

Návrh a hardwarová realizace vlnovodu a odbočnice pro generátor skupiny rychlých impulzů s oscilačními vlnami pro $f = 2,45$ GHz

Ondřej Zapletal

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta Technologická

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je popsat některé základní vlastnosti elektromagnetického vlnění, které nachází použití v oblasti elektromagnetické kompatibility. Diplomová práce prezentuje některé fyzikální principy a možnosti použití vlnovodů v šíření elektromagnetické energie. Práce obsahuje také návrh a realizaci vlnovodu pro měření elektromagnetické kompatibility ve frekvenčním pásmu 2,45 GHz.

Abstrakt ve světovém jazyce

The aim of this diploma work is to describe some basic properties of electromagnetic waves, that find using in elektomagnetic compatibility area. The work presents some physical principles of eletromagnetism and possibilities of using of waveguids in distribution of elektromagnetic energy. This diploma work contents also a syntese and realisation of waveguide for electromagnetic compatibility measurement in frequency band 2,45GHz.

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jánů Ivankovi za podnětné připomínky a rady při vypracování mé práce.

Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně, 14. 06. 2005

.....

jméno diplomanta

OBSAH

OBSAH	5
ÚVOD.....	6
I. TEORETICKÁ ČÁST	7
1.ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA.....	8
1.1 ÚVOD K ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITĚ.....	8
1.2 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ EMC	9
1.2.1 EMC biologických systémů	9
1.2.2 EMC technických systémů a zařízení.....	11
1.3 DRUHY ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ, JEHO ZDROJE A ZPŮSOBY ŠÍŘENÍ.....	15
1.3.1 Nízkofrekvenční rušení	16
1.3.2 Vysokofrekvenční rušení.....	18
1.3.3 Impulzní rušení.....	20
1.4 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ PROBLEMATIKY EMC.....	21
1.5 ZÁKLADNÍ POJMY EMC	23
1.6 NORMY EMC	24
1.6.1 Legislativa EMC v České republice, české normy EMC	25
1.6.2 Druhy civilních norem EMC	26
1.7 DĚLENÍ NOREM.....	28
1.7.1 Všeobecné normy EMC (EMC Standards)	28
1.7.2. Normy pro vysokofrekvenční elektromagnetické rušení (RFI Standards)	29
1.7.3 Normy pro elektromagnetickou odolnost (Immunity Standards).....	33
2. ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ A JEHO VLASTNOSTI.....	35
2.1 POPIS ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	35
2.2 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	36
3. ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN	40
3.1 VLASTNOSTI ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ	40
3.2 ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VLNĚNÍ.....	41
3.3 DŮLEŽITÉ JEVIŠTĚ PŘI ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN V ATMOSFÉŘE	42
II. PRAKTICKÁ ČÁST	45
4. VLNOVODY	46
4.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ VLN ŠÍŘÍCÍCH SE VE VLNOVODU.....	46
4.1 IDEÁLNÍ VLNOVOD OBDÉLNÍKOVÉHO PRŮŘEZU	48
4.1.1 Matematický popis vlnění v ideálním obdélníkovém vlnovodu	48
5. REALIZACE VLNOVODU	59
5.1 VÝPOČET A VOLBA PARAMETRŮ VLNOVODU	59
5.2 TECHNICKO REALIZAČNÍ ČÁST	60
ZÁVĚR	63
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	66
SEZNAM OBRÁZKŮ	68
SEZNAM TABULEK.....	69

ÚVOD

Úkolem diplomové práce je návrh a realizace vlnovodu pro pracovní frekvenci 2,45 GHz. Vlnovod je navržen a realizován pro již dříve zkonstruovaný generátor s pracovní frekvencí 2,45GHz. Jak vlnovod, tak generátor, jsou zkonstruovány pro zkoušky interference a susceptibility v rámci EMC. Na základě norem ČSN v rámci EMC, které Česká republika musela přijmout v rámci svého přijetí k Evropské unii, musí všechny elektrické přístroje a spotřebiče splňovat platné normy a standarty. Respektování EMC při vývoji, konstrukci a výrobě všech elektrotechnických a elektronických zařízení je nezbytnou podmínkou pro jejich prodejnost na trzích, které, pokud nejsou splněny, tj. spotřebič neprojde požadovaným atestem, tak jej není možné uvést na trh (spotřebič musí splňovat požadované parametry jak v úrovni vyzařování, tak i v úrovni odolnosti).

Při samotném atestu přístroje nelze určitě zanedbat ekonomické hledisko. Na atestaci přístroje je nutno vynaložit nemalé finanční prostředky a čekací doba se pohybuje v řádech měsíců. Navržený vlnovod umožňuje provést jakési technické „předměření“, které by umožnilo zjistit, jestli vyráběný produkt odpovídá těmto normám. Měření není směrodatné, ale na základě jeho výsledků lze poměrně přesně odhadnout celkové vlastnosti vyzařování měřeného produktu a v případě, že měření ukáže, že produkt nesplňuje požadované normy, tak jeho další atestace prakticky pozbývá na smyslu. Odhad přesnosti závisí na kalibraci měřicího systému s kvalitou referenčního měřicího systému (např. pomocí korekčních křivek).

Diplomová práce je rozdělena na dvě části a to na část teoretickou a část experimentální. V první části jsou popsány tyto problematiky: EMC – Elektromagnetické kompatibility, elektromagnetické vlnění a jeho vlastnosti a šíření elektromagnetických vln. Tyto problematiky jsou navzájem propojeny a v experimentální části je bylo nutné pojmut jako celek.

Experimentální část byla rozdělena na návrh a výpočet parametrů vlnovodu pro frekvenci 2,45GHz a jeho vlastní hardwarovou realizaci.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1.ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

1.1 Úvod k elektromagnetické kompatibilitě

Elektromagnetická kompatibilita (*Electromagnetic Compatibility* – EMC) je nová vědecká disciplína, která vznikla teprve v šedesátých letech a byla poměrně dlouhou dobu známa jen úzkému okruhu odborníků pracujících ve vojenském a kosmickém výzkumu. Lze ji definovat jako schopnost zařízení nebo systému fungovat v daném elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřipustného elektromagnetického rušení pro zařízení a přístroje umístěné v tomto prostředí. EMC je tedy schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení nebo systémů (jak elektronických nebo strojních doplněných elektronikou, tak i biologických), které se nacházejí ve společném elektromagnetickém prostředí bez vzájemného ovlivňování svých normálních funkcí. Je tedy ukazatelem kvality a spolehlivosti techniky. Nedodržení požadavků EMC může mít za příčinu řadu havárií s katastrofálními následky. Systém, který je sám o sobě dokonale spolehlivý, je v provozu bezcenný, pokud není současně elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a EMC jsou neoddělitelné požadavky systému, který má fungovat za každých pracovních podmínek a za všech okolností.

V posledních patnácti letech velmi narůstá význam posuzování elektromagnetické odolnosti prakticky všech elektronických zařízení vůči vlivu rušivých elektromagnetických polí. Tato skutečnost, která je dána současným rozvojem techniky ve všech oblastech včetně dopravy, neustále zvětšuje okruh zařízení, která generují elektromagnetické vlny v rozmanitých frekvenčních pásmech, nejčastěji v pásmu 300MHz-10GHz (komunikační zařízení včetně rozhlasu, televize, radary, mobilní telefony, digitální obvody a zařízení pro přenos dat, počítače, atd.). Tyto vlny se šíří jak volným prostorem, tak i pomocí různých typů vedení a tím ovlivňují a ruší ostatní zařízení, případně i živé organismy. Protože tyto komunikační systémy nelze vypnout a nelze tedy ani plně odstranit jejich rušivé působení na jiná elektronická zařízení, je jedinou schůdnou cestou zvyšování elektromagnetické odolnosti elektronických zařízení vůči vysokofrekvenčním polím, s nimiž tyto systémy pracují.

1.2 Základní členění EMC

EMC můžeme dělit dle mnoha různých hledisek. Nejdůležitější je rozdělení na:

- 1.) EMC biologických systémů
- 2.) EMC technických systémů a zařízení

1.2.1 EMC biologických systémů

EMC biologických systémů zkoumá elektromagnetické pozadí našeho životního prostředí a přípustné úrovně rušivých a užitečných elektromagnetických signálů (přírodních i umělých) spolu s jejich vlivy na živé organismy. Přestože jsou tyto vlivy pozorovány již delší dobu, výsledky dosavadních biologických a biofyzikálních výzkumů nejsou jednoznačné. Biologické účinky elektromagnetického pole závisí totiž na jeho charakteru, době působení i na vlastnostech organismu. Protože nejsou známy receptory pole (vstupy elektromagnetického pole do organismu), posuzují se tyto účinky jen podle nespécifických reakcí organismu. Reakce každého člověka na působení elektromagnetického pole je různá a naprosto individuální a závisí především na fyzických dispozicích každého jedince. Z tohoto důvodu je velmi obtížné analyzovat změny v organismu a na základě statistických výsledků dojít k závěrům. Všechny tyto skutečnosti v obtížnosti posuzování EMC biologických systémů jsou příčinou toho, že v příslušných hygienických normách ve světě existují až řádově velké rozdíly, např. v přípustných dávkách elektromagnetického záření.

Problematikou EMC biologických systémů se zabývají některá výzkumná lékařská pracoviště, která mají za úkol posoudit odolnost lidského organismu vůči elektromag. vlivům, mechanismy jejich působení apod. U vysokofrekvenčních polí (10 kHz až 1000 MHz) jsou relativně nejvíce objasněny tzv. tepelné účinky, tj. účinky, které se objeví jako výsledek ohřevu tkání vystavených vysokým úrovním polí. Příslušné hodnoty prahových výkonových hustot elektromagnetického pole na velmi vysokých kmitočtech, při jejichž překročení může nastat tepelné poškození organismu, jsou uvedeny v Tab.1.

Tab. 1. Prahové výkonové hustoty tepelných účinků a elektromagnetického pole

Pásmo elektromagnet vln [GHz]	Prahová výkonová hustota [mW/cm]
0,3 - 3	40
3 - 30	10
30 - 300	70

Účinky na centrální nervový, srdečně cévní, krvetvorný a imunitní systém se přisuzují tzv. netepelným účinkům, tj. trvalým expozicím polí s nízkou výkonovou úrovní. Ani tyto, ani genetické či karcinogenní účinky však nebyly jednoznačně prokázány. V České republice se této problematice týká Vyhláška ministerstva zdravotnictví č. 408/1990 Sb, která stanovuje poměrně přesné požadavky pro práci a pobyt osob v elektromagnetickém poli. Vyhláška především ukládá každému, kdo provozuje zdroje elektromagnetického záření (např. rozhlasové, televizní, ale i amatérské vysílače a generátory), aby učinil technická opatření, která omezí počty i ozařování osob elektromagnetickým polem na nejmenší možnou míru, nejvýše však na hodnoty stanovené touto vyhláškou. Stanovují se zde největší přípustné velikosti ozáření jak pracovníků, tak i "běžného" obyvatelstva. Velikost ozáření se přitom určuje jako velikost celkové energie záření W , tj. jako součin druhé mocniny intenzity E nebo H a času expozice t v hodinách v jednom pracovním cyklu (pětidenní pracovní týden pro pracovníky, kalendářní týden pro obyvatelstvo). Jak plyne z Tab.2, jsou tyto mezní velikosti ozáření závislé na kmitočtovém pásmu a s rostoucím kmitočtem se rychle zmenšují. Kromě velikosti ozáření jsou v Tab.2 (a tedy ve Vyhlášce 408/1990) stanoveny i mezní úrovně polí (elektrického E_{mez} , magnetického H_{mez} či výkonové hustoty P_{mez}), které nesmějí být překročeny ani krátkodobě. Dodržení těchto hodnot musí výrobce či provozovatel příslušného zařízení zajistit a kontrolovat opakovaným měřením. V určitém rozsahu frekvencí (2,45GHz - 5GHz) se vysokofrekvenčního záření využívá v lékařství, jde o tzv. radioterapii (ozařování) a jedná se podobně jako u chirurgie o lokální (místní) formu léčby. K ničení nádorových buněk se při ní využívá schopností vysokoenergetického záření.

Tab. 2. Mezní úrovně elektromagnetického pole a největší přípustná ozáření

podle vyhlášky Ministerstva zdravotnictví ČR č. 408/1990 Sb.

Veličina	Pracovníci u zdrojů záření				Obyvatelstvo			
	Kmitočet [MHz]				Kmitočet [MHz]			
	0,06-3	3-30	30-300	> 300	0,06-3	3-30	30-300	> 300
E_{mez} [V/m]	500	300	100	-	180	80	30	-
H_{mez} [A/m]	50	-	-	-	15	-	-	-
P_{mez} [mW/cm]	-	-	-	2,65	-	-	-	0,25
W_E [(V/m).hod]	50 000	7000	800	-	5000	700	100	-
W_H [(A/m).hod]	200	-	-	-	20	-	-	-
W_P [(mW/cm).hod]	-	-	-	$0,8K_1$	-	-	-	$0,12K_2$

$$W_E = E^2 t, W_H = H^2 t, W_P = P^2 t;$$

Stacionární antény a zářiče $K_1 = 1$ $K_2 = 1$

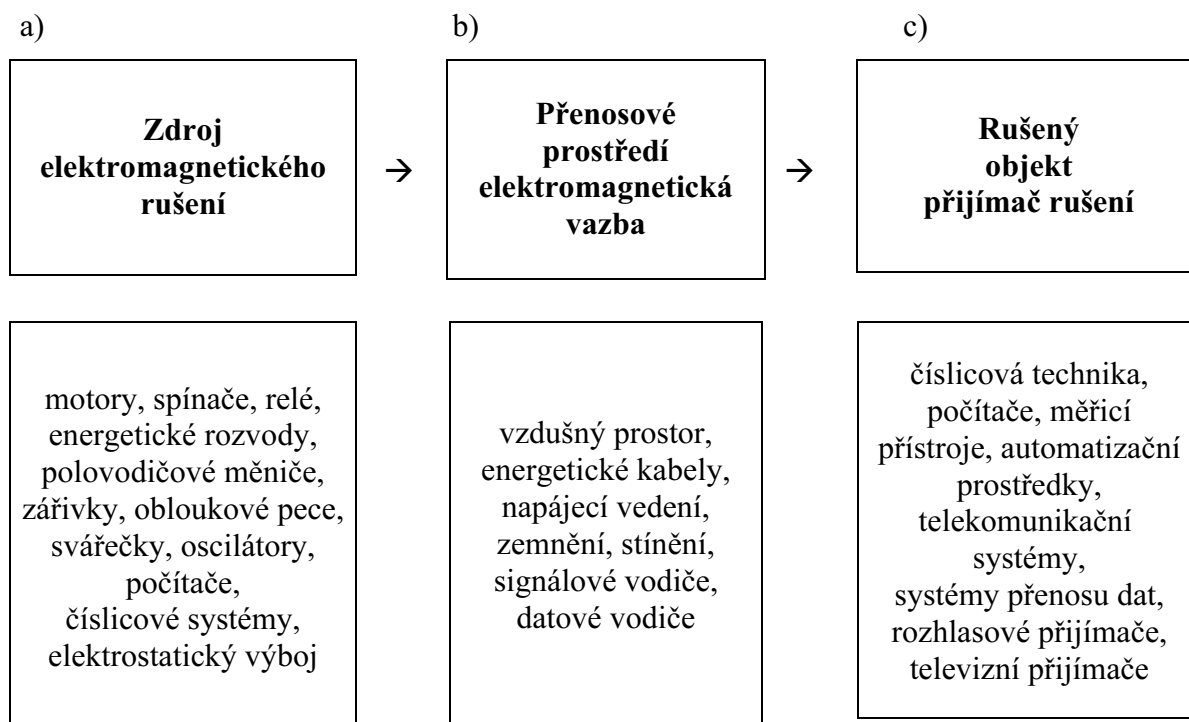
Mechanicky sektorující antény $K_1 = 2,5$ $K_2 = 5$

Otáčející se antény $K_1 = 120$ $K_2 = 360$

1.2.2 EMC technických systémů a zařízení

EMC technických systémů a zařízení můžeme charakterizovat jako vzájemné působení a koexistenci technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů, prostředků a zařízení. Elektromagnetická kompatibilita se tak z původní disciplíny, zabývající se pouze ochranou proti rušení rádiového příjmu, v současnosti rozvinula ve velmi široký obor, který se člení na několik dílčích podoborů a oblastí.

