

Vliv poruch měřícího zařízení při testování stínící účinnosti

Bc. Jaroslav Willert

Diplomová práce
2021



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav elektroniky a měření

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jaroslav Willert
Osobní číslo: A19410
Studijní program: N3902 Inženýrská informatika
Studijní obor: Bezpečnostní technologie, systémy a management
Forma studia: Prezenční
Téma práce: Vliv poruch měřicího zařízení při testování stínící účinnosti
Téma práce anglicky: The Influence of Measuring Device Failures During Shielding Effectiveness Testing

Zásady pro vypracování

1. Vypracujte literární rešerši na téma elektromagnetická kompatibilita a stínící účinnost.
2. Vytvořte model komory pro testování stínící účinnosti v simulačním software CST Studio Suite.
3. Navrhněte praktický experiment s komorou a výsledky srovnajte se simulacemi.
4. Optimalizujte experiment a model.
5. Identifikujte potenciální poruchy a navrhněte protiopatření.
6. Vyhodnoťte výsledky experimentu a simulace.

Forma zpracování diplomové práce: **Tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 8021418737.
2. PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0471755001.
3. GOOCH, Jan W. a John K. DAHER. Electromagnetic Shielding and Corrosion Protection for Aerospace Vehicles [online]. New York, NY: Springer New York, 2007, 2007, s. 17-24 [cit. 2020-11-05]. ISBN 978-0-387-46094-9. Dostupné z: DOI:10.1007/978-0-387-46096-3_3
4. IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0.1 m and 2 m. IEEE Std 299.1-2013. Leden 2014, s. 1-96. DOI: 10.1109/IEEESTD.2014.6712029
5. LEFERINK, F.B.J., H. BERGSMAN a W.C. VAN ETTEN. Shielding effectiveness measurements using a reverberation chamber. In: 2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility [online]. IEEE, 2006, 2006, s. 505-508 [cit. 2020-11-21]. ISBN 3-9522990-3-0. Dostupné z: doi:10.1109/EMCZUR.2006.214982

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Stanislav Kovář, PhD.**
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **15. ledna 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2021**

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan



Ing. Milan Navrátil, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 15. ledna 2021

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové/bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 15.5.2021

Jaroslav Willert v.r.
podpis diplomanta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem poruch měřícího zařízení při testování stínící účinnosti. V teoretické části je popsána elektromagnetická kompatibilita, její vznik a základní členění. Následuje popis stínící účinnosti a fyzikálních mechanismů útlumu a také vlivu technologických netěsností a otvorů. Závěr teoretické části se věnuje software CST Studio Suite, ve kterém je vymodelovaný a nasimulovaný praktický experiment. Praktická část práce je zaměřena na simulování 3D modelu, praktické ověření měřící techniky a srovnání výsledků obou experimentů. Následné vyhodnocení pomůže identifikovat potenciální poruchy či limity měřící techniky a navrhnout protiopatření. Experiment a přínos diplomové práce je shrnut v závěru.

Klíčová slova: Elektromagnetická kompatibilita, stínící účinnost, vliv poruch, útlum, technologické netěsnosti

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the influence of measuring equipment failures during testing of shielding effectiveness. The theoretical part describes electromagnetic compatibility, its origin, and basic classification. The following section includes a description of the shielding effectiveness and the physical mechanisms of attenuation, and the influence of technological leaks and openings. The conclusion of the theoretical part is devoted to the software CST Studio Suite, in which a practical experiment is modeled and simulated. The practical part of the thesis focuses on simulating a 3D model, practical verification of measuring techniques, and comparison of both experiment results. Subsequent evaluation helps identify potential failures and limits of measurement techniques and proposes countermeasures. The experiment and the contribution of the diploma thesis are summarized in conclusion.

Keywords: electromagnetic compatibility, shielding effectiveness, influence of failures, attenuation, technological leaks

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Stanislavu Kovářovi Ph.D. za odborné vedení, jež mi pomohlo při psaní této práce. Dále také děkuji svým rodičům a přítelkyni za podporu po celou dobu mého studia.

Motto:

„Chceš realizovat své sny? Probud' se!“

Joseph Rudyard Kipling

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	11
1.1 VZNIK ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	11
1.2 ROZVOJ ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	12
1.2.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů	12
1.2.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení	14
1.3 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	16
1.3.1 Elektromagnetická interference	16
1.3.2 Elektromagnetická susceptibilita	17
1.4 TVORBA Norem EMC.....	18
1.4.1 Civilní normy EMC.....	18
1.4.2 Vojenské normy EMC.....	20
2 STÍNÍCÍ ÚČINNOST	21
2.1 ÚČINNOST ELEKTROMAGNETICKÉHO STÍNĚNÍ	24
2.1.1 Útlum odrazem.....	24
2.1.2 Útlum absorpcí	25
2.1.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů	25
2.1.4 Celková účinnost.....	26
2.2 VLIV TECHNOLOGICKÝCH NETĚSNOSTÍ A OTVORŮ	27
3 CST STUDIO SUITE	32
II PRAKTICKÁ ČÁST	34
4 VYTVOŘENÍ MODELU KOMORY	35
4.1 TESTOVACÍ KOMORA EMC	35
4.2 MODELOVÁNÍ V CST STUDIU	38
5 NÁVRH PRAKTICKÉHO EXPERIMENTU	44
5.1 NÁVRH EXPERIMENTU	44
5.2 POUŽITÉ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ	48
5.3 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	50
6 OPTIMALIZACE EXPERIMENTU A MODELU	54
6.1 UKÁZKA NASIMULOVANÝCH DAT.....	56
7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	60
8 IDENTIFIKACE POTENCIONÁLNÍCH PORUCH	64
9 NÁVRH PROTIOPATŘENÍ	66

ZÁVĚR	69
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	70
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	73
SEZNAM OBRÁZKŮ	74
SEZNAM TABULEK.....	76

ÚVOD

Návrh a vývoj elektronických a elektrických zařízení prošel v posledních letech rozsáhlým vývojem, zejména s nástupem miniaturizace komponent. Pro návrháře těchto zařízení vznikl nepříjemný problém. Jak navrhnu zařízení, jež by byla schopna uspokojivě fungovat a zároveň neovlivňovala elektromagnetické prostředí. [1]

Vzhledem k možnostem, jež nabízí současné moderní technologie, je možné celý výrobní proces daného výrobku krok po kroku nasimulovat. Což vede k úspoře peněz a zároveň k eliminaci nežádoucích účinků či snížení spolehlivosti. Což vede k úspoře peněz a zároveň k eliminaci nežádoucích účinků či snížení spolehlivosti. V simulačních programech je možné nasimulovat nejrůznější vnější vlivy, jež na výrobek působí, takže je možné predikovat chování zařízení ještě před samotným vyrobením.

Simulační programy se také využívají pro elektromagnetickou kompatibilitu, která se v poslední době stává čím dál tím více probíraným tématem. Každý výrobek musí splňovat legislativní specifikaci úrovně energie vyzářené a přijímané a v případě, že požadavek není dodržen, výrobek nesmí být prodáván, neboť může mít nežádoucí účinky nejen na lidské životy, ale i na elektrická a elektronická zařízení. Tyto zařízení musí být zkonstruována tak aby nepřístupně neovlivňovaly ostatní zařízení, které jsou umístěny v jejich elektromagnetickém prostředí, zároveň ovšem musí bez jakýchkoliv problému či omezení vykonávat svou činnost pro kterou byly tyto zařízení zkonstruována.

V dnešní době je tedy opravdu velmi nutné se touto oblastí zabývat, neboť počet elektrických a elektronických zařízení každý den stoupá a bez oblasti EMC by již dnes nebylo možné fungovat tak jak jsme dnes zvyklí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

Elektromagnetická kompatibilita dříve označována jako slučitelnost, vyplývá z anglického „Electromagnetic Compatibility“ (EMC – mezinárodně uznávaná zkratka). Je to schopnost vykazovat správnou činnost i v prostředí, ve kterém se nacházejí i jiné elektromagnetické signály a zároveň nedochází k nepřijatelnému ovlivňování svého okolí rušivými signály. [1]

Tyto signály je možné rozdělit následovně:

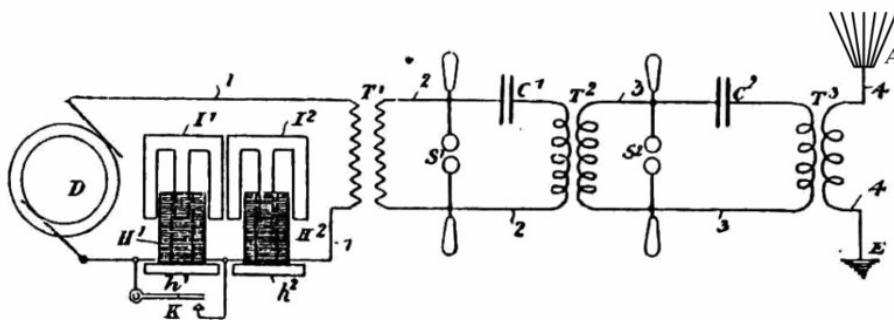
- signály přírodní (přirozené) – Slunce, elektrické procesy v atmosféře,
- signály umělé – vytvořené lidskou činností. [1], [2]

1.1 Vznik elektromagnetické kompatibility

Jako samostatný vědní obor vznikla elektromagnetická kompatibilita již v 60. letech dvacátého století v USA. Nejdříve byla tato disciplína předmět zkoumání úzkého kruhu lidí. Především z odborníků pracujících ve vojenském a kosmickém odvětví. [1]

H. M. Schlike, jeden ze zakladatelů elektromagnetické kompatibility jako samostatného oboru, v roce 1968 řekl: *"Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností"* Aktuální trend elektrických zařízení dává H. M. Schlikemu jednoznačně za pravdu. [1]

Interference byla poprvé představena experimentem Marconiho na konci 19. století. Kdy v roce 1901 provedl první transatlantický přenos. V té době existovalo pouze malé množství rádiových přijímačů, takže problém s rušením byl vždy poměrně jednoduše vyřešen.



Obr. 1 - Marconiho rádiový vysílač. [3]

Nicméně technická specifikace o rádiovém rušení se v různých odborných časopisech začala objevovat kolem roku 1920. Antény tehdy byly poměrně velmi náchylné k rušení z externích zdrojů nebo z vnitřních jako u samoindukovaných oscilací. Vylepšení v konstrukční technologii vyřešilo tyto vzniklé problémů. Kolem roku 1930 se začali objevovat problémy u elektrických motorů. Období druhé světové války zaznamenalo enormní nárůst rádií, navigací či radarů, a tedy i případů jejich vzájemné interference. Interferenční problémy se vyskytovaly zejména v leteckém sektoru, který tyto komplikace řešil restrukturalizací kabelové sítě. Tedy umístěním mimo dosah zdrojů rušení. Případy kdy interference mezi rádiem a navigací v letadlech způsobovala problémy začala přibývat. Tyto případy byly obvykle vyřešeny přemístěním kabelů od zdroje rušení. Postupný vývoj v elektronice vedl k minimalizaci elektroniky a začalo tak docházet k nárůstu problémů s interferencí. V 50. let byl objeven bipolární tranzistor, v 60. letech byl vynalezen integrovaný obvod a v 70. letech došlo k vytvoření prvního mikroprocesoru. Význam EMC vznikl nejspíše v 70 letech po zavedení zpracování digitálního signálu, jenž nahradil zpracování analogového signálu a tím došlo k zvýšení rychlostí a zmenšování obvodů. [2]

1.2 Rozvoj elektromagnetické kompatibility

Rozvoj elektroniky v posledních letech má za důsledek neustále stoupající počet elektrických zařízení a s tím spojené elektromagnetické rušení, jenž se pohybu v pásmu od 0 Hz až do stovek GHz. V praxi se velmi často stává, že citlivá elektronická zařízení musejí pracovat v prostředí, kde dochází k velmi silnému rušení, a tak někdy vznikají obtížné situace. Šum lze pouze snížit na určitou velikost, která je již přípustná. [1], [2]

Problematiku Elektromagnetické kompatibility je možné rozdělit na následující oblasti:

- elektromagnetická kompatibilita biologických systémů,
- elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení. [1], [2]

1.2.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů popisuje přípustné úrovně rušivých i užitečných elektromagnetických signálů, s ohledem, jaké mají vlivy na živé organismy. I přesto, že jsou tyto účinky pozorované již delší dobou, stále nejsou výsledky v této oblasti zcela jednoznačné. Neboť nejsou známe receptory pole, posuzují se tyto účinky podle nespécifikovaných reakcí organismu. [1]

Znepokojení je téma ohledně bezdrátových sítí se týká především možných dlouhodobých účinků na zdraví, které může mít vystavení vysokofrekvenčním signálům na celé tělo. Zatím jediným zdravotní účinek z vysokofrekvenčních polí, jež byl identifikovaný ve vědeckých laboratořích doposud souvisel se zvýšením tělesné teploty ($> 1^\circ\text{C}$) z expozice při velmi vysoké intenzitě pole, která se vyskytuje pouze v některých průmyslových zařízeních, jako jsou vysokofrekvenční ohříváče. Úrovně vystavení vysokofrekvenčnímu záření ze základních stanic a bezdrátových sítí jsou tak nízké, že zvýšení teploty je nevýznamné a nemá vliv na lidské zdraví.

Nejsilnější vysokofrekvenční pole je přímo u zdroje a s postupným narůstání vzdálenosti od zdroje rychle klesá. V blízkosti antén základní stanice je pohyb osob omezen z důvodu, že zde mohou vysokofrekvenční signály překročit mezinárodní limity expozice.

Nicméně, ve skutečnosti tělo při nižších frekvencích absorbuje, pětkrát více signálu z FM rádia a TV než se základních stanic. Důvodem je používání nízkých frekvencí FM rádio (přibližně 100 MHz), TV vysílání (300 až 400 MHz). [4]

Reakce na elektromagnetické pole se u každé osoby liší, a proto je velmi složité stanovit jednoznačné výsledky. Z tohoto důvodu je i velmi málo klinických studií a závěrů.

Mezi nežádoucí vlivy na člověka patří:

- přímé působení elektromagnetického pole na pracovišti,
 - obsluha vysílačů, obsluha výpočetních středisek,
- dlouhodobé působení v domácnosti,
 - domácí elektronické zařízení, kuchyňské spotřebiče, počítače. [1]

Výzkumná lékařská centra se zabývají odolností lidského organismu vzhledem k účinkům elektromagnetických vlivů. Nejvíce zatím objasněnými oblastmi jsou vysokofrekvenční a mikrovlnná pole, u nichž se jedná o tepelné účinky, jež mají za následek ohřev tkání organismů vystavených vysokým úrovním polí. Naopak na imunitní či nervový systém působí tzv. netepelné účinky. Tyto účinky však zatím nebyli jednoznačně potvrzeny. [1]

V české republice se tato problematika řeší v Nařízení vlády č. 291/2015 Sb. Ochrana zdraví před neionizujícím zářením, jenž vešlo v účinnost 18.11.2015 a nahrazuje předchozí nařízení. V tomto nařízení jsou specifikována např.:

- hodnocení expozice,
- minimální rozsah opatření k ochraně zdraví zaměstnance při práci s neionizujícím zářením,
- minimální rozsah informací poskytnutých zaměstnanci k ochraně zdraví při práci
- bezpečnostní značky. [5]

1.2.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů a zařízení

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů zařízení zkoumá vzájemné působení a ovlivňování technických prostředků. Původně tato oblast byla zaměřena pouze na oblast ochrany proti rušení rádiového signálu, ale v posledních letech k dalšímu členění na několik podoborů a oblastí. Nedůležitější je ovšem vědomí toho, že se jedná o výrazně aplikační a systémový obor. Při zkoumání EMC se vychází z obr. 1 Základní řetězec EMC. [1],[2]



Obr. 2 - Základní řetězec EMC. [1]

První část řetězce popisuje zdroj elektromagnetického rušení. Tato oblast se zaměřuje na to, jak vzniká elektromagnetické rušení, jeho charakter a intenzitu. Reprezentativní prvky první části jsou např.: svářečky, počítače, zářivky, motory atd. [1].

Zdroje rušení je možné rozdělit na dvě skupiny:

- umělé zdroje rušení,
- přírodní zdroje rušivých signálů. [1]

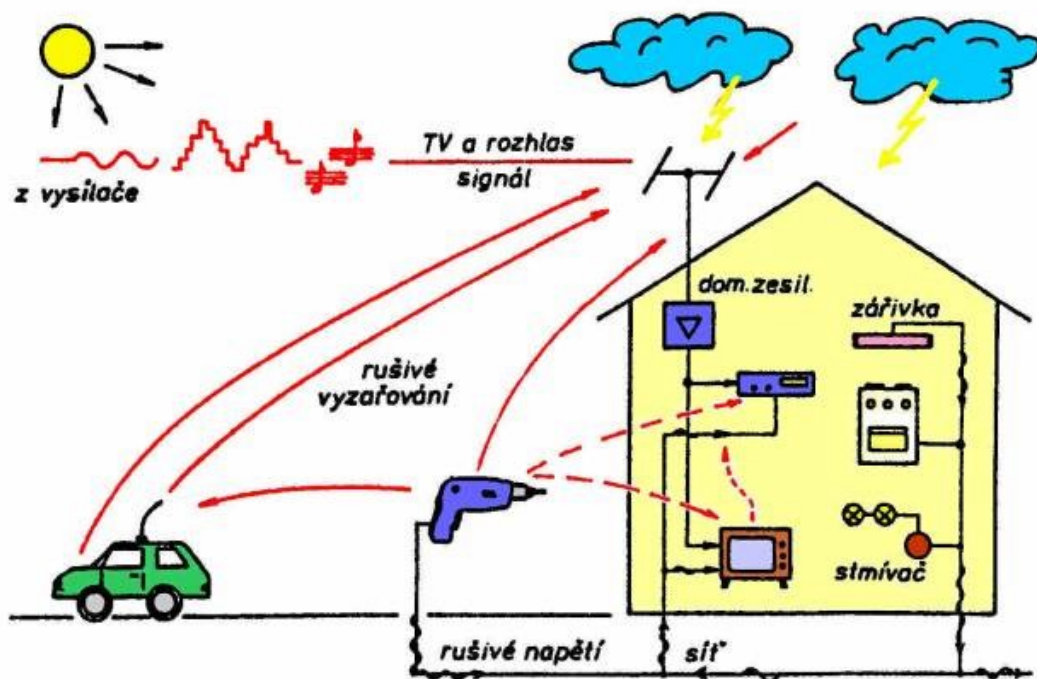
Prostřední část řetězce se soustředí na elektromagnetický přenos prostředím a vazbami tzn. popisuje jakými možnostmi se dostává energie ze zdroje do přijímačů rušení.

