

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA
V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Potlačení rušivého vlivu vysokofrekvenčních
signálů**

ABSTRAKT:

Úvodní část diplomové práce je zaměřena na základní pojmy a principy elektromagnetické kompatibility. Poté jsem se zaměřil na zdroje rušivých signálů, druhy přenosových cest (např. kapacitní, induktivní a galvanická vazba) a omezení všech těchto rušení. V další kapitole jsem popisoval vliv na zařízení.

Stěžejní část se zabývala elektromagnetickým stíněním. Blíže jsem popsal druhy stínění (elektrického a magnetického pole). Také jsem popsal vliv otvorů na stínění. Tímto tématem jsem se zabýval dále v praktické části.

Praktická část obsahovala testovací měření, které se zabývalo účinností stínění. Dvě antény, kdy jedna vysílá signál skrz konstrukci s plechem, ve kterém jsou vytvořeny kruhové a štěrbinové otvory o různých velikostech a druhá anténa přijímá signál. Z tohoto vzniklá data jsem dále graficky znázornil a porovnával účinnosti stínění různých otvorů.

Klíčová slova:

Elektromagnetická kompatibility, zdroje rušení, bezodrazová komora, účinnost stínění, vliv na zařízení, sonda elektrického pole

ABSTRACT:

The introductory part of the thesis focuses on the basic concepts and principles of electromagnetic compatibility. Then I focused on noise sources, types of transmission paths (eg, capacitive, inductive and galvanic coupling) and the reduction of all these disturbances. In the next chapter, I described the impact on the device.

Most part dealt with electromagnetic shielding. Closer I described species of shield (electric and magnetic fields). I also described the effect of the holes on the shield. This topic I dealt with further in the practical part.

The practical part contains test measurements, which investigated the efficacy of screening. Two antennas when one transmits through the structure with the sheet, which are formed circular and slotted holes of different sizes and the second antenna receives the signal. This created data, which I then graphed and compared the effectiveness of different shielding holes.

Key words :

Electromagnetic kompatibility, interference sources, anechoic chamber, shielding effectiveness, effect on the device ,electric field probe

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury uvedené v seznamu použité literatury.

K vypracování diplomové práce byl použit legální software.

V Plzni dne 5.dubna 2013

Bc. Aleš Barcal

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval panu *Ing. Miroslavovi Hromádkovi Ph.D.*, za konzultace a neocenitelnou pomoc při realizaci této práce.

Děkuji také své rodině, své přítelkyni a přátelům za ohromnou podporu při studiu na vysoké škole.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:	8
ÚVOD	9
1. ZÁKLADNÍ POJMY EMC	10
2. RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE	12
2.1. PRŮMYSLOVÉ ZDROJE RUŠENÍ	13
2.2. ZDROJE PŘEPĚTÍ	15
3. VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ	17
3.1. GALVANICKÁ VAZBA	17
3.2. KAPACITNÍ VAZBA	19
3.3. INDUKTIVNÍ VAZBA	20
3.4. VAZBA VYZAŘOVÁNÍM	21
4. VLIV NA ZAŘÍZENÍ	22
5. ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ	24
5.1. ÚČINNOST STÍNĚNÍ	25
5.2. DRUHY STÍNĚNÍ	26
5.2.1. STÍNĚNÍ ELEKTRICKÉHO POLE	26
5.2.2. STÍNĚNÍ MAGNETICKÉHO POLE	27
5.3. VLIV OTVORŮ NA ÚČINNOST STÍNĚNÍ	30
5.4. VLNOVODY	33
6. MĚŘENÍ ÚČINNOSTI STÍNĚNÍ	34
6.1. POPIS TESTOVACÍHO MĚŘENÍ	34
6.2. TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ	36
6.3. NAMĚŘENÉ HODNOTY	40
6.4. PŘÍKLAD VÝPOČTU	42
6.5. GRAFICKÉ VÝSTUPY	43
7. ZÁVĚR	47
8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	49
PŘÍLOHY	50

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ:

EMC	.....	Elektromagnetická kompatibilita
LEMP	.....	Bleskový elektromagnetický impulz
NF	.....	Nízko frekvenční
VF	.....	Vysokofrekvenční
Π	.....	Ludolfovo číslo
$I[A]$	.....	Elektrický proud
$U[V]$	.....	Elektrické napětí
$Q [C]$	.....	Elektrický náboj
$R[\Omega]$	.....	Elektrický odpor
$P[W]$	.....	Výkon
$U_z[V]$	.....	Zemní napětí
$U_r[V]$	.....	Rušivé napětí
$C_c[F]$	.....	Vazební kapacita mezi vodiči
$C_g[F]$	.....	Vazební kapacita vodiče proti zemi
$L[H]$	.....	Indukčnost
$t[s]$	.....	Čas
$\mu_0[H.m^{-1}]$	.....	Relativní permeabilita
$\Phi[Wb]$	.....	Magnetický tok
$r[m]$	.....	Poloměr
$K_s[-]$	.....	Koeficient stínění
SE [dB]	.....	Účinnost stínění
$E_i[V.m^{-1}]$	.....	Intenzita elektrického pole uvnitř stíněného objektu
$E_0[V.m^{-1}]$	.....	Intenzita elektrického pole dopadající na stínící přepážku
$H_i[A.m^{-1}]$	.....	Intenzita magnetického pole uvnitř stíněného objektu
$H_0[A.m^{-1}]$	.....	Intenzita magnetického pole dopadající na stínící přepážku
$C[m/s]$	.....	Rychlost světla
$l[m]$	.....	Délka štěrbin
$f_c [Hz]$	.....	Kritická frekvence

ÚVOD

Každé zařízení nebo systém musí splňovat podmínky elektromagnetické kompatibility. Tento pojem je užíván po celém světě. Z toho vyplývá, že každé zařízení musí být odolné vůči ostatním zařízením a samo svým chodem nesmí zasahovat ani ovlivňovat jiné zařízení. Proto takový systém by mohl zároveň vysílat i přijímat rušivé vlivy.

V dnešní době, kdy máme daleko více elektronických spotřebičů kolem nás, stoupá úroveň rušení a kvalita stínění těchto zařízení. Kmitočtová pásma se pohybují v pásmech od 0Hz až do stovek GHz.

V běžné praxi vedle sebe pracují přístroje a elektrické zařízení, které pracují na různých frekvencích, protože obsahují generátory netlumených a modulovaných kmitů. Dále mohou obsahovat generátory obrazových a frekvenčních impulzů nebo výkonové zesilovače, které pracují na úrovních mW ale také na MW. Pokud tyto zařízení umístíme vedle sebe, budou se vzájemně ovlivňovat.

Citlivá elektronická zařízení dnes daleko více pracují v prostředí s velkým rušením. Není výjimkou, že například kabely vedoucí do počítače měřicí ústředny, jsou přiváděny i několik set metrů. Na kabely po celé své délce působí signály nízkých úrovní ale zároveň i rušivé pole, které do kabelů indukují někdy i stovky volt. Tyto parazitní signály jsou pak vyhodnoceny jako informace, které mohou ovlivnit nesprávný zásah s rizikem hospodářských škod nebo možné havárie. Tyto zásahy jsou ve většině případů vyhodnocovány automaticky (čidla a počítače) a nemuseli bychom o nich ani vědět. Proto se na dodržování elektromagnetické kompatibility kladou tak velké nároky.

1. ZÁKLADNÍ POJMY EMC

Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) EMC je schopnost zařízení, systému či přístroje správně fungovat i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a zároveň však svou vlastní elektromagnetickou činností nesmí nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. nesmí produkovat signály, jež by byly nepřípustně rušivé pro jiná zařízení (technická či biologická).

Elektromagnetická kompatibilita vznikla jako samostatná vědeckotechnická disciplína v šedesátých letech 20. století v USA a poměrně dlouhou dobu 10 až 15 let byla předmětem zájmu jen úzkého okruhu odborníků v elektronice, pracujících ve vojenském a kosmickém průmyslu. V sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století však nastává postupný přesun zájmu o problematiku elektromagnetické kompatibility i do všech oblastí civilního života. Hlavními důvody byl zejména prudký rozvoj mikroprocesorové techniky a osobních počítačů a dále rozvoj celosvětových elektronických komunikací (zejména celoplošných mobilních a satelitních komunikací a komunikačních služeb). Dnes již EMC ztratila svoji původní exkluzivnost a je neoddělitelnou součástí všech oblastí života. Důvody k tomu jsou technické, zdravotní, bezpečnostní ale i ekonomické. [1]

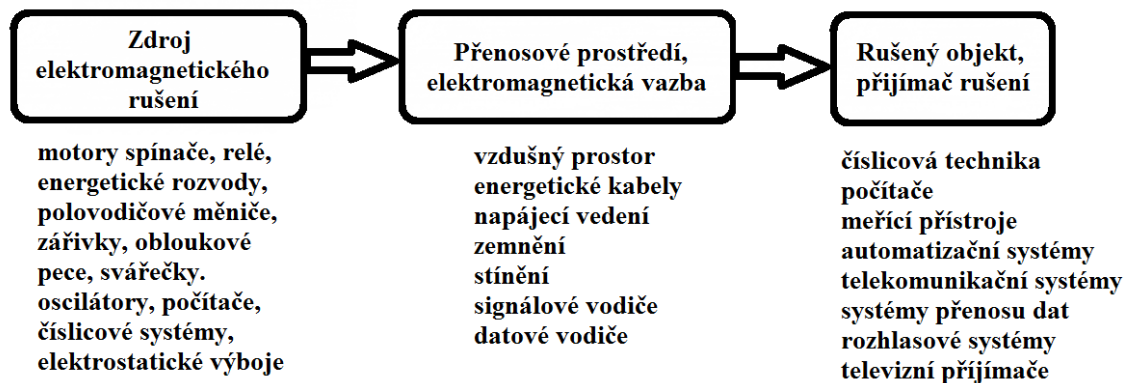
Dříve se používal pojem elektromagnetická slučitelnost, avšak dnes se více užívá pojem elektromagnetická kompatibilita (z anglického Electromagnetic Compatibility, z něhož pochází i mezinárodně užívaná zkratka EMC, která vyjadřuje schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení nebo systémů nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí bez závažného ovlivňování jejich normálních funkcí. [1]

Každé zařízení a systém musí být dostatečně odolný vůči působení jiných zařízení a nesmí přitom nepříznivě ovlivňovat jejich normální funkci. Přitom každý systém nebo zařízení, či jejich určitá část, může být současně vysílačem i přijímačem rušení. Elektromagnetická kompatibilita je tedy vyšší pojem než prostá spolehlivost daného zařízení, s níž byla v počátcích mylně zaměňována. H. M. Schlicke, jeden ze zakladatelů elektromagnetické kompatibility jako samostatného oboru, v roce 1968 řekl: „Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností“.

[1]

Rozvoj elektroniky v posledních desetiletích dal H. M. Schlickemu jednoznačně za pravdu. V důsledku neustále stoupajícího množství moderních elektrických zařízení a spotřebičů neúnosně stoupá úroveň rušení v kmitočtových pásmech prakticky od 0 Hz až do stovek GHz. Elektronická zařízení nebo přístroje mohou obsahovat generátory signálů pracující na několika různých kmitočtech, generátory obrazových a vysokofrekvenčních impulzů, řetězce výkonových vysokofrekvenčních, nízkofrekvenčních a impulzních zesilovačů. Všechny tyto díly pracují na poměrně vysokých výkonových úrovních měřitelných jak W, tak i MW. Ve stejných či sousedících zařízeních mohou být citlivé přijímače, citlivé zesilovače či mikroprocesorové obvody. Tyto části zpracovávají často extrémně nízké úrovně výkonu řádově až 10^{-14} W. Různé díly elektronického zařízení tak pracují na nejrůznějších výkonových úrovních s různými výkony signálů, které zpracovávají; maximální poměr těchto výkonů může dosáhnout až 200 dB, tj. 10^{20} . Pravděpodobnost vzájemného nežádoucího ovlivňování (rušení) je za těchto podmínek značně velká. [1]

Při zkoumání EMC daného zařízení či systému se vychází z tzv. základního řetězce EMC uvedeného na obr. 1.1.



Obr.1.1 Základní řetězec EMC

V obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky, které poukazují na systémový charakter EMC.