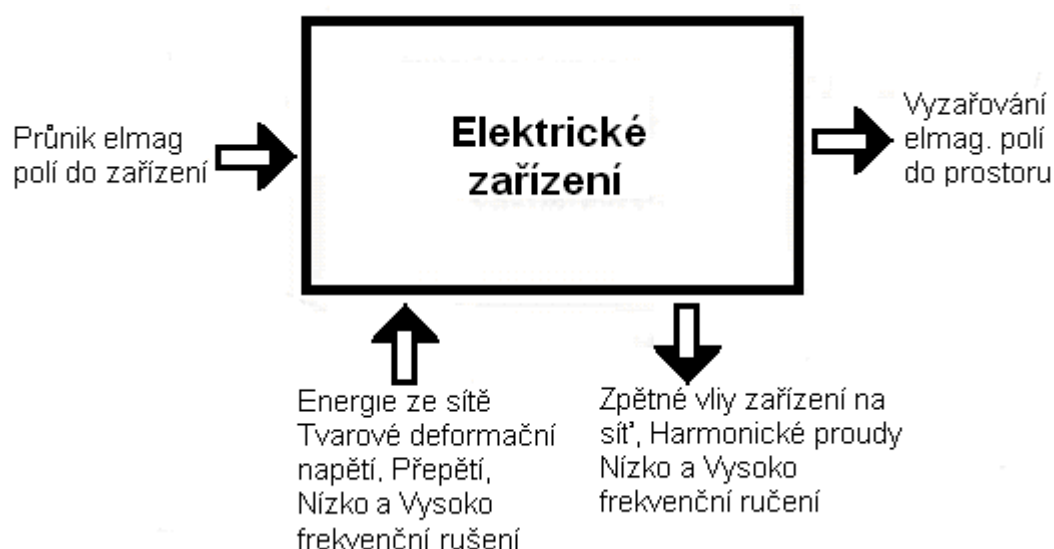
Při zkoumání EMC daného zařízení či systému (a to jak technického, tak i biologického) se vychází vždy z tzv. **základního řetězce EMC**, naznačeného na obr.1. Výše uvedený řetězec zdůrazňuje systémový charakter problematiky EMC, kdy v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky.



Obr. 1. Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí

- a) Zdroje elektromagnetického rušení: Zahrnujeme zde zkoumání obecných otázek, týkajících se mechanismů vzniku rušení, jeho charakteru a intenzity. Patří sem jednak tzv. přírodní (přirozené) zdroje rušivých signálů (Slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře apod.), dále pak tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností ("*man made noise*"), k nimž patří nejrůznější technická zařízení - zapalovací systémy, elektrické motory, výroba, přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné spotřebiče apod.
- b) Elektromagnetické přenosové prostředí a vazby: Zde zkoumáme způsoby cesty, kterou se energie ze zdroje rušení dostává do rušených objektů - přijímačů rušení.
- c) Rušené objekty a přenosové vazby: V dané oblasti se zabýváme klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí elektromagnetickou odolností.

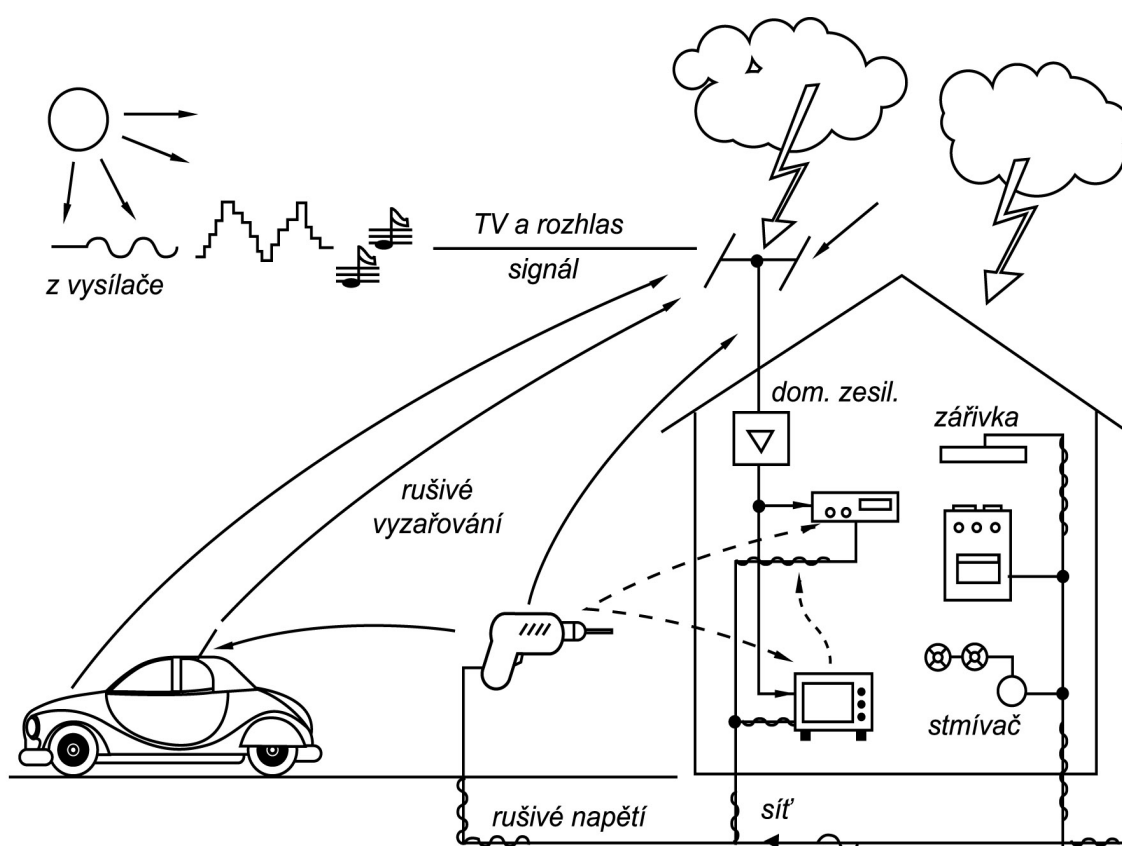
Ve skutečnosti jsou souvislosti jednotlivých tří oblastí základního řetězce EMC mnohem složitější, než je uvedeno na obr.1 Každý systém či zařízení, nebo jeho určitá část, může být současně jak vysílačem (zdrojem), tak i přijímačem elektromagnetického rušení. Přesto můžeme v technické praxi většinou označit element méně citlivý na rušení a generující větší úroveň rušení jako zdroj (vysílač) rušícího signálu, a naopak citlivější element s menší úrovní generovaného rušení za přijímač rušivých signálů. V obou směrech jsou přitom zdroj a přijímač vázány mezi sebou parazitní elektromagnetickou vazbou.



Obr. 2. Rušení působící na elektrické zařízení a rušení způsobené elektrickým zařízením

Ve skutečném řetězci EMC se nikdy nejedná o působení jediného zdroje rušení a jediného přijímače, ale vždy se řeší vzájemné vztahy více všestranně se ovlivňujících systémů. V praxi postupujeme tak, že jeden systém na začátku považujeme za systém ovlivňující (zdroj rušení) a všechny ostatní za systémy ovlivňované (přijímače rušení). 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 projevuje různými způsoby: od zhoršení kvality systémových parametrů, přes částečné nebo úplné omezení systémové funkce, až k havarijním technologickým či bezpečnostním stavům. Vzájemné působení různých systémů je velmi složité a v praxi se snažíme alespoň přiblížit stavu, kdy daný systém nebo zařízení bude absolutně kompatibilní. Uvažujeme, zda rušivé účinky ovlivňujícího systému (zdroje rušení) jsou jeho funkčními parametry

(např. signál rozhlasového vysílače), nebo zda jsou jeho parazitními (rušivými) produkty (např. jiskření na kontaktech, vyšší harmonické apod.). Podle toho pak směřujeme prostředky pro minimalizaci těchto rušivých vlivů převážně na zdroj rušení nebo na rušený objekt, příp. na přenosovou cestu mezi nimi. Svou pozornost zaměříme na jednu ze tří oblastí řetězce EMC a výběr nejvhodnější z nich, jejíž úpravou pak dosáhneme nejvyššího efektu EMC. Vše samozřejmě závisí na konkrétním systému a okolnostech jeho činnosti.



Obr. 3. Příklady zdrojů elektromagnetického rušení

1.3 Druhy elektromagnetického rušení, jeho zdroje a způsoby šíření

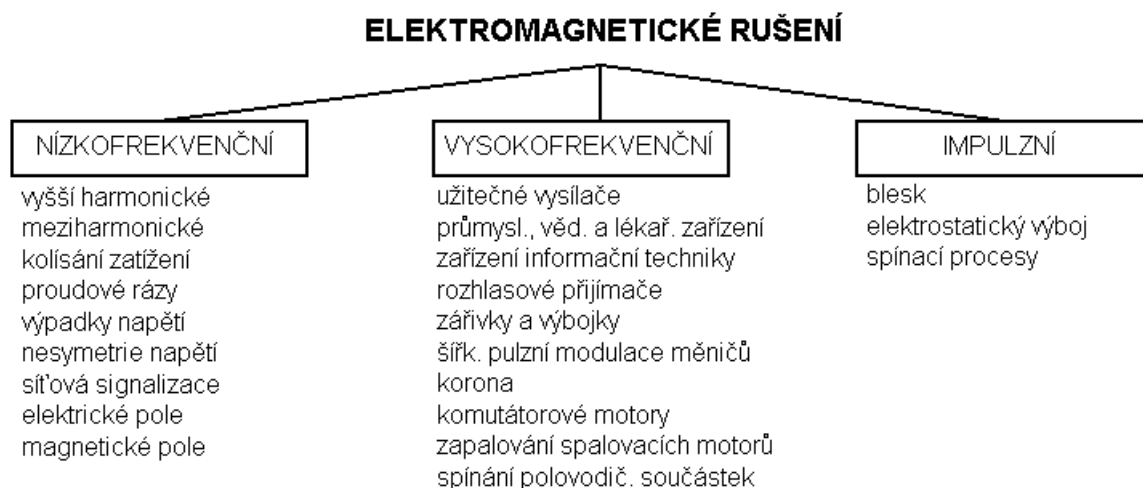
Elektromagnetické rušení je zpravidla vyvoláno činností elektrických přístrojů, zařízení či systémů. Jeho příčinou může být:

- a) Elektromagnetický jev jako žádoucí užitečný produkt činnosti, který pronikl do nepatřičných míst elektromagnetického okolí a chová se tam jako nežádoucí signál (např. užitečný signál radiotelefonu, rušící činnost zabezpečovacího systému objektu, elektromagnetické pole unikající z pracovního prostoru zařízení pro vysokofrekvenční ohřev).
- b) Elektromagnetický jev jako nežádoucí vedlejší produkt činnosti (např. vyšší harmonické proudy vznikající při činnosti polovodičového měniče, přepětí při spínání zátěží v rozvodné síti, rádiové rušení vyvolané jiskřením komutátoru elektromotoru).
- c) Mimo těchto umělých zdrojů existují i přírodní zdroje elektromagnetického rušení, jako např. atmosférické výboje

Od zdroje k rušenému objektu se elektromagnetické rušení šíří:

- a) Po vodičích (silových nebo datových) - jako elektrické napětí resp. proud; mezi jednotlivými vodiči se může rušení šířit pomocí kapacitní vazby (kapacitní proud je úměrný strmosti změn rušivého napětí), nebo pomocí indukční vazby (indukované napětí je úměrné strmosti změn rušivého proudu),
- b) Prostorem - jako elektromagnetické pole, definované elektrickou složkou (intenzita el. pole ve V/m) nebo magnetickou složkou (intenzita magnetického pole v A/m).

Základním kritériem pro klasifikaci jednotlivých druhů elektromagnetického rušení je umístění v kmitočtovém spektru. Všeobecně rušení dělíme na nízkofrekvenční, vysokofrekvenční a impulsní.



Obr. 4. Druhy elektromagnetického rušení

1.3.1 Nízkofrekvenční rušení

Nízkofrekvenční rušení je představované kmitočtem sítě a jeho harmonickými (do max. kmitočtu cca 2,5 kHz). Nízkofrekvenčním rušením je, až na výjimky, míněno zhoršení kvality síťového napájení rušením, šířícím se po napájecím vedení veřejných rozvodných sítí. Kvalita napájení el. energií z veřejné distribuční sítě je dána normou [ČSN EN 50160].

Kvalitu síťového napájení ovlivňují především tyto druhy rušení:

Zatížení nesinusovým proudem obsahujícím vyšší kmity harmonického síťového kmitočtu: Hlavními zdroji tohoto rušení jsou výkonové polovodičové měniče (tyristorové i diodové usměrňovače, fázově řízené střídavé měniče napětí) a zařízení s přesyceným magnetickým obvodem. Polovodičové měniče mohou vyvolat i elektromagnetické interference v systému měnič - zátěž, způsobené vyššími harmonickými kmity výstupního střídavého napětí měniče kmitočtu, nebo střídavou složkou usměrněného napětí usměrňovače.

Zatížení nesinusovým proudem obsahujícím meziharmonické resp. širokopásmové kmitočtové spektrum: Hlavními zdroji rušení jsou obloukové svářečky a obloukové pece, výkonové polovodičové měniče s šířkově pulzní modulací, zejména s tranzistory IGBT (měniče kmitočtu, spínané zdroje).

Kolísání zatížení, které je příčinou kolísání napájecího napětí: Zdrojem tohoto rušení jsou odporové a obloukové svářečky, obloukové pece, velké motory s proměnným

zatížením (např. válcovenské pohony), dvouhodnotově regulované spotřebiče (např. tepelné).

Zatížení proudovými rázy: Zatížení proudovými rázy vyvolává krátkodobé poklesy napájecího napětí pod přípustnou 10 % mez. Těmi může být ohrožena funkce řady elektronických přístrojů, způsobeno vypínání ochran a spínacích přístrojů, zhášení výbojek, změna rychlosti nebo zastavování motorů. Zdrojem rušení mohou být spínací proudové rázy velkých spotřebičů (transformátorů a motorů).

Poruchy a spínací procesy v rozvodných sítích: Způsobující krátkodobé výpadky napájecího napětí. Účinky těchto poruch jsou podobné předchozímu případu.

Nesymetrické zatížení: Způsobuje napětíovou nesymetrii napájecího napětí trojfázových systémů. Zdrojem rušení jsou především velké jednofázové spotřebiče (trakční měniče, jednofázové el. pece).

Rušení síťovou signalizací: Signály hromadného dálkového ovládání, nízkofrekvenční nosné systémy energetických vedení, síťové značkovací systémy. Rušení je vyvoláno injektováním nosných signálů v rozsahu 110 až 500 Hz, nebo krátkodobých pulzů do napájecího napětí. Při dodržení předepsaných úrovní by nemělo docházet k elektromagnetické interferenci, jinak by účinky byly podobné vyšším harmonickým, meziharmonickým, případně kolísání napětí.

Zvláštní skupinu tvoří takové nízkofrekvenční rušení, které se na rozdíl od všech předchozích případů nešíří po napájecím vedení, ale prostorem jako pole:

Rušení elektrickým polem síťového kmitočtu: V okolí vedení vvn, dosahující intenzity až několik kV/m.

Rušení magnetickým polem síťového kmitočtu: V okolí vodičů protékaných velkým proudem (vedení vvn, příklady k elektrodám el. obloukových pecí, rozvodná zařízení zejména v okamžiku zkratu apod.). Intenzita magnetického pole může krátkodobě dosáhnout až několik set A/m.

Rušivé vlivy těchto polí mohou nepříznivě ovlivnit funkci příp. způsobit poruchu prakticky jakéhokoliv elektrického přístroje, zařízení nebo systému, pokud není dostatečně robustní. Předmětem zkoumání jsou i vlivy na živé organismy.

1.3.2 Vysokofrekvenční rušení

Vysokofrekvenční rušení se odehrává v kmitočtovém pásmu od 9 kHz až do stovek GHz. Může se šířit jak po vodičích (napájecích i datových) - zde především v nižší části spektra (zpravidla se sleduje do cca 30 MHz), tak prostorem jako pole (zpravidla se sleduje od 30 MHz do současné obvyklé hranice 1 GHz). Ve srovnání s nízkofrekvenčním rušením nesouvisí vysokofrekvenční rušení zpravidla bezprostředně s kvalitou síťového napájení, jeho účinek se proto projevuje především v informační části rušených systémů - v měřicích, řídicích, komunikačních obvodech apod., kde rušivý signál či šum může být superponován k užitečnému signálu nebo ho může i zcela potlačit. Vysokofrekvenční rušení není o nic méně nebezpečné, protože narušením informačních funkcí může ohrozit rušené zařízení na velmi citlivém místě.

Na rozdíl od uvedeného úzkého výběru druhů vysokofrekvenčních rušivých signálů a jejich účinků existuje široký okruh jejich zdrojů - viz též [ČSN IEC 1000-2-3]:

Užitečné vysílače: Tímto termínem jsou označována zařízení určená k výrobě a šíření vysokofrekvenčních signálů. Pokud tyto signály proniknou do zařízení, jimž nejsou určeny, stávají se signály rušivými. Do této skupiny se řadí rozhlasové a televizní vysílače, radiokomunikační zařízení, radary a komunikační systémy po energetických vedeních. Kmitočtový rozsah rušivých signálů je velmi široký - elektromagnetické pole od cca 150 kHz dlouhovlnných rádiových vysílačů do cca 30 GHz radarových vysílačů, dále pak signály šířené po vodičích již od dolní hranice vysokofrekvenčního rušení. Kmitočtová pásma jsou vyhrazena mezinárodními úmluvami, takže k nežádoucím vzájemným interferencím by nemělo docházet; není ovšem vyloučeno rušení jiných zařízení..

