

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor
v oboru

Elektroenergetika

Ing. Miroslav Hromádka

Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů

Školitel: Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.

Datum státní doktorské zkoušky: 18.2.2008

Datum odevzdání práce: 30.3.2012

V Plzni, 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použité literatury.

V Plzni dne 30. března 2012

Miroslav Hromádka

Tato práce vznikla v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice.

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli Doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za veškerou věnovanou péči a odbornou podporu během studia. Mé vřelé díky patří kolegům Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. a Ing. Petrovi Martínkovi z oddělení elektrických přístrojů a techniky vysokého napětí za jejich ochotu a cennou pomoc při časově náročných měřeních.

Miroslav Hromádka

Abstrakt

Tato práce se zabývá problematikou elektromagnetického stínění, které je významnou součástí oboru elektromagnetická kompatibilita. Stínění zlepšuje odolnost zařízení proti rušivým elektromagnetickým polím. Proto jsou na začátku práce popsány zdroje rušivých signálů a přenosové cesty, kterými se tyto signály mohou šířit do prostoru a do okolních zařízení.

V další části jsou návody a doporučení, jak postupovat při návrhu stínícího krytu. Je zde popsáno, jak volit materiály a jak vypočítat tloušťku krytu, pokud chceme stínit blízké elektrické nebo magnetické pole nebo vzdálené pole. O tloušťce krytu většinou rozhoduje permeabilita použitého materiálu a frekvence pole. Nejvíce limitujícím faktorem pro kvalitu stínění jsou obvykle různé dveře, otvory, štěrby a různé jiné nehomogenity ve stěně krytu. Uvádím zde proto teoretické vzorce, které nám mohou přibližně ukázat, jaký negativní vliv tyto otvory mají. Splněním doporučení, která zmiňuji v této části, se dá tento vliv zmírnit. Jedná se zejména o různé konstrukční opatření nebo používání vlnovodů. Jako další výrazně negativní vliv na účinnost stínění je zde popsán jev dutinové rezonance.

Důležitou součástí návrhu krytu je i otestování jeho skutečné účinnosti stínění. V práci porovnávám dva měřicí postupy. První z nich je měření s anténovým setem na testování účinnosti stínění a druhý je postup, který jsem vyvinul v naší EMC laboratoři. Porovnávám výhody a nevýhody těchto metod a přikládám některé naměřené výsledky, zejména výsledky naší metodiky. Při testovacím měření jsem si ověřil, že je možné zachytit fyzikální jevy spojené se stíněním, popsané v teoretické části této práce. Dalším krokem bylo testování skutečného krytu, který se používá v průmyslovém prostředí. Tento kryt však neměl dobrou účinnost stínění, proto došlo k jeho úpravě podle již zmíněných doporučení. Porovnání účinnosti stínění základní a vylepšené verze krytu jsou uvedeny v závěru práce.

Klíčová slova:

Elektromagnetická kompatibilita, rušení, odolnost, účinnost stínění, přístrojový kryt, dutinová rezonance, vlnovod, měřicí metoda.

Abstract

This work deals with issue of electromagnetic shielding, which is important part of electromagnetic compatibility branch. Shielding improves immunity of equipment against electromagnetic field. That is the reason why are described sources of interference signals at the beginning of this work, with the transmission paths, by which is these signals propagate to space and surrounding devices.

In the next part are manuals and recommendations, how to proceed by designing of a shielding cover. There is described, how to choose materials and how to calculate thickness of the enclosure, if we want to shield the near electric or magnetic field or the far field. The thickness of the enclosure is mostly determined by permeability of used material and the frequency of the field. The most limiting factors for shielding effectiveness are usually doors, holes, slots and other inhomogeneities in the wall of the cover. That is why I bring in the theoretical equations, which can show us, how negative the influence of these apertures is. These influences can be reduced by fulfilling recommendations mentioned in this part. These are mainly different constructional treatment or using of waveguides. Other strong negative influence described in this chapter is cavity resonance phenomena.

Important step by designing the enclosure is measuring its actual shielding effectiveness. I compare two different measuring methods in the work. First of them uses shielding effectiveness antenna set and the second is method I developed in our laboratory. I discuss advantages and disadvantages of these methods and I attach some measured results, especially results of our method. During first testing measuring was verified, that I'm able to record physical effects in shielding, which are described in the theoretical part of this work. After that I proceeded to measuring of the enclosure commonly used in industry. But this enclosure had insufficient level of shielding effectiveness, so we applied some of the mentioned recommendations on it. Comparisons between standard and improved versions of the enclosure are at the end of this work.

Keywords:

Electromagnetic compatibility, interference, immunity, shielding effectiveness, enclosure, cavity resonance, waveguide, measuring method.

Obsah

Abstrakt	5
Obsah	7
Seznam fyzikálních veličin a zkratk	8
Cíle práce	11
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	12
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ EMC	12
1.2 ZDROJE RUŠENÍ	15
1.3 ELEKTROMAGNETICKÉ VAZBY PŘENOSU RUŠENÍ	17
1.3.1 Galvanická vazba	17
1.3.2 Induktivní vazba	18
1.3.3 Kapacitní vazba	19
1.3.4 Vazba elektromagnetickým polem	21
2 ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ	25
2.1 ÚČINNOST STÍNĚNÍ	25
2.2 DRUHY STÍNĚNÍ	26
2.2.1 Stínění elektrického pole	26
2.2.2 Stínění magnetického pole	29
Magnetostatické pole	29
Střídavá magnetická pole	33
Vícenásobné stínění	38
Možnosti omezení vlivu rušivého magnetického pole	39
2.2.3 Stínění rovinné elektromagnetické vlny	40
Útlum odrazem	41
Absorpční útlum	42
Útlum mnohonásobnými odrazy	43
Celkový útlum	44
Účinnost stínění v blízkém poli	45
2.2.4 Vlivy zhoršující účinnost stínění	47
Otvory	47
Dutinová rezonance	54
3 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI STÍNĚNÍ	56
3.1 MĚŘENÍ PODLE MIL-STD-285	56
3.2 MĚŘENÍ PODLE IEEE-STD-299	57
3.3 MĚŘENÍ PODLE ASTM D4935	58
3.4 MĚŘENÍ PODLE ČSN EN 61000-5-7	59
3.5 MĚŘENÍ POMOCÍ ANTÉNOVÉHO SETU	63
3.6 MĚŘENÍ POMOCÍ SYSTÉMU NA TESTOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI	69
3.6.1 Technické parametry systému	71
3.6.2 Testovací měření	75
3.6.3 Účinnost stínění rozváděče ve standardním provedení	80
Vzhled rozváděče	80
Nastavení měření	81
Naměřené a vypočtené hodnoty	82
3.6.4 Rozváděč v EMC verzi	85
Provedené úpravy	85
Nastavení měření	85
Naměřené a vypočtené hodnoty	86
4 ZÁVĚR	91
Literatura	95
Příloha A – Fotografie	98
Příloha B – Výsledky testovacího měření	104
Příloha C – Výsledky měření rozváděče ve standardní verzi	113
Příloha D – Výsledky měření rozváděče v EMC verzi	126
Publikační a výzkumná činnost	135

Seznam fyzikálních veličin a zkratk

Fyzikální veličiny a jejich jednotky

f ... Frekvence [Hz] [s^{-1}]

U, u ... Napětí [V]

U_r ... Rušivé napětí

I, i ... Proud [A]

t ... Čas [s]

R ... Odpor [Ω]

L ... Indukčnost [H]

C ... Kapacita [F]

C₁₃, C₂₃ ... Parazitní kapacitní vazby mezi vodiči číslicového obvodu

C_c ... Vazební kapacita mezi vodiči

C_g ... Vazební kapacita vodiče proti zemi

C_p ... Vazební kapacita vodivé desky proti zemi

E ... Intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]

E_i ... Intenzita elektrického pole uvnitř stíněného objektu

E₀ ... Intenzita elektrického pole vně stíněného objektu

H ... Intenzita magnetického pole [$A \cdot m^{-1}$]

H_i ... Intenzita magnetického pole uvnitř stíněného objektu

H₀ ... Intenzita magnetického pole vně stíněného objektu

Φ ... Magnetický tok [Wb]

S ... Plocha [m^2]

B ... Magnetická indukce [T]

r ... Hranice blízkého pole [m]

λ ... Vlnová délka [m]

c ... Rychlost světla, $3 \cdot 10^8$ [m.s⁻¹]

x ... Vzdálenost [m]

P ... Výkon [W]

P_c ... Výkon přijatý měřicí anténou při kalibraci

P_m ... Výkon přijatý měřicí anténou při testování účinnosti stínění

P_{noise} ... Výkon přijatý měřicí anténou vlivem šumu měřicího systému

l ... Délka štěrbin [m]

l_{ef} ... Efektivní délka antény [m]

K_s ... Koeficient stínění [-]

μ ... Permeabilita [H.m⁻¹]

ρ ... Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$]

R_m ... Magnetický odpor (reluktance) [H⁻¹]

δ ... Hloubka vniku [mm]

V ... Objem [m³]

Z ... Impedance [Ω]

Z_0 ... Charakteristická impedance volného prostoru ve vzdáleném poli

Z_M ... Charakteristická impedance vodivého prostředí

ϵ ... Permittivita [F.m⁻¹]

σ ... Konduktivita [S.m⁻¹]

ω ... Úhlová rychlost [Hz]

G ... Zisk antény [dB]

a ... Poloměr [m]

d ... Tloušťka stínění [m]

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

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

Seznam zkratk

EMC ... Elektromagnetická kompatibilita

EMI (Electromagnetic Interference) ... Elektromagnetické rušení

EMS (Electromagnetic Susceptibility) ... Elektromagnetická odolnost

LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse) ... Atmosférický výboj

ESD (Electrostatic Discharge) ... Elektrostatický výboj

AF ... Anténní faktor [m^{-1}]

SE (Shielding Effectiveness) ... Účinnost stínění

PY ... Permalloy - slitina železa a niklu

R (Reflection) ... Účinnost stínění odrazem [dB]

R_E ... Účinnost stínění odrazem blízkého elektrického pole

R_H ... Účinnost stínění odrazem blízkého magnetického pole

A (Absorption) ... Účinnost stínění pohlcením [dB]

M (Multiple Reflection) ... Účinnost stínění mnohonásobnými odrazy [dB]

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

Cíle práce

Prvním cílem práce je vytvoření komplexních doporučení a pravidel, podle kterých je možné stanovit konstrukční a technologický návrh přístrojového krytu z hlediska jeho elektromagnetického stínění. Důležitou součástí návrhu krytu je i posouzení vlivu jeho různých nehomogenit na celkovou účinnost stínění. Očekávané nepřesnosti teoreticky stanovené účinnosti stínění ovlivněné nehomogenitami stínícího krytu, logicky vyžadují nutnost ověřování kvality elektromagnetického stínění praktickými metodami.

Z tohoto důvodu je hlavním cílem této práce navržení experimentální metody, která bude korespondovat se současně známými postupy, ale umožní stanovit účinnost elektromagnetického stínění objektů s rozměry v řádu od desítek centimetrů do cca dvou metrů, pro které není metodika v současné době zpracována.

Dalším významným cílem je příprava experimentu a podrobné ověření navržené metody na modelovém uspořádání krytu, který umožní variantní provedení jeho elektromagnetického stínění. Tyto záměrné kvalitativní změny by měly umožnit porovnání teoretických předpokladů s výsledky experimentů a ověřit tak správnost měřícího postupu.

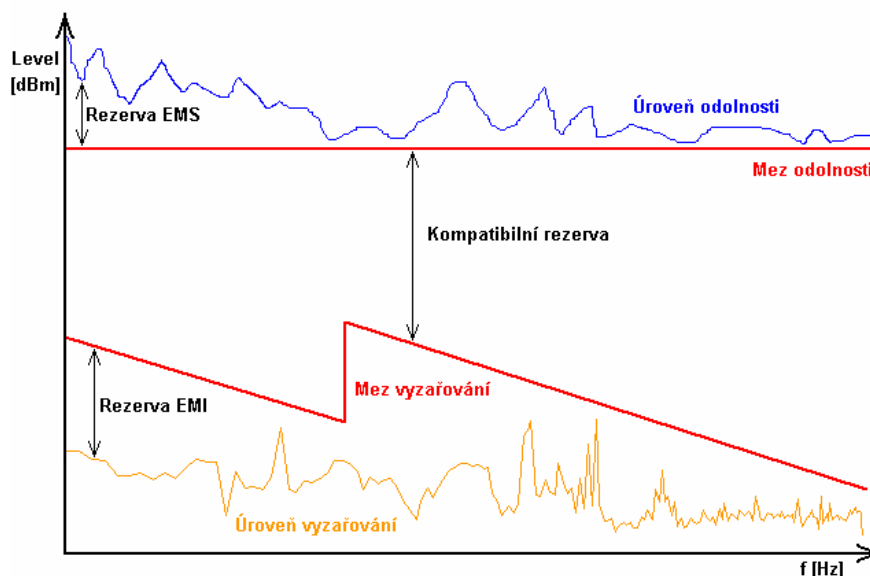
Ověření metodiky měření účinnosti elektromagnetického stínění na reálném objektu s různým provedením krytu a stanovení doporučení pro realizaci stínících opatření je finálním cílem práce.

1 Elektromagnetická kompatibilita

1.1 Základní rozdělení EMC

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost elektrického zařízení, přístroje nebo systému fungovat uspokojivě v elektromagnetickém prostředí, aniž by produkoval rušení ovlivňující činnost ostatních objektů v tomto prostředí.

Z definice vyplývá, že se kompatibilita dělí na dvě podoblasti - elektromagnetickou odolnost (susceptibilitu) a elektromagnetické rušení (interferenci). Pro každé zařízení je dána jeho maximální úroveň vyzařování v závislosti na frekvenci. Úroveň odolnosti všech zařízení nebo organismů (včetně jeho samého) ve společném prostředí musí tedy být výše.



Obr. 1.1: Úrovně EMC [1]

Tyto meze se tedy netýkají pouze přístrojů, ale i živých organismů. V takovém případě hovoříme o elektromagnetické kompatibilitě biologických systémů. Tento obor zkoumá úrovně odolnosti organismů a hledá úrovně vyzařování elektromagnetických signálů, tak aby nedocházelo k poškozování životního prostředí. Stanovování přípustných mezí vyzařování, je však komplikované, protože citlivost organismů na elektromagnetické pole je značně individuální. Nejsnáze měřitelné jsou tepelné účinky vysokofrekvenčních polí. Ne zcela prokázané jsou vlivy na nervový, srdeční nebo imunitní systém, popřípadě karcinogenní účinky. V České Republice jsou hygienické normy stanoveny v nařízení vlády 1/2008 o ochraně zdraví před

neionizujícím zářením [2] a novelou 106/2010. Tento zákon stanovuje maximální hodnoty indukované proudové hustoty [$A \cdot m^{-2}$], měrného absorbovaného výkonu [$W \cdot kg^{-1}$], měrné absorbované energie [$J \cdot kg^{-1}$], hustoty zářivého toku [$W \cdot m^{-2}$], intenzity elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$] a magnetické indukce [T] pro osoby pracující se zdroji záření a pro normální obyvatelstvo. Obtížnost stanovení hygienické úrovně dokazuje i to, že ve světě jsou v obdobných normách velké rozdíly těchto limit.

Oproti tomu se dají kompatibilní úrovně technických systémů celkem dobře změřit a otestovat. Zkoušek, které prokazují dostatečnou odolnost zařízení nebo nízkou úroveň vyzařování je celá řada. Jen některá důležitá zařízení, určená například do jaderných elektráren nebo vojenská zařízení, je třeba testovat celým spektrem zkoušek. U méně důležitých přístrojů se obvykle vyberou jen některé zkoušky, podle prostředí, ve kterém má být systém provozován. Podle toho o jaký jde přístroj, je zvažováno, na kterých frekvencích by mohl rušit a dále jakým způsobem a z jakých okolních zařízení může být rušen. Zdroj rušení, možné přenosové vazby a rušený objekt tvoří takzvaný základní řetězec EMC.

Zdroje rušení se dělí na přírodní a umělé. Mezi nejběžnější přírodní rušivé signály patří atmosférické výboje, elektrostatické impulsy, záření ze slunce nebo z vesmíru, přirozené radioaktivní záření a podobné jevy. Mezi umělé zdroje rušení (vytvořené člověkem) mohou patřit vlastně všechny elektrické systémy od výroby elektrické energie, přes přenos až po spotřebu. Ne vždy je generování rušení nějaký parazitní jev. To co je pro jeden přístroj užitečný a potřebný signál, může být pro jiný výrazný zdroj rušení.

Rušení se může přenášet různými cestami a vazbami. Nejčastěji to je přes napájecí, signálové a sdělovací vedení, zemněním, kapacitní a induktivní vazbou nebo vyzařováním elektrického a magnetického pole. Zlepšení úrovně elektromagnetické kompatibility lze dosáhnout omezením nebo přerušením těchto vazeb, například použitím filtrů nebo stínění.

Přijímačem rušení může být jakýkoliv technický nebo biologický systém.

Nelze samozřejmě technické systémy striktně rozdělit na zdroje a přijímače rušení. Jde spíše o jejich funkci a porovnání jejich úrovní rušení a odolnosti, aby se dospělo k rozhodnutí, zda je přístroj nebo jeho část spíše zdrojem nebo spíše přijímačem rušení. Ve skutečném elektromagnetickém prostředí není samozřejmě jen jeden

zdroj a jeden přijímač, ale celá řada třeba i vzdálených systémů, které se vzájemně ovlivňují. Při testování je tedy potřeba se postupně vždy zaměřit na jeden ze systémů a zkoumat, jak je ovlivňován ostatními systémy a jak ovlivňuje své okolí. Kvůli značnému počtu vzájemných komplikovaných vazeb je velmi těžké zkoumat kompatibilitu teoretickými výpočty nebo simulací. Počítačové simulace a modelování jsou však celkem vhodné při vývoji zařízení. Těžko však může nahradit přímé testování a měření, které lze také samozřejmě provádět už ve stadiu vývoje a šetřit tak pozdější náklady v případě, že by byl testován až hotový objekt a byl by vyhodnocen jako nekompatibilní.

Rušivé signály lze rozdělit podle délky jejich trvání, podle frekvenčního obsahu nebo podle způsobu šíření.

Pokud je nutné vyhodnotit délku trvání signálu, rozlišuje norma ČSN-EN 55014 signály impulsní, spojitě nebo kvaziimpulsní [3]. Impulsní (mžikový) signál je takový, který nemá dobu trvání delší než 200 ms a jehož odstup od ostatních signálů je nejméně 200 ms. Nemusí to být vždy jeden impuls, tato porucha se může skládat z velkého počtu impulsů, jejichž délka nepřesahuje 200 ms. Důležitý ukazatel pak je četnost těchto pulsů nebo frekvence jejich opakování. Například při zkoušce rychlými přechodovými jevy se používá zkušební signál složený z velkého počtu pulsů tvaru 5/50 ns, jejichž frekvence opakování je 5 kHz, délka jedné skupiny pulsů je 15 ms a odstup jednotlivých skupin pulsů je 300 ms. Nebezpečí krátkých impulsů může být ve velikosti jejich napětí a ve velkém frekvenčním obsahu.

Právě podle frekvenčního obsahu se dělí signály na úzkopásmové a širokopásmové, nebo na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční. Úzkopásmové jsou obvykle užitečné signály, například rozhlasové a televizní vysílání, signály mobilních telefonů nebo wifi sítě. Širokopásmové jsou obvykle signály pocházející z přírodních zdrojů nebo průmyslové rušení - spojitě i impulsní. Za nízkofrekvenční rušení jsou považovány signály do kmitočtu 10 kHz. Do 2 kHz se obvykle vyskytuje v napájecí síti a jsou na něj náchylné systémy závislé na kvalitě elektrické energie. Do 10 kHz jde o akustické rušení, na které mohou být citlivé například komunikační systémy. Vysokofrekvenční (od 10 kHz) je převážná většina rušivých signálů – přírodní zdroje rušení, rádiové vysílání, impulsy s velkou strmostí nárůstu napětí, atd.

1.2 Zdroje rušení

Zdrojem rušení, které se šíří po napájecí síti, jsou už samotné generátory v elektrárnách. Ty produkují vyšší harmonické napájecí sinusovky 50 Hz. Největšími zdroji harmonických kmitočtů jsou však výkonové spínané měniče. Další rušivá napětí, která se mohou objevit v napájecí síti, jsou přepětí při náhlém odlehčení zátěže, podpětí při připojení velkého odběru, výpadky napájecího napětí a přepětí způsobená přechodovými jevy.

Tyto přechodové jevy jsou způsobeny obvykle spínacími pochody. V sítích vn a vvn při spínání indukčních a kapacitních zátěží, v sítích nn při činnosti mechanických relé a stykačů nebo při tyristorovém spínání výkonových zařízení.

Při mechanickém odpojení obvodu obsahujícího indukčnost, vzniká rušivé napětí úměrné časové změně proudu $u = -L \cdot di/dt$. Toto přepětí může mít tak vysokou strmost nárůstu, že překoná elektrickou pevnost vzduchu mezi oddalujícími se kontakty. Dojde k zapálení oblouku, poklesu napětí mezi kontakty téměř k nule a tím k zániku výboje. Poté však dojde k dalšímu přechodovému jevu a celý děj se může opakovat, dokud nejsou kontakty dostatečně daleko od sebe. Vzniklé přepětíové impulsy mají velkou strmost nárůstu napětí, vysokofrekvenční obsah, opakují se asi tak 10x během 1 ms a dosahují až několika kV. K podobnému jevu může dojít, i když se kontakty k sobě přibližují, popřípadě když na sebe kontakty špatně dosednou nebo se při prudkém pohybu od sebe několikrát odrazí.

Při tyristorovém řízení velkých motorů dochází k opakovanému spínání velkých proudů a opět ke vzniku přepětíových špiček, které se superponují na napájecí napětí. Jejich frekvenční obsah je však několik desítek MHz a mohou se tedy vyzařovat do okolního prostoru.

Další vysokofrekvenční signály v síti vznikají při jiskření kartáčů na komutátorech točivých strojů.

Častým zdrojem velmi nebezpečného přepětí je atmosférický impuls (LEMP – Lightning Electromagnetic Pulse). Proud bleskového výboje má obvykle okolo 30 kA, frekvenční obsah do 100 MHz a energii až 10 MJ, takže účinek na zařízení není jen rušivý, ale často i ničivý [4]. Blesk, který zasáhne vedení vysokého napětí, způsobí přepětíovou vlnu, která putuje po vedení oběma směry a která se může induktivní vazbou a částečnou transformací dostat i do sítě nízkého napětí.

Všechny rušivé signály, impulsy a přepětí v napájecích sítích můžeme úspěšně omezit nebo potlačit instalováním vhodných filtrů a přepěťových ochran. Jsou však jevy, které se vyskytují nepravidelně nebo náhodně. Mezi ně patří například koróna a kapacitní výboje na vedeních vysokého a velmi vysokého napětí a elektrostatický výboj. U nich můžeme pouze vhodnými opatřeními předcházet jejich vzniku, pokud se však objeví, dají se jejich projevy jen velmi těžko omezit.

Koróna může v rozvodných a distribučních sítích zapálit při nějakém přepěťovém jevu nebo na nečistotách, otřepech a kapičkách vody na vedení. Koróna způsobuje elektromagnetické rušení o frekvencích několika desítek MHz a akustické rušení. Svými projevy tedy může rušit rádiové signály. Venkovní sítě vln však obvykle vedou mimo zastavěná území a rušení tedy nezpůsobuje závažné problémy.

Kapacitní výboje vznikají mezi nedokonale spojenými kovovými konstrukcemi nebo spoji v těsné blízkosti vodičů vysokého napětí. Typický příklad jsou kloubové spoje závěsných izolátorů. Mezi nimi může dojít ke vzniku izolační vrstvy z oxidů a k vysokofrekvenčnímu jiskření (až 1 GHz) při proražení této vrstvy. Výboje se z kovových částí snadno vyzařují do okolí a ruší rádiové a televizní vysílání. Nyní se však už začínají používat silikonové závěsné izolátory, u nichž tyto výboje nemohou vznikat.

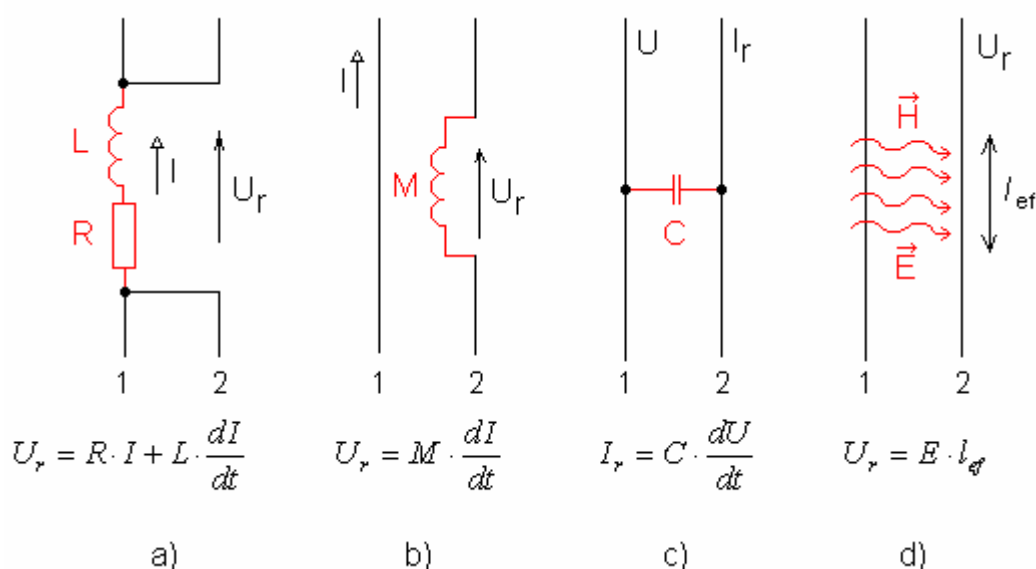
K elektrostatickému výboji (ESD – Electrostatic Discharge) dojde, pokud jsou vhodné podmínky k nahromadění elektrického náboje na povrchu nevodivého předmětu. Obzvláště snadno k tomu může dojít při tření materiálů z umělých hmot a syntetických tkanin při nízké vlhkosti vzduchu. Proud elektrostatického výboje je tvarem podobný atmosférickému výboji, má však mnohonásobně menší energii (10 mJ). Vzniklé napětí může za zvlášť nepříznivých podmínek dosahovat hodnot 20 až 30 kV a tím je elektrostatický výboj velmi nebezpečný pro integrované obvody a elektronické součástky. Elektrostatickému výboji můžeme předcházet volbou vhodných materiálů, snížením prašnosti prostředí, řízením vlhkosti vzduchu nebo ionizací prostředí opačným nábojem, než je vznikající elektrostatický náboj.

Další zdroje rušení, které nemůžeme v jejich činnosti omezovat, jsou zdroje přírodní jako sluneční vítr nebo kosmické záření a nebo zdroje užitečného vysílání. Patří sem například rádiové a televizní vysílače, satelitní vysílání, radarové záření, mikrovlnná internetová pojítka, GPS, wifi sítě. Toto všechno jsou vlastně zdroje kontinuálního

rušení. U umělých zdrojů můžeme alespoň regulovat jejich výkon, aby vyzařování nebylo příliš silné. I když například při Citizen Band vysílání se často stává, že dojde k překročení maximálního povoleného výkonu 4 W a tím k nepřiměřenému rušení. Proti těmto zdrojům kontinuálního rušení se můžeme bránit na straně přijímače rušení a to například právě elektromagnetickým stíněním.

1.3 Elektromagnetické vazby přenosu rušení

Podle fyzikálních principů se přenosové vazby dělí na galvanickou, induktivní, kapacitní a na vazbu polem (vyzařováním). Pokud by bylo možné úplně přerušit přenosové vazby, vznikl by dokonale kompatibilní systém. Tyto základní elektromagnetické vazby mezi dvěma obvody jsou znázorněny na obrázku 1.2:



Obr. 1.2: Přenosové vazby: a) galvanická, b) induktivní, c) kapacitní, d) polem [5]

1.3.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba je vazba přes společnou impedanci dvou nebo více obvodů nebo elektrických systémů. Tato impedance je obvykle tvořena RL prvky, přes které protéká společný proud obvodů. Napětí vzniklé na impedanci průtokem proudu prvního obvodu, může být pro druhý obvod rušivé. O tom jaká část impedance se projeví více pro přenos rušivého napětí, rozhoduje frekvence proudu. Na nízkých kmitočtech (do kHz) je hlavní přenos přes odporovou část, na vysokých kmitočtech je rozhodující induktivní část. Rychlé časové změny proudu na indukčnosti totiž vyvolají výrazné napěťové špičky. Navíc hrozí při připojení kapacitní zátěže vznik

rezonančního obvodu a tím k zesílení společné vazby. Impedance může být tvořena například společným zdrojem napájení, společným řídicím obvodem nebo společným zemnicím systémem.

Právě parazitní zemní smyčka bývá častou příčinou problémů s rušením. Průtokem bludných zemních proudů vzniká mezi dvěma zemnicími body rušivé napětí. Tento problém můžeme částečně odstranit použitím společné zemní svorky (obvykle u zdroje napájení). Je ovšem třeba dostatečně nadimenzovat zemnicí vodič a zemnicí plochu. Avšak vysokofrekvenční signály se mohou částečně uzemňovat i přes parazitní kapacity zátěže proti zemi a tím opět způsobit problém s rušivým zemním napětím. Existuje však několik možností jak zvýšit impedanci zemní smyčky nebo obvody úplně oddělit. Velmi dobré je použití optoelektrických převodníků a optického kabelu pro přenos signálu nebo použití optočlenu, který však může mít také parazitní rozptylové kapacity. Časté je i použití oddělovacího transformátoru, případně s dodatečným stíněním pro omezení parazitní kapacitní vazby. Impedanci zemní smyčky pro vysoké kmitočty můžeme zvýšit nasazením feritových kroužků, útlumového pláště nebo neutralizačního transformátoru (Balun) na propojovací vedení.

1.3.2 Induktivní vazba

Při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká v okolí vodiče magnetické pole stejného charakteru, jaký má proud, který ho vyvolal. Časově proměnné magnetické pole indukuje do okolních elektrických obvodů rušivé napětí, jehož velikost je podle Faradayova indukčního zákona [5]:

$$U_r = -\frac{d\Phi}{dt} \approx -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -S \cdot \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad [V] \quad (1.1)$$

Kde $S [m^2]$ je plocha smyčky, kterou tvoří vodiče rušeného obvodu.

Intenzita magnetického pole ve vzdálenosti $r [m]$ od vodiče kruhového průřezu je:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.2)$$

Velikost indukovaného rušivého napětí tedy přibližně vychází:

$$U_r = -\frac{\mu_0 \cdot S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad [V] \quad (1.3)$$

Takže velikost rušivého napětí závisí na ploše smyčky do které se napětí indukuje, na vzdálenosti obou obvodů a na časové změně proudu, který vyvolává rušivé napětí. Z tohoto vzorce tedy lze odvodit i opatření pro minimalizaci rušivého napětí. Musí se zkrátit délka souběžně jdoucích vodičů obou obvodů, zmenšit smyčka z vodičů rušeného obvodu a zvětšit vzdálenost mezi obvody. Zmenšit plochu smyčky rušeného obvodu lze i tím, že se otočí kolmo k ploše smyčky rušivého obvodu. Pro omezení induktivní vazby je účinné i zkroucení vodičů rušeného obvodu, vložení smyčky nakrátko nebo odstínění celého rušeného obvodu.

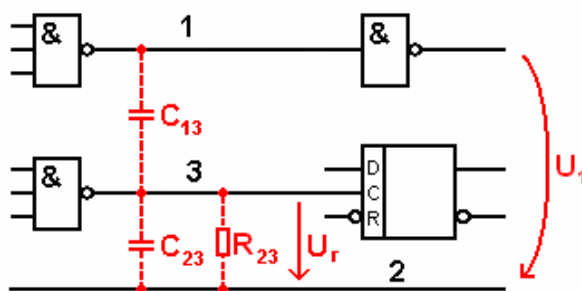
Těžko však lze ovlivnit stavy, kdy je protékající proud velký a má rychlé časové změny. To nastává například při poruchových stavech, úderu blesku do vedení (strmost desítek kA/ms) nebo elektrostatickém výboji (strmost desítek A/ns). Při těchto situacích je indukované napětí tak velké, že může dojít ke zničení obvodu.

1.3.3 Kapacitní vazba

Kapacitní přenos rušivého napětí přes parazitní kapacity nastává mezi každými obvody s rozdílným potenciálem. Typickým příkladem silné kapacitní vazby je dlouhý souběh vodičů.

Pokud existují galvanicky oddělené obvody, jejichž vodiče jdou paralelně vedle sebe, je možné vzájemné kapacitní vazby obvodů omezit například zkroucením obou vodičů zdroje rušení a odděleně od nich obou vodičů rušeného obvodu. Tím se dosáhne zároveň omezení induktivní vazby, jak je popsáno v předcházející kapitole. Pokud není zkroucení možné, mohou se použít stíněné vodiče. Pro omezení parazitních kapacit je nutné stínění dobře uzemnit (viz kapitola 2.2.1).

Ve vícežilových kabelech jsou kapacitní vazby mezi jednotlivými vodiči a vazby vodičů ke společnému vztažnému vodiči. K obdobnému problému se společným vodičem dochází často v číslicových obvodech.



Obr. 1.3: Příklad parazitních kapacitních vazeb v číslicovém obvodu [5]

Na obrázku 1.3 je zobrazen příklad kapacitních vazeb signálových vodičů 1, 3 a společného vztažného vodiče 2. Rušivé napětí, které se přenesou z vodiče 1 do vodiče 3, je:

$$U_r = U_1 \cdot \frac{C_{13}}{C_{13} + C_{23}} \quad [V] \quad (1.4)$$

Pokud je ve vodiči 1 pulzní napětí, pak přenesené rušivé napětí je přibližně:

$$U_r \approx R_{23} \cdot I_r = R_{23} \cdot C_{13} \cdot \left(\frac{\Delta u_1}{\Delta t} \right) \quad [V] \quad (1.5)$$

Opatření pro zmenšení přeneseného napětí jsou tedy:

- Snížení hodnoty odporu mezi vodiči 2 a 3 na co nejmenší hodnotu
- Zmenšení kapacity C_{13} oddálením vodičů a jejich co nejkratším souběhem nebo snížení permitivity materiálu mezi vodiči
- Zvětšení kapacity C_{23} přiblížením vodičů
- Snížení opakovací frekvence signálů U_1 na co nejnižší úroveň postačující k správnému chodu obvodu
- Vložení uzemněného (stínícího) spoje na desku mezi vodiče 1 a 3

Problém působí i kapacity přívodů proti společné zemi. Vzniká tak zemní smyčka, přes kterou protékají z přívodů kapacitní proudy, které vyvolávají na zařízení rušivé napětí. Tyto parazitní kapacity proti zemi lze omezit použitím stíněného přívodního vodiče. Platí zde ovšem omezení pro vysoké frekvence, neboť s rostoucí frekvencí roste impedance stínění a proud, který protéká stíněním, tak může vyvolat na zařízení rušivé napětí.

Induktivní a kapacitní vazba se často označují jako vazba blízkým polem. Za hranici blízkého pole je označována vzdálenost r od zdroje rušení taková, že platí:

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} = \frac{c}{2\pi f} \quad [m] \quad (1.6)$$

Pokud je přijímač rušení ve větší vzdálenosti než r , hovoříme o vazbě elektromagnetickým polem (vazba vyzařováním). Problémy s rušením způsobeným induktivní a kapacitní vazbou tedy nastávají zejména, jsou-li dlouhé úseky vodičů vedeny v těsné blízkosti. Například v budovách a průmyslových podnicích jsou silové

a datové vodiče uloženy v dlouhých, úzkých kanálech, kde není dostatečný prostor na oddělení vodičů a bylo by příliš nákladné, budovat pro různé typy vodičů oddělené šachty. V takovém případě je nejúčinnější obranou před přenosem rušení rozdělení vodičů do sektorů podle jejich druhu a elektromagneticky je odstínit.

1.3.4 Vazba elektromagnetickým polem

Při vzdálenosti od zdroje rušení větší než podle vzorce (1.6), se už nemůže uplatnit induktivní nebo kapacitní vazba. Rušení se do prostoru šíří vyzářeným elektromagnetickým polem. Mezi zdroje takového rušení patří samozřejmě všechny vysílače užitečných signálů, sluneční vítr, vysokofrekvenční složka průmyslového rušení a podobné zdroje. Elektrické pole, které vyvolá zdroj rušení ve vzdálenosti x [m], má intenzitu úměrnou vyzářovanému výkonu P [W] [5]:

$$E_x = \frac{\sqrt{30 \cdot P}}{x} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.7)$$

Do zařízení se takovéto rušení dostává navázáním na přívodní vodiče nebo přes anténní vstup. Rušivé napětí, které vznikne na anténě (přívodním vodiči) je:

$$U_r = E_x \cdot l_{ef} = E_x \cdot \frac{1}{AF} \quad [V] \quad (1.8)$$

Kde l_{ef} [m] je efektivní délka antény (převrácená hodnota anténního faktoru).

Takže například do dipólové antény s délkou ramen 10 cm se v elektrickém poli $1 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ naindukuje napětí velikosti 100 mV.

Pokud se bude uvažovat místo rovné antény (vodiče) smyčka o ploše S [m²], pak pro příchozí sinusovou vlnu o vlnové délce λ [m] je indukované rušivé napětí [6]:

$$U_r = \frac{j \cdot 2\pi \cdot E_x \cdot S}{\lambda} \quad [V] \quad (1.9)$$

Takže například pro vlnu o frekvenci 100 MHz a intenzitě $10 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ (intenzita pole používaná pro zkoušky v bezodrazové komoře ZČU) se do smyčky 10x10 cm naindukuje rušivé napětí 0,21 V.

Proti vzniku rušivého napětí se můžeme bránit snižováním výkonu vysílačů (pokud je to možné), vysokofrekvenčními filtry na vstupu zařízení nebo zeslabením

elektromagnetické vazby. To realizujeme pomocí stínící přepážky, která snižuje intenzitu pole, které se dostane k přijímači rušení.

Stíněním neomezujeme jen intenzitu přichozího rušení, ale i intenzitu pole produkovaného samotným stíněným přístrojem. Pokud budeme uvažovat rovný vodič protékáný proudem, pak pole v okolí vodiče bude podle [6]:

$$E_r = 60 \cdot I \cdot l \cdot \left(\frac{1}{r^2} - \frac{j \cdot \lambda}{2\pi \cdot r^3} \right) \cos \sigma \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.10)$$

$$E_\sigma = \frac{Z_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot r} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \right)^4} \sin \sigma \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.11)$$

$$H_\phi = \frac{I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot r} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r} \right)^2} \sin \sigma \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.12)$$

Kde I [A] je proud protékající vodičem, l [m] je délka vodiče, λ [m] je vlnová délka, r [m] je vzdálenost k bodu ve kterém počítáme intenzitu pole a $Z_0 = 377 \Omega$ je impedance volného prostoru.

Tyto rovnice platí pro vodič ve volném prostoru, pro jehož délku l platí, že je menší než vzdálenost r a mnohem menší než vlnová délka λ .

E_r je maximální pro úhel $\sigma = 0$. Pro tento úhel má intenzita směr podle osy vodiče a velmi rychle klesá s poměrem r^2 a r^3 . Zajímají nás tedy především složky E_σ a H_ϕ , které nabývají maxima pro $\sigma = 90^\circ$. Ve vzdáleném poli ($r \gg \lambda/2\pi$) můžeme psát:

$$H = \frac{I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot r} \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.13)$$

$$E = \frac{Z_0 \cdot I \cdot l}{2 \cdot \lambda \cdot r} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.14)$$

Takže při průchodu proudu 10 mA vodičem délky 5 cm bude na frekvenci 100 MHz ve vzdálenosti 10 m od vodiče elektrické pole přibližně $76 \text{ dB}\mu\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$.

Pokud nebude proud protékat rovným vodičem, ale proudovou smyčkou, pak složky vzniklého pole budou [6]:

$$H_r = \frac{I \cdot S}{\lambda} \cdot \left(\frac{j}{r^2} + \frac{\lambda}{2\pi \cdot r^3} \right) \cos \sigma \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.15)$$

$$H_{\sigma} = \frac{\pi \cdot I \cdot S}{\lambda^2 \cdot r} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r}\right)^4} \sin \sigma \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.16)$$

$$E_{\Phi} = \frac{Z_0 \cdot \pi \cdot I \cdot S}{\lambda^2 \cdot r} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi \cdot r}\right)^2} \sin \sigma \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.17)$$

Kde $S [m^2]$ je plocha smyčky, ostatní veličiny a jednotky jsou stejné, jako v předchozím případě.

Vzorce platí pro zjednodušený případ smyčky umístěné ve volném prostoru, jejíž rozměry jsou menší než vzdálenost r a mnohem menší než vlnová délka.

Složka H_r je maximální pro úhel $\sigma = 0$ a její vliv je hlavně uprostřed smyčky ve směru její osy. Dále tato intenzita rychle klesá s poměrem r^2 a r^3 .

V rovině cívky pro úhel $\sigma = 90^\circ$ jsou naopak maximální složky H_{σ} a E_{Φ} . Pro vzdálené pole můžeme jejich rovnice zjednodušit na:

$$H_{\sigma} = \frac{\pi \cdot I \cdot S}{\lambda^2 \cdot r} \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (1.18)$$

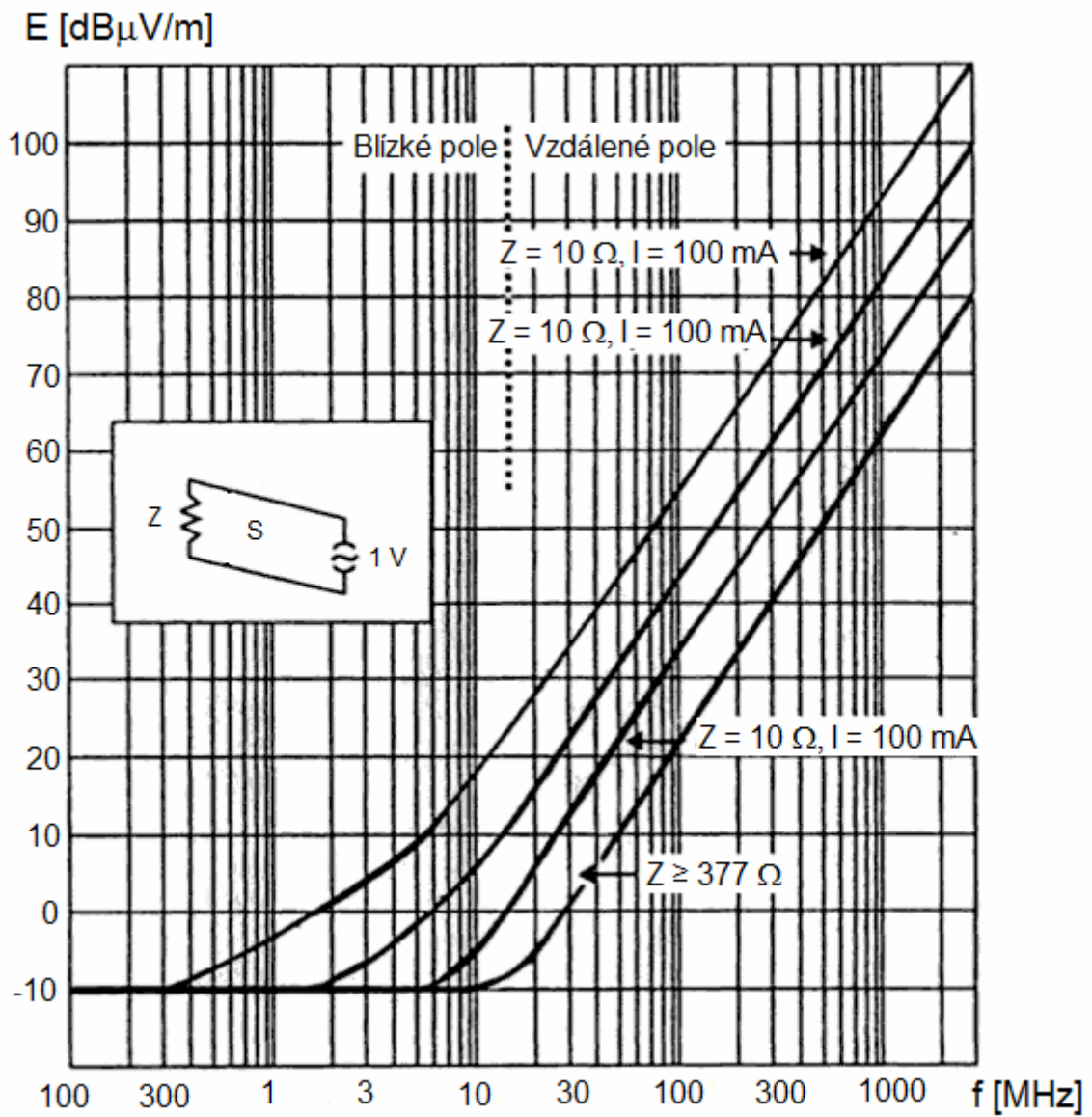
$$E_{\Phi} = \frac{Z_0 \cdot \pi \cdot I \cdot S}{\lambda^2 \cdot r} \quad [V \cdot m^{-1}] \quad (1.20)$$

Emise na frekvenci 100 MHz z proudové smyčky o ploše $0,01 m^2$ protékané proudem 10 mA budou ve vzdálenosti 10 m přibližně $62 dB_{\mu V} \cdot m^{-1}$.

Pokud by takto zjištěné hodnoty rušivého pole překračovaly normami předepsané limity, bylo by nutné navrhované zařízení (nebo jeho část) odstínit.

V [6] uvádí autor grafy pro určení intenzity elektrického pole v určité vzdálenosti od jednoduchého elektrického obvodu. Následující graf je počítán pro vzdálenost 3 m od obvodu o ploše $1 cm^2$ se zdrojem o napětí 1 V. Pro přepočítání intenzit při jiném napětí zdroje $U [V]$ a jiných rozměrech obvodu $S [cm^2]$ se musí k hodnotám přičíst činitel:

$$E_K = 20 \log U + 20 \log S \quad [dB_{\mu V} \cdot m^{-1}] \quad (1.21)$$



Obr. 1.4: Intenzita elektrického pole ve vzdálenosti 3 m od obvodu o ploše 1 cm^2 [6]

2 Elektromagnetické stínění

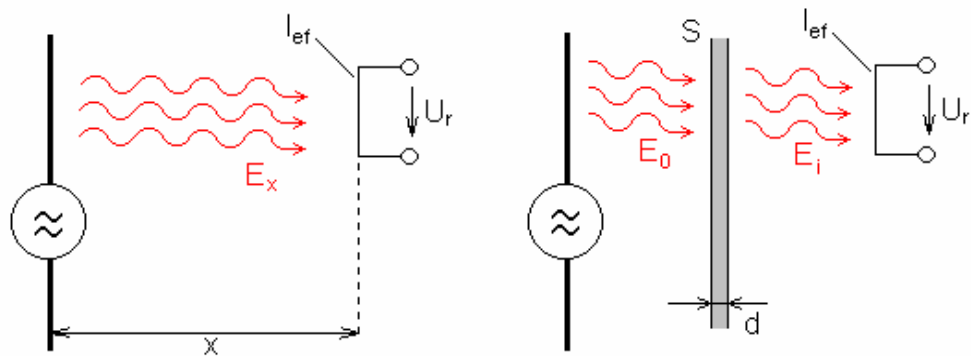
Stínění je jedním ze základních prostředků, jak zajistit dostatečnou úroveň EMC. Vhodným stíněním je možné jak snižovat elektromagnetické emise vyzařované ze zdrojů rušení tak zajišťovat dostatečnou úroveň odolnosti citlivých zařízení. Stínění tedy lokalizuje rušivé elektromagnetické pole v ohraničeném prostoru (nebo mimo ohraničený prostor) a zabraňuje jeho šíření mimo tento prostor (nebo do tohoto prostoru). Často není nutné stínit celý přístroj, ale z hospodárných důvodů pouze část zařízení, která působí jako zdroj rušení. Chce-li se však zabránit nežádoucím vazbám mezi jednotlivými citlivými obvody zařízení, je třeba odstínit každou součást samostatně. Zdroj rušení už by pak nebylo nutné stínit, pokud by úroveň jeho vyzařování nepřekračovala limity dané normou pro konkrétní typ zařízení. K nákladnému stínění jednotlivých součástí by se však mělo přikročit až po vyčerpání ostatních možností zvýšení odolnosti, například optimálního návrhu a konstrukce přístroje.

Už při projektování krytu přístroje, který plní nosnou funkci, ochranu před vnějšími vlivy prostředí nebo tvoří bariéru před nebezpečným dotykem, je třeba myslet i na funkci dobrého elektromagnetického stínění. Takovýto postup může ušetřit náklady, které by mohly nastat při pozdějším přepracovávání koncepce krytu.

2.1 Účinnost stínění

Kvalitu provedeného stínění lze posoudit pomocí koeficientu stínění K_s , který je definován jako poměr intenzity elektrického pole E_i [$V.m^{-1}$] (magnetického pole H_i [$A.m^{-1}$]) uvnitř stíněného objektu a intenzit E_0 (H_0) v tom samém bodě bez stínícího krytu (intenzita pole dopadajícího na stínící přepážku) [7]:

$$K_s = \frac{E_i}{E_0} \quad \text{nebo} \quad K_s = \frac{H_i}{H_0} \quad (2.1)$$



Obr. 2.1: Vazba elektromagnetickým polem a vliv stínění na šíření pole [5]

Pro praktické účely se z tohoto poměru počítá účinnost stínění (SE – Shielding Effectiveness), která udává zeslabení rušivého pole stíněním přímo v decibelech:

$$SE [dB] = 20 \cdot \log \frac{1}{K_s} = 20 \cdot \log \frac{E_0}{E_i} \quad \text{nebo} \quad SE [dB] = 20 \cdot \log \frac{H_0}{H_i} \quad (2.2)$$

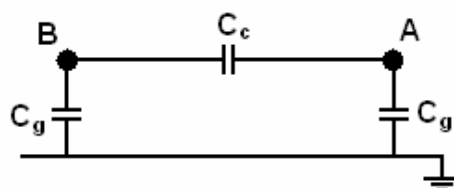
V případě, že nelze posoudit elektrické a magnetické pole odděleně, musí se účinnost stínění definovat podle výkonu:

$$SE [dB] = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_i} \quad (2.3)$$

2.2 Druhy stínění

2.2.1 Stínění elektrického pole

Princip stínění elektrického pole spočívá v odstranění kapacitní vazby mezi objekty. Pro vytvoření stínícího efektu je nejlepší použít celokovový kryt. Žádný kryt však není zcela dokonalý a na přenosu elektrického pole se pak mohou podílet různé parazitní kapacity. O tom, jak velká část pole se přenesse do stíněného objektu tedy rozhoduje rozdělení kapacit. To je možné demonstrovat na následujícím jednoduchém případě. Na obrázku 2.2 jsou dva paralelní vodiče A a B, které mají mezi sebou vzájemnou kapacitní vazbu reprezentovanou kapacitou C_c [F] a každý má kapacitu k zemi C_g [F].

