



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**Stíněná komora pro testování stínící účinnosti materiálů**

**Shielded chamber for materials shielding effectiveness  
testing**

**Bakalářská práce**

Studijní program: Elektrotechnika energetika a management


Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Kořínek, Ph.D.

**Jan Sekera**

**Praha 2024**

## Zadání práce



# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Sekera**                      Jméno: **Jan**                      Osobní číslo: **420711**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**

Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**

Specializace: **Aplikovaná elektrotechnika**

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Stíněná komora pro testování stínicí účinnosti materiálů**

Název bakalářské práce anglicky:

**Shielded chamber for materials shielding effectiveness testing**

Pokyny pro vypracování:

1. Prostudujte problematiku měření stínicí účinnosti.
2. Porovnejte vlastnosti skalárních a vektorových měření stínicí účinnosti.
3. Navrhněte malou stíněnou komoru pro měření stínicí účinnosti vzorků materiálů. Pro návrh využijte vhodné sw nástroje.

Seznam doporučené literatury:

[1] HEMMING, Leland H. Architectural electromagnetic shielding handbook: a design and specification guide. New York: Wiley, c1992. ISBN 0-7803-6024-9.

[2] KAISER, Kenneth L. Electromagnetic shielding. Boca Raton: CRC, c2006. ISBN 0849363721.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Tomáš Kofínek, Ph.D.    katedra elektromagnetického pole    FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2024**                      Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **21.09.2025**

Ing. Tomáš Kofínek, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis dikána(ky)

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

CVUT-CZ-ZBP-2015.1
© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

## **Prohlášení**

**„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“**

**V Praze, 15.8.2024**

**Jan Sekera**

## **Poděkování**

**Rád bych tímto poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomáši Kořínkovi, Ph.D. za vedení, rady, připomínky a konstruktivní kritiku při tvorbě bakalářské práce.**

## **Abstrakt a klíčová slova**

### **Abstrakt**

Bakalářská práce se zabývá tématem elektromagnetického stínění, stínící účinnosti a jejího měření. Elektromagnetické stínění je významný prvek elektromagnetické kompatibility – oboru, který se zabývá problematikou elektromagnetického rušení přístrojů a jejich odolností na rušení. Stínění a s tím spojená stínící účinnost je schopnost materiálu tlumit rušivé signály a tím chránit zařízení před nežádoucími vlivy rušení stejně jako zabránit v nežádoucím rušení jiných zařízení.

### **Klíčová slova**

Elektromagnetické stínění, stínící účinnost, stíněná komora, způsob měření, rušení.

## **Abstrakt**

The bachelor's thesis deals with the topics of electromagnetic shielding, shielding efficiency and its measurement. Electromagnetic shielding is an important element of electromagnetic compatibility - a field that deals with the issue of electromagnetic interference of devices and their resistance to interference.

Shielding and the associated shielding efficiency is the ability of the material to dampen interfering signals and thereby protect the device from unwanted effects of interference as well as prevent unwanted interference from other devices.

## **Keywords**

Electromagnetic shielding, shielding efficiency, shielded chamber, method of measurement, interference.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>str. 9</b>
<b>Seznam zkratk</b>	<b>str. 10</b>
<b>Elektromagnetické stínění a stínící účinnost</b>	<b>str. 11</b>
<b>Úvod do stínící účinnosti</b>	<b>str. 11</b>
<b>Účinnost elektromagnetického stínění</b>	<b>str. 11</b>
<b>Koeficient stínění</b>	<b>str. 11</b>
<b>Stínící účinnost</b>	<b>str. 12</b>
<b>Princip stínění elektromagnetické vlny</b>	<b>str. 15</b>
<b>Stínění magnetického pole</b>	<b>str. 15</b>
<b>Stínění elektrického pole</b>	<b>str. 16</b>
<b>Vliv frekvence na celkový útlum</b>	<b>str. 17</b>
<b>Blízké elektromagnetické pole</b>	<b>str. 17</b>
<b>Blízké elektrické pole</b>	<b>str. 18</b>
<b>Blízké magnetické pole</b>	<b>str. 18</b>
<b>Otvory a jejich vliv na stínící účinnost</b>	<b>str. 19</b>
<b>Měření stínící účinnosti</b>	<b>str. 20</b>
<b>Metody, standardy a normy měření</b>	<b>str. 21</b>
<b>Norma IEEE-STD-299</b>	<b>str. 22</b>
<b>Standard MIL-STD-285</b>	<b>str. 22</b>
<b>Norma ČSN EN 61000-5-7</b>	<b>str. 22</b>
<b>ASTM D-4935-99</b>	<b>str. 23</b>
<b>Dynamika měření</b>	<b>str. 23</b>

<b>Zvolený postup měření</b>	<b>str. 24</b>
<b>Rezonance uvnitř komory</b>	<b>str. 25</b>
<b>Skalární a vektorové měření stínící účinnosti</b>	<b>str. 26</b>
<b>Používané přístroje</b>	<b>str. 29</b>
<b>Srovnání</b>	<b>str. 30</b>
<b>Návrh stíněné komory</b>	<b>str. 31</b>
<b>Požadavky na návrh a limitující podmínky</b>	<b>str. 31</b>
<b>Konkrétní návrh</b>	<b>str. 31</b>
<b>Materiál</b>	<b>str. 31</b>
<b>Konstrukce</b>	<b>str. 32</b>
<b>Řešení uchycení vzorků a dveří</b>	<b>str. 33</b>
<b>Pákové upínky</b>	<b>str. 34</b>
<b>Přípevnění upínek ke komoře</b>	<b>str. 34</b>
<b>Výztuž komory</b>	<b>str. 35</b>
<b>Použití</b>	<b>str. 35</b>
<b>Závěr</b>	<b>str. 36</b>
<b>Reference</b>	<b>str. 37</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>str. 38</b>



## Úvod

Cílem této bakalářské práce je prozkoumat princip a metody elektromagnetického stínění, stínící účinnost a její měření. Závěrem bakalářské práce je navrhnout stíněnou komoru pro testování stínící účinnosti vzorků materiálů.

Bakalářská práce navazuje na bakalářský projekt zabývající se stínící účinností elektromagnetického stínění.

Z důvodu návaznosti jsou v bakalářské práci uvedeny poznatky o principu a účinnosti elektromagnetického. Bez tohoto úvodu by nebylo možné řešit samotnou problematiku měření stínící účinnosti ani návrh stínící komory.

## Seznam zkratk

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
B	Magnetická indukce
$\mu$	Permeabilita
$\mu_r$	Relativní permeabilita
$\mu_0$	Permeabilita vakua
H	Intenzita magnetického pole
$\sigma$	Elektrická vodivost
$\delta$	Hloubka vniku
$K_s$	Koeficient stínění
E	Intenzita elektrického pole
SE	Stínící účinnost
f	Frekvence
R	Útlum odrazem
A	Útlum absorpcí
M	Útlum mnohanásobnými odrazy
d	Šířka/tloušťka materiálu
l	Délka
r	poloměr
$\lambda$	Vlnová délka
Z	Impedance
$Z_0$	Impedance vzduchu
$Z_M$	Impedance stínící desky/přepážky
G	Výkonový zisk antény

# Elektromagnetické stínění a stínící účinnost

## Úvod do stínící účinnosti

Elektromagnetické stínění můžeme chápat jako vlastnost materiálu – schopnost tlumit vliv elektromagnetického vlnění procházející daným materiálem. Tato vlastnost se pak využívá při výrobě stínících krytů, které slouží jak k ochraně elektrických zařízení před rušivými vlivy okolí, ale zejména k omezení šíření rušení vyzařovaného přístroji v případech, kdy nelze toto rušení odstranit v samotném návrhu daného přístroje. Samotným vlivem rušení jednotlivých přístrojů se zabývá obor zvaný elektromagnetická kompatibilita (EMC). V tomto oboru pak dochází k častému využívání stínících krytů a to jak pro celé přístroje, tak i pro části přístrojů vyzařující rušivé emise.

Kromě konkrétního konstrukčního provedení, míra jakou stínící kryt sníží rušivý vliv emisí elektromagnetického záření, závisí na zvoleném materiálu, ze kterého je kryt vyroben. Pro samotný návrh stínícího krytu je tedy nutná znalost vlivu různých materiálů na stínící účinnost stěny daného krytu. Měření samotné stínící účinnosti není jednoduchý úkol a získání přesných hodnot skýtá řadu problémů, které je nutné vyřešit. Pro měření stínící účinnosti existuje řada metod a standardů, které se zabývají těmito problémy. Měření a metody měření bude později rozebráno více podrobně v samostatné kapitole.

## Účinnost elektromagnetického stínění

Vliv elektromagnetického stínění lze hodnotit podle koeficientem stínění, ten se dále využívá k výpočtu stínící účinnosti – útlumu rušení. Útlumem rušivého signálu rozumíme měrný pokles výkonu rušivého signálu po průchodu stíněním.

### Koeficient stínění

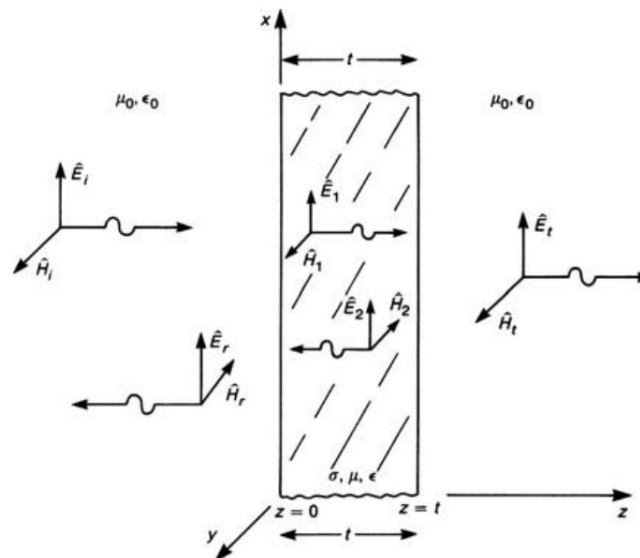
$$K_s = \frac{E_t}{E_i} [-]; \quad K_s = \frac{H_t}{H_i} [-] \quad (1)$$

Kde  $E$  je intenzita elektrického pole a  $H$  je intenzita magnetického pole, index  $t$  značí intenzitu uvnitř stíněného prostoru a index  $i$  značí intenzitu pole v bodě dopadu na stínící desku. Rovnost obou podílů lze napsat za předpokladu, že prostředí před i za stínící deskou je stejné a do stínící desky naráží rovinná elektromagnetická vlna.

