prostor a signály v něm se šířící, čímž může také dojít k porušení telekomunikačního zákona.

Z hlediska měření elektromagnetické interference (neboli vyzařování) EMI je však tento uvedený fakt působení okolního rušivého elektromagnetického pole možno odstranit, a to v případě, kdy se jedná o rušivé pole pokud možno konstantního charakteru (tj. časově neproměnného). Moderní měřiče rušení totiž obsahují funkci, pomocí které lze rušivé pole okolí změřit a zaznamenat a pak tuto hodnotu odečítat z naměřených hodnot tak, aby výsledné naměřené hodnoty byly na tomto rušivém poli nezávislé. Toto však není možné, pokud se charakter rušivého pole na pozadí měřeného prostoru mění v čase.

Mimo uvedené nevýhody v sobě zahrnuje měření ve volném prostoru i určité pozitivní aspekty. Zde pochopitelně není nutná jakákoliv složitá realizace stínění elektromagnetických vln, tak jako v případě stíněných komor, čímž cena za realizaci zkušebního měřicího pracoviště značně klesá.

2.2 Elektromagneticky stíněné prostory

Ideálním případem při měření elektromagnetické susceptibility by bylo vytvoření takového měřicího pracoviště, kde na zkoušený objekt bude působit pouze signál zkušebního pole a žádný jiný. Tento signál rovněž nebude jakkoliv ovlivňovat kterýkoliv jiný signál či jiné zařízení v okolním prostředí a tím se myslí také zařízení zahrnuté ve vybavení zkušební komory (tj. používané při měření), tzn. měřicí technika. Zároveň je pro získání reprodukovatelných naměřených výsledků důležité zajistit dostatečnou uniformitu zkušebního pole uvnitř měřicího prostoru, tj. parametry tohoto pole se v prostoru nesmí příliš měnit (ideálně vůbec). To znamená, že ani spojení měřicí techniky uvnitř měřicí komory s technikou vně nesmí způsobit jakékoliv přenášení rušení či degradaci zkušebního homogenního pole.

Právě tyto aspekty v sobě zahrnují elektromagneticky stíněné prostory, kdy se jako ochrana proti rušivému elektromagnetickému poli působící vně komory použijí výhradně ocelové plechy představující dostatečnou elektromagnetickou izolaci. Je zde však nutné zajistit stínění všech částí bezodrazové komory, mezi které patří také okna, dveře, otvory ventilace a jakékoliv další netěsnosti z hlediska elektromagnetického pole. Ve výsledku se však tyto netěsnosti projeví zhoršením celkového elektromagnetického stínění dané komory vůči vnějšímu poli. Obecně je pak považována za kvalitní elektromagnetickou komoru taková komora, která utlumí vnější signály hodnotou útlumu z rozsahu 80 až 120 dB, a to na 5 dekadách kmitočtu.

Mimo tyto uvedené požadavky na elektromagneticky stíněnou komoru se uplatňují ještě některé další. Měřicí komora musí být dostatečně rozměrná pro umožnění realizace daných měření, přičemž pochopitelně čím větší objem v sobě daná komora bude zahrnovat, tím větší soubor měření lze uvnitř zrealizovat. Dále je nutné, aby měřicí antény uvnitř komory bylo možno zvedat až do výšek 4, popř. 6 m nad podlahou. Výsledkem pak může být stíněná komora o velikosti 20 x 10 x 10 m.

Jak již bylo zmíněno, tak je nezbytné, aby jakékoliv vodivé spojení měřeného objektu, či měřicí antény nebo jiného zařízení uvnitř komory, bylo s zařízením vně komory realizováno tak, aby se nikterak nepodílelo na vytváření či přenášení elektromagnetického rušení. Toto je důvodem, proč se v některých elektromagneticky stíněných komorách přenáší signál například mezi měřicí anténou a měřičem rušení v optické formě, tj. po optickém vlákně. Zároveň je doporučeno napájet zkoušená a měřicí zařízení z různých fází rozvodné sítě. Dále je nutno respektovat, aby osvětlení uvnitř stíněné komory nebylo výbojkové či zářivkové, jelikož by zde docházelo k produkování dalšího nežádoucího elektromagnetického rušení uvnitř komory. Co se týče vybavení nábytku komory, tak je doporučeno toto vybavení omezit na minimum, a to za účelem co největší redukce případných odrazů elektromagnetických vln uvnitř komory.

Elektromagneticky stíněná komora ve tvaru kvádrů de facto představuje dutinový rezonátor s vysokým činitelem jakosti a teoreticky nekonečným počtem rezonančních frekvencí f_0 , které lze určit podle následujícího vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \mu_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (2.1)$$

Kde jsou: $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – permitivita vakua [F/m],

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

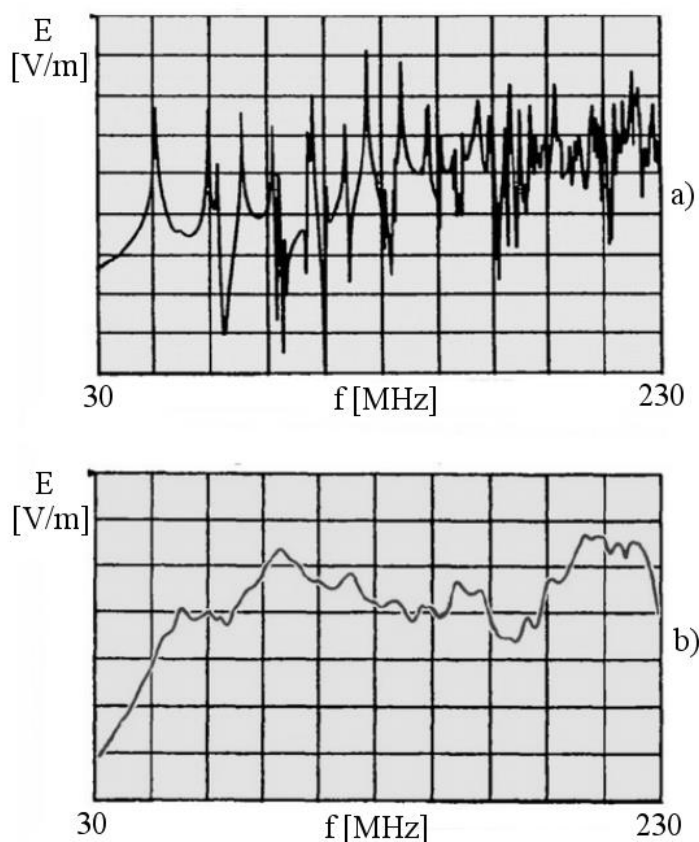
a, b, c – rozměry vnitřního prostoru komory [m],

m, n, p – vidová čísla (celá nezáporná).

Vidová čísla zde pak reprezentují rezonanční vid, resp. dané uspořádání elektromagnetického pole v rezonátoru. Rozdíly mezi vypočtenými a naměřenými rezonančními frekvencemi dutinového rezonátoru pak korespondují s tím, že stíněná komora

není ideální, resp. není dokonale odstíněna od vnějšího pole, tj. útlum absorpčního materiálu na stěnách komory není nekonečný a zároveň vnitřek komory není úplně prázdný (nachází se zde mj. měřicí anténa a zkoušený objekt).

Pokud se nacházejí rezonanční kmitočty uvnitř rozsahu měřených kmitočtů, může to způsobit to, že celá stíněná komora při rezonančních frekvencích f_0 začne rezonovat, tj. naměřená data mohou být znehodnocena a měření pak nelze považovat za platné. Toto popisuje následující obr. 2.1a. V tomto případě by naměřené výsledky závisely na pozici měřicí antény uvnitř komory, což nelze akceptovat.



Obr. 2.1 Naměřené průběhy intenzity elektrického pole E [V/m] v závislosti na frekvenci ve stíněných prostorách: a) bez absorbérů, b) včetně absorbérů, převzato z [1].

Za řešení problému rezonančních vidů v komoře lze považovat zmenšení činitele jakosti Q rezonančního obvodu představovaného stíněnou komorou. To lze realizovat tak, že po zjištění poloh maximálních hodnot intenzity elektrického pole v komoře, se do těchto pozic umístí materiál ve tvaru kvádrů s dostatečně vysokým činitelem pohlcení z hlediska elektromagnetického šíření vln. Toto způsobí, že se daný vid neuplatní, resp. potlačí se příslušná rezonance stíněné komory. Výsledek lze pak vypořadovat na průběhu dle obr. 2.1b.

Toto již pak může být považováno z hlediska reprodukovatelnosti za měření platné, přičemž uvedený průběh na obr. 2.1b následně představuje de facto kalibrační křivku stíněné komory.

Dalším možným problémem v elektromagneticky stíněné komoře může být mnohacestné šíření signálu, kdy v případě testování elektromagnetické susceptibility se od antény s širokým vyzařovacím lalokem bude šířit signál směrem k testovanému zařízení po více drahách. To je způsobeno tím, že stěny elektromagneticky stíněné komory odráží téměř všechen signál zpět do prostoru komory a vytvářejí tím více možných drah signálu od měřicí antény ke zkušebnímu zařízení. V místě zkoušeného objektu se tedy bude superponovat více elektromagnetických vln, které k zařízení dorazily po různých drahách, mají tedy různý fázový posun. Toto může způsobit kolísání naměřených hodnot až o +/- 20 dB, čímž se vytvoří nepřijatelná nejistota měření. Tento problém je tedy nutno správně korigovat.

Existuje několik řešení jak uvedený problém eliminovat. Nabízí se možnost zvýšení rozměrů komory, což způsobí vlivem zvětšení vzdálenosti od měřicí antény ke zkoušenému objektu zmenšení velikosti mnohacestných signálů, které se sčítají v místě tohoto zkoušeného objektu. Toto řešení je však velice nákladné z hlediska realizace dané měřicí komory. Další alternativou může být použití antény s dostatečně úzkým vyzařovacím úhlem, zde je ale nutné velice přesně nasměrovat anténu směrem ke zkoušenému objektu. Prakticky častým řešením tohoto problému pak může být obložení všech vnitřních stěn elektromagneticky stíněné komory absorpčním materiálem s vysokou pohltivostí. Tato konstrukce komory zamezí odrazům elektromagnetického signálu od stěn komory a šíření signálu různými drahami směrem ke zkoušenému objektu, čímž se de facto vytvoří tzv. absorpční bezodrazová komora.

2.2.1 Princip obložení stěn bezodrazové stíněné komory

Jak již bylo uvedeno, měření ve volném prostoru s sebou přináší řadu komplikací, a to v některých případech dokonce neřešitelných. Ovšem rovněž měření v elektromagneticky stíněných prostorech, kde se odráží elektromagnetické vlny od vnitřních stěn komory zpět do jejího prostoru, není příliš ideální. Pokud ovšem těmto odrazům zabráníme, můžeme tak vytvořit měřicí komoru, která se bude přibližovat ideálu. Toto se prakticky provádí obložení vnitřních stěn komory absorpčním materiálem, který v podstatě utlumí přicházející elektromagnetický signál tak, aby se pokud možno nešířil ani do vnitřku komory, ani do jejího vnějšku.

Princip obložení stěn bezodrazové komory vychází vlastně z teorie vedení, kdy si lze představit vnitřní prostor komory jako hodnotu charakteristické impedance volného prostoru Z_0 :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{8,854 \cdot 10^{-12}}} = 120 \cdot \pi = 377 \quad [\Omega; H/m; F/m] \quad (2.2)$$

Pokud by se následně zakončilo toto vedení rovněž charakteristickou impedancí Z_0 , muselo by se následně nějakým způsobem zajistit připojení nekonečně velké impedance tak, aby tato charakteristická impedance již nebyla ničím zatěžována a vedení by tak bylo impedančně přizpůsobené, tj. neodrazil by se z dopadajícího výkonu P_{dop} zpět žádný výkon P_{odr} (viz rovnice 2.3). Tento případ by se pak jevil jako nejideálnější, avšak materiál s nekonečně vysokou hodnotou impedance v praxi není znám. Proto tento způsob zakončení volného prostoru komory není dobré uvažovat.

$$P_{odr} = P_{dop} \cdot |\rho_{vst}|^2 = P_{dop} \cdot \left| \frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} \right|^2 = 0 \quad [W] \quad (2.3)$$

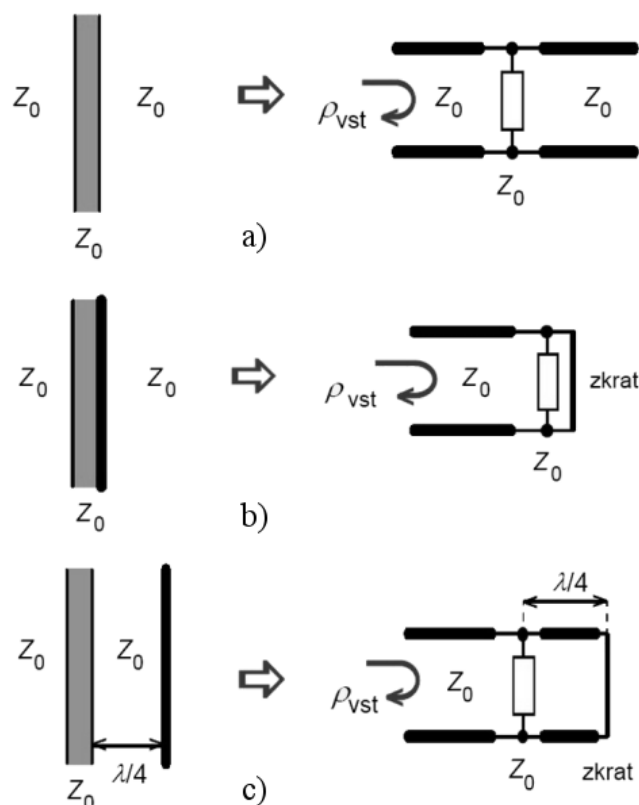
Kde je: ρ_{vst} – vstupní činitel odrazu [-].

Jestliže ovšem v reálném případě bude uvažován vně komory opět prostor s charakteristickou impedancí Z_0 , velikost odraženého výkonu P_{odr} při zakončení komory rovněž Z_0 bude následující:

$$P_{odr} = P_{dop} \cdot |\rho_{vst}|^2 = P_{dop} \cdot \left| \frac{\frac{Z_0 \cdot Z_0}{2Z_0} - Z_0}{\frac{Z_0 \cdot Z_0}{2Z_0} + Z_0} \right|^2 = P_{dop} \cdot \frac{1}{9} = 0,111 \cdot P_{dop} \quad [W] \quad (2.4)$$

Tento případ lze demonstrovat na obr. 2.2a, přičemž při dopadu elektromagnetické vlny na vnitřní stěnu komory by se tedy odrazilo zpět do komory přibližně 11 % jejího výkonu, což nelze v praxi považovat za uspokojivé. Ovšem ne všechen zbývající výkon by se absorboval ve stínícím materiálu, což by znamenalo, že určitá část výkonu by procházela ven z měřicí komory a ovlivňovala tak vnější elektromagnetické prostředí. Toto však rovněž není akceptovatelné.

Tento problém lze však vyřešit aplikací co možná nejvíce vodivého stínícího materiálu na stěny měřicí komory, který zajistí její dostatečnou izolaci vůči vnějšímu prostředí a zamezí



Obr. 2.2 Impedanční přizpůsobení stěn měřicí komory pomocí charakteristické impedance Z_0 vložím: a) pouze impedance Z_0 , b) impedance Z_0 a následně zkratu v těsné vzdálenosti, c) impedance a následně zkratu ve vzdálenosti $\lambda/4$, převzato z [1].

tak jeho ovlivňování. Tento případ je pak ilustrován na obr. 2.2b. Znamená to ale, že vodivý materiál na stěně komory vytvářející zkrat se rovněž projeví do impedančního přizpůsobení dle následujícího vztahu (2.5).

$$P_{odr} = P_{dop} \cdot |\rho_{vst}|^2 = P_{dop} \cdot \left| \frac{Z_0 - 0}{Z_0 + 0} \right|^2 = P_{dop} \quad [W] \quad (2.5)$$

To znamená, že sice byla zajištěna elektromagnetická izolace měřicí komory, ovšem vzhledem k vytvořenému zkratu se nyní bude odrazet všechen výkon od měřicí antény zpět do komory, což v případě bezodrazové komory nelze připustit.

Jak již bylo uvedeno, „bezodrazovost“ měřicí komory lze tedy zajistit připojením nekonečně velké impedance paralelně k materiálu na stěnách komory s charakteristickou impedancí Z_0 . Tato nekonečně velká impedance může být zrealizována pomocí zkratu ve vzdálenosti čtvrtiny vlnové délky λ , tj. $\lambda/4$. Toto řešení je pak zobrazeno na obr. 2.2c. Je nutno podotknout, že zde je však problém impedančního přizpůsobení vyřešen pouze na jedné frekvenci f_0 , kterou lze určit podle následujícího vztahu (2.6).

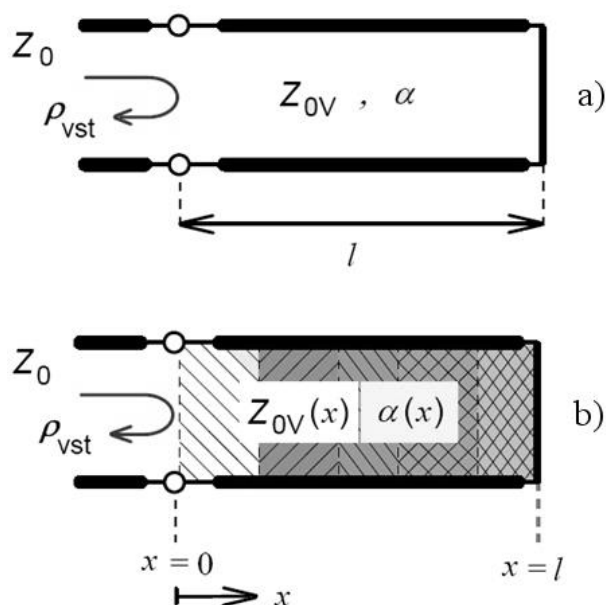
$$f_0 = \frac{c}{\lambda} \quad [Hz; m/s; m] \quad (2.6)$$

Kde je: c – rychlost šíření, přičemž ve vakuu platí: $c = 3 \cdot 10^8$ [m/s].

Měřicí komora fungující pouze na jednom kmitočtu však není v praxi příliš využitelná, proto ani tento způsob řešení není vyhovující.

Bezodrazová komora pochopitelně musí být dostatečně odstíněná od okolního prostředí, proto je zřejmé, že její správný návrh v sobě bude zahrnovat rovněž vodivé plechy respektující zkrat, a to na samém vnějšku stěny komory. Dále je nutno zmínit, že energii dopadající elektromagnetické vlny je nezbytné nějakým způsobem eliminovat a jelikož není žádoucí, aby se vlna odrazila zpět do prostoru komory a rovněž neprocházela do jejího vnějšku, jediným řešením je přeměnit energii v teplo. Z analogie přenosového vedení lze tvrdit, že dostatečně dlouhé ztrátové přenosové vedení bude vždy impedančně přizpůsobeno, a to nezávisle na zakončovací impedanci či frekvenci procházejícího signálu. Pro dlouhé vedení zakončené zkratem (viz obr. 2.3a) bude velikost odraženého výkonu úměrná záporné mocnině desíti, kde bude figurovat mj. součin útlumu a délky vedení. Pokud tedy alespoň jeden z těchto parametrů vedení se přiblíží nekonečnu, zajistí se tak nulový odražený výkon zpět. Při uvažování frekvenční nezávislosti např. útlumu (blížícího se nekonečnu) lze pak konstatovat, že nulový odražený výkon bude frekvenčně nezávislý.

Je zřejmé, že zajištění (resp. přiblížení) útlumu či délky blížících se nekonečnu pro materiály použité pro obložení stěn komory není prakticky jednoduché. Zejména délka materiálu je z hlediska rozměrů komory omezena. Proto se jako lepší řešení jeví zajistit vysoký útlum materiálu. Je však patrné, že velikost útlumu materiálu na rozhraní prostoru komory a obložení stěn nemůže být velká. V takovém případě by totiž impedance materiálu nebyla rovna hodnotě Z_0 a docházelo by k odrazu velkého výkonu. Útlum materiálu se musí postupně měnit od nízké hodnoty na rozhraní s vnitřním prostorem komory až po velmi vysokou hodnotu na konci absorpčního materiálu ohraničující konec stěny komory. Tímto se postupně zajistí přeměna energie elektromagnetické vlny na teplo. Impedance materiálu koresponduje s jeho útlumem, tj. rovněž se mění, ale v opačném smyslu, tj. na začátku absorpčního materiálu je rovna charakteristické impedanci volného prostředí Z_0 (viz rovnice 2.2) a směrem ven z komory postupně klesá až k nule, tj. zkratu. Pokud by totiž celý absorpční materiál byl složen z několika málo vrstev s různým útlumem (tj. docházelo by ke skokové změně impedance), tak by zde vznikaly jednotlivé dílčí odrazy výkonu právě na roz-



Obr. 2.3 Principiální využití ztrátového vedení délky l zakončeného zkratem pro impedanční přizpůsobení stěn měřicí komory: a) vedení s konstantním útlumem α b) vedení s proměnným útlumem α , převzato z [1].

hraní těchto vrstev, čímž by se rovněž odražený výkon nemusel blížit nule. Ideální by bylo, aby se impedance materiálu měnila pokud možno spojitě. V praxi se tomu lze přiblížit tak, že absorpční materiál bude složen z více vrstev různých materiálů. Toto ilustruje obr. 2.3b. Zároveň je nutno zmínit, že délka aplikovaného absorpčního materiálu je směrodatná pro určení minimální frekvence, na které bude ještě bezodrazová komora správně fungovat. Obecně platí, že pro nejnižší frekvenci z pracovního rozsahu komory by stále tloušťka absorpčního materiálu neměla být menší než $\lambda/4$. Potom totiž absorpční materiál ztrácí svoji bezodrazovost.

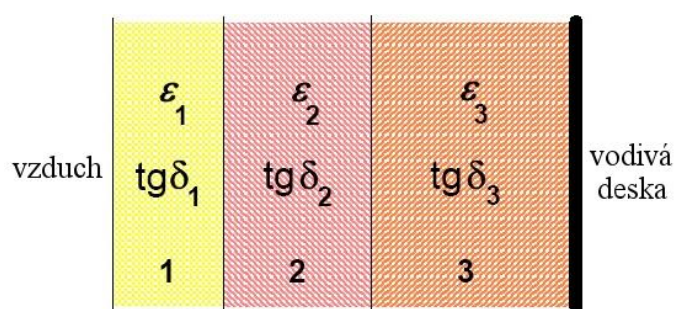
V praxi se dosahuje přeměny energie v teplo dvěma typy absorpčních materiálů, a to magneticky či dielektricky ztrátovými materiály. Magneticky ztrátové materiály však vycházejí s podstatně větší hmotností, proto se dává spíše přednost dielektrickým materiálům s vhodným průběhem relativní permitivity ϵ_r simulující vlastnosti volného prostoru. Materiály jsou většinou v podobě tvrzené pěny (polystyrén, polypropylén), jejíž vlastnosti lze poměrně spolehlivě řídit velikostí elektricky vodivých či grafitových přísad, čímž lze zajistit proměnný charakter impedance materiálu. Tyto materiály jsou použitelné do poměrně vysokých teplot (až 160 °C), tj. lze s nimi tlumit vysoké hodnoty intenzity elektrického pole a pochopitelně musejí splňovat patřičné normy z hlediska nehořlavosti materiálu tak, aby nevznikl případný požár uvnitř měřicí komory.

Mezi další výhody těchto dielektrických materiálů patří kromě nízké hmotnosti také například jednoduchá instalace, a to nejčastěji lepením. Požadovaná struktura materiálu se získá nalepením více desek materiálů s různě požadovanými vlastnostmi na sebe. Tento postup ilustruje následující obr. 2.4, přičemž je patrné dle rovnice pro impedanci (obdobu rovnice 2.2), že dané relativní permitivity materiálu musejí postupně směrem k vnějšímu prostoru komory (zkratované desce) růst, tj. platí:

$$\varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3 \quad [-; -; -] \quad (2.7)$$

Charakter dielektrických ztrát musí být opačný, tj. společně s rostoucí relativní permitivitou materiálu musí činitel dielektrických ztrát klesat. Toto v sobě zahrnuje následující rovnice:

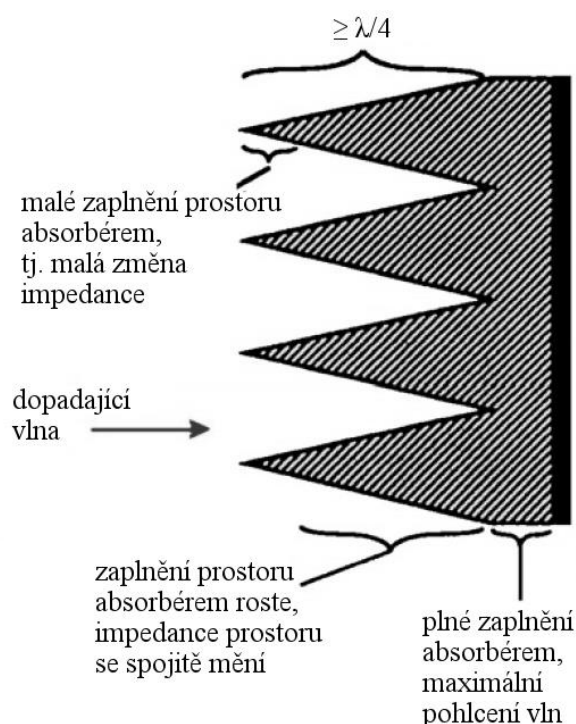
$$\tan \delta_1 > \tan \delta_2 > \tan \delta_3 \quad [-; -; -] \quad (2.8)$$



Obr. 2.4 Absorpční materiál složený ze tří vrstev s jejich jednotlivými parametry, převzato z [1].

Co se týče použití materiálů využívající magnetické ztráty, tak jejich nespornou výhodou jsou například výsledné rozměry. Jinými slovy pro stejnou frekvenci zde vychází menší rozměr materiálu než v případě dielektricky ztrátových materiálů. Problém je však zejména s jejich mechanickým připevněním na stěny komory, jelikož magneticky ztrátové materiály jsou podstatně těžší. Další nevýhodou těchto materiálů je poměrně vysoká cena. Přesto se však tyto materiály používají, a to většinou jako doplnění materiálů využívajících dielektrické ztráty.

Z hlediska rovnoměrné změny impedance materiálu je rovněž vhodné použít jeho patřičný geometrický tvar. Obr. 2.5 znázorňuje, jak lze fyzickými proporcemi materiálu rovněž podpořit plynulý přechod impedance volného prostoru na impedanci absorpčního materiálu. Tímto de facto dochází k realizaci impedančního transformátoru, který následně postupně s klesající impedancí (zvětšujícím se útlumem) přeměňuje energii dopadající vlny v teplo, a to s tím větší účinností, v čím větší hloubce materiálu se vlna nachází. Jak již bylo



Obr. 2.5 Konstrukční provedení absorpčního materiálu ve tvaru jehlanu, převzato z [1].

uvedeno, pro správnou funkci absorbéru ve tvaru jehlanu je důležité, aby jeho rozměry činily minimálně čtvrtinu vlnové délky (tj. $\lambda/4$) pro všechny frekvence v pracovním rozsahu absorbéru (tj. také pro nejnižší frekvenci). Například pro frekvenci $f = 10 \text{ MHz}$ vychází $\lambda/4$ rovno 7,5 m (dle rovnice 2.6), což by z hlediska realizace komory představovalo podstatné omezení. Tento fakt je nutno respektovat v souvislosti s rozměry komory, které se tím mohou výrazně zvětšit, čímž se realizace dané komory může prodražit.

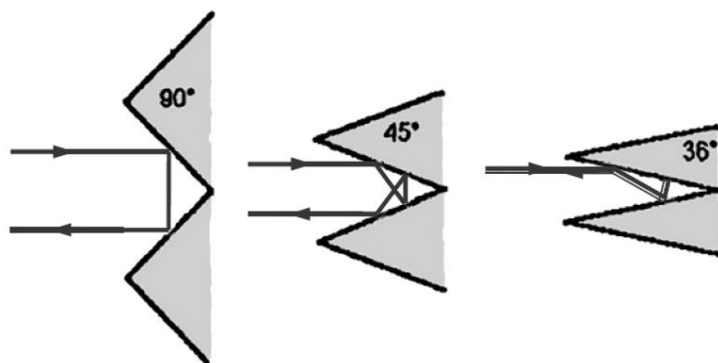
Pro porovnání jednotlivých absorpčních materiálů z hlediska jejich „bezodrazových vlastností“ se využívá parametr nazývaný útlum odrazu RL (angl. Return Loss), který je někdy také udáván pod názvem reflektivita. Tento parametr je definován dle následující rovnice (2.9).

$$RL = 10 \cdot \log \frac{P_{odr}}{P_{dop}} = 10 \cdot \log |\rho_{vst}|^2 = 20 \cdot \log |\rho_{vst}| \quad [dB] \quad (2.9)$$

Například při hodnotě: $RL = -30 [dB]$, to respektuje, že jedna tisícina výkonu dopadající vlny na plochu absorpčního materiálu se odrazí zpět.

