



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií ■

Návrh stínicí stěny pro elektromagnetickou odolnost

Diplomová práce

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Autor práce: **Bc. Aleš Jerie**

Vedoucí práce: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechatronics, Informatics
and Interdisciplinary Studies ■

Design of electromagnetic shielding for electromagnetic immunity

Master thesis

Study programme: N2612 – Electrical engineering and informatics

Study branch: 3906T001 – Mechatronics

Author: **Bc. Aleš Jerie**

Supervisor: Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.





Zadání diplomové práce

Návrh stínicí stěny pro elektromagnetickou odolnost

Jméno a příjmení: **Bc. Aleš Jerie**
Osobní číslo: M19000171
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku elektromagnetického stínění.
2. Pomocí software Comsol Multiphysics vytvořte model stínicí stěny a optimalizujte její vlastnosti do určeného prostoru.
3. Navrhněte a realizujte stínicí stěnu a její parametry porovnejte se simulacemi.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40–50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility [i.e. compatibility]: přednášky*. Vyd. 2. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2005. ISBN 80-214-2864-3.
- [2] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [3] WILES, M., KRIZ, A.: *Multi-purpose Anechoic chamber, EMC to antenna measurements*, EMC Zurich 2005, ISBN 3-9521199-9-7.
- [4] ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 (333432): *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.

Vedoucí práce:

Ing. Lubomír Slavík, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

14. května 2021

Bc. Aleš Jerie

Abstrakt

Tato práce obsahuje problematiku testování elektromagnetické kompatibility. Konkrétně se jedná o testování elektromagnetické odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli. Součástí práce je i teoretický rozbor šíření elektromagnetického záření a teorie bezodrazových komor včetně materiálů pohlcujících elektromagnetické záření. Jsou popsány dále použité konkrétní absorbéry. Pro splnění požadavků normy ČSN-EN-61000-4-3 bylo navrženo a vytvořeno měřicí pracoviště. Pro návrh a optimalizaci měřicího pracoviště posloužily simulace v programu Comsol Multiphysics. Tyto simulace byly následně porovnány s reálnými měřeními. Měření i simulace proběhly s bikonickou i logaritmicko periodickou anténou ve vertikální i horizontální polarizaci. Výsledné konfigurace se liší v umístění antény.

Klíčová slova: EMC, elektromagnetická kompatibility, elektromagnetická odolnost, norma, vyzařované elektromagnetické pole, bezodrazová komora, absorbér, Comsol

Abstract

This thesis deals with electromagnetic compatibility testing. Specifically deals with radiated high-frequency electromagnetic field immunity testing. The thesis also includes a theoretical analysis of the propagation of electromagnetic radiation and the theory of anechoic chambers, including materials absorbing electromagnetic radiation. The specific absorbers description is included. To meet the requirements of the ČSN-EN-61000-4-3 standard, a measuring workplace was designed and created. Simulations in the software Comsol Multiphysics were used to design and optimize the measuring workplace. These simulations were then compared with real measurements. Measurements and simulations were performed with biconical and logarithmic periodic antennas in vertical and horizontal polarization. The result configurations differ in the location of the antenna.

Keywords: EMC, electromagnetic compatibility, electromagnetic immunity, standard, radiated electromagnetic field, anechoic chamber, absorber, Comsol

Poděkování

Rád bych poděkoval rodině podporu při studiu a zpracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Lubomíru Slavíkovi Ph.D. za konzultace a rady při vytváření této práce. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat společnosti ABEGU, a.s. za zapůjčení absorberů, bez kterých by nebylo možné tuto práci prakticky odměřit.

Obsah

Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Seznam zkratek	12
Seznam proměnných	13
Úvod	14
1 Elektromagnetická kompatibilita	15
1.1 Elektromagnetická odolnost	17
1.1.1 Zkouška odolnosti proti vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole	18
2 Šíření elektromagnetického vlnění	23
2.1 Maxwellovy rovnice	24
2.1.1 První Maxwellova rovnice	24
2.1.2 Druhá Maxwellova rovnice	24
2.1.3 Třetí Maxwellova rovnice	24
2.1.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice	25
2.2 Vlnová rovnice	25
3 Teorie bezodrazových komor	27
3.1 Absorpční materiál	28
3.1.1 Konstrukce absorberů	28
3.1.2 Absorbéry Frankosorb®	30
3.2 Konstrukce komor	30
4 Návrh bezodrazové stěny	32
4.1 Realizace bezodrazové stěny	34
5 Simulace v Comsol multiphysic	36
5.1 Simulace s bikonickou anténou	37
5.2 Simulace s log-periodickou anténou	41
6 Měření a porovnání se simulacemi	44
6.1 Měřicí přístroje	44
6.2 Měření s bikonickou anténou	45
6.2.1 Horizontální polarizace	45

6.2.2	Vertikální polarizace	48
6.3	Simulace úspěšných konfigurací s bikonickou anténou	49
6.3.1	Horizontální polarizace	50
6.3.2	Vertikální polarizace	51
6.4	Měření s log-periodickou anténou	52
6.4.1	Horizontální polarizace	53
6.4.2	Vertikální polarizace	54
6.5	Shrnutí výsledků měření	56
	Závěr	58
	Použitá literatura	59
	Seznam příloh	60

Seznam obrázků

1.1	Základní řetězec EMC [4]	16
1.2	Příklad vhodného uspořádání zkušebny [5]	19
1.3	Antény zleva bikonická, log-periodická, bi-log a trychtýřová [14] [15] [16] [17]	20
1.4	Plocha homogenního pole s vyznačenými kalibračními body (modře)	21
2.1	Tvar elektromagnetické vlny [20]	26
3.1	Vrstvený absorbér	29
3.2	Jehlanový absorbér	29
3.3	Plně bezodrazová komora od firmy Frankonia [22]	31
3.4	Částečně bezodrazová komora od firmy Frankonia [24]	31
4.1	Půdorys místnosti určené pro testování	32
4.2	Reálný vzhled místnosti	33
4.3	Grafický návrh bezodrazových stěn	35
4.4	Reálný vzhled bezodrazových stěn	35
5.1	Geometrie fyzikálního modelu v COMSOL včetně bodů zájmu (zeleně)	37
5.2	Intenzita elektrického pole ze simulace 7 pro frekvenci 110 MHz, dole rovina homogenního pole	39
5.3	Intenzita elektrického pole ze simulace 7 pro frekvenci 190 MHz, dole rovina homogenního pole	40
5.4	Reálný vzhled (vlevo) a model log-periodické antény LP 04	42
5.5	Model s log-periodickou anténou včetně vypočtených úrovní intenzity elektrického pole pro frekvenci 400 MHz	42
5.6	Intenzita elektrického pole pro model s log-periodickou anténou pro frekvenci 300 MHz, dole rovina homogenního pole	43
6.1	Měřicí schéma s bikonickou anténou	45
6.2	Intenzity elektrického pole pro problematické frekvence druhé kalibrace	46
6.3	Relativní úroveň intenzity elektrického pole pro všech 16 bodů třetí kalibrace s bikonickou anténou v horizontální polarizaci	47
6.4	Úspěšná konfigurace pro měření s bikonickou anténou v horizontální polarizaci (šesté měření)	48
6.5	Srovnání grafů relativních odchylek měření a simulace pro 12 bodů, horizontální polarizaci BC 01	50

6.6	Srovnání grafů relativních odchylek měření a simulace pro 12 bodů, vertikální polarizaci BC 01	52
6.7	Konfigurace pro měření s log-periodickou anténou v horizontální polarizaci (čtvrté měření)	53
6.8	Relativní úroveň intenzity elektrického pole pro 12 bodů (bez horní řady) páté kalibrace s log-periodickou anténou v horizontální polarizaci	54
6.9	Měřicí konfigurace s log-periodickou anténou ve vertikální polarizaci (první konfigurace)	55

Seznam tabulek

1.1	Zkušební úrovně vyzařovaného vysokofrekvenčního elektromagnetického pole [5]	16
4.1	Výpis prvních rezonančních frekvencí místnosti v MHz	34
5.1	Možnosti optimalizace	36
5.2	Výsledky simulací s bikonickou anténou v horizontální polarizaci . . .	38
6.1	Seznam přístrojů	44
6.2	Srovnání výsledků měření a simulace horizontální polarizace s BC 01	51
6.3	Srovnání výsledků měření a simulace vertikální polarizace s BC 01 . .	51
6.4	Nejlepší zjištěné konfigurace	56

Seznam zkratek

TUL	Technická univerzita v Liberci
FM	Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií Technické univerzity v Liberci
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
EUT	Equipment under test (Zkoušené zařízení)
DUT	Device under test (Zkoušené zařízení)
IEC	International Electrotechnical Commission (Mezinárodní elektrotechnická komise)
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
CDN	Coupling-Decoupling Network (Vazební a oddělovací obvod)
TEM	Transverse Electro-Magnetic cell (Odstíněná měřicí komora s příčnou elektromagnetickou vlnou)
GTEM	Gigahertz Transverse Electro-Magnetic cell (Vysokofrekvenční odstíněná měřicí komora s příčnou elektromagnetickou vlnou)
UFA	Uniform Field Area (Plocha homogenního pole)
AM	Amplitudová Modulace
GSM	Groupe Spécial Mobile (Telekomunikační standard)
USB	Universal Serial Bus (Univerzální sériová sběrnice)
PC	Personal Computer (Osobní počítač)
RAM	Random Access Memory (Paměť s náhodným přístupem používaná jako operační paměť v PC)
GB	Giga Byte (Jednotka paměti)
GPIB	General Purpose Interface Bus (Sběrnice pro měřicí a zkušební přístroje)
CD	Compact Disc (Optický disk pro ukládání dat)

Seznam proměnných

Veličina	Název veličiny	Jednotka
t	Čas	s
l	Délka	m
S	Plocha	m ²
v	Rychlost	m/s
F	Síla	N
Q	Elektrický náboj	C
U	Elektrické napětí	V
I	Elektrický proud	A
Z	Elektrická impedance	Ω
P	Výkon	W
f	Frekvence	Hz
c	Rychlost světla $\approx 3 \cdot 10^8$	m/s
λ	Vlnová délka	m
E	Intenzita elektrického pole	V/m
D	Elektrická indukce	C/m ²
P	Elektrická polarizace	C/m ²
B	Magnetická indukce	T
H	Intenzita magnetického pole	A/m
M	Magnetizace	A/m
ε_r	Relativní permitivita	
ε₀	Permitivita vakua $\approx 8,854 \cdot 10^{-12}$	F/m
μ_r	Relativní permeabilita	
μ₀	Permeabilita vakua $= 4\pi \cdot 10^{-7}$	H/m
ρ	Objemová hustota náboje	C/m ³
J	Proudová hustota	A/m ²
σ	Konduktivita (Měrná elektrická vodivost)	S/m
Ψ	Elektrický indukční tok	C
Φ	Magnetický indukční tok	Wb
K_S	Koeficient stínění	
SE	Efektivita stínění (Shielding Effectiveness)	dB
RL	Útlum odrazu (Return Loss)	dB

Úvod

V této diplomové práci se zabývám problematikou testování elektromagnetické kompatibility. Konkrétně se jedná o testování elektromagnetické odolnosti proti účinkům vyzařovaného vysokofrekvenčního elektromagnetického pole. Cílem bylo seznámit se s normovaným způsobem testování, vytvořit numerické simulace v programu Comsol Multiphysics a dle závěrů z těchto simulací navrhnout a vytvořit elektromagneticky bezodrazovou stěnu pro konkrétní prostor a konkrétní vyzařovací antény. Prakticky nejčastější metodou je použití bezodrazové komory. Taková bezodrazová komora je ovšem velkou investicí, a proto jsem se pokusil vytvořit vyhovující pracoviště pro předcertifikační měření výrobků. Cílem tedy bylo vytvořit pracoviště s co nejlepší homogenitou intenzity elektrického pole v širokém spektru frekvencí. Jednalo se o frekvence 80 až 1 000 MHz. Posledním cílem bylo změřit reálné pracoviště a porovnat výsledky s výsledky simulací. V reálných podmínkách je vyzařované vysokofrekvenční rušení generováno širokým spektrem vysílačů, jako je rádio a televize. Celkově je v dnešní době snaha dělat veškeré technologie bezdrátové. Zároveň je nutné výrobky testovat, protože z důvodů snižování pracovních napětí a zvyšování pracovních frekvencí elektromagnetická odolnost výrobků klesá. Vzhledem k těmto důvodům bude tato zkouška získávat na důležitosti.

1 Elektromagnetická kompatibilita

Tuto problematiku lze rozdělit na Elektromagnetickou kompatibilitu biologických systémů a technických systémů. EMC biologických systémů spočívá v reakci živého organismu (nejen člověka) na elektromagnetické záření. Vlivy na biologický materiál nejsou do dnešní doby jednoznačně známé. Nejlépe zdokumentované jsou tepelné účinky, kterých využívá například mikrovlnná trouba. Limity elektromagnetických polí působící na lidský organismus jsou v České republice regulovány nařízením vlády č. 291/2015 Sb.

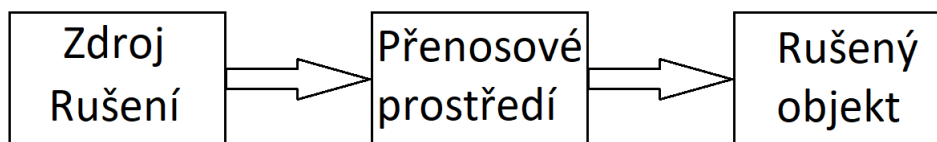
Druhou částí je elektromagnetická kompatibilita technických systémů. Elektromagnetická kompatibilita je vlastnost přístroje. Zařízení, které je funkční ještě nemusí být elektromagneticky kompatibilní. Nekompatibilita by mohla v extrémních případech znamenat ztrátu na lidských životech jako je třeba pád letadla. Například roku 1984 došlo k pádu stíhacího letounu Tornado. Automatický systém řízení letadla selhal při přeletu nad vysílačem v Holzkirchenu u Mnichova. Letoun proletěl ve výšce 230 metrů rychlostí 800 km/h. Zemřeli oba členové posádky a škoda byla vyčíslena na 100 miliónů marek [1] [2].

V dnešní době je tento problém stále aktuálnější, protože se snižují pracovní napětí procesorů a jejich frekvence se zvyšují. Důsledkem je nižší odstup signálu od šumu (SNR). Vztah je uveden v rovnici 1.1, kde P značí výkon.

$$SNR_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}} \right) \quad (1.1)$$

Zařízení je elektromagneticky kompatibilní pokud svou činností nevytváří příliš velké rušení, které by ovlivňovalo jiné zařízení a zároveň je proti určitému druhu rušení odolné. Z toho také plyne, že nesmí vytvářet větší rušení než je jeho vlastní odolnost. Z této definice plyne základní dělení problematiky na **elektromagnetickou susceptibilitu (odolnost)** a **elektromagnetickou interferenci (rušení)** [3].

Při řešení problémů EMC se využívá základní řetězec (Obr. 1.1), který je platný pro technické i biologické systémy. Zdroj rušení, prostření, což je obvykle vzduch a vodiče, a rušený objekt. Přenos lze vylepšit přidáním filtrů na vedení a stíněním zdroje rušení i přijímače rušení. Dále závisí na návrhu zdroje a rušeného objektu. Tato problematika je velmi komplexní. Návrh a odrušení výrobku nejsou tématem této práce.



Obrázek 1.1: Základní řetězec EMC [4]

Úroveň odolnosti a úroveň rušení je pro určitý typ zařízení přesně daná v normách věnovaných EMC. V normě věnované určitému zařízení (například zdravotnické zařízení) si výrobce najde normy, podle kterých musí testovat. V těchto normách nalezne odpovídající úrovně odolnosti i rušení a také různé vyhodnocení zkoušky. Následně musí své zařízení podle těchto norem otestovat v akreditované zkušebně.

Úrovně rušení

Úrovně rušení pro testování odolnosti jsou označeny číselně 1 až 4, kde jedna značí nejnižší úroveň rušivého signálu a 4 nejvyšší. Dále je uvedena úroveň X, která značí zvláštní úroveň, která může být vyšší, nebo se může nacházet mezi některými číselnými úrovněmi. Například zvláštní úroveň pro zdravotnická zařízení je 28 V/m, což souvisí s bezpečnostními limity pro člověka.

Například pro normu ČSN EN 61000-4-3, která se věnuje odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli, jsou tyto úrovně uvedeny v tabulce 1.1.

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

Tabulka 1.1: Zkušební úrovně vyzařovaného vysokofrekvenčního elektromagnetického pole [5]

Vyhodnocení zkoušky

Vyhodnocení zkoušky jsou klasifikovány podle ovlivnění zařízení. Používají se 4 třídy označené písmeny A až D, kde A značí nejmenší ovlivnění výrobku a D největší [1].

- **A** - Normální funkce výrobku nebyla ovlivněna.
- **B** - Dočasná ztráta nebo zhoršení normální funkce výrobku. Obnovení normálního stavu bez zásahu člověka.

- **C** - Dočasná ztráta nebo zhoršení normální funkce výrobku. Pro obnovení normálního stavu je nutný zásah člověka.
- **D** - Nevratná ztráta nebo nevratné zhoršení normální funkce výrobku. Poškození výrobku, programu nebo došlo ke ztrátě dat.

1.1 Elektromagnetická odolnost

V této části se věnuji nejčastějším způsobům testování elektromagnetické odolnosti (EMS). Mohou nastat jevy lišící se četností výskytu, frekvencemi, velikostmi napětí, dobou trvání atd. Věnuji se testům klasických průmyslových a domácích zařízení. Například automobily mají speciální požadavky a z nich vyplývající normy pro testování elektromagnetické odolnosti.

Zkouška odolnosti proti elektrostatickému výboji

Tato zkouška simuluje elektrostatický výboj, který může vzniknout například dotykem lidské ruky s jiným potenciálem, než má testovaný výrobek. Metodika zkoušky je popsána v normě ČSN EN 61000-4-2. Zkouška se dělí na vzduchový výboj a kontaktní výboj. Tyto dvě kategorie mají i odlišné zkušební úrovně, které začínají na 2 kV a končí na 15 kV. Tento výboj je krátký (asi 60 ns) a má relativně malou energii. Při testování se vybírá místo s možností největšího ovlivnění výrobku. Tyto testovací místa určuje testující technik a následně jsou uvedeny v protokolu o zkoušce [6].