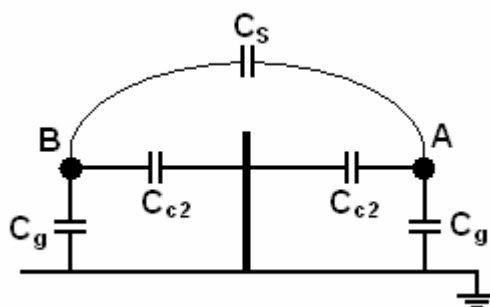


Obr. 2.2: Kapacitní vazby mezi vodiči a zemí [7]

Napětí U na vodiči A způsobí na vodiči B rušivé napětí U_r velikosti:

$$U_r = \frac{U C_c}{C_g + C_c} \quad [V] \quad (2.4)$$

Vazební kapacity tedy působí jako napěťový dělič. Pro zredukování rušivého napětí je tedy nutné zvýšit kapacitu proti zemi a snížit kapacitu mezi vodiči. Toho lze docílit vložením vodivé dokonale uzemněné desky mezi vodiče A a B . Situace se tedy změní podle následujícího obrázku:



Obr. 2.3: Kapacitní vazby mezi vodiči oddělenými vodivou uzemněnou deskou [7]

Za předpokladu, že kapacita C_{c2} je přibližně dvojnásobek původní kapacity C_c ,

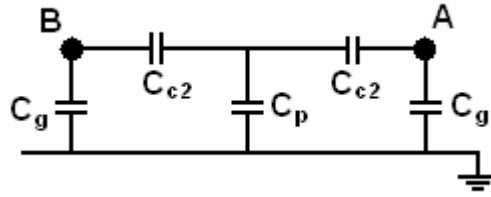
$$C_{c2} \approx 2C_c \quad (2.5)$$

se díky uzemnění vodivé desky kapacita C_{c2} nemůže uplatnit pro šíření rušivého napětí z A do B . Šíření rušení je však stále ještě zajištěno malou rozptylovou kapacitou C_s . Rušivé napětí na vodiči B je tedy:

$$U_r = \frac{U C_s}{(C_g + C_{c2}) + C_s} \quad [V] \quad (2.6)$$

Přenesené rušení je tedy menší.

Pokud by deska mezi vodiči nebyla uzemněna, tak můžeme rozptylovou kapacitu vzhledem k velikosti kapacit C_c zanedbat. Přenesené rušení by se tak oproti případu bez desky nezměnilo. Ve skutečnosti bude mít neuzemněná deska jistý vliv, protože i deska samotná bude mít kapacitu proti zemi. V náhradním schématu je označena jako C_p .



Obr. 2.4: Kapacitní vazby mezi vodiči a neuzemněnou vodivou deskou [7]

Z náhradního schématu je vidět, že napětí U na vodiči A se přenese na desku P podle vzorce:

$$U_p = \frac{U C_{c2}}{C_{c2} + C_p} \quad [V] \quad (2.7)$$

A dále na vodič B :

$$U_B = \frac{U_p C_{c2}}{C_{c2} + C_g} \quad [V] \quad (2.8)$$

Takže rušivé napětí v místě B je:

$$U_r = \frac{U C_{c2}^2}{(C_{c2} + C_p)(C_{c2} + C_g)} \quad [V] \quad (2.9)$$

Pokud by byla deska taková, že by její kapacita proti vodiči A byla velká a proti zemi malá, objeví se na desce téměř plné napětí U . Přenesené rušivé napětí do vodiče B by se tak dokonce mohlo i zvětšit. Čím větší je tedy kapacita desky proti zemi, tím více je redukováno přenesené rušivé napětí. Zvětšování kapacity C_p nade všechny meze znamená vlastně zkrat mezi deskou a zemí a tedy dokonalé uzemnění.

Účinnost stínění elektrického pole není závislá na tloušťce krytu, protože jím prochází jen malý proud. Nejdůležitějším faktorem je tedy dokonalé uzemnění celého krytu. To může být problematické například u víka, dveří nebo různých jiných průchodů. Zejména pro odstranění elektrických polí vysokých kmitočtů je vhodné mít kraje dveří opatřeny pružinovými kontakty. Pokud máme v jednom krytu přístroj rozdělený na několik částí oddělených stínící deskou, je třeba, aby víko krytu mělo pružné kontakty i pro tuto dělicí desku, nebo aby bylo víko rozděleno na dvě části. Společné víko u zdroje rušení a chráněných obvodů by mohlo zprostředkovávat induktivní vazbu pro šíření rušení.

Otvory malých rozměrů a úzké štěrbiny nemění rozložení kapacit a nemění tedy příliš účinnost stínění, pokud jsou otvory malé ve srovnání s vlnovou délkou pole.

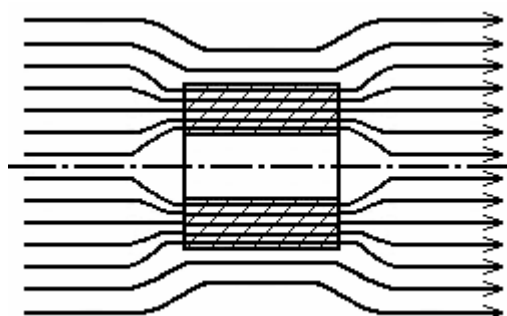
Je třeba, aby všechny vodiče a části zařízení pracující s užitečným signálem byly uvnitř stínění.

2.2.2 Stínění magnetického pole

Magnetostatické pole

Stejnoseměrná magnetická pole nebo střídavá magnetická pole nízkého kmitočtu vznikají například působením trvalých magnetů motorů, měřicích přístrojů nebo reproduktorů, v okolí budících cívek relé a elektromagnetických spínačů, u vodičů protékáných proudem (zejména při zkratech nebo atmosférických výbojích), popřípadě magnetickým polem Země.

Ke stínění těchto polí se využívá principu vytvoření dobře magneticky vodivé cesty, která v sobě „koncentruje“ magnetické pole a nedovolí mu vniknout do stíněného prostoru, jak je znázorněno na následujícím obrázku.



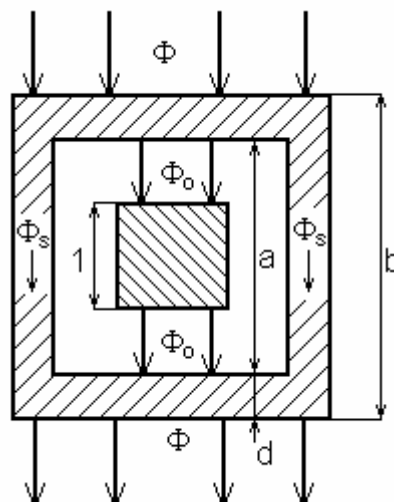
Obr. 2.5: Princip stínění magnetostatického pole [7]

Kolem stíněného prostoru se tak vlastně vytváří jakýsi „magnetický zkrat“. K tomu se využívají magneticky měkké materiály s vysokou počáteční permeabilitou jako transformátorové plechy (železo s maximálně 4% uhlíku) nebo permalloy (slitina železa a niklu ... označení PY).

Označení	Chemické složení [%]						Počáteční permeabilita μ	Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
	Fe	Si	Ni	Mo	Cu	Cr		
Transf. Plech III	97	3					350	0,46
Transf. Plech IV	96	4					450	0,55
PY36	64		36				1 450	0,80
PY50	50		50				1 500	0,60
PY76Cu	17		76		5	2	10 000	0,47
PY78	22		78				6 000	0,22
PY78M	17		79	4			20 000	0,55

Tabulka 2.1: Materiály vhodné pro magnetostatické stínění [8]

Pokud se však tímto způsobem bude stínit předmět z feromagnetického materiálu, musí se stínění navrhnout tak, aby přes tento předmět procházela co nejmenší část z celkového magnetického toku. Tato úloha lze řešit pomocí Kirchhoffova zákona. Na obrázku 2.6 je znázorněno stínění o vnějším rozměru b [m] a vnitřním a [m] z materiálu jehož permeabilita $\mu_r \gg 1$ a stíněný předmět jednotkové délky z téhož materiálu.



Obr. 2.6: Rozdělení magnetických toků ve stínění a stíněném objektu [8]

Vnější magnetický tok Φ [Wb], se rozdělí na dvě části, z nichž jedna prochází stěnami stínění (Φ_s) a druhá vzduchovými mezerami a stíněným objektem (Φ_o).

$$\Phi = \Phi_s + \Phi_o \quad (2.10)$$

Síla stěny stínění je:

$$d = \frac{b-a}{2} \quad [m] \quad (2.11)$$

Průměrná délka siločáry jdoucí stíněním je 1,5 b.

Pokud se uvažuje $\mu_r \gg 1$ a pokud se zanedbají vířivé proudy, lze určit magnetické odpory obou cest takto:

$$R_{mo} = \frac{a-1}{2} \quad [H^{-1}] \quad \text{a} \quad R_{ms} = \frac{1,5 \cdot b}{4 \cdot a \cdot d \cdot \mu_r} \quad [H^{-1}] \quad (2.12)$$

Z poměru magnetických odporů je pak možné určit koeficient stínění:

$$\frac{R_{mo}}{R_{ms}} = \frac{\Phi_s}{\Phi_o} = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot a \cdot (b-a)(a-1)}{3 \cdot b} \quad (2.13)$$

$$K_s = \frac{\Phi}{\Phi_o} = \frac{\Phi_s}{\Phi_o} + 1 = \frac{4 \cdot \mu_r \cdot a \cdot (b-a)(a-1) + 3 \cdot b}{3 \cdot b} \quad (2.14)$$

Pro zjištění, při jakých poměrech je koeficient stínění maximální při zachování konstantního rozměru b , se musí výraz v čitateli zderivovat. Optimální vnitřní rozměr krytu pak vychází:

$$a = \frac{2 \cdot b + 1}{3} \quad (2.15)$$

Tloušťka stěny krytu je pak:

$$d = \frac{b-1}{6} \quad (2.16)$$

A délka vzduchové mezery vychází:

$$m = \frac{b-1}{3} \quad (2.17)$$

Koeficient stínění pak za těchto předpokladů vychází:

$$K_s = \frac{\Phi}{\Phi_o} = 1 + \frac{8}{81} \cdot \mu_r \left(2b^2 + 3b + \frac{1}{b} \right) \quad (2.18)$$

Ideální délka vzduchové mezery vychází tedy dvojnásobná oproti tloušťce stěny krytu a nezávisí na materiálu, pokud je splněn předpoklad $\mu_r \gg 1$.

Ani tvar krytu nemá výrazný vliv. To pro přibližné výpočty umožňuje nahradit pravoúhlý kryt ekvivalentní koulí, jejíž průměr je geometrickým středem tří rozměrů pravoúhlého krytu. Činitel stínění této koule bude [8]:

$$K_s = 1 + \frac{4}{3} \cdot \mu_r \cdot \frac{d}{D} \quad (2.19)$$

Kde D [m] je vnitřní průměr ($D = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}$) a d [m] je tloušťka stěny.

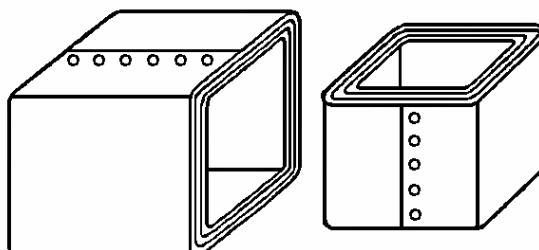
Z uvedených vztahů vyplývá, že vyšší účinnosti stínění můžeme dosáhnout větší tloušťkou stínění nebo vyšší permeabilitou použitého materiálu. Pro magnetické pole nízkých kmitočtů však tloušťka stěny nesmí přesáhnout určitou maximální hodnotu (tabulka 2.2), která je daná mezní frekvencí pole f_o [8]:

$$f_o \cong \frac{\rho}{d^2 \cdot \mu} \quad [Hz] \quad (2.20)$$

Materiál	Maximální tloušťka [mm]	
	50 Hz	100 Hz
Transformátorový plech	5,30	3,80
Permalloy 78% Ni	0,63	0,44
Permalloy 40% Ni	3,00	2,10
Hipernik 50% Ni	1,30	0,93
Mu-metal 75% Ni, 5% Cu, 2% Cr	0,65	0,45

Tabulka 2.2: Maximální tloušťka stínění při 50 Hz nebo 100 Hz [8]

Pokud by nebylo s určeným materiálem při maximální šířce stěny dosaženo požadovaného útlumu, bylo by nutné užít stínění složeného z izolovaných vrstev. Tímto způsobem se omezí vířivé proudy a mezní frekvence se posune výše.



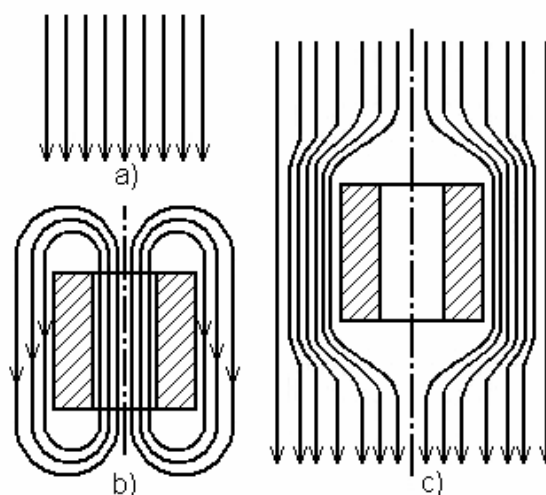
Obr. 2.7: Vícevrstvý stínící kryt

Vícevrstvý stínící kryt z jednoho kusu by byl konstrukčně velmi složitý, proto se často používají kryty složené ze dvou kusů vinutých z pásového permalloye s oxidovaným povrchem (obr. 2.7). Po ohýbání, nýtování a svařování je nutné permalloy tepelně ošetřit žíháním ve vodíkové atmosféře (800 až 900°C) podle technologických pokynů výrobce, aby se materiál zbavil mechanického pnutí. [8]

Problematické je stínění cívky (transformátoru) se železným jádrem. Jádro vytváří magnetický bočník a zhoršuje tím stínící účinek krytu. V takovém případě by měla být mezera mezi cívkou a stíněním minimálně $\frac{2}{3}$ poloměru cívky. Pokud nejde tato podmínka splnit, musí se ekvivalentně k tomu navrhnout kryt s vyšší stínící účinností, aby byl vykompenzován účinek tohoto bočníku.

Střídavá magnetická pole

Stínění magnetických polí středních a velkých kmitočtů se někdy označuje jako elektromagnetické stínění. Princip tohoto stínění spočívá v tom, že se vlivem střídavého magnetického pole ve stěnách krytu indukují vířivé (Foucaultovy) proudy, které svým vlastním polem působí proti původnímu magnetickému poli a tím ho v okolí krytu zeslabují.



Obr. 2.8: Stínění magnetického pole: a) původní homogenní magnetické pole, b) magnetické pole vířivých proudů, c) celkové magnetické pole [8]

Potlačení původního magnetického pole bude tím výraznější, čím větší vířivé proudy vzniknou. To znamená, čím bude vyšší frekvence magnetického pole, čím bude stínící materiál silnější a čím bude vyšší magnetická vodivost. Proto je výhodné používat dobře vodivé materiály.

Materiál	Měrný odpor ρ [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]
Měď	0,0178
Hliník	0,028
Dural	0,050
Zinek	0,062
Mosaz	0,075

Tabulka 2.3: Měrné odpory některých materiálů vhodných ke stínění mag. pole

Kvůli skinefektu (povrchovému jevu) nejsou vířivé proudy v celém objemu stínění rozloženy rovnoměrně. Spodní vrstvy vodiče jsou vlastně stíněny vrchní vrstvou. Hodnota intenzity magnetického pole tak ve směru od povrchu exponenciálně klesá. V hloubce x poklesne původní intenzita H_0 na hodnotu:

$$H_x = H_0 \cdot e^{-\frac{x}{\delta}} \quad [A \cdot m^{-1}] \quad (2.21)$$

Kde δ je takzvaná hloubka vniku, která je závislá na frekvenci pole a na permeabilitě a odporu materiálu.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad [m] \quad (2.22)$$

Hloubka vniku udává míru tlumení magnetického pole (nebo i hustoty vířivých proudů). Dosadí-li se do vzorce (2.21) $x = \delta$, klesne původní hodnota H_0 e^{-1} -krát. To znamená přibližně na 37% hodnoty na povrchu. Čím menší je hloubka vniku, tím větší je proudová hustota u povrchu krytu a tím je také větší stínící magnetické pole, které působí proti původnímu poli. Pro potřeby stínění je však zeslabení pole e -krát (2,73 krát) nedostatečné. Proto se udávají i hloubky vniku $\delta_{0,1}$ popřípadě $\delta_{0,01}$ ve kterých je pole zeslabeno desetkrát nebo stokrát. Podle [8] platí:

$$\delta_{0,1} = 2,3 \cdot \delta \quad \text{a} \quad \delta_{0,01} = 4,6 \cdot \delta \quad (2.23)$$

Důležité je, aby tloušťka stínící stěny d [m] byla větší než ekvivalentní tloušťka vodivé vrstvy, tedy aby byl poměr:

$$p = \frac{d}{\delta} > 1 \quad (2.24)$$

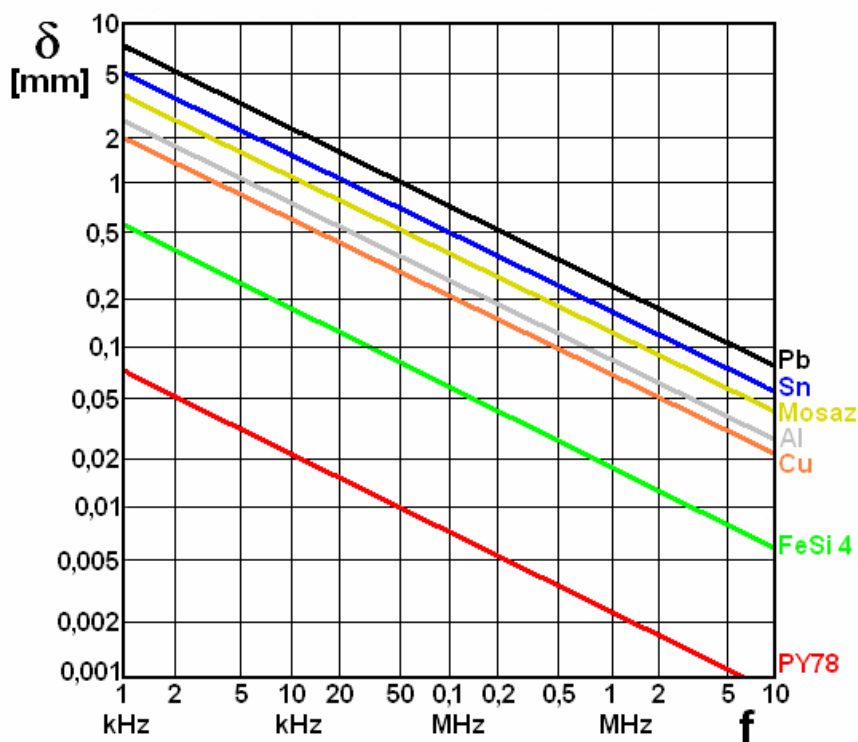
Poměru p je nazýván koeficientem vířivých proudů. Pokud je menší než 1, jsou vířivé proudy rozloženy rovnoměrně v celém průřezu stínění a neposkytují dostatečný

stínící účinek. Pokud je větší než 1, jsou vířivé proudy u povrchu stínění a působí proti pronikání rušivého magnetického pole dovnitř krytu.

Čím menší je hloubka vniku, tím tenčí stínění je potřeba pro dosažení potřebného útlumu. Rušení síťové frekvence nebo jejích násobků je tedy nutné odstínit feromagnetickým materiálem s velkou permeabilitou. Může se však stát, že vlivem silného magnetického pole by došlo k nasycení materiálu, který by tím ztratil své výhodné vlastnosti.

Frekvence f	Hloubka vniku δ [mm]		
	Měď	Hliník	Železo
100 Hz	6,6	8,5	0,66
1 kHz	2,1	2,7	0,02
10 kHz	0,66	0,84	0,08
100 kHz	0,2	0,3	0,02
1 MHz	0,08	0,08	0,008

Tabulka 2.4: Hloubka vniku při různých frekvencích [8]



Obr. 2.9: Závislost hloubky vniku v různých materiálech na frekvenci

Přibližně od 100 kHz výše je tedy efektivní stínění z libovolného kovu tloušťky nad 0,5 mm. Takže při návrhu stínění se zohledňuje více ekonomické hledisko a

mechanické vlastnosti (pevnost, odolnost proti korozi, pájitelnost a podobně) než elektrické vlastnosti.

Pro kmitočty od 10 MHz je pro kvalitní stínění postačující měděná nebo stříbrná fólie šířky 0,1 mm. Takže je možné používat i izolační materiály s nanesenou vodivou vrstvou (například cuprexit). I pro vysoké frekvence je však stále kvalitnější stínění ze železa nebo oceli. V tomto případě se však musí počítat s většími hysterezními ztrátami a větším měrným odporem. Ocelové stínění se tedy používá, pokud je možné zanedbat vznikající ztráty.

Přesný výpočet stínění je možný a řešitelný pouze pro několik geometrických uspořádání: dvě nekonečné rovnoběžné desky, nekonečný válec a dutá koule. Tvar krytu má však na celkovou účinnost stínění velmi malý vliv, takže skutečné kryty můžeme pro výpočty zaměnit pomocí jednoho z těchto tří případů. Účinnost stínění ve vysokofrekvenčním poli je tedy podle [8]:

$$SE = 20 \cdot \log \left(\frac{H_o}{H_i} \right) \cong 8,686 \cdot \left(\frac{d}{\delta} + \ln \left(\frac{k \cdot D}{\mu_r \cdot \delta \cdot 2 \cdot \sqrt{2}} \right) \right) \quad [dB] \quad (2.25)$$

Kde je:

k ... součinitel tvaru krytu

$k = 1$ pro nekonečné rovnoběžné desky

$k = 0,5$ pro válec

$k = \frac{1}{3}$ pro kouli

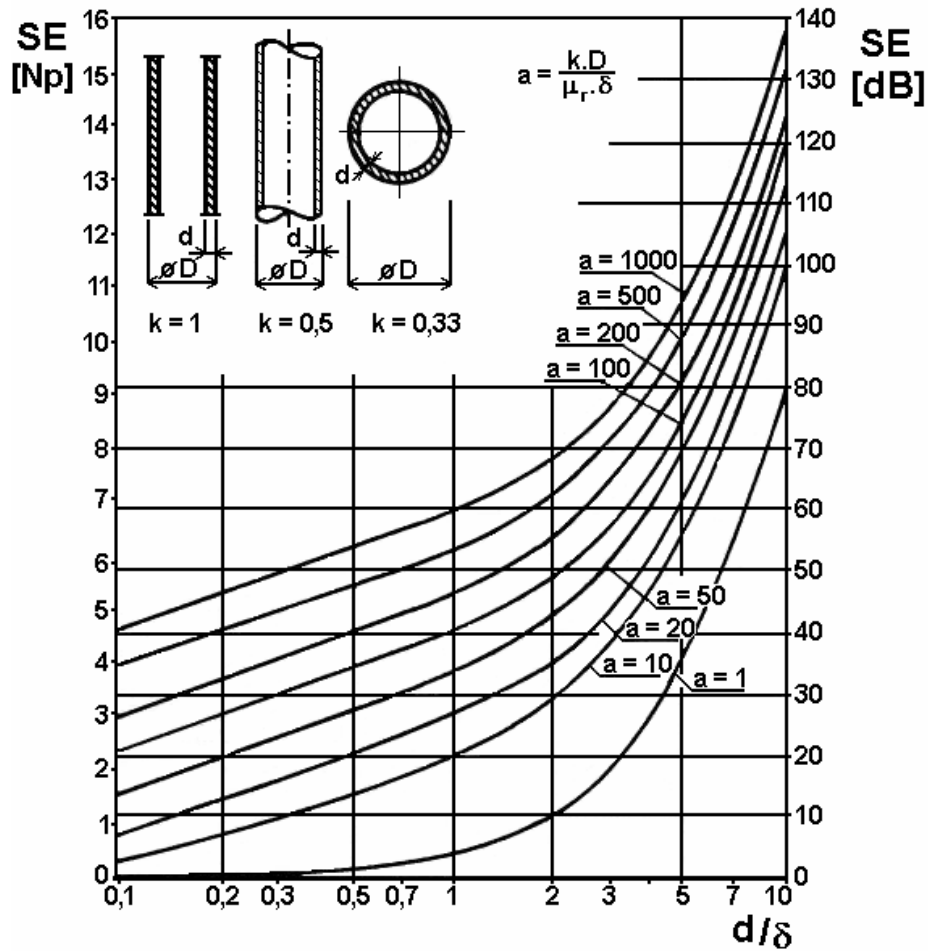
D [m] ... vzdálenost desek nebo průměr válce nebo průměr koule

Konstanta 8,686 vychází ze vztahu:

$$(20 \cdot \log e) dB = 1 Np \approx 8,686 dB \quad (2.26)$$

Tento vztah pro účinnost stínění platí za předpokladu $d \gg \delta$. Skládá se ze dvou složek, z nichž první je závislá na tloušťce a materiálu stínění a druhá na činiteli

velikosti krytu $a = \frac{k \cdot D}{\mu_r \cdot \delta}$.



Obr. 2.10: Závislost účinnosti stínění na koeficientu vířivých proudů [8]

Z grafu 2.10 vyplývá, že nejdůležitějším faktorem pro kvalitní stínění je síla stěny nebo spíše poměr d/δ . Relativní velikost krytu ovlivní stínění daleko méně. Proto je v některých případech možné uvažovat pouze složku:

$$SE [dB] \approx 8,686 \cdot \frac{d}{\delta} \quad (2.27)$$

Druhou část výrazu pak považujeme za jakousi bezpečnostní rezervu stínění.

Pro nižší frekvence, u kterých platí že $d > \delta$, lze vztah pro účinnost stínění zjednodušit na [8]:

$$SE [dB] = \frac{H_o}{H_i} = \sqrt{1 + \left(\frac{k \cdot d \cdot D}{\mu_r \cdot d} \right)^2} \quad (2.28)$$

A za předpokladu, že je stínění dobře navrženo a platí $\frac{H_o}{H_i} \gg 1$, můžeme pro nízké frekvence napsat lineární závislost [8]:

$$SE [dB] = \frac{H_o}{H_i} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot k \cdot d \cdot \omega \cdot \delta \cdot D \quad (2.29)$$

Vícenásobné stínění

Pokud se použije vícenásobné stínění, může se dosáhnout daleko vyšší stínící účinnosti. Ovšem toto řešení je ekonomicky, konstrukčně a prostorově náročné. Vícenásobné stínění není to samé jako vrstvené stínění (obr. 2.7). Zde musíme mít mezi jednotlivými kryty určitou mezeru. Bývá zajištěna izolační vrstvou o přibližně dvojnásobné tloušťce, než mají kovové vrstvy krytu. Jednotlivé části krytu by neměly být spojeny, aby se mezi nimi zamezilo pronikání vířivých proudů.

Díky velké mezeře mezi kryty roste celkový objem n -násobného stínění s $3n$ -tou mocninou rozměru b , kdežto účinnost stínění s n -tou mocninou. Pokud je u násobného krytu skládajícího se z n krytů dán celkový objem V , pak platí [8]:

$$b^{3n} = V = konst. \quad \text{nebo} \quad 3n \cdot \ln b = \ln V = konst. \quad (2.30)$$

Hledá se optimální relativní rozměr b a počet krytů n takové, aby byla účinnost stínění maximální.

$$SE = \ln K_s = n \cdot \ln \frac{\Phi}{\Phi_0} \quad (2.31)$$

Je tedy požadován maximální poměr:

$$\frac{SE}{\ln V} = \frac{\ln \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right)}{3 \cdot \ln b} = \frac{\ln \left[1 + \frac{8}{81} \cdot \mu_r \left(2b^2 - 3b + \frac{1}{b} \right) \right]}{3 \cdot \ln b} \quad (2.32)$$

Maximum se získá derivací a anulováním pravé strany výrazu [8]:

$$\ln(b) \cdot \frac{\mu_r (4b - 3 + b^{-2})}{\frac{81}{8} + \mu_r (2b^2 - 3b + b^{-1})} - \frac{1}{b} \cdot \ln \left[1 + \frac{8}{81} \cdot \mu_r (2b^2 - 3b + b^{-1}) \right] = 0 \quad (2.33)$$

Řešením se nalezne optimum pro SE :

$$\ln\left(\frac{\Phi_1}{\Phi_o}\right) = 1,6 \quad (2.34)$$

Počet krytů n tedy bude:

$$n = \frac{SE}{1,6} [Np] = \frac{SE}{13,9} [dB] \quad (2.35)$$

A pro relativní rozměry krytu platí [8]:

$$b = 1 + \sqrt{\frac{13,5}{\mu_r}} \quad (2.36)$$

Pro stínění z transformátorových plechů $\mu_r = 400$ vychází objem plechů 0,25 celkového objemu stíněného prostoru a u permalloye $\mu_r = 10\,000$ je objem stínícího materiálu jen 0,04 stíněného objemu. U transformátorových plechů je tedy kryt 6x těžší a objemnější. Avšak na druhou stranu je zase transformátorový plech daleko levnější, takže se permalloyové násobné stínění používá, jen pokud existuje omezení prostorem. Vícenásobné kryty jsou konstrukčně náročné, proto je obvykle lepší použít jednoduchý kryt například z permalloye než vícenásobný ze železa. Vícenásobný kryt je výhodný, pokud se počítá s tím, že bude třeba stínit signály v širokém frekvenčním spektru. Pak se použijí násobné kryty složené z různých materiálů. Dobrého stínícího účinku se dosáhne například kombinací měď+železo nebo hliník+železo. Na pláště kabelů se často používá kombinace olovo+železo i přesto, že vykazuje horší stínící účinky, protože olověná vrstva umožňuje hermetické uzavření pláště.

Možnosti omezení vlivu rušivého magnetického pole

Citlivé obvody se nesmí pokud možno umisťovat do blízkosti zdrojů silných magnetických polí, jako jsou síťové transformátory nebo vodiče protékané velkými případně i zkratovými proudy.

Pokud se musí vést vodič v blízkosti zdroje magnetického pole, umisťuje se tak, aby byl rovnoběžný se siločarami pole. Indukované rušivé napětí se tak sníží na minimum.

Vodiče vedoucí k zátěži velké proudy je vhodné zkroutit dohromady. Proudů tekoucí opačnými směry skrz zkroucené vodiče kompenzují okolní magnetické pole. Výhodnější je, když se nemusí zátěž uzemnit a je uzemněn pouze zdroj. Pak zemí neprotéká žádný proud, který by účinek kompenzace zmenšoval. Pro zmenšení parazitních kapacit, které mohou rovněž tento jev narušovat, je dobré, když jsou vedeny zkroucené vodiče co nejbližší zemi.

Pro potlačení magnetického pole se používají vodiče s kovovým pláštěm. Plášť slouží buď přímo jako stínění, chrání tak vnitřní vodič před vnějšími signály a zároveň odstiňuje případné rušení, které by se mohlo šířit z vodiče. Nebo lze plášť použít jako zpětný vodič, pak dochází ke kompenzaci magnetických polí, jako v předchozím případě.

Rušivé napětí, které se indukuje do vodičů, je úměrné orientaci a ploše smyčky, kterou vodiče tvoří. Plocha smyčky se tedy omezí zkrácením vodičů nebo celých obvodů. Orientace se ovlivní vzájemnou pozicí citlivého vedení a předpokládaného zdroje rušení.

2.2.3 Stínění rovinné elektromagnetické vlny

Pro zjednodušení úlohy se předpokládá, že se rovinná vlna šíří volným prostorem kolmo k nekonečně velké kovové desce. Kolmý dopad vlny na stínící přepážku je z hlediska stínění nejhorší případ, proto pro dostatečně nadimenzované stínění není nutné počítat s jinými úhly dopadu.

Pro stanovení účinnosti stínění je třeba zjistit, jak velká část dopadající elektromagnetické vlny E_0 , H_0 se přenesla za vodivou přepážku o parametrech μ , σ a tloušťce d . Parametry volného prostoru jsou μ_0 , ε_0 .

Jde vlastně o šíření vlny na rozhraní dvou prostředí o různých impedancích. Charakteristická impedance volného prostoru na obou stranách krytu je [9, 10]:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120 \cdot \pi = 377 \, \Omega \quad (2.37)$$

A charakteristická impedance vodivého prostředí kovového krytu je [9, 10]:

$$Z_M = \sqrt{\frac{j\mu\omega}{\sigma}} \quad [\Omega] \quad (2.38)$$

Pro koeficient stínění pak platí vztah [5]:

$$K_s = \frac{1}{\cosh \gamma d \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_0}{Z_M} + \frac{Z_M}{Z_0} \right) \cdot \operatorname{tgh} \gamma d \right]} \quad (2.39)$$

A dle definice (2.2) vychází následně účinnost stínění jako [5]:

$$SE [dB] = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 \cdot Z_M} \cdot e^{\gamma d} \cdot \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma d} \right] \right| \quad (2.40)$$

Kde veličina γ označuje vlnové číslo (konstantu šíření) elektromagnetické vlny v kovovém prostoru krytu [10]:

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} = \alpha + j\beta \quad [m^{-1}] \quad (2.41)$$

Kde α [dB.m⁻¹] je konstanta útlumu a β [rad.m⁻¹] je fázová konstanta.

Celkovou účinnost stínění lze rozepsat do několika složek označovaných R (Reflection - odraz), A (Absorption - pohlcení) a M (Multiple Reflection – mnohonásobný odraz).

$$SE [dB] = R [dB] + A [dB] + M [dB] \quad (2.42)$$

Útlum odrazem

K odrazu elektromagnetické vlny dochází vždy na rozhraní dvou různých impedancí. V našem případě tedy nejprve při příchodu vlny z volného prostoru na stěnu krytu a pak při prostupu z vodivé stěny do volného prostoru uvnitř krytu. Celkový útlum odrazem

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{(Z_0 + Z_M)^2}{4Z_0 \cdot Z_M} \right| \quad [dB] \quad (2.43)$$

pak tedy můžeme rozdělit do dvou složek [5]:

$$R = 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0 + Z_M}{2Z_M} \cdot \frac{Z_0 + Z_M}{2Z_0} \right| = R_1 + R_2 \quad [dB] \quad (2.44)$$

Kde R_1 reprezentuje odraz na prvním (vstupním) rozhraní vzduch – kov a R_2 útlum na druhém (výstupním) rozhraní kov – vzduch.

Za předpokladu, že stěna je z velmi dobře vodivého materiálu platí $Z_0 \gg Z_M$ a celkový útlum odrazem jde zjednodušit na:

$$R \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{4Z_M} \right| \quad [dB] \quad (2.45)$$

Popřípadě jednotlivé složky na:

$$R_1 \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{2Z_M} \right| \quad [dB] \quad (2.46)$$

$$R_2 \approx 20 \cdot \log \frac{1}{2} = -6 \text{ dB} \quad (2.47)$$

Při použití kovového stínícího materiálu se tedy nejvíce na odrazu podílí první rozhraní, kdežto odraz na druhém rozhraní je téměř konstantní. Pro dosažení co nejvyšší stínící účinnosti je třeba, aby měl použitý materiál co nejlepší vodivost. Lze použít i tenké kovové vrstvy, protože na tloušťce stěny v tomto případě vůbec nezáleží.

Absorpční útlum

Při průchodu elektromagnetické vlny kovovou stěnou krytu se část její energie mění na teplo. Velikost pohlcené části energie je závislá na materiálu stěny, její tloušťce a frekvenci vlnění.

$$A = 20 \cdot \log \left| e^{\gamma d} \right| = 20 \cdot \log e^{\alpha d} = 20 \cdot \log e^{\frac{d}{\delta}} \quad [dB] \quad (2.48)$$

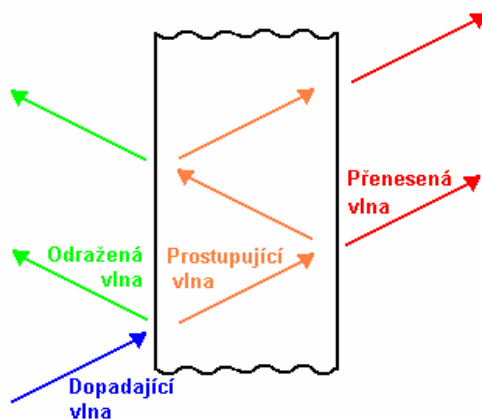
Kde δ je hloubka vniku dle vzorce (2.22). Stejně jako u stínění vysokofrekvenčních magnetických polí tedy přibližně platí:

$$SE \approx 8,686 \cdot \frac{d}{\delta} \quad [dB] \quad (2.49)$$

Nejlepší absorpční útlum tedy mají kryty z materiálu s vysokou permeabilitou jejichž tloušťka přesahuje hloubku vniku prostupující vlny. S rostoucí frekvencí vlnění roste i účinek absorpčního stínění.

Útlum mnohonásobnými odrazy

K mnohonásobným odrazům dochází uvnitř stěny krytu, kde se vlna vždy částečně odrazí na impedančním rozhraní kov – vzduch. Odražená část vlny prochází zpátky stěnou a dochází opět k částečnému odrazu zpět do objemu stěny, jak je znázorněno na obrázku 2.11.



Obr. 2.11: Skládání vlny vlivem mnohonásobného odrazu ve stěně krytu [5]

Takto odrážená a nasčítaná vlna může mít za určitých podmínek negativní vliv na celkovou účinnost stínění. Z rovnice (2.40) lze vyjádřit část týkající se mnohonásobných odrazů [5]:

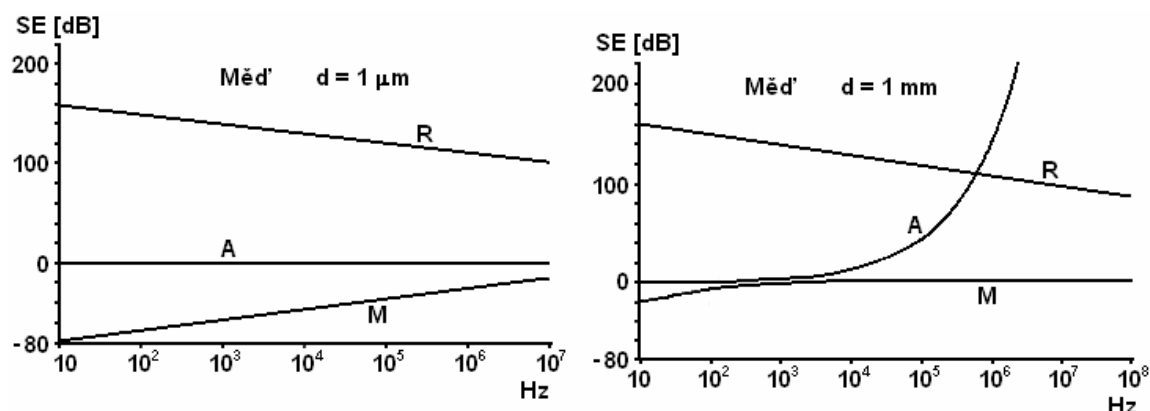
$$M = 20 \log \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-2\gamma d} \right] = 20 \log \left[1 - \left(\frac{Z_0 - Z_M}{Z_0 + Z_M} \right)^2 \cdot e^{-\frac{2d}{\delta}} \cdot e^{-j\frac{2d}{\delta}} \right] \quad [dB] \quad (2.50)$$

Pokud je stínění zhotoveno z dobře vodivého materiálu ($Z_0 \gg Z_M$) a pokud je tloušťka stěny stínění mnohonásobně větší než hloubka vniku ($d \gg \delta$), pak je hodnota M téměř nulová a vliv mnohonásobných odrazů na celkovou účinnost stínění lze zanedbat. Odrážená vlna se vlivem absorpčního útlumu snadno přemění na teplo.

Pokud však bude tloušťka stěny menší než hloubka vniku (poměr $\frac{d}{\delta} \leq 1$), pak nabývá M záporných hodnot a snižuje celkovou účinnost stínění takového krytu třeba až o desítky dB (obr 2.12).

Celkový útlum

Na to, jaká část útlumu bude mít na stínění rozhodující roli, má největší vliv frekvence vlnění.



Obr. 2.12: Velikost jednotlivých složek stínění v závislosti na frekvenci [7]

Je tedy vhodné před návrhem a konstrukcí stínění proměřit, spočítat nebo odhadnout, jaká bude frekvence rušivých signálů a podle toho vybrat materiál a tloušťku krytu. Na nižších frekvencích má dominantní vliv odraz. Se vzrůstající frekvencí se zvyšuje vliv absorpce a naopak vliv odrazu klesá. To vychází ze vzorců (2.45 a 2.49), které je po dosazení možné upravit na:

$$R \approx 20 \cdot \log \left| \frac{Z_0}{4Z_M} \right| \approx 20 \cdot \log \left(\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{\omega \mu_r \epsilon_0}} \right) \quad [dB] \quad (2.51)$$

$$A \approx 8,686 \cdot \frac{d}{\delta} \approx 0,0069 \cdot d \cdot \sqrt{\omega \mu_r \sigma} \quad [dB] \quad (2.52)$$

Pro odraz jsou tedy vhodné dobře vodivé nemagnetické materiály. A nezáleží při tom na tloušťce krytu. Toho se využívá například při stínění záření v mikrovlnných troubách, kde postačuje tenký průhledný vodivý film na dvířkách trouby.

Oproti tomu absorpce se podstatně zvyšuje se silou stěny krytu a je daleko výraznější pro feromagnetické materiály.

Tloušťka vrstvy	0,1 μm		1,25 μm		2,2 μm		22 μm	
Frekvence [MHz]	1	1000	1	1000	1	1000	1	1000
R [dB]	109	79	109	79	109	79	109	79
A [dB]	0,014	0,44	0,16	5,2	0,29	9,2	2,9	92
M [dB]	-47	-17	-26	-0,6	-21	-0,6	-3,5	0
Celková SE [dB]	62	62	83	84	88	90	108	171

Tabulka 2.5: Účinnost stínění u velmi tenkých měděných napařovaných povlaků [5]

Účinnost stínění v blízkém poli

Ve vzdáleném poli je hodnota charakteristické impedance prostředí Z_0 konstantní a podle rovnice (2.37) má hodnotu 377Ω . V blízkém elektromagnetickém poli se však musí charakteristická impedance rozdělit na elektrickou a magnetickou část, jejichž hodnoty se liší. Hranici blízkého a vzdáleného pole se stanovuje podle rovnice (1.6).

Pokud je zdrojem pole elektrický dipól, pak je charakteristická impedance ve vzdálenosti $r \ll \frac{c}{2\pi f}$ větší, než impedance ve vzdáleném poli.

$$Z_{0E} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0 r} = Z_0 \cdot \frac{c}{2\pi r f} \gg Z_0 \quad [\Omega] \quad (2.53)$$

Pokud je zdrojem pole proudová smyčka, pak je charakteristická impedance ve vzdálenosti $r \ll \frac{c}{2\pi f}$ menší, než impedance ve vzdáleném poli.

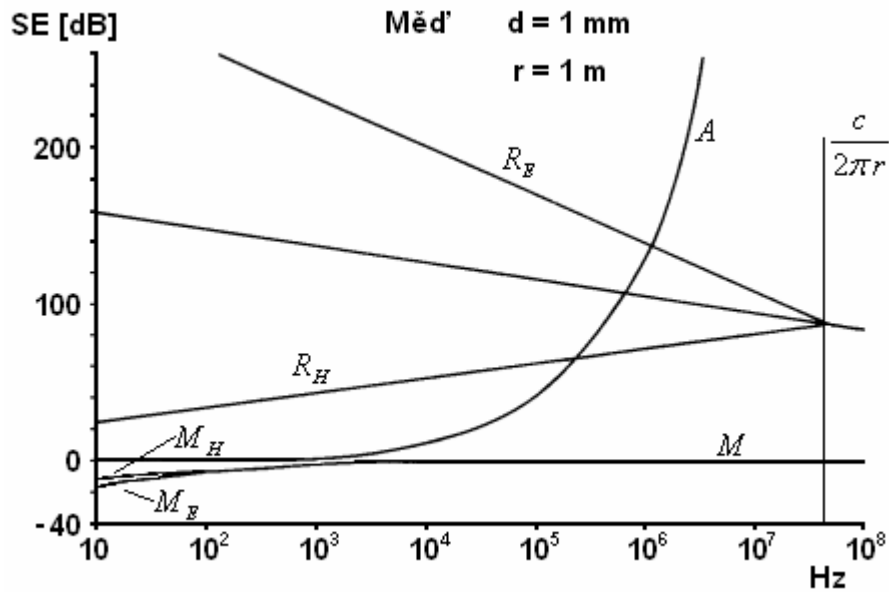
$$Z_{0H} = -j\omega\mu_0 r = Z_0 \cdot \frac{2\pi r f}{c} \ll Z_0 \quad [\Omega] \quad (2.54)$$

Absorpční útlum je nezávislý na typu zdroje, proto se v blízkém poli nezmění.

Nejvýraznější vliv má změna impedance v blízkém poli na útlum odrazem. Rovnice (2.51) pro odraz se tedy změní na [5]:

$$R_E \approx 268 + 10 \cdot \log \frac{\sigma}{\mu_r \omega^3 r^2} \quad [dB] \quad (2.55)$$

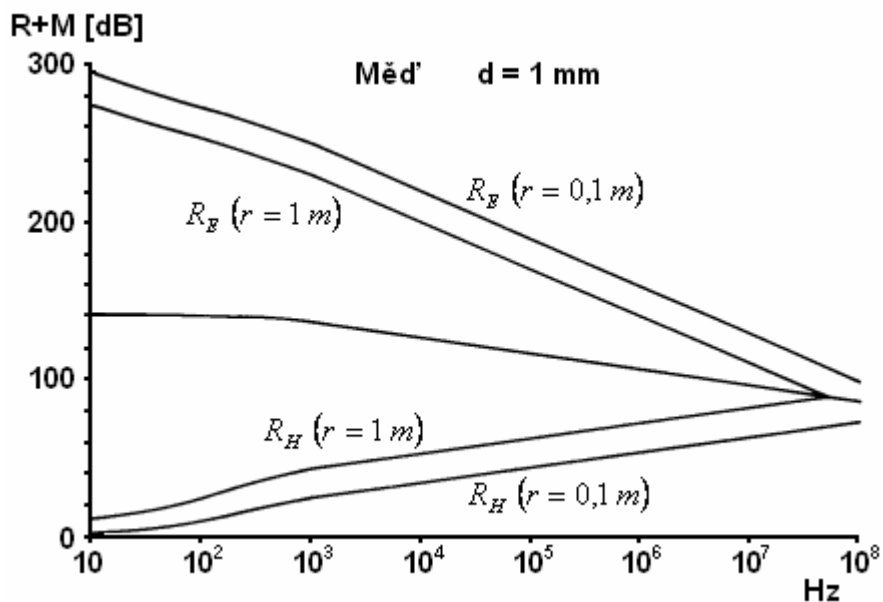
$$R_H \approx -71 + 10 \cdot \log \frac{\omega \sigma r^2}{\mu_r} \quad [dB] \quad (2.56)$$



Obr. 2.13: Porovnání jednotlivých složek stínění v blízkém poli [7]

V blízkém elektrickém poli je charakteristická impedance prostředí větší, proto vychází vždy větší i útlum odrazem R_E . Tento útlum dokonce roste, pokud se přibližujeme ke zdroji pole (Obrázek 2.14).

V blízkém magnetickém poli je však impedance nižší a útlum R_H klesá. Proto pro stínění blízkého magnetického pole musíme zajistit dostatečný absorpční útlum i pro nízké frekvence. To znamená použít feromagnetický materiál dostatečné tloušťky.



Obr. 2.14: Útlum odrazem v závislosti na vzdálenosti od zdroje rušení [7]

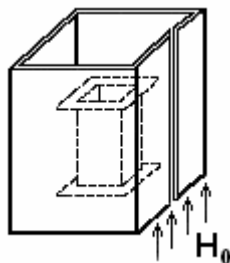
2.2.4 Vlivy zhoršující účinnost stínění

Otvory

Kryt musí plnit i řadu jiných funkcí, než je jen stínění, které jsou nezbytné pro správnou funkci zařízení, jako je třeba chlazení a ventilace, zajištění komunikace, vstupů a výstupů, přístup k měřicím bodům, opravitelnost a rozebiratelnost zařízení, optická kontrola a podobně. Reálný kryt má proto celou řadu nehomogenit, spojů, štěrbin a otvorů, které zhoršují účinnost stínění. Vhodnou konstrukcí krytu je možné nepříznivý vliv otvorů potlačit a omezit.

Při stínění elektrického pole nepředstavují malé otvory ve stínění závažný problém. Pokud jsou jejich rozměry menší než je vlnová délka rušivého pole, tak téměř neovlivní rozložení kapacit mezi zdrojem rušení a chráněnými obvody. Indukované rušivé napětí se tedy nijak podstatně nezvýší.

V magnetostatickém poli jsou siločáry vtahovány do stěn krytu, který tak vytváří magnetický zkrat okolo stíněného prostoru. Případné spoje a štěrby by tedy neměly zvyšovat odpor tohoto zkratu. Podlouhlé otvory a nehomogenity je tedy nutné směřovat tak, aby byly rovnoběžné se siločárami pole [8].

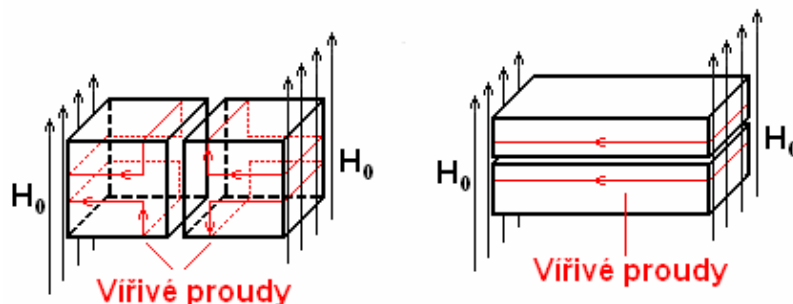


Obr. 2.15: Štěrbina v magnetostatickém poli

Pokud takové uspořádání není možné, tak musí mít spoj dostatečný přesah materiálu a spojení se provádí pokud možno svařováním nebo nýtováním. Je doporučeno se vyhnout pájení, protože vrstva cínu přerušuje průběh siločar a působí tak podobně jako vzduchová mezera. Části, které se nemohou pevně spojit (dvířka, víka), se vyrábí s velkým přesahem a co nejmenší vzduchovou mezerou.