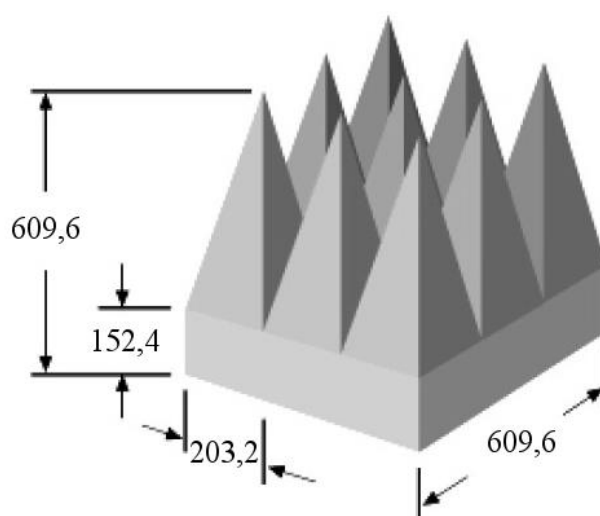
Absorpční materiály ve tvaru jehlanu kromě realizace impedančního transformátoru disponují ale i další výhodou. Jejich konstrukce totiž zajišťuje, že elektromagnetická vlna se od absorpčního materiálu odrazí vícekrát. Tento počet odrazů přitom závisí na vrcholovém

úhlu jehlanového absorpčního materiálu. Na toto poukazuje obr. 2.6, přičemž každý odraz de facto pohltí část energie vlny a přemění ji v teplo. To znamená, že je žádoucí, aby těchto odrazů nastalo co nejvíce, než se elektromagnetická vlna odrazí úplně zpět do prostoru měřicí komory. Tento fakt dále zdokonaluje použitý absorpční materiál. Při praktickém zhotovení jehlanových absorpčních materiálů se hodnota vrcholového úhlu pohybuje okolo 25° .



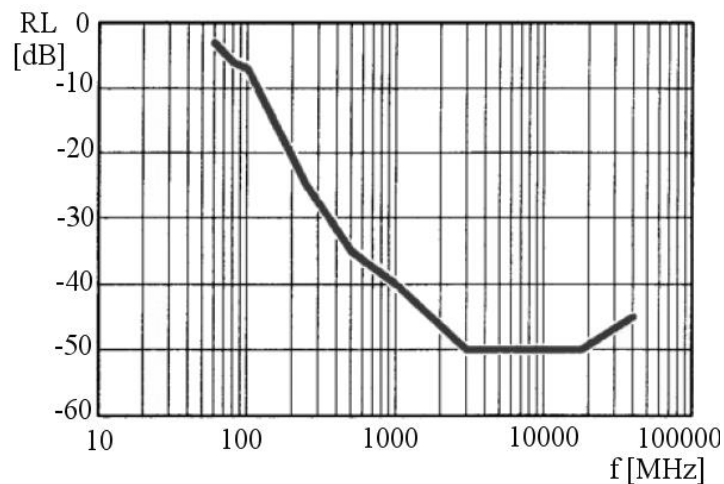
Obr. 2.6 Konstrukční provedení jehlanového absorpčního materiálu z hlediska vrcholového úhlu, převzato z [1].

Obr. 2.7 a 2.8 ilustrují příklad absorpčního materiálu s jeho konstrukčními rozměry (viz obr. 2.7) a jeho závislostmi útlumu odrazu RL na frekvenci (viz obr. 2.8). Z uvedené grafické závislosti lze určit pracovní rozsah frekvence z hlediska zamezení odrazů vln od stěn bezodrazové komory vybavené tímto materiálem. Je patrné, že tento materiál bude funkční až do frekvence několika GHz, kdy od frekvence 3 GHz až téměř do 20 GHz disponuje hodnotou $RL = -50$ [dB], což znamená, že se pouze jedna stotisícina výkonu odražené vlny



Obr. 2.7 Příklad konstrukčního provedení jehlanového absorpčního materiálu s rozměry uvedenými v [mm], převzato z [1].

dostane zpět do prostoru komory. Tuto hodnotu lze již považovat za dostatečnou. Zároveň pro vyšší frekvence se tento materiál chová také vyhovujícím způsobem. Podstatně větší omezení funkce absorpčního materiálu však nastává na nízkých frekvencích, kdy dle obr. 2.8 útlum odrazu nejprve nabývá pro praktickou použitelnost nepřijatelných hodnot. Tento fakt se však mění v závislosti na prakticky definovaném požadavku na velikost útlumu odrazu RL , tj. pokud se jako dostatečná hodnota tohoto útlumu jeví velikost $RL = -20$ [dB], pak lze jako minimální použitelnou frekvenci stanovit hodnotu 200 MHz. Pokud ovšem bude přijatelná i nižší hodnota útlumu RL , pak lze použít jehlan menší velikosti než uvedené pravidlo $\lambda/4$. V praxi se pak hodnota RL nejčastěji pohybuje u jehlanových absorberů mezi -30 dB až -40 dB v závislosti na frekvenci.



Obr. 2.8 Závislost útlumu odrazu RL [dB] na frekvenci pro uvedený příklad jehlanového absorpčního materiálu, převzato z [1].

2.2.2 Plně bezodrazová, polo-bezodrazová a modifikovaná polo-bezodrazová komora

Obecně bezodrazovou komoru lze ještě dále členit na její jednotlivé typy v závislosti na umístění absorpčních materiálů uvnitř této měřicí komory. Tyto typy jsou následující:

- **Plně bezodrazová komora**

V předešlé kapitole byl vysvětlen princip zajištění bezodrazových vlastností stěn měřicí komory. Pokud se zhotoví obložení všech stěn komory absorpčním materiálem, vytvoří se de facto plně bezodrazová komora (angl. anechoic chamber). Ilustrativní podoba plně bezodrazové komory je pak uvedena na obr. A1 v příloze A tohoto dokumentu.

- ***Polo-bezodrazová komora***

Ovšem z hlediska pohybu obsluhy po měřicí komoře je praktičtější provedení částečně bezodrazové (neboli polo-bezodrazové) komory, kde se obloží absorpčním materiálem všechny stěny komory kromě podlahy, která bude představovat odrazivou (vodivou) plochu. Tímto tedy vznikne vlastně částečně bezodrazová měřicí komora. Toto provedení měřicí komory je pak pro představivost znázorněno na obr. B1 v příloze B, přičemž tato měřicí komora může být ještě dále upravována.

- ***Modifikovaná polo-bezodrazová komora***

Pouze pro doplnění lze konstatovat, že pokud bude dále upravována již popsaná polo-bezodrazová komora tím, že bude vhodně doplněna absorpčními materiály tak, jak požaduje dané měření, vznikne tím vlastně modifikovaná polo-bezodrazová komora.

2.2.3 Odrazová komora

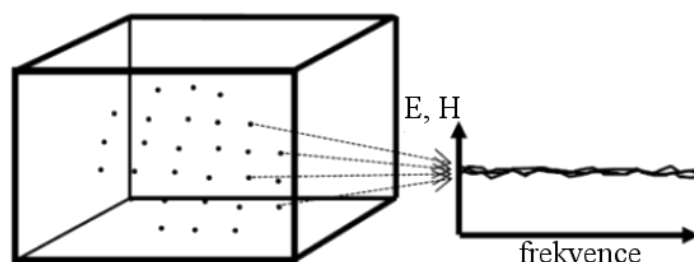
Odrazová (neboli reverberační) měřicí komora je navržena tak, aby v jejím vnitřním prostoru bylo dosaženo velmi nízkého útlumu odrazu elektromagnetické vlny od vnitřních stěn komory, tj. stěny komory mají tendenci vlny ve velké míře odrážet a v malé míře jejich energii pohlcovat a přeměňovat v teplo. Konstrukce odrazové komory má za snahu vytvořit v jejím vnitřním prostoru difúzní pole, což prakticky představuje rovnoměrné rozložení elektromagnetických vln uvnitř prostoru komory.

Obložení stěn této komory se na rozdíl od komory plně bezodrazové skládá výhradně z vysoce odrazivých (vodivých) materiálů. V ideálním případě jde o naprosto vodivé materiály, tzn. materiály se vstupním činitelem odrazu $\rho_{vst} = 1$ (viz rovnice (2.5)). Vzhledem k tomu, že zde se energie na stěnách odrazové komory příliš nemění v teplo (v ideálním případě vůbec), ale je naopak vyzářena zpět do jejího prostoru, tak je možné při menším vstupním výkonu měřicí antény dosáhnout podstatně větší intenzity elektrického pole uvnitř komory než v případě komory bezodrazové. Tím se zajistí vyvinutí dostatečné intenzity pole uvnitř komory, která je potřebná pro testování odolnosti daného zkušebního zařízení. Pochopitelně se rovněž zmenší ztráty energie při měření v odrazové komoře, což vede k energetické úspoře.

Z hlediska posouzení kvality provedení a funkce odrazové komory je kromě vytvoření dostatečně vysoké intenzity pole uvnitř komory také důležité dodržet několik následujících bodů respektujících vlastnosti elektromagnetického pole v komoře.

- **Prostorově uniformní pole**

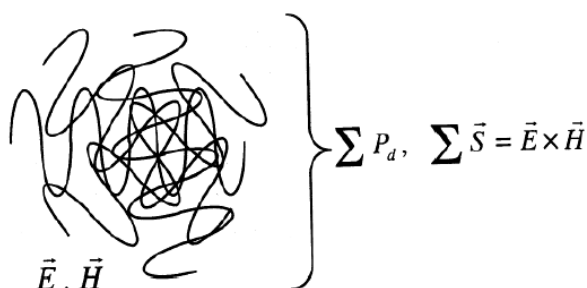
Pro správnou funkci odrazové komory je důležité, aby pole uvnitř měřicí komory bylo uniformní v prostoru, tj. rozložení hustoty energie pole v komoře musí být v přípustných mezích, resp. nesmí se příliš měnit. V ideálním případě by to znamenalo, že hustota energie pole je shodná, a to jak ve všech bodech prostoru komory, tak také na celém frekvenčním rozsahu. Příjemný stav zobrazuje obr. 2.9.



Obr. 2.9 Prostorově uniformní zkušební elektromagnetické pole, převzato z [2].

- **Náhodná změna fáze (a polarizace)**

Další důležitou vlastností pole uvnitř komory je zajištění náhodných fázových posuvů mezi vektory intenzity elektrického pole E a intenzity magnetického pole H uvnitř komory, čímž se v podstatě zajistí nestálá polarizace elektromagnetických vln. Na toto poukazuje obr. 2.10, kde S je Poytingův vektor definovaný jako vektorový součin vektorů E a H .

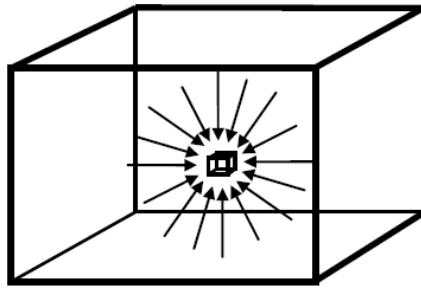


Obr. 2.10 Zkušební elektromagnetické pole s náhodnou polarizací, převzato z [2].

- **Izotropní pole**

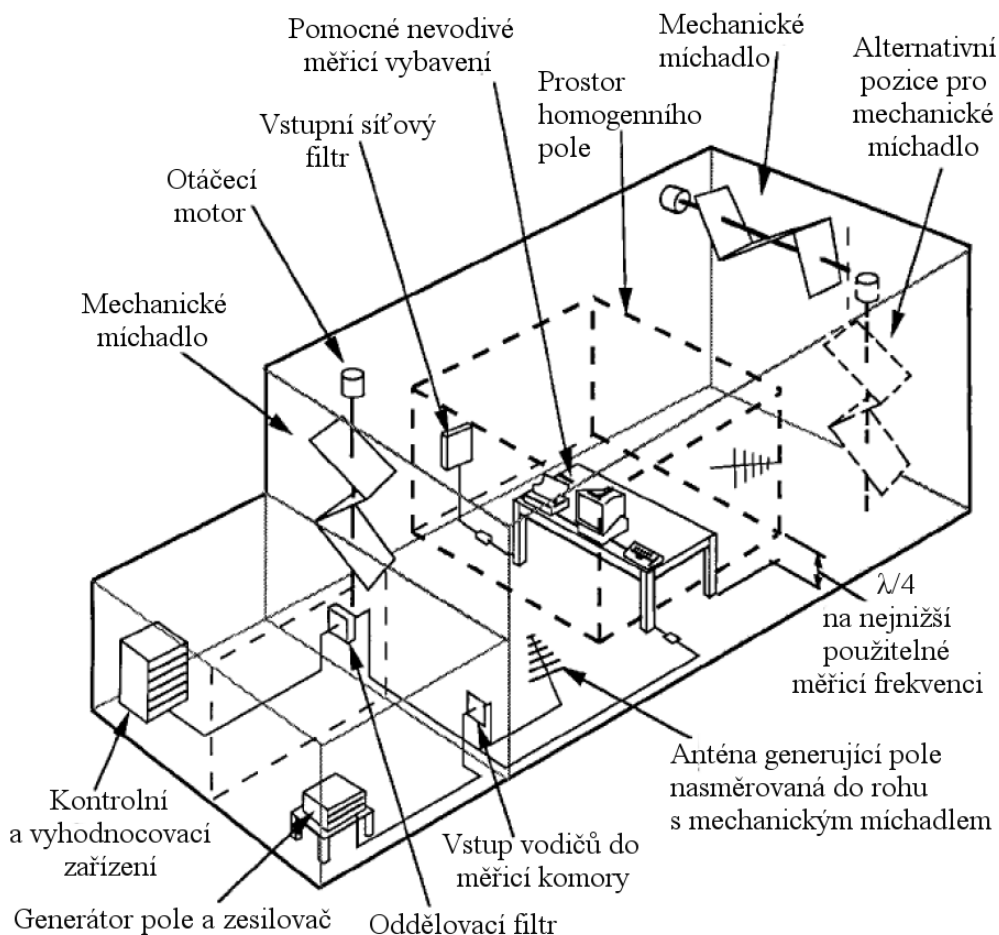
Dalším důležitým parametrem charakterizujícím pole uvnitř odrazové komory je vytvoření tzv. izotropního pole. To znamená, že elektromagnetické vlny se budou šířit ve všech směrech prostoru stejným způsobem. Jinými slovy šíření energie v prostoru nebude závislé na směru. Tuto skutečnost pak ilustruje obr. 2.11.

Pro zajištění změn rezonančních vidů a vzniku tak homogenního pole uvnitř komory jsou použita tzv. mechanická míchadla, která se buďto mohou otáčet plynule, pak jde o rozrušené módy odrazové komory, nebo v případě užití krokového motoru jde o laděné módy odrazové komory. První případ je více preferován, a to z důvodu podstatně rychlejšího



Obr. 2.11 Izotropní zkušební elektromagnetické pole, převzato z [2].

měření. Ovšem při měření určitých zařízení může být požadováno, aby elektromagnetické pole uvnitř komory bylo okamžik konstantní, pak je žádoucí spíše druhý uvedený případ. Nákres a popis částí odrazové měřicí komory je znázorněn na obr. 2.12.



Obr. 2.12 Odrazová měřicí komora, převzato z [2].

Vytvořit uniformní elektromagnetické pole uvnitř komory lze i jiným způsobem než použitím mechanických míchadel, a to tak, že se zajistí nesymetrické rozměry komory. Pokud totiž budou úhly svírající mezi sebou podlahu, stěny a strop komory rozdílné a budou se

v čase měnit, tak se nevytvoří pravidelný útvar tak jako kvádr v případě bezodrazové komory a chování odrazové komory jako rezonátor bude potlačeno. Stěny takovéto komory pak vibrují, a to z důvodu zajištění právě nesymetrických rozměrů komory a zamezení vzniku rezonančních vidů. Takovéto úpravy pak vylepší prostorovou uniformitu a také izotropní vlastnosti pole v komoře. Takto zhotovená měřicí komora pak nese název vibrující intrinzičká odrazová komora. Stěny této komory jsou vytvořeny flexibilním vodivým materiálem, který je nevodivými provazy připevněn k tyčové konstrukci. Ukázka tohoto typu komory je pak ilustrována obrázkem C1 v příloze C, přičemž tato komora nabízí zmíněnou možnost změny fyzických rozměrů mezi svými stěnami. Tímto se de facto změny rozměry komory jakožto rezonátoru, což pak v porovnání s rozrušenými módy odrazové komory se stejnými rozměry respektuje nižší možné pracovní kmitočty vibrující intrinzičké odrazové komory, což pak vede k rozšíření rozsahu pracovních frekvencí této komory. Další výhodou uvedené komory je její možné vztyčení uvnitř bezodrazové komory. V případě testování zařízení z hlediska jeho vyzařování (EMI) v bezodrazové komoře, kde je testované zařízení pečlivě instalováno, lze v jeho okolí postavit vibrující intrinzičnou odrazovou komoru a provést patřičná měření aniž by se jakkoli pohybovalo s testovaným zařízením.

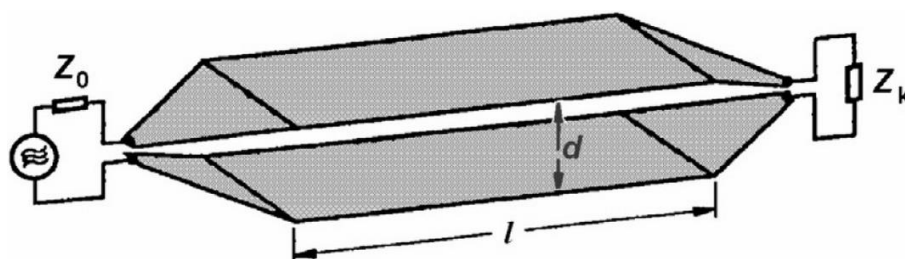
Dalším typem měřicí komory je transportní intrinzičká odrazová komora. Vlastně je velmi podobná vibrující intrinzičké odrazové komoře, pouze se zde stěny komory nepohybují či nevibrují konstantní rychlostí. Změnu fyzických rozměrů stěn komory lze zajistit pomocí krokového motoru či je rovněž možné měnit vidy uvnitř komory zapojením mechanických míchadel na krokový motor. Jeden zástupce těchto měřicích komor je znázorněn na obr. D1 a D2 v příloze D.

2.2.4 Speciální zkušební komory

Při testování v bezodrazové komoře dochází k absorpci drtivé většiny vyzařovaného výkonu z měřicí antény stěnami komory. Pro dosažení požadované intenzity elektrického pole ve frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 2 GHz uvnitř komory, kde se nachází testovaný objekt, je pak nutné přivést velký výkon na vstupní svorky měřicí antény. Tato skutečnost potom představuje vyšší stanovená kritéria na parametry širokopásmového výkonového zesilovače, který je nezbytnou součástí vybavení zkušební komory. Toto pak koresponduje s vyšší pořizovací cenou výkonového zesilovače.

Snížení vstupního výkonu měřicí antény za současného vytvoření stejné intenzity elektrického pole jako v případě bezodrazové komory lze dosáhnout vhodnou úpravou měřicí

komory. Intenzita pole ve vzdálené zóně v daném bodu prostoru bude tím menší, v čím větší vzdálenosti od měřicí antény se bude tento bod nacházet. Snahou tedy je provádět měření ve vzdáleném poli a přitom ne daleko od měřicí antény. Za tímto účelem vznikly speciální měřicí komory vytvořené pomocí speciálních antén, které vytvářejí de facto vysokofrekvenční vedení s transverzální elektromagnetickou vlnou TEM. Zkoušený objekt se vloží mezi vodiče tohoto vedení, kde následně může docházet k jeho testování. Tímto způsobem je možné dosáhnout vysokých intenzit zkušebního pole v místě testovaného zařízení, a to současně s řádově nižším vstupním výkonem měřicí antény než v případě bezodrazové komory. Ovšem v porovnání s bezodrazovou komorou lze zde vzhledem k velikosti homogenního pole, které se vytváří uvnitř takovéto speciální měřicí komory, testovat pouze zařízení s menšími konstrukčními rozměry. Pro ilustraci takovéto speciální měřicí antény vytvářející de facto deskové vedení slouží následující obr. 2.13.



Obr. 2.13 Deskové vysokofrekvenční anténní vedení délky l , převzato z [1].

Transverzálně elektromagnetická vlna TEM vznikne mezi deskovými vodiči antény na takových frekvencích, při kterých je vlnová délka λ mnohem větší než vzdálenost deskových vodičů d , tj. platí $\lambda \gg d$. Intenzitu TEM pole E lze určit pomocí napětí U a vzdálenosti vodičů dle známého vztahu (2.10).

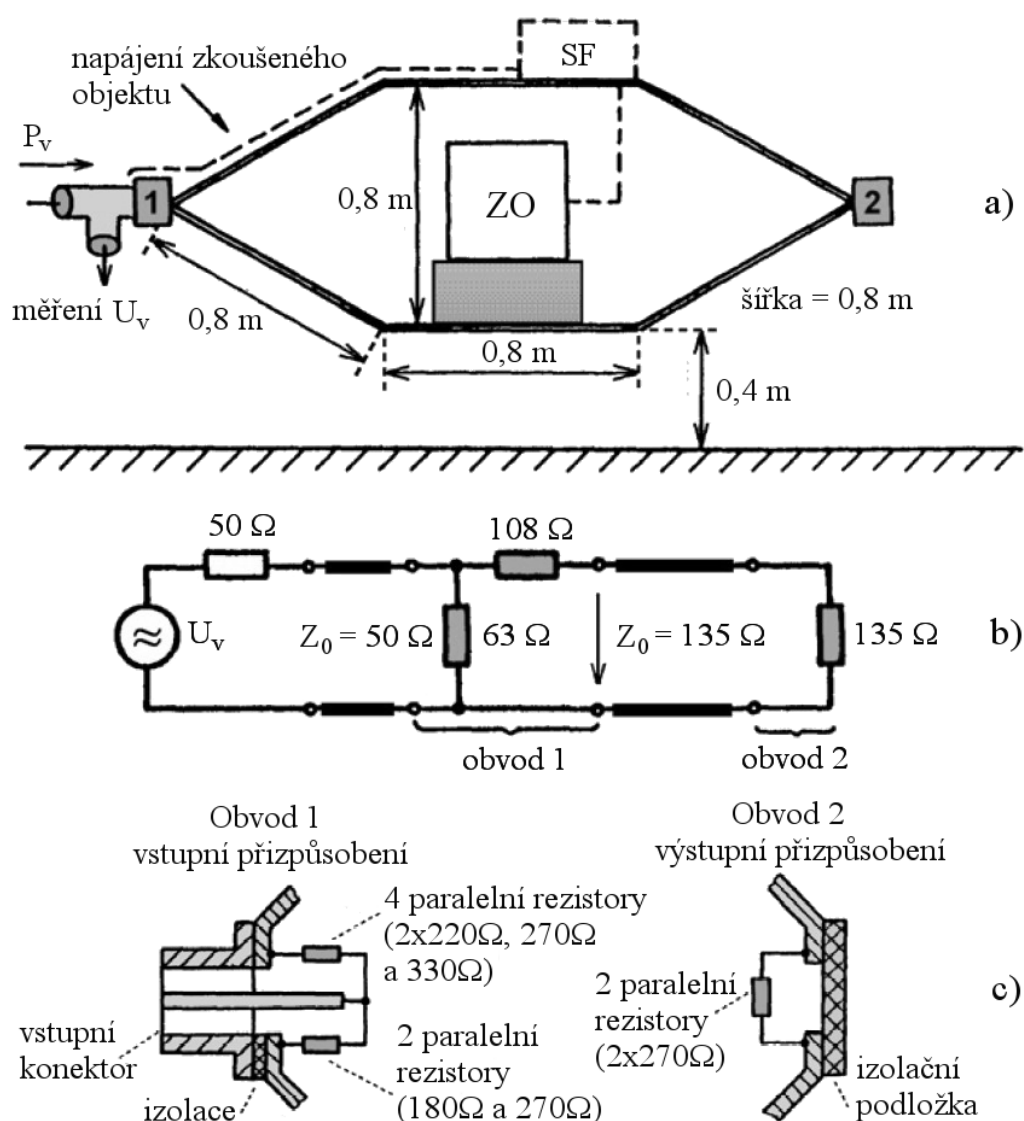
$$E = \frac{U}{d} \quad [V/m; V; m] \quad (2.10)$$

Při testování zařízení je nutné, aby toto zařízení bylo situováno do prostoru homogenního pole, přičemž toto pole tvoří přibližně třetinu vzdálenosti vodičů antény, tj. $d/3$. Při zachování stejné šířky anténních vodičů jako je jejich vzájemná vzdálenost, lze tak v případě, kdy platí $d = 90 \text{ cm}$, testovat nejvýše zařízení o rozměrech krychle s hranou 30 cm.

Následující obr. 2.14a zobrazuje klasické provedení této speciální měřicí komory pro testování elektromagnetické odolnosti. Dřevem vyztužené vedení se musí nacházet minimálně 40 cm nad podlahou, od které je rovněž izolováno, přičemž kovové předměty se nesmí

nacházet blíže než 2 m od tohoto vedení. Všechna zařízení využívaná při měření se umísťují na horní stranu měřicí komory, která je rovněž pro zajištění bezpečnosti uzemněna.

Pro správnou funkci tohoto deskového vedení je nutné zajistit správné impedanční přizpůsobení, které zamezí odrazům energie na vedení. Jedno možné zapojení je uvedeno na obr. 2.14b. Pro širokopásmové impedanční přizpůsobení je nutné využít rezistory, kterými se charakteristická impedance napájecího vedení antény $Z_0 = 50 \Omega$ převede na charakteristickou impedanci deskového vedení antény $Z_0 = 135 \Omega$, což je realizováno obvodem 1. Pro impedanční přizpůsobení konce deskového vedení je využito dle uvedeného schématu obvod 2. Pro zajištění větší přesnosti uvedených hodnot odporů se tyto hodnoty realizují paralelním za-

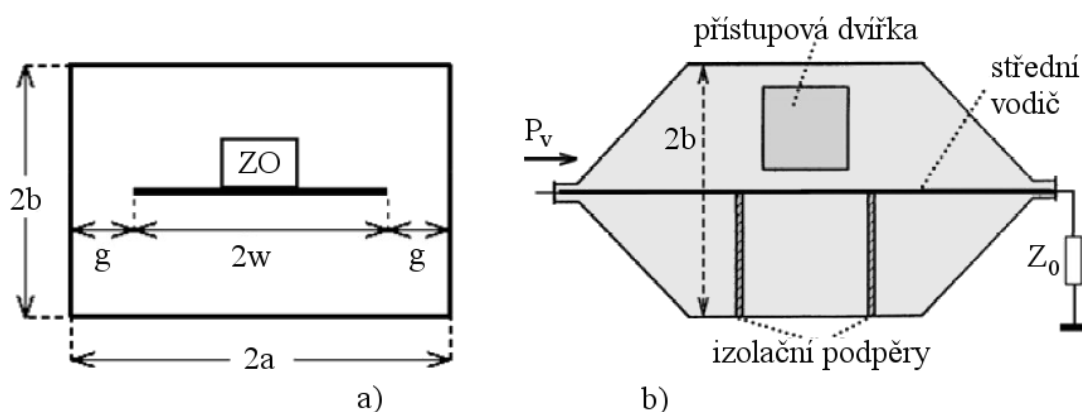


Obr. 2.14 Deskové vedení sloužící k testování elektromagnetické odolnosti: a) konstrukční provedení, b) náhradní schéma pro impedanční přizpůsobení vedení, c) realizace vstupního a výstupního obvodu impedančního přizpůsobení, kde SF je síťový filtr, převzato z [1].

pojením více rezistorů. Toto je demonstrováno na obr. 2.14c, přičemž je rovněž nutné dostatečné výkonové dimenzování těchto rezistorů tak, aby bylo možné přenášet požadovaný výkon přes desková vedení při stálém impedančním přizpůsobení.

Jedním z nedostatků deskového vedení je vyzařování elektromagnetického pole ze stran vedení do okolního prostoru. Toto vyzařované „rozptylové“ pole je de facto neúčinné a navíc způsobuje nehomogenitu zkušebního pole na okrajích deskového vedení, čímž se vlastně zmenšuje přípustná velikost testovaného zařízení. Dalším avšak důležitějším důsledkem existence tohoto pole může být ohrožení obsluhy deskového vedení. Z těchto uvedených důvodů je žádoucí potlačit toto vyzařované pole ze stran vedení. Toho se dosahuje například přidáním absorpčních materiálů, kterými se obloží obě strany deskového vedení po celé své délce.

Dokonalejší řešení vyzařování „rozptylového“ pole ze stran deskového vedení v sobě zahrnují elektromagneticky stíněné zkušební měřicí komory TEM, kde je možné provádět testování odolnosti i vyzařování zkušebního objektu. Mezi tyto komory patří také Crawfordova komora, jejíž konstrukční provedení (z roku 1974) je znázorněno na obr. 2.15.



Obr. 2.15 Zkušební (Crawfordova) měřicí komora TEM: a) průřez v příčném směru, b) průřez v podélném směru, převzato z [1].

Crawfordova komora představuje de facto koaxiální vedení tvořené vnitřním a vnějším vodičem, mezi které se umísťuje zkoušený objekt (ZO). Vnější vodič může být obdélníkového ($b \neq a$) či čtvercového ($b = a$) tvaru a obklopuje ZO, přičemž vnitřní vodič je ve tvaru pásky a je umístěn pod ZO. Charakteristická impedance Z_0 koaxiálního vedení, které simuluje Crawfordova komora, je v celé délce konstantní a lze ji stanovit podle následujícího vztahu (2.11).

$$Z_0 = \frac{30 \cdot \pi}{\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \cdot \ln(\sinh \frac{\pi \cdot g}{2b})} \quad [\Omega] \quad (2.11)$$

Kde jsou: a, b, g – konstrukční rozměry Crawfordovy komory [m] (viz obr. 2.15).