Zkouška odolnosti proti rychlým přechodovým jevům

Pomocí této normy (ČSN EN 61000-4-4) se výrobky testují proti rychlým přechodovým jevům. Tyto jevy se též nazývají Burst. Jedná se o skupinu krátkých impulzů s velkou amplitudou a nízkou energií. Tento typ rušení vzniká v síti při přechodových jevech v průběhu spínání indukčních zátěží. Pulz se také někdy označuje jako 5/50 ns, což značí náběžnou hranu délky 5 ns a trvání celého pulzu 50 ns. Amplituda napětí je v tomto případě dána požadovanou úrovní rušení od 500 V do 4 kV [7].

Zkouška odolnosti proti rázovému impulzu

Rázový impulz může v elektrické rozvodné síti nastat například při zkratu způsobujícím oblouk nebo při úderu blesku. Této zkoušce se věnuje norma ČSN EN 61000-4-5. Jedná se o pulzy s větší energií, které jsou v rámci zkoušky odděleny několika sekundami. Rázový impulz se označuje 1,2/50 μ s, což je stejné značení jako u předchozí zkoušky. Náběžná hrana o délce 1,2 μ s a délka pulzu 50 μ s. Hodnota amplitudy napětí se pohybuje od 500 V do 4 kV [8].

Zkouška odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Tato zkouška se zabývá testováním výrobku proti vysokofrekvenčnímu rušení, které se indukuje na vedení. Toto rušení je ekvivalentní s rušením od vysílacích antén. Frekvence v této normě se pohybuje s krokem 1 % od 150 kHz do 80 MHz, úroveň rušení je od 1 do 10 V s tím, že je toto napětí amplitudově modulováno frekvencí 1 kHz s hloubkou modulace 80 % [9].

Zkouška odolnosti proti účinkům magnetického pole

Odolnosti proti účinkům magnetického pole se věnují normy ČSN EN 61000-4-8 (pole síťového kmitočtu) a ČSN EN 61000-4-9 (pulzy magnetického pole). Jelikož se nachází magnetické pole v okolí každého vodiče, kterým protéká proud, tak asi nemá příliš význam vysvětlovat příčiny této zkoušky. Zkušební úrovně magnetického pole síťového kmitočtu se pohybují od 1 A/m do 100 A/m a hodnoty pulzního pole jsou desetinásobné (tedy až 1 000 A/m) [3].

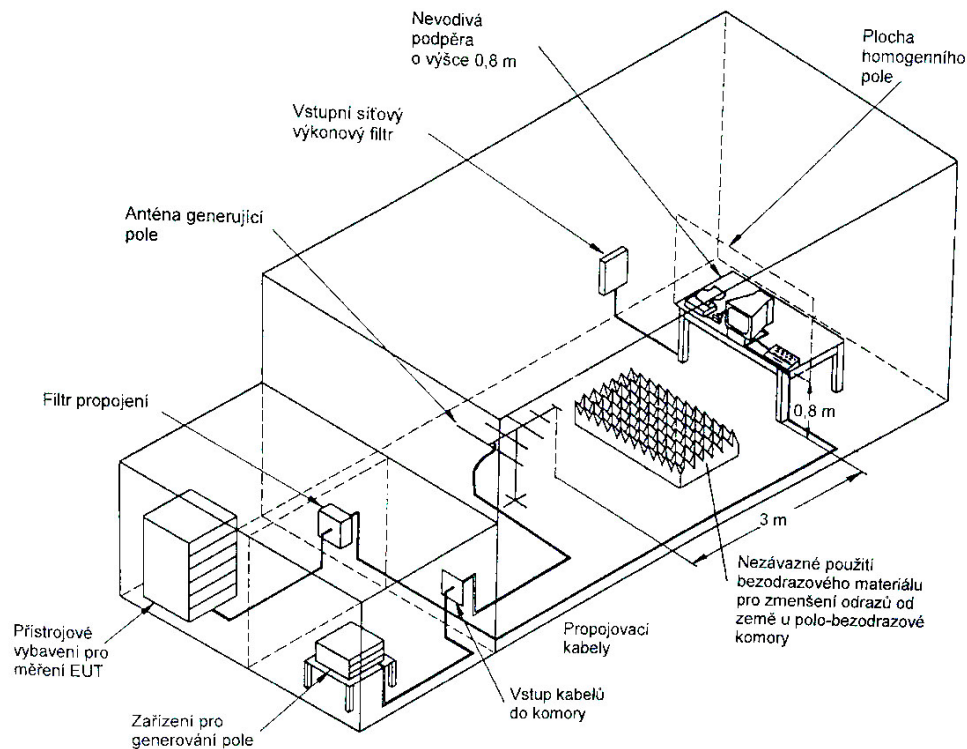
Zkouška odolnosti proti poklesům a přerušení napájení

V průběhu této zkoušky se ověřuje reakce výrobku na poklesy a výpadky napájecího napětí. Metodika zkoušky je popsána v normě ČSN EN 61000-4-11. Zkušební úrovně jsou rozděleny na výpadky a přerušení. Jelikož se jedná především o výrobky připojené do sítě, tak je doba přerušení udávána v násobcích periody. Pro uvedení stejného času pro rozvodnou síť s 60 Hz jsou uvedena 2 čísla (například 70 % napětí po dobu 25/30 period). Další komplikací může být testování třífázové sítě, kde se mohou zkoušet jak varianta s poklesem (přerušením) jedné fáze tak i varianta s více fázemi [10].

1.1.1 Zkouška odolnosti proti vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole

Této zkoušce se budu věnovat trochu víc než ostatním, protože je to zkouška, pro kterou jsem optimalizoval bezodrazovou stěnu. Tato zkouška souvisí se zkouškou odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli. Hlavní rozdílem je způsob injektování a jiný frekvenční rozsah. Rušení je realizováno pomocí antény (případně sestavy více antén), která je standardně umístěna 3 metry od testovaného zařízení. Význam této zkoušky se zvýšil s příchodem mobilních telefonů, rádií a televizního vysílání. Frekvence vyzařovaného rušení se pohybuje od 80 MHz do 6 GHz. Spodní hranice frekvence může být vzhledem k okolnostem (například velikost testovaného zařízení) posunuta na hodnotu mezi 26 MHz a 230 MHz s podmínkou, že je zbytek rozsahu otestován injektováním do kabelů podle normy ČSN EN 61000-4-6. Horní frekvence je v základu 1 GHz. Tato hranice se může změnit podle produktové normy. Prakticky používané frekvence končí na 6 GHz, ale je velmi pravděpodobné, že s vývojem techniky se tato horní hranice bude zvyšovat.

Například pro technologii 5G se předpokládá používání frekvenčních pásem až kolem 39 GHz [5] [11] [12].



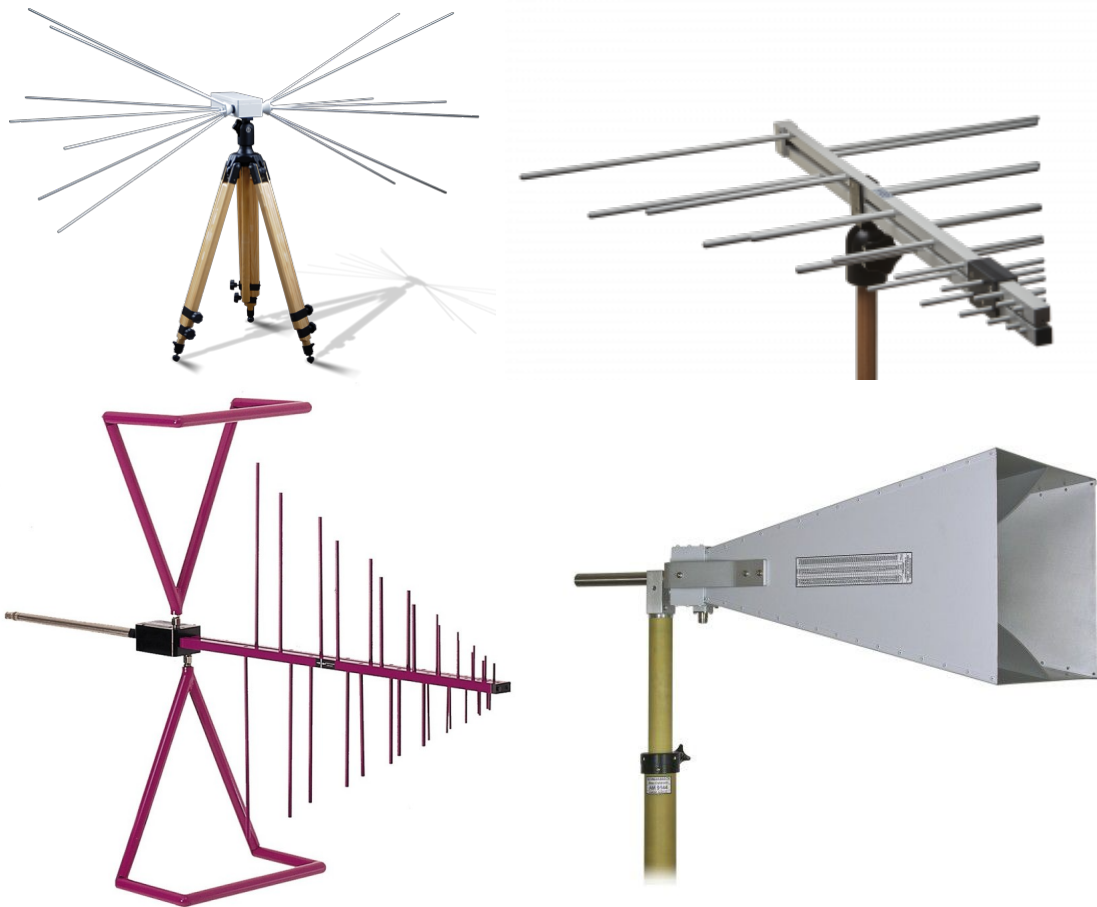
POZNÁMKA Pro zjednodušení je bezodrazové obložení stěn a stropu vynecháno

Obrázek 1.2: Příklad vhodného uspořádání zkušebny [5]

Používané antény

Pro tuto zkoušku se používají širokospektrální antény. Nejčastějšími typy jsou bikonická anténa, logaritmicko-periodická anténa a trychtýřová anténa. Každá anténa má daný svůj specifický frekvenční rozsah a svou frekvenční charakteristiku. Pro nízké frekvence (desítky až stovky MHz) se používá bikonická anténa, pro střední frekvence (stovky až tisíce MHz) logaritmicko-periodická anténa a pro vysoké frekvence (nad 1 GHz) trychtýřová anténa. Pro zlepšení těchto vlastností lze vytvořit bi-log anténu, což je spojení bikonické a logaritmicko-periodické antény. Trychtýřové antény se používají hlavně kvůli lepší směrovosti. Je pak potřeba menší výkon pro vybuzení určité úrovně elektrického pole a nedochází k interferencím z důvodu odrazů od stěn testovací místnosti. Pro speciální případy, jako je například testování armádních strojů, lze najít speciálně upravené antény s lepším ziskem a lepší směrovostí, které mají vstupní výkon v řádu kW. V případech malých zařízení je možné použít speciální komory, která je vlastně anténou. Jedná se o komory s příčným elektrickým polem tzv. TEM. V těchto komorách je pole velmi kvalitně homogenní. Testováním se zabývá norma ČSN EN 61000-4-20, ve které jsou i specifikovány

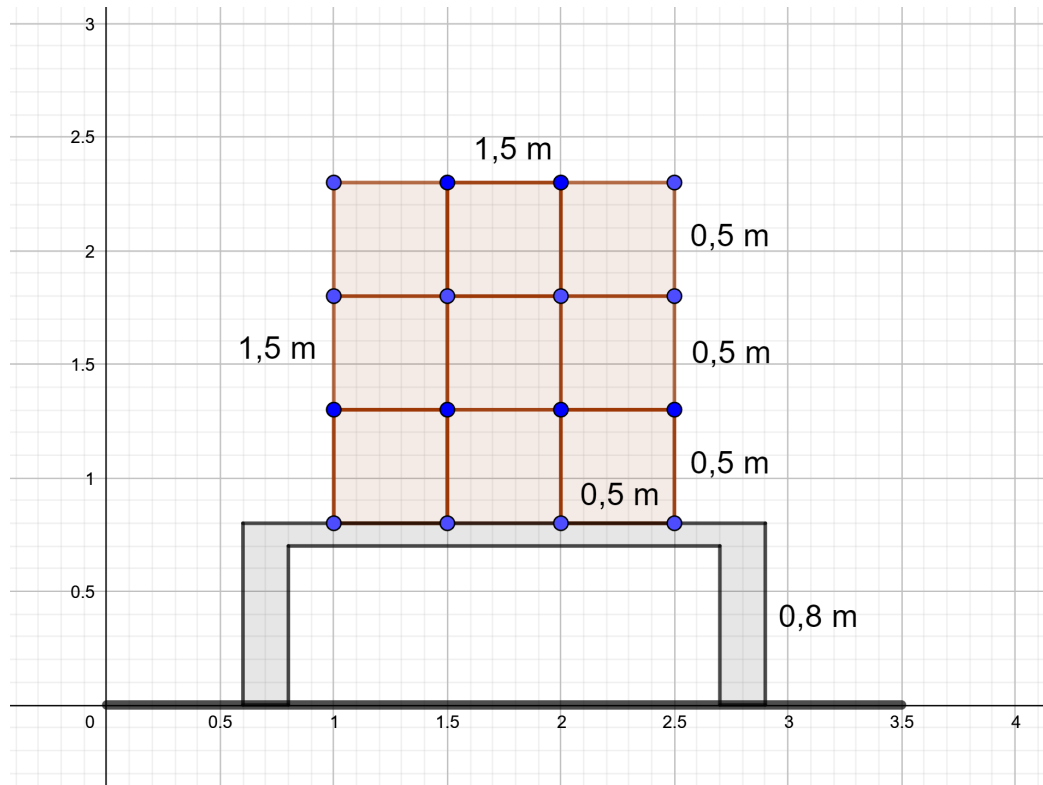
standardně používané komory. Typem s dvojitým připojením je Crawfordova komora a typem pro vyšší frekvence je GTEM, který je mimořádně umístěn v laboratoři EMC na Technické univerzitě v Liberci [5] [13].



Obrázek 1.3: Antény zleva bikonická, log-periodická, bi-log a trychtýřová [14] [15] [16] [17]

Kalibrace pole

Plocha homogenního pole (z angličtiny UFA - uniform field area) je plocha, která je určena pro testování. Tato plocha je rozdělena na pole o velikosti 0,5 x 0,5 metru, což je také nejmenší možná velikost UFA. V rozích těchto polí je měřena hodnota intenzity elektrického pole. Tímto způsobem vznikne za ploše 1,5 x 1,5 m 16 měřicích bodů. Dále existují dvě metody kalibrace tohoto pole. Lze nastavovat stále stejnou hodnotu elektrického pole a odečítat hodnotu výkonu do antény, nebo je možné zanechat konstantní hodnotu výkonu a odečítat hodnotu elektrického pole. Tato metoda se mi zdá snazší a rychlejší, protože není nutné stále regulovat hodnotu elektrického pole. Stačí pouze posunout sondu elektrického pole do dalšího měřicího místa a opakovat měření [5].



Obrázek 1.4: Plocha homogenního pole s vyznačenými kalibračními body (modře)

Z naměřených hodnot intenzit elektrického pole jsou dopočítány hodnoty v decibelech (rovnice 1.2), které se porovnávají. Maximální relativní odchylka od nejnižší hodnoty je ${}_{+6}^{-0}dB$. V tomto pásmu se musí nacházet alespoň 75 % měřicích bodů [5]. Ve stíněné komoře lze dosáhnout řádově lepší homogenity pole [18].

$$E_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{E_n}{E_{MIN}} \right) \quad , \text{ kde } n \text{ jsou všechny ostatní měřicí body} \quad (1.2)$$

Kalibrace se provádí s nemodulovaným signálem. Toto měření se provádí pro horizontální i vertikální polarizaci a každou frekvenci. Kalibrační frekvence se mění po maximálně 1 %. Pro kalibraci od 80 MHz do 1 GHz a 16 měřicích bodů je tedy nutné změřit 8128 hodnot intenzity elektrického pole. Samozřejmě je také nutné kontrolovat, aby nebyl zesilovač nasycen a nedocházelo ke zkreslení budícího signálu. Nenasyčení zesilovače při zkoušce lze zajistit kalibrací na 180 % požadované úrovně.

$$p = 2 m \left(\frac{\log \left(\frac{f_{MAX}}{f_{MIN}} \right)}{\log(1,01)} \right) \quad , \text{ kde } p \text{ je počet měření a } m \text{ je počet měřicích bodů} \quad (1.3)$$

Součástí kalibrace je také záznam zkušební sestavy, protože každá změna konfigurace, jako je například změna polohy bezodrazového materiálu, změna polohy antény a změna vedení kabelů, má výsledný vliv na intenzitu elektrického pole.

Po kalibraci můžeme přejít k vlastnímu testování. Aby nebylo nutné pro každou testovací úroveň dělat další kalibraci, tak z veličin z kalibrace (výkon generátoru P_{cal} a intenzita elektrického pole E_{cal}) lze dopočítat potřebný výkon generátoru (P) pro požadovanou úroveň elektrického pole (E). Tak jak to uvádí vzorec 1.4 [3].

$$P = P_{cal} \left(\frac{E}{E_{cal}} \right)^2 \quad (1.4)$$

Testované zařízení musí být menší, než je plocha homogenního pole a čelní stěna zařízení musí být umístěna v ploše homogenního pole. Pro testování se původní průběh napětí ještě moduluje frekvencí 1 kHz amplitudovou modulací o hloubce 80 %. Někdy se používá pulzní modulace nebo složitější modulace jako je třeba GSM.

2 Šíření elektromagnetického vlnění

Na popis šíření bylo vymyšleno několik různých přístupů. Dnes nejpokročilejším a samozřejmě také nejsložitějším přístupem je kvantový popis elektromagnetického vlnění. Pro mé potřeby by byl tento přístup zbytečně složitý, a proto si vystačím s Maxwellovými rovnicemi, které v roce 1865 formuloval James Clerk Maxwell. Dále lze říct, že při průchodu prostředím se část energie odrazí, část se pohltí a část projde. Jednotlivé díly závisí na tloušťce a materiálu prostředí.