V této části jsou jako reprezentativní prvky vybrány např.: zemnění, stínění, vzdušný prostor, datové vodiče atd. [1]

Poslední část řetězce se zabývá detailní specifikací na základě vyhotovení analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho vyplývající odolností proti rušení. V této poslední části jsou reprezentativní prvky následující: počítače, měřicí technika, rozhlasové a televizní přijímače atd. [1]

Opravdová spojitost mezi všemi třemi částmi EMC je daleko složitější, neboť ve skutečnosti může být každé zařízení nebo systém zároveň přijímač i vysílač. Skutečný EMC řetězec se vždy zaměřuje na více systému, jenž se vzájemně a všestranně ovlivňují. [1], [2]

V reálných podmínkách není nikdy zdroj rušení pouze jeden a proto, se nejdříve jeden systém označí jako ovlivňující systém (zdroj rušení) a ostatní systémy jako ovlivňované systémy (přijímače rušení) a po provedeném měření se tyto systémy vymění a opět změní. Souhrn rušivého působení může vést přes zhoršené kvality systémových parametrů, až k havarijním stavům. [1], [2]



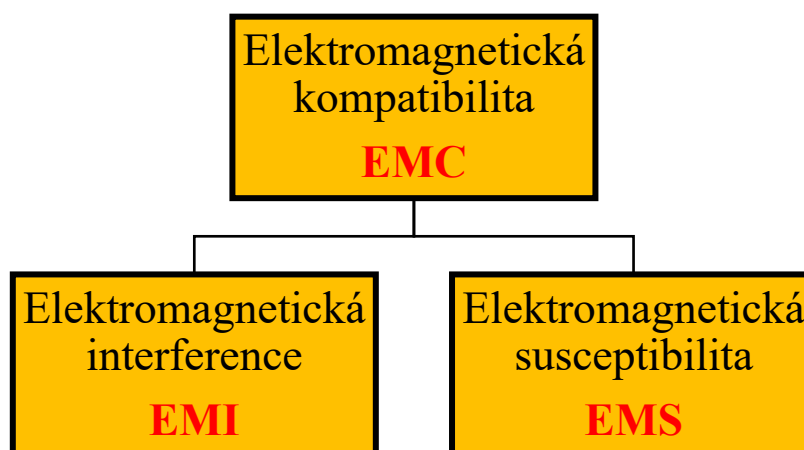
Obr. 3 – Působení různých rušivých signálů. [1]

Podle Obr. 3 lze vidět, že se jedná o velmi složitou oblast. Je potřeba zvážit, zda se jedná o rušivé účinky ovlivňující systém, funkční parametry nebo parazitní produkty. Následně se zaměřuje na minimalizaci zdroje rušení. [1]

1.3 Základní členění elektromagnetické kompatibility

V současné době dochází k testování elektromagnetické kompatibility pomocí simulátorů rušení. Jedná se v podstatě o praktické ověření stupně EMC navrženého zařízení. Toto testování probíhá nejen v průběhu vývoje výrobku, ale i na hotových výrobcích. Tuto možnost počítačových simulací v širokém spektru různých softwarů, využívá nemalý počet firem. Toto testování ve fázích návrhu vývoje umožňuje optimalizovat technický návrh zařízení z hlediska EMC. [1]

Z následujícího Obr. je zřejmé, že se EMC rozděluje na dvě základní oblasti. První z nich je elektromagnetická interference a druhou je elektromagnetická susceptibilita. [1]



Obr. 4 – Základní členění EMC. [1]

1.3.1 Elektromagnetická interference

Elektromagnetické interference neboli rušení (EMI) se stalo významným problémem pro návrháře obvodů a je velmi pravděpodobné, že vzhledem k velkému počtu dennodenně používaných elektronických zařízení v budoucnu bude tento problém ještě větší. [6]

Současný trend, kdy se velikost elektronických zařízení zmenšuje, čili dochází i k zmenšování elektronických obvodů, jenž jsou čím dál tím sofistikovanější, tudíž se samozřejmě zvyšuje pravděpodobnost rušení. Kromě zmenšování se začala v posledních letech zvyšovat frekvence. Není nic neobvyklého, že osobní počítač pracuje mnohdy s vyšší frekvencí než GHz. [6]

Elektromagnetická interference je vlastně proces, při kterém se v elektromagnetickém prostředí, přenáší generovaný zdroj rušení do rušených systémů. V elektromagnetické interferenci jde hlavně o identifikaci původu rušení její následnou specifikaci, identifikaci

parazitních cest a měření rušivých signálů. Z toho vyplývá, že se EMI zabývá především příčinou rušení a jeho odstranění. [1]

1.3.2 Elektromagnetická susceptibilita

Elektromagnetická susceptibilita neboli imunita (EMS), popisuje schopnost zařízení a systémů pracovat v prostředí, v němž dochází k elektromagnetickému rušení, a to bez jejich poruch. EMS se tedy zabývá zvýšením elektromagnetické imunity, z toho vyplývá, že se nejedná o odstraňování příčin, ale spíše o odstraňování rušení. [1]

Elektromagnetická interference spolu s elektromagnetickou susceptibilitou zahrnují mnoho stejných postupů. Jednou z nedůležitějších oblastí je především identifikace a měření rušivých signálů, jež také obsahuje měřící metody a postupy pro hodnocení vybraných parametrů na přijímačů rušení a jejich zdrojů. Oblast měření je pro finální specifikování EMC určitého zařízení vždy rozhodující. Jedná se o velmi komplikované rozhodování, neboť je důležité respektovat, že měřící zřízení je zdrojem i přijímačem rušení. [1]

Je velmi důležité klasifikovat funkční kritéria elektromagnetické susceptibility jakéhokoli testovaného zařízení. Jedná se o vliv přijatého elektromagnetického pole působící na zařízení. Funkční kritéria jsou definována normou EN 50082. Rozdělení základních funkčních kritérií je uvedeno v Tab. 1 níže. [7]

Tab. 1 – Rozdělení základních funkčních kritérií. [8]

Kritérium	Popis
A	Testované zařízení není ovlivněn vnějším elektromagnetickým pole.
B	Dochází k ovlivnění funkce testovaného zařízení vnějším elektromagnetickým polem. V moment odstranění externího pole dochází k zpětné normální funkci zařízení. Vnější elektromagnetické pole nezmění data uložená v paměti zařízení.
C	Funkce testovaného zařízení je ovlivněna vnějším elektromagnetickým polem. V moment odstranění externího pole dochází k zpětné normální funkci zařízení buď automaticky, nebo prostřednictvím dálkového ovládání, či operátorem podle kroků, jež jsou definovány v uživatelském návodě k zařízení.
D	Testované zařízení je trvale ovlivněno, i když vnější elektromagnetické pole bylo odstraněno. Zařízení je zničeno nebo poškozeno.

1.4 Tvorba norem EMC

Technická norma je základem normalizace ve všech technických oblastech. Je to dokument, v němž, je jednoznačně definováno pro jednotlivé zařízení nebo systémy jaké mají mít vlastnosti, provedení, tvar, způsob a postup práce. Většinou se zde nacházejí i všeobecně užívané technické pojmy. Jedná se tedy o požadavky na kvalitu, bezpečnost, ochranu zdraví a životního prostředí. [9], [10]

Technická norma není ovšem závazná, jedná se pouze o kvalifikované doporučení. Dodržení určité normy je pouze dobrovolné. Nicméně je vhodné normu aplikovat už jen z ekonomického hlediska konkurenceschopnosti na hospodářském trhu a také hlediska prestiže firmy ve vztahu ke spotřebiteli a usnadnění volného pohybu zboží v mezinárodním obchodu. Samozřejmě její dodržení je také vhodné z důvodu bezpečnosti a zajištění ochrany životního prostředí. [9], [10]

Základní normy v oblasti EMC jsou sestaveny ze skutečnosti, že každé elektrotechnické zařízení je zdrojem elektromagnetické interference a zároveň má určitou úroveň elektromagnetické susceptibility. Vzhledem k nemožnosti dosáhnout u jakéhokoliv zařízení absolutní elektromagnetické kompatibility je velmi důležité mít stanovené maximální hodnoty rušivých signálů, které je možné akceptovat. Ve všech zemích Evropské Unie platí mezinárodní normalizace. Každé zařízení nebo přístroj uváděný na trh musí této normě vyhovovat. Bez splnění požadavků a prokázání souladu s touto normou je zakázáno zařízení prodávat, ale i propagovat, nedodržení je finančně sankcionováno. [1]

1.4.1 Civilní normy EMC

Mezi hlavní představitele Evropské komise pro normalizaci elektrotechnických zařízení patří CENELEC, jež je jednou z národních evropských normalizačních organizací. Mezi členy této komise patří například národní normalizační orgány Belgie, Francie, Irsko, Německo, Norsko, Portugalsko, Rakousko, Švédsko a Velká Británie. Normy a doporučení vytvářené těmito komisemi jsou celoevropsky harmonizované. [9], [10]

Problematiku EMC v rámci CENELEC zkoumá především technická komise TC 110, která přebírá již existující mezinárodní normy na základě dohody o spolupráci a také zpracovává obdržené požadavky nebo nové návrhy na vypracování norem. Nově vzniklé normy je možné rozdělit do 3 skupin:

- **Základní normy** – popisují oblast EMC a specifikují základní všeobecné podmínky pro splnění elektromagnetické kompatibility u různých zařízeních. Základní normy

ovšem přesně nedefinují meze odolnosti či rušení a také, žádné vyhodnocovací kritéria. [9], [10]

- **Kmenové normy** – definují minimální požadavky nejen pro vyzařování, ale i pro odolnost. Také jsou zde specifikovány testovací metody EMC pro technická zařízení pracující v různých elektromagnetických prostředích jmenovitě:
 - průmyslové prostředí,
 - obytné prostředí,
 - speciální prostředí. [9], [10]
- **Předmětové normy (výrobní normy)** – Přesně specifikují jednotlivé požadavky a testovací metody EMC pro určité výrobky, skupiny výrobků či zařízení. Předmětové normy ovšem musí být v souladu s normami základními a kmenovými a mohou být použity na následující výčet skupin výrobků:
 - televizory a podobná zařízení,
 - spotřebiče pro domácnost,
 - dopravní a přepravní zařízení,
 - lékařská zařízení,
 - kancelářské stroje a přístroje,
 - měřicí a testovací zařízení. [9], [10]

Všechny výše uvedené typy norem jsou podle stupně své legislativní podpory rozděleny do dvou skupin:

Závazné normy – vyrábět a prodávat výrobky, jenž nevyhovují těmto normám je nelegální.

Doporučené normy – vznikají většinou za spolupráce výrobců a normalizačních organizací. Jedná se o určitou dohodu a má pouze doporučující charakter. I přesto, že se jedná pouze o doporučené normy, jejich význam může být téměř shodný s důležitostí závazných norem. [9], [10]

1.4.2 Vojenské normy EMC

Historicky první sepsané normy a předpisy z oblasti EMC, z nichž později vznikly i civilní normy byli normy vojenské (**MIL-STD**), jež jsou využívány ve většině armádách světa. Za nejpracovanější soustavu norem EMC, je označovaná soustava norem MIL-STD, jež vznikla v amerických ozbrojených silách. Pomocí NATO se tyto normy rozšířily do celé západní Evropy a byly převzaty armádami těchto zemí. [9], [10]

Normy vojenské se od civilních norem z oblasti EMC liší především v měření a vyhodnocování elektromagnetického rušení. U vojenské normy je využívání detekce špičkových hodnot, na rozdíl od civilní normy, jež je založena na detekci kvazi-špičkových hodnot. [9], [10]

Civilní norma je zaměřena hlavně na ochranu zvukového signálu a rádiového příjmu před účinky rušení, kdežto pro vojenské využití je nejdůležitější správně vyhodnotit špičkovou hodnotu rušení a jeho nežádoucí vliv na vojenská elektronická vybavení, zejména při testování účinnosti jejich stínění špičkovým detektorem. [9], [10]

Mezi další rozdíly vojenské a civilní normami patří odlišný kmitočtový rozsah a především nestejnost doporučené mezní hodnoty elektromagnetického vyzařování. [9], [10]

2 STÍNÍCÍ ÚČINNOST

Tato kapitola se zabývá stínící účinností elektronických obvodů. Elektromagnetické stínění na straně přijímačů umožňuje nejen snížení elektromagnetického rušení, ale také zvýšení elektromagnetické odolnosti. [1]

Stínění je charakterizováno jako konstrukční prostředek, jenž, ve vymezené části prostoru oslabí rušivé pole signálů. Termín štít obvykle označuje kovové pouzdro, které zcela obklopuje elektroniku. Používá se ochrana jednotlivých součástek, bloků nebo zařízení. [1]

Jedná se o efektivní způsob elektromagnetické ochrany, jak zamezit kontinuálním a impulzivním rušení. [1]

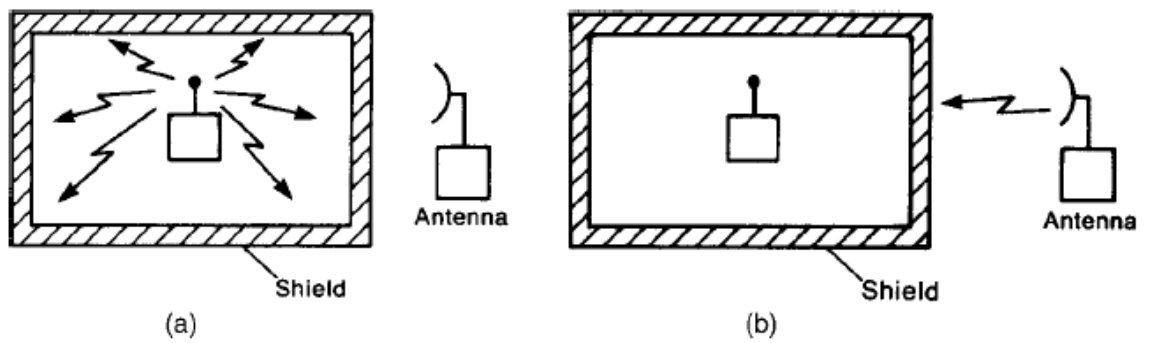
Působení elektromagnetického stínění je možné definovat koeficientem stínění K_s jenž je možné definován poměrem intenzity elektrického pole E_t (nebo magnetického pole H_t) v určitém bodě stíněného prostoru k intenzitě E_i (H_i) pole dopadajícího na stínící. [1]

$$K_s = \frac{E_t}{E_i} \qquad K_s = \frac{H_t}{H_i} \qquad (1), (2)$$

Pro výpočet elektromagnetické účinnosti se většinou v praxi využívá logaritmické vyjádření efektivnosti či účinnosti stínění z angl. Shielding Effectiveness (SE) a je udávána v decibelech (dB). [1]

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_s|} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| \qquad SE = 20 \cdot \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right| \cdot [dB] \qquad (3), (4)$$

Existují dvě varianty stínění. První z nich je vyobrazena na obr.6 (a). Je zde znázorněno zabránění vyzařování rušivých signálů. Druhá možnost je také vyobrazena na obr. 6, ale nyní (b). Tato možnost zabraňuje vyzařování mimo propojené zařízení. Na obr. 7 je vyobrazena zkušební komora EMC. Zde také platí, že stínění je bariérou elektromagnetického přenosu. [2]



Obr. 5 – Rozdělení stínění. [2]

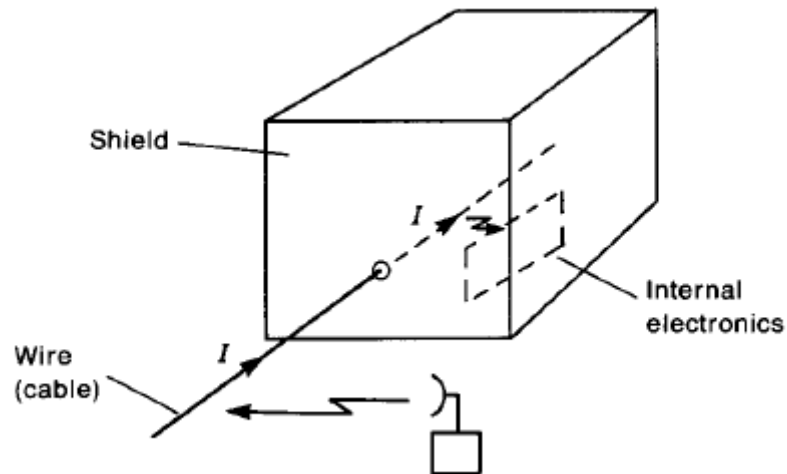


Obr. 6 – Testovací komora EMC. [2]

Stínění musí uzavřít elektroniku bez existence průniků, jako jsou otvory, sloty nebo kabely. Jakékoli průniky stíněním, pokud nejsou řádně ošetřeny, mohou drasticky snížit účinnost stínění, neboť bude docházet k únikům. [2]

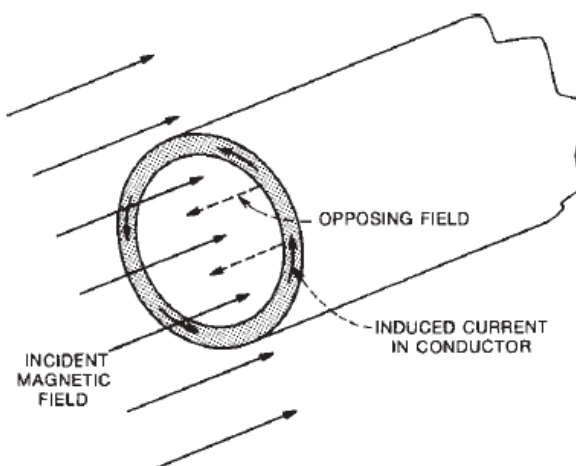
Na Obr. 7 je vyobrazena uzavřená kovová komora do níž proniká vodič. Za předpokladu, že je poblíž vyzařující zdroj, jako je anténa, jež generuje elektromagnetické pole. Bude toto pole přecházet na kabel a bez větších problémů se dostane dovnitř komory. [2]

Dojde k naprosté eliminaci stínění, proto je nezbytné, aby všechny prostupy kabelů byly řádně ošetřeny. Je možné filtrovat kabel ve vstupním/výstupním bodě nebo použít stíněný kabel, který je připojen k produktovému stínění. [2]



Obr. 7 – Narušení stínění kabelem. [6]

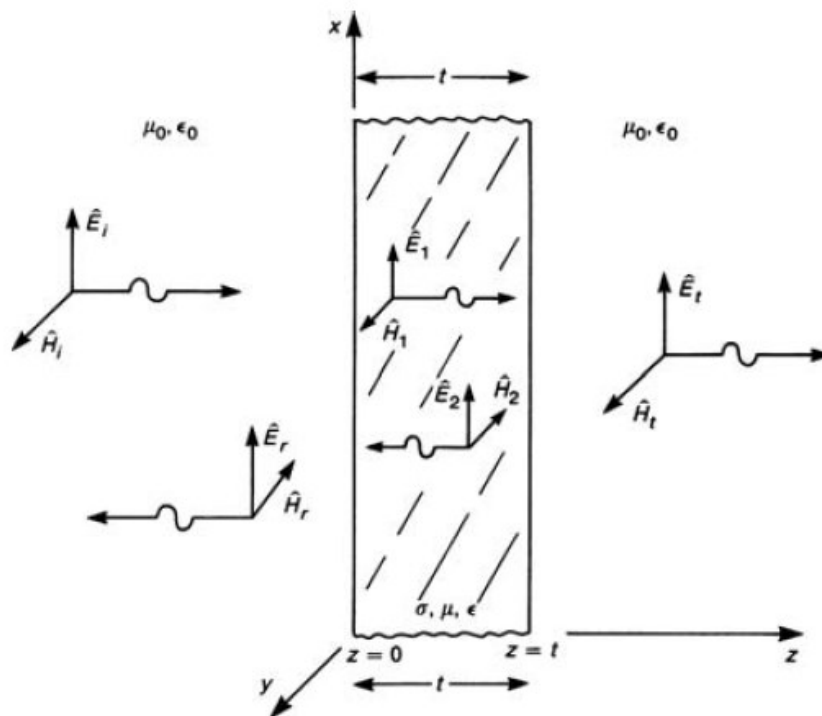
Nemagnetický materiál může poskytovat magnetické stínění. Magnetické pole indukuje proudy ve vodiči, které vytváří protichůdné pole čímž dojde ke vyrušení stávajícího pole uzavřeného v prostoru stínění. [6]



Obr. 8 – Stínění vodiče. [6]

2.1 Účinnost elektromagnetického stínění

Účinnost stínění se mění podle frekvence, geometrie stínění. Dále také záleží na vlnové délce, jež je zeslabeno, úhlem dopadu a polarizací. Jednoduchá geometrie rovinné vrstvy vodivého materiálu představuje koncepci stínění a poukazuje na vliv vlastností materiálu na celkovou stínící účinnost. Výsledky výpočtu jsou použité pro odhad relativní účinnosti stínění různých materiálů. Existují tři typy útlumu při nárazu elektromagnetických vln na kovový povrch. [2], [6]



Obr. 9 - Rovinná vlna dopadající kolmo k povrchu. [2]

Účinnost stínění (SE), jež se nachází, ve vzdáleném elektromagnetickém poli se vypočítá vyobrazeným součtem. Z Obr. 9 vyplývá jednoduchý vztah, že stínící účinnost je dána součtem dílčích stínících vlastností, tedy útlumem materiálu odrazem mezi prostředími R, útlumem absorpcí materiálů A, útlumem vícenásobných odrazů mezi prostředími M. [2]

$$SE \text{ [dB]} = R \text{ [dB]} + A \text{ [dB]} + M \text{ [dB]} \quad (5)$$

2.1.1 Útlum odrazem

Útlum odrazem vzniká částečného odrazu vlny na vstupním a výstupním impedančním rozhraní. K vyššímu útlumu dochází u elektrické složky pole na vstupním rozhraní a pouze malá část přechází výstupní rozhraní. U magnetické složky pole naopak

dochází na vstupním rozhraní pouze k minimálnímu útlumu a útlum vyšší nastává na výstupním rozhraní. [6], [10]

2.1.2 Útlum absorpcí

Útlum absorpcí označený A vzniká, v moment, kdy je část elektromagnetické vlny utlumena při průchodu stínicí kovovou přepážkou. Když elektromagnetická vlna prochází médiem, jeho amplituda exponenciálně klesá. K tomuto úpadku dochází, protože proudy indukované ve stínění způsobují ohmický útlum a zahřívání materiálu. [10]

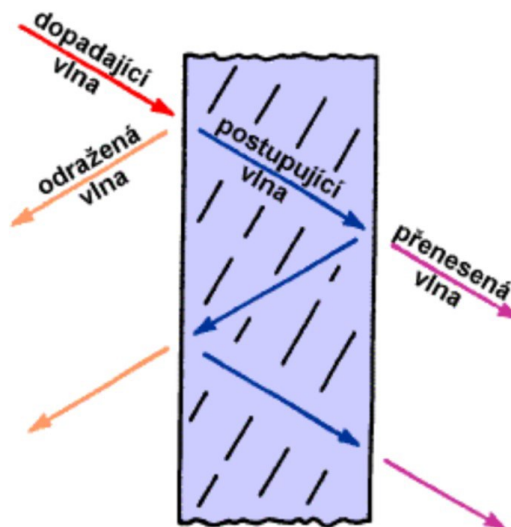
Pokud je intenzita vln ve vzdálenosti t uvnitř stínění. Vzdálenost potřebná k útlumu vlny je přibližně 37 % jeho původní hodnoty a je definována jako hloubka materiálu. Pro názornost je vyobrazen rozdíl mezi mědí, hliníkem, ocelí a mumetalem v Tab.2 [6]