Pro správnou funkci Crawfordovy komory je nezbytné zamezit odrazům energie na vedení pomocí správného impedančního přizpůsobení, a to až do frekvence prvního vidu f_{TE10} , kterou lze určit ze vztahu (2.12). Pole uvnitř Crawfordovy komory je až do frekvence f_{TE10} charakteru transverzální elektromagnetické vlny TEM s homogenní intenzitou E , pro kterou platí mezi středním a horním či spodním vodičem známý vztah (2.10).

$$f_{TE10} = \frac{c}{4 \cdot a} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot a} \quad [f; m/s; m] \quad (2.12)$$

Ovšem i zde platí, že z důvodu zajištění homogenního pole je využitelný prostor pro umístění ZO pouze přibližně $2b/3$.

Crawfordovy komory existují dvojího typu. Vyrábí se v přenosném či stacionárním provedení. Přenosná komora je více praktická, ale slouží pro testování ZO velikosti desítek cm^3 , zatímco uvnitř stacionární komory lze zkoušet ZO velikosti do několika dm^3 . Tyto komory se využívají pro frekvence až do několika set MHz a intenzity elektrického pole přibližně do 500 V/m. Pro ilustraci jsou uvedeny dva starší typy těchto komor na následujícím obr. 2.16.

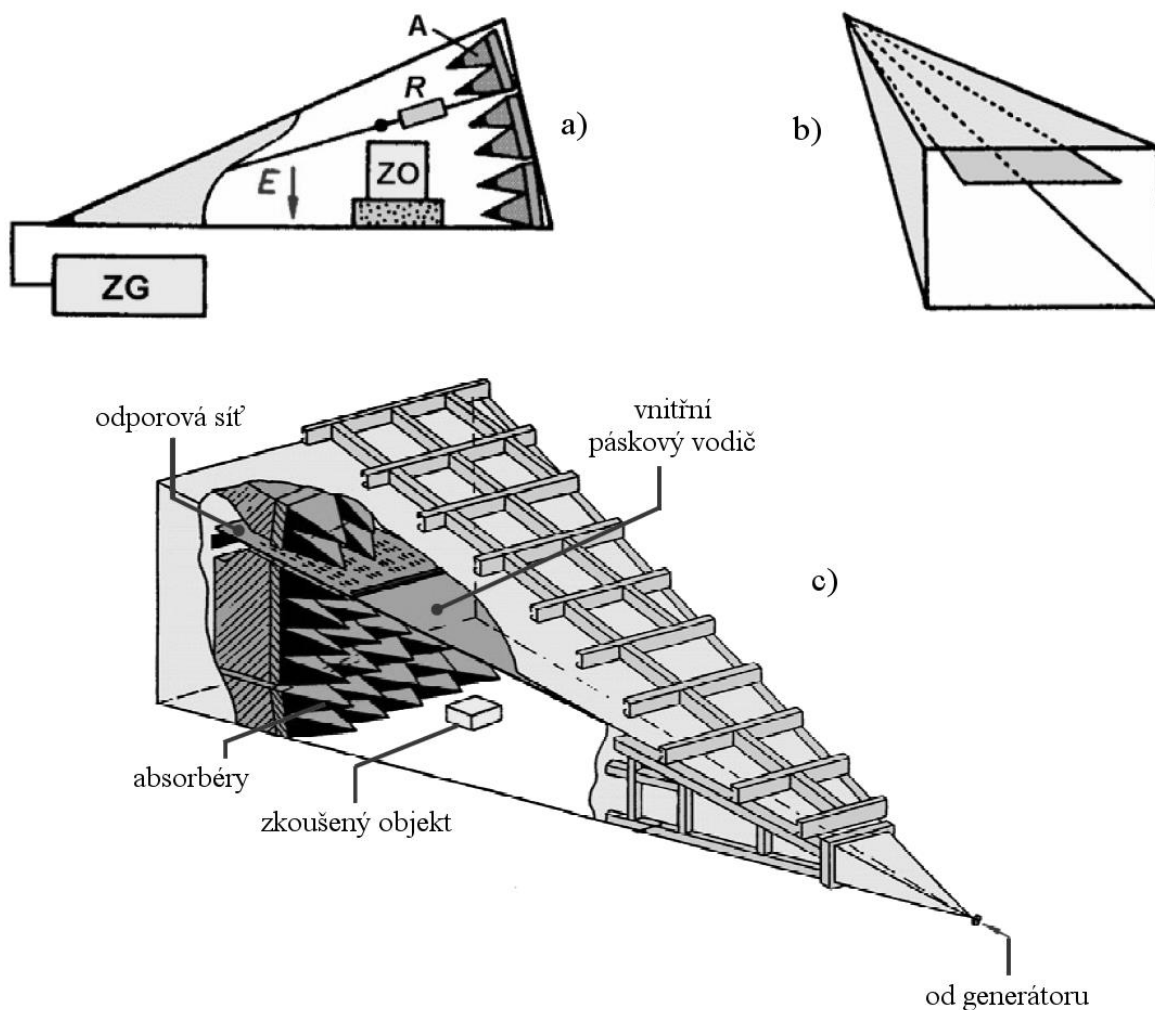


Obr. 2.16 Zkušební Crawfordova měřicí komora, převzato z [1].

Tento typ Crawfordových komor však může být ještě zdokonalen, a to z pohledu impedančního přizpůsobení na vysokých kmitočtech. Zamezení nežádoucím odrazům energie vln uvnitř komory lze provést aplikací absorpčních materiálů. Tímto způsobem pak vzniká další druh měřicí komory, tzv. GTEM komora (angl. Gigahertz Transversal Electromagnetic Cell). Principiální provedení takovéto komory popisuje obr. 2.17.

Jak je patrné z obr. 2.17a,b komora GTEM představující koaxiální vedení disponuje vnitřním prostorem pyramidálního tvaru s nesymetricky umístěným vnitřním vodičem (viz obr. 2.17b). Impedance tohoto koaxiálního vedení je rovna $50 [\Omega]$ v celé jeho délce. Existenci pouze postupné vlny v komoře zajišťuje impedanční přizpůsobení, které je realizováno na vysokých kmitočtech pomocí obložení absorpčními materiály a na nízkých kmitočtech odporovou sítí s hodnotou $R = Z_0 = 50 [\Omega]$.

Hlavní výhodou měřicích komor GTEM je skutečnost vytvoření homogenního pole uvnitř komory za současného nevyzařování pole z měřicí komory. Tato komora může být rovněž dimenzována pro ZO velikosti až několika m^3 . Další výhodou může být konstrukce této komory ve smyslu přídavných dílů. Na základní stavební prvek komory, jenž je ilustrován na obr. E1 v příloze E, se mohou dokoupit další přídavné části komory, jimiž se celková velikost komory zvětší, a to například na komoru uvedenou na obr. E2 v příloze E.[1]



Obr. 2.17 Zkušební měřicí komora GTEM: a) principiální průřez v bočním směru, b) průřez v příčném směru, c) principiální provedení, převzato z [1].

2.2.5 Porovnání jednotlivých typů měřicích komor

Před pořízením jednoho či druhého typu měřicí komory je pochopitelně vždy vhodné zvážit kladné a záporné stránky jednotlivých komor a na základě tohoto faktu se rozhodnout pro nejvhodnější řešení. Tato volba rovněž pochopitelně vychází z předpokládaného typu realizovaných měření v dané komoře.

Co se týče porovnání odrazové a bezodrazové měřicí komory, tak na základě toho, co již zde bylo zmíněno, jsou výhody i nevýhody těchto komor zřejmé. Zatímco bezodrazová komora poskytuje téměř dokonalé měřicí prostory za cenu vysokých pořizovacích nákladů a nutného velkého vstupního výkonu do měřicí antény, tak odrazová komora může být konstruována pro možný transport komory a zároveň stěny této komory příliš nepřeměňují energii dopadající vlny na teplo, proto zde nedochází k markantní ztrátě energie jako v předešlém případě a vstupní výkon do měřicí antény nemusí být zdaleka tak vysoký. Tento fakt způsobí nižší finanční prostředky nutné pro pořízení výkonového zesilovače, a tím se sníží cena celkového vybavení zkušebny. Zároveň nelze zapomenout na fakt, že stěnami odrazové komory lze pohybovat, čímž je možné měnit rezonanční frekvence komory jakožto rezonátoru.

Pro menší testovaná zařízení je pak vhodnější měření pomocí Crawfordovy či GTEM komory. Tyto komory neobsahují takové množství absorpčních materiálů jako v případě bezodrazové komory, proto nemají tak vysokou pořizovací cenu. Rovněž vzhledem k uspořádání těchto komor nemusí být dodávaný vstupní výkon tak vysoký a navíc je možné tyto komory konstruovat i pro větší testovaná zařízení. Na toto rovněž poukazuje obr. E2 v příloze E.

Tato kapitola vychází ze zdrojů [1], [2], [3], [4] a [5].

3 Zkoušky elektromagnetické odolnosti proti rušivému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli

Jak již bylo uvedeno v kap. 1.1, jelikož prakticky nelze absolutně odizolovat signály různých provozovaných elektronických zařízení, jsou tato zařízení neustále pod účinkem rušivých elektromagnetických polí. Tento fakt je navíc umocněn neustálým rozvojem elektroniky, s čímž je spojený i nárůst radiokomunikace. Tyto uvedené faktory mají vliv na celkové elektromagnetické záření působící nežádoucím způsobem na provozovaná zařízení.

Kromě vyzařovaných rušivých signálů, které jsou užitečné (tj. úmyslně vyzařované), existuje však i rušivý signál vyzařovaný neúmyslně, který je tedy v podstatě neúčinný. Tento neúčinný signál například generují různé svářečky, spínací tyristory, zářivky a další indukční zátěže. Tento typ je charakterizován jako rušení šířené vedením a platí, že i tento rušivý signál bude rovněž odpovídajícím způsobem omezen metodami pro ochranu před rušivým elektromagnetickým polem, tak jako je tomu u úmyslně vyzařovaného signálu.

Tyto všechny uvedené aspekty v sobě zahrnují opodstatnění zkoušek elektromagnetické odolnosti elektronických zařízení. Pro svoji správnou funkci totiž zařízení musí být v jisté míře odolné proti působícímu rušení a právě tuto odolnost zařízení jsou pověřeny ověřit zkoušky elektromagnetické odolnosti. Tyto zkoušky se realizují v poměrně širokém rozsahu frekvencí, s čímž souvisí fakt, že elektromagnetická pole nízkých kmitočtů představují větší hodnoty vlnové délky λ , což koresponduje s potřebným velkým rozměrem použité měřicí antény, a proto jsou tyto pole navázána do zkušebního zařízení použitím kapacitních či indukčních vazebních obvodů, např. jsou využita kapacitní kleště. V závislosti na akceptovatelných anténních rozměrech v dané měřicí komoře jsou pak přibližně od frekvencí 26 MHz pro generování rušivých elektromagnetických polí preferovány měřicí antény.

3.1 Zkušební úrovně

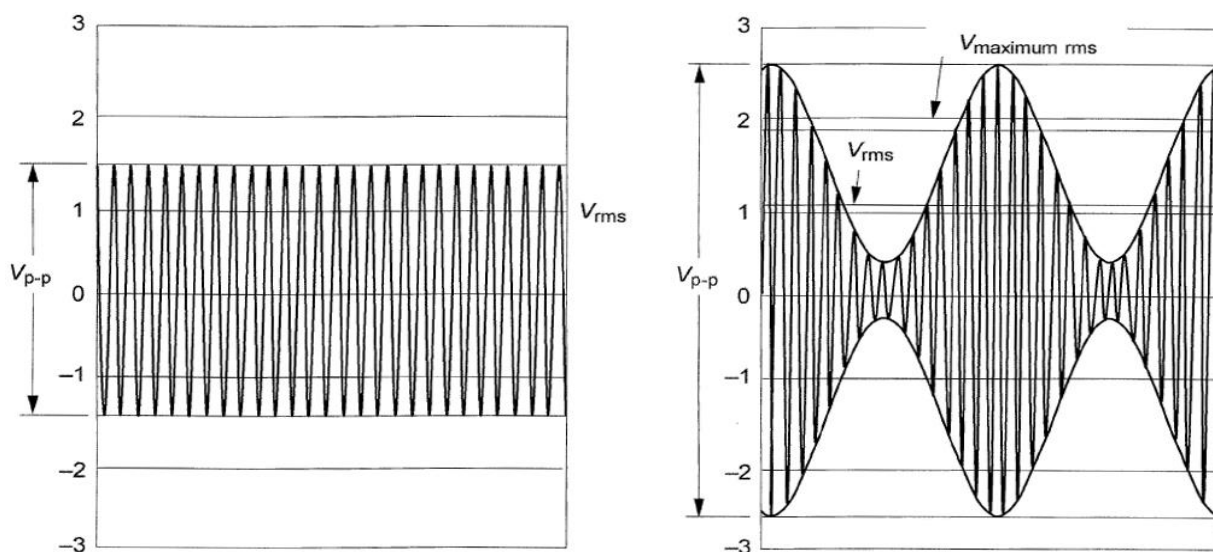
Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 stanovuje zkušební úrovně intenzit elektrických polí pro zkoušky elektromagnetické odolnosti dle tab. 3.1. Uvedené úrovně mohou být při zkoušce kombinovány. O tom, která úroveň bude aplikována pro který frekvenční rozsah testovaného výrobku, rozhoduje zkušební komise tohoto výrobku.

V tab. 3.1 jsou předepsány intenzity zkušebního pole, které představují efektivní hodnoty intenzit elektrického pole modulačního signálu nosné vlny, který je znázorněn

Úroveň	Intenzita zkušebního pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
x	Zvláštní

Tab. 3.1 Zkušební úrovně měřicích signálů pro všeobecné účely, digitální radiotelefony a další vysokofrekvenčně vyzařující přístroje, kde úroveň x může být specifikována normou jako neomezená úroveň s přidělenou intenzitou jakékoliv hodnoty, převzato z [4].

na obr. 3.1 vlevo. Při zkoušce dochází k amplitudové modulaci tohoto signálu s použitím sinusové vlny o frekvenci 1 kHz s hloubkou modulace 80 %, čímž vzniká modulovaný signál, jehož časový průběh je zobrazen na obr. 3.1 vpravo. Uvedený typ modulace nese svoje výhody, mezi které patří poměrně jednoduchá praktická realizace a dále prokázání dostatečně náročného testování i proti jiným druhům rušení, jako je například pulzní amplitudová modulace PAM, pulzní kódová modulace PCM a další. Tímto způsobem se tedy dosahuje simulace reálného rušivého signálu, který je de facto v provozu emitován na dané zařízení.



Obr. 3.1 Vysokofrekvenční signál, kde $V_{p-p} = 2,8 V$; $V_{rms} = 1,0 V$; $V_{maximum\ rms} = 1,8 V$,
Modulační (obr. vlevo), Modulovaný AM s hloubkou modulace 80 % (obr. vpravo), převzato z [4].

3.1.1 Zkušební úrovně pro všeobecné účely

Zkoušky elektromagnetické odolnosti pro všeobecné účely popsané normou ČSN EN 61000-4-3 se běžně provádějí v celých kmitočtových rozsazích od 80 MHz až po 1 GHz. Metody zkoušky odolnosti pro nižší frekvence pak v sobě zahrnuje norma IEC 61000-4-6, přičemž komise výrobku rozhoduje o případné změně spodní hranice uvedeného

kmitočtového rozsahu ve smyslu jiné oddělovací hodnoty mezi normami IEC 61000-4-6 a IEC 61000-4-3 než právě uvedených 80 MHz. Zároveň je možné, aby tato komise určila jiná doplňující modulační schémata této zkoušky.

3.1.2 Zkušební úrovně pro zkoušky odolnosti zařízení vůči vysokofrekvenčně vyzařujícímu rušení z digitálních radiotelefonů a dalších vysokofrekvenčně vyzařujících přístrojů

Tyto uvedené zkoušky odolnosti se běžně realizují ve dvou frekvenčních rozsazích, a to od 800 MHz do 960 MHz a dále od 1,4 GHz do 6,0 GHz. Zmíněné frekvenční rozsahy se dále přizpůsobují na takové, na kterých je daný testovaný mobilní radiotelefon či jiný vysokofrekvenčně vyzařující přístroj v praxi provozován. Zároveň není požadováno provádět zkoušku daného zařízení v celém spojitým uvedeném frekvenčním rozsahu (1,4 až 6,0) GHz. Rovněž je dle uvedené normy možné pro testování zařízení úmyslně emitujícího vysokofrekvenční signál (jako je např. mobilní radiotelefon) použít v daném frekvenčním rozsahu specifické hodnoty zkušebních úrovní.

V případě, že na daný testovaný produkt jsou kladeny požadavky jen od určitých zemí, je možné uvedený frekvenční rozsah (1,4 až 6,0) GHz adaptovat na základě rozsahu kmitočtů přidělených mobilním radiotelefonům a dalším úmyslně vyzařujícím zařízením právě v těchto zemích. Pokud tento případ nastane, tak je nezbytné, aby byl patřičně popsán v protokolu zkoušky daného zařízení.

3.2 Vybavení zkušebního pracoviště

Norma ČSN EN 64000-4-3 ed. 3 pro provádění zkoušek elektromagnetické odolnosti uvádí jako vybavení zkušebního pracoviště tyto následující zkušební zařízení:

- ***Bezodrazová komora***

Velikost bezodrazové komory musí být adekvátní z důvodu vytvoření dostatečné velikosti uniformního měřicího pole, která vlastně určuje maximální akceptovatelnou velikost zkoušeného zařízení v této komoře. Pro přiblížení se plně bezodrazové komoře lze ještě aplikovat přidavné absorpční materiály, a to například na podlahu komory, přičemž princip těchto materiálů byl podrobněji rozebrán a vysvětlen v kap. 2.2.1. Pro ilustraci bezodrazové komory pak slouží obr. A1 v příloze A.

- **Elektrické filtry**

Tyto filtry slouží k potlačení elektromagnetické interference EMI mezi částí měřicí komory, kde je prováděn daný test zkoušeného zařízení, a vedlejší odstíněnou částí komory, kde dochází mj. ke zpracování naměřených hodnot. Je podstatné, aby všechna vodivá propojení mezi uvedenými dvěma částmi měřicí komory byla opatřena těmito filtry tak, aby docházelo k jejich minimálnímu ovlivňování a procházení zanedbatelného rušivého signálu mezi nimi. Zároveň uvedená norma poukazuje na dodržení takových zapojení filtrů, která nevytvářejí přídatné rezonanční kmitočty na vedení.

- **Vysokofrekvenční generátor měřicího signálu**

Tento generátor musí umožňovat amplitudovou modulaci s 80 % hloubkou modulace se sinusovým nosným signálem o frekvenci 1 kHz. Dále pochopitelně musí být schopen generovat signál v celém kmitočtovém pásmu, v kterém je realizována daná zkouška odolnosti. Pro měřicí generátor je rovněž nezbytné, aby v sobě obsahoval funkci nastavení jednotlivých parametrů modulace. Dále může nastat případ, kdy bude nutné filtry typu pásmové či dolní propusti doplnit zkušební pracoviště, a to z důvodu zamezení vzniku vyšších harmonických složek, čímž se patřičně omezí rušivý signál.

- **Zesilovače výkonu**

Tyto zesilovače zajišťují napájení měřicí antény, která generuje zkušební signál s požadovanou intenzitou elektrického pole a dále pochopitelně rovněž zesilovače slouží k zesílení signálu před i po amplitudové modulaci. Pro použitý výkonový zesilovač je nezbytné, aby jeho hodnota harmonického a jiného zkreslení nezpůsobovala nereprodukovatelnost měření. Pokud by totiž jednotlivé vyšší harmonické složky způsobené výkonovým zesilovačem byly nepřijatelně vysoké, způsobovaly by tak přírůstek k intenzitám elektrického pole v jednotlivých bodech prostoru komory a tím by snižovaly uniformitu měřicího pole. Pro eliminaci tohoto problému se využívá zapojení přeladitelného filtru typu dolní propust na výstup výkonového zesilovače. Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 stanovuje případ potlačení jednotlivých vyšších harmonických složek výstupního signálu zesilovače o 6 dB a více oproti základní harmonické za přijatelný.

- **Měřicí antény**

Pro generování elektromagnetického pole ve zkušebním pracovišti jsou často používány antény, jako jsou například bikónické, logaritmicko-periodické, trychtýřové a další, které disponují lineární polarizací a pro danou zkoušku dostatečnou šířkou frekvenčního pásma.

- ***Izotropní sonda***

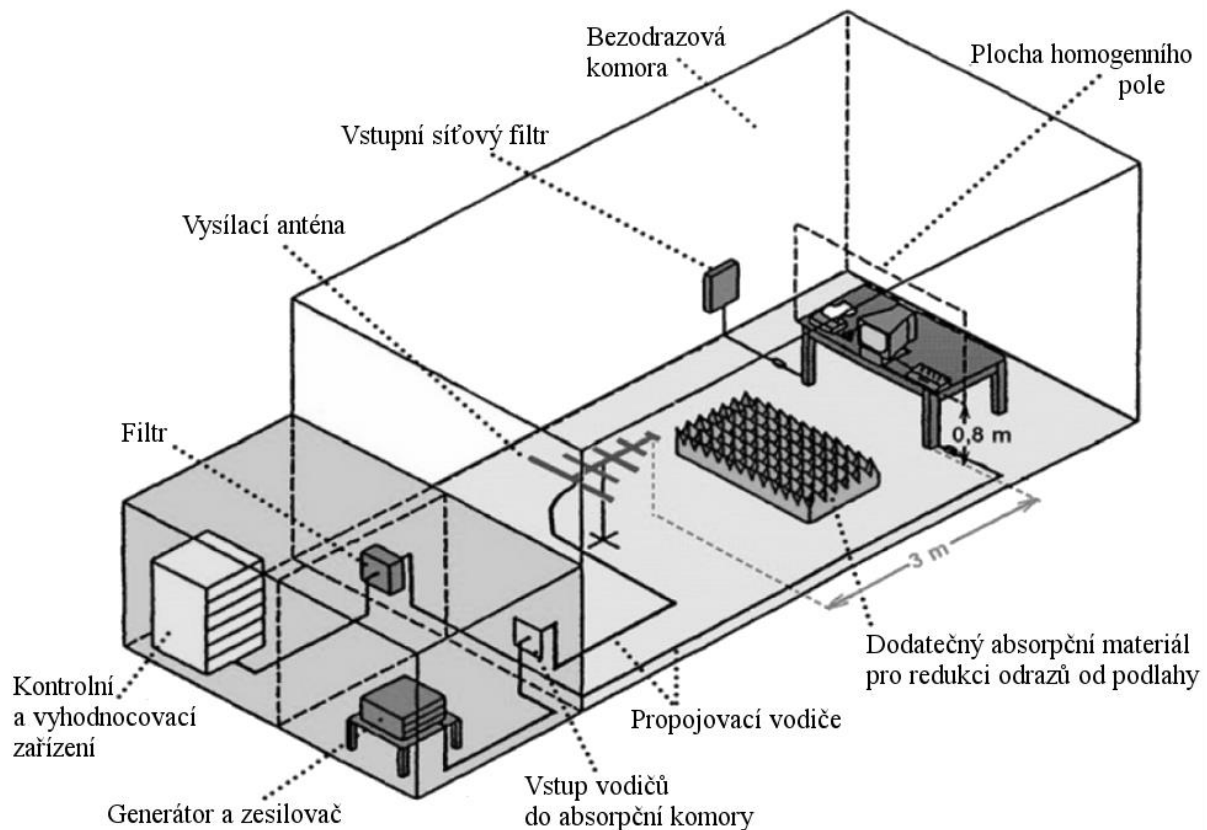
Tato sonda měří velikosti intenzity elektrického pole v jednotlivých bodech měřicí komory a propojovacím (nejčastěji optickým) vedením jsou pak odváděny tyto naměřené údaje do vedlejší odstíněné části měřicí komory, kde dochází k jejich zpracování. Izotropní sonda, společně s připojenou optoelektronikou, elektronikou a propojovacím vedením, musí vykazovat akceptovatelnou schopnost odolávat zkušebnímu poli uvnitř měřicí komory. Kalibrace měřicí sondy elektrického pole je pak uvedena v kap. 3.5.

- ***Pomocná zařízení***

Pomocná zařízení slouží k monitorování funkčních stavů jednotlivých měřicích zařízení, která se podílejí na provádění zkoušky odolnosti, a to za účelem co nejrychlejšího zjištění závad v měřicím systému. Dále jsou pak využívána také pro záznam a řízení jednotlivých úrovní výkonu, které jsou směrodatné pro získání požadované intenzity elektrického pole uvnitř komory. Zároveň i tato pomocná zařízení musí pochopitelně v sobě zahrnovat určitou míru elektromagnetické odolnosti proti vyzařovanému zkušebnímu poli.

3.3 Popis zkušebního pracoviště

Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 doporučuje jako zkušební pracoviště použít bezodrazovou měřicí komoru. Výhody tohoto typu zkušební komory jsou uvedeny v kap. 2.2 a lze je stručně charakterizovat tak, že bezodrazová komora poskytuje nezávislost zkušebního signálu na jiných signálech šířících se okolním prostorem, ale především z důvodu mnohdy vysoké intenzity zkušebního měřicího pole, tato komora skýtá dostatečnou ochranu její obsluhy. Principiální náčrt této bezodrazové komory jako zkušebního pracoviště s uspořádáním jednotlivých měřicích přístrojů je uveden na obr. 3.2. Jak již bylo zmíněno, pro správné měření je nezbytné vytvořit v blízkosti měřicí komory s testovaným zařízením a měřicí anténou vedlejší odstíněnou komoru, kde bude docházet ke zpracování naměřených dat a jejich následnému vyhodnocení. Rovněž bylo řečeno, že oddělení této vedlejší komory od měřicí je třeba realizovat takovým způsobem, že se zařízení uvnitř těchto komor prakticky nebudou téměř nijak vzájemně ovlivňovat. V reálném prostředí pochopitelně určitá míra ovlivňování těchto uvedených komor navzájem bude existovat. Úkolem ovšem je tuto míru zmenšit na takové minimum, kde nebude docházet k zasahování rušivých signálů do vyhodnocovací části tak, aby byly přespříliš ovlivněny výsledky měření. Pro znázornění je vedlejší vyhodnocovací komora na obr. 3.2 vyplněna šedou barvou.



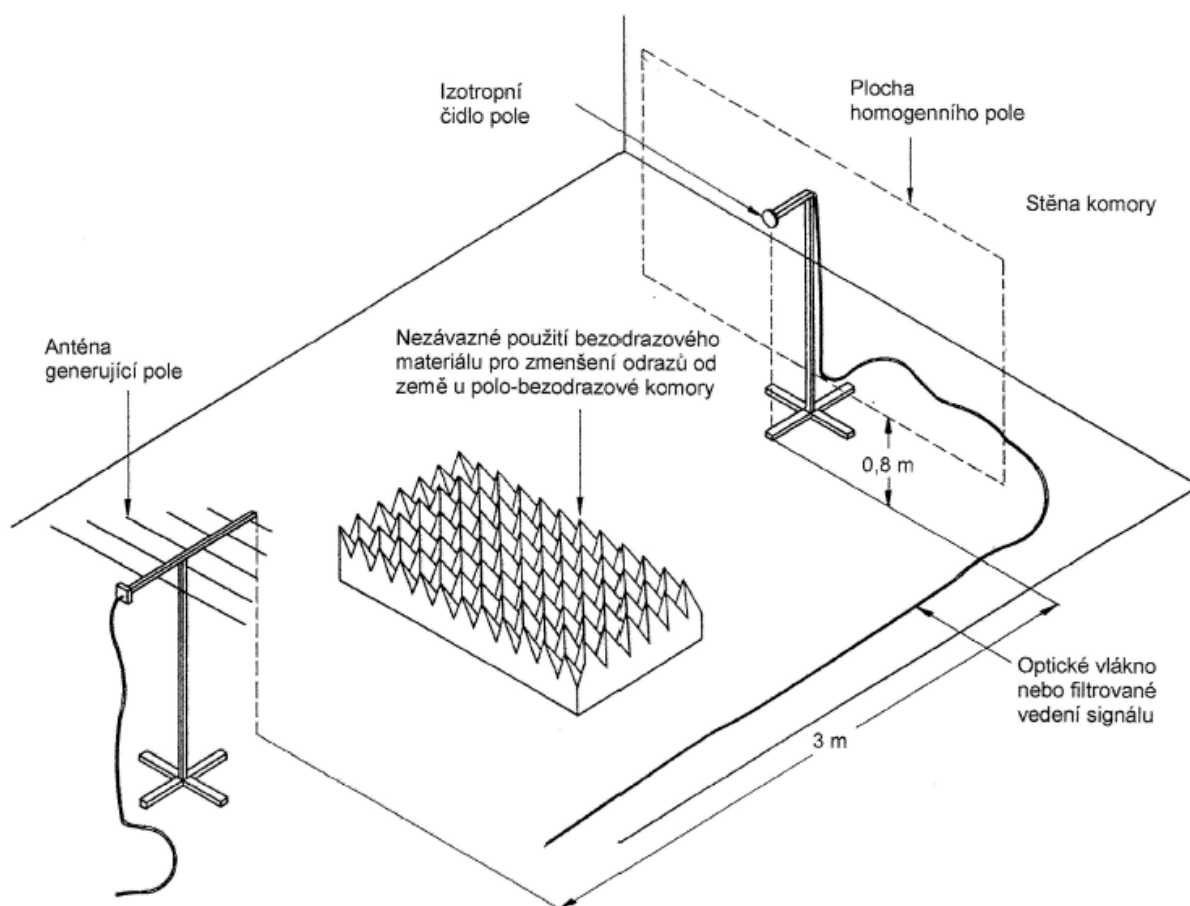
Obr. 3.2 – Zkušební pracoviště pro provádění zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli (obložení stěn a stropu pracoviště absorpčními materiály je pro zjednodušení vynecháno), převzato z [1].