Průmyslová, vědecká a lékařská (PVL) vysokofrekvenční zařízení: zařízení koncipovaná pro výrobu a užívání vysokofrekvenční energie na malém prostoru, viz též [ČSN EN 55011]. Patří sem např. zařízení pro průmyslový vysokofrekvenční ohřev, svařování a lepení, vědecká zařízení pro vybuzení plazmy, lékařská diatermie apod. Některá z těchto zařízení pracují opět v kmitočtových pásmech vyhrazených Mezinárodní

telekomunikační unií (ITU), opět od dolního okraje vř pásma až do kmitočtů řádově stovky GHz. Mohou vyzařovat rušivé signály po vodičích i v prostoru.

Zařízení informační techniky (ZIT): zařízení určená pro příjem, zpracování a reprodukci dat, viz též [ČSN EN 55022]. Generované rušivé signály jako v předchozím případě.

Rozhlasové a televizní přijímače, monitory a videorekordéry: generují úzkopásmové rušivé signály způsobené lokálními oscilátory, viz též [ČSN EN 55013].

Zářivky a výbojky: - viz též [ČSN EN 55015]. Rušivé signály jsou tvořeny širokopásmovým šumem na elektrodách trubice; u svítidel s aktivním předřadníkem se navíc vyskytuje úzkopásmové rušení na kmitočtu oscilátoru (cca 20 až 50 kHz).

Modulované výkonové polovodičové měniče zejména s tranzistory IGBT a MOSFET: měniče kmitočtu, pulzní měniče, zdroje nepřerušovaného napájení, spínané zdroje; modulační kmitočty projevující se jako rušení dosahují od nízkofrekvenčního pásma až do řádově stovek kHz.

Korona na vedení vvn: generuje širokopásmové rušivé elektromagnetické pole o kmitočtu až několik MHz - viz též [ČSN CISPR 18-1].

Další skupina zdrojů vysokofrekvenčního rušení vytváří rušivé signály jako posloupnost vysokofrekvenčních tlumených přechodných jevů. Vysokofrekvenční kmity vznikají periodickým buzením RLC kmitavých obvodů, v nichž často působí i parazitní indukčnosti a kapacity obvodu.

Komutátorové motory - např. elektrického nářadí a jiných podobných spotřebičů - viz též [ČSN EN 55014]. Vysokofrekvenční rušení je vyvoláno zejména činností komutátoru.

Zážehové systémy spalovacích motorů - viz též [ČSN CISPR 12].

Spínání polovodičových součástek v obvodech výkonových polovodičových měničů.

1.3.3 Impulzní rušení

Při impulzním rušení je rušivý signál tvořen impulzem (krátkodobá změna elektromagnetického rušivého signálu s následným rychlým návratem k výchozí hodnotě), nebo skupinou impulzů; rušivé signály jsou jevem jednorázovým nebo náhodně se opakujícím, přičemž doba mezi následujícími rušivými signály je mnohem delší než doba trvání rušivého signálu. Impulz je charakterizován amplitudou, dobou náběhu (např. intervalem mezi dosažením 10 % a 90 % amplitudy) a dobou trvání (např. šířkou impulzu v 50 % amplitudy). Impulzní rušení může vyvolat elektromagnetickou interferenci jak s informační částí rušeného objektu, tak i s jeho výkonovou částí, pokud má rušivý signál dostatečnou energii. Základní impulzní rušivé jevy a jejich zdroje uvádí norma [ČSN IEC 1000-2-3]:

Atmosférický výboj – blesk: Je tvořen mnohonásobným jiskrovým výbojem velké amplitudy a strmosti proudu mezi mraky nebo mezi mrakem a zemí. Proud tohoto výboje nebo proud v zemním svodiči vytváří strmý impulz nebo tlumený vysokofrekvenční zážeh magnetického pole značné intenzity, které může na rušený objekt působit přímo, nejčastěji indukuje v blízkých i vzdálených napájecích nebo datových vedeních přepětový impulz resp. skupinu impulzů. Tyto rušivé napěťové impulzy mají značnou amplitudu (omezenou až přeskokovou úrovní vedení, tj. např. ve vnitřních rozvodných sítích nn asi 6 kV) i značný energetický obsah, umožňující na nízké zátěžné impedanci vznik proudových impulzů až několik kA. Rušivé účinky na výkonové i informační části rušených zařízení jsou zřejmé.

Elektrostatický výboj: jako vyrovnání elektrického náboje mezi tělesy o rozdílném elektrostatickém potenciálu; tento potenciálový rozdíl vzniká třením dielektrických materiálů a přenáší se dotykem nebo elektrostatickou indukcí. Velikost potenciálového rozdílu závisí na vlastnostech materiálu (tj. pozici v tzv. triboelektrické řadě) a izolačních schopnostech prostředí, může dosáhnout i více než 15 kV. Vyrovnání náboje se děje velmi strmým a krátkým proudovým impulzem (trvání řádově desítky ns). Zdrojem elektrostatických výbojů mohou být technologické nebo dopravní procesy, často i činnost lidské obsluhy. Vzhledem k poměrně nízkému energetickému obsahu rušivého signálu jsou ohroženy informační (elektronické) části rušeného zařízení, zejména elektronické součástky s velkým vstupním odporem - řízené polem.

Spínací procesy ve výkonových obvodech: Rušivým jevem jsou proudové a napětové rázy, vznikající přechodovými jevy při spínání vedení vn a vvn, spínání transformátorů, reaktorů a kondenzátorů, působení pojistek a jističů. V rozvodných systémech nn jsou častým zdrojem impulzního rušení spínací přepětí, vznikající kontaktním přerušením proudu do indukční zátěže; opakované přerušování a znovuzapalování oblouku mezi rozpojovanými kontakty spínače vytváří rychlý přechodový jev - řadu strmých a krátkých napětových impulzů s amplitudou až několik kV. Energetická úroveň rušivých signálů je dostatečná i pro rušení výkonových částí rušeného zařízení.

1.4 Základní členění problematiky EMC

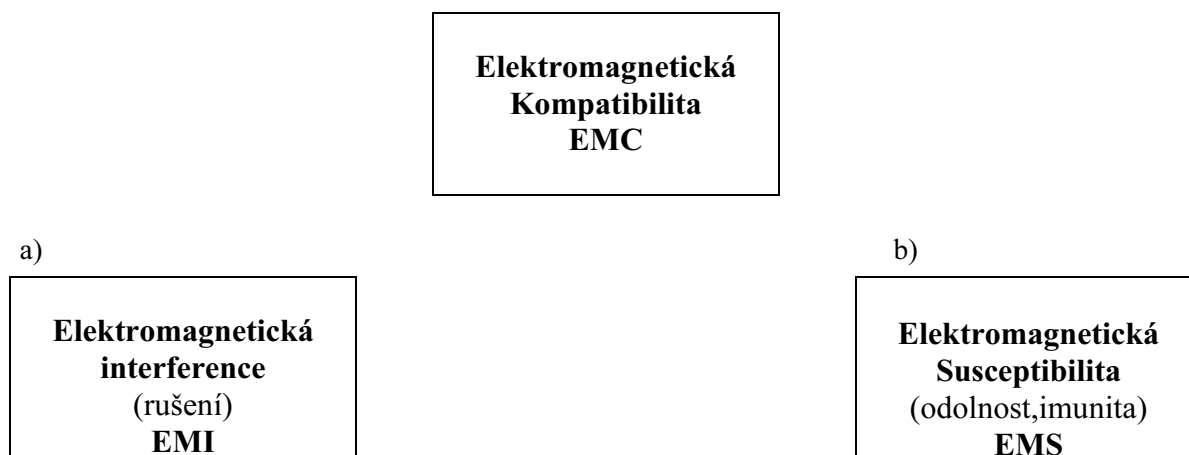
Elektromagnetická kompatibilita se z původní disciplíny, zabývající se pouze ochranou proti rušení radiového příjmu, v současnosti rozvinula ve velmi široký obor, který se člení na několik základních podoborů. Mezi základní dělení EMC patří rozdělení na dvě oblasti:

a)

Elektromagnetická interference (EMI) (*Electromagnetic Interference*) neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených systémů. EMI se zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních přenosových cest. Kompatibility celého systému se dosahuje technickými opatřeními především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

b)

Elektromagnetická susceptibilita či imunita (EMS) (*Electromagnetic Susceptibility* či *Electromagnetic Immunity*) neboli elektromagnetická citlivost či elektromagnetická odolnost vyjadřuje schopnost zařízení pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, v němž se vyskytuje elektromagnetické rušení. EMS se zabývá především technickými opatřeními, které zvyšují u objektu (příjímače rušení) jeho elektromagnetickou imunitu, tedy jeho odolnost proti vlivu rušivých signálů. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

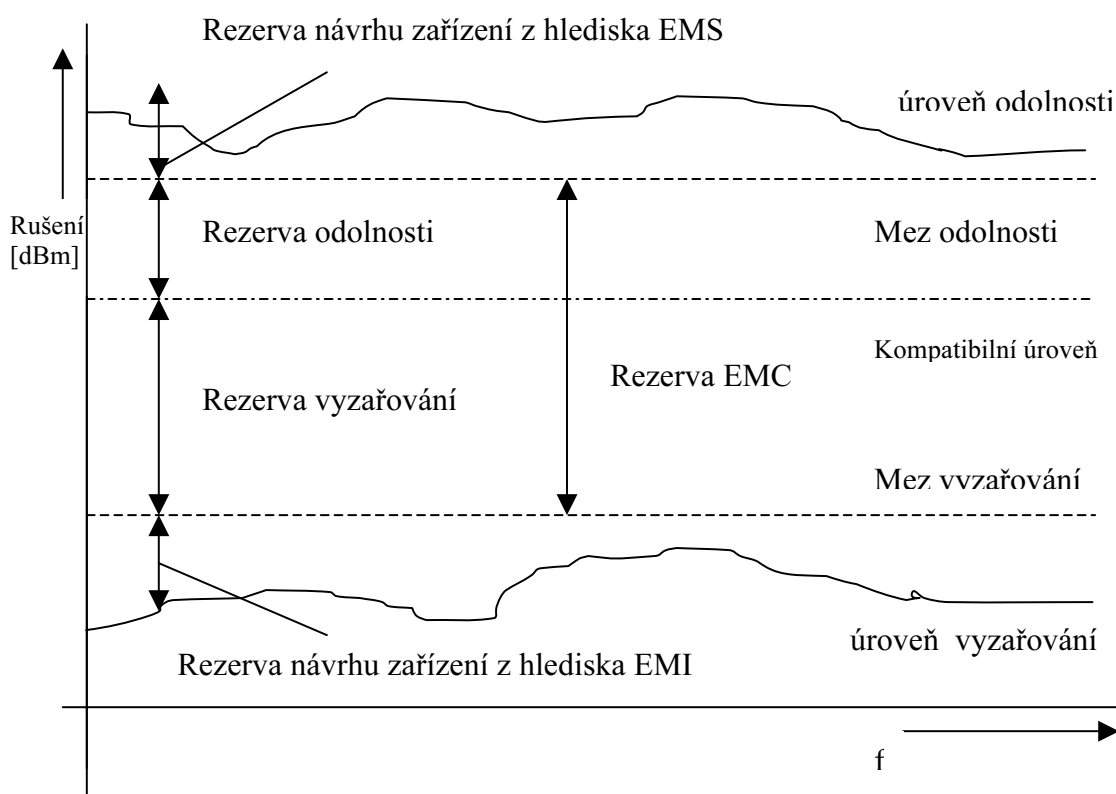


Obr. 5. Základní členění problematiky EMC

EMI a EMS v sobě zahrnují celou řadu často společných kroků a nezbytných postupů. Jednou z nejdůležitějších oblastí je měření elektromagnetické interference, především měření rušivých signálů a jejich identifikaci. Zahrnuje měřicí metody a postupy pro kvantitativní hodnocení vybraných parametrů, hlavně na rozhraních zdrojů a přijímačů rušení. Problematika měření, která je pro závěrečné posouzení EMC daného zařízení vždy rozhodující, je navíc komplikovaná tím, že i samotné měřicí zařízení je (či může být) zdrojem a současně přijímačem rušivých signálů, což je nutno při měření respektovat (technicky, kalibračně, početně). Při návrhu a vývoji daného zařízení sehrává důležitou úlohu počítačové simulace a modelování EMS i EMI, k čemuž se využívá rozsáhlých softwarových produktů různých firem. Tímto způsobem je možno realizovat optimální technický návrh zařízení z hlediska EMC.

1.5 Základní pojmy EMC

Každé elektrotechnické zařízení je současně jak zdrojem elektromagnetického rušení, tak i jeho přijímačem, pracujícím v určitém elektromagnetickém prostředí. Pro každé takové zařízení definuje obecná norma ČSN-IEC 1000-1-1 některé základní pojmy, jejichž základní vztah je vysvětlen na obr.6



Obr. 6. Úroveň a mezní vyzařování

Úroveň vyzařování je rušení generované samotným konkrétním spotřebičem či zařízením, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v dBm, v závislosti na kmitočtu (dle obr.5). **Mez vyzařování** je maximální přípustná (tj. normami povolená) úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje tzv. **rezervu návrhu** daného zařízení z hlediska EMI. Podobně **úroveň odolnosti** je maximální úroveň rušení působícího na konkrétní zařízení, při němž nedochází ještě ke zhoršení jeho provozu a **mez odolnosti** je nejnížší normou požadovaná úroveň odolnosti daného zařízení. Rozdíl obou

těchto úrovní udává **rezervu návrhu** zařízení z hlediska jeho odolnosti EMS. Rozdíl mezi (mezi) odolností a meze (mezi) vyzařování je nazýván **rezervou (rozpětím) EMC** daného zařízení. Výše uvedená norma zavádí rovněž pojem tzv. **kompatibilní úrovně** (obr.6), jakožto úrovně rušení. Rozdíly mezi vyzařování a mezi odolností vůči této kompatibilní úrovni (v [dB]) jsou nazývány **rezerva (rozpětí) vyzařování** a **rezerva (rozpětí) odolnosti**.

1.6 Normy EMC

V praxi není možné dosáhnout absolutní elektromagnetické kompatibility jakéhokoli zařízení, proto je nutné stanovit jednotné normy a meze maximálních přípustných hodnot rušivých signálů pro určitý typ zařízení, přesné a reprodukovatelné podmínky pro jejich měření a ověřování odolnosti. Chceme-li exportovat výrobky českého průmyslu, musí naše výrobky těmto normám vyhovovat. Ve všech zemích EU je v platnosti jednotná přísně sledovaná a sankcionovaná direktiva č. 89/336/EEC, předepisující obecné požadavky EMC pro uvedení přístroje či zařízení na trh. Bez splnění všech těchto požadavků a jeho závazného prokázání je prodej zařízení (ale i jeho vystavení či reklama) finančně sankcionován a zakázán.

Respektování vytvořených norem zamezí nežádoucím emisím a zvyšuje odolnost zařízení a systémů proti "elektromagnetické agresivitě" prostředí.

Historicky vůbec první existující normy a předpisy pro oblast EMC jsou **Vojenské normy (Military Standards)**, používané v mnoha armádách světa. Z nich se později vyvinuly i příslušné civilní normy. To, že byly převzaty normy z vojenské sféry do civilní je důsledkem toho, že vojenská zařízení představují často špičku technických možností v dané oblasti. Navíc jsou užívána ve velmi rozmanitých a obtížně definovatelných pracovních podmínkách, a proto musí být testována za náročných podmínek. Kromě rušivého vyzařování se tyto normy zabývají i elektromagnetickou odolností vojenských technických zařízení. Vojenské normy byly prvními a po mnoho let jedinými normami, které se testováním imunity podrobně zabývaly. Proto byly po dlouhou dobu a v širokém rozsahu používány i v civilním sektoru, a to jako normy doporučené. Velmi propracovaná soustava norem EMC, označovaná jako **MIL-STD**, vznikla především v amerických ozbrojených silách US Army, US Navy a US Air Force. Prostřednictvím NATO se tyto normy rozšířily do celé západní Evropy a byly převzaty armádami těchto zemí.

Vojenské normy MIL-STD se od civilních norem EMC liší především tím, že se v nich pro měření a vyhodnocování elektromagnetického rušení používá detekce špičkových hodnot (*peak detection*), zatímco civilní normy jsou založené na metodice CISPR, používající detekci kvazi-špičkových hodnot (*quasi-peak detection*). Tento rozdíl je dán tím, že CISPR je zaměřen především na ochranu rádiového příjmu a zvukového signálu před rušením, zatímco pro vojenské účely je hlavním cílem vyhodnocení špičkových hodnot rušení a jeho vlivu na vojenská zařízení, zejména při testování účinnosti jejich stínění špičkovým detektorem. K dalším rozdílům vůči civilním normám patří některé jiné doporučené mezní hodnoty elektromagnetického vyzařování a jiný (obvykle širší) měřicí kmitočtový rozsah.