První oblast zdrojů elektromagnetického rušení zahrnuje zkoumání otázek vzniku rušení, jeho charakteru a intenzity. Patří sem jednak tzv. přírodní tj. přirozené zdroje rušivých signálů (Slunce, elektromagnetické procesy v atmosféře apod.), jednak tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností k nimž patří nejrůznější technická zařízení např.

zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod.

Druhá část řetězce EMC se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami, tj. způsoby a cestami, kterými se energie ze zdroje dostává do objektů přijímačů rušení.

Konečnou oblastí je problematika objektů či přijímačů rušení zabývající se klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností. [1]

Ve skutečném řetězci EMC se rovněž nikdy nejedná o působení jediného zdroje rušení a jediného přijímače, ale řeší se vždy vzájemné vztahy více systémů navzájem, které se všestranně ovlivňují. Přesto obvykle postupujeme tak, že jeden systém považujeme nejprve za systém ovlivňující (zdroj rušení) a všechny ostatní za systémy ovlivňované (přijímače rušení). Pak tento vybraný systém naopak považujeme za ovlivňovaný a hodnotíme důsledky jeho možných ovlivnění všemi ostatními systémy, které tvoří tzv. obklopující elektromagnetické prostředí. Souhrn jejich rušivého působení se ve zkoumaném systému může projevat různými způsoby, počínaje zhoršením kvality systémových parametrů přes částečné nebo úplné omezení systémové funkce až k havarijním technologickým či bezpečnostním stavům. [4]

2. RUŠIVÉ SIGNÁLY A JEJICH ZDROJE

Už samotné generátory v elektrárnách, které jsou zdrojem rušení v napájecí síti. Vytvářejí vyšší harmonické napájecí sinusovky 50 Hz. Například při náhlém odlehčení zátěže dochází k rušivým napětím, která se objeví v napájecí síti, dále také podpětí při připojení velkého odběru, výpadky napájecího napětí a přepětí způsobená přechodovými jevy, které jsou zapříčiněny obvykle spínacími pochody. V sítích vn a vvn při spínání induktivních 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 $u = -L \times (di/dt)$. Pokud přepětí bude mít tak vysokou strmost nárůstu, překoná elektrickou pevnost vzduchu mezi oddalujícími se kontakty. Dojde tedy k zapálení oblouku, napětí klesne mezi kontakty téměř k

nule a tím zanikne výboj. Potom nastane další přechodový jev a celý děj se může opakovat, dokud kontakty nejsou dostatečně daleko od sebe. Vzniklé přepět'ové impulsy mají velkou strmou nárůstu napětí, vysoko frekvenční obsah, opakují se asi tak 10x během 1 ms a dosahují až několika kV. Podobný jev může nastat, když na sebe špatně dosedají kontakty, případně v době kdy se k sobě přibližují kontakty nebo v případě prudkého pohybu od sebe se kontakty několikrát odrazí.

Další rušivé vysokofrekvenční signály v síti vznikají při jiskření kartáčů na komutátorech točivých strojů. Častým zdrojem velmi nebezpečného přepětí je atmosférický impuls (LEMP – Lightning Electromagnetic Pulse), kde 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. Blesk, který zasáhne vedení vysokého napětí, způsobí přepět'ovou 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 přepět'ových 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 přepět'ovém jevu nebo na nečistotách, otřepch a kapičkách vody na vedení. Koróna způsobuje elektromagnetické rušení o frekvencích několika desítek MHz a akustické rušení.[2]

2.1. PRŮMYSLOVÉ ZDROJE RUŠENÍ

Nejdůležitější harmonické složky z periodických spojitých signálů jsou složky kmitočtu 50Hz (60Hz), které jsou často produkovány generátory při výrobě elektrické energie. Tyto harmonické složky produkují na nelineárních impedancích sítě další harmonické složky. Největšími průmyslovými zdroji tohoto rušení jsou řízené polovodičové měniče velkých výkonů, které vyvolávají v napájecí síti harmonické kmitočty až do 30 MHz. Deformace harmonického napájecího napětí 50 či 60 Hz v energetických sítích má velmi mnoho podob a řadu různých projevů.

V napájecích energetických sítích se vyskytuje řada přechodových jevů (a tím i rušivých napětí) spojených se spínacími nebo rozpínacími pochody mechanických či

elektrických spínačů. V sítích vysokého a velmi vysokého napětí dochází k vysokofrekvenčním oscilacím při zapínání vlivem kapacity a indukčnosti spínaných vedení. Tlumené oscilace s kmitočtem do několika MHz dosahují velikosti několika tisíc V a trvají obvykle pěti- až desetinásobek doby své periody. Pro svůj vysoký kmitočet se tyto oscilace kapacitními vazbami snadno šíří až do sítí nízkého napětí.

Přepět'ové impulzy lze odstranit, zajistíme-li pomalejší nárůst napětí mezi kontakty spínače, aby jeho velikost nepřesáhla ani při ne zcela rozevřených kontaktech průraznou pevnost vzduchu. Toho lze dosáhnout např. překlenutím kontaktů sériovým RC obvodem. Tato kombinace má však pro střídavý proud konečnou impedanci, takže odpojení zařízení od sítě není dokonalé. Toto řešení však není příliš vhodné z bezpečnostních důvodů. Uvedené rušení se dá rovněž omezit použitím standardních přepět'ových ochran diod a varistorů, případně užitím bezkontaktních elektronických spínačů, např. tyristorů či triaků avšak za cenu vzniku jiných rušivých jevů.

Další typ rušení, které souvisí se spínacími pochody, vzniká v usměrňovačích diodového typu a zejména v systémech tyristorového řízení výkonových průmyslových zařízení, např. tramvají, trolejbusů, lokomotiv, ale i při tyristorové regulaci otáček velkých motorů, např. u výtahů a podobných zařízení. Při činnosti těchto obvodů a zařízení jsou opakovaně spínány velké proudy, takže zde vznikají rušivá napětí v podobě periodicky se opakujících impulzů, které značně deformují průběh napájecího napětí a jejichž kmitočtové spektrum sahá do desítek MHz. Jsou-li tyto usměrňovače a tyristorové spínače, regulátory či měniče připojeny k energetické napájecí síti přímo bez patřičné filtrace, příp. bez přepět'ových ochran, deformují svými výstupními průběhy síťové napětí do té míry, že mohou způsobit celoplošné výpadky energetické sítě. [1]

Venkovní energetická vedení vysokého (vn) a velmi vysokého (vvn) napětí vykazují také velmi silné rušící účinky. Tyto zdroje rušení se těžce vyhledávají a ještě obtížněji odstraňují. Jejich rušivé spektrum se pohybuje od několika kHz až k 1000 MHz, a proto negativně ovlivňuje provoz prakticky jakékoli radiokomunikační služby. Zdrojem rušivých signálů vedení vn a vvn jsou výboje dvojího druhu. Pokud nastanou nerovnosti na vodičích, vznikají koronové výboje, které nalezneme jen u vedení velmi vysokého napětí (110 kV a více) na nerovnostech vodičů, na armaturách a zařízeních rozveden. Korona se podobá doutnavému výboji a její spektrální složky nepřesahují 10 MHz. Pro korónu jsou typické krátkodobě svítící rozvětvené kanálky. Zápalné napětí koróny závisí na špičatosti ostří.

Velikost výbojů se zvyšuje za vlhka (projevuje se jako intenzivní slyšitelný praskot pod vedením vvn). Intenzita rušivého pole korónového výboje však není příliš velká, takže jeho nežádoucí vlivy lze omezit především tím, že venkovní linky vvn vedou mimo obytná území. Koróna je neodstranitelnou vlastností vedení vvn. Koróna ruší rádiový provoz hlavně na dlouhých a středních vlnách. Krátké vlny již ovlivňuje málo a velmi krátké vlny vůbec ne. Kapacitní výboje jsou typické pro vedení vysokého napětí 22 kV a 35 kV, kde vznikají na nedokonalém spojení kovových předmětů, které se nacházejí v těsné blízkosti částí vedení pod napětím. Takovými místy jsou především kovové kloubové spoje závěsných izolátorů, u nichž se v důsledku koroze vytvoří izolační vrstvička a dielektricky se oddělí kovové části kloubového spoje. Po překročení dielektrické pevnosti této vrstvičky či při jejím mechanickém narušení (např. při kývání izolátoru ve větru) dojde k jiskrovému výboji. Vznikající kmitočtové spektrum sahá až k 1000 MHz a rušivý signál se dobře vyzářuje částmi armatur i vlastním vn vedením. Za suchého počasí bývá toto rušení větší, za vlhka někdy i zcela vymizí. Kapacitní výboje signalizují závady na vedení, dokonalé odrušení vyžaduje rozsáhlé a nákladné úpravy. Rušení lze odstranit pouze užitím jiné konstrukce izolátorů bez závěsného kloubu.

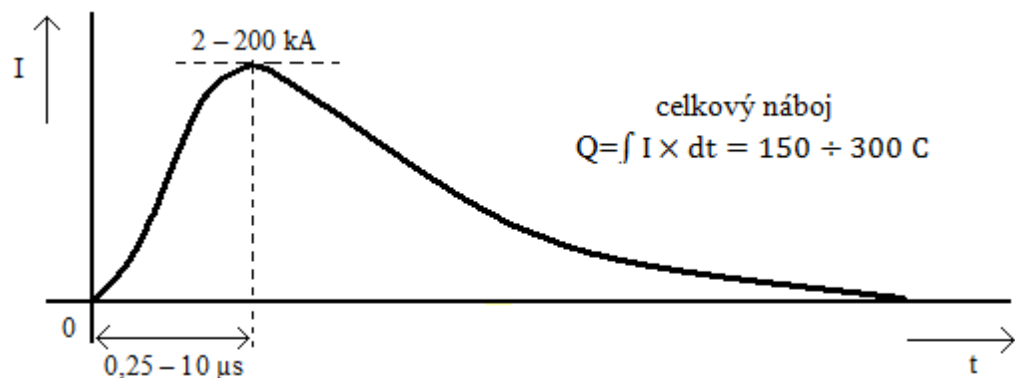
Rušivě působí i jiné druhy elektrických výbojů, např. u zářivek a osvětlovacích či jiných výbojek. Dříve se využívaly u kompaktních zářivek startéry, které se přemostovaly odrušovacími kondenzátory, které zkratovali vysokofrekvenční složky vznikající při rozpojování kontaktu startéru.[1] Tyto starší typy kompaktních zářivek s indukčními předřadníky také blikaly (v závislosti na kmitočtu napájecí sítě), což byla velká nevýhoda. Moderní kompaktní zářivky jsou vybavené elektronickými předřadníky, které pracují s frekvencemi o několik řádů vyššími a blikání zářivek tak není postřehnutelné. Elektronické předřadníky v moderních kompaktních zářivkách rovněž zcela minimalizují tzv. bručení. [6]

2.2.ZDROJE PŘEPĚTÍ

Tyto zdroje se rozdělují dle jejich původu na dvě skupiny: přírodní zdroje a zdroje uměle vytvořené lidskou činností. S neustále rostoucí hustotou součástek v elektronických obvodech roste i poruchovost a velmi klesá odolnost zařízení proti přepětí. Kdežto zařízení s diskretními součástkami snesla přepětí až několik kV, integrované obvody (s počtem součástek až několik desítek miliónů na jednom čipu) jsou poškozeny napětím od několika volt při mizivě malé energii přepětí. Dalším nepříznivým faktorem je stále vyšší rychlost

polovodičových součástek, které tak reagují na stále kratší rušivé signály. Lze tedy konstatovat, že rostoucí citlivost moderních zařízení vůči rušení je daň placená technickému pokroku.

Nejdůležitějším přírodním zdrojem přepětí je bleskový výboj, jakožto nejsilnější přírodní elektrický výboj. Úder blesku ohrožuje elektrická a elektronická zařízení až do vzdálenosti cca 4 km. Vybíjení atmosférické elektřiny bleskem způsobuje vznik strmého elektromagnetického impulzu (označovaného zkratkou LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse), který má na zasažená i vzdálenější zařízení rušivé až destruktivní účinky. Velikost proudu bleskového výboje činí až 200 kA. Z kmitočtového hlediska produkuje blesk rušení o hodnotě až 140 dB v pásmu 2÷30 kHz, dále úroveň rušení klesá se strmostí 20 dB/dek až do kmitočtu cca 100 MHz.



