

Testování elektromagnetické odolnosti poplachových systémů s využitím vlnodů s příčným elektromagnetickým polem

Testing of Electromagnetic Immunity of Alarm Systems using
Transverse Electromagnetic Waveguides

Bc. Jan Vašík

Diplomová práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan VAŠÍK**
Osobní číslo: **A11362**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Testování elektromagnetické odolnosti
poplachových systémů s využitím vlnododů
s příčným elektromagnetickým polem**

Zásady pro vypracování:

1. Popište principy činnosti vlnododů s příčným elektromagnetickým polem.
2. Analyzujte způsoby testování elektromagnetické odolnosti s využitím vlnododů s příčným elektromagnetickým polem.
3. Pojednejte o technických požadavcích na testovací zařízení.
4. Popište funkci a nastavení techniky pro testování elektromagnetické odolnosti dle ČSN EN 61000-4-20.
5. Zpracujte metodiku testování elektromagnetické odolnosti s využitím vlnododů s příčným elektromagnetickým polem.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení. 1. vydání. Praha: Grada Publishing, 1998. 487 s. ISBN 80-7169-568-8.
2. OTT, Henry, V. Electromagnetic Compatibility Engineering. New Jersey: John Wiley & Sons. Inc., 2009. 843 p. ISBN: 9780470189306
3. VALOUCH, Jan. Elektromagnetická kompatibilita poplachových systémů- testování a měření elektromagnetických parametrů. Security magazin. Vyd. č. 107, 3/2012. Praha: Security Media, 2012, s. 24- 29. ISSN 1210-8273.
4. KAŇUCH, Jan, KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ Irena. EMC z hlediska teorie a praxe. 1. vydání. Praha: BEN- technická literatura, 2006. 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
5. SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility. Brno: Vysoké učení technické, 2005. 155 s. ISBN 80-214-2864-3.
6. ČSN EN 50130-4 ed. 2 Poplachové systémy. Část 4: Elektromagnetická kompatibilita - Norma skupiny výrobků: Požadavky na odolnost komponentů požárních systémů, poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů a systémů CCTV, kontroly vstupu a přivolání pomoci. Praha: ÚNMZ, 2012. 28 s. Třídící znak 334590.
7. ČSN EN 61000-4-20 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-20: Zkušební a měřicí technika - Zkoušky emise a odolnosti ve vlnovodech s příčným elektromagnetickým polem (TEM). Praha: ČNI: 2004. 60 s. Třídící znak 333432.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Valouch, Ph.D.

Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

8. února 2013

Termín odevzdání diplomové práce:

3. června 2013

Ve Zlíně dne 8. února 2013

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

děkan



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

ředitel ústavu

ABSTRAKT

Teoretická část mé práce se věnuje testování elektromagnetické odolnosti, především pak zkoušek, pomocí vlnovodu s příčným elektromagnetickým polem, z hlediska vlastností TEM a GTEM buněk a jejich specifikacemi. Praktická část prezentuje nastavení zkušební techniky podle příslušných norem a metodiku samotného testování elektromagnetické odolnosti poplachových systémů.

Klíčová slova: poplachový systém, elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická odolnost, zkušební komora, vlnovod, TEM buňka

ABSTRACT

The theoretical part of my work deals with electromagnetic immunity testing, especially testing, and using a waveguide with a transverse electromagnetic field in terms of features TEM and GTEM cells and their specifications. The practical part presents set test equipment in accordance with relevant standards and methodology itself electromagnetic susceptibility testing of alarm systems.

Keywords: alarm system, electromagnetic compatibility, electromagnetic resistance, test chamber, waveguide, TEM cell