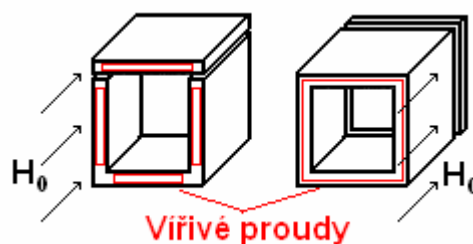
Ve střídavém magnetickém poli stínící účinek vytváří vířivé proudy, které se indukují v krytu. Vířivé proudy protékají v rovině kolmé ke směru magnetického pole. Případné nehomogenity a otvory tedy nesmí narušit průběh vířivých proudů ve stěně

krytu. Je nutné je umístit rovnoběžně se směrem vířivých proudů, tedy kolmo k magnetickému poli.



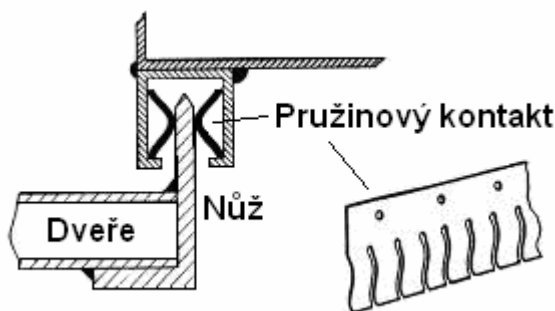
Obr. 2.16: Špatná a správná orientace štěrbin ve střídavém magnetickém poli

Pevné nerozebíratelné spoje se provádí s co nejlepší elektrickou vodivostí pokud možno dokonalým spájením spáry. Víka krytů se orientují také kolmo k rovině pole, aby nebyl narušen průtok proudu tělem krytu ani samotným víkem.



Obr. 2.17: Špatné a správné umístění víka krytu

U velkých objektů s dveřmi je snaha o co nejdokonalejší vodivé spojení po celém obvodu dveří. Toho se dosáhne užitím nožových a pružinových kontaktů. U částí, které se rozebírají jen výjimečně, lze pro dokonalé spojení užít vodivých past a silikonů, které vyplní případnou štěrbinu nebo netěsnost.



Obr. 2.18: Vodivé spojení po celém obvodu dveří pro zlepšení stínění [8]

Pokud dopadá rovinná elektromagnetická vlna na otvor ve vodivé desce, pak může tímto otvorem pronikat do stíněného prostoru. Takovýto otvor ve stínění se totiž chová jako štěrbinová anténa se ziskem G [-].

Pro kruhový otvor o poloměru a [m]: [7]

$$G = \left(\frac{2\pi a}{\lambda} \right)^2 \quad (2.57)$$

Pro podélnou štěrbinu délky l [m]:

$$G = \left(\frac{2l}{\lambda} \right)^2 \quad (2.58)$$

Zisk štěrbinové antény se může definovat také podle poměru vyzářeného a dopadajícího (referenčního) výkonu:

$$G = \frac{P_i}{P_0} \quad (2.59)$$

Proto lze účinnost stínění pro kruhový otvor psát jako:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{1}{G} = 10 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{2\pi a} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi a} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a f} \quad [dB] \quad (2.60)$$

A pro podélnou štěrbinu je účinnost stínění:

$$SE = 10 \cdot \log \frac{1}{G} = 10 \cdot \log \left(\frac{\lambda}{2l} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2l} = 20 \cdot \log \frac{c}{2lf} \quad [dB] \quad (2.61)$$

Jelikož je zisk úměrný ploše, tak pro n kruhových otvorů v krytu lze vypočítat účinnost stínění jako:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{\lambda}{2\pi a \sqrt{n}} = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a f \sqrt{n}} \quad [dB] \quad (2.62)$$

Stěny krytů však mají určitou tloušťku d . Působí proto jako vlnovody s kritickou frekvencí [11]:

$$f_c = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad [Hz] \quad (2.63)$$

Kde a, b [m] jsou rozměry obdélníkového vlnovodu a m, n jsou nezáporná celá čísla, která určují takzvaný vid vlny.

Pro úzkou štěrbinu délky l lze dosadit takzvaný dominantní vid ($m = 1$ a $n = 0$) a výsledkem je nejmenší kritická frekvence pro toto uspořádání:

$$f_c = \frac{c}{2l} \quad [Hz] \quad (2.64)$$

Vlny o vyšší frekvenci než je kritická projdou vlnovodem zcela beze změny. Vlnění nižších frekvencí však bude tlumeno s faktorem $e^{-\alpha d}$, kde d je tloušťka stěny a α lze spočítat ze vztahu:[7]

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\mu \varepsilon} \cdot \sqrt{\left(\frac{f_c}{f}\right)^2 - 1} \quad [m^{-1}] \quad (2.65)$$

Pro frekvence f nižší než je kritická frekvence se může α zjednodušit na:

$$\alpha \approx \omega \cdot \sqrt{\mu \varepsilon} \cdot \frac{f_c}{f} = 2\pi f \cdot \sqrt{\mu \varepsilon} \cdot \frac{c}{2lf} = \frac{\pi}{l} \quad [m^{-1}] \quad (2.66)$$

A účinnost stínění takového vlnovodu je pak:

$$SE \approx 8,686 \cdot |\alpha d| \approx 8,686 \cdot \frac{\pi d}{l} \approx 27,2 \frac{d}{l} \quad [dB] \quad (2.67)$$

Pro kruhový vlnovod poloměru a je kritická frekvence:

$$f_c = \frac{1,841 \cdot c}{2\pi a} \quad [Hz] \quad (2.68)$$

A účinnost stínění pro kruhový vlnovod při frekvencích nižších než f_c je přibližně:

$$SE \approx 8,686 \cdot \left(\frac{1,841 \cdot d}{a}\right) \approx 15,991 \cdot \frac{d}{a} \quad [dB] \quad (2.69)$$

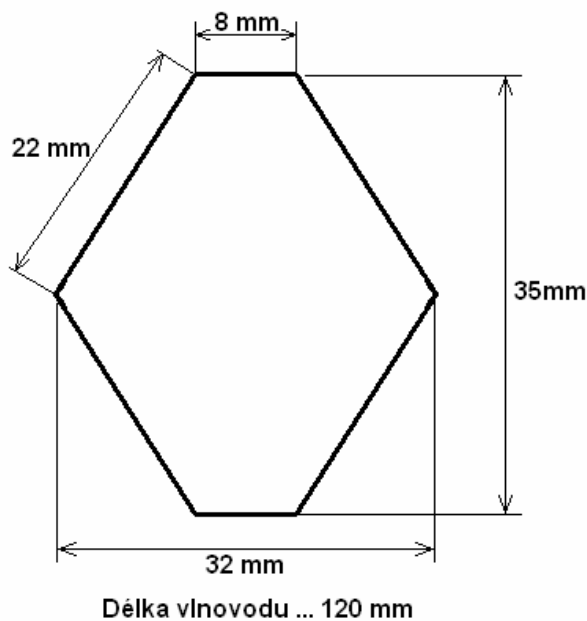
Tyto dvě rovnice (2.67 a 2.69) tedy vlastně vyjadřují absorpční útlum vlnovodů.

Pro stěnu s otvory, u které nejde zanedbat tloušťka d , zvýší se o tento útlum účinnost stínění takového krytu. Rovnice (2.60 a 2.61) pak lze doplnit o tento útlum [7]:

$$SE = 20 \cdot \log \frac{c}{2\pi a f} + 15,991 \cdot \frac{d}{a} \quad [dB] \quad (2.70)$$

$$SE = 20 \cdot \log \frac{c}{2lf} + 27,2 \cdot \frac{d}{l} \quad [dB] \quad (2.71)$$

Při konstrukci větracích panelů se však velmi často používají vlnovody šestiúhelníkového průřezu (například obrázek 3.8). Pro výpočty se tyto šestiúhelníky nahrazují kruhem [9, 12], čímž je však výsledek ovlivněn nepřesností, hlavně při výpočtu kritické frekvence. Jeden vlnovod tohoto panelu má rozměry podle následujícího obrázku 2.19.



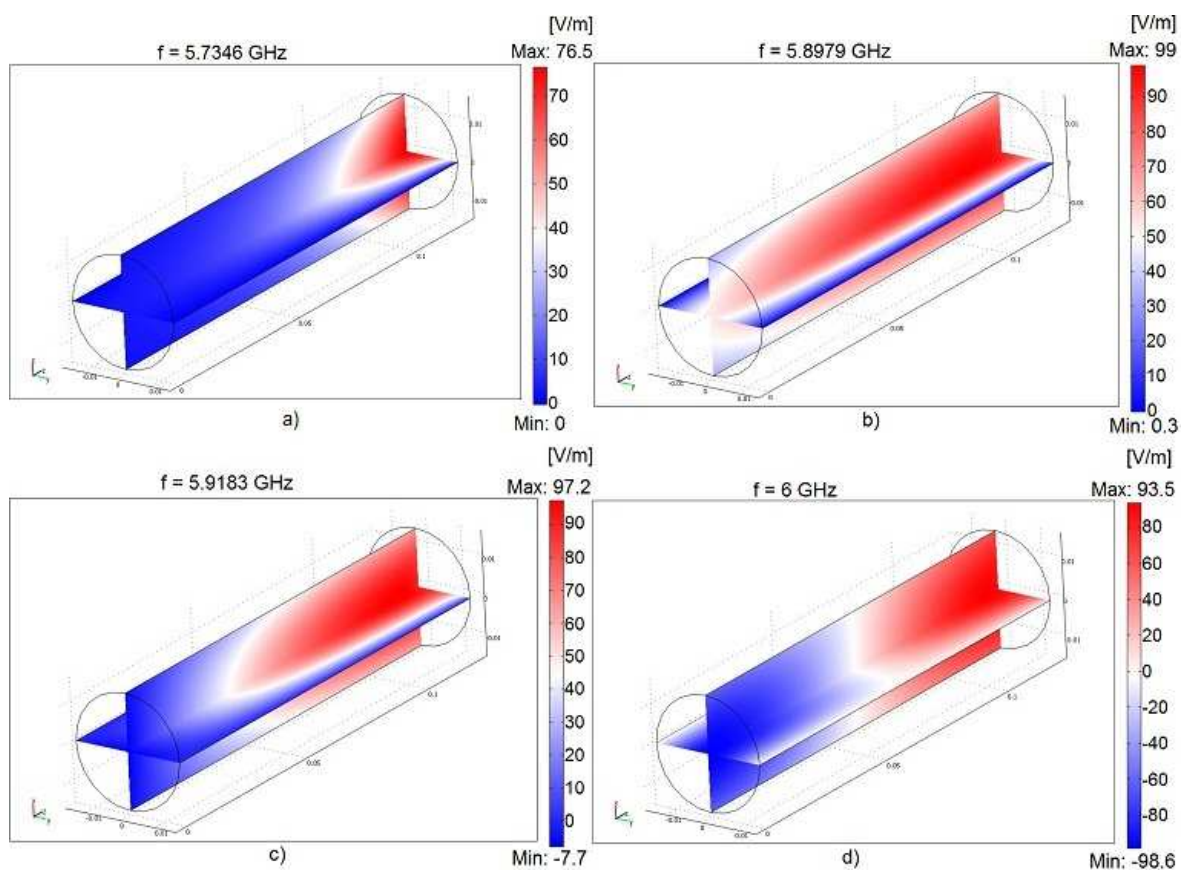
Obr. 2.19: Rozměry jednoho vlnovodu ventilačního panelu

Pro proudění vzduchu je rozhodující průřez vlnovodu. Plocha tohoto ventilačního otvoru vychází 700 mm^2 . Pokud nahradíme šestiúhelník kruhem o stejném průřezu, dostaneme pro hrubé výpočty kruh poloměru $14,927 \text{ mm}$. Takovýto kruhový vlnovod má podle vzorce (2.68) kritickou frekvenci $f_c = 5,89 \text{ GHz}$.

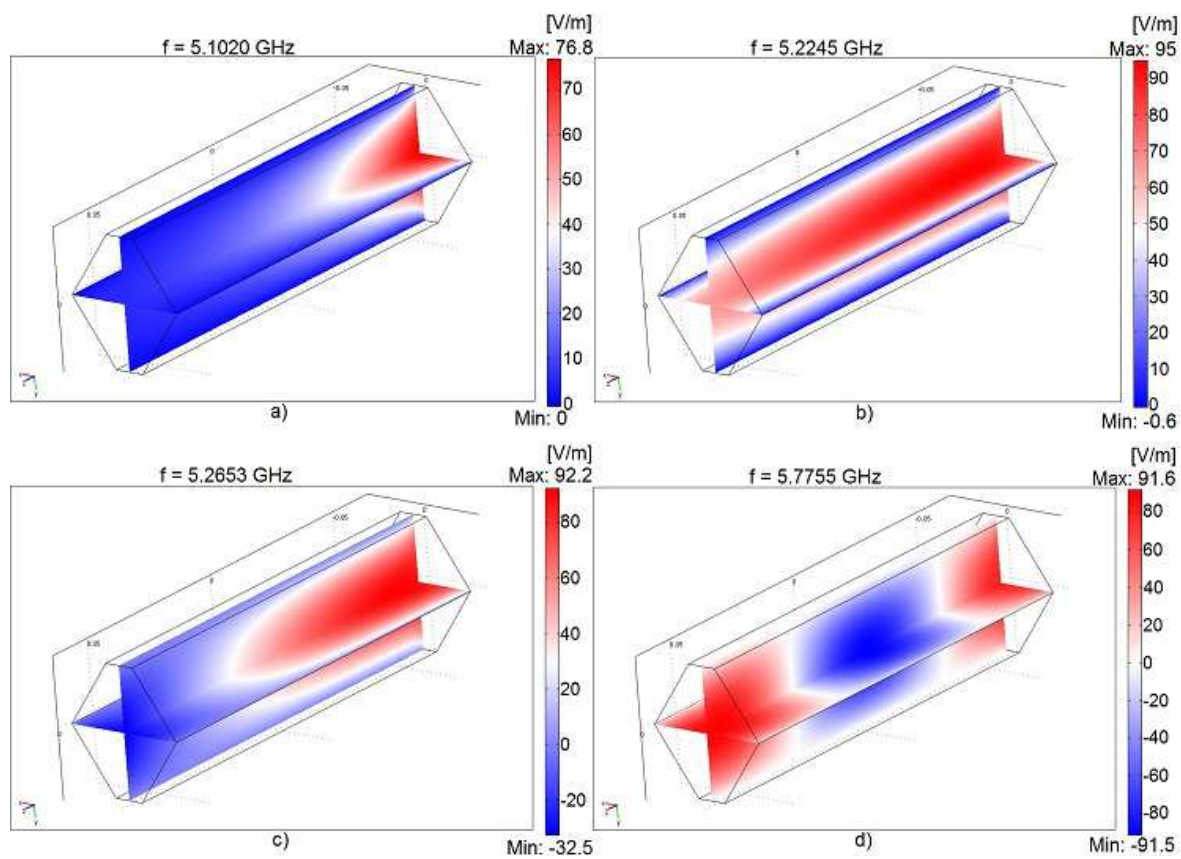
Pokud tento kruhový vlnovod nasimulujeme v programu *COMSOL Multiphysics* vyjde rezonanční frekvence stejně (obrázek 2.20).

Pokud ovšem namodelujeme původní šestiúhelníkový vlnovod, tak zjistíme, že jeho kritická frekvence vychází $f_c = 5,22 \text{ GHz}$ (obrázek 2.21). To je mnohem nižší frekvence než u kruhového vlnovodu.

Na obrázcích 2.20 a 2.21 jsou znázorněny průchody vlny vlnovodem. V případě a) je frekvence přichodící vlny pod kritickou frekvencí, vlna projde jen částí vlnovodu a je utlumena. V části b) je vlna na kritické frekvenci, prochází již celá kladná půlvlna. V případě c) těsně nad kritickou frekvencí se na konci vlnovodu již objevuje záporná půlvlna a za d) při frekvenci vysoko nad kritickou prochází vlny celé.



Obr. 2.20: Intenzita elektrického pole v kruhovém vlnovodu

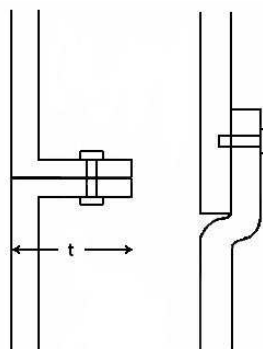


Obr. 2.21: Intenzita elektrického pole v šestiúhelníkovém vlnovodu

Pro výpočty stínící účinnosti tedy nelze šestiúhelník nahradit kruhem stejného průřezu, jako pro výpočet proudění vzduchu a chlazení krytu. Pokud bychom však uvažovali kruhový vlnovod stejného průřezu jako je největší vertikální (horizontální) rozměr šestiúhelníku, tak se dostaneme ke kritické frekvenci blíže. V tomto konkrétním příkladu by byl průměr 35 mm a kritická frekvence dosahuje 5,023 GHz. Tato hodnota se liší od skutečné kritické frekvence šestiúhelníku o 3,7% (při nahrazování kruhem stejného průřezu je chyba 12,8%). Jelikož je tato vypočtená náhradní frekvence níže, lze rozdíl od skutečné kritické frekvence považovat za jakousi bezpečnostní rezervu.

Problém s útlumem vlnovodu lze způsobit i tím, že se vnitřek vlnovodu vyplní dielektrikem. Kritická frekvence, která je závislá na poměru $1/\sqrt{\epsilon\mu}$ (tedy na rychlosti šíření vlny), se tím posune směrem k nižším frekvencím. Štěrbinami a otvory potom může do stíněného prostoru projít daleko širší spektrum signálů, než když jsou nechány volné (vyplněné pouze vzduchem).

Otvory, štěrbiny, spoje a různé jiné nehomogenity jsou nejvíce limitujícím faktorem pro účinnost stínění. Pokud se jim nelze vyhnout, je snaha alespoň potlačit jejich nepříznivý vliv. Dveře a různé přístupové panely, ale i pevné spoje by měly mít dostatečný přesah, aby se netvořily podlouhlé štěrbiny.



Obr. 2.22: Příklady spojů s dobrou stínící účinností [7]

Některé otvory ve stínění však není možné zakrýt, například kvůli chlazení. Takové ventilační průduchy je pak vhodné vytvořit raději z velkého počtu malých otvorů než z několika velkých nebo velké otvory dodatečně překrýt mřížkou. Posune se tím mezní frekvence záření, které se může dostat dovnitř krytu. Velmi výhodné je udělat u otvorů přehyb materiálu do vnitřního prostoru nebo zesílit tloušťku stěny a vytvořit tím vlnovod, který výrazně tlumí vlnění menších frekvencí, než je jeho kritická

frekvence. Průzory a okénka pro optickou kontrolu přístrojů je vhodné překrýt tenkým průhledným vodivým filmem nebo jemnou kovovou sítkou. Důležitý je dokonale vodivý kontakt mezi touto vrstvou a okolním krytem. Tenký film sice nemá žádnou absorpční schopnost, ale může mít výraznou odraznou složku účinnosti stínění. Technologie nanesení takového povrchu by měla umožňovat vytvořit dostatečnou, rovnoměrnou a stabilní vrstvu. Používané postupy jsou: vodivý nátěr, chemické nanášení, vakuové naprašování nebo obloukové rozprašování [9].

Dutinová rezonance

Uzavřené kovové kryty všech možných tvarů mohou působit jako dutinové rezonátory. Elektromagnetické vlny, které se dostanou skrz stěny nebo otvory, se odrážejí na vnitřních stěnách krytu. Při určitých frekvencích dochází ke sčítání vlnění ve vnitřním prostoru. Tyto frekvence se nazývají rezonanční frekvence [7, 13]:

$$f_{rez} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad [Hz] \quad (2.72)$$

Kde m, n, p jsou vidy vlnění, za které se dosazují celá nezáporná čísla, a a, b, c jsou vnitřní rozměry krytu v metrech.

Na rezonanční frekvenci dosahuje pole uvnitř krytu několikanásobné intenzity oproti poli, které dopadá na vnější stranu krytu. Proto je třeba dávat dobrý pozor a do krytů neumisťovat zařízení, která jsou citlivá nebo pracují na rezonanční frekvenci nebo jejích násobcích. Přibližná hodnota nejnižší rezonanční frekvence se vypočte, pokud se uvažují dva největší vnitřní rozměry a příslušné vidy k těmto rozměrům se položí rovny jedné:

$$f_{rez\ low} = \frac{1}{2\sqrt{\mu\epsilon}} \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \quad [Hz] \quad (2.73)$$

Pro rezonátor vyplněný vzduchem:

$$f_{rez\ low} = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} = 1,5 \cdot 10^8 \cdot \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2}} \quad [Hz] \quad (2.74)$$

Pro správnou funkci i nad tímto kmitočtem, je třeba propočítat i všechny ostatní rezonanční frekvence a zjistit, zda nekolidují s pracovní frekvencí zařízení.

Dutinové rezonanci se u kovových krytů není možné vyhnout. Pokud by kolidovala rezonanční frekvence s pracovní frekvencí stíněného zařízení, je třeba upravit velikost krytu tak, aby se posunula rezonanční frekvence výše nebo níže. Čím menší kryt se podaří vytvořit, tím vyšší budou rezonanční kmitočty. Pro potlačení rezonance se mohou pokrýt vnitřní stěny krytu materiálem s vysokou absorpční složkou stínění. Tohoto nákladného způsobu úpravy se však obvykle využívá pouze pro vytvoření elektromagneticky stálého prostředí v bezodrazových komorách, kde se stěny obvykle pokrývají absorpčním materiálem ve tvaru jehlanů. Délka těchto absorbérů by měla být minimálně čtvrtinu vlnové délky nejdelších používaných vln v komoře.

3 Měření účinnosti stínění

3.1 Měření podle MIL-STD-285

Nejčastěji citovaným a nejvíce používaným postupem měření stínění je vojenský standard MIL-STD-285 [14]. Tento standard byl publikován v roce 1956 a platil v nezměněné podobě do roku 1997, kdy byl zrušen.

Měřicí postup se skládá ze dvou kroků. První krok je referenční měření bez stínícího krytu a druhý je vlastní měření stínění. Během těchto dvou měření se nemění pozice vysílací a přijímací antény. Zdroj zkušebního signálu by měl být umístěn vně zkoušeného krytu a měřicí zařízení uvnitř. Účinnost stínění se pak z těchto dvou měření vypočte podle (2.2) respektive (2.3).

V normě jsou definovány tři frekvenční pásma, podle charakteru zkušebních polí.

1. Proti působení nízkoimpedančního magnetického pole je kryt testován v rozsahu od 150 kHz do 200 kHz. Měří se na jedné frekvenci z tohoto pásma. Pro vysílání i přijímání jsou použity kruhové antény poloměru 30 cm. Jejich vzdálenost od stínící stěny je stanovena na 30 cm. Minimální stínící útlum by v tomto pásmu měl být 70 dB.

2. Proti vysokoimpedančnímu elektrickému poli musí být kryt vyzkoušen na frekvencích 200 kHz, 1 MHz a 18 MHz. Pro tato měření jsou použity elektrické monopóly délky 104 cm. Minimální útlum pro splnění požadavků normy je 100 dB.

3. Poslední test je měření útlumu vzdáleného elektromagnetického pole. Zkušební frekvence je stanovena na 400 MHz. Pro měření jsou použity dipóly naladěny na tuto frekvenci. Vzdálenost vysílací antény od stěny musí být minimálně 183 cm. Vzdálenost přijímací antény je 5 cm. Účinnost stínění má být nejméně 100 dB.

Platnost normy byla ukončena v roce 1997 a jako vhodná náhrada byla určena norma IEEE-STD-299.

3.2 Měření podle IEEE-STD-299

Norma IEEE-STD-299 [15] byla poprvé publikována v roce 1969, v roce 1997 do ní byly začleněny některé koncepty z MIL-STD-285 a zatím její poslední revize byla v roce 2006.

Tento dokument popisuje měřicí metody pro stínící kryty, jejichž všechny rozměry jsou větší než 2 m.

Měřicí procedura se také skládá z referenčního měření bez krytu a z testovacího měření s krytem, při zachování pozic použitých antén. Popisované měřicí postupy jsou použitelné v rozsahu od 9 kHz do 18 GHz a dělí se do tří pásem popsanych v následující tabulce.

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

Tabulka 3.1: Rozdělení frekvenčních pásem v IEEE-STD-299

Měření se provádí na jedné frekvenci z každého rozmezí daného tabulkou 3.1. Přesnou frekvenci stanovuje osoba provádějící měření nebo výrobce krytu.

Norma popisuje velmi detailně přesné pozice měřicích antén, hlavně v oblasti dveří, ventilace nebo v rohu krytu. A také stanovuje, v kolika pozicích antény uvnitř krytu se provádí měření v závislosti na velikosti krytu.

Norma nestanovuje limity potřebné pro splnění nebo nesplnění testu. Potřebnou úroveň stínění stanovuje výrobce nebo uživatel krytu.

V pásmu nízkých frekvencí od 9 kHz do 20 MHz se měří pomocí 30 cm kruhových antén. Jejich vzdálenost od testované stěny má být 30 cm.

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 (2.72). Zjednodušený vzorec pro výpočet nejnižší možné rezonanční frekvence je (2.74).

Při výběru testovací frekvence je doporučeno se vyhnout rezonanční frekvenci nebo frekvenci jí blízké. Vysílací anténa je umístěna vně krytu ve vzdálenosti 1,7 m od stěny a přijímací anténa uvnitř ve vzdálenosti 0,3 m od stěny.

V pásmu vysokých frekvencí od 300 MHz do 18 GHz se jako vysílací anténa může použít půlvlnný dipól, bionická, horn, yagi, logaritmicko-periodická nebo jiná lineární anténa. Pro přijímací antény jsou použity půlvlnné dipóly nebo horn antény. Měření se provádí na jedné frekvenci z každého podpásmu daného tabulkou 3.1.

3.3 Měření podle ASTM D4935

Norma Americké společnosti pro testování materiálů (American Society for Testing Materials ASTM D4935 [16]) byla publikována v roce 1999. Její platnost sice byla již ukončena v roce 2005, ale metoda, kterou popisuje, je stále využívána v mnoha laboratořích pro měření stínící účinnosti plochých materiálů.

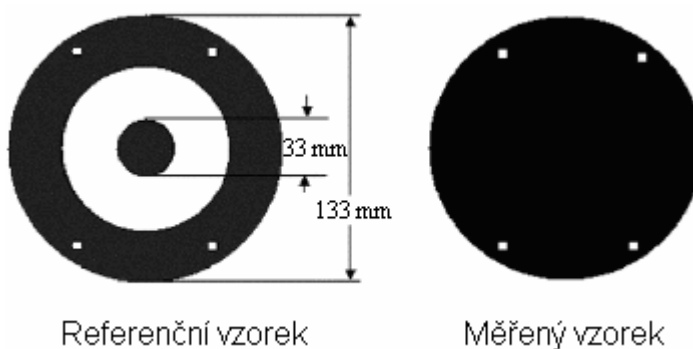
Metoda je založena na podélně rozděleném koaxiálním držáku (obr. 3.1), do kterého se vkládají vzorky testovaného materiálu. Při měření se zkoumá, jak vložený materiál ovlivní kapacitní vazbu mezi vodiči v držáku, oproti referenčnímu vzorku.

Metoda je použitelná pro frekvence od 30 MHz do 1,5 GHz. Pro nižší frekvence není měření přesné, kvůli nedokonalé kapacitní vazbě v magnetickém poli. Omezení pro vysoké frekvence je dáno buzením dalších módů vlnění odlišných od TEM vlny.



Obr. 3.1: Držák vzorků ASTM D4935 [17]

Účinnost stínění se vypočítá z porovnání různého útlumu kalibračního vzorku a vzorku testovaného materiálu (obr. 3.2). Pro výpočet může být využit poměr intenzit elektrických polí nebo poměr výkonů.



Obr. 3.2: Podoba vzorků pro měření podle ASTM D4935

Tento měřicí postup už není podporován a dále rozvíjen organizací ASTM, ale je stále pro měření často využíván, díky svojí jednoduchosti a nenáročnosti. Pro měření nejsou třeba velké vysílací a přijímací antény, stíněné TEM buňky nebo bezodrazové komory. Pro stanovení stínící účinnosti je potřebný pouze relativně malý vzorek materiálu. Takže tato metoda je vhodná především pro výzkumné laboratoře a vývojová pracoviště, které vyvíjejí a testují nové stínící materiály, jako jsou tenké vodivé filmy [18] nebo stínící textilie [17].

3.4 Měření podle ČSN EN 61000-5-7

Postup měření účinnosti stínění, zkušební podmínky a vyhodnocení zkoušek popisuje norma ČSN EN 61000-5-7 - Elektromagnetická kompatibilita: Směrnice o instalacích a zmírňování vlivů – Stupně ochrany kryty proti elektromagnetickým rušením (EM kód) [19]. Norma udává návod, jak testovat účinnost stínění prázdných mechanických krytů a jak naměřené výsledky reprezentovat pomocí EM kódu tak,

aby si výrobce zařízení mohl vybrat kryt s požadovanou schopností zeslabení elektromagnetického pole.

Technické požadavky normy:

Klimatické podmínky v laboratoři musí být v mezích pro provoz zkoušeného zařízení a vybavení laboratoře. Vlhkost vzduchu nesmí překračovat hodnotu, při které by docházelo ke kondenzaci na zařízeních.

Zkušební vzorky musí být čisté a nové. Pokud je to možné, je vhodné zkoušet několik vzorků vybraných z většího počtu výrobků na základě statistických pravidel pro výběr.

Zkoušené frekvence od sebe nesmí být s větším rozestupem než je 1 % předcházející frekvence. Zabrání se tak možnému vynechání měření nebo špatnému výběru frekvence. Při porovnání většího počtu měření je možné dobře rozpoznat, na jakých frekvencích je stínění nedostačující.

Měření se provádí pro horizontální i vertikální polarizaci vysílací antény v rovině paralelní k nejbližšímu povrchu krytu. Zkoušený objekt se postupně natáčí nejméně třemi stranami k vysílací anténě. Pokud má kryt nějaké otvory, vstupy/výstupy nebo jiné nehomogenity na více než třech stranách, pak se zkouší všechny tyto strany. Antény se nastavují proti středu exponované strany krytu. Pokud je kryt větší než 2,5 m x 2,5 m, rozdělí se na segmenty 2,5 m x 2,5 m a zkouší se každý segment zvlášť. Dále, pokud je to možné, se nastavuje anténa přímo proti každému otvoru ve zkoušené straně krytu.

Testy musí probíhat ve stíněné bezodrazové komoře se stěnami pokrytými absorpčním materiálem pro zajištění homogenity pole od 10 MHz výše. Vnitřní rozměry komory musí být alespoň trojnásobek rozměrů zkoušeného zařízení. Pokud není možné měřit v komoře, je možné měření provést na volném prostranství, kde nejsou v okolí 5 m od zkoušeného zařízení a vysílací antény žádné vodivé předměty.

Je nutné používat spoje optickými vlákny nebo stíněnými kabely, jejichž stínící účinnost je alespoň o 10 dB větší než účinnost požadována pro zkoušený kryt. Délka kabelu přijímací antény musí být minimální, zejména pokud je vystaven zkušebnímu poli. Pro dobrý přenos signálů se u kabelů dává přednost šroubovým spojům.

Neuzemněné kryty se musí umístit na nevodivý podstavec o výšce 0,8 m. Pro velké kryty můžeme podstavec snížit na 0,1 m.

Vysílací anténa musí být od zkoušeného krytu dále než dvojnásobek vlnové délky zkušebního pole nebo 2,5 m (podle toho co je menší). Přijímací anténa by měla být 0,3 m od zkoušené strany, pokud to umožňuje velikost krytu. Požadavky na přijímací antény jsou v podstatě shodné s normou IEEE-STD-299. Z toho vyplývá, že také není možné otestovat objekty menší než 2 m, i když to není v normě přímo uvedeno.

Ve zkušebním protokolu by měly být zaznamenány všechny odchylky od těchto požadavků a od stanoveného měřicího postupu.

Postup měření

Pro výpočet stínící účinnosti se musí změřit výkon elektromagnetického pole, které dopadá na stínící přepážku a vydělit ho výkonem pole, které se dostane do krytu. Pro měření potřebujeme vysílací a přijímací anténu. Nejprve se provede kalibrační měření, kterým se zjistí výkon dopadající na kryt.

Při kalibračním měření se umístí antény do potřebné vzdálenosti a nechá se mezi nimi volný prostor. Vysílací anténou generujeme elektromagnetické pole v potřebném rozsahu kmitočtů s 1% frekvenčním krokem. Na jednotlivých frekvencích se ukládají hodnoty výkonu změřené přijímací anténou (v normě jsou značeny jako P_c).

Poté se přistoupí k měření stínící účinnosti krytu. Celé uspořádání měřicí sestavy se ponechá stejné jako při kalibračním měření, pouze přijímací anténu umístíme do testovaného krytu. Je důležité, aby antény byly pořád na stejných místech ve zkušebním prostoru. Vysílací frekvence také musí zůstat stejné jako při kalibračním měření (přijímací anténa měří výkon P_m).

Na každé jednotlivé frekvenci se pak stínící účinnost vypočte jako: [19]

$$SE [dB] = P_c [dBW] - P_m [dBW] \quad (3.1)$$

Pro správné vyhodnocení účinnosti stínění musíme provést ještě měření šumu. Při tomto měření je uspořádání a vysílací frekvence stejné jako při kalibračním měření, pouze přijímací anténu nahradíme stíněným, impedančně přizpůsobeným zakončením kabelu. Tímto měřením se zjistí celkový šum způsobený zdrojem signálu, elektromagnetickým pozadím v laboratoři a měřicím systémem. Pokud se dá změřený výkon šumu (P_{noise}) do poměru s kalibračním výkonem získá se na každé

frekvenci maximální měřitelná hodnota SE. Tato hodnota je v normě označována jako měřicí rozsah:

$$MR [dB] = P_c [dBW] - P_{noise} [dBW] \quad (3.2)$$

Vyhodnocení zkoušek

Po změření a vypočtení účinnosti stínění na jednotlivých frekvencích se může kryt označit takzvaným EM kódem. Kód se zapisuje ve formátu EMABCDEF, kde označovače stínění A až F určují nejnižší změřenou stínící účinnost na každém frekvenčním rozsahu daném tabulkou 3.2. Pokud se v nějakém frekvenčním pásmu neměřilo, je v kódu na jeho místě písmenko x místo hodnoty označovače.

Například kryt, který byl zkoušen v rozsahu 1 MHz až 10 GHz a v pásmech C a D byla naměřena nejnižší účinnost stínění přes 60 dB a v pásmu E přes 30 dB bude označen EM kódem: EMxx663x

Má-li kryt několik možných konfigurací nebo uspořádání a v každém má jinou účinnost stínění, je třeba vyznačit EM kód pro každou variantu zvlášť.

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

Tabulka 3.2: Frekvenční pásma a hodnoty označovačů stínění EM kódu

3.5 Měření pomocí anténového setu

Společnost ETS-Lindgren vyrábí anténový set MF-130D určený přímo pro testování účinnosti stínění. Set se skládá ze dvou nástavců, vysílacího a přijímacího, na které se montují antény. Na každý nástavec jsou dvě antény zajišťující měření na různých frekvencích. Jedna operuje na frekvencích 10 kHz, 156 kHz, 1 MHz a 10 MHz a druhá na frekvencích 8 MHz, 16 MHz, 32 MHz a 64 MHz. Napájení antén je z NiCd baterií, které jsou v nástavcích. Na nástavcích jsou LCD displeje a tlačítka pro ovládání setu, nastavení měření a pro odečítání popřípadě ukládání naměřených výsledků.

Postup měření

Po zapnutí si antény zkontrolují úroveň nabití baterií. Poté přijímací anténa nabídne kalibraci měření. Kalibrace se provádí po každém startu. Kalibrování lze provést podle předpisů norem NSA 65-6, IEEE STD-299 nebo MIL-STD-285. Antény se umístí proti sobě do kalibrační vzdálenosti bez přítomnosti stínění. Během kalibrace nesmí být v okolí 0,5 m od antén žádné vodivé předměty. Pro správné natočení a pro nastavení vzdálenosti lze na antény připevnit plastové tyčky, které pomáhají s nastavením jak při kalibraci tak při samotném měření.



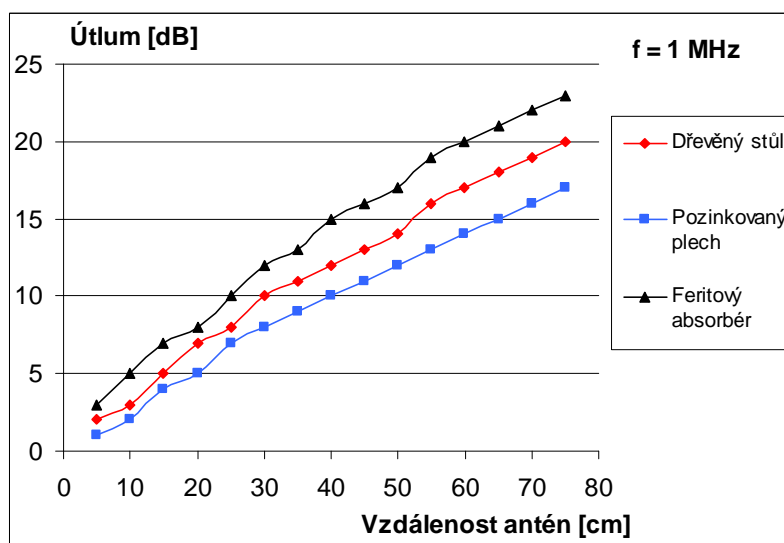
Obr. 3.3: Kalibrace podle normy IEEE STD-299 a MIL-STD-285

Údaj na displeji přijímací antény instruuje obsluhu, jakou kalibrační frekvenci má nastavit na vysílací anténě. Postupně prochází všechny 4 frekvence a ukládá si hodnoty pole při kalibrační vzdálenosti. Průběh kalibrace se zobrazuje na displeji. Po dokončení kalibrace je anténa připravena na měření účinnosti stínění. Anténa automaticky přepočítává naměřené hodnoty rovnou na decibely. Při kalibrační vzdálenosti bez přítomnosti krytu tedy ukazuje útlum 0 dB.

Po kalibraci se nastaví na vysílací anténě požadovaná frekvence a umístí se do krytu. Vzdálenost od stěny krytu se nastaví pomocí plastové tyčky, která má délku 30 cm (odpovídá požadavku ČSN EN 61000-5-7). Z opačné strany krytu ve stejné vzdálenosti se umístí přijímací anténa (vzdálenost neodpovídá požadavku 2,5 m normy ČSN EN 61000-5-7), na jejímž displeji se odečítá účinnost stínění v dB a naměřené hodnoty se i ukládají do paměti antény. Na každé ze čtyř frekvencí je možno uložit až 63 hodnot. Pokud se měřená hodnota mění při pohybu antény okolo stěny krytu, lze využít pro nalezení nejnižší účinnosti funkci alarmu. Do paměti se uloží libovolná naměřená hodnota, pohybuje se anténou podél stěny krytu a anténa zvukovým signálem upozorní, jakmile naměří nižší úroveň SE než je uložená hodnota. Nová nižší hodnota pak v paměti může nahradit původní a může se pokračovat ve vyhledávání místa s nejmenším útlumem. Poté se na vysílací i přijímací anténě přepne na další postupnou frekvenci a pokračuje se v měření podle stejného postupu.

Po změření všech potřebných hodnot je můžeme z paměti v nastavci antény uložit do počítače přes RS-232 rozhraní pomocí softwaru dodávaného výrobcem. Anténu nesmíme vypnout před stažením naměřených hodnot, vynulovali bychom tím paměť.

Pokud má kryt velkou tloušťku stěny (například stěna stíněné místnosti) je potřeba počítat s tím, že se nám změní vzdálenost antén oproti kalibrační vzdálenosti. S rostoucí vzdáleností antén roste i naměřený útlum. Závislost útlumu na vzdálenosti a na prostředí je v grafu 3.4:



Obr. 3.4: Závislost útlumu na vzdálenosti antén a na jejich okolí

Tento graf je pro frekvenci 1 MHz, na všech ostatních frekvencích jsou průběhy velmi podobné, jednotlivé hodnoty se od sebe liší o 1 až 2 dB. Kalibrace i měření probíhaly v bezodrazové komoře. Nejprve jsem změřil útlum při zvětšující se vzdálenosti na dřevěném 80 cm vysokém stole. Poté jsem pro porovnání měření zopakoval, ale antény stály na pozinkovaném plechu. Plech odrážel do přijímací antény i vlny, které by ji jinak minuly a snižoval tím útlum. Při třetím měření jsem pod antény dal feritové absorbéry, které působí přesně opačně než odrazný plech.

Antény neumožňují měření šumu, které je požadováno v normě ČSN EN 61000-5-7. Při laboratorním měření ve stíněné bezodrazové komoře to není problém, ale při měření v průmyslovém prostředí bychom mohli dostat zkreslené výsledky. Vliv okolního elektromagnetického pozadí by měl být potlačen kalibrací, která se provádí před každým měřením. Měřicí rozsah nemůžeme spočítat z naměřené hodnoty šumu, ale máme ho daný přímo výrobcem. Přesnost měření výrobce udává ± 2 dB.

Norma	10 kHz	Ostatní frekvence
NSA 65-6	120 dB	130 dB
IEEE STD-299	120 dB	130 dB
MIL STD-285	110 dB	120 dB

Tabulka 3.3: Měřicí rozsahy antén MF-130D na jednotlivých frekvencích[20]

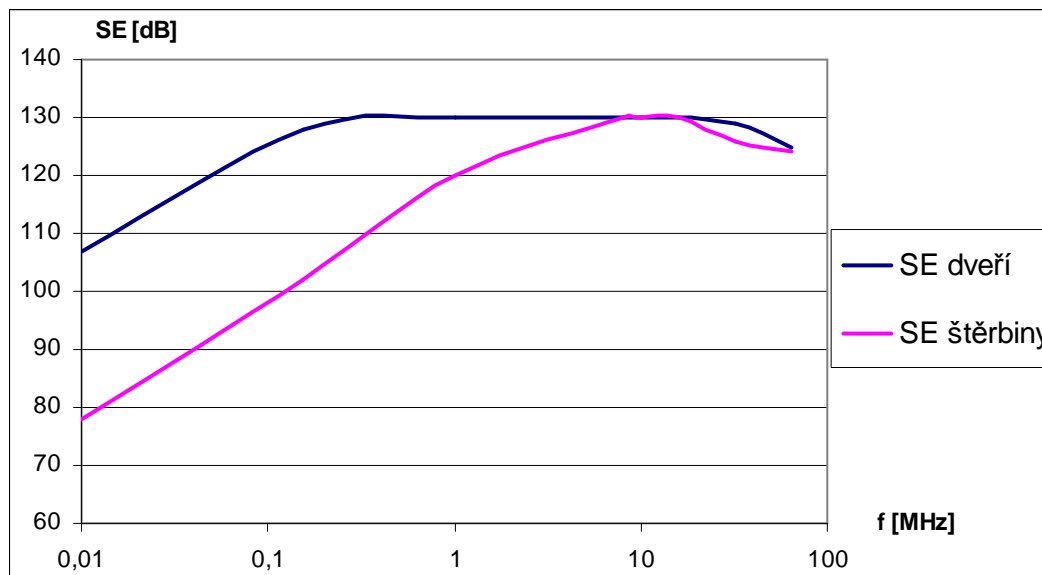
Měření

Antény jsou 48 cm vysoké a 33 cm široké. Kvůli těmto velkým rozměrům se hodí pouze pro testování velkých přístrojových krytů a skříní. Ideální jsou, dle mého názoru, pro ověření stínící účinnosti částí laboratoří, celých stíněných místností nebo budov. Proto byly jako testovací objekty pro první měření na vyzkoušení antén vybrány stíněné laboratoře elektromagnetické kompatibility.

Nejdříve proběhlo měření ve stíněné bezodrazové komoře. Kalibrace byla provedena podle normy IEEE STD-299 uvnitř komory na dřevěném stole. Nebyla měřena účinnost stínění celé komory. To by musely být stěny komory rozděleny na čtverce o hraně 2,5 m a měření by probíhalo uprostřed každého čtverce. Pro toto první orientační měření bylo zvoleno místo, kde lze očekávat nejsnazší průnik elektromagnetických vln stěnou komory a to je štěrbina okolo dveří. A pro porovnání účinnosti byl ještě zvolen bod přímo uprostřed dveří. Naměřené výsledky jsou v tabulce 3.4 a grafu 3.5.

Frekvence [MHz]	0,01	0,156	1	8	10	16	32	64
SE dveří [dB]	107	129	130	130	130	130	129	125
SE štěrbiny [dB]	78	102	120	130	130	130	126	124

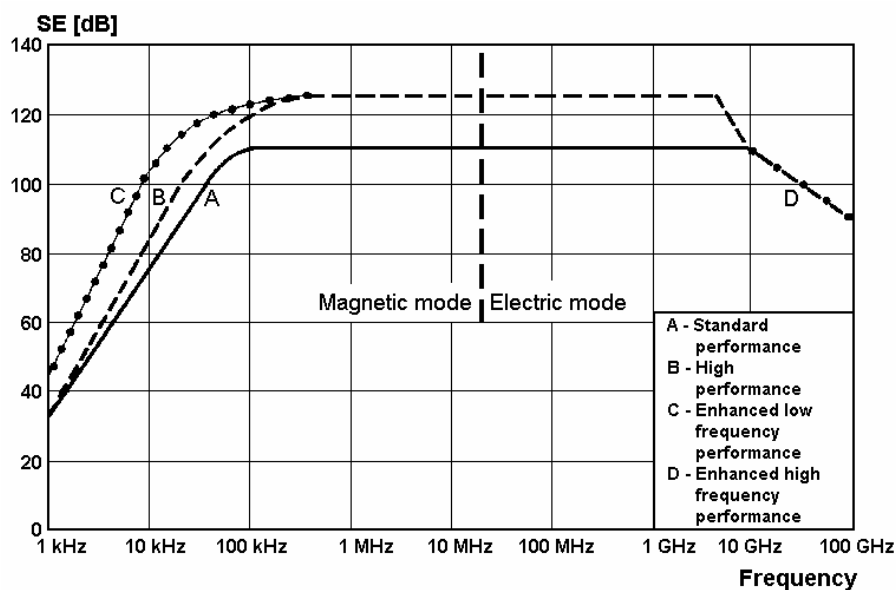
Tabulka 3.4: Účinnost stínění dveří bezodrazové komory



Obr. 3.5: Účinnost stínění dveří bezodrazové komory

Po celém obvodu dveří byly naměřené hodnoty podobné s minimálními rozdíly několika dB.

Zavřené dveře komory mají sice několikacentimetrový přesah a jsou po celém obvodu vybaveny pružinovými měděnými kontakty, ale i tak ovlivňuje tato nehomogenita ve stěně komory její účinnost stínění. Komora by měla mít ve svém pracovním pásmu od 10 MHz do 18 GHz účinnost stínění vyšší než 120 dB. To bylo měřením prokázáno na několika málo frekvencích i v místě nejhorší očekávané účinnosti stínění. Naměřený průběh odpovídá i teoretickým předpokladům popsaným v [7], kde autor uvádí graf účinnosti stínění pečlivě konstruovaných krytů nebo stíněných komor.



Obr. 3.6: Teoretické průběhy účinnosti stínění ideálních krytů [7]

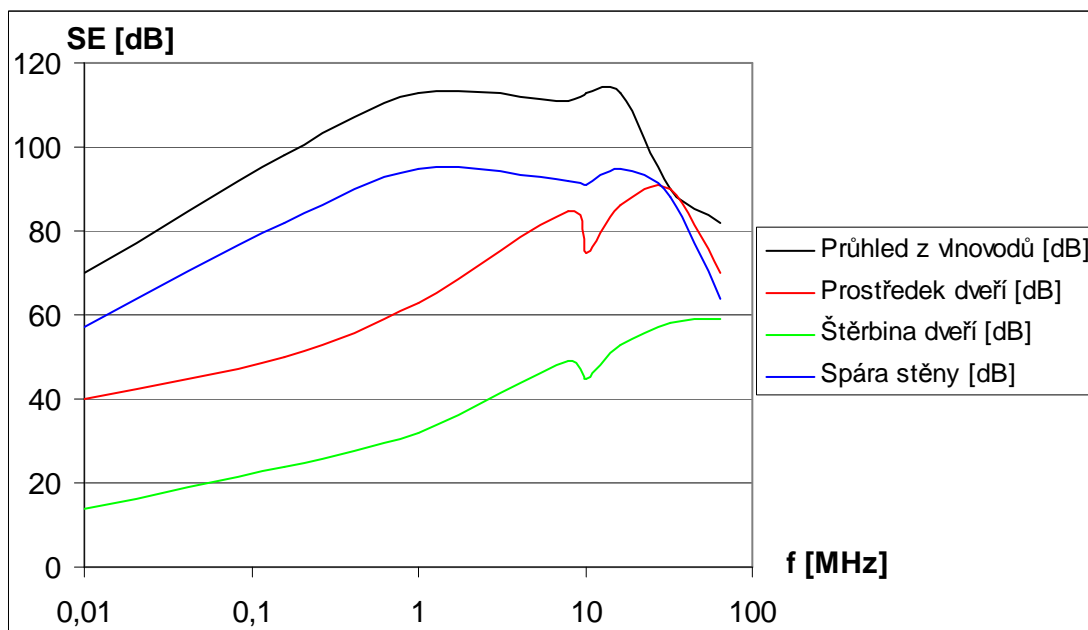
Další testování bylo provedeno v odstíněné plechové komoře umístěné v laboratoři vysokého napětí a elektromagnetické kompatibility. Komora se používá především pro různé testy elektromagnetické odolnosti zařízení a má zajišťovat zkušební podmínky a reprodukovatelnost těchto zkoušek.

Pro měření byla vybrána 4 místa na stěně komory – průhled do vnitřku komory, který je tvořen vlnovody, štěrbina okolo dveří, střed dveří a spára mezi jednotlivými plechy, které tvoří stěnu komory.