3.4 Kalibrace měřicího pole

Kalibrace pole ve zkušebním pracovišti se provádí z důvodu zajištění dostatečné uniformity (neboli homogenity) měřicího pole, tj. jde o zajištění přijatelně malých rozdílů intenzit elektrického pole v jednotlivých bodech prostoru komory. Tímto způsobem se pak při provádění zkoušek odolnosti získají reprodukovatelná naměřená data. Norma IEC 61000-4-3 využívá plochu homogenního pole znázorněnou na obr. 3.3 (podrobněji pak obr. 3.4), kde je tato plocha reprezentována imaginární vertikální plochou, v jejíchž stanovených bodech nabývá odchylka uniformity měřicího pole takových hodnot, které lze akceptovat. Jinými slovy odchylky pole spadají do normou požadované tolerance. Při provádění kalibrace zkušebního pole uvnitř kalibrované měřicí komory se potom ověřuje, zdali je měřicí anténa schopna vytvořit tuto požadovanou imaginární plochu. Zároveň se zaznamenávají data potřebná ke správnému uspořádání hodnot intenzity elektrického pole při realizaci zkoušky odolnosti. Kalibrace měřicího pole pak umožňuje z hlediska homogenity zkušebního pole testovat

taková zařízení, jejichž vnější rozměry společně s přídatnými kabely plně spadají do plochy uniformního pole.

Jak je patrné z obr. 3.3, kalibrace v měřicí komoře se provádí bez přítomnosti zkoušeného zařízení. Během provádění této kalibrace se stanovuje závislost mezi vstupním výkonem do antény a hodnotou intenzity elektrického pole uvnitř plochy uniformního pole. Při provádění dané zkoušky se pak určí potřebný vstupní anténní výkon potřebný pro vytvoření požadované hodnoty elektrické intenzity na ploše uniformního pole. Pro dodržení platnosti provedené kalibrace měřicího pole je nezbytné, aby při dané zkoušce odolnosti všechna zařízení a ostatní prvky v komoře byly uspořádány tak, jak tomu bylo při provádění této kalibrace. To znamená, že po provedené kalibraci se před odebráním měřicích prvků ze svého postavení v komoře musí zdokumentovat poloha a orientace těchto zařízení. Toto je nutné provést pečlivým způsobem tak, aby nemohlo dojít ani k menší změně polohy měřicích zařízení a kabelů uvnitř komory. V opačném případě by pak hrozilo získání nesprávných naměřených výsledků a kalibraci by bylo nutné zopakovat.



Obr. 3.3 Kalibrace měřicího pole na zkušebním pracovišti (obložení stěn a stropu pracoviště absorpčními materiály je pro zjednodušení vynecháno), převzato z [4].

Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 stanovuje nutnost provádění kalibrace pole v měřicí komoře každých 12 měsíců a také v případě, kdy došlo ke změně uspořádání plochy, kde se umísťuje zařízení, absorpčních materiálů v komoře či jiných prvků umístěných uvnitř komory, jejichž poloha je směrodatná pro správné provedení zkoušky odolnosti. Zároveň je nutno prakticky verifikovat správnost provedené kalibrace před každou skupinou zkoušek odolnosti.

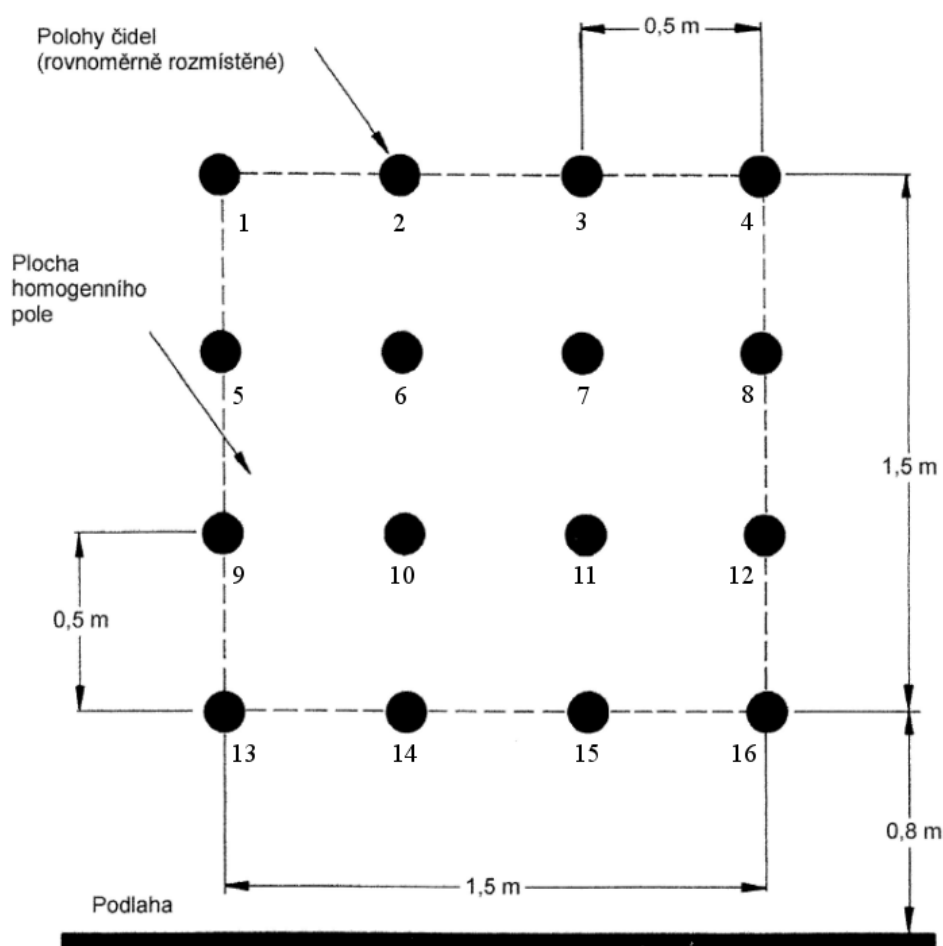
Umístění měřicí antény je nutné provést tak, aby celá imaginární plocha uniformního pole byla uvnitř pole vyzařovaného anténou, tj. vyzařovací úhel antény může omezit minimální akceptovatelnou vzdálenost mezi anténou a testovaným zařízením (resp. plochou uniformního pole). Uvedená norma doporučuje hodnotu této vzdálenosti 3 m, kdy se začátek vzdálenosti měří od středu bikónické antény, předního konce logaritmicke-periodické antény nebo od přední hrany trychtýřové antény či antény s dvojitým vlnovodem. Zároveň čidlo pole se musí nacházet nejbližší 1 m od antény.

Uvedenou normou je stanovena minimální velikost plochy uniformního pole na rozměr ve tvaru čtverce o straně 0,5 m, přičemž pokud je zkoušené zařízení rozměrnější a není možné, aby byl celý jeho vnější okraj vystaven ploše uniformního pole, musí mít tato plocha rozměry minimálně 1,5 x 1,5 m, a to ve vzdálenosti 0,8 m nad podlahou měřicí komory.

Intenzita zkušebního pole se rovněž kromě plochy uniformního pole měří také ve výšce 0,4 m nad podlahou měřicí komory, a to z důvodu kontroly, zdali je daná zkouška pro testovaná zařízení a kabeláže dostatečně přísná. Kabeláž je dle normy doporučeno testovat co nejbližší u podlahy, která tvoří referenční zemní rovinu. Naměřená data ve výšce 0,4 m se tedy zaznamenávají, ale nejsou nikterak směrodatná pro kalibrační údaje a posuzování z hlediska vlastností zkušebny.

Vlastnosti částečně bezodrazové měřicí komory mohou komplikovat vytvoření plochy uniformního pole, a to z důvodu existence odrazů elektromagnetických vln od podlahy. Proto se na tuto podlahu umísťuje přídatný absorpční materiál, který se snaží tyto nedostatky měřicí komory eliminovat. Toto je patrné z obr. 3.3.

Uniformní zkušební pole představované pomyslnou plochou o rozměrech ve tvaru čtverce o hraně délky 1,5 m je znázorněno na následujícím obr. 3.4. Tato plocha je představována mříží jednotlivých bodů, které jsou od sebe ve vertikálním i horizontálním směru vzdáleny o 0,5 m. Zkušební pole lze prohlásit za uniformní pouze v případě, kdy naměřené hodnoty intenzity pole v 75 % či více bodech pomyslné plochy splňují příslušnou toleranci. To znamená, že pro plochu uniformního pole 1,5 m x 1,5 m obsahující 16 měřicích



Obr. 3.4 Rozměry a tvar pomyslné plochy uniformního pole, převzato z [4].

bodů (viz obr. 3.4), musí nejméně 12 těchto bodů splňovat danou toleranci pole. Tato tolerance je rovna $\pm_6^0 dB$ jmenovité hodnoty. Pro minimální velikost plochy uniformního pole (tj. 0,5 m x 0,5 m) je pak nezbytné, aby veškeré měřicí body této plochy byly v uvedené toleranci. Rovněž měřicí pole zůstává uniformní i v případě, kdy společně se změnami frekvence se mění také měřicí body, které jsou právě v toleranci, avšak za stavu, kdy je na všech frekvencích splněna uvedená tolerance pro 75 % měřicích bodů pro jinou než minimální plochu uniformního pole či všech měřicích bodů pro minimální tuto plochu. Uvedená tolerance označená jako $\pm_6^0 dB$ zaručuje, že intenzita zkušebního pole nebude nižší než jmenovitá hodnota.

Při frekvencích větších než 1 GHz uvedená norma dovoluje širší toleranci od 0 dB až do +10 dB. Toto se však musí zahrnout v protokolu zkoušky. Pokud nastane konflikt použitých tolerancí, tolerance $\pm_6^0 dB$ je dle zmíněné normy preferována.

Jestliže je z hlediska rozměrů zkoušeného zařízení vyžadována větší plocha homogenního pole než je 1,5 m x 1,5 m a tuto plochu je nemožné prakticky sestavit, je možná

alternativa v podobě vystavení vnějšku zkoušeného zařízení postupně jednotlivým menším plochám uniformního pole, než je vnější rozměr zkoušeného zařízení. Takto prakticky dochází k částečnému ozařování zkoušeného zařízení, přičemž metody realizace jsou dvojího typu, a to:

- Buďto se posouvá měřicí anténa, čímž se de facto posouvá i plocha uniformního pole a to takovým způsobem, že postupně ozáří celý vnějšek zkoušeného zařízení. Toto zařízení je tedy vystavováno zkušebnímu signálu postupně v několika fázích, kdy v každé fázi se měřicí anténa nachází v jiné své poloze. Zároveň je požadováno, aby pro každou pozici měřicí antény byla provedená úplná její kalibrace.

- Anebo lze měnit polohu zkoušeného zařízení v několika fázích měření takovým způsobem, že vždy v každé fázi je postupně část tohoto zařízení ozařována plochou uniformního pole. Testované zařízení se tedy vždy v každé fázi měření nachází v jiné poloze, a to takové, že přes všechny tyto fáze se ozáří celý jeho vnějšek.

Požadavky na úplné a částečné ozáření udává tab. F1 v příloze F, přičemž pokud z určitého důvodu již nelze plnit od nějaké frekvence nad 1 GHz uvedené v této tab., je možné použít jiný způsob ozáření využívající tzv. „metodu nezávislých oken“. Tato metoda je sepsána v kap. 3.4.3 tohoto dokumentu.

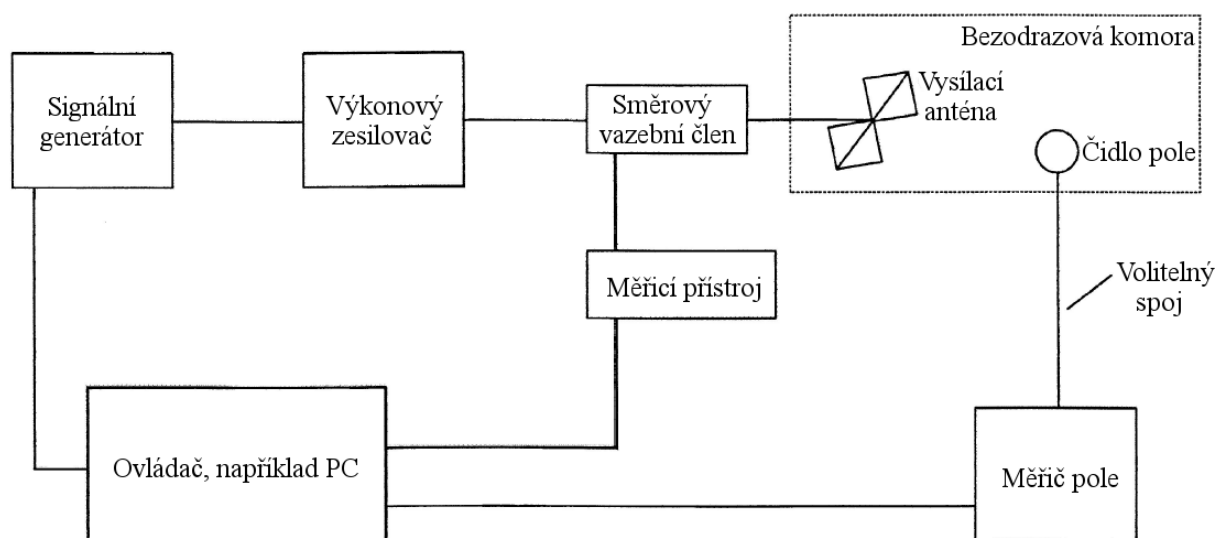
Norma ČSN EN 61000-4-3 ed.3 předepisuje schéma zkušební sestavy, která je nutná pro provádění kalibrace zkušebního pole, dle obr. 3.5. Kalibraci pole je pak zapotřebí provádět pouze s nemodulovanou nosnou vlnou, a to v obou případech lineární polarizace, tj. vertikální i horizontální. Zároveň je nutné zajistit případ, kdy výkonový zesilovač umožní provést modulaci signálu a přitom nevstoupí do stavu saturace. Toto uvedená norma řeší způsobem, kdy navrhuje provádět kalibraci pole s použitím intenzity E_K , která odpovídá 1,8 násobku intenzity E_T , jaká bude ve skutečnosti aplikována na testované zařízení v průběhu zkoušky odolnosti. Maximální použitelnou intenzitu pro zkoušku odolnosti E_T udává rovnice (3.1), v logaritmických hodnotách této intenzity $E_{T,dB}$ pak rovnice (3.2), přičemž zmíněná norma ponechává prostor i pro jinou možnost zamezení vzniku nasycení zesilovače.

$$E_T = \frac{E_K}{1,8} \quad [V/m; V/m] \quad (3.1)$$

$$E_{T,dB} = 20 \cdot \log_{10} \frac{E_K}{1,8} = E_{K,dB} - 5,1 \quad [dBV/m; V/m; dBV/m] \quad (3.2)$$

Kde je: $E_{K,dB}$ – hodnota intenzity pro kalibraci pole v logaritmických jednotkách.

Diskutovaná norma dále uvádí dvě metody, kterými je možné provádět kalibraci měřicího pole. Tyto metody, demonstrovány na ploše uniformního pole 1,5 m x 1,5 m, jsou popsány v následujících kap. 3.4.1 a 3.4.2.



Obr. 3.5 Měřicí sestava pro provádění kalibrace pole, přičemž existuje možnost náhrady směrového vazebního členu a měřiče výkonu detektorem propustného výkonu nebo monitorem vloženým mezi zesilovač a anténu, převzato z [4].

3.4.1 Kalibrace měřicího pole metodou konstantní intenzity pole

Popis této metody je relativně jednoduchý, jde zde o vytvoření konstantní intenzity elektrického pole v každém měřicím bodě plochy uniformního pole (v případě rozměrů této plochy 1,5 m x 1,5 m jde o 16 měřicích bodů – viz obr. 3.4). Toto se děje při všech měřicích kmitočtech za současného nastavení vhodné hodnoty vstupního výkonu do měřicí antény a aplikování vhodného kroku.

Jedná se tedy o vytvoření dané požadované intenzity v prostoru měřicí komory, tj. v ploše uniformního pole, a to za současného zdokumentování takové velikosti vstupního výkonu do vysílací antény, který je pro vytvoření této intenzity pole vyžadován. Při tomto měření se vychází z obr. 3.5.

Postup realizace této kalibrace, který se provádí pro horizontální i vertikální polarizaci měřicí antény na všech měřicích frekvencích, je následující:

- 1) Nejprve se měřicí čidlo vloží do jedné z 16 poloh měřicího pole (pro plochu uniformního pole 1,5 m x 1,5 m) a zvolí se nejmenší měřicí frekvence.
- 2) Na základě vytvoření požadované velikosti intenzity E_K v ploše uniformního pole se zvolí patřičný vstupní výkon do měřicí antény. Důležité je, aby zvolená velikost vstupního výkonu do antény byla patřičně zdokumentována.

- 3) Měřicí frekvence je zvýšena, a to nejvýše o 1 % skutečné frekvence.
- 4) Dále je nutné znovu opakovaně provádět body 2) a 3), a to až do stavu, kdy je měřicí frekvence nejvyšší z celého frekvenčního rozsahu, pak je realizován pouze bod 2) a frekvence se již dále nezvyšuje.
- 5) Nyní je nutno provádět uvedené body 1) až 4) pro každou polohu čidla, tj. v uvedeném případě plochy uniformního pole 1,5 m x 1,5 m jde o dalších 15 poloh (jedna poloha již byla odměřena).

Na každé měřicí frekvenci je nutno uskutečnit tyto následující body:

- 6) Seřadí se od nejnižší po nejvyšší hodnotu všech 16 naměřených hodnot vstupního výkonu do antény.
- 7) Postupně od nejvyšší (referenční) hodnoty tohoto výkonu se zkoumá, zdali alespoň 11 měřicích bodů se nachází v přípustné toleranci -6 dB až 0 dB od této nejvyšší hodnoty.
- 8) Pokud tolerance v bodě 7) není patřičně splněna, pokračuje se dále zvolením druhé nejvyšší hodnoty vstupního výkonu do antény a bod 7) se opakuje. Pokud opět není splněna tolerance, zvolí se třetí nejvyšší hodnota atd. Jelikož v uvedeném případě pouze 4 měřicí body z celkových 16 mohou nevyhovovat toleranci, je pouze 5 těchto postupů volby nejvyšší hodnoty výkonu pro každou frekvenci.
- 9) Jestliže je tolerance dle bodu 7) patřičně splněna, bod 8) se přeskočí a zdokumentuje se nejvyšší vstupní výkon do antény P_{max} .
- 10) Dále je nutno ověřit, zdali měřicí systém nebyl ve stavu saturace (např. zesilovač výkonu). Při uvážení, že intenzita pro provádění kalibrace je 1,8 násobkem intenzity pro zkoušku odolnosti, lze pro každou měřicí frekvenci použít tento postup:
 - 10 a) Úroveň generátoru nutná pro vytvoření výkonu P_{max} (viz bod 9) se zmenší o $5,1 \text{ dB}$ (tato hodnota vyplývá z rovnice 3.2).
 - 10 b) Zdokumentuje se nová hodnota vstupního výkonu do antény P_{Nmax} .
 - 10 c) Odečte se výkon P_{Nmax} od hodnoty výkonu P_{max} a pokud je výsledek větší než $3,1 \text{ dB}$, tak výkonový zesilovač není ve stavu saturace. Pokud výsledná hodnota není v rozmezí $3,1$ až $5,1 \text{ dB}$, pak je zesilovač pro zkoušku odolnosti nevyhovující.

Pro úplné porozumění metody kalibrace konstantní intenzity pole je dále uveden příklad vyhodnocení naměřených dat s použitím právě této metody, kde je plocha uniformního pole 1,5 m x 1,5 m.

Předpokládejme, že byla naměřena na jedné určité frekvenci následující data uvedená v tab. 3.2, přičemž hodnota konstantní intenzity vytvořená v měřicí komoře byla rovna $6 V/m$.

Poloha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Propustný výkon [dBm]	27	22	37	33	31	29	23	27	28	30	30	31	40	30	31	31

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty propustného výkonu kalibrační metodou konstantní intenzity pole, převzato z [4].

Jak již bylo uvedeno v bodu 6 popisu kalibrace této metody, nejprve jsou naměřená data v tab. 3.2 seřazena od nejmenšího výkonu po největší, čímž vzniká tab. 3.3.

Poloha	2	7	1	8	9	6	10	11	14	5	12	15	16	4	3	13
Propustný výkon [dBm]	22	23	27	27	28	29	30	30	30	31	31	31	31	33	37	40
POZNÁMKA																
Poloha 13: $40 - 6 = 34$, vyhovují jen 2 polohy.																
Poloha 3: $37 - 6 = 31$, vyhovuje jen 6 poloh.																
Poloha 4: $33 - 6 = 27$, vyhovuje 12 poloh.																

Tab. 3.3 Naměřené hodnoty propustného výkonu kalibrační metodou konstantní intenzity pole seřazené vzestupně, převzato z [4].

Dále se provádí bod 7 popisu kalibrace, tj. zkoumá se, jestli nejméně 11 měřicích bodů je v přípustné toleranci $-6 dB$ až $0 dB$ od zvolené referenční hodnoty, přičemž tato referenční hodnota se volí postupně od nejvyššího výkonu po nejnižší (tj. v tab. 3.3 se začíná vpravo). V tab. 3.3 v poznámce je dokumentováno, že uvedená tolerance je splněna až v měřicí poloze 4, proto je potřeba vytvořit propustný výkon $33 dBm$, který bude odpovídat intenzitě pole $6 V/m$ v poloze 4 a intenzitám $12 V/m$ v polohách 1 a 8 v měřicí komoře. Měřicí polohy nesplňující uvedenou toleranci jsou 13, 3, 7 a 2.

3.4.2 Kalibrace měřicího pole metodou konstantního výkonu

Stejně jako v předešlé metodě, tak i zde je nezbytné generovat intenzitu uniformního pole a zaznamenávat ji v každém měřicím bodě postupně od 1. až po 16., a to na všech měřicích frekvencích. Rovněž je nezbytné nastavovat odpovídající vstupní výkon do antény během provádění kalibrace.

Z hlediska vytvoření požadované intenzity pole je nezbytné zdokumentovat vstupní výkon do měřicí antény, který se následně použije pro každý z 16 měřicích bodů. Hodnota vstupního výkonu se tedy pro každý měřicí bod nemění, přičemž je rovněž nutné zaznamenat hodnoty intenzit pole vytvořených ve všech jednotlivých měřicích bodech.

Postup kalibrace metodou konstantního výkonu, který se provádí pro vertikální i horizontální polarizaci měřicí antény, je následující:

- 1) Nejprve se měřicí čidlo vloží do jedné z 16 poloh měřicího pole (pro plochu uniformního pole 1,5 m x 1,5 m) a zvolí se nejmenší měřicí frekvence.
- 2) Na základě vytvoření požadované velikosti intenzity E_K v ploše uniformního pole se zvolí patřičný vstupní výkon do měřicí antény (s ohledem na budoucí modulaci zkušebního pole). Hodnoty naměřené intenzity pole a vstupního výkonu do antény se zapíší.
- 3) Měřicí frekvence je zvýšena, a to nejvýše o 1 % skutečné frekvence.
- 4) Dále je nutné znovu opakovaně provádět body 2) a 3), a to až do stavu, kdy je měřicí frekvence nejvyšší z celého frekvenčního rozsahu, pak je realizován pouze bod 2) a frekvence se již dále nezvyšuje.
- 5) Měřicí čidlo se vloží do další polohy v mříži (viz obr. 3.4). Pro každou frekvenci aplikovanou v bodech 1) až 4) se použije stejný vstupní výkon do antény, který byl zachycen v bodě 2) této odpovídající frekvence. A zároveň se zdokumentuje velikost generované intenzity pole při tomto výkonu.
- 6) Nyní je nutno provádět uvedené body 1) až 4) pro každou polohu čidla, tj. v uvedeném případě plochy uniformního pole 1,5 m x 1,5 m jde o dalších 15 poloh (jedna poloha již byla odměřena).

Na každé měřicí frekvenci je nutno uskutečnit tyto následující body:

- 7) Seřadí se od nejnižší po nejvyšší hodnotu všech 16 naměřených hodnot vstupního výkonu do antény.
- 8) Postupně od nejnižší (referenční) hodnoty tohoto výkonu se zkoumá, zdali alespoň 11 měřicích bodů se nachází v přípustné toleranci 0 dB až +6 dB od této nejnižší hodnoty.
- 9) Pokud tolerance v bodě 8) není patřičně splněna, pokračuje se dále zvolením druhé nejnižší hodnoty vstupního výkonu do antény a bod 8) se opakuje. Pokud opět není splněna tolerance, zvolí se třetí nejnižší hodnota atd. Jelikož v uvedeném případě pouze 4

měřicí body z celkových 16 mohou nevyhovovat toleranci, je pouze 5 těchto postupů volby nejnižší hodnoty výkonu pro každou frekvenci.

- 10) Jestliže je tolerance dle bodu 8) patřičně splněna, bod 9) se přeskočí a z těchto získaných poloh měřicích bodů se odebere poloha, kde byla stanovena nejnižší hodnota jako referenční.
- 11) Početně se určí vstupní výkon do antény P_{max} , který je nutný pro vytvoření požadované intenzity pole v referenční poloze měřicího čidla.
- 12) Dále je nutno ověřit, zdali měřicí systém nebyl ve stavu saturace (např. zesilovač výkonu). Při uvážení, že intenzita pro provádění kalibrace je 1,8 násobkem intenzity pro zkoušku odolnosti, lze pro každou měřicí frekvenci použít tento postup:
 - 12 a) Úroveň generátoru nutná pro vytvoření výkonu P_{max} (viz bod 11) se zmenší o 5,1 dB (tato hodnota vyplývá z rovnice 3.2).
 - 12 b) Zdokumentuje se nová hodnota vstupního výkonu do antény P_{Nmax} .
 - 12 c) Odečte se výkon P_{Nmax} od hodnoty výkonu P_{max} a pokud je výsledek větší než 3,1 dB, tak výkonový zesilovač není ve stavu saturace. Pokud tato výsledná hodnota není v rozmezí 3,1 až 5,1 dB, pak je zesilovač pro zkoušku nevyhovující.

Příklad vyhodnocení naměřených dat dle metody konstantní intenzity pole s plochou uniformního pole 1,5 m x 1,5 m je následující:

Opět budeme předpokládat, že byla naměřena data při kalibraci metodou konstantního výkonu znázorněná v tab. 3.4. Jak už název metody říká, měření probíhalo za konstantního propustného výkonu 27 dBm, přičemž bod 1 byl stanoven jako referenční, tj. byla v něm vytvořena zadaná intenzita pole 6 V/m. Vzhledem k této referenční hodnotě se dále vypočetly rozdílové hodnoty k dalším měřicím polohám udávané v dB.

Stejně jako v příkladu kalibrace metodou konstantní intenzity pole se i zde nejprve seřadí naměřené hodnoty, avšak podle intenzity pole od nejnižší po nejvyšší (viz bod 7 popisu kalibrace). Tento fakt v sobě zohledňuje tab. 3.5.

Dále jak již bylo zmíněno v bodě 8 popisu této kalibrační metody, posuzuje se, zda alespoň 11 hodnot se od zvolené referenční polohy nachází uvnitř tolerance 0 dB až +6 dB. Pokud ano, vyhodnocování je u konce a pokud ne, zvolí se nová referenční poloha a uvedená tolerance se řeší znovu. S volbou referenční hodnoty se začíná u nejnižší hodnoty intenzity (tj. v tab. 3.5 vlevo). Jak už vypovídá poznámka v tab. 3.5, zmíněná tolerance je splněna až v poloze 4, kdy je tedy alespoň 12 poloh uvnitř tolerance a nevyhovují polohy 7, 2, 13 a 3.

Poloha	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Propustný výkon [dBm]	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Intenzita pole [V/m]	6,0	10,7	1,9	3,0	3,8	4,8	9,5	6,0	5,3	4,2	4,2	3,8	1,3	4,2	3,8	3,8
Intenzita pole (dB relativně k poloze 1)	0	5	-10	-6	-4	-2	4	0	-1	-1	-3	-4	-13	-3	-4	-4

Tab. 3.4 Naměřené hodnoty intenzity pole kalibrační metodou konstantního výkonu, převzato z [4].

Poloha	13	3	4	5	12	15	16	10	11	14	6	9	1	8	7	2
Propustný výkon [dBm]	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Intenzita pole [V/m]	1,3	1,9	3,0	3,8	3,8	3,8	3,8	4,2	4,2	4,2	4,8	5,3	6,0	6,0	9,5	10,7
Intenzita pole (dB relativně k poloze 1)	-13	-10	-6	-4	-4	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	0	4	5

POZNÁMKA

Poloha 13: $-13 + 6 = -7$, vyhovují jen 2 polohy.