Obr.2.2.1 Proudový impulz[5]

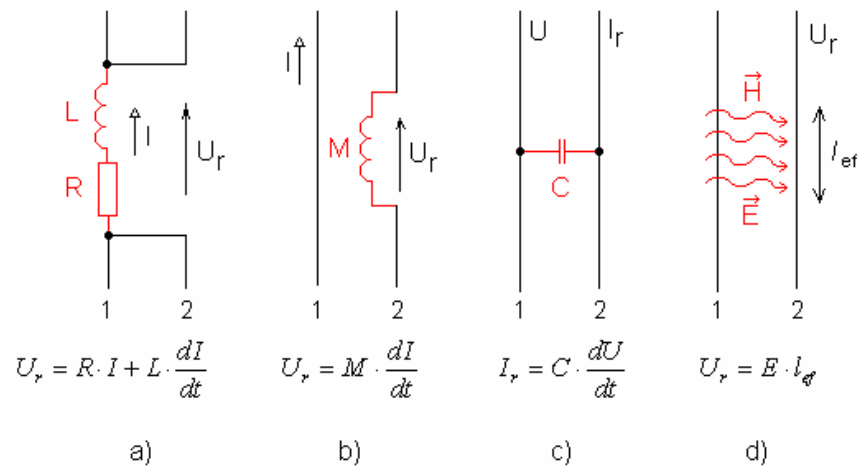
Pokud by takový blesk udeřil do budovy, má za následek rázový impulz proudu, který neprotéká jen hromosvodovým svodem, ale může se uzavírat i přes kovové konstrukce budovy, a tedy protéká i vnitřkem budovy v blízkosti elektronických zařízení. Kromě silného magnetického pole indukuje v síťovém rozvodu budovy sekundární napěťové rázy.

Nepřímý účinek blesku spočívá v zavlčení napěťového rázového impulzu z vnějšího vedení nízkého, případně i vysokého napětí do vnitřního silového rozvodu budov. V tomto případě je důležité, aby na vstupu budovy byla instalována primární přepěťová ochrana (bleskojistky, varistory) a aby budova byla vybavena dokonalým zemnicím systémem. Všem napěťovým či proudovým bleskovým impulzům je společná velká strmost náběžné hrany (jednotky μs) a pomalejší pokles (stovky μs), který závisí na velikosti náboje blesku.

Umělé zdroje přepětí jsou, prakticky všechna spínací zařízení. Velikost vzniklého přepětí závisí především na velikosti spínaného proudu a napětí, na kvalitě spínacích prvků u mechanických zařízení, na rychlosti spínacího procesu a na impedančních poměrech v energetické síti. Za nebezpečné zdroje přepětí (a rovněž vysokofrekvenčního rušení) je nutno považovat všechna zařízení, v nichž dochází ke vzniku elektrického oblouku. [4]

3. VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ

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 [2]

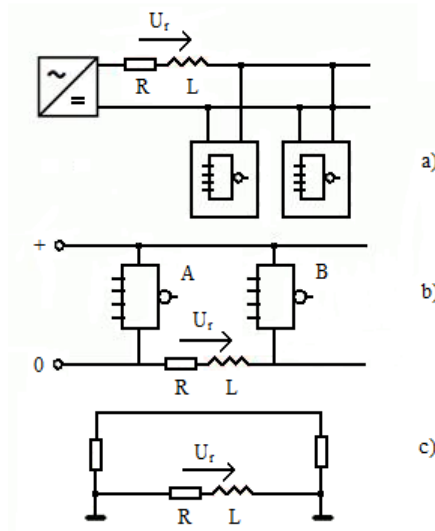


Obr. 3.1 Přenosové vazby: a) galvanická, b) induktivní, c) kapacitní, d) polem [2]

3.1. GALVANICKÁ VAZBA

Galvanická vazba neboli vazba společnou impedancí je vazbou dvou elektrických systémů či bloků, jejichž proudové smyčky se uzavírají společnými úseky spojovacích vedení, tedy přes společnou impedanci. Tato impedance, která má nejčastěji charakter sériového obvodu RL, může být tvořena např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje (obr. 3.1.1a), společného přívodu řídicích obvodů (obr. 3.1.1b), nebo být impedancí společného zemnicího systému (obr. 3.1.1c). Společnou impedancí tečou proudy všech (obou) bloků, takže napětí U_r vznikající na této impedanci průtokem proudu prvního bloku představuje pro druhý blok rušivé napětí. Na nízkých kmitočtech (v pásmu kHz) je rozhodující část společné impedance tvořena odporovou složkou R. V oblasti vyšších

kmitočtů se uplatňuje především induktivní složka, na níž i poměrně malý proud prvního bloku může při rychlé časové změně vyvolat velké napětí, které je rušivé pro druhý blok zařízení. Indukčnost L společné impedance a kapacity spojů i součástí tvoří navíc rezonanční obvody, jejichž vlivem může být společná impedance (a tím i galvanická vazba) na některých vyšších kmitočtech dosti velká. [2]



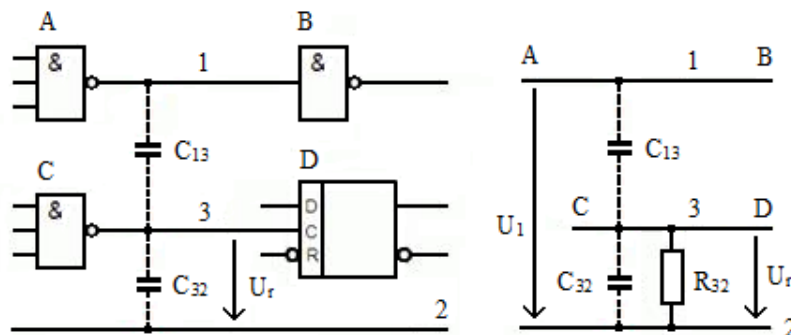
Obr. 3.1.1 Galvanická vazba společnou impedancí ve vedení: a) napájecím, b) řídicím c) zemním [5]

Pro minimalizaci galvanických vazeb společnou impedancí napájecích, signálových či zemních obvodů je tedy zejména nutné:

- dostatečně dimenzovat společný zemnicí vodič zemní plochu a jednotlivé bloky k němu propojovat přímou cestou masivním vodičem. Těmito kroky se sníží velikost vstupního rušivého zemního napětí U_z zemní smyčky
- u signálových vodičů neslučovat společný vodič
- nevytvářet společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům
- elektronická zařízení různých technologií vybavit samostatnými napájecími zdroji
- v možných případech zcela vzájemně galvanicky oddělit např. funkčně související signálové a výkonové obvody jednoho zařízení [1]

3.2.KAPACITNÍ VAZBA

Kapacitní vazba je způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči (rušícím a rušeným) nebo mezi jednotlivými částmi obvodů či konstrukce zařízení. Parazitní kapacitou modelujeme elektrické pole, které existuje mezi každými dvěma vodiči (vodivými částmi) s různým potenciálem. Tato situace typicky nastává např. při souběžném vedení energetických a signálových či datových kabelů a linek, příp. při paralelním vedení vodivých drah plošných spojů.



Obr. 3.2.1 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem
a) možný vznik v číslicových obvodech; b) náhradní schéma[5]

Potřebná opatření pro snížení tohoto druhu kapacitní vazby:

- Co nejvíce zmenšit vazební kapacitu C_{13} maximálním vzájemným oddálením obou vodičů 1 a 3, jejich co nejkratším souběžným vzájemným vedením, příp. zamezením jejich souběžnému vedení, volbou co nejmenších průřezů obou vodičů a co nejmenší hodnotou permitivity izolace mezi vodiči, příp. permitivity materiálu desky plošného spoje.
- Realizovat co největší kapacitu C_{32} , která na vstupu ovlivňovaného obvodu omezuje velikost přeneseného rušivého napětí. To lze provést např. vzájemným těsným přiblížením, případně zkroucením vodiče 3 se vztažným vodičem 2.
- Zajistit nízko-ohmové impedanční poměry v navázaném (ovlivňovaném) obvodu, tedy hodnotu R_{32} udržovat na co nejmenší velikosti.

- Rychlost časových změn všech napětí (signálů) v obvodu $\Delta u/\Delta t$ omezit na minimální možnou hodnotu postačující ke správné činnosti daného obvodu. V praxi to např. znamená, že digitální obvody by měly pracovat se signály jen o takových opakovacích kmitočtech, jež jsou nezbytně nutné pro jejich správnou funkci, nikoli se zbytečně vyššími.
- Vzájemně elektricky odstínit oba ovlivňující se vodiče buď stíněním daného vodiče, nebo zavedením pomocného stínicího spoje s nulovým potenciálem na desce plošného spoje mezi vodiče 1 a 3. [1]

3.3.INDUKTIVNÍ VAZBA

Při průchodu elektrického proudu obvodem, vzniká v okolním prostoru magnetické pole. Toto pole může být konstantní nebo proměnné v závislosti na časovém průběhu proudu. Pokud by v takovém poli byly vodiče, indukovaly by se do nich napětí, které by bylo závislé na kmitočtu. Při časové změně magnetického toku se v obvodu indukuje rušivé napětí dané Faradayovým indukčním zákonem:

$$U_{rmax} = \frac{d\phi}{dt} \approx S \cdot \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = \mu_0 \cdot S \cdot \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1)$$

kde S je plocha smyčky, v níž je rušivé napětí indukováno. Je-li magnetické pole vytvářeno průtokem proudu I vodičem přibližně kruhového průřezu, lze pro jeho intenzitu H ve vzdálenosti r podle Ampérova zákona celkového proudu psát.

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (2)$$

Pak indukované rušivé napětí můžeme popsat vztahem :

$$H = \frac{\mu_0 S}{2\pi r} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3)$$

Parazitní induktivní vazba se nejvíce projeví při rychlých změnách primárního proudu velké velikosti. Změny proudu nastávají nejčastěji při elektrostatickém výboji, blesku nebo

umělých lokálních výbojích. Proudové impulzy bleskového výboje dosahují strmosti jednotek až stovek kA/ μ s. Impulzy lokálních výbojů mají strmost jednotky až desítky A/ns.[5]

Pro minimalizaci parazitní induktivní vazby mezi obvody je třeba dodržet následující pravidla:

- minimální délka obou souběžně probíhajících vodičů
- co největší vzdálenost obou obvodů
- nejmenší velikost proudové smyčky rušeného obvodu (obvodu přijímače)

3.4.VAZBA VYZAŘOVÁNÍM

Při větších vzdálenostech mezi zdrojem a přijímačem rušení, kdy je prakticky vyloučena kapacitní i induktivní vazba, je možná vzájemná vazba obou objektů vyzářeným elektromagnetickým polem. K parazitním vazbám vyzářováním lze typicky počítat rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení i řadu druhů průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích, do nichž se dostává anténou, příp. jejím svodem, což je charakteristické pro rušení vyzářováním. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sečítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje. Účinnou ochranu proti elektromagnetickému rušení vyzářováním lze realizovat pomocí stínicího krytu či přepážky umístěné mezi zdroj a přijímač rušení. Zeslabení nastává jednak vlivem absorpce (pohlcení) energie části vlny v materiálu stínicí přepážky, jednak vlivem odrazu elektromagnetické vlny od přepážky zpět směrem ke zdroji záření. Velikost zeslabení vlny přitom závisí na tloušťce přepážky, na její vodivosti a permeabilitě a rovněž na kmitočtu signálu.

Přímo v samotném zařízení může dojít k parazitní vazbě vyzářováním na mikrovlnných kmitočtech s vlnovými délkami menšími než jsou příčné rozměry přístroje. Kovový kryt přístroje lze za těchto podmínek považovat za úsek dutého kovového vlnovodu, kterým se mohou šířit různé vidy elektromagnetického vlnění. Takovým způsobem je možná parazitní vazba vyzářováním (tzv. vlnovodová vazba), jsou-li v jednom společném kovovém krytu zdroj i přijímač rušení, pracující v oblasti vlnových délek kratších než dvojnásobek nejdelší strany uzavřeného kovového krytu.