Tab. 2 - Hloubky šíření frekvencí v povrchu materiálů. [6]

Frekvence		Měď	Hliník	Ocel	Mumetal
60	Hz	0,335	0,429	0,034	0,014
100	Hz	0,26	0,33	0,026	0,011
1	kHz	0,082	0,105	0,008	0,003
10	kHz	0,026	0,033	0,003	-
100	kHz	0,008	0,011	0,008	-
1	MHz	0,003	0,003	0,0003	-
10	MHz	0,0008	0,001	0,0001	-
100	MHz	0,00026	0,003	0,00008	-
1000	MHz	0,00008	0,0001	0,00004	-

2.1.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů

K opakovaným odrazům dochází při průchodu elektromagnetické vlny vodivou přepážkou. Schematicky je tento jev vyobrazen na Obr. 10. Skládání mnohonásobně odražených vln může mít neopomenutelný vliv na celkový útlum kovové přepážky. [1]

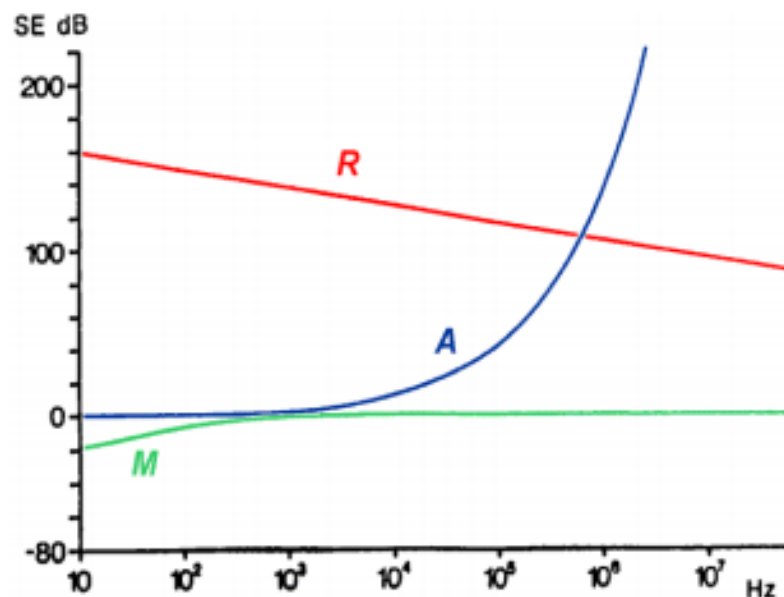


Obr. 10 -Mnohonásobné odrazy. [1]

2.1.4 Celková účinnost

Pro celkovou účinnost stínění je obvykle nejdůležitější útlum odrazem spolu s absorpčním útlumem přepážky. Je možné konstatovat, že pro vysoce vodivé kovy je útlum odrazem vyšší na nižších kmitočtech. Hodnota útlumu odrazem s rostoucím kmitočtem se zmenšuje o – 10 dB/dekádu. Materiály nemagnetické vykazují vyšší úroveň útlumu než feromagnetické materiály. [1]

Absorpční útlum vzrůstá na vysokých kmitočtech a převyšuje útlum odrazem. U magneticky kovových materiálů na vysokých kmitočtech dochází k daleko výraznějšímu nárůstu účinnosti stínění oproti nízkým kmitočtům. Tyto skutečnosti jsou vyobrazeny kmitočtovými průběhy obou složek účinnosti stínění – útlumu odrazem R a útlumu absorpcí A . [1]



Obr. 11 - Kmitočtový průběh účinnosti stínění. [1]

Na Obr. 11 - Kmitočtový průběh účinnosti je také znázorněn i kmitočtový průběh útlumu mnohonásobným odrazem M. Při nízkých kmitočtech je hodnota M záporná a dochází k snížení celkové účinnosti kovové přepážky. Naopak mnohonásobné odrazy se zvyšujícím kmitočtem přestávají ovlivňovat výslednou účinnost stínění. [1]

Pokud je přepážka velmi tenká může docházet k nepříznivému uplatňování mnohonásobných odrazů i na vyšších kmitočtech. Nejčastěji k tomuto dochází u počítačových nebo u přístrojových stínících krytů, jež jsou zkonstruovány za použité velmi tenkého pokovovaného povlaku na vnitřním povrchu nekovové přístrojové skříně. [1]

Tab. 3 - Účinnost stínění velmi tenkých měděných povlaků. [11]

Tloušťka stínění	0,1 μm		1,25 μm		2,2 μm		22 μm	
Kmitočet [MHz]	1	1000	1	1000	1	1000	1	1000
Útlum odrazem R [dB]	109	79	109	79	109	79	109	79
Absorpční útlum A [dB]	0,014	0,44	0,16	5,2	0,29	9,2	2,9	92
Mnohonásobné odrazy M [dB]	-47	-17	-26	-0,6	-21	-0,6	-3,5	0
Účinnost stínění SE [dB]	62	62	83	84	88	90	108	171

2.2 Vliv technologických netěsností a otvorů

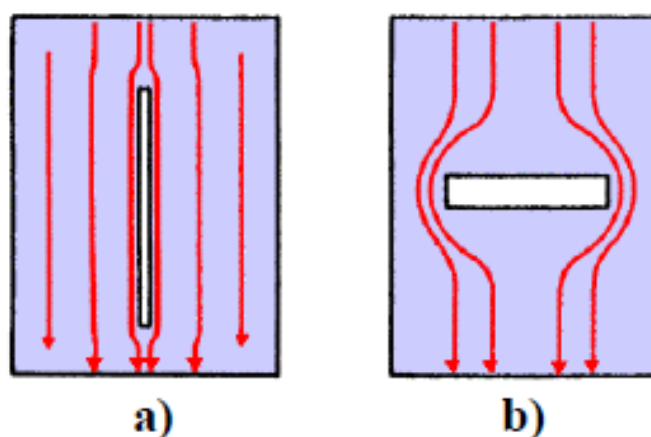
Pokud dojde ke splnění požadované stínící účinnosti, je důležité splňovat i ostatní technické požadavky, jež jsou důležité pro bezchybný chod zařízení. Jedná se například o dodržení správných teplotních režimů, dostupnost ke vstupům a výstupům zařízení, opravitelnost zařízení apod. Ovšem bez narušení homogenosti, celistvosti a kompaktnosti není možné všechny tyto funkce aplikovat. Navíc do určité míry je účinnost stínění

ovlivněna také nehomogenitou, netěsností či přerušení krytu. Je možné rozlišit tyto technické nehomogenity v kovovém stínění do tří druhů:

- otvory, štěrby a ostatní narušení stínicí plochy,
 - netěsnosti mezi kovovými plochami stíněn, štěrby,
- špatně vodivé části stínění,
 - nedostatečně utěsněné vodivé průhledy a spojení,
- vnější přívodní kabely a přípojná vedení,
 - kabely sloužící k napájecí a dále také signálové a datové kabely. [12]

Největší vliv mají ovšem na celkovou účinnost stínění kovových krytů otvory ve stínicí ploše. Při dopadu elektromagnetické vlny se tento malý kruhový otvor chová vůči stínění jako plošná anténa s výkonový ziskem. [12]

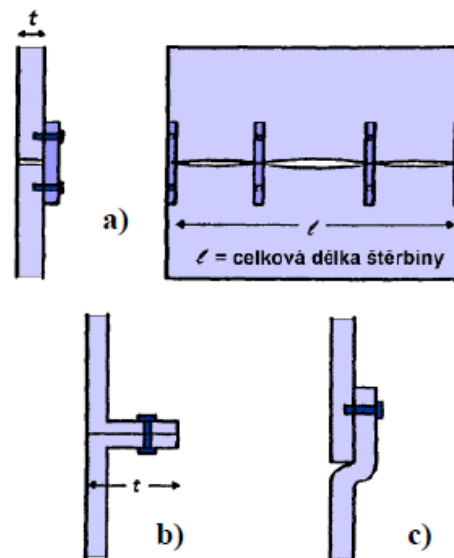
V případě pravouhlé štěrby ve stínicí přepážce se především dlouhé štěrby mohou chovat jako intenzivní vyzařovací do vnitřního prostoru stínicího krytu, čímž dochází k jednoznačnému snižování stínicí účinnosti. Je to dáno jejich orientací vůči dopadající elektromagnetické vlně. Orientace štěrbin je naznačena na Obr. 12, neboť v praxi není známa orientace vlny, jenž dopadá na stínicí přepážku. Musí se v EMC předpokládat nejhorší možná varianta a ta je vyobrazena na Obr. 12 b) vyzařující podlouhlé štěrby v kovové stínicí přepážce. [1]



Obr. 12 - Orientace nevyzařující (a) a vyzařující (b) [12]

Pro kvalitu stínicího krytu je tedy velmi důležité, zda obsahuje nějaké otvory, štěrby a ostatní technologické průchody, jež jsou obsaženy v stínicí ploše. Dochází ovšem kromě úmyslně vytvořených otvorů jako je např. montážní či prosvětlovací otvor, také ke vzniku

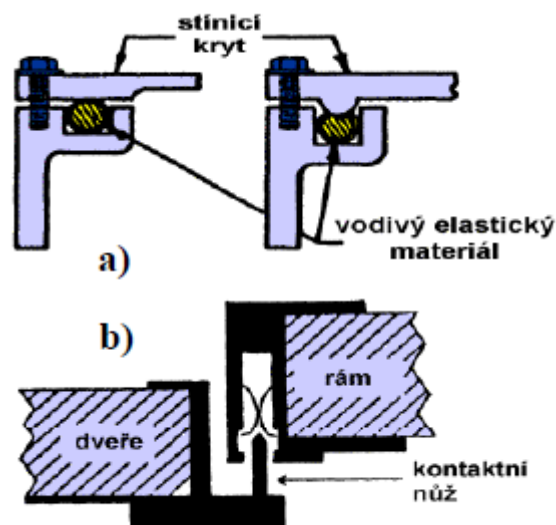
nechtěných štěrbin a netěsností, především v místech propojení jednotlivých stínících ploch krytu. Ke vzniku dochází při spojení nedokonale opracovaných kovových desek, jež mohou dosahovat značných délek viz. Obr. 13 a). Tím dojde ke snížení účinnosti stínění kovového krytu především již od nízkých kmitočtů. [1]



Obr. 13 - Vznik nežádoucích štěrbin při spojení. [12]

Zredukovat počet netěsností je možné změnou spojení jednotlivých kovových desek za využití jejich vzájemného dlouhého překrytí. Tím dojde k zvýšení celkové účinnosti stínění díky vytvoření tzv. podkritického vlnovodu a dostatečné délce. Netěsnosti je možné spojit vhodnějším způsobem jejich dlouhým vzájemným překryvem viz Obr 13 b), c) [1].

Místa mechanických spojů jednotlivých částí krytu jsou zdrojem dalších technologických netěsností stínících krytů. Především přístrojové a skříňové typy. Elektromagnetické těsnosti je možné dosáhnout za využití elastických a zároveň vodivých materiálů (silikon, pasta atd.), jenž se nanese do místa spojení a zcela vyplní za pomoci mechanického tlaku jednotlivé štěrbině. Toto řešení je ovšem vhodné použít na místě, kde dochází k občasnému rozebrání stínícího krytu například z důvodu údržby. Toto užití je vodivého elastického materiálu je vyobrazeno na Obr. 14 a).



Obr. 14 - Řešení elektromagnetického těsnění. [11]

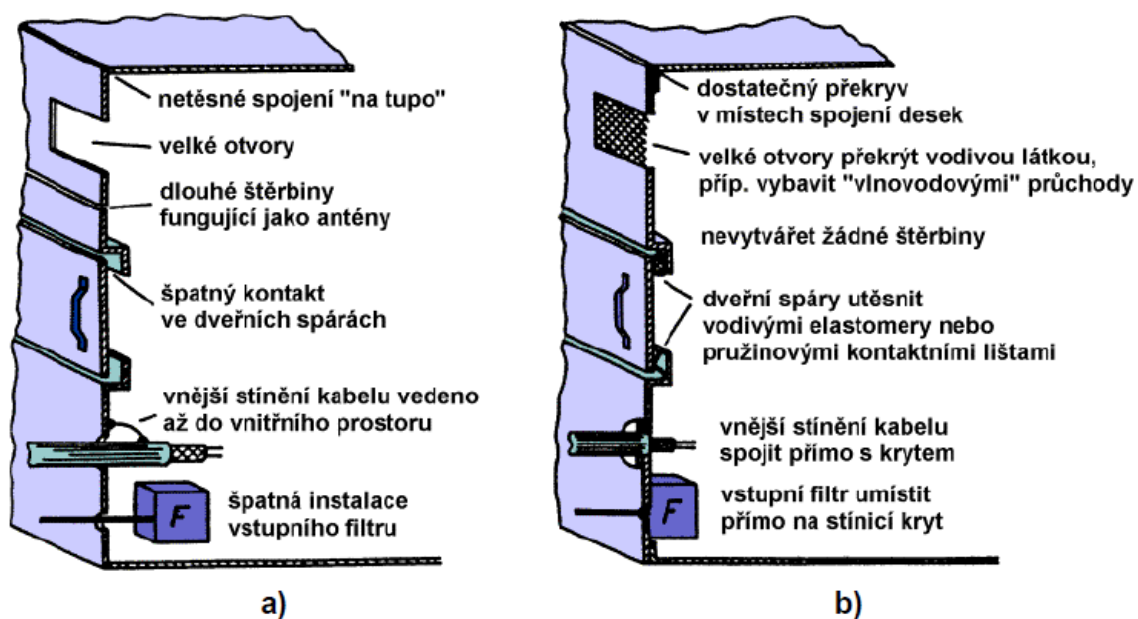
Všechny dveře a ostatní pravidelně otevírané otvory dostíněného krytu musí mít velmi kvalitní kontakt bez štěrbin. V uzavřeném stavu je nutné, aby zajišťovaly dokonalou elektromagnetickou těsnost. Běžně se pro tuto dokonalou těsnost využívá pružinových kontaktů na pohyblivých částech, jak ilustruje Obr 14. [1]

Reálné hodnoty účinnosti stínění jsou mnohem nižší, než teoretické kompaktně neomezené kovové stínící plochy. Na základě určitých zkušeností a poznatků v elektromagnetickém stínění došlo ke kategorizaci stínění dle dosahovaných hodnot. Rozdělení kategorií je uvedeno v Tab. 4. [1]

Tab. 4 – Kategorizace stínění. [13]

Účinnost stínění [dB]	Kategorie
0 ÷ 10	Nedostatečné stínění
10 ÷ 30	Stínění pro minimální požadavky
30 ÷ 60	Stínění dostačující pro většinu běžných požadavků
60 ÷ 90	Velmi dobré stínění
90 ÷ 120	Vysoce kvalitní stínění

Na obr. 15 jsou vyobrazeny nejčastější kontrakční chyby, díky kterým není nikdy možné dosáhnout ideálního elektromagnetického stínění. Naopak na obr. 15. jsou znázorněny konstrukční úpravy, jež přispívají k celkovému vylepšení výsledné účinnosti stínění. Správné konstrukční úpravy vedoucí ke zlepšení výsledné účinnosti stínění. [1], [13]



Obr. 15 - Zásady konstrukce elektromagneticky stíněných krytů. [13]

3 CST STUDIO SUITE

Návrháři antén dnes čelí náročnému úkolu při navrhování antén musí splnit stále větší množství požadavků z hlediska počtu kmitočtových pásem a také prostředí ve kterém budou provozovány při splnění stanovených limitů a předpisů z oblasti elektromagnetické kompatibility. Simulace při jejich navrhování zde zastávají velmi důležitou. Pokrok v simulačních a výpočetních technologiích umožnil navrhovat kreativnější řešení bez vážnějších konstrukčních problémů. Simulace se stala nepostradatelnou ve všech fázích návrhu antény. Design antény se obvykle vyskytuje v několika fázích. Je potřeba nastavit dané specifikace, jako je např. pracovní frekvence, vyzařovací diagram, velikost, hmotnost, počáteční topologie antény. Výkonné modelování je vyžadováno tedy v rozhraní, které umožňuje propojení se stávajícími CAD modely. Dále je potřeba při simulacích zohlednit, že anténa není nijak izolována a také, že je vždy součástí prostředí, ve kterém se nachází. [14]

Nejvhodnější simulační nástroj, jež umí řešit nejen tyto, ale i další problémy je právě program CST STUDIO SUITE, jehož design prostředí splňuje veškeré požadavky. Obvod prvky a 3D komponenty mohou existovat společně ve stejném designu. Je zde možnost jednoznačně definovat elektrická spojení, jež jsou následně umístěny v 3D návrhu. [14]

CST Studio Suite® je vysoce výkonný softwarový balíček pro 3D EM analýzu pro navrhování, analýzu a optimalizaci elektromagnetických (EM) komponent a systémů. [15]

Řešiče elektromagnetického pole pro aplikace napříč EM spektrem jsou obsaženy v jediném uživatelském rozhraní v CST Studio Suite. Řešitele lze spojit a provádět hybridní simulace, což dává technikům flexibilitu efektivně a přímočaře analyzovat celé systémy složené z více komponent. Společný design s dalšími produkty SIMULIA umožňuje integraci EM simulace do toku návrhu a řídí vývojový proces od nejranějších fází. [15]

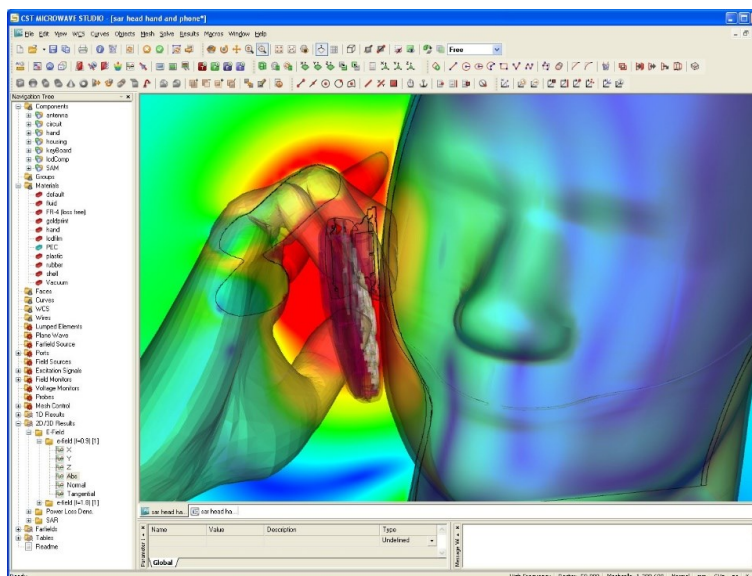
Mezi běžné předměty EM analýzy patří výkon a účinnost antén a filtrů, elektromagnetická kompatibilita a interference (EMC / EMI), vystavení lidského těla elektromagnetickým polím, elektromechanické účinky v motorech a generátorech a tepelné účinky ve vysokém výkonu zařízení. [15]

CST Studio Suite se používá v předních technologických a inženýrských společnostech po celém světě. Nabízí značné tržní výhody, usnadňuje kratší vývojové cykly a snižuje náklady. Simulace umožňuje použití virtuálních prototypů. Výkon zařízení lze optimalizovat, potenciální problémy s dodržováním předpisů identifikovat a zmírnit na

začátku procesu návrhu, snížit počet požadovaných fyzických prototypů a minimalizovat riziko selhání a odvolání testu. [15]

Typické využití softwaru:

- návrh antén a anténních řad,
- návrh vysokofrekvenčních, mikrovlnných a optických obvodů,
- řešení problémů s elektromagnetickou kompatibilitou (EMC),
- omezení nechtěného vyzařování (EMI) a zvýšení elektromagnetické odolnosti (susceptibility) a to jak na úrovni DPS, tak celého zařízení,
- simulace desek plošných spojů,
- simulace stínící účinnosti,
- návrh senzorů (kapacitní – touchscreen, indukční – poloha, rychlost),
- vliv elektromagnetického pole na biologické tkáně,
- simulace transformátorů,
- simulace elektro-mechanických efektů elektrických strojů,
- simulace pohybu nabytých částic v elektromagnetickém poli. [16]



Obr. 16 – Ukázka softwaru CST STUDIO SUITE. [17]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 VYTVOŘENÍ MODELU KOMORY

Pro vytvoření modelu stínící komory bylo využito programu CST Studio Suite, ve kterém došlo k vymodelování identické komory, jenž se nachází v laboratořích Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Nejdříve je v této kapitole popsána skutečná komora a následně je zde uvedeno samotné modelování této testovací komory EMC.

4.1 Testovací komora EMC

Testovací komora EMC je vyrobena z nerezové oceli, jež dosahuje tloušťky 3,5mm. Rozměry testovací komory jsou uvedeny v následující Tab. 5.

Tab. 5 – Rozměry komory

Šířka	1 200 mm
Výška	1 200 mm
Délka	2 000 mm

Komora slouží k testování elektromagnetické kompatibility. Z čelní strany je možné měnit čtvercové pláty, které jsou vyrobeny z různých materiálů, dle potřeb měření. Pro tuto diplomovou práci byl vybrán materiál nerezová ocel.