Poloha 3: $-10 + 6 = -4$, vyhovuje jen 6 poloh.

Poloha 4: $-6 + 6 = 0$, vyhovuje 12 poloh.

Tab. 3.5 Naměřené hodnoty intenzity pole kalibrační metodou konstantního výkonu seřazené vzestupně, převzato z [4].

V poloze 4 je tedy zapotřebí vytvořit zadanou intenzitu 6 V/m , což znamená, že v referenční poloze 1 bude zapotřebí vytvořit dvojnásobnou intenzitu 12 V/m , čemuž odpovídá přírůstek o 6 dB vzhledem k poloze 4. Protože v bodě 4 je výkon roven 27 dBm , v referenčním bodě 1 je potřeba aplikovat výkon $27 \text{ dBm} + 6 \text{ dB} = 33 \text{ dBm}$. Celkový výkon, který je nutno aplikovat, je tedy 33 dBm .

3.4.3 Další metoda částečného ozáření nazývaná „metodou nezávislých oken“

Pokud z nějakého důvodu, kterým může být např. úzký vyzařovací lalok antény, není v rámci možností vytvořit požadovanou plochu uniformního pole pro dané zkoušené zařízení

na frekvenci vyšší než 1 GHz, norma ČSN EN 61000-4-3 ed.3 pak stanovuje jako výchozí řešení použití tzv. „metody nezávislých oken“. Princip této metody spočívá v tom, že se daná mříž uniformního pole (např. velikosti 1,5 m x 1,5 m) rozseká na jednotlivá dílčí okna velikosti 0,5 m x 0,5 m, která budou kalibrována každé separátně, a měřicí anténa bude postupně vytvářet uniformní pole vždy v každém dílčím okně. Jinými slovy tyto dílčí okna budou ozařovány jedno po druhém v řadě za sebou, jak naznačuje obr. 3.6, přičemž nemusí být nutné kalibrovat všechna dílčí okna, ale pouze ta, ve kterých se nachází dané zkoušené zařízení (viz obr. 3.7). Již zmíněná norma uvádí pro frekvenci vyšší než 1GHz zkušební vzdálenost, tj. vzdálenost mezi anténou a imaginární plochou kalibrace (resp. zkoušeným zařízením), rovnou 1 m a zároveň se pochopitelně v této vzdálenosti musí ověřit uniformita měřicího pole před prováděním zkoušky odolnosti.

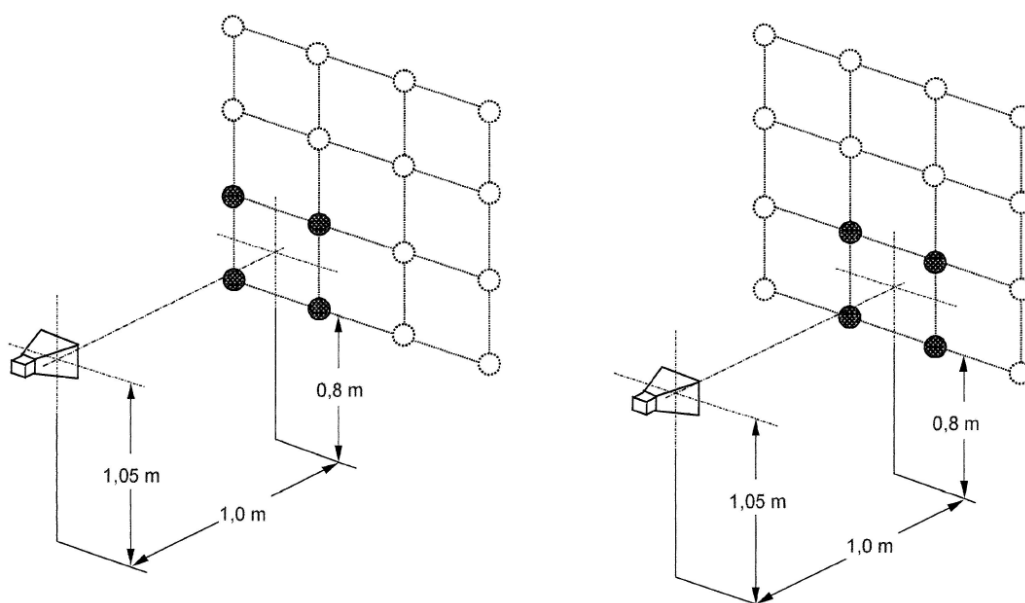
Diskutovaná norma prezentuje následující způsob kalibrace, který se uskutečňuje v jednotlivých dílčích oknech celé plochy uniformního pole tak, že dochází ke kalibraci všech dílčích oken uniformního pole na sobě nezávisle:

- 1) Nejprve se umístí sonda do zvolené měřicí polohy, přičemž existují 4 možné polohy (jedná se o plochu uniformního pole 0,5 m x 0,5 m, tj. 4 měřicí body – viz obr. 3.6).
- 2) Zvolí se taková hodnota vstupního výkonu do antény, aby anténou generovaná intenzita pole byla v rozsahu od 3 V/m do 10 V/m, a to v krocích frekvence rovných 1% od vždy předcházející frekvence (na počátku jde o nejnižší frekvenci měřicího rozsahu). Důležité je dokumentovat jak hodnotu anténního výkonu, tak velikost intenzity pole v komoře.
- 3) Zaznamenaný anténní výkon v bodě 2 se spustí na všechny tři zbývající měřicí polohy, přičemž intenzita generovaná v těchto bodech se musí nacházet v toleranci 0 dB až 6 dB od první měřicí polohy.
- 4) Poloha sondy, v které byla naměřena nejmenší intenzita pole, se prohlásí za referenční (důvodem je jistota splnění požadavku tolerance $\pm_6^0 dB$)
- 5) Proveďte se a uchová se výpočet příslušného vstupního anténního výkonu potřebného k vytvoření požadované intenzity. Toto se děje za skutečnosti, že je již známý výkon a jemu odpovídající intenzita pole.
- 6) Uvedené body postupu kalibrace od 1) do 5) je nutné provádět pro obě lineární polarizace (tj. vertikální i horizontální).

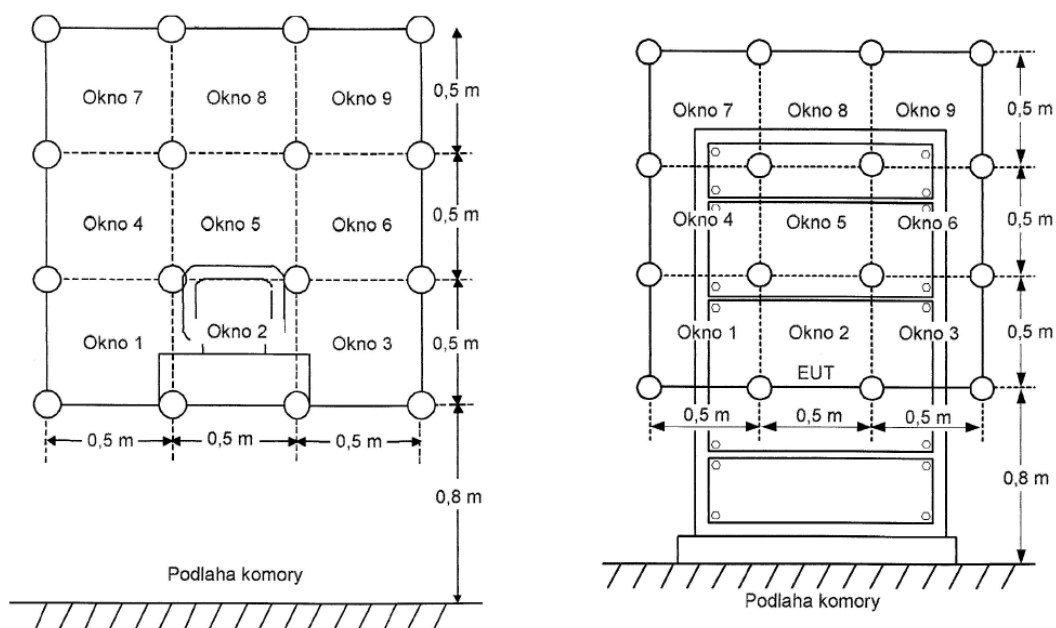
Podstatné je, aby se totožné vodiče použité při kalibraci použily také při dané zkoušce, což zaručuje, že jejich ztrátové parametry nemusí být brány v potaz. Jak už bylo řečeno,

tak i zde je důležité zdokumentovat umístění měřicích antén a vodičů, a to z důvodu, aby bylo možné je opět poskládat do poloh, v kterých byly situovány během kalibrace.

Výkon vypočtený v bodě 5) postupu kalibrace je nutno použít při každé měřicí frekvenci. Jakmile se tato kalibrace dokončí, je nezbytné ji zopakovat pro další dílčí okna uniformního pole, dokud nebudou všechna pro zkoušku požadovaná okna kalibrována. Na toto poukazuje obr. 3.6.



Obr. 3.6 Příklad postupného ozařování jednotlivých dílčích oken, převzato z [4].



Obr. 3.7 Příklad koncepce dílčích oken pro zkoušené zařízení umístěné na stole (obr. vlevo) a stojící na podlaze (obr. vpravo), převzato z [4]

Jak je patrné u příkladu zařízení stojící na stole (obr. 3.7 vlevo), tak v tomto případě vzhledem k velikosti testovaného zařízení (EUT) postačí kalibrovat pouze dílčí okna č. 1, 2, 3 a 5, zatímco v druhém případě u příkladu zařízení stojící na podlaze (obr. 3.7 vpravo), je nutné kalibrovat všechna dílčí okna, tj. okna od č. 1 až do č. 9.

3.5 Kalibrace měřicí sondy elektrického pole

Změna A1 normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 se věnuje způsobu kalibrace měřicí sondy elektrického pole, která slouží pro zjištění míry kvality dané sondy a omezení nejistoty při provádění zkoušky odolnosti. Pro provedení kalibrace měřicího pole ať už metodou konstantní intenzity či konstantního výkonu je nutné použít měřicí sondu, která musí být předtím řádně kalibrována. Uvedená změna normy zcela pochopitelně stanovuje provádění kalibrace měřicí sondy na takových frekvencích a dynamických rozsazích, jaké budou použity při měření uniformity pole v dané komoře. Změna A1 se zabývá rovněž schválením a potvrzením vhodného měřicího prostranství pro provedení kalibrace měřicí sondy, jelikož i prostranství, v kterém je sonda kalibrována, může mít vliv na získané výsledky a v mnoha případech tomu tak je. Tato změna normy uvádí jako vhodnější zkušební komoru pro tuto kalibraci na nižších frekvencích speciální měřicí komoru založenou na principu vlnovodu TEM (viz kap. 2.2.4). Z tohoto důvodu se soustředí spíše na propracování a vylepšení postupu kalibrace sondy pole v bezodrazové komoře s použitím trychtýřové antény.

3.5.1 Požadavky kladené na sondu elektrického pole

Měřicí sonda elektrického pole, která bude sloužit při kalibraci uniformního pole dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (viz kap. 3.4), musí splňovat určité požadavky, a to takové, aby daná sonda byla pro tuto kalibraci vyhovující. Tyto požadavky jsou následující:

- **Frekvenční rozsah**

Konkrétní rozmezí frekvencí pro provedení kalibrace sondy se stanovuje mezi 80 MHz a 6 GHz a zároveň se ponechává možnost změny tohoto frekvenčního rozsahu v závislosti na frekvenčním rozsahu dané zkoušky odolnosti.

- **Frekvenční kroky**

Z důvodu vzájemné komparace naměřených dat z odlišných měřicích komor, kde se provádí kalibrace sondy, je nutné stanovit a respektovat frekvenční kroky, a to dle tab. 3.7.

Jak už napovídá tab. 3.6, při frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 1 GHz se jednotlivé frekvenční kroky liší o nejprve 20 MHz, pak stále o 50 MHz a v případě druhého rozsahu

od 1 GHz do 6 GHz se kmitočtové kroky zvyšují po 200 MHz. Pokud se měří obě pásma, tak frekvence 1 000 MHz se měří pouze jedenkrát.

Frekvenční rozsah	Frekvenční kroky
80 MHz až 1 GHz	80, 100, 150, 200, ..., 950, 1 000 MHz
1 GHz až 6 GHz	1 000, 1 200, 1 400, ..., 5 800, 6 000 MHz

Tab. 3.6 Frekvenční kroky pro dva různé měřicí frekvenční rozsahy, převzato z [5].

- **Intenzita elektrického pole**

Intenzita pole aplikovaná při provádění kalibrace měřicí sondy pochopitelně vychází z intenzity pole určené pro zkoušku odolnosti daného zařízení. Jak již bylo uvedeno, kalibrace měřicího pole se provádí pro intenzitu 1,8 krát větší, než je intenzita aplikovaná při zkoušce odolnosti. Změna A1 normy ČSN EN 61000-4-3 ed.3 proto stanovuje jako vhodnou intenzitu pro kalibraci měřicí sondy dvojnásobek intenzity pole aplikované právě při dané zkoušce odolnosti. Tato intenzita pole pro kalibraci sondy, uvedená v tab. 3.7, se tedy získá jako dvojnásobek intenzity pole pro zkoušku odolnosti, která je popsána v tab. 3.1. Nesmí být opomíjen ani fakt, že jestliže je sonda provozována ve více úrovních rozsazích pole, je vhodné kalibrovat sondu na všech těchto rozsazích, minimálně tedy na nejmenší a největší úrovni pole.

Kalibrační úroveň	Intenzita kalibračního pole [V/m]
1	2
2	6
3	20
4	60
X	Y

Tab. 3.7 Úroveň intenzity pole pro provádění kalibrace měřicí sondy, X a Y je otevřená kalibrační úroveň, která může být libovolná a může být nalezena ve specifikacích výrobku či stanovena zkušební laboratoří, převzato z [5].

Pro postup kalibrování měřicí sondy v bezodrazové komoře již v této práci nezbývá prostor, proto zde tento postup nebude již nadále popisován.

3.6 Sestava zkušebního pracoviště

Norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 pamatuje také na to, že pro dosažení co nejvěrohodnějších výsledků měření odolnosti je nutné, aby se uspořádání testovaného zařízení co nejvíce shodovalo s takovým, v jakém bude toto zařízení v praxi provozováno. Veškeré instalace vodičů musí být provedeny tak, jak výrobce stanovuje. Testované zařízení se rovněž

musí nacházet ve stavu, kdy je opatřeno veškerými kryty a panely tak, jak tomu bude při jeho provozu, pokud se neuvádí jinak.

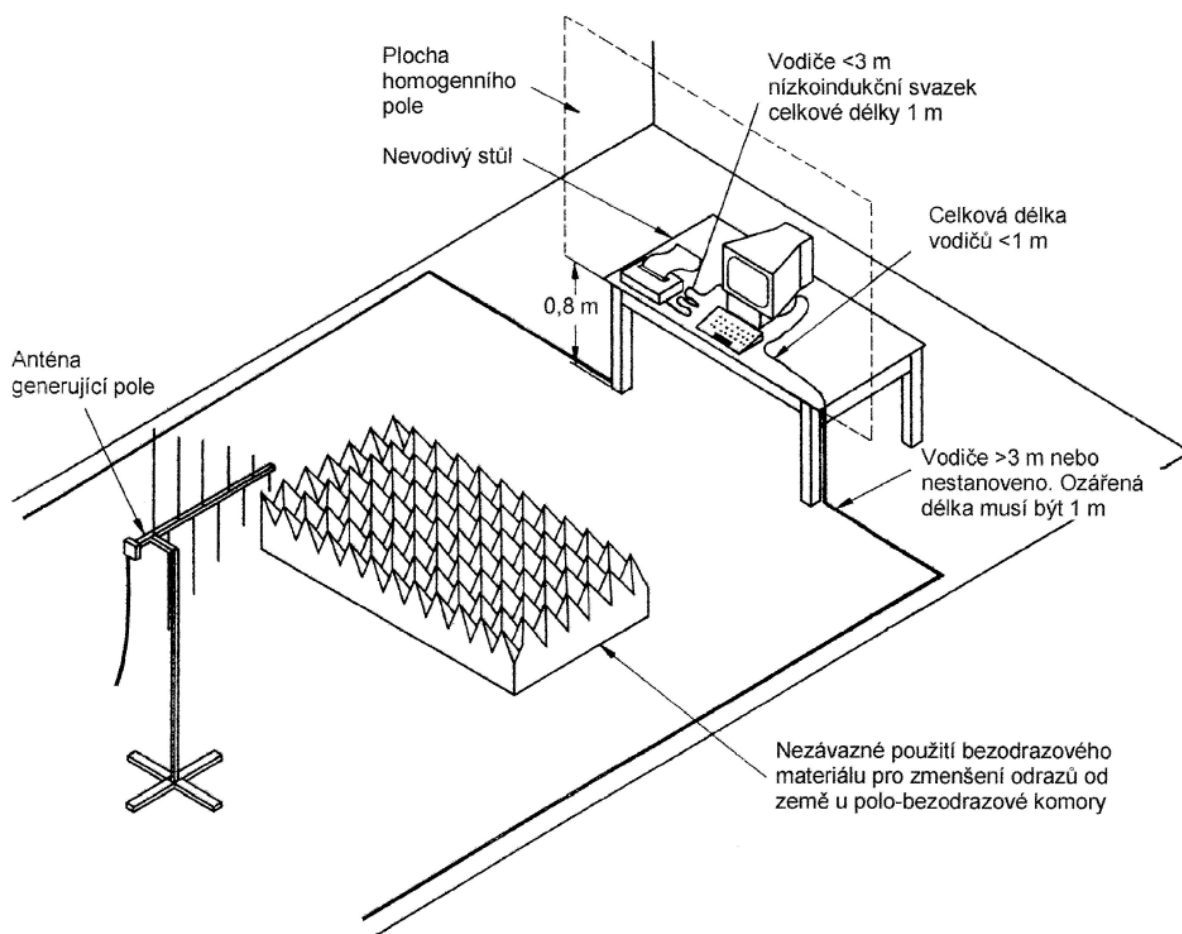
Pokud bude zařízení v provozu určeno k umístění do skříně či panelu nebo podobného prvku, musí se v tomto umístění také zkoušet.

Jestliže je nutné testované zařízení podepřít, pak toto podepření musí být realizováno pomocí nevodivého materiálu. Zároveň však musí být zachováno takové uzemnění zařízení, jaké je doporučeno jeho výrobcem. Zemnicí rovina z kovového materiálu není vyžadována.

Zároveň je důležité, aby testované zařízení složené z více částí, mělo tyto části umístěné tak, aby byla dodržena jejich správná vzájemná pozice.

3.6.1 Uspořádání zařízení umístěného na stole

Sestava zkušebního pracoviště vhodná pro zkoušku zařízení situovaného na stole je ilustrována na následujícím obr. 3.8. Zkoušené zařízení je zde umístěno na stole z nevodivého

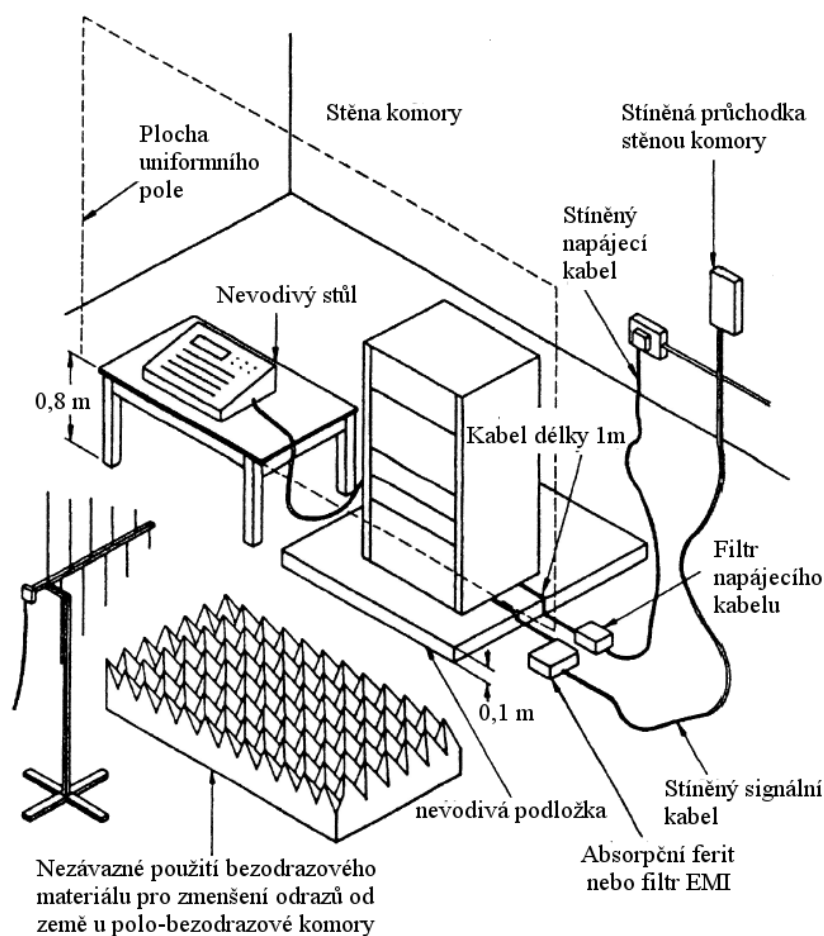


Obr. 3.8 Příklad zkušební sestavy pro zařízení umístěné na stole (obložení stěn a stropu pracoviště absorpčními materiály je pro zjednodušení vynecháno), převzato z [4].

materiálu, který je vysoký 0,8 m. Podle doporučení výrobce jsou následně k testovanému zařízení připojeny patřičné vodiče (signálové, napájecí).

3.6.2 Uspořádání zařízení umístěného na podlaze

Tento případ umístění zařízení ve zkušební komoře je znázorněn na obr. 3.9. Testované zařízení umístěné na podlaze by mělo být podloženo nevodivým materiálem vysokým 5 až 15 cm takovým způsobem, aby se zamezilo náhodnému uzemnění tohoto zařízení, čímž by vznikala degradace elektromagnetického pole. Pro správný účinek tohoto procesu norma ČSN EN 64000-4-3 ed. 3 doporučuje používat takové složení podložky testovaného zařízení, které neobsahuje vodivé materiály. Jinými slovy norma tedy nedoporučuje používat podložku, jejíž vnitřek je navržen z kovového materiálu, který je následně obalen izolačním materiálem. Jestliže testované zařízení určené pro stání na podlaze je takového charakteru, že jeho umístění na podložku vysokou 0,8 m nad podlahou neklade žádná omezení z hlediska váhy či velikosti a proces nadzvednutí zařízení do této výšky není



Obr. 3.9 Příklad zkušební sestavy pro zařízení umístěné na podlaze (obložení stěn a stropu pracoviště absorpčními materiály je pro zjednodušení vynecháno), převzato z [4].

příliš komplikovaný a nebezpečný, je možné toto zařízení na zmíněnou podložku umístit. Avšak pokud tento případ nastane, je nezbytné, aby byl patřičně uveden v protokolu zkoušky.

Po vhodném umístění testovaného zařízení ve zkušební komoře, jsou k němu následně připojeny napájecí a signální vodiče.

3.6.3 Uspořádání kabeláže

Jak již bylo řečeno, veškerá připojení k testovanému zařízení musí být realizována na základě předpisů a specifikací jeho výrobce. Toto se týká také případů volby vhodných typů kabelů a konektorů připojených k zařízení. Jestliže není výrobcem určeno, jaký typ kabelu lze připojit k testovanému zařízení, lze použít paralelní vodiče, které nejsou stíněny.

Pokud výrobce požaduje délku kabelů do 3 m včetně, potom se tomuto požadavku musí vyhovět. Pokud délka kabelů není výrobcem patřičně specifikována, nebo je specifikována delší než 3 m, pak se vychází z praktických zkušeností při instalaci daného typu zařízení. Instalace kabelů se realizuje takovým způsobem, že elektromagnetické pole působí nejméně na 1 m kabelu. Jestliže jsou kabely delší, je nutné zajistit jejich svázání zhruba v jejich středu za cílem minimalizace indukčnosti tak, aby výsledný svazek byl 30 až 40 cm dlouhý.

3.6.4 Uspořádání zařízení určeného k upevnění na lidském těle

Tímto typem zařízení se rozumí takové zařízení, které bude provozováno těsně u lidského těla (např. ruční měřicí přístroje, implantáty atd.). Tato zařízení mohou být zkoušena jako zařízení umístěná na stole (viz obr. 3.8). Tento typ zkoušky však může způsobit neoptimální přesnost zkoušky, jelikož nejsou uvažovány vlastnosti a charakteristiky lidského těla. Proto by měl být simulátor lidského těla z hlediska jeho dielektrických vlastností a charakteristik patřičně popsán komisemi výrobku.

3.7 Postup zkoušky

Zkouška odolnosti se skládá z těchto 4 částí:

- *Verifikace laboratorních referenčních podmínek*
- *Verifikace správné funkce zařízení před zkouškou*
- *Realizace zkoušky*
- *Vyhodnocení naměřených výsledků*

3.7.1 Laboratorní referenční podmínky

Pro zamezení vlivu vnějších podmínek na výsledky získané při zkoušce odolnosti je nezbytné, aby klimatické i elektromagnetické podmínky laboratoře, kde se provádí zkouška, byly podrobně specifikovány a dodrženy v přípustných mezích. Tyto podmínky jsou popsány takto:

- ***Klimatické laboratorní podmínky***

Jestliže komise výrobku neurčují prostřednictvím kmenových či výrobových norem požadované klimatické podmínky, pak se tyto podmínky musí nezbytně nacházet v takovém rozmezí, které je výrobcem považováno za přijatelné, a to pro činnost jak testovaného zařízení, tak také měřicích zařízení uvnitř zkušebního pracoviště. Výběr přesných klimatických podmínek z uvedeného rozsahu je prakticky libovolný.

Je však zakázáno provádět zkoušku odolnosti při takové velikosti relativní vlhkosti, kdy dochází ke kondenzaci na testovaném či měřicím zařízení.

- ***Elektromagnetické laboratorní podmínky***

Tyto podmínky nesmí nijak ovlivňovat správnou funkci testovaného zařízení, společně s naměřenými výsledky zkoušky odolnosti.

3.7.2 Realizace zkoušky

Je nezbytné, aby se při realizaci zkoušky odolnosti respektovaly aspekty udávané plánem zkoušky, který rovněž musí nezbytně obsahovat verifikaci správné funkce testovaného zařízení dle technické specifikace. Obsah plánu zkoušky je uveden v následující tab. 3.8.

Během zkoušky je důležité, aby testované zařízení bylo vystaveno normálním provozním podmínkám.

Ještě než se přistoupí ke zkoušení intenzity kalibrovaného pole, musí se verifikovat správná funkce měřicího zařízení, jakým je zkušební pracoviště vybavené.

Následně se provede kalibrace zkušebního pole (viz kap. 3.4) a na základě hodnot získaných z této kalibrace dochází ke generaci pole.

Velikost testovaného zařízení.
Reprezentativní provozní podmínky testovaného zařízení.
Zda testované zařízení se musí zkoušet na stole nebo stojící na podlaze nebo v kombinaci obojího.
U zařízení stojícího na podlaze výška podpěry.
Typ použitého zkušebního technického vybavení a poloha vyzařujících antén.
Typy použitých antén.
Rozsahy kmitočtu, prodleva a kmitočtové kroky.
Velikost a tvar plochy homogenního pole.
Zda je použito jakékoliv částečné ozáření.
Zkušební úroveň, která má být použita.
Typy a počty použitých propojovacích vodičů a propojovacích rozhraní (na testované zařízení), ke kterým jsou tyto vodiče připojeny.
Funkční kritéria, která jsou přípustná.
Popis metod vyšetřování funkce testovaného zařízení.

Tab. 3.8 Plán zkoušky, převzato z [4].

Nejprve se první vnější část testovaného zařízení položí do pomyslné kalibrační roviny pole tak, aby ozařovaný vnějšík testovaného zařízení byl celý uvnitř plochy homogenního pole (rozměry viz obr. 3.4), a to za předpokladu, že nedochází k částečnému ozařování.

Rozsahy požadovaných frekvencí jsou rozmítány signálem, který je modulován (dle kap. 3.1), přičemž v přestávkách rozmítání se nastavuje požadovaná úroveň vysokofrekvenčního signálu. V případě, že je rozmítání realizováno s přírůstkem, pak velikost tohoto přírůstku nesmí být větší než 1 % předchozí hodnoty frekvence.

Je nutné, aby jednotlivé časové prodlevy amplitudově modulovaného signálu nosné byly dostatečně dlouhé na dobu potřebnou pro vyšetření testovaného zařízení a jeho reakce. Nejnižší možná doba této prodlevy je pak 0,5 s. Výrobní normy pak vyžadují přesnější analýzu citlivějších frekvencí

Při testování odolnosti musí být vyšetřované zařízení odzkoušeno ve všech svých polohách vůči vysílací anténě, kdy bude jeho každá strana čelit rušivému signálu od této antény. Toto se týká i možné horizontální či vertikální polohy testovaného zařízení. Rovněž zkouška každé strany zařízení musí být realizována jak při vertikální tak také při horizontální polarizaci vysílané antény.

Při zkoušce odolnosti se pečlivě monitoruje stav funkčnosti testovaného zařízení a sledují se všechny jeho významné režimy, které se určí pro tuto zkoušku.