Frekvence [MHz]	0,01	0,156	1	8	10	16	32	64
Průhled z vlnovodů [dB]	70	98	113	111	113	113	90	82
Prostředek dveří [dB]	40	50	63	85	75	86	90	70
Štěrbina dveří [dB]	14	24	32	49	45	53	58	59
Spára stěny [dB]	57	82	95	92	91	95	88	64

Tabulka 3.5: Účinnost stínění několika míst plechové komory

Skok v hodnotách na 10 MHz je způsoben výměnou měřicích antén.



Obr. 3.7: Účinnost stínění několika míst plechové komory

Nejvyšší stínící účinnost vykazoval průhled z vlnodů.



Obr. 3.8: Průhled z vlnodů plechové odstíněné komory

Vlnovody mají průřez nepravidelného šestiúhelníku s delšími stranami 22 mm a kratšími 8 mm a délku 12 cm (obrázek 2.19). Celý průzor se skládá z 1078 vlnodů. Kritická frekvence těchto šestiúhelníkových vlnodů vychází podle simulace 5,22 GHz. Při náhradě za kruhové vlnovody o průměru 3,5 cm vychází útlum podle vzorce (2.69) pro podkritické frekvence přibližně 109 dB. Nejhorší stínění bylo zjištěno okolo dveří. Okraj dveří by bylo vhodné vybavit pružinovými kontakty. Spára mezi plechy, které tvoří komoru, nepropouští nijak výrazně vlnění, protože plechy k sobě velmi dobře přiléhají a v místě styku jsou zahnuty tak, aby tvořily vlnod.

Výhody a nevýhody setu MF-130D

Největší nevýhodou těchto antén je omezený počet frekvencí, na kterých je možné měřit. Lze tedy splnit podmínky měření pouze pro pásmo nízkých frekvencí (částečně pro první podpásmo z rezonančních frekvencí) z IEEE-STD-299. Proměření osmi frekvencí však nemůže postihnout všechny jevy, ke kterým může v krytu docházet. Měření nesplňuje požadavek normy ČSN EN 61000-5-7 na 1% frekvenční krok a zkoušenému krytu nemůžeme tedy přidělit žádný EM kód. Kmitočty od 10 kHz do 64 MHz postihují spíše oblast rušení, které vzniká v průmyslovém prostředí, ale neotestují kryt na signály vysílačů rádií a televizí, mobilních telefonů, wi-fi sítí a podobných signálů, které v současné době nabývají na významu.

Limitujícím faktorem pro měření je i velikost antén. Smyčka antény by neměla zabírat více jak 90 % plochy nejmenší strany krytu a od měřené strany krytu má být vzdálená 30 cm. Pokud bychom měřili všechny strany krytu tvaru kvádra, pak rozměry jeho kratších hran by musely být alespoň 55 cm.

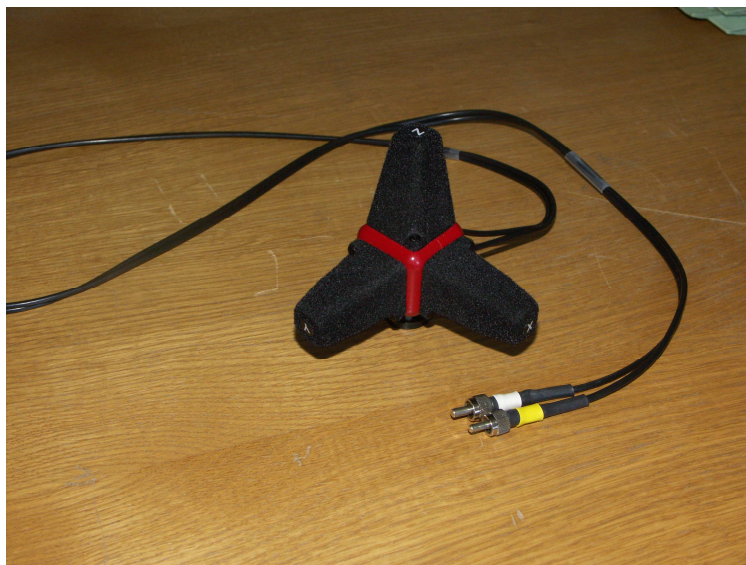
Antény neumožňují měření šumu popsané v normě ČSN EN 61000-5-7. Nemůžeme tedy změřit úroveň elektromagnetického pozadí v místě měření. K potlačení vlivu pozadí by mělo dojít během kalibrace, která se provádí po každém spuštění antény. Potřebujeme tedy neměnné podmínky během celého měření.

Hlavní výhodou setu je rychlé a snadné a levné měření. Díky tomu je vhodné antény použít pro rychlé orientační měření už například během vývoje zařízení, kdy je snadné a málo nákladné provádět změny v návrhu a konstrukci. Pro finální otestování celkové stínící účinnosti zařízení však vhodné nejsou, zejména kvůli jejich nedostatečnému frekvenčnímu rozsahu.

3.6 Měření pomocí systému na testování elektromagnetické odolnosti

Při testování odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli dle normy ČSN EN 61000-4-3 se zkoušené zařízení vystavuje účinkům elektrického pole konstantní velikosti. Toto známé pole se může dosadit do vzorce pro účinnost stínění (2.2) za E_0 , tedy pole které dopadá na stěnu krytu. Pro výpočet účinnosti stínění se pak už jen potřebuje změřit velikost pole uvnitř krytu. Aby bylo možné měřit účinnost stínění krytů menších než 2 metry, je třeba

nahradit rozměrné měřicí antény jiným zařízením. Software systému pro testování odolnosti spolupracuje se sondou elektrického pole HI-6005 od firmy ETS-Lindgren, kterou používá při kalibraci vysílaného pole a která mu tedy zprostředkovává měření elektrického pole.



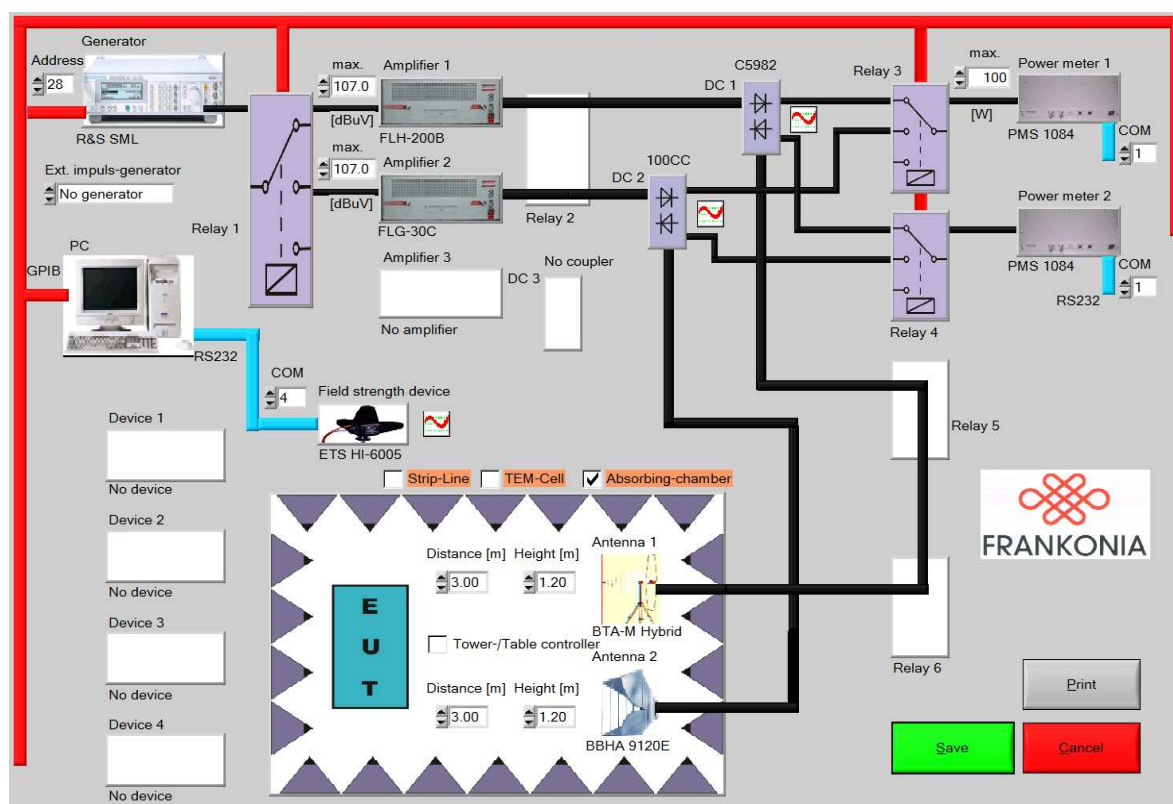
Obr. 3.9: Sonda elektrického pole HI-6005

Pomocí tohoto systému a sondy pole tedy lze splnit podmínky normy ČSN EN 61000-5-7 na testování účinnosti stínění. Nejprve se bez přítomnosti krytu nakalibruje pomocí sondy systém tak, aby vysílal požadovanou konstantní úroveň pole E_0 . Poté je umístěn do zkušebního prostoru kryt, v němž je uzavřena sonda pole a změří se velikost pole E_i uvnitř krytu. Dosazením do (2.2) se získá účinnost stínění. Systém splňuje i další požadavky normy ČSN EN 61000-5-7 ... měření probíhá s 1% frekvenčním krokem a měřicí vzdálenost je 3 m. Na rozdíl od požadavků této normy však počítáme účinnost pouze z elektrického pole, ne z vyzařovaného a přijímaného výkonu.

Systém také neumožňuje měření šumu, které by mělo probíhat tak, že by se místo přijímací antény (sondy) umístilo stíněné zakončení kabelu. Bez připojené sondy by systém neukazoval žádné hodnoty. Úroveň šumu by však měla být dostatečně nízká a neměnná, aby neovlivňovala měření, díky tomu, že měření lze provádět pouze ve stíněné bezodrazové komoře, že sonda je připojena optickým kabelem a že všechna ovládací a měřicí zařízení jsou umístěna mimo zkušební prostor.

3.6.1 Technické parametry systému

System pro testování odolnosti je zapojen podle schématu na obrázku 3.10.



Obr. 3.10: Schéma systému pro testování odolnosti [21]

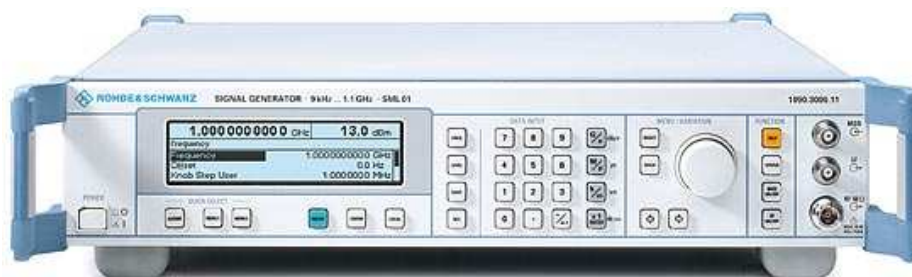
System je ovládán softwarem Frankonia RF-LAB, který je umístěn v řídicím počítači. Počítač komunikuje s prvky systému přes GPIB rozhraní. V softwaru se nastavují všechny parametry měření, jako jsou frekvenční rozsah (maximálně od 80 MHz do 3 GHz), frekvenční krok (používá se 1%), intenzita elektrického pole (maximálně 10 V.m^{-1}), čas vysílání signálu na každé frekvenci, modulace signálu (pro testování odolnosti se používá 80% amplitudová modulace signálu s 1 kHz obálkou, při měření stínění modulaci nepoužíváme). Podle zadaných parametrů ovládá počítač signální generátor R&S SML, ze kterého jde signál do spínacího pole, které přepíná mezi zesilovači. Zesilovač FLH-200B je pro signály od 80 MHz do 1 GHz a zesilovač FLG-30C od 1 GHz do 3 GHz. Ze zesilovače je signál veden do měřiče výkonu PMS 1084 a přes stíněné průchodky kabelem do prostoru zkušební bezodrazové komory a do vysílacích antén BTA-M Hybrid nebo BBHA 9120E. Měření intenzity pole ve zkušebním prostoru (3 m od vysílací antény) a zpětnou vazbu zprostředkovává sonda pole ETS HI-6005.

Signálový generátor

V systému je použit signálový generátor Rohde & Schwarz SML 03. Parametry vysílaného signálu jsou dány nastavením v ovládacím softwaru RF-LAB.

Frekvenční rozsah	9 kHz až 3.3 GHz
Rozlišení (nejnižší krok)	0.1 Hz
Rychlost nastavení	< 10 ms
Rozsah úrovní	- 140 dBm až 13 dBm
Rozlišení úrovně	0.1 dBm
Vstupní impedance (externí ref.)	50 Ω

Tabulka 3.6: Základní parametry R&S SML03 [22]



Obr. 3.11: Signálový generátor R&S SML03 [22]

Spínací pole

Pro přepínání signálu mezi zesilovači podle jeho frekvence slouží spínací pole RSU (Relay Switching Unit) firmy Frankonia. RSU je použitelné pro přepínání koncových zesilovačů, antén nebo výkonových měřicích přístrojů ve všech vysokofrekvenčních a EMC měřeních. Může přepínat jeden vstup mezi dva až tři výstupy.

Frekvenční rozsah	do 40 GHz
VSWR	1.14
Vložný útlum	0,1 dB
Max. vstupní výkon	440 W
Impedance	50 Ω
Spínací doba	60 ms
Počet operací	max 10/min

Tabulka 3.7: Základní parametry RSU [23]

Zesilovače

Zesilovače použité v systému jsou od firmy Frankonia. Zvyšují úroveň výstupního signálu z generátoru na požadovanou testovací úroveň podle zadání počítače. U zesilovačů se požaduje velký zisk při velkém frekvenčním rozsahu bez zarušení nebo zkreslení signálu.

Zesilovač	FLH 200B	FLG 30C
Frekvenční rozsah	20 MHz - 1GHz	1 GHz - 3 GHz
Max. výstupní výkon	200 W	30 W
Zisk	54 dB	46 dB
Zvlnění	+/- 2 dB	+/- 1,5 dB
Vstupní impedance	50 Ω	50 Ω
Výstupní impedance	50 Ω	50 Ω

Tabulka 3.8: Základní parametry zesilovačů [24]

Měřič výkonu

Frankonia PMS 1084 je dvoukanálový měřič výkonu. Měří výkon, který jde ze zesilovače do antény a zároveň výkon odražený zpět do systému. Obě změřené hodnoty se ukládají do počítače.

Frekvenční rozsah	100 kHz až 6 GHz
Měřicí rozsah	- 60 dBm až 20 dBm
VSWR	1.15
Vstupní impedance	50 Ω
Přesnost	+/- 1 dB
Rozlišení	0.1 dB

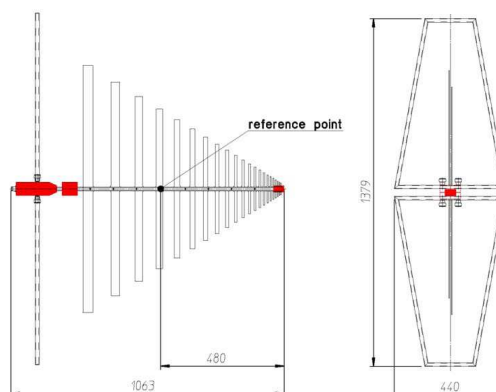
Tabulka 3.9: Základní parametry měřiče výkonu PMS 1084 [25]

Vysílací antény

Pro měření používáme dvě antény. Pro pásmo do 1 GHz je výhodnější kombinovaná širokopásmová bikónicko-logaritmická (bi-log) anténa Frankonia BTA-M a nad 1 GHz trychtýřová anténa BBHA 9120E od Schwarzbeck Mess Elektronik.

Frekvenční rozsah	30 MHz - 3 GHz
Impedance	50 Ω
Max. vstupní výkon	100 W

Tabulka 3.10: Základní parametry antény BTA-M [26]



Obr. 3.12: Anténa BTA-M [26]

Frekvenční rozsah	0.5 - 6 GHz
Impedance	50 Ω
Max. vstupní výkon	300 W

Tabulka 3.11: Základní parametry antény BBHA 9120E [27]



Obr. 3.13: Anténa BBHA 9120E

Sonda elektrického pole

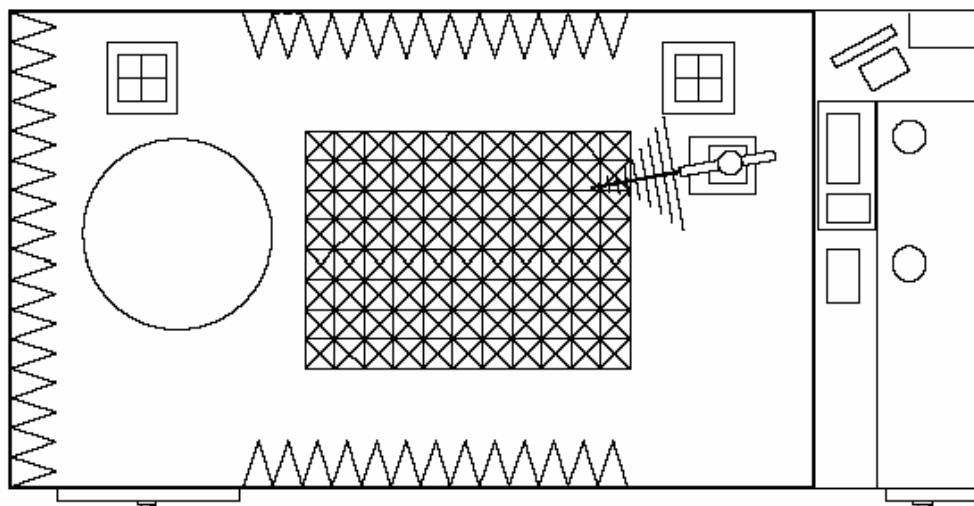
Sonda elektrického pole HI-6005 od firmy ETS-Lindgren zajišťuje měření intenzity pole při kalibraci a při testování stínění. Používá se místo přijímací antény požadované v normě ČSN EN 61000-5-7. Velkou výhodou je připojení sondy optickými vlákny, takže nemůže dojít k zarušení signálu, který posílá do počítače. Další výhodou jsou malé rozměry sondy umožňující testování stínění i menších krytů. Sonda měří elektrické pole ve třech osách a jako výslednou intenzitu vyhodnotí vektorový součet měření.

Dynamický rozsah	0.5 až 800 V.m ⁻¹
Rozlišení	0,01 V.m ⁻¹
Frekvenční rozsah	100 kHz až 6 GHz
Přesnost	+/- 1 dB
Rozměry	8 x 7,5 x 7,5 cm

Tabulka 3.12: Základní parametry sondy pole HI-6005 [28]

Stíněná bezodrazová komora

Komora byla postavena a vybavena firmou Frankonia. Komora je 8,84 m dlouhá, 4,955 m široká a 5,75 m vysoká. Komora je navržena pro měření ve frekvenčním pásmu od 10 kHz do 18 GHz. Homogenitu pole ve zkušebním prostoru komory zajišťují absorbéry umístěné na všech stěnách a stropě a mezi vysílací anténou a zkušebním prostorem i na podlaze, jak znázorňuje obrázek 3.14.

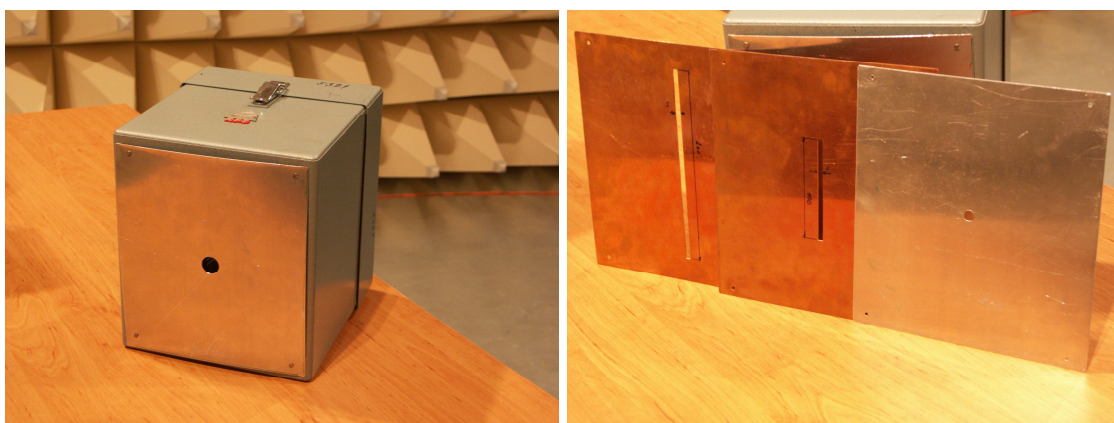


Obr 3.14: Schematický náčrt bezodrazové stíněné komory s velínem [29]

Použité absorbery jsou buď z feritových destiček (typ Frankosorb F006) nebo kombinované feritové s pyramidovými (typ Frankosorb H450). Pyramidové absorbery jsou z tenké vodivé fólie nanesené na nosný polystyrénový materiál. Homogenita pole ve zkušebním prostoru je pravidelně testována podle požadavků normy ČSN EN 61000-4-3.

3.6.2 Testovací měření

Chování systému a jeho použitelnost pro měření účinnosti stínění bylo otestováno na starém přístrojovém krytu. Kryt má vnitřní rozměry 243 x 280 x 295 mm. Pro ověření, že dojde k zachycení i různých jevů ovlivňujících účinnost stínění, došlo k úpravě krytu. Byla odstraněna jedna stěna krytu a na její místo byly připevňovány různé plechy, které byly z mědi a hliníku tloušťky 1 mm s kruhovými otvory, podélnými štěrbinami nebo plné bez otvorů.



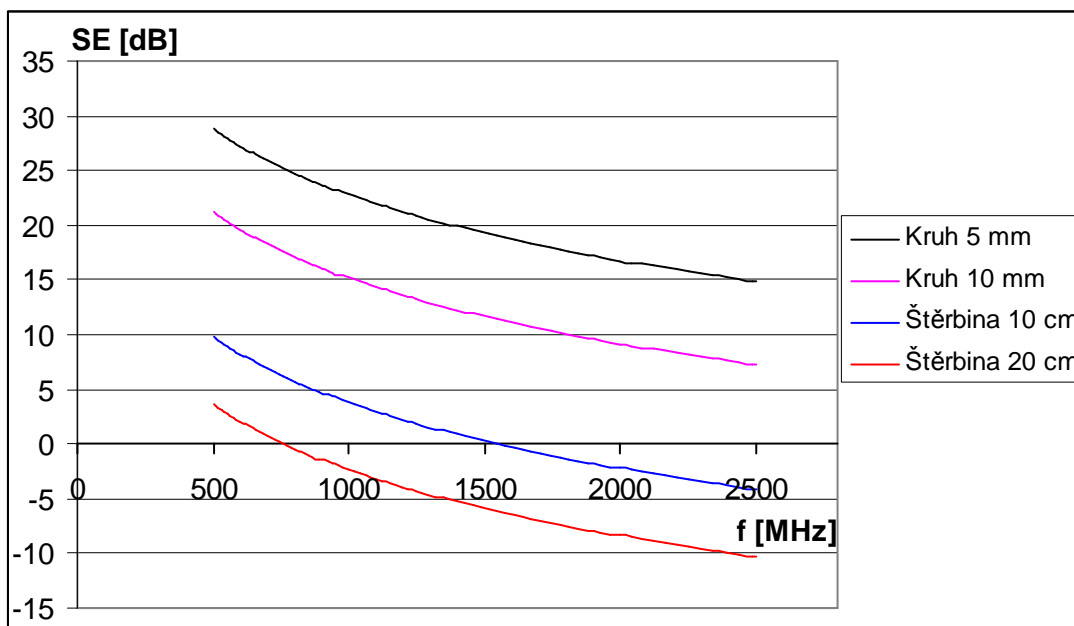
Obr 3.15: Přístrojový kryt s výměnnými panely

Pro dokonalé vodivé spojení plechu a těla krytu byla použita páska speciálního stínícího materiálu. Z opačné strany byla namontována stíněná průchodka pro vstup optických vláken sondy pole.

Měření probíhalo v intervalu od 500 MHz do 2,5 GHz, nejprve v celém pásmu s vysílací bi-log anténou a poté pro porovnání ve stejném pásmu s trychtýřovou anténou. Intenzita vysílaného elektrického pole byla při kalibraci nastavena na nejvyšší možnou hodnotu $10 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$. Pro urychlení měření byl použit 2% frekvenční krok. Na každé frekvenci byl zkušební signál vysílán po 4 sekundy.

Výměnné čelní panely krytu byly připraveny s kruhovými otvory o poloměrech 5 mm a 10 mm a se štěrbinami délky 10 cm a 20 cm.

Při použití vzorců pro kryty s otvory (2.70 a 2.71) získáme přibližné hodnoty účinnosti stínění. Jsou to však hodnoty spíše orientační, neboť tyto vzorce jsou značně zjednodušené a nerespektují například kritické frekvence štěrbinových antén.



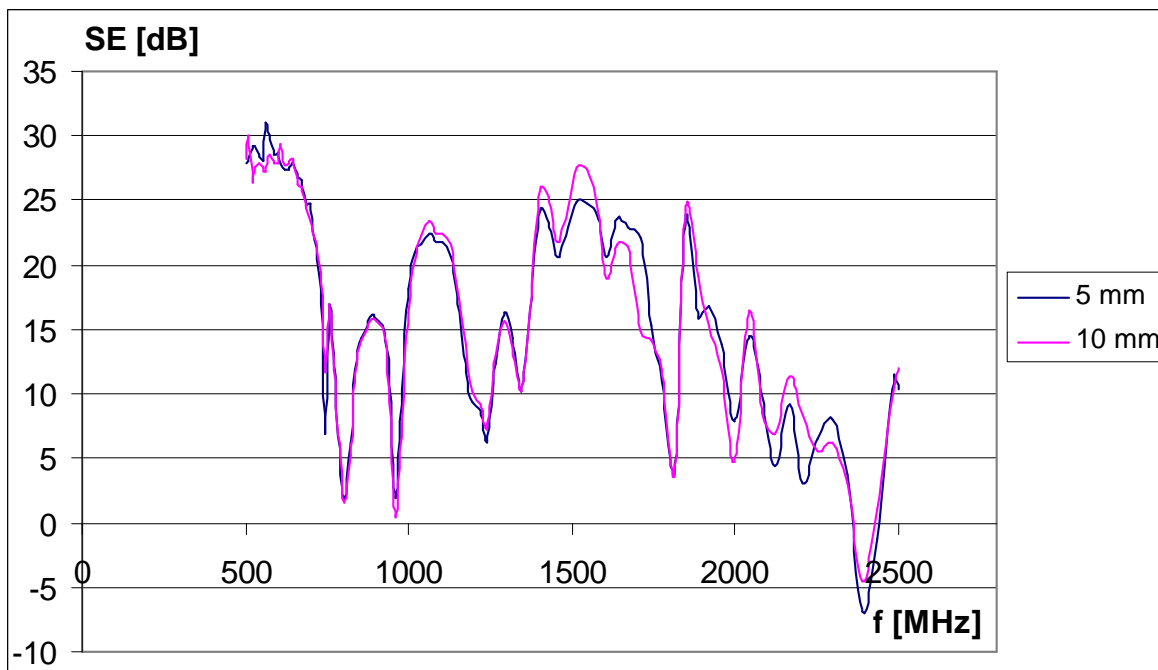
Obr. 3.16: Přibližné hodnoty SE pro různé otvory v čelní stěně krytu

Kritické frekvence pro otvory ve stínění můžeme vypočítat ze zjednodušených vzorců (2.64 a 2.68). Pro modelové měření byly připraveny kruhové otvory o poloměrech 5 mm a 10 mm.

$$\text{Kruh 5 mm: } f_c = \frac{1,841 \cdot c}{2\pi a} = \frac{1,841 \cdot 3 \cdot 10^8}{2 \cdot \pi \cdot 0,005} = 1,758 \cdot 10^{10} \text{ Hz} \quad \text{tedy } 17,58 \text{ GHz}$$

Pro kruh o poloměru 10 mm je frekvence poloviční: 8,79 GHz

Nad těmito frekvencemi je tedy třeba očekávat výrazně zhoršenou účinnost stínění. Pro takto malé kruhové otvory není kritická frekvence s tímto systémem dosažitelná. Aby byla měřením zjistitelná kritická frekvence, musel by se zvětšit kruhový otvor alespoň na 8 cm v průměru. Pak by byla kritická frekvence na 2,2 GHz. Tak velký otvor by však zabíral značnou část stěny.



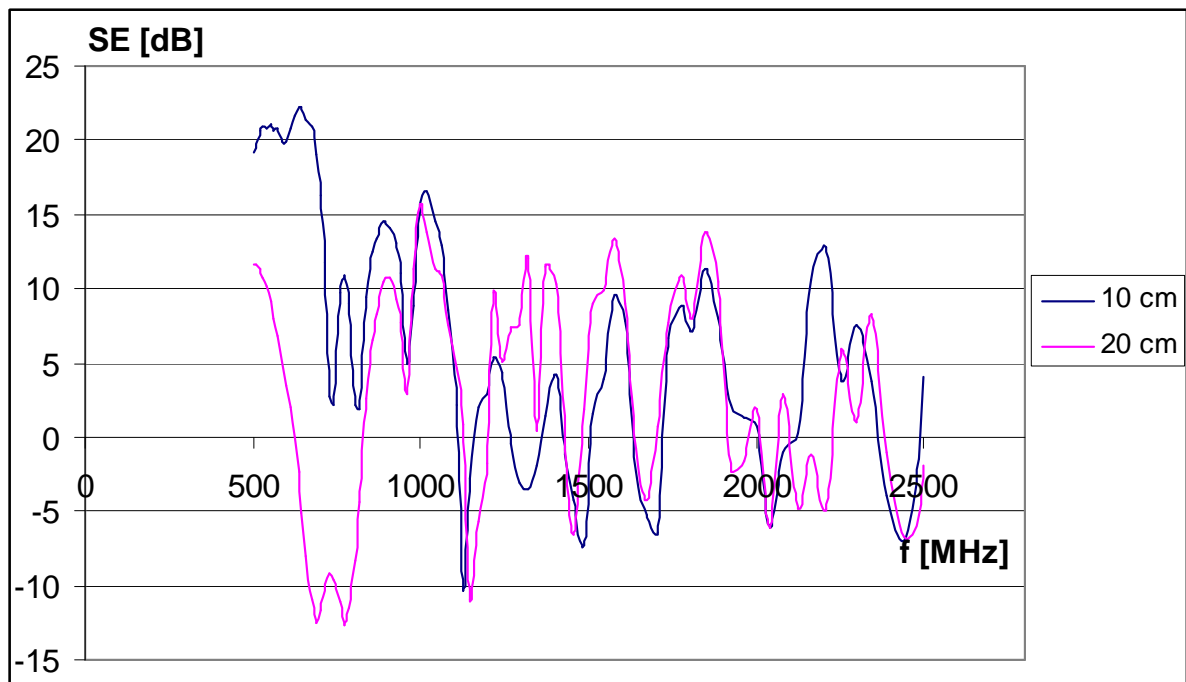
Obr. 3.17: Porovnání účinnosti stínění pro kruhové otvory 5 mm a 10 mm

Z grafu 3.17 je zřejmé, že se v měřeném frekvenčním pásmu účinnost stínění pro kruhové otvory o poloměrech 5 mm a 10 mm od sebe téměř neliší. Na rozdíl od vypočítaných hodnot, které se od sebe liší o 7 dB. Grafy jsou z hodnot z měření trychtýřovou anténou. Při porovnání hodnot naměřených bi-log anténou jsem dostal podobný graf (viz. přílohy B).

Proto jsem dále realizoval měření s úzkými podélnými štěrbinami v předním panelu o délkách 10 cm a 20 cm. Kritické frekvence pro tyto štěrbinu vychází:

$$\text{Štěrbinu 10 cm: } f_c = \frac{c}{2l} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 0,1} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Hz} \quad \text{tedy 1500 MHz}$$

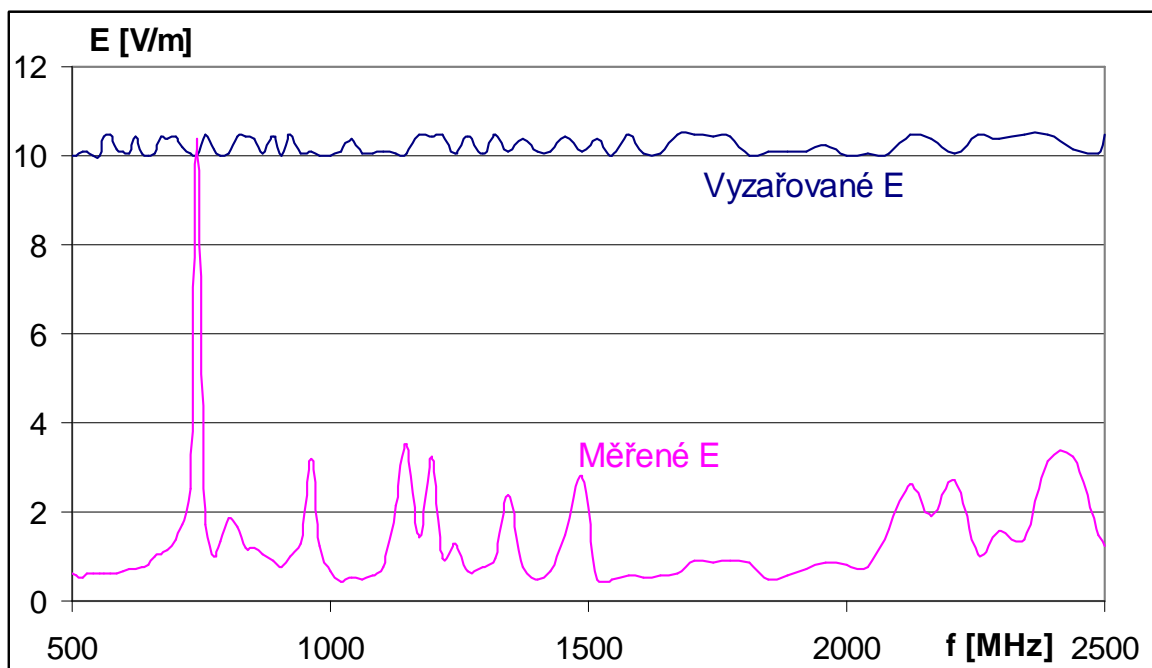
Pro štěrbinu 20 cm je frekvence: 750 MHz



Obr 3.18: Porovnání účinnosti stínění pro štěrbinu 10 cm a 20 cm

Z grafu 3.18 je patrné, že pro kratší štěrbinu dojde ke zhoršení stínící účinnosti na vyšších frekvencích. Tento průběh však velice zkreslují špičky rezonančních frekvencí.

Rezonanční frekvence lze nejlépe najít na záznamu měřeného elektrického pole uvnitř krytu, pokud máme výměnný panel bez otvorů. Graf měřeného elektrického pole pro plnou měděnou čelní desku krytu je na obrázku 3.19. Při plném hliníkovém plechu byla získána podobná data, ale nejvyšší rezonanční špička byla $34 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$, takže svojí velikostí znesnadňuje přehled o ostatních rezonančních frekvencích (viz. příloha B.18). Grafy z měření trychtýřovou anténou pro desky bez otvorů jsou také v příloze.



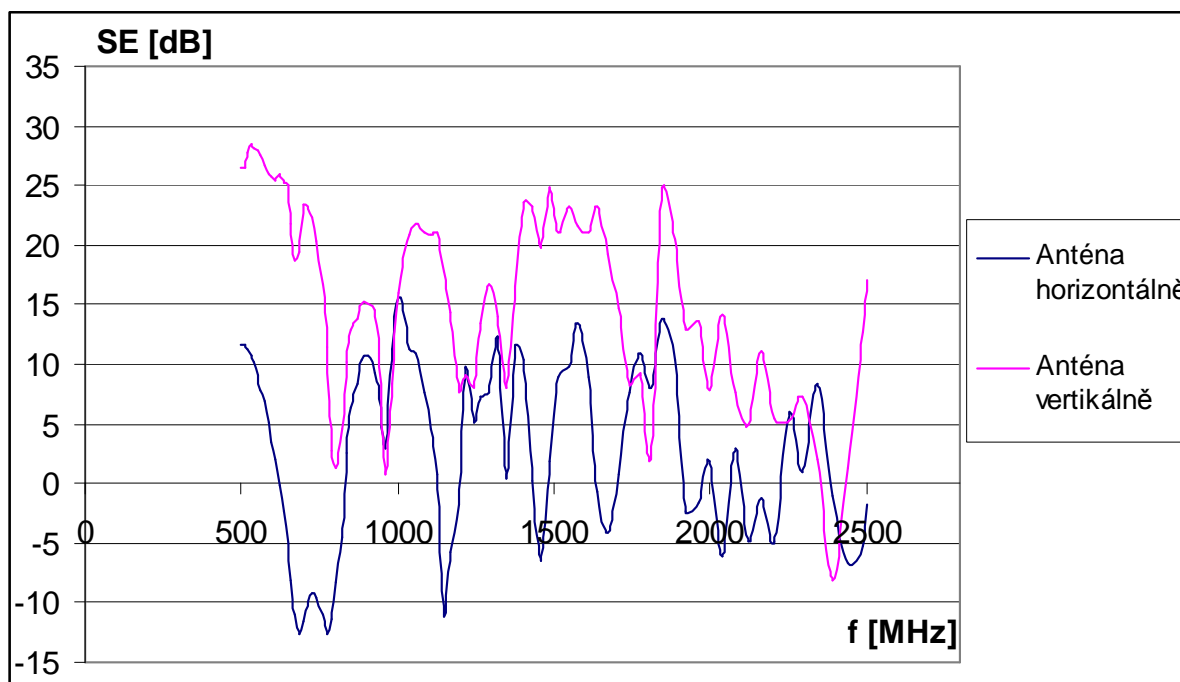
Obr. 3.19: Vyzařované a měřené elektrické pole při plné měděné desce

Rezonanční frekvence můžeme spočítat ze vzorce (2.72). V tabulce 3.13 jsou uvedeny rezonanční frekvence spočítané pro různé kombinace hodnot vidů vlnění. Velká část spočtených frekvencí se při měření skutečně projevila špičkou v průběhu měřeného elektrického pole. Na několika frekvencích jsem dokonce naměřil uvnitř krytu vyšší intenzitu pole, než mělo pole dopadající na kryt. Měření probíhá s nadefinovaným frekvenčním krokem, takže nelze měřené frekvence nastavit tak, aby přesně otestovali všechny spočtené rezonanční frekvence a vliv rezonance na účinnost stínění krytu.

Vid vlnění			Rezonanční frekvence [MHz]	
m	n	p	Vypočtená	Změřená
0	1	1	738,09	742,97
1	0	1	799,18	788,45
1	1	0	816,76	820,30
1	1	1	961,92	961,11
0	1	2	1148,62	1148,62
1	0	2	1188,80	1195,02
1	1	2	1303,78	1345,79
2	0	2	1598,37	1608,34
2	2	1	1710,73	1706,79
2	2	3	2234,30	2207,91
3	2	2	2367,22	2389,92
3	1	3	2456,60	2437,71

Tabulka 3.13: Porovnání vypočtených a změřených rezonančních frekvencí

U podlouhlých štěrbin hraje významnou roli i natočení antény (polarizace vlny) vůči štěrbině, jak je vidět na příklad na obrázku 3.20 pro 20 cm dlouhou štěrbinu při měření trychtýřovou anténou a na grafech v příloze.



Obr. 3.20: Porovnání SE při horizontální a vertikální polarizaci trychtýřové antény

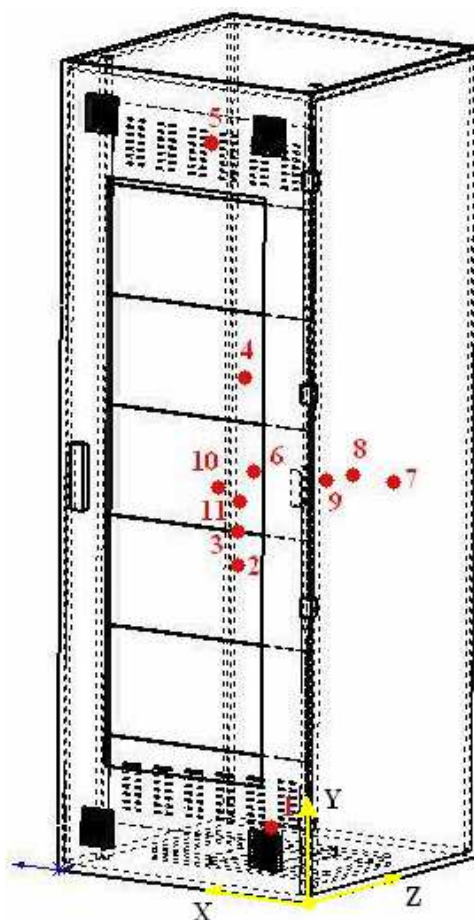
3.6.3 Účinnost stínění rozváděče ve standardním provedení

Vzhled rozváděče

Na základě dobrých zkušeností a dosažených výsledků z měření na zkušebním objektu, jsem přikročil k otestování krytu, používaného v běžném průmyslovém prostředí. Vybral jsem kovovou rozváděčovou skříň. V běžné sériové verzi se skříň skládá z nosného rámu, na který se montují vnější stěny a vnitřní plechy s nosnými částmi a lištami pro upevnění elektrických přístrojů a vybavení. V přední stěně jsou na rám usazeny vnitřní a vnější dveře. Vnější dveře jsou kovové s plexisklovým průzorem o rozměrech 60 x 160 cm a s větrací mřížkou 15 x 15 cm v každém rohu dveří. Plocha vnitřních dveří je složena z pěti plechů a na spodním i horním okraji jsou ventilační otvory. Strop rozváděče je plný a v podlaze jsou kabelové průchodky. Vnější rozměry sestaveného rozváděče jsou 80 x 80 x 220 cm. Při měření byl rozváděč umístěn na 15 cm vysokém dřevěném podstavci.

Nastavení měření

Měření probíhalo v celém frekvenčním rozsahu 80 MHz až 3 GHz. Při frekvenci 1 GHz byly vyměňovány antény z BTA-M (bi-log) na BBHA 9120E (trychtýřová). Vzdálenost antén od středu rozváděče byla 3 m. Při kalibraci byla nastavena intenzita vysílaného pole na 10 V.m^{-1} pro měření, při kterých měla být sonda ve zkušebním prostoru, kde je definována homogenita pole. Anténa byla při kalibraci 120 cm nad podlahou. Jeden měřicí bod však byl vybrán i níže než je definovaný zkušební prostor. Pro toto měření byla provedena zvláštní kalibrace s intenzitou 3 V.m^{-1} a vysílací anténou umístěnou do výšky 50 cm. Pro horizontální polarizaci antén byl nastaven 1% frekvenční krok a pro vertikální rychlejší 3%. Na každé jednotlivé frekvenci byl vysílací čas signálu 3 s.



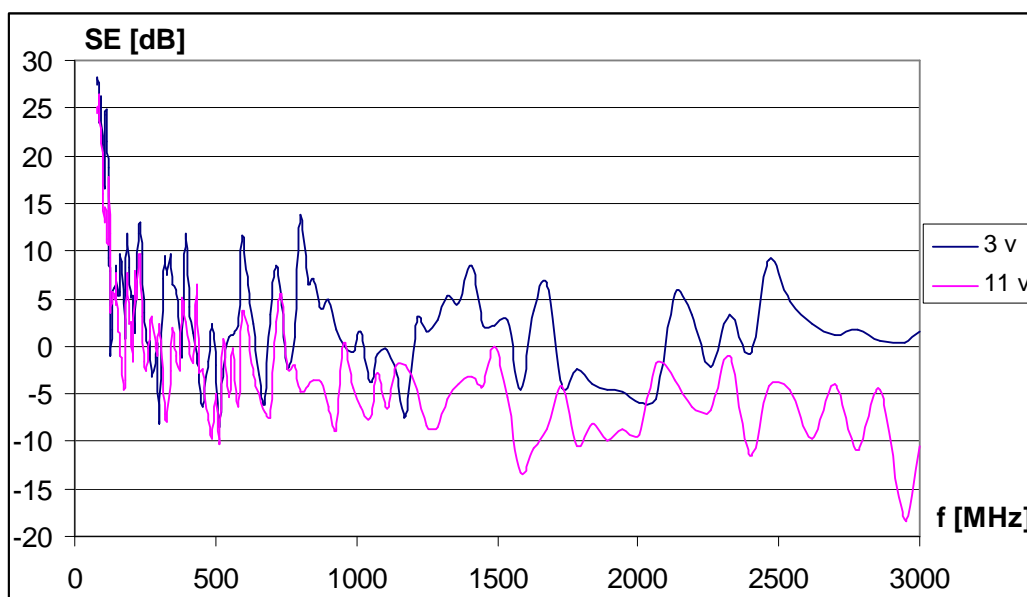
Obr. 3.21: Umístění měřících bodů v rozváděči [29]

V rozváděči bylo před měřením vybráno několik měřících bodů a během měření byly ještě doplněny o několik dalších. Rozmístění bodů, které je naznačeno na obrázku 3.21, je popsáno souřadnicemi (x, y, z) v centimetrech s počátkem v pravém dolním rohu.

- | | | |
|-----|--|-------------|
| 1. | Za pravou dolní větrací mřížkou vnějších dveří | (25,25,25) |
| 2. | Lišta na umístění elektrických přístrojů | (40,90,15) |
| 3. | Štěrbina mezi plechy vnitřních dveří | (40,95,30) |
| 4. | Lišta na umístění elektrických přístrojů | (40,150,35) |
| 5. | Za horními větracími otvory vnitřních dveří | (40,205,40) |
| 6. | Střed rozváděče | (40,120,40) |
| 7. | Měření útlumu pravé boční stěny | (35,120,50) |
| 8. | Měření útlumu zadní stěny | (40,120,40) |
| 9. | Mezera mezi rámem vnitřních dveří a stěnou rozváděče | (15,120,20) |
| 10. | Rozváděč bez zadní a bočních stěn - pouze dveře | (55,115,40) |
| 11. | Odmontován jeden plech vnitřních dveří | (40,110,30) |

Naměřené a vypočtené hodnoty

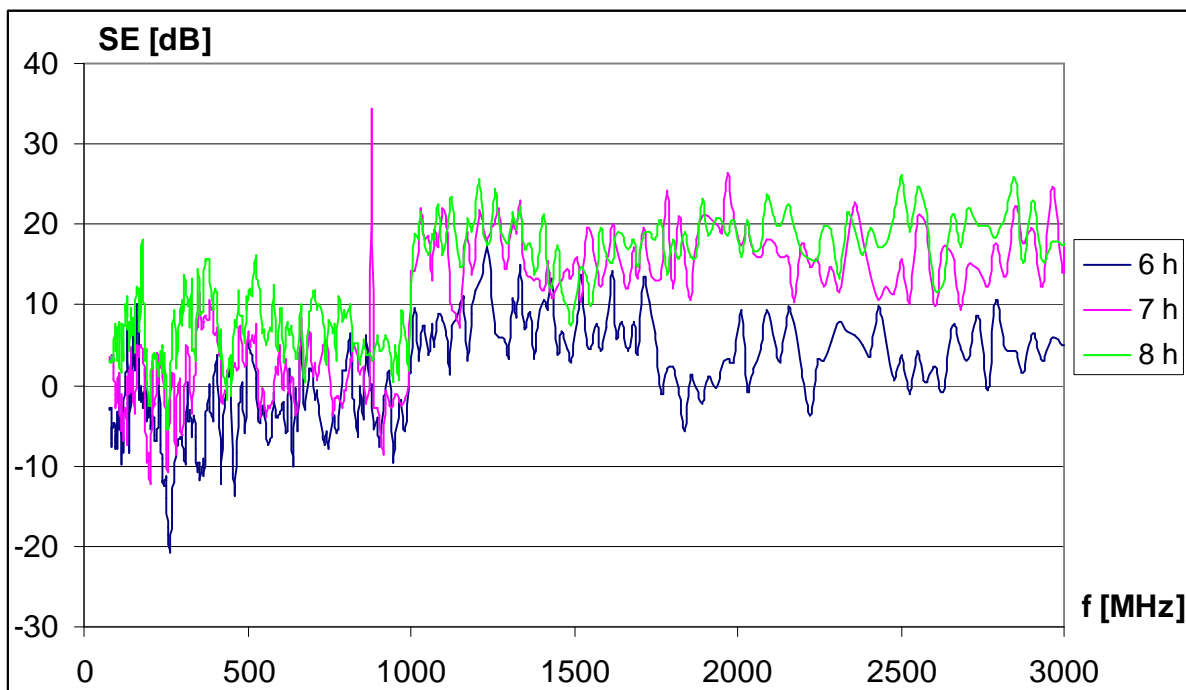
Z hlediska stínění je na první pohled vidět problematické uspořádání prosklených vnějších dveří a vnitřních dveří sestavených z plechů, které k sobě nepřiléhají. Mezi plechy vnitřních dveří jsou 40 cm dlouhé štěrby. Kritická frekvence těchto štěrbin je 375 MHz, takže poměrně dobře propouštějí většinu frekvencí měřeného pásma. Ale i tak poskytují alespoň minimální stínění, na rozdíl od případu, kdy je plech vnitřních dveří vyndán úplně, jak je vidět na grafu 3.22.



Obr. 3.22: Porovnání hodnot z měření 3 a 11 při vertikální polarizaci

Měření 11 bez jednoho plechu vnitřních dveří mělo nejhorší výsledky účinnosti stínění ze všech.