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Janu Valouchovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, informace a věcné připomínky, které mi poskytoval během zpracování diplomové práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPABILITA	12
1.1 ZÁKLADY EMC.....	12
1.2 ZDROJE RUŠENÍ	13
1.3 PŘENOS A MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ.....	15
2 VLNOVOD S PŘÍČNÝM ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM (TEM)	17
2.1 VLASTNOSTI TEM BUŇKY	17
2.2 VLASTNOSTI GTEM BUŇKY.....	18
2.3 CHARAKTERISTICKÁ IMPEDANCE	21
2.4 HYBRIDNÍ UKONČENÍ	21
2.4.1 Aktuální ukončení	22
2.4.2 Pole ukončení	25
3 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST	27
3.1 OBECNÉ TESTOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI.....	27
3.1.1 Metodika zkoušek	29
3.2 TESTOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI POMOCÍ GTEM BUŇKY	32
3.2.1 Zkušební postupy	33
3.2.2 Výsledky zkoušky a protokol o zkoušce.....	33
4 TECHNICKÉ PARAMETRY ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ	35
4.1 TECHNICKÉ PARAMETRY ZKUŠEBNÍ KOMORY GTEM.....	35
4.1.1 Specifikace	35
4.1.1.1 Rozměry.....	35
4.1.1.2 Testovací prostor v buňce	37
4.1.2 Vrchol.....	38
4.1.3 RF absorbéry	38
4.2 TECHNICKÉ A FUNKČNÍ PARAMETRY GENERÁTORU SIGNÁLU	39
4.2.1 Typy RF generátorů	39
4.2.2 Provoz RF generátoru	40
4.2.3 Funkce RF generátoru	41
4.2.4 Frekvenční rozsah	43
4.2.5 Harmonické a rušivé signály	43
4.2.6 Výkon RF generátoru	43
4.2.7 Přesnost napájení.....	44
4.2.8 Fázový šum	44
4.2.9 Podporované modulační formáty	45
4.2.10 Zkušební interval kalibrace	45
4.2.11 Vektorový generátor signálu	45
4.3 TECHNICKÉ A FUNKČNÍ PARAMETRY ZESILOVAČE SIGNÁLU	47
4.3.1 Třídy výkonu	48
4.3.1.1 Třída – A	48
4.3.1.2 Třída – B	49
4.3.1.3 Třída – AB	50

4.3.1.4	Třída – C	51
4.3.1.5	Třída – D	52
4.3.1.6	Třída – E	53
4.3.1.7	Třída – F	54
II	PRAKTICKÁ ČÁST	57
5	NASTAVENÍ TECHNIKY DLE NORMY ČSN EN 61000-4-20.....	58
5.1	VÝPIS ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ.....	58
5.2	POPIS ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ TEM	59
5.2.1	Ověření konstantního pole	59
5.3	ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ RF GENERÁTOR.....	62
5.3.1	Výkon a frekvence	62
5.3.1.1	Frekvence.....	62
5.3.2	Výkon.....	62
5.3.2.1	Testovací úrovně.....	63
5.3.3	Modulace.....	63
5.3.3.1	Amplitudová modulace signálu	64
5.4	ZESILOVAČ.....	64
6	METODIKA TESTOVÁNÍ ZA POUŽITÍ GTEM	66
6.1	SYSTEMATICKÝ NÁVRH ZKUŠEBNÍ SESTAVY	66
6.2	ZKUŠEBNÍ VLNOVOD GTEM	67
6.2.1	Uspořádání stolního zařízení.....	67
6.2.1.1	Zkušební podstavec.....	67
6.2.1.2	Manipulátor.....	67
6.2.2	Uspořádání uvnitř GTEM buňky	68
6.2.3	Uspořádání kabeláže	68
6.3	GENERÁTOR SIGNÁLU	69
6.3.1	Specifikace	69
6.3.2	Nastavení.....	69
6.4	ZESILOVAČE.....	70
6.4.1	Zesilovač FLH-120B.....	70
6.4.2	Zesilovač FLG-100A	70
6.4.3	Zesilovač FLG-50F	71
6.5	KONTROLNÍ POČÍTAČ A SOFTWARE NA TESTOVÁNÍ ODOLNOSTI.....	71
6.5.1	Kontrolní počítač.....	71
6.5.2	Kontrolní software	71
6.5.2.1	Základní údaje.....	71
6.6	POPIS ZPŮSOBU TESTOVÁNÍ NAVRŽENÝMI SOUSTAVAMI	72
6.6.1	Testování pomocí zkušebních sestav	73
	ZÁVĚR	76
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	80
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	83
	SEZNAM OBRÁZKŮ	85
	SEZNAM TABULEK.....	87

SEZNAM GRAFŮ88

ÚVOD

Elektromagnetické záření je v určité podobě všude kolem nás a my jeho vlastností mnohdy nevnímáme (např. mikrovlnná trouba, rentgen, rádio, některé typy detektorů pohybu atd.), přestože jsou častým zdrojem rušení. Rozvoj elektroniky v posledních desetiletích jasně ukázal, že u každého elektronického zařízení je důležitá jeho elektromagnetická kompatibilita v prostředí, ve kterém má správně fungovat. Elektromagnetické rušení může způsobovat nesprávnou činnost zařízení nebo jeho úplnou provozní neschopnost.