Před popisem Maxwellových rovnic je dobré zmínit používané veličiny. Základními veličinami jsou nepochybně vektory intenzity elektrického pole \mathbf{E} [V/m] a magnetické indukce \mathbf{B} [T]. K těmto dvěma veličinám patří vektory elektrické indukce \mathbf{D} [C/m²] a intenzity magnetického pole \mathbf{H} [A/m], pro které platí:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot \vec{E} + \vec{P} \quad , \text{ kde } \epsilon \text{ jsou permitivity (vakua a relativní) a } \vec{P} \text{ je polarizace} \quad (2.1)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \cdot \mu_R} - \vec{M} \quad , \text{ kde } \mu \text{ jsou permeability (vakua a relativní) a } \vec{M} \text{ je magnetizace} \quad (2.2)$$

Permitivita vakua je konstanta viz 2.3 a relativní permitivita je dána materiálem. Relativní permitivita značí schopnost prostředí polarizovat se. Při větší permitivitě dochází k většímu útlumu elektromagnetické vlny [19].

Obdobně permeabilita vakua je konstantou (viz 2.4) a relativní permeabilita je vlastnost materiálu, která vyjadřuje míru schopnosti magnetizace. Z tohoto hlediska dělíme materiály na diamagnetické ($\mu_R < 1$), paramagnetické ($\mu_R > 1$) a feromagnetické ($\mu_R \gg 1$).

Je také nutné podotknout, že u reálných materiálů jsou obě tyto hodnoty (ϵ_R a μ_R) frekvenčně závislé.

$$\epsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2.3)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.4)$$

Pro nadefinování Maxwellových rovnic budeme potřebovat vektor proudové hustoty \mathbf{J} [A/m²] a objemovou hustotu náboje ρ [C/m³].

2.1 Maxwellovy rovnice

Veškeré Maxwellovy rovnice lze uvést v integrálním a diferenciálním tvaru. Integrální tvar popisuje elektromagnetické pole v oblasti a diferenciální tvar popisuje bod v elektromagnetickém poli. Vedle rovnic je v některých případech uveden i doplňující vztah pro použitou veličinu [19].

2.1.1 První Maxwellova rovnice

První z rovnic označována jako Ampérův zákon popisuje magnetické pole vůči elektrickému proudu. Integrální tvar nám říká, že vektor intenzity magnetického pole \vec{H} cirkulující po uzavřené křivce je dán součtem proudu stacionárního a posuvného $\frac{\partial \Psi}{\partial t}$ [19].

$$\oint_C \vec{H} \, dl = i + \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad \Psi \equiv \int_S \vec{D} \, dS \quad (2.5)$$

Diferenciální tvar je o něco průhlednější a říká, že rotace intenzity magnetického pole \vec{H} je rovna součtu vektoru proudové hustoty a časové změny vektoru elektrické indukce.

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.6)$$

2.1.2 Druhá Maxwellova rovnice

Faradayův indukční zákon je druhou Maxwellovou rovnicí. Jedná se o zákon, který se též nazývá zákonem elektromagnetické indukce. Díky tomuto zákonu se v dnešní době vyrábí většina elektrické energie.

Z integrálního tvaru je vidět, že při časové změně magnetického indukčního toku vzniká vektor intenzity elektrického pole cirkulující po uzavřené křivce l [19].

$$\oint_C \vec{E} \, dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad \Phi \equiv \int_S \vec{B} \, dS \quad (2.7)$$

Tvar diferenciální vyjadřuje rovnost rotace intenzity elektrického pole a záporně vzatou časovou změnu magnetické indukce. Tedy změnou magnetické indukce se indukuje elektrické pole.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.8)$$

Z těchto prvních dvou Maxwellových rovnic je patrné, že při změně elektrického pole vzniká vír magnetického pole a naopak při změně magnetického pole vzniká vír elektrického pole. Tyto dvě veličiny jsou tedy svázány, a proto nemluvíme zvlášť o elektřině a magnetismu, ale mluvíme přímo o elektromagnetismu [19].

2.1.3 Třetí Maxwellova rovnice

Třetí rovnicí je takzvaný Gaussův zákon elektrostatiky, který vyjadřuje vztah mezi tokem elektrické indukce a elektrickým nábojem. Tok elektrické indukce z plochy

S je roven náboji uvnitř této plochy. Případně lze využít vztahu 2.1 a se zanedbáním polarizace se D mění na E a na pravé straně rovnice 2.9 bude $\frac{Q}{\epsilon}$. Hlavním závěrem je přímá úměrnost mezi intenzitou elektrického pole a elektrickým nábojem [19].

$$\oint_S \vec{D} \, dS = Q, \quad Q \equiv \int_V \vec{\rho} \, dV \quad (2.9)$$

Rovnici lze opět převést na diferenciální tvar. Divergence (zřídlovost) intenzity elektrického pole je dána objemovou hustotou náboje.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.10)$$

2.1.4 Čtvrtá Maxwellova rovnice

Poslední a zdánlivě nejsnazší rovnicí je zákon spojitosti indukčního toku. Tato rovnice říká, že výtok vektoru magnetické indukce z uzavřené plochy je nulový.

$$\oint_S \vec{B} \, dS = 0 \quad (2.11)$$

Z diferenciálního tvaru je vidět, že magnetické pole má nulovou divergenci (zřídlovost) a tím pádem neexistuje takzvaný magnetický monopol. Tento monopol by byl nositelem magnetického náboje [19].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.12)$$

V trojrozměrném prostoru tvoří Maxwellovy rovnice systém 12 rovnic pro 6 proměnných. Proměnnými jsou 3 složky intenzity elektrického pole E a magnetické indukce B . Díky tomuto přeurčení je možné, aby výpočetní software kontroloval vlastní výpočty.

Síla v elektromagnetickém poli

Pro úplnost popisu je vhodné doplnit sílu, která působí na náboj v elektromagnetickém poli. Tato síla se nazývá Lorentzova.

$$\vec{F} = Q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (2.13)$$

2.2 Vlnová rovnice

Z výše uvedených Maxwellových rovnic je možné odvodit vlnovou rovnici. Jedná se o parciální diferenciální rovnici druhého řádu, která popisuje časový průběh elektromagnetické vlny. Pro lineární, homogenní, stacionární a izotropní prostředí platí rovnice 2.14 [19].

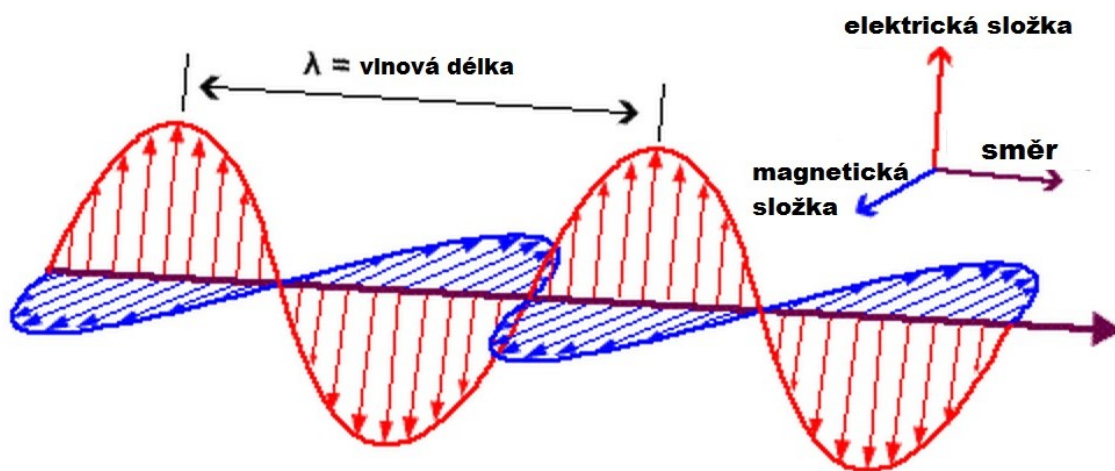
$$\Delta \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0, \quad \text{kde } \Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (2.14)$$

Za předpokladu nevodivého prostředí a šíření pouze ve směru osy z lze tuto rovnici zjednodušit na tvar 2.15.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (2.15)$$

Vlnová rovnice neplatí pouze pro vektor intenzity elektrického pole. Lze ji snadno přepsat pro elektrickou indukci, magnetickou indukci, intenzitu magnetického pole a proudovou hustotu.

Pro lepší představu šíření prostorem je vhodný obrázek 2.1. Vlnění magnetické složky (modrá) je kolmé na elektrickou složku (červená). Polarizace takového vlnění je dána směrem elektrické složky. V tomto případě se tedy jedná o vertikální polarizaci. Kromě zmíněných složek je vyznačená i vlnová délka λ .



Obrázek 2.1: Tvar elektromagnetické vlny [20]

3 Teorie bezdrazových komor

Potřeba bezdrazových komor plyne z nemožnosti měřit v otevřeném prostoru, protože i v odlehlých částech je nějaké vnější rušení (například rozhlas, TV a mobilní sítě), které by ovlivnilo měření rušení vlastního zkoušeného zařízení. Proti průchodu vnějšího rušení se tedy používá **stíněná komora**. Stínění je obvykle vytvořeno z materiálů s vysokou elektrickou vodivostí a relativní permeabilitou. Standardním a relativně levným materiálem je tedy ocelový plech. Tloušťka plechu má vliv na výsledný útlum. Důležité je brát ohled na správnou konstrukci elektromagneticky těsných dveří, ventilace, průchodů na kabely, veškerých spojů a podobně. Tyto netěsnosti velmi ovlivňují výsledný stínící efekt SE (Shielding Effectiveness). Pro malé stínění lze využít koeficient stínění K_S , který je definován jako poměr intenzity elektrického (nebo magnetického) pole bez stínění E_N a se stíněním E_S [3].

$$K_S = \frac{E_S}{E_N} = \frac{H_S}{H_N} \quad (3.1)$$

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_N}{E_S} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{H_N}{H_S} \right| \quad [dB] \quad (3.2)$$

Kvalitně vytvořená komora zajišťuje útlum 80 až 120 dB na frekvenčním rozsahu asi 5 dekád. To jest od desítek kHz do jednotek GHz.

Důležitým požadavkem je také velikost komory, která je u profesionálních EMC komor pro anténní měření $20 \times 10 \times 10$ metrů a větší.

Nicméně taková stíněná komora je dutinovým rezonátorem. Pro rozměry komory a , b , c jsou rezonanční frekvence dány vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2}, \quad m, n, p \in \mathbb{N} \quad (3.3)$$

Čísla m , n , p jsou takzvaná vidová čísla, která udávají rezonanční vid. Ve stíněné komoře je tedy problém s rezonančními frekvencemi. Další problém vzniká kvůli všesměrovému šíření elektromagnetických vln. Při tomto šíření se vlny odráží od stěn a do měřicího místa putují po různých drahách. Různé dráhy znamenají různou vzdálenost a tím i různou dobu šíření a různou fázi. V měřicím bodě se tyto vlny vektorově sečtou a může docházet k velkým chybám měření. Experimentálně je zjištěno, že takové měření může být zatíženo chybou až ± 20 dB. Zlepšení těchto vlastností lze docílit větší komorou, lepší směrovostí antény nebo obložení komory absorpčním materiálem. Tímto způsobem vznikne **bezdrazová komora** [3].

3.1 Absorpční materiál

Pro bezodrazovost bychom chtěli, aby měl absorpční materiál charakteristickou impedanci shodnou s volným prostorem. Jedná se ve své podstatě o zakončení vlnovodu charakteristickou impedancí. Při nesprávné impedanci by docházelo k odrazům od konce vedení (stěn). Pro bezztrátové prostředí (nulová elektrická vodivost) je tato impedance:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 120\pi \approx 377 \quad [\Omega] \quad (3.4)$$

Takový materiál by ovšem nepřinesl požadovaný efekt, protože by vlna prošla materiálem jako by tam nebyl a pokračovala by k odrazovému materiálu stíněné komory (plechu). Materiál musí být tedy o něco sofistikovanější. Takovou možností by mohl být materiál s nekonečnou charakteristickou impedancí. Takový materiál neexistuje, ale lze se k tomu přiblížit pomocí zkratu. Zkrat se vytvoří ve vzdálenosti $\lambda/4$ za materiálem s charakteristickou impedancí Z_0 . Z toho je patrná závislost na vlnové délce a tím na frekvenci. Tato konstrukce má tedy nulovou odrazivost pro jednu konkrétní frekvenci a opravdu funguje a používá se [3].

Jelikož jsem uvedl vlnovou délku, tak uvádím její vztah k frekvenci:

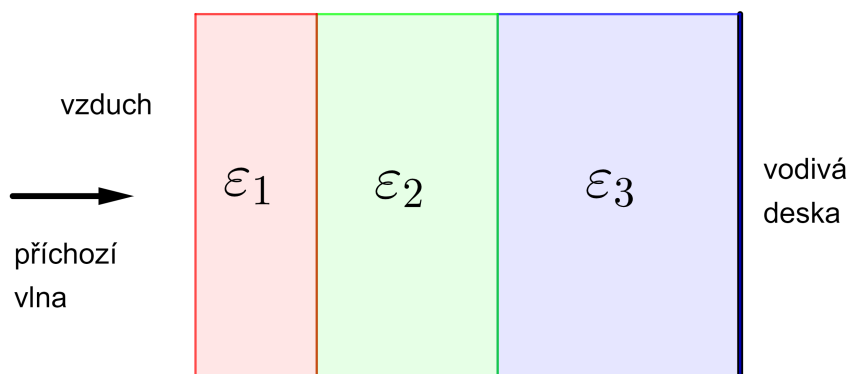
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [m] \quad , \text{ kde } c \text{ je rychlost světla} \quad (3.5)$$

3.1.1 Konstrukce absorbérů

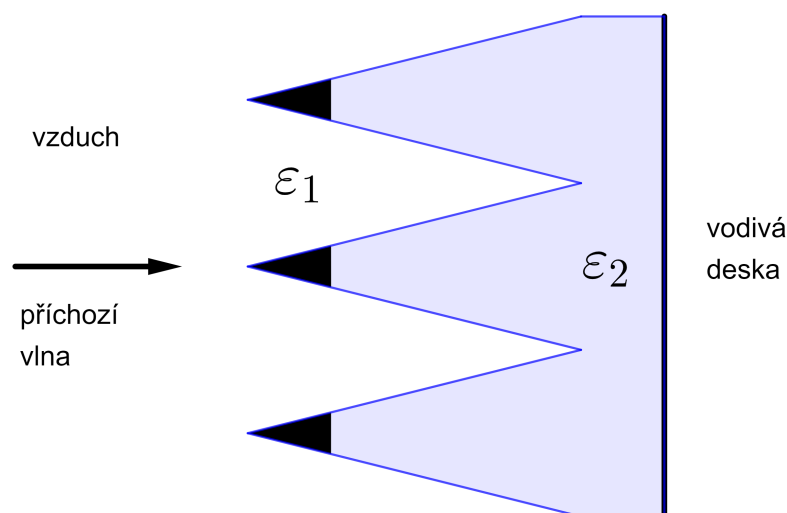
Jelikož potřebujeme přejít z charakteristické impedance vzduchu 377Ω na impedanci stínícího materiálu 0Ω a uvědomíme-li si, že při změně impedance dochází k odrazu, tak je jediným řešením postupná spojitá změna impedance. Délka tohoto impedančního přechodu musí být alespoň $\lambda_{MAX}/4$. V absorbéru dochází k dielektrickým nebo magnetickým ztrátám a pohlcená energie je přeměněna na teplo. Využívá se spíše dielektrických ztrát, protože magnetické materiály by byly drahé a těžké. Dielektrický materiál musí mít relativní permitivitu ϵ_r velmi podobnou vzduchu. Běžnými materiály jsou polystyren, polypropylen a polyuretan. Tento materiál je následně dotován elektricky vodivými přísadami, které snižují impedanci. Standardními vlastnostmi těchto absorbérů je vysoký rozsah teplot a možnost pohlcení intenzit elektrického pole až 200 V/m , což zhruba odpovídá intenzitě záření 100 W/m^2 [3].

Takto získaný materiál o určité permeabilitě a elektrické vodivosti ještě není finálním absorbérem. Finální absorbér se vyrábí buď spojením tří až pěti absorpčních vrstev na sebe, nebo vytvořením jehlanů, které ve své podstatě spojitě mění zaplnění prostoru absorpčním materiálem a tím vytvářejí lepší impedanční přechod. Pro ještě lepší přechod je možné špičku jehlanů sytit méně a spodní část naopak více. K největšímu procentu absorpce tedy dochází v plné části absorbéru.

Obě konstrukce lze vidět na obrázcích (3.1 a 3.2), kde je znázorněn směr příchozí vlny a různé permitivity materiálu. Pro obrázky platí, že $\epsilon_1 < \epsilon_2 < \epsilon_3$. V části s největší permitivitou dochází k největšímu útlumu elektromagnetického vlnění.



Obrázek 3.1: Vrstvený absorbér



Obrázek 3.2: Jehlanový absorbér

Pro srovnání různých absorbérů je ideální využít hodnotu útlumu odrazu RL (Return Loss), což je poměr odraženého a dopadajícího výkonu v decibelech.

$$RL = 10 \cdot \log \frac{P_{odr}}{P_{dop}} \quad [dB] \quad (3.6)$$

Z důvodů lepšího přechodu impedance se využívají jehlany, které se doplňují o ztrátový deskový materiál. Tyto desky mohou být i feritové (magnetické ztráty). Feritové desky jsou těžší, ale oproti polymerovým absorbérům nevyžadují tloušťku o vlnové délce $\lambda/4$. Tento fakt souvisí s relativní permitivitou a permeabilitou, protože pro charakteristickou impedanci záleží pouze na jejich poměru (viz 3.4). Je tudíž možné mít materiál se shodnou relativní permitivitou a relativní permeabilitou (například 20). Polymery s vyšší relativní permeabilitou neexistují [3].

Jehlanový absorbér s výškou jehlanu $\lambda/4$ má na frekvenci odpovídající vlnové

délce útlum asi -20 dB. Podle 3.6 to tedy značí, že odražený výkon je jedna setina původního výkonu. Samozřejmě také záleží na vrcholovém úhlu jehlanu. Při dopadu vlny do jehlanů dochází k odrazům do vedlejších jehlanů a k následnému dalšímu útlumu a tím ke zlepšení útlumu odrazu. Pro menší vrcholový úhel dochází k většímu množství odrazů a tím i lepšímu útlumu odrazu. Ovšem při menším úhlu je také složitější výroba a horší mechanická odolnost výsledného jehlanu. U reálně konstruovaných jehlanů se vrcholový úhel pohybuje kolem 25°.