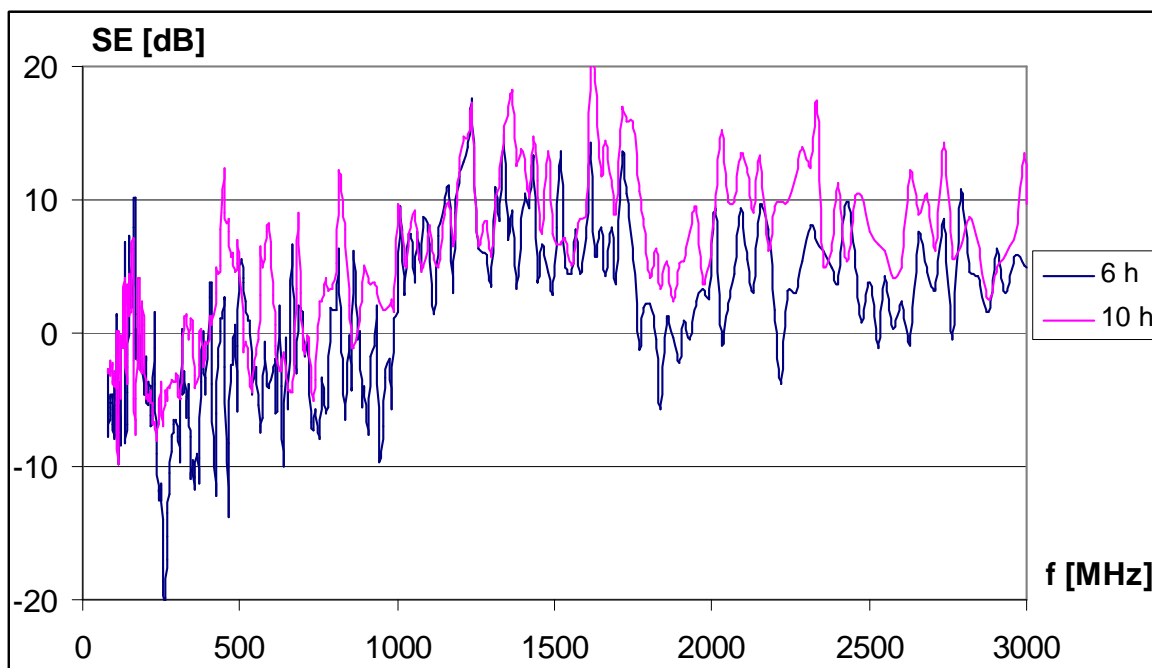
Vliv špatné stínící účinnosti dveří je vidět zejména při porovnání přední, boční a zadní stěny (měření 6, 7 a 8). V celém pásmu je stínící účinnost boční a zadní stěny vyšší a rozdíl se ještě zvětšuje s rostoucí frekvencí.



Obr. 3.23: Porovnání hodnot z měření 6, 7 a 8 při horizontální polarizaci

Právě při ozařování boční a zadní stěny byla zjištěna nejvyšší účinnost ze všech měření. Pro zlepšení stínící účinnosti přední strany by bylo potřeba pozměnit konstrukci vnitřních dveří, tak aby se plechy překrývaly nebo aby měly zahnuté okraje a tvořili tak vlnovody.

Také při měření 10 bez vnějších stěn byly naměřeny o něco vyšší hodnoty, než u zbytku měření. Z grafu 3.24 je vidět, že mají tyto hodnoty podobný trend s měřením uprostřed rozvaděče, ale nejsou u nich tak výrazné poklesy způsobené rezonancí krytu.



Obr. 3.24: Porovnání hodnot z měření 6 a 10 při horizontální polarizaci

Z naměřených hodnot jde vyčíst celá řada rezonančních frekvencí, na kterých je změřená intenzita elektrického pole vyšší, než intenzita pole dopadajícího na stěnu rozváděče. Frekvence, na kterých je tento rozdíl výrazný a které se opakovaly alespoň při pěti měřeních, jsou uvedeny v tabulce 3.14. Pro porovnání jsou zde opět i frekvence vypočtené z teoretického vzorce (2.72). U takto velkého objektu se už ovšem třeba dosazovat poměrně vysoké hodnoty vidů vlnění, abychom se dostali s vypočtenými hodnotami k vyšším frekvencím.

Vid vlnění			Rezonanční frekvence [MHz]	
m	n	p	Vypočtená	Změřená
0	1	1	199,37	201
1	0	1	264,98	261
1	2	1	297,97	300
1	3	1	334,66	359
1	1	2	424,48	430
1	3	2	466,17	461
2	0	2	529,96	515
2	0	3	675,57	672
5	7	6	1539,17	1536
6	9	7	1833,08	1835
6	18	6	2007,95	2006

Tabulka 3.14: Rezonanční frekvence rozváděče

Všechna ostatní měření mají velmi podobné průběhy, při kterých kolísají hodnoty útlumu přibližně mezi -10 a 10 dB (viz. přílohy C).

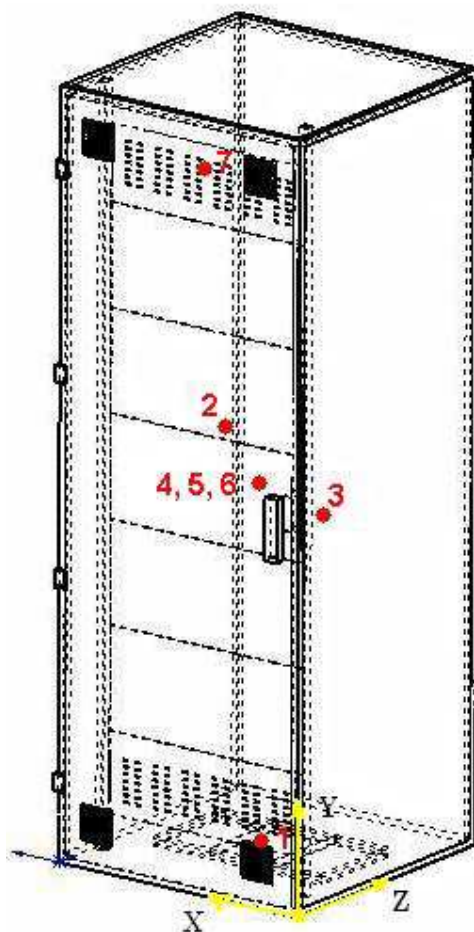
3.6.4 Rozváděč v EMC verzi

Provedené úpravy

Rozváděč ve standardně vyráběném provedení nemá v měřeném pásmu moc dobrou stínící účinnost. Proto byla vyzkoušena opatření, která by měla rozváděč v tomto směru vylepšit. Prosklené dveře byly vyměněny za celokovové. Lakované boční a zadní vnější stěny byly vyměněny za stěny z pozinkovaného za studena válcovaného plechu o tloušťce 2 mm. Ventilací otvory v rozích dveří byly doplněny o kovovou mřížku s otvory 5 x 5 mm. A poslední úprava spočívala v nahrazení běžného těsnění okolo dveří za speciální těsnění se zalisovanými kovovými páskami.

Nastavení měření

Při měření upravené verze rozváděče byly použity naprosto stejná nastavení a kalibrace jako při předchozím měření. Body, ve kterých byla umístěna sonda pole, jsou znázorněny na obrázku 3.25.



Obr. 3.25: Umístění měřících bodů v upraveném rozváděči [29]

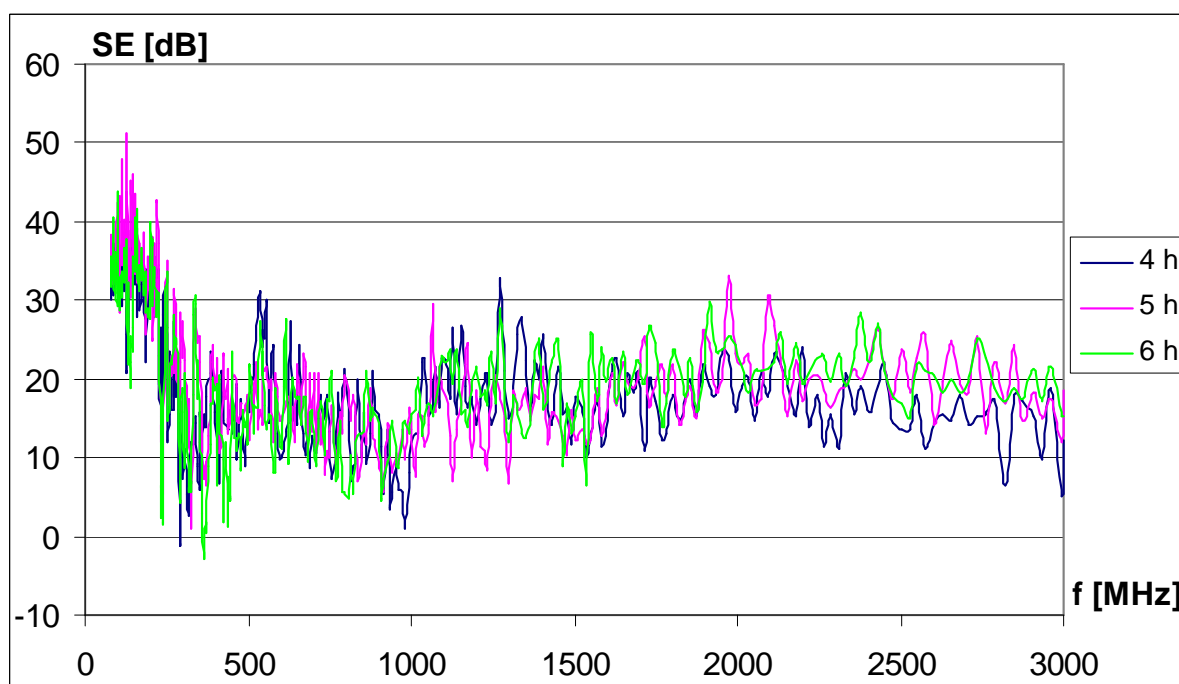
Měřicí body:

- | | |
|---|-------------|
| 1. Za pravou dolní větrací mřížkou vnějších dveří | (25,25,25) |
| 2. Lišta na umístění elektrických přístrojů | (40,140,30) |
| 3. Mezera mezi rámem vnitřních dveří a stěnou rozváděče | (15,120,20) |
| 4. Střed rozváděče | (40,120,40) |
| 5. Měření útlumu pravé boční stěny | (35,120,50) |
| 6. Měření útlumu zadní stěny | (40,120,40) |
| 7. Za horními větracími otvory vnitřních dveří | (40,205,40) |

Naměřené a vypočtené hodnoty

Ve všech měřicích bodech jsou si průběhy křivek závislosti účinnosti stínění na frekvenci velmi podobné. Při horizontální polarizaci antén se účinnost pohybuje přibližně od 10 dB do 40 dB a při vertikální polarizaci od 0 dB do 40 dB. Pouze v bodě 2 jsou hodnoty pro frekvence nad 1 GHz při horizontální polarizaci o 10 dB vyšší než v ostatních bodech. Všechny naměřené průběhy jsou v příloze D.

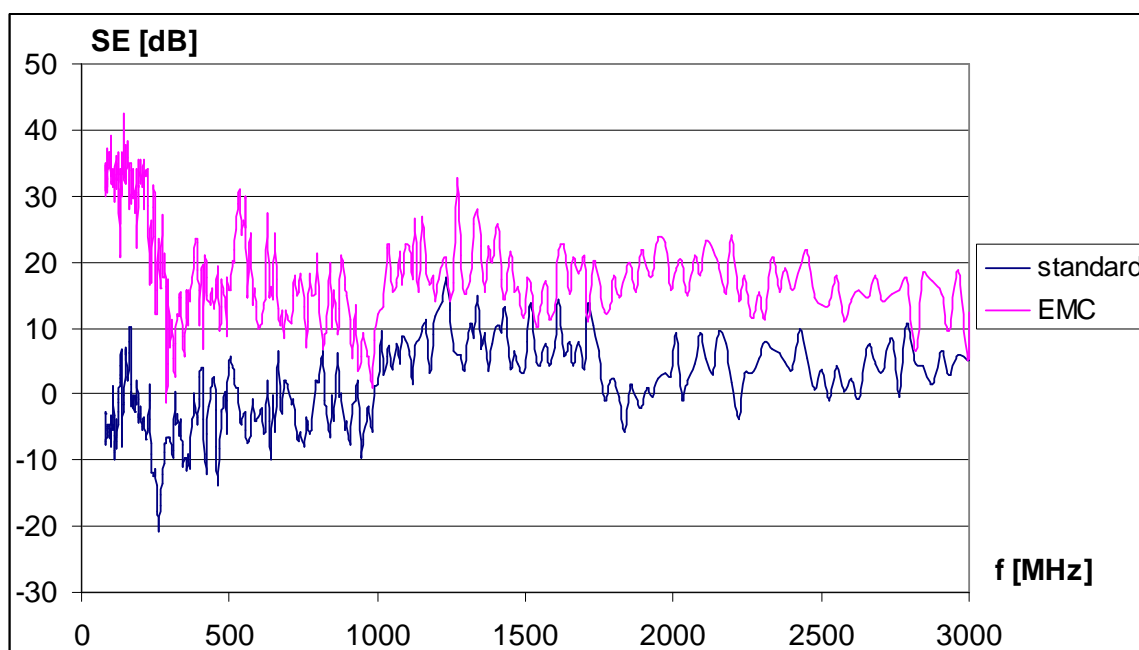
Typické průběhy jsou opět vidět na porovnání účinnosti stínění dveří, boční stěny a zadní stěny (měření 4, 5, 6).



Obr. 3.26: Porovnání hodnot z měření 4, 5 a 6 při horizontální polarizaci

Z tohoto grafu je patrné, že úpravami se podařilo vylepšit účinnost stínění dveří rozváděče téměř na úroveň plné plechové stěny.

Důležité je přímé porovnání standardní verze a vylepšené EMC verze rozváděče. Na grafu 3.27 je porovnání měření ve středu rozváděče při horizontální polarizaci antén.



Obr. 3.27: Porovnání SE dveří dvou verzí rozváděče

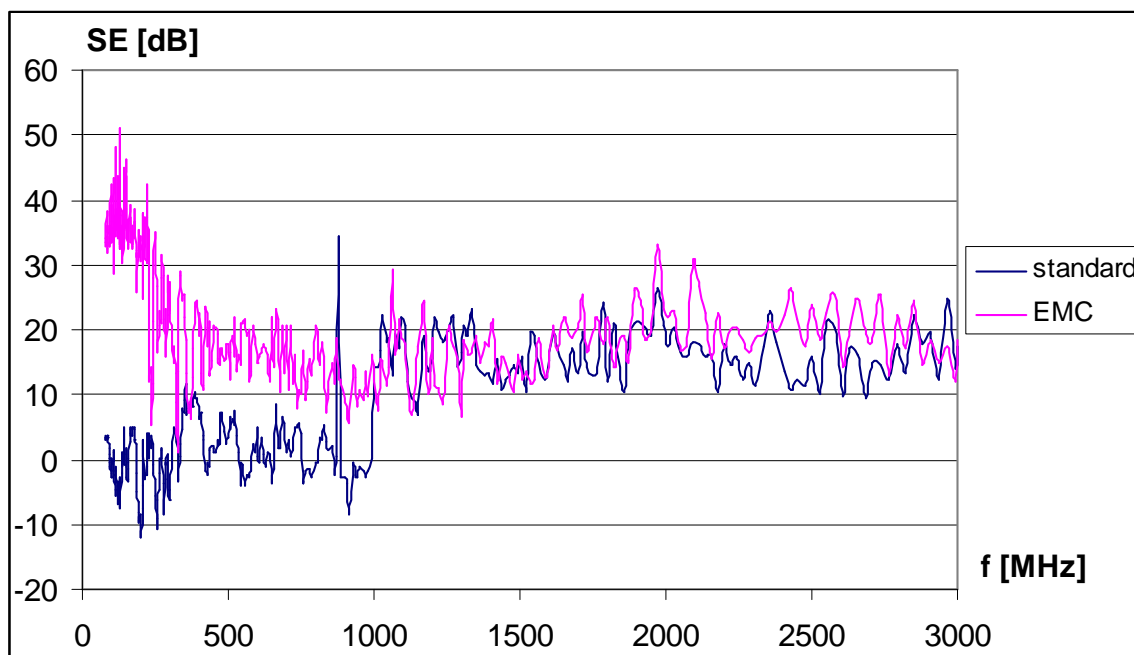
V celém měřeném pásmu se tedy díky úpravám podařilo zvýšit účinnost stínění minimálně o 10 dB. Nejvýraznější vylepšení, místy až o 30 dB, je na frekvencích do 1 GHz.

Velmi podobně vypadá i graf porovnání SE za větrací mřížkou v rohu dveří (bod 1). Rozdíl v účinnostech je přibližně 15 až 20 dB. Z výpočtu podle (2.70) vychází, že by rozdíl měl být přibližně 10 dB. Naměřená hodnota je vyšší nejspíše vlivem ostatních úprav provedených na rozváděči. Zřejmě kvůli komplikované struktuře celého rozváděče se však nepodařilo měřením prokázat kritickou frekvenci větracího otvoru, která ze vzorce (2.63) vychází 1413 MHz.

Ventilační štěrby, které se nacházejí v horní a dolní části vnitřních dveří, nemají na celkovou účinnost výrazný vliv. Jsou totiž i ve standardním uspořádání skryty za plechem vnějších dveří. Štěrbin je 42 (7 štěrbin v šesti sloupcích) a mají rozměry 55 mm x 5 mm.

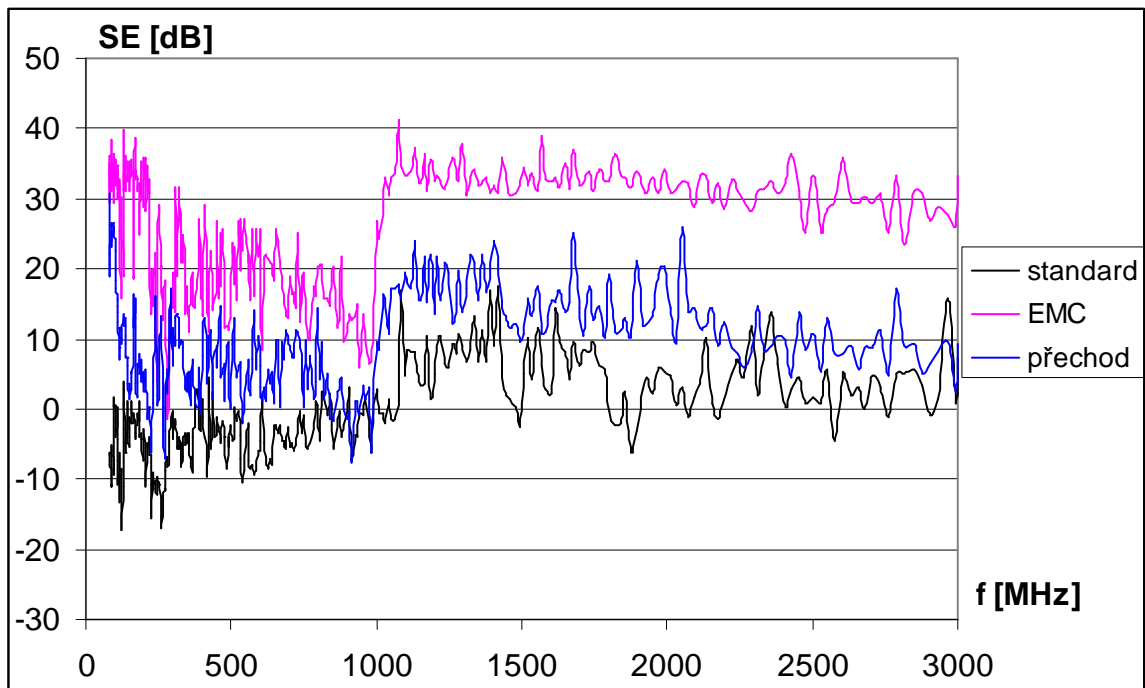
Výměna původních lakovaných bočnic za stěny z pozinkovaných plechů má opodstatnění hlavně pro nižší frekvence, díky lepšímu reflexnímu útlumu materiálu.

S rostoucí frekvencí nabývá na významu absorpční složka, charakteristiky se k sobě přibližují a přibližně od frekvence 1 GHz se už od sebe nijak výrazně neodchylují, jak je vidět na grafu 3.28.



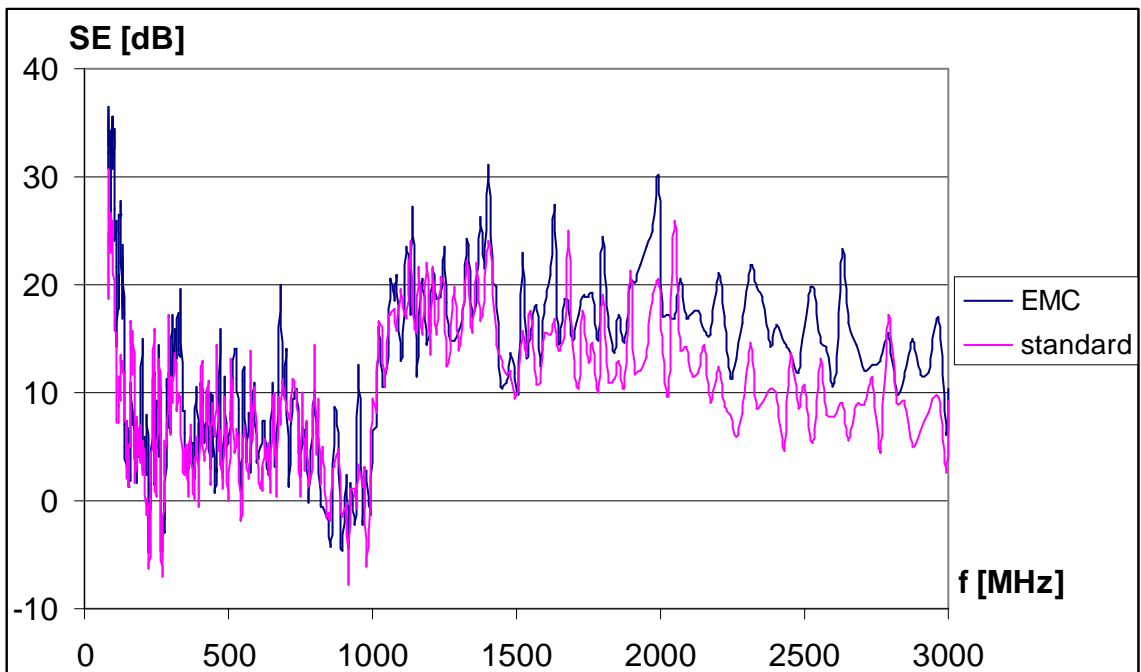
Obr. 3.28: Porovnání SE boční stěny dvou verzí rozváděče

Dále jsem vyzkoušel, jak se na stínění projeví dvě nejsnáze proveditelné úpravy, to znamená výměna dveří a namontování kovových mřížek za větrací otvory v rozích dveří. Boční stěny a těsnění kolem dveří jsem pro toto měření nechal původní. Sondu jsem umístil do místa, kde měla EMC verze rozváděče nejvyšší účinnost stínění, tedy na lištu pro připevnění elektrických přístrojů (40,140,30). Následující graf je pro horizontální polarizaci antén.



Obr. 3.29: Porovnání SE dveří standardní, přechodné a EMC verze rozváděče

Po tomto měření jsem ještě vyzkoušel, jaký má účinek těsnění vylepšené kovovými páskami. Rozváděč a sondu pole jsem nechal jako při předchozím měření, jen jsem vyměnil standardní těsnění za EMC těsnění.



Obr. 3.30: Vliv EMC těsnění dveří rozváděče

Vylepšené těsnění má malý význam pro odstínění frekvencí přibližně od 1,7 GHz výše. Na nižších frekvencích se jeho vliv neprojeví, neboť signály této frekvence neprojdou úzkou štěrbinou okolo dveří.

Shrnutí naměřených výsledků

Z porovnání dosažených výsledků je vidět, že účinnost stínění EMC verze rozváděče je alespoň o 20 dB vyšší než standardní verze. Dokonce ani při rezonancích neklesly hodnoty pod 0 dB. Nejvyšší hodnoty byly přibližně do 300 MHz, pro vyšší frekvence účinnost mírně klesala.

Účinnost stínění standardní verze rozváděče			
Polarizace antény	Nejčastější hodnoty	Nejvyšší hodnoty	Nejnižší hodnoty
Horizontální	3 až 10 dB	25 dB	-20 dB
Vertikální	5 až 15 dB	30 dB	-15 dB
Účinnost stínění EMC verze rozváděče			
Polarizace	Nejčastější hodnoty	Nejvyšší hodnoty	Nejnižší hodnoty
Horizontální	18 až 30 dB	50 dB	0 dB
Vertikální	10 až 30 dB	50 dB	0 dB

Tabulka 3.15: Porovnání účinnosti stínění rozváděčů

Pro další zvýšení účinnosti stínění navrhuji vyrobit dveře rozváděče také z pozinkovaného plechu, plechy vnitřních dveří udělat s mírným přesahem přes sebe, zesílit tloušťku stěn a dveří a hrany rozváděče překrýt pravoúhlými lištami. Pro omezení rezonancí by bylo vhodné pomocí absorpčního materiálu nebo nátěru upravit vnitřní povrch stěn.

4 Závěr

Stínící bariéra je významný konstrukční prvek zařízení, kterým můžeme omezit přenosové vazby rušivého napětí jak vzdáleným elektromagnetickým polem, tak i kapacitní a induktivní vazbu blízkým polem. Díky narušení přenosových vazeb rušivých polí můžeme tedy zvyšovat odolnost zařízení nebo snižovat jeho vyzařované emise.

Cílem práce bylo tedy vytvořit metodiku pro konstruování přístrojových krytů, podle které bychom mohli poskytovat poradenský servis zákazníkům akreditované laboratoře ETL na FEL ZČU, která se zabývá zejména měřeními a testy z oblasti elektromagnetické kompatibility. Zároveň jsem chtěl vyvinout a vyzkoušet měřicí postup, kterým by bylo možné zjistit účinnost stínění přístrojových krytů takových rozměrů, které lze umístit do zkušebního prostoru bezodrazové komory.

V kapitole elektromagnetické stínění jsou návody, jak postupovat při návrhu stínění. Uvedená doporučení se týkají hlavně vhodnosti používání různých stínících materiálů. Volba materiálu závisí hlavně na tom, zda chceme stínit blízké elektrické nebo magnetické pole nebo pole vzdálené, a na frekvenci pole. Podle toho pak vybíráme materiál potřebné permeability a vodivosti. Na základě těchto údajů můžeme stanovit potřebnou tloušťku stěny krytu a tím i množství materiálu, který se na kryt spotřebuje. Dále je v této kapitole popsáno, jak různé vlivy, jako jsou štěrbiny, otvory, vstupy, okna a různé nehomogenity v krytu, dále špatné uzemnění, popřípadě dutinová rezonance, zhoršují účinnost stínění, a jak můžeme tyto negativní vlivy omezit. Pomocí počítačové simulace se podařilo přibližně určit, jaké chyby se dopustíme, pokud nahradíme skutečný v praxi používaný tvar vlnovodu za ideální zjednodušený tvar vhodný pro jednoduché zjišťovací výpočty.

Důležitou součástí návrhu stínícího krytu je i změření jeho skutečné účinnosti stínění. Při výpočtech lze snadno dosáhnout teoretické účinnosti stínění okolo 200 dB, ale tato hodnota daleko překračuje mez, kterou jsme schopni v reálném prostředí dosáhnout. Vyzkoušel jsem dva různé systémy na měření účinnosti stínění. Jeden systém byl anténový set přímo určený na testování stínění a druhý je systém, který je primárně určen na testování odolnosti zařízení proti vysokofrekvenčnímu vyzařovanému poli.

Anténový set na měření účinnosti stínění má velkou výhodu v tom, že přímo ukazuje hodnotu účinnosti v dB a měření s ním je velmi rychlé. Jeho obrovská nevýhoda je ale v tom, že měří pouze na osmi daných frekvencích mezi 10 kHz a 64 MHz. To znamená, že nejsme schopni těmito anténami zachytit všechny jevy, ke kterým může docházet. Toto zařízení proto doporučuji spíše k rychlému měření během vývoje stínění, než k důkladnému finálnímu otestování hotového krytu. Navíc vzhledem k velikosti antén je set vhodný pouze pro poměrně velká zařízení, stíněné místnosti a celé budovy.

Pro důkladné proměření účinnosti stínění je vhodnější navržený měřicí postup, při kterém jsem využil systém na testování odolnosti. Výhodou systému je, že splňuje většinu podmínek normy ČSN EN 61000-5-7, hlavně požadavek na 1% frekvenční krok. Nelze provést jen měření šumu popsané v této normě. Okolní rušení a šum by však měl měření ovlivňovat minimálně, neboť systém je používán pouze v definovaném prostředí stíněné bezodrazové komoře a měřicí anténa (sonda pole) je připojena optickým kabelem. Všechna pomocná zařízení jako generátor, zesilovače, měřič výkonu a počítač jsou umístěna mimo zkušební prostory, takže nemohou svými emisemi ovlivňovat naměřené hodnoty.

Významným přínosem tohoto měřicího postupu je jeho schopnost měřit kvalitu stínění malých přístrojových krytů. Při zkušebním měření na modelovém uspořádání jsem byl schopen zachytit fyzikální jevy popsané v teoretické kapitole a tím ověřit správnost postupu. Poté jsem tímto postupem úspěšně otestoval i skříň elektrického rozváděče.

Pro vylepšení této metody by však bylo potřeba rozšířit frekvenční pásmo. Současný rozsah 80 MHz až 3 GHz nepokrývá ani jedno celé pásmo EM kódu (viz kapitola 3.1). Nejsnazší by bylo posunutí spodní hranice alespoň na 30 MHz, pak bychom v EM kódu pokryli alespoň celé pásmo *D*. Na 30 MHz začíná pracovní pásmo použité bi-log antény a podle ujištění firmy Frankonia by měl být systém schopen pracovat od 30 MHz. V měření od 30 MHz však brání rozbočovací prvek (číslo C5982 ve schématu 3.8) za zesilovačem, který vede signál do měřiče výkonu a do antény. Tento prvek pracuje až od 80 MHz a pro rozšíření měřeného pásma navrhuji jeho výměnu.

Velkým problémem je to, že maximální intenzita generovaného elektrického pole je pouze 10 V.m^{-1} . Zároveň výrobce sondy elektrického pole udává, že sonda měří od $0,5 \text{ V.m}^{-1}$. Z výpočtu účinnosti stínění z těchto dvou mezních hodnot vyplývá, že nelze změřit útlum větší než 26 dB. Při měření jsem však zaznamenal i nižší intenzity než $0,5 \text{ V.m}^{-1}$. Nejnižší hodnota, které se mi podařilo dosáhnout, byla $0,04 \text{ V.m}^{-1}$, což představuje stínící účinnost 48 dB. Pokud by sonda měřila již od $0,01 \text{ V.m}^{-1}$ (její rozlišovací schopnost), mohli bychom testovat účinnost do 60 dB. Ani to však není dostatečná hodnota, potřebovali bychom být schopni měřit alespoň do 100 dB. Takové vylepšení systému by však bylo velmi nákladné.

Z toho plyne, že se stávajícím vybavením není možné dokonale proměřit účinnost stínění krytů, ale spíše zjistit frekvence, na kterých má daný kryt se stíněním potíže. To jsem si ověřil na testovacím objektu, u kterého jsem dokázal výborně zachytit rezonanční frekvence a vliv otvorů ve stínění. Právě rozeznání dominantních rezonančních frekvencí při měření je důležité, protože pro komplikované kryty je velmi obtížné je spočítat. To se ukázalo právě při měření rozváděče. Nevýhodou takto naměřených frekvencí je to, že jsem je zjistil pro prázdný rozváděč. Po osazení rozváděče elektrickými přístroji by jistě došlo k posunu některých frekvencí nebo ke vzniku nových rezonančních frekvencí.

Za velkou výhodu tohoto systému považuji to, že při měření účinnosti stínění se používá naprosto stejný signál, jako při testování elektromagnetické odolnosti. Pokud je tedy zjištěna vyhovující účinnost stínění přístrojového krytu, je pak dobrá šance, že i celý přístroj vyhoví zkoušce odolnosti proti vyzařovanému poli.

Na základě naměřených výsledků a získaných zkušeností při měření navrhuji změny v normách, které se týkají měření účinnosti stínění, zejména pro IEEE-STD-299. Současná IEEE norma může zůstat nezměněna pro potřeby zjištění stínění budov, laboratoří nebo takových krytů, které nelze přemístit do bezodrazové komory. Měřením na několika málo frekvencích, které jsou nyní vyžadovány, se vyhneme dlouhodobé expozici silného elektromagnetického pole na okolní prostředí a na osoby provádějící měření. Pro potřeby měření účinnosti stínění malých přístrojových krytů a objektů je však nutné stávající normu doplnit o další část. Pro tato měření není nutné striktně stanovit podobu přijímacích antén na jednotlivých frekvencích, ale je potřeba připustit i použití sond pole, které se vejdou do malých krytů. Pro

dokonalejší proměření stínícího krytu je nutné stanovit 1% frekvenční krok nebo na vysokých frekvencích i konstantní frekvenční krok. Při tomto způsobu měření se tedy už samozřejmě nebudeme vyhýbat rezonančním frekvencím krytu, ale naopak se je budeme snažit zjistit a zachytit jejich účinek. Pro malé kryty nemá smysl dělit frekvenční pásma na rezonanční a na vysoké frekvence. Čím menší kryt je, tím výše se posouvá jeho rezonance. Díky tomuto měřicímu postupu je možné zachytit i překročení kritické frekvence otvorů a vlnovodů.

Další výzkum v této oblasti bude spočívat v rozšíření počítačového modelování (nejspíše opět v programu *COMSOL Multiphysics*) stínění vlnovodů i celých krytů a v porovnávání výsledků získaných ze simulace a z reálného měření.

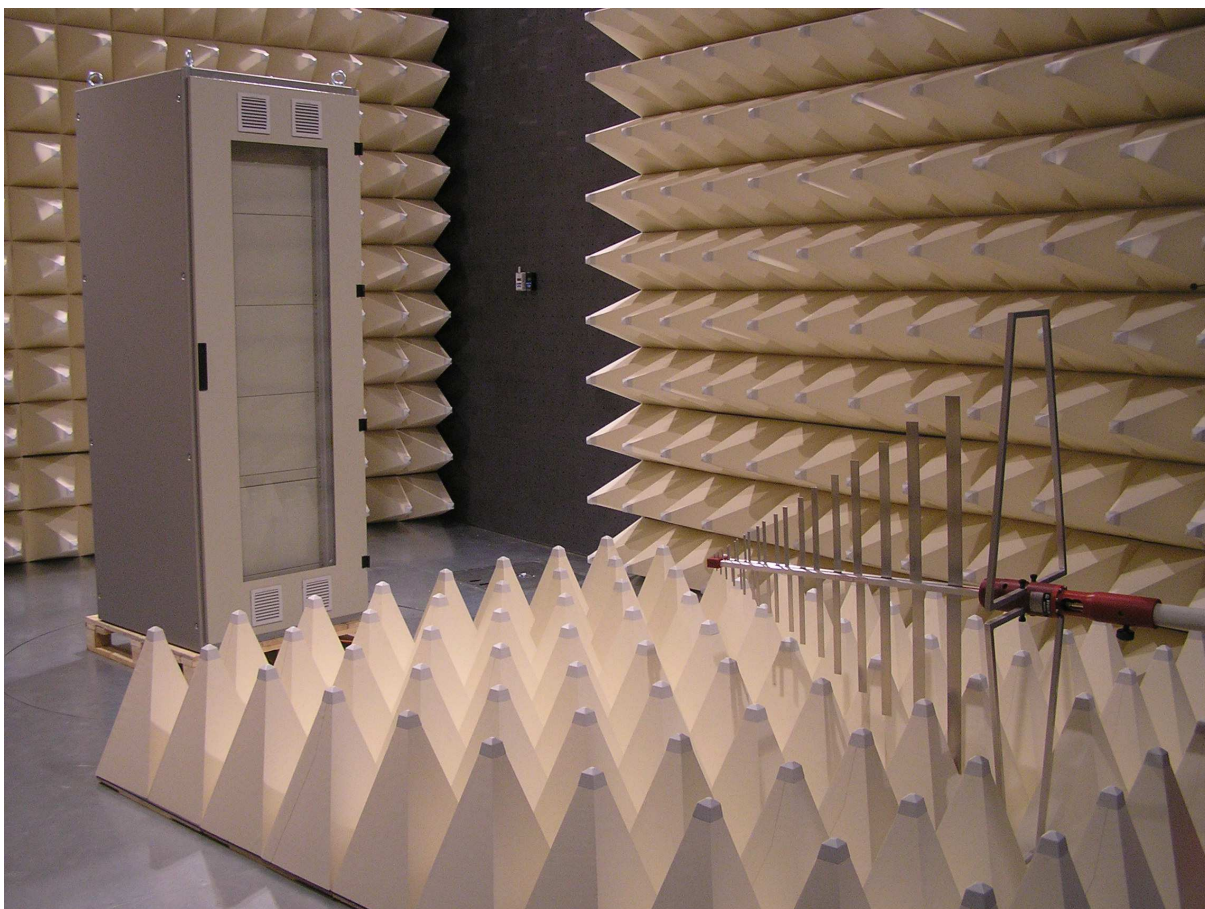
Literatura

- [1] ČSN IEC 50(161) (334201) - Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita. Praha: Český normalizační institut, prosinec 1993
- [2] Česko. Vláda. Nařízení vlády č. 1 ze dne 9. ledna 2008 o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Sbírka zákonů, Česká republika, 2008, částka 1, s. 1-29. [cit. 2011-12-03]. Dostupný také z www:
<<http://aplikace.mvcr.cz/archiv2008/sbirka/2008/sb001-08.pdf>>
- [3] ČSN-EN 55014 - Elektromagnetická kompatibilita - Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Vyzařování. Praha: Český normalizační institut, září 2001
- [4] Hasman T.: Přepětí v elektroenergetických soustavách, ČVUT Praha 1997
- [5] Svačina J.: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. [cit. 2009-10-20]. Dostupný z www: <<http://www.urel.feec.vutbr.cz/EncyklopedieEMC/index.php>>
- [6] Mardiguian M.: Controlling Radiated Emissions by Design - Second Edition. Kluwer Academic Publishers, Massachusetts USA, 2001. ISBN 0-7923-7978-0
- [7] Chatterton P.A., Houlden M.A.: EMC – Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1992. ISBN 0-471-92878-X
- [8] Bajer A.: Stínění. [cit. 2009-10-05]. Dostupný z www:
<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bajer/BNKP/07_9_St%C3%ADn%C4%9Bn%C3%AD.doc>
- [9] Vaculíková P., Vaculík E.: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů. Grada Publishing, Praha, 1998. ISBN 80-7169-568-8
- [10] Paul C. R.: Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley & Sons Ltd, USA, 1992. ISBN 0-471-54927-4
- [11] Čapek M.: Vlnovod. [cit. 2010-05-16]. Dostupný z www:
<http://www.elmag.org/doku.php/k317:simulace_elmag_poli:vlnovod>

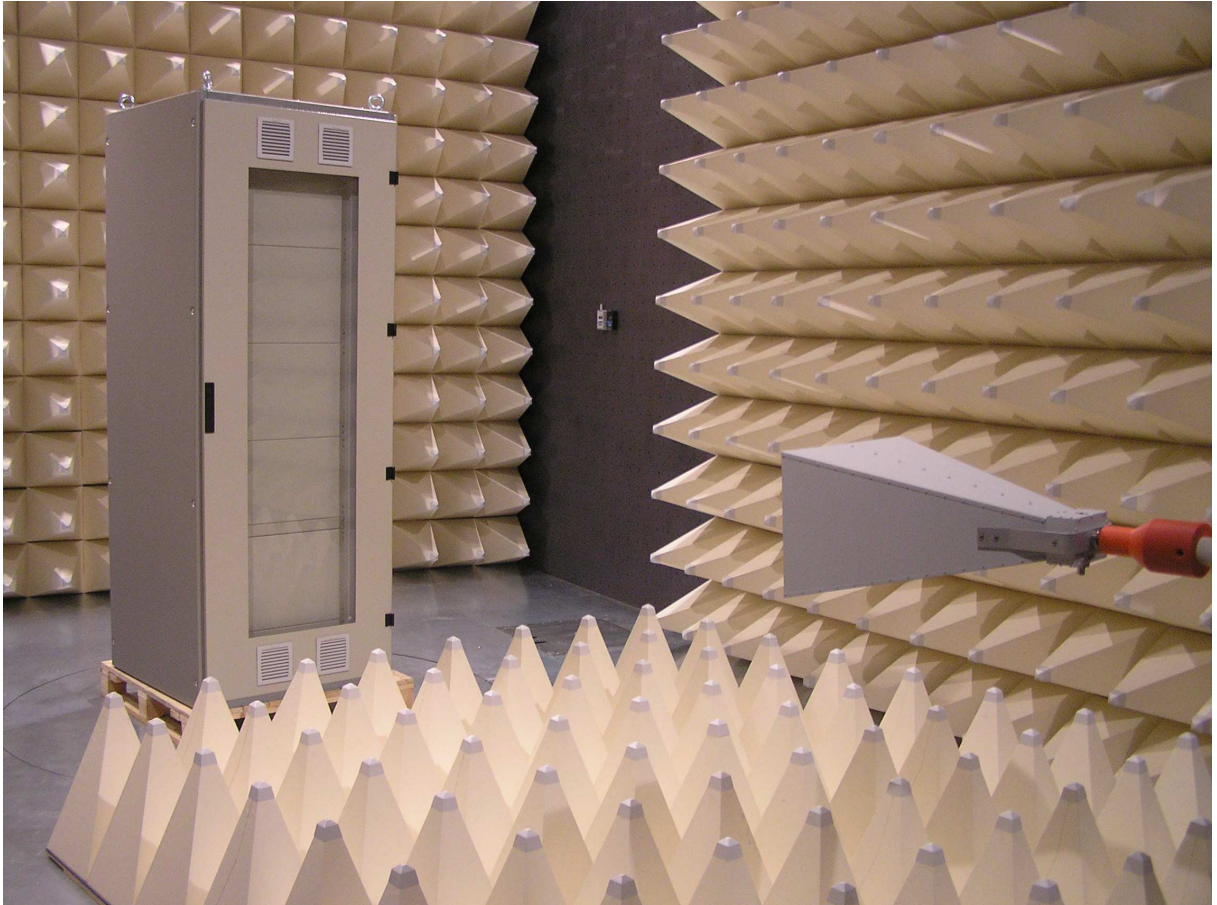
- [12] Kodali V.P.: Engineering Electromagnetic Compatibility: Principles, Measurements, and Technologies. IEEE PRESS Marketing, New York, USA, 1996. ISBN 0-7803-1117-5
- [13] RF Cafe - Rectangular Cavity Resonant Frequency. [cit. 2010-07-26]. Dostupný z www: <<http://www.rfcafe.com/references/spreadsheets/cavity-resonant-freq-calc-ss.htm>>
- [14] MIL-STD-285 - Military Standard, Attenuation Measurements for Enclosures, Electromagnetic Shielding, for Electronic Test Purposes, Method of. United States Government Printing Office, Washington, USA, 1956
- [15] IEEE-STD-299 - IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. New York, USA, 2007
- [16] ASTM D4935 - Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999, DOI: 10.1520/D4935-99, www.astm.org
- [17] Vojtech L., Neruda M., Hájek J.: Measurement of electromagnetic shielding efficiency of planar textiles. Digital Technologies 2009 [CD-ROM], TU in Zilina, 2009, vol. 1, ISBN 978-80-554-0150-8
- [18] Baker-Jarvis J., Janezic M.D.: Analysis of a two-port flanged coaxial holder for shielding effectiveness and dielectric measurements of thin films and thin materials. IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 38, no. 1, pp. 67–70, Feb. 1996
- [19] 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
- [20] ETS-Lindgren: Operational manual (Model MF-130D Attenuation Meter), 2009
- [21] Frankonia GmbH: Frankonia RF Lab – měřicí software
- [22] Rohde & Schwarz: Signal Generator Operating Manual. [cit. 2010-09-14]. Dostupný z www: <http://www2.rohde-schwarz.com/file_4718/SML_SMV__e._gl.pdf>

- [23] Frankonia GmbH: RF Relay-Switching-Unit – RSU. [cit. 2010-09-14].
Dostupný z www:
<http://www.frankonia-emv.com/data_sheets/emc_test_equipment/RSU.pdf>
- [24] Frankonia GmbH: Frankonia Broadband RF-Power-Amplifiers. [cit. 2010-09-14].
Dostupný z www:
<http://www.arctechnical.com/Resources/FRL_Broadband_RF_Power_Amp.pdf>
- [25] Frankonia GmbH: Frankonia Multi-Channel RF-Power-Meter. [cit. 2010-09-14].
Dostupný z www:
<http://www.frankonia-emv.com/data_sheets/emc_test_equipment/for_immunity_tests/rf_power_meters/pms_1084_Englisch.pdf>
- [26] Frankonia GmbH: Ultrabroadbandantenna BTA-Series. [cit. 2010-09-14].
Dostupný z www:<<http://tectra.cz/prilohy/file438afb40babb4.pdf>>
- [27] Schwarzbeck - Mess Elektronik e.K.: Calibrated Double Ridged Broadband Horn Antenna BBHA 9120 E. [cit. 2010-09-14]. Dostupný z www:
<<http://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/k9120e.pdf>>
- [28] ETS Lindgren: HI-6005 Electric Field Probe. [cit. 2010-09-14]. Dostupný z www:
<<http://www.ets-lindgren.com/pdf/HI-6005.pdf>>
- [29] Šlik O.: EMC parametry rozváděče pro řízení a chránění v energetice. Plzeň 2009. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická

Příloha A – Fotografie



Obr. A.1: Standardní verze rozváděče v bezodrazové komoře, měření bi-log anténou



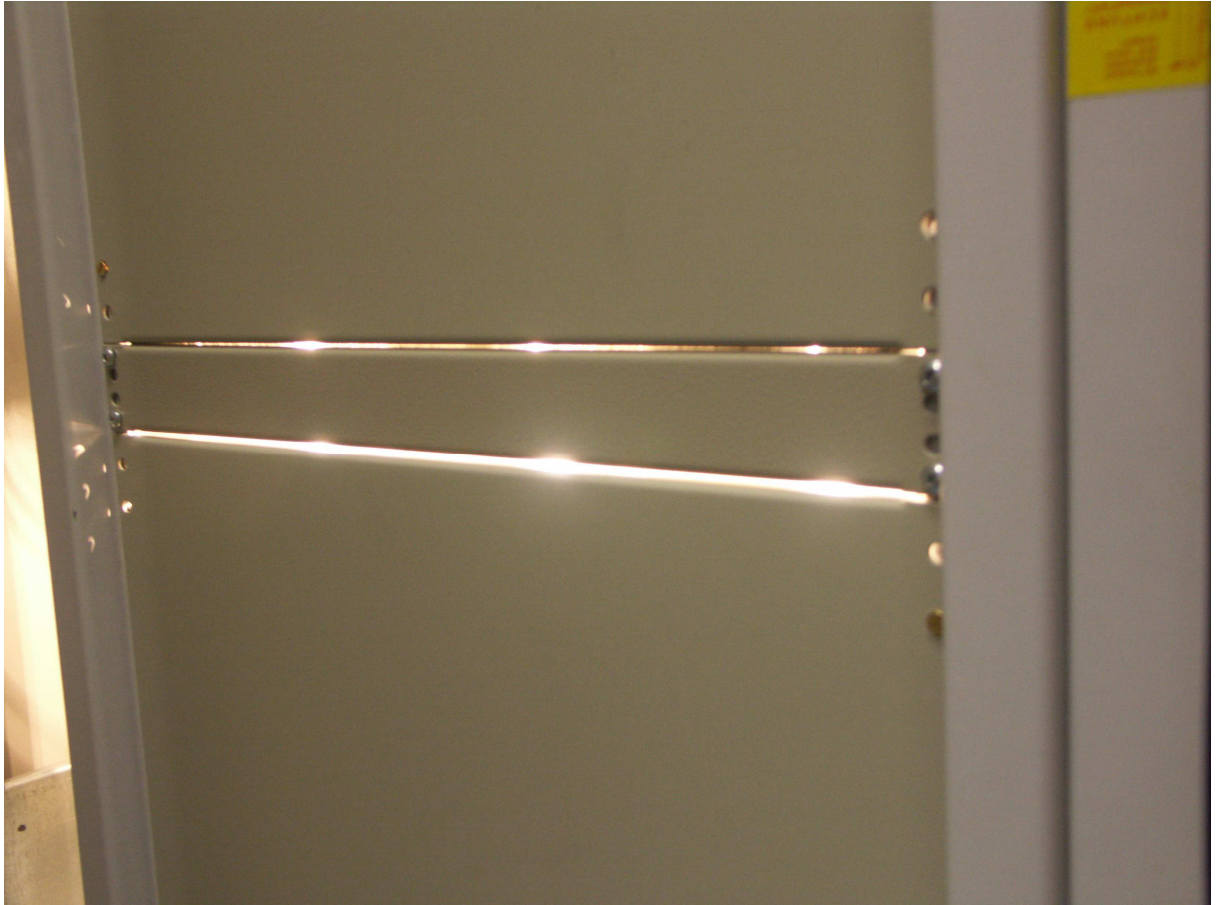
Obr. A.2: Standardní verze rozváděče v bezodrazové komoře, měření trychtýřovou anténou



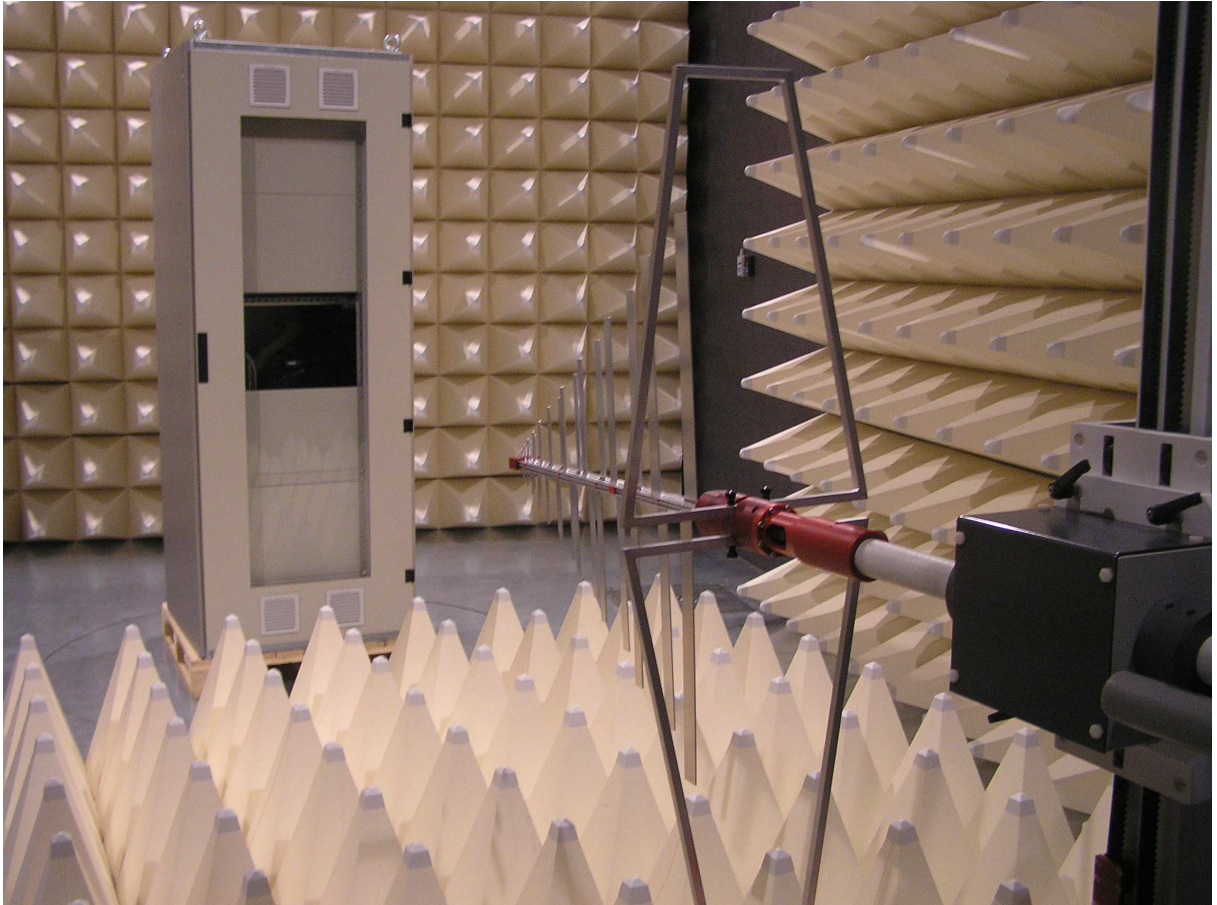
Obr. A.3: EMC verze rozváděče v bezodrazové komoře