Obr. 17 – Testovací komora EMC. [zdroj vlastní]



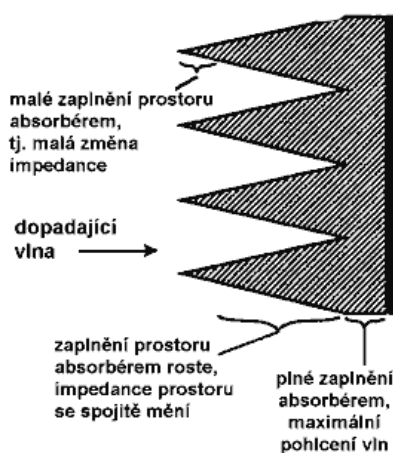
Obr. 18 – Detailní pohled na uchycení materiálu.



Obr. 19 – Testovací komora EMC. [zdroj vlastní]

Vnitřní část komory je z poloviny vyplněna absorpční materiálem, z kterého je vytvořeno jehlanové obložení stěn. Absorpční materiál přeměňuje dopadající elektromagnetické vlny na teplo, a to s využitím především dielektrických materiálů, neboť magnetické materiály jsou příliš drahé a zároveň i velmi těžké. Používají se různě tvrzené pěnové materiály z polystyrénu, polypropylénu či polyuretanu, které se sytí elektro vodivými

či grafitovými plnidly různé hustoty. Stupněm tohoto sycení lze účinně regulovat zejména ztrátové parametry výsledného materiálu. Kromě elektricky vhodných vlastností jsou dalšími výhodami těchto materiálů jejich nízká hmotnost, snadná mechanická opracovatelnost a snadné spojování lepením. Materiály je většinou možné použít i při vysokých teplotách (90, 160 °C), a tím pro pohlcování vysokých intenzit elektrického pole (až 250 V/m), příp. vysokých hustot výkonu (až 100 W/m²). Materiály jsou většinou nevznětlivé, tj. v případě požáru jen doutnají, ale nehoří. [18]

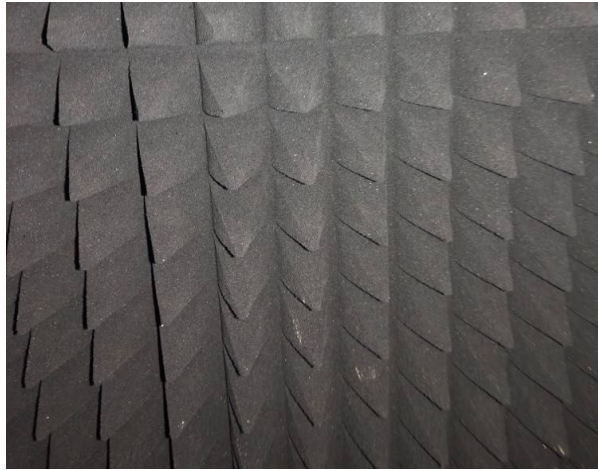


Obr. 20 – Konstrukce absorbéru. [19]

Absorpční jehlaný se v testovací komoře nacházejí ve třech velikostech, jež jsou uvedeny v Tab. 6 níže. Na zadní straně komory se nacházejí ovšem pouze velké jehlaný.

Tab. 6 – Velikost jehlanů

Jehlan	Šířka	Výška
Malý	30 mm	60 mm
Střední	75 mm	210 mm
Velký	150 mm	470 mm



Obr. 21 – Absorpční výplň testovací komory. [zdroj vlastní]

4.2 Modelování v CST studiu

Samotné modelování probíhalo v programu CST studio, kde nejdříve byla za využití nejrůznějších nástrojů vymodelována samostatná komora a také testovací deska materiálu dle reálných rozměrů a materiálů, jenž jsou uvedeny v předchozí kapitole 4.1. Pro správné simulace bylo pro komoru využito možnosti ztrátového kovu, jež se využívá pouze u dobrých, ale ne dokonalých elektrických vodičů, tento typ simuluje přidružené pevné látky pomocí jednorozměrného modelu povrchové impedance.

Je třeba poznamenat, že tento model je fyzicky přiměřený pouze tehdy, když je vodivost tak vysoká, že lze dielektrické a polarizační účinky v materiálu považovat za zanedbatelné. Ztrátový kov je určen vstupem hodnoty elektrické vodivosti a propustnosti. Je možné, zde nastavovat např. elektrickou vodivost, drsnost povrchu kovu, atd.

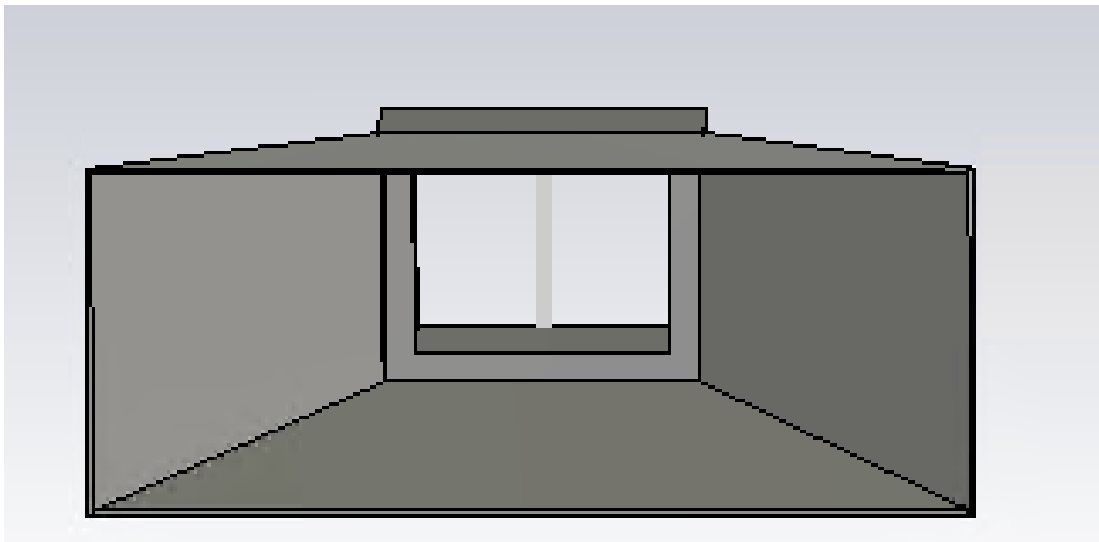
Testovací desce materiálu byla nastavena nulová tloušťka a také možnost tenkého panelu. To znamená, že se jedná o plošný materiál, jež se skládá z jedné nebo více vrstev materiálu a je specifikován uvedením tloušťky a materiálu každé základní vrstvy.

Na rozdíl od ztrátového kovu jsou tenké panely vždy prostupné elektromagnetickým polím. Tenké panely by měly být specifikovány pouze pro objekty skládající se z povrchů bez tloušťky. Skutečná tloušťka panelu se bere jako elektrický parametr spolu s permitivitou, propustností a vodivostí atd. Vhodnými aplikacemi pro využití tenkých panelů jsou například plochy tvořené z uhlíkových vláken na vozidlech nebo povrchy dielektrických objektů s uhlíkem.

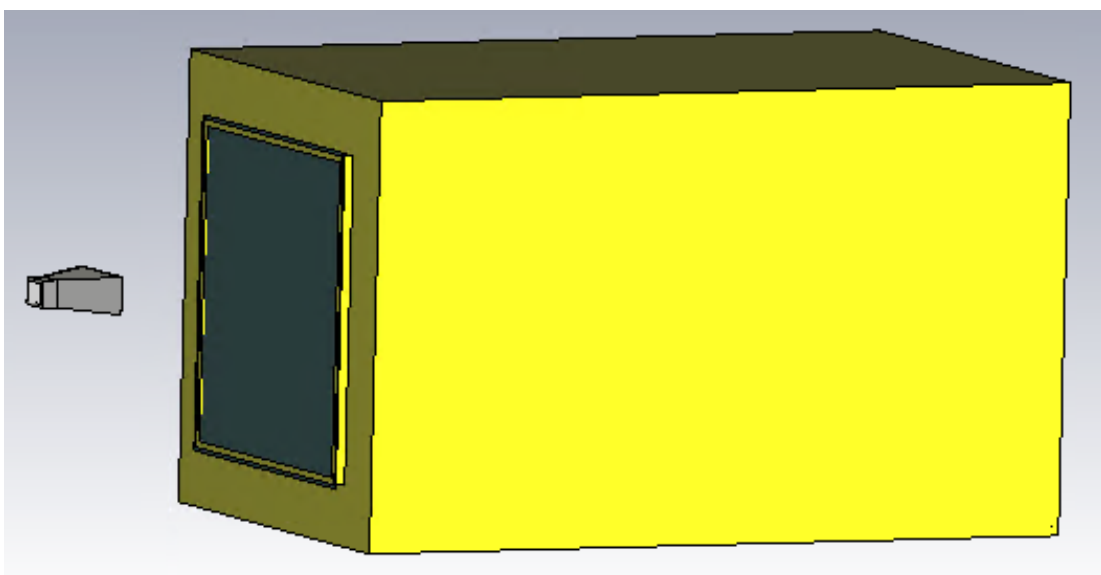
Použitý počítačový hardware potřebný k modelování tenkých panelů by měl být úměrný počtu ploch buněk pokrytých panelem. Pokud jsou zadány tenké panely, které mají

velmi mnoho hloubek povrchu, může dojít k nadměrnému využití paměti počítače a zvýšení doby běhu. Ke každé součásti tenkého panelu musí být připojen pevný lokální souřadnicový systém (WCS), aby bylo možné identifikovat směr hromadění vrstev. Směr je definován jako kladný směr W v souřadnicovém systému WCS.

Dále byla vymodelována trychtýřová anténa, jež je blíže popsána v Kapitole 5.3. Tato anténa je umístěna z vnější části komory a je vymodelována, z hliníku pouze s tím rozdílem, že pro její vlastnosti je použita možnost PEC, neboli perfektně elektricky vodivý materiál. Oproti skutečné anténě byla potřeba vytvořit otvor skrz zadní stranu antény, kde byl následně umístěn Discrete Port, jemuž byla nastavena orientace na testovací model komory.

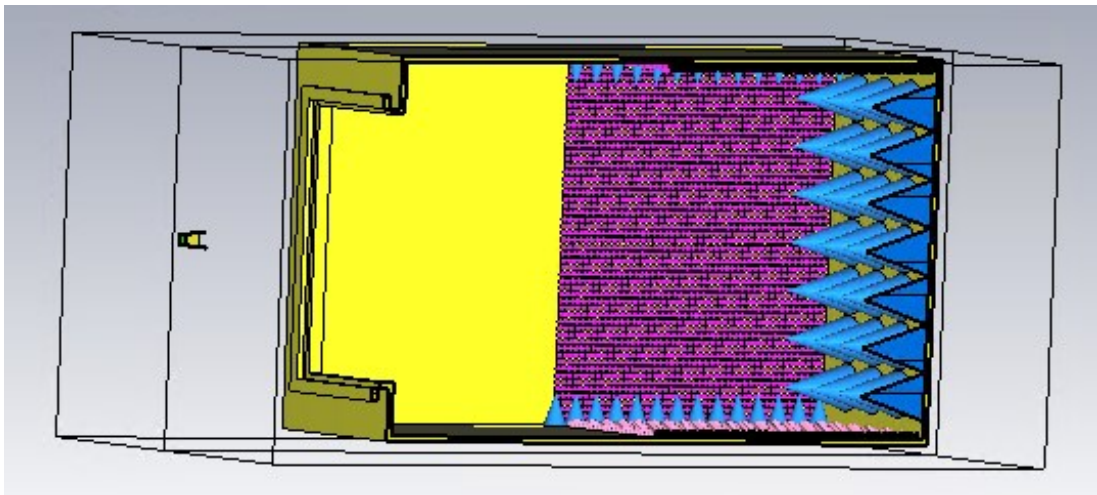


Obr. 22 – Vymodelovaná anténa. [zdroj vlastní]



Obr. 23 – Vymodelovaná komora. [zdroj vlastní]

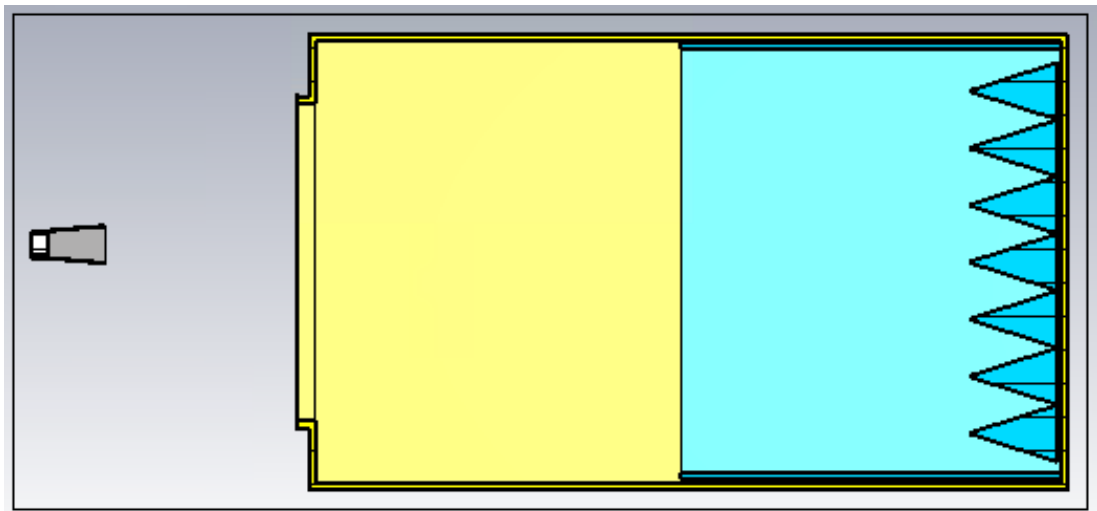
Následně byly na všechny strany komory postupně umístěny absorpční jehlany, jak vizualizuje Obr. 24. Těmto jehlanům byl nastaven absorpční materiál a dále bylo pro tyto jehlany zvoleno normální nastavení, jež se využívá pro materiály s relativní permitivitou epsilon a relativní permeabilitou mu. Výchozím a vysokofrekvenčním materiálům mohou být volitelně nastaveny elektrické a magnetické ztráty a také disperzní modely.



Obr. 24 – Průřez vymodelovanou komorou. [zdroj vlastní]

Poté, co byl model geometricky nastaven a přiřazeny příslušné zdroje energie a okrajové podmínky, bylo potřeba model převést do vhodné podoby pro simulaci. CST Studio Suite nabízí vytváření buněk a generování buněk se snadnou možností křížového ověřování různých metod a buněk ve stejném grafickém uživatelském rozhraní. Počet buněk ovlivňuje přesnost a rychlost simulace, takže bylo velmi důležité porozumět problematice tohoto procesu.

Bohužel při provádění zkušební simulace, se model dostal řádově do stovek miliard sítí, což obnášelo úpravu absorpčních jehlanů. Postranní absorpční jehlany byly nahrazeny celistvými plochami se stejnými vlastnostmi materiálu a zůstali pouze největší jehlanové absorbéry na zadní straně testovací komory, a to z důvodu velkého počtu sítí. Pro tuto práci byla využívána studentská licence softwaru CST Studio, jenž dovolovala spuštění simulace s maximální počtem 1 000 000 sítí, takže právě z tohoto důvodu bylo nezbytné vymodelované absorbéry v testovací komoře upravit, aby bylo možné provádět simulace. Upravený model je vyobrazen na Obr. 25.



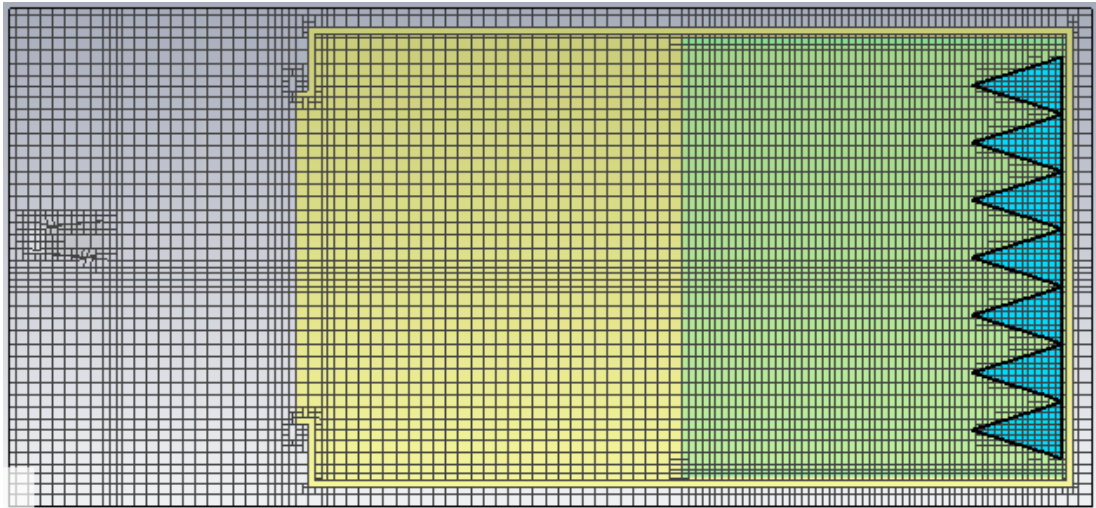
Obr. 25 – Průřez upravenou komorou. [zdroj vlastní]

Hexahedral TLM

Nejdříve bylo potřeba spojit model skládající se z několika částí. Metody řešení vyžadují konzistentní buňky na rozhraní různých částí, aby bylo možné správně nastavit maticové rovnice. Většinou se nejprve vytvoří „nediferencovaný“ simulační model. Tato mezilehlá operace převádí shodné plochy ze dvou těles na jednu společnou oboustrannou plochu. Jakmile bylo toto provedeno, bylo možné v prvním kroku spojit hrany a plochy modelu. Na základě těchto povrchových buněk lze následně vytvořit objemové buňky. Non-manifold model zaručuje, že povrchové buňky sousedních těles jsou identické na jejich rozhraních, protože jsou vytvořeny ze stejných povrchových buněk vzájemné oboustranné plochy.

Každá buňka reprezentuje malý objem v prostoru, ve kterém jsou následně počítána elektrická a magnetická pole. Čím větší počet buněk je použit, tím větší to bude mít dopad na celkovou dobu simulace a zároveň její přesnost. Z tohoto důvodu je nezbytné vytvořit kompromis mezi rychlostí a přesností simulace.

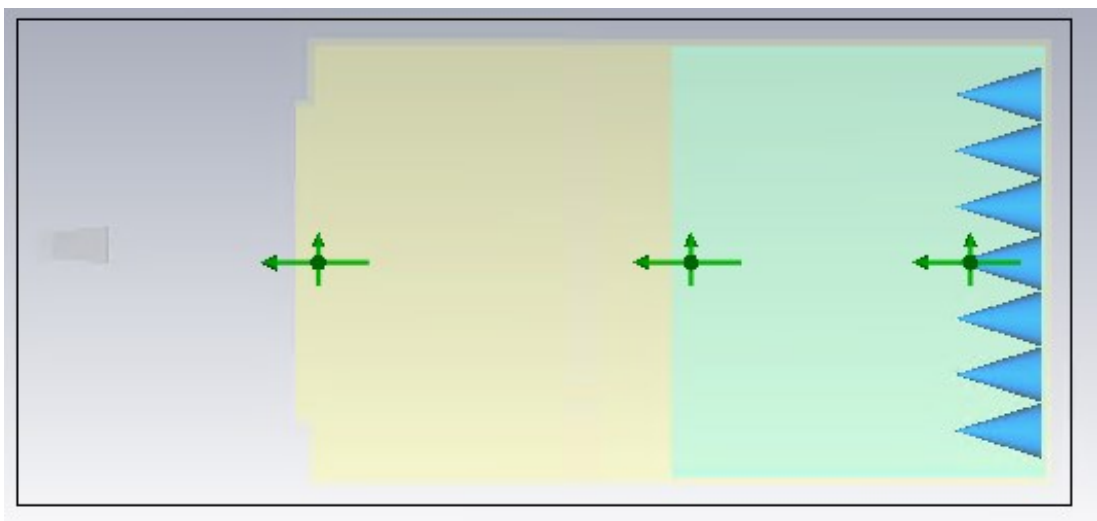
Čtyřboké buňky se automaticky vytvoří pokaždé, při spuštění řešitele požadující tento typ sítě. Existuje ovšem i možnost vizualizovat buňky před spuštěním simulace. Protože vytvoření čtyřbokých buněk je výpočetně náročný úkol, buňky se po každé změně automaticky neaktualizuje. Aktualizaci buněk je potřeba vynutit. Ukázka buněk v modelu obsahující 891 586 buněk je vyobrazena na Obr. 26.