Odstranit tuto vazbu lze zmenšením příčných rozměrů parazitního vlnovodu tak, aby vlnová délka nejvyššího kmitočtu rušivého signálu byla delší než dvojnásobek největšího rozměru. Rušivý signál se pak tímto vlnovodem nešíří, zůstává v něm pouze pole vybuzené v těsné blízkosti rušivého zdroje. Toto pole se pak velmi rychle tlumí s rostoucí vzdáleností od zdroje rušení. [4]

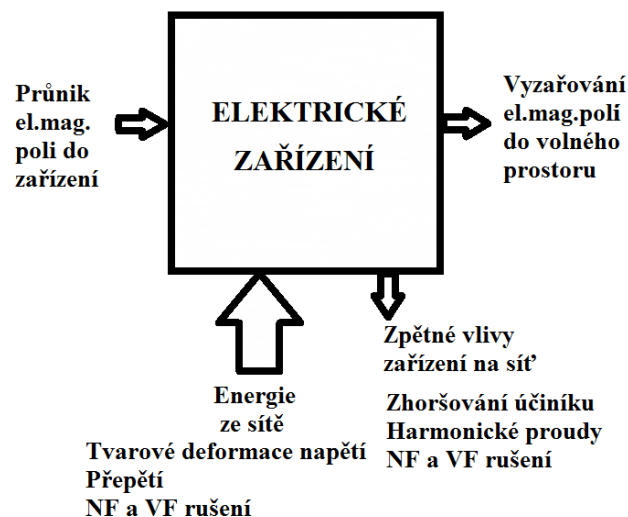
4. VLIV NA ZAŘÍZENÍ

Současná moderní přístrojová základna pro výstroj elektrických zařízení napájených z elektrické rozvodné sítě 3x230/400V je ve stále rostoucí míře osazována elektronickými součástkami. Použití elektronických součástek v přístrojích přináší na jedné straně nebývalé rozšíření funkčních možností, výrazné zmenšení rozměrů a hmotnosti a snížení jejich energetické náročnosti. Na druhé straně se však s rostoucím počtem aplikací objevují problémy se spolehlivostí a funkčností těchto přístrojů. Typickými příznaky jsou občasné selhání (zařízení za určitých okolností mění své funkční vlastnosti, z „neznámých příčin“ dochází ke změně nebo výpadku programu u procesorových systémů) nebo v ještě horším případě je část nebo celé zařízení destruováno. Příčiny těchto poruch jsou v podstatě všeobecně známé. Jde ve většině případů o přepětové vlny, superponované na napájecí napětí. Jejich výskyt je téměř vždy náhodný a těžko předvídatelný. Amplituda a tvar přepětových vln závisí na charakteru jejich zdroje a momentálních impedančních poměrech v síti. V sítích nízkého napětí až do doby „elektronizace“ byly používány přístroje a zařízení, jejichž přirozená odolnost byla tak vysoká, že běžná přepětí či krátkodobé výpadky napájení nezpůsobovaly vážnější provozní problémy. Jejich charakteristickým znakem byla vysoká energetická úroveň řídicích a ovládacích signálů vzhledem k úrovni okolního rušení. Uvedené pozitivní vlastnosti byly vykoupeny velkými rozměry zařízení a jejich vysokou energetickou náročností. Nástupem elektronické součástkové základny do přístrojů používaných pro řízení toku velkých energií se začala výrazně projevovat rizika nežádoucích interferencí a negativních vlivů silových systémů na elektroniku přístrojů a naopak. Systematické práce na potlačení těchto vlivů podnítily vznik nového vědního oboru, elektromagnetické kompatibility. Jeho vznik je přirozenou reakcí člověka na nové problémy v elektrotechnickém oboru.

Každé elektrické zařízení, zapojené do systému rozvodu a využívání elektrické energie, určitým způsobem tento systém ovlivňuje a samo je zpětně ovlivňováno. Zpětný vliv

elektrického zařízení na síť není dán pouze velikostí odebíraného proudu, ale hlavně jeho časovým průběhem a vztahem k časovému průběhu síťového napětí. Každý spotřebič elektrické energie by měl ze sítě odebírat pokud možno harmonický proud a pracovat s účinníkem okolo 0,95. Na druhé straně síť by měla poskytovat harmonické napájecí napětí o jmenovité hodnotě a kmitočtu. Dodržení uvedených požadavků je značně problematické vzhledem k vlastnostem spotřebičů, které jsou naprosto náhodně k elektrické napájecí síti připojovány a odpojovány. Průvodními jevy těchto náhodných procesů jsou deformace průběhu napájecího napětí a další vedlejší účinky elektrických zařízení jak na samotnou síť, tak i na blízké a v některých případech i vzdálené okolí. Projevy tohoto vzájemného působení jsou znázorněny na obr.1 a lze je shrnout do následujících bodů:

- Krátkodobá přepětí v energetické síti, vyvolaná spínacími operacemi a přírodními vlivy.
- Ovlivňování účinníku sítě zátěžemi reaktančního nebo nelineárního charakteru.
- Deformace síťového napětí spotřebiči s odběrem neharmonického proudu.
- Nízko frekvenční a vysoko frekvenční rušivá napětí, šířící se po vedení.
- Vyzářovaná nízko frekvenční a vysoko frekvenční elektromagnetická pole.



Obr. 4.1 Formy energie působící na zařízení

Každý z uvedených jevů může za určitých okolností způsobit selhání či trvalou poruchu některého ze zařízení, připojeného na elektrickou síť. Proto jsou stanovena kritéria

odolnosti jednotlivých elektrických přístrojů a zařízení, která jsou v příslušných výrobních normách přesně specifikována včetně postupů jejich ověřování. Uvedené nepříznivé jevy se snáze odstraňují v případech, kdy působí trvale nebo si je lze dle potřeby vyvolat. Komplikovanější situace nastává v případě náhodných přechodných jevů, doprovázených přepětími v napájecí síti či uvnitř elektrických zařízení. Velikost i tvar přepěťové vlny je výrazně ovlivněn okamžitou konfigurací spínané sítě, jejími impedančními poměry a připojenými zátěžemi. Proto každé elektrické zařízení musí být do určité míry vůči těmto přepětím odolné. V některých případech vzhledem k místním podmínkám a s ohledem na důležitost zařízení, musí být proti přepětí vybaveno potřebnými ochranami. Provedení ochrany proti přepětí je často technicky i finančně náročné. Většinou vyžaduje předchozí analýzu stavu sítě a dlouhodobější sledování výskytu přepětí. V jednodušších případech lze vyjít ze všeobecných poznatků a použít standardizovaná řešení, doporučená výrobcem přepěťových ochrany či specializovaných firem. Tato doporučení se však týkají převážně ochrany před účinky atmosférických výbojů. V případě aplikací ochrany v průmyslových a rozsáhlých administrativních objektech je však potřebné více dbát na ochranu před spínacími přepětími. V těchto případech je nezbytná pečlivá analýza místních poměrů. [3]

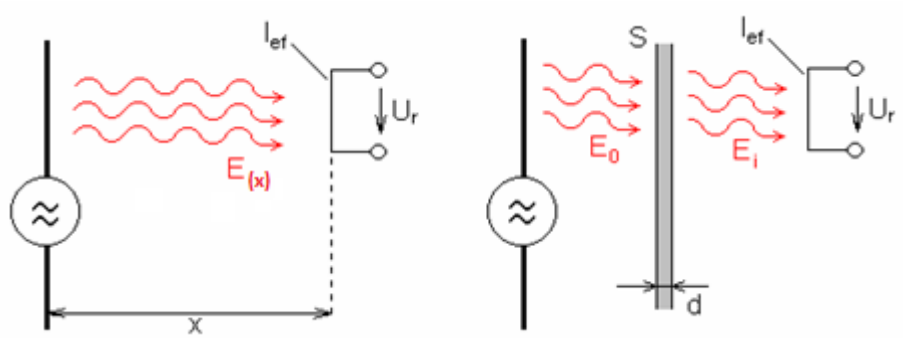
5. ELEKTROMAGNETICKÉ STÍNĚNÍ

Stínění je základní prostředek, jak lze zajistit dostatečnou úroveň EMC. Vhodně zvoleným stíněním dokážeme snížit elektromagnetické emise vyzařované ze zdrojů rušení tak i zajistit dostatečnou úroveň odolnosti citlivých zařízení. Tudíž stínění lokalizuje rušivé elektromagnetické pole v ohraničeném prostoru a zabraňuje jeho šíření mimo tento prostor. Z hospodárných důvodů obvykle stíníme pouze část zařízení, které působí jako zdroj rušení nikoli celý přístroj. Ale kvůli nežádoucím vazbám mezi jednotlivými citlivými obvody zařízení, je třeba odstínit každou součást přístroje samostatně. Pak už není nutné zdroj rušení 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 přepracování koncepce krytu.

5.1. ÚČINNOST STÍNĚNÍ

Kvalitu provedeného stínění lze posoudit pomocí koeficientu stínění K_s , který je definován jako poměr intenzity elektrického pole E_i [$V \cdot m^{-1}$] (magnetického pole H_i [$A \cdot m^{-1}$]) uvnitř stíněného objektu a intenzit E_0 (H_0) v tom samém bodě bez stínícího krytu (intenzita pole dopadajícího na stínící přepážku) [2]

$$K_s = \frac{E_i}{E_0} \text{ nebo } K_s = \frac{H_i}{H_0} \quad [8] \quad (4),(5)$$



Obr.5.1.1 Vazba elektromagnetickým polem a vliv stínění na šíření pole [2]

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

$$SE[dB] = 20 \cdot \log \frac{1}{K_s} = 20 \cdot \log \frac{E_0}{E_i} \text{ nebo } SE[dB] = 20 \cdot \log \frac{H_0}{H_i} \quad [8] \quad (6)$$

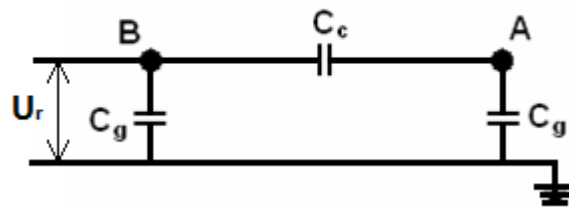
V případě, že nelze posoudit elektrické a magnetické pole odděleně, musí se účinnost stínění definovat podle výkonu:

$$SE[dB] = 10 \cdot \log \frac{P_0}{P_i} \quad (7)$$

5.2.DRUHY STÍNĚNÍ

5.2.1. STÍNĚNÍ ELEKTRICKÉHO POLE

Základem principu stínění elektrického pole je potlačení kapacitní vazby mezi objekty. Nejlepšího efektu docílíme při použití celokovového krytu. 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 5.2.1.1 jsou dva paralelní vodiče A a B , které mají mezi sebou vzájemnou vazbu reprezentovanou kapacitou C_c [F] a každý má kapacitu k zemi C_g [F]. [2]

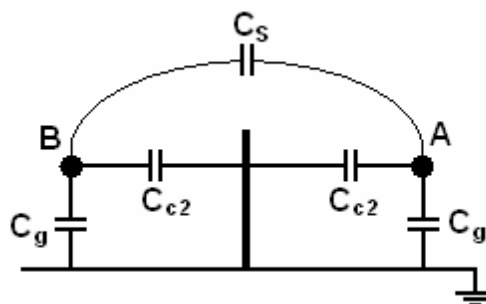


Obr.5.2.1.1 Kapacitní vazby mezi vodiči a zemí[2]

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

$$U_r = \frac{UC_c}{C_g + C_c} \quad (8)$$

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 vložení vodivé dokonale uzemněné desky mezi vodiče A a B . Situace se tedy změní podle následujícího obrázku:



Obr.5.2.1.2 Kapacitní vazby mezi vodiči oddělenými vodivou uzemněnou deskou [2]

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

$$C_{c2} \cong 2C_c \quad (9)$$

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:

$$U_r = \frac{UC_s}{(C_g + C_{c2}) + C_s} \text{ [V]} \quad (10)$$

Přenesené rušení je tedy menší.

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.

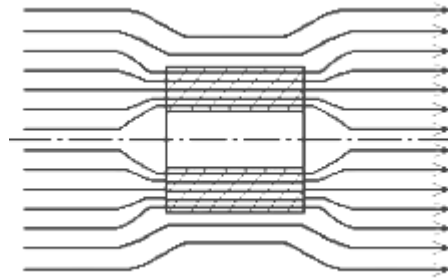
Otvory malých rozměrů a úzké štěrbiny nemění rozložení kapacit a nemění tedy příliš účinnost stínění, pokud jsou otvory malé ve srovnání s vlnovou délkou pole. Je třeba, aby všechny vodiče a části zařízení pracující s užitečným signálem byly uvnitř stínění. [2]

5.2.2. STÍNĚNÍ MAGNETICKÉHO POLE

Magneto-statické 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.