Obr. A.4: Vnitřní uspořádání rozváděče se sondou elektrického pole

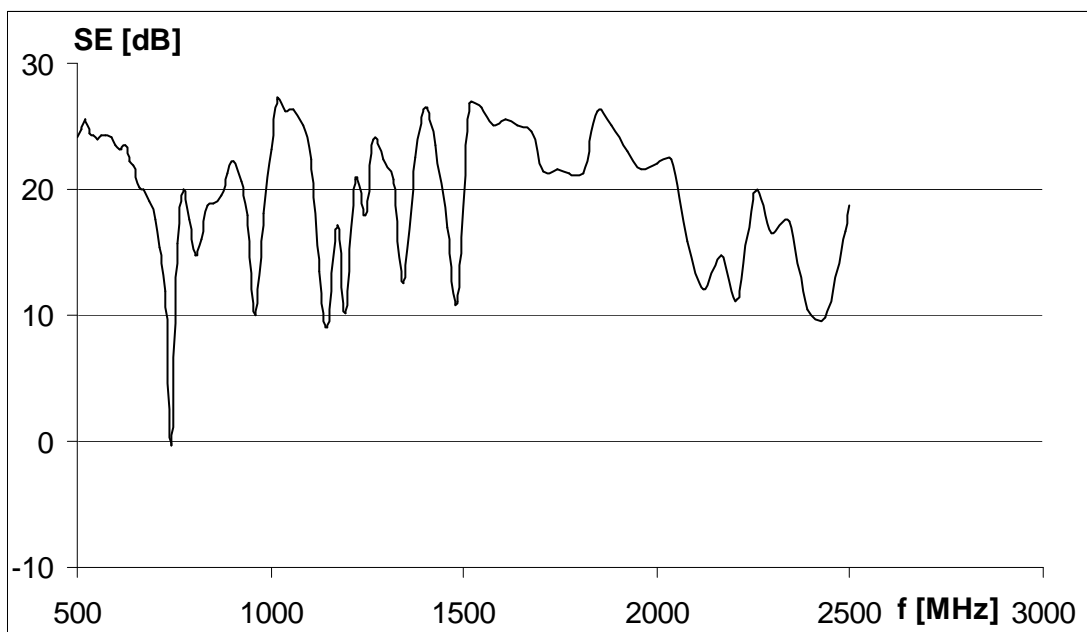


Obr. A.5: Detail štěrby mezi plechy vnitřních dveří rozváděče

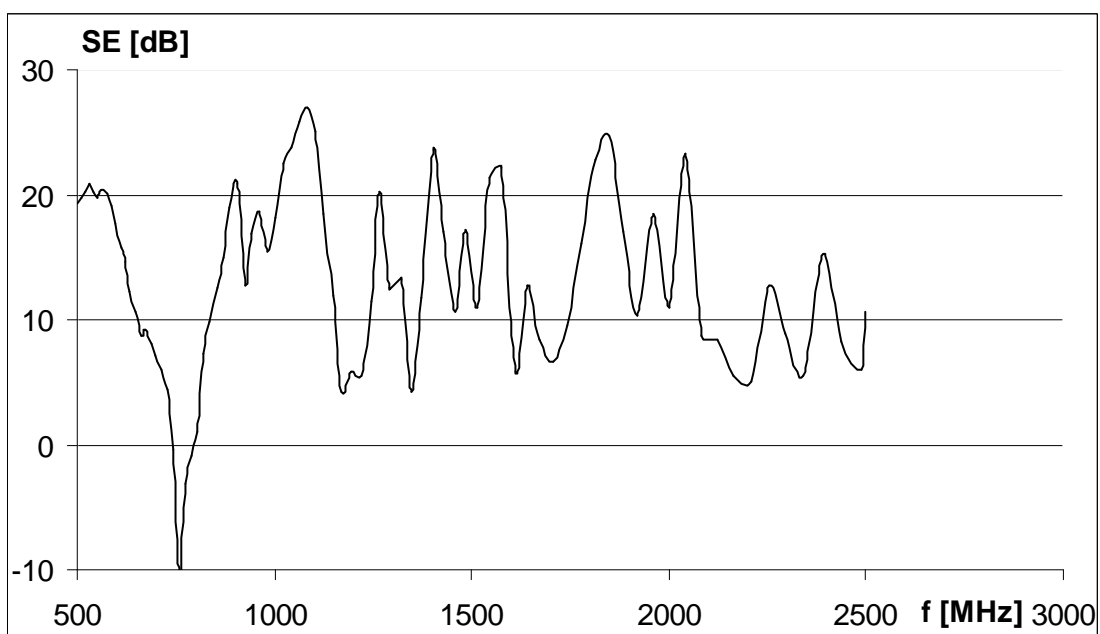


Obr. A.6: Měření s odmontovaným jedním plechem vnitřních dveří

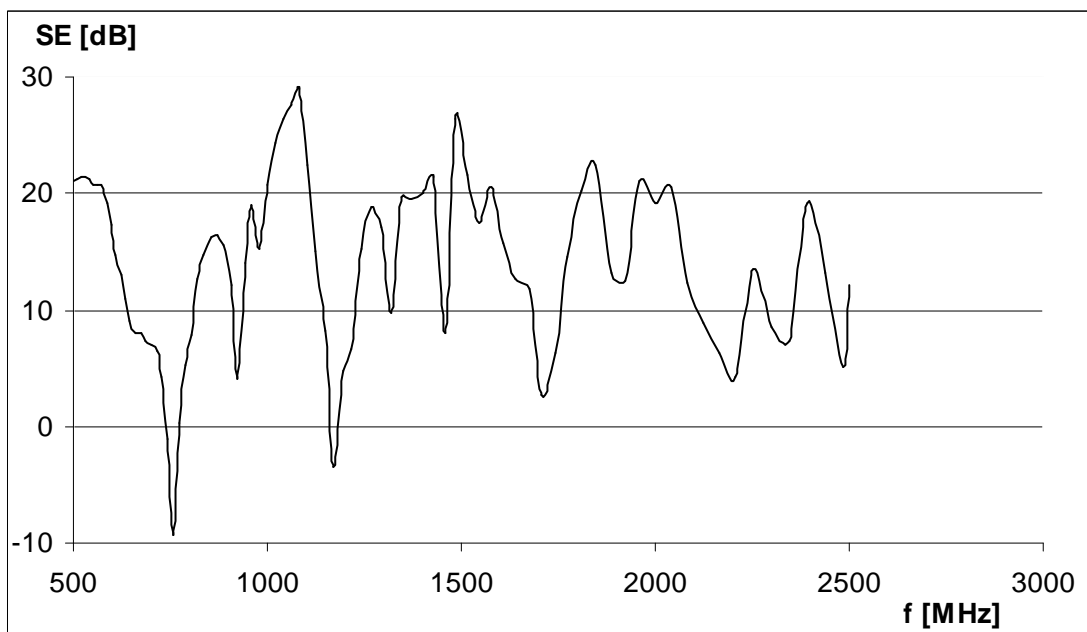
Příloha B - Výsledky testovacího měření



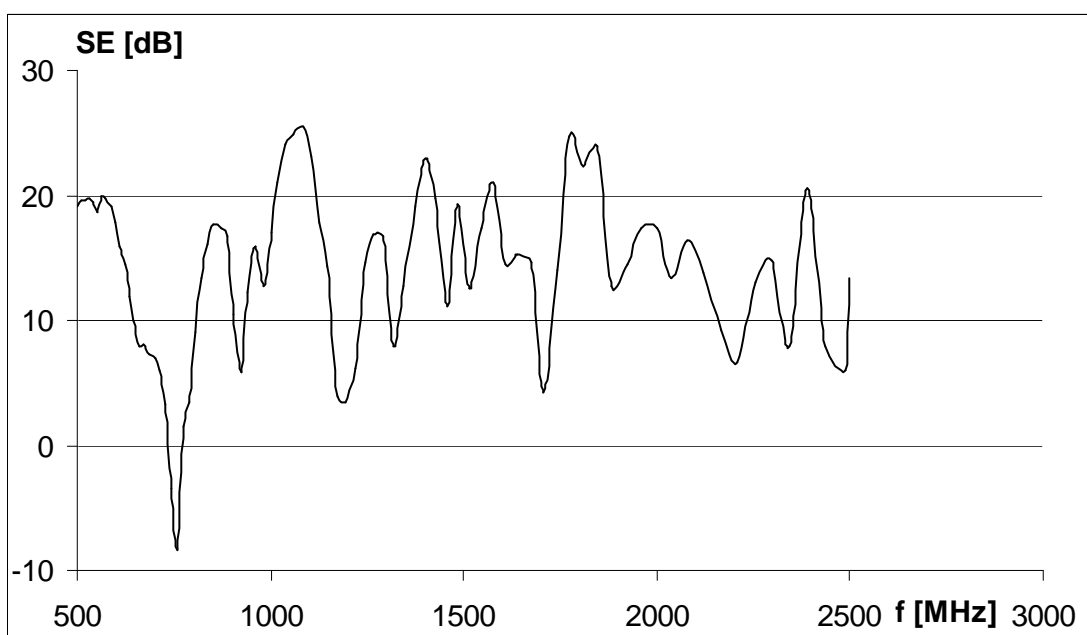
Obr. B.1: Účinnost stínění plné měděné desky, bi-log anténa



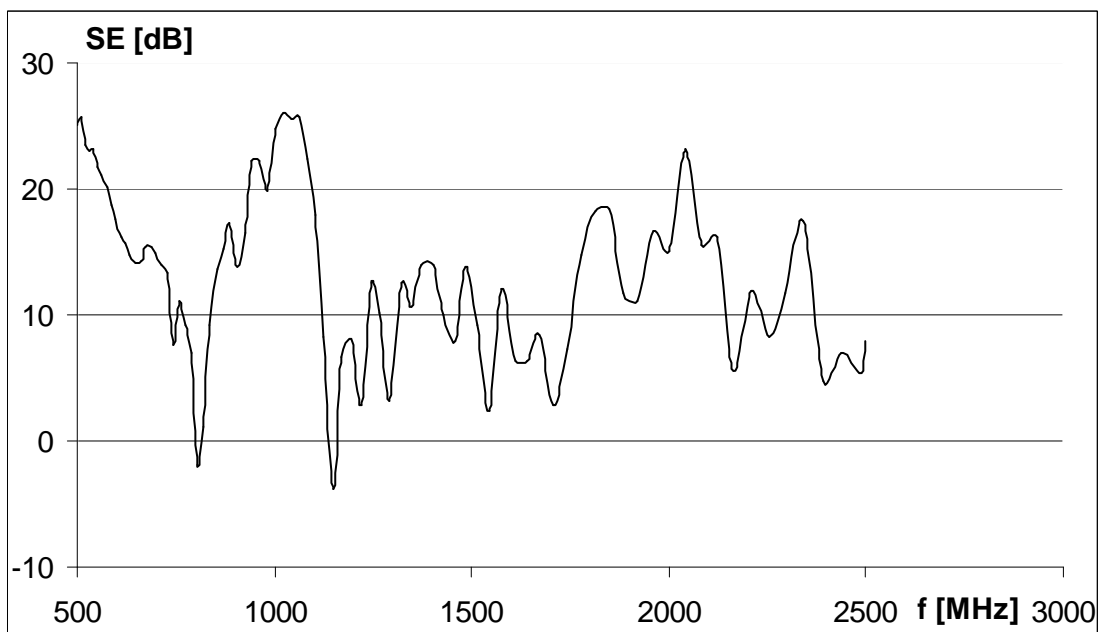
Obr. B.2: Účinnost stínění plné hliníkové desky, bi-log anténa



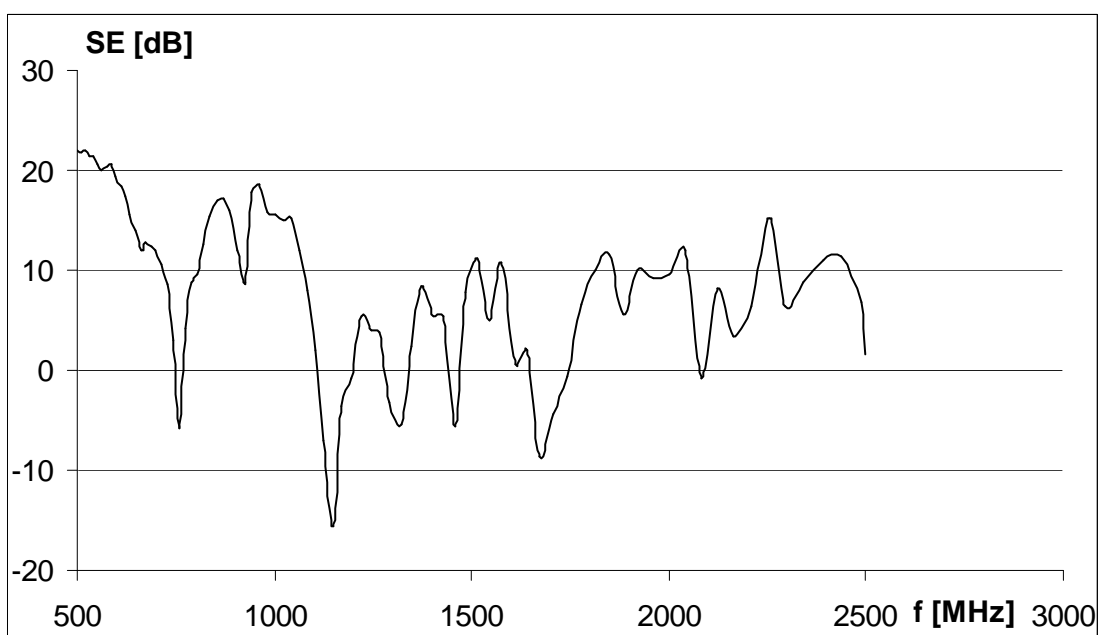
Obr. B.3: Účinnost stínění při kruhovém otvoru $a=5$ mm, bi-log anténa



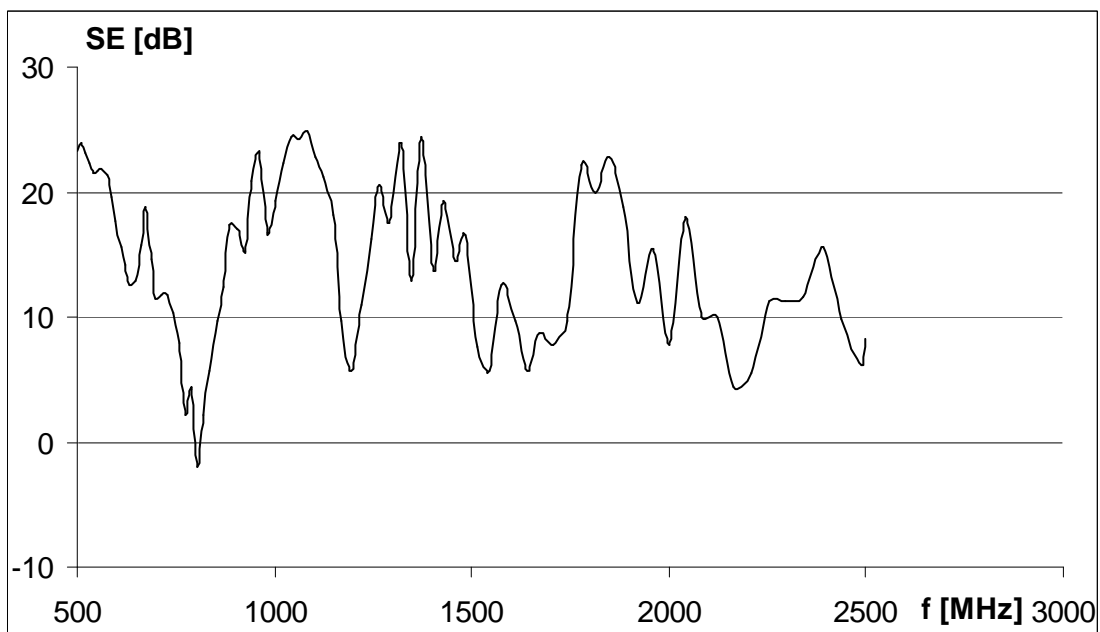
Obr. B.4: Účinnost stínění při kruhovém otvoru $a=10$ mm, bi-log anténa



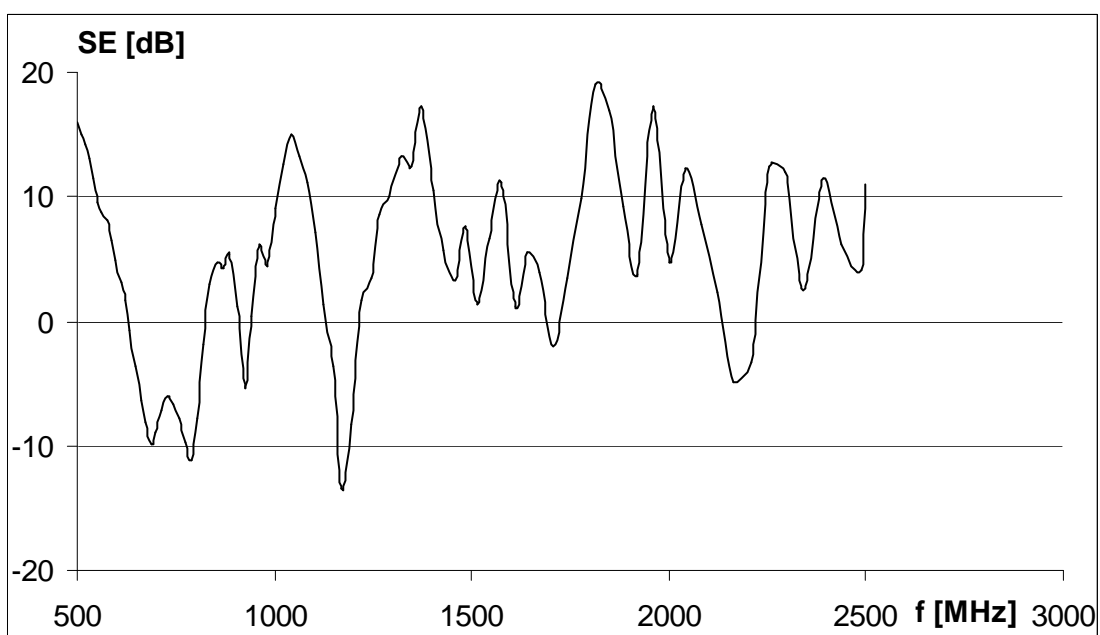
Obr. B.5: Účinnost stínění při štěrbíně $l=10$ cm, bi-log anténa horizontálně



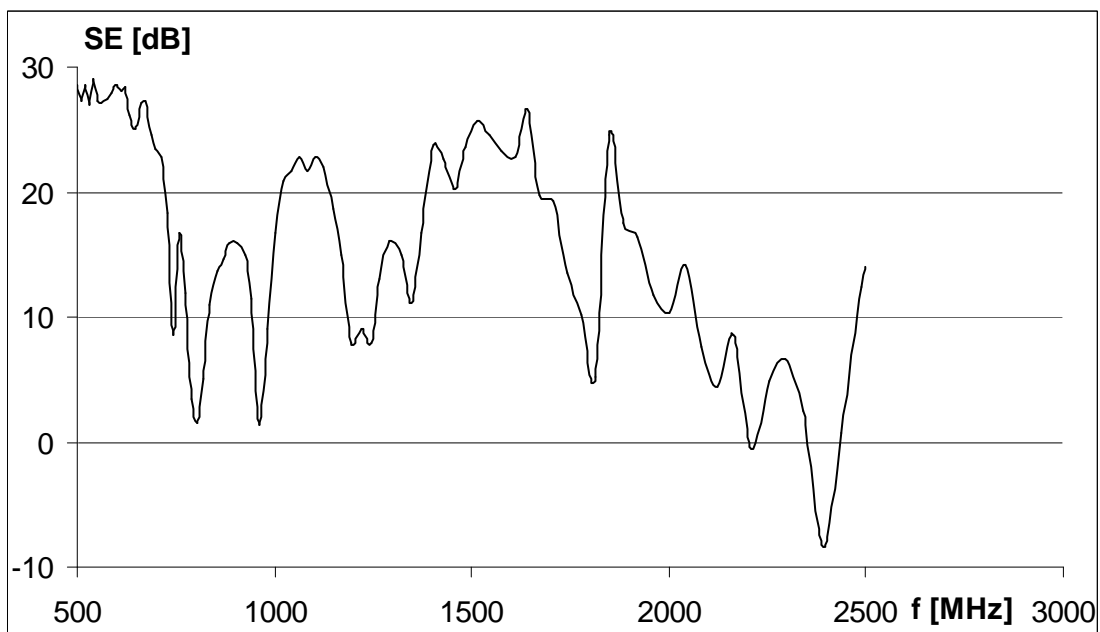
Obr. B.6: Účinnost stínění při štěrbíně $l=10$ cm, bi-log anténa vertikálně



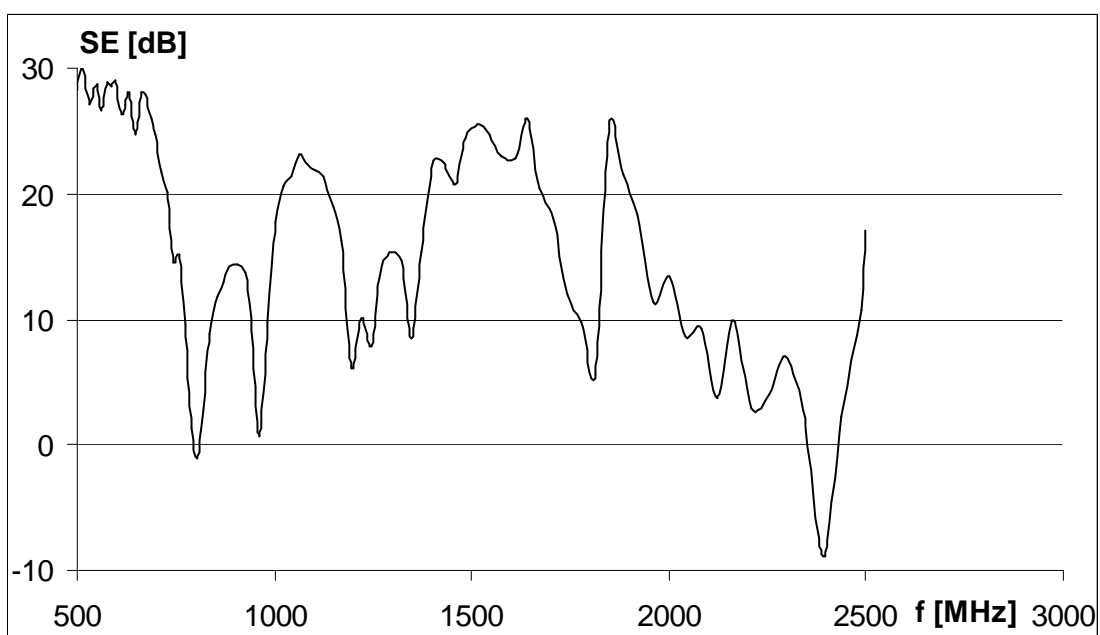
Obr. B.7: Účinnost stínění při štěrbíně $l=20$ cm, bi-log anténa horizontálně



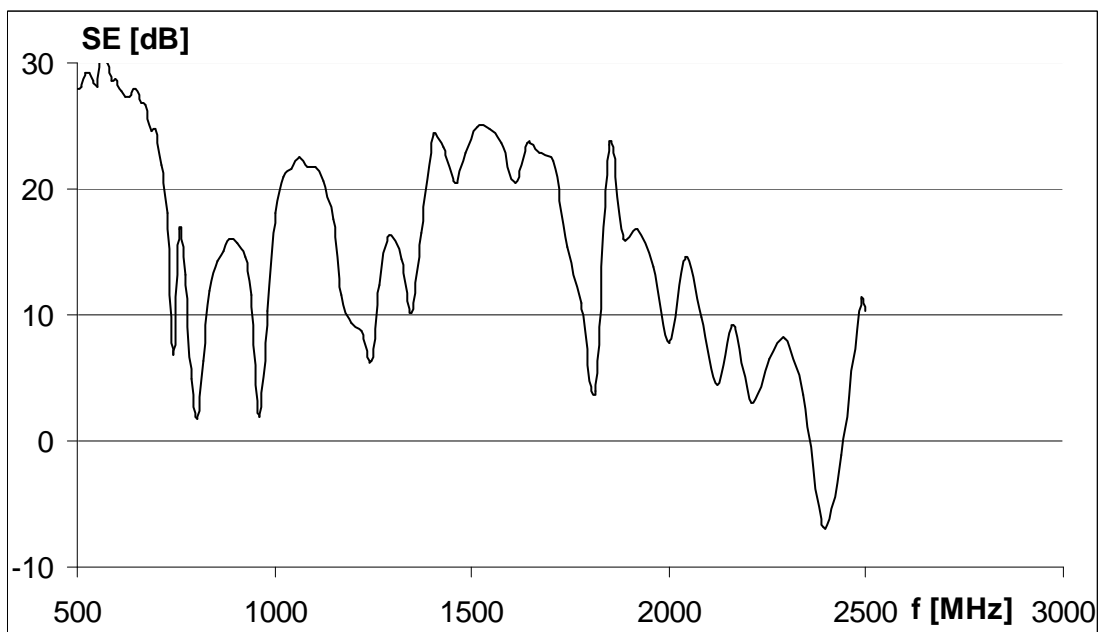
Obr. B.8: Účinnost stínění při štěrbíně $l=20$ cm, bi-log anténa vertikálně



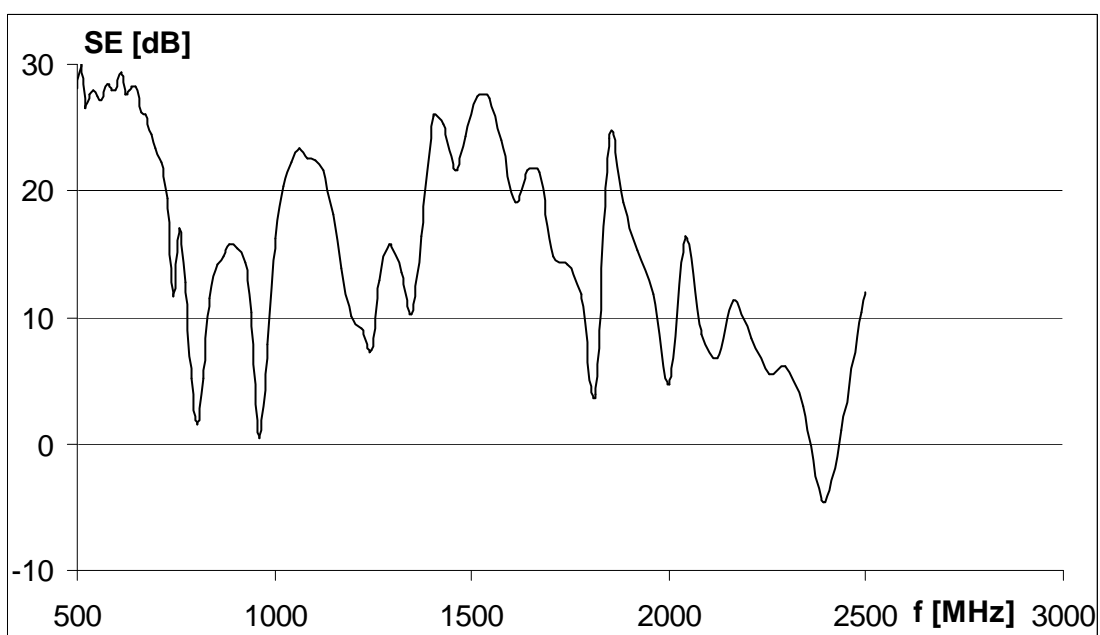
Obr. B.9: Účinnost stínění plné měděné desky, trychtýřová anténa



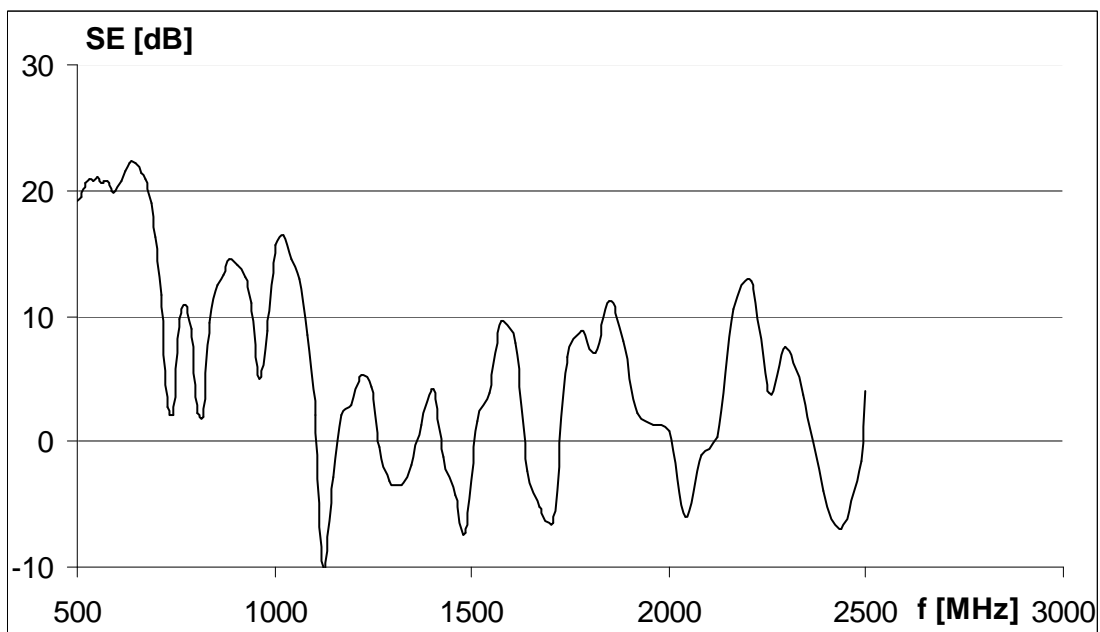
Obr. B.10: Účinnost stínění plné hliníkové desky, trychtýřová anténa



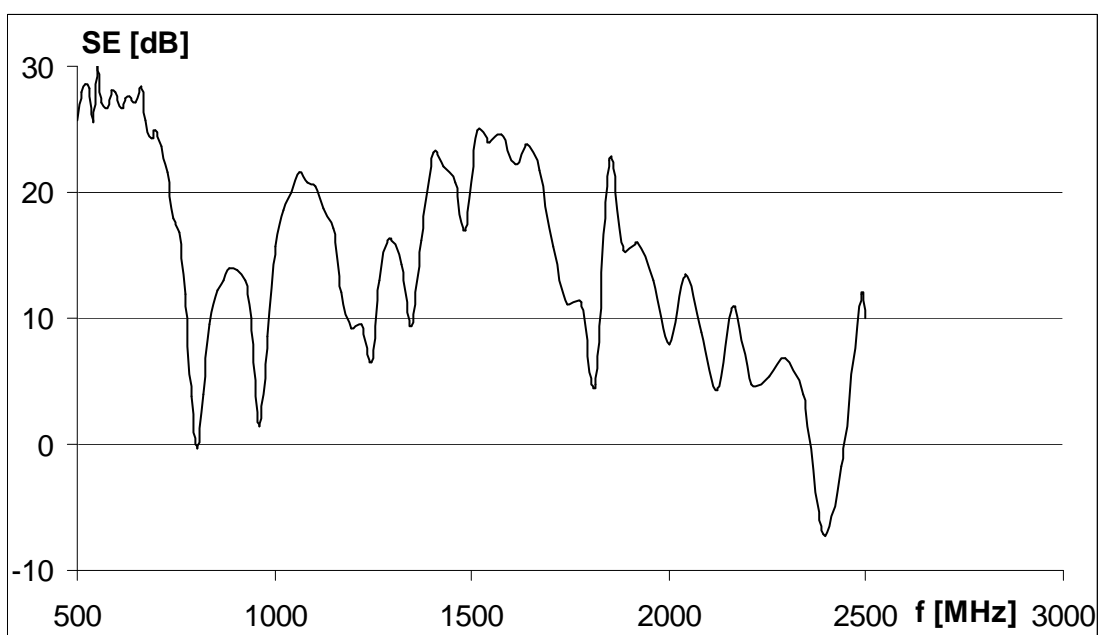
Obr. B.11: Účinnost stínění při kruhovém otvoru $a=5$ mm, trychtýřová anténa



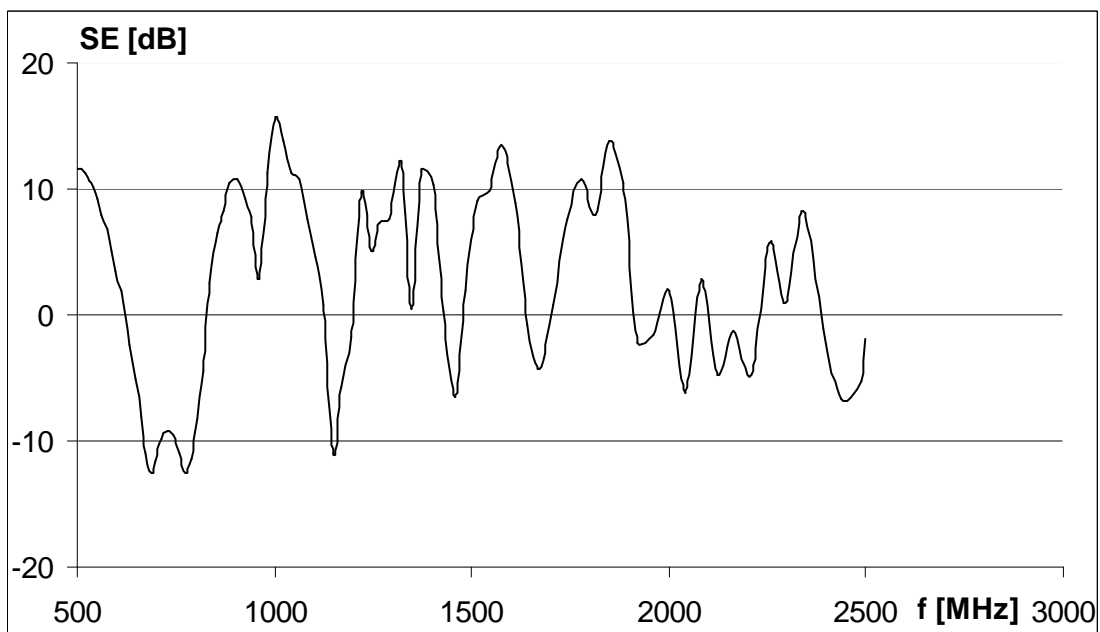
Obr. B.12: Účinnost stínění při kruhovém otvoru $a=10$ mm, trychtýřová anténa



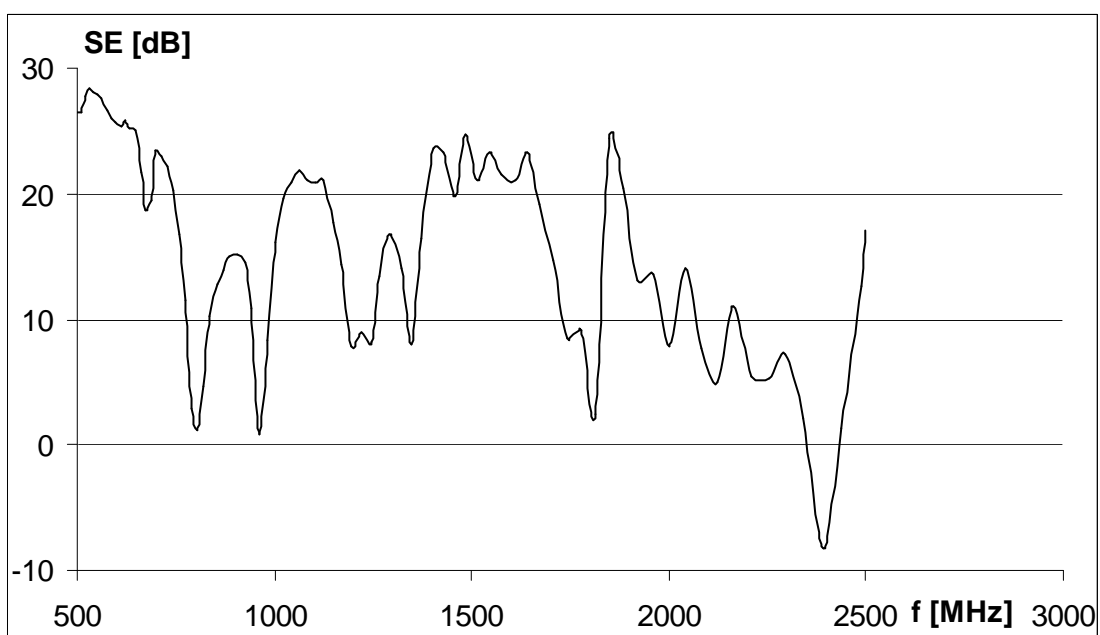
Obr. B.13: Účinnost stínění při štěrbíně $l=10$ cm, trychtýřová anténa horizontálně



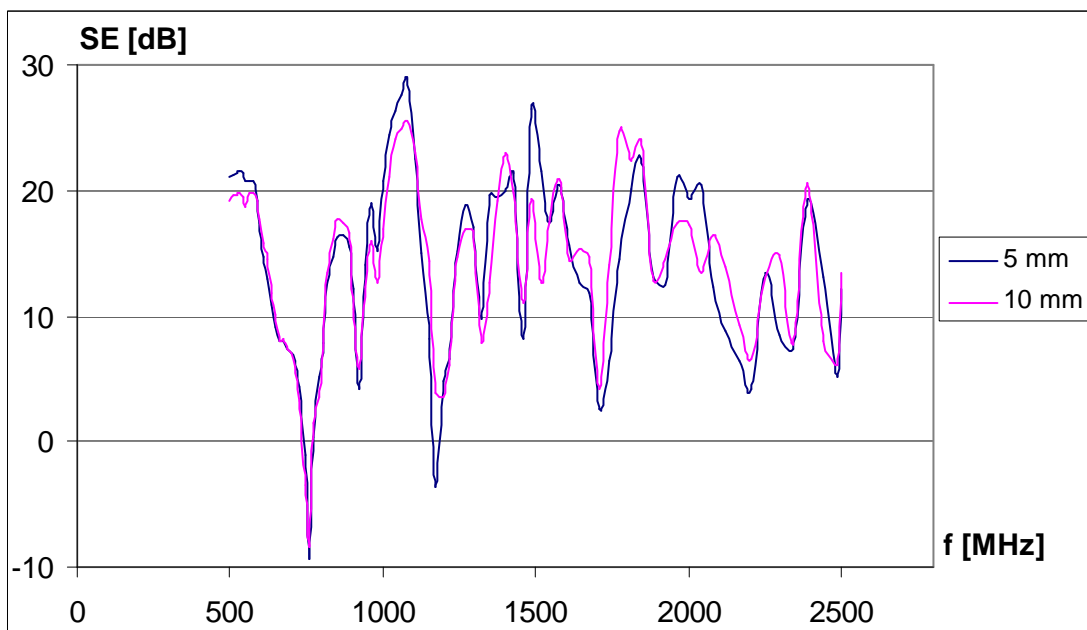
Obr. B.14: Účinnost stínění při štěrbíně $l=10$ cm, trychtýřová anténa vertikálně



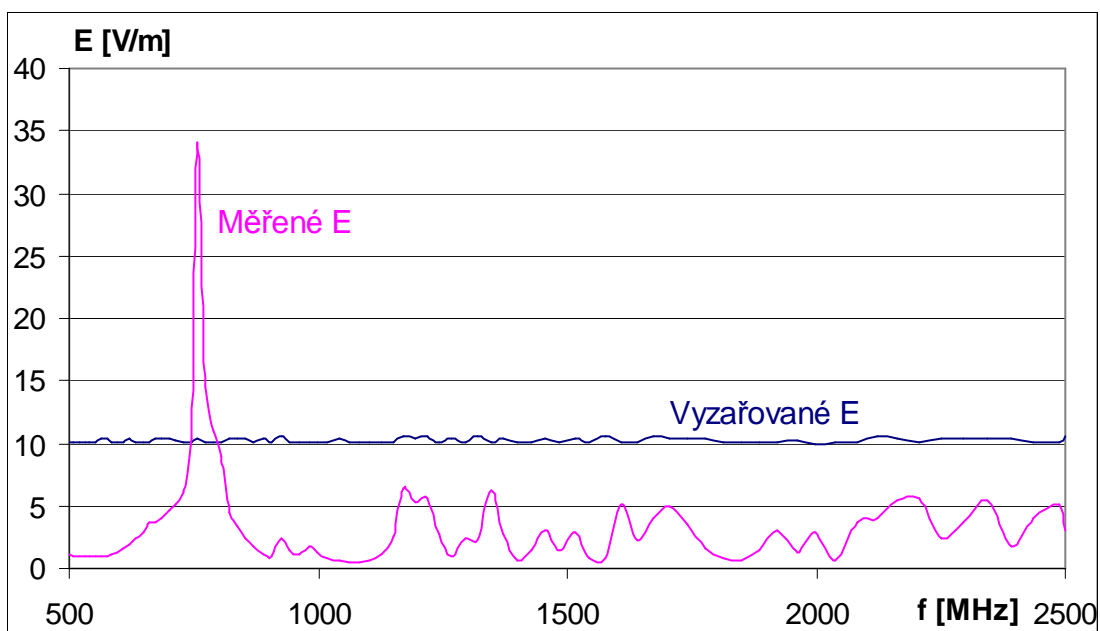
Obr. B.15: Účinnost stínění při štěrbíně $l=20$ cm, trychtýřová anténa horizontálně



Obr. B.16: Účinnost stínění při štěrbíně $l=20$ cm, trychtýřová anténa vertikálně

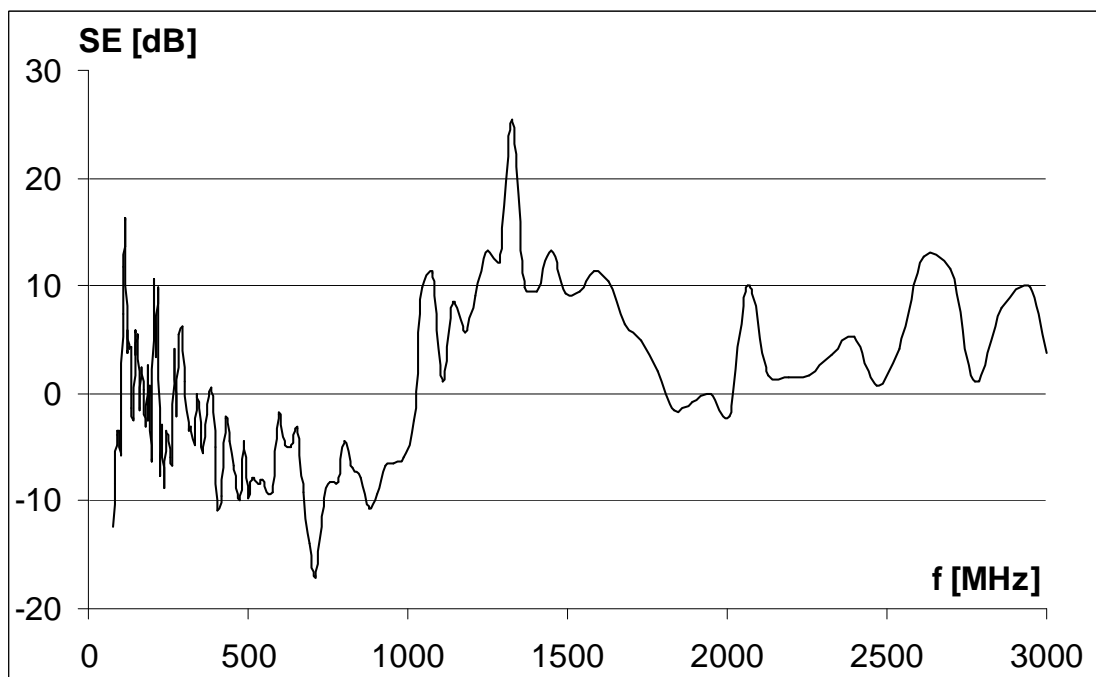


Obr. B.17: Porovnání účinnosti stínění pro kruhové otvory 5 mm a 10 mm, bi-log anténa

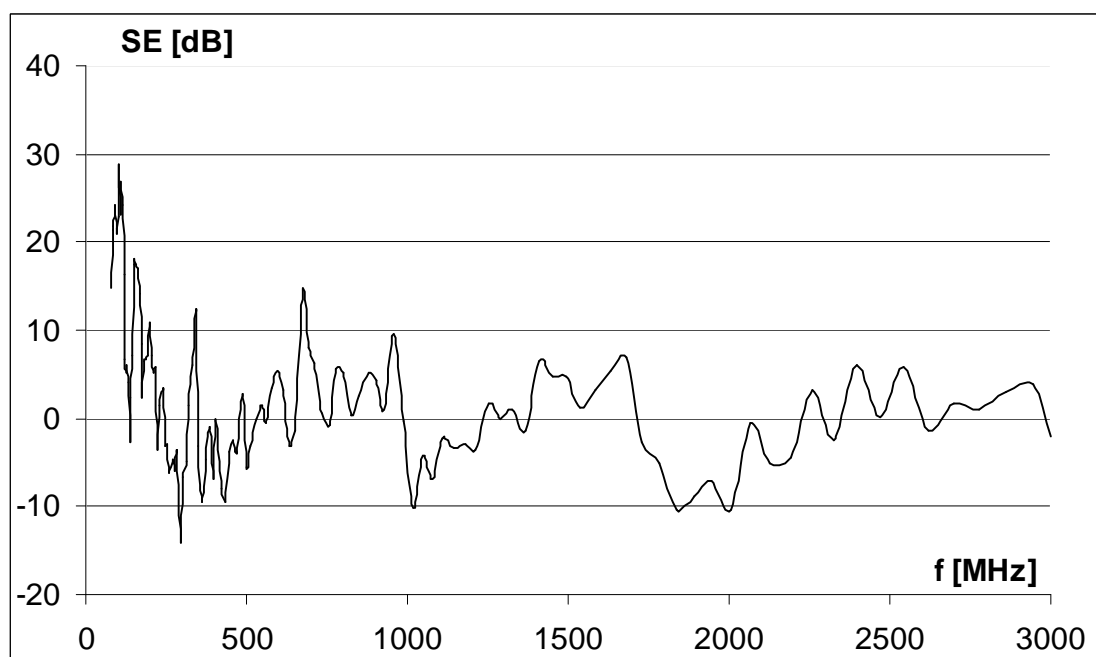


Obr. B.18: Vyzařované a měřené elektrické pole při plné hliníkové desce

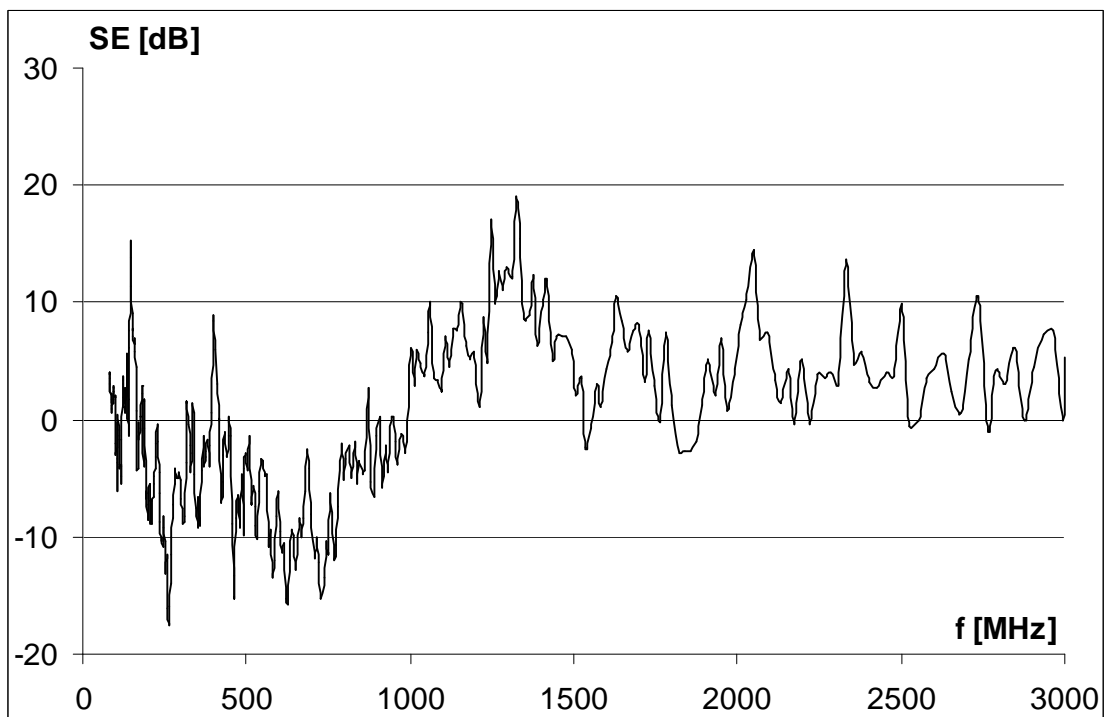
Příloha C – Výsledky měření rozváděče ve standardní verzi