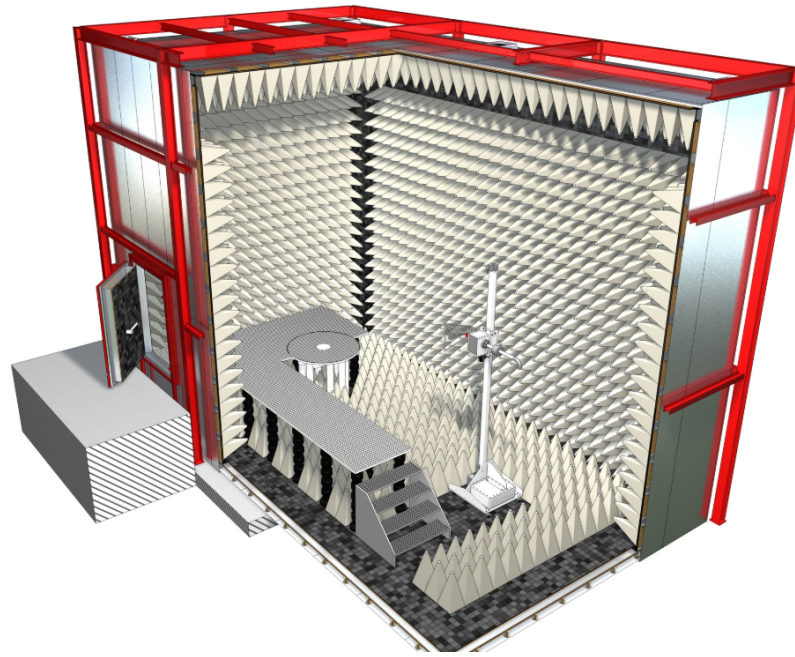
3.1.2 Absorbéry Frankosorb®

Při shánění absorbérů mi od firmy ABEGU, a.s. byly zapůjčeny absorbéry Frankosorb®, které vyrábí firma Frankonia. Jedná se o jehlany se speciální technologií absorpce, která byla vynalezena v 90. letech minulého století. Pro pohlcení elektromagnetického záření využívá tenkou vrstvu nanomateriálu. Pro zvýšení mechanické odolnosti je nanovrstva nanosená na nosný materiál a překryta skelným vláknem. Takto vyrobené absorbéry jsou tedy duté a díky tomu lépe skladovatelné (stohovatelné). Výrobce se chlubí dlouhou stálostí (nad 25 let), bezuhlíkovostí, nehořlavostí, vysokou homogenitou a snadnou montáží/demontáží (nelepené). Frekvenční rozsah je výrobcem deklarován větší než u standardních polymerových jehlanových absorbérů. Spodní frekvence začínají na 30 až 80 MHz a shora je frekvence omezena 18 až 40 GHz, což je pro mé měření mezi 80 MHz a maximálně 6 GHz zcela dostačující. Další výhodou je možnost montáže po jednom jehlanu. Půjčené jehlany mají základnu 30×30 cm, zatímco polymerové absorbéry jsou běžně v panelech 61×61 cm. Montáž těchto speciálních absorbérů je pomocí matek a závitových tyčí [21].

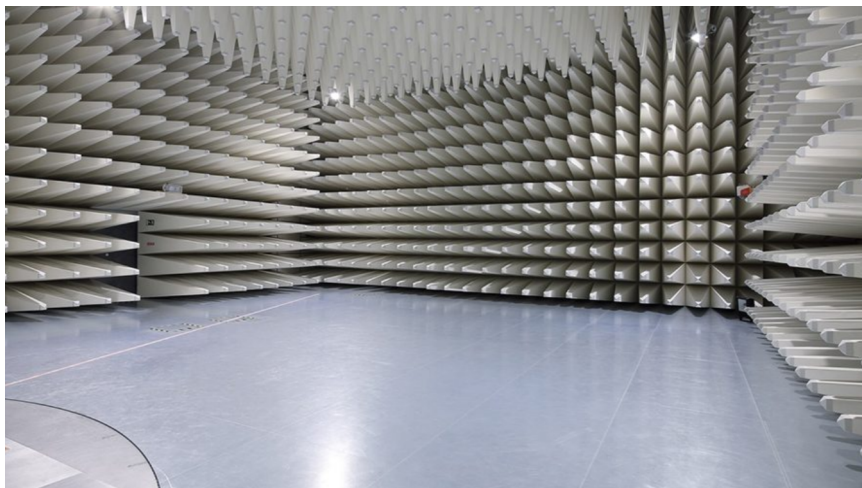
3.2 Konstrukce komor

Základem komory je stínící část, kterou běžně tvoří ocelový plech. Do stíněné komory se přidají absorbéry a vznikne plně bezodrazová nebo částečně bezodrazová komora. Plně bezodrazová komora (anglicky fully anechoic chamber) je osazena absorbéry na všech stěnách včetně podlahy. Na podlahu se tedy umísťují zpevněné ploché absorbéry nebo se jehlanové absorbéry překrývají různými můstky. Tyto můstky jsou ze speciálního materiálu, který neovlivňuje prostředí, nebo se můstky v průběhu měření z komory odstraní.

Částečně bezodrazová komora (anglicky semi anechoic chamber) je velmi podobná plně bezodrazové komoře. Jediným rozdílem je podlaha bez obložení absorbéry. Tato komora tudíž odpovídá volnému prostranství, kde je možnost odrazu od podlahy také [23].



Obrázek 3.3: Plně bezodrazová komora od firmy Frankonia [22]



Obrázek 3.4: Částečně bezodrazová komora od firmy Frankonia [24]

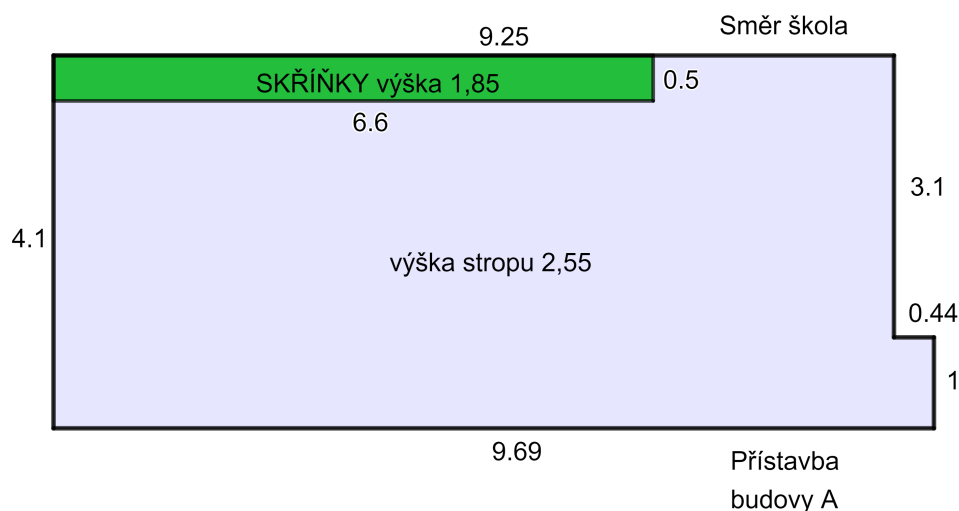
Nevýhodou takových komor je vysoká pořizovací cena a velké nároky na prostor. Absorpční materiál je velmi drahý. Pro představu se cena jehlanů pohybuje mezi 30 a 350 dolary za m^2 . Pro komoru $20 \times 10 \times 10$ metrů se jedná o 800 m^2 (bez podlahy). Pro cenu 2 000 Kč (necelých 100 dolarů) za m^2 je tedy cena absorbérů 1 600 000 Kč. K této ceně ještě nutné přidat cenu ocelových plechů, dveří včetně těsnění spojů, ventilace, osvětlení, průchodů na kabely atd [3].

4 Návrh bezodrazové stěny

Ideální by bylo vytvořit bezodrazovou komoru. Nicméně pro zkoušku odolnosti proti vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole je v normě ČSN EN 61000-4-3 uvedena komora jako doporučená. Pro měření lze tedy vytvořit prostředí, kde bude pole dostatečně homogenní na všech frekvencích i bez použití komory. V jaké části stěny postavit je netriviální problém, ale z důvodu umístění zařízení a EUT je logickým závěrem umístění za testované zařízení, protože by při odrazech na různých frekvencích docházelo k interferenci. Mohlo by se stát, že by se intenzita elektrického pole při některých frekvencích zcela vyrušila a při některých byla až dvojnásobná. Dokonce by mohly nastat oba případy při jedné frekvenci a jiný by byl pouze měřicí bod (viz obr. 1.4).

Rozbor místnosti

Jelikož závisí na umístění každého objektu v místnosti, tak začnu rozměry a charakterem místnosti. Místnost jsem si proměřil a vytvořil její půdorys.



POZNÁMKA: Rozměry uvedeny v metrech

Obrázek 4.1: Půdorys místnosti určené pro testování

Od levé strany (podle obrázku 4.1) jsem umístil bezodrazovou stěnu, stůl a následně anténu. Doporučená vzdálenost antény je 3 metry. V případě nutnosti lze

tuto vzdálenost zkrátit až na jeden metr, ale je nutné mít na paměti, že při přiblížení se snižuje homogenita výsledného pole. Umístění antény tedy vychází zhruba ve vzdálenosti 4-5 metrů od levé stěny místnosti, čímž vznikne prostor za anténou, který by měl být dostačující, aby nedocházelo k velkým odrazům zadního laloku antény od pravé stěny. Tato vzdálenost bude užitečná i při použití bikonické antény při měření nízkých frekvencí.

Pro představu přidávám i fotografie místnosti. Největším problémem bude pravděpodobně vysoce odrazová stěna vytvořená ze skříněk na pravé straně (podle fotografií 4.2). Předpokládám, že rušení ze zářivek je na nižší frekvenci než 80 MHz. Případné vyšší harmonické by mohly zasáhnout do měřeného pásma, ale intenzity elektrického pole ze zářivek budou mnohem menší než generované pro testování odolnosti. Nicméně jednoduchým zhasnutím je možné vliv zcela eliminovat. Hasičcí přístroje budou mít nepochybně také určitý vliv. Důležité je, že tento vliv bude pořád stejný.



Obrázek 4.2: Reálný vzhled místnosti

Z rozměrů lze vybrat hlavní rozměry, pro které jsem vypočítal některé rezonanční frekvence, tak jak uvádím v rovnici 3.3. Zvolil jsem majoritní rozměry nákresu místnosti, které jsou $9,25 \times 3,6 \times 2,55$ metry. Výsledných rezonančních vidů (frekvencí) je velmi mnoho. Pro frekvence do 200 MHz existuje 155 vidů a pro frekvence do 1 GHz jich je 14340. Takto velké množství je způsobeno velkými rozměry místnosti. Pro mnou sledované frekvence mezi 80 a 1 000 MHz je tato informace v podstatě zbytečná, neboť ve vyšším pásmu jsou rezonanční téměř všechny frekvence. Jediný užitečný výsledek se dá považovat okolo spodní frekvenční hranice. Pro představu přikládám výsledky rezonančních frekvencí v MHz pro všechny vidy do hodnoty 2. Při vyšších frekvencích roste hustota rezonančních frekvencí.

Tento výčet (viz tabulka 4.1) rozhodně není úplný, ani nelze říct, že při dalších videch bude frekvence vyšší. Například pro vid 300 je frekvence 48,62 MHz. Z tabulky můžeme vidět například dvojnásobnou frekvenci vidů 100 a 200, neboť se jedná o stejný směr rezonance.

Vid	Frekvence	Vid	Frekvence	Vid	Frekvence
000	0	001	58,78	002	117,57
100	16,21	101	60,98	102	118,68
010	41,64	011	72,04	012	124,72
110	44,68	111	73,84	112	125,77
200	32,41	201	67,13	202	121,95
210	52,77	211	78,99	212	128,86
020	83,28	021	101,93	022	144,07
120	84,84	121	103,21	122	144,98
220	89,36	221	106,96	222	147,67

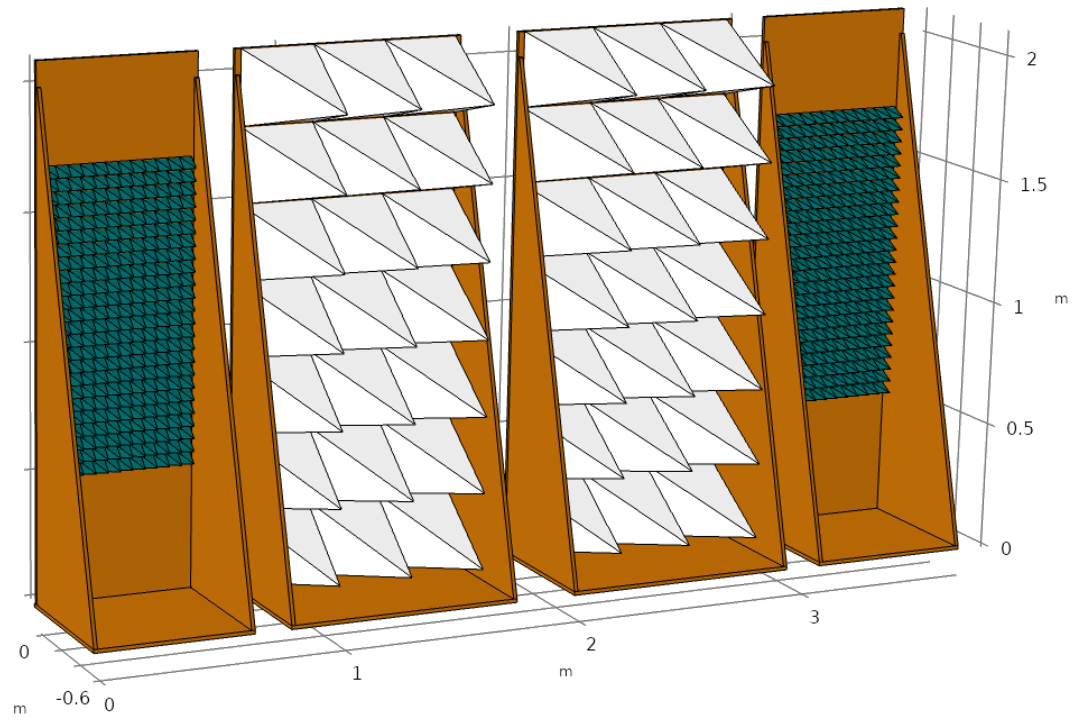
Tabulka 4.1: Výpis prvních rezonančních frekvencí místnosti v MHz

4.1 Realizace bezodrazové stěny

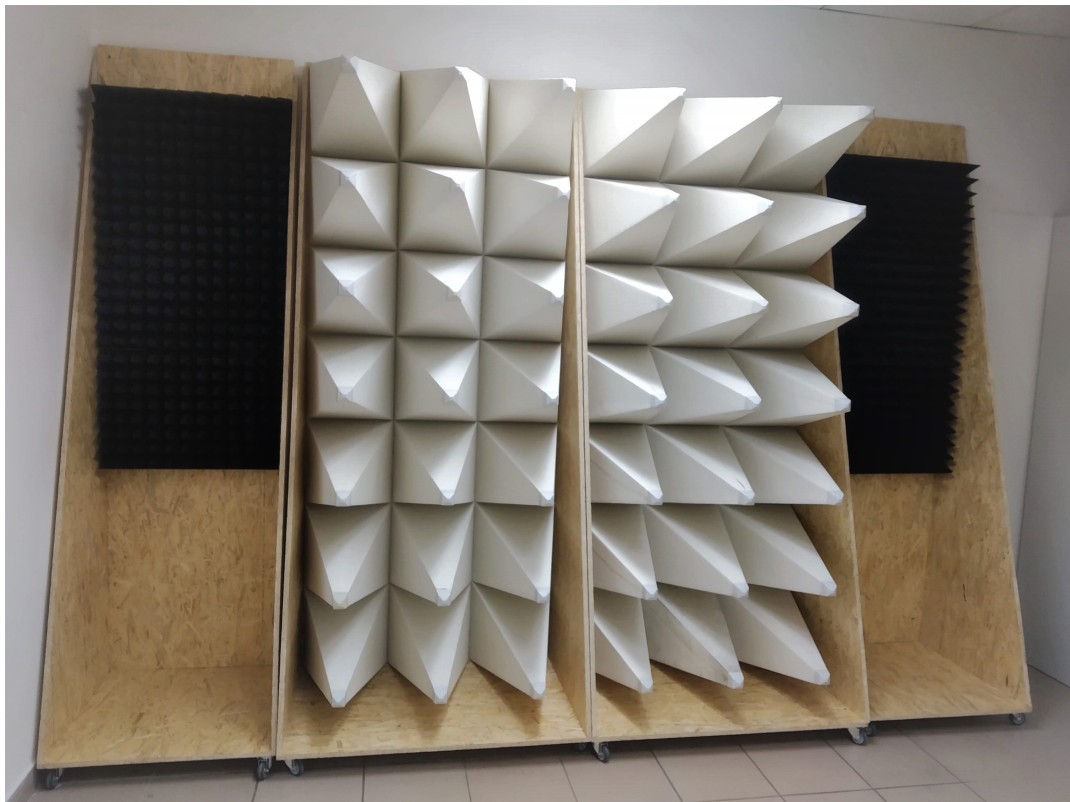
Jak jsem již dříve zmínil, tak mi byly od firmy ABEGU, a.s. zapůjčeny absorbéry Frankosorb[®]. Jedná se o 42 kusů jehlanových absorbérů se základnou $0,3 \times 0,3$ m a výškou 0,65 m. S těmito absorbéry je tedy možné obsadit plochu $3,78$ m². Pro lepší variabilitu optimalizace jsem se rozhodl vyrobit dvě stěny o velikosti $0,9 \times 2,1$ m (3×7 jehlanů). Pro výrobu jsem se rozhodl použít standardní dřevotřískové desky, protože jsou levné a dostatečně mechanicky pevné. Z důvodu snazší manipulace jsem do spodní desky přidělal kolečka. Jelikož se nejedná o bezodrazovou komoru, tak nejsou kladeny tak extrémní nároky na spojovací materiál, a proto jsem použil standardní vruty. Myslím, že přesný návrh rozměrů nemá smysl zmiňovat, a proto jej neuvádím.