1.6.1 Legislativa EMC v České republice, české normy EMC

V bývalém Československu se problematika EMC týkala jen několik zákonů, a to většinou pouze v souvislosti s jinými zákony pro určité oblasti především spojovací techniky. Podle těchto zákonů se postupovalo až do konce roku 1994, kdy se od 1.1.1995 staly všechny platné české (státní) normy (ČSN) nezávaznými. Problematika dodržování EMC technických zařízení tak zůstala v České republice legislativně nezajištěna.

V souvislosti s všeobecnými přípravami přistoupení České republiky k Evropské unii byl po několikaleté přípravě v ČR v lednu 1997 přijat zákon č.22/1997 Sb. o technických požadavcích na výrobky, který nabyl účinnosti dnem 1.9.1997. Tento zákon byl novelizován a doplněn zákonem č. 71/2000 Sb. ze dne 24. 2. 2000. Na tyto zákony navázala rada vládních nařízení ve formě prováděcích vyhlášek k jeho praktickému zajištění.

Od roku 1997 probíhá v České republice intenzivní harmonizace všech národních technických norem. Tyto normy, které si podržely tradiční označení ČSN vznikají přebíráním (tj. překladem) odpovídajících harmonizovaných norem IEC, CISPR, EN, příp. ETS; jsou pak označeny jako ČSN IEC, ČSN CISPR, ČSN EN, případně ČSN ETS. Za touto skupinou písmen následuje skupina čísel, která je stejná jako v příslušné výchozí mezinárodní normě.

Příslušná ČSN se stává harmonizovanou, pokud splnění jejich technických požadavků zajistí naplnění zásad zákona č.22/1997 Sb. a pokud byla zveřejněna v oficiálním Věstníku

Úřadu pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví v Praze. Zařízení, které splňuje ustanovení harmonizovaných českých norem, pak automaticky vyhovuje i příslušným evropským či mezinárodním normám a lze je tedy exportovat i na tyto trhy.

V České republice je koordinačními pracemi v oblasti všech norem pověřen **Český normalizační institut CNI** (www.csni.cz) v Praze. Jeho **technická normalizační komise TNK 47** postupně reviduje existující české normy ČSN (tj. i dřívější československé státní normy) v oblasti EMC a harmonizuje je s normami IEC, CISPR a EN. Přebíráním a překladem těchto světových a evropských norem tak vznikají harmonizované normy ČSN s označením ČSN IEC, ČSN CISPR či ČSN EN.

1.6.2 Druhy civilních norem EMC

V rámci **Evropská komise pro normalizaci v elektrotechnice (CENELEC)** se otázkami EMC zabývá především technická komise TC 110. Na základě dohody o spolupráci přebírá tato komise od **Mezinárodní elektrotechnická komise (IEC)** již existující mezinárodní normy IEC a IEC CISPR beze změn a současně předkládá IEC požadavky a návrhy na vypracování nových norem. Takto vznikající, příp. přebírané normy lze podle jejich charakteru dělit do tří skupin:

Základní normy: (*Basic Standards*) definují problematiku EMC a určují základní všeobecné podmínky pro dosažení elektromagnetické kompatibility u libovolného technického produktu. Tyto normy nestanovují žádné konkrétní meze rušení či meze odolnosti, ani žádná jejich vyhodnocovací kritéria.

Kmenové normy: (*Generic Standards*) specifikují minimální soubor požadavků (jak pro vyzařování, tak pro odolnost) a testovacích metod EMC pro všechna technická zařízení pracující v určitých typech elektromagnetických prostředí (obytná prostředí, průmyslová prostředí, speciální prostředí apod.).

Předmětové normy: (*Product Standards*) čili normy výrobku (výrobní normy) nebo normy skupin výrobku definují detailní požadavky a testovací metody EMC pro jednotlivé výrobky a skupiny podobných výrobků a zařízení. Tyto normy musejí být v souladu se základními a kmenovými normami. Předmětové normy mohou být použity na následující skupiny výrobků s celkem asi 50 různými individuálními produkty:

- spotřebiče pro domácnost, kancelářské stroje a přístroje, přenosné elektrické nářadí a podobné elektrické přístroje s výjimkou zařízení informační techniky (ZIT),
- průmyslová zařízení s výjimkou ZIT,
- zařízení informační techniky a telekomunikační zařízení,
- televizory a podobná zařízení,
- dopravní a přepravní zařízení,
- účelová zařízení,
- lékařská zařízení,
- měřicí a testovací zařízení.

Všechny výše uvedené typy norem mají podle stupně své legislativní podpory buď závazný nebo pouze doporučující charakter. **Závazné normy** (*Regulatory, Mandatory Standards*) mají charakter zákona. Vyrábět a prodávat výrobky, které těmto normám nevyhovují, je nelegální. V Evropské unii je takovou normou především Směrnice Rady Evropské unie č.89/336/EEC z roku 1989. V ní uvedené zásady musí být dodrženy a respektovány. V USA mají sílu zákona federální normy z Federální komunikační komise FCC (*Federal Communications Commission*).

Doporučené normy (*Voluntary Standards*) jsou projevem určité dohody a mají jen doporučující charakter. Vznikají obvykle jako výsledek společné práce výrobců a normalizačních organizací. V USA jde např. o ASTM (*American Standards and Testing Materials*) v oblasti materiálu, nebo o SAE (*Society of Automotive Engineers*) v automobilovém průmyslu.

Podobně existují doporučené normy od IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), EIA (*Electronic Industries Association*) a dalších profesních zájmových organizací. Koordinačním orgánem normalizační činnosti v USA je **Americký národní normalizační institut ANSI** (*American National Standards Institute*), který často přejímá normy od těchto organizací. Takto převzaté normy pak jsou označovány jako ANSI/ASTM, ANSI/IEEE atd. V Evropě je situace v této oblasti více centralizovaná a koordinace jednotlivých normalizačních organizací se uskutečňuje prostřednictvím nadnárodních organizací, především CENELEC a jeho komisí.

Současně je třeba si uvědomit, že přestože jde „pouze“ o doporučené normy, jejich vliv na trhu výrobku může být prakticky stejný jako u závazných norem. Doporučené normy jsou totiž často brány jako prodejní specifikace a jejich nesplnění je bráno v úvahu při pojišťovacích či náhradových řízeních apod.

1.7 Dělení norem

Ve své práci jsem musel vyhledat a především dodržet všechny platné normy pro EMC v ČR. Dodržení norem je hlavním předpokladem pro bezchybný a bezpečný chod mnou realizovaného vlnovodu.

V rámci základního dělení celé problematiky EMC na oblast EMI a oblast EMS, lze normy rozdělit na tři skupiny :

1. **Normy zabývající se obecnou problematikou EMC; tzv. EMC Standards.**
2. **Normy elektromagnetického rušení; tzv. Emission Standards.**
3. **Normy odolnosti proti rušení; tzv. Immunity Standards.**

Uvedené členění je velmi obecné a jenom rámcové. Přesné a jednoznačné dělení je komplikováno tím, že některé normy se týkají současně jak požadavku na rušení, tak i na odolnost vůči němu a patří tak do první i druhé skupiny. V devadesátých letech i v současné době přitom vzniká a je každoročně schvalováno mnoho dalších nových či nově harmonizovaných norem, a to ze všech tří výše uvedených tematických skupin.

1.7.1 Všeobecné normy EMC (EMC Standards)

Zde můžeme zařadit především obecné normy ČSN EN 50081 a ČSN EN 50082. Jde o kmenové normy (*Generic Standards*) vycházející ze základních norem a stanovující všeobecné požadavky EMC, které mají splňovat jakékoli elektrické spotřebiče či přístroje určené k provozu v určitém typu prostředí. Obě normy přitom rozlišují:

- a) prostředí obytná, obchodní a prostředí lehkého průmyslu,
- b) prostředí průmyslová, příp. speciální.

ČSN EN 50081 - Elektromagnetická kompatibilita – všeobecná norma týkající se vyzářování se ve své **Části 1** týká prostorů obytných, obchodních a lehkého průmyslu,

tedy míst charakterizovaných zejména tím, že jsou napájena přímo z veřejné napájecí sítě nízkého napětí. Účelem normy je stanovení mezních hodnot elektromagnetického vyzařování v kmitočtovém rozsahu 0 až 400 GHz a příslušných zkušebních metod. Tyto mezní hodnoty jsou shrnuty v Tab.3 Příslušné meze vyzařování byly stanoveny tak, aby bylo zajištěno, že běžně generovaná rušení v prostorách specifikovaných normou nepřekročí úroveň, která by narušila činnost jiných běžných elektrických a elektronických přístrojů. Tyto meze jsou přitom pouze základní a nezaručují nerušený provoz jiných vysoce citlivých přístrojů a zařízení, umístěných v bezprostřední blízkosti zdrojů rušení. Např. u rozhlasových a televizních přijímačů je to vzdálenost zdroje rušení od antény přijímače menší než 10 m. Jednotlivé mezní hodnoty a požadavky na zkoušení jsou normou specifikovány pro každý vstup zařízení, tj. pro každé rozhraní daného přístroje s vnějším elektromagnetickým prostředím. Tato všeobecná norma EMC se používá jen v těch případech, kdy pro dané zařízení neexistuje výrobková norma EMC či norma EMC pro skupinu výrobku. Norma se přitom netýká přístrojů a zařízení určených pro vysílání elektromagnetických vln pro radiokomunikační účely.

V části 2 normy ČSN EN 50082, tedy ČSN EN 50082-2, se navazuje ve všech obecných specifikacích na předchozí Část 1 a definuje požadavky na elektromagnetickou odolnost zařízení určených pro průmyslové prostředí jak vnitřní, tak i vnější. Přístroje, na něž se tato část normy vztahuje, nejsou určeny pro přímé připojení do veřejné napájecí sítě, ale do rozvodných sítí napájených z transformátoru vysokého či velmi vysokého napětí, určeného k napájení instalací ve výrobních a podobných průmyslových závodech. Norma zároveň uvádí, že dominantní zdroje rušení v průmyslových prostorech je možno některými opatřeními omezit tak, že se vytvoří elektromagnetické prostředí, pro něž lze použít normu ČSN EN 50082-1 stejně jako pro prostory obytné, obchodní a lehkého průmyslu.

1.7.2. Normy pro vysokofrekvenční elektromagnetické rušení (RFI Standards)

Tato oblast EMC je zakotvena v mezinárodních normách CISPR 11 až 23, které jsou postupně přebírány do evropských harmonizovaných norem rady EN 55000. Normy CISPR z této oblasti patří k vůbec nejstarším existujícím normám EMC; vznikly již v padesátých letech, tedy daleko dříve, než se EMC etablovala jako samostatná vědeckotechnická disciplína a byly původně koncipovány výhradně pro ochranu rádiového příjmu před rušením. V průběhu let došlo k jejich harmonizaci pro evropské prostředí. Nyní jejich české ekvivalenty zahrnují veškerou problematiku vysokofrekvenčního

elektromagnetického rušení. Uvedené normy jsou jak základní (např. CISPR 16), kmenové i předmětové (např. CISPR 22).

ČSN EN 55011 - Meze a metody měření charakteristik elektromagnetického rušení od průmyslových, vědeckých a lékařských (PVL) vysokofrekvenčních zařízení odpovídá původní normě CISPR 11 a platí pro zařízení určená ke generování či využívání vysokofrekvenční energie pro průmyslové, vědecké a lékařské účely a pro elektrojiskrová zařízení. Elektrická zařízení PVL jsou touto normou rozdělena do dvou tříd:

Zařízení třídy A

jsou elektrická zařízení vhodná k používání ve všech objektech kromě obytných prostorů (domácností), případně zařízení, která nejsou přímo připojena na rozvodnou síť nízkého napětí obytných budov. Mezní hodnoty rušení zařízeními třídy A jsou tzv. **meze třídy A**. Norma specifikuje, že užívání zařízení, které sice nesplňuje meze třídy A, avšak nezpůsobuje nepřijatelné zhoršení veřejných radiokomunikačních služeb, může být povoleno příslušným kompetentním státním orgánem. Výjimečně a při provedení potřebných opatření může tento orgán rovněž povolit instalaci a provoz zařízení třídy A i v domácnostech, příp. v provozu přímo připojeném na napájecí síť obytných budov.

Zařízení třídy B

jsou zařízení vhodná k použití v obytných objektech a v objektech přímo připojených k rozvodné síti nízkého napětí napájející obytné budovy. Zařízení třídy B musí z hlediska elektromagnetického rušení vyhovovat tzv. **mezím třídy B**.

Z hlediska své vnitřní konstrukce a způsobu využití vř. pole se zařízení PVL obou tříd dělí do dvou skupin:

Skupina 1

Obsahuje všechna zařízení, v nichž je vysokofrekvenční elektromagnetické pole záměrně generováno pro zajištění vnitřní funkce samotného zařízení. Příkladem zařízení skupiny 1 jsou laboratorní, lékařské a vědecké přístroje typu signální generátory, měřicí přijímače, měřiče kmitočtu, spektrální analyzátory, samostatné napájecí zdroje apod.

Skupina 2

Obsahuje všechna zařízení, z nichž je generované vysokofrekvenční pole záměrně vyzařováno vně zařízení pro zajištění jeho funkce, např. pro zpracování materiálu. Do skupiny 2 patří průmyslová zařízení s indukčním ohřevem, domácí indukční pece, zařízení s dielektrickým či mikrovlnným ohřevem, lékařské přístroje v pásmu krátkých vln a mikrovln, obloukové svářečské soupravy s vysokofrekvenčním buzením, bodové svářečské zařízení apod.

ČSN EN 55013 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného rozhlasovými a televizními přijímači a přidruženými zařízeními odpovídá normě **CISPR 13** a specifikuje mezní hodnoty rušivého napětí a rušivého elektromagnetického pole vyzařovaného rozhlasovými a televizními přijímači a přidruženými zařízeními v pásmu 9 kHz až 18 GHz.

ČSN EN 55014 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízeními s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnost a podobné účely, elektrickým nářadím a podobnými elektrickými přístroji, odpovídá mezinárodní normě **CISPR 14** a deklaruje svou obecnou platnost pro kmitočtový rozsah 9 kHz až 400 GHz. Příslušné mezní hodnoty rušivých napětí a vyzařovaných elektromagnetických polí však specifikuje jen v pásmu 150 kHz až 300 MHz, a to pro následující skupiny výrobku:

- zařízení pro domácnost poháněná elektrickým motorem (pračky, chladničky, kuchyňské roboty, vysavače, fény, apod.);
- elektrické nářadí napájené přímo ze sítě nebo přes transformátor (přenosné ruční vrtačky, elektrické pily, nože, přemístitelné motorové nářadí, pájecí přístroje apod.);
- lékařská zařízení poháněná elektrickým motorem (zubní vrtačky, pily, nože, kardiografy a podobná záznamová zařízení, čerpadla apod.);
- zemědělské elektrické stroje a přístroje (sekačky trávy apod.);
- elektrická vyhřívací zařízení (elektrické sporáky, varné pánve, konvice, ohříváče jídla, kávovary, průtokové ohříváče a zásobníky vody, pečicí trouby, žehlicí stroje, spotřebiče pro elektrické vytápění místností apod.);

- hrací, prodejní a zábavní automaty (hrací skříně, hrací stroje, video automaty apod.);
- motorové elektrické hračky (vláčky, auta, roboty apod.);
- různé přístroje a elektrická zařízení, např. časové spínače, elektrické zapalovače plynu, elektrostatické čističe vzduchu, nabíječe, usměrňovače, měniče apod.

ČSN EN 55015 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného elektrickými svítidly a podobným zařízením” odpovídá normě **CISPR 15** a platí pro rušivá napětí a rušivá pole v kmitočtovém rozsahu 9 kHz až 400 GHz způsobená následujícími druhy zařízení:

- svítidla připojená na rozvodnou síť nízkého napětí nebo na baterii včetně pomocných zařízení
- vnitřní dopravní osvětlení (v automobilech, autobusech, vlacích apod.) a venkovní pouliční osvětlení
- zdroje ultrafialového či infračerveného záření

ČSN EN 55022 - Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky odpovídá normě **CISPR 22** a zabývá se postupy měření elektromagnetického rušení, generovaného zařízením informační techniky v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 400 GHz, přičemž specifikuje meze tohoto rušení v pásmu 0,15 MHz až 1000 MHz. Za zařízení informační techniky (**ITE – Information Technology Equipment**) je dle této normy považováno libovolné zařízení

- a) jehož prvotní funkcí je vstup, ukládání, zobrazování, vyhledávání, zpracování, propojování nebo řízení datových a telekomunikačních zpráv nebo jejich kombinací a může být vybaveno jedním nebo více koncovými porty typickými pro přenos informací,
- b) se stanoveným vstupním napětím nepřesahujícím 600 V.

Toto vymezení zahrnuje např. veškerá zařízení pro zpracování dat, kancelářské stroje, obchodní elektronická zařízení a telekomunikační zařízení. Norma se nevztahuje na žádné zařízení nebo část zařízení ITE, jehož prvotní funkcí je rádiové vysílání nebo příjem dle Radiokomunikačního řádu ITU.