Pro samotný výpočet stínící účinnosti materiálu musíme nejprve definovat podmínky měření. Účinnost stínění je ovlivněna tvarem, velikostí úhlem mezi plochou a směrem šíření dopadající elektromagnetické vlny. Pro určení stínící efektivity samotného materiálu a ne konkrétního návrhu budeme uvažovat nekonečnou rovinu. Pro směr dopadu zvolíme nehorší možný scénář – kolmý dopad elektromagnetické vlny. Jakýkoliv jiný, než kolmý dopad by znamenal zvětšení tloušťky stínícího materiálu, kterým by vlna elektromagnetického rušení musela projít, a zároveň by odraz vlnění z obou přechodů rozhraní nesměřoval proti dopadající vlně. To by mělo za následek zvýšení

útlumu vlivem mnohonásobných odrazů. Takto definované podmínky můžeme nazvat stínění rovinné elektromagnetické vlny.

Účinnost stínění v tomto případě pak můžeme určit z rozboru energie dopadajícího a průchozího vlnění.



Obrázek 1: Energie elektromagnetického vlnění při průchodu stíněním [1]

### Stínící účinnost

$$SE = 20 \cdot \log \frac{1}{|K_S|} = 20 \cdot \log \left| \frac{E_t}{E_i} \right| = 20 \cdot \log \left| \frac{H_t}{H_i} \right| \quad [dB] \quad (2)$$

Převzato z [1]

Stínící účinnost můžeme rozložit na jednotlivé složky – útlum odrazem (R), absorpcí (A) a mnohonásobnými odrazy (M).

Výsledná stínící účinnost krytu je pak rovná součtu všech složek:

$$SE = A + R + M \quad [dB] \quad (3)$$

Převzato z [1]

Útlum odrazem jak již název napovídá, vzniká při dopadu elektromagnetické vlny na rozhraní stěny stínícího krytu a okolního prostoru, kdy část rušivé elektromagnetické vln je odražena do prostoru vně stínícího krytu. Útlum odrazem tedy nezávisí na tloušťce stěny, ale na impedanci prostředí a impedanci stěny stínícího krytu.

Útlum odrazem lze vypočítat ze vzorce:

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 Z_M} \right| \quad [dB] \quad (4)$$

*Převzato z [1]*

Kde  $Z_0$  je impedance prostředí (vzduchu),  $Z_M$  je impedance stínící desky.

Pro impedanci prostředí mnohonásobně větší než je impedance stínící desky ( $Z_0 \gg Z_M$ ) lze vzorec (4) zjednodušit do tvaru:

$$R \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{4Z_M} \right| \approx 20 \cdot \log \left( \frac{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}}{4} \right) \quad [dB] \quad (5)$$

*Převzato z [1]*

Útlum absorpcí je způsoben částečným pohlcením rušivé elektromagnetické vlny procházející stěnou stínícího krytu. Pohlcená energie při průchodu elektromagnetické vlny je přeměněna na teplo. Na rozdíl od útlumu odrazem je útlum absorpcí ovlivněn kromě vlastností materiálu, ze kterého je stěna stínícího krytu vyrobena, také její tloušťkou.

Útlum absorpcí lze vypočítat ze vzorce:

$$A = 20 \cdot \log e^{\frac{d}{\delta}} \quad [dB] \quad (6)$$

*Převzato z [1]*

Kde  $d$  je tloušťka stínící desky,  $\delta$  je hloubka vniku.

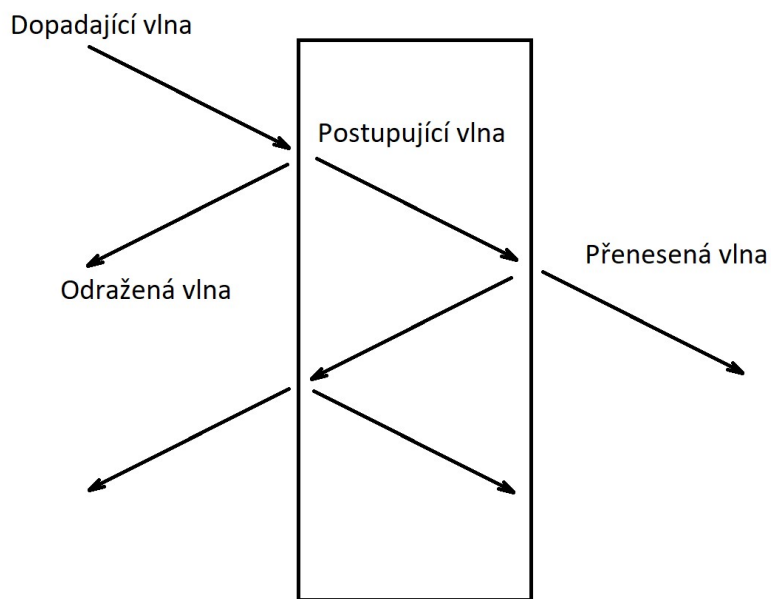
Útlum mnohonásobnými odrazy je podobný útlumu odrazem s tím rozdílem, že při útlumu mnohonásobnými odrazy dochází při částečném odrazení již procházející vlny na rozhraní stěny stínícího krytu a prostoru uvnitř krytu. Tato odražená vlna se může opět při dosažení rozhraní vnějšího prostoru a stěny krytu částečně odrazit a opět putovat směrem do prostoru uvnitř krytu tak, jak je vidět na obrázku 2. Při mnohonásobných odrazech tedy dochází k opakovanému odražení vlny uvnitř stěny stínícího krytu, dokud vlna zcela nezanikne vlivem absorpce její energie v kombinaci s částí energie, která prochází přes rozhraní při každém odrazu do prostoru uvnitř nebo vně krytu.

Útlum mnohanásobnými odrazy lze vypočítat:

$$M = 20 \cdot \log \left| 1 - \left( \frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2t}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right| \text{ [dB]} \quad (7)$$

*Převzato z [1]*

Pokud je impedance vnějšího prostředí mnohem větší než impedance stínící desky a tloušťka desky mnohem větší než hloubka vniku, hodnota útlumu mnohonásobnými odrazy se bude blížit nule a lze tedy útlum mnohonásobnými odrazy zanedbat.



*Obrázek 2: Mnohonásobné odrazy*

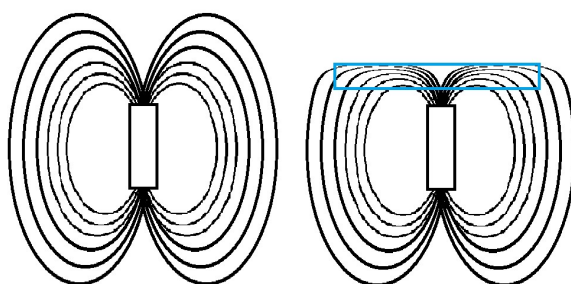
*Převzato z [1]*

## Princip stínění elektromagnetické vlny

Stínění se obvykle navrhuje pro určité charakteristické prostředí – například blízkost zdroje napětí, transformátoru a podobně. Protože rušení vyzařované různými zdroji může obsahovat značně výraznější elektrickou nebo naopak magnetickou složku, je vhodné problém stínění elektromagnetického pole rozdělit na stínění magnetického pole a stínění elektrického pole.

### Stínění magnetického pole

Magnetické pole je vyvoláváno například vodiči, kterými prochází elektrický proud, cívkami nebo permanentními magnety, ve všech případech lze intenzitu pole znázornit magnetickými siločárami. V případě nehomogenního prostředí se magnetické pole bude uzavírat „cestou nejmenšího odporu“ tedy cestou největší permeability. Proto lze k omezení šíření pole vložit do jeho cesty předmět s vysokou permeabilitou. Siločáry magnetického pole se pak budou uzavírat tímto předmětem – dobře magneticky vodivou cestou a ne přes stíněný prostor, viz obrázek 3.



Obrázek 3: Vliv materiálu s vysokou permeabilitou na magnetické pole

Magnetické stejnosměrné pole je charakteristické nízkou frekvencí. Při nízkých frekvencích tvoří hlavní část stínění útlum odrazem. Se zvětšující se frekvencí dochází k poklesu útlumu odrazem. Naopak je tomu u absorpčního útlumu, ten s rostoucí frekvencí výrazně nabývá na účinku a při vysokých hodnotách frekvence značně převyšuje útlum odrazem.

Tato frekvenční závislost je dána hloubkou vniku. Tu lze vypočítat ze vzorce:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma\pi\mu_r\mu_0 f}} \text{ [mm]} \quad (8)$$

Převzato z [1]

Kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita,  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $f$  je frekvence vlnění a  $\sigma$  je vodivost materiálu.

U některých materiálů – jako je například železo – dochází se změnou frekvence také ke změně permeability. To způsobí, že železo bude vhodnější stínící materiál pro nižší frekvence než měď, ale od jisté frekvence tomu bude naopak.

Permeabilita materiálu ale není jediná vlastnost, která ovlivňuje magnetické pole. Druhá důležitá vlastnost je vodivost – ta přichází na řadu u proměnlivých – oscilujících magnetických polí. Tyto magnetická pole indukují proud do stínícího materiálu – EDI proud. Tento proud pak vyvolá vlastní magnetické pole, které bude působit proti původnímu poli, které proud vyvolalo.

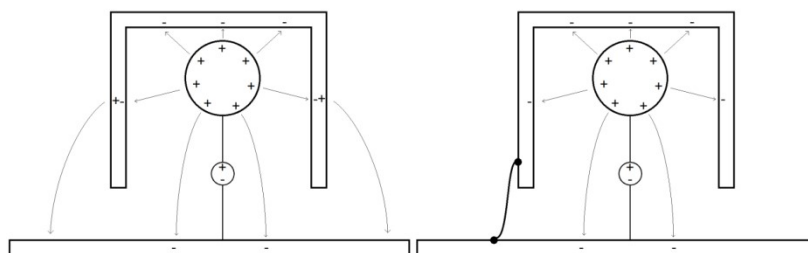
## Stínění elektrického pole

Elektrické pole je generováno mezi dvěma body – místy s rozdílnými potenciály. Pokud se v dosahu působení elektrického pole nachází vodivý bod, dochází k vazbě – působení elektrického pole mezi tímto bodem a alespoň jedním z původních bodů generujících dané elektrické pole.