Dalšími absorbéry, které jsem měl možnost využít, byly poměrně malé polymerové jehlanové absorbéry. Jedná se tedy o absorbéry na vyšší frekvence. Základna je 20×60 cm a výška je zhruba 11 cm. Na jednom takovém díle je 48 jehlanů. Za předpokladu, že se výška rovná $\lambda/4$ je vlnová délka rovna 0,44 m. Z vlnové délky lze podle rovnice 3.5 vypočítat frekvenci, která odpovídá 682 MHz. Pro tuto frekvenci by měl být útlum zhruba 20 dB. Těchto absorbérů mám 12 kusů, tedy $1,44$ m². Pro tyto polymerové absorbéry jsem vytvořil velmi podobné stěny, které jsou proti předchozím užší. Mají šířku 61 cm, což je standardní velikost vyráběných panelů. Je zde tedy v budoucnu možnost stávající panely doplnit nebo nahradit a tím zlepšit vlastnosti bezodrazové stěny a následně homogenitu elektrického pole. Z důvodu nedostatečného počtu absorbérů pro celý sloupec jsem osadil plochu od výšky 0,8 do 2 metrů, což je od nejnižších měřených bodů.

Ve výsledku jsem tedy vyráběl 4 stěny. Dvě o šířce 90 cm, které jsem osadil většími absorpčními jehlanými pro frekvence od 80 MHz, a dvě široké 61 cm s menšími absorpčními jehlanými pohlcujícími frekvence od cca 700 MHz. Pro představu je ideální grafický návrh na obrázku 4.3 a reálný vzhled na fotografii 4.4.



Obrázek 4.3: Grafický návrh bezodrazových stěn



Obrázek 4.4: Reálný vzhled bezodrazových stěn

5 Simulace v Comsol multiphysic

Simulace jsem se snažil udělat co nejpodobnější reálnému prostředí. Z důvodu širokého frekvenčního rozsahu jsem byl nucený použít dvě různé antény. První z nich je bikonická anténa BC 01 od firmy PMM. Frekvenční rozsah antény je 30 až 200 MHz. Druhou anténou je log-periodická PMM LP 04 pro frekvence 200 až 6 000 MHz.

Pro optimalizace jsem měl mnoho možností, jak změnit konfiguraci, abych dosáhl dostatečně homogenního pole dle normy ČSN EN 61000-4-3. V následující tabulce je uvádím.

Výška antény
Vyosení antény
Vyosení testovacího stolu
Pozice pohlcujícího materiálu
Vzdálenost stolu od antény

Tabulka 5.1: Možnosti optimalizace

Způsob vyhodnocení

Jak jsem již uvedl dříve, tak norma říká, že intenzita elektrického pole se musí v alespoň 75 % bodů pohybovat v rozmezí 6 dB (nejvyšší je dvojnásobkem nejnižší). V mém případě je snaha o kalibraci pole $1,5 \times 1,5$ metru, což odpovídá celkem 16 bodům. Z těchto bodů musí být v rozmezí 6 dB alespoň 12 bodů. Tato podmínka je nutná pro každou frekvenci.

Z výsledného výpočtu mně tedy pro každou frekvenci zajímala pouze intenzita elektrického pole na ploše v řezu stolu a konkrétněji jen 16 bodů podle obrázku 1.4. Vektor 16 hodnot intenzit jsem si převedl do decibelů a seřadil od nejmenší po největší. Z tohoto vektoru je 5 možností jak vybrat 12 hodnot. Ve výsledku jsem počítal, kolik těchto možností na každé frekvenci splňuje podmínku rozsahu 6 dB. Asi nejdůležitějším faktorem je počet nul, který udává, na kolika frekvencích není možné udělat kalibraci. Ideální by tedy bylo na všech frekvencích získat hodnotu 5, která vyjadřuje nejlepší homogenitu pole. Dostačující je nemít na žádné frekvenci nulu. Například pro bikonickou anténu bez absorbérů mi vyšlo 69 ze 102 frekvencí nemožných zkalibrovat (69 nul). Tento počet je často přepočítán do procent.

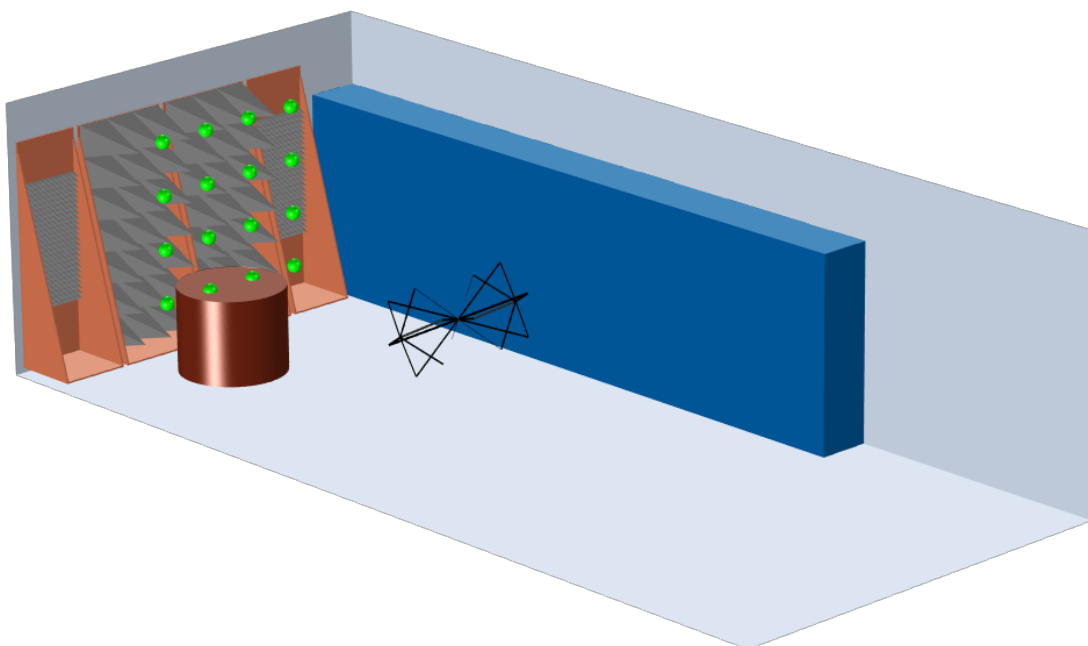
Z výsledného vektoru čísel, kde každé číslo odpovídá počtu variací kalibrace pro danou frekvenci, jsem si ještě vypočítal střední hodnotu, která je pro dokonale homogenní pole teoreticky 5. Prakticky jsem dosahoval hodnot mezi 2 a 3.

5.1 Simulace s bikonickou anténou

Simulace v této části jsem dělal pro frekvence od 80 do 210 MHz. Úmyslně jsem tedy přesáhl frekvenční rozsah antény. Frekvenční krok by měl být podle normy 1 %, ale protože Comsol tuto možnost volby frekvencí nemá, tak jsem použil logaritmické rozložení, kde je nutné zadat počáteční frekvenci, koncovou frekvenci a počet kroků na dekádu. Počet kroků lze získat variací rovnice 1.3 pro jeden měřicí bod, vynechání konstanty 2 (počet polarizací antény) a poměr frekvencí 10. Z této rovnice tedy vychází počet kroků na dekádu 231,408.

Nejprve jsem začal s horizontální polarizací antény a vzdáleností antény od stolu 3 metry. V této konfiguraci jsem udělal mnoho různých výpočtů, které uvádím v tabulce 5.2. Proměnnými parametry byly vyosení antény a stolu, výška antény a poloha absorpčních stěn.

Z důvodu vysoce odrazivé stěny vpravo (skříňky) jsem v simulacích osu antény a stolu posunul mírně doleva. Díky simulacím jsem zjistil, že tento posun je ideální mezi 20 a 30 cm. Zjišťoval jsem také vliv této odrazivé stěny na výsledné pole a rozhodl jsem se tuto stěnu ponechat, protože je jiná než stěna na opačné straně. Důsledkem tohoto faktu je jiná odrazivost bočních stěn, díky čemuž nedochází k interferencím, které by mohly způsobovat sčítání nebo vyrušení elektromagnetického pole.



Obrázek 5.1: Geometrie fyzikálního modelu v COMSOL včetně bodů zájmu (zeleně)

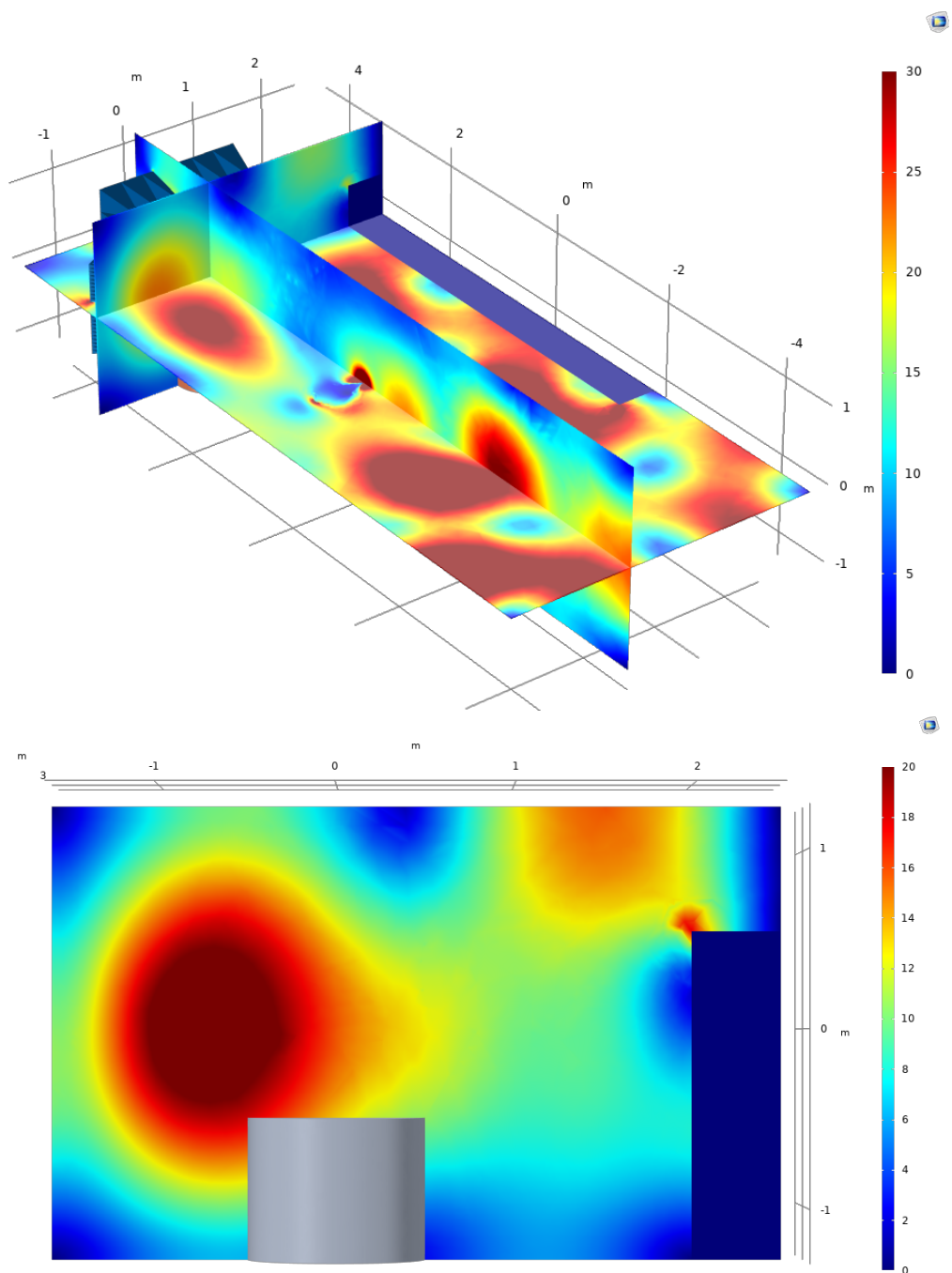
Pro výpočty jsem zkoušel různé nastavení výpočetní sítě. Nastavení řídké sítě má za následek to, že výpočet nekonverguje k řešení. Při nastavení velmi husté sítě je výpočet velmi pomalý a náročný na hardware (především RAM). Snahou bylo nastavit síť, aby byl výpočet co nejrychlejší. Taková optimální velikost sítě je ale

frekvenčně závislá. Nakonec jsem zvolil síť kdy pro frekvenci 80 MHz trval výpočet zhruba 40 sekund a pro 200 MHz zhruba 90 sekund. Při uvážení kroku 1 % se jedná o 94 frekvencí. Z tohoto důvodu trvá výpočet jedné konfigurace zhruba 90 minut.

K optimálnímu stavu jsem se nejprve pokoušel dojít stylem pokus omyl a zjistil si, že je ideální mít bezodrazové stěny co nejbliž stolu. Tento závěr je logický, protože je také nejlépe zabrán prostorový úhel od antény a výsledné přímé vlny od antény se neodrážejí. Parametry jako je vyosení a výška antény jsem tímto způsobem také zjistil. Velkou většinu simulací jsem provedl pro stejné vyosení stolu a antény. S touto konfigurací byl posun nejlépe zhruba 25 cm a výška antény byla nejlepší 1,2 metru. Tyto hodnoty nejsou nutné simulovat naprosto přesně, protože model není dokonalým obrazem skutečnosti. Konkrétní konfigurace a výsledky uvádím v následující tabulce.

číslo	vyosení antény (stolu)	výška antény	popis absorberů	nul [%]	střední hodnota
0	0,35	1,3	nejsou	67,65	0,60
1	0,35	1,3	v rovině 15 cm za stolem	34,02	2,07
2	0,25	1,3	v rovině 15 cm za stolem	32,99	2,04
3	0,3	1,3	v rovině 15 cm za stolem	35,05	2,05
4	0,3	1,3	přímo za stolem, malé o 1 m blíž a otočené o 30° k ose	30,93	2,27
5	0,3	1,3	jako 4, ale bez otočení	46,39	1,63
6	0,3	1,3	přímo za stolem, malé o 2,5 m blíž a otočené o 30° k ose	32,99	2,18
7	0,2	1,3	přímo za stolem, malé o 0,8 m blíž a otočené o 30° k ose	24,74	2,4
8	0,2	1,4	jako 7	27,84	2,2
9	0,2	1,2	jako 7	21,65	2,59
10	0,15	1,2	jako 7	27,84	2,57
11	0,2	1,1	jako 7	22,68	2,90
12	0,25	1,2	jako 7	20,62	2,61
13	0	1,2	jako 7, ale odebrány skříňky	21,65	2,45
14	0,1	1,2	jako 13	18,56	2,64
15	0,25	1,2	jako 12, ale vertikální polarizace antény	26,80	2,64
16	0,46 (0,2)	1,21	malé blíž o 0,76 m, otočené o 20° k ose, anténa otočená o 10°	28,87	2,42
17	0,46 (0,2)	1,21	jako 16, ale anténa otočená o 5°	28,87	2,44
18	0,3 (0)	1,2	v rovině přímo za stolem	32,63	2,05
19	0,7 (-0,2)	1,25	přímo za stolem, malé o 0,2 m blíž bez otočení	36,84	1,92

Tabulka 5.2: Výsledky simulací s bikonickou anténou v horizontální polarizaci

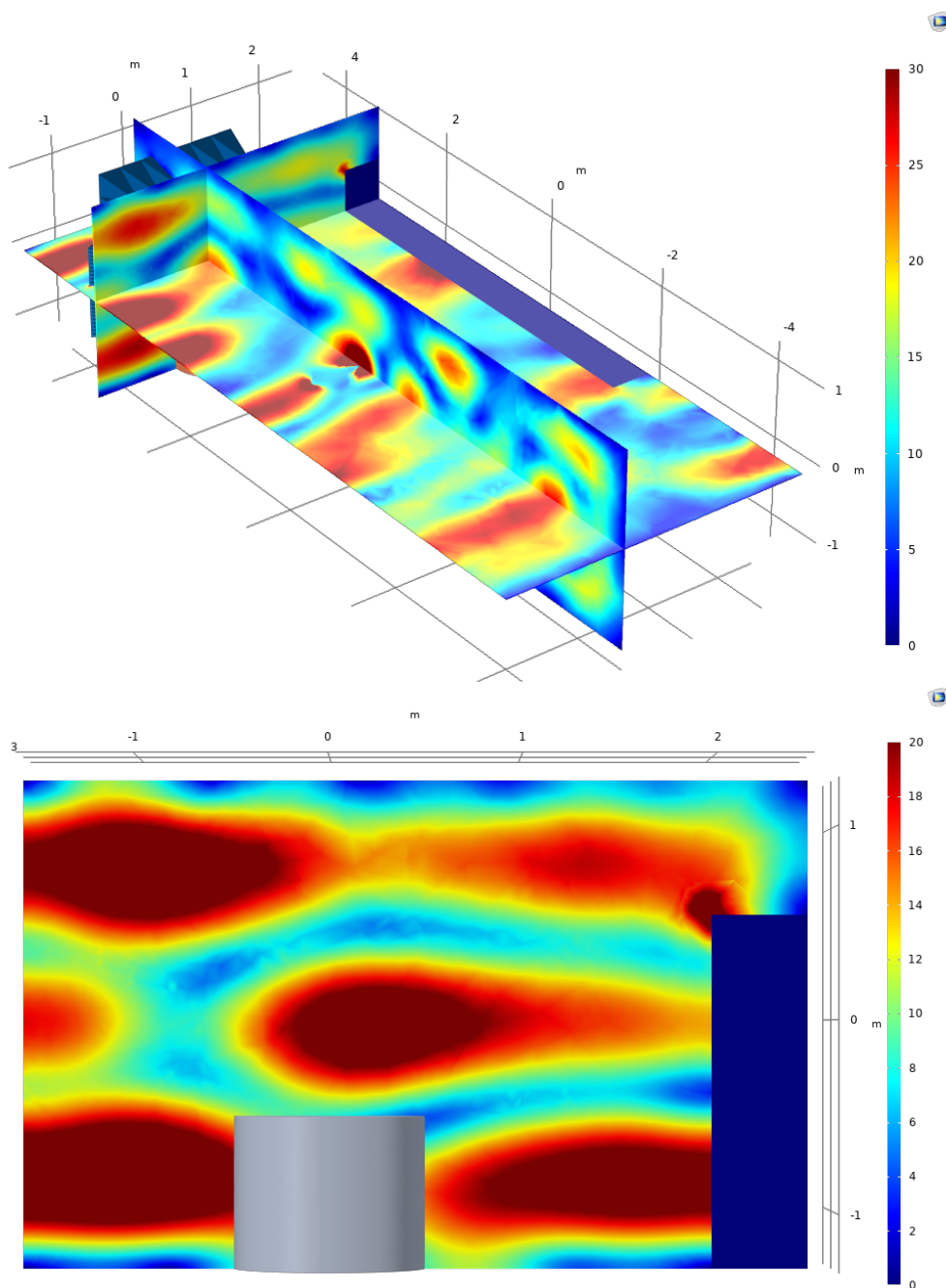


Obrázek 5.2: Intenzita elektrického pole ze simulace 7 pro frekvenci 110 MHz, dole rovina homogenního pole

Na horním obrázku 5.2 je řez třemi ortogonálními rovinami, které protínají střed antény a plochu homogenní pole umístěnou nad testovacím stolem. Patrná je větší úroveň intenzity elektrického pole za anténou. Tento fakt je nepochybně způsoben umístěným bezodrazovým materiálem za stolem, který je taktéž částečně vidět. V pravé části je tmavomodrý kvádr značící nulovou intenzitu elektrického pole. To

je způsobeno umístěným železným blokem simulující skříňky.