Zařízení informační techniky jsou normou ČSN EN 55022 řazena do třídy A ITE či B ITE podle toho, jaké požadavky na odrušení zařízení splňuje. Uvedené třídy jsou zde definovány stejně jako třídy A,B ve výše uvedené normě ČSN EN 55011. **Třída B ITE** je kategorie přístrojů určených především pro použití ve vnitřním prostředí, tj. prostředí, v němž lze předpokládat použití rozhlasových a televizních přijímačů ve vzdálenosti do 10 m od zařízení ITE. Třída B ITE tedy může zahrnovat

- zařízení bez pevného místa použití, např. přenosná zařízení ITE napájená z baterií,
- telekomunikační koncová zařízení napájená z telekomunikační sítě,
- osobní počítače a jejich pomocná přípojná zařízení.

1.7.3 Normy pro elektromagnetickou odolnost (Immunity Standards)

Do této skupiny patří především harmonizované české normy řady ČSN EN 61000-4, které jsou ekvivalentní výchozím mezinárodním normám rady IEC 1000-4. Uvedená řada norem specifikuje požadavky na odolnost vůči elektromagnetickému rušení a jednotlivé normy mají charakter základních norem (Basic Standards). Rada ČSN EN 61000-4 pod společným názvem „**Elektromagnetická kompatibilita – zkušební a měřicí technika**“ obsahuje řadu oddílů, tj. norem podrobně popisujících jednotlivé typy zkoušek odolnosti.

ČSN EN 61000-4-1 Přehled zkoušek odolnosti poskytuje celkový přehled existujících zkoušek odolnosti včetně jejich stručného popisu. Norma uvádí všeobecný návod a doporučení pro volbu vhodné zkoušky odolnosti a jejího použití, s ohledem na zkoušené zařízení a podmínky jeho použití (místo použití, předpokládaná úroveň rušení v tomto místě, požadovaný stupeň odolnosti a další). Z této normy lze rovněž zjistit řadu základních technických údajů o všech zkouškách odolnosti, jejichž podrobný popis je obsahem dalších norem této řady.

ČSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti obsahuje metodiku testu a vyhodnocování chování elektronických zařízení a systému při působení elektrostatických výbojů (ESD). Úroveň elektromagnetické odolnosti ESD se dle této normy volí podle pracovního prostředí a provozních podmínek zkoušeného zařízení. Preferovanou metodou zkoušky ESD je zkouška kontaktním výbojem, zkouška vzduchovým výbojem se provádí tam, kde nelze realizovat kontaktní výboj.

ČSN EN 61000-4-3 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – zkouška odolnosti určuje metody zkoušek elektromagnetické odolnosti elektronických zařízení vůči spojitým elektromagnetickým polím vyzařovaným v kmitočtovém pásmu $80 \div 1000$ MHz. Jde tedy o zkoušky odolnosti vůči vyzařování např. ručních (přenosných) vysílačů, ale i stabilních vysílacích stanic, rozhlasových, televizních a vozidlových vysílačů, mobilních radiotelefonu i různých průmyslových zdrojů vysokofrekvenčních signálů.

ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli definuje metodiku testování elektromagnetické odolnosti, parametry testovací aparatury a stupně přísnosti pro zařízení, která jsou rušena signály šířícími se po napájecích a signálových vedeních a zemnicích spojeních. Cílem těchto zkoušek je stanovit anténní efekty kabelů, připojených ke zkoušenému objektu. Zdrojem těchto rušivých signálů jsou úmyslné vysokofrekvenční vysílače v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 80 MHz. Norma se netýká zařízení, která nemají alespoň jeden vodivý kabel (sítový přívod, signální či zemnicí vedení), který může způsobit vazbu zařízení na vf. rušivá pole. Při vlastní zkoušce odolnosti je zkušební signál amplitudově modulován sinusovou vlnou 1 kHz do hloubky 80 %. Zdrojem tohoto zkušebního signálu je vysokofrekvenční signální generátor s parametry definovanými normou. Generátor se připojuje ke zkoušenému zařízení jedním z 11 typu vazebních obvodů, specifikovaných rovněž v této normě.

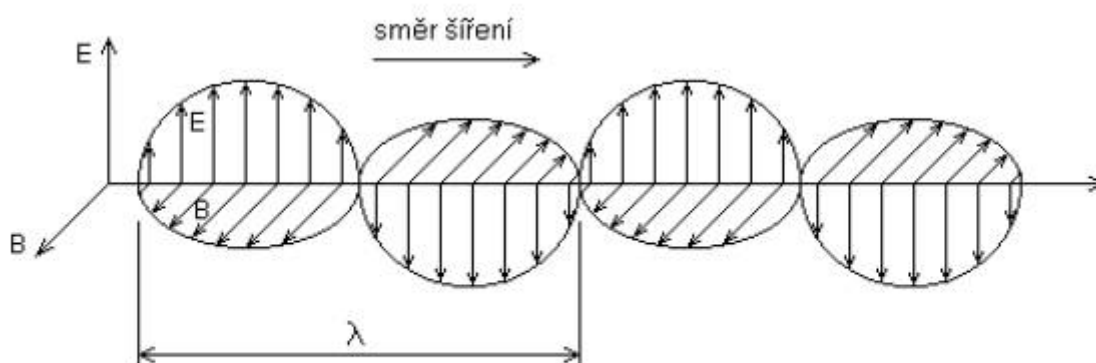
ČSN EN 61000-4-11 Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí – zkoušky odolnosti specifikuje metodiku a provedení zkoušek odolnosti zařízení, která mohou být citlivá na krátkodobé poklesy a krátká přerušení napájecího síťového napětí. Norma obsahuje rovněž návod pro optimální výběr zkušebních úrovní podle průměrné doby trvání poruch a četnosti jejich výskytu v místě instalace zkoušeného zařízení.

2. ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ A JEHO VLASTNOSTI

2.1 Popis elektromagnetického vlnění

Elektromagnetické spektrum: je škála elektromagnetického vlnění. Ukazuje různé druhy elektromagnetického vlnění (záření – kratší vlnové délky).

Elektromagnetické vlnění: Elektromagnetické vlnění můžeme charakterizovat jako vlnění které má dvě navzájem neoddělitelné složky. Elektrickou složku charakterizuje vektor intenzity el. pole E a magnetickou složku charakterizuje vektor magnetické indukce B . Vektory E a B jsou navzájem kolmé, mají souhlasnou fázi a jejich kmity probíhají napříč ke směru, kterým se vlnění šíří.



Obr. 7. Příčné a podélné elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění je vlnění příčné a má vlastnosti vlnové a kvantové:

vlnové (odraz, lom, ohyb, interference, polarizace)

kvantové (fotoelektrický jev)

Uvedené vlnění se šíří ve vakuu rychlostí $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. To je mezní rychlost ve vesmíru.

2.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je škála elektromagnetického vlnění. Ukazuje různé druhy elektromagnetického vlnění.

Rozdělení elektromagnetického spektra podle vlnových délek při šíření ve vakuu:

a) Rozhlasové vlny (radiové vlny) ($\lambda = 10^3 - 10^{-1} \text{ m} \rightarrow 1 \text{ km} - 10 \text{ cm}$)

Zdrojem rádiových vln je elektromagnetický oscilátor. Do prostoru se vlnění dostává přes anténu (elektromagnetický dipól). V prostoru kolmých vektorů k dipólu se vytvoří elektromagnetické pole se složkou elektrickou a magnetickou. Šíří se prostorem a přenáší energii kmitů oscilátoru.

Podle vlnové délky se rádiové vlny dělí na:

Dlouhé (DV, LW) $f = 150 - 300 \text{ kHz}; \lambda = 2000 - 1000 \text{ m}$

Pásmo rádiového vysílání – dlouhé vlny (LW). Dlouhé vlny se šíří na velké vzdálenosti a lze je zachytit kdekoli v terénu, kam se kratší vlnové délky nedostanou.

Střední (SV, MW, AM) $f = 0,5 - 2 \text{ MHz}; \lambda = 600 - 150 \text{ m}$

Krátké (KV, SW) $f = 6 - 20 \text{ MHz}; \lambda = 50 - 15 \text{ m}$

Krátké vlny se odrážejí od ionosféry (odraz vln začíná probíhat ve výšce 60 – 80 km) nad zemským povrchem, obsahuje určité množství molekul vzduchu, rozštěpených na ionty a volné elektrony. Chová se jako vodivá plocha. Stav ionosféry se mění vlivem slunečního záření, mění se i podmínky šíření krátkých vln v různých denních a nočních dobách, kdy mají velký dosah.

Velmi krátké (VKV) $f = 20 - 300 \text{ MHz}; \lambda = 15 - 1 \text{ m}$

Používají se k přenosu televizního signálu, pásmo rozhlasového vysílání FM (87,5 – 108 MHz). Vysílač a přijímač musí být přibližně v přímce nebo v přímé viditelnosti, na které není překážka. Z tohoto důvodu se dnes používají družicové systémy, kdy mezi oběžnou dráhou a povrchem není žádná překážka. V pásmu na rozhraní rádiových vln a mikrovln jsou i frekvence pro mobilní sítě (900 a 1800 MHz), jelikož jejich vysoká

frekvence umožňuje přenos velkého množství informací. Mezi mobilním telefonem a vysílačem ale nesmí být překážka (zástavby, pohoří apod.).

b) Mikrovlny ($l = 10^{-1} - 10^{-4} \text{ m} \rightarrow 10\text{cm} - 0,1 \text{ mm}$)

Svojí vlnovou délkou patří do pásma mezi rádiovými vlnami a infračerveným zářením. Jedná se o vlnové pásmo, které se v současné době hojně využívá v bílé elektrotechnice. Princip jejich práce spočívá v rozkmitání molekul, např. vody (princip mikrovlnné trouby). Kmitání molekul vody vyvolává tření, ohřívá se; ohřev je stejnoměrný po celém objemu.

c) Infračervené záření ($l = 10^{-4} - 7,6 \cdot 10^{-4} \text{ m} \rightarrow 0,1 \text{ mm} - 760 \text{ nm}$)

Infračervené záření je také někdy označováno jako IR (infrared) záření nebo tepelné záření (pomocí IR záření se šíří teplo zářením, a to i vakuem; nejlepším příkladem je toho skutečnost, kdy povrch Země je zahříván slunečním zářením).

Zdrojem je každé těleso, které má teplotu vyšší než je absolutní nula. Původem IR záření jsou změny elektromagnetického pole vyvolané pohybem molekul. Pohyb molekul je způsoben vnitřní energií a závisí na teplotě. Stejně tak tělesa zahřátá na vyšší teplotu jsou původcem silnějšího IR záření.

Není viditelné okem, využívá se v dálkových ovladačích, protože neruší signál – je v jiné části spektra a zároveň ho nevnímáme. Proniká mlhou a znečištěným ovzduším při pohlcování IR záření probíhá tepelná výměna energie, elektromagnetického vlnění se mění na vnitřní energii pohlcujícího tělesa infrazářiče (slouží k vytápění)

d) Světlo: ($l = 7,6 \cdot 10^{-7} - 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ m} \rightarrow 760 \text{ nm} - 390 \text{ nm}$)

Zdroje světla: – přirozené: slunce, oheň, hvězdy
– umělé: žárovka, zářivka, výbojka, laser
– chromatické: složené ze světla více vlnových délek, např. bílé světlo (složené ze sedmi barev)

Světelné záření vyvolává v lidském oku světelný vjem. Pomocí světla získáváme nejdůležitější informace o světě kolem nás. U světla rozeznáváme jeho intenzitu, která je jiná v každém časovém denním intervalu a barevná škála spektra závisí na vlnových délkách obsažených ve světle.

e) Ultrafialové záření ($\lambda = 3,9 \times 10^{-7} - 10^{-8} \text{ m} \rightarrow 390 \text{ nm} - 10 \text{ nm}$)

Zdrojem jsou tělesa zahřátá na velmi vysokou teplotu – Slunce (hvězdy), rtuťové výbojky (horské slunce), elektrický oblouk (sváření)

Ultrafialové záření reaguje s fotografickou deskou - při dopadu na určité látky se mění na viditelné světlo. Má silné vlivy na lidský organismus - v menších dávkách způsobuje zhnědnutí kůže a produkci vitamínu D, ve vyšších dávkách rakovinu kůže. Také může způsobit zánět spojivek. Působí jako desinfekce – ničí mikroorganismy. Přírozenou ochranou proti UV záření je ozónová vrstva, která je součástí stratosféry (je velmi tenká; ozon O_3 se rozkládá, když se dostane do kontaktu s freony)

f) Rentgenové záření ($\lambda = 10^{-8} - 10^{-12} \text{ m} \rightarrow 10 \text{ nm} - 1 \text{ pm}$)

Vzniká na speciálních elektronkách při zabrzdění elektronů emitovaných žhavenou katodou a urychlených potenciálovým rozdílem 10 kV až 400 kV mezi anodou a katodou. V prostoru mezi katodou a anodou je antikatoda – druhá anoda, která svírá s přímkou katoda-anoda úhel 45° , vyrobená z wolframu. Rentgenové záření vzniká změnami elektromagnetického pole v atomovém obalu

Mezi jeho základní vlastnosti můžeme považovat vysokou pronikavost (proniká kovy). Je pohlcováno v závislosti na protonovém čísle, což se využívá v diagnostice (rentgen). Je pohlcováno v závislosti na tloušťce látky a používá se v defektoskopiích (zjišťování trhlin nebo vzduchových bublin v odlitcích). Používá k léčbě zhoubných nádorů (ničí buňky), při zjišťování struktury látek (vlny o délce $10^{-8} - 10^{-10}$).

g) Záření gama - γ (jaderné) ($\lambda < 10^{-12} \rightarrow < 1 \text{ pm}$)

Zdrojem jaderného vlnění jsou změny elektromagnetického pole při jaderných reakcích. Radioaktivní záření gama neexistuje samovolně, ale doprovází záření α nebo β (jsou vyzařovány radionuklidy). Záření gama je nejpronikavější jaderné záření (vedle α a β), lze jej zeslabit silnou vrstvou železobetonu nebo materiálem obsahujícím jádra těžkých prvků posledních řad Mendělejevovy soustavy chemických prvků. Má silné ionizační účinky a v důsledku fotoefektu uvolňuje z látek nabitě částice.

Mezi jeho základní vlastnosti můžeme uvést podobně jako u rentgenové záření schopnost pohlcování, což se používá v průmyslovém oboru defektoskopie (tj. zjišťování vad v součástkách). Gama záření je pronikavější než rentgenové záření a stačí menší dávky; pro získání gama záření stačí radioaktivní látka. Gama záření je pro defektoskopii výhodnější než rentgenové záření. Způsobuje genetické změny buněk, nemoc z ozáření (po genetických změnách narušení struktur DNA a RNA kyselin může dojít k rakovinnému bujení).

3. ŠÍŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VLN

Základním článkem vlnění je vlna. Její vlastnosti charakterizují veličiny: čas, bod - místo odkud vlnu pozorujeme, vlnová délka λ [m] a fázová rychlost v_f [m.s⁻¹], což je rychlost pohybu ve směru šíření vlny.

Pod pojmem volné šíření elektromagnetické vlny rozumíme její šíření v atmosféře okolo zemského povrchu, v mezihvězdném prostoru a v povrchové vrstvě zemské kůry. Šíření, které je usměrňováno jakýmkoliv umělým zařízením jako vlnovod a nebo vysokofrekvenční vedení, se nepovažuje za volné.