Při stínění elektrického pole jde tedy o odstranění kapacitní vazby, které se nacházejí mezi jednotlivými předměty. Významný vliv na efektivitě stínícího krytu elektrického pole mají různé parazitní kapacity. Kapacitní vazba pak působí jako napěťový dělič.

Pro odstínění lze podobně jako u magnetického pole použít vodivou přepážku, která ale na rozdíl od magnetického stínění musí být uzemněná, viz obrázek 4. Pokud by stínění nebylo uzemněné a tím mělo kapacitu vůči zemi, docházelo by naopak ke zvýšení vlivu elektrického pole – rušení. Míra rušení by pak závisela velikosti kapacity stínění vůči zemi.

Uzemnění stínění musí být provedeno s dostatečně nízkou impedancí, aby stínění bylo účinné.



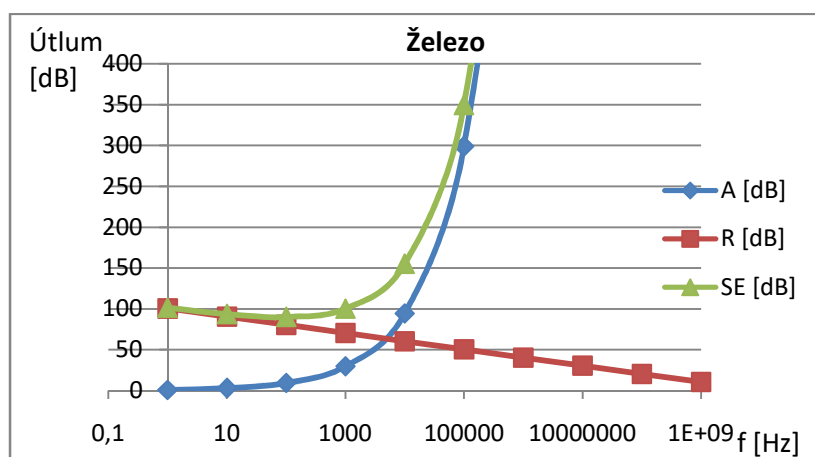
Obrázek 4: Vliv uzemnění na stínění elektrického pole



## Vliv frekvence na celkový útlum

Tak jak jsou jednotlivé složky – útlum odrazem, absorpcí a mnohonásobnými frekvencí závislé na frekvenci, je tedy i celkový útlum frekvenčně závislý. U dobře vodivých materiálů jako je měď nebo železo má útlum odrazem největší vliv na celkový útlum při nízkých frekvencích a s rostoucí frekvencí lineárně klesá. Útlum absorpcí je naopak při nízkých frekvencích zanedbatelný, ale jeho exponenciálně roste a při určité frekvenci (obvykle v rozsahu  $10^4$  Hz až  $10^6$  Hz – podle materiálu stínícího krytu) dojde k překonání hodnoty útlumu odrazem. Útlum mnohonásobnými odrazy bývá při dostatečné tloušťce stěny stínícího krytu téměř nulový a tak skoro neovlivní výslednou hodnotu útlumu nezávisle na frekvenci rušivého elektromagnetického pole.

Z důvodu frekvenční závislosti útlumu je tedy vhodné navrhovat kryt na specifický zdroj rušení podle jeho frekvence. Frekvence zdroje by tedy měla ovlivňovat nejen volbu materiálu, ale i tloušťku stěn krytu. Pro stínění zdrojů vyzařující rušení o nízké frekvenci je tedy vhodné navrhovat kryt tak, aby útlum odrazem byl dostatečně veliký – vhodné je použít vodivý nemagnetický materiál, přičemž tloušťka stěny nemá na útlum odrazem vliv. Pro stínění zdrojů rušení vyšších frekvencí je naopak podstatný útlum absorpcí a pro návrh krytů je vhodné volit feromagnetické materiály a také podstatná je tloušťka stěn krytu.



Obrázek5: Průběh závislosti celkové stínící účinnosti a jednotlivých složek na frekvenci pro železnou desku o tloušťce 1 mm

## Blízké elektromagnetické pole

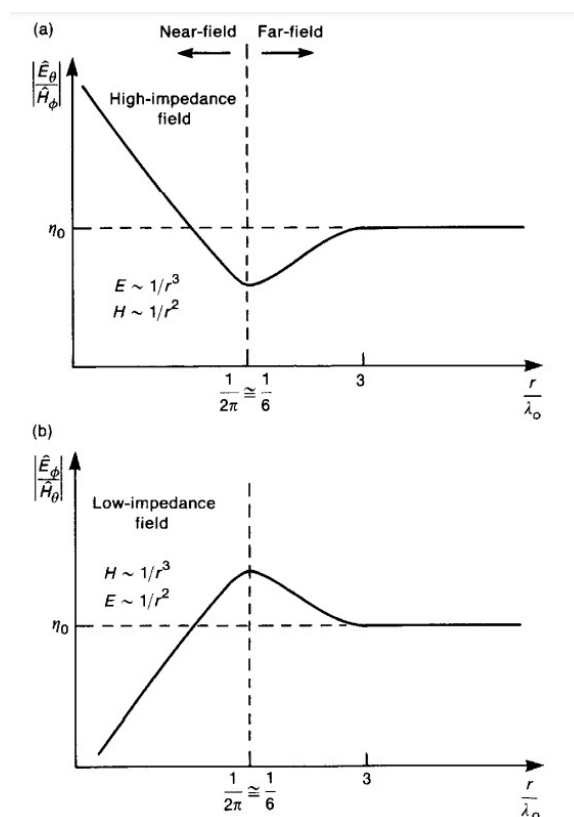
Blízké elektromagnetické pole je takové, kdy zdroj tohoto elektromagnetického pole je ve vzdálenosti od stěny stínícího krytu, menší než je vlnová délka vlny rušení. V takovém případě není impedance prostředí konstantní, jako ve vzdáleném poli, ale mění se se vzdáleností od zdroje. Závislost impedance na vzdálenosti se liší podle typu blízkého pole, a proto je nutné rozdělit blízké pole na elektrickou a magnetickou část - dochází ke vzniku elektrického nebo magnetického kvazistatického pole. Rozdělení na magnetické a elektrické blízké pole je matematická záležitost založená na poměrech  $E_0$  a  $H_0$ , tento poměr se nazývá vlnová impedance. Hranice blízkého a vzdáleného elektromagnetického pole je v bodě, kdy poměr  $\frac{E_0}{H_0}$  je roven  $\mu_0$ .

## Blízké elektrické pole

Blízké elektrické pole je blízké elektromagnetické pole s elektrickou složkou značně převyšující magnetickou složku. Pro blízké elektrické pole je hodnota impedance prostředí větší, než hodnota impedance pro rovinnou elektromagnetickou vlnu. Z rovnic 4 a 5 je vidět, že větší impedance prostředí způsobí výrazný nárůst útlumu odrazem. Při zmenšování vzdálenosti mezi zdrojem rušení a stěnou stínícího krytu bude docházet k růstu útlumu odrazem. Útlum absorpcí není větší impedancí prostředí ovlivněn. Celková hodnota útlumu bude tedy větší při nižších frekvencích u blízkého elektrického pole, než je tomu u rovinné elektromagnetické vlny. U blízkého elektrického pole bude větší stínící účinnost na nižších frekvencích. Zdrojem blízkého elektrického pole jsou obvykle kabely a antény.

## Blízké magnetické pole

Blízké magnetické pole je blízké elektromagnetické pole s magnetickou složkou značně převyšující elektrickou složku. Pro blízké magnetické pole bude hodnota impedance prostředí naopak výrazně menší, než u rovinné elektromagnetické vlny. Blízké magnetické pole lze tedy nazvat nízkoozpečančím. Z rovnic 4 a 5 je opět vidět vliv prostředí na hodnotu útlumu odrazem, která na rozdíl od blízkého elektrického pole menší, než je tomu u rovinné elektromagnetické vlny. Protože hodnota útlumu absorpcí není impedancí prostředí ovlivněna, dojde k překonání hodnot útlumu odrazem útlumem absorpcí při nižších frekvencích. Při návrhu krytu pro stínění blízkého magnetického pole je tedy vhodné zajistit větší tloušťku stěny krytu z feromagnetického materiálu, aby útlum absorpcí a tím i celkový útlum dosahoval požadovaných hodnot i pro nízké frekvence. Zdrojem blízkého magnetického pole jsou obvykle cívky nebo proudové smyčky.