3.8 Vyhodnocení naměřených výsledků

Pro správné vyhodnocení zkoušky odolnosti je nezbytné stanovit, jakým vlivem disponuje rušivý signál generovaný při zkoušce na testované zařízení, tj. jak se mění funkce tohoto zařízení během zkoušky odolnosti. Tím je myšleno, zdali zařízení pracuje standardním správným způsobem či je důsledkem rušivého signálu nějakým způsobem znehodnocena jeho funkce. Pro sjednocení a publikování naměřených výsledků zkoušky se zavádí tzv. funkční kritéria (viz kap. 1.2), kdy se posuzuje právě vliv rušivého signálu na testované zařízení během a po zkoušce odolnosti. Vyhodnocení ztráty funkce zařízení je pochopitelně spojené s definicí této funkce udávané výrobcem a rovněž příslušné vyhodnocení zkoušky vychází z požadavků na funkci zařízení výrobcem, popř. jeho zákazníkem.

3.9 Protokol zkoušky

Protokol zkoušky odolnosti slouží k zaznamenání výsledků a vůbec všeho, co je potřebné pro správné opětovné provedení této zkoušky. Přesný obsah protokolu zkoušky dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 udává následující tab. 3.9, přičemž jak už je v této tabulce znázorněno, protokol zkoušky v sobě zahrnuje rovněž plán zkoušky (viz kap. 3.7.2 v tab. 3.8).

<i>Identifikace testovaného zařízení a jakéhokoliv přidruženého zařízení, např. obchodní značka, typ výrobku, číslo série.</i>
<i>Identifikace zkušebního zařízení, např. obchodní značka, typ výrobku, číslo série.</i>
<i>Jakékoliv zvláštní podmínky prostředí, při kterých byla zkouška provedena, např. stínící kryt.</i>
<i>Jakékoliv specifické podmínky nutné k umožnění provedení zkoušky.</i>
<i>Funkční úroveň definovaná výrobcem, žadatelem o zkoušku nebo zákazníkem kupujícím výrobek.</i>
<i>Funkční kritérium specifikované v kmenové normě, normě výrobku nebo v normě skupiny výrobků.</i>
<i>Jakékoliv účinky na testované zařízení pozorované během nebo po aplikování zkušebního rušení a doba trvání, po kterou tyto účinky setrvají.</i>
<i>Zdůvodnění rozhodnutí zda zařízení při zkoušce obstálo/neobstálo (založené na funkčním kritériu specifikovaném v kmenové normě, normě výrobku nebo v normě skupiny výrobků nebo dohodnutém mezi výrobcem a zákazníkem kupujícím výrobek).</i>
<i>Jakékoliv použité specifické podmínky, například délka nebo typ kabelu, stínění nebo uzemnění nebo provozní podmínky testovaného zařízení, které jsou požadovány k dosažení shody.</i>
<i>Do protokolu zkoušky se musí zahrnout kabeláž, poloha zařízení i jeho orientace, v některých případech může k tomu stačit obrázek.</i>
<i>Body specifikované v plánu zkoušky (viz tab. 3.8).</i>

Tab. 3.9 Protokol zkoušky, převzato z [4].

Tato kapitola čerpá ze zdrojů [4] a [5].

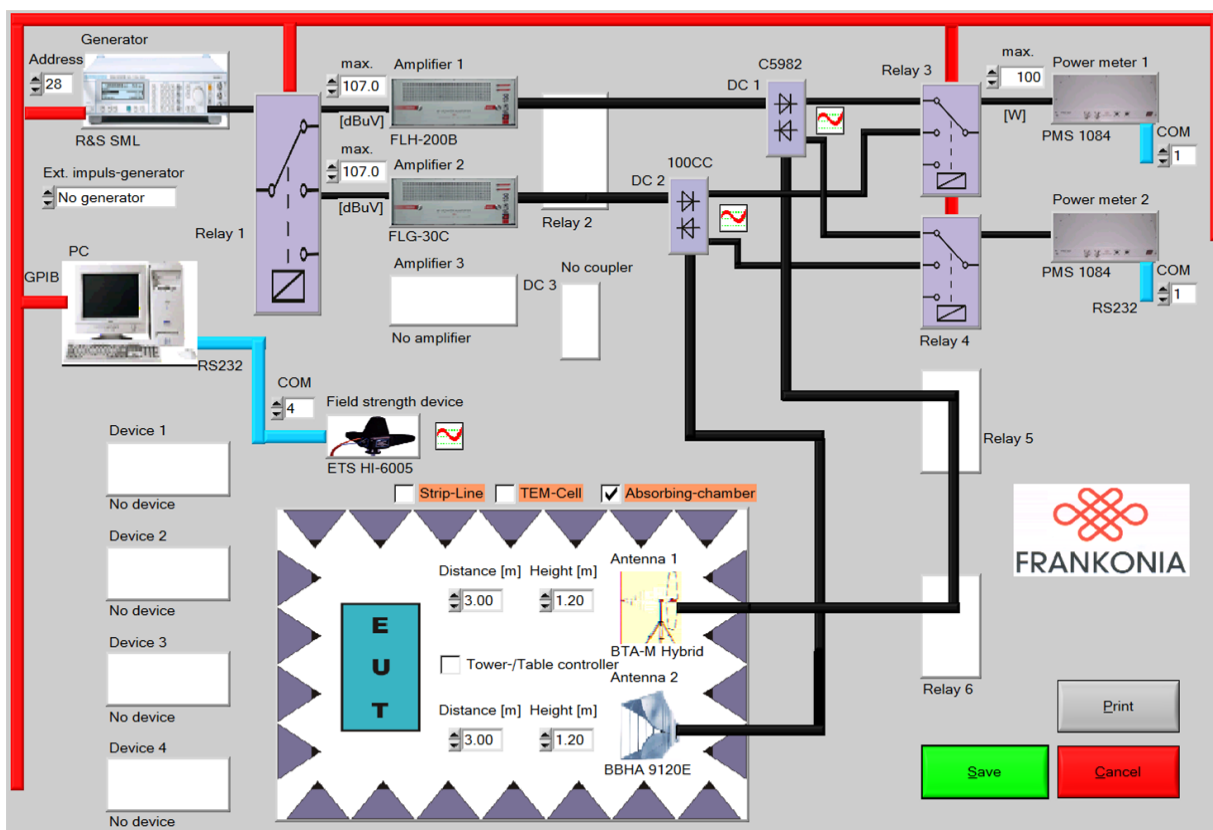
4 Měření homogenity zkušebního vysokofrekvenčního elektrického pole v bezodrazové komoře

Toto měření bylo prováděno dle doporučení normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (viz kap. 3.3) v bezodrazové komoře na Západočeské Univerzitě v Plzni ve dnech 11. a 26. března 2015, resp. jednalo se o polo-bezodrazovou komoru doplněnou přidavnými absorbéry na podlaze komory. Pro ilustraci této komory slouží obr. G1, G2 a G3 v příloze G, které znázorňují měřicí bezodrazovou komoru, přičemž z polohy antény je patrné, že se v tomto případě jedná o měření při horizontální polarizaci vysílací antény. Obr. G4 v této příloze pak zobrazuje vedlejší vyhodnocovací komoru, kde byla získána naměřená data.

Měření homogenity zkušebního pole v bezodrazové komoře v podstatě celé vychází z kap. 3.4, kde jsou popsány mj. dvě kalibrační metody, a to metoda konstantní intenzity pole a metoda konstantního výkonu. Z důvodu vysoké časové náročnosti bylo po změření několika měřicích poloh sondy metodou konstantní intenzity pole od této metody ustoupeno. Jinými slovy byla prováděna kalibrace měřicího pole pouze metodou konstantního výkonu (viz kap. 3.4.2).

4.1 Schéma měřicího řetězce a popis jednotlivých bloků

Schéma měřicího systému homogenity pole, které pochopitelně zároveň slouží i pro měření odolnosti, je uvedeno na obr. 4.1, kde se pro kontrolu určitých měřicích prvků využívá počítače. Signál prochází od generátoru přes přepínač výkonových zesilovačů do vybraného zesilovače, dále se šíří skrze směrový vazební prvek do příslušné antény a také do obou spínacích polí, kde každé toto pole slouží pro jiný měřič výkonu. Velikost pole v bezodrazové komoře snímá měřicí sonda, která je napojena na počítač, jenž vyhodnocuje naměřené výsledky. Zkratka EUT reprezentuje testované zařízení (angl. Equipment Under Test), které je během kalibrace pole nahrazeno měřicí sondou umístěnou na nosné dřevěné konstrukci umožňující nastavení této sondy do vhodné měřicí polohy pro provádění kalibrace, toto je patrné z obr. G1 až G3 v příloze G. Během provádění této kalibrace byla velikost uniformního pole 1,5 m x 1,5 m, čemuž, jak už bylo v této práci několikrát zmíněno, odpovídá dle obr. 3.4 celkem 16 měřicích bodů, přičemž jeden bod slouží vždy jako referenční, což byl při všech provedených měřeních bod číslo 11 (číslováno při pohledu od antény dle obr. 3.4). Vzdálenost mezi měřicí anténou a sondou elektrického pole byla rovna 3 m a anténa se nacházela ve výšce 1,55 m nad podlahou komory, tato výška antény koresponduje se středem plochy uniformního pole, protože plocha uniformního pole je 1,5 m vysoká a je umístěna



Obr. 4.1 Schéma měřicího systému pro provádění měření uniformity zkušebního pole v bezodrazové komoře

0,8 m nad podlahou komory, je celková výška antény rovna $0,8\text{ m} + 1,5/2\text{ m} = 1,55\text{ m}$. Jako měřicí software byl použit typ Frankonia RF-LAB a rozhraní, přes které komunikoval počítač s jednotlivými měřicími prvky, se nazývá GPIB.

Schéma z obr. 4.1 se velmi podobá schématu již uvedeného v kap. 3.4 na obr. 3.5, které vychází z normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, pouze zde nevystupuje měřič pole a zároveň se využívají některé prvky vícekrát, a to z důvodu různých frekvenčních pásem. Konkrétně se jedná o dva zesilovače, kdy první zesilovač slouží při měření pro frekvenční rozsah od 80 MHz do 1 GHz a druhý od 1 GHz do 3GHz, dále jde o příslušný počet spínacích polí zajišťující potřebný výběr z měřicích prvků a dvě měřicí antény, přičemž při tomto měření byl použit dle pokynů vedoucího práce jen jeden typ antény, a to BTA-M. Jednotlivé měřicí komponenty z uvedeného schématu jsou včetně jejich technických parametrů podrobně sepsány v následující kap. 4.1.1.

4.1.1 Technické parametry jednotlivých měřicích prvků

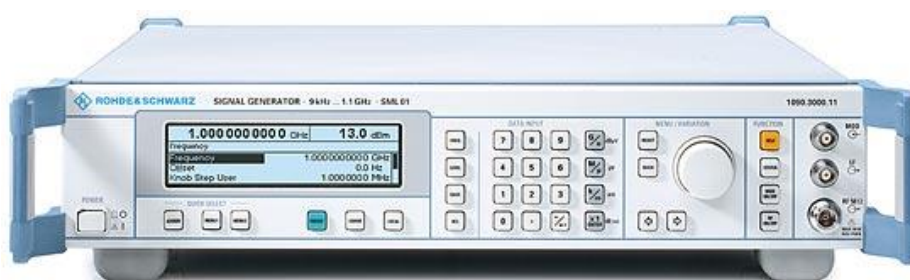
Jednotlivé měřicí prvky vystupující ve schématu měření uniformity pole v bezodrazové komoře dle obr. 4.1 jsou následující.

- **Signálový generátor**

Signálový generátor stojí na celém počátku měřicího řetězce a jednoduše řečeno, tento měřicí prvek slouží vytvoření signálu o požadované úrovni a frekvenci pro danou zkoušku. Generátor použitý při měření byl vyroben společností Rohde & Schwarz a konkrétně se jedná o typ SML 03. Technické parametry popisovaného generátoru jsou uvedeny v tab. 4.1 a jeho design pak reprezentuje obr. 4.2.

Frekvenční rozsah	9 kHz až 3,3 GHz
Nejnižší frekvenční rozlišení	0,1 Hz
Rychlost nastavení	< 10 ms
Rozsah úrovně	- 140 dBm až 13 dBm
Rozlišení úrovně	0,1 dBm
Vstupní impedance	50 Ω

Tab. 4.1 Technické parametry signálového generátoru R&S SML 03, převzato z [6].



Obr. 4.2 Signálový generátor R&S SML 03, převzato z [6].

- **Spínací pole**

Jak již bylo uvedeno, spínací pole zprostředkovává jednotlivá potřebná propojení mezi zesilovači, měřiči výkonu popř. anténami, přičemž je toto pole schopno přepínat jeden vstup až na tři možné výstupy. Při měření byl použit typ spínacího pole RSU zhotovený firmou Frankonia, který je zobrazen na obr. 4.3 a jeho parametry popisuje tab. 4.2.



Obr. 4.3 Spínací pole RSU, převzato z [7].

Frekvenční rozsah	≤ 40 GHz
Napěťový činitel stojatých vln VSWR	1,14
Vložný útlum	0,1 dB
Maximální vstupní výkon	440 W
Impedance	50 Ω
Spínací doba	60 ms
Maximální počet operací za 1 minutu	10

Tab. 4.2 Technické parametry spínacího pole RSU, převzato z [7].

- **Výkonové zesilovače**

Tyto zesilovače pochopitelně slouží k zesílení signálu na počítačem požadovanou úroveň a toto se děje za minimálního šumu a pokud možno co nejvyššího frekvenčního rozsahu. Technické parametry těchto zesilovačů vyrobených společností Frankonia jsou sepsány v tab. 4.3.

Typ zesilovače	FLH-200B	FLG-30C
Frekvenční rozsah	20 MHz až 1 GHz	1 GHz až 3 GHz
Maximální výstupní výkon	200 W	30 W
Zisk	54 dB	46 dB
Zvlnění	+/- 3 dB	+/- 1,5 dB
Maximální vstupní VSWR	2	2
Vstupní impedance	50 Ω	50 Ω
Výstupní impedance	50 Ω	50 Ω

Tab. 4.3 Technické parametry jednotlivých typů výkonových zesilovačů FLH-200B a FLG-30C převzato z [8] a [9].

- **Měřič výkonu**

Jako měřič výkonu byl při měření použit typ PMS 1084 od firmy Frankonia, který je ilustrován na obr. 4.4. Tento měřič zaznamenává výkon ve směru jak dopředném, tak zpětném, tj. měří výkon procházející ze zesilovače do antény a zároveň výkon odražený ve směru od antény k zesilovači. Technické parametry tohoto typu měřiče výkonu udává tab. 4.4.



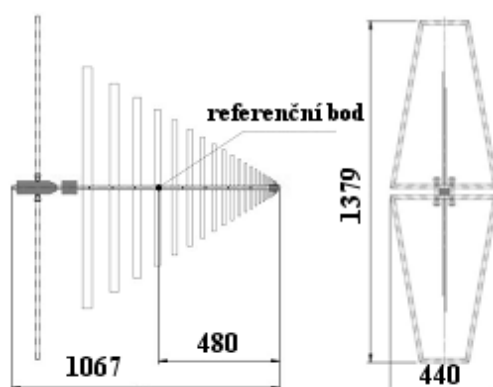
Obr. 4.4 Měřič výkonu PMS 1084, převzato z [10].

Frekvenční rozsah	100 KHz až 6 GHz
Výkonový rozsah měřících úrovní	- 60 dBm až 20 dBm
Přesnost	+/- 1 dB
Rozlišení	0,1 dB
Maximální vstupní výkon	500 mW
Napěťový činitel stojatých vln VSWR	1,15
Vstupní impedance	50 Ω

Tab. 4.4 Technické parametry měřiče výkonu PMS 1084, převzato z [10].

- **Vysílací anténa**

Zkráceně řečeno vysílací anténa zastává funkci transformátoru z energie šířící se vedením na energii šířící se volným prostorem. Jak již bylo zmíněno, vedoucí práce určil pro měření typ antény BTA-M společnosti Frankonia, přičemž se de facto jedná o bikónicko-logaritmickou anténu, jejíž nákres s konstrukčními rozměry v [mm] znázorňuje obr. 4.5 a technické parametry této antény pak v sobě zahrnuje tab. 4.5.



Obr. 4.5 Měřicí anténa typu BTA-M, převzato z [11].

Frekvenční rozsah	30 MHz až 3 GHz
Impedance	50 Ω
Maximální vstupní výkon	100 W

Tab. 4.5 Technické parametry měřicí antény typu BTA-M, převzato z [11].

- **Sonda elektrického pole**

Úkolem měřicí sondy je zaznamenat velikost elektrického pole v příslušné měřící poloze. Při měření uniformity pole byl použit typ sondy HI-6005 vyrobený firmou ETS-Lindgren. Tato sonda měří vlastně ve třech na sebe kolmých osách a výsledek pak stanoví jako vektorový součet těchto naměřených hodnot. Sonda je připojena optickými kabely, a to z důvodu zamezení vzniku interference mezi signálem šířícím se od sondy a zkušebním polem působícím v bezodrazové komoře při měření uniformity pole. Technické parametry sondy jsou popsány v tab. 4.6 a její vzhled je pak reprezentován obr. 4.6.

Frekvenční rozsah	100 kHz až 6 GHz
Rozlišení	0,01 V/m
Dynamický rozsah	0,5 V/m až 800 V/m
Přesnost	+/- 1 dB
Konstrukční rozměry	(8 x 7,5 x 7,5) cm

Tab. 4.6 Technické parametry měřicí sondy typu HI-6005, převzato z [12].



Obr. 4.6 Měřicí sonda typu HI-6005, převzato z [12].

- **Bezodrazová měřicí komora**

Testování uniformity zkušebního elektrického pole bylo prováděno v bezodrazové komoře zkonstruované společností Frankonia. Technické parametry této komory uvádí tab. 4.7, přičemž jako absorbéry jsou v komoře použity dva typy, a to typ Frankosorb F006 a Frankosorb H450. Tento typ komory byl již ilustrován v této práci několikrát, avšak pro doplnění je v příloze H této práce uveden obr. H1, kterým firma Frankonia prezentuje svoji bezodrazovou měřicí komoru. Jak již bylo uvedeno, jedná se de facto o polo-bezodrazovou komoru, která je doplněna přídatnými absorbéry na podlaze komory, čímž se přibližuje vlastnostem plně bezodrazové měřicí komory.

Frekvenční rozsah	30 MHz až 18 GHz
Konstrukční rozměry (délka x šířka x výška)	(8,84 x 4,955 x 5,75) m

Tab. 4.7 Technické parametry bezodrazové měřicí komory, převzato z [13].

4.2 Postup měření homogenity pole metodou konstantního výkonu

Měřicí software Frankonia RF-LAB nabízí tři možné varianty kalibrace měřicího pole, kde první dvě varianty byly v podstatě založené na metodě kalibrace konstantního výkonu, pouze se jednalo o různou polohu uvažovaného výkonu v měřicím řetězci. V prvním případě se jednalo o výkon vstupující do antény (varianta „Constant forward level“) a v druhém o výkon přímo na generátoru („Constant generator level“), přičemž vzhledem ke skutečnosti, že počítač přímo komunikuje s měřicím generátorem, je z hlediska nastavení

požadovaného výkonu vhodnější metoda kalibrace konstantního výkonu na generátoru, proto může být doporučena pro uskutečnění tohoto měření. Třetí nabízená varianta byla metoda kalibrace konstantní intenzity pole („Constant field strength“), která byla ovšem z hlediska časové náročnosti téměř neproveditelná, jelikož měření v jedné poloze sondy zabralo více než 2 hodiny, tj. jedno ze čtyř měření by trvalo déle než 30 hodin.

Z uvedených důvodů bylo měření homogenity pole v bezodrazové komoře realizováno pouze metodou konstantního výkonu na generátoru (varianta „Constant generator level“), přičemž postup měření z pravidla vychází z kap. 3.4.2, kde je postup kalibrace touto metodou podrobněji popsán. Většinu bodů postupu dle kap. 3.4.2 prováděl měřicí software automaticky, tj. zvyšoval frekvenční krok o 1%, nastavoval potřebný vstupní výkon do antény v referenčním bodě pro vytvoření požadované intenzity 6 V/m s tolerancí 0,1 V/m na ploše uniformního pole a tento výkon následně aplikoval pro všech ostatních 15 měřicích bodů. Zároveň také tento software prováděl veškerá potřebná vyhodnocení naměřených dat. Jinými slovy obsluha komory a měřicího zařízení byla při měření poměrně jednoduchá, pouze bylo nutné pochopitelně manuálně nastavovat sondu do příslušných měřicích poloh, kterých bylo celkem 16 pro měření jedné polarizace a jednoho frekvenčního pásma. Avšak nesmí se zapomenout na to, že před započítím měření bylo zapotřebí vyskládat feritové a jehlanové absorbéry na podlahu měřicí komory a zároveň bylo nutné otáčet měřicí anténu do horizontální či vertikální polohy podle použité polarizace při daném měření.

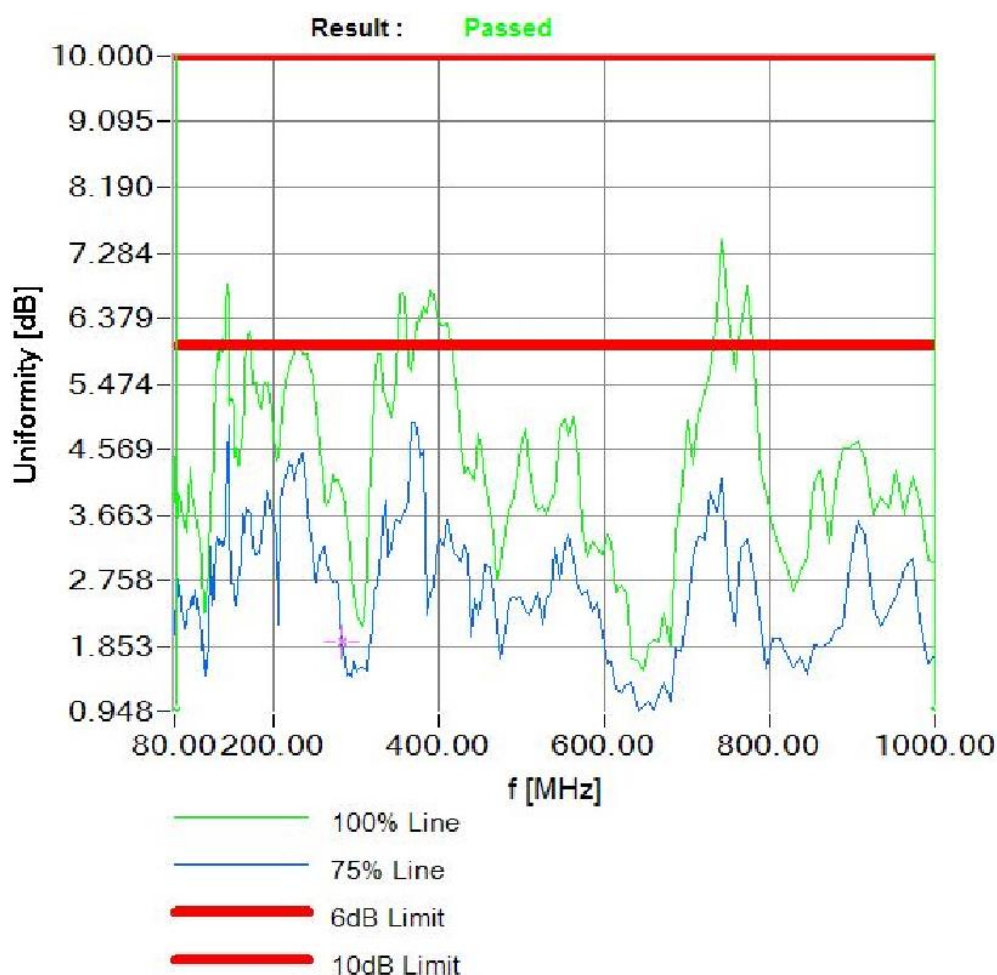
Měření probíhalo ve dvou frekvenčních pásmech, a to nejprve od 80 MHz do 1 GHz a následně od 1 GHz do 3 GHz, přičemž v každém frekvenčním pásmu se měřilo při vertikální i horizontální polarizaci antény, tj. celkem se prováděla 4 měření.

Co se týče zařízení použitých při měření, tak byla použita zařízení uvedená a popsána v kap. 4.1.1, pouze pro frekvenční pásmo od 80 MHz do 1 GHz se využíval zesilovač typu FLH-200B a pro pásmo od 1 GHz do 3 GHz pak zesilovač typu FLG-30C.

4.3 Naměřené závislosti uniformity pole metodou konstantního výkonu

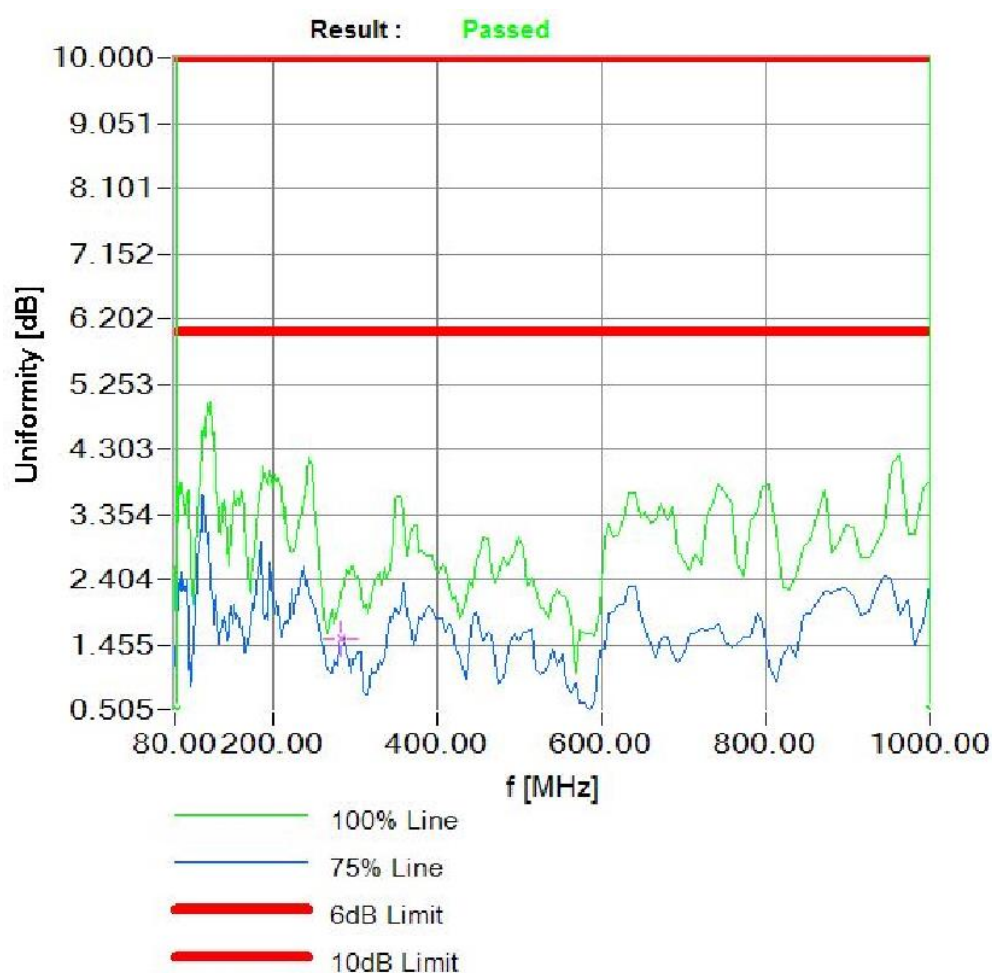
Jak již bylo uvedeno, celkové vyhodnocení, jehož příklad je rovněž uveden v kap. 3.4.2, měřicí software prováděl automaticky a jako výsledek pak prezentoval několik naměřených vyhodnocovacích charakteristik, přičemž se vždy jednalo o jednu charakteristiku korespondující s jedním daným měřením, celkem tedy jde o 4 charakteristiky zobrazené na obr. 4.7 až 4.10. Zároveň tento software poskytoval naměřenou grafickou závislost

respektující průběh nastavované intenzity elektrického pole v závislosti na frekvenci v měřicím bodě za účelem vytvoření požadované intenzity pole v bezodrazové komoře, a to pro každý měřicí bod, tj. šlo o 16 závislostí pro každé měření, celkem tedy 64 grafických závislostí. Z důvodu toho, že všech těchto 64 závislostí nenese podstatnou informaci o provedeném měření a současně výrazně naroste rozsah této práce při jejich kompletním uvádění, je pro každé ze 4 měření vždy pro nahlédnutí v příloze CH uveden vybraný jeden tento graf jako zástupce celé skupiny. Dále je u grafické závislosti zapsána příslušná vybraná poloha sondy, které odpovídá naměřený graf, přičemž číslování vychází z obr. 3.4 při pohledu od antény. Důležité je ale podotknout, že v ideálním případě by na těchto grafických závislostech na obr. CH1 až CH4 byl naměřen konstantní průběh rovný 6 V/m v celém frekvenčním rozsahu.