3.1 Vlastnosti elektromagnetického vlnění

- zdrojem je elektromagnetický rozruch
- dvě neoddělitelné složky (elektrickou a magnetickou)
- je to vlnění příčné, proud fotonů, přenáší energii, šíří se rychlostí světla
- je to zvláštní forma hmoty, způsobuje tlak na tělesa, jimiž prochází
- není potřeba hmotné prostředí – šíří se i ve vakuu

Polarizace elektromagnetického vlnění

- jestliže se směr vektoru B a E nemění, jde o lineární polarizovanou elektromagnetickou vlnu
- vlnění dipólu je polarizované tak, že E leží v rovině dipólu a B je kolmé na E

Odraz a ohyb elektromagnetické vlnění

- platí zákon odrazu, pokud dopadá pod pravým úhlem, pak interferuje
- vlnová délka má vliv na vznik stínu za překážkou a na ohyb vlnění
- je-li překážka značně větší než vlnová délka, vlnění neproniká – vzniká stín vlnění, pokud jsou rozměry překážky menší než vlnová délka, vlnění proniká za překážku – část se odrazí

Interference elektromagnetického vlnění

- odraz při pravém úhlu – dopadající a odrážející vlnění interferují
- výsledné vlnění závisí na rozdílu drah obou vlnění, pokud je rozdíl sudým násobkem půlvln, pak se setkávají se stejnou fází a amplituda se zvětšuje,

pokud je rozdíl drah rovný lichému počtu půlvln pak se setkávají s opačnou fází a amplituda se zmenšuje

Vliv prostředí na délku elektromagnetické vlny:

rychlost elektromagnetického vlnění v jiném prostředí se vypočte: $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$, kde ϵ_r je

relativní permitivita a μ_r je relativní permeabilita prostředí

3.2 Šíření elektromagnetického vlnění

1) Povrchová vlna

- krátká vzdálenost, bez odrazu, přímé šíření

2) Prostorová vlna

- využívá se vlastnosti ionosféry, která odráží elektromagnetické vlnění krátkých vlnových délek (podmínky se mění vzhledem k počasí, vhodné podmínky, špatné podmínky na vysílání)
- velké vzdálenosti

Druhy vln:

- a) dlouhé vlny DV – povrchové $\lambda = 1000m$
- b) střední vlny SV – povrchové $\lambda = 100m$
- c) krátké vlny KV – prostorové $\lambda = 10m$
- d) velmi krátké vlny VKV – družice $\lambda \in (1m; 0,1m)$

RADAR – RADio Detecting And Ranging – zjišťování polohy objektů

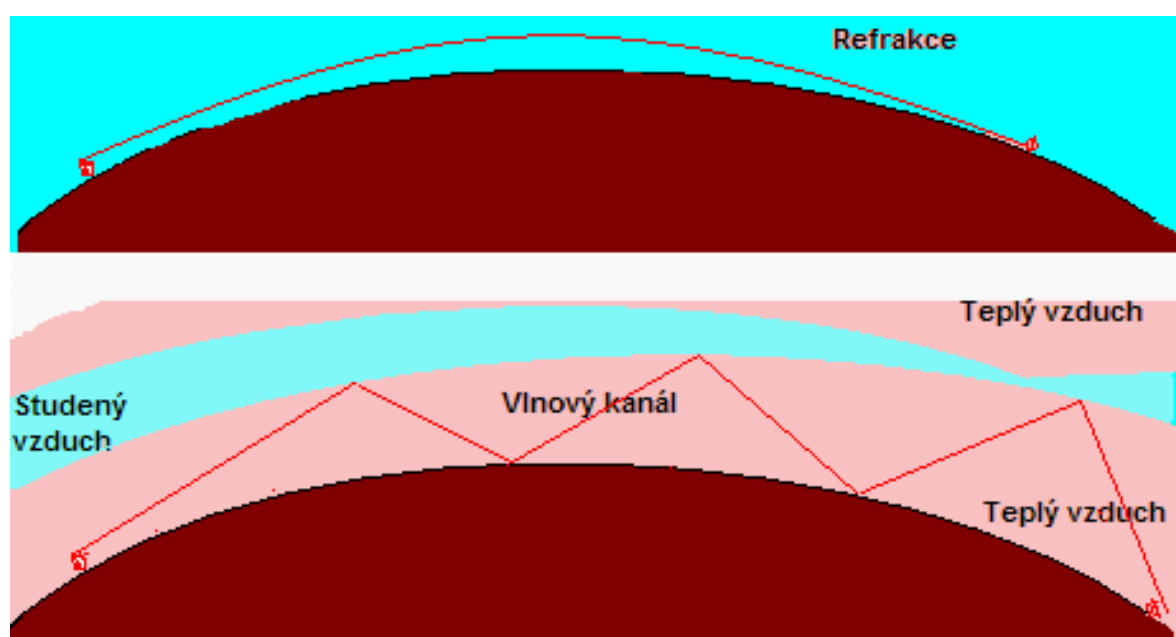
Elektromagnetická interakce

- elektrické ani magnetické pole není nutně vázáno na přítomnost nosičů náboje
- rozdíl je jen v tom, že v elektrickém poli směřují siločáry od kladného k zápornému pólu
- mohou existovat bez náboje jen pokud probíhá neustálá změny jednoho z nich a tím i druhého
- velice značná interakce mezi hmotnými objekty (chemická vazba) – příčina vzniku molekul

3.3 Důležité jevy při šíření elektromagnetických vln v atmosféře

a) Ohyb vln v atmosféře (refrakce)

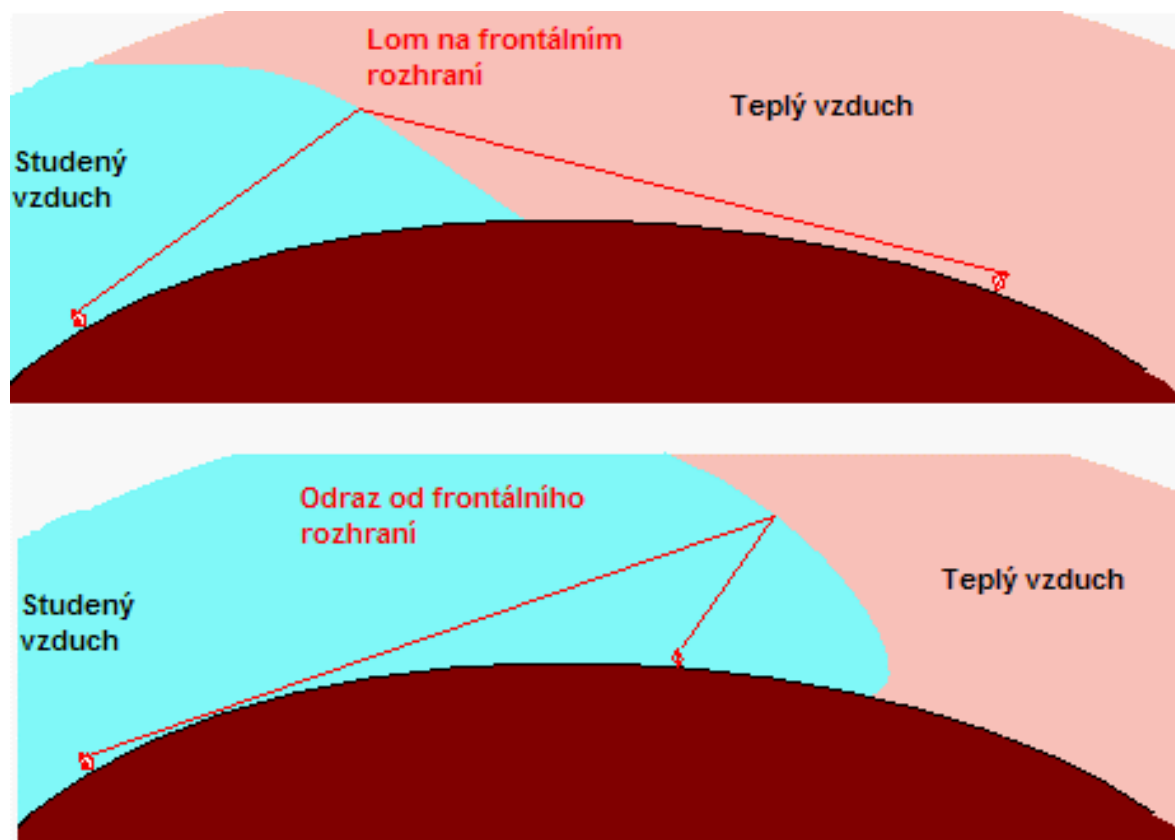
K ohybu dochází díky tomu, že hustota vzduchu s výškou klesá. Tím se mění index lomu prostředí a záření je stáčeno do oblasti s vyšší hustotou vzduchu. Tento jev je pro praktické šíření signálu zanedbatelný. V mimořádných podmínkách při silném zvrstvení atmosféry (inverze apod.) se tento jev zesiluje. V určitých případech může dojít i vytvoření vlnového kanálu mezi povrchem Země a inverzní vrstvou.



Obr. 8. Ohyb vln v atmosféře (refrakce)

b) Lom a odraz v atmosféře (frontální rozhraní apod.)

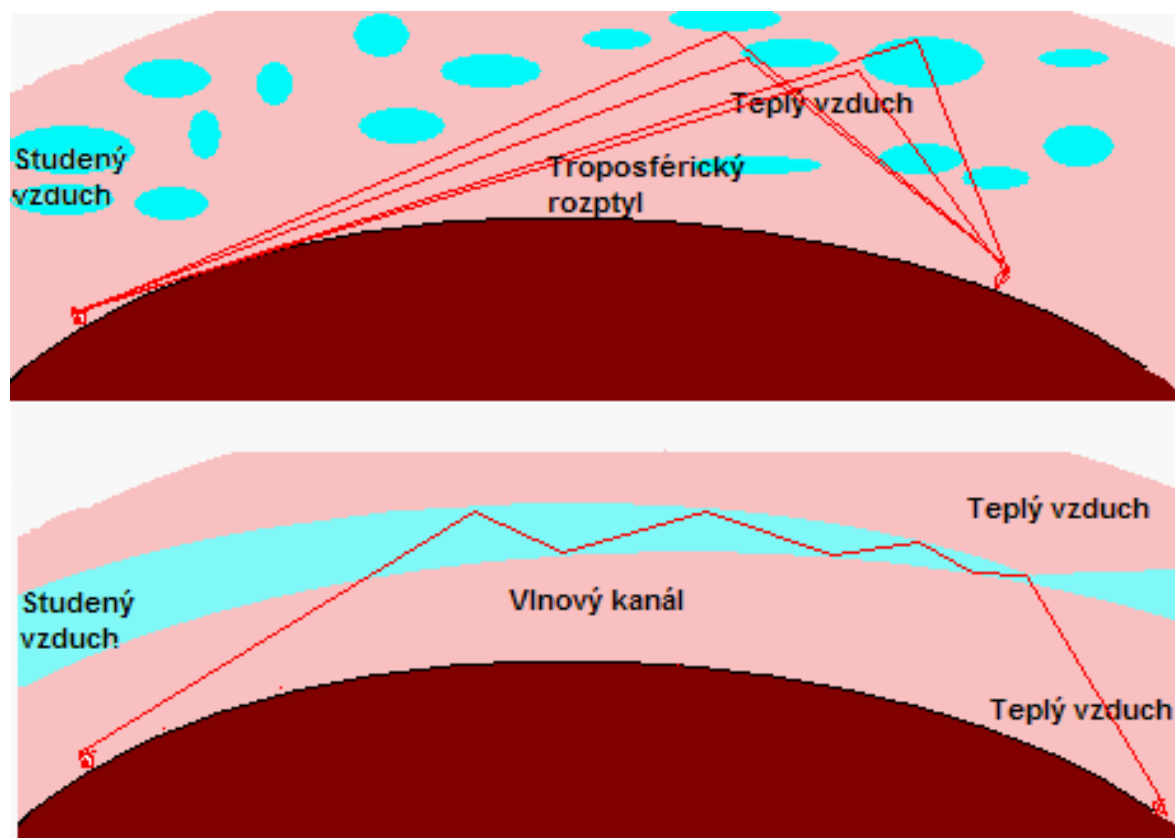
Na frontálním rozhraní - tj. rozhraní mezi studeným a teplým vzduchem, může dojít k lomu nebo odrazu elektromagnetických vln. Tento jev se týká především velmi krátkých a ultra krátkých vln. Při vhodné orientaci fronty a vysílače mohou být elektromagnetické vlny nasměrovány za obzor i na poměrně velké vzdálenosti.



Obr. 9. Lom a odraz v atmosféře (frontální rozhraní apod.)

c) Odraz na troposférickém rozptylu

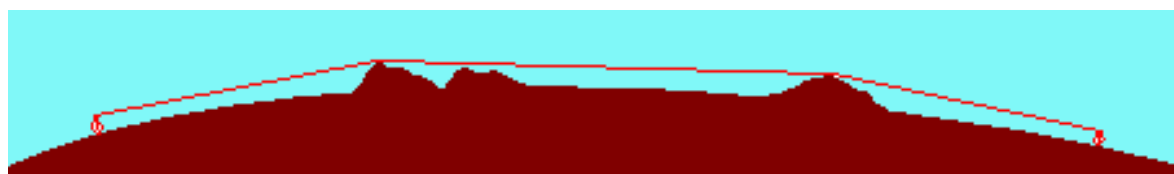
V troposféře je běžná velká teplotní nestabilita. Ta způsobí, že se v celém prostoru troposféry vyskytují oblasti s rozdílnou teplotou vzduchu i v objemově malých prostorech (bubliny, vrstvy...). Na teplotních rozhraních vrstev či bublin dochází k lomu i odrazu elektromagnetického záření. Při velkých vysílacích výkonech a téměř vodorovně směřovaných svazcích vln může dojít k vytvoření poměrně stabilních spojení se vzdálenými stanicemi. Při vhodném zvrstvení atmosféry (do velkých vodorovných vrstev) se mohou vytvořit i vlnové kanály. Spojení je pak možné i na poměrně značné vzdálenosti.



Obr. 10. Odraz na troposférickém rozptylu

d) Lom na ostré překážce (hřebety pohoří)

Pokud elektromagnetické vlny dopadají šikmo na ostrou překážku, dochází na hraně překážky k lomu a změně směru záření. To umožňuje příjem v místech která nemají přímou viditelnost na vysílač.



Obr. 11. Lom na ostré překážce (hřebety pohoří)

II. PRAKTICKÁ ČÁST

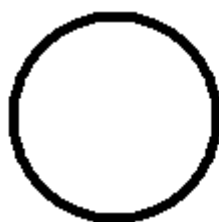
4. VLNOVODY

Vlnovody jsou rourovitá dielektrická tělesa, jejichž plášť je tvořen dobře vodivým materiálem. S vlnovody se setkáváme většinou na kmitočtech v řádu GHz, protože na jiných kmitočtech by vlnovody 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 vysokofrekvenčnímu stupni přijímače. 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 H.

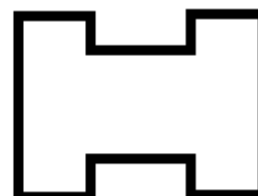
a) obdélníkový



b) kruhový



c) ve tvaru písmene H



Obr. 12. Základní profily vlnovodu

Elektromagnetické vlny které se šíří ve vlnovodu mají na rozdíl od elektromagnetických vln, které se šíří ve volném prostoru (dielektriku nebo vakuu) i podélnou složku elektrického nebo magnetického pole.

4.1 Základní rozdělení vln šířících se ve vlnovodu

- a) vlny, které mají pouze příčné složky polí (jako ve volném prostoru), se označují jako vlny transverzálně elektromagnetické - TEM
- b) vlny, které mají podélnou složku elektrického pole se označují jako vlny transverzálně magnetické - TM nebo též jako vlny elektrické - E
- c) vlny s podélnou složkou magnetickou se označují jako vlny transverzálně elektrické - TE nebo jako vlny magnetické - H

V problematice šíření vln nás bude zajímat problematika spojená s tím, jaké vlny se mohou vlnovodem šířit. To ovšem neznamená, že v každém konkrétním případě se jím šíří. To závisí na tom, jakým způsobem se bude přivádět do vlnovodu energie a dalších okolnostech (což už je podstatně složitější). Předpokládáme, že vlnovod je vyplněn vakuem (prakticky též vzduchem atmosférického tlaku, neboť rozdíl v permitivitách je zanedbatelný), a že uvnitř vlnovodu nejsou žádné náboje a neteče tam vodivostní proud tj. $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$, $i = 0$.

Maxwellovy rovnice pro tento případ mají tvar:

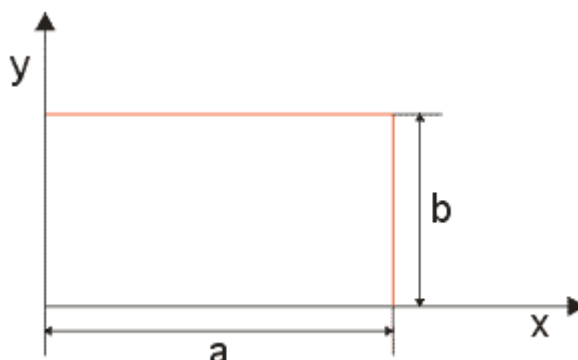
$$\text{rot} \vec{H} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\tau} \quad (1)$$

$$\text{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\tau} \quad (2)$$

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (3)$$

$$\text{div} \vec{H} = 0 \quad (4)$$

4.1 Ideální vlnovod obdélníkového průřezu



Obr. 13. Řez vlnovodem obdélníkového průřezu

Předpokládáme, že elektromagnetická vlna se šíří vlnovodem obdélníkového průřezu (obr.13.) a má rozměry stran o délce **a** a **b**. Budeme předpokládat, že stěny vlnovodu jsou ideálně vodivé (vodivost prostředí $\sigma \rightarrow \infty$). Tento předpoklad prakticky nemůže být splněn, ale značně zjednoduší okrajové podmínky - v nekonečně vodivém obalu vlnovodu je tangenciální složka elektrického pole nulová, právě tak jako normálová složka magnetického pole. Současně ve vlnovodu vyplněném vakuem a s ideálně vodivými stěnami nenastávají žádné tepelné ztráty a útlum $\alpha = 0$, takže $\gamma = j \cdot \beta$ je čistě imaginární, a $h^2 = k^2 - \beta^2$

4.1.1 Matematický popis vlnění v ideálním obdélníkovém vlnovodu

Rovnice pro z-ovou, tj. podélnou, složku vektoru elektrického pole má tvar:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + h^2 E_z = 0 \quad (5)$$

a rovnice pro podélnou složku magnetického vektoru má tvar:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + h^2 H_z = 0 \quad (6)$$

Jelikož jsou obě rovnice nezávislé, můžeme i vlny ve vlnovodech rozdělit na transverzálně magnetické TM (E), kdy $H_z = 0$ a transversálně elektrické TE (H), kdy $E_z = 0$. Vybereme si vlnu TM v ideálním vlnovodu obdélníkového průřezu, se stranami a, b (obr.13 Řez vlnovodem obdélníkového průřezu). Rovnici pro z-ovou, tj. podélnou, složku elektrického pole potom řešíme obvyklou metodou separace proměnných.