Obrázek 6: Přechod z blízkého na vzdálené pole [1]

## Otvory a jejich vliv na stínící účinnost

Z praktických důvodů obsahují stínící kryty netěsnosti, štěrbiny a otvory. Ty pak mají negativní vliv na celkovou stínící účinnost krytu. Štěrbiny a netěsnosti jsou obvykle způsobeny nedokonalým dotykem dvířek a odnímatelných krytů, zatímco větší otvory jsou v návrhu stínícího krytu umístěny záměrně z důvodu chlazení nebo připojení I/O kabelů. Kromě otvorů je možný přenos rušení právě po připojených kabelech nebo pře špatně vodivé části stínícího krytu. [1]

Každý otvor nebo štěrbina ve stěně stínícího krytu funguje jako anténa, která přenáší dopadající vlnu elektromagnetického rušení. Pro výkonový zisk  $G$  antény tvořené kruhovým otvorem o poloměru  $r$  uvnitř tenké stěny lze spočítat stínící účinnost jako:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{1}{G} = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi r} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi r f} \quad [\text{dB}] \quad (9)$$

Pro  $n$  stejně velkých kruhových otvorů pak platí:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi r \sqrt{n}} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi r f \sqrt{n}} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

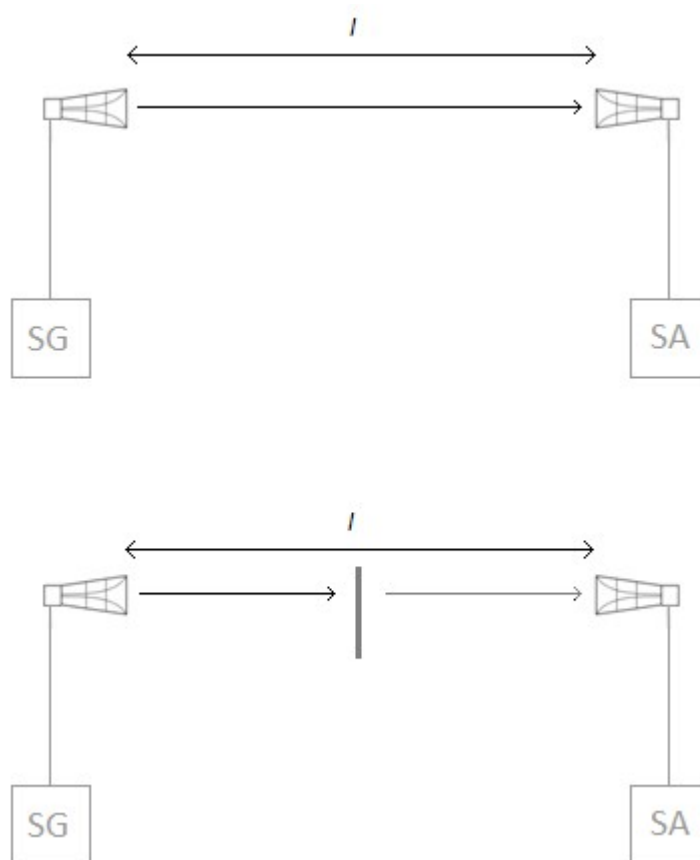
Pro obdélníkový otvor závisí na natočení otvoru oproti směru protékajícího proudu stěnou krytu. Pro nejhorší scénář, kdy je obdélníkový otvor natočen příčně vůči směru protékajícího proudu, stínící účinnost lze vypočítat pomocí vzorce:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2l} + 27,2 \frac{d}{l} \quad [\text{dB}] \quad (11)$$

Kde  $\lambda$  je vlnová délka,  $l$  je délka štěrbiny a  $d$  je tloušťka stěny krytu.

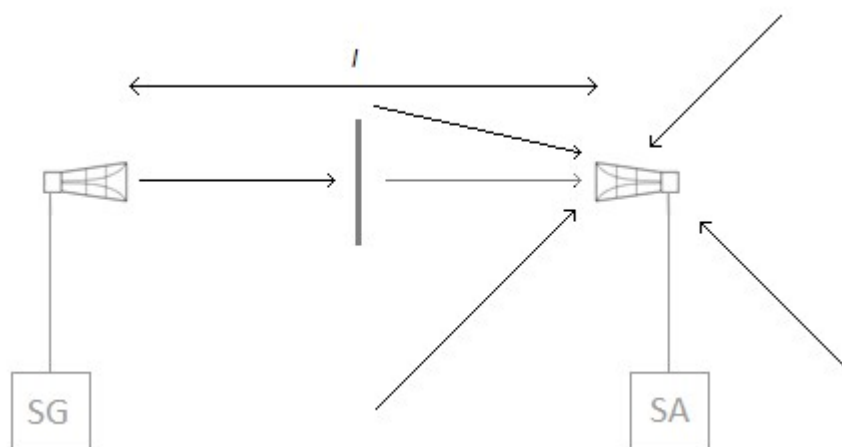
## Měření stínící účinnosti

Pro technický návrh stínících krytů je nezbytná znalost stínící účinnosti dostupných materiálů. Potřebná data lze získat měřením vzorků se stejnými rozměry. Obecně můžeme stínící účinnost určit pomocí metod měření vyzařování nebo metod měření přenosové impedance. Základní experiment pro měření stínící účinnosti lze realizovat soustavou dvou antén, kdy jedna z antén plní funkci zdroje rušení a druhá anténa roli přijímače, viz obrázek 7. Vložení vzorku stínícího materiálu mezi antény dojde k utlumení signálu zaznamenaného druhou anténou. Při porovnání signálu bez měřeného vzorku stínícího materiálu se signálem s vloženým vzorkem, dostaneme základní přehled o schopnosti testovaného materiálu stínit rušivý signál.

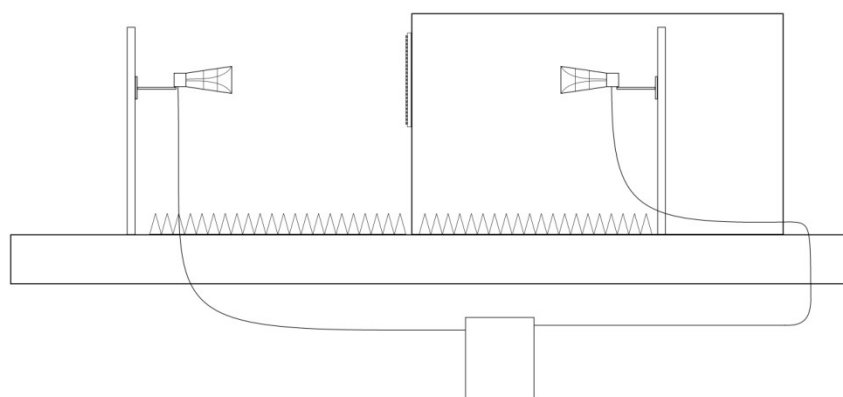


Obrázek 7: Schéma měření signálu bez a s vloženým vzorkem stínícího materiálu

Problém ale nastává s obcházením signálu testovaného vzorku. Protože z praktických důvodů nelze realizovat měření s nekonečně rozlehlou tenkou deskou, je nutné zvolit jiné řešení. Tím řešením může být například stínící komora, viz obrázek 9. Další významný problém při měření stínící účinnosti je okolní rušení - rušení na pozadí, viz obrázek 8. Určitá úroveň okolního rušení je ve dnešní době v podstatě všudypřítomná – od rádiového vysílání až po mikrovlnné záření.



Obrázek 8: Rušení na pozadí



Obrázek 9: Schéma měření stínící účinnosti za použití stínící komory

## Metody, standardy a normy měření

V technice existuje řada norem a standardů pro měření nejen stínící účinnosti vzorků jednotlivých materiálů a především celých stínících krytů. Značná část těchto standardů má počátek v armádních aplikacích. Některé z těchto standardů již přestaly platit, ale pro svoji praktičnost bývají stále v omezené míře využívány. Bohužel ne všechny metody lze použít z důvodu nespílitelných požadavků těchto metod na vlastnosti vzorků. Navíc rozdílnost jednotlivých metod značně omezuje porovnání jejich výsledků. Z tohoto důvodu je často nutné navrhnout vlastní měření, které bude vyhovovat našim potřebám. Vlastní řešení je ale vhodné navrhnout na základě některé ze standardizovaných metod.

## **Norma IEEE-STD-299**

Norma IEEE-STD-299 byla publikována v roce 1969 a za dobu její existence několikrát nahrazena novější verzí (IEEE-1991, IEEE-1997 a IEEE-2006).

Norma je určena ke stanovení stínící účinnosti stínících krytů se všemi rozměry alespoň 2m. Měření se provádí v rozsahu frekvencí 9 kHz až 18 GHz a je rozšířitelné na frekvence 50 Hz a 100 GHz. K měření jsou využity dvě antény – jedna je zdrojem rušení, druhá funguje jako přijímač. Samotné měření se skládá z referenčního měření – tedy bez měřeného stínícího krytu a měření se stínícím krytem. Frekvenční rozsah je rozdělen na menší části a pro každou část je předepsán typ antény. Z každé této části je vybrána jedna frekvence, pro kterou je provedeno měření. Norma doporučuje vyhýbat se rezonančním frekvencím.

Umístění a typ antény při měření je dán přesně normou. Počet pozic závisí na velikosti stínícího krytu.

Norma stanovuje pouze postup měření, ale ne potřebné hodnoty stínící účinnosti.

## **Standard MIL-STD-285**

Vojenský standard pro měření stínící účinnosti krytů z roku 1956, byl zrušen v roce 1997. Části tohoto standardu se staly součástí normy IEEE-STD-299 v roce 1997. Standard MIL-STD-285 byl používán beze změny až do jeho zrušení a i nyní je stále často využíván.

Měření je rozděleno na dvě části – referenční a samotné vlastní měření.

K měření jsou opět využity dvě antény – jedna je zdrojem rušení, druhá funguje jako přijímač. Referenční měření probíhá bez přítomnosti stínícího krytu. Samotné vlastní měření stínící účinnosti pak probíhá se stejnou vzdáleností antén, kdy anténa sloužící jako přijímač je umístěna uvnitř měřeného stínícího krytu. Frekvenční rozsah standardu je rozdělen na tři rozmezí.

## **Norma ČSN EN 61000-5-7**

Elektromagnetická kompatibilita – směrnice o instalacích a zmírňování vlivů je česká norma stanovující postup při měření stínící účinnosti prázdných stínících krytů při různých kmitočtových pásmech. Součástí normy jsou i požadavky na klimatické podmínky laboratoře a na čistotu měřených krytů. Další požadavek je na rozestup měřených frekvencí, který nesmí být větší než jedno procento. To zajistí, že nedojde k špatnému výběru frekvence a zároveň odhalí jakékoliv nedostatky měření při zvolených frekvencích.

Měřicí soustava je složena ze dvou antén, kdy jedna opět slouží jako vysílač rušivého signálu a druhá, která je uvnitř měřeného krytu slouží jako přijímač. Měření se provádí v rozsahu 10 kHz až 40 GHz. Nejprve dojde k referenčnímu měření bez krytu a následně měření s krytem. Při porovnání obou měření získáme stínící účinnost krytu v měřeném rozsahu frekvencí.

Během měření je testovaný kryt postupně natočen tak třemi různými stranami směrem k anténě. Pro kryty s otvory na více než třech stranách je potřeba kryt otestovat pro při natočení krytu postupně všemi těmito stranami k anténě.