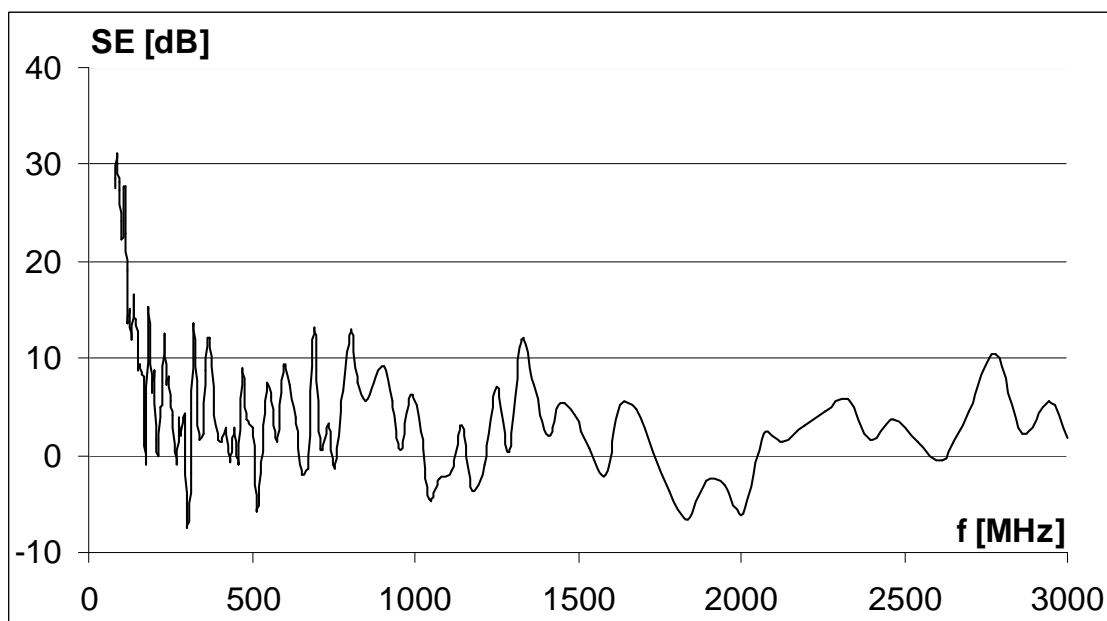
Obr. C.1: Účinnost stínění v bodě 1, horizontální polarizace antén



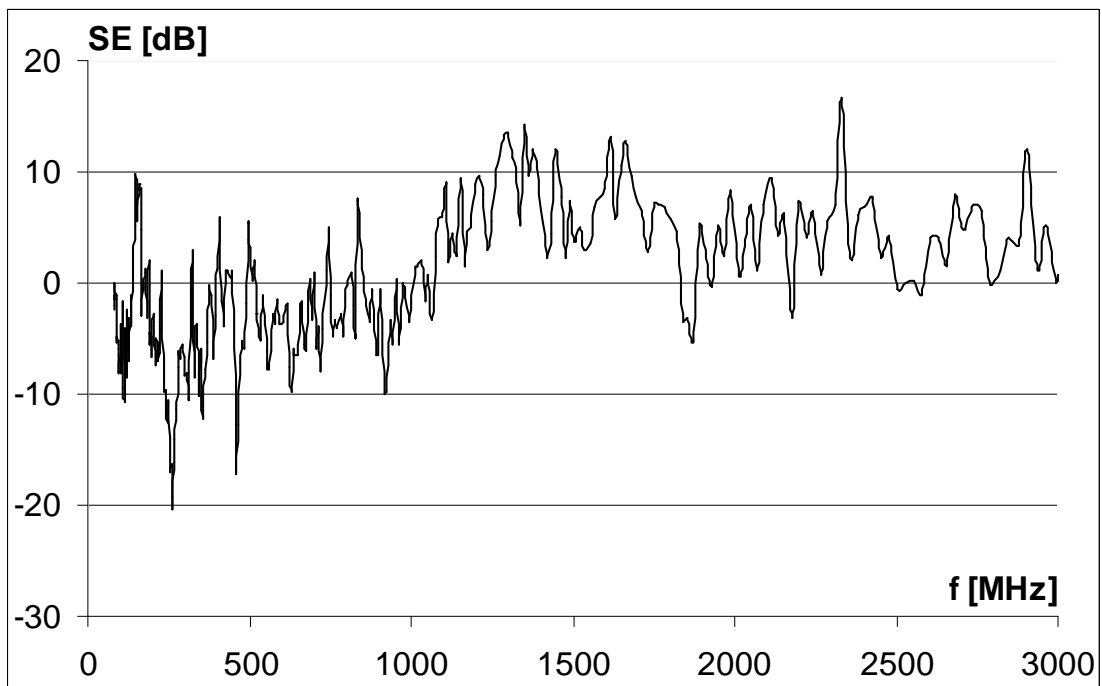
Obr. C.2: Účinnost stínění v bodě 1, vertikální polarizace antén



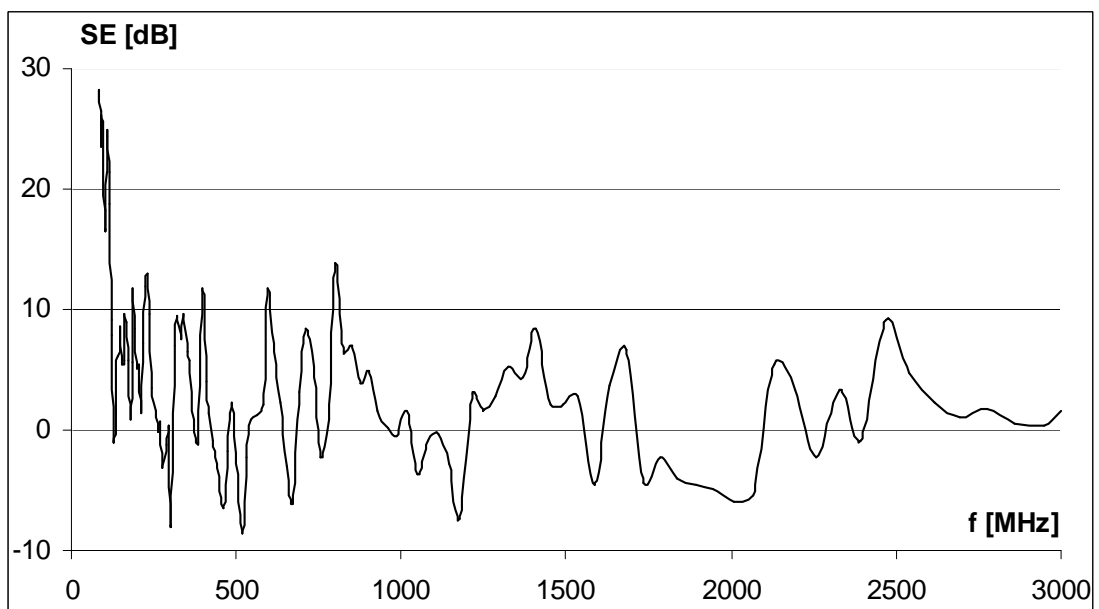
Obr. C.3: Účinnost stínění v bodě 2, horizontální polarizace antén



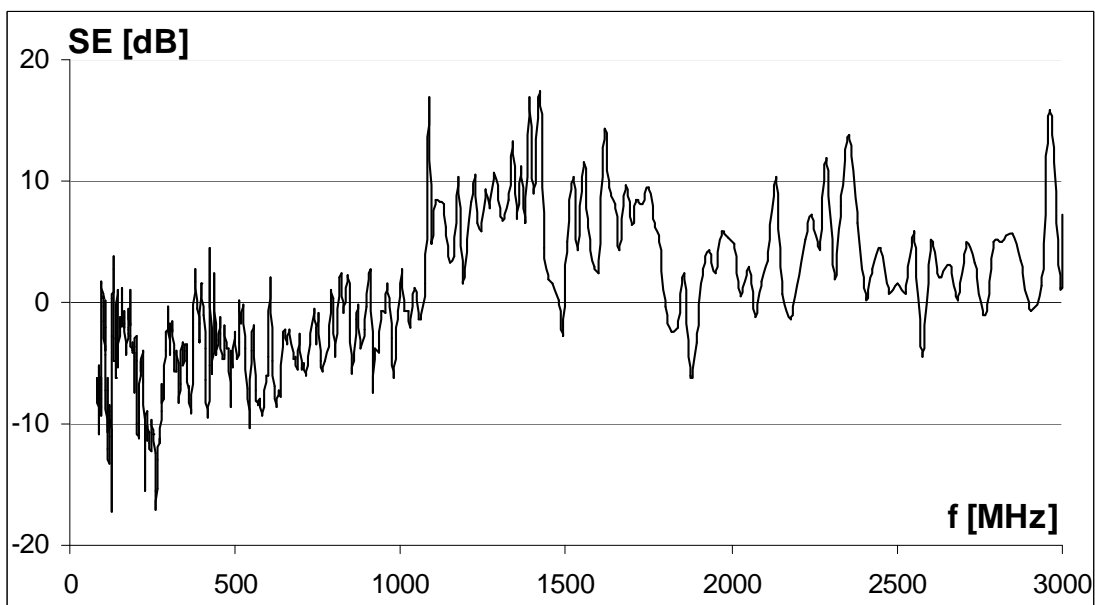
Obr. C.4: Účinnost stínění v bodě 2, vertikální polarizace antén



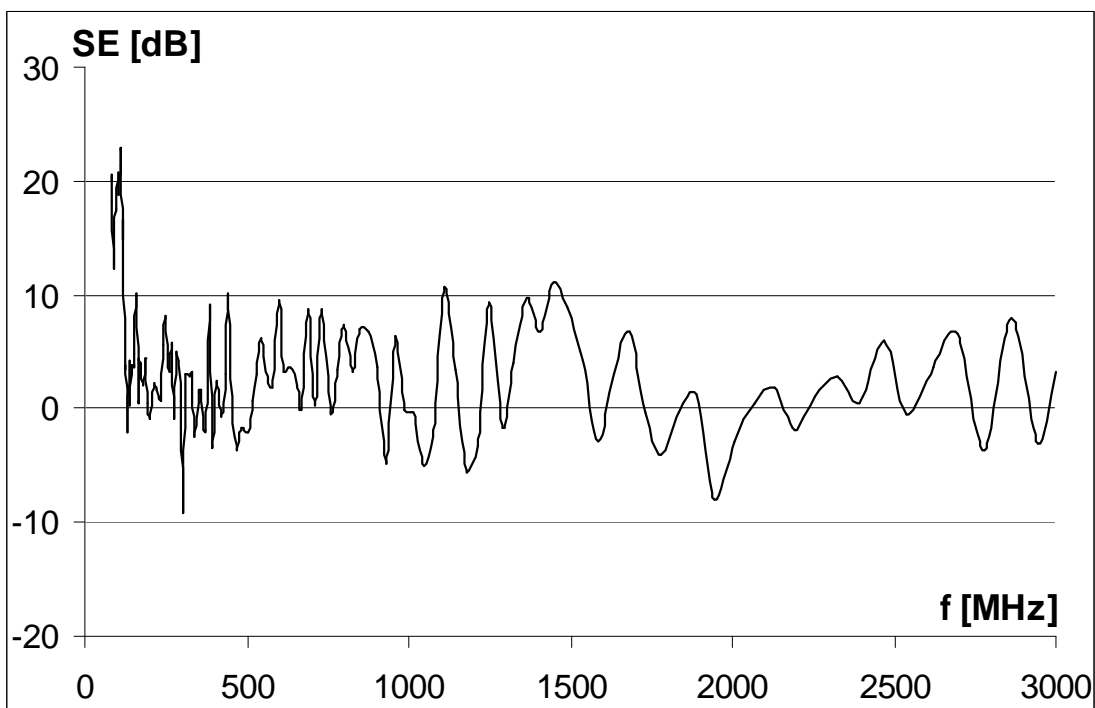
Obr. C.5: Účinnost stínění v bodě 3, horizontální polarizace antén



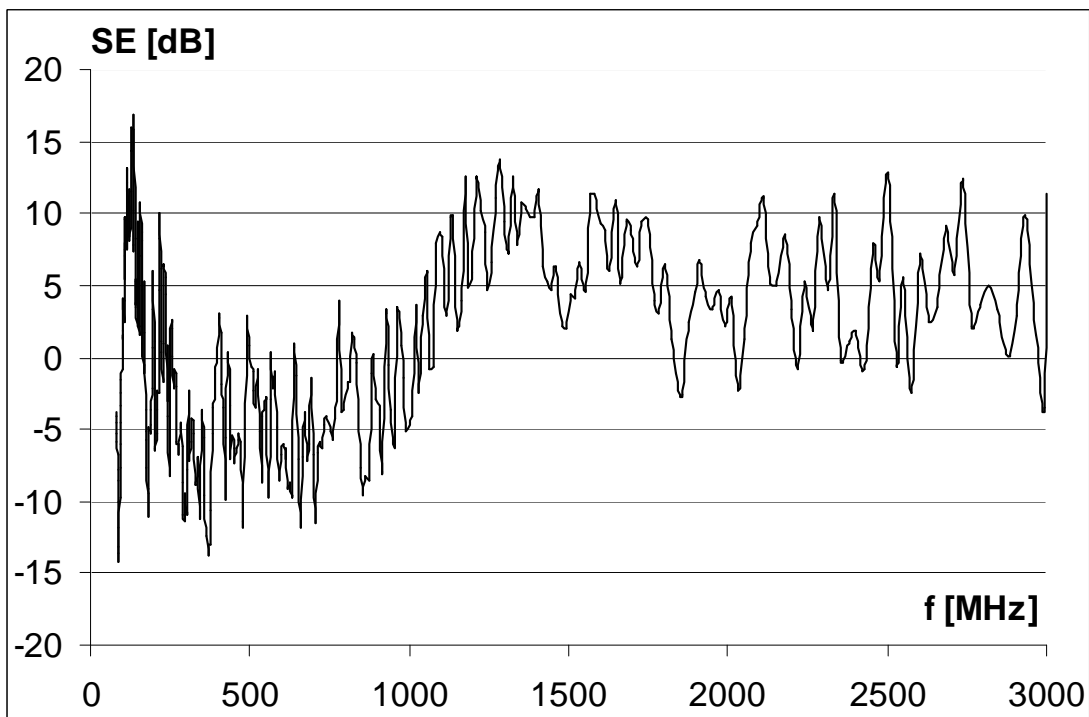
Obr. C.6: Účinnost stínění v bodě 3, vertikální polarizace antén



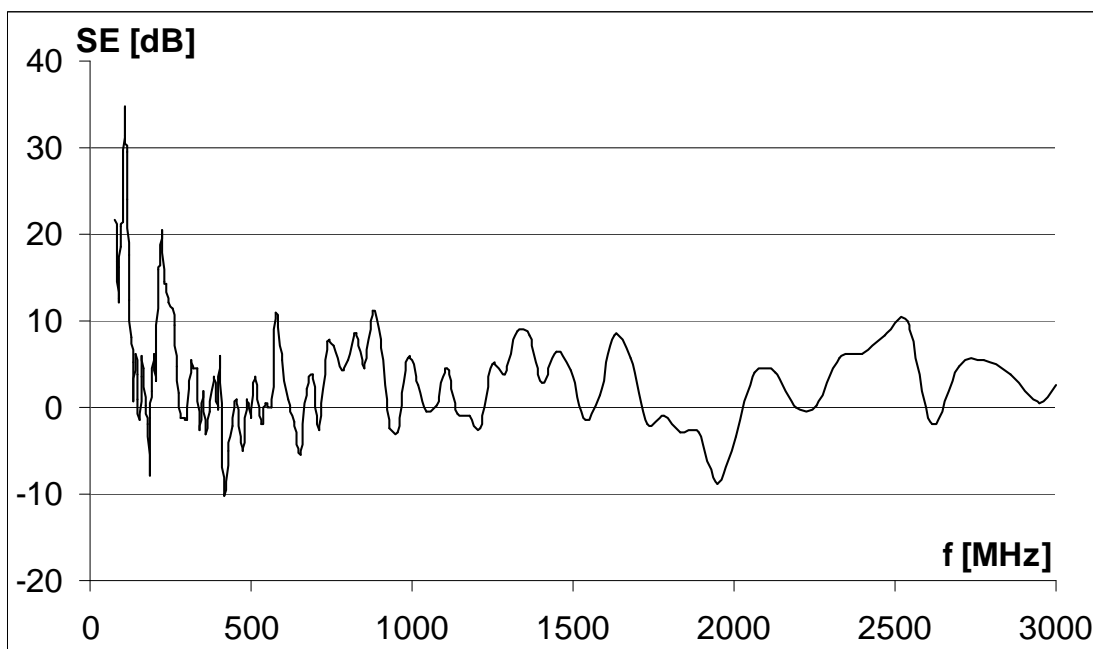
Obr. C.7: Účinnost stínění v bodě 4, horizontální polarizace antén



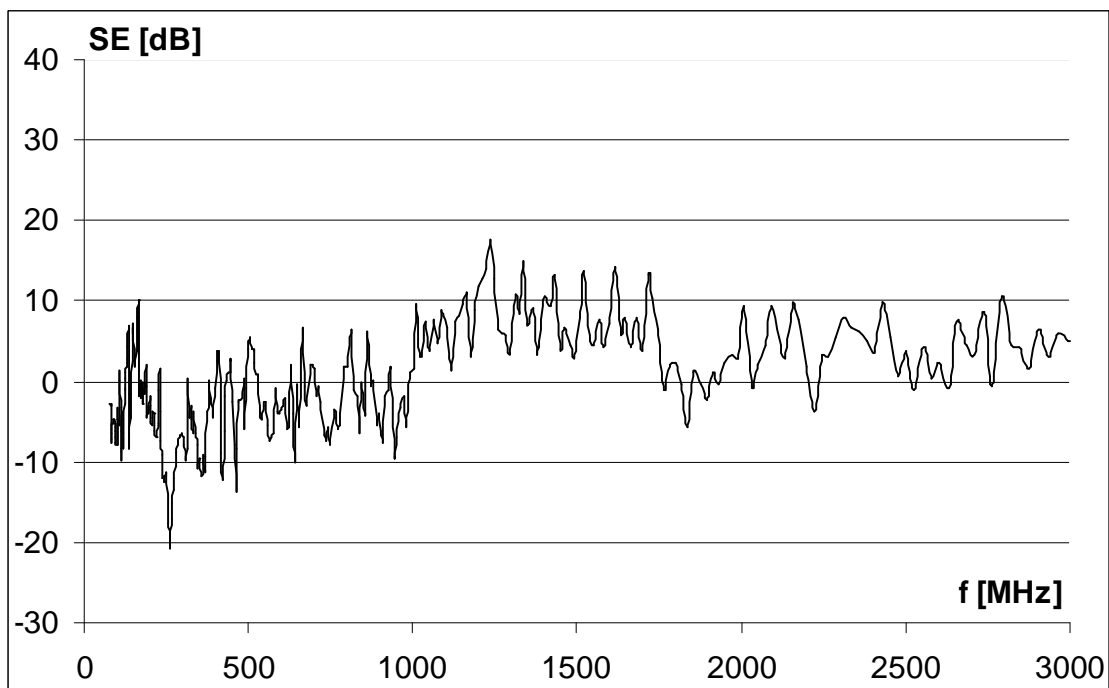
Obr. C.8: Účinnost stínění v bodě 4, vertikální polarizace antén



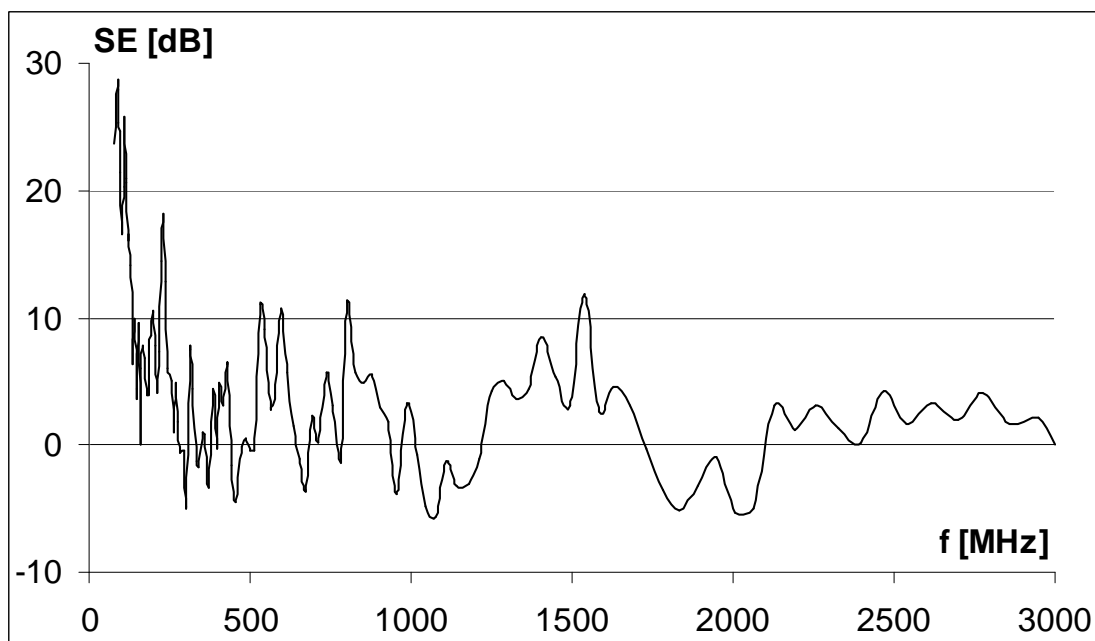
Obr. C.9: Účinnost stínění v bodě 5, horizontální polarizace antén



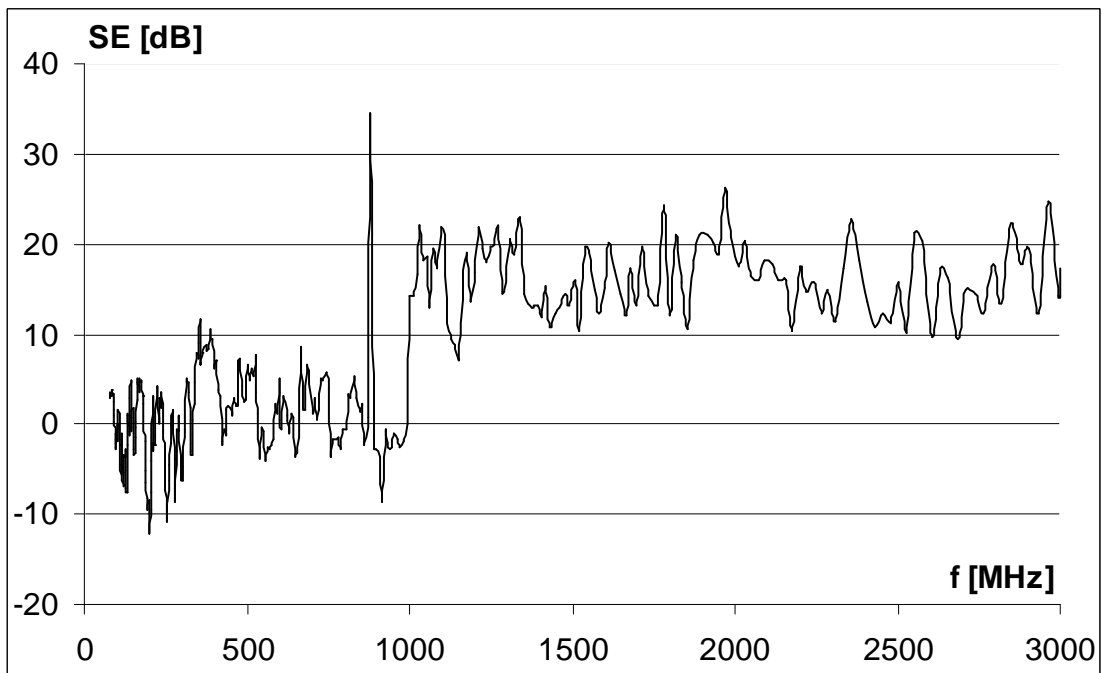
Obr. C.10: Účinnost stínění v bodě 5, vertikální polarizace antén



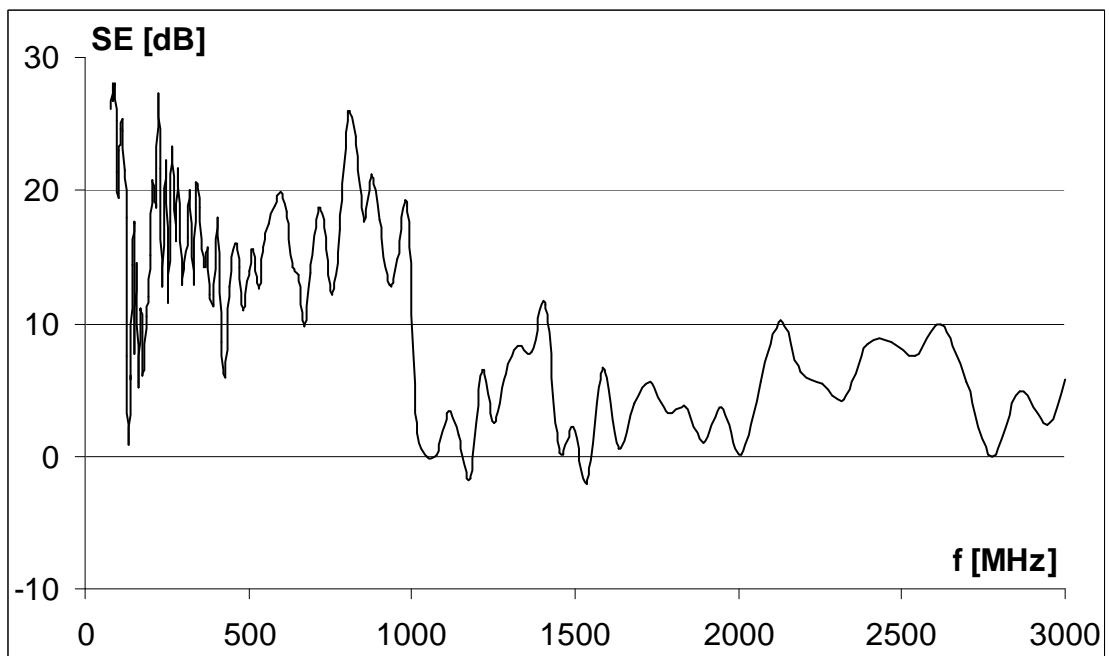
Obr. C.11: Účinnost stínění v bodě 6, horizontální polarizace antén



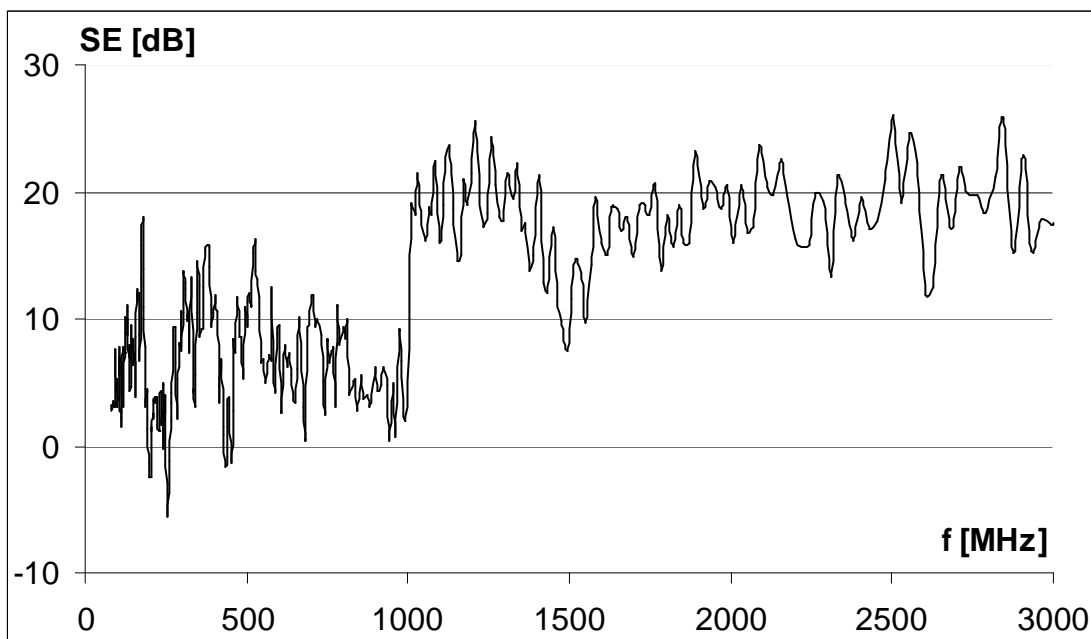
Obr. C.12: Účinnost stínění v bodě 6, vertikální polarizace antén



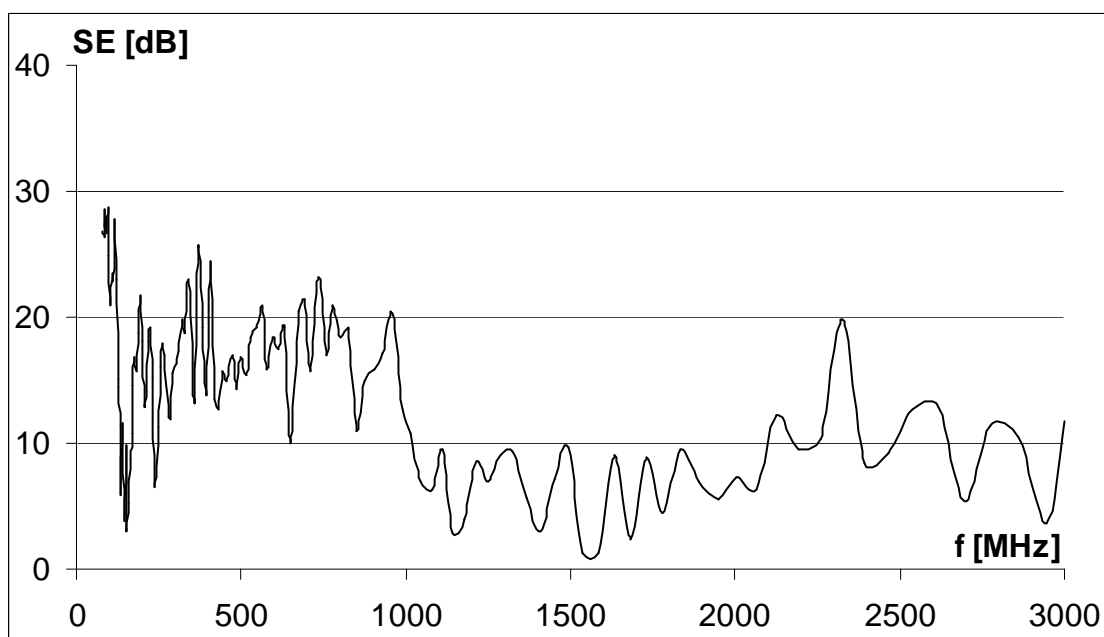
Obr. C.13: Účinnost stínění v bodě 7, horizontální polarizace antén



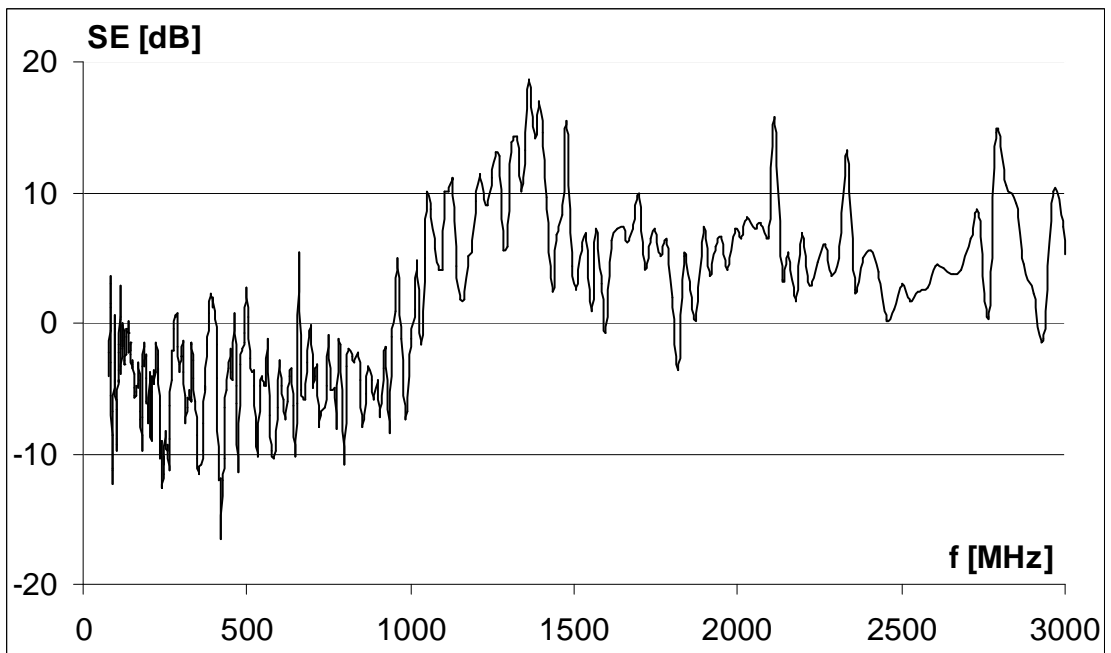
Obr. C.14: Účinnost stínění v bodě 7, vertikální polarizace antén



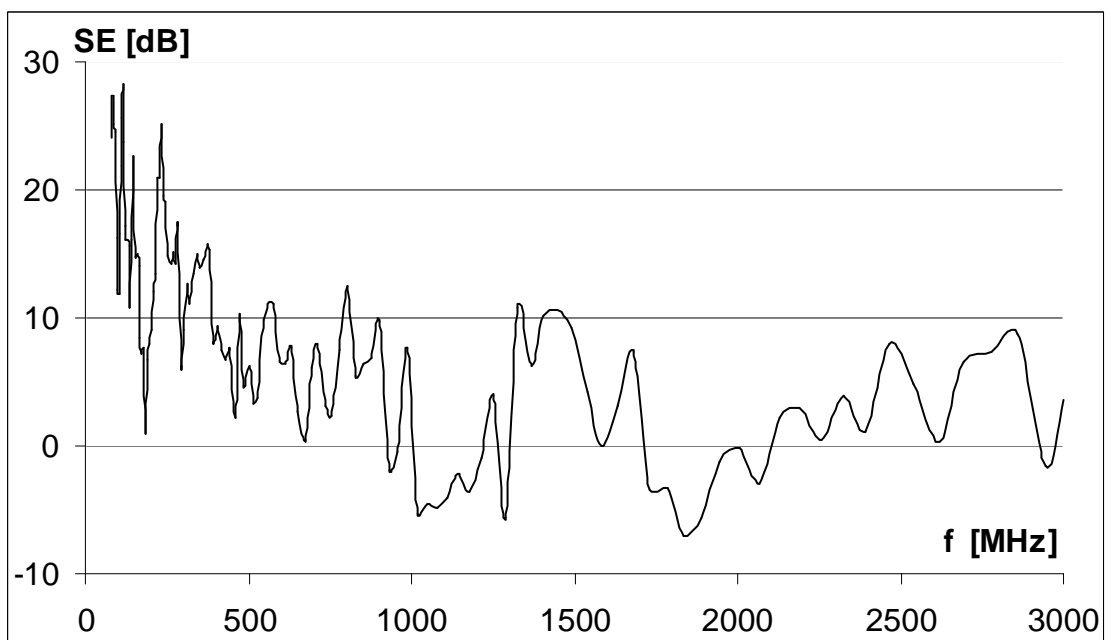
Obr. C.15: Účinnost stínění v bodě 8, horizontální polarizace antén



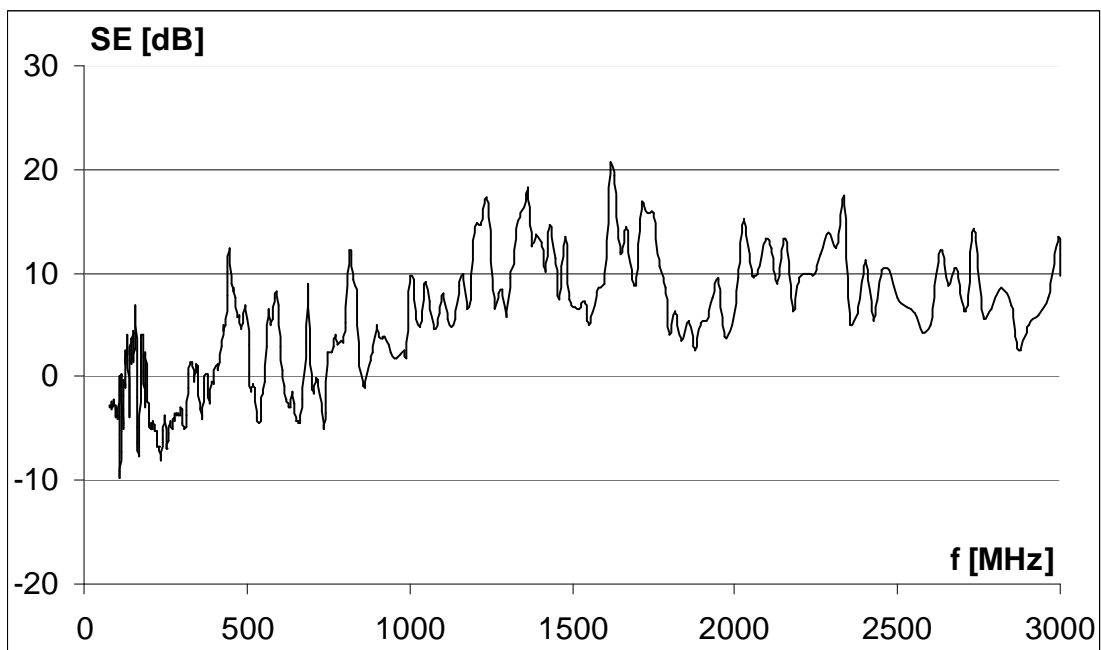
Obr. C.16: Účinnost stínění v bodě 8, vertikální polarizace antén



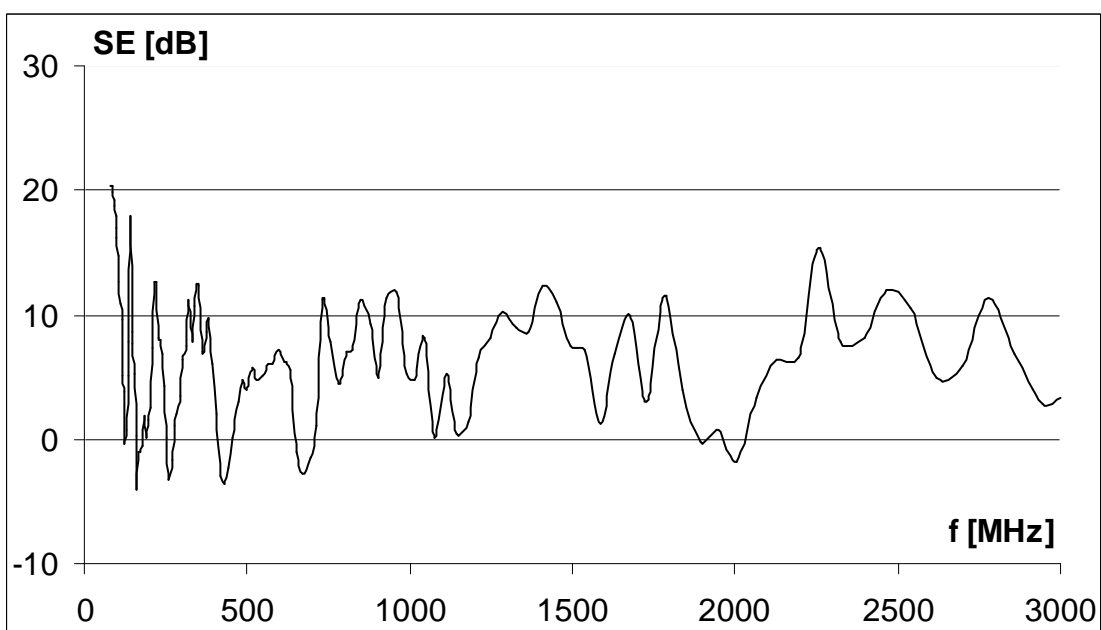
Obr. C.17: Účinnost stínění v bodě 9, horizontální polarizace antén



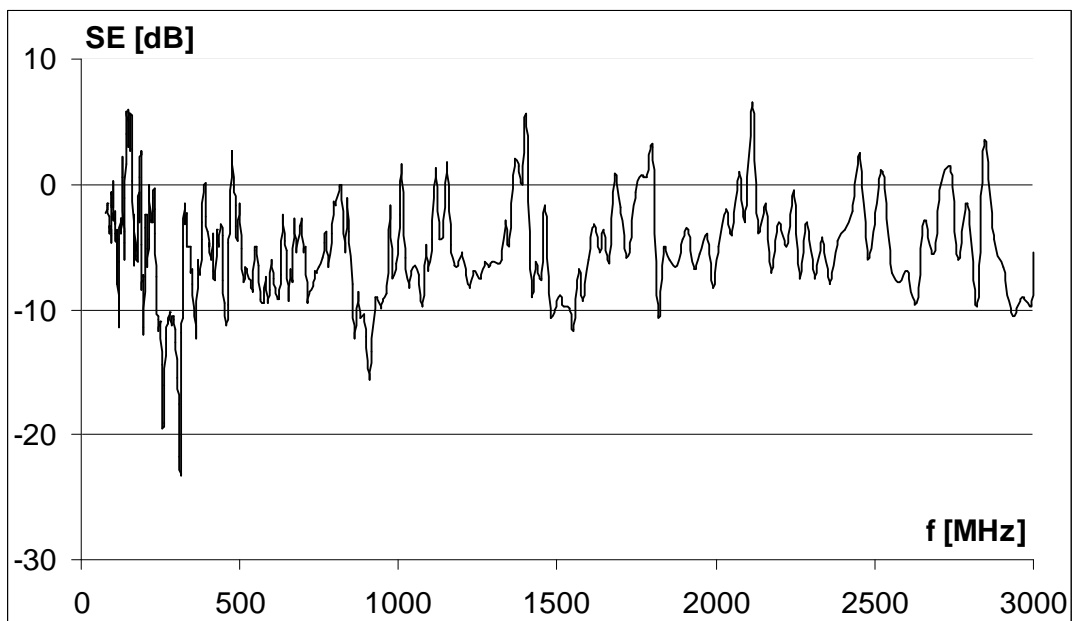
Obr. C.18: Účinnost stínění v bodě 9, vertikální polarizace antén



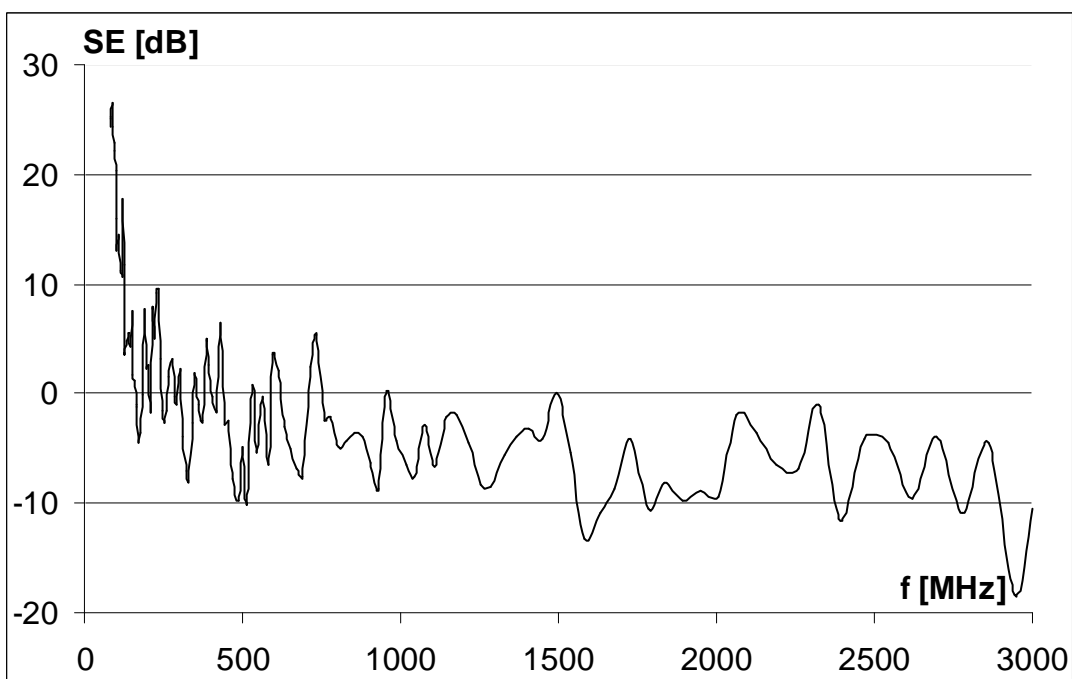
Obr. C.19: Účinnost stínění v bodě 10, horizontální polarizace antén



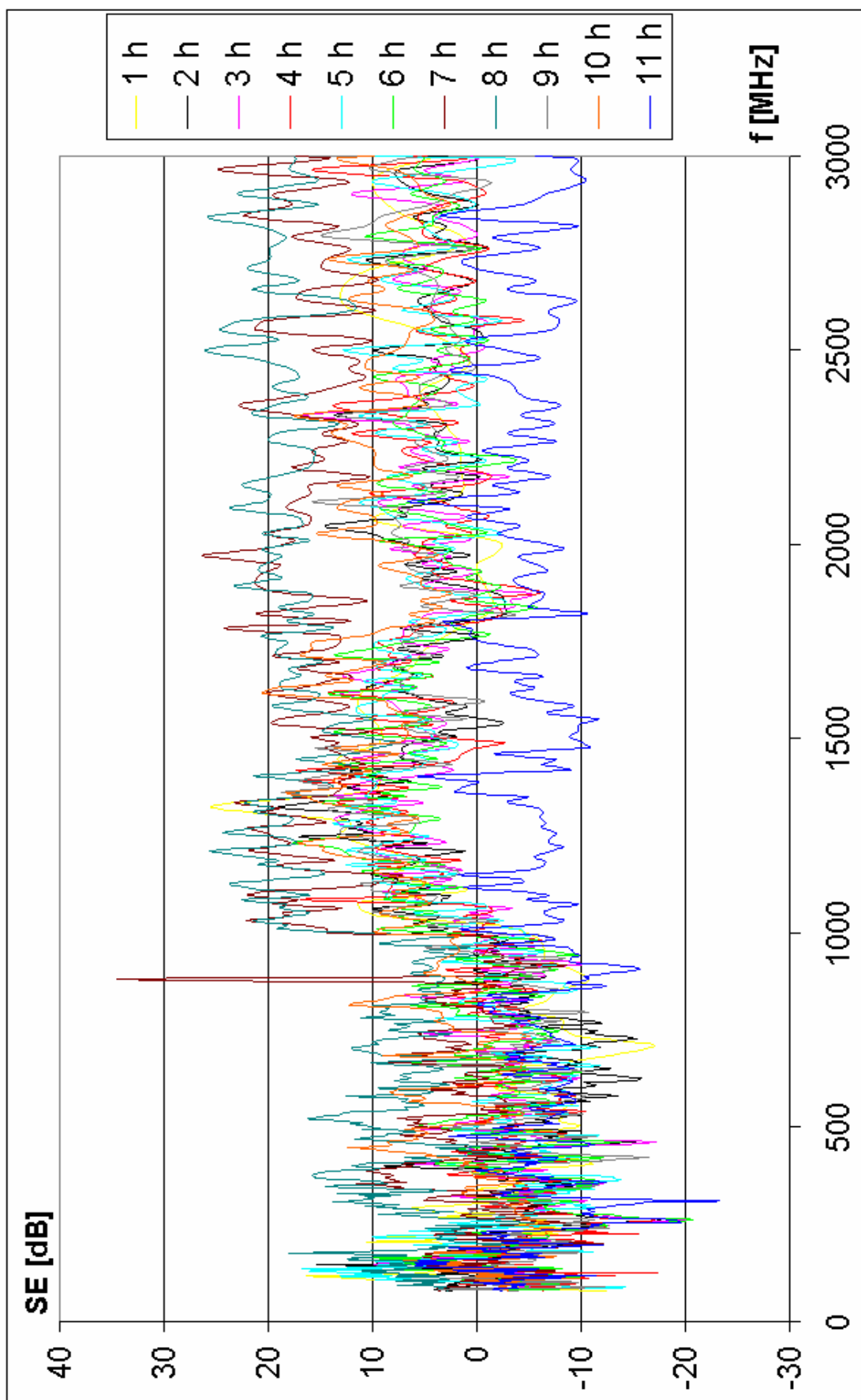
Obr. C.20: Účinnost stínění v bodě 10, vertikální polarizace antén



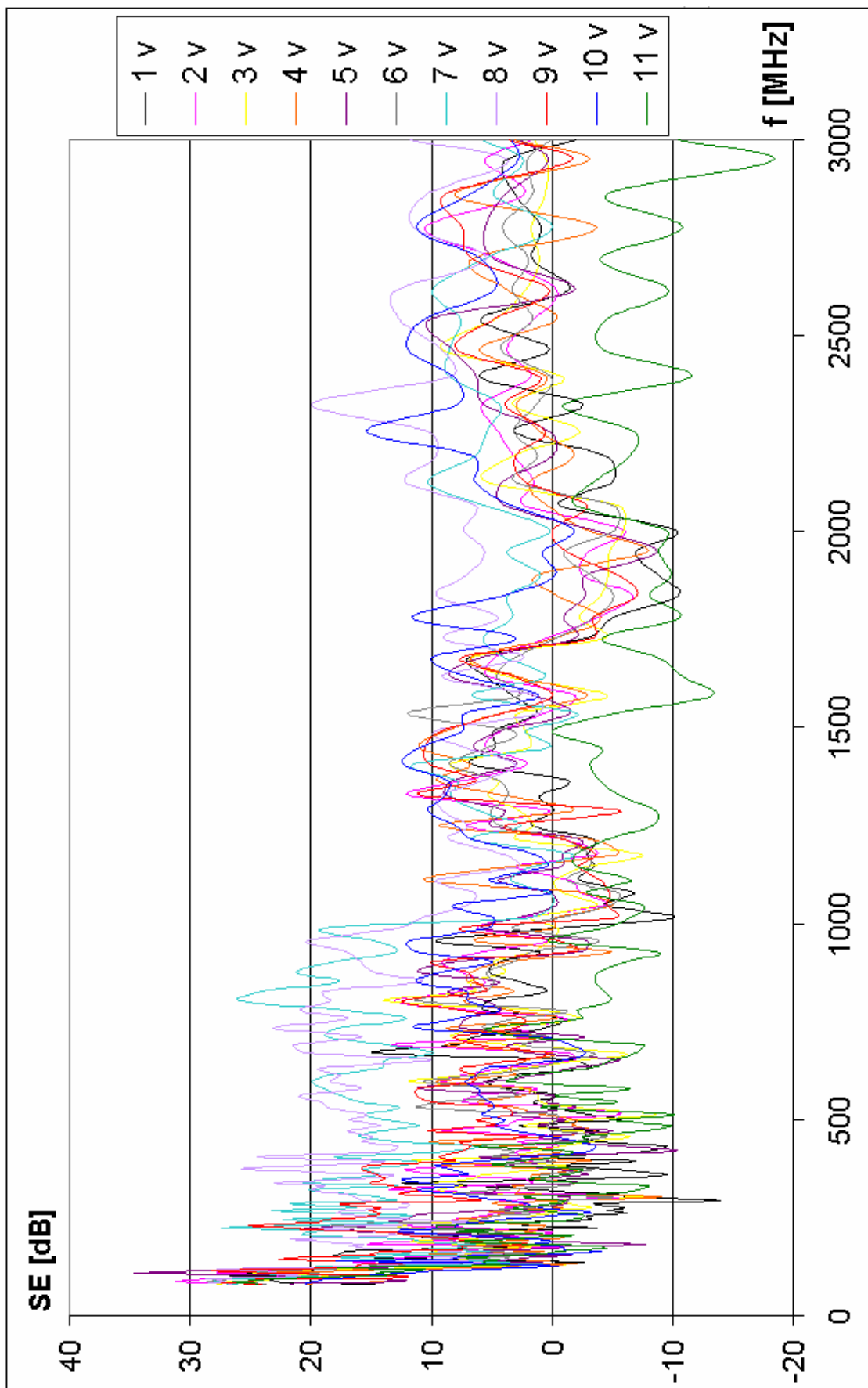
Obr. C.21: Účinnost stínění v bodě 11, horizontální polarizace antén