Položíme $E_z = X(x) Y(y)$ odkud plyne:

$$\frac{X''}{X} + \frac{Y''}{Y} = -h^2 = -k_1^2 - k_2^2 \quad (7)$$

takže

$$X'' + k_1^2 X = 0 \quad (8)$$

$$Y'' + k_2^2 Y = 0 \quad (9)$$

Řešení je typu :

$$\sin(k_1 x), \cos(k_1 x), \sin(k_2 y), \cos(k_2 y) \quad (10)$$

E_z dostaneme vynásobením obecných řešení rovnic pro X a Y . Společné řešení nebudeme vypisovat. Zvolíme takové, které splní podmínky pro ideální vlnovod: tangenciální složka E na stěnách musí být nulová, takže $E_{z(x=0)}$ a $E_{z(y=0)}$ z toho je patrné, že vhodné jsou pouze pro goniometrické funkce tvaru $\sin$:

$$E_z = A \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) \quad (11)$$

Dostaneme podmínky pro zbývající dvě stěny, takže:

$$\sin(k_1 a) = 0 \quad \sin(k_2 b) = 0 \quad (12)$$

odtud plyne, že $k_1 a = m \cdot \pi$, $k_2 b = n \cdot \pi$, kde m, n jsou celá čísla výsledný tvar je :

$$k_1^2 + k_2^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 = h^2 = k^2 - \beta^2 \quad (13)$$

Dosadíme-li nyní za vztahy pro vlnové vektory:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (14)$$

což se vztahuje se k volnému prostoru a

$$\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (15)$$

což se vztahuje k vlnovodu, dostaneme následující výraz

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \quad (16)$$

kde Λ je vlnová délka ve vlnovodu a Λ^2 musí být kladné. Šíření ve vlnovodu je možné jen pro ty vlnové délky λ ve volném prostoru, pro něž platí, že:

$$\frac{1}{\lambda^2} > \frac{1}{4} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \quad (17)$$

Pro vztah:

$$\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{4} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \quad (18)$$

se vlnová délka λ ve vlnovodu stává nekonečnou, šíření vlnovodem přestává. Tato vlnová délka se nazývá kritická a platí pro ni vztah:

$$\lambda_0 = \frac{2}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)^2} \quad (19)$$

Všechny vlnové délky, které jsou ve volném prostoru delší než kritickém, se vlnovodem šířit nemohou. Kritické vlnovodové délce odpovídá kritická frekvence:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (20)$$

Vyjádříme-li vlnovou délku ve vlnovodu Λ pomocí frekvence signálu, dostaneme:

$$\Lambda = \frac{c}{\sqrt{f^2 - f_0^2}} \quad (21)$$

z čehož je patrné, že vlnovod je disperzní prostředí (vlnová délka závisí na frekvenci). Dále pro fázovou rychlost šíření vln ve vlnovodu platí:

$$v_f = c \sqrt{\frac{1}{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad (22)$$

a pro grupovou rychlost :

$$v_g = c \sqrt{1 - \frac{f_0^2}{f^2}} \quad (23)$$

Pro vlny TE (H) platí obdobně $E_z = 0$. Složky polí dostaneme řešením rovnice

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_z}{\partial y^2} + h^2 H_z = 0 \quad (24)$$

včetně okrajových podmínek a výpočtem podle:

$$E_x = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (25)$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (26)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon_0}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (27)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (28)$$

Pro ideální vodič platí, že normálové složky intenzity magnetického pole na vodiči jsou nulové. Podle obr.13 (Řez vlnovodem obdélníkového průřezu) je $E_y (x=0)$ a $E_x (y=0)$

Vzhledem k tomu, že:

$$H_x \sim \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad \text{a} \quad H_y \sim \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (29)$$

pak při obdobném postupu jako při řešení rovnice:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial y^2} + h^2 E_z = 0 \quad (30)$$

vyhovují těmto okrajovým podmínkám pro goniometrické funkce tvaru $\cos$, tak dostaneme:

$$H_z = B \cos\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b}y\right) \quad (31)$$

Pro kritickou vlnovou délku dostaneme opět výraz :

$$\lambda_0 = \frac{2}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} \quad (32)$$

Celá čísla m, n se nazývají indexy a označují se jako vid (modus) příslušné vlny. Vlna se označuje obecným tvarem: TE_{mn} (H_{mn}) nebo TM_{mn} (E_{mn}).

Pro vlnu TE_{mn} (H_{mn}) dostaneme netriviální výsledek i při jednom indexu nulovém. Pro vlnu TM_{mn} (E_{mn}) nemůže být vzhledem k:

$$\frac{1}{\Lambda^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{4} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) \quad (33)$$

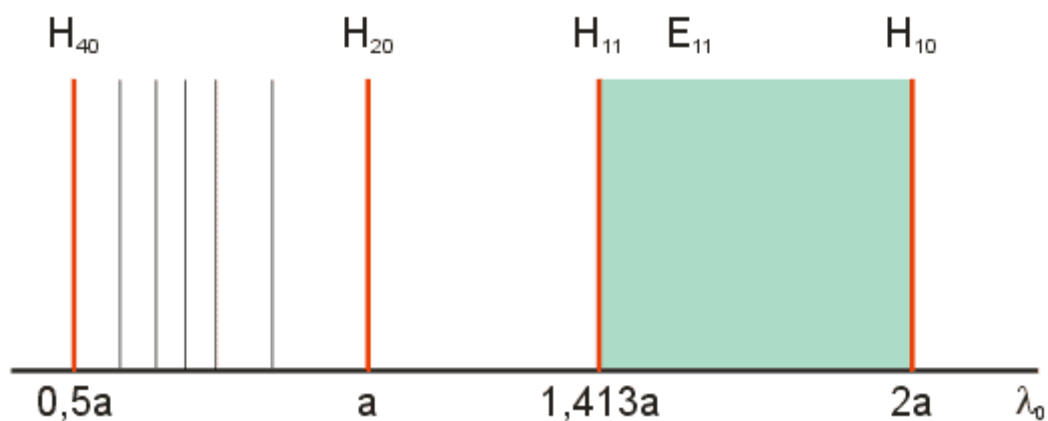
ani jeden index nulový a nejnižší vid má $m=1$ a $n=1$. Pomocí indexů se značí i kritické vlnové délky jako λ_{0mn} . Vlny typu H a E mají při shodných indexech stejnou kritickou vlnovou délku, avšak příslušné vlny se svou strukturou liší. Jedna vlna, která se může šířit ve vlnovodu obdélníkového průřezu, má kritickou vlnovou délku největší. Jestliže je $a > b$ obr.13 (Řez vlnovodem obdélníkového průřezu), jedná se o vlnu TE_{10} (H_{10}) a její kritická vlnová délka $\lambda_{0mn} = 2a$. Pro zjednodušení úvah budeme uvažovat speciální případ vlnovodu čtvercového průřezu, tj. $a=b$.

Nyní můžeme snadno seřadit vidy podle kritických vlnových délek:

Tab. 3. Seřazení vidů podle kritických vlnových délek

vid	λ_0
$H_{10}, (H_{01})$	$2a$
H_{11}, E_{11}	$1,413a$
$H_{20}, (H_{02})$	a
H_{12}, E_{12}	$0,846a$
H_{22}, E_{12}	$0,718a$
$H_{30}, (H_{03})$	$0,666a$
H_{13}, E_{13}	$0,632a$
H_{23}, E_{23}	$0,554a$
$H_{40}, (H_{04})$	$0,500a$

Se stoupajícími hodnotami indexů klesá kritická vlnová délka. Tento výsledný vztah můžeme graficky znázornit takto:



Obr. 14. Závislost vlnové délky na indexu

Směrem doleva od kritické vlnové délky se mohou šířit vlny, které jsou kratší. Z toho plyne, že v barevné oblasti (mezi $\lambda = 2a$ a $\lambda = 1,413a$) se může šířit pouze vlna H_{10} , která má nejdelší kritickou vlnovou délku (vlna dominantní). To má důležitý praktický význam. V ostatních oblastech se mohou šířit všechny vidy, pro něž λ leží nalevo od jejich kritické vlnové délky a je třeba speciálních opatření, aby se mohl šířit jen žádoucí vid.

Strukturu pole ve vlnovodu pravoúhlého průřezu dostaneme z rovnic pro složky pole např. z rovnice:

$$H_z = B \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \quad (34)$$

Skutečné hodnoty pole získáme vynásobením složky výrazem $e^{j(\omega t - \beta z)}$. Vezmeme reálnou nebo imaginární část. Z této rovnice tedy máme:

$$H_z = B \cos \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right) \cos(\omega t - \beta t) \quad (35)$$

a obdobné výrazy stejným postupem pro ostatní složky z rovnic:

$$E_x = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (36)$$

$$E_y = -\frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} + \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (37)$$

$$H_x = \frac{j\omega\epsilon_0}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial x} \quad (38)$$

$$H_y = -\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\gamma}{h^2} \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (39)$$

Je obvyklé znázorňovat průběhy elektromagnetických polí ve vlnovodech pomocí „siločar“ (podobně jako v elektrostatice nebo magnetostatice). To znamená, že si zvolíme určitý čas (např. $t=0$) a v tomto okamžiku „pořídíme“ záběr siločar, obecně řešením rovnic:

$$\frac{dx}{E_x} = \frac{dy}{E_y} = \frac{dz}{E_z} \quad \frac{dx}{H_x} = \frac{dy}{H_y} = \frac{dz}{H_z} \quad (40)$$

Pro vlnu H_{10} a pro $t = 0$ dostaneme:

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \cos \beta z \quad (41)$$

$$H_z = \frac{\beta}{\frac{\pi}{a}} H_0 \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin \beta z \quad (42)$$

$$H_z = -E_0 \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right) \sin \beta z \quad (43)$$

$$H_0 = E_0 \frac{\pi}{a} \frac{1}{\omega\mu_0} \quad (44)$$

kde E_0 je intenzita y-ové (a v tomto případě jediné) složky elektrického pole pro:

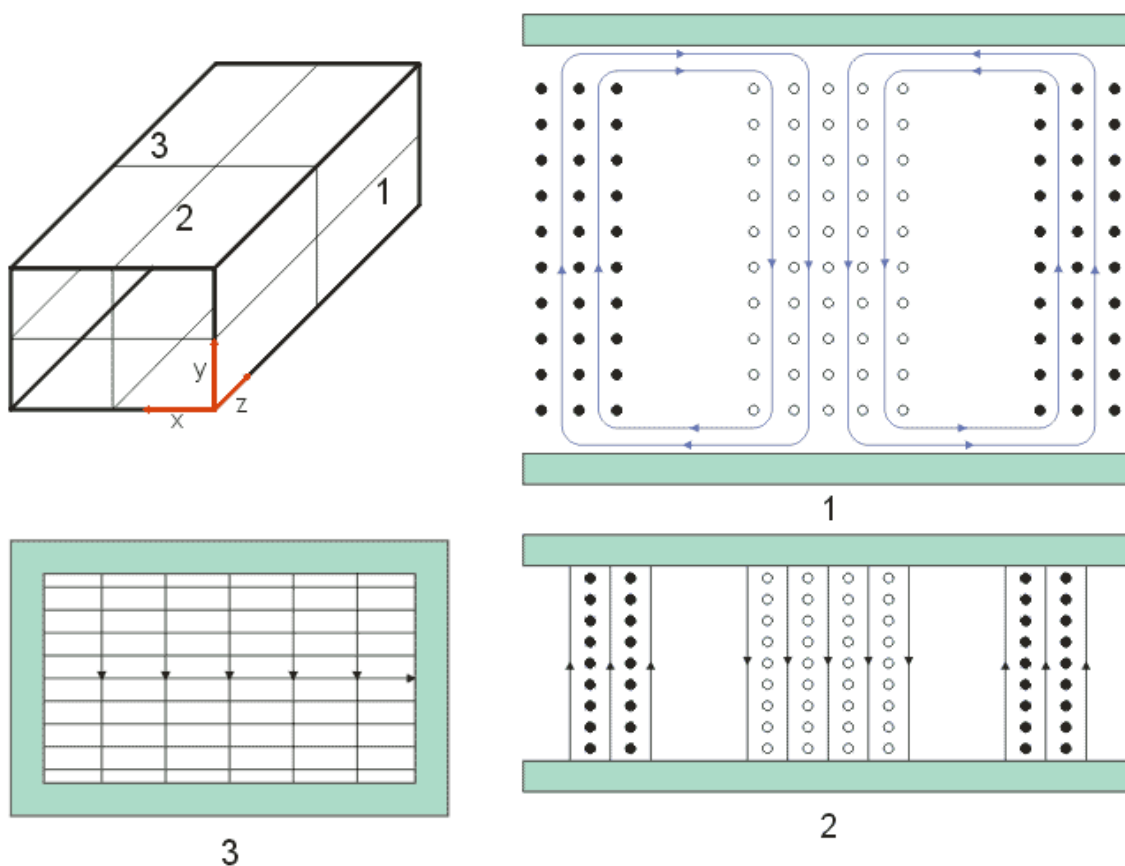
$$x = \frac{a}{2} \quad a - z = \frac{\Lambda}{4} \quad z = \frac{3}{4} \Lambda \quad (45)$$

Síločáry elektrického pole mají směr osy y , magnetické síločáry jsou stejné ve všech rovinách XZ a jsou vyjádřeny rovnicemi:

$$\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\beta z = konst \quad (46)$$

Vlna TE_{10} : Síločáry: 1 - v rovině xz 2 - v rovině yz 3 - v rovině xy

Nenulové složky pole $H_z, H_x, E_y, \lambda_0 = 2a$



Obr. 15. Struktura pole v obdélníkovém vlnovodu pro vlnu TE_{10}

5. REALIZACE VLNOVODU

5.1 Výpočet a volba parametrů vlnovodu

Návrh a výpočet parametrů vlnovodu pro $f = 2,45 \text{ GHz}$ a mód H_{10} , který je u obdélníkových vlnovodů nejobvyklejší a nejjednodušší (má nejdelší možnou mezní vlnu).

$$f_0 = 2,45 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

$$c = 2.9979 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0} = \frac{2.9979 \cdot 10^8}{2,45 \cdot 10^9} = 0,12236 \text{ m} = 122,36 \text{ mm}$$

$$\lambda_0 = \frac{2}{\left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right)^2} = \frac{2}{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{0}{a}\right)^2} = 2a$$

$$a = \frac{\lambda_0}{2} = \frac{122,36}{2} = 61,18 \text{ mm}$$

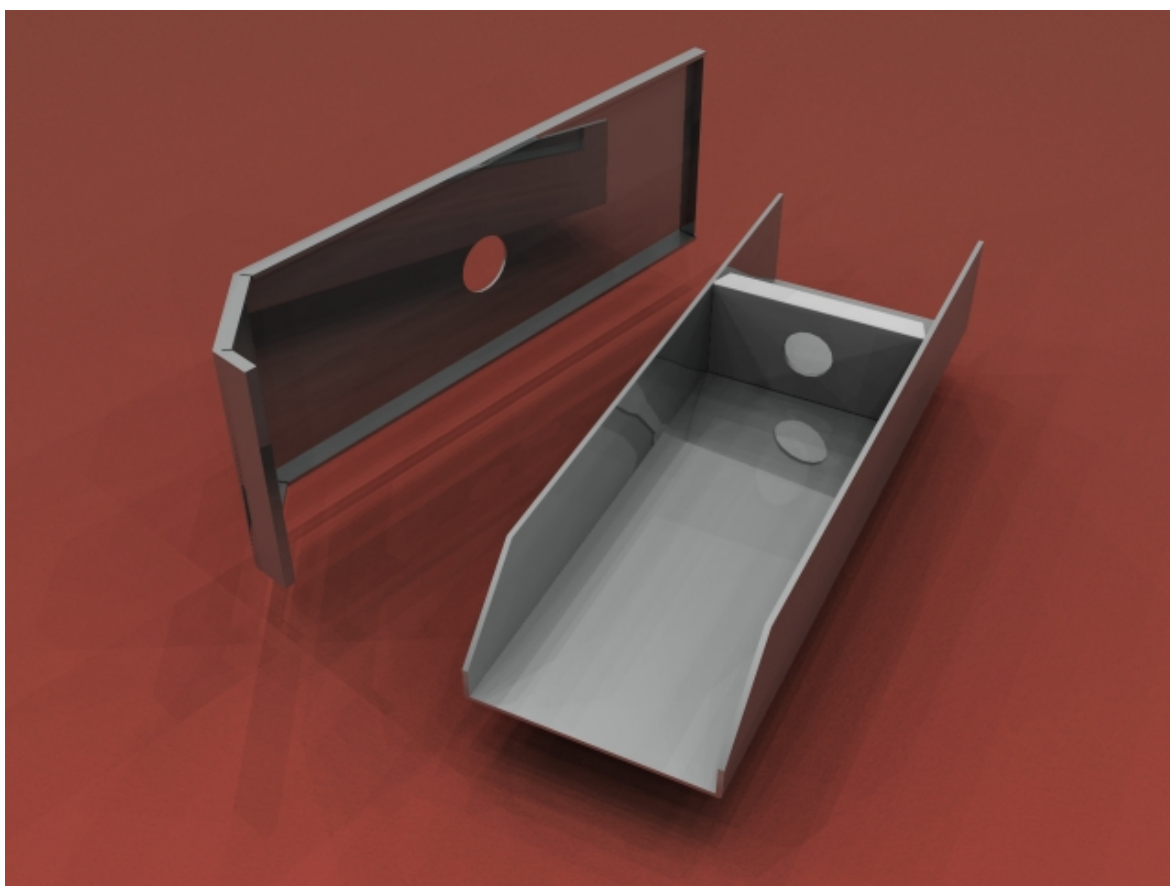
$$b = 27,2 \text{ mm}$$

Se zvyšující se pracovní frekvencí se budou zmenšovat rozměry vlnovodu.