Výsledkem měření je EM kód, který udává minimální hodnoty útlumu stínícího krytu pro různá rozmezí frekvencí. Norma tedy na rozdíl od IEEE-STD-299 stanovuje hodnocení stínící účinnosti měřeného krytu.

## **ASTM D-4935-99**

Norma od Americké společnosti pro testování a materiály, která popisuje metodu testování a měření stínící účinnosti. Norma byla publikována v roce 1999 a její platnost skončila v roce 2005, nicméně postup měření je stále velmi často využíván díky jeho praktičnosti. V roce 2018 pak byla představena nová norma pro měření stínící účinnosti materiálů ASTM-4935-18.

Samotné měření se provádí v rozsahu frekvencí od 30 MHz do 1,5 GHz, pro nižší frekvence je měření nepřesné. Měřicí soustava se skládá z vysílače a přijímače signálu a koaxiálního držáku do, kterého je umístěn měřený vzorek materiálu. Účinnost stínění se určí porovnáním útlumu referenčního a měřeného vzorku. Výhoda metody spočívá především v jednoduchosti, kdy není požadována stínící komora.

## **Dynamika měření**

Přesnost měření a vypovídací hodnotu naměřených dat může ovlivnit celá řada faktorů, které je před měřením stínící účinnosti vzít v potaz.

Vzhledem k frekvenční závislosti stínící účinnosti je právě frekvence rušivého signálu pozitivního pro měření stínící účinnosti jedním z hlavních faktorů ovlivňující celkovou přesnost měření. Frekvenční rozsah měření stínící účinnosti je omezen použitými měřicími přístroji.

Kromě frekvenčního rozsahu měřicího přístroje záleží ale i na samotném zdroji rušení a jeho umístění. Rušení může být rovinná elektromagnetická vlna nebo blízké elektromagnetické pole. Blízké elektromagnetické pole je nutné rozdělit na blízké elektrické a blízké magnetické. Pro každý typ zdroje je nutné přizpůsobit měření.

Neméně významným faktorem je i samotné prostředí, ve kterém měření probíhá. Rušení na pozadí, stejně jako odražené vlny vysílaného signálu může způsobit značné zkreslení. Kromě prostoru, ve kterém se experiment nachází, hlavně záleží na vzájemném umístění zdroje rušení, měřeného vzorku a přijímači.

## Zvolený postup měření

Pokud založíme vlastní metodu stínění na metodě IEEE-STD-299, měřicí soustava se bude skládat ze dvou antén otočených proti sobě a umístěny v pevně zvolené vzdálenosti od sebe. Protože potřebujeme, aby byla metoda opakovatelná pro budoucí měření, musí tato vzdálenost být zaznamenána a dodržena jak pro referenční měření, tak pro měření všech vzorků. Bez dodržení stejné vzdálenosti by nebylo možné porovnávat změřené výsledky mezi sebou. Antény také musí být umístěny ve stejné výšce oproti geometrickému středu měřeného vzorku.

První anténa je umístěna vně stíněné komory a je připojena ke zdroji signálu. Důležité je konstantní výkon vysílače (první antény). Druhá anténa se nachází uvnitř stíněné komory a je připojena k vektorovému analyzátoru. Generátor signálu ani vektorový analyzátor by se neměly nacházet uvnitř stíněné komory, aby nedocházelo k ovlivnění měření polem vyzařovaným těmito přístroji.

Určení stínící účinnosti materiálu spočívá ve změření síly signálu zachyceného přijímačem (anténou uvnitř stíněné komory). Měřit lze amplitudu (skalární měření) nebo i fázi signálu (vektorové měření).

Výsledná stínící účinnost se pak určí podle vzorce:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{|P_1|}{|P_2|} [\text{dB}] \quad (12)$$

*Převzato z [6]*

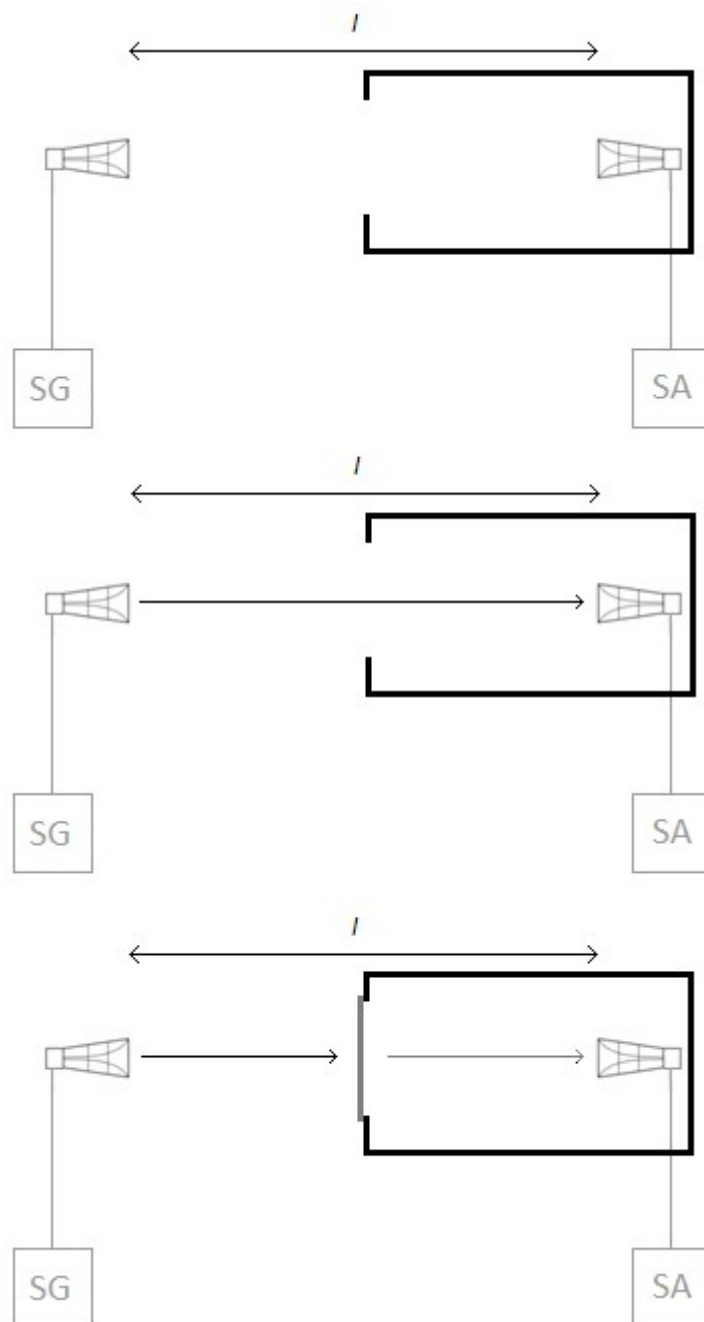
Tedy jako podíl výkonů pole dopadajícího na měřený vzorek a procházejícího skrz měřený vzorek.

Při měření postupně měníme frekvenci v měřeném rozsahu – ten bývá obvykle daný použitou anténou a měřicím přístrojem. Při měření je důležité zachovat dostatečně malý rozestup mezi jednotlivými frekvencemi – například jedno procento, jak je definováno u normy ČSN EN 61000-5-7.

Měření provedeme dvakrát – jednou jako referenční měření bez vzorku stínícího materiálu a podruhé se vzorkem. Druhé měření je nutné provést pro stejné frekvence jako to první. Referenční měření se provádí z důvodu získání hodnoty výkonu elektromagnetického pole, které dopadá na vzorek při druhém měření.

Pro zvýšení přesnosti měření je vhodné provést ještě měření šumu na pozadí, tedy bez zdroje signálu. Jako měřicí přístroj lze využít například vektorový obvodový analyzátor Rohde & Schwarz ZVA 40 a jako antény, širokopásmové antény s DRH10.





Obrázek 10: Schéma měření po krocích (měření rušení na pozadí, měření bez vzorku, měření se vzorkem)

## Rezonance uvnitř komory

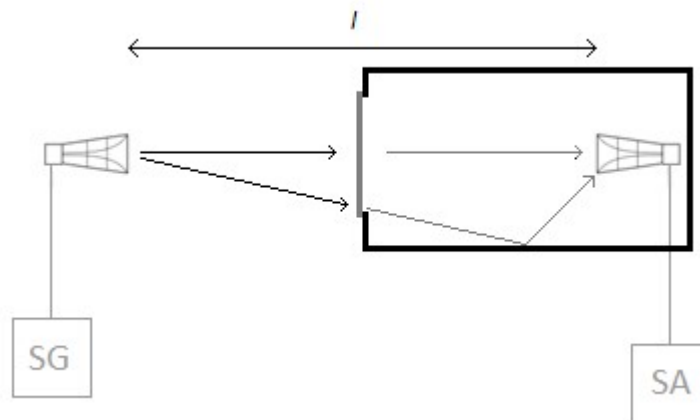
Při využití stíněné komory může nastat problém s odrazy a rezonancí uvnitř komory. Vlny rušivého signálu, které projdou dovnitř ať už pomocí otvorů, mezer, netěsností nebo přes samotné stěny komory, se od jejích stěn odrážejí, viz obrázek 11. V závislosti na frekvenci může dojít ke složení těchto vln a tím ke zvýšení nebo snížení naměřené hodnoty amplitudy měřeného signálu. Složení vln dochází při rezonanční frekvenci. Rezonance uvnitř komory negativně ovlivňuje přesnost měření stínící účinnosti a proto je vhodné se při měření vyhnout rezonanční frekvenci.

Rezonanční frekvence je závislá na velikosti stíněné komory nebo krytu a na prostředí. Hodnota frekvence, od které může docházet k rezonanci lze určit podle vzorce:

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \text{ [Hz]} \quad (14)$$

Kde a a b jsou dva největší vnitřní rozměry komory.

Rezonance uvnitř komory nelze úplně odstranit, ale pouze omezit. Kromě změny rozměrů komory, která umožní posunutí rezonanční frekvence, lze také využít absorpční materiál na pokrytí stěn komory. Absorpční materiál omezuje odrazy signálu uvnitř komory pohlcováním elektromagnetických vln. Obvykle se používá absorpční materiál tvaru jehlanů. Nevýhodou tohoto řešení jsou vysoké náklady.