Na spodním obrázku je pouze rovina homogenního pole, kde je kromě barevně zvýrazněné intenzity elektrického pole vidět stůl (šedý) a skříňky (vpravo). V obrázku této roviny je použitý jiný rozsah (maximum 20 V/m místo 30 V/m). Zbývá doplnit, že číselné výsledky pro 16 bodů by splnily požadavky dané normou ČSN EN 61000-4-3. Vyhovují dokonce 2 z pěti možných variant.



Obrázek 5.3: Intenzita elektrického pole ze simulace 7 pro frekvenci 190 MHz, dole rovina homogenního pole

Na obrázku 5.4 jsou výsledky stejné konfigurace jako na obrázku 5.2. Jediným rozdílem je jiná frekvence a to 190 MHz. Záměrně jsem vybral frekvenci, kde nebyla úspěšná kalibrace. I když v rovině nejsou zakresleny přesné body, tak je patrné, že výsledné pole nemůže být dostatečně homogenní. Jelikož je anténa umístěna v počátku souřadného systému a podle tabulky 5.2 je výška antény 1,3 m, tak je první řada umístěna hned nad stolem, druhá řada ve výšce 0 m, čtvrtá řada ve výšce 1 m a třetí řada mezi čtvrtou a druhou (také 5 cm pod horní hranou skříněk).

Dalším způsobem, který jsem vyzkoušel, byla možnost optimalizace v COMSOL Multiphysics. Optimalizační funkci pro minimalizaci jsem vytvořil pomocí sumy druhých mocnin od střední hodnoty intenzity elektrického pole ve všech 16 bodech. Pro výpočet vlastní optimalizace jsem využil Nelder Meadovu metodu.

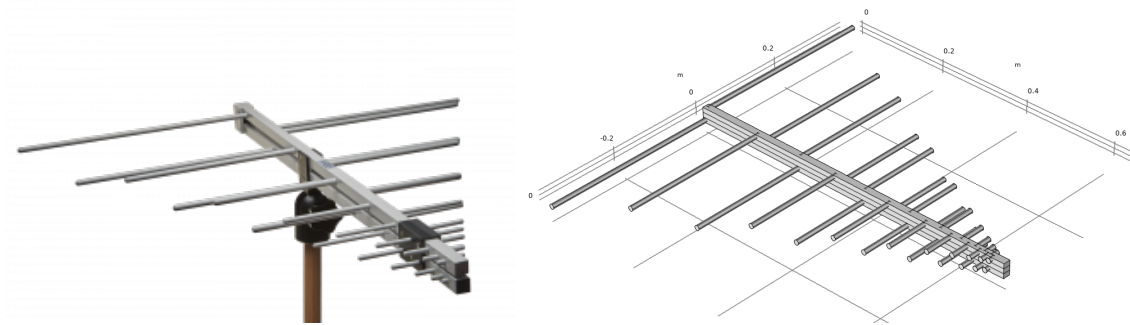
$$\min F = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (E_{ij} - E_{AVG})^2 \quad (5.1)$$

Volil jsem různé parametry v okolí výše zjištěných hodnot, ale pro potřebu velkého množství frekvencí by kompletní optimalizační funkce trvala neuvěřitelně dlouhou dobu, kterou jsem výpočtu nemohl poskytnout. Z výsledků jsem zjistil problémy kolem frekvence 107 MHz a z toho důvodu jsem vypočítal optimalizaci na třech frekvencích 106, 107 a 108 MHz. Výsledek je kombinace číslo 19 v tabulce 5.2, který nebyl uspokojivý ani na požadovaných frekvencích. Je pravděpodobné, že funkce je natolik komplikovaná, že je nakonec nalezeno lokální minimum. Nicméně stále platí, že model nikdy nebude dokonale přesný, protože se elektromagnetické záření šíří i za betonové stěny. Z tohoto důvodu je rozumnější věnovat čas reálným měřením.

5.2 Simulace s log-periodickou anténou

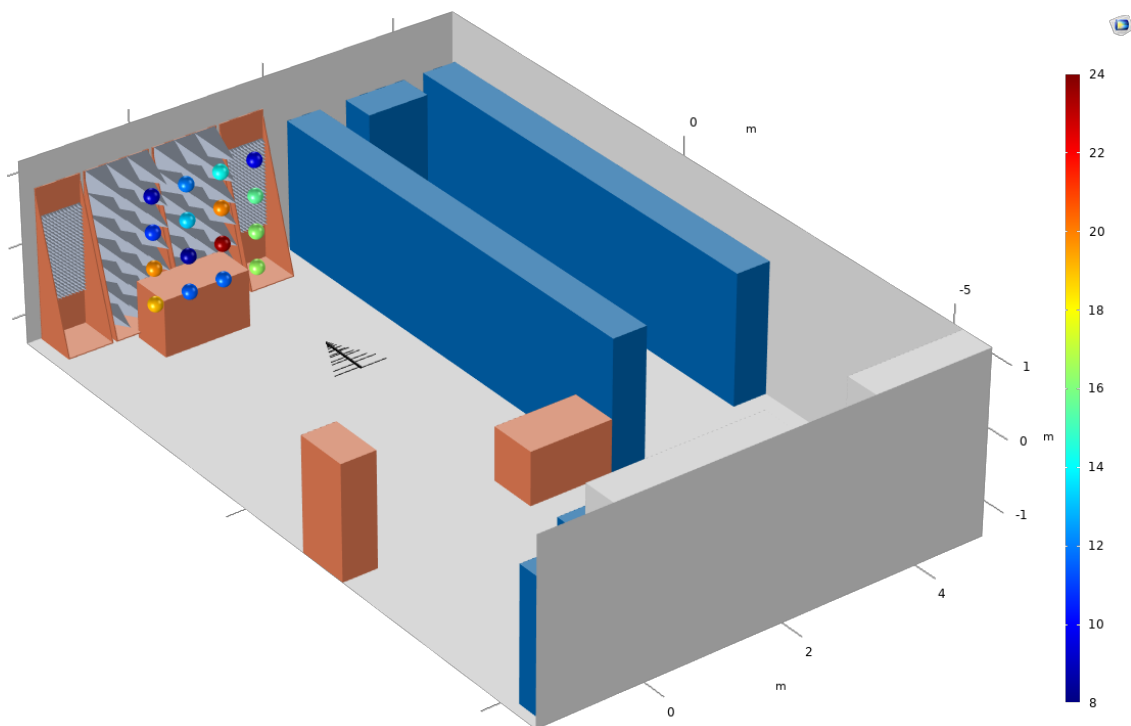
V této části se věnuji modelování testovacího pracoviště na frekvencích od 200 MHz do maximálně 1 GHz. Doufal jsem, že bude patrný vliv harmonických frekvencí a nebude nutné testovat pásmo celé, protože při výpočtu vyšší frekvencí je nutné vytvořit hustší síť (anglicky mesh), čímž se značně zvyšuje výpočetní náročnost a tím i potřebný výpočetní čas. Další omezení vytváří použitý hardware, kde bylo využito kompletních 32 GB operační paměti.

Použitou log-periodickou anténou v reálném měření bude LP 04, na které jsem si změřil veškeré rozměry a následně jsem se ji pokusil co nejvěrněji namodelovat.



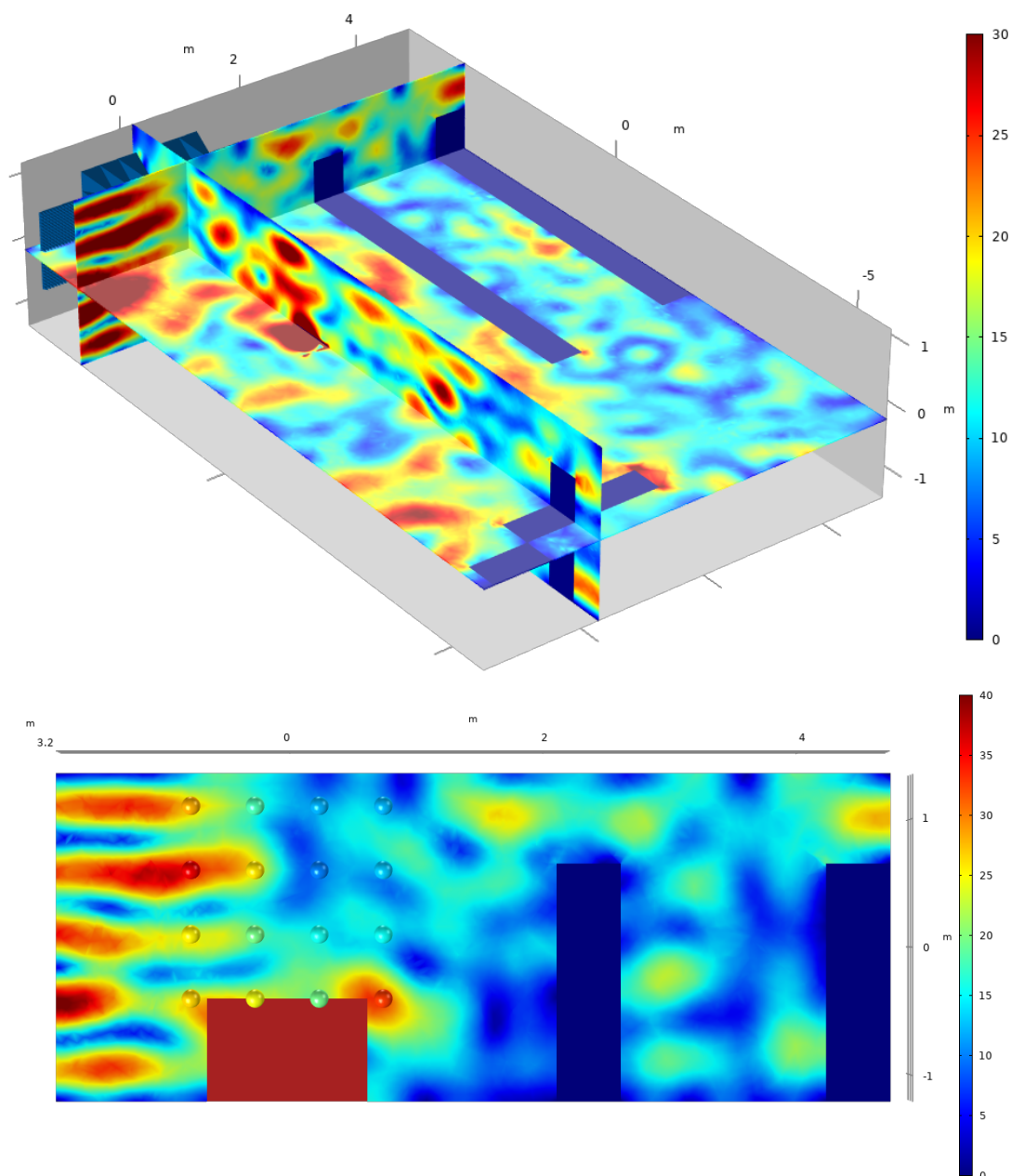
Obrázek 5.4: Reálný vzhled (vlevo) a model log-periodické antény LP 04

Před samotným spuštěním simulace s frekvencemi po 1 % jsem potřeboval naladit velikosti výpočetní sítě výpočtem na několika diskretních frekvencích. Pro jedno nastavení sítě trval výpočet pro 200 MHz lehce přes 4 minuty a pro frekvenci 400 MHz to bylo 82 minut. Vyzkoušel jsem i frekvenci 425 MHz, kde výpočet zabral téměř 5 hodin. Takové časy jsou naprosto nepřijatelné. Jen mezi 400 a 425 MHz by se jednalo o 6 frekvencí, pro které by výpočet trval zhruba 20 hodin. Při upravení sítě jsem pro frekvenci 400 MHz dosáhl výpočetního času 15 minut, což by mohlo být přijatelné, ale pro frekvenci 500 MHz jsem výpočet po zhruba 5 hodinách přerušil. Z těchto důvodů jsem udělal jen pár výpočtů pro několik frekvencí mezi 200 a 400 MHz.



Obrázek 5.5: Model s log-periodickou anténou včetně vypočtených úrovní intenzity elektrického pole pro frekvenci 400 MHz

Pro výpočet jsem volil základní geometrickou konfiguraci, kde byla anténa ve výšce 1,2 metru umístěna ve vzdálenosti 3 m od testovacího stolu. Vyosení stolu, antény i bezodrazových stěn bylo 15 cm vlevo vůči ose mezi skříňkami a levou stěnou. Simuloval jsem tedy na frekvencích 200 až 425 MHz s krokem 25 MHz. I přes takové omezení zabral výpočet v podstatě celý den. Výsledná sada dat tedy obsahovala 16 bodů pro 10 frekvencí. Data jsem následně vyhodnotil v Matlabu a zjistil, že výsledné pole je na 20 % nedostatečně homogenní. Jedná se o frekvence 225 a 300 MHz. Naopak velmi homogenní pole bylo na frekvencích 200, 275 a 350 MHz.



Obrázek 5.6: Intenzita elektrického pole pro model s log-periodickou anténou na frekvenci 300 MHz, dole rovina homogenního pole

6 Měření a porovnání se simulacemi

Měřicí prostředí samozřejmě nikdy nebude totožné se simulovaným. V simulacích nejsou nijak zohledněny prostory za stěnami. Jelikož jsem pracoviště vytvářel ve volně přístupném prostoru, tak jsem se navíc dopustil porušení zadní části generovaného pole. Pro optické uzavření jsem za anténu umístil stůl a skříň (viditelné na obrázku 6.4), které jsou zahrnuty i v simulacích s log-periodickou anténou.

6.1 Měřicí přístroje

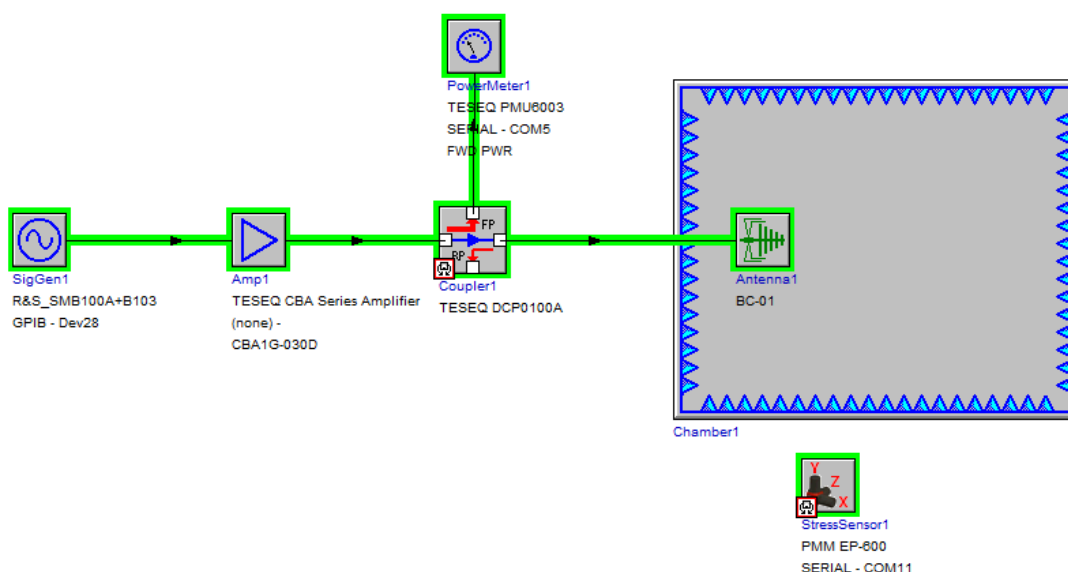
Pro měření jsem použil přístroje uvedené v následující tabulce. Abych dosáhl automatizovaného měření, tak jsem se naučil s programem Compliance 5 Immunity od firmy Teseq. Program slouží k ovládání velkého množství prvků a já jej využil pro ovládání generátoru, čtení dat ze sondy elektrického pole a čtení dat z měřiče výkonu PM 6003, který měří výkon proudící do antény. Použitými rozhraními byla převážně sériová linka s použitím USB konektoru. Jediným jinak ovládaným zařízením je generátor, který je připojen k PC přes GPIB sběrnici.

Název	Popis	Sériové číslo
PMM BC 01	Bikonická anténa	001WX70919
PMM LP 04	Log-periodická anténa	000WX70304
R&S SMA 100B	Signální Generátor	1422.1000K02-102094-mF
CBA 1G-030D	Zesilovač 30 W, 1–1 000 MHz	1089671
CBA 3G-025B	Zesilovač 25 W, 800–3 100 MHz	U2596-0620
PMM EP-600	Sonda intenzity elektrického pole	711ZX00444
PM 6003	Měřič příkonu antény (do 1 GHz)	77999
PM 6003	Měřič příkonu antény (nad 1 GHz)	78000
DCP 0100A	Směrová odbočnice (do 1 GHz)	56472
BDC 0760-40/500	Směrová odbočnice (nad 1 GHz)	1926125-03
RFB 6000	Vysokofrekvenční přepínač	57132
RF cable	Kabel 5 m, N-N, 6 GHz	210.300.005
Profi supra 3 m	Svinovací metr 3 m	

Tabulka 6.1: Seznam přístrojů

6.2 Měření s bikonickou anténou

Měření v této kapitole jsem dělal obdobně jako simulace v kapitole 5.1. Frekvenční rozsah je tedy 80-200 MHz a používané kalibrační pole je 3 V/m, protože při nižší intenzitě elektrického pole dochází k nižšímu zatížení zesilovače a tím také k nižší úrovni hluku způsobeného chlazením. Nevýhodou je nižší odstup signálu od šumu. Měřicí sestavu jsem umístil za skříňku, abych minimalizoval ovlivnění výsledného pole. V měřicí sestavě jsem použil vhodný zesilovač a směrovou odbočnici s měřičem příkonu antény. Pro jednodušší změnu zesilovače je zapojen přepínač, který pro přehlednost ve schématu neuvádím. Jeden přepínač by byl vložen před zesilovač a druhý za směrovou odbočnici a mezi přepínači by byl umístěn druhý zesilovač, druhá směrová odbočnice a druhý měřič příkonu antény.