Obr. 26 – Ukázka sítě v pro modelovanou komoru. [zdroj vlastní]

Sondy

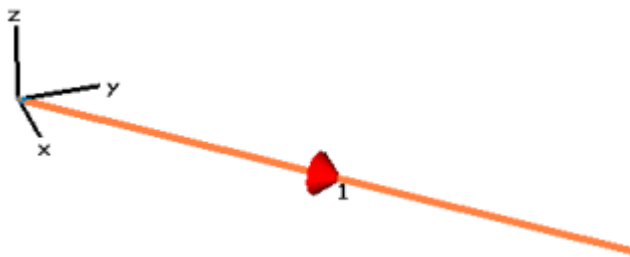
V dalším kroku byly ještě před spuštěním simulace vytvořeny sondy, jež se využívají k zaznamenávání jedné konkrétní složky elektromagnetického pole na určeném místě během přechodové analýzy. Sondy jsou k dispozici pro umístění uvnitř domény. Sondy mimo výpočetní doménu jsou sondy farfield časové domény pro řešitele časové domény. V případě diskrétních napět'ových nebo proudových portů, stejně jako buzení rovinnou vlnou, výsledná data odpovídají uživatelem definované amplitudě buzení. V modelované komoře byly použity tři sondy, ve stejné výšce, stejně orientované, ale v různých vzdálenostech od testovací desky.



Obr. 27 – Sondy v modelované komoře. [zdroj vlastní]

PORT

Jako poslední byl před spuštěním simulace vložen Discrete Port na konec vnější antény, jež byl následně také nastaven a byl natočen směrem k modelu. Byl zvolen S-parametr, jež je modelován soustředěným prvkem, který se skládá ze zdroje proudu s vnitřní impedancí umístěnou paralelně, který vyzařuje a absorbuje energii. Hodnota impedance byla nastavena na hodnotu 73 Ohm z důvodu následného otestování, Tato hodnota byl postupně měněna. Zdroj proudu je aktivní pouze v případě, že diskretním prvkem je stimulační port v přechodové analýze.



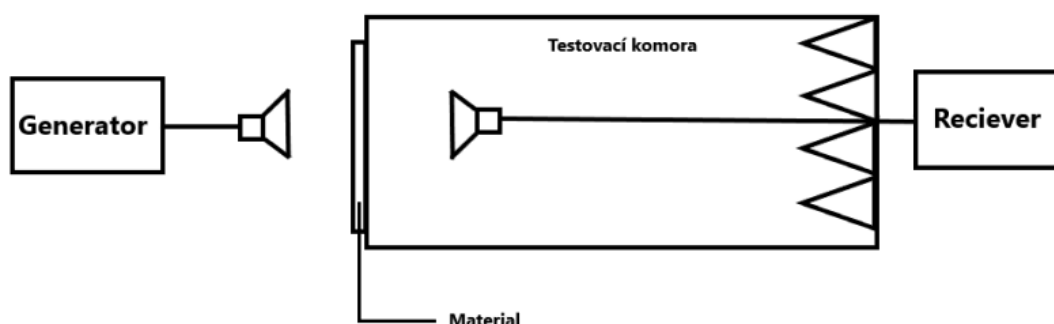
Obr. 28 – Discrete port [20]

5 NÁVRH PRAKTICKÉHO EXPERIMENTU

V této kapitole je popsán praktický experiment testování stínící účinnosti, postup měření, a také jednotlivé měřicí zařízení, jež byly pro experiment využity.

5.1 Návrh experimentu

Praktický experiment i následná simulace spočívala ve stanovení útlumu a rušivých vlivů na výsledky měření. K měření byly využity dvě trychtýřové antény HF 906. První z nich byla umístěna před čelní stranu testovací komory a druhá trychtýřová anténa byla umístěna uvnitř komory. Antény byly natočené směrem k sobě a vždy byly ve stejné vzdálenosti a výšce od materiálu, který zde tvořil stínící vzorek. Nejdříve došlo k změření útlumu bez materiálu, tato hodnota potom následně při vyhodnocení měření tvoří hodnotu backgroundu. Na Obr. 29 je vyobrazeno schéma zapojení. Ilustrativní ukázka měřicího pracoviště je uvedena v Obr. 29. První fáze měření zahrnovala stanovení elektrické intenzity bez stínícího materiálu, aby bylo možné vypočítat stínící účinnost.



Obr. 29 – Schéma zapojení komponentů. [zdroj vlastní]

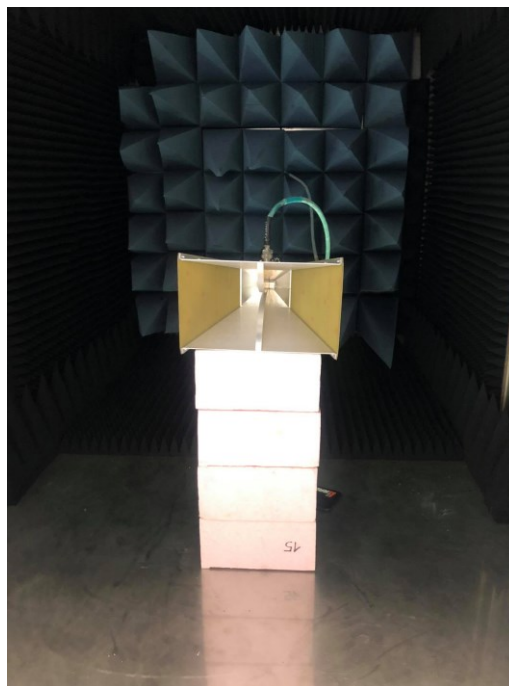
Použitá měřicí zařízení:

- Anténa trychtýřová HF 906 s frekvenčním rozsahem 1 až 7 GHz
- SMR 20 SIGNAL GENERATOR s frekvenčním rozsahem 1 až 20 GHz
- ESPI TEST RECIEVER s frekvenčním rozsahem 9 kHz až 7 GHz

Obr. 30 a Obr. 31 ilustrují rozložení měřicí techniky při měření bez stínícího vzorku. Antény byly vypořádány nevodivými materiály bez absorpčních vlastností, aby experiment neovlivňoval a zároveň bylo možné měnit pozici antény.

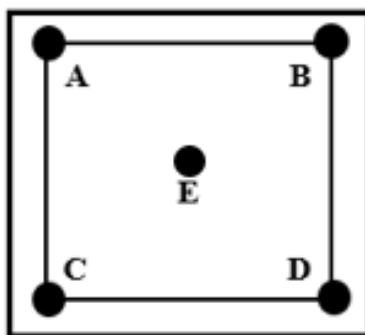


Obr. 30 - Měření bez materiálu. [zdroj vlastní]



Obr. 31 – Vnitřní anténa [zdroj vlastní]

Ostatní měření probíhala nejen ve středu stínícího materiálu, ale také v jeho okrajích, jak ilustruje Obr. 32. Vzdálenost mezi stínícím vzorkem a jednotlivými anténami byla pro první měření stanovena na 50 cm Pro druhé měření byla stanovena vzdálenost jen 15 cm od materiálu, aby bylo zřejmé, k jakým změnám dochází při odlišném umístění antény. Antény se v tomto případě nacházeli 15 cm od materiálu.



Obr. 32 – Body měření. [zdroj vlastní]

Obr. 33 vyobrazuje umístění trychtýřové antény a testovaného stínícího vzorku pro bod E ve vzdálenosti 50 a také 15 cm.



Obr. 33 – Měření bodu E ve vzdálenosti 50 cm [zdroj vlastní]



Obr. 34 – Měření bodu E ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]



Obr. 35 – Měření bodu B ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]

Měření vždy probíhalo v pásmu od 1 do 7 GHz po jednotlivých krocích 0,1 GHz, a to z důvodu omezení generátoru, jež umožňoval generovat signál od 1 GHz. Měření bylo 3x opakováno, aby následně mohla být vypočtena nejistota měření a předešlo se nahodilým chybám, které jsou při opakovaném měření snáze odhalitelné. Byl využit generátor od firmy RHODE&SCHWARZ, a to přesněji typ SMR 20 SIGNAL GENERATOR, jež byl využit pro generování signálů v celém rozsahu měření a to od 1 do 7 GHz. Dále pro příjem signálu

bylo použito zařízení od stejné firmy s označením ESPI TEST RECIEVER, které rovněž bylo použito pro celý rozsah měření. Všechna použitá měřící zařízení jsou blíže popsána v Kapitole 5.2.

5.2 Použité měřící zařízení

V následující podkapitole jsou popsány jednotlivé komponenty, jež byly využity v praktickém experimentu.

Anténa trychtýřová HF 906

Kalibrovaná anténa podle ANSI C63.5 / DIN45003 je ideální komponent pro použití v laboratořích EMC. Existence konektoru N umožňuje jednoduchá přizpůsobení stávajícím zařízením. Anténa je vyrobena z hliníku a pocínovaného GPR materiálu. Anténa HF 906 je lineárně polarizovaná s vlnovodem se dvojitým paprskem. Jedná se o širokopásmovou anténu, jež vysílá a přijímá na frekvencích od 1 GHz do 18 GHz. Vzhledem k činiteli stojatého vlnění je umožněno měření nízkých i vysokých hodnot intenzit pole, bez jakékoliv významné ztráty. Specifikace této antény jsou uvedeny v Tab. 7 níže. [21]



Obr. 36 – Trychtýřová anténa HF 906. [zdroj vlastní]

Tab. 7 – Specifikace Trychtýřové antény HF 906 [21]

Frekvenční rozsah	1 GHz to 18 GHz	Konektor	N female
Polarizace	Lineární	Teplotní rozsah	0 °C to +50 °C
Vstupní impedance	50 Ω	Rozměry	290 × 250 × 160 mm
VSWR	<1.5	Hmotnost	1.5 kg

SMR 20 SIGNAL GENERATOR

Jedná se o mikrovlnný generátor signálu s frekvenčním rozsahem 1 GHz - 20 GHz a výstupní úrovní dosahující + 10 dBm. Generátor má velmi vysokou přesnost řízení úrovně nastavovaných hodnot a obsahuje také možnosti jako je CW (pulzní modulace) a sweep

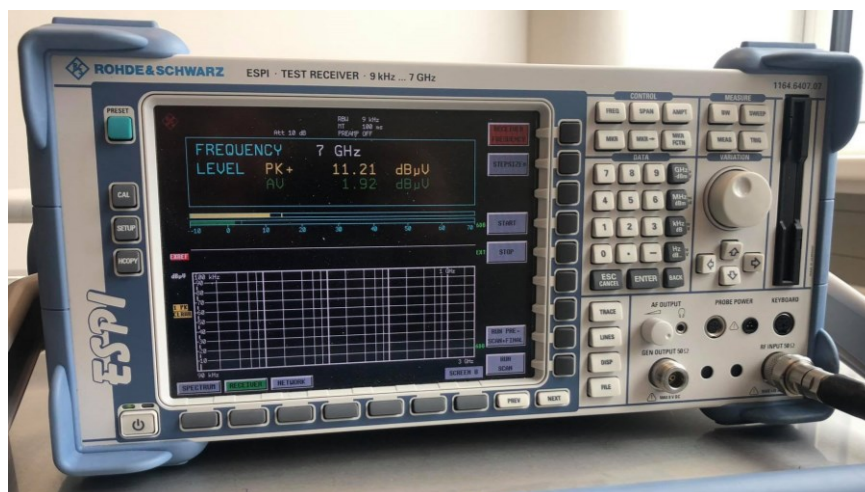
(vynikající frekvenční přesnost digitálních kroků). Tento model nabízí vynikající poměr cena / výkon a je ideální pro uživatele, kteří chtějí vstoupit do oblasti mikrovlnného testování za dostupnou cenu. Vyniká od ostatních generátorů svou vynikající spektrální čistotou. Nízký fázový šum a vysoké rušivé potlačení, což jsou veškeré předpoklady pro spolehlivé měření přijímače. [22]



Obr. 37 - SMR 20 SIGNAL GENERATOR. [zdroj vlastní]

ESPI TEST RECIEVER

ESPI TEST RECIEVER je kombinací standardně vyhovujícího testovacího přijímače EMI a vysoce kvalitního spektrálního analyzátoru s integrovanou předvolbou spolu s volitelným předzesilovačem 20 dB. Obsahuje spektrální analýzu pro laboratorní aplikace a také intuitivní provoz a výkonné funkce EMI analýzy pro rychlé a přesné výsledky. Tento robustní a kompaktní duální přístroj je uživatelsky přívětivý, díky přímému displeji a intuitivnímu dotykovému rozhraní. Přístroj vyhovuje standardu CISPR 16-1-1 Ed. 3. Frekvenční rozsah toho zařízení je 9 kHz až 7 GHz. [23]



Obr. 38 - ESPI TEST RECIEVER [zdroj vlastní]

5.3 Zpracování naměřených dat

Vyhodnocení měření probíhalo tak, že všechna 3 měření útlumu byla zanesena do tabulky a následně byl zde vypočítán průměr pro jednotlivé body a vzdálenosti měření. Z těchto byla vypočítána nejistota typu A dle následujícího vzorce:

$$uA = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (7)$$

Naměřené hodnoty bylo potřeba převést na jednotky srovnatelné s možnostmi CST Studio Suite, proto se přepočítala z dBm na dB μ V/m pomocí vzorce 8 uvedeného níže. Průměrná hodnota je nazvána Elektrické pole. V dalším kroku byly vypočítány hodnoty stínící účinnosti neboli také útlumu. Ten byl vyjádřen v decibelech (dB). Útlum byl tedy vypočítán z průměrné hodnoty Distance všech tří měření vždy pro jednotlivý bod a vzdálenost. Tuto hodnotu nazýváme A. Součtem všech hodnot S-parametru měření backgroundu byla vypočtena hodnota B. Tyto hodnoty byly následně dosazeny do vzorce pro výpočet SE.

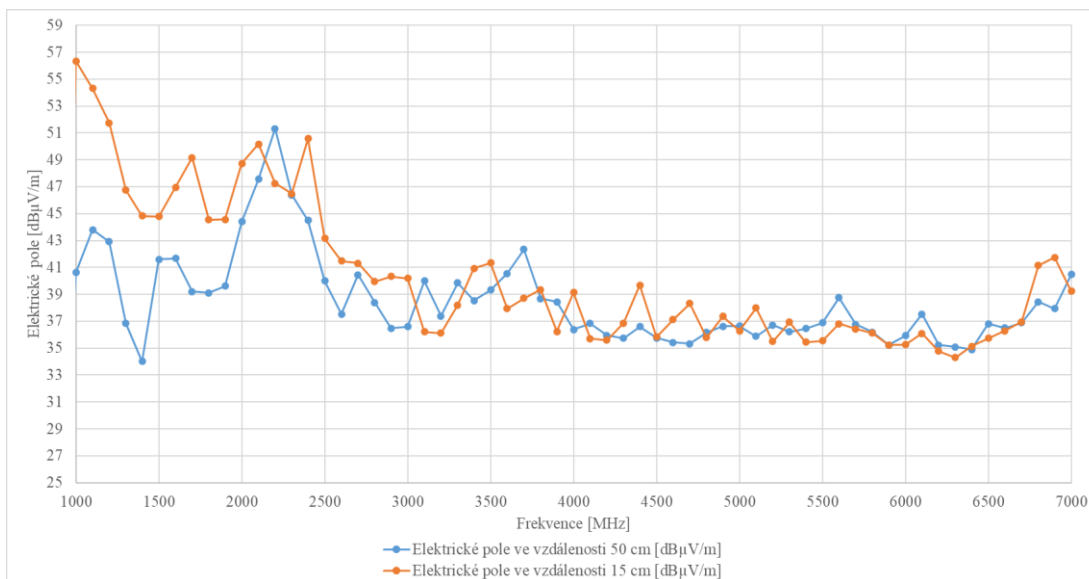
$$SE = 20 \cdot \log|B/A| \quad (9)$$

Tab. 8 obsahuje pouze několik reprezentativních údajů, neboť kvůli zvolenému kroku měření čítala příliš mnoho dat. Bylo zde vybráno 13 frekvencí, vždy po 500 MHz. Vzhledem k velkému objemu dat, je zde pouze ukázka, neboť měření probíhalo od 1 GHz po 7 GHz po krocích 100 MHz v pěti různých bodech a dvou vzdálenostech.

Tab. 8 – Ukázkové vyhodnocení naměřených hodnot

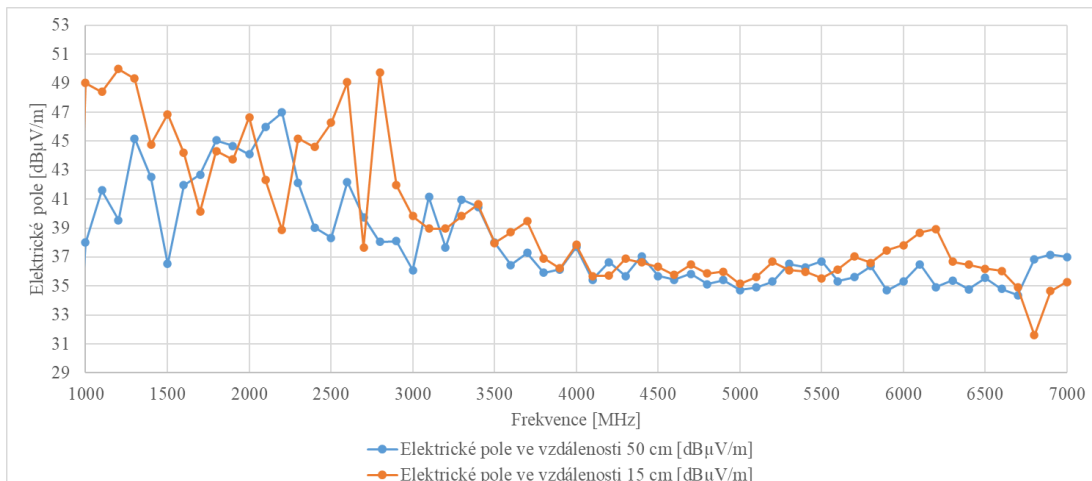
Bod E bez materiálu - vzdálenost 50 cm		Bod E - vzdálenost 50 cm				
MHz	Elektrické pole [dB μ m/m]	Elektrické pole [dB μ V/m]	Odchylka	AVG - nejistota [dB μ V/m]	AVG + nejistota [dB μ V/m]	SE - útlum [dB]
1000	93,69	32,42	1,01	31,41	33,43	14,97
1500	93,76	39,10	2,50	36,60	41,60	14,20
2000	91,56	39,08	1,06	38,02	40,13	12,87
2500	87,58	37,40	3,27	34,13	40,66	11,09
3000	89,44	38,96	2,23	36,72	41,19	11,77
3500	83,81	40,05	1,10	38,95	41,15	9,21
4000	87,87	41,78	1,62	40,16	43,40	10,66
4500	85,55	37,38	0,74	36,64	38,12	10,23
5000	84,72	37,85	2,85	35,00	40,71	9,84
5500	82,80	37,08	1,04	36,04	38,11	9,22
6000	84,57	37,68	0,28	37,40	37,96	9,80
6500	83,93	36,45	0,29	36,16	36,74	9,71
7000	81,31	35,86	0,40	35,46	36,26	8,85

Obr. 39 ilustruje naměřené hodnoty ve stanoveném bodě A pro obě vzdálenosti, tedy pro vzdálenost 15 a 50 cm od materiálu. Na frekvencích 1 až 2 GHz dochází k velkým rozdílům v naměřených hodnotách elektrického pole, na některých frekvencích, až 16 dB μ V/m, ale od frekvence 2 GHz dochází k pozvolnému snižování elektrického pole. S tímto poklesem je spojeno vyplývající zlepšení stínící účinnosti. K tomuto vývoji dochází kvůli kratší vlnové délce zvyšující se frekvencí.



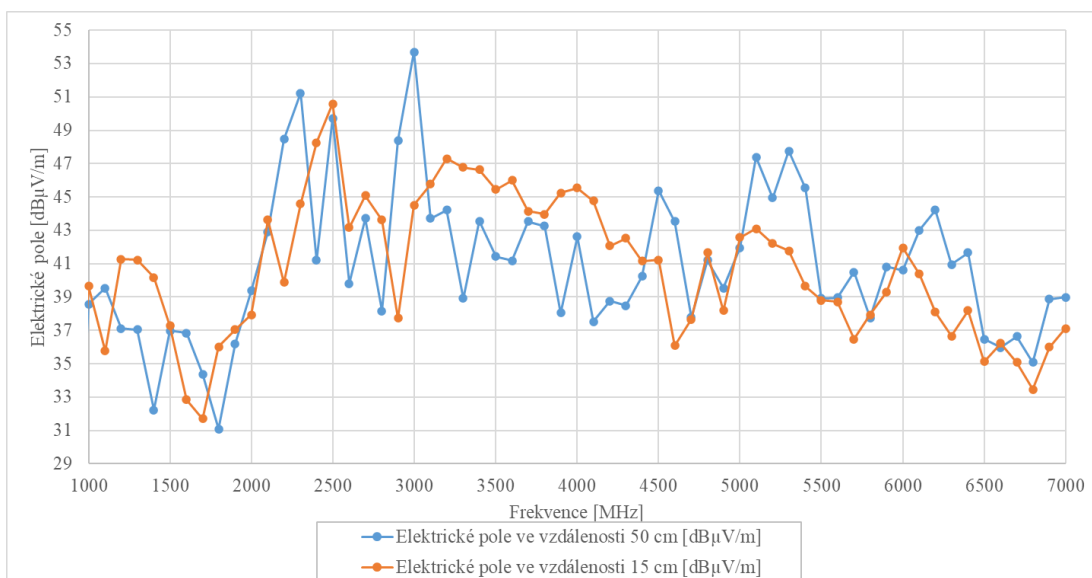
Obr. 39 – Naměření hodnoty v bodě A. [zdroj vlastní]

Obr. 40 ilustruje naměřené hodnoty ve stanoveném bodě B pro obě definované vzdálenosti. Zde je patrné, že rozdíl v naměřených hodnotách je od 1 GHz do 3 GHz, pak dochází v podstatě ke stejným hodnotám elektrického pole s klesajícím charakterem. K největšímu rozdílu naměřených hodnot dochází na frekvenci 2,6 GHz, kde nastal pokles ve vzdálenosti 15 cm téměř o 10 dB μ V/m. Snižující charakter křivek je způsoben kratší vlnovou délkou zvyšující se frekvencí. Naopak snižující charakter křivky znamená zvyšující se účinnost stínění.