Obrázek 11: Odrazy uvnitř komory

## Skalární a vektorové měření stínící účinnosti

Při návrhu jakéhokoliv zařízení je pro výrobce důležité znát chování tohoto zařízení v provozu. U složitých elektrických zařízení je potřebné znát chování jak celku, tak i jednotlivých součástí a obvodů. To, jak se signál daným obvodem šíří pomáhá výrobcům zjistit metoda zvaná obvodová analýza. Signál procházející obvodem je tímto obvodem tlumen a zkreslován. Obvodovou analýzou se měří takzvané s-parametry (scattering parameters) obvodů.

S-parametry popisují chování signálu procházejícího obvodem za pomoci vztahů mezi porty na vstupu a výstupu. S-parametry nabývají na důležitosti hlavně při vysokých frekvencích, kdy napětí a proud ztrácí vyvídací hodnotu.

Pro obvod s jedním vstupem a jedním výstupem se využívají čtyři popisující s-parametry:

S<sub>11</sub> – koeficient odrazu na vstupu

S<sub>12</sub> – koeficient zpětného přenosu

S<sub>21</sub> – koeficient přímého přenosu

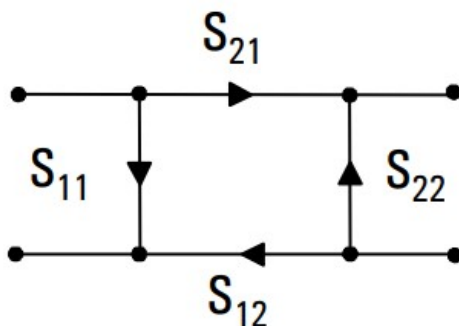
S<sub>22</sub> – koeficient odrazu na výstupu

Pro amplitudy napěťových vln na portech obvodu, kde  $a$  je vektor amplitud napěťové vlny na vstupu a  $b$  je vektor amplitud napěťové vlny na výstupu platí, že amplituda  $b$  je rovna násobku matice parametrů  $S$  a amplitudy  $a$ . Tedy:

$$b = S \cdot a$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

*Převzato z [3]*



*Obrázek 12: S parametry charakterizující lineární obvod [2]*

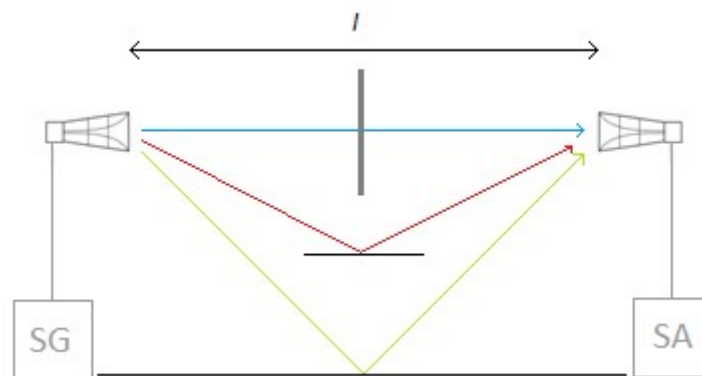
Při měření stínící účinnosti parametr S<sub>21</sub> představuje útlum měřeného signálu procházejícího prostorem a testovaným vzorkem, popřípadě pouze prostorem pro měření bez vzorku stínícího materiálu.

Při obvodové analýze rozlišujeme dva typy: skalární obvodovou analýzu (SNA) a vektorovou obvodovou analýzu (VNA). U skalární síťové analýzy dochází k měření pouze amplitudy signálu, u vektorové je kromě amplitudy měřena ještě i fáze.

Lineární prvky dokážou měnit amplitudu i fázi signálu. Značný problém s efektivitou přenosu signálu nastává v komunikačních systémech. Aby byl přenos signálu efektivní, musí se u vedení a antén vyskytovat dostatečná impedance. Tato impedance se musí shodovat s impedancí zdroje. Pokud se

neshodují reálné a imaginární části impedance na vstupech a výstupech propojených zařízení, nastává celkový rozdíl impedancí a tím neideální spojení. Rozdílná impedance pak dokáže způsobit odraz signálu.

Při bližším porovnání chování signálu procházejícího obvodem a stíněním komory, zjistíme značné podobnosti. Signál šířící se prostorem se od svého okolí odráží a tyto odrazy dopadají na vzorek měřeného materiálu i na samotnou komoru. Odrazy signálu popisuje obrázek 13. Po průchodu stíněním nebo při referenčním měření se odrazy sčítají spolu s původním signálem. Protože cesta, kterou odražený signál urazí je delší než cesta přímého signálu, nastává fázový posun odraženého signálu. Součtem těchto odražených signálů s původním signálem může vzniknout značná chyba v získaných hodnotách stínící účinnosti při měření.

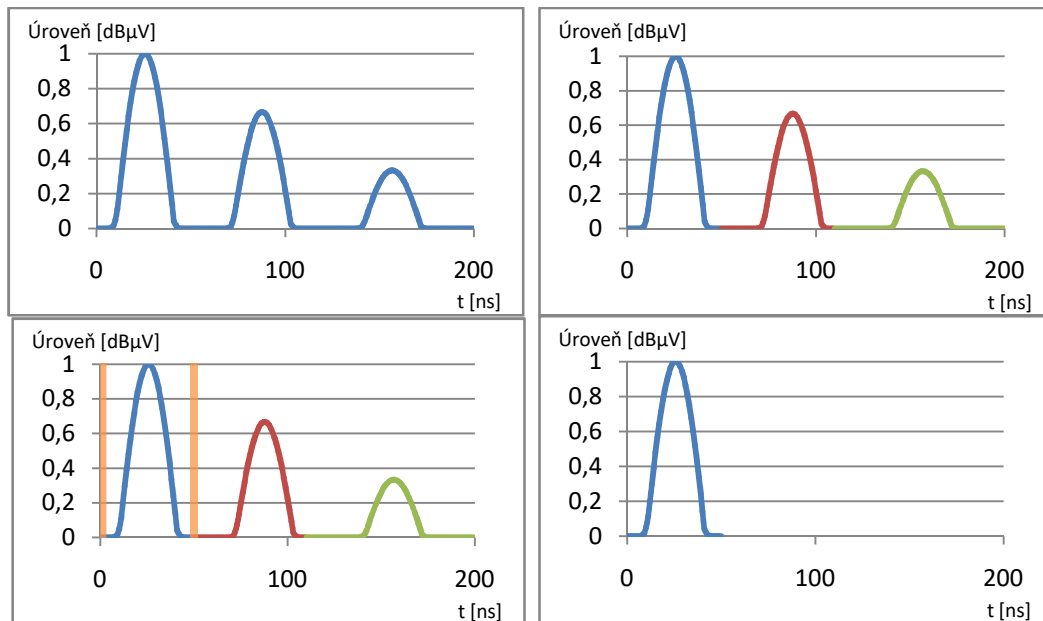


Obrázek 13: Odrazy signálu od okolí

Protože při skalárním měření dochází k zaznamenávání pouze amplitudy, nelze tyto odražené signály odlišit od původního přímého signálu. To má za následek značné zkreslení naměřených výsledků při skalárním měření stínění.

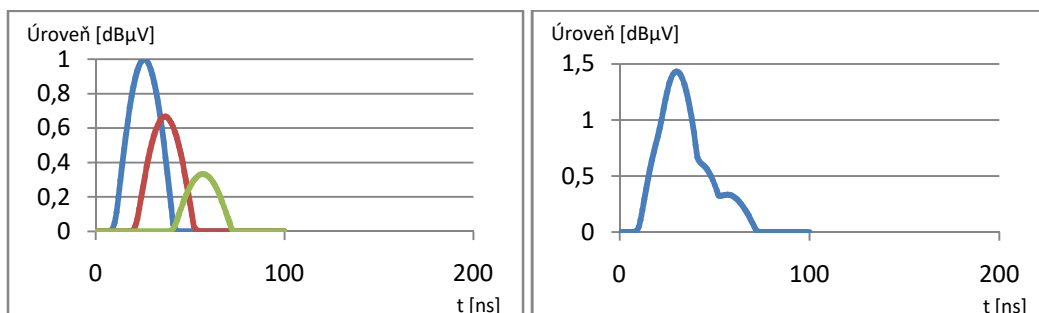
Proto je pro větší přesnost měření nejen stínící účinnosti vhodné vždy vektorové měření. Protože při vektorovém měření je kromě amplitudy signálu zaznamenávána také fáze, můžeme odražené signály odfiltrovat a tak získat přesnější hodnoty stínící účinnosti než při skalárním měření.

Metoda, která se k rozlišení a odstranění odražených signálů využívá, se nazývá time gating. Při time gatingu dochází k izolování části zaznamenaného signálu. Time gating je vhodné používat při analýze nestacionárních signálů. Protože přímý signál cestuje mezi vysílačem a přijímačem nejkratší dobu, můžeme při vektorovém měření obsahující měření fáze, pomocí time gatingu odražené, tedy zpožděné signály odlišit a odstranit, viz obrázek 14.



Obrázek 14: Time gating – schéma a průběh signálů v čase

Time gating ale nelze využít k odstranění odrazů ve všech případech. Pokud je vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem příliš malá, může docházet k překrývání přímého signálu a odražených signálů, viz obrázek 15. Přímý signál pak nelze odlišit a pomocí brány nelze odfiltrovat odražené signály.



Obrázek 15: Odražené signály překrývající přímý signál

## Používané přístroje

Pro jednotlivé typy obvodové analýzy se využívají rozdílné měřicí přístroje. Pro skalární měření se využívá spektrální analyzátor. Spektrální analyzátoři měří amplitudu signálu v celém frekvenčním rozsahu přístroje. Skalárně lze stínící účinnost měřit za použití generátoru signálu a spektrálního analyzátoru. Nevýhoda tohoto způsobu měření je zkreslení výsledků měření zaznamenáním odražených signálů. Pro vektorovou obvodovou analýzu se využívá vektorový analyzátor. Vektorový analyzátor dokáže kromě amplitudy zaznamenávat i fázi signálu a tedy přenos a odrazy na portech - s-parametry (mezi porty1 a2 - s21) a odstranit zkreslení naměřených hodnot převedením zaznamenaných hodnot do časové oblasti, odfiltrováním signálů s delší dráhou a následným převedením do kmitočtové oblasti.