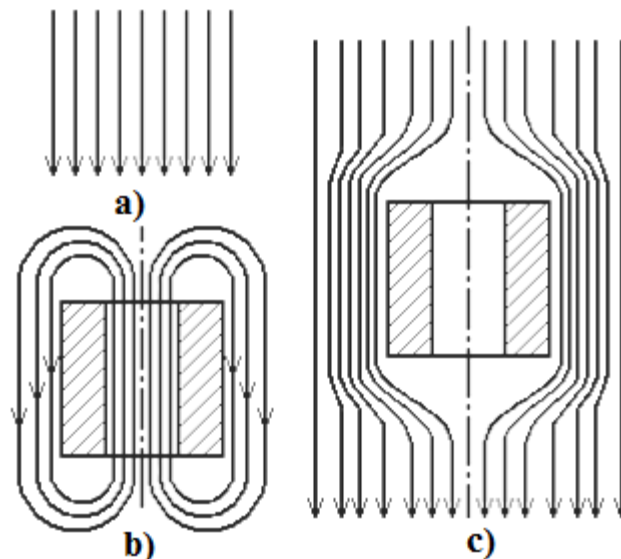


Obr.5.2.2.1 Princip stínění magneto-statického pole [2]

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).

Střídavá magnetická pole

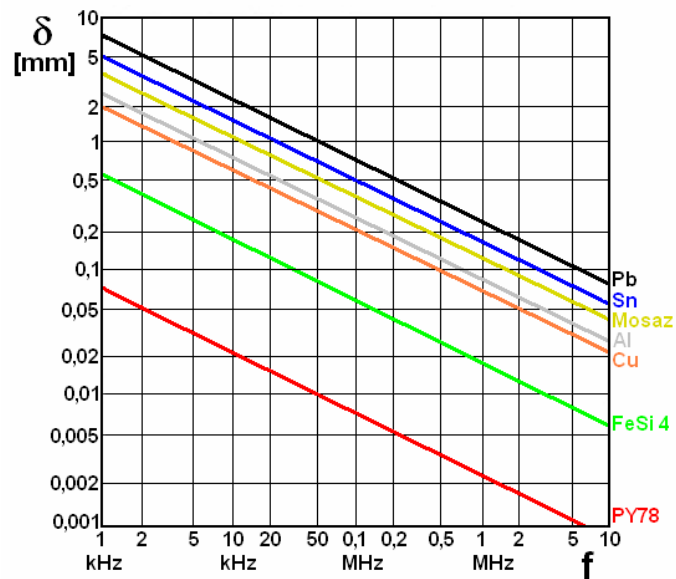
Stínění magnetických polí středních a velkých kmitočtů se někdy označuje jako elektromagnetické stínění. Princip tohoto stínění spočívá v tom, že se vlivem střídavého magnetického pole ve stěnách krytu indukují vířivé (Foucaltovy) proudy, které svým vlastním polem působí proti původnímu magnetickému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



Obr.5.2.2.2 Stínění magnetického pole: a) původní homogenní magnetické pole, b) magnetické pole vířivých proudů, c) celkové magnetické pole [2]

Potlačení původního magnetického pole bude tím výraznější, čím větší vířivé proudy vzniknou. To znamená, čím bude vyšší frekvence magnetického pole, čím bude stínicí materiál silnější a čím bude vyšší magnetická vodivost. Proto je výhodné používat dobře vodivé materiály (Měď, Hliník, Dural, Zinek, Mosaz).

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.



Obr.5.2.2.3 Závislost hloubky vniku v různých materiálech na frekvenci [2]

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 36 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.

5.3. Vliv otvorů na účinnost stínění

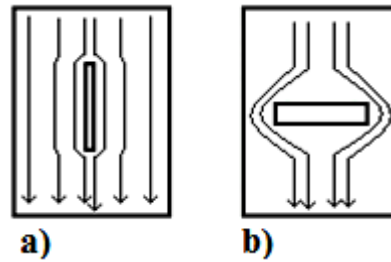
Kromě zajištění požadované účinnosti stínění musí stínicí kryt splňovat i další technické požadavky nutné pro správný chod stíněného zařízení, např. správný tepelný režim zařízení, tj. chlazení a větrání, technologičnost konstrukce, pravidelnost zařízení, tj. rozebíratelnost krytu, přístup ke vstupům a výstupům, k měřicím bodům apod. Všechny tyto funkce nelze zajistit, aniž se naruší kompaktnost, celistvost a homogennost kovové stínicí plochy. Každý reálný stínicí kryt tak obsahuje řadu nehomogenit, netěsností a přerušení, jejichž existence do značné míry určuje skutečnou účinnost jeho stínění. V praxi rozlišujeme tři druhy technických nehomogenit v kovovém stínění: [4]

- Otvory, štěrby a další otevření stínicí plochy (např. dveře, okna, větrací otvory, štěrby a netěsnosti mezi jednotlivými kovovými plochami stínění, vstupní otvory pro přípojné kabely, vedení, příp. vnější mechanické ovládací prvky stíněného zařízení).
- Špatně vodivé (vysoko-impedanční) části stínění (vodivě nedokonalá spojení jednotlivých částí stínění, nedokonale vodivé průhledné plochy (skla) při požadavku vizuální kontroly zařízení).
- Vnější přívodní kabely a přípojná vedení (napájecí, signálové a datové kabely, jimiž se mohou dostávat elektromagnetické rušivé signály do vnitřního prostoru stínicího krytu).

Základní vliv na výslednou účinnost stínění reálných kovových krytů mají zejména otvory ve stínicí ploše. Malý kruhový otvor o poloměru a v tenké kovové stínicí přepážce, na kterou dopadá rovinná elektromagnetická vlna, se vůči stíněnému prostoru chová jako plošná anténa s výkonovým ziskem.

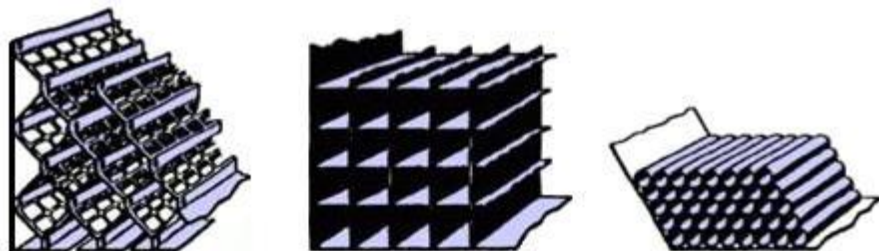
Zejména dlouhé štěrby v kovovém stínění se mohou chovat jako účinné štěrbinové antény, které podle své orientace vůči dopadající elektromagnetické vlně, příp. vůči proudům protékajícím po stínicí přepážce, mohou intenzivně vyzařovat do vnitřního (chráněného) prostoru stínicího krytu a tím výrazně snižovat účinnost jeho stínění. Případy nejlepší a nejhorší orientace podlouhlé štěrby v kovové stínicí ploše z hlediska jejího vyzařování jsou naznačeny v obr. 5.3.1.a. Protože v praxi nikdy neznáme orientaci vlny dopadající na stínicí

přepážku, je v oblasti EMC nutno vždy předpokládat nejhorší možný případ, tedy situaci dle obr. 5.3.1.b.[4]



Obr. 5.3.1 Orientace nevyzařující a vyzařující podlouhlé štěrby v kovové stínící přepážce [5]

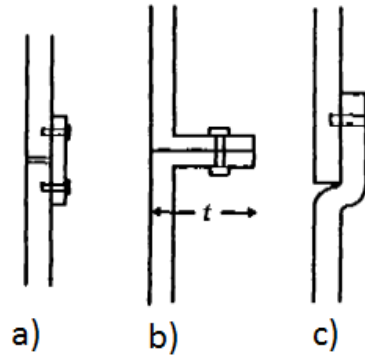
Pomocí "podkritického" dutého kovového vlnovodu, tj. vlnovodu provozovaného pod svým nejnižším mezním kmitočtem, se v technice elektromagnetického stínění realizují průchody a otvory nutné např. pro zavedení kabelů či mechanických ovládacích prvků do vnitřku stíněného prostoru, nebo pro zajištění jeho větrání či denního osvětlení. Vyrábějí se tak celé větrací, příp. průchodkové sekce sestávající z řady podkritických vlnovodů, které tvoří jakousi "komínkovou" strukturu podle obr. 5.3.2. Používané vlnovody mají kruhový, pravoúhlý, příp. hexagonální příčný průřez, jehož rozměry musí být takové, aby i pro nejvyšší předpokládaný kmitočet elektromagnetického rušení byla zajištěna jejich činnost (hluboko) pod nejnižším mezním kmitočtem vlnovodu.



Obr. 5.3.2 Větrací a průchodkové sekce stínících krytů [5]

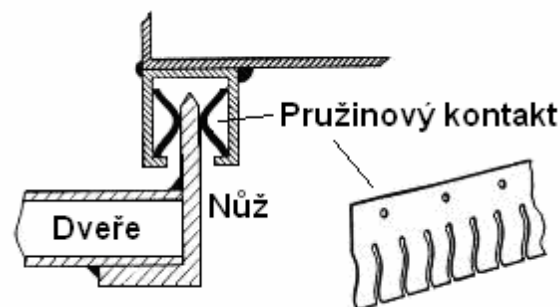
Teoretické rozbory i praktické zkušenosti ukazují, že zásadní význam pro kvalitu stínících krytů mají otvory, štěrby a další technologické průchody, které vytváříme v kompaktní stínící ploše. Kromě těchto úmyslně vytvářených průvlekových, prosvětlovacích, přístupových, montážních a podobných otvorů vznikají však ve všech stínících krytech i neúmyslné a nechtěné štěrby a průchozí netěsnosti, zejména v místech spojení dílčích stínících ploch celkového kovového krytu. Tyto štěrby mohou přitom dosáhnout značných délek (podle rozlohy celé stínící plochy až několika desítek cm), a tím výrazně snížit účinnost stínění kovového krytu již od poměrně nízkých kmitočtů. Potlačit vliv těchto průchozích netěsností lze zejména zlepšením způsobu spojení dílčích kovových desek jejich dostatečně

dlouhým vzájemným překryvem, např. dle obr. 5.3.3.b. nebo obr. 5.3.3.c. Těmito způsoby vlastně opět vytváříme "podkritický vlnovod" o dostatečné délce t , a tím zvyšujeme celkovou účinnost stínění SE, příp. "posouváme" hranici jejího poklesu směrem k vyšším kmitočetům. [4]



Obr.5.3.3 a) spojení částí stínicího krytu "na tupo". b), c) Způsoby zlepšení účinnosti stínění překryvem spojovaných částí [4]

Dalším zdrojem technologicky podmíněných elektromagnetických netěsností stínicích krytů zejména přístrojového a skříňového typu jsou místa mechanických spojů dílčích částí krytu. Kromě principu "podkritického" vlnovodu se elektromagnetická těsnost těchto míst dosahuje užitím elastických a současně vysoce vodivých materiálů (past, silikonů apod.), které se nanášejí do míst spojení a mechanickým tlakem spojovaných částí zcela vyplní možné štěrbinu mezi nimi. Tato technika je vhodná zejména tam, kde z konstrukčních či údržbových důvodů je nutno stínicí kryt čas od času rozebrat a opět sestavit. Velmi kvalitní vodivý kontakt bez štěrbin musí být zajištěn rovněž u všech dveří a dalších často otvíraných přístupů do stíněného krytu či stíněné místnosti. V zavřeném stavu musí tyto přístupy (dveře) zajišťovat dokonalou elektromagnetickou těsnost. Toho se v praxi dosahuje užitím pružinových kontaktů na pohyblivých částech, příp. užitím pérových nožových kontaktů. [4]



Obr. 5.3.4 Vodivé spojení po celém obvodu dveří pro zlepšení stínění [2]

Dlouholeté zkušenosti v potřebách elektromagnetického stínění elektronických a elektrotechnických přístrojů, zařízení a systémů vedly k jisté kategorizaci stínění podle dosahovaných hodnot jejich účinnosti SE. Tyto kategorie jsou shrnuty v tabulce.