Z tohoto důvodu je důležité provádět testy elektromagnetické odolnosti. Především u poplachových systémů je na tento problém kladen velký důraz. Vzhledem k tomu, že tyto systémy mají za úkol detekovat nebezpečí v objektu nebo jeho ohrožení musí fungovat na sto procent a není možné, aby selhávaly. Díky těmto testům je možné určit místo jejich instalace v reálném prostředí, ale také určité problémy s technikou vyřešit už při konstrukci či dokonce v návrhu daného systému.

Z toho vyplývá, že se diplomová práce bude zabývat především elektromagnetickou odolností a to hlavně jejím měřením pomocí vlnovodů TEM (transverse electromagnetic mode) potažmo jejich nástupcem GTEM. Tyto vlnovody zde budou podrobně rozebrány a popsány.

Dále se pak práce hodlá ve své praktické části zabývat jejich technickým nastavením před a při měření elektromagnetické odolnosti. Hlavně metodikou samotného měření odolnosti u poplachového systému, pomocí již zmíněného vlnovodu GTEM.

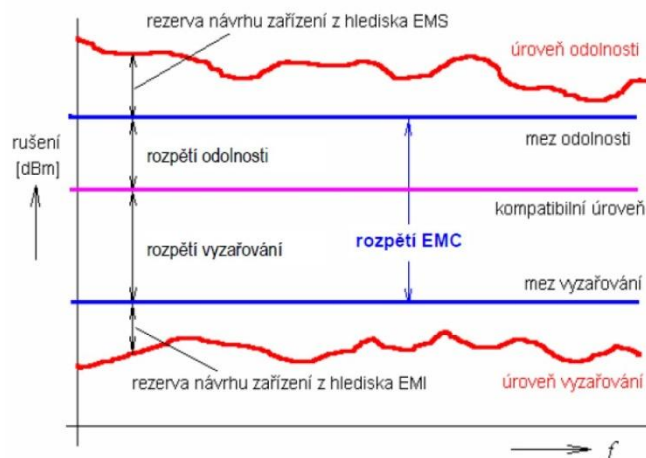
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPABILITA

Elektromagnetická kompatibilita neboli EMC (electromagnetic compability) je schopnost přístroje či systému fungovat správným způsobem v prostředí, ve kterém působí další původce elektromagnetických signálů (přírodní či umělé). Zároveň toto zařízení nesmí omezovat svou vlastní elektromagnetickou činností ostatní přístroje v okolí.

1.1 Základy EMC

Zdrojem elektromagnetického rušení je zpravidla jakékoli elektronické zařízení, které je zároveň přijímačem, pracujícím v elektromagnetickém prostředí. Též mohou být zdrojem elektromagnetického rušení přírodní zdroje, které většinou nedokážeme odstranit, případně omezit. Obecná norma ČSN-IEC 1000-1-1 definuje základní pojmy pro tato zařízení. Základní vztahy jsou vysvětleny na Obr č. 1.



Obr č. 1 Mez vyzařování a odolnosti [11]

Úroveň elektromagnetické odolnosti značí největší možnou míru rušení působícího na určité zařízení, při kterém nedochází k ovlivnění provozu. Nejnižší mez odolnosti je normou požadovaná úroveň odolnosti daného zařízení. Rezerva návrhu zařízení, z hlediska EMS (elektromagnetická susceptibilita), udává rozdíl výše zmíněných veličin.