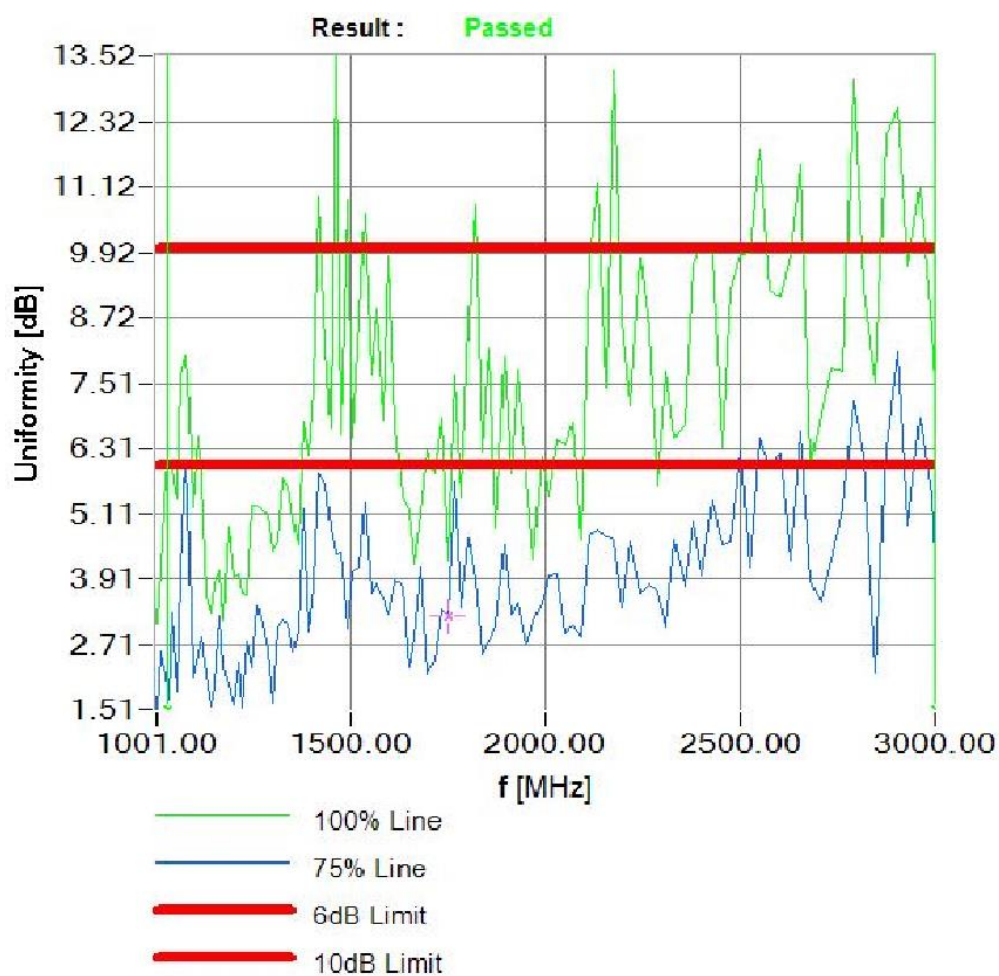


Obr. 4.7 Naměřený průběh uniformity pole [dB] v závislosti na frekvenci v rozsahu od 80 MHz do 1 GHz při horizontální polarizaci antény, zelená křivka (100% Line) reprezentuje všech 16 měřicích bodů, zatímco modrá křivka (75% Line) pak pouze 12 měřicích bodů.

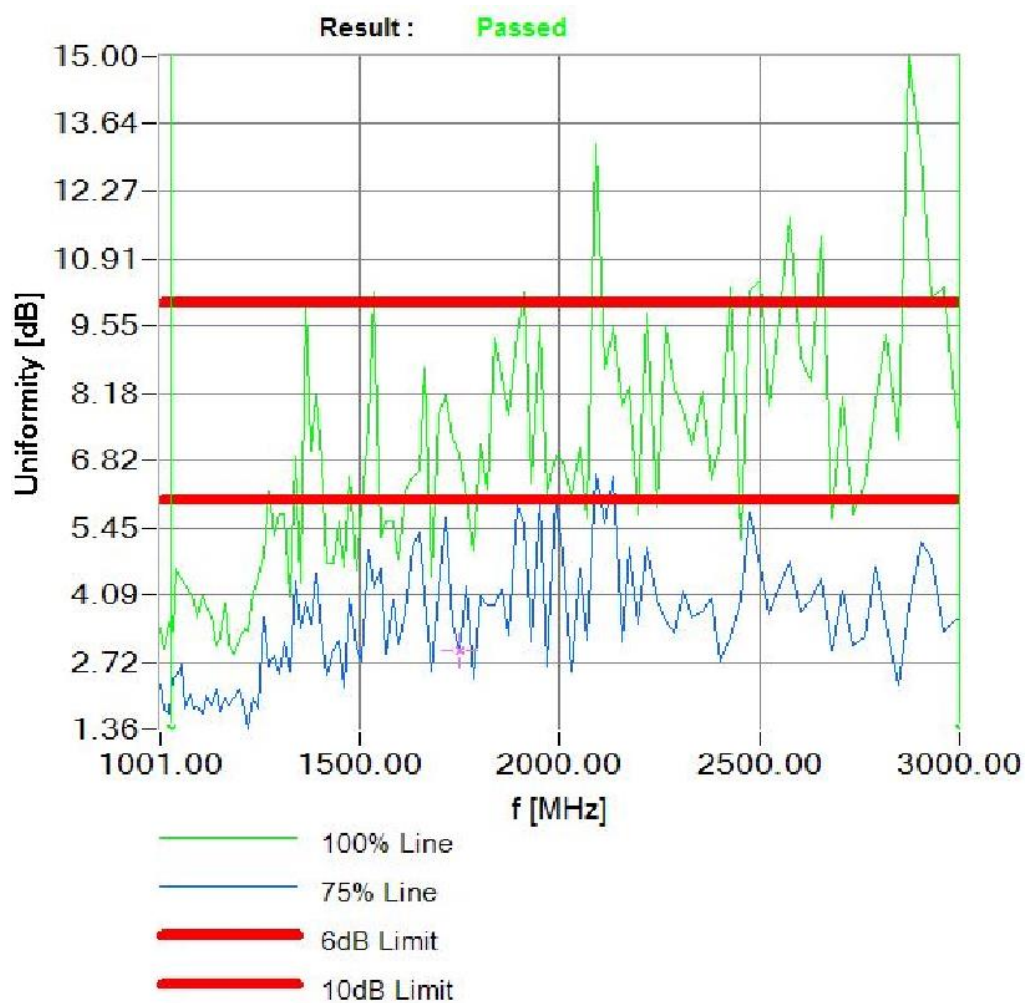
Již zmíněné naměřené vyhodnocovací charakteristiky na obr. 4.7 až 4.10 vlastně reprezentují míru, neboli kvalitu uniformity elektrického zkušebního pole v bezodrazové komoře, kdy v těchto charakteristikách vystupují dva naměřené průběhy, a to pro 75 % všech měřicích bodů (modře) a 100 % těchto bodů (zeleně). Pak zde ještě figurují dvě ohraničující meze tolerance 6 dB a 10 dB, přičemž jak už bylo v této práci řečeno, při větším frekvenčním rozsahu než 1 GHz se může uplatňovat tolerance až 10 dB. Jelikož popisovaná norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 stanovuje jako minimální přijatelnou odchylku pro 75 % měřicích bodů velikost 6 dB (popř. 10 dB), tak zelenou křivku pro 100 % měřicích poloh lze považovat pouze za informativní či doplňující, protože pro celkové hodnocení kvality uniformity pole v komoře je nepodstatná.



Obr. 4.8 Naměřený průběh uniformity pole [dB] v závislosti na frekvenci v rozsahu od 80 MHz do 1 GHz při vertikální polarizaci antény, zelená křivka (100% Line) reprezentuje všech 16 měřicích bodů, zatímco modrá křivka (75% Line) pak pouze 12 měřicích bodů.



Obr. 4.9 Naměřený průběh uniformity pole [dB] v závislosti na frekvenci v rozsahu od 1 GHz do 3 GHz při horizontální polarizaci antény, zelená křivka (100% Line) reprezentuje všech 16 měřicích bodů, zatímco modrá křivka (75% Line) pak pouze 12 měřicích bodů.



Obr. 4.10 Naměřený průběh uniformity pole [dB] v závislosti na frekvenci v rozsahu od 1 GHz do 3 GHz při vertikální polarizaci antény, zelená křivka (100% Line) reprezentuje všech 16 měřicích bodů, zatímco modrá křivka (75% Line) pak pouze 12 měřicích bodů.

Závěr

Cílem této práce bylo především změřit a vyhodnotit uniformitu elektrického vysokofrekvenčního zkušebního pole v bezodrazové komoře dle doporučení normy ČSN EN 6100-4-3 ed.3, přičemž kalibrace se prováděla pouze metodou konstantního výkonu. Velikost plochy uniformního pole byla 1,5 m x 1,5 m, čemuž odpovídalo 16 měřicích bodů.

Pro vyhodnocení homogenity pole v bezodrazové komoře jsou klíčové obr. 4.7, 4.8, 4.9 a 4.10, které modře zobrazují naměřené odchylky 75% měřicích bodů, které by ideálně měly být nulové, avšak zmíněná norma stanovuje jako maximální odchylku pro pásmo od 80 MHz do 1 GHz hodnotu 6 dB. Tato tolerance, jak je patrné z obr. 4.7 a 4.8, je splněna jak pro horizontální, tak také pro vertikální polarizaci antény, jelikož modrá křivka nepřekračuje červenou čáru na 6 dB. Pouze lze doplnit, že pro vertikální polarizaci antény naměřená závislost vychází lépe, protože je na obr. 4.8 zřetelná větší rezerva do 6 dB tolerance, než je tomu u horizontální polarizace antény dle obr. 4.7 a dokonce všech 16 měřicích poloh sondy u vertikální polarizace v pásmu od 80 MHz do 1 GHz je v uvedené toleranci.

Co se týče pásma měřicích frekvencí od 1 GHz do 3 GHz, tak zde norma ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 stanovuje mírnější toleranci, a to až 10 dB. Tato normou přijatelná odchylka musí platit nejméně pro 75 % měřicích bodů, což jak lze vypožorovat z obr. 4.9 a 4.10, je rovněž dodrženo. Podobně jako v minulém případě, tak i zde byla naměřena větší rezerva do uvedené tolerance pro vertikální polarizaci antény, kdy se dokonce až na malý zlomek celkového frekvenčního rozsahu, všech 75 % měřicích bodů vešlo do tolerance 6 dB. V případě horizontální polarizace byla 6 dB tolerance pro 75 % měřicích poloh nedodržena ke konci kmitočtového rozsahu, avšak na celkové posouzení způsobilosti komory z hlediska požadované kvality uniformního pole to nemá vliv, jelikož 10 dB tolerance je pro 75 % měřicích bodů splněna v celém pásmu frekvencí.

Na úplný závěr lze tedy konstatovat, že bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni při testování homogenity pole dle normy ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 uspěla, což znamená, že tato komora je oprávněná z hlediska homogenity pole testovat odolnost zařízení ve frekvenčním rozsahu od 80 MHz do 3 GHz a pro vertikální i horizontální polarizaci vysílací antény. Zároveň je nutno podotknout, že dle této normy je požadováno tuto homogenitu pole testovat nejméně každých 12 měsíců. Dále lze doporučit pro testování homogenity pole ve vyšších frekvenčních polohách použití trychtýřové antény s vyšším ziskem, popř. lze aplikovat částečné ozařování (dle kap. 3.4 na str. 43) či metodu nezávislých oken (viz kap. 3.4.3).

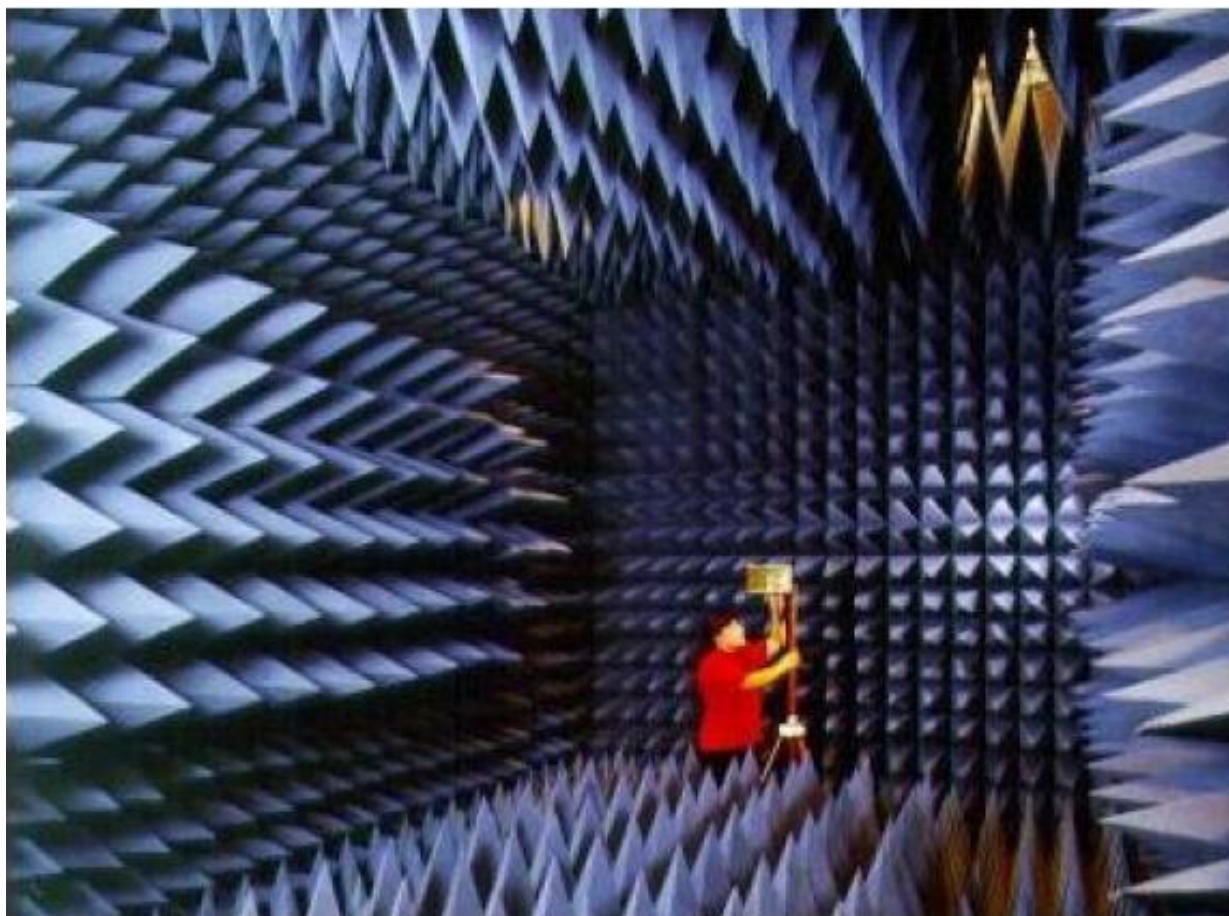
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DŘÍNOVSKÝ, Jiří; FRÝZA, Tomáš; SVAČINA, Jiří; KEJÍK, Zdeněk a RŮŽEK, Václav. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno. [Cit. 10.12.2014]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc>
- [2] LEFERINK, Frank. *In-situ High Field Strength Testing using a Transportable Reverberation Chamber* [online]. University of Twente / Thales Nederland B.V, Netherlands [Cit. 10.12.2014]. Dostupné s omezeným přístupem z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4559891>
- [3] EMC Testing at dB Technology. *Gigahertz Transverse Electro-Magnetic Cell* [Online]. Anglie [Cit. 10.12.2014]. Dostupné z: <http://www.dbtechnology.co.uk/gtem.htm>
- [4] ČSN EN 61000-4-3 ed. 3. *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [5] ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 ZMĚNA A1. *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2008.
- [6] ROHDE & SCHWARZ. *R&S SML Signal Generator* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/sml-productstartpage_63493-7567.html
- [7] FRANKONIA GmbH. *RF-Relay Switching Unit - RSU* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RF-Relay%20Switching%20Unit.pdf
- [8] FRANKONIA GmbH. *20 MHz – 1000 MHz* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Amplifiers/20MHz_1000MHz.pdf
- [9] FRANKONIA GmbH. *1 GHz – 3 GHz* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documents/Catalogues/Amplifiers/1GHz_3GHz.pdf

- [10] FRANKONIA GmbH. *2/4-Channel RF-Power Meter – PMS 1084* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: [http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/ RF-Power%20Meter.pdf](http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RF-Power%20Meter.pdf)
- [11] FRANKONIA GmbH. *EMC Test Instruments and Components* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.gigatest.net/frankonia/emc_test_instruments.pdf
- [12] ETS-LINDGREN. *HI-6005 Electric Field Probe* [online]. Francie [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: <http://www.ets-lindgren.com/HI-6005>
- [13] FRANKONIA GmbH. *Compact Hybrid Chamber – CHC* [online]. Německo [Cit. 5.4.2015]. Dostupné z: http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic_Chambers/CHC.pdf

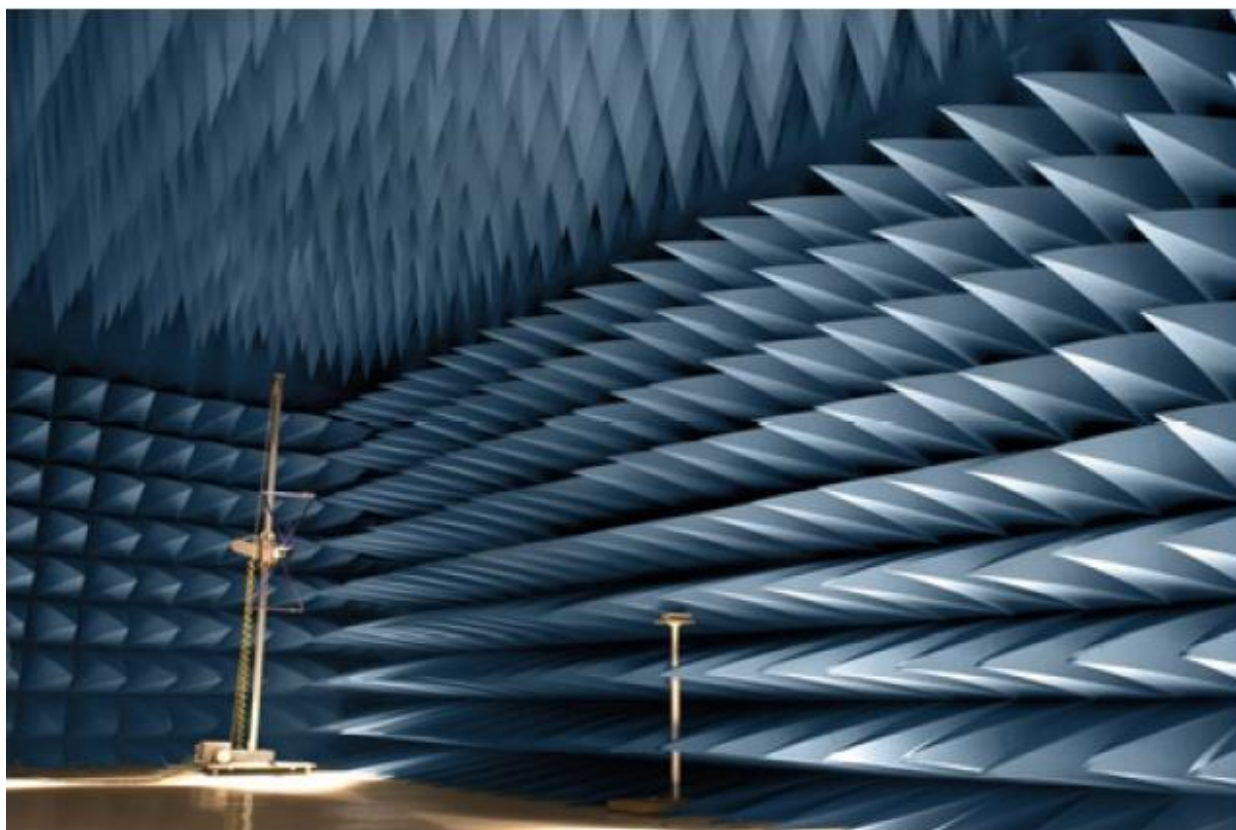
Přílohy

Příloha A – Bezodrazová měřicí komora.



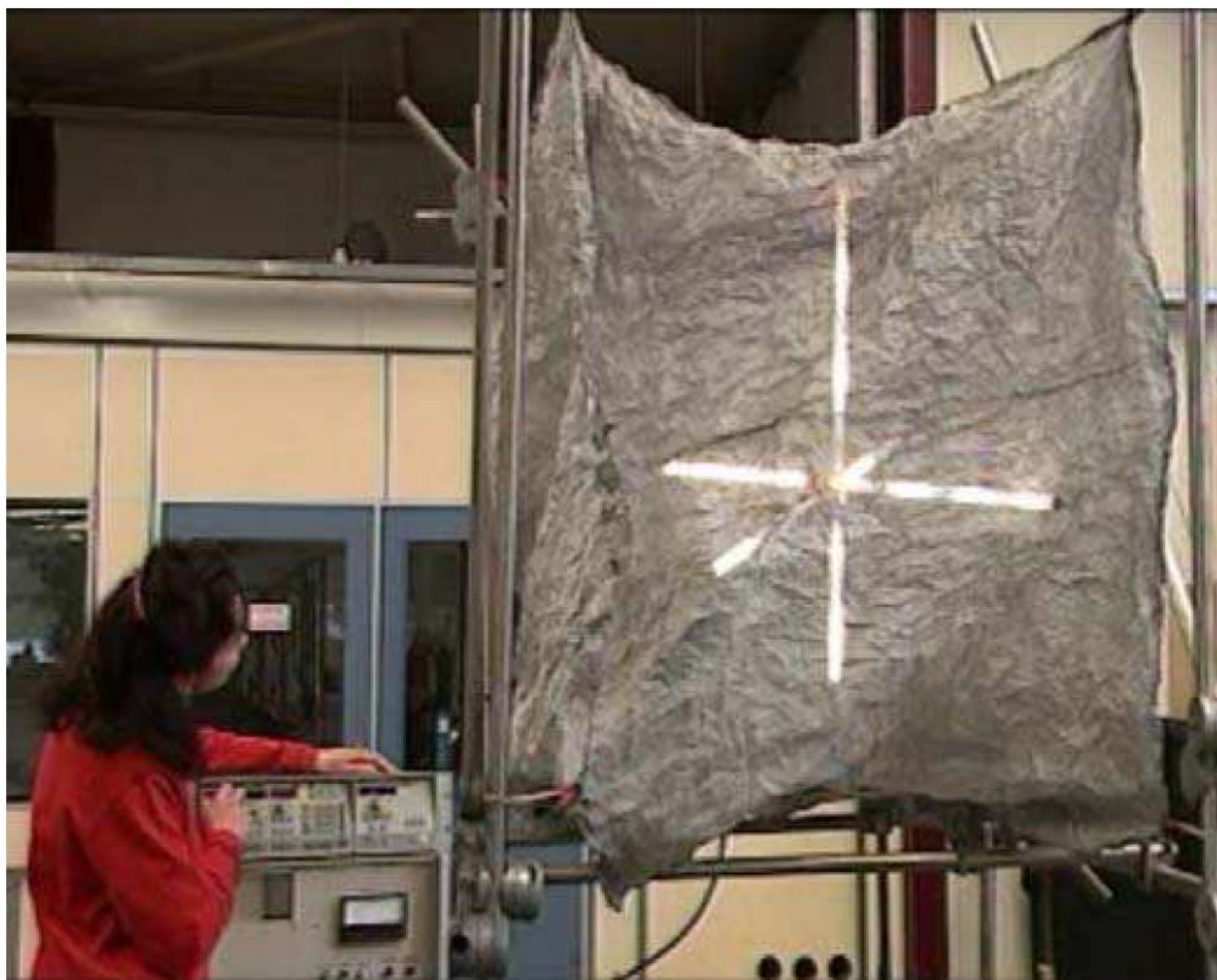
Obr. A1 Bezodrazová měřicí komora, převzato z [1].

Příloha B – Polo-bezodrazová měřicí komora.



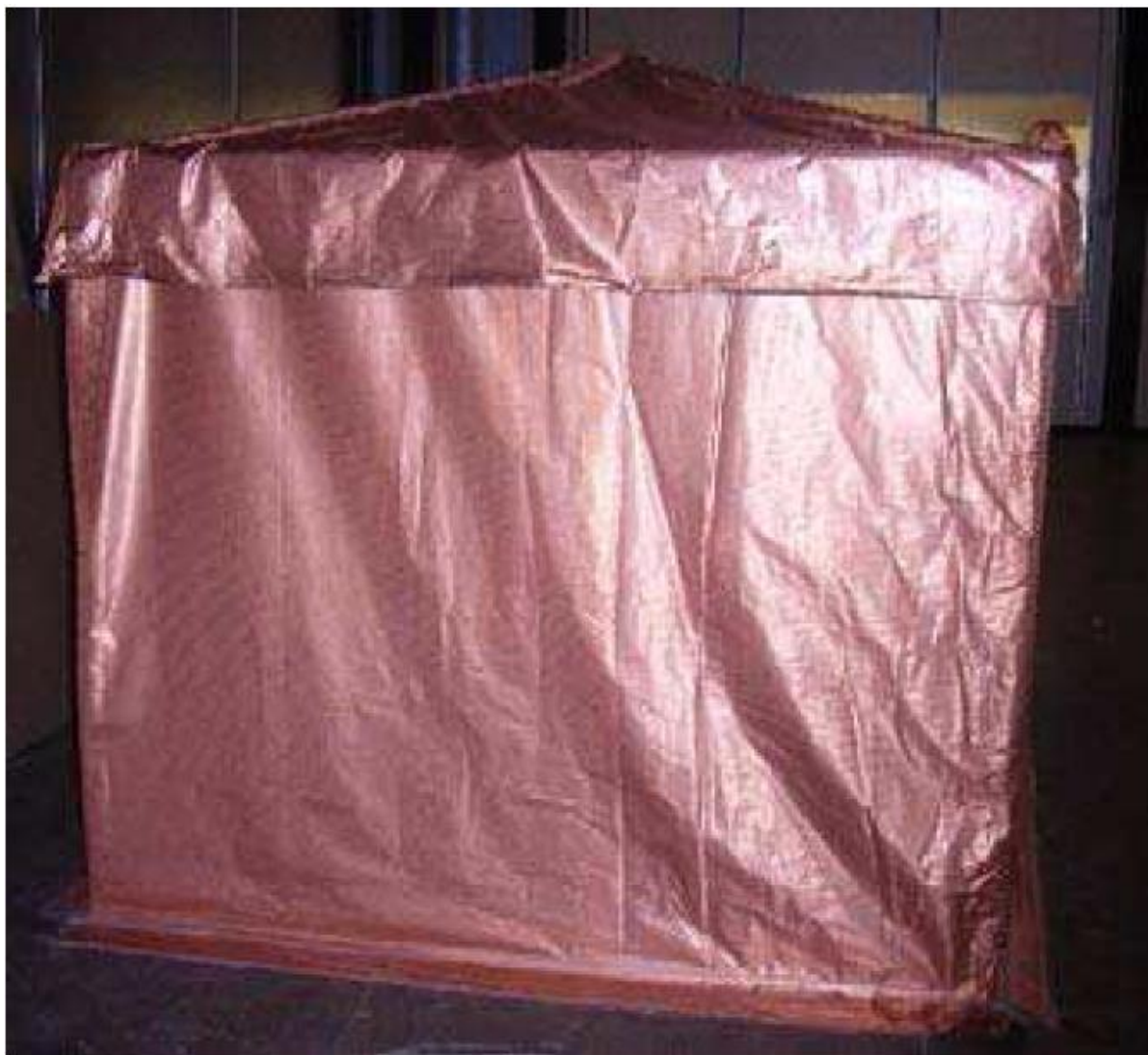
Obr. B1 Polo-bezodrazová měřicí komora, převzato z [1].

Příloha C – Vibrující intrinzická odrazová měřicí komora.



Obr. C1 Vibrující intrinzická odrazová měřicí komora, převzato z [2].

Příloha D – Transportní intrinzická odrazová měřicí komora.



Obr. D1 Transportní intrinzická odrazová měřicí komora – pohled z vnějšího prostoru, převzato z [2].



Obr. D2 Transportní intrinzická odrazová měřicí komora – pohled z vnitřního prostoru, převzato z [2].

Příloha E – Zkušební měřicí komora GTEM.



Obr. E1 Zkušební měřicí komora GTEM, převzato z [1].