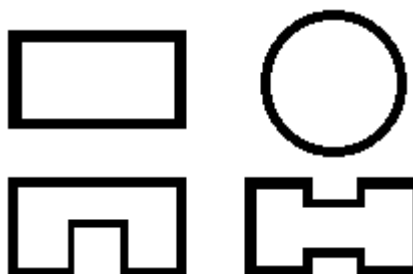
Účinnost stínění [dB]	Kategorie- hodnocení
0-10	Nedostatečné stínění
10-30	Stínění pro minimální požadavky
30-60	Stínění dostačující pro většinu běžných požadavků
60-90	Velmi dobré stínění
90-120	Vysoce kvalitní stínění

Tab.5.3.5 Hodnocení elektromagnetického stínění [4]

5.4.VLNOVODY

Druhy vedení, které známe z každodenního života (koaxiální vedení, dvojlinka), jsou jen omezeně použitelné v mikrovlnných kmitočtových pásmech, protože s růstem kmitočtu přenášeného signálu významně rostou ztráty v dielektriku těchto vedení. Proto se na vyšších kmitočtech používají pro přenos signálu velmi často vlnovody.

Termínem vlnovod většinou označujeme kovovou trubici, jejíž příčné rozměry jsou srovnatelné s délkou vlny. Vnitřní stěny vlnovodu bývají upraveny tak, aby byly minimalizovány ztráty v kovu (obvykle lze stěny vlnovodu pokládat za dokonalý elektrický vodič). Příčný profil vlnovodu má obvykle obdélníkový nebo kruhový tvar. Ve speciálních případech může mít průřez vlnovodu tvar písmene Π nebo H (Obr.5.4.1), tyto vlnovody jsou širokopásmovější než běžný obdélníkový vlnovod, avšak na druhou stranu přenášejí menší výkon.



Obr.5.4.1 Ukázka různých tvarů vlnovodů

S vlnovody se setkáváme na kmitočtech řádu gigahertzů, protože na nižších kmitočtech by měly příliš velké příčné rozměry. Vlnovody nacházíme zejména u

radiolokátorů a u systémů pro družicovou komunikaci. Slouží zde jednak pro přenos energie z vysokofrekvenčního generátoru k anténě, jednak pro přenos signálu z antény k vysokofrekvenčnímu stupni přijímače. [7]

6. MĚŘENÍ ÚČINNOSTI STÍNĚNÍ

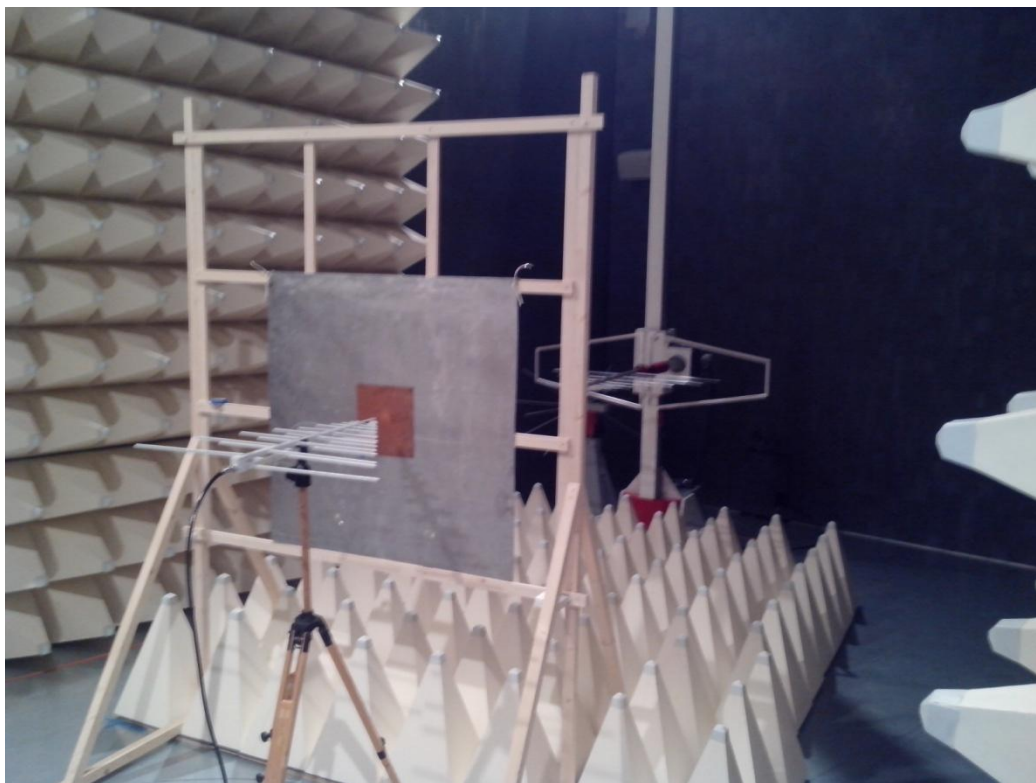
6.1. POPIS TESTOVACÍHO MĚŘENÍ

Měření probíhalo ve frekvenčním rozsahu 80 MHz až 1,2GHz s frekvenčním krokem 120kHz. Byly použity dvě antény. Pro přijímací signál byla použita logaritmicky-periodická anténa LP02 a pro vysílací signál bikónicko-logaritmická anténa Frankonia BTA-M. Oba signály se zesilovaly pro lepší názornost měření a názornější grafické výstupy.

Mezi dvě antény se umístila konstrukce s plechem, na kterém se vyměňovaly zkušební plechy. Plechy měly různé otvory o různých tvarech a velikostí pro ověření, že došlo k zachycení nebo jiných jevů ovlivňující účinnost stínění. První dvojice plechů měla kruhový otvor o průměru 10 a 20 mm, druhá dvojice měla podélné štěrbinové otvory, kde délka štěrbin byla 100mm a 200mm a šířka konstantní 5mm (viz příloha 1). Nakonec byl umístěn plech bez otvoru.

Vzdálenost antén, respektive měřených bodů antén byla 2,45 m. Antény byly polarizovány horizontálně i vertikálně. Bylo provedeno kalibrační měření bez konstrukce pro výpočet účinnosti stínění. Při měření jsem zaznamenával hodnoty v dB μ V. Pro výpočet celkové účinnosti stínění pak nebylo nutné dělat poměr elektrických polí jako ve vzorci (6), ale pouze odečíst naměřené hodnoty z jednotlivých měření od hodnot kalibračních.

Zjednodušený příklad výpočtu jsem uvedl níže spolu s ukázkou naměřených hodnot z důvodu velkého množství dat.



Obr. 6.1 Rozložení při testovacím měření na účinnost stínění

6.2. TECHNICKÉ PARAMETRY POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ

Spektrální analyzátor HP E4411B (ESA-L series)

Při měření jsem používal spektrální analyzátor od firmy Hewlett packard. Analyzátor byl propojený s počítačem a komunikoval s programem Microsoft Excel přes USB port.

Frekvenční rozsah	9 kHz až 1,5 GHz
Vstupní impedance	75 Ω

Tab. 6.1.1 Základní parametry spektrálního analyzátoru



Obr. 6.2.2 Spektrální analyzátor HP E4411B

Zesilovač přijímaného signálu

Zesilovač použitý pro zvýšení vysílacího signálu je od firmy R&S.

Frekvenční rozsah	100 kHz až 3 GHz
Zisk	20 dB
Max. vstupní výkon	0,02 W

Tab.6.2.3 Základní parametry zesilovače R&S HZ 16



Obr. 6 2.4 Detail na zesilovač R&S HZ-16

Zesilovač vysílaného signálu

Pro zesílení přijímacího signálu jsem použil zesilovač HP 8447F OPT H64 Aplifier. Zesiloval jsem i vstupní signál z důvodu lepší názornosti grafických výstupů.



Obr. 6.1.5 Zesilovač HP 8447F OPT H64

Frekvenční rozsah	9 kHz až 1,3 GHz
Zisk	25 dB
Impedance	50Ω

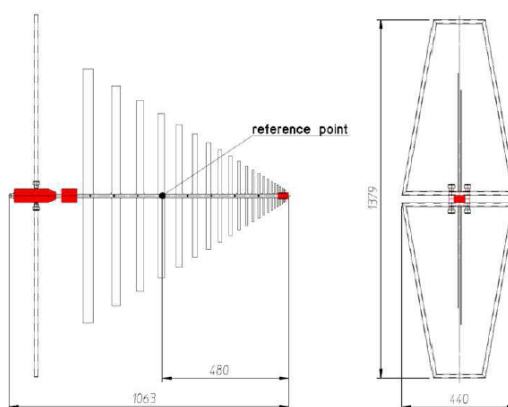
Tab. 6.2.6 základní parametry zesilovače HP 8447F

Vysílací anténa

Pro měření používáme širokopásmovou bikónicko-logaritmickou anténu Frankonia BTA-M, která je použité pásmo výhodnější.

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

Tab. 6.2.7 Základní parametry antény BTA-M



Obr. 6.2.8 Anténa BTA-M

Logaritmicky-periodická anténa LP02

Je tvořena řadou vhodně fázově napájených rezonančních unipólů, jejichž délky a vzájemné vzdálenosti jsou pro sousední prvky v pevném poměru daném podílem logaritmů jejich rezonančních kmitočtů → tvar vyzařovacího diagramu a hodnota vstupní impedance je ve většině pracovního pásma konstantní, reagují na elektrickou složku rušivého elektromagnetického pole s lineární polarizací (horizontální nebo vertikální).



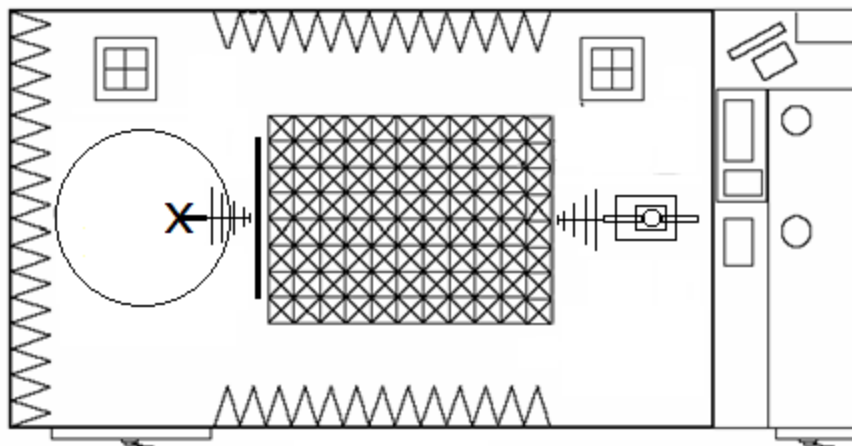
Obr. 6.2.9 Anténa LP02

Frekvenční rozsah	200MHz až 3 GHz
Impedance	50 Ω
Max. vstupní výkon	100 W

Tab. 6.2.10 Základní parametry antény LP02

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 následující obrázek.



Obr. 6.2.11 Nákres bezodrazové komory s velínem

Použité absorbéry jsou buď z feritových destiček (typ Frankosorb F006) nebo kombinované feritové s pyramidovými (typ Frankosorb H450). Pyramidové absorbéry 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

6.3. NAMĚŘENÉ HODNOTY

Frekvence	Změřené hodnoty		Účinnost stínění
	<i>Plný plech</i>	<i>Kalibrace</i>	
[MHz]	[dB μ V]	[dB μ V]	SE [dB]
80,000	75,482	89,752	14,270
82,800	82,025	94,189	12,164
85,600	84,480	92,568	8,088
88,400	87,864	94,420	6,556
91,200	85,850	93,030	7,180
94,000	83,668	94,864	11,196
96,800	78,773	90,952	12,179
99,600	81,468	91,995	10,527
102,400	83,830	96,855	13,025
105,200	85,041	99,870	14,829
108,000	85,091	100,591	15,500
110,800	84,900	96,149	11,249
113,600	84,645	98,514	13,869
116,400	86,555	98,434	11,879
119,200	85,743	91,530	5,787
122,000	84,292	92,681	8,389
124,800	81,942	93,138	11,196
127,600	81,935	92,942	11,007
130,400	86,978	95,154	8,176
133,200	89,234	97,164	7,930
136,000	93,037	97,596	4,559
138,800	96,134	98,593	2,459

141,600	97,988	99,308	1,320
144,400	99,435	99,730	0,295
147,200	100,133	101,897	1,764
150,000	100,897	102,114	1,217
152,800	102,206	104,594	2,388
155,600	103,595	106,090	2,495
158,400	105,338	108,927	3,589
161,200	107,226	110,069	2,843
164,000	108,665	111,179	2,514
166,800	109,848	111,638	1,790
169,600	110,764	111,925	1,161
172,400	111,198	111,942	0,744
175,200	111,258	111,898	0,640
178,000	111,411	112,072	0,661
180,800	111,550	112,271	0,721
183,600	111,517	112,296	0,779
186,400	111,245	112,132	0,887
189,200	111,014	112,032	1,018
192,000	111,064	111,905	0,841
194,800	111,063	111,885	0,822
197,600	111,073	111,814	0,741
200,400	111,018	111,910	0,892

Tab. 6.3.1 Ukázka naměřených hodnot u plného plechu

6.4.PŘÍKLAD VÝPOČTU

Kalibrační hodnoty (obě antény horizontálně)

Frekvence: 80 MHz; Změřená hodnota : 89,75 dB μ V

Plný plech (obě antény horizontálně)

Frekvence: 80 MHz; Změřená hodnota: 75,48 dB μ V

Pokud vycházíme ze základních pravidel integrálů, stačí tyto hodnoty od sebe odečíst a dostaneme rovnou účinnost stínění.