## Srovnání

Při srovnání obou metod měření vidíme, že skalární měření je značně jednodušší – pro měření stačí kombinace generátoru a spektrálního analyzátoru. Nicméně přesnost měření je negativně ovlivněna odrazy signálu od okolí, které se započítají do výsledné hodnoty útlumu signálu měřeným stínícím materiálem. Vektorové měření nám umožní tuto nepřesnost odstranit (pokud nedochází k překrývání signálů – přímého a odrazů), nevýhodou je ale větší cena použitých přístrojů.

## Návrh stíněné komory

### Požadavky na návrh a limitující podmínky

Při návrhu stíněné komory je nutné vzít v potaz několik požadavků. První požadavek na stíněnou komoru je stínící účinnost samotné komory. V ideálním případě by stíněná komora měla nekonečný útlum a zabránila tak průchodu rušivého signálu mimo umístěného vzorku. I když zajistit nekonečnou stínící účinnost komory nelze, je vhodné navrhnout komoru tak, aby její stínící účinnost byla značně větší, než stínící účinnost měřeného vzorku. V případě že by stínící účinnost testovaného vzorku přesahovala stínící účinnost komory, měření by bylo zatíženo značnou nepřesností a celý návrh komory by postrádal smysl. Proto je vhodné zvolit materiál stěn komory s dostatečnou vodivostí a permeabilitou a zvolit patřičnou tloušťku stěn.

Další významný faktor je velikost antén, měřeného vzorku a celé stínící komory. Tento faktor má praktický význam. Komora musí být schopná pojmout zamýšlenou anténu, ale zároveň by její rozměry měly umožnit instalaci do omezených prostor laboratoře a případnou manipulaci.

Neméně významná je ale i pevnost celého zařízení. Protože je nutné zajistit těsné přiléhání dveří a uchycení měřeného vzorku, dá se očekávat mechanické namáhání konstrukce. Aby nedošlo prohnutí a tím i k negativnímu ovlivnění stínících vlastností komory je nutné zajistit dostatečnou pevnost konstrukce.

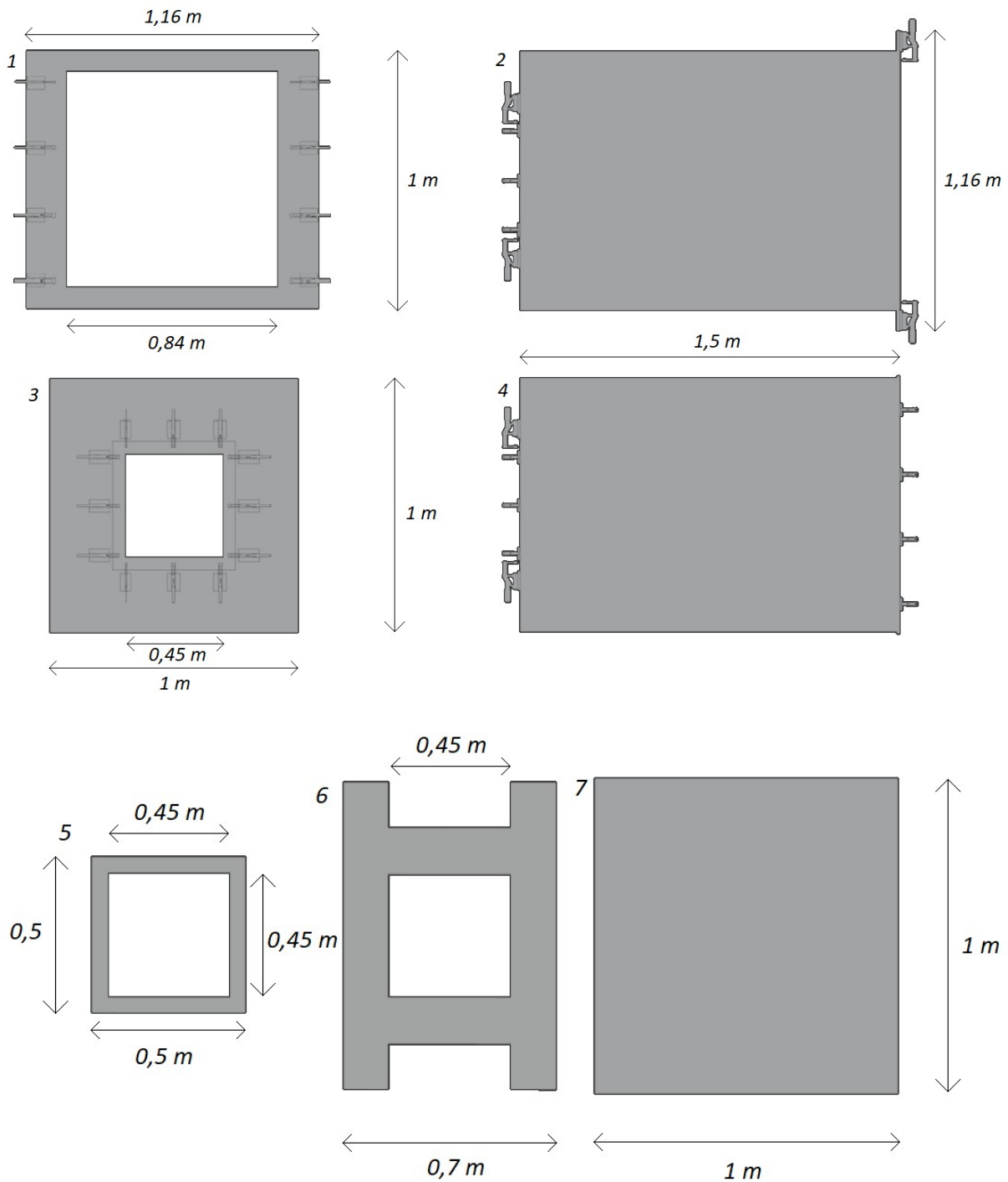
V potaz je nutné brát i praktičnost celého návrhu. Případů, kdy technický návrh je podle autora dokonalým řešením problému a noční můrou uživatele nebo obsluhujícího technika je celá řada. Proto by měl návrh stíněné komory obsahovat řešení uchycení vzorků, které by umožnilo jejich snadnou a rychlou výměnu.

## Konkrétní návrh

### Materiál

Tloušťka stěn byla zvolena 2 mm a jako materiál železo. Z grafu průběhu stínící účinnosti železné desky na frekvenci (obrázek 4) je patrná vysoká stínící účinnost železné desky o síle 1mm, ta se pohybuje od 100 dB při frekvenci 1Hz do cca 90 dB při frekvenci 100 Hz a pak strmě roste. Pokud vezmeme v potaz frekvenční rozsah použité antény (740 Mhz až 10,5 GHz), vidíme, že hlavní složku stínící účinnosti zvoleného materiálu bude tvořit útlum absorpcí. Typ zdroje signálu (blízké elektrické pole) tedy nebude mít takový vliv na stínění materiálu komory, jaký by měl při nízkých frekvencích. Komora bude tedy mít při síle stěn 2 mm dostatečnou účinnost stínění – větší než je předpokládaná stínící účinnost měřených vzorků.

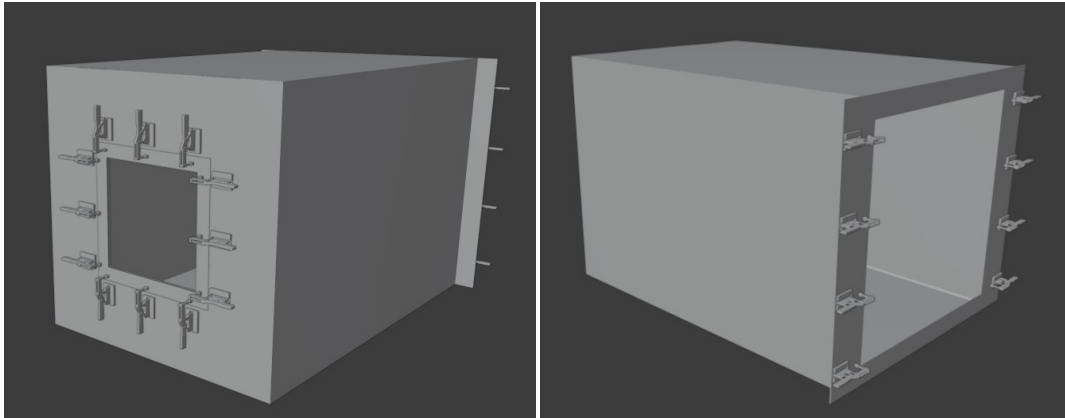
## Konstrukce



Obrázek 16: Výkres jednotlivých částí stínící komory (1 – zadní stěna, 2 – vrchní stěna, 3 – přední stěna, 4 – bok komory, 5 – rám pro uchycení vzorků, 6 – výztuž přední stěny, 7 – dveře komory)



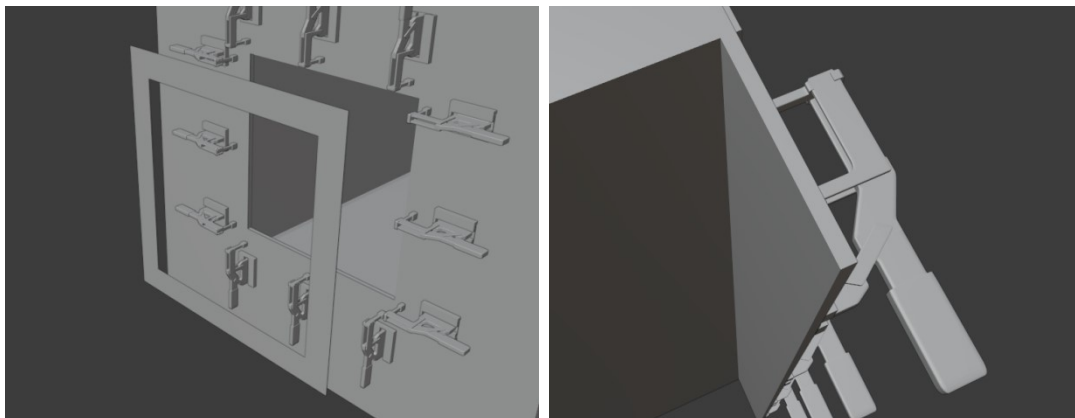
Velikost stíněné komory byla zvolena tak, aby bylo možné do ní umístit anténu DRH10 s dostatečnou rezervou a uchytit vzorek stínícího materiálu o velikosti 50x50 cm. Vnější rozměry komory jsou 1,5x1x1 m. 3D model komory byl využit program Blender.



