

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv otvorů v přístrojovém krytu na účinnost stínění

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav ČUTKA**
Osobní číslo: **E14N0058P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Vliv otvorů v přístrojovém krytu na účinnost stínění**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište funkci elektromagnetického stínění.
2. Zpracujte faktory ovlivňující účinnost stínění.
3. Navrhněte experiment pro otestování vlivu více otvorů v přístrojovém krytu.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická


Seznam odborné literatury:

1. Chatterton, Houlden: EMC, Electromagnetic Theory to Practical Design
2. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility
3. Paul: Introduction to electromagnetic compatibility

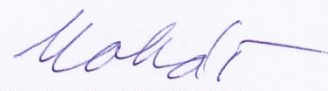
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá vlivem otvorů na celkovou účinnost stínění. Otvory jsou umístěny na čelní desce krytu a mají pro porovnání stejnou výslednou plochu. Kruhové otvory mají představovat odlišné varianty provedení ventilace a štěrbiny spíše netěsnosti (např. nedokonalosti v překrytí). Cílem je navrhnout a otestovat různé druhy otvorů v různých pozicích a stanovit tak, jak moc ovlivňují útlum stínění. Obsahem práce je také teoretický popis elektromagnetické kompatibility, účinnosti stínění, vlivu otvorů a netěsností na útlum stínění. V neposlední řadě jsou zde shrnuty také normy určené pro měření. Závěr této diplomové práce pojednává o naměřených výsledcích.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, účinnost stínění, vzdálené/blízké pole, intenzita elektrického pole, kritická frekvence, absorbér, dutinová rezonance

Abstract

This thesis is focused on the effect of apertures on shielding effectiveness. The apertures are in front of the cover plate and have for comparison all the same area. Circular apertures represent different types of ventilation and slots represent some inhomogeneities. The purpose is to propose different types of apertures in different positions, assessments and to test their effect of shielding effectiveness. Content of this thesis is theoretical description of electromagnetic compatibility, shielding effectiveness, effect of apertures and inhomogeneities, standards for measuring. The end of this work discusses measured results.

Key words

Electromagnetic compatibility, shielding effectiveness, far/near field, electric field strength, critical frequency, absorber, cavity resonance

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2016

Václav Čutka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. za jeho ochotu, cenné připomínky a metodické vedení během zpracování diplomové práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	12
1.1 EMC - ZÁKLADNÍ POJMY A JEJÍ ROZDĚLENÍ	12
1.1.1 Základní pojmy.....	12
1.1.2 Rozdělení oboru EMC.....	14
1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ VAZBY PŘENOSU RUŠENÍ	15
1.2.1 Galvanická vazba.....	16
1.2.2 Kapacitní vazba	16
1.2.3 Induktivní vazba	17
1.2.4 Vazba vyzařováním	17
2 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ	18
2.1 ÚČINNOST STÍNĚNÍ.....	19
2.2 VZDÁLENÉ POLE	19
2.2.1 Jednoduché stínění.....	19
2.3 ÚTLUMY ZPŮSOBENÉ STÍNĚNÍM	21
2.3.1 Útlum odrazem - R.....	21
2.3.2 Absorpční útlum – A.....	22
2.3.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů - B.....	22
2.3.4 Celkový útlum stínění	23
2.4 BLÍZKÉ POLE.....	24
2.5 DUTINOVÁ REZONANCE	26
2.6 VLIV OTVORŮ A NETĚSNOSTÍ NA ÚČINNOST STÍNĚNÍ.....	27
2.6.1 Vliv otvorů.....	27
2.6.2 Vliv netěsností	30
2.7 MATERIÁLY PRO STÍNĚNÍ.....	32
2.7.1 Povrchové úpravy	33
3 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI STÍNĚNÍ	35
3.1 NORMA IEEE-STD-299	35
3.2 NORMA ČSN EN 61000-5-7	38
4 VLASTNÍ MĚŘENÍ	40
4.1 MĚŘICÍ SYSTÉM A JEHO PARAMETRY	42
4.2 NÁVRH ČELNÍHO OTVORU PŘÍSTROJOVÉHO KRYTU.....	48
4.3 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY	50
ZÁVĚR	58
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	60
PŘÍLOHY	62

Seznam symbolů a zkratk

f... Frekvence [Hz]

f_m ... Kritická frekvence [Hz]

f_{rez} ... Rezonanční frekvence [Hz]

U ... Napětí [V]

U_r ... Rušivé napětí [V]

I ... Proud [A]

R... Odpor [Ω]

L... Indukčnost [H]

E_i ... Intenzita elektrického pole uvnitř stíněného objektu [V/m]

E_0 ... Intenzita elektrického pole vně stíněného objektu [V/m]

H_i ... Intenzita magnetického pole uvnitř stíněného objektu [A/m]

H_0 ... Intenzita magnetického pole vně stíněného objektu [A/m]

P_i ... Výkon vlny dopadající na stínící desku [W]

P_t ... Výkon vlny, která prostoupila za stínící desku [W]

S... Plocha [m^2]

r... Hranice mezi blízkým a vzdáleným polem [m]

λ ... Vlnová délka [m]

c... Rychlost světla, $3 \cdot 10^8$ [m/s]

l... Délka štěrbiny [m]

l_{ef} ... Efektivní délka antény [m]

μ ... Permeabilita [H/m]

δ ... Hloubka vniku [mm]

Z... Impedance [Ω]

Z_0 ... Charakteristická impedance volného prostoru ve vzdáleném poli [Ω]

Z_M ... Charakteristická impedance vodivého prostředí [Ω]

ϵ ... Permittivita [F/m]

σ ... Konduktivita [S/m]

G... Zisk antény [dB]

a... Poloměr [m]

t... Tloušťka stínění [m]

ω ... Úhlová rychlost [Hz]

n... počet otvorů

m, n, p... Vidy elektromagnetického vlnění (počet půlvln stojatého vlnění v dutinovém rezonátoru)

a, b, c... Rozměry dutinového rezonátoru [m]

EMC... Elektromagnetická kompatibilita

EMI ... Elektromagnetické rušení (interference)

EMS ... Elektromagnetická odolnost (susceptibilita)

SE ... Účinnost stínění (Útlum stínění) [dB]

R... Útlum odrazem [dB]

R_E ... Útlum odrazem blízkého elektrického pole [dB]

R_H ... Útlum odrazem blízkého magnetického pole [dB]

A ... Útlum pohlcením [dB]

B ... Útlum mnohonásobnými odrazy [dB]

EM kód... Stupeň ochrany krytu proti vniku elektromagnetického pole

Úvod

Elektromagnetická kompatibilita je pojem, který je znám po celém světě. Každé zařízení, které je připravováno pro běžný provoz by nemělo být zdrojem rušení a ani být rušením ovlivňováno. Stále více se v průmyslu vyskytuje rušení, a proto je zapotřebí kvalitnějších stínících krytů. V praxi není žádný kryt ideální, protože obsahuje řadu netěsností (nehomogenit) a materiál také není dokonale vodivý.

Předložená diplomová práce se skládá ze čtyř částí. První z nich se zabývá základní problematikou elektromagnetické kompatibility, jejím rozdělením a elektromagnetickými vazbami přenosu rušení. Druhá část pojednává o elektromagnetickém stínění, nejprve o hlediscích jak na stínění můžeme nahlížet a poté o účinnosti stínění. Útlum stínění je rozsáhlejší kapitola, která je zaměřena na vzdálené magnetické pole a útlumy způsobené stíněním. Dále je probráno, jak se útlum liší, když se předmět nachází v blízké zóně elektromagnetického pole a pojem dutinové rezonance. Nakonec jsou zde popsány vlivy netěsností a otvorů na účinnost stínění a materiály pro tuto problematiku. Třetí část je zaměřena na měření účinnosti a to konkrétně podle standardu IEEE-STD-299 a dále podle normy ČSN EN 61000-5-7. Poslední čtvrtá část shrnuje postup měření, použitý měřicí systém a dosažené výsledky měření a především obsahuje návrh čelní desky krytu.

Cílem této práce je popsat vlivy netěsností a otvorů na účinnosti stínění, udělat návrh na testování vlivů různých otvorů v přístrojovém krytu a vyhodnotit dosažené výsledky.

1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

1.1 EMC - Základní pojmy a její rozdělení

Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení, přístroje či systému pracovat tak, aby byl schopen být v provozu za působení rušivých zdrojů elektromagnetických signálů. Zároveň však nesmí vytvářet signály, které by byly nepřijatelně rušivé pro jiná zařízení.

Z výše uvedeného lze usoudit, že EMC se dá rozdělit na dvě hlavní oblasti – elektromagnetickou odolnost (susceptibilitu) a elektromagnetické rušení (interferenci).

Elektromagnetická odolnost (EMS) je schopnost systému nebo zařízení pracovat trvale bez výpadků nebo s přípustným vlivem v prostředí, ve kterém se nachází elektromagnetické rušení.

Elektromagnetické rušení (EMI) je děj, při kterém se rušivý signál vyzařovaný zdrojem přenáší pomocí elektromagnetické vazby ze zdroje rušení do rušeného zařízení. [1,6]

1.1.1 Základní pojmy

Úroveň vyzařování - rušení generované jediným konkrétním spotřebičem nebo zařízením, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené v závislosti na kmitočtu.

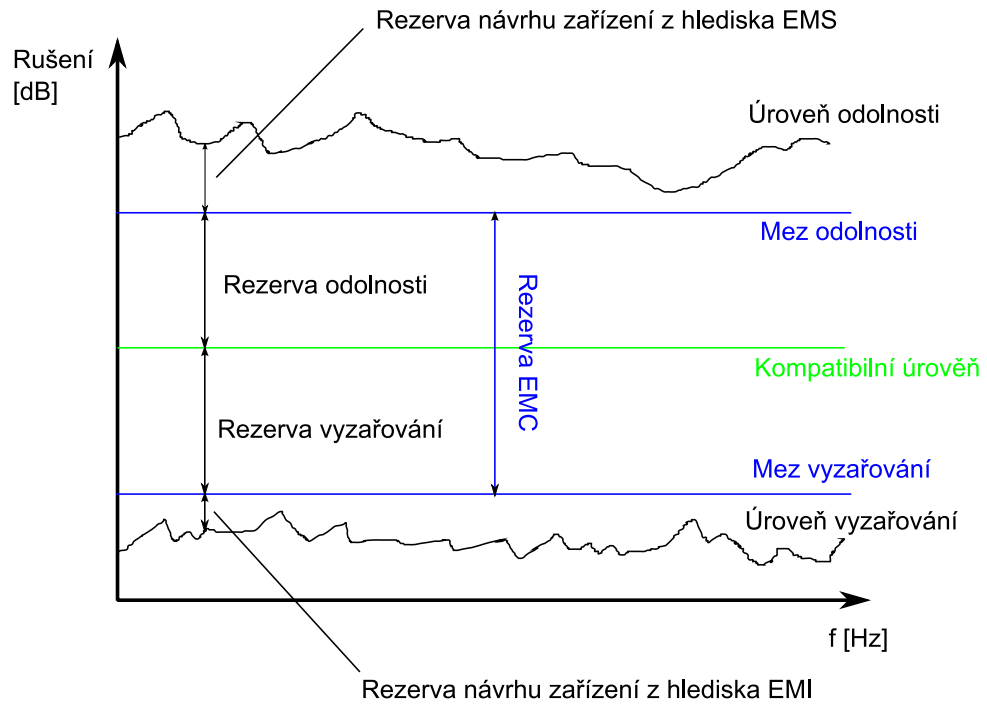
Mez vyzařování - maximální přípustná (tj. daná normou) úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje rezervu návrhu daného zařízení z hlediska EMI.

Úroveň odolnosti - maximální úroveň rušení působícího na dané zařízení, při němž ještě nedojde ke zhoršení jeho provozu.

Mez odolnosti - nejnižší normou požadovaná úroveň odolnosti zařízení. Rozdíl těchto úrovní udává rezervu návrhu zařízení z hlediska jeho odolnosti.

Rezerva EMC - rozdíl meze odolnosti a meze vyzařování

Kompatibilní úroveň - maximální předepsaná úroveň celkového rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje či zařízení provozované v určitých podmínkách. Rozdíly mezi vyzařováním a odolností vůči této kompatibilní úrovni určují rezervu vyzařování a rezervu odolnosti. [1,6]



Obr. 1.1: Meze a úrovně odolnosti a vyzařování [1]

1.1.2 Rozdělení oboru EMC

EMC můžeme členit podle několika různých pohledů, avšak celkově ji lze rozdělit na dvě hlavní oblasti: EMC biologických systémů a EMC technických systémů a zařízení.

Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

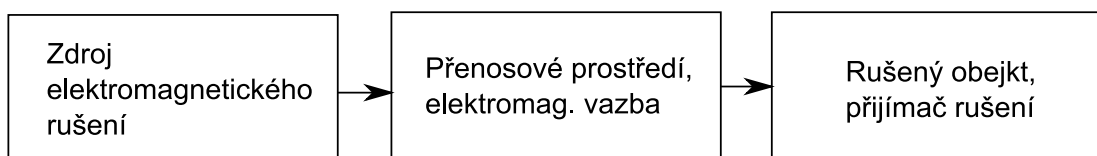
EMC biologických systémů je zaměřena na celkové elektromagnetické vlivy v našem životním prostředí s ohledem na živé organismy. Každý organismus reaguje na působení elektromagnetického pole jinak, proto je těžké zkoumat změny v organismu a dojít k platným závěrům.

Touto problematikou se zabývají výzkumná pracoviště, která se snaží určit odolnost lidského organismu.

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

EMC technických systémů zkoumá vzájemné působení technických prostředků, většinou elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení. Při zjišťování EMC daného zařízení se vychází ze základního řetězce (Obr. 1.2).

První je zdroj elektromagnetického rušení, kde se řeší vznik rušení, jeho charakter a intenzita. Druhá oblast řetězce se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami, tzn., jakou cestou se energie ze zdroje dostává do přijímačů rušení. Poslední částí je rušený objekt. Zde se problematika zabývá rozdělením typů a podrobným zkoumáním rušivých účinků na základě dříve provedené analýzy.

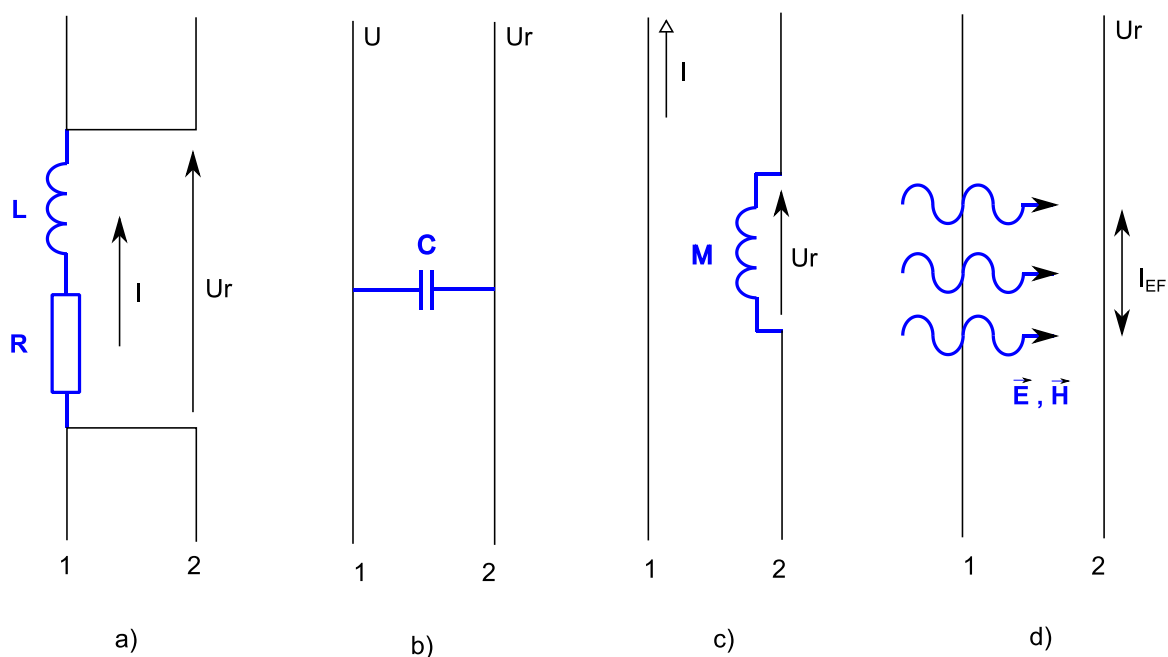


Obr. 1.2: Základní řetězec EMC [1]

Nicméně obr. 1.2 nemůžeme brát jako reálný případ. Ve skutečnosti může zařízení být současně jak vysílačem, tak přijímačem elektromagnetického rušení, navíc se jedná o působení více zdrojů rušení a více přijímačů. Přesto se nejčastěji postupuje tak, že se jedno zařízení uvažuje jako ovlivňující a ostatní za ovlivňované a potom se toto zařízení uvažuje naopak za ovlivňované a hodnotí se důsledky jeho možných ovlivnění všemi ostatními systémy. [1,5]

1.2 Elektromagnetické vazby přenosu rušení

Přenos rušivých signálů ze zdroje do přijímače závisí na druhu a způsobu vazby mezi nimi (Obr. 1.2). Vazby lze podle fyzikálních principů rozdělit do čtyř skupin: galvanické, kapacitní, induktivní a vyzařováním. Základní princip mezi dvěma obvody je uveden na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Elektromagnetické vazby: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním [1]

1.2.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba je vazba dvou systémů, které jsou propojeny přes společnou impedanci. Impedance je obvykle složena z RL prvku a protéká jím proud. V prvním systému vzniká rušivé napětí U_r , které může být rušivé pro druhý systém. Frekvence protékajícího proudu nám určuje, která část impedance se bude více podílet na rušení. Pro nízké frekvence (kHz) je impedance tvořena převážně R a pro vyšší frekvence se projevuje L. Při rychlých změnách totiž L může vyvolat velké napětí rušivé pro druhý systém a navíc při připojení kapacitní zátěže zde hrozí výskyt rezonance.

Často se lze s galvanickou vazbou setkat u dvou bloků (systémů), které jsou zvlášť zemněny. Mezi těmito zemnicími místy vzniká rušivé zemní nahodilé napětí. Toto napětí pak může způsobit U_r na vstupu zařízení. Proto je snaha o přerušení galvanické vazby. Na nízkých kmitočtech se to provádí pomocí oddělovacího kondenzátoru, který je zařazen mezi uzemnění a vstupní impedanci ovlivňovaného systému. Dále je možno použít oddělovacích transformátorů, feritových kroužků, elektromechanických relé, optočlenů apod. [1]

1.2.2 Kapacitní vazba

Parazitní kapacitní vazba vzniká mezi vodiči nebo částmi obvodu s různým potenciálem. Typický příklad silné kapacitní vazby je souběžné dlouhé vedení.

Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů paralelně vedených vodičů se omezuje například zkroucením vodičů zdroje rušení nebo alespoň rušeného vedení. V tomto případě se sníží i induktivní vazba obou vedení. Vazbu lze snížit též použitím stíněných vodičů.

Kapacitní vazba vůči zemi může být vyvolána kapacitou přívodů vůči společné zemi. Rušivé napětí je přenášeno skrz uzemnění na vstup obvodu. Tento jev se částečně omezuje stíněným přívodem, který je navíc spojen se zemněním. Rušivý proud pak prochází stíněním a nepřenáší se na vstupní svorky. Omezuje se jen částečně proto, jelikož se u vyšších kmitočtů na impedanci stíněného přívodu tvoří také rušivé napětí, které ovlivňuje vstup obvodu.

Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem se nejvíce uplatňuje u analogových a číslicových obvodů. [1,9]

1.2.3 Induktivní vazba

Induktivní vazba vzniká ve vodičích, které jsou vystaveny časově proměnnému magnetickému poli. To totiž umožňuje vznik indukovaného napětí, jehož velikost roste společně s kmitočtem, popřípadě s časovými změnami proudu v hlavním obvodu. Vazba je proto velmi nebezpečná u vyšších velikostí proudů a navíc při rychlých změnách. Proudů jsou následkem přírodních jevů (blesku), a také elektrostatických výbojů.

Při těchto jevech dochází (např. u silových vedení a paralelně vedených datových kabelů) k významným vazbám parazitním induktivním, ale i k těm kapacitním. Proto je nutné kabely rozdělovat do zvlášť stíněných sekcí. Obecně se pro omezení induktivní vazby doporučuje, aby délka paralelně vedených vodičů a velikost proudové smyčky rušeného vedení byla co nejmenší a zároveň vzdálenost vodičů od sebe byla naopak co největší. [1]

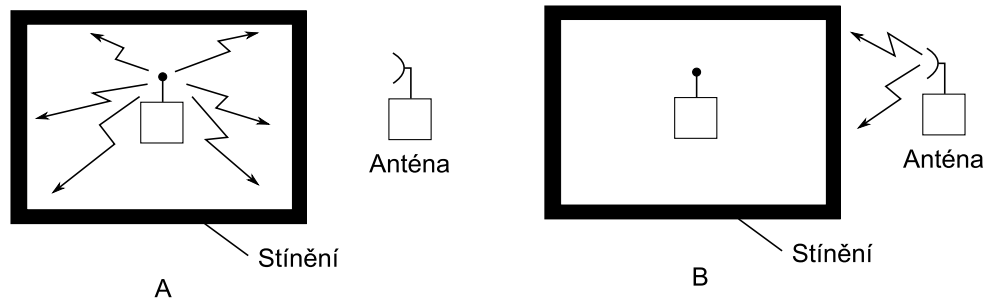
1.2.4 Vazba vyzařováním

Vazba vyzařováním se uplatňuje při větších vzdálenostech. Tedy tam, kde není vazba induktivní ani kapacitní. Rušení se do prostoru dostává vyzářeným elektromagnetickým polem, kdy se do vodičů indukuje rušivé napětí a to se sčítá s užitečným signálem nebo jej zcela překryje. Tato rušení jsou způsobena vysílači signálů, atmosférickým rušením i řadou poruch v průmyslu. Do zařízení se rušení přenáší skrz přívodní vodiče nebo přes vstup antény.

K odstranění této vazby slouží stínící kryty nebo desky. Materiály ale nemají takové vlastnosti a uspořádání, aby dokonale stínily – to je závislé na mnoha faktorech, které jsou dále uvedeny v následující kapitole. [1,9]

2 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetické stínění je technika, která zabraňuje pronikání nežádoucí vyzařované elektromagnetické energie do zařízení nebo naopak ze zařízení. Tyto dva rozdílné přístupy jsou uvedeny na obr. 2.1.



Obr. 2.1: Způsoby stínění [4]

Uvedených cílů se dosahuje prostředky, které se nazývají stínící kryty nebo také stínění.

Účelem prvního stínění (A) je zabránit vyzařování vznikajícího uvnitř krytu ven a to jak z hlediska splnění emisních limitů daných normou, tak i z hlediska elektromagnetického rušení ostatních elektronických zařízení. Druhý případ je opačný. To znamená, že stínění je zde z důvodu chránění zařízení před rušením vzniklým mimo stínící kryt.

Stínění se objevuje jak u velkých budov, které jsou celé uzavřeny v ocelovém krytu a jsou nehybné, tak i u malých a flexibilních věcí. To je například stínění koaxiálních kabelů. Uvnitř stíněných objektů se také zvlášť mohou stínit jednotlivá zařízení, která by se navzájem mohla ovlivňovat.

Důležité je si uvědomit, že stínění je dosti nákladné a nejprve je tedy zapotřebí udělat ostatní metody návrhu z hlediska elektromagnetické kompatibility a to především použitím metod pro optimální návrh a konstrukci zařízení z hlediska EMC. [1,4]

2.1 Účinnost stínění

Účinnost stínění (= útlum stínění) můžeme chápat jako poměr velikosti elektrického (magnetického) pole, které se přeneslo skrz kryt (E_t , H_t) do zařízení a velikosti pole, které je vyzařováno na stínící kryt (E_i , H_i). Jako alternativní způsob můžeme stínění brát jako poměr velikosti pole, když je zařízení se stínící přepážkou a bez stínícího krytu. Měření se provádí ve stejném bodě.

Účinnost stínění se obvykle udává přímo v decibelech jako funkce logaritmu z poměru vstupující a vystupující elektrické (E) nebo magnetické (H) vlny:

$$SE = 20 \cdot \log \left| \frac{E_i}{E_t} \right| , \quad SE = 20 \cdot \log \left| \frac{H_i}{H_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.1.)$$

Tam, kde jsou na obou stranách stínidla stejná homogenní prostředí, se poměry elektrických a magnetických polí rovnají a tím i účinnost stínění. V opačném případě se výsledky liší a pro výsledky v blízké zóně se používá vzoreček elektrických polí.

Při vyšších frekvencích se nemůže zvlášť rozdělit elektrické a magnetické pole, proto je účinnost stínění počítána z výkonů:

$$SE = 10 \cdot \log \left| \frac{P_i}{P_t} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.2.)$$

2.2 Vzdálené pole

2.2.1 Jednoduché stínění

Nejhorší variantu stínění představuje případ, kdy rovinná vlna dopadá kolmo na povrch stínícího krytu. Při jiných úhlech dopadu je prošlá vlna vždy menší. Účinnost stínění kovové desky (Obr. 2.2) lze odvodit ze známých parametrů. Známé parametry stínící přepážky jsou (μ , ε , t , σ) a okolního prostředí (ε_0 , μ_0). Předpokládá se, že je deska nekonečně dlouhá, abychom mohli zanedbat okrajové jevy. Účinnost stínění je potom dána vztahem:

$$SE = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4 \cdot Z_0 \cdot Z_M} \cdot e^{\gamma t} \cdot \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma t} \right] \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.3.)$$

Kde Z_0 je charakteristická impedance okolního prostředí (mimo stínící desku) a Z_M je charakteristická impedance desky.

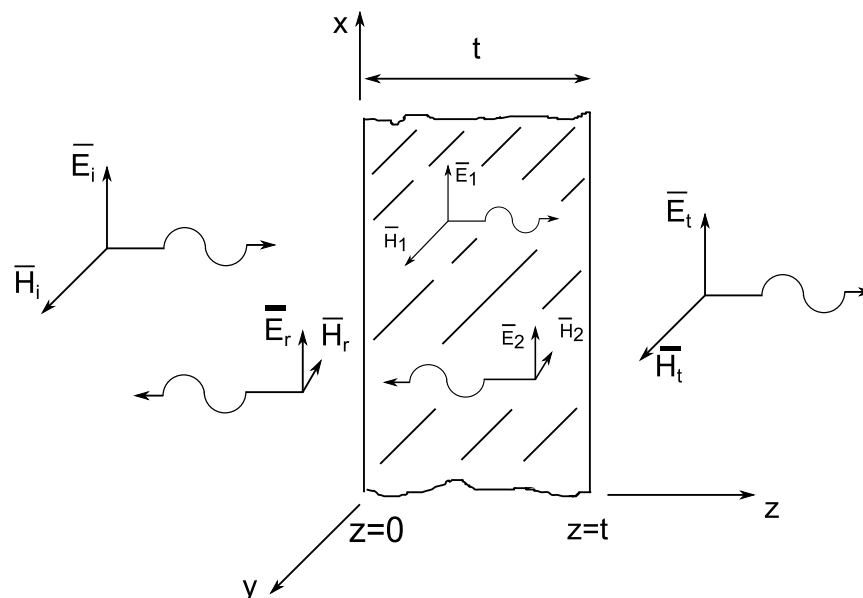
Platí vztahy:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377\Omega \quad (2.4)$$

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \quad (2.5.)$$

Veličina γ je konstanta šíření elektromagnetické vlny uvnitř stínící desky, která se určí dle vztahu:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu\sigma} \quad (2.6.)$$



Obr. 2.2: Vodivá stínící deska a dopad rovinné vlny kolmo na povrch [4]

2.3 Útlumy způsobené stíněním

2.3.1 Útlum odrazem - R

Vznik je zapříčiněn částečným odrazem energie vlny na rozmezí dvou materiálů s různou impedancí. Nejčastěji vzduch a kovová stěna stínícího prvku.

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4 \cdot Z_0 \cdot Z_M} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.7.)$$

Pak lze rovnici napsat ve tvaru dvou složek:

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0 + Z_M}{2 \cdot Z_M} \cdot \frac{Z_0 + Z_M}{2 \cdot Z_0} \right| = R_1 + R_2 \quad [\text{dB}] \quad (2.8.)$$

Kde R_1 představuje rozhraní na vstupu, tedy vzduch-kov a R_2 zase výstup - kov-vzduch.

Jestliže je stínící část z dobrého vodiče, který má $Z_0 \gg Z_M$, je celkový útlum odrazem přibližně roven:

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{4Z_M} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.9.)$$

Lze také zapsat:

$$R_1 \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{2Z_M} \right| \quad a \quad R_2 \approx 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \right| = -6\text{dB} \quad [\text{dB}] \quad (2.10.)$$

Na vstupní straně vzniká největší útlum a na výstup se dostane jen malá část energie vlny. V tomto případě útlum nezávisí na tloušťce stínící stěny, proto lze přepážku vytvořit i z tenkého, avšak vysoce vodivého materiálu. [1,3]

2.3.2 Absorpční útlum – A

Vznik je zapříčiněn pohlcením části elektromagnetické vlny při průchodu přepážkou o tloušťce t vlivem tepelných ztrát.

$$A = 20 \cdot \log|e^{\gamma t}| = 20 \cdot \log^{\alpha t} = 20 \cdot \log e^{\frac{t}{\delta}} \quad [\text{dB}] \quad (2.11.)$$

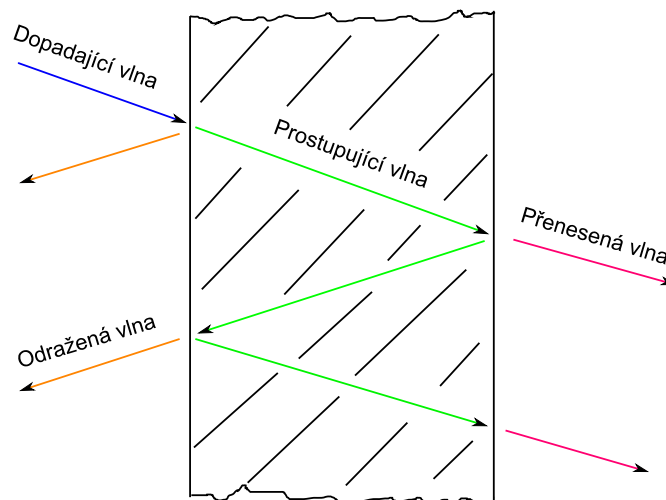
δ – hloubka vniku:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \omega \cdot \sigma}} \Rightarrow A = 8,686 \cdot \frac{t}{\delta} \quad [\text{dB}] \quad (2.12.)$$

Z uvedeného je zřejmé, že nejlepší absorpční útlum mají materiály s nízkou hloubkou vniku, tedy při vysoké frekvenci a permeabilitě. Absorpční útlum závisí na tloušťce stínící přepážky. [1]

2.3.3 Útlum vlivem mnohonásobných odrazů - B

V tomto případě dopadá vlna na stínící přepážku. Dále vlna prostupuje přes vodivý materiál a následně přes rozhraní kov-vzduch. Avšak vlna se na rozhraní vždy odrazí, a tak vznikají uvnitř kovové desky mnohonásobné odrazy, jak je možno vidět na obr. 2.3.



Obr. 2.3: Mnohonásobné odrazy kovové přepážky [1]

Pro velikost B lze psát rovnici vyplývající z rovnice 2.3.:

$$B = 20 \cdot \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma t} \right| = 20 \cdot \log \left| 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2t}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{2t}{\delta}} \right| \quad [\text{dB}] \quad (2.13)$$

Mnohonásobné odrazy mohou mít vliv na celkový útlum. Má-li stínění dobrou vodivost ($Z_0 \gg Z_M$) a ($t \gg \delta$), pak lze útlum B zanedbat. Nemá-li dobrou vodivost, je hodnota B záporná a snižuje se útlum stínění. [1,3]

2.3.4 Celkový útlum stínění

Celkový útlum je dán součtem všech tří složek. Tedy útlumem odrazu, absorpčním a útlumem vlivem mnohonásobných odrazů.

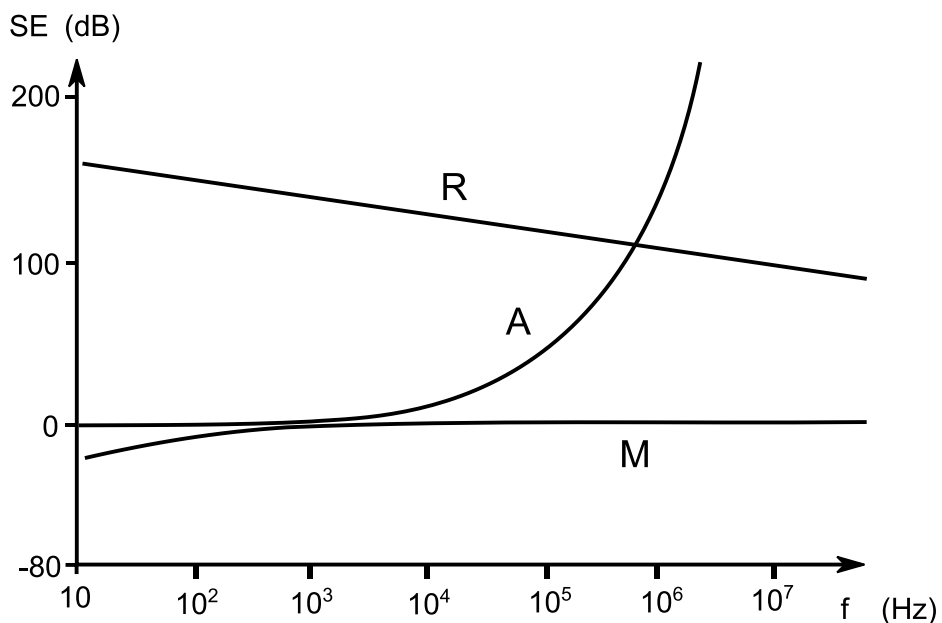
$$SE = R + A + B \quad [\text{dB}] \quad (2.14.)$$

Do vztahu (2.9.) a (2.12.) dosadíme dle vztahů (2.4.) a (2.5.) hodnoty Z_0 a Z_M :

$$R = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \varepsilon_0}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (2.15.)$$

$$A = 8,686 \cdot \frac{t}{\delta} = 0,0069 \cdot t \cdot \sqrt{\omega \cdot \mu_r \cdot \sigma} \quad [\text{dB}] \quad (2.16.)$$

Můžeme tvrdit, že R (útlum odrazem) je vyšší při nízkých kmitočtech a pro vysoce vodivé kovy. Naopak je tomu u A (absorpční útlum), který roste s druhou odmocninou frekvence a je větší pro feromagnetické materiály. Útlum vlivem mnohonásobných odrazů (B) na nízkých frekvencích snižuje celkovou účinnost stínění (Obr. 2.4).



Obr. 2.4: Frekvenční charakteristika složek útlumu pro měď s $t=1\text{mm}$ [1]

B se také může projevat u vyšších kmitočtů, jestliže je stínící deska velice tenká ($t \ll \delta$). Pro tento případ je absorpční útlum roven nule, jelikož je také závislý na tloušťce. Lze se s tím setkat u PC stínících krytů, kde je na plast napařená vrstvička kovu. [1,3]

2.4 Blízké pole

Proti vzdálenému poli, kde vlna v prostoru vykazuje konstantní impedanci Z_0 , je blízké pole považováno za značně komplikovanější. Charakteristická impedance se mění v závislosti na vzdálenosti a účinnost stínění je proto značně ovlivňována. V tomto případě je zdroj rušivého záření umístěn daleko blíže než u vzdáleného pole. Pro r (=vzdálenost rušivého zdroje od stínící desky) platí: $r \ll \lambda/2\pi$.

Charakteristické impedance už není jen jedna, ale je třeba ji rozdělit podle toho, jaké pole působí na stínící desku. Působící pole může být elektrické Z_{0E} nebo magnetické Z_{0H} . Pro charakteristické impedance platí vztahy:

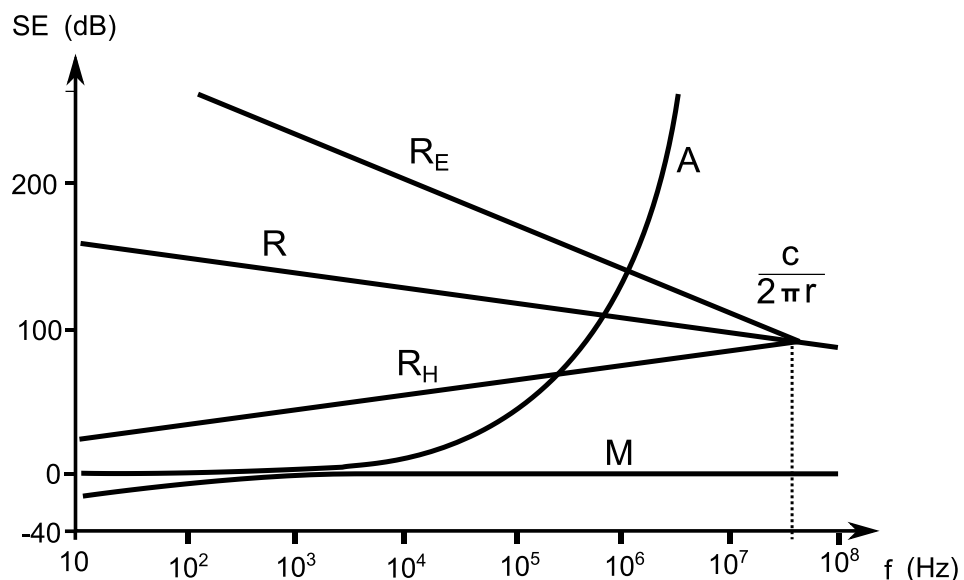
$$Z_{0E} = \frac{1}{\omega \epsilon_{0-r}} = Z_0 \cdot \frac{c}{2\pi r f} \gg Z_0 \quad [\Omega] \quad (2.17.)$$

$$Z_{0H} = \omega\mu_0 r = Z_0 \cdot \frac{2\pi r f}{c} \ll Z_0 \quad [\Omega] \quad (2.18.)$$

To samé platí pro útlumy odrazem, pro které jsou dány rovnice:

$$R_E = 322 - 10 \cdot \log\left(\frac{\mu_r r^2 f^3}{\sigma_r}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.19.)$$

$$R_H = 15 - 10 \cdot \log\left(\frac{\mu_r}{r^2 \sigma_r f}\right) \quad [\text{dB}] \quad (2.20.)$$



Obr. 2.7: Frekvenční průběh útlumů blízkého pole měděné desky o $t=1\text{mm}$ a $r=1\text{m}$ [1]

Z obrázku výše je patrné, že útlum odrazem pro elektrické pole R_E se pro snižující se frekvence zvyšuje. R_E je pro blízké pole vždy vyšší než R (pro homogenní elektromagnetickou vlnu) a je větší pro nemagnetické než pro magnetické materiály. Naopak je tomu u útlumu odrazem pro magnetické pole.