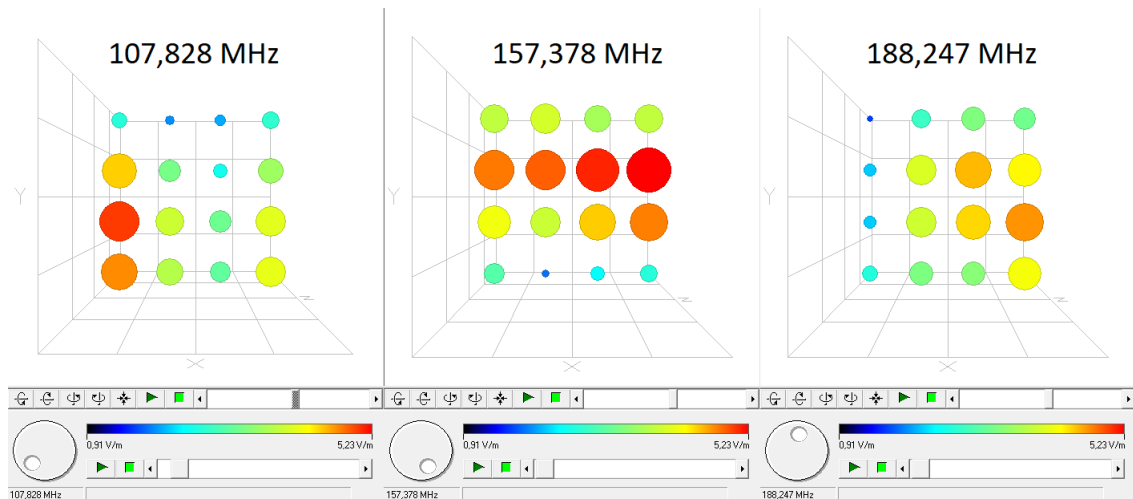
Obrázek 6.1: Měřicí schéma s bikonickou anténou

6.2.1 Horizontální polarizace

První měření jsem udělal v ose místnosti a výškou antény 1,2 m. Podle očekávání došlo k velkým úrovním intenzit elektrického pole v pravých (pohled ze směru antény) měřicích bodech. Měřením se tedy potvrdila nutnost vyosení vlevo. Kalibrace nevyhovovala zhruba na 17 % frekvencí.

Pro druhé měření jsem posunul anténu i stůl o 30 cm vlevo a měření ve všech 16 bodech opakovat. Výsledek byl nedostačující na frekvencích zhruba 106 až 110 MHz a 188 MHz. Hraniční výsledek byl dosažen na 157 MHz. Jednalo se tedy o zhruba 5 % frekvencí. Měření na okolí 108 MHz vykazuje vyšší hodnoty intenzity v levých měřicích bodech a pro frekvenci 188 MHz je v těchto bodech intenzita naopak nízká. Problém se zdá být způsoben šířkou místnosti, což nepochybně souvisí s odrazy elektromagnetických vln. Pro další měření jsem tuto šířku navýšil o 30 cm. Výsledky

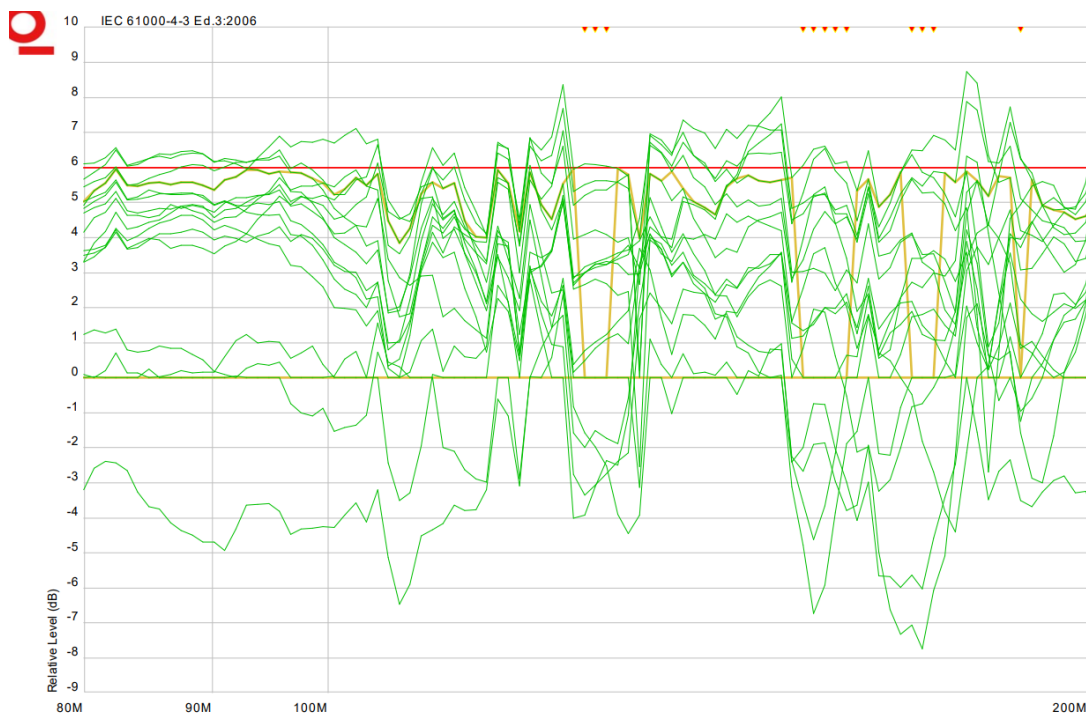
na frekvenci 157 MHz mají vyšší hodnotu intenzity elektrického pole v bodech ve druhém řádku měření (1,8 m nad podlahou). Protože se jedná o výsledek v řádku, tak je pro posunutí frekvence vhodné změnit výšku antény. Nicméně ve třetím měření jsem ji neupravoval.



Obrázek 6.2: Intenzity elektrického pole pro problematické frekvence druhé kalibrace

Pro třetí měření jsem rozšířil místnost o 0,3 m a posunul anténu o stejnou vzdálenost. Osa místnosti se tedy posunula o 15 cm a anténa o 30 cm. Výsledné vyosení bylo tedy 15 cm vlevo. Důsledkem bylo odstranění problému na frekvencích kolem 108 MHz, ale naopak vznikl problém na jiných frekvencích. Problematické frekvence byly 126-129, 154-160 a 170-174 MHz. Celkový kvalitativní výsledek je hodně podobný s druhým měřením (cca 5 %). Nicméně při zvyšování maximální tolerance intenzity elektrického pole bylo toto měření nejlepší. Při tomto měření je maximální odchylka 6,7 dB (v normě je dáno 6 dB).

Na obrázku 6.3 je vidět relativní úroveň intenzity měřicích bodů. Připomenu, že pro úspěšnou kalibraci je nutné mít 75 % bodů v rozmezí 0 až 6 dB. Žluté křivky tvoří homogenní obálku, která ukazuje rozmezí 75 % bodů. Na některých frekvencích je tato křivka pouze na nulové hodnotě, což značí neúspěšnou kalibraci. Neúspěšná kalibrace je také zvýrazněna malou šipkou u horního okraje nad danou frekvencí. Frekvenční osa je v logaritmickeém měřítku.



Obrázek 6.3: Relativní úroveň intenzity elektrického pole pro všech 16 bodů třetí kalibrace s bikonickou anténou v horizontální polarizaci

V dalším měření (čtvrté) jsem ponechal rozšířenou místnost o 0,3 m a vyzkoušel jsem změnu výšky antény. Anténu jsem místo 1,2 m umístil 1 m nad zem. Výsledek se zhoršil, a proto by v dalším měření mohlo být vhodné změnit výšku antény naopak výš.

V pátém měření jsem vyzkoušel umístění antény blíže k testovacímu stolu. Nehomogenita je dána vektorovým součtem mnoha odražených vln. Při bližším umístění antény by měl být příspěvek odrazů nižší, ale nepochybně bude snížena intenzita v krajních bodech. Vzdálenost jsem ze 3 m upravil na 1,8 m. Výsledek tohoto měření je sice špatný na zhruba stejné frekvencích jako předchozí měření, ale maximální relativní odchylka je neúnosně velká (9 dB).

Pro šesté měření jsem se s anténou vrátil do vzdálenosti 3 m od testovacího stolu a dle výsledků ze čtvrtého měření jsem anténu umístil naopak výše. Výšku jsem zvolil 1,3 m. Zpočátku jsem byl z výsledku zklamaný, ale při detailnějším pohledu jsem zjistil, že nízké úrovně intenzity elektrického pole, které způsobovaly neúspěšný výsledek, jsou v nejvyšší řadě měřicích bodů. Nakonec jsem tedy ustoupil z požadavku na velikost homogenního pole $1,5 \times 1,5$ metru. Pro zmenšené pole ($1,5 \times 1$ m) jsem na všech 94 frekvencích v rozsahu 80 až 200 MHz splnil rozpětí požadovaných 6 dB. Anténa byla tedy ve výšce 1,3 m ve vzdálenosti 3 m od testovacího stolu a vyosená o 0,15 metru vlevo. Stůl i bezodrazová stěna byly vyoseny stejně jako anténa o 0,15 m vlevo. Kalibrační úroveň 3 V/m, šířka místnosti 3,9 m a zářivky zhasnuty. Pozici antény jsem si následně vyznačil na podlahu elektrickářskou páskou. Konfigurace je jasně zřetelná na obrázku 6.4, kde jsou jediným rozdílem světla.



Obrázek 6.4: Úspěšná konfigurace pro měření s bikonickou anténou v horizontální polarizaci (šesté měření)

6.2.2 Vertikální polarizace

Pro vertikální polarizaci jsem se již snažil neměnit pozici ničeho jiného než antény. Při testu by bylo nevhodné muset změnit polohu jiných věcí, jako jsou skříňky, bezodrazová stěna nebo testovací stůl. Ve všech měřeních jsem anténu na stativu sklápěl do pravé strany (z pohledu antény).

V prvním měření jsem zanechal stejnou pozici jako při úspěšné horizontální polarizaci. Jednalo se tedy o výšku 1,3 metru a vyosení antény, stolu i bezodrazové stěny o 0,15 metru vlevo. Zaměřil jsem se i na polohu stativu, protože s vertikální polarizací s určitým natočením překáží anténě. Bohužel byl výsledek tohoto měření nedostatečný. Neúspěšné frekvence byly 123-128, 133, 134 a 170-180 MHz. Z výsledků jsem nezaznamenal žádnou pravidelnost, kterou by bylo vhodné odstranit.

Ve druhém měření jsem umístil anténu níže a to do výšky 1,2 metru. Stativ jsem musel více rozložit. Chybné frekvence byly téměř totožné jako při prvním měření. K chybovým frekvencím přibyla frekvence 157 MHz a ostatní pásma chybových frekvencí z prvního měření se mírně rozšířila.

Ve třetím měření jsem musel změnit vyosení antény, protože změna výšky antény neměla žádný (dokonce negativní) účinek. Zvolil jsem tedy umístění v ose, což pro jednoduchost odpovídá umístění nohy stativu do spáry dlaždic. Výšku antény jsem

ponechal stejnou, tj. 1,2 metru. Výsledek byl sice nejlepší z vertikálních polarizací, ale stále nedostatečný. Chybné kalibrace nastaly na frekvencích 123-129, 133, 134, 174, 179, 180 MHz.

Z důvodu neúspěchu a zdánlivě slepé uličky jsem se rozhodl mírně změnit postup. Pro některé frekvence jsem zaznamenal velký nárůst požadovaného příkonu pro generování intenzity elektrického pole 3 V/m. V dalších měřeních jsem tedy různě měnil konfigurace a snažil se sledovat požadovaný příkon. Ze změny příkonu je patrná interference vln, kdy dochází ke sčítání nebo odčítání odražených vln. Jelikož je příkon určen pro první bod a pro ostatní měřicí body je příkon stejný, tak jsem mohl měření velmi urychlit. Zrychlení měření bylo i díky zmenšení sledovaného frekvenčního rozsahu, protože chybné frekvence a frekvence s vyšším příkonem ležely vždy v pásmu nad 120 MHz. Mým výchozím bodem měření byl bod ve druhém řádku od spodní hrany a ve druhém sloupci od levé hrany homogenního pole. Teoreticky je volba tohoto bodu nedůležitá, protože se sledují relativní hodnoty intenzit elektrického pole v jednotlivých bodech. Výsledky tohoto sledování příkonu byly ve všech konfiguracích, které jsem vyzkoušel, srovnatelné s předchozími měřeními. Rozhodl jsem se tedy změnit doporučený parametr vzdálenosti antény od měřicího stolu. Při bližším umístění antény nepochybně dochází k menšímu vlivu odražených vln. Většina odražených vln v mé konfiguraci je od boční stěny, skříněk, stropu a podlahy. Anténu jsem umístil do vzdálenosti 1,8 metru od stolu. Důsledkem bylo zmenšení špičky příkonu, což jsem při přiblížení očekával. Výšku antény jsem ponechal 1,2 m a vyosení nulové. Konfiguraci jsem následně proměřil ve všech 16 bodech. Výsledek byl zatím nejlepší. Chybná kalibrace byla na frekvencích 131 a 193-200 MHz. Dokonce při ignorování nejvyšších bodů (jako při kalibraci horizontální polarizace) jsem dosáhl chybných frekvencí 190-200 MHz. Tyto frekvence by teoreticky mohla převzít log-periodická anténa.

I přes možnost posunout výsledek na další anténu jsem se rozhodl udělat ještě jedno měření, ve kterém jsem umístil anténu do střední vzdálenosti od stolu, protože v předchozím měření byla v některých krajních bodech úroveň intenzity elektrického pole nízká. Vzdálenost jsem volil 2,4 m, výšku a vyosení jsem ponechal nulové. Výsledek byl bohužel horší než při předchozím měření. Pro frekvence blízké horní hranici se sice rozptyl snížil, ale stále nebyl dostatečně malý. Na frekvencích okolo 120 až 130 MHz došlo naopak ke zhoršení.

6.3 Simulace úspěšných konfigurací s bikonickou anténou

Jelikož jsou výsledné měřicí konfigurace jiné, než testované, tak jsem se rozhodl udělat srovnávací simulace. Předpokládám, že velké množství neúspěšných frekvencí v simulaci je způsobeno jiným absorpčním materiálem. Nebylo možné namodelovat speciální nanostrukturu absorberů Frankosorb. Absorbéry použité v simulacích jsou vytvořeny podle ukázkových příkladů Comsolu.

6.3.1 Horizontální polarizace

Pro připomenutí se jednalo o homogenní pole se 3 řádky a 4 sloupci. Ve výsledné simulaci jsem tento fakt zohlednil. Vzdálenost antény od stolu byla 3 m a výška antény byla 1,3 m. Anténa, stůl i absorbéry byly vyoseny o 15 cm vlevo a prostor mezi skříňkami a levou stěnou byl rozšířen o 0,3 m na 3,9 m.



Obrázek 6.5: Srovnání grafů relativních odchylek měření a simulace pro 12 bodů, horizontální polarizaci BC 01

Grafy relativních odchylek ukazují velké odlišnosti mezi reálným měřením a modelem. V datech na příloženém CD se jedná o model a data 027. Hlavní příčinou

bude pravděpodobně nedokonalý model absorbérů Frankosorb. Podle teorie o absorpčních jehlanech by takto vysoké jehlany měly pohlcovat od frekvence zhruba 115 MHz.

BC HP	Chyby 16 bodů [%]	Chyby 12 bodů [%]
Simulace	38,95	29,47
Měření	11,7	0

Tabulka 6.2: Srovnání výsledků měření a simulace horizontální polarizace s BC 01

Z výsledků v tabulce 6.2 je vidět určitá korelace při zmenšení homogenního pole. Při ignorování nejvyšší řady hodnot došlo v obou případech k určitému zlepšení. Konkrétní chybné frekvence se bohužel neshodují, a proto je neuvádím. Výsledek simulace při 12 bodech a toleranci 8 dB je i přes zvýšení tolerance 7,37 %. Většina měření byla při toleranci 8 dB úspěšná.

6.3.2 Vertikální polarizace

Úspěšné měření s vertikální polarizací bylo pro výšku antény 1,2 m, která byla vzdálená 1,8 m od testovacího stolu. Stůl i absorbéry byly vyoseny stejně jako při horizontální polarizaci o 15 cm vlevo, ale anténa byla umístěna o 15 cm vpravo od osy stolu, což znamená, že byla v ose mezi skříňkami a stěnou.

BC VP	Chyby 16 bodů [%]	Chyby 12 bodů [%]
Simulace	37,89	26,32
Měření	6,38	7,4

Tabulka 6.3: Srovnání výsledků měření a simulace vertikální polarizace s BC 01

Uvedených 7,4 % chyb je v horní části frekvenčního rozsahu (190-200 MHz), což je vidět na horním grafu na obrázku 6.6. Tyto chybné frekvence přebírá log-periodická anténa LP 04.

Z grafů na obrázku 6.6 je vidět velký rozdíl mezi simulací a měřením jako v případě horizontální polarizace. Výsledky simulací vychází řádově hůř. Nicméně frekvence, které nevychází v reálném měření, vychází v simulaci. Model jsem pro tyto simulace navíc vylepšil tak, že jsem jej rozšířil o prostor za skříňkami. Obdobně rozšířený model jsem použil pro modelování s log-periodickou anténou. Rozšířený model je vidět na obrázku 5.5. V datech na přiloženém CD se jedná o model a data 028. Při změně tolerance na 8 dB se výsledek simulace zlepšil na 3,16 % neúspěšných frekvencí.



Obrázek 6.6: Srovnání grafů relativních odchylek měření a simulace pro 12 bodů, vertikální polarizaci BC 01

6.4 Měření s log-periodickou anténou

Pro měření od 200 MHz do 1 GHz jsem ve schématu na obrázku 6.1 pouze vyměnil bikonickou anténu BC 01 za log-periodickou anténu LP 04. Používal jsem opět kalibrační pole 3 V/m. Z důvodu vyšší směrovosti antény jsem očekával menší množství odrazů a tím i lepší výsledky. Při standardním kroku 1 % se jednalo o 163 frekvencí, jejichž proměření na 16 bodech zabralo zhruba 170 minut.