Obrázek 16: Přední stěna a bok komory – vlevo, zadní stěna a bok komory bez dveří – vpravo

### **Řešení uchycení vzorků a dveří**

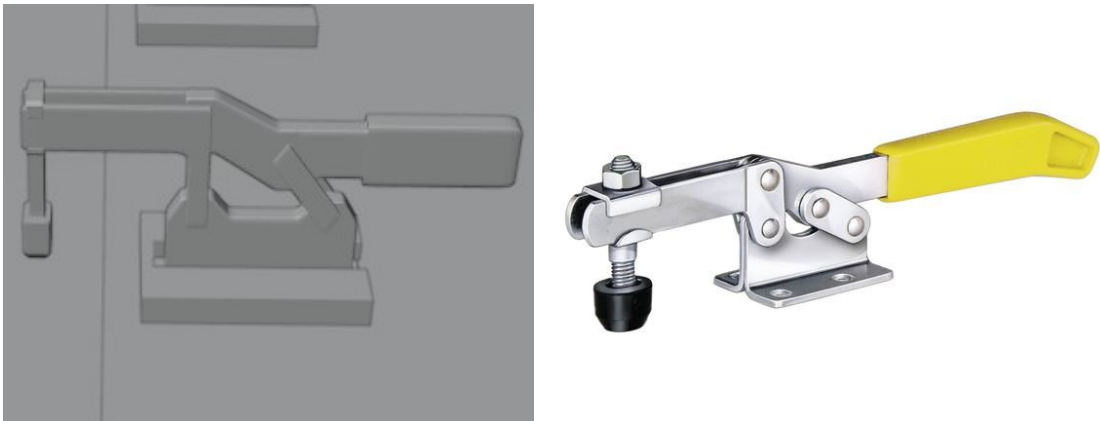
Otvor v přední části komory má rozměry 45x45 cm. Vzorek 50x50 cm je přitlačován ke komoře rámem čtvercového tvaru, který přesahuje otvor komory o 5 cm. Samotný rám je stejně jako dveře komory uchyten pomocí pákových upínek – třemi na každé straně. Dveře pak přitlačují ke komoře na obou bocích 4 pákové upínky – stejně jako byly použity pro uchycení vzorku.



Obrázek 18: Rám na uchycení vzorků- vlevo, rozšíření zadní stěny - vpravo

### ***Pákové upínky***

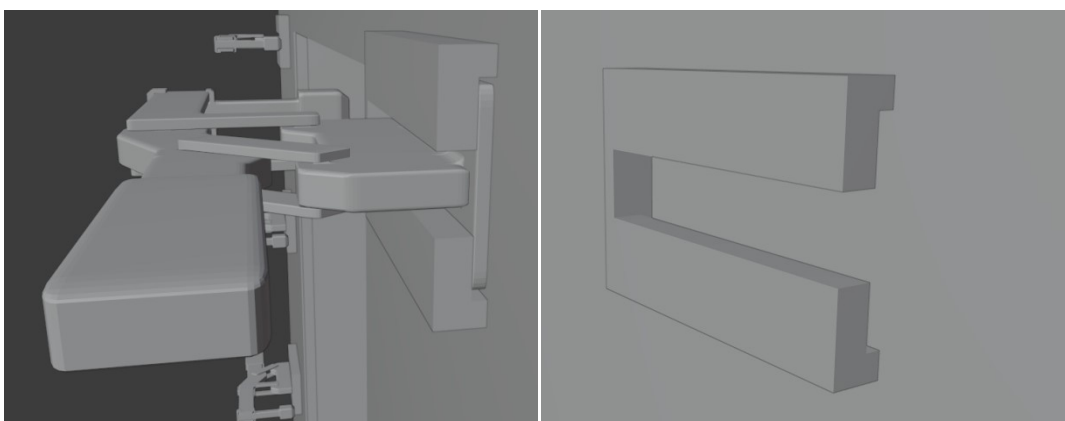
Pákové upínky slouží k rychlému uchycení předmětů v případech, kdy je vyžadována vysoká přitlačná síla. Upínače fungují na pákovém principu a tak při malé ovládací síle dokážou vyvinout vysokou upínací sílu. Při překročení nulového bodu začne páka upínače působit jako samosvorná a uchycený předmět zůstane sevřený i po přestání působení ovládací síly. Vytvořený 3D model zhruba reprezentuje pákový upínač T2-27-U TÜNKERS. U upínky lze měnit velikost vysunutí upínací plošky pomocí šroubu.



*Obrázek 19: Upínka (model) – vlevo, Horizontální upínač T2-27-U TÜNKERS - vpravo [9]*

### ***Připevnění upínek ke komoře***

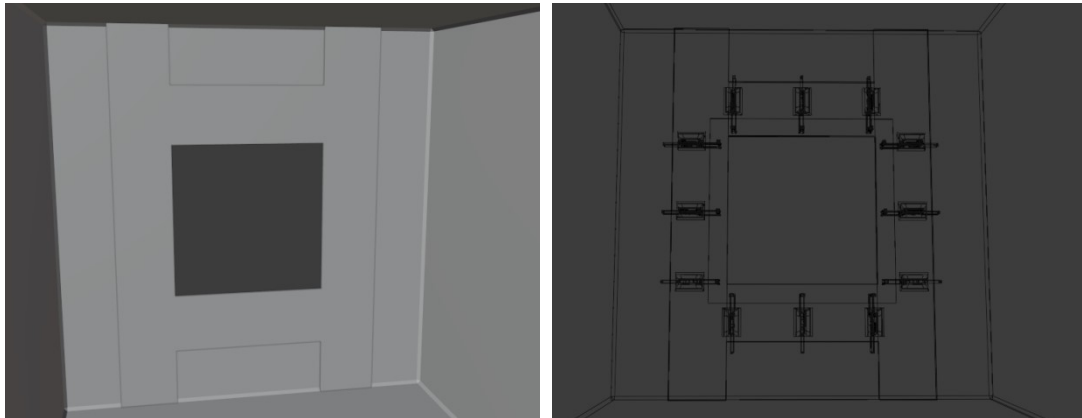
Protože nevýhoda pákových upínek je malý posuv kontaktní části upínky, nastává problém při uchycení rámu, držící vzorek. Při využití upínek na všech stranách by bylo velmi obtížné vsunout rám pod přitlačnou plošku upínek. Tento problém byl vyřešen zásuvným uchycením upínek.



*Obrázek 20: Zásuvná úchytka s upínkou- vlevo, samotná zásuvná úchytka - vpravo*

### **Výztuž komory**

Protože přítlačná síla upínek by mohla způsobit deformaci stěny komory, bylo nutné ji zesílit v místě uchycení upínek, tedy po obvodu výřezu pro měření vzorku. Zadní stěna také obsahuje rozšíření do stran pro upevnění upínek, které je zesílené na celé své ploše, aby nedocházelo k prohýbání.



*Obrázek 22: Výztuž přední stěny- vlevo, přesah výztuže přední stěny přes umístění úchytů upínek - vpravo*

### **Použití**

Účel navrhované stínící komory je zamezení generovaného signálu v obcházení vzorku stínícího materiálu při měření stínící účinnosti a omezení vlivu odrazů signálu od okolí. Komora také umožní snadné uchycení měřených vzorků.

## Závěr

Bakalářská práce obsahuje teoretický rozbor elektromagnetického stínění, stínící účinnosti a způsobů, metod, norem a standardů jejího měření. Teorii a princip stínění a stínící účinnosti bylo nutné zahrnout v práci z důvodu návaznosti teorie měření stínící účinnosti na zmiňované principy. Část teorie a rozborů principů stínění a stínící účinnosti byla převzata z bakalářského projektu, který této bakalářské práci předcházela. Dále bylo v bakalářské práci rozebráno porovnání skalárního a vektorového měření stínící účinnosti.

Získané poznatky, pak byly využity při návrhu samotné stíněné komory. Návrh obsahuje definování požadavků na předpokládanou funkčnost a vlastnosti stíněné komory a následovně technický návrh a 3D model. Jednotlivé prvky návrhu jsou pak samostatně popsány a graficky zobrazeny.

## Reference

- [1] CLAYTON R. PAUL Introduction to Electromagnetic Compatibility [pdf]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2006. ISBN-13: 978-0-471-75500-5
- [2] Network analyzer basics [online]. Keysight Technologies, Inc. Dostupné z : [https://web.archive.org/web/20200204075722/https://www.keysight.com/upload/cmcc\\_upload/All/BTB\\_Network\\_2005-1.pdf](https://web.archive.org/web/20200204075722/https://www.keysight.com/upload/cmcc_upload/All/BTB_Network_2005-1.pdf)
- [3] Hiebel, Michael. Fundamentals of vector network analysis. 8th ed. München: Rhode&Schwarz GmbH & Co. KG, 2005. ISBN 978-3-939837-06-0
- [4] Kennel L. Kaiser. Electromagnetic shielding. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN 0-8493-6372-1
- [5] Xingcun Colin T. Advanced Materials and Design for Electromagnetic Interference [pdf]. Boca Raton: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-4200-7358-4
- [6] Celozzi S., RODOLFO ARANEO, GIAMPIERO LOVAT. Electromagnetic Shielding [pdf]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2008. ISBN 978-0-470-05536-6
- [7] Practical EM Shielding [online]. LearnEMC, LLC. Dostupné z: <https://learnemc.com/practical-em-shielding>
- [8] Broadband Antenna Solutions [online]. RF Spin. Dostupné z: <https://www.rfspin.com/product/drh10/>
- [9] T2-27 TŮNKERS upínač horizontální [online]. KOPTA, s.r.o.. Dostupné z: <https://www.upinace.eu/inpage/manualni-upinky>

## Seznam příloh

Stíněná komora.blend

- 3D model stíněné komory ve formátu .blend pro program Blender