Obr. C.22: Účinnost stínění v bodě 11, vertikální polarizace antén

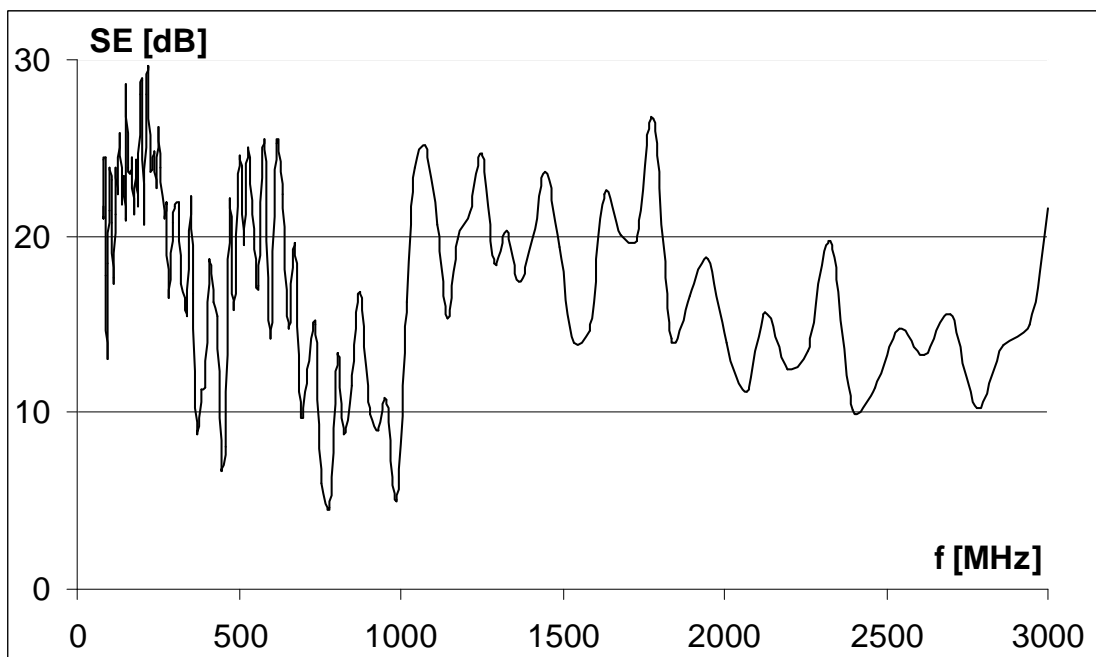


Obr. C.23: Porovnání všech průběhů, horizontální polarizace antén

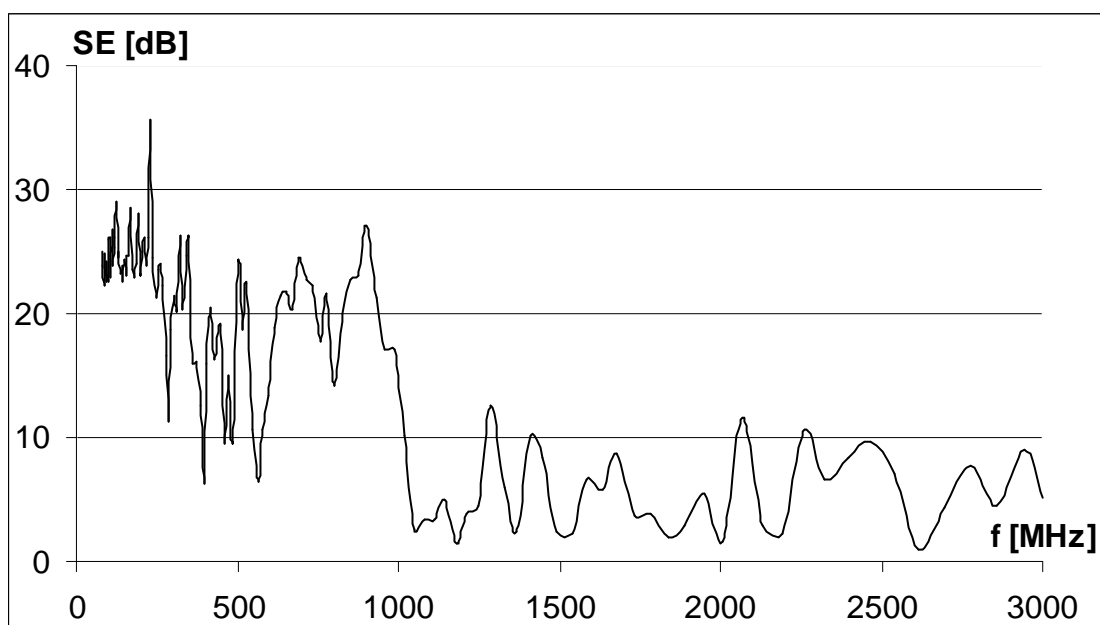


Obr. C.24: Porovnání všech průběhů, vertikální polarizace antén

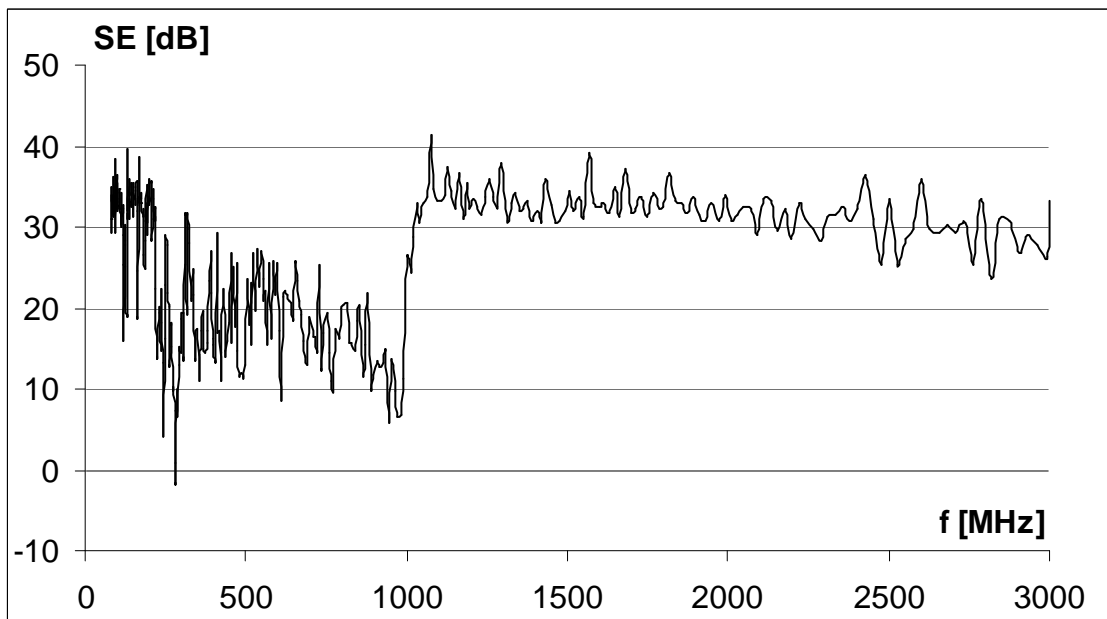
Příloha D – Výsledky měření rozváděče v EMC verzi



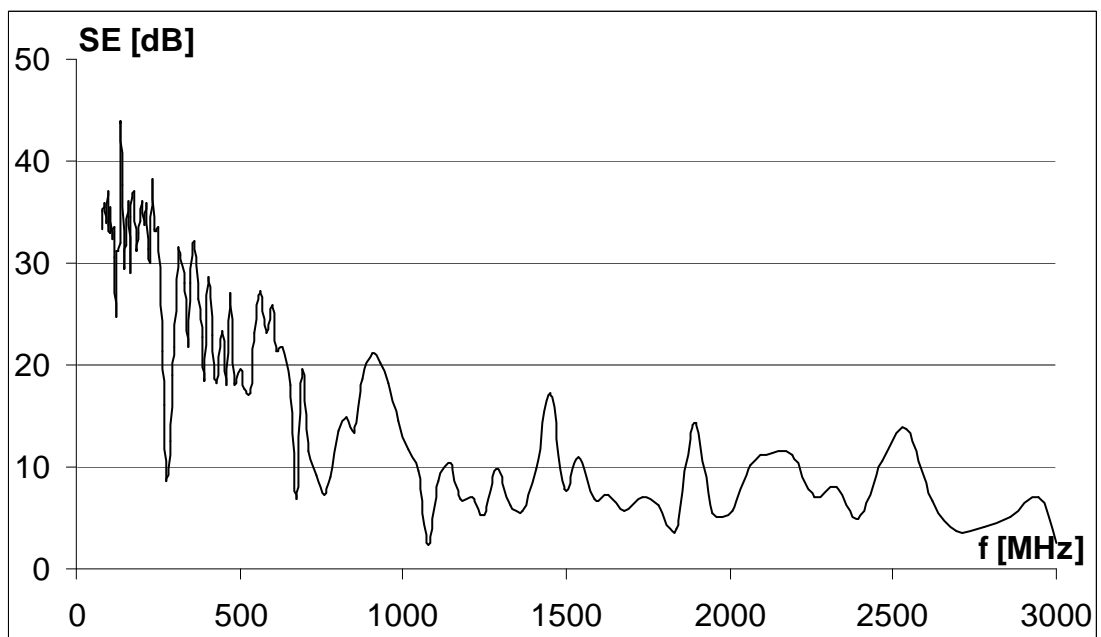
Obr. D.1: Účinnost stínění v bodě 1, horizontální polarizace antén



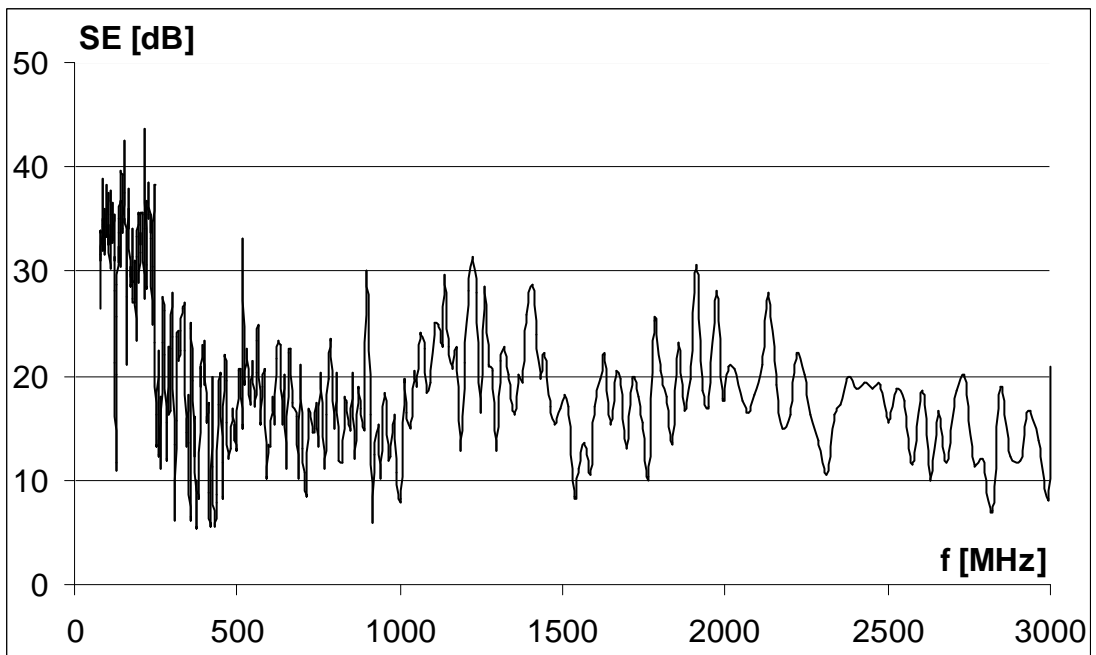
Obr. D.2: Účinnost stínění v bodě 1, vertikální polarizace antén



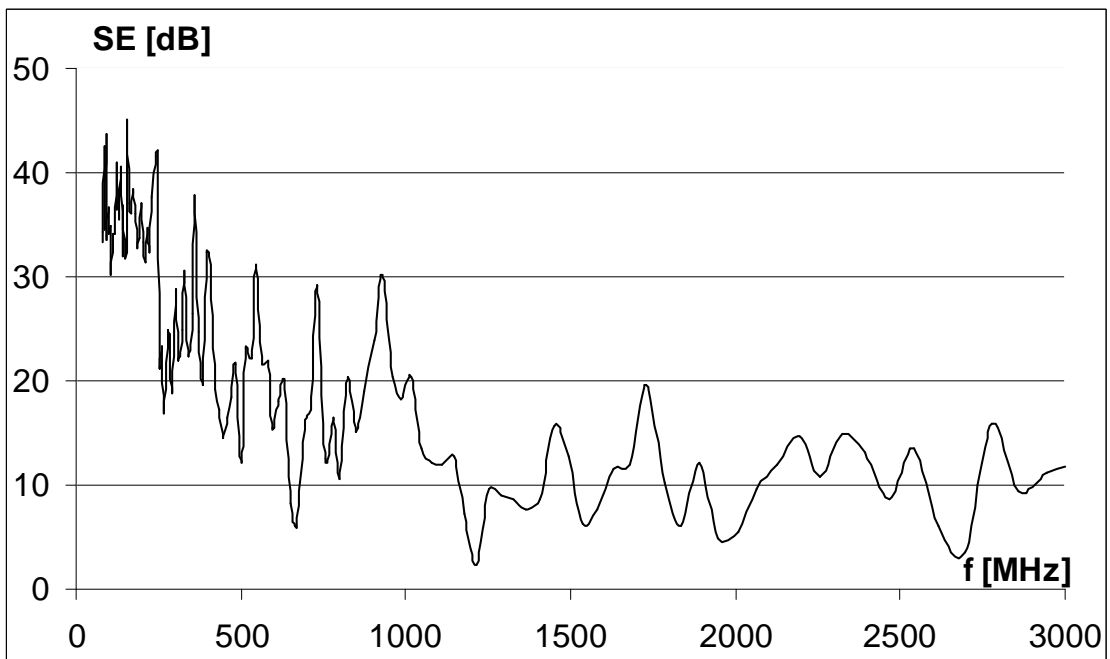
Obr. D.3: Účinnost stínění v bodě 2, horizontální polarizace antén



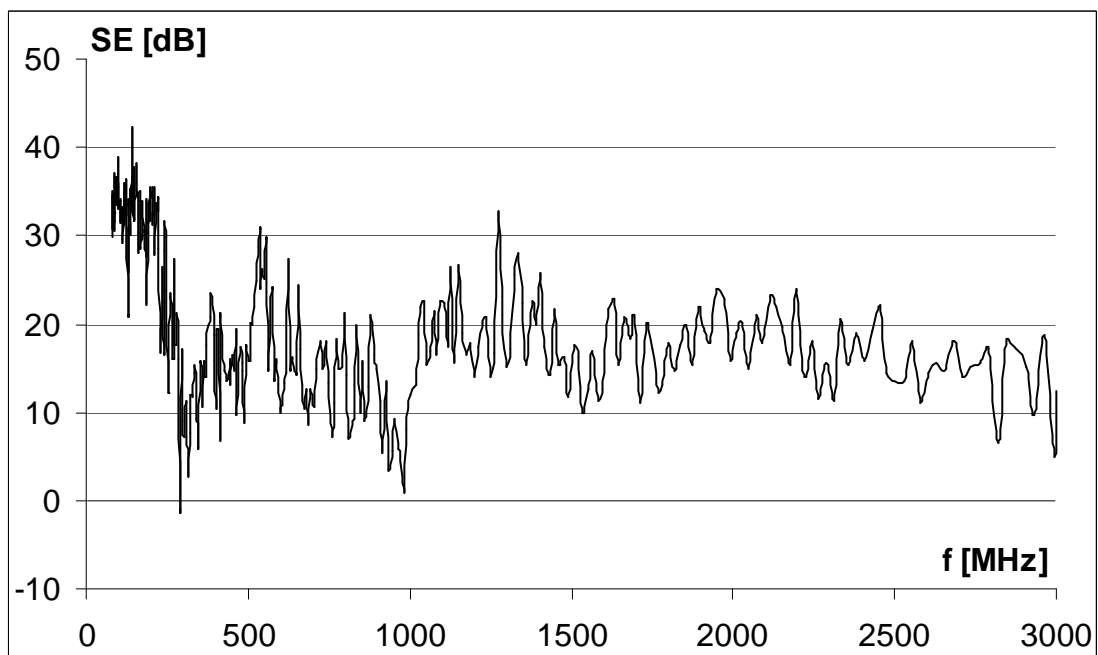
Obr. D.4: Účinnost stínění v bodě 2, vertikální polarizace antén



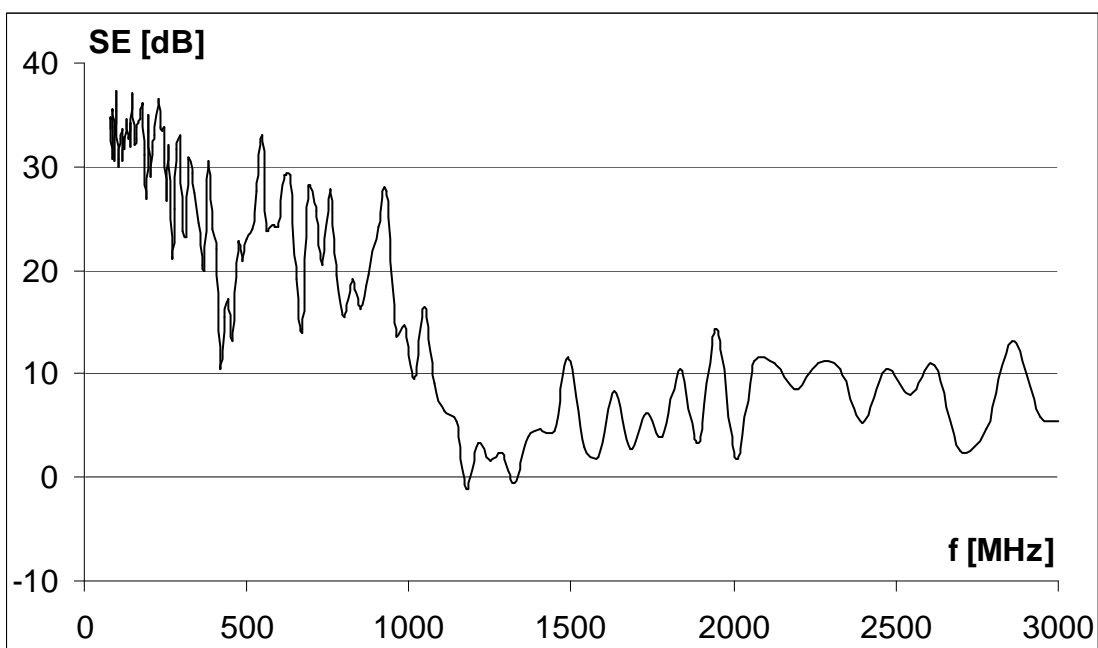
Obr. D.5: Účinnost stínění v bodě 3, horizontální polarizace antén



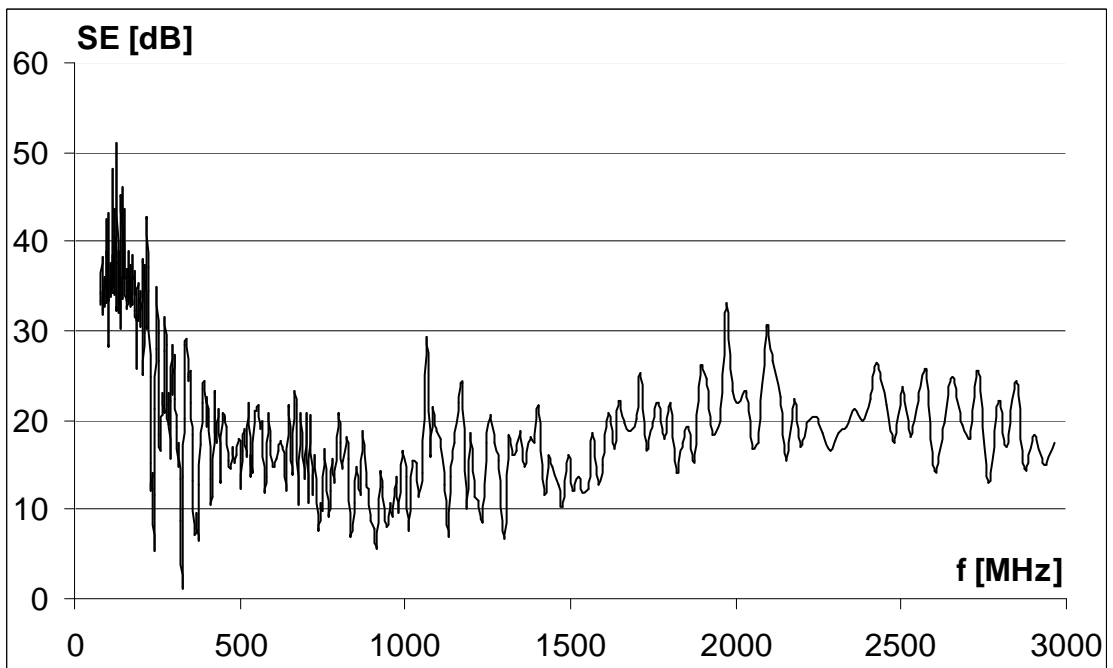
Obr. D.6: Účinnost stínění v bodě 3, vertikální polarizace antén



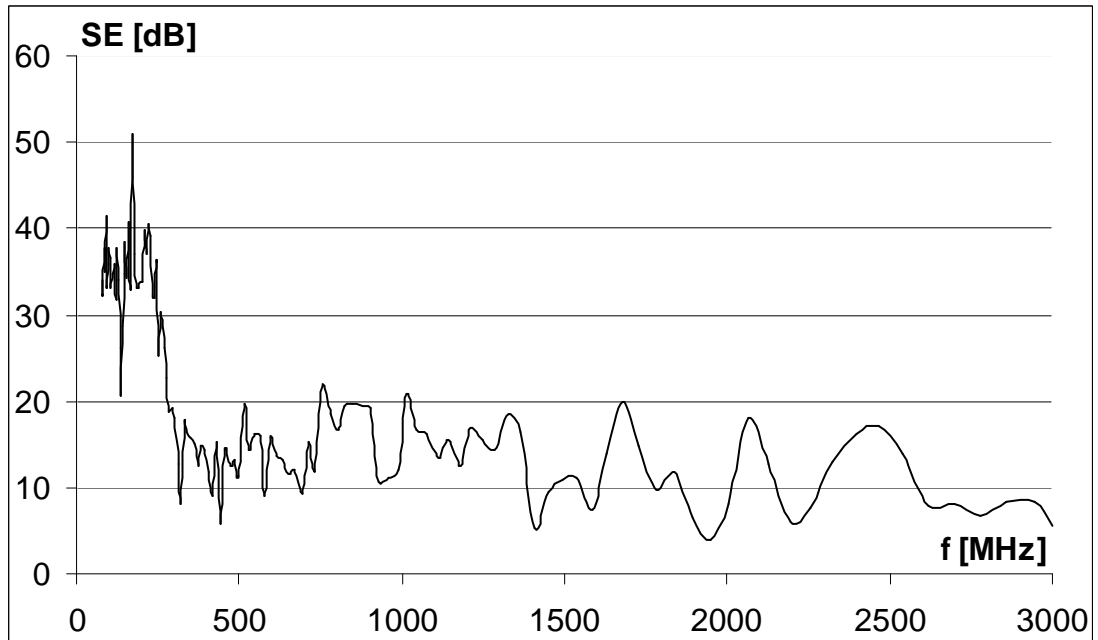
Obr. D.7: Účinnost stínění v bodě 4, horizontální polarizace antén



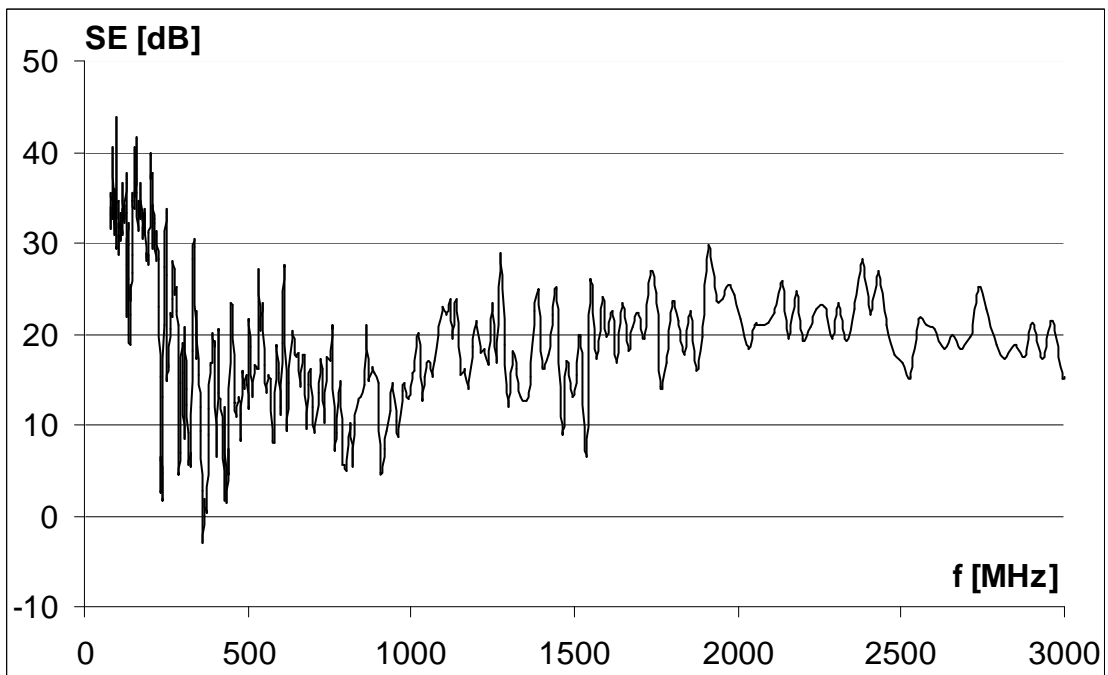
Obr. D.8: Účinnost stínění v bodě 4, vertikální polarizace antén



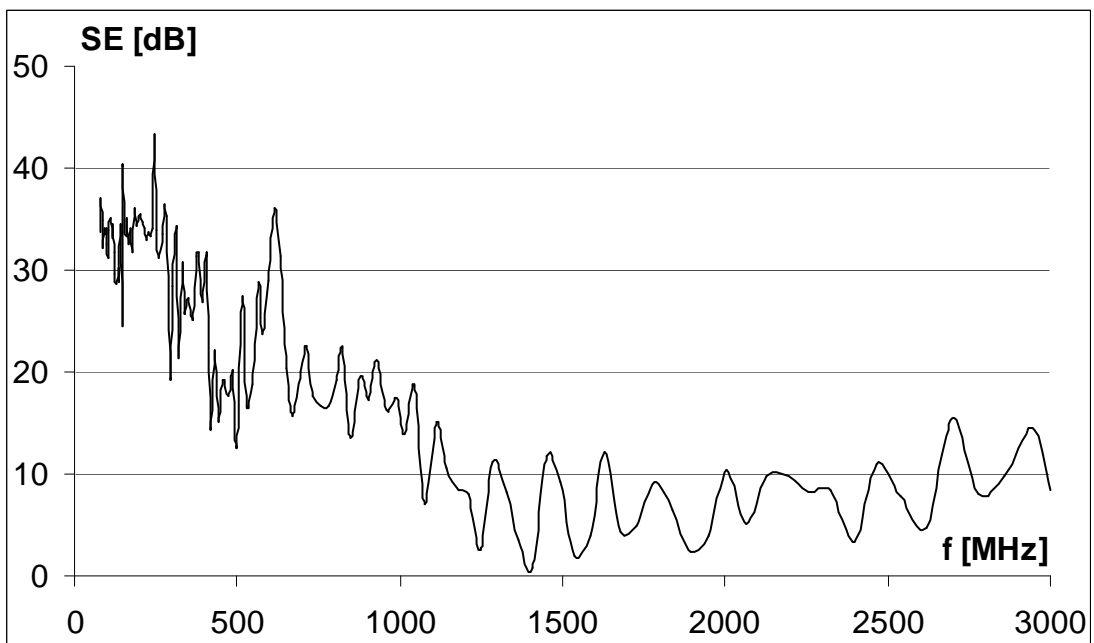
Obr. D.9: Účinnost stínění v bodě 5, horizontální polarizace antén



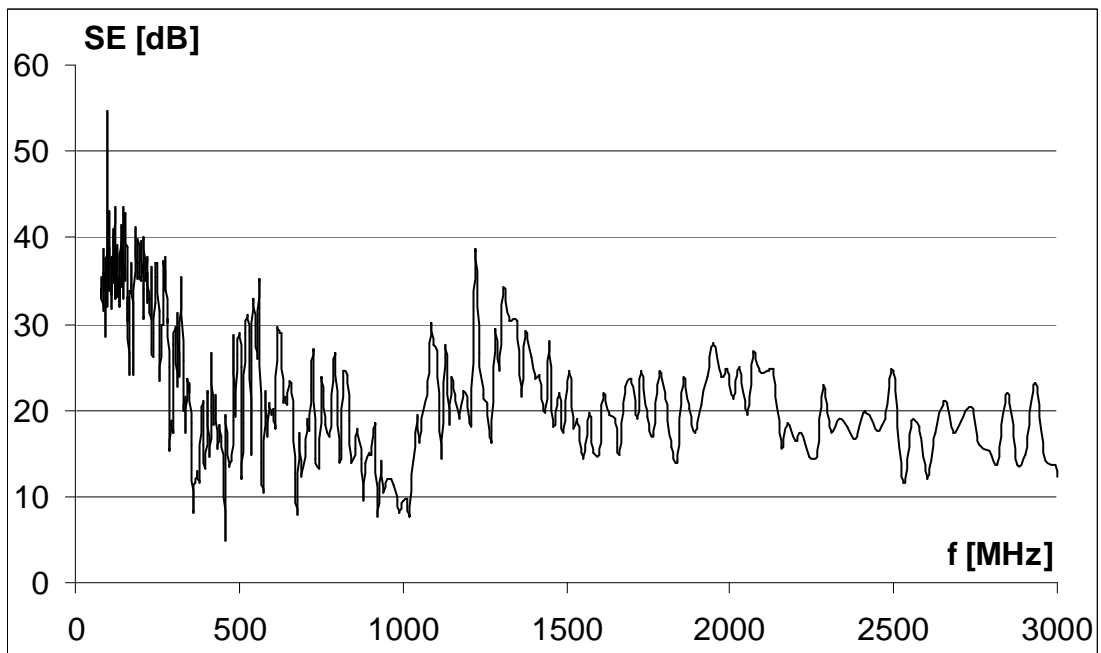
Obr. D.10: Účinnost stínění v bodě 5, vertikální polarizace antén



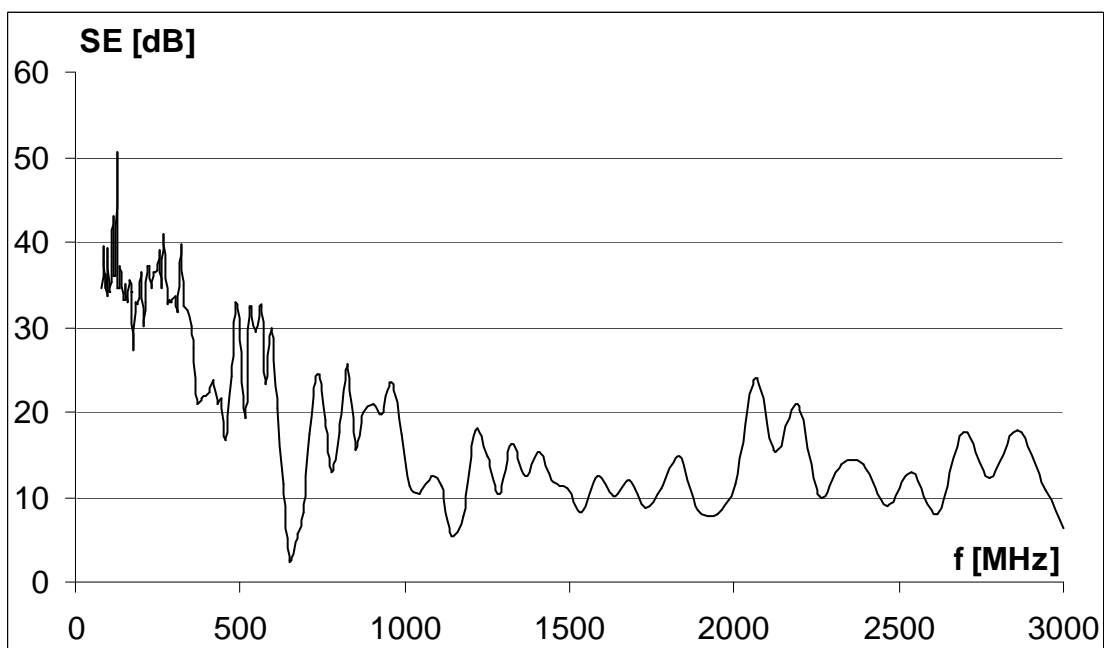
Obr. D.11: Účinnost stínění v bodě 6, horizontální polarizace antén



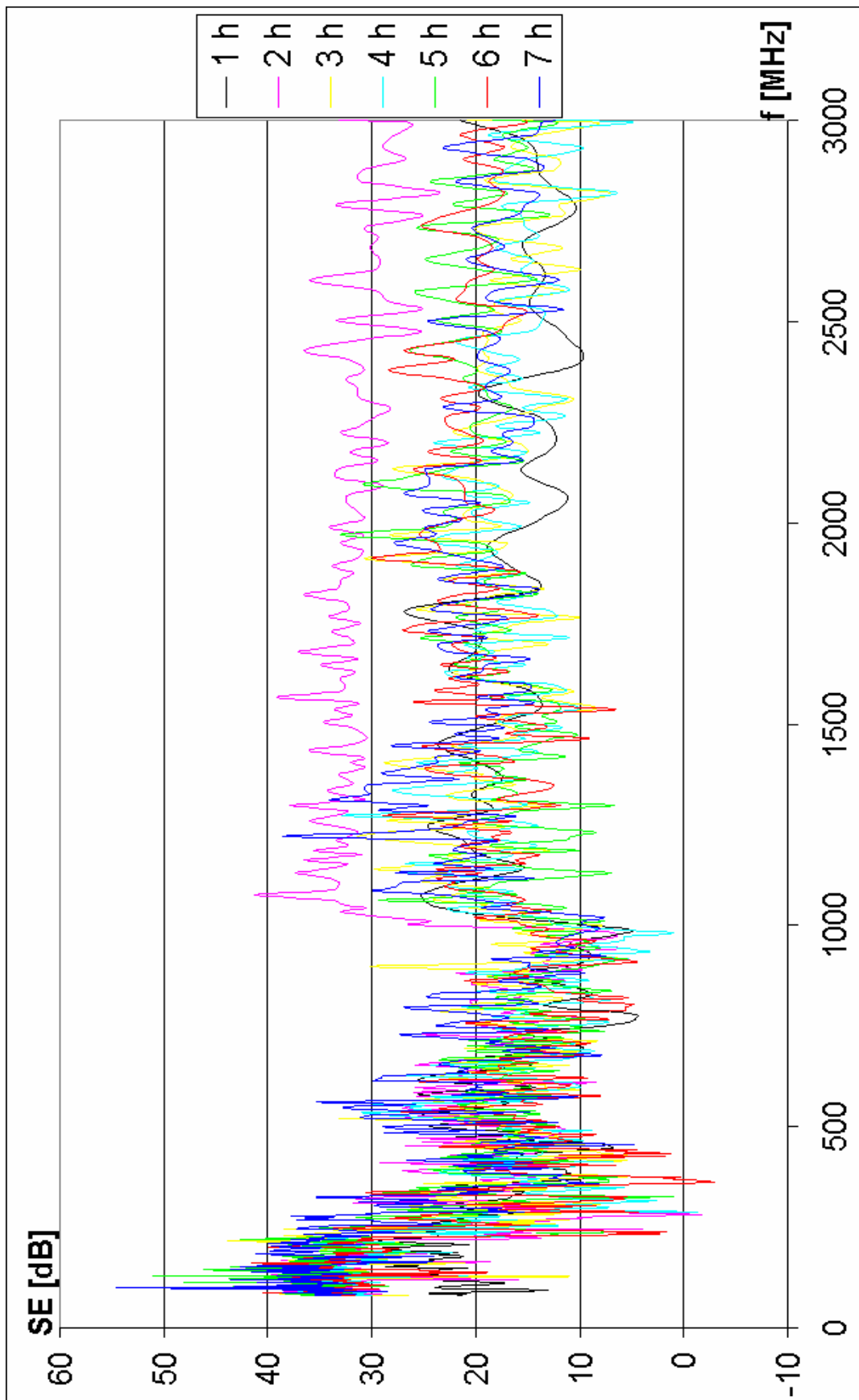
Obr. D.12: Účinnost stínění v bodě 6, vertikální polarizace antén



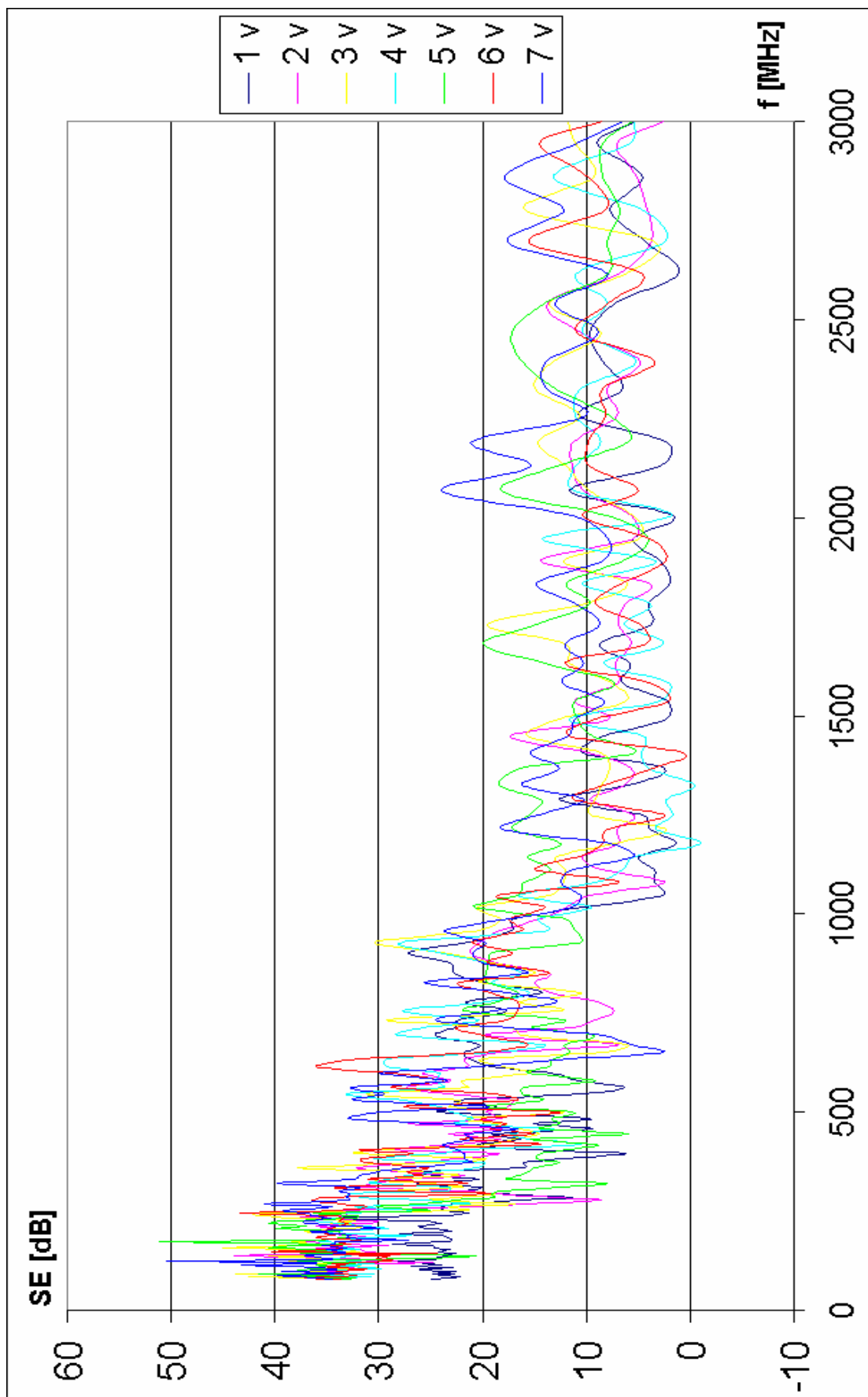
Obr. D.13: Účinnost stínění v bodě 7, horizontální polarizace antén



Obr. D.14: Účinnost stínění v bodě 7, vertikální polarizace antén



Obr. D.15: Porovnání všech průběhů, horizontální polarizace antén



Obr. D.16: Porovnání všech průběhů, vertikální polarizace antén

Publikační a výzkumná činnost:

- Hromádka M.: *Přepětí v sítích vysokého napětí a jeho eliminace*, Rigorózní práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 47 s.
- Hromádka M.: *Přepětí v sítích vn a vvn*, Západočeská univerzita v Plzni, 2005, podklady pro zkoušku, 10 s.
- Hromádka M.: *Měření vysokých a velmi vysokých napětí*, Západočeská univerzita v Plzni, 2005, podklady pro zkoušku, 12 s.
- Hromádka M.: *Shielding of Transmission Lines*, Západočeská univerzita v Plzni, Doktorandská konference KEE, 2005, 6 s.
- Hromádka M.: *Koordinace jištění distribučních transformátorů*, Západočeská univerzita v Plzni, Elektrotechnika a informatika 2006, s.31-34, ISBN: 80-7043-475-9
- Hromádka M.: *Ochrana vedení zemnicím lanem*, Západočeská univerzita v Plzni, Doktorandská konference KEE, 2006, 5 s.
- Hromádka M.: *Partial Discharges*, Západočeská univerzita v Plzni, Elektrotechnika a informatika 2007, s.31-34, ISBN: 978-80-7043-573-1
- Hromádka M.: *Zkoušení omezovačů přepětí*, Západočeská univerzita v Plzni, Doktorandská konference KEE, 2007, 5 s.
- Hromádka M.: *Testování přepětiových ochranných prvků*, Západočeská univerzita v Plzni, Elektrotechnika a informatika 2008, s.31-34, ISBN: 978-80-7043-703-2
- Hromádka M.: *Slovník částečných výbojů*, Západočeská univerzita v Plzni, Doktorandská konference KEE, 2008, 6 s.
- Hromádka M.: *Účinnost stínění*, Západočeská univerzita v Plzni, Elektrotechnika a informatika 2009, s.23-26, ISSN-ISBN: 978-80-7043-811-4
- Hromádka M.: *Reakce přepětiových ochranných prvků na burst signál*, Západočeská univerzita v Plzni, Doktorandská konference KEE, 2009, 10 s.
- Hromádka M.: *Negative influences on shielding effectiveness*, Západočeská univerzita v Plzni, Renewable Energy Sources 2010, s.101-106, ISSN-ISBN: 978-80-7043-893-0
- Hromádka M., Laurenc J., Martínek P., Müllerová E., Tureček O.: *Akustické chování transformátoru při namáhání impulzním napětím*, oponovaná zpráva pro výzkumný záměr MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, 2008, autorský podíl 20 %

- Hromádka M., Laurenc J., Martínek P., Müllerová E., Pihera J.: *Charakteristické záznamy výbojové činnosti pořízené měřením na modelových vzorcích, elektrických strojích a jejich částech*, oponovaná zpráva pro výzkumný záměr MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, 2008, autorský podíl 20 %
- Hromádka M., Laurenc J., Martínek P., Müllerová E.: *Elektromagnetická kompatibilita – Omezování impulsního rušení EMC filtry a proudově kompenzovanými tlumivkami*, oponovaná zpráva pro výzkumný záměr MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, 2009, autorský podíl 25 %
- Hromádka M., Laurenc J., Martínek P., Müllerová E.: *Diagnostika vn zařízení – Analýza stavu izolačního systému distribučních rozvodů izolovaných epoxidovou pryskyřicí*, oponovaná zpráva pro výzkumný záměr MSM 4977751310 – Diagnostika interaktivních dějů v elektrotechnice, 2009, autorský podíl 25 %
- Hromádka M., Laurenc J., Martínek P., Müllerová E.: *Příprava dokumentace, její začlenění do systému managementu a praktická realizace nově akreditovaných zkušebních postupů pro zkoušky odolnosti proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 a odolnosti proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli ČSN EN 61000-4-6 ed. 2*, 2008, autorský podíl 25 %
- Holík M., Kraus V., Georgiev V., Skála J., Kubík Z., Hromádka M., Jakůbek J., Granja C.: *Influence of electromagnetic interference on the analog part of hybrid pixel detectors*. Journal of Instrumentation, IOP Publishing, 2011. ISSN 1748-0221

Funkční vzorky:

- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti rychlým přechodovým signálům (burst)*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti vysokoenergetickým rázovým impulzům (surge)*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti vysokofrekvenčním signálům šířeným po vodičích*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti magnetickým polím různého charakteru (střídavému o průmyslovém kmitočtu, impulznímu, tlumených kmitů)*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti vysokofrekvenčním signálům šířeným prostorem*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti účinkům tlumených napěťových signálů*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti elektrostatickým výbojům*. 2010
- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Testovací souprava ke zjišťování elektromagnetické imunity proti napěťovým poklesům a přerušením*. 2010

Prototyp:

- Laurenc J., Hromádka M., Martínek P., Müllerová E.: *Izolační systém přepojovače vn pro kolejové vozidlo*. 2010

Realizovaná metodika odvozená z výzkumné činnosti, analýza
elektromagnetické kompatibility a posouzení odrušovacích opatření pro:

- 1) Elektronický kmitač, VÚŽ, ETL 05 – 08
- 2) Střídač pomocných pohonů, Škoda Electric, ETL 05 – 17
- 3) Řídicí systém dieselagregátů, ZAT, ETL 06 – 03
- 4) Řídicí systém pro JE, ZAT, ETL 06 – 06
- 5) Mainsconnector Makita, BECH – AKU – POWER, ETL 07 – 07/1
- 6) Indukční ohřívací zařízení, ETL 07 – 08
- 7) Synchronní fázový detektor, VÚŽ, ETL 07 – 09
- 8) Trakční měnič, Škoda Electric, ETL 07 – 17
- 9) Měřicí systém, TEDIA, ETL 07- 15
- 10) Měnič pro motor klimatizace, Škoda Electric, ETL 07 – 14
- 11) Auxiliary Power Supply Unit, Škoda Electric, ETL 07 – 18
- 12) Car computer rack, Škoda Electric, ETL 07 – 19
- 13) Trolejbus, Škoda Electric, ETL 07 – 21
- 14) Skříně trakčních měničů, Škoda Transportation, ETL 08 – 02
- 15) Systém vyhodnocení hladiny, ZAT, ETL 08 – 04
- 16) Statický měnič, Škoda Electric, ETL 08 – 05/2
- 17) Trolejbus, Škoda Electric, ETL 08 – 07
- 18) Trakční měnič, Škoda Electric, ETL 08 – 06/1
- 19) Trakční měnič, Škoda Electric, ETL 08 – 06/2
- 20) Kardiospirox, JUNKALOR, ETL 08 – 17
- 21) Model IE-AR-10T, Conel, ETL 08 – 23/1
- 22) Model IE-AR-10T, Conel, ETL 08 – 23/2
- 23) Spínaný zdroj, BECH – AKU – POWER, ETL 09 – 04
- 24) Rozvaděč buzení Prismic A50, ETL 10-01
- 25) Řídicí a měřicí moduly Mikroklima, ETL 10-02
- 26) Trolejbus 27 Tr Solaris, ETL 10-03
- 27) Lokomotiva 109 E/ 380, ETL 10-04
- 28) Trolejbus 26 Tr Solaris, ETL 10-06
- 29) Trolejbus AVANCITY+SF, ETL 10-07
- 30) Tramvaj 15T, ETL 10-08
- 31) Dvoupodlažní elektrická jednotka EPJ 671-001, ETL 10-10
- 32) Zdroj mazníku ZN 600V, ETL 10-11
- 33) Ultrazvukový průtokoměr FL 50X4, ETL 10-12
- 34) Anténa VA 42, ETL 10-13
- 35) Trolejbus 26 Tr – vozidlo s diesel agregátem, ETL 10-14
- 36) Trolejbus 27 Tr – vozidlo s diesel agregátem, ETL 10-15
- 37) Tramvaj 19T, ETL 10-17
- 38) Zařízení DSC1, ETL 10-18

Doklady o realizaci jsou pod výše uvedenými čísly součástí akreditační knihovny laboratoře ETL.