Potom: SE = 89,75 dB μ V - 75,48 dB μ V = 14,27 [dB]

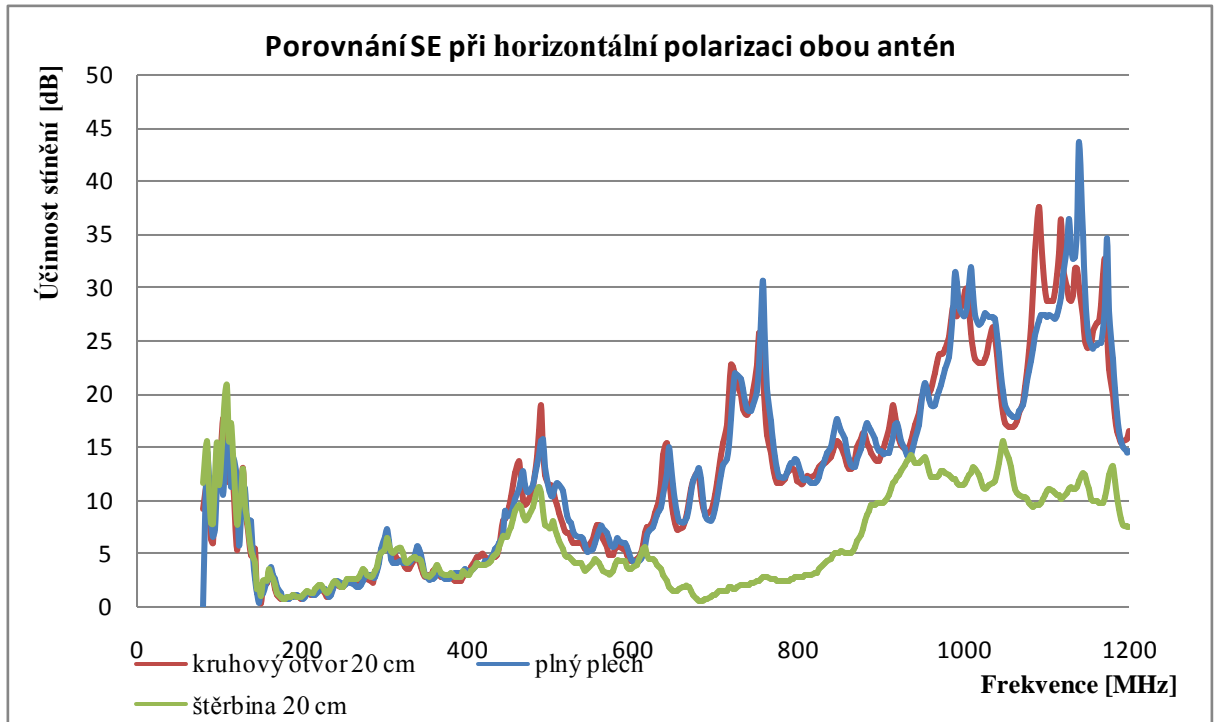
Pro výpočet kritických frekvencí jsem použil zjednodušených vztahů. Pro štěrbinu o délce l pak vztah vypadá následovně:

$$f_c = \frac{c}{2l} \quad (10)$$

Pro kruhový otvor jsem použil vztah:

$$f_c = \frac{c}{4\pi a} \quad (11)$$

6.5. GRAFICKÉ VÝSTUPY



Obr. 6.5.1 Porovnání při horizontální polarizaci

Na obr 6.5.1 je zobrazen grafický výstup pro všechny tři varianty plechu při horizontální polarizaci vysílací i přijímací antény. Na obrázku 6.5.1 lze jasně vidět, že štěrbina vyzářuje do stíněného prostoru za sebou od nižších frekvencí než kruhový otvor. Na grafickém výstupu je dále vidět, že při nízkých frekvencích se štěrbina i kruhový otvor chovají velmi podobně až do kritické frekvence.

Ta se vypočítá pro štěrbinové otvory podle zjednodušeného vztahu (viz 10). Pro toto testovací měření byly vytvořeny plechy s podélnými štěrbinami o délkách 10 a 20 cm.

Kritické frekvence tedy vychází:

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

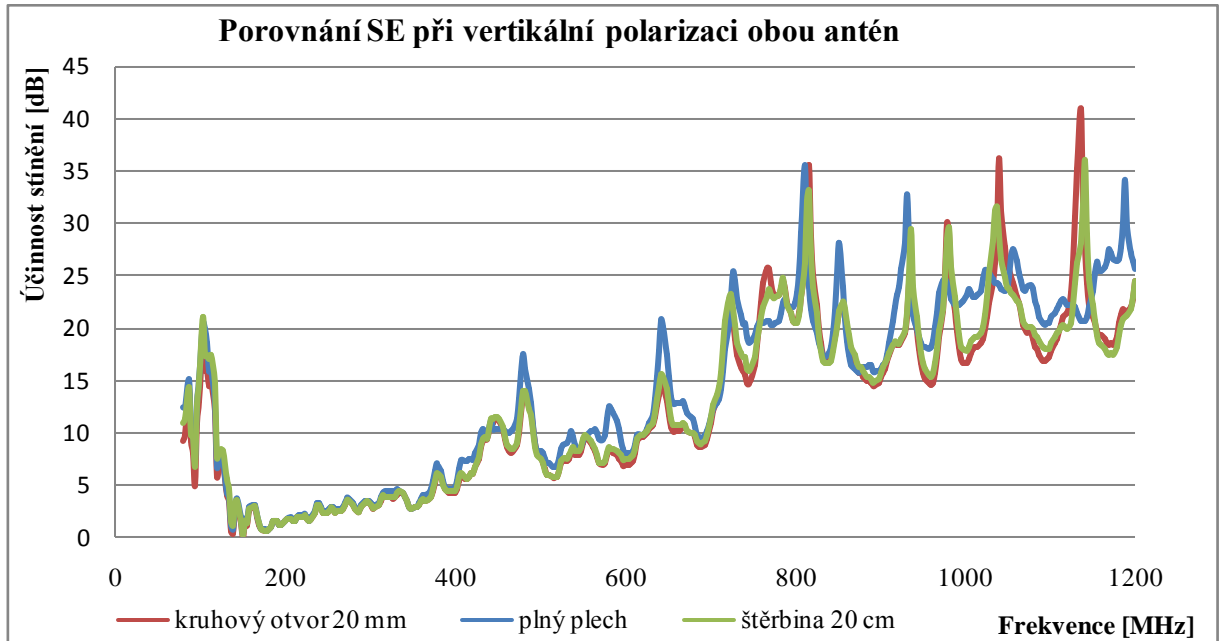
Štěrbina 20 cm je kritická frekvence 750 MHz.

Pro další testování jsem vytvořil kruhové otvory s průměrem 10mm a 20mm. Pro tyto otvory jsem také vypočítal kritickou frekvenci dle zjednodušeného vztahu (viz 11)

Kritická frekvence pro kruhový otvor s průměrem 10mm vyšla:

$$f_c = \frac{c}{4\pi a} = \frac{3 \cdot 10^8}{4 \cdot \pi \cdot 0,05} = 4,8 \text{ GHz}$$

Kruhový otvor s průměrem 20 mm vyšla kritická frekvence 2,4 GHz

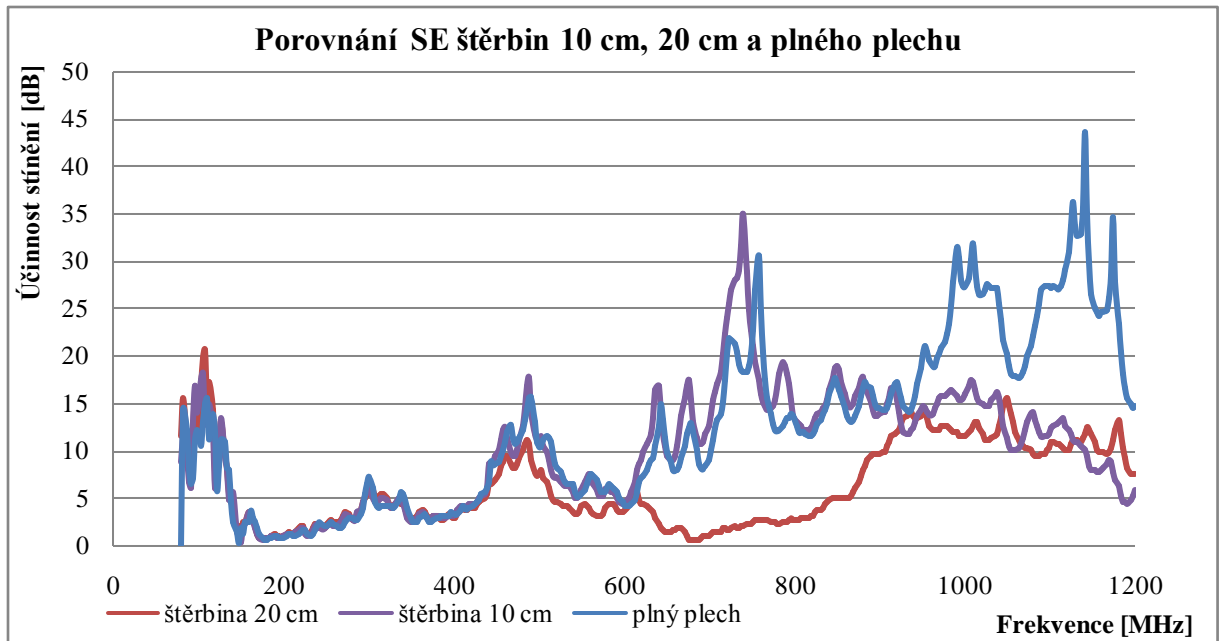


Obr. 6.5.2 Porovnání při vertikální polarizaci

Pokud porovnáme hodnoty SE tří variant plechů při vertikální polarizaci obou antén (obr.6.4.2) můžeme si všimnout, že při vyšších frekvencích jsou hodnoty plného plechu nepatrně vyšší než u otvorů. Při frekvencích pod 1 GHz se dá říct, že průběhy jsou srovnatelné a hodnoty účinnosti stínění se nepatrně liší.