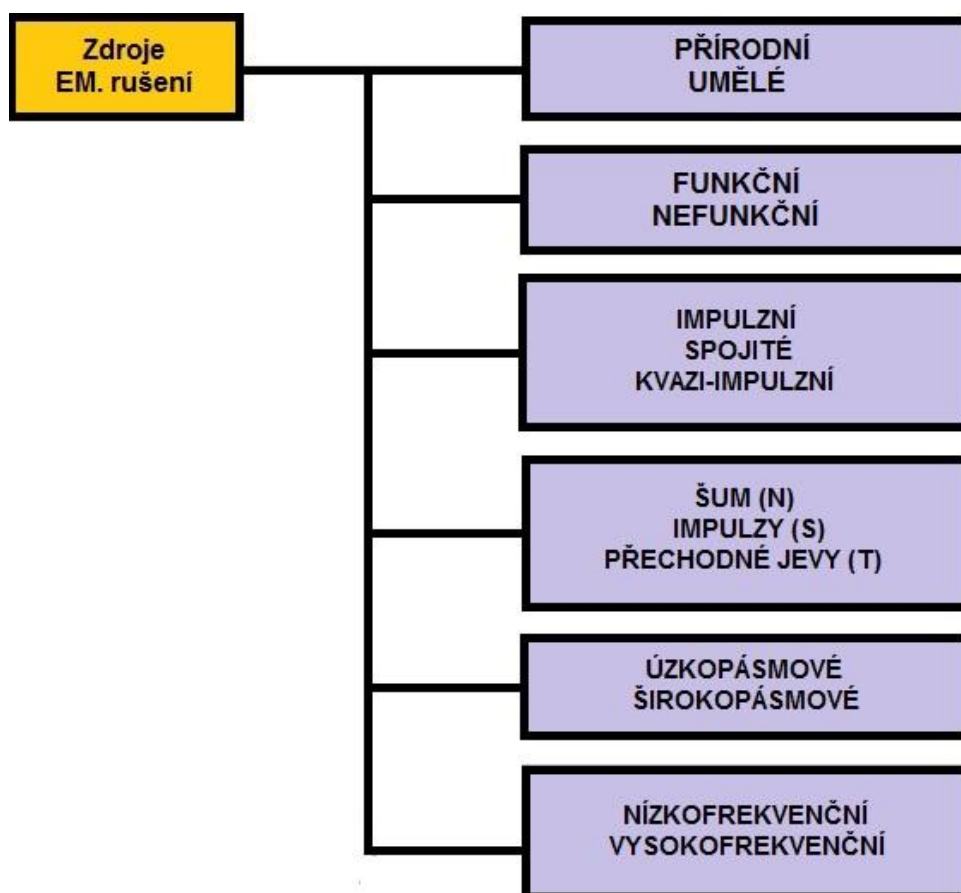
Úroveň vyzařování značí míru rušení, vydávaného samotným přístrojem, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené např. v [dBm] v závislosti na kmitočtu. Mez vyzařování je maximální normou umožněná míra vyzařování daného zařízení. Rezerva návrhu zařízení z hlediska EMI udává rozdíl výše zmíněných veličin.[26]

Rezerva EMC je v podstatě rozdíl mezi mezí odolnosti a mezí vyzařování. Kompatibilita úrovně je zaváděna jakožto míra rušení, při níž je dosaženo ještě přijatelně vysoké pravděpodobnosti EMC.

Z těchto zavedených pojmů jasně vyplývá, že pokud má přístroj vyhovět požadavkům EMC, musí být míra jeho vyzařování nižší než mez vyzařování. Stejně tak úroveň odolnosti přístroje musí být vždy vyšší než mez odolnosti. Také je důležité, aby mez odolnosti byla vyšší než mez vyzařování a to kvůli dostatečné rezervě EMC přístroje. Konkrétní velikosti rezervy návrhu zařízení z hlediska EMI a EMS nejsou nijak předepsány a jejich míra je výlučnou záležitostí výrobce daného zařízení.

1.2 Zdroje rušení

Zdroji elektromagnetického rušení či interferenčními zdroji nazýváme takové přístroje nebo přírodní jevy (blesky, sluneční erupce), u nichž vysoce převažuje proces generování rušivých signálů nad jejich nežádoucím příjmem. Rozřazení těchto případů lze učinit z mnoha hledisek, které jsou uvedeny v Obr. č. 2.



Obr. č. 2 Klasifikace interferenčních signálů [11], upravil Vašík, 2013

Umělé interferenční zdroje jsou, z našeho pohledu, nejvíce sledovanou skupinou z hlediska zamezení rušení, protože vznikají lidskou technickou činností. Přírodní zdroje se musí brát jako fakt, protože vznikají přirozenou cestou a jejich vzniku většinou nelze zabránit.