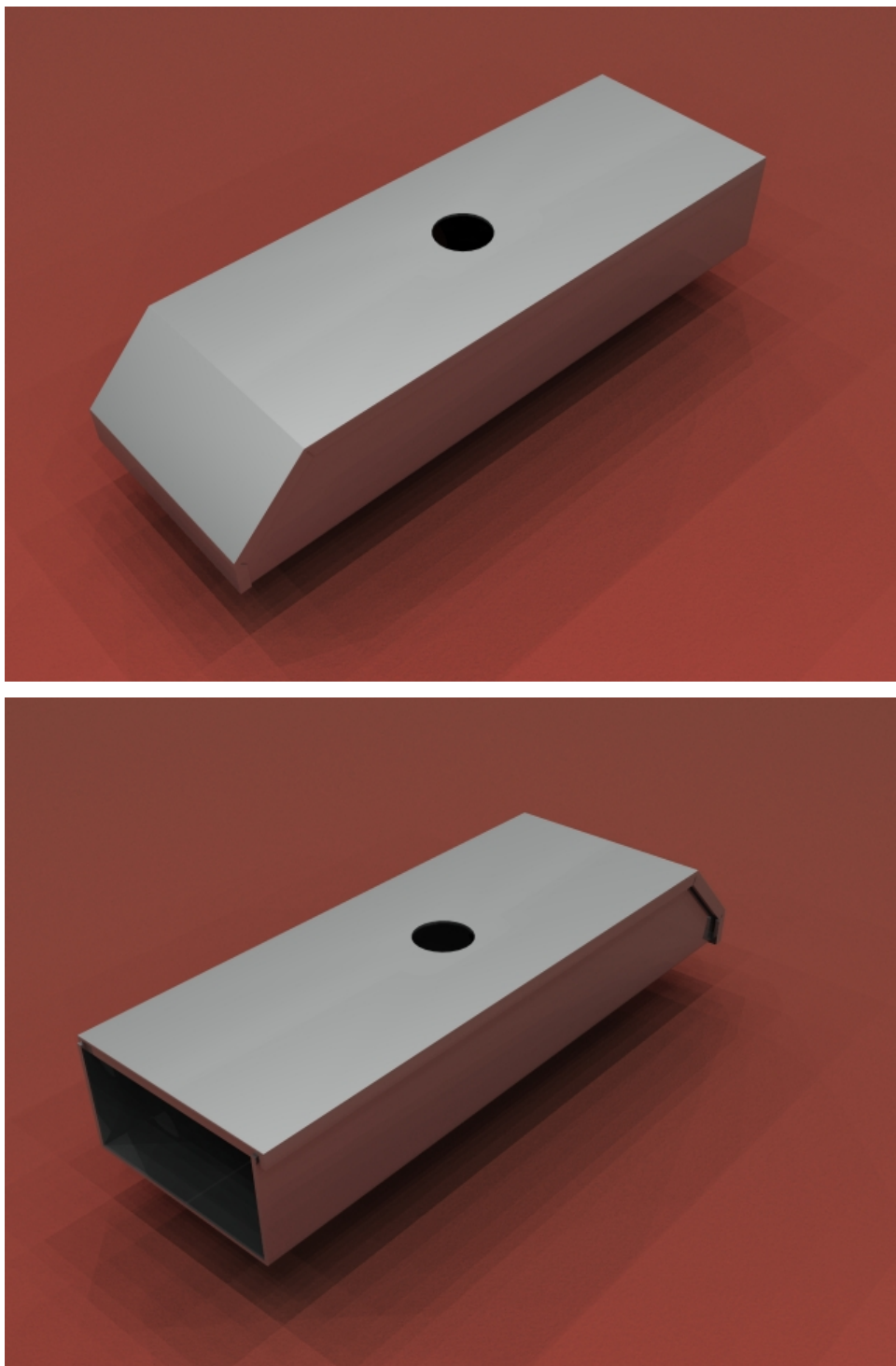
5.2 Technicko realizační část

Pro výrobu vlnovodu byl použit hliníkový plech tloušťky 1mm. Vlnovod byl vyroben ze tří částí (obr.16) vzájemně spojených leťování. Pomocí technologie napařování je v celém vnitřním prostoru vlnovodu nanесena vrstva stříbra (dva mikrony). Celý vlnovod je vsazen do dřevěného obalu o rozměrech 220x80x45 mm z důvodu snadného uchycení.

Na spodní části vlnovodu je posazena a přileťována jeho spodní část. Do vnitřního prostoru je vsazena a přileťována jeho horní část (svislá mezistěna).



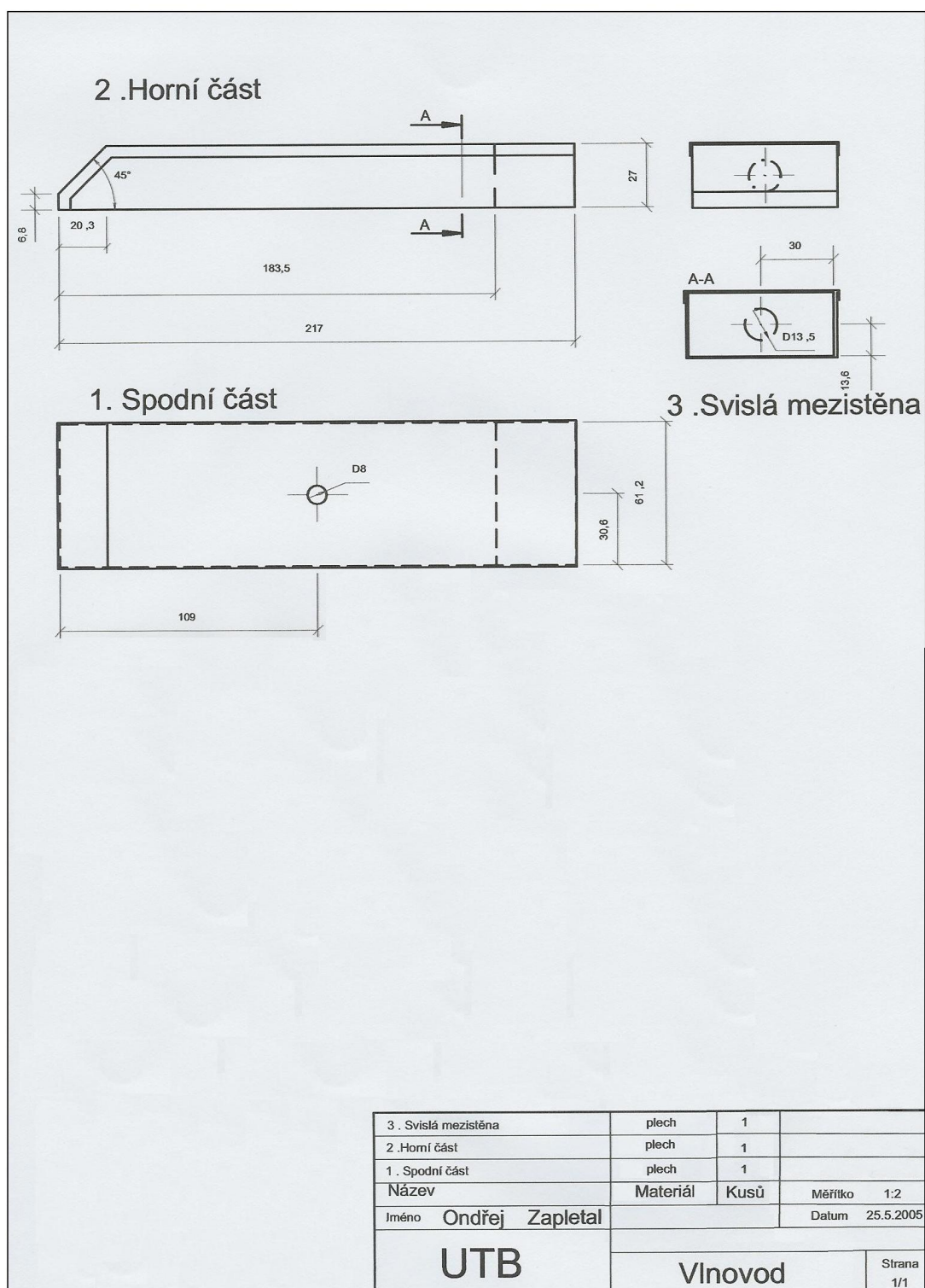
Obr. 16. Rozložený vlnovod



Obr.17.Složený vlnovod

5.2.1 Postup výroby:

Na hliníkový plech tloušťky 1mm byl špicí předrýsován rozvinutý plášť jednotlivých částí vlnovodu s nadmírami. Předrýsovaný tvar byl z plechu vystřižen a bylo provedeno ohnutí ve vyznačených místech jednotlivých částí, tyto pak byly vzájemně spojeny letováním. Vnitřní plochy vlnovodu byly dokončeny postříbřením.



Obr. 18. Technická dokumentace

ZÁVĚR

V rámci Diplomové práce jsem se zabýval návrhem a realizací vlnovodu pro pracovní frekvenci 2,45GHz. Vlnovod je součástí generátoru s pracovní frekvencí 2,45GHz. Jak vlnovod, tak generátor, jsou zkonstruovány pro zkoušky interference a susceptibility v rámci EMC. V rámci diplomové práce bylo nutné prostudovat a zpracovat několik kapitol, po jejichž zpracování bylo teprve možno provést praktickou realizaci výrobku (vlnovodu).

Teoretická část Diplomové práce je členěna do tří kapitol.

Kapitola 1. popisuje problematiku EMC, což je nová aktuální technická disciplína, která vznikla teprve v šedesátých letech a zabývá se správností funkce, tj. koexistencí zařízení a systémů (elektronických, strojních tak i biologických), které se nacházejí ve společném elektromagnetickém prostředí a musí správně fungovat bez vzájemného ovlivňování svých normálních funkcí. Nedodržení požadavků EMC může mít za příčinu řadu havárií s katastrofálními následky.

EMC můžeme rozdělit podle různých hledisek. Nejčastěji se ovšem EMC rozděluje na:

a) EMC biologických systémů, kde se zabýváme „elektromagnetickým pozadím“ našeho životního prostředí a přípustnými úrovněmi rušivých a užitečných elektromagnetických signálů a jejich vlivem na živé organismy

b) EMC technických systémů, kde se zabýváme vzájemným působením jednotlivých zařízení mezi sebou

V oblasti EMC jsou na spotřebiče kladeny čím dál tím větší nároky. Systém, který je sám o sobě dokonale spolehlivý, je v provozu bezcenný, pokud není současně elektromagneticky kompatibilní. Spotřebič, který neprojde požadovanými atesty, které jsou v současné době platné v celé EU, není možné uvést na trh. Díky tomu má EMC značné ekonomické důsledky.

Kapitola 2. popisuje elektromagnetické vlnění a jeho vlastnosti. Je zde popsáno Elektromagnetické spektrum a jeho jednotlivé složky rozdělené dle své vlnové délky (rádiové vlny, Mikrovlny, Infračervené záření, Světelné záření, Ultrafialové záření, Rentgenové a Gama záření)

Kapitola 3. se zabývá šířením elektromagnetických vln a je zaměřena na popis vln (čím jsou charakterizovány jejich vlastnosti) a jejich šíření ve volném prostoru a v umělých zařízením, jako jsou vlnovody, kde se šíření vln nepovažuje za volné.

V praktické části diplomové práce je obsažen popis základních typů vlnovodů (kruhový, obdélníkový) a základní rozdělení vln šířících se ve vlnovodu (transverzálně elektromagnetické – TEM, transverzálně magnetické – TM a transverzálně elektrické – TE. Dále je zde rozebrán popis ideálního vlnovodu obdélníkového průřezu a matematický popis vlnění v ideálním obdélníkovém vlnovodu.

Dále je zde proveden návrh a výpočet délkových rozměrů pro obdélníkový vlnovod s pracovní frekvencí 2,45GHz a technická dokumentace.

Tuto technickou realizaci lze vylepšovat v budoucnu hlavně na základě výsledků kalibrace, kterou je třeba provést současně jak u generátoru, tak i vlnovodu. Potom by navržený vlnovod umožňoval provést technické „předměření“, na jehož základě by bylo možné zjistit, jestli vyráběný produkt odpovídá výše uvedeným normám. Bez požadované atestace a kalibrace nelze na vlnovodu provádět měření.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Norma ČSN CISPR 16 – 1, 1996
- [2] Vaculíková P., Vaculík E.: *Elektromagnetická kompatibilita*, Grada Publishing, Praha, 1998.
- [3] SVAČINA, J. *Elektromagnetická kompatibilita, základní pojmy a principy*. FEI VUT: Brno, 1995.
- [4] SVOBODA, p. *Skripta FEL ČVUT*. ČVUT, Praha 1993
- [5] Hewlett Packard, firemní materiály, Sborník semináře EMC, Praha 1996, 1997
- [6] Rhode & Schwarz, firemní materiály, Seminář EMC Praha 1996, Katalog 1996

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbole a zkratky	Význam	Jednotky
ANSI	Americký národní normalizační institut	-
ASTM	American Standards and Testing Materials	-
CEN a CENELEC	komise Evropské unie k technické přípravě EN	-
CISPR	výbor pro rádiovou interferenci	-
ČNI	Český normalizační institut	-
ČSN	České státní normy	-
EIA	Electronic Industries Association	-
EMC	elektromagnetická kompatibilita	-
EMI	elektromagnetická interference	-
EMS	elektromagnetická susceptibilita (imunita)	-
EN	evropské normy	-
FCC	Federál Communications Commission	-
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise	-
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise	-
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	-
ISO	International organization of standartion	-
ITE	Information Technology Equipment	-
MIL – STD	Vojenské normy	-
NATO	Severoatlantická aliance	-
SAE	Society of Automotive Engineers	-
ZIT	Zařízení informační techniky	-
c	rychlost světla	m.s^{-1}
ϵ_r	permitivita prostředí	$\text{N}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{C}^2$
ϵ_0	permitivita vakua	$\text{N}^{-1}.\text{m}^{-2}.\text{C}^2$
μ_0	permeabilita vakua	H.m^{-1}
μ	permeabilita prostředí	H.m^{-1}
a, b	strany u vlnovodu obdélníkového průřezu	m
m	počet půlvln ve směru osy x	-
n	počet půlvln ve směru osy y	-
λ_m	mezní délka vlny ve vlnovodu	m

f	frekvence	Hz
E	intenzita elektrostatického pole	N.C^{-1}
S	plocha	m^2
H	intenzita magnetického pole	A.m^{-1}
v_f	fázová rychlost šíření	m.s^{-1}

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí	12
Obr. 2. Rušení působící na elektrické zařízení a rušení způsobené elektrickým zařízením	13
Obr. 3. Příklady zdrojů elektromagnetického rušení.....	14
Obr. 4. Druhy elektromagnetického rušení.....	16
Obr. 5. Základní členění problematiky EMC.....	22
Obr. 6. Úroveň a mezní vyzařování	23
Obr. 7. Příčné a podélné elektromagnetické vlnění	35
Obr. 8. Ohyb vln v atmosféře (refrakce).....	42
Obr. 9. Lom a odraz v atmosféře (frontální rozhraní apod.).....	43
Obr. 10. Odraz na troposférickém rozptylu	44
Obr. 11. Lom na ostré překážce (hřbety pohoří).....	44
Obr. 12. Základní profily vlnovodu:	46
Obr. 13. Řez vlnovodem obdélníkového průřezu	48
Obr. 14. Závislost vlnové délky na indexu	55
Obr. 15. struktura pole v obdélníkovém vlnovodu pro vlnu TE ₁₀	58
Obr. 16. Rozložený vlnovod	60
Obr. 17. Složený vlnovod	61
Obr. 18. Technická dokumentace	62

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Prahové výkonové hustoty tepelných účinků a.....	10
Tab. 2. Mezní úrovně elektromagnetického pole a největší přípustná ozáření.....	11
Tab. 3. Seřazení vidů podle kritických	55