6.4.1 Horizontální polarizace

Při prvním měření s log-periodickou anténou v horizontální polarizaci jsem zvolil pozici antény stejně jako při úspěšné kalibraci s bikonickou anténou v horizontální polarizaci. Jednalo se tedy o vzdálenost 3 m mezi anténou a stolem. Výška antény byla 1,3 m a vyosení bylo opět 15 cm vlevo. Výsledek byl překvapivě velmi špatný. Kalibrací neprošlo 28,8 % frekvencí.

Pro druhé měření jsem se rozhodl snížit anténu na 1,2 m, tak jak odpovídají simulace. Chybných frekvencí ubylo na 22,7 %. Nejhorší výsledky byly okolo 275 MHz, kde se jednalo o zvýšenou hodnotu intenzity elektrického pole v nejnižší řadě měřících bodů.

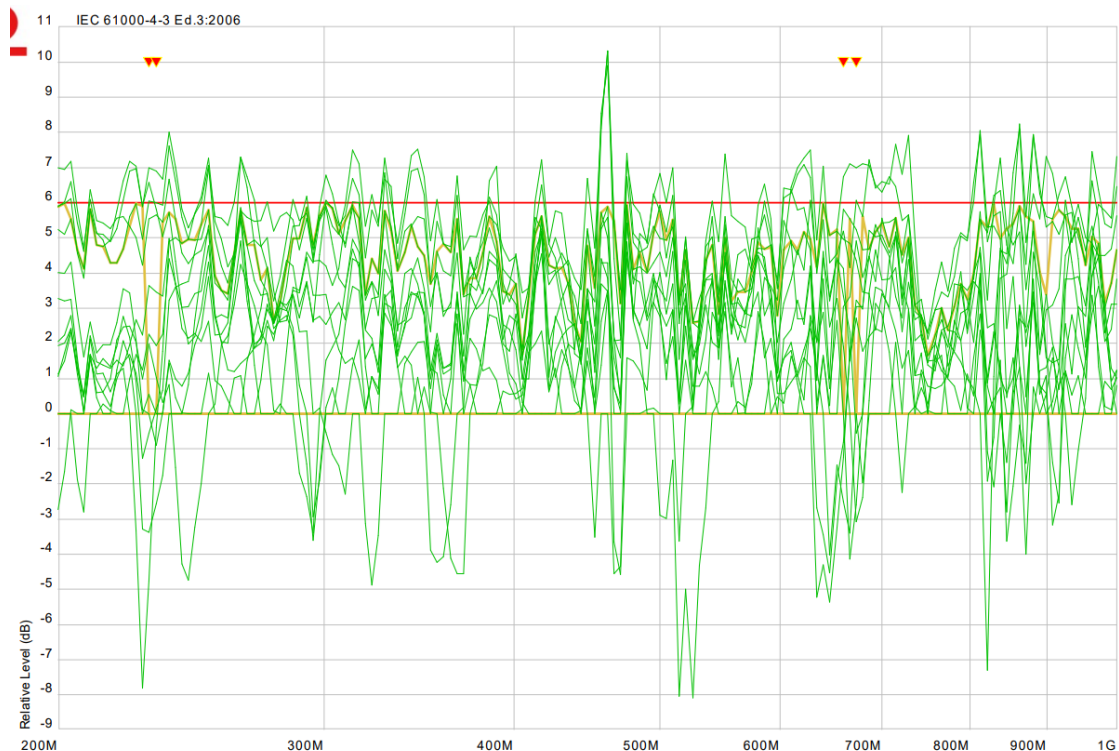
Z důvodu trendu z předchozích měření jsem se pro třetí měření rozhodl snížit anténu až na 110 centimetrů. Po naměření jsem bohužel získal nejhorší výsledky z měření s log-periodickou anténou. Jednalo se o 41,7 % neúspěšných frekvencí.

Vzhledem k neuspokojivým a velmi náhodným výsledkům jsem usoudil, že důvodem je velké množství odrazů. Ve čtvrtém měření jsem umístil anténu do vzdálenosti 1,8 m a do výšky 1,2 m. Výsledkem tohoto měření byl mnohem lepší výsledek. Jednalo se o 11 %. Může se zdát, že je tento výsledek dobrý, ale stále se jedná o zhruba každou desátou frekvenci, což je nepřijatelné.



Obrázek 6.7: Konfigurace pro měření s log-periodickou anténou v horizontální polarizaci (čtvrté měření)

Po analýze výsledků čtvrtého měření jsem se v pátém měření rozhodl o zvýšení antény na 1,3 m. Po odměření a analýze neprošlo kalibrací 6 % frekvencí a při ignorování nejvyšší řady dokonce jen 2,4 % frekvencí. Jednalo se o frekvence 230, 232, 660 a 673 MHz, což je přijatelná chyba. Norma ČSN EN 6100-4-3 dokonce dovoluje 3 % frekvencí do 1 GHz, které mohou překonat relativní odchylku 6 dB a mohou dosáhnout maximální relativní odchylky 10 dB, což je přesně tento případ a tuto kalibrace lze tedy prohlásit za úspěšnou. Tato skutečnost musí být uvedena v protokolu o zkoušce a při sporu dvou laboratoří má samozřejmě přednost tolerance 6 dB.



Obrázek 6.8: Relativní úroveň intenzity elektrického pole pro 12 bodů (bez horní řady) páté kalibrace s log-periodickou anténou v horizontální polarizaci

6.4.2 Vertikální polarizace

Vertikální polarizace s log-periodickou anténou byla čtvrtou a poslední variantou měření. Frekvenční rozsah v těchto měřeních byl 180 až 1 000 MHz, protože měření nebylo úspěšné na konci frekvenčního rozsahu bikonické antény ve vertikální polarizaci. Výsledky pro 12 bodů (při odebrání nejvyšší řady) byly lepší než výsledky homogenní plochy 1,5×1,5 m. Z tohoto důvodu jsem v některých měřeních vynechal měření nejvyšší řady, čímž jsem ušetřil čas.

První konfiguraci jsem volil stejnou jako při vertikální polarizaci s bikonickou anténou. Jednalo se o výšku antény 1,2 m a vzdálenost 1,8 m od testovacího stolu. Vyosení vůči ose stolu a bezdrazové stěny bylo 15 cm vpravo, což odpovídá

umístění přesně mezi levou stěnou a skříňkami. Výsledek pro 12 bodů byl 11,49 % neúspěšných frekvencí. Špatné výsledky byly především kolem 200 a kolem 300 MHz. v okolí 200 MHz byly úrovně intenzity elektrického pole nižší v levé části a v okolí 300 MHz byla nižší úroveň intenzity elektrického pole naopak v pravé části plochy homogenního pole. Z tohoto důvodu vychází jako lepší varianta oddálení antény.



Obrázek 6.9: Měřicí konfigurace s log-periodickou anténou ve vertikální polarizaci (první konfigurace)

Ve druhém jsem oproti prvnímu měření posunul anténu do vzdálenosti 3 m od stolu a zvolil jsem nulové vyosení vůči ose stolu. Výška antény zůstala 1,2 m. Výsledkem pro 12 bodů bylo 32,76 % neúspěšných frekvencí. Při této vzdálenosti pravděpodobně dochází k mnohonásobným odrazům od stěn, a proto je výsledek tak nevyhovující. Pro další měření je nepochybně nutné přiblížit anténu.

V pořadí třetím měřením byla konfigurace velmi podobná druhému měření. Jediným rozdílem byla vzdálenost antény od stolu, která činila 2,1 m. Výsledek byl opět horší než při prvním měření. Jednalo se o 21,26 % neúspěšných frekvencí. Toto měření potvrdilo domněnku, že změnou vzdálenosti antény nedosáhnou požadovaného výsledku.

Vzhledem k předchozím výsledkům jsem se rozhodl změnit vyosení antény. Pro čtvrté měření jsem zvolil vyosení 15 cm vlevo od osy stolu. Vzdálenost od stolu a výšku antény jsem ponechal. Výsledek byl kupodivu lepší, ale stále ne lepší než první měření. Neúspěšných frekvencí bylo 17,24 %.

Další možností na změnu byla výška antény. Tuto možnost jsem využil v pátém měření. Umístil jsem anténu 1,8 m od stolu do výšky 1,3 m. Vyosení antény v této konfiguraci bylo 15 cm vpravo od osy stolu, což je umístění v ose mezi skříňkami a stěnou. Měření jsem tentokrát udělal pro všech 16 bodů a výsledkem bylo stejné množství chyb pro 12 i 16 bodů. Výsledek byl 12,07 % neúspěšných frekvencí.

Posledním, šestým měřením bylo umístění antény do vzdálenosti 1,8 m od stolu a do výšky 1,3 m. Vyosení antény vůči stolu a bezodrazové stěně bylo nulové. Výsledkem kalibrace pro 12 bodů bylo 14,37 % neúspěšných frekvencí.

Simulace s log-periodickou anténou v konkrétních pozicích jsem nedělal, protože by simulace na některých frekvencích vůbec nedoběhla a časová náročnost by byla moc velká. Navíc se z porovnání simulací a měření s bikonickou anténou dá předpokládat, že by byly výsledky simulací úplně jiné než výsledky měření.

6.5 Shrnutí výsledků měření

V této kapitole jsem se pokusil stručně shrnout nejdůležitější poznatky z měření, které by měly následně sloužit jako určitý návod k budoucímu testování odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli. Pro všechny konfigurace platí vyosení stolu a bezodrazové stěny o 15 cm vlevo. Umístění bezodrazové stěny až u stěny a umístění stolu co nejbližší k bezodrazové stěně. Pokud není dáno jinak, tak platí kalibrace s 12 body, kde byl vynechán nejvyšší řádek bodů a jedná se tedy o plochu homogenního pole $1,5 \times 1$ m.

Anténa	Polarizace	Vzdálenost od stolu [m]	Výška antény [m]	Vyosení vpravo vůči stolu [cm]
Bikonická	Horizontální	3	1,3	0
Bikonická	Vertikální	1,8	1,2	15
Log-periodická	Horizontální	1,8	1,3	0
Log-periodická	Vertikální	1,8	1,3 (1,2)	15

Tabulka 6.4: Nejlepší zjištěné konfigurace

Bikonická anténa v horizontální polarizaci

Tato konfigurace vyšla nejlépe. Měření ve frekvenčním rozsahu 80-200 MHz plně odpovídá normě ČSN EN 61000-4-3 a je vhodné pro testování.

Bikonická anténa ve vertikální polarizaci

V této konfiguraci jsem v celém frekvenčním rozsahu 80-200 MHz nedosáhl požadovaných 6 dB pro 7 % frekvencí. Pro předcertifikační testy by měla být dostačující dosažená hodnota 9 dB, což znamená, že výsledné pole bude v některých bodech vyšší. V případě požadavku 6 dB je možné zmenšit frekvenční rozsah na 80-190 MHz a zbytek frekvencí otestovat s log-periodickou anténou. Poslední možností je otočení výrobku (včetně kabelů) a otestování s horizontální polarizací.

Log-periodická v horizontální polarizaci

Testování ve frekvenčním rozsahu 200-1 000 MHz je v této konfiguraci možné v rozsahu normy, kde jsou dovoleny 3 % frekvencí mezi 6 a 10 dB. Výsledných 2,4 % chybných frekvencí je pouze nutné uvést v protokolu o zkoušce. Vzhledem k předcertifikační povaze zkoušky je možné tuto skutečnost zanedbat.

Log-periodická ve vertikální polarizaci

Tato varianta dávala nejhorší výsledky. Z tohoto důvodu jsou ve výsledku 2 varianty. Výška antény 1,2 m je lepší pro pole $1,5 \times 1$ m a výška 1,3 m pro pole $1,5 \times 1,5$ m. Z mého pohledu je lepší výška 1,3 m, protože je ve větší ploše a výsledek v menší ploše je jen o jednu frekvenci horší. Nicméně 12 % je normou nepřijatelné. Existuje několik možností řešení. První možností je testování s vyšší tolerancí, což by mohlo být pro předcertifikační testy dostačující. Druhou variantou je rotace zařízení a opakování horizontální polarizace.

Závěr

Laboratoř EMC na Technické univerzitě v Liberci je pro měření odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu záření vybavena komorou GTEM, která umožňuje testovat výrobky o maximální velikosti $17 \times 17 \times 17$ cm. Mým úkolem tedy bylo vytvořit bezodrazovou stěnu, která by zajistila homogenní elektromagnetické pole pro testování rozměrnějších výrobků a tuto stěnu co nejvhodněji umístit v určeném prostoru. Před samotnou konstrukcí místnosti jsem provedl simulace v Comsol Multiphysics, které ukázaly určitý trend optimalizace homogenity elektromagnetického záření.

Pro testy byly použity bikonická anténa BC 01 pro zkoušky do 200 MHz a log-periodická anténa LP 04 pro zkoušky nad 200 MHz. Měření jsem provedl ve vertikální i horizontální polarizaci antén. Norma ČSN EN 61000-4-3 požaduje, aby bylo 75 % měřených bodů v relativní toleranci 0 až 6 dB. Díky simulacím a poměrně náročné optimalizaci a měření, které zabralo 120 hodin, se mi podařilo dosáhnout splnění výše zmíněných parametrů pro oblast $1,5 \times 1$ m v horizontální polarizaci antén a požadovaném frekvenčním rozsahu 80 až 1 000 MHz. Zkoušky ve vertikální polarizaci antén lze použít od 80 do 190 MHz. Pro zbývající frekvence do 1 GHz je možné použít pouze s odchylkou 8 dB, což je pro předcertifikační testy plně vyhovující. Existuje možnost otočit výrobek a opakovat horizontální polarizace, což plně vyhoví požadavkům na akreditované zkoušky.

Při požadavcích na lepší homogenitu elektromagnetického pole by bylo nezbytné použití většího množství bezodrazového materiálu na stěnách a za anténou. Pro eliminaci vlivu na okolní zařízení a osoby by bylo vhodné vytvořit elektromagneticky stíněnou komoru, která by mohla sloužit pro testování odolnosti i vyzařování větších výrobků. Dále bych doporučil pořídit anténu pro celý frekvenční rozsah, která by byla určena pro testování odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli a měla by lepší zisk a směrovost. Pravděpodobně by se jednalo o Bi-log anténu nebo nějakou speciální anténu.

Použitá literatura

- [1] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility* [online]. Brno, 2002 [cit. 2019-01-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3284087-Elektromagneticka-kompatibilita.html>. Skripta. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] *An die Nieren* [online] [cit. 2020-10-20]. Dostupné z: <https://www.spiegel.de/spiegel/print/d-13518844.html>.
- [3] DŘÍNOVSKÝ, Jiří; RŮŽEK, Václav; FRÝZA, Tomáš; ZACHAR, Jiří. *Elektromagnetická kompatibility* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-12-11]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=Skripta EMC.pdf>. Přednášky. VUT Brno.
- [4] JERIE, Aleš. *Pracoviště pro testování elektromagnetické kompatibility*. Liberec, 2019. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [5] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [6] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-2: Zkušební a měřicí technika – Elektrostatický výboj – Zkouška odolnosti*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [7] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-4: Zkušební a měřicí technika – Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů – Zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [8] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impulz – Zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [9] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) - Část 4-6: Zkušební a měřicí technika - Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli*. Ed. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [10] *Elektromagnetická kompatibility (EMC) – Část 4-11: Zkušební a měřicí technika - Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí - Zkoušky odolnosti*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005.

- [11] *What frequency is 5G?* [online]. 2020 [cit. 2020-11-27]. Dostupné z: <https://www.verizon.com/about/our-company/5g/what-frequency-5g>.
- [12] WILES, Martin; KRIZ, Alexander. Multi-Purpose Anechoic Chambers - EMC (SAR/FAR) to Antenna Measurements. In: [online]. 2005, s. 6 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://rf.seibersdorf-laboratories.at/fileadmin/uploads/intranet/dateien/le/rf/rf-publ/2005_multi-purpose_anechoic_chambers.pdf.
- [13] *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-20: Zkušební a měřicí technika – Zkoušky emise a odolnosti ve vlnovodech s příčným elektromagnetickým polem (TEM)*. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] *BC-01 – Biconical antenna 30 – 200 MHz* [online]. Narda, 2021 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.narda-sts.it/eng/products/antennas/bc01/>.
- [15] *LP-04 – Log Periodic Antenna 200 MHz – 6 GHz* [online]. Narda, 2021 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.narda-sts.it/eng/products/antennas/lp04/>.
- [16] *Compact X-Wing® BiLog® Antenna 30 MHz to 2 GHz* [online]. Teseq [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.teseq.com/products/CBL-6141.php>.
- [17] *Double-Ridged Horn Antennas* [online]. Schwarzbeck, c2013–2021 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <http://www.schwarzbeck.de/en/antennas/broadband-horn-antennas/double-ridged-horn-antenna.html>.
- [18] VOSECKÝ, Michal. *Zajištění homogenity zkušebního vysokofrekvenčního elektrického pole*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. ZČU Plzeň.
- [19] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. Vydání první. Praha: SNTL, 1975.
- [20] NOVÁK, Ivo. *Účinky elektromagnetického pole na lidský organismus* [online]. 2015 [cit. 2021-03-05]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/13319-ucinky-elektromagnetickeho-pole-na-lidsky-organismus>.
- [21] *Frankosorb absorbers* [online]. Frankonia Group, c2021 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: <https://frankonia-solutions.com/anechoic-chambers/frankosorb-absorbers/>.
- [22] *Frankonia FAC-3 L* [online] [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://frankonia-solutions.com/portfolio/fac-3-l/>.
- [23] *Albatross Projects COMMERCIAL EMC*. Nattheim, 2017.
- [24] *Frankonia SAC-10/P Pyramid* [online] [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://frankonia-solutions.com/portfolio/sac-10-p-pyramid/>.

Seznam příloh

Příložené CD

- A. Text diplomové práce
- B. Data ze simulací včetně úspěšných konfigurací
- C. Skript v Matlabu pro vyhodnocení dat
- D. Skript v Matlabu pro výpočet vidových frekvencí dutinového rezonátoru
- E. Průběhy relativních odchylek všech měření

PC v laboratoři EMC

- F. Programy v simulačním prostředí Comsol Multiphysics 5.6
- G. Naměřené hodnoty elektromagnetických polí (v programu Compliance 5)