Funkční interferenční zdroje jsou takové, jejichž mají základní funkci systému, to je vypouštět elektromagnetické vlny (např. sdělovací signály vysílačů) a zároveň mohou ovlivnit provoz jiného systému. Opačný případ jsou nefunkční interferenční zdroje, které při svém provozu také vytváří elektromagnetické vlny, ale tyto jsou pouze vedlejším nežádoucím produktem a neplní žádnou funkci při provozu přístroje.

Interferenční zdroje lze rovněž členit podle časového průběhu rušivého signálu. Impulzní rušení má charakter časové posloupnosti jednotlivých impulzů nebo přechodných jevů. Opakem je tzv. spojitě rušení, které nemůže být považováno za posloupnost oddělených jevů a působí kontinuálně (nepřetržitě) na rušené zařízení. Kombinací spojitě a impulzního rušení je kvaziimpulzní rušení.

Dalším rozdělením podle obr. č.2 je členění na tři skupiny šum, impulzy a přechodové jevy.

Šum (angl. noise N) je zdroj rušivých signálů, mající význam jako náhodný signál, provázející provoz elektrických a elektronických součástek a obvodů. Šum jakožto rušivý signál má obvykle periodický charakter.

Druhou ze skupiny nazýváme Impulzy (angl. spikes S). Jsou to rušivé signály impulzního charakteru s velkým poměrem velikosti vzruchů k době jejich trvání. Na užitečný signál se tyto vzruchy superponují jako kladné či záporné „špičky“. Typickou příčinou jejich vzniku jsou zejména spínací pochody při kontaktním spínání elektrických či energetických obvodů a soustav.

Přechodné jevy (angl. transients T) jsou rušivé signály, trvající od několika ms do několika sekund, s náhodným jednorázovým výskytem. Příčinou jsou většinou náhlé změny v energetické síti při zapínání či vypínání spotřebiče velkého výkonu.

Pokud se zaměříme na časový průběh rušivého signálu je s ním jednoznačně vázána šířka jeho kmitočtového spektra, což je důležité hlavně pro potlačení rušení. Úzkopásmové rušení představují zejména užitečné signály rozhlasových a televizních vysílačů. Charakter širokopásmového rušení má naopak většina tzv. průmyslových rušivých signálů.

Z obecného hlediska se z každého interferenčního zdroje šíří rušivý signál, jak vyzařováním (prostorem), tak i po napájecích či sdělovacích vedeních. U různých zdrojů

rušení však obvykle jeden z těchto způsobů šíření převažuje, a proto se interferenční zdroje někdy rozdělují na zdroje rušení šířených vedením a na zdroje rušení šířených vyzařováním (prostorem).

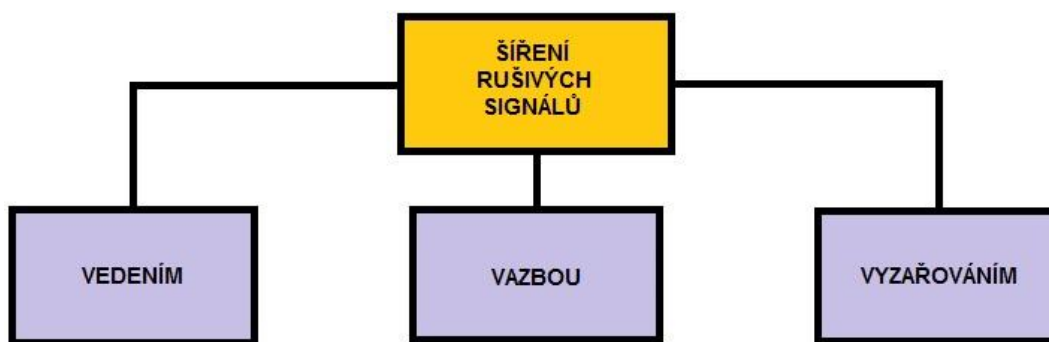
Z uvedeného přehledu rušivých signálů je zřejmé, že není možné provést přesnou a vyčerpávající klasifikaci. Různé zdroje rušení se navzájem prolínají a navíc problém komplikuje to, že vztahy a vazby ve sdělovací, informační a řídicí technice jsou vždy velmi složité.

1.3 Přenos a měření rušivých signálů

Měření rušivých signálů je nedílnou součástí problematiky EMC, jelikož představuje praktické ověření míry EMC daného zařízení. Je téměř nemožné dosáhnout dokonalé