Obr. 40 – Naměření hodnoty v bodě B. [zdroj vlastní]

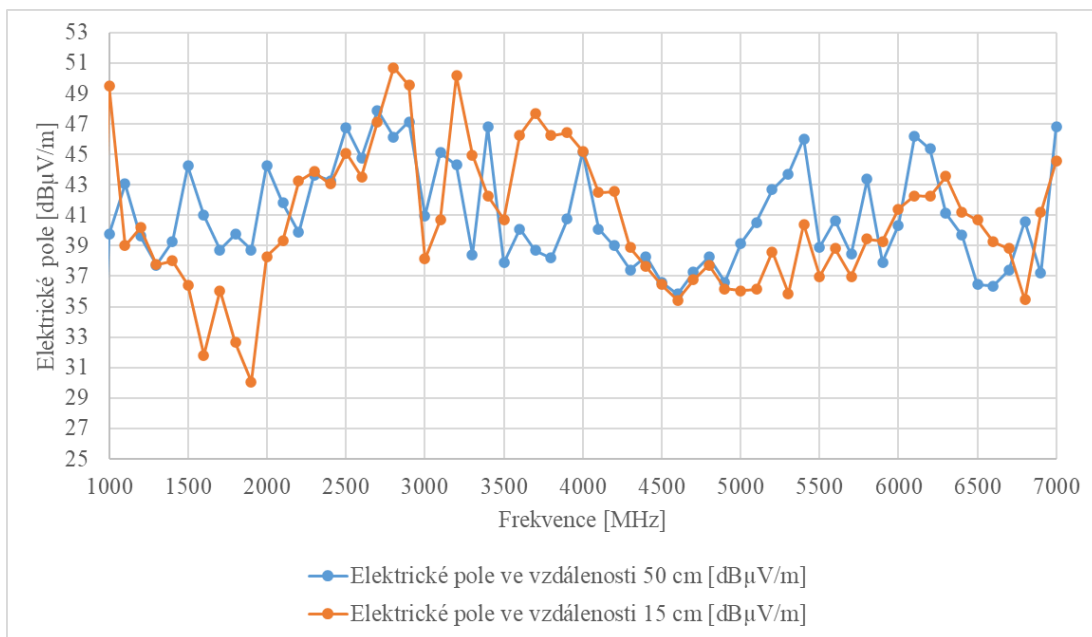
Obr. 41 vyobrazuje naměřené hodnoty elektrického pole ve stanoveném bodě C pro obě vzdálenosti. Je vidět, že s měnící se frekvencí dochází k poměrně velkým změnám. Mezi frekvencí 1,5 GHz až 2,5 GHz dochází ke změně přibližně 20 dBµV/m. Takto významný rozdíl se již v průběhu dalšího měření, až do 7 GHz neopakuje. Lze však konstatovat, že rostoucí frekvencí při vzdálenosti 15 cm dochází od 3 GHz k postupnému klesání elektrického pole a zároveň dochází k zvýšení účinnosti stínění zapříčiněné kratší vlnovou délkou.



Obr. 41 – Naměření hodnoty v bodě C. [zdroj vlastní]

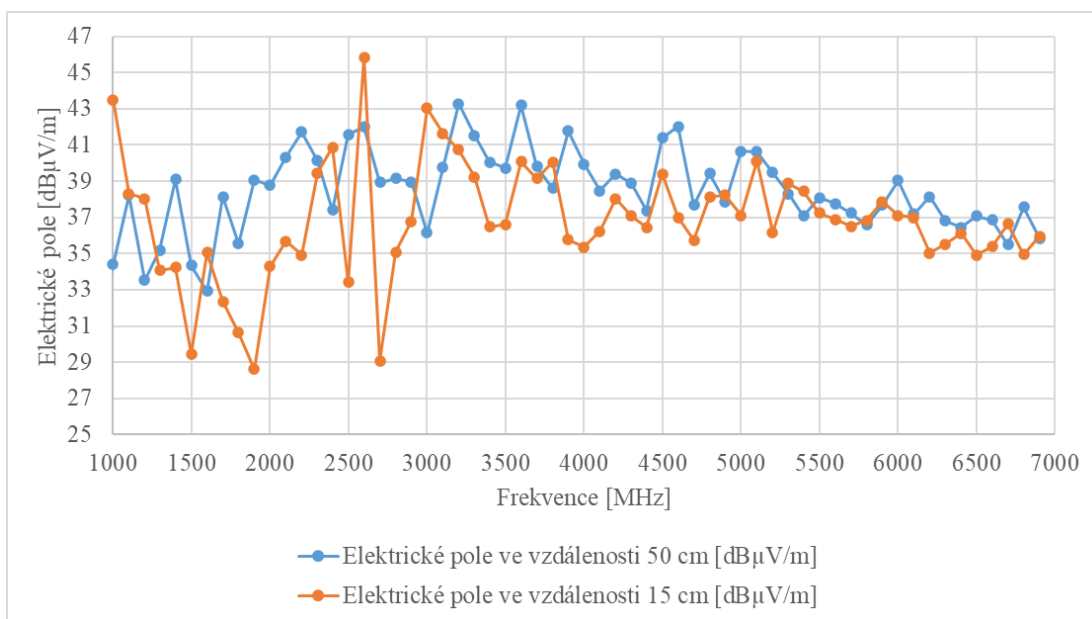
Obr. 42 ilustruje výsledky měření elektrického pole pro bod D opět v obou vzdálenostech. V tomto bodě dochází k proměnlivému spádu křivky. K největšímu rozdílu naměřených hodnot dochází na frekvenci 1,7 GHz a to přibližně 10 dBµV/m. Za zmínku

také stojí propad hodnot elektrického pole na frekvenčním rozsahu 5,45 GHz až 6 GHz. Rozdílné hodnoty elektrického pole mohou být způsobené vnějšími vlivy.



Obr. 42 – Naměření hodnoty v bodě D. [zdroj vlastní]

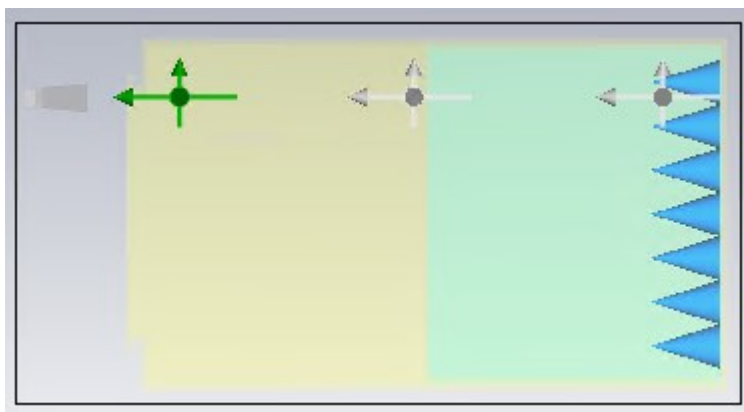
Na Obr. 43 je vyobrazen bod E, u kterého dochází k největšímu poklesu naměřených hodnot elektrického pole ve vzdálenosti 15 cm na frekvenci 2,7 GHz a tento rozdíl činí 16 dBμV/m. Jinak je vidět, že od frekvence 1 GHz až po 3 GHz dochází k postupnému zvětšování elektrického pole, následně od 3 GHz se hodnoty elektrického pole postupně snižují, tudíž dochází k zlepšení stínící účinnosti.



Obr. 43 – Naměřené hodnoty v bodě E. [zdroj vlastní]

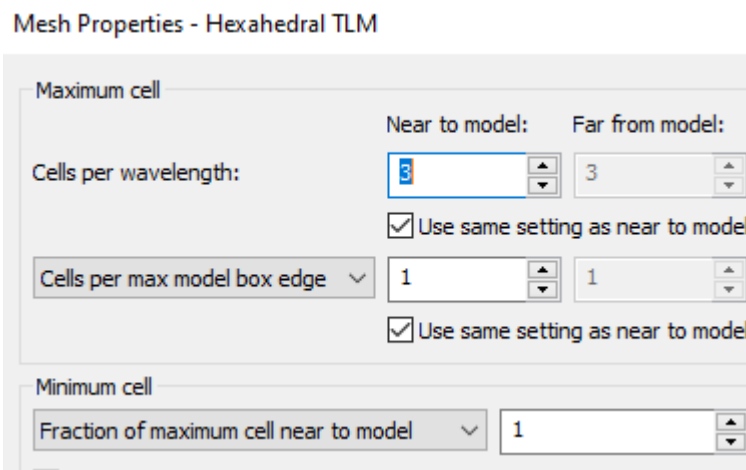
6 OPTIMALIZACE EXPERIMENTU A MODELU

Kapitola popisuje optimalizaci experimentu a modelu vytvořeného v CST Studiu Suite. Před spuštěním první simulace bylo nejdříve potřeba upravit rozmístění sondy uvnitř modelu komory, a také vymodelované antény tak, aby odpovídala umístění při reálném měření, jak ilustruje Obr. 44. Tento postup se opakoval pro každou pozici A až E zvlášť.



Obr. 44 – Upravené rozmístění sond a antén. [zdroj vlastní]

Pro účely studentské verze CST Microwave Studio muselo být změněno nastavení sítě buněk pro výpočet elektromagnetických polí, jež je vyobrazeno a Obr. 45. Nastavení bylo dosti omezené, neboť studentská licence CST dovoluje pouze 1 milion buněk, takže simulace mohla probíhat pouze od 1 do 3 GHz.



Obr. 45 – Simulační nastavení. [zdroj vlastní]

První výsledky simulace byly dost znepokojivé, a proto bylo potřeba přistoupit k optimalizaci modelu. Nejprve byly upraveny typ a vlastnosti testovaného materiálu tak, aby lépe reprezentovaly skutečný vzorek. Vzhledem k omezenému množství buněk nebylo

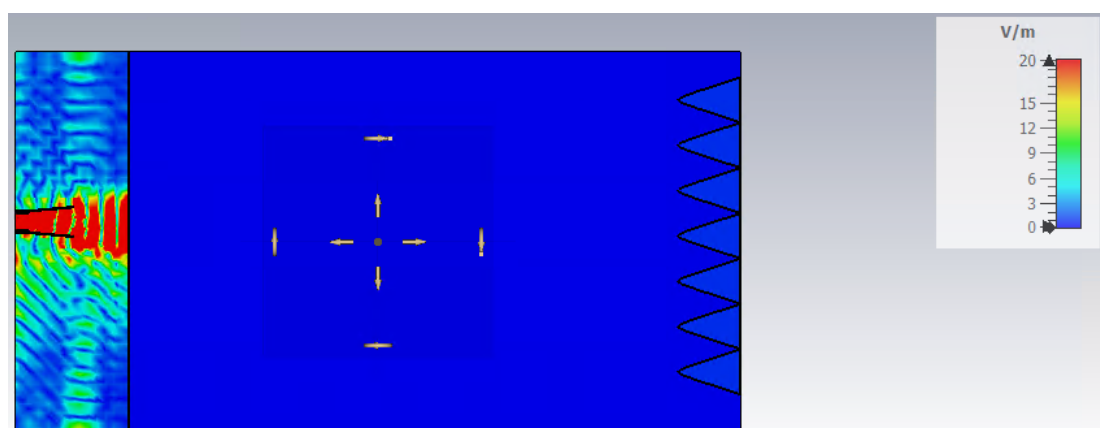
možné využít stejné materiály, a proto jako nejvhodnější byl zvolen materiál nerezová ocel, jež ovlivnilo výslednou simulaci.

Při nastavování materiálu byly testovány nejrůznější parametry a výsledky porovnány. Jako nejlepší se po srovnání výsledků jevílo nastavení testovaného materiálu jako tenkého panelu.

Bohužel ani po celkové úpravě materiálu simulace nedosahovali podobných výsledků jako tomu bylo při reálném měření. Přistoupilo se tedy k úpravě nastavení portu a jeho budících hodnot. Po provedení několika simulací se nastavení portu na S-parametr s hodnotou 50 Ohmu jevílo jako nejvhodnější nastavení.

Po provedení dalších sérií simulací, kdy docházel k velmi odlišným výsledkům, bylo přistoupeno k variantě celkové úpravy modelu. Provedlo se odstranění vymodelované komory a ponechána byla pouze anténa s portem, sondy a zadní absorbační materiál. Testovaný materiál byl zvětšen přes celou velikost „Bounding box“ a upravily se „Boundary Conditions“, jež slouží pro nastavení prostředí navzdory provedeným změnám se však nepodařilo dosáhnout uspokojivých výsledků.

I přes celkovou úpravu se testovaný materiál choval jako bezchybný a proto docházelo k úplnému útlumu. Ukázka nepropustnosti materiálu je vyobrazena na Obr. 46. Změny komponenty pro vybuzení a úprava nastavení simulace vedly pouze k dalším problémům s omezenou studentskou licenci.



Obr. 46 – Prostupnost materiálu. [zdroj vlastní]

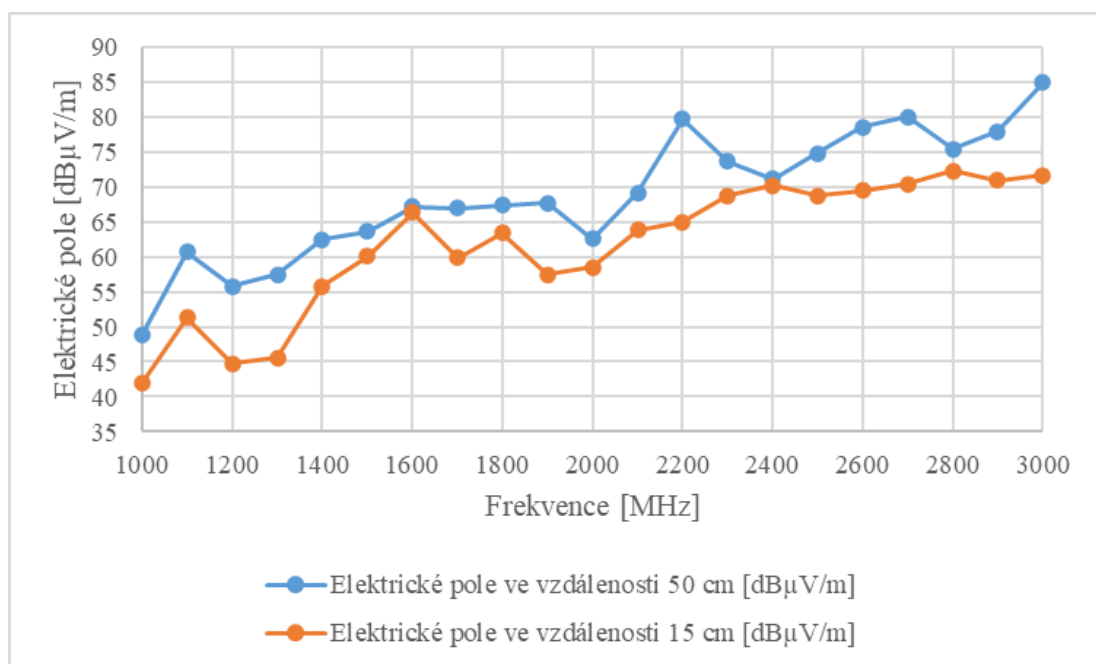
Získané výsledky sice zcela neodpovídají realitě, neboť nebylo možné získat všechny informace a zároveň nebyl k dispozici datový list, ale s tím se při vytváření simulací musí

počítat. Dále docházelo při reálném měření k ovlivňování rušivými vlivy okolí, jako jsou například mobilní telefony, wifi routery, servery a ostatní elektronická zařízení atd.

Vzhledem k omezeným možnostem simulace, kvůli studentské licenci, jenž dovoluje omezený počet boněk, které ovlivňují přesnost simulace se hodnoty liší, neboť bylo potřeno podstoupit několik kroků, a také je potřeba zohlednit okolní vnější vlivy, jež ovlivňovaly reálné měření v laboratoři. Pro ukázkou vyexportovaných hodnot byly vytvořeny grafy v Excelu a to hlavně z důvodu dobré znalosti tohoto programu. Bohužel, hodnoty dosahují vyšších hodnot, než tomu ve skutečnosti.

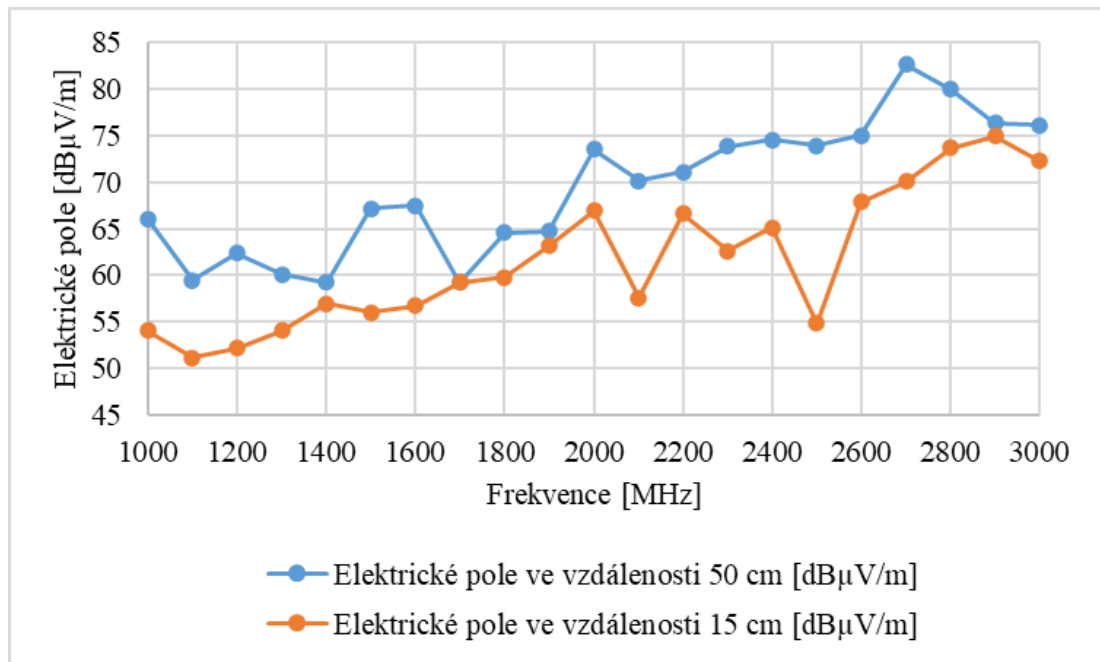
6.1 Ukázka nasimulovaných dat

Na Obr. 47 je vyobrazen graf hodnot pro bod A, kde je možné si všimnout podobně rostoucí úrovně elektrického pole pro obě vzdálenosti, s výsledným rozdílem přibližně 15 dB μ V/m. Dále na frekvenci 2,8 GHz pro obě vzdálenosti dochází k přibližně stejné hodnoty intenzity elektrického pole a to 72 dB μ V/m. K největšímu rozdílu intenzit elektrického pole dochází na frekvenci 2,2 GHz a to 15 dB μ V/m.