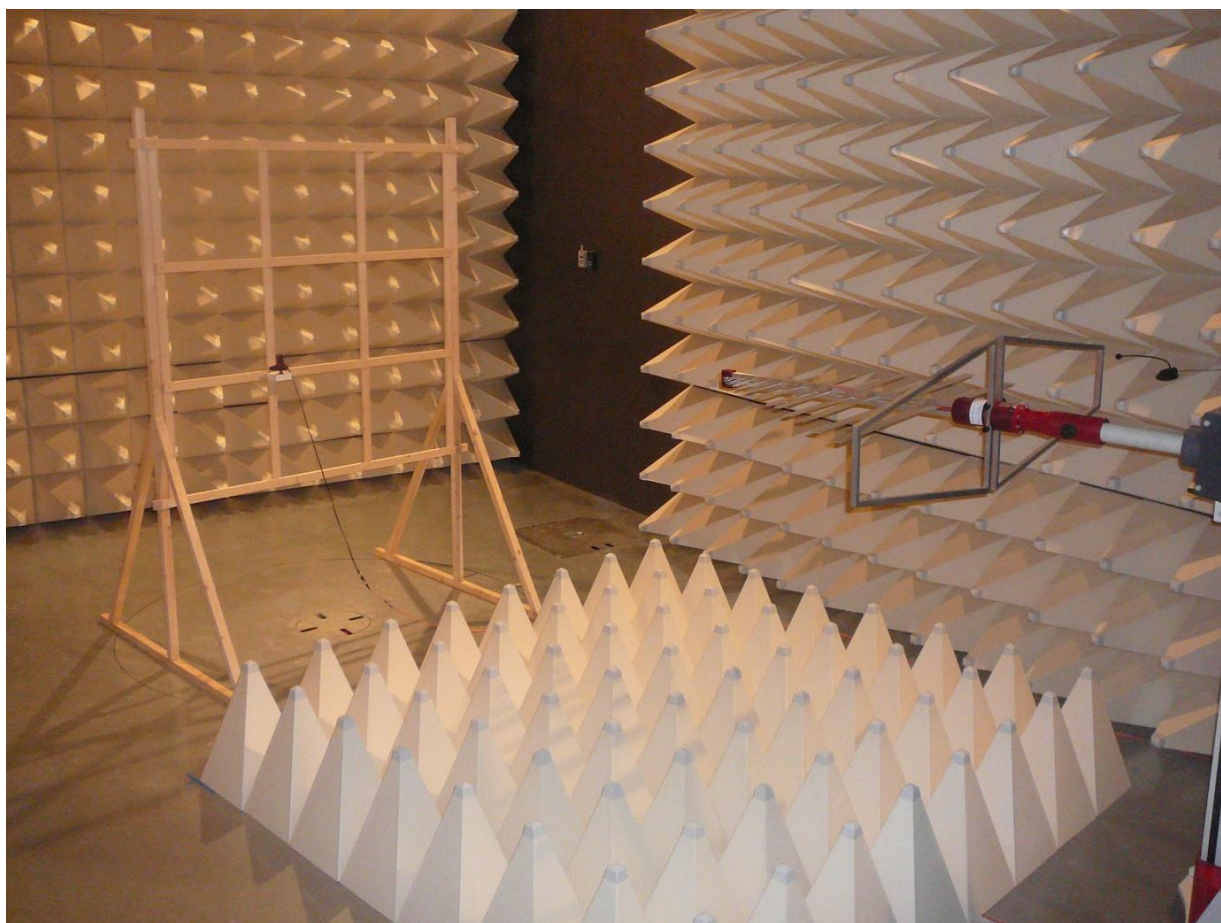
Obr. E2 Zkušební měřicí komora GTEM většího provedení, převzato z [3].

Příloha F – Požadavky na plochu homogenního pole.

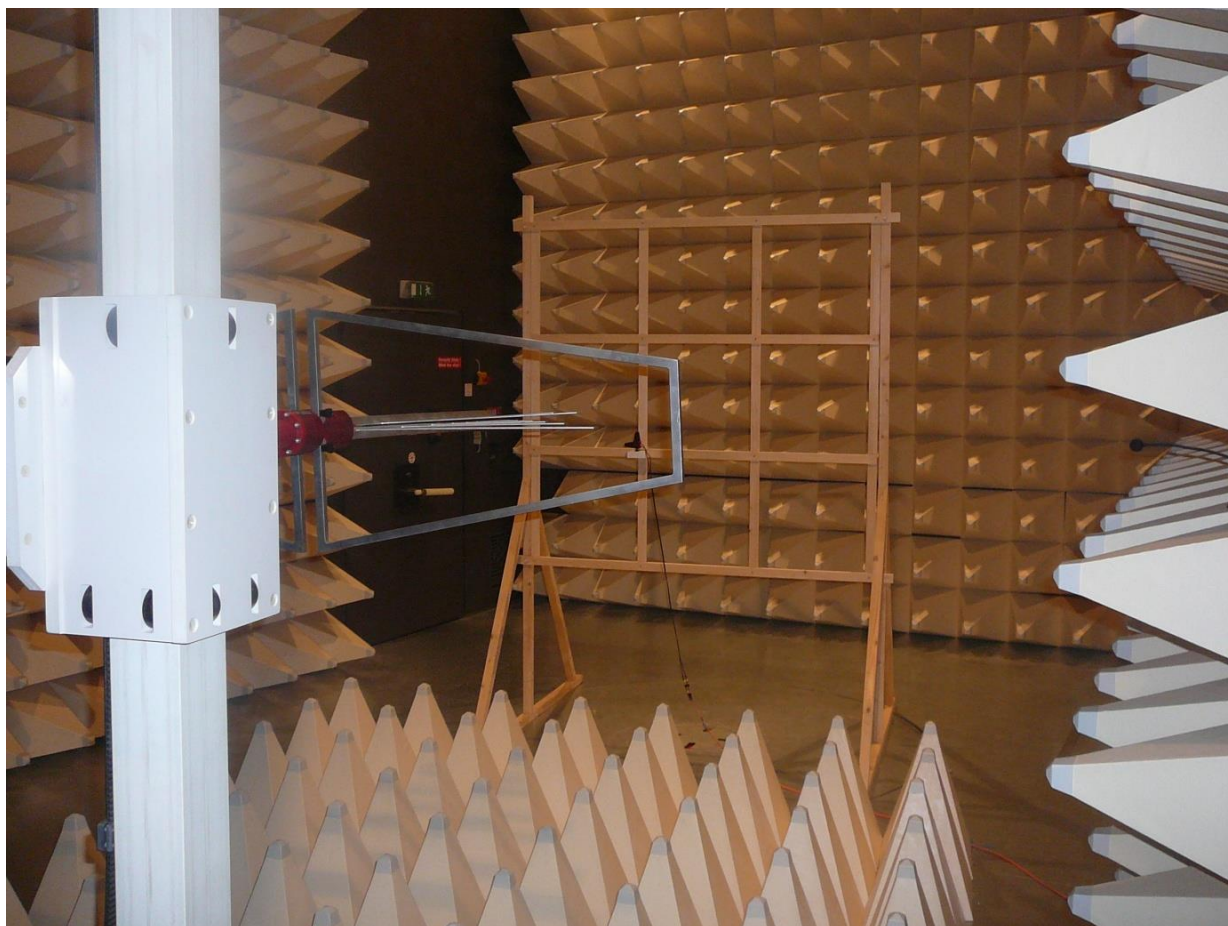
Kmitočtový rozsah	Požadavky na velikost a kalibraci plochy uniformního pole v případě, že do této plochy zkoušené zařízení spadá úplně (Preferovaná metoda úplného ozáření)	Požadavky na velikost a kalibraci plochy uniformního pole, pokud do této plochy testované zařízení nespadá úplně (Alternativní metody částečného ozáření a nezávislých oken)
Pod 1 GHz	<p>Minimální plocha uniformního pole 0,5 m x 0,5 m</p> <p>Velikost plochy uniformního pole v krocích o velikosti 0,5 m (např., 0,5 m x 0,5 m; 0,5 m x 1,0 m; 1,0 m x 1,0 m; atd.)</p> <p>Kalibrace v krocích mříže 0,5 m x 0,5 m 75% kalibračních bodů uvnitř specifikací pokud plocha uniformního pole je větší než 0,5 m x 0,5 m. 100 % těchto bodů (všechny 4 body) musí být ve specifikacích pro plochu uniformního pole 0,5 m x 0,5 m.</p>	<p>Částečné ozáření</p> <p>Minimální velikost plochy uniformního pole 1,5 m x 1,5 m</p> <p>Velikost plochy uniformního pole v krocích o velikosti 0,5 m (např., 1,5 m x 1,5 m; 1,5 m x 2,0 m; 2,0 m x 2,0 m; atd.)</p> <p>Kalibrace v krocích mříže 0,5 m x 0,5 m 75 % kalibračních bodů uvnitř specifikací</p>
Nad 1 GHz	<p>Minimální plocha uniformního pole 0,5 m x 0,5 m</p> <p>Velikost plochy uniformního pole v krocích o velikosti 0,5 m (např. 0,5 m x 0,5 m; 0,5 m x 1,0 m; 1,0 m x 1,0 m; atd.)</p> <p>Kalibrace v krocích mříže 0,5 m x 0,5 m 75% kalibračních bodů uvnitř specifikací pokud plocha uniformního pole je větší než 0,5 m x 0,5 m. 100 % těchto bodů (všechny 4 body) musí být ve specifikacích pro plochu uniformního pole 0,5 m x 0,5 m.</p>	<p>Metoda nezávislých oken</p> <p>Okno 0,5 m x 0,5 m (viz kap. 3.4.3)</p> <p>Částečné ozáření</p> <p>Velikost okna 1,5 m x 1,5 m a větší v přírůstcích 0,5 m (např., 1,5 m x 2,0 m; 2,0 m x 2,0 m; atd.)</p> <p>Kalibrace v krocích mříže 0,5 m x 0,5 m 75% kalibračních bodů uvnitř specifikací pokud plocha uniformního pole je větší než 0,5 m x 0,5 m. 100 % těchto bodů (všechny 4 body) musí být ve specifikacích pro plochu uniformního pole 0,5 m x 0,5 m.</p>

Tab. F1 Požadavky na plochu homogenního pole pro aplikaci úplného ozáření, částečného ozáření a nezávislé metody oken, převzato z [4].

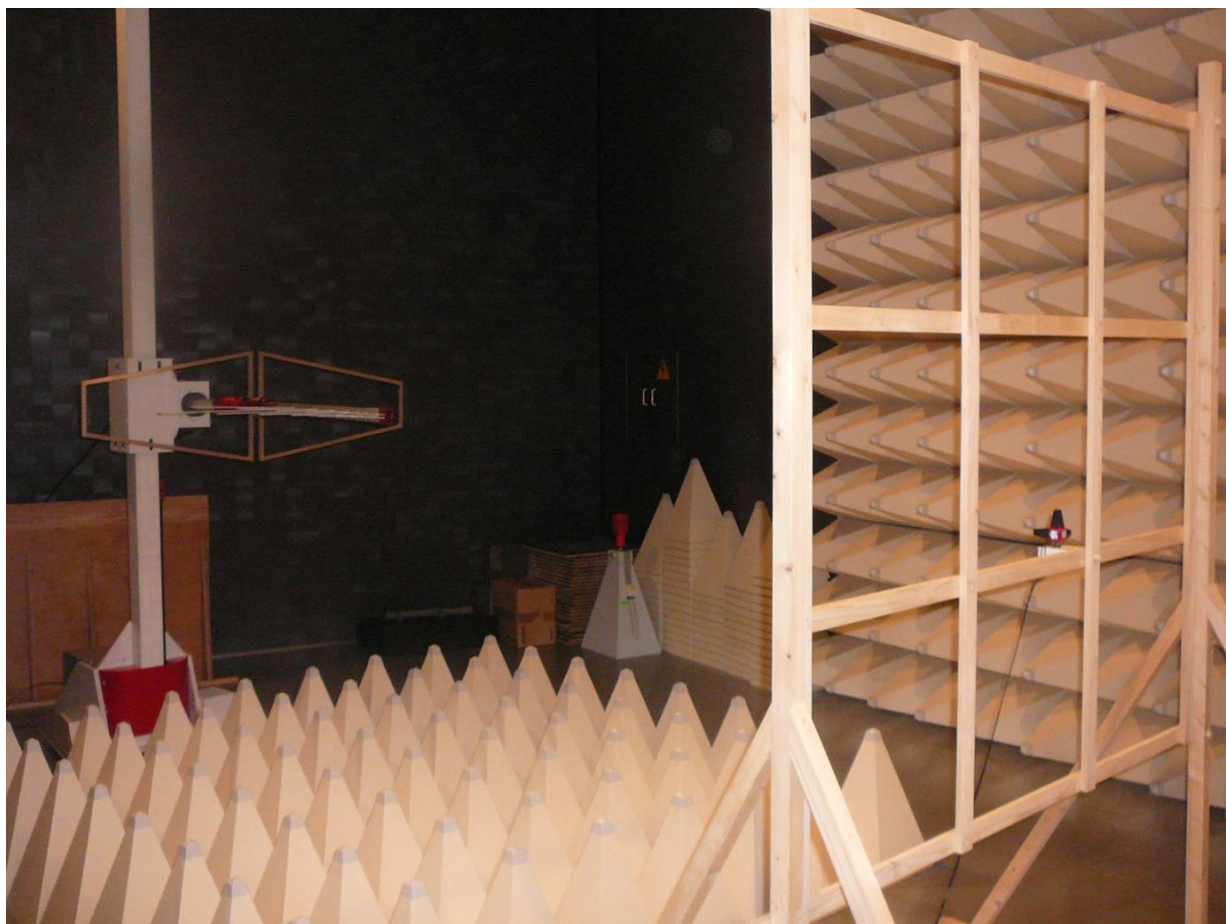
Příloha G – Bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni.



Obr. G1 Bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni při pohledu směrem zleva od měřicí antény.



Obr. G2 Bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni při pohledu směrem zprava od měřicí antény.

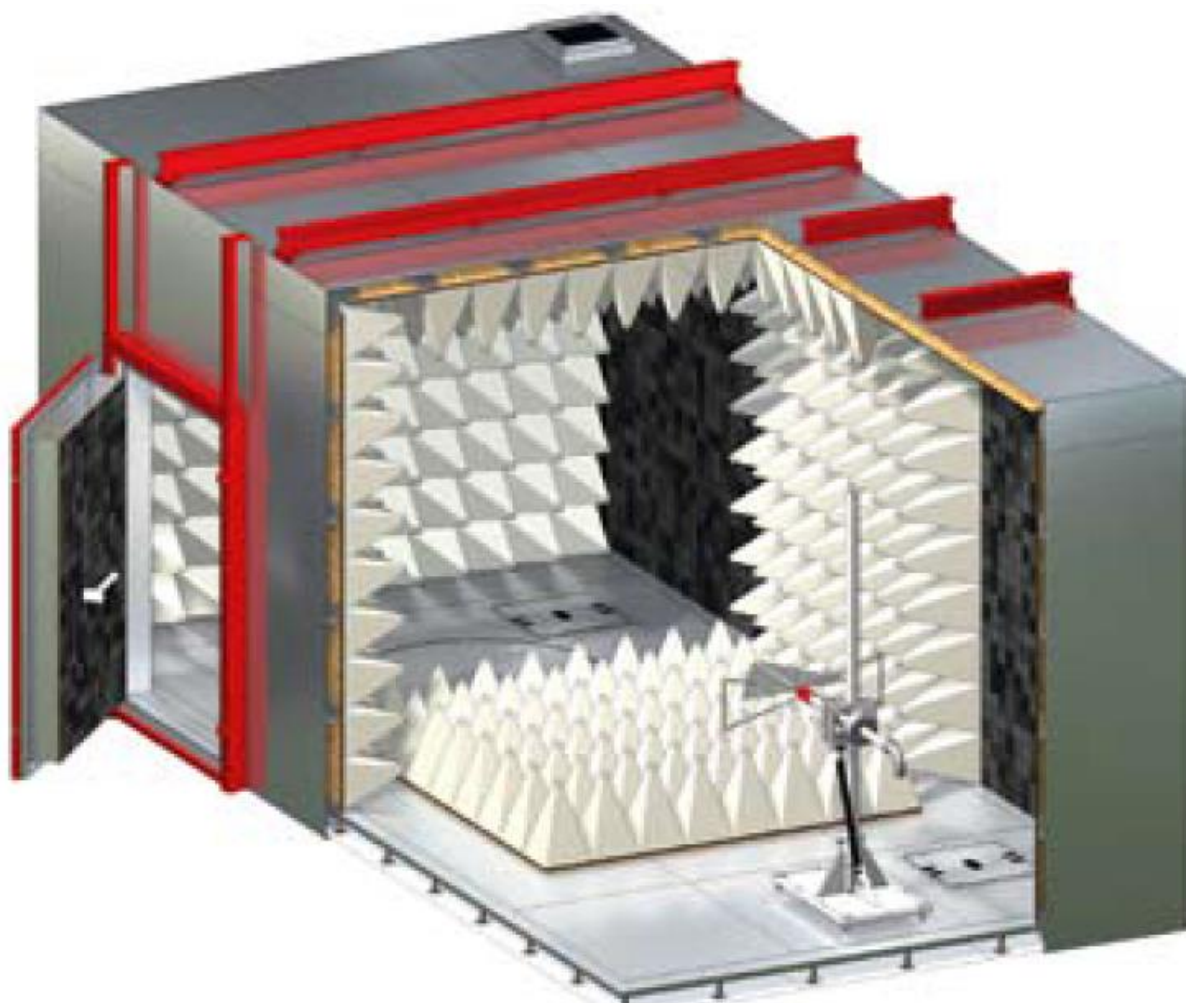


Obr. G3 Bezodrazová měřicí komora na ZČU v Plzni při pohledu směrem k měřicí anténě.



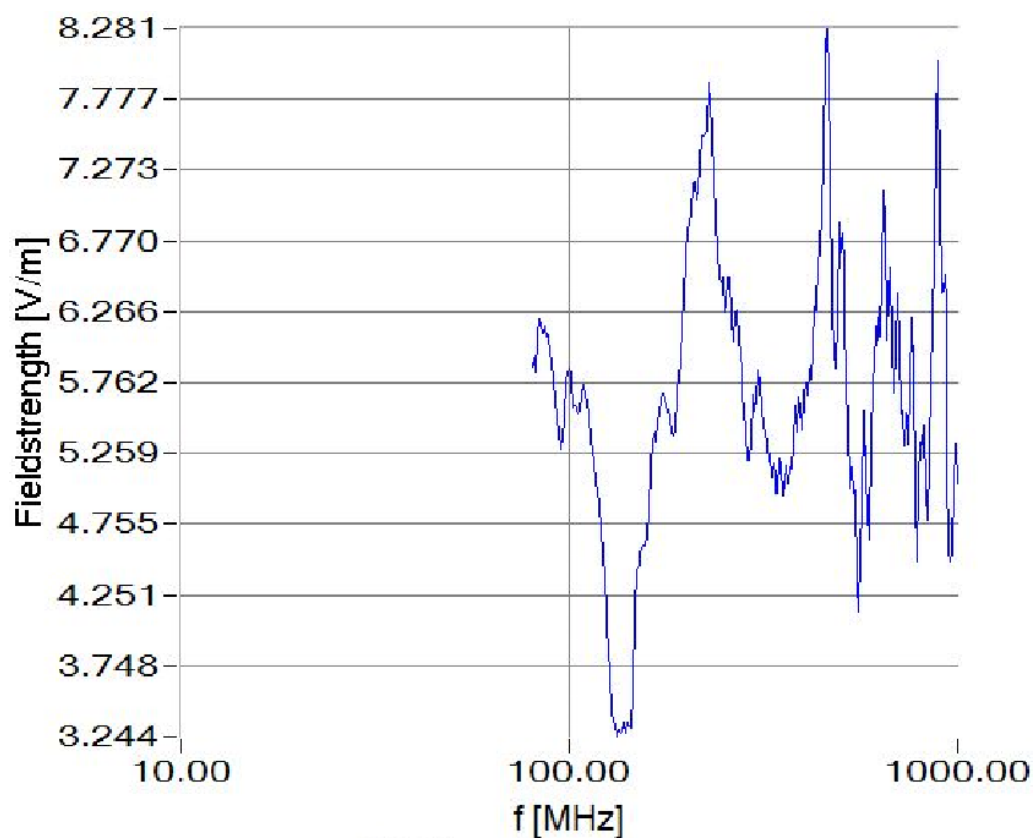
Obr. G4 Vedlejší vyhodnocovací komora na ZČU v Plzni.

Příloha H – Bezodrazová měřicí komora firmy Frankonia.

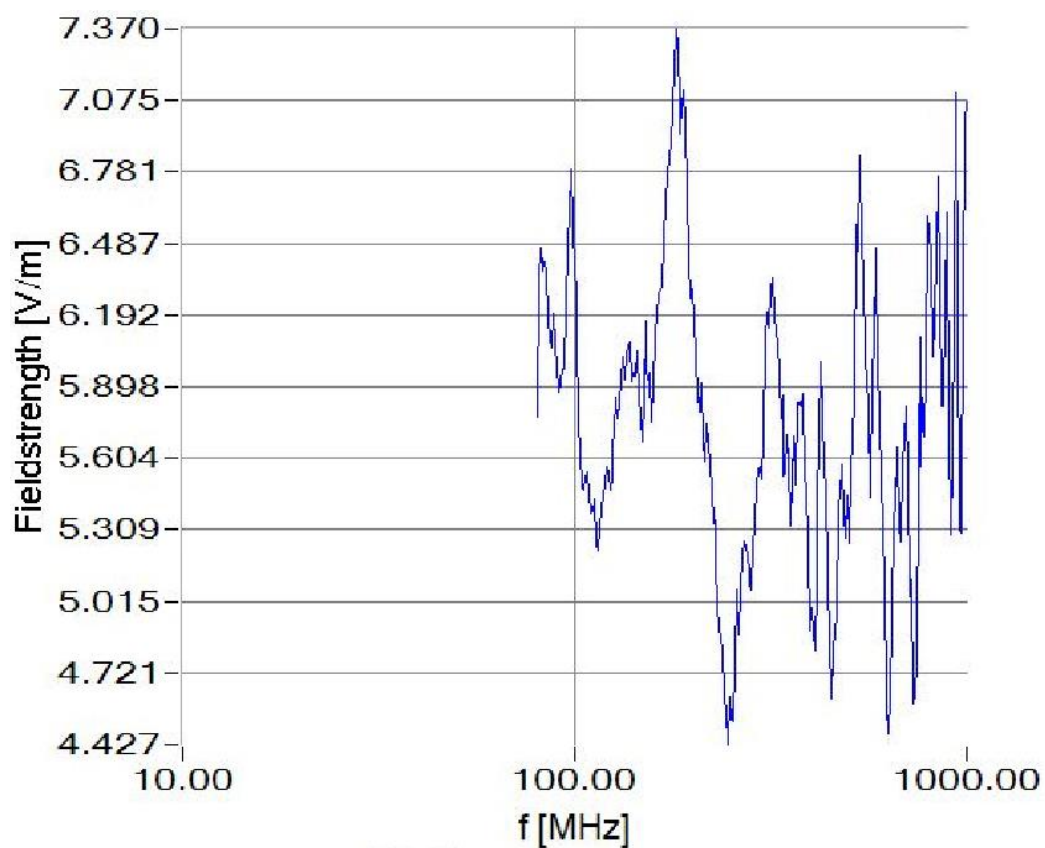


Obr. H1 Bezodrazová měřicí komora firmy Frankonia, převzato z [13].

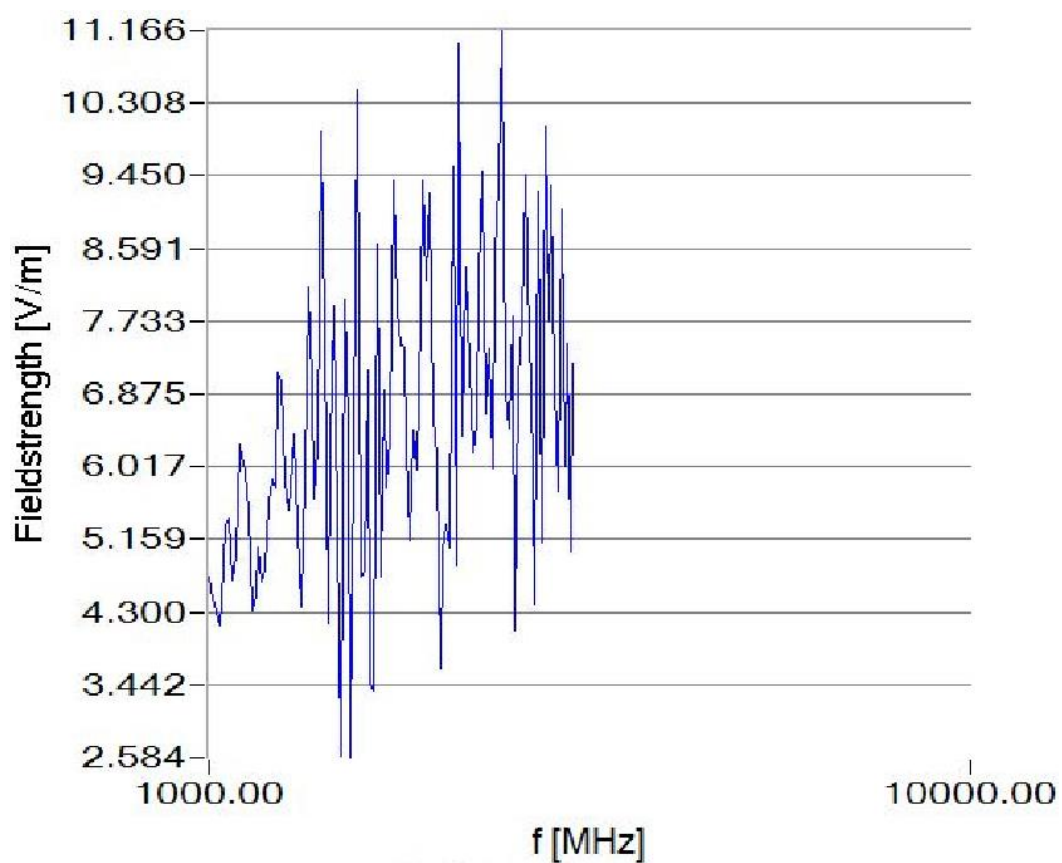
Příloha CH – Příklady naměřených průběhů.



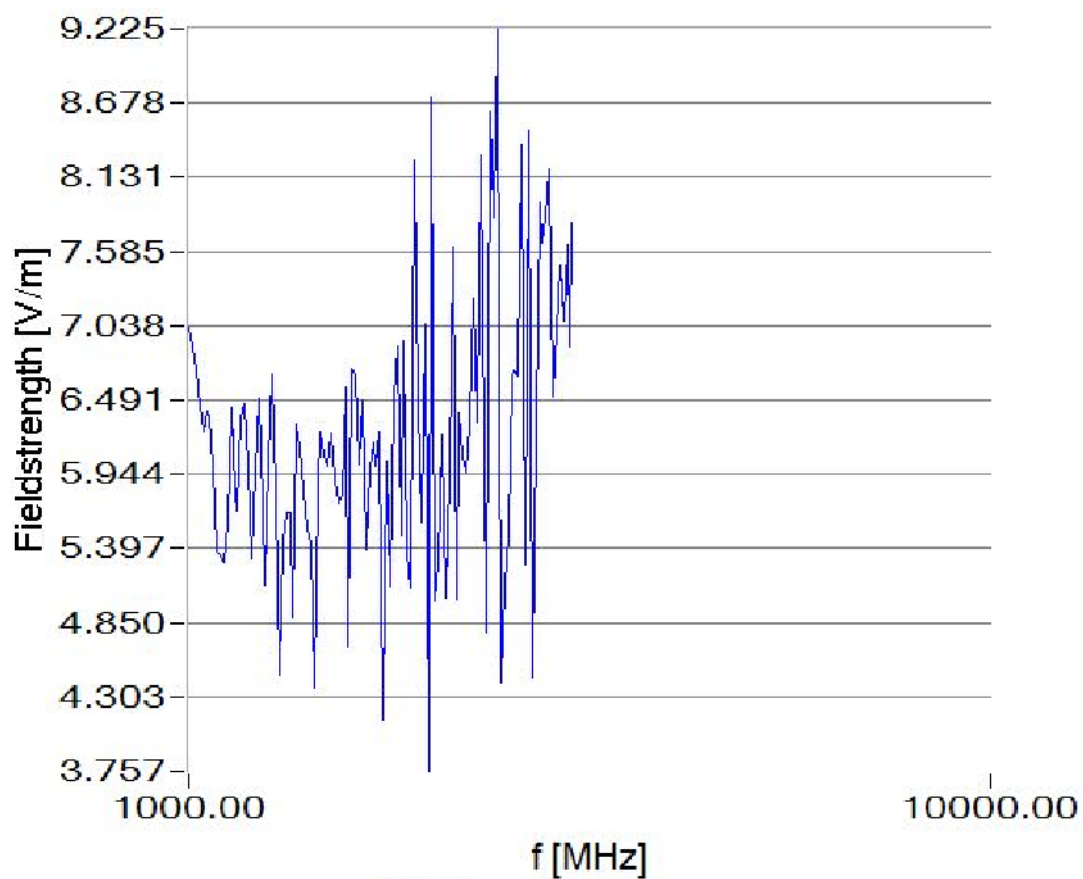
Obr. CH1 Naměřený průběh intenzity elektrického pole [V/m] v měřící poloze sondy 3 v závislosti na frekvenci v rozsahu od 80 MHz do 1 GHz při horizontální polarizaci antény.



Obr. CH2 Naměřený průběh intenzity elektrického pole [V/m] v měřící poloze sondy 5 v závislosti na frekvenci v rozsahu od 80 MHz do 1 GHz při vertikální polarizaci antény.



Obr. CH3 Naměřený průběh intenzity elektrického pole [V/m] v měřící poloze sondy 6 v závislosti na frekvenci v rozsahu od 1 GHz do 3 GHz při horizontální polarizaci antény.



Obr. CH4 Naměřený průběh intenzity elektrického pole [V/m] v měřicí poloze sondy 7 v závislosti na frekvenci v rozsahu od 1 GHz do 3 GHz při vertikální polarizaci antény.