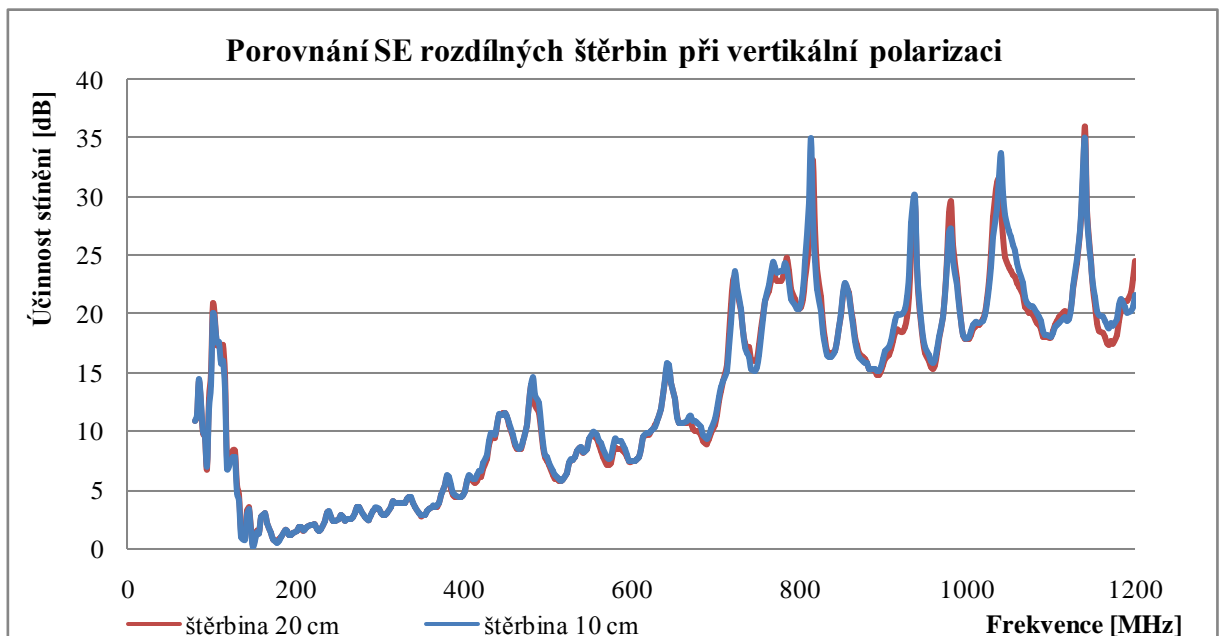
Pro názornost jsem srovnal obě štěrbinu a plný plech. Na obr. 6.5.3 je zřejmé, že štěrbina s délkou 10 cm vyzařuje přibližně od 950 MHz a při vyšších frekvencích mají podobný charakter, zatímco plný plech poskytuje účinnost stínění přes 25 dB. Při výpočtu kritické frekvence pro štěrbinu o délce 10 cm jsem došel k hodnotě 1500 MHz, což neodpovídá naměřené hodnotě.

Při měření mohly nastat vlivy, které by mohli ovlivnit měření jako například šíření vln okolo zkušební desky. Tyto negativní vlivy bych mohl eliminovat částečně uzavřeným prostorem mezi vysílací a přijímací anténou místo mnou použité desky. Dále bych měření zlepšil použitím těsnícího vodivého materiálu nebo vylepšil spoje mezi zkušební deskou a výměnnými plechy.



Obr. 6.5.3 Porovnání štěrbin a plného plechu

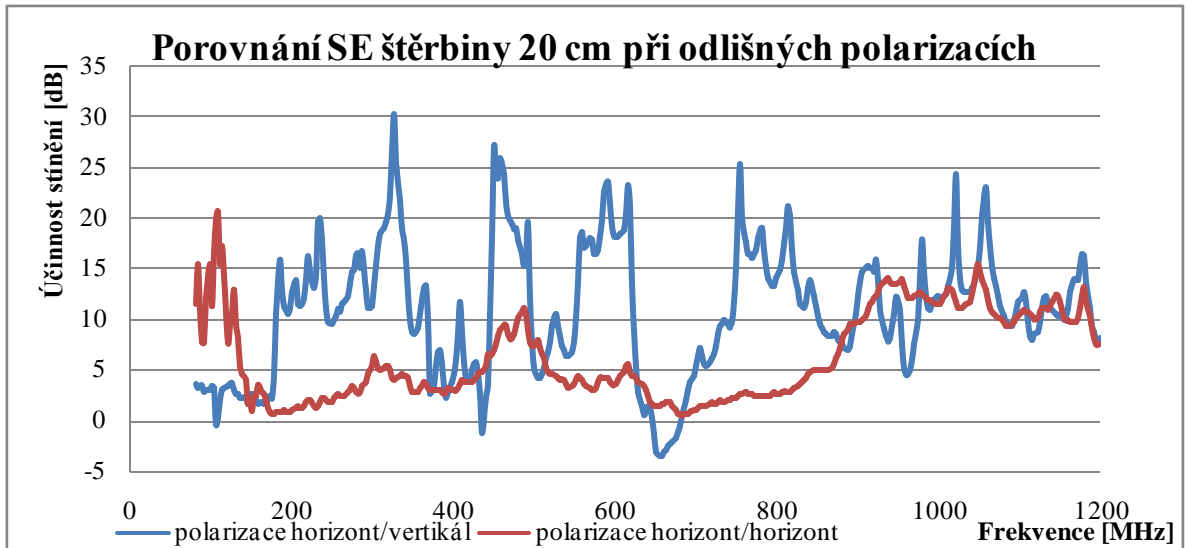
Při vertikální polarizaci obou antén a zvolené podélné štěrbině, která je ve stejné polarizaci jako antény, dochází k jevu, kdy i při různých dlouhých štěrbinách je účinnost stínění téměř totožná (obr.6.5.4). Délka štěrbin nemá vliv na procházející vlnu při stejných polarizacích.



Obr. 6.5.4 Porovnání štěrbin při vertikální polarizaci

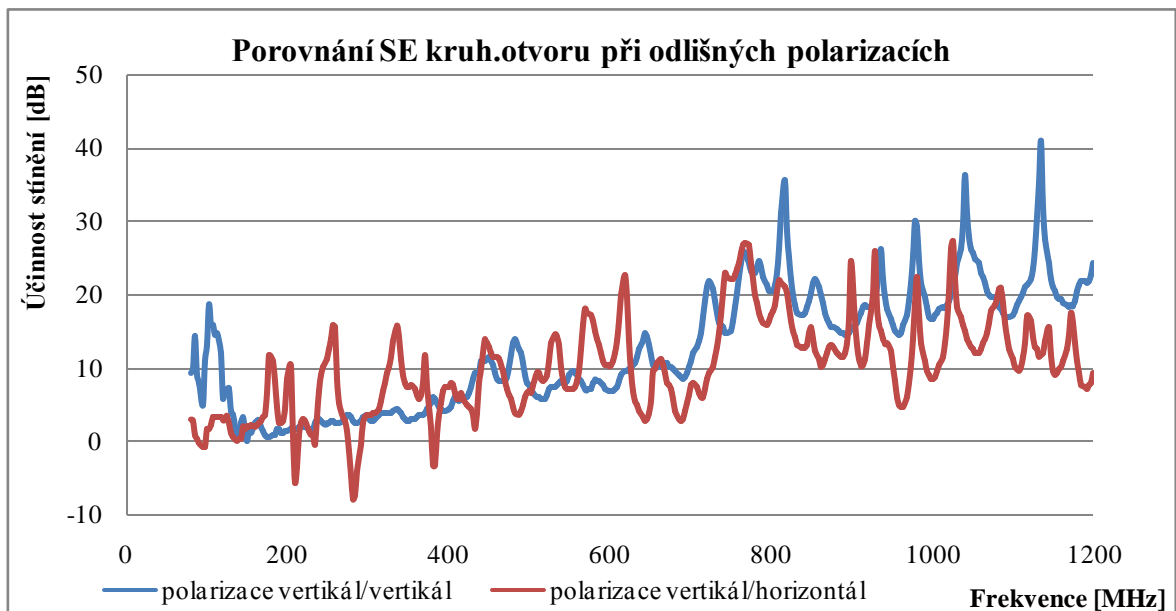
Naopak pokud jsou odlišné polarizace antén, lze velmi dobře pozorovat rozdíly v hodnotách SE. Máme-li vysílací anténu horizontálně polarizovanou a přijímací vertikálně je

účinnost stínění při frekvencích do 1 MHz několikrát větší než při stejné polarizaci (obr. 6.5.5). Při vyšších frekvencích nad 1 GHz jsou hodnoty účinnosti stínění podobné.



Obr. 6.5.5 Porovnání štěrbiny při odlišných polarizacích

U kruhových otvorů, pokud máme odlišné polarizace vysílací a přijímací antény, můžeme vidět (obr. 6.5.6), že účinnosti stínění se u menších frekvencí pohybuje okolo 10 dB a při vyšších frekvencích se účinnost zvýší přibližně dvakrát. Tudiž u kruhových otvorů nemá vliv na účinnost stínění polarizace antén.



Obr. 6.5.6 Porovnání kruhového otvoru při odlišných polarizacích

7. ZÁVĚR

Cílem mé práce bylo seznámit se vznikem rušivých signálů, za jakých podmínek může signál vzniknout, jakými vazbami se šíří a také jak všechny tyto rušivé vlivy můžeme omezit nebo v lepším případě úplně odstranit. Dále jsem se seznámil s problematikou popisující vliv otvorů na účinnost stínění. Toto téma je stěžejní pro moji praktickou část. V té jsem vytvořil test pro účinnost stínění, kde jsem používal dvě antény, jednu jako vysílací a druhou jako přijímací a mezi nimi jsem vytvořil bariéru z plechu, na kterém se daly proměňovat různé plechy s různými otvory o různých velikostech (viz příloha 1). Tyto změny měly vliv na hodnoty účinnosti stínění, které jsem dále graficky znázornil a některé porovnal mezi sebou. Například jsem tímto testovacím měřením zjistil, že pokud máme kruhový otvor, nezáleží na polarizaci vysílací a přijímací antény.

Při měření také došlo někdy k nepřesnostem, proto jsem navrhnul pár opatření, které by mohlo tyto nepřesnosti omezit. V první řadě jsem měl desku o rozměrech 1x1 metr, která bylo, podle mého názoru, nedostatečná. Rozpětí antén by mohlo zapříčinit, že vlnění se mohlo šířit okolo zkušební desky, což je velmi nežádoucí. Proto bych volil větší rozměry desky nebo úplně nejlepším řešením by bylo částečné uzavření prostoru mezi vysílací a přijímací anténou. Další opatření, které by mohlo omezit nepříznivé vlivy při měření účinnosti stínění je vylepšení spojů mezi zkušební deskou a výměnnými plechy. To lze provést použitím těsnícího vodivého materiálu.

Tato metoda měření účinnosti stínění nebyla dosud v naší školní laboratoři testována. Měření, které jsem prováděl na modelovém uspořádání, měla za cíl zjistit měřicí rozsah a použitelnost této metody. Maximální zjištěné hodnoty SE se pohybovali okolo 40 dB. Měřicí rozsah byl od -10dB do 45dB. Pro větší dynamický rozsah měření by bylo třeba použít výkonnější zdroj vysílání. Teoretické hodnoty účinnosti stínění mohou nabývat hodnot i okolo 120 dB.(tab. 5.3.5.), což je už dostatečný rozsah pro měření krytů. Jelikož byl při tomto konkrétním uspořádání úzký měřicí rozsah, není metoda příliš vhodná pro přesné zjištění účinnosti stínění, ale spíše pro porovnávací měření. Díky velké rychlosti měření je možné zachytit vliv prováděných změn ve stínícím krytu během několika vteřin.

Kvůli rozměru přijímací antény není metoda vhodná pro testování malých přístrojových krytů, ale spíše pro rozměrná zařízení nebo stíněné místnosti, ve kterých můžeme měnit polohu a polarizaci této antény.

Mnou navržený pokus by šel aplikovat částečně i na materiálový výzkum, kdy by se ve stínící stěně vyměňoval pouze malý vzorek testovaného materiálu a porovnával by se s jinými materiály popřípadě plnou stěnou.

8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Encyklopedie elektromagnetické kompatibility [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node5>
- [2] HROMÁDKA, Miroslav. Analýza účinnosti elektromagnetického stínění objektů malých rozměrů. V Plzni, 2012. Dizertační práce. ZČU v Plzni.
- [3] Problémy EMC v provozu elektrických zařízení a přístrojů nízkého napětí: Doc.Ing.Pavel Mindl, CSc. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2003/EMC1_testcom.pdf
- [4] Základy elektromagnetické kompatibility. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041>
- [5] SCHOLTZ, Miroslav. Stínění vysokofrekvenčních signálů. 2010, v Plzni. Diplomová práce. ZČU v Plzni.
- [6] Energeticky úsporné osvětlování v domácnostech – přehled technologií a legislativy. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://ec.europa.eu/ceskarepublika/pdf/brozurazarovky.pdf>
- [7] Multimediální učebnice: Elektromagnetické vlny a mikrovlnná technika. [online]. [cit. 2013-03-02]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=3-1-A>
- [8] Chatterton P.A., Houlden M.A.: EMC – Electromagnetic Theory to Practical Design. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1992. ISBN 0-471-92878-X

PŘÍLOHY

Příloha 1: Fotografie z testovacího měření



Obr. 1.1 Ukázka štěrbinového otvoru 100mm
při horizontální polarizaci



Obr.1.2 Ukázka štěrbinového otvoru 200mm
při horizontální polarizaci



Obr. 1.3 Ukázka kruhového otvoru o průměru 20mm
při horizontální polarizaci