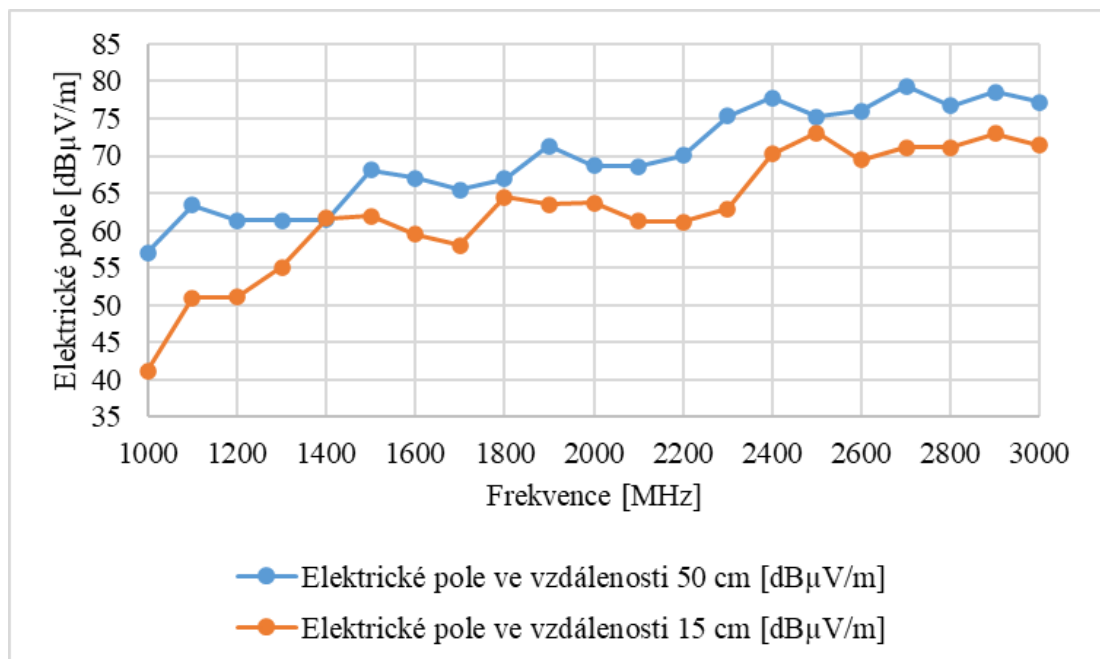
Obr. 47 – Nasimulované hodnoty v bodě A. [zdroj vlastní]

Na Obr. 48 je znázorněn graf, jenž ilustruje bod B pro obě zkoumané vzdálenosti. Z grafu opět vyplývá narůstající tendence intenzity elektrického pole. K největšímu rozdílu elektrického pole dochází na frekvenci 2,5 GHz a to přibližně 20 dB μ V/m.



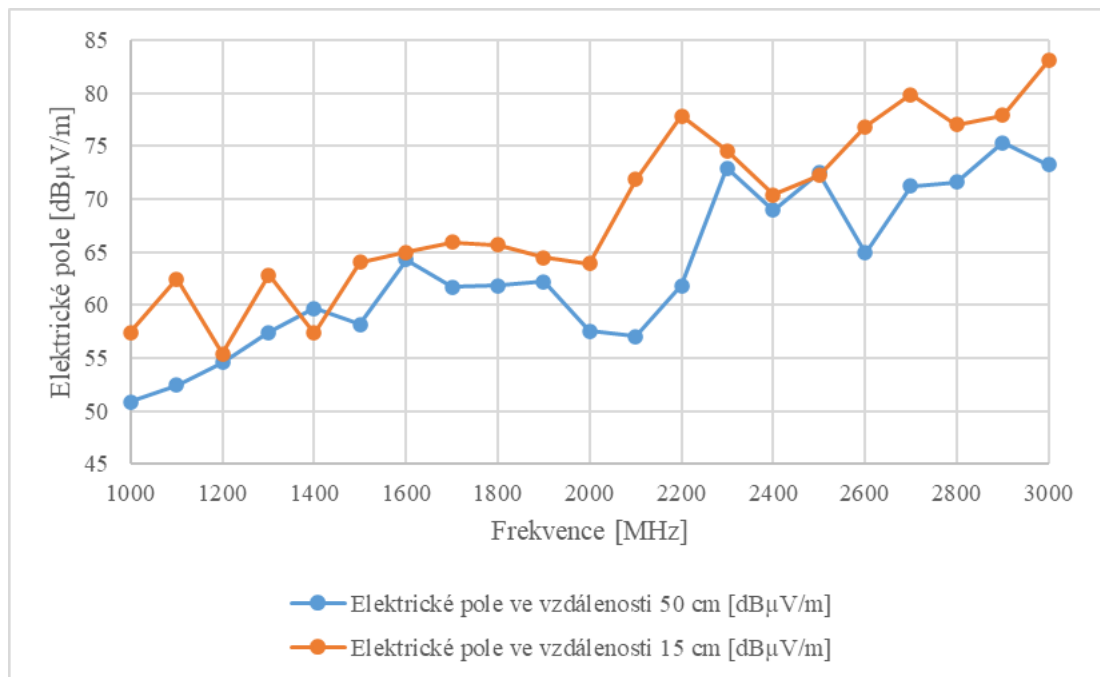
Obr. 48 – Nasimulované hodnoty v bodě B. [zdroj vlastní]

Na Obr. 49 je znázorněn graf, jenž ilustruje bod C pro obě zkoumané vzdálenosti. Graf indikuje, že v případě 15 cm vzdálenosti mezi stínícím vzorkem a anténou dochází v porovnání s předchozími měřeními, o pokles cca 5 dBμV/m. Na frekvenci 1,4 GHz jsou dokonce hodnoty shodné a přibližně stejné hodnoty elektrického pole se dále nacházejí na frekvencích 1,6 GHz a 2,5 GHz.



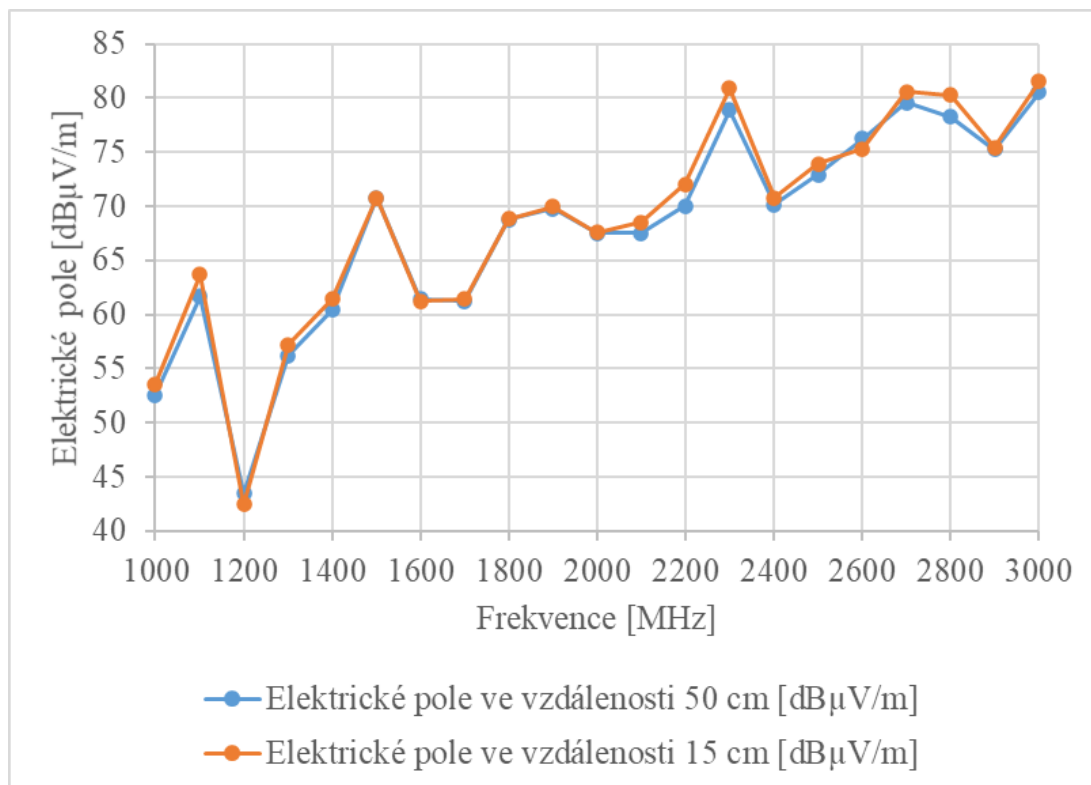
Obr. 49 – Nasimulované hodnoty v bodě C. [zdroj vlastní]

Na Obr. 50 je znázorněn graf, jenž ilustruje bod D pro obě zkoumané vzdálenosti. Z grafu je patrný rozdílný průběh elektrického pole na všech frekvencích. Ve vzdálenosti 15 cm dochází k nejvýraznějšímu zvýšení elektrického pole mezi frekvencemi 2 až 2,2 GHz. U vzdálenosti 50 cm je to mu od frekvence 2,1 GHz 2,3 GHz.



Obr. 50 – Nasimulované hodnoty v bodě D. [zdroj vlastní]

Na Obr. 51 je vyobrazen graf pro průběh elektrického pole v bodě E, kde je patrný téměř identický průběh intenzity elektrického pole v závislosti na frekvenci. Pouze pro vzdálenost 15 cm dochází mezi frekvencemi 2,7 GHz až 2,9 GHz k nepatrnému poklesu elektrického pole.



Obr. 51 – Nasimulované hodnoty v bodě E. [zdroj vlastní]

7 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Po celkovém zpracování dat bylo možné vyhodnotit provedený experiment. Prvním krokem bylo vypočítat průměr ze všech 61 naměřených hodnot pro daný bod ve vzdálenosti 50 cm. Naměřené hodnoty jsou vyobrazeny v grafech v Kapitole 5.3. Naměřené hodnoty byly následně seřazeny podle velikosti od nejmenší po největší a nakonec těmito hodnotám bylo přiřazeno bodové hodnocení stejné jako ve škole. 1 – nejlepší (reprezentuje největší účinnost stínění) až 5 - nejhorší (reprezentuje nejhorší účinnost stínění).

Tab. 9 - Vyhodnocení měření ve vzdálenosti 50 cm

Vzdálenost 50 cm		
Bodové hodnocení	E-field [$\text{dB}\mu\text{V/m}$]	Pozice
1	38,06	Bod B
2	38,40	Bod E
3	38,53	Bod A
4	40,89	Bod C
5	41,02	Bod D

Z uvedeného porovnání výše v Tab. 9 je zřejmé, že ve vzdálenosti 50 cm od materiálu nejlépe stínil bod B, jež má průměrnou hodnotu 38,06 $\text{dB}\mu\text{V/m}$ a naopak nejhůře stínil bod D, který má hodnotu 41,02 $\text{dB}\mu\text{V/m}$.

Pro vzdálenost 15 cm jsou hodnoty označené stejně jako tomu bylo pro předešlou vzdálenost 50 cm. Naměřené hodnoty jsou opět vyobrazeny v grafech v Kapitole 5.3. Tyto hodnoty jsou vyobrazeny v Tab. 10. Z těchto naměřených dat vyplývá, že k nejlepšímu stínění zde docházelo v bodě E, který má hodnotu 36,93 $\text{dB}\mu\text{V/m}$ a nejhoršímu pro změnu v bodě C, jehož hodnota dosáhla úrovně 40,70 $\text{dB}\mu\text{V/m}$.

Tab. 10 - Vyhodnocení měření ve vzdálenosti 15 cm

Vzdálenost 15 cm		
Bodové hodnocení	Elektrické pole [$\text{dB}\mu\text{V/m}$]	Pozice
1	36,93	Bod E
2	39,57	Bod B
3	40,31	Bod A
4	40,62	Bod D
5	40,70	Bod C

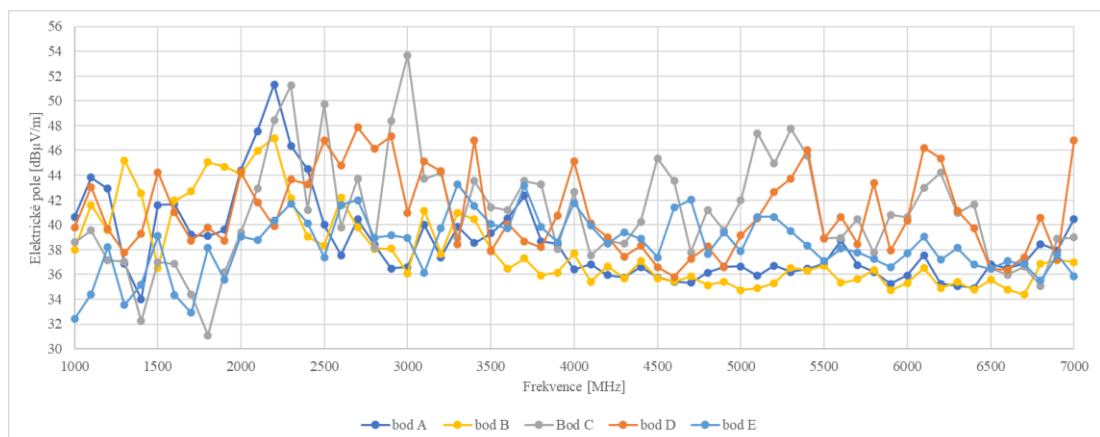
Při zahrnutí obou vzdáleností pro jeden bod do jednoho vyhodnocení, byl stanoven celkový nejlepší a nejhorší bod. Opět došlo ke stejnému postupu zpracování jako pro předešlé dvě vyhodnocení. Z hodnot, jež jsou vyobrazeny v Tab. 11 je patrné, že

k nejlepšímu stínění docházelo v bodě B, které má hodnotu 35,9923 dB μ V/m naopak k nejhoršímu docházelo v bodě D, jehož hodnota je 40,4579 dB μ V/m

Tab. 11 – Vyhodnocení celkového měření

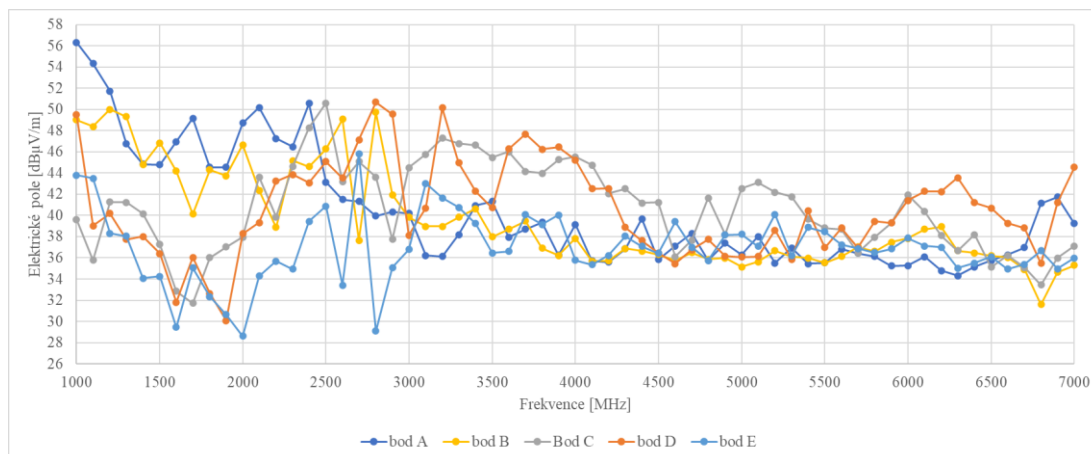
Celkové vyhodnocení pro jednotlivé pozice		
Bodové hodnocení	S-parametr [dB μ V/m]	Pozice
1	35,9923	Bod B
2	36,7171	Bod A
3	36,9008	Bod E
4	38,6526	Bod C
5	40,4579	Bod D

Na následujícím Obr. 52 je vyobrazen celkový průběh měření ve vzdálenosti 50 cm jenž proběhl na frekvenčním rozmezí 1 až 7 GHz. Z Grafu je zřetelně pozorovatelné, že docházelo k naměření odlišných hodnot v každém bodě měření a lze předpokládat, že tyto rozdíly byly způsobeny identifikovanými poruchami v předchozí kapitole a také odchylkou měření.



Obr. 52 – Výsledky měření elektrického pole ve vzdálenosti 50 cm. [zdroj vlastní]

Měření, jenž bylo uskutečněno ve vzdálenosti 15 cm je vyobrazeno na Obr. 53. I zde je zřetelné naměření odlišných hodnot, jenž mohlo být způsobené identifikovanými poruchami a také odchylkou měření. Z grafu je možné také vyčíst, že ve vzdálenosti 15 cm docházelo k menšímu útlumu, než tomu bylo u vzdálenosti 50 cm.

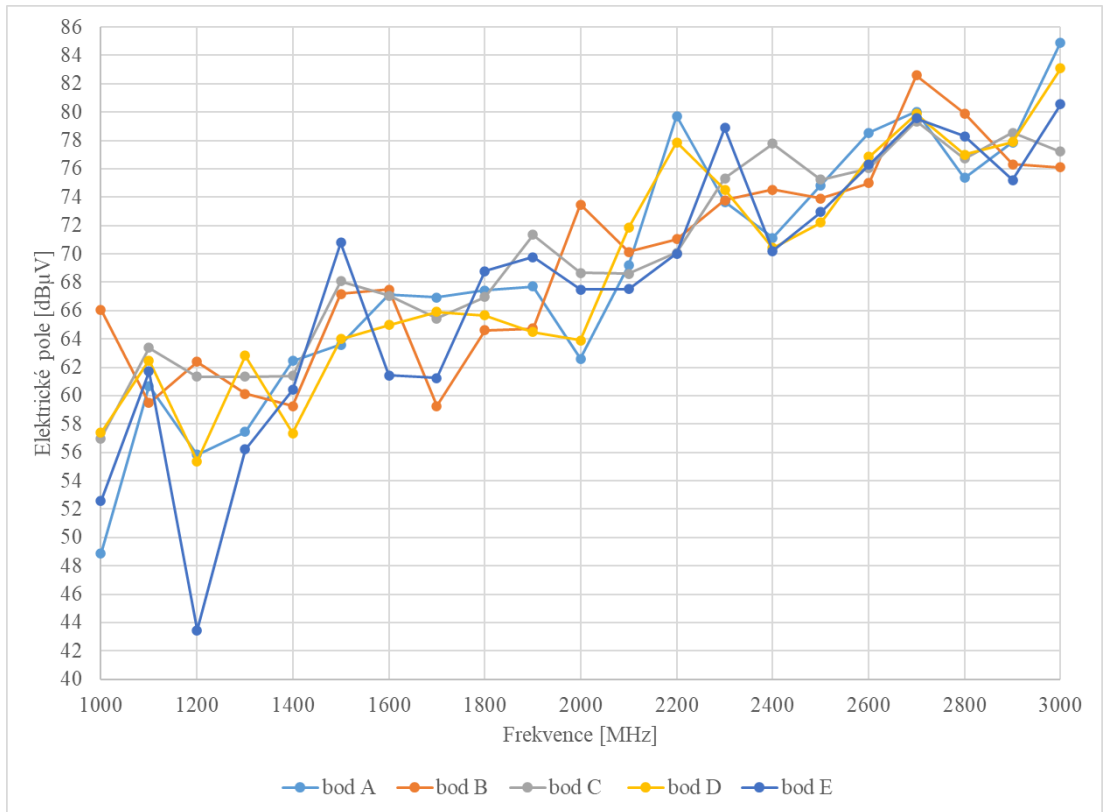


Obr. 53 - Výsledky měření elektrického pole ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]

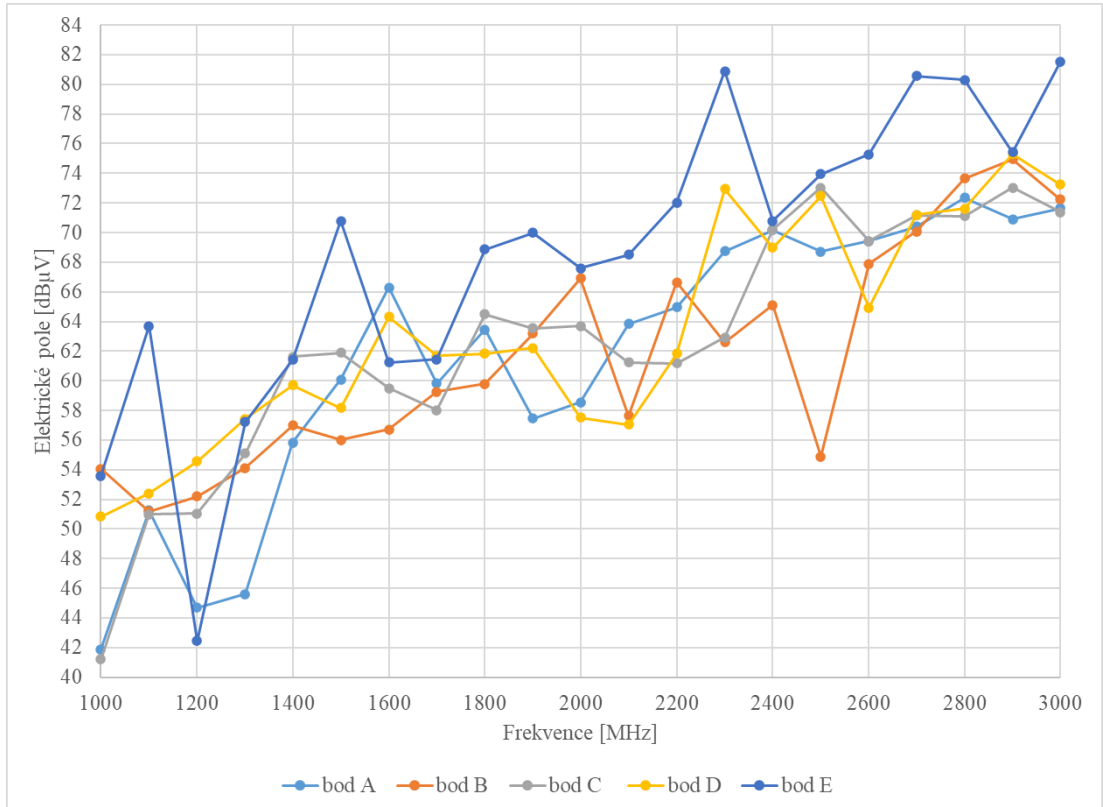
Pro názornost porovnání reálného měření a simulace bylo vytvořeno srovnání pro vzdálenost 15 cm a také 50 cm zvlášť. Z výsledků simulací je zřejmý stoupající charakter, jenž do jistý míry můžeme pozorovat i na hodnotách změřených v laboratoři. Bohužel simulace dosahuje vyšších hodnot, než tomu bylo při reálném měření v laboratoři. Nicméně, jak již bylo v předešlých kapitolách zmíněno, je potřeba brát v potaz omezenou studentské licenci software CST studio, a také vnější vlivy, jež ovlivňovaly reálné měření. Vzdálenost 15 cm je znázorněna na Obr. 54. a vzdálenost 50 cm je vyobrazena na Obr. 55. Z Tab. 12, která vyobrazuje průměrné hodnoty simulace pro obě vzdálenosti, je možné konstatovat, že bod E s hodnotou 67,78 dB μ V/m má nejlepší účinnost stínění ve vzdálenosti 15 cm, a naopak bod C s hodnotou 69,85 dB μ V/m je nejhorší. U vzdálenosti 50 cm dosáhl nejlepšího stínění bod A s hodnotou 61,71 dB μ V/m a nejhoršího stínění dosáhl bod E s hodnotou 68,45 dB μ V/m.