Hranice frekvence blízkého/vzdáleného pole je dána vztahem $c/2\pi r$. Směrem k nižším kmitočtům považujeme pole za blízké a směrem k vyšším přechází charakteristika v R – pro vzdálené pole. Čím je větší vzdálenost r , tím je hranice frekvence nižší.

Průběh absorpčního útlumu v blízkém poli zůstává nezměněn a při působení magnetického pole je cílem útlum A zvýšit. Je to dáno tím, že R_H téměř nepřispívá k útlumu (hlavně na nízkých frekvencích) a je tedy žádoucí použít větší tloušťku stínění. [1,3]

2.5 Dutinová rezonance

Ve stínícím krytu mohou vznikat na určitých rezonančních frekvencích odrazy vln od vnitřních stěn, které se sčítají a mohou tak výrazně ovlivnit činnost krytu. Frekvence mají poloviční vlnovou délku a vnitřní pole je dosti nehomogenní. Kryt pak nazýváme dutinovým rezonátorem. V EMC technice je tento jev nežádoucí a snažíme se mu předejít tím, že volíme materiály a rozměry krytu tak, aby nám frekvence, které se v prostředí vyskytují, neovlivňovaly účinnost stínění. V některých aplikacích (např. mikrovlnné technice) se tento jev uplatňuje a je žádoucí.

Pro rezonanční frekvence krytu ve tvaru kvádru platí vztah:

$$f_{rez} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2} = 1,5 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{l}{c}\right)^2} \quad [\text{Hz}] \quad (2.21.)$$

kde a, b, c jsou rozměry krytu (šířka, výška, délka) v metrech a m, n, l jsou celá nezáporná čísla libovolných hodnot, z nichž maximálně jedno může nabývat nulové hodnoty. Tyto čísla nazýváme vidy vlnění.

Elektromagnetické pole uvnitř rezonátoru je dáno superpozicí transverzálně magnetické (TM) a transverzálně elektrické (TE) vlny. Zde může existovat nekonečně mnoho rozdílných TE a TM, které jsou nazývány vidy. Každý vid se dá charakterizovat pomocí vidových čísel m, n, p (TM_{mnp} nebo TE_{mnp}).

Kvádrové rezonátory nejčastěji pracují s nejjednodušším videm transverzálně elektrickým TE_{101} , z čehož lze usoudit, že jeho rezonanční frekvence není závislá na výšce kvádru. Změna kmitočtu se provádí pomocí délky kvádru c , která bývá ve formě zkratovacího posuvného pístu. [7,8]

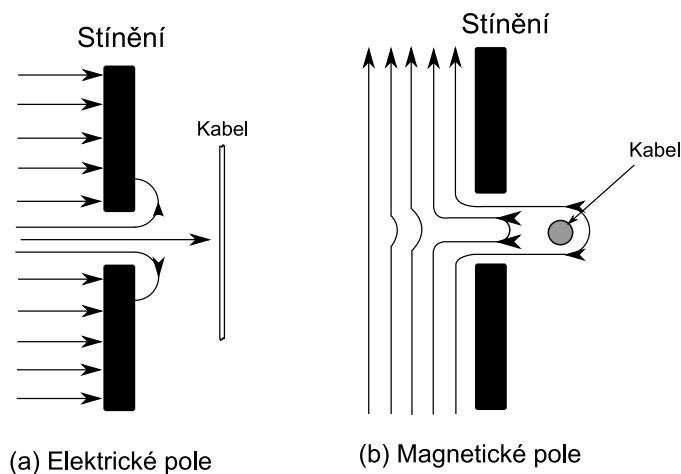
2.6 Vliv otvorů a netěsností na účinnost stínění

Téměř ve všech případech nemůže být stínění kompletně vodivě uzavřené. Je potřeba provádět údržbu zařízení. To znamená mít rozebíratelný kryt a také skla kvůli vizuální kontrole, která představují špatné vodivé spojení. Dále je potřeba zajistit chlazení, ventilaci apod. Přívodními (napájecími) kabely se také mohou dostávat rušivé signály dovnitř prostoru.

Zařízení není zcela ideálně chráněné před vnějším rušením a obsahuje řadu chyb a netěsností. Pronikání rušení je dáno fyzikálními vlastnostmi materiálu krytu, velikostí, tvarem a umístěním otvorů a netěsností. [1,4]

2.6.1 Vliv otvorů

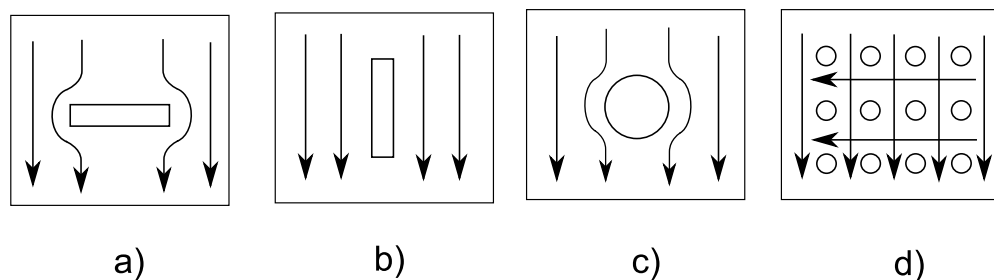
Největší vliv na účinnost stínění mají otvory ve stínícím krytu. Otvory mohou být modelovány jako jednoduché geometrické útvary, jako jsou obdélníkové nebo kruhové díry. Průnik vnějšího rušení skrz otvory v krytu, které jsou menší než vlnová délka, je zobrazeno na obr. 2.7. Tyto otvory lze z hlediska účinnosti stínění zanedbávat.



Obr. 2.7: Průnik rušení skrz malé otvory [3]

Působením vnější elektromagnetické vlny se ve stínící desce indukují vířivé proudy, které mají kolmý směr proti magnetickému poli. Potom celková účinnost stínění závisí také na orientaci, velikosti a umístění otvorů (Obr. 2.8). Jestliže je zde

štěrbina, pak při nesprávné orientaci vůči magnetickému poli (Obr.2.8.a) se chová jako účinná štěrbinová anténa, která může vyzařovat rušivé vlny do stíněného prostoru a tím tak výrazně snižovat útlum stínění. Je žádoucí, aby elektromagnetická vlna byla rovnoběžná (magnetické pole bylo kolmé) se štěrbinou, čímž vířivé proudy budou také rovnoběžné a nebude nijak ovlivněn jejich průběh. V praxi ovšem neznáme směr vlny dopadající na přepážku a je nutné uvažovat s tím nejhorším případem. [1,3,4]



Obr. 2.8: Ilustrace proudů indukovaných ve stínící přepážce při různých otvorech [4]

U otvoru ve tvaru kruhu je lepší používat více malých děr (ventilace) než jednu větší (Obr. 2.8 c, d). Malá díra o poloměru a , která je umístěná v desce se také při dopadu elektromagnetické rovinné vlny chová jako plošná anténa, jejíž výkonový zisk je dán vztahem:

$$G = \frac{P_t}{P_i} = \left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{2\pi a \cdot f}{c}\right)^2 \quad (2.22.)$$

kde P_i je výkon vlny dopadající na stínící desku s dírkou a P_t je výkon vlny, která prostoupila za stínící desku.

Po dosazení do základní rovnice (2.1) lze pro desku s malým kruhovým otvorem psát vztah:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{P_i}{P_t} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a \cdot f} \quad [\text{dB}] \quad (2.23.)$$

V případě více otvorů stejného průřezu ve stínící desce, je zisk G úměrný celkové ploše otvorů (počtu otvorů n):

$$SE = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi a \cdot \sqrt{n}} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a \cdot f \cdot \sqrt{n}} \quad [\text{dB}] \quad (2.24.)$$

V případě, že nelze zanedbat tloušťku stínící desky t v porovnání s rozměry otvoru, tak se jedná o přenos dutým vodivým „vlnovodem“ o délce t . Jestliže navíc je $f < f_m$, jedná se o vlnovod (podkritický), který pracuje s f_m svého dominantního vidu TE_{11} . [1]

Účinnost stínění je pak přibližně rovna:

$$SE \approx 8,686 \cdot \left(\frac{1,841 \cdot t}{a} \right) = 15,99 \cdot \frac{t}{a} \quad [\text{dB}] \quad (2.25.)$$

Pro kruhový vlnovod o poloměru a je kritická frekvence:

$$f_m = 1,841 \cdot \frac{c}{2\pi a} \quad [\text{Hz}] \quad (2.26.)$$

Pro podélnou štěrbinu s délkou l při zanedbatelné tloušťce stínící přepážky je účinnost stínění dána vztahem:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{1}{G} = 10 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{2l} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{c}{2l \cdot f} \quad [\text{dB}] \quad (2.27.)$$

Bez zanedbání tloušťky je:

$$SE \approx 8,686 \cdot |\alpha \cdot l| \approx 8,686 \cdot \frac{\pi t}{l} \approx 27,29 \cdot \frac{t}{l} \quad [\text{dB}] \quad (2.28.)$$

S tímto členem je nutno uvažovat při $t > l$ na kmitočtech $f < c/2l$.

Pro úzkou štěrbinu délky l se může dosadit takzvaný dominantní vid ($m = 1$ a $n = 0$), potom je výsledkem nejmenší kritická frekvence:

$$f_m = \frac{c}{2l} \quad [\text{Hz}] \quad (2.29.)$$

Rovnice (2.28),(2.25) lze přičíst k základním (2.27),(2.23) tam, kde nelze zanedbat tloušťka t [1,9]:

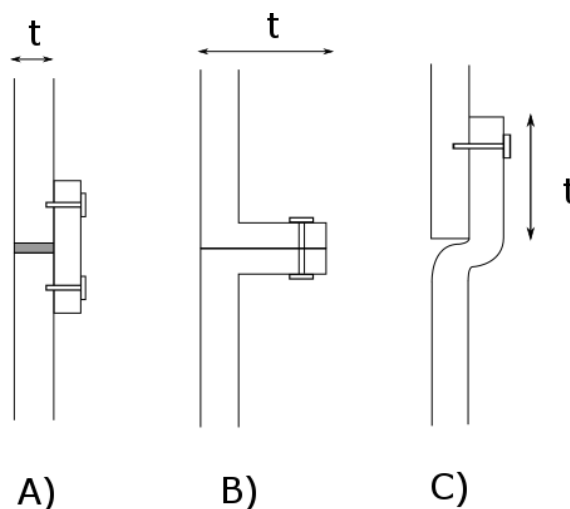
$$SE \approx 20 \cdot \log \frac{c}{2l \cdot f} + 27,29 \cdot \frac{t}{l} \quad [\text{dB}] \quad (2.30.)$$

$$SE \approx 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a \cdot f} + 15,99 \cdot \frac{t}{a} \quad [\text{dB}] \quad (2.31.)$$

2.6.2 Vliv netěsností

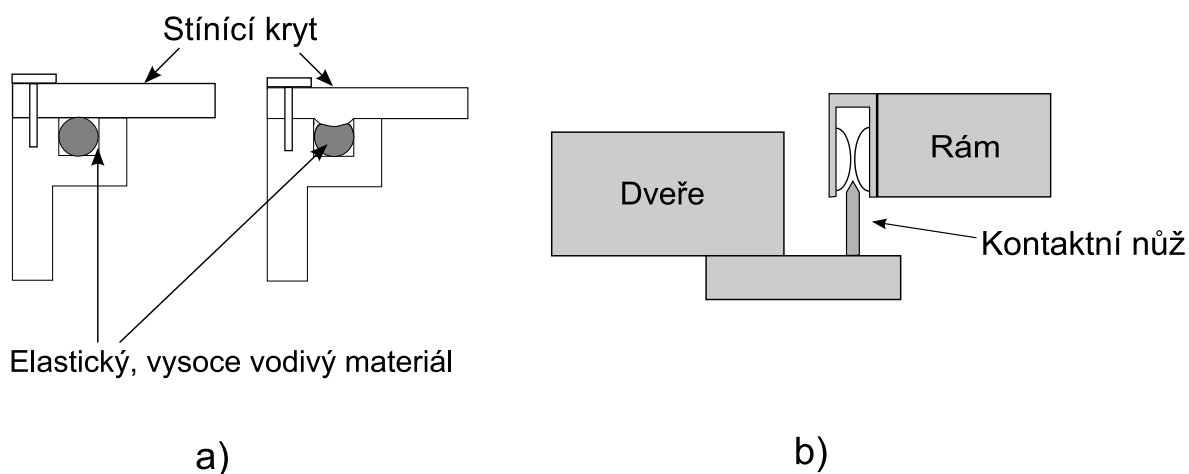
Kromě potřebných otvorů mohou narušit homogenitu stínění i různé další netěsnosti. Účinnost stínění je ovlivněna primárně odporem spoje. Tento odpor závisí na materiálu, vodivosti povrchu a tlaku, kterým jsou desky k sobě přitlačeny. Špatným spojením se omezují případné vzniklé vířivé proudy, což je nežádoucí, a proto se používají následující opatření pro zvýšení útlumu stínění:

- 1) Vodivost kontaktu: Všechny povrchy spojů musí být elektricky vodivé.
- 2) Překrytí netěsností: Překrytím také zvyšujeme účinnost stínění. Tímto způsobem (Obr. 2.9) tvoříme vlnovod o větší tloušťce a pokles charakteristiky tak nastává u vyšších kmitočtů.



Obr 2.9: Znárodnění některých typů překrytí [2]

- 3) Těsnění: Zdrojem dalších netěsností mohou být také mechanické části krytu. U takových částí, kde potřebujeme jednou za čas rozebrat kryt, se používá kromě překrytí také vysoce vodivých a elastických materiálů (silikon apod.), které dokonale přilnou k povrchu (Obr. 2.10 a)). Obdobně je to i u často otevíraných dveří nebo skříní, kde potřebujeme též dokonalou elektromagnetickou těsnost. V praxi se používá pérových nožových kontaktů (Obr. 2.10 b)). [3,2]



Obr. 2.10: Zvyšováním účinnosti stínění těsněním [1]

Dále se pro zlepšení účinnosti stínění (například u průchodů na kabely) dělá zahnutím části plechu dovnitř stíněného prostoru. Potom se provádí spojení vnějšího stínění kabelu s kovovou přepážkou. Je snaha o co nejmenší otvory, případně velké otvory překrýt vodivou látkou nebo opatřit průchody složené z trubek kruhového, čtvercového či hexagonálního tvaru. Vyvarovat se netěsností a utěsnit je vodivými elastomery atp.

Ne všechny netěsnosti se dají zcela eliminovat, proto byla zavedena kategorizace účinnosti stínění podle následující tabulky:

Tab. 2.1: Kategorie hodnocení stínění [1]

Účinnost stínění (dB)	Kategorie - Hodnocení
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

2.7 Materiály pro stínění

Materiály typické pro stínění jsou měď, hliník a ocel. Tyto materiály však nemají stejné vlastnosti z hlediska stínění a to jak pro elektrické, magnetické a elektromagnetické pole. Samozřejmě, že útlum závisí také na frekvenci, tloušťce materiálu, tvaru a vzdálenosti rušícího zdroje od stínící desky. Při srovnání materiálů ve stejných podmínkách a s totožnými rozměrovými parametry vychází lépe měď a hliník před ocelí. Je ovšem nutné zvážit ekonomickou náročnost. [10]

Pro blízké magnetické pole je útlum odrazem malý, proto stínění magnetického pole závisí hlavně na absorpčních ztrátách. Správné je volit feromagnetický materiál s vysokou permeabilitou μ . Avšak musíme brát zřetel na železné materiály, protože μ se mění s magnetizační silou.

Pro vzdálené elektrické pole je útlum odrazem značně větší než absorpční, a proto je dobré dávat přednost materiálům s vysokou vodivostí. Tabulka 2.2 ukazuje seznam stínících materiálů a jejich hodnoty vodivosti a permeability. [3]

Tab. 2.2: Materiály pro stínění [3]

Materiál	Vodivost v porovnání s mědí	Relativní permeabilita v porovnání se vzduchem	Použití
Slitina Ni-Fe	0,03	80000	Stínící desky
Železo	0,17	1000	Stínící desky
Ocel	0,1	1	Stínící desky
Stříbro	2,05	1	Pokovování kontaktů
Měď	1	1	Stínící desky
Zlato	0,7	1	Pokovování kontaktů
Hliník	0,61	1	Stínící desky
Zinek	0,29	1	Pokovování desek
Mosaz	0,26	1	Příruby
Fosforový bronz	0,18	1	Pružinové kontakty
Monel (Ni+Cu)	0,04	1	Těsnění

2.7.1 Povrchové úpravy

V oblasti EMI se používají povrchové úpravy z těchto důvodů: 1) ochrana proti oxidaci a korozi stínící desky; 2) k vytvoření kovového spojení mezi dvěma spojovanými částmi, 3) ke zlepšení pájitelnosti, 4) k eliminaci galvanické koroze, která vzniká spojením dvou různých kovů. Vrstva kovu se obvykle nanáší elektrolytickým pokovováním. Ve speciálních aplikacích se může používat vodivých nátěrů, potahů, chemických nanášení, obloukových rozprašování nebo vakuových napařování.

V mnoha případech je potřeba, aby povrchy stínících prostředků odolávaly korozi a oxidaci. Obvyklými prostředky jsou ušlechtilé nebo neušlechtilé kovové povrchové úpravy.

Ušlechtilé povrchové úpravy - K ušlechtilým povrchům patří zlato, paladium a různé slitiny těchto kovů, které odolávají korozi a oxidaci. Avšak důsledkem např. opotřebení kontaktů nebo nečistot v kovu se může snižovat jejich funkčnost. Vrstvy nanášené na materiál mají tloušťku 0,4-0,8 μm pro zlato.

Neušlechtilé povrchové úpravy – neušlechtilé úpravy se od ušlechtilých liší tím, že mají vždy povrchovou oxidační vrstvu, která může být narušena. Tato vrstva má potenciál pro obnovení vrstvy během provozu. Používané kovy jsou cín, stříbro a nikl. Cín řadíme mezi nejpoužívanější, stříbro se používá na vysoce vodivé kontakty a nikl v aplikacích s vysokou teplotou. [6,7]

3 Měření účinnosti stínění

Historicky první normou pro měření účinnosti stínění byla vojenská norma MIL-STD-285, která byla v roce 1997 nahrazena normou IEEE-STD-299. Norma měla poslední revizi v roce 2006 a byla pro testované objekty, které měly všemi svými rozměry více jak 2 metry. Teprve v roce 2013 byla vydána norma IEEE-STD-299.1, která ji rozšiřuje a popisuje měření pro objekty menší jak 2 metry.

3.1 Norma IEEE-STD-299

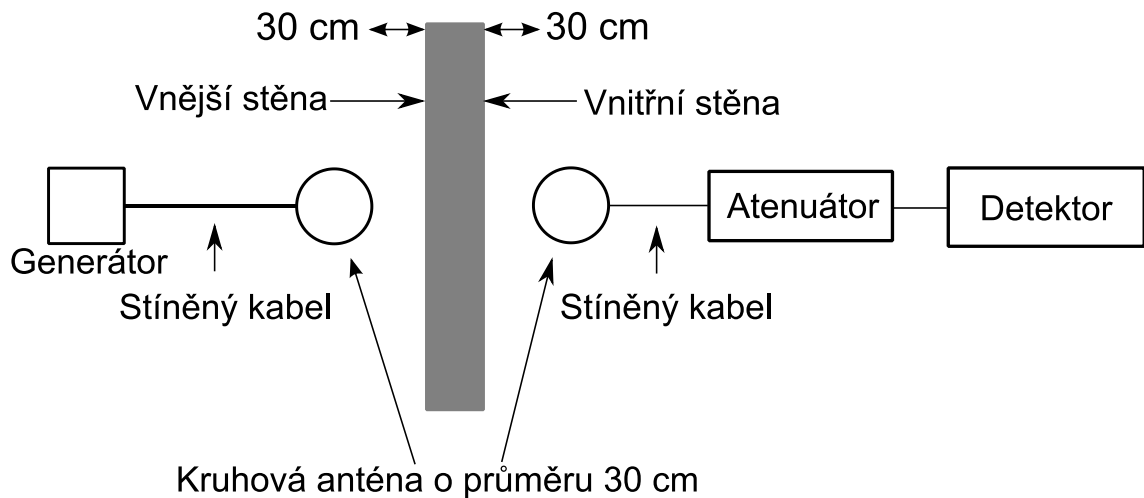
Měření se provádí u zařízení bez krytu a následně u stíněného zařízení, přičemž se pozice antén nemění. Vysílané kmitočty se pohybují v rozmezí od 9 kHz do 18 GHz. Na každý rozsah v tabulce 3.1 by se měl volit jeden kmitočet.

Tab. 3.1: Zkušební frekvence [12]

Zkušební frekvence	Typ antény
Pásmo nízkých frekvencí	
9 kHz – 16 kHz	Kruhová
140 kHz – 160 kHz	Kruhová
14 MHz – 16 MHz	Kruhová
Pásmo rezonančních frekvencí	
20 MHz – 100 MHz	Bikónická
100 MHz – 300 MHz	Dipólová
Pásmo vysokých frekvencí	
0,3 GHz – 0,6 GHz	Dipólová
0,6 GHz – 1,0 GHz	Dipólová
1,0 GHz – 2,0 GHz	Horn
2,0 GHz – 4,0 GHz	Horn
4,0 GHz – 8,0 GHz	Horn
8,0 GHz – 18 GHz	Horn

Norma je rozšířena o některé doporučené frekvence. V oblasti pod 9 kHz je to pásmo 50 ÷ 110 Hz, kde mohou vzniknout rušení na frekvenci sítě a 0,9 ÷ 1,1 kHz. V oblasti vyšších kmitočtů než 18 GHz jsou to pásma 35 ÷ 45 GHz a 90 ÷ 100 GHz. Měření je popsáno přesnými pozicemi měřících antén. Hlavně tedy v oblasti, kde se nacházejí dveře, ventilace nebo roh krytu. Zkoušení je také závislé na velikosti krytu, podle něhož se stanoví, v kolika pozicích má anténa být umístěna uvnitř krytu.

U nižších frekvencí, v rozmezí od 9 kHz do 20 MHz se měří pomocí kruhových antén s průměrem 30 cm. Jejich vzdálenost od testované stěny má být také 30 cm.



Obr. 3.1: Uspořádání vysílací a přijímací antény [12]

Od 20 MHz do 300 MHz je takzvané pásmo rezonančních frekvencí. Podle normy se v tomto pásmu může projevit jev dutinové rezonance. Konkrétní rezonanční frekvence lze spočítat ze vzorce (2.21). Tyto frekvence a frekvence jím blízké jsou nepříznivé a je doporučeno na nich testy neprovádět. Pro nejmenší rezonanční frekvenci platí vztah (3.1), který lze odvodit dosazením do rovnice 2.21, kde zanedbáme nejmenší rozměr a vidy největších dvou rozměrů se položí rovné jedné.

$$f_{rez} = 150 \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \quad [\text{Hz}] \quad (3.1.)$$

V pásmu vysokých frekvencí (0,3 ÷ 18 GHz) se jako vysílací anténa může použít půlvlnný dipól, bionická, horn, yagi, logaritmicko-periodická nebo jiná lineární anténa. Jako přijímací antény jsou použity půlvlnné dipóly nebo horn antény. V normě nejsou přímo stanoveny limitní hodnoty odolnosti. Volí si ji uživatel či výrobce zařízení. [12]

IEE-STD-299.1

Rozšiřující norma je rozdělena do dvou hlavních částí a to pro měřené objekty s rozměry 0,75 m ÷ 2 m a pro fyzicky malé objekty: 0,1 ÷ 0,75 m.

Měření fyzicky malých objektů je dále rozděleno:

- 1) Elektricky velké (jejich největší rozměr je větší než desetina vlnové délky $\lambda/10$)
- 2) Elektricky malé ($L < \lambda/10$) užívající k měření magnetické pole menší nebo rovné 300 MHz
- 3) Elektricky malé objekty v odrazové komoře

Pro objekty s rozměry 0,75 ÷ 2 metry také není definována minimální úroveň účinnosti stínění. Avšak jsou zde také doporučené frekvence pro testování zařízení.

Tab. 3.2: Zkušební frekvence [11]

Zkušební frekvence	Typ antény
Pásmo nízkých frekvencí	
9 kHz – 16 MHz	Kruhová
16 MHz - 20 MHz	Kruhová
Pásmo vysokých frekvencí	
0,3 GHz – 0,6 GHz	Dipólová
0,6 GHz – 1,0 GHz	Dipólová
1,0 GHz – 2,0 GHz	Horn
2,0 GHz – 4,0 GHz	Horn
4,0 GHz – 8,0 GHz	Horn
8,0 GHz – 18 GHz	Horn

Jako rozšířené pásma frekvencí jsou zde 35 ÷ 45 GHz a 90 ÷ 100 GHz. Měření pro nízké frekvence (9 kHz ÷ 20 MHz) je provedeno stejně jako na obr. 3.1. Rezonanční kmitočty, tedy pásmo od 20 do 300 MHz tato norma nezahrnuje.

Pro měřené objekty fyzicky malé a elektricky velké se obvykle sonda nevejde dovnitř zařízení. Proto se umísťuje doprostřed stěny krytu, kde by měla vykazovat stejné výsledky, jako kdyby byla uvnitř objektu. Zařízení se umísťuje do odrazové komory a vysílací anténa se namíří proti stěně krytu.

Takové uspořádání má zajistit náhodné odrazy jako při běžném provozu. Proti vzniku stojatého vlnění se zde používají takzvané stirrery (míchače), které mají za úkol generovat rovnoměrné pole. [11]

3.2 Norma ČSN EN 61000-5-7

Požadavky

Pro měření podle normy ČSN EN 61000-5-7 je zapotřebí zajistit vhodné klimatické prostředí. Tím je vlhkost vzduchu, která musí být v mezích, při kterých nevznikají na zařízení žádné kapičky vody. Zkoušená zařízení musí být nová a čistá. Zároveň by se mělo zkoušet více produktů, aby byly výsledky přesnější. Frekvenční krok nesmí být větší jak 1% předcházející frekvence, aby se zabránilo špatné volbě frekvence nebo jejímu vynechání.

Měření se provádí při horizontální i vertikální polarizaci vysílací antény. Zkoušené zařízení se vystavuje záření alespoň třemi stranami k vysílací anténě. V případě, že má objekt otvory nebo jiné nehomogenity na více než třech stranách, tak se provádí měření u všech stran s těmito netěsnostmi. Umístění antény má být proti středu ozařované strany objektu. Dále pokud jsou obě strany exponované plochy objektu větší jak 2,5 m, tak se rozdělí na části (2,5 m x 2,5 m) a měří se každá zvlášť. Norma udává, že se testy musí provádět ve stíněné bezodrazové komoře. Stěny mají být pokryty absorpčním materiálem pro zajištění homogenity pole od 10 MHz. Rozměr zkoušeného zařízení musí být minimálně třikrát menší než vnitřní strany krytu. Jinak se měření může provádět na volném prostranství, kde se nevyskytují vodivé předměty v okolí pěti metrů.

V případě, že není zkoušený kryt uzemněný, musí se umístit na nevodivý podstavec o výšce 0,8 m. Pro velké kryty je možnost snížení podstavce na 0,1 m. Vzdálenost vysílací antény od zkoušeného krytu je větší než 2λ zkušebního pole nebo 2,5 m (podle toho, která z těchto dvou vzdáleností je kratší). Přijímací anténa je ve vzdálenosti 0,3 m od zkoušené strany.

Testy se provádějí s použitím stíněných nebo optických kabelů s účinností alespoň o 10 dB větší než je účinnost požadovaná pro zkoušený kryt, přičemž musí být délka kabelu přijímací antény minimální. Pro lepší přenos signálů se u kabelů upřednostňuje šroubových spojů.

Pokud nejsou splněny všechny podmínky této normy, pak by všechny odlišnosti měly být zaznamenány v měřicím protokolu.

Vyhodnocení

Z vypočtené účinnosti stínění se kryt může označit EM kódem. Podle tohoto kódu si může každý výrobce stanovit účinnost stínění zařízení. Kód se zapisuje ve formátu EMABCDEF. Označovače stínění A až F určují nejnižší vypočtenou SE na každém frekvenčním pásmu a jsou dány tabulkou 3.3. Jestliže se na nějakém frekvenčním rozsahu neměřilo, je v kódu na jeho místě znaménko x. [20]

Tab. 3.3: Frekvenční pásma a hodnoty označovačů stínění EM kódu [20]

Kmitočtové pásmo	Označovač stínění	Stínící účinnost SE [dB]	Hodnota označ.stínění
10 kHz - 100 kHz	A	nezkouší se	x
100 kHz - 1 MHz	B	< 10	0
1 MHz - 30MHz	C	≥ 10	1
30 MHz - 1 GHz	D	≥ 20	2
1 GHz - 10GHz	E	≥ 30	3
10GHz – 40 GHz	F	≥ 40	4
		≥ 50	5
		≥ 60	6
		≥ 70	7
		≥ 80	8
		≥ 100	9

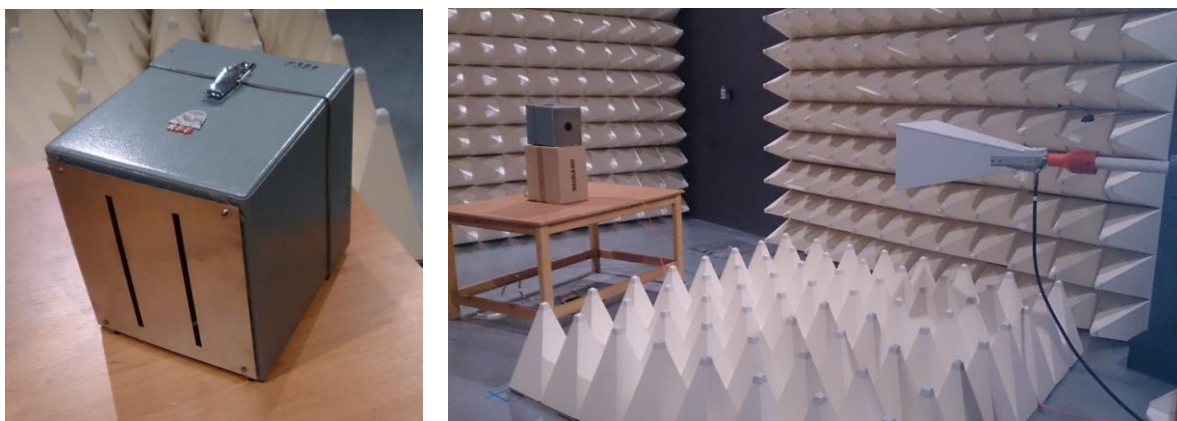
4 Vlastní měření

Měřeno bylo podle normy ČSN EN 61000-4-3, kdy se zařízení vystavovalo elektrickému poli konstantní velikosti. Avšak testovaný kryt (Obr. 4.1) byl malých rozměrů, a proto se muselo použít jiné zařízení než přijímací anténa. Byla použita sonda elektrického pole HI-6005 od firmy ETS-Lindgren, která je dostatečně malá, aby se vešla dovnitř krytu. Pomocí této sondy, která komunikuje s PC, jsou splněny podmínky normy ČSN EN 61000-5-7.

Nejprve proběhlo kalibrační měření. Prvně to bylo bez přítomnosti krytu. Zde se nastavila hodnota elektrické intenzity E na 10 V/m s určitou dovolenou odchylkou, která byla 1 V/m. Tato odchylka je dána jen do vyšších hodnot, protože je potřeba, aby minimální intenzita elektrického pole byla právě 10 V/m. Pro každou frekvenci se tedy zaznamenala příslušná hodnota elektrického pole E_0 a hodnota vyzařovaného výkonu, kterou má anténa působit na testovaný objekt. Tyto hodnoty se poté vysílaly na kryt s různým provedením čelního otvoru a zaznamenávala se intenzita uvnitř krytu E_i . Z hodnot E_0 a E_i se potom vypočítala účinnost stínění. Na rozdíl od normy, kde je účinnost počítána z vyzařovaného a přijímaného výkonu, se zde počítala jen z elektrického pole.

Testování elektromagnetické odolnosti probíhalo na měřených frekvencích od 500 MHz do 2 GHz s frekvenčním krokem 2,5 MHz, i když v normě je uveden frekvenční krok 1%. Použitím tohoto kroku se dosáhlo přesnější charakteristiky. Pro vyšší kmitočty (při kroku 1%) je velikost frekvenčního kroku podstatně větší a docházelo tak k jistému zkreslení. Na každé frekvenci byl zkušební signál vysílán po dobu 1 sekundy. Vysílací anténa byla ve vzdálenosti 3 m a ve výšce 1,45 m.

Sonda se umísťovala na polystyrenový podstavec doprostřed krytu a její optický kabel byl vyveden zadní částí krytu, kde na něj byla vyvrtána díra (Příloha 2). K působení elektrického pole na objekt se používala trychtýřová anténa na celém frekvenčním rozsahu.



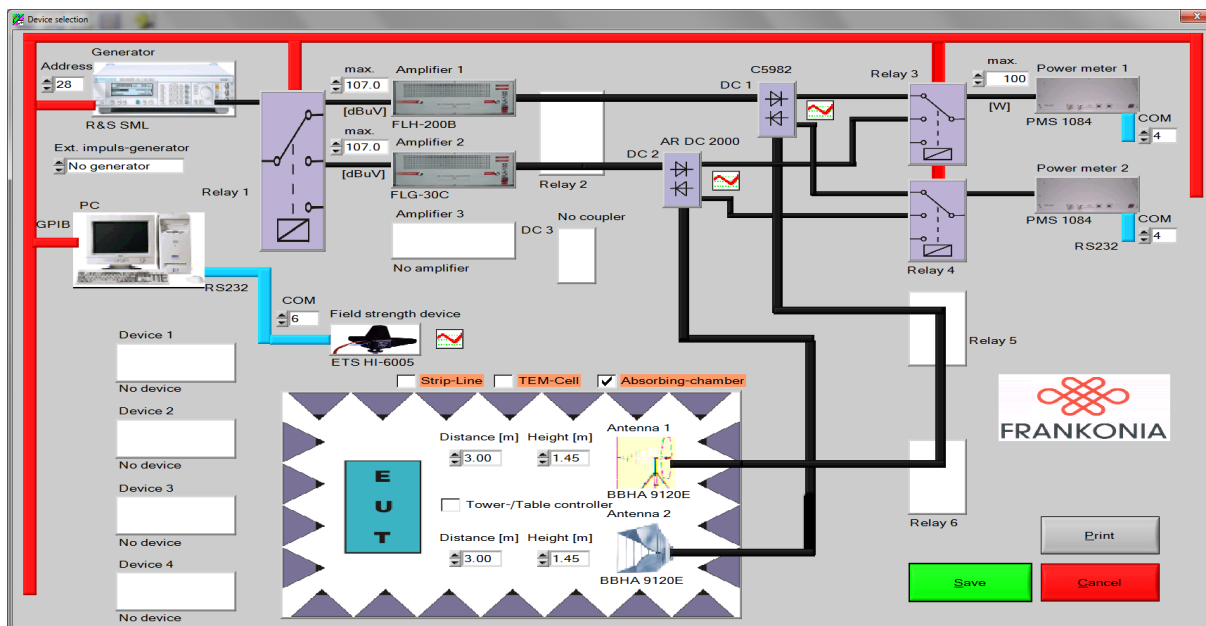
Obr. 4.1: Měření v bezodrazové komoře

K zajištění homogenity pole je třeba měření provádět v plně bezodrazové komoře, proto se na podlahu musely umístit 4x4 feritové desky a na ně pyramidové absorbéry, jelikož nejsou přímou součástí komory.

4.1 Měřicí systém a jeho parametry

Měřicí systém (Obr. 4.2) je ovládán pomocí softwaru Frankonia RF-LAB, jenž je uložen v počítači. Ten komunikuje s prvky systému přes GPIB rozhraní. V softwarovém programu jsou nastavovány všechny parametry měření. Zadávané parametry jsou frekvenční rozsah (80 MHz ÷ 3 GHz), frekvenční krok, intenzita elektrického pole, čas vysílání signálu na každé frekvenci. Je možnost nastavit i modulaci signálu, která se pro testování odolnosti používá (80% amplitudová modulace s 1 kHz obálkou). Amplitudová modulace má za úkol stimulovat vnější náhodné jevy. Nicméně při měření SE je modulace nežádoucí.

Počítač ovládá signálový generátor R&S SML. Odtud je signál veden do spínacího pole, které přepíná mezi zesilovači FLH-200B (pro frekvence od 80 MHz do 1 GHz) a FLG30C (od 1 GHz do 3 GHz). Ze zesilovače je signál veden do měřiče výkonu PMS 1084 a přes stíněné průchodky optickým kabelem do vysílací antény BBHA 9120E. Celý tento obvod je zakončen sondou ETS HI-6005, která měří intenzitu pole uvnitř sledovaného objektu a komunikuje s počítačem přes optický kabel.



Obr. 4.2: Měřicí systém

Použité měřicí přístroje

Signálový generátor

Signálový generátor Rohde & Schwarz SML03 má široké frekvenční pásmo použití a rozsáhlé možnosti analogové modulace (AM, FM, fázové-PhiM).

Tab. 4.1.: Základní technické parametry [14]

Frekvenční rozsah	9 kHz ÷ 3,3 GHz
Rozsah úrovní	-140 dBm ÷ +13 dBm
Frekvenční rozlišení (nejnižší krok)	0,1 Hz
Úroňové rozlišení (nejnižší krok)	0,1 dBm
Rychlost nastavení	<10 ms



Obr. 4.3: Signálový generátor [14]

Zesilovač FLH-200B a FLG30C

Zesilovače FLH-200B a FLG30C jsou produktem firmy Franconia. Slouží k převedení signálu ze signálového generátoru na vyšší úroveň, který je potřebný pro anténu produkující elektrické pole. Vstupní i výstupní impedance těchto zesilovačů jsou 50 Ω.

Tab. 4.2: Základní technické parametry [18]

Typ zesilovače	FLH 200B	FLG 30C
Frekvenční rozsah	20 MHz - 1GHz	1 GHz - 3 GHz
Maximální výstupní výkon	200 W	30 W
Zisk	54 dB	46 dB
Zvlnění	±2 dB	±1,5 dB



Obr. 4.4: Zesilovač FLH-200B [18]

Spínací pole

Spínací pole RSU je reléová spínací jednotka od firmy Franconia, která přepíná mezi jednotlivými koncovými zesilovači FLH-200B a FLG30C. RSU může také spínat mezi různými (až třemi) anténami popř. mezi výkonovými měřicími přístroji.

Tab. 4.3: Základní technické parametry [17]

Frekvenční rozsah	do 40 GHz
Impedance	50 Ω
Vstupní výkon	≤ 440 W
Maximální počet operací	10/min
Spínací doba	60 ms
VSWR	$\leq 1,14$
Vložný útlum	$\leq 0,1$ dB



Obr. 4.5: Spínací pole RSU [17]

Měřič výkonu PMS 1084

PMS 1084 je měřič výkonu, který měří dvoukanalově. Měří jak výkon, který připravuje zesilovač pro anténu, tak výkon zpětně odražený do systému. Tyto dvě měřené hodnoty se ukládají do počítače prostřednictvím softwaru RF-LAB. Pro převod do počítače je užitá sériová linka RS 232, na jejímž konci je USB redukce.

Tab. 4.4: Základní technické parametry [19]

Frekvenční rozsah	100 kHz ÷ 6 GHz
Vstupní impedance	50 Ω
Měřicí rozsah	- 60 dBm ÷ + 20 dBm
Přesnost	± 1 dB
Rozlišení	0,1 dB
VSWR	1,15



Obr. 4.6: Měřič výkonu PMS 1084 [19]

Anténa BBHA 9120E

Pro celé měření byla použita Horn anténa BBHA 9120E i přesto, že podle normy by se měla začít používat od hranice 1 GHz. Její frekvenční rozsah však splňuje použití již od 500 MHz (Tab. 4.5).

Tab. 4.5: Základní technické parametry [16]

Frekvenční rozsah	0,5 GHz ÷ 6 GHz
Materiál	Hliník
Maximální vstupní výkon	400 W
Impedance	50 Ω
Rozměry antény	60,5 x 42 x 31 cm



Obr. 4.7: Lineární anténa BBHA 9120E [16]

Sonda ETS HI-6005

Sonda elektrického pole je od firmy ETS-Lindgren. Měří elektrickou intenzitu celkem ve třech osách (X, Y a Z), kde mohou být hodnoty uváděny zvlášť. Více se však uvádí celková hodnota, tj. vektorový součin všech tří hodnot. Její výhodou je nepochybně připojení přes optický kabel, který zajišťuje, aby nebyl signál vedený do počítače zkreslený. Další výhodou je také dynamický rozsah, na kterém lze odečítat hodnoty bez jakékoliv manipulace se sondou a její velikost, která umožňuje měřit intenzitu elektrického pole i uvnitř malých objektů.

Tab. 4.6: Základní technické parametry sondy ETS HI-6005 [15]

Frekvenční rozsah	100 kHz ÷ 6 GHz
Rozlišovací schopnost	0,01 V/m
Dynamický rozsah	0,5 ÷ 800 V/m
Přesnost	± 0,9 dB
Rozměry sondy	8 x 7,5 x 7,5 cm

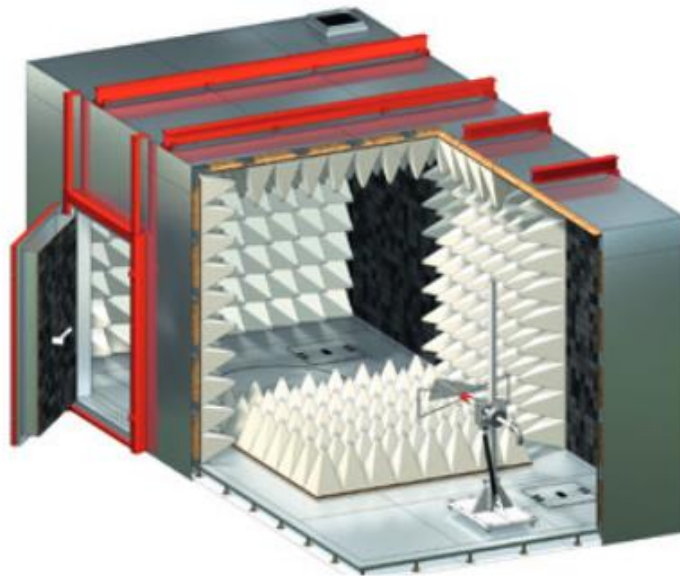


Obr. 4.8: Sonda elektrického pole [15]

Bezodrazová komora

Bezodrazová komora slouží jako optimální řešení pro měření elektromagnetické odolnosti podle harmonizované normy IEC/EN 61000-4-3. Testování probíhá na vzdálenost 3 metry, protože na tuto vzdálenost vykazuje měření nejlepší výsledky. Komora má rozměry 8,84 x 4,955 x 5,75 m (délka x šířka x výška) a rozsah frekvencí, na kterých se má měřit je 10 kHz až 18 GHz.

Homogenitu prostředí zajišťují absorbéry, které jsou umístěny podle obr 4.9. Absorbéry jsou z feritových destiček nebo se jedná o kombinaci feritových destiček a pyramidových absorbérů. Ty jsou z polystyrénového materiálu, na který je nalepena tenká vodivá fólie. Podlahové absorbéry nejsou na pevně přichycené, musejí se tedy skládat mezi anténu a měřené zařízení. [13]



Obr. 4.9: Bezodrazová komora[13]

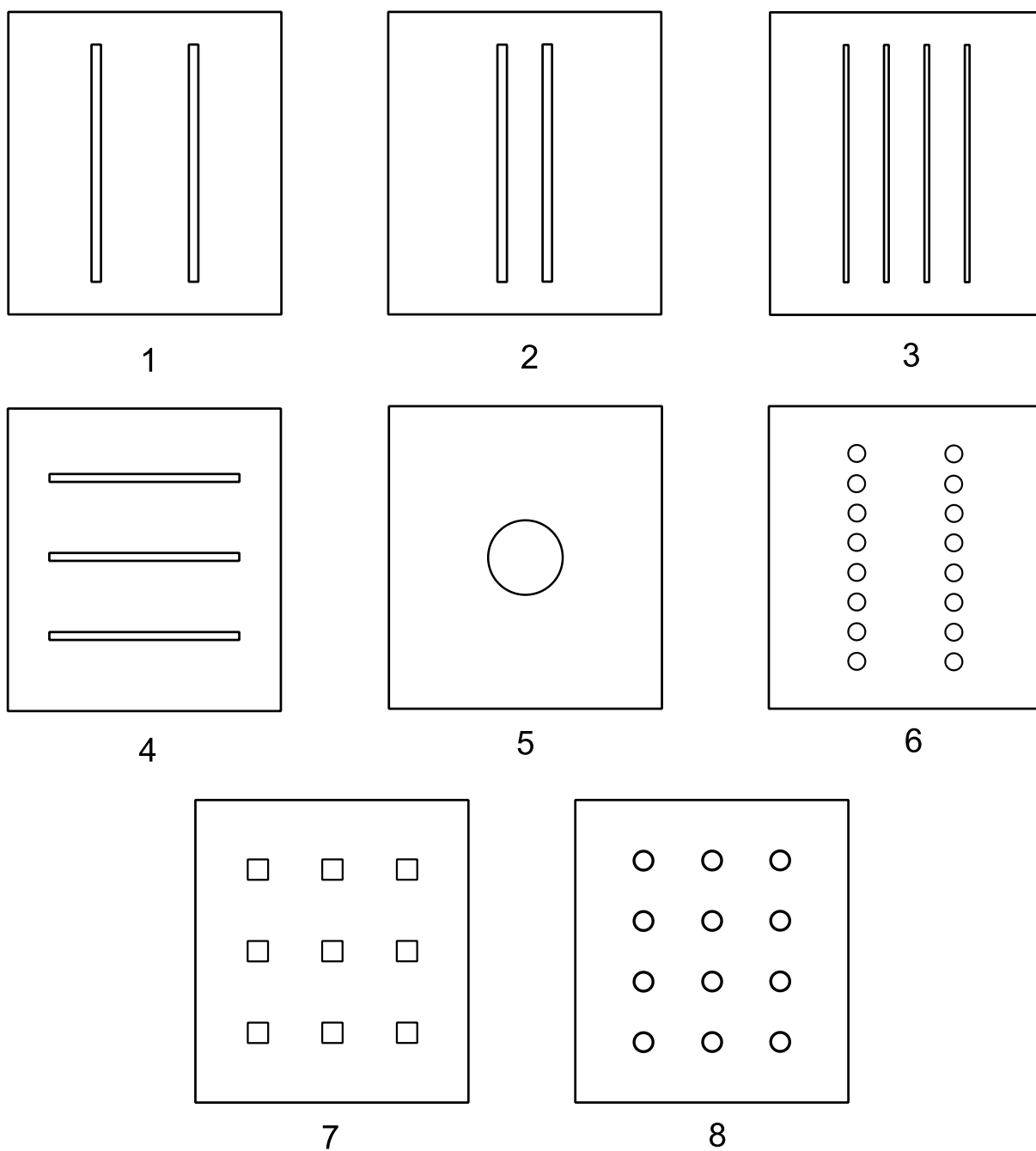
4.2 Návrh čelního otvoru přístrojového krytu

Pro přístrojový kryt bylo zapotřebí navrhnout jeho čelní stranu s otvory. Celkové rozměry krytu byly 290 x 280 x 247 mm, kde čelní strana měla rozměry 280 x 247 mm a navrhovaná stínící deska rozměry 255 x 230 mm. Celkem bylo navrženo 8 variant krytu s otvory nebo otvorem o stejném průřezu. Průřez byl vždy 3200 cm². Otvory mají představovat různé provedení ventilace či překrytí. Předpokládá se, že nejlepší výsledky budou vykazovat kruhové otvory a to z hlediska natočení vysílací antény jak horizontálně, tak i vertikálně. U podélných štěrbin se očekává při kolmé polarizaci vlny a štěrbin, že se bude chovat jako dutý vlnovod a intenzita elektrického pole uvnitř krytu bude větší. Návrh jednotlivých variant je uveden na obr. 4.10.

- 1) 2 štěrbin s rozměry 8 x 200 mm dále od sebe
- 2) 2 štěrbin s rozměry 8 x 200 mm blíže k sobě
- 3) 4 užší štěrbin s rozměry 4 x 200 mm
- 4) 3 podélné štěrbin s rozměry 6,67 x 160 mm
- 5) 1 kruhový otvor s poloměrem 31,92 mm
- 6) 2x8 kruhových otvorů s poloměrem 7,98 mm
- 7) 3x3 čtvercové otvory s délkou strany 18,85 mm
- 8) 3x4 kruhové otvory s poloměrem 9,22 mm

K zajištění vyřezání přesných rozměrů bylo použito laseru. Plechy byly z nerezové oceli o tloušťce 1 mm.

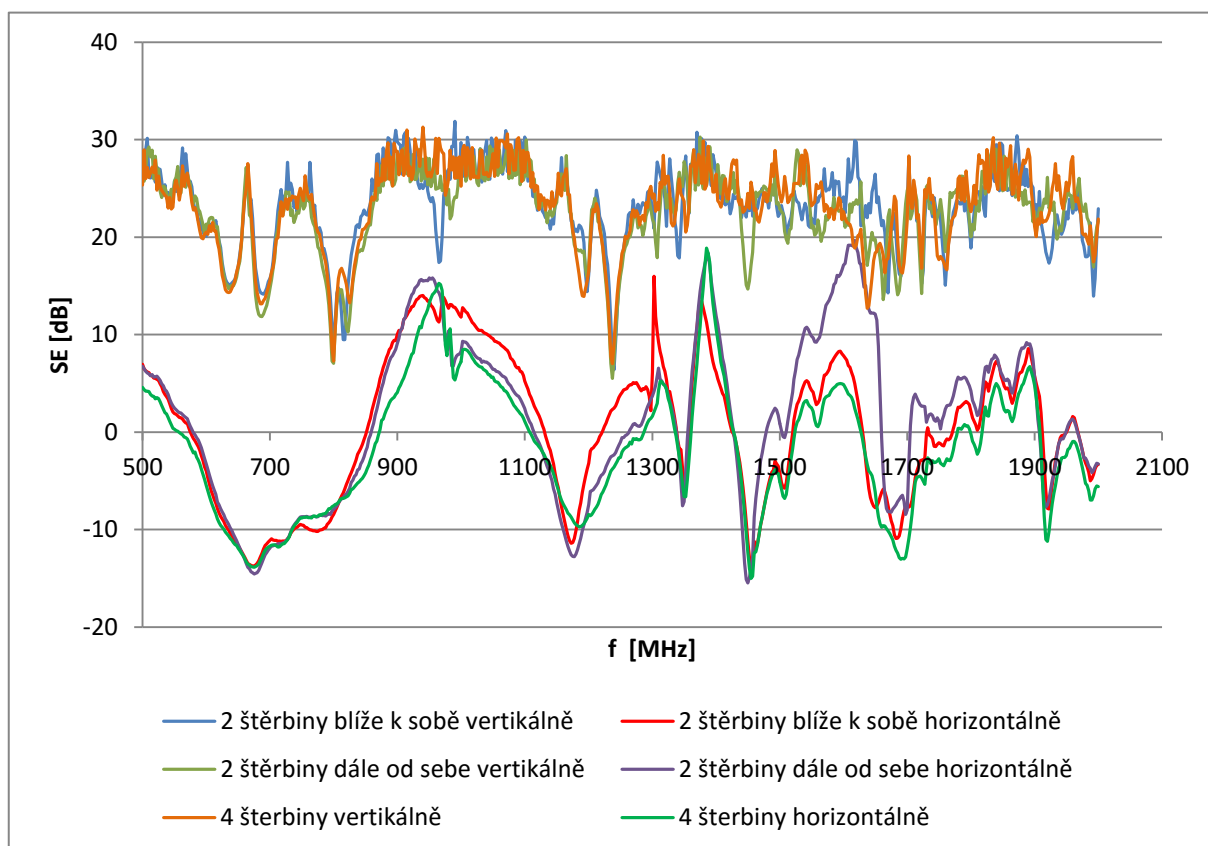
Pro každý čelní kryt se umísťovalo zařízení jak do svislé (na výšku postavené-vertikální polohy), tak do polohy horizontální. Neměnila se polarizace antény z důvodu zachování stejných podmínek měření. Pro zajištění dokonalejšího vodivého spojení plechu a krytu bylo použito pásky ze speciálního stínícího materiálu.



Obr. 4.10: Návrh jednotlivých stínících desek

4.3 Dosažené výsledky

Naměřené a vypočtené výsledky jsou rozděleny do několika grafů. Jednotlivé grafy zahrnují více variant provedení čelního stínícího krytu proto, aby se mohly vzájemně porovnat jednotlivé návrhy. Grafy dílčích variant čelního krytu a také podrobné rozměry (Příloha 11) jsou vloženy v příloze.



Obr. 4.11: Porovnání variant 1,2,3

První graf obsahuje porovnání prvních třech návrhů provedení.

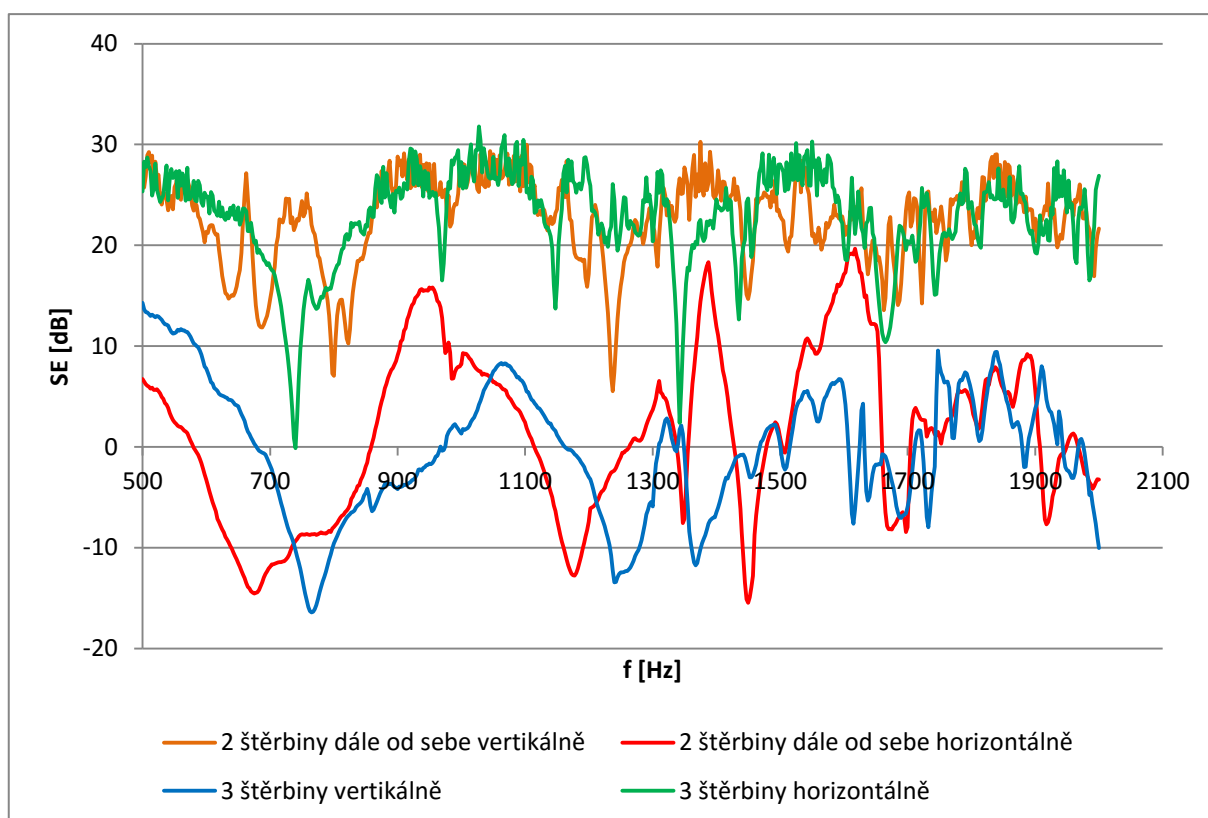
Varianty jsou:

- 1) 2 štěrby s rozměry 8 x 200 mm vzdáleny 74 mm od sebe
- 2) 2 štěrby s rozměry 8 x 200 mm vzdáleny 30 mm od sebe
- 3) 4 užší štěrby s rozměry 4 x 200 mm vzdáleny 30 mm od sebe

Měřeno bylo jak ve vertikální polarizaci krytu (kryt postavený na výšku), tak v horizontální poloze (kryt položený na delší stranu).

Z grafu (Obr. 4.11) je patrné, že dosažené výsledky nevykazují žádné velké odchylky. Toto tvrzení platí zejména pro vertikální natočení přístrojového krytu. V celém rozsahu se pohybuje útlum stínění od 7 ÷ 31 dB a toto stínění by bylo hodnoceno jako nedostačující.

Při horizontálním natočení je SE znatelně nižší než při vertikálním. Příčinou jsou odrazy elektromagnetické vlny v této štěrbině, jejíž část se následně vyzáří do prostoru krytu a tím se snižuje útlum stínění. Celkově lze říci, že nejnižších hodnot SE na většině měřených frekvencí dosahuje plech se 4 štěrbinami. Nejnižší hodnota SE, podle které se systém hodnotí je -15 dB, což je dosti nepříznivé. Větší rozdíl je v pásmu od zhruba 1550 do 1600 MHz. Na těchto hodnotách dosahuje útlum stínění pro štěrbinu dále od sebe větší hodnoty (10 ÷ 20 dB) než u dvou štěrbin blíže k sobě (0 ÷ 10 dB).



Obr. 4.12: Porovnání variant 1 a 4

Návrh se třemi štěrbinami má při vertikální poloze krytu horizontální natočení štěrbin. Štěrbin mají rozměry 6,67 x 160 mm a jsou od sebe vzdáleny 60 mm. Z druhého grafu je vidět, že při vertikální polarizaci (ne krytu ale štěrbin) je průběh SE přibližně stejný. Výjimkou jsou vzniklé rezonanční špičky na rozdílných frekvencích. U návrhu třech štěrbin jsou vzniklé špičky větší a SE dosahuje až na 0 dB. Nejvíce se projevují dvě špičky, a to na frekvenci 750 MHz a 1370 MHz. U varianty se dvěma štěrbinami dosahuje nejnižší hodnota SE na 7 dB a má také dvě výrazné špičky na 800 a 1230 MHz.

Srovnání horizontálního natočení štěrbin je takové, že zřejmě lepší SE vykazuje varianta dvou štěrbin. Tyto průběhy se však liší a záleželo by na tom, jaké frekvence budou na kryt působit.

Kritická frekvence je u jednotlivých variant rozdílná a spočítá se podle vzorce (2.29.). Vzorec platí jen pro jednu štěrbinu, proto se do jmenovatele zavede člen \sqrt{n} . Frekvence nezávisí na ploše jednotlivých štěrbin, ale jen na délce a počtu štěrbin. [3]

Pro 2 štěrbin:

$$f_m = \frac{c}{2l\sqrt{n}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{2}} \cong 530,330 \text{ MHz}$$

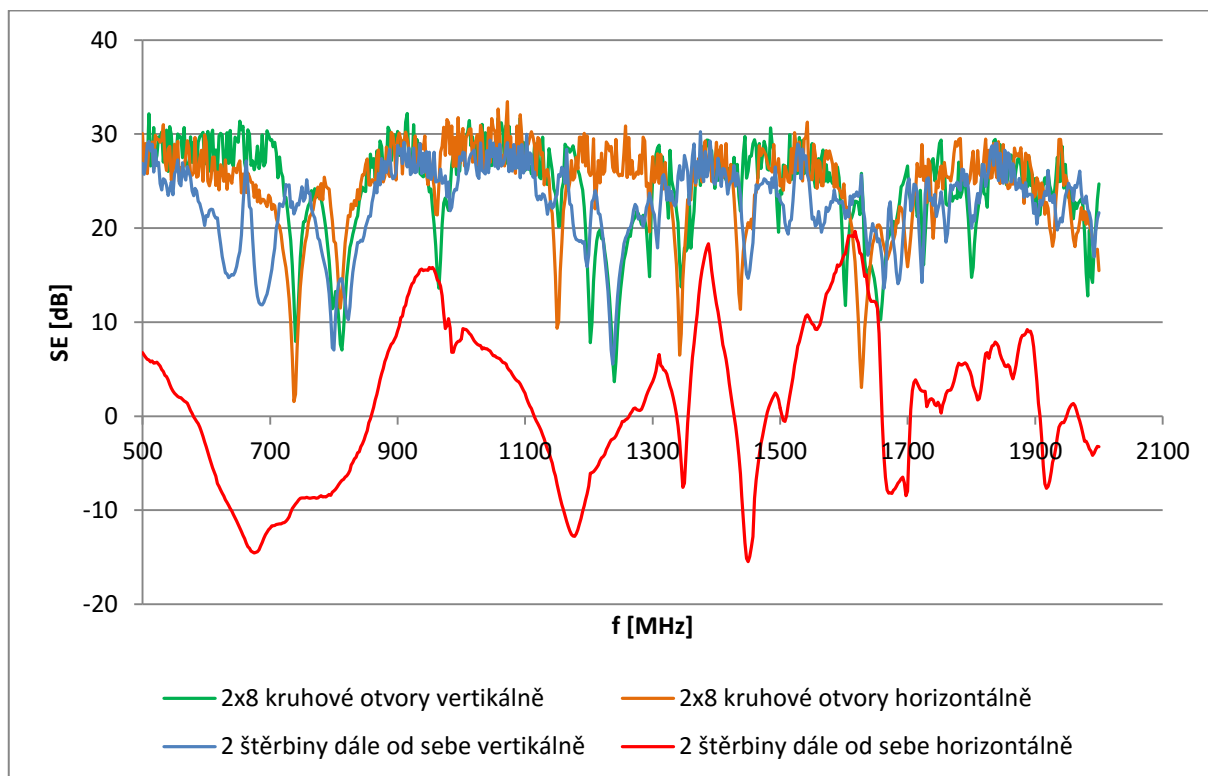
Pro 3 štěrbin:

$$f_m = \frac{c}{2l\sqrt{n}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 160 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{3}} \cong 541,265 \text{ MHz}$$

Pro 4 štěrbin:

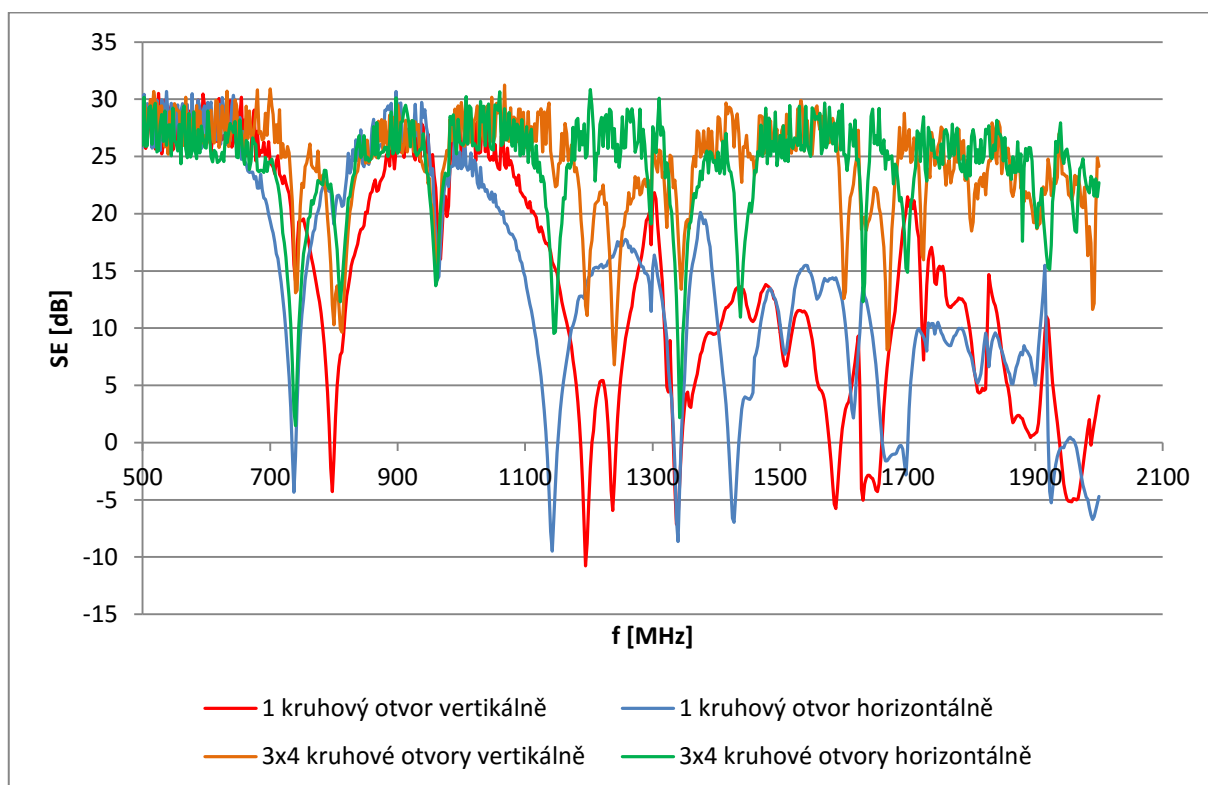
$$f_m = \frac{c}{2l\sqrt{n}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 200 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{4}} \cong 375,0 \text{ MHz}$$

Nad touto frekvencí by se očekával nižší útlum stínění. Pro toto srovnání by bylo potřeba měřit již od nižších frekvencí. Je ale zřejmé, že velkou roli zde hraje polarizace vlny vůči otvorům a počítat kritické frekvence u štěrbinových otvorů není z hlediska představy pro SE ideální.



Obr. 4.13: Porovnání variant 1 a 6

U grafu číslo 3 je porovnáváno uspořádání do dvou pruhů. Pruhy jsou u šesté varianty tvořeny kruhy a u první štěrbinou. Vzdálenosti jsou voleny tak, aby se oba návrhy co nejvíce podobaly. Cílem bylo ukázat, že kruhové otvory s průměrem 15,95mm mají mnohem lepší vlastnosti než podélné štěrbinu, což se u horizontálního natočení krytu potvrdilo. SE je znatelně menší pro horizontální natočení krytu a také pro vertikální je na tom lépe u otvorů ve tvaru kruhů.



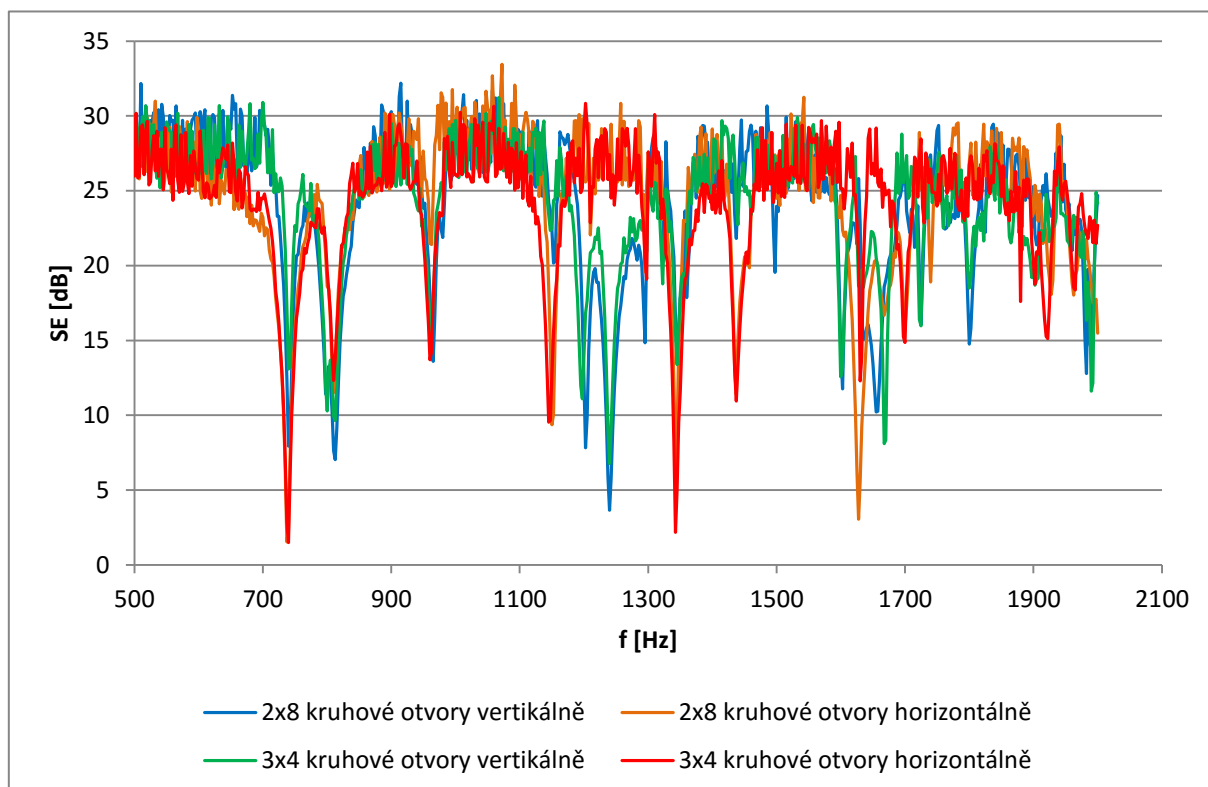
Obr. 4.14: Porovnání variant 5 a 8

Předpokládá se, že návrh s jedním otvorem bude mít menší útlum stínění než návrh s více otvory o stejné ploše. Tento teoretický předpoklad se také splnil. Velký otvor měl průměr 63,85 mm a každý z dvanácti menších otvorů měl průměr 18,43 mm. Je tedy lepší, když se nahradí jeden větší otvor větším počtem menších. Jak u vertikálního, tak u horizontálního uspořádání se rozmístění děr vůči magnetickému poli skoro nezměnilo. U velké díry se nezměnilo vůbec a u malých děr byla při vertikální polarizaci vzdálenost ve vertikálním směru 51 mm a horizontálním 57,5 mm, takže zde malé rozdíly byly. Vznik rezonančních špiček na rozdílných frekvencích je zapříčiněn rozměry krytu vůči elektromagnetickému poli a také polohou sondy uvnitř krytu.

Kritická frekvence se spočítá podle vztahu (2.26.):

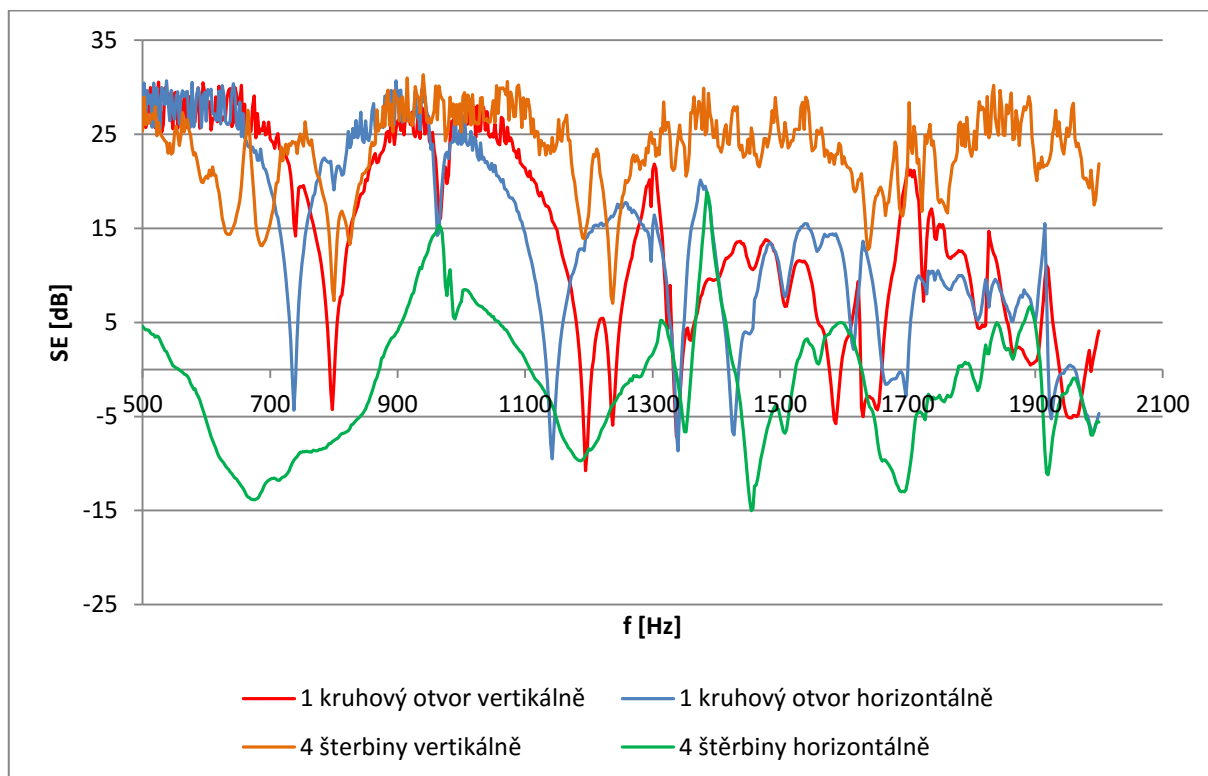
$$f_m = 1,841 \cdot \frac{c}{2\pi a} = 1,841 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{2\pi \cdot 31,92 \cdot 10^{-3}} \cong 2,754 \text{ GHz}$$

Frekvence je stejná u všech kruhových otvorů, protože závisí na ploše otvorů a ta se u žádné varianty nemění. Měření však probíhalo jen do 2 GHz. Přesto je vidět, že už na nižších frekvencích (zhruba od 1 GHz) se projevilo snížení SE u varianty s jedním kruhovým otvorem. U více kruhových otvorů tomu tak nebylo a kromě rezonančních špiček se menší snížení účinnosti projevilo až u hodnot frekvence nad 1900 MHz.



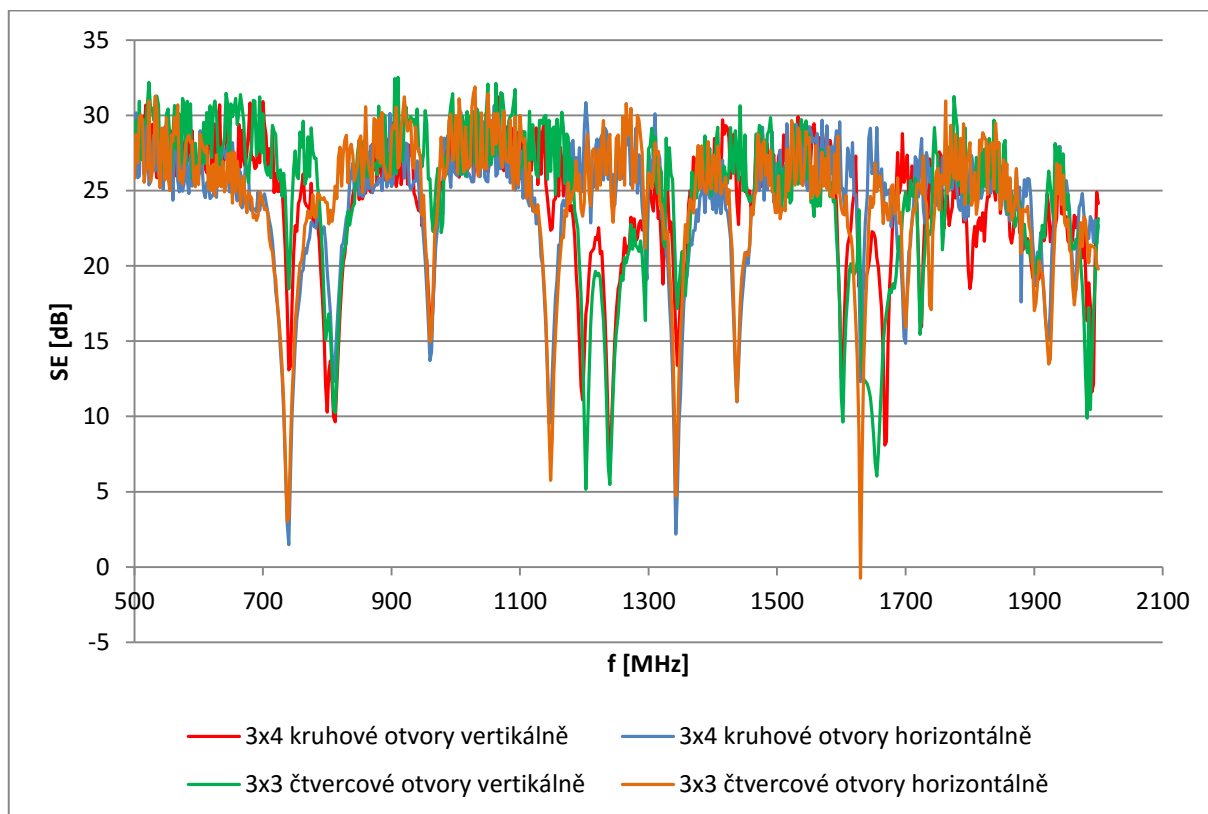
Obr. 4.15: Porovnání variant 6 a 8

Na pátém grafu (Obr. 4.15) lze pozorovat jen velmi malé rozdíly mezi oběma návrhy. Nezáleží tedy na tom, jestli použijeme 12 větších kruhových děr rovnoměrně rozmístěných nebo 16 menších ve dvou sloupcích. Jen velmi nepatrně lépe vycházejí větší kruhové otvory (varianta 8).



Obr. 4.16: Porovnání variant 3 a 5

Šestý graf (Obr. 4.16) ukazuje srovnání kruhového otvoru a čtyř šterbin. U čtyř šterbin SE silně závisí na polarizaci antény vůči šterbinám. Při vertikálním natočení vykazuje lepší hodnoty varianta č. 3 (4 šterbiny) a naopak při horizontálním je lepší použití kruhové díry. Z těchto dvou variant nelze určit, která je výhodnější. Bylo by potřeba znát polarizaci vlny a frekvence, kterým by byl kryt vystavován.



Obr. 4.17: Porovnání variant 7 a 8

U posledního porovnání je vidět, že při použití celkem devíti čtverců (délka strany 18,85 mm) nebo dvanácti kruhových otvorů nejsou rozdíly tak výrazné. Při rezonanci hodnota SE u čtvercových otvorů dosahuje záporných hodnot, konkrétně -1 dB. Oproti tomu u kruhových je to +2 dB. K rezonancím docházelo při obou variantách natočení krytu přibližně na stejných hodnotách frekvence. Jednou byla nižší špička u varianty 7, jindy u 8. Největší rozdíl byl na frekvenci 1620 Hz, kdy hodnota u čtvercových otvorů dosahovala zmiňovaných téměř -1dB a u druhého návrhu přibližně +12 dB. Z mého hlediska je lepší natočení horizontální, sice vzniklé rezonance jsou větší, ale nevznikají tak často. Toto hodnocení natočení ale většinou v praxi nehraje roli. Nevíme totiž, jaká bude polarizace elektrického či magnetického pole vůči otvorům, a proto by nejlépe splňovali podmínky elektromagnetické imunity tyto dvě varianty a varianta č. 6. U těchto tří návrhů nejsou téměř žádné rozdíly, i když je uspořádání děr dosti odlišné.

Závěr

Elektromagnetické stínění je zásadní problematikou v oboru elektromagnetické kompatibility. V zařízení bývají často nedokonalosti, jako jsou špatné vodivé spojení kontaktů, netěsnosti v uzavíratelných částech, otvory z nekovového materiálu určené například pro vizuální kontrolu nebo i otvory pro ventilaci. Některé z těchto netěsností lze účinně eliminovat například překrytím plechů, použitím kovové mřížky, vodivých elastomerů, pokovením či zahnutím plechu do vnitřku chráněného objektu.

Proto je cílem této práce vyzkoušet, jaké otvory jsou z hlediska stínění nejvýhodnější a jaké naopak nejméně vhodné. Celkem jsem navrhl 8 variant provedení čelní desky krytu. Otvory jsem volil kruhového, čtvercového a štěrbinového tvaru, které měly navíc stejný průřez. Štěrbiny měly za úkol představovat jakési nedokonalosti v překrytí krytu a naopak kruhové otvory znázorňovaly ventilační otvory. Největší kruhový otvor napodobuje případ ventilačního otvoru s plastovou mřížkou. Měřilo se ve frekvenčním pásmu $0,5 \div 2$ GHz z důvodu trychtýřové antény, která může být používána na těchto frekvencích a nebylo jí tak potřeba měnit. Sonda elektrického pole, která měla za úkol měřit elektrickou intenzitu uvnitř krytu má dynamický rozsah $0,5 \div 800$ V/m. Z toho důvodu je horní hranice SE přibližně $26 \div 30$ dB a lze tedy spíše pozorovat rezonanční frekvence. Pro určení kvality stínění lepších krytů by bylo zapotřebí měřit SE až do 120 dB (nebo alespoň 90 dB), a proto by tato sonda nevyhovovala pro tyto požadavky.

Měření probíhalo v souladu s normou ČSN EN 61000-5-7. Místo frekvenčního kroku 1% se použil konstantní frekvenční krok po 2,5 MHz, aby nedocházelo na vyšších frekvencích k většímu zkreslení rezonančních špiček.

Z naměřených výsledků jsem dopočítal účinnost stínění a tu vynesl do grafu v závislosti na frekvenci. Z uvedených grafů lze říci, že nejlepší účinnost měly obecně menší otvory, kterých bylo více. Nejnevýhodnější byly pro kryt štěrbiny, které při špatné polarizaci navíc působily jako štěrbinové antény a vysílaly tak rušivé vlny do vnitřní části krytu. V praktickém užití navíc nevíme, v jaké polarizaci bude

elektromagnetické rušení působit, a proto je nutné uvažovat s tím nejhorším případem.

Konkrétně vycházejí nejlépe varianty s kruhovými průřezy rovnoměrně rozmístěnými (3x4), ve dvou sloupcích (2x8) a varianta devíti čtverců. Jak grafy vertikálních natočení, tak horizontálních jsou téměř totožné a lze pozorovat jen velmi nepatrné rozdíly. Rezonanční špičky vznikají na stejných frekvencích, jen nejsou stejně veliké. Největší tři špičky jsou u vertikálního natočení na 810, 1240 a 1670 MHz. U horizontálního natočení jsou na 740 a 1345 MHz. Oproti tomu nejhorší jsou varianty se štěrbinami, kde účinnost stínění byla značně snížena a to zejména při kolmé polarizaci vlny a štěrbinou. Nejmenší hodnota dosahovala dokonce -15,5 dB. Mezi jednotlivými variantami se štěrbinami však také rozdíly nebyly veliké. Rozdělení štěrbin do více menších má spíše negativní vliv na celkovou účinnost stínění. Z hlediska útlumu stínění a uvažování těch nejhorších případů se jeden kruhový otvor jevil jako vhodný kompromis mezi štěrbinami a zmiňovanými nejlepšími třemi variantami. Kritická frekvence u kruhového otvoru a u více kruhových otvorů vyšla stejná a to 2,754 GHz. U jednoho otvoru však snížení SE nastalo dříve a u více otvorů později. Proto je tyto vzorce nutno brát pouze jako orientační.

Podíl na útlum stínění má samozřejmě také materiál. Nerezová ocel je daleko méně vodivá než například hliník nebo měď. Proto bych pro rozšíření této problematiky navrhoval použít různé materiály použitých předních desek nebo plechy s různým pokovením.

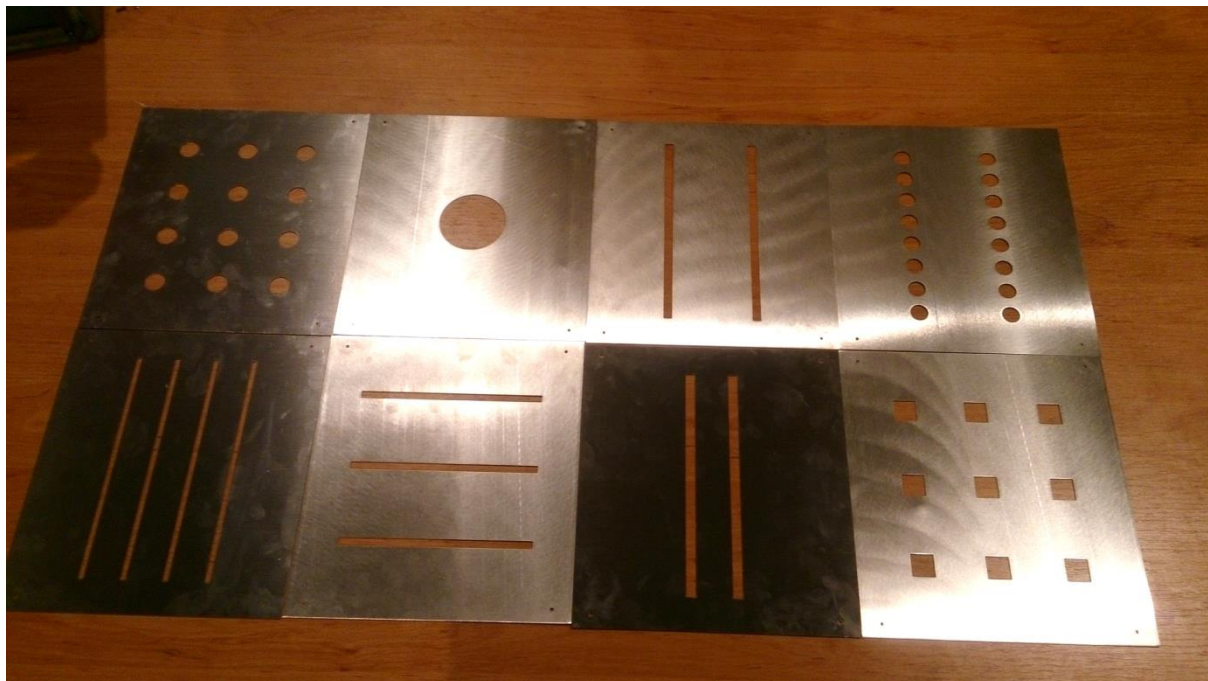
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita* [online]. Brno, 2002
[cit. 2016-01-20]. Dostupné z:
www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=Skripta EMC tisk.pdf svačina elektromagnetická kompatibilita
- [2] CHATTERTON, Paul A a M HOULDEN. *EMC: electromagnetic theory to practical design*. New York: Wiley, 1992. ISBN 047192878x.
- [3] KODALI, Prasad V. *Engineering electromagnetic compatibility*. IEEE PRESS, 1996. 369 s. ISBN 0-7803-1117
- [4] Paul C. R.: *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. John Wiley & Sons Ltd, USA, 1992. ISBN 0-471-54927-4
- [5] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zdeněk, RŮŽEK, Václav, ZACHAR, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2010. 266 s. ISBN 987-80-214-4202-3.
- [6] VACULÍKOVÁ, P., VACULÍK, E.: *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*, Grada Publishing, Praha, 1998. ISBN 80-7169-568-8
- [7] TONG, Xingcun Colin : *Advanced materials and design for electromagnetic interference shielding* [online]. [cit. 2016-02-08]. Dostupné z:
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=256696&lang=cs&site=ehost-live>
- [8] Hanus, S., Svačina, J.: *Vysokofrekvenční a mikrovlnná technika – přednášky*. VUT v Brně, 2002
- [9] Hromádka, M., Disertační práce: *Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů*, vPlzni, 2012
- [10] SAADI, H., OUSSAID, R.: *Materials effect on shielding effectiveness* [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [11] IEEE Standard Method for Measuring the Shielding Effectiveness of Enclosures and Boxes Having all Dimensions between 0,1 m and 2 m [online]. [cit. 2016-02-12]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>
- [12] IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures [online]. [cit. 2016-02-13]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

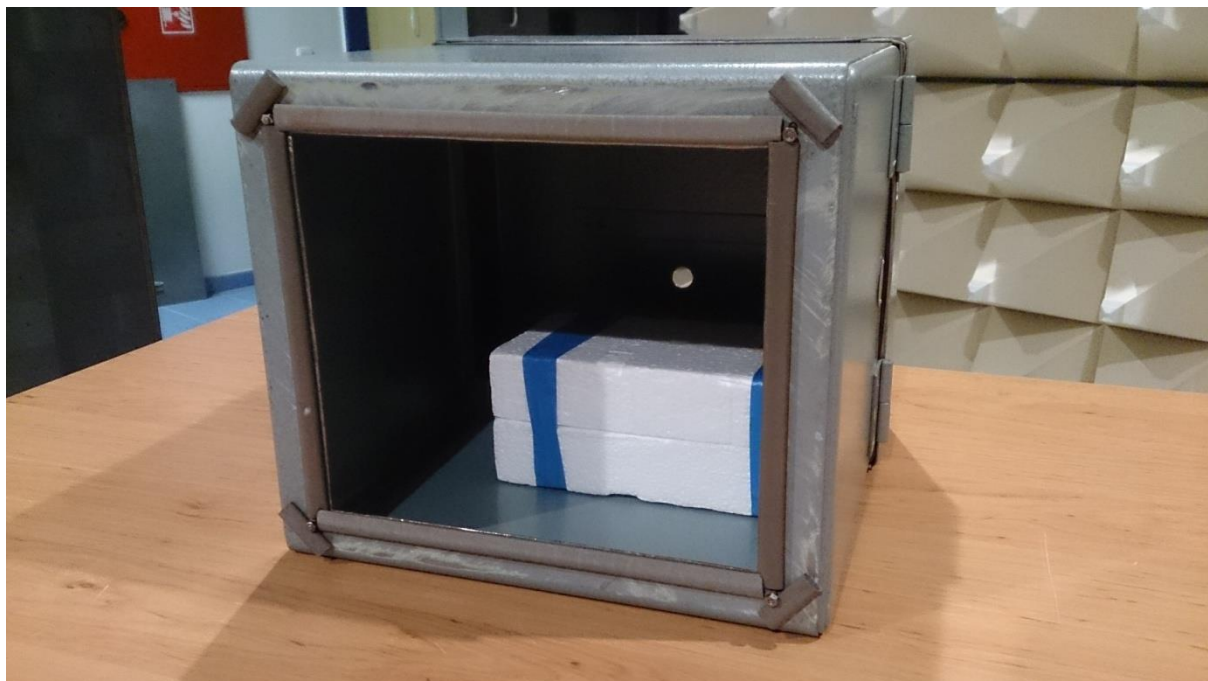
- [13] Anechoic Chambers /RF-Shielded Rooms [online]. [cit. 2016-04-12].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/downloads/Anechoic_Chambers/CHC.pdf
- [14] Product specs for Rohde & Schwarz SML03 [online]. [cit. 2016-04-12].
Dostupné z:
<http://www.gsamart.com/sp.cfm/SIGSOU/RS/SML03.html>
- [15] HI-6005 Electric Field Probe [online]. [cit. 2016-04-14]. Dostupné z:
<http://www.ets-lindgren.com/Hi-6005>
- [16] BBHA 9120 E - Double Ridged Broadband Horn Antenna [online].
[cit. 2016-04-15]. Dostupné z:
<http://www.schwarzbeck.de/en/antennas/broadband-horn-antennas/double-ridged-horn-antenna/405-bbha-9120-e-double-ridged-broadband-horn-antenna.html>
- [17] RF-Relay Switching Unit – RSU [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z:
www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RF-Relay_Switching_Unit.pdf
- [18] Broadband RF-Power-Amplifiers 10 kHz – 6 GHz [online]. [cit. 2016-04-18].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/cms/fileadmin/user_upload/documens/Catalogues/Amplifiers/Frankonia_amplifier_web.pdf
- [19] 2/4-Channel RF-Power Meter – PMS 1084 [online]. [cit. 2016-04-23].
Dostupné z:
http://www.frankoniagroup.com/downloads/EMC_Test_Equipment/RF-Power%20Meter.pdf?PHPSESSID=eb30c392e7f26bb962eaf5bc66dda3bb
- [20] ČSN EN 61000-5-7 - Elektromagnetická kompatibilita: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů – Stupně ochrany kryty proti elektromagnetickým rušením (EM kód). Praha: Český normalizační institut, prosinec 2001

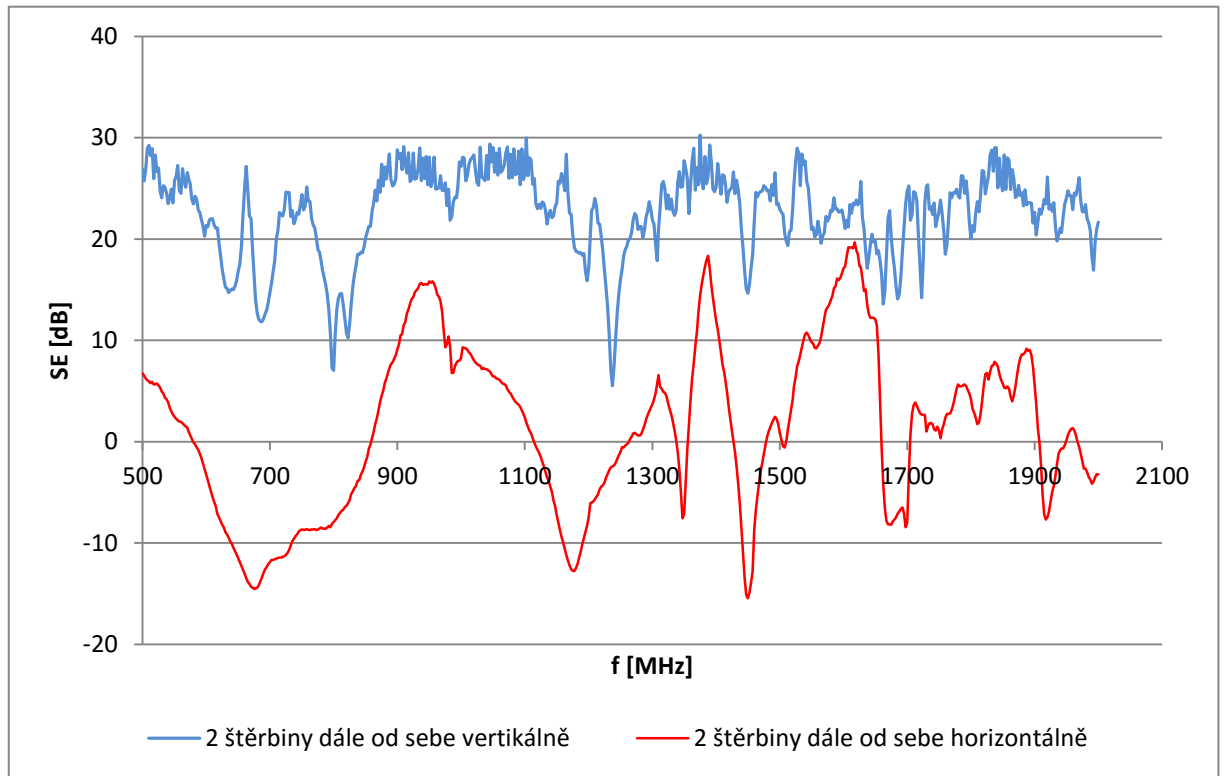
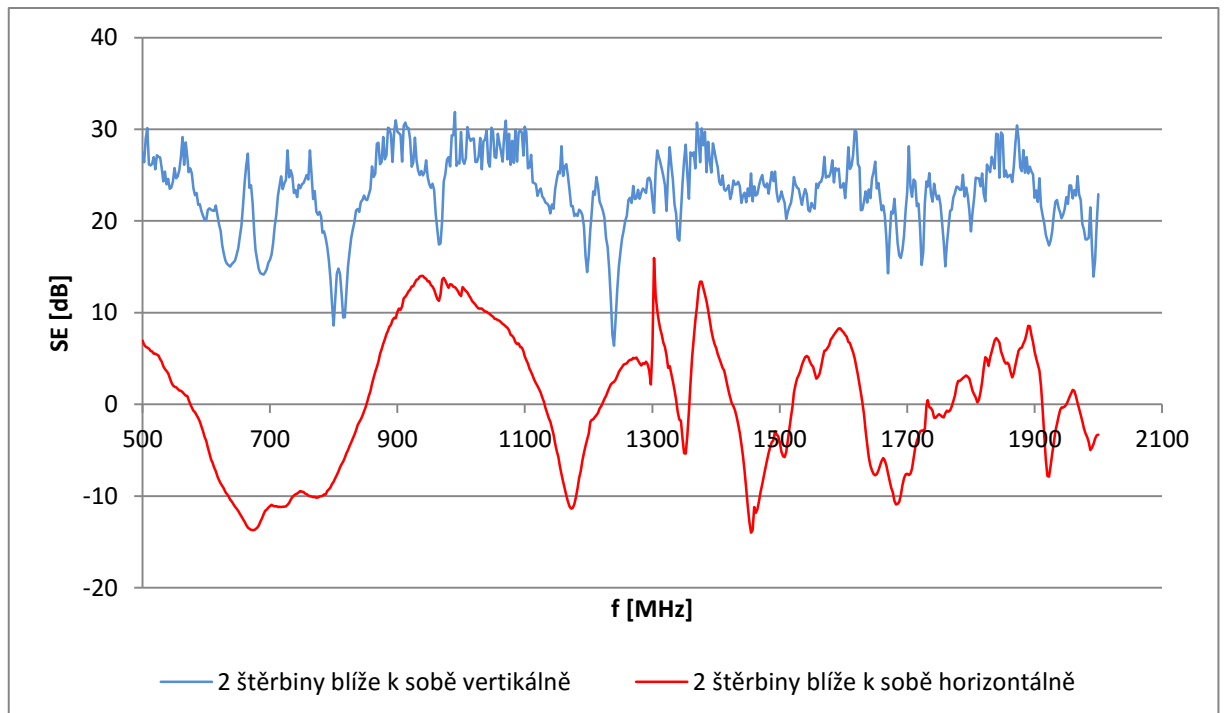
Přílohy

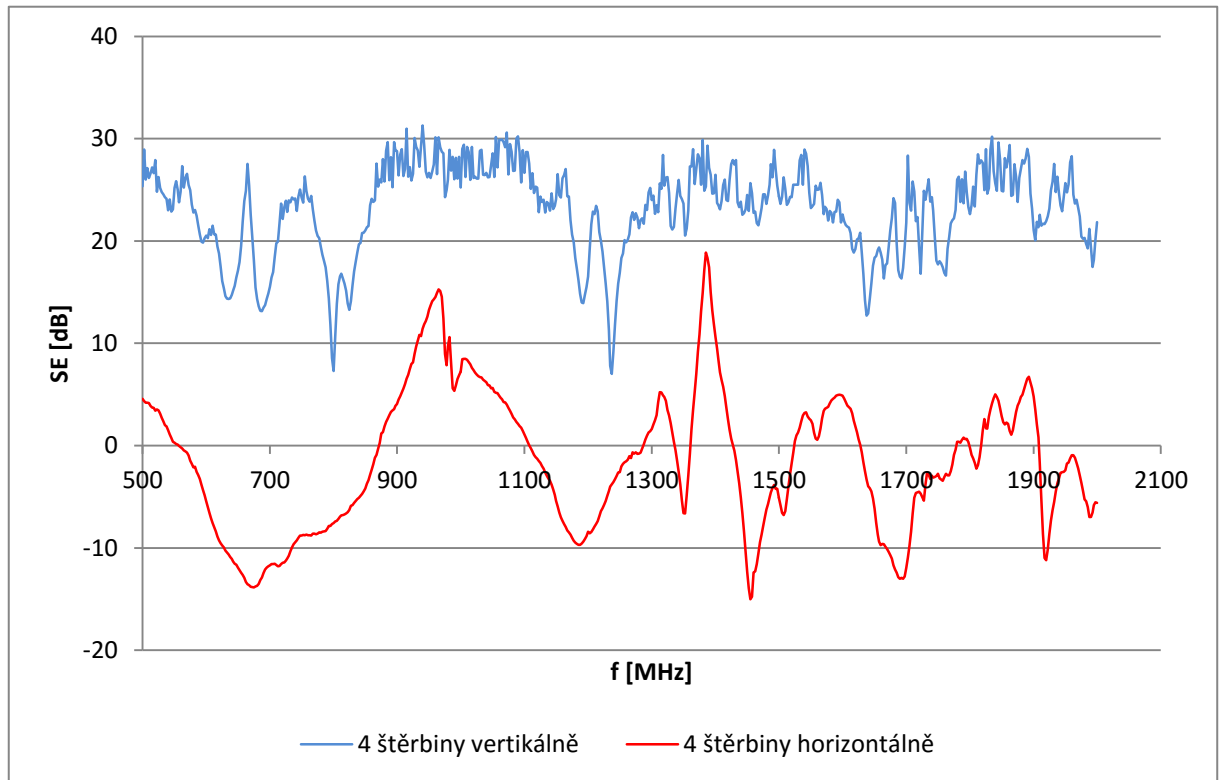
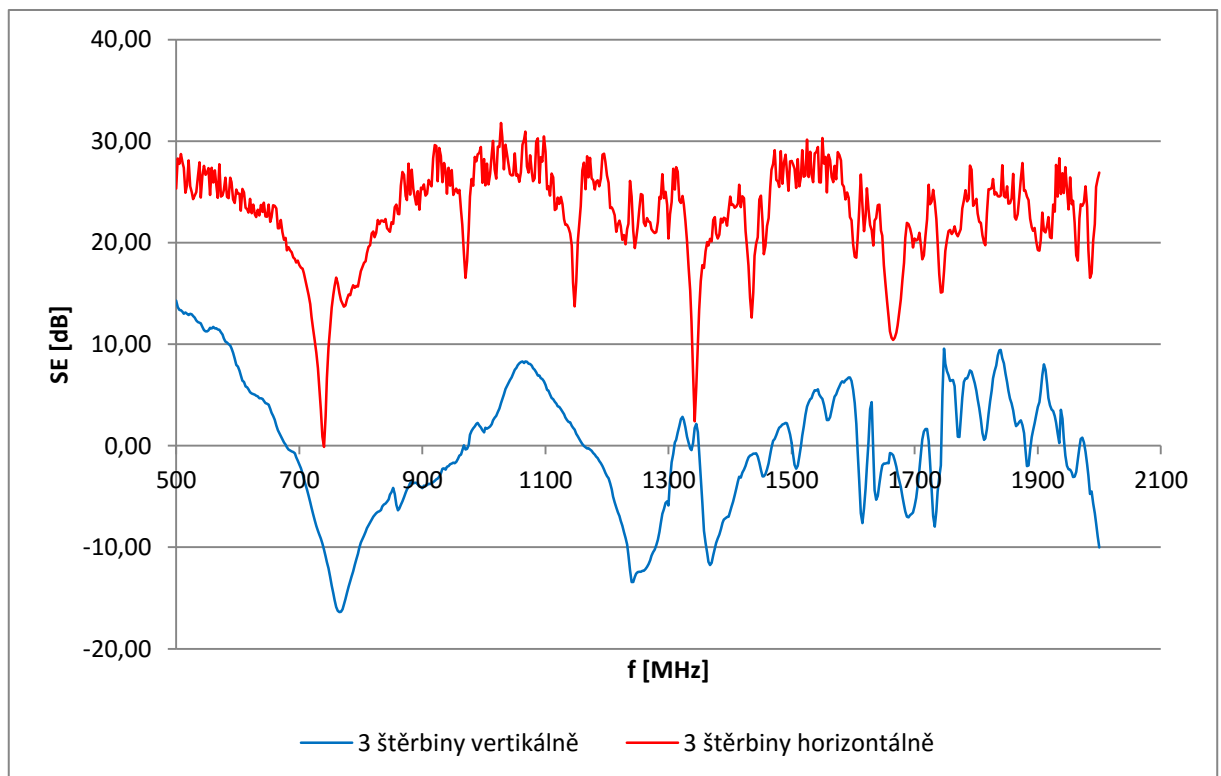
Příloha 1 : Varianty provedení čelních desek krytu

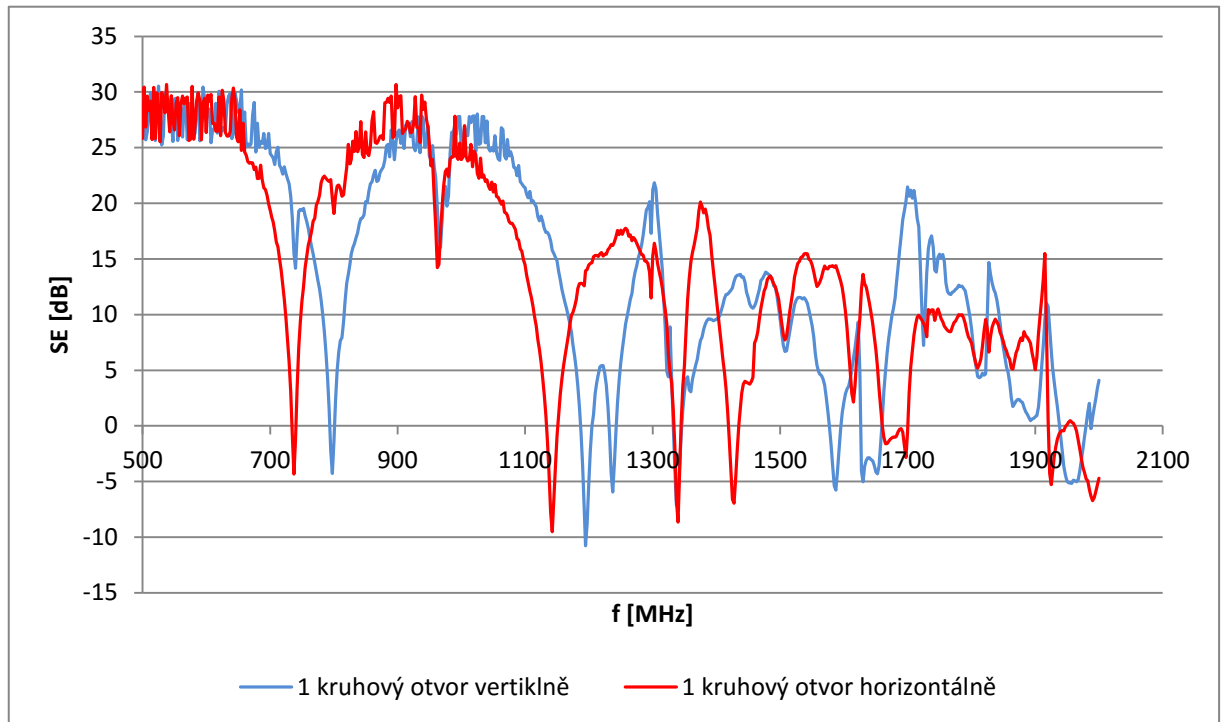
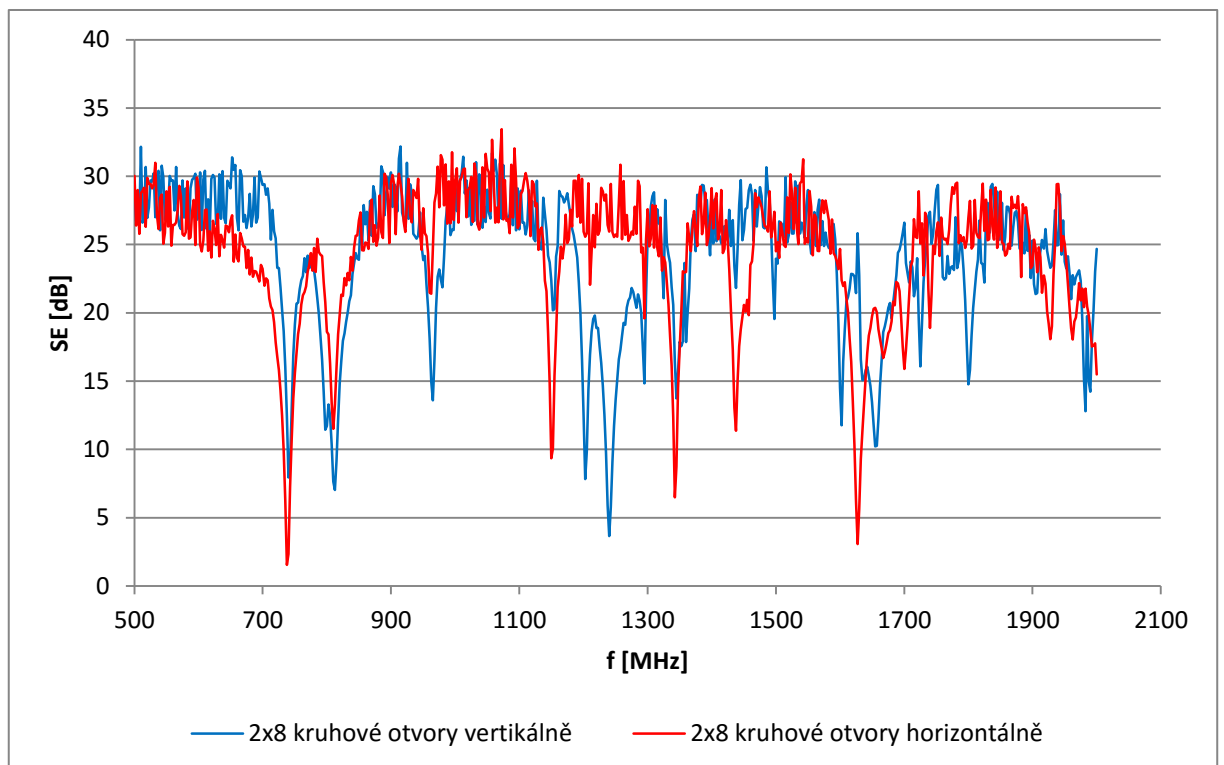


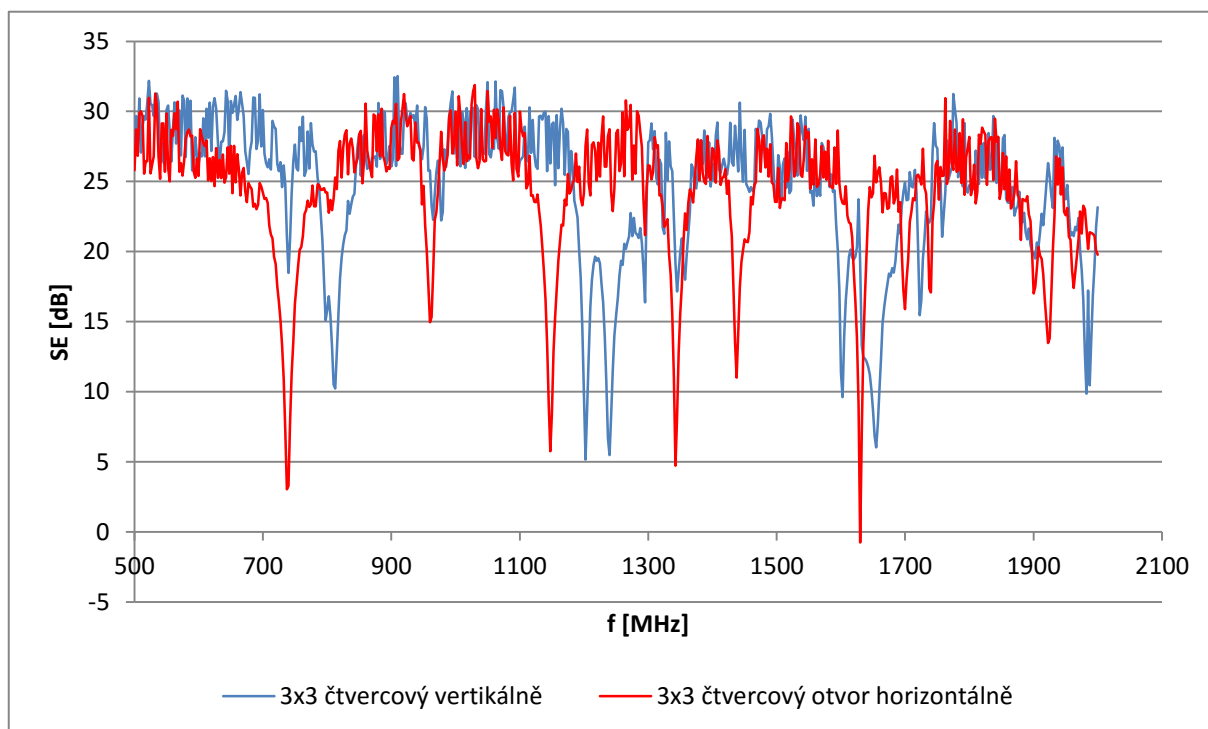
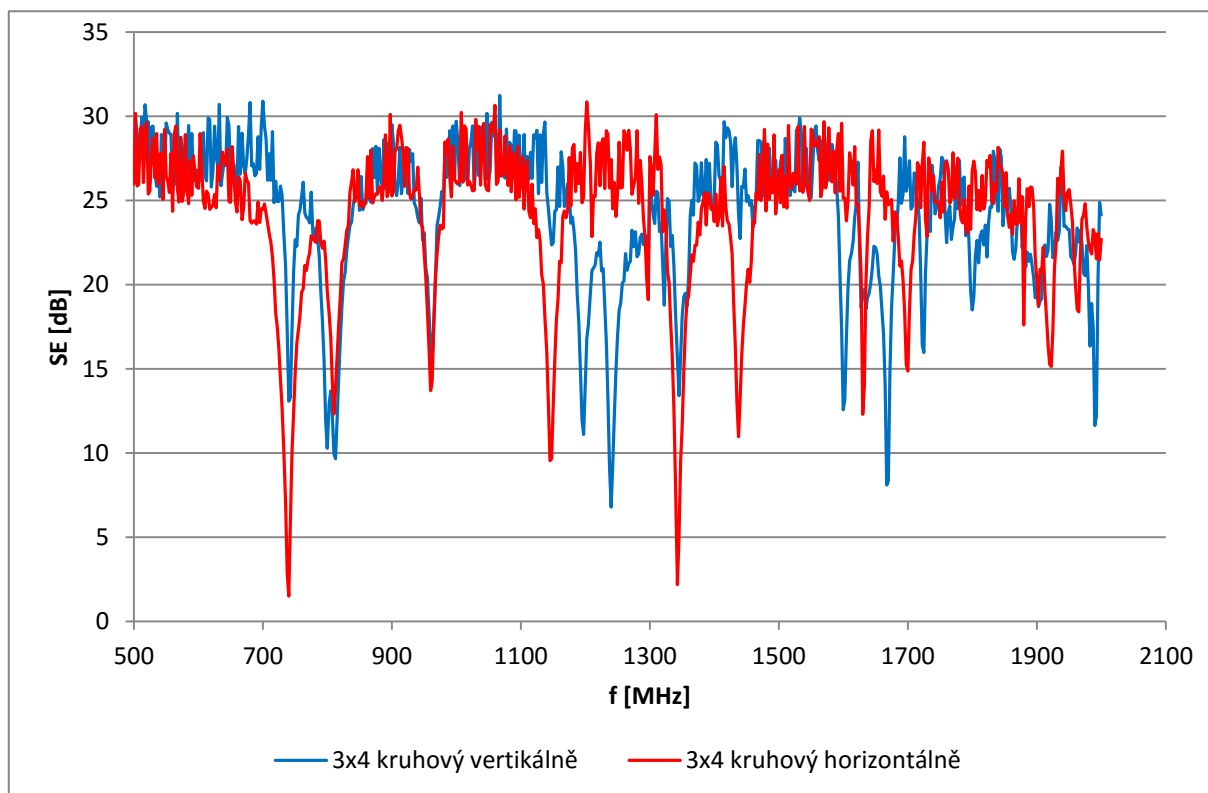
Příloha 2 : Pohled do krytu bez čelní desky



Příloha 3 : Závislost frekvence na SE pro variantu 1**Příloha 4 : Závislost frekvence na SE pro variantu 2**

Příloha 5 : Závislost frekvence na SE pro variantu 3**Příloha 6 : Závislost frekvence na SE pro variantu 4**

Příloha 7 : Závislost frekvence na SE pro variantu 5**Příloha 8 : Závislost frekvence na SE pro variantu 6**

Příloha 9 : Závislost frekvence na SE pro variantu 7**Příloha 10 : Závislost frekvence na SE pro variantu 8**

Příloha 11 : Detailní návrh čelní desky krytu (rozměry v mm)