Tab. 12 – Vyhodnocení simulačních hodnot ve vzdálenosti 15 cm a 50 cm

Vzdálenost 15 cm			Vzdálenost 50 cm		
Bodové hodnocení	Elektrické pole [dB μ V/m]	Pozice	Bodové hodnocení	Elektrické pole [dB μ V/m]	Pozice
1	67,78	bod E	1	61,71	bod A
2	68,86	bod A	2	61,72	bod B
3	68,86	bod D	3	62,65	bod C
4	69,40	bod B	4	63,34	bod D
5	69,85	bod C	5	68,45	bod E



Obr. 54 - Výsledky simulace elektrického pole ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]



Obr. 55 – Výsledky simulace elektrického pole ve vzdálenosti 50 cm [zdroj vlastní]

8 IDENTIFIKACE POTENCIONÁLNÍCH PORUCH

Při identifikaci potencionálních poruch se nejprve provedla analýza naměřených a zpracovaných výsledků. Podle těchto hodnot bylo možné odvodit potencionální poruchy. Jako pomůcka v této identifikaci posloužilo i fyzické zkoumání komory, kdy došlo k odmontování upínacího rámu, vyjmutí testovaného plátu materiálu a zkontrolování všech doléhacích ploch na které je upevňován testovaný materiál. Závěrem bylo provedeno srovnání výsledků a zejména analýza 3D simulací, které vykreslují chování elektromagnetických vln pro konkrétní frekvence při změně fáze.

Jako první potencionální porucha bylo identifikováno špatně vyrobené testovací pláty materiálu, které nejsou po celém obvodu se stejným přesahem. V rozích materiálových plátů je tento přesah naprosto vynechán, z důvodu jednoduché výroby. Toto řešení ovšem může způsobit únik nebo vnik elektromagnetické energie a ovlivnění testů. Tento konstruktivní nedostatek je vyobrazen na Obr. 56.



Obr. 56 - Přesah materiálu. [zdroj vlastní]

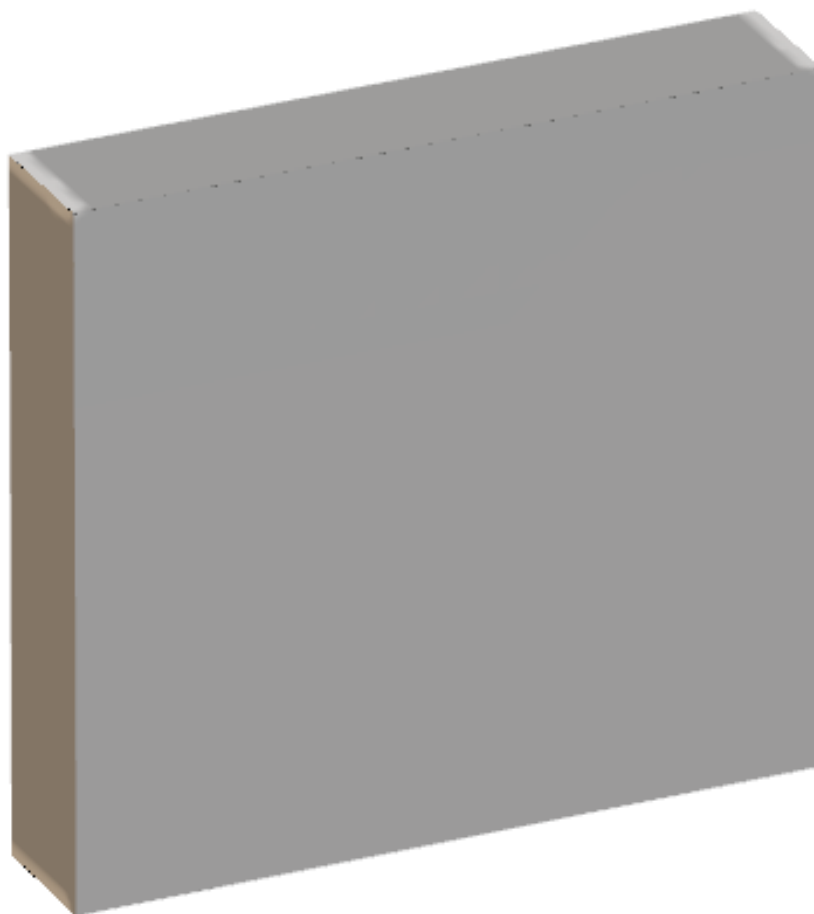
Dále po odstranění upínacího rámu a odstranění materiálového plátu bylo vidět, že obvodové těsnění sloužící pro stínění při upevněném materiálu, není v ideálním stavu. V některých místech již odpadávalo, bylo vidět opotřebení, způsobené pravidelným používáním této komory, tudíž je pravděpodobné, že tato skutečnost může také ovlivňovat prováděné měření, protože není zajištěna rovnoměrná přilnavost. Poslední potencionální porucha byla identifikována při zpětném kompletování upínacího rámu, který se ke komoře dotahuje velkým množstvím závitových upínacích systémů, u kterých je velmi velká pravděpodobnost různého dotažení. Lze tedy předpokládat, že každý pracovník, pracující

testovací komorou je schopný vyvinout jinou fyzickou sílu pro jeho dotažení, a proto vlivem nerovnosti vznikne nerovnoměrné přilnutí, které může vést k únikům nebo vnikání EM polí a ovlivňování výsledků.

9 NÁVRH PROTIOPATŘENÍ

Kapitola se věnuje navrhovaným protiopatřením, která by měla eliminovat vnější vlivy ovlivňující testování stínící účinnosti. Tato protiopatření se bude skládat z úpravy tvaru testovaných plátů materiálu, výměny obvodového těsnění a také změny uchycení rámu, jenž drží materiál.

První část navrhovaného protiopatření je zaměřená na samotný materiálový plát, který je variabilní dle požadavků a typu měření. Pro lepší představu je tento plech vymodelován na Obr. 57. Reálná detailní fotografie tohoto plátu je ilustrována v Kapitole 8 na Obr. 56. Dle naměřených výsledků, které jsou vyhodnoceny v tabulkách v Kapitole 7, dochází přes tyto prázdné rohy k rušení a je tedy vhodné, aby byly pláty nahrazeny jinými materiálovými pláty, jež budou mít přesné rozměry pro uchycení a nebudou mít prázdné rohy. Úprava stávajících plátů by byla zbytečně komplikovaná, a proto je navrhováno nechat vyrobit pláty nové.



Obr. 57 - Materiálový plát. [zdroj vlastní]

Další částí navrhovaného protiopatření je výměna těsnění, jež se nachází v upínací části pod materiálovým plátem. Současné těsnění, již není v nejlepším stavu, a proto je navrhována výměna za těsnění EMC ploché čtvercové těsnění, jež vyrábí firma Laird TECHNOLOGIES, která spolupracuje v nejrůznějších odvětvích, jako je např. letectví, kosmonautika, automobilová elektronika, síťové zařízení, počítače atd.

Toto těsnění je ideální pro vojenské i komerční aplikace. Je vyrobeno z elastomeru pro stínění EMC/RFI, díky tomu je velmi jemné a pružné. Těsnění má protlačované jádro z nevodivé termoplastické pryže, pokryté tenkou vrstvou silikonu a vodivými aditivami (Flectron). Dosahuje vysokého stupně stínění i při nízké síle stlačení. Tato páska je dodávána i s montážní páskou odolnou proti teplotám a vyrábí se po metrových kusech. Těsnění je vyobrazeno na Obr. 58. [24]



Obr. 58 - Stínící těsnění. [25]

Poslední částí navrhovaných protiopatření je odlišné upínání materiálu. Pláty by se již nedotahovali několika přitlačnými úchyty, neboť při velkém počtu těchto úchytnů dochází k utažení odlišnými silami. Zde je navrhováno, aby rám, jež drží materiálový plát měl čtyři panty na levé straně rámu a na pravé straně bylo otočné kolo, které slouží pro dovření těchto rámových dveří. Podobně jako u bočních revizních dvířek vizualizovaných na Obr. 59. Tak by bylo dosaženo rovnoměrné přilnavosti po okrajích testovaného vzorku.



Obr. 59 – Revizní dvířka

ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřená na stanovení vlivu poruch měřícího zařízení při testování stínící účinnosti. Nejprve byla v teoretické části popsána elektromagnetická kompatibilita, její vznik následný a rozvoj. Následovalo základní členění elektromagnetické kompatibility a tvorba norem EMC. V další kapitole byla popsána stínící účinnost, rozdělení a klasifikování jednotlivých druhů útlumů, a také zde byl specifikován vliv technologických netěsností a otvorů. V poslední kapitole, jež uzavírá teoretickou část této práce byl přiblížen software CST STUDIO SUITE.

V praktické části byl nejdříve vymodelován v software CST STUDIO SUITE a následně popsán postup modelování testovací komory EMC spolu s trychtýřovou anténou. Bohužel, kvůli velkému počtu buněk a omezení studentské licence musel být interiér modelu aproximován. V další části byl navržen a popsán praktický experiment, jež měl zjistit nedostatky při měření v testovací komoře. Experiment byl následně vyhodnocen a popsány jednotlivé jeho komponenty. Následně byl model optimalizován, ale opět kvůli omezené studentské licenci nebylo možné simulaci nastavit tak, aby odpovídala skutečným naměřeným hodnotám. V následující části došlo k identifikaci potenciálních poruch a také návrhu protiopatření. V poslední části této diplomové práce byl provedený experiment vyhodnocen.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibilita: principy a poznámky. Brno: Vysoké učení technické, 2001. Připojujeme se k Evropské unii. ISBN 8021418737
- [2] PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. ISBN 0471755001
- [3] FLEMING, John Ambrose Fleming. Marconi first transatlantic radio transmitter circuit. Wikipedia [online]. 2018 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Marconi_first_transatlantic_radio_transmitter_circuit_-_Poldhu_1901.png?uselang=cs
- [4] Electromagnetic fields and public health. World Health Organization [online]. Geneva, 2007 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/radiation-and-health/electromagnetic-fields-and-public-health>
- [5] Nařízení vlády č. 291/2015 Sb.: Nařízení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Zákony pro lidi [online]. Zlín, 2015 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2015-291/zneni-20151118#p2>
- [6] HENRY W., OTT, Electromagnetic compatibility engineering. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-18930-6. [cit. 2021-5-4].
- [7] POSPISILIK, Martin, Tomas RIHA, Milan ADAMEK a Rui Miguel Soares SILVA. DSLR Camera Immunity to Electromagnetic Fields – Experiment Description. WSEAS Transactions on Circuits and Systems [online]. 2015, 14, 10 [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/circuits/2015/b105801-436.pdf>
- [8] SKŘIVAN, Vojtěch. Testování EMC v automobilové technice. Plzeň. Bakalářská práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ. [cit. 2021-5-4].
- [9] KAZDEROVÁ, Jaroslava. Elektromagnetická interference a její vyhodnocování. Zlín, 2010. Dostupné také z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13348/kazderová_2010_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce František Hruška.

- [10] SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) 6 Normalizace v oblasti EMC. Elektrevue [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně, 2001 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01036/index.html>
- [11] KEISER, B. Principles of Electromagnetic Compatibility. Artech House, Norwood 1987 [cit. 2021-5-4]
- [12] CHATTERTON, P. A., HOULDEN, M. A. EMC – Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley, New York 1991 [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qre.4680080215>
- [13] HABIGER, E. Elektromagnetische Verträglichkeit. Hüthig Buch Verlag, Heidelberg 1992 ISBN 978-3-662-06980-6
- [14] RÜTSCHLIN, Marc a Tilmann WITTIG. State of the art antenna simulation with CST STUDIO SUITE [online]. Německo, 2015 [cit. 2021-5-14]. ISSN 2164-3342. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7228785>
- [15] CST STUDIO SUITE ELECTROMAGNETIC FIELD SIMULATION SOFTWARE. 3DS [online]. Boston [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
- [16] CST Studio Suite. Simulia [online]. Hradec Králové, 2018 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.simulia.cz/software/simulia-cst-studio-suite>
- [17] Antenna Design Software Cst. [online]. 9.1.2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://pakis427.blogspot.com/2021/02/get-21-antenna-design-software-cst.html>
- [18] JIŘÍ SVAČINA. Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) Část 5: Elektromagnetická odolnost a její testování. Elektrevue [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01025/index.html>
- [19] JIŘÍ SVAČINA. Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) - Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů. Elektrevue [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <http://www.elektrevue.cz/clanky/01021/index.html#kap4.5>

- [20] Discrete Port. CST STUDIO CABLE. NWEDA [online]. 2013 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: http://www.mweda.com/cst/cst2013/mergedProjects/CST_CABLE_STUDIO/special_solvopt/special_solvopt_discreteports.htm
- [21] Horne R&S®HF906 Antenna. Manualzz [online]. 2012 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://manualzz.com/doc/12009034/rands®hf906-antenna---brief-description>
- [22] Rohde & Schwarz SMR20 1GHz-20GHz Microwave Signal Generator. Test equipmentHQ [online]. Berkshire, 2012 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.testequipmenthq.com/product/rohde-schwarz-smr20>
- [23] R&S®ESPI EMI Test Receiver Specifications. Universitat Politècnica de Catalunya [online]. Barcelona, 2012 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: https://www.upc.edu/sct/ca/documents_equipament/d_95_id-443-1.pdf
- [24] MATERIÁLY PRO EMC STÍNĚNÍ. Thonauer GmbH [online]. Brno [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.thonauer.com/cz/nc/vyrobky/details-vyrobky/materialy-pro-emc-stineni/>
- [25] EMC ploché čtvercové těsnění, Délka 1m, Laird. Distrelec [online]. Vídeň [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.distrelec.cz/cs/emc-ploche-ctvercove-tesneni-delka-1m-laird-4046ab51k03937/p/15016183?q=&pos=11&origPos=11&origPageSize=50&track=true>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- EMC Elektromagnetická kompatibilita
- EMI Elektromagnetické interference
- EMS Elektromagnetická susceptibilita
- SE Shielding effectiveness (stínící účinnost)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Marconiho rádiový vysílač. [3]	11
Obr. 2 - Základní řetězec EMC. [1]	14
Obr. 3 – Působení různých rušivých signálů. [1].....	15
Obr. 4 – Základní členění EMC. [1]	16
Obr. 5 – Rozdělení stínění. [2].....	22
Obr. 6 – Testovací komora EMC. [2]	22
Obr. 7 – Narušení stínění kabelem. [6].....	23
Obr. 8 – Stínění vodiče. [6].....	23
Obr. 9 - Rovinná vlna dopadající kolmo k povrchu. [2].....	24
Obr. 10 -Mnohonásobné odrazy. [1].....	26
Obr. 11 - Kmitočtový průběh účinnosti stínění. [1].....	27
Obr. 12 - Orientace nevyzařující (a) a vyzařující (b) [12]	28
Obr. 13 - Vznik nežádoucích štěrbin při spojení. [12].....	29
Obr. 14 - Řešení elektromagnetického těsnění. [11]	30
Obr. 15 - Zásady konstrukce elektromagneticky stíněných krytů. [13].....	31
Obr. 16 – Ukázka softwaru CST STUDIO SUITE. [17]	33
Obr. 17 – Testovací komora EMC. [zdroj vlastní]	35
Obr. 18 – Detailní pohled na uchycení materiálu.	36
Obr. 19 – Testovací komora EMC. [zdroj vlastní]	36
Obr. 20 – Konstrukce absorbéru. [19]	37
Obr. 21 – Absorpční výplň testovací komory. [zdroj vlastní]	38
Obr. 22 – Vymodelovaná anténa. [zdroj vlastní].....	39
Obr. 23 – Vymodelovaná komora. [zdroj vlastní]	39
Obr. 24 – Průřez vymodelovanou komorou. [zdroj vlastní]	40
Obr. 25 – Průřez upravenou komorou. [zdroj vlastní].....	41
Obr. 26 – Ukázka sítě v pro modelovanou komoru. [zdroj vlastní]	42
Obr. 27 – Sondy v modelované komoře. [zdroj vlastní].....	42
Obr. 28 – Discrete port [20].....	43
Obr. 29 – Schéma zapojení komponentů. [zdroj vlastní]	44
Obr. 30 - Měření bez materiálu. [zdroj vlastní]	45
Obr. 31 – Vnitřní anténa [zdroj vlastní].....	45
Obr. 32 – Body měření. [zdroj vlastní].....	46
Obr. 33 – Měření bodu E ve vzdálenosti 50 cm [zdroj vlastní].....	46
Obr. 34 – Měření bodu E ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní].....	47

Obr. 35 – Měření bodu B ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní].....	47
Obr. 36 – Trychtýřová anténa HF 906. [zdroj vlastní]	48
Obr. 37 - SMR 20 SIGNAL GENERATOR. [zdroj vlastní]	49
Obr. 38 - ESPI TEST RECIEVER [zdoj vlastní]	49
Obr. 39 – Naměření hodnoty v bodě A. [zdroj vlastní]	51
Obr. 40 – Naměření hodnoty v bodě B. [zdroj vlastní]	52
Obr. 41 – Naměření hodnoty v bodě C. [zdroj vlastní]	52
Obr. 42 – Naměření hodnoty v bodě D. [zdroj vlastní]	53
Obr. 43 – Naměřené hodnoty v bodě E. [zdroj vlastní].....	53
Obr. 44 – Upravené rozmístění sond a antén. [zdroj vlastní]	54
Obr. 45 – Simulační nastavení. [zdroj vlastní]	54
Obr. 46 – Prostupnost materiálu. [zdroj vlastní].....	55
Obr. 47 – Nasimulované hodnoty v bodě A. [zdroj vlastní].....	56
Obr. 48 – Nasimulované hodnoty v bodě B. [zdroj vlastní]	57
Obr. 49 – Nasimulované hodnoty v bodě C. [zdroj vlastní].....	57
Obr. 50 – Nasimulované hodnoty v bodě D. [zdroj vlastní].....	58
Obr. 51 – Nasimulované hodnoty v bodě E. [zdroj vlastní]	59
Obr. 52 – Výsledky měření elektrického pole ve vzdálenosti 50 cm. [zdroj vlastní].....	61
Obr. 53 - Výsledky měření elektrického pole ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]	62
Obr. 54 - Výsledky simulace elektrického pole ve vzdálenosti 15 cm. [zdroj vlastní]	63
Obr. 55 – Výsledky simulace elektrického pole ve vzdálenosti 50 cm [zdroj vlastní].....	63
Obr. 56 - Přesah materiálu. [zdroj vlastní].....	64
Obr. 57 - Materiálový plát. [zdroj vlastní].....	66
Obr. 58 - Stínící těsnění. [25]	67
Obr. 59 – Revizní dvířka.....	68

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Rozdělení základních funkčních kritérií. [8]	17
Tab. 2 - Hloubky šíření frekvencí v povrchu materiálů. [6]	25
Tab. 3 - Účinnost stínění velmi tenkých měděných povlaků. [11]	27
Tab. 4 – Kategorizace stínění. [13]	30
Tab. 5 – Rozměry komory	35
Tab. 6 – Velikost jehlanů	37
Tab. 7 – Specifikace Trychtýřové antény HF 906 [21]	48
Tab. 8 – Ukázkové vyhodnocení naměřených hodnot	50
Tab. 9 - Vyhodnocení měření ve vzdálenosti 50 cm	60
Tab. 10 - Vyhodnocení měření ve vzdálenosti 15 cm	60
Tab. 11 – Vyhodnocení celkového měření	61
Tab. 12 – Vyhodnocení simulačních hodnot ve vzdálenosti 15 cm a 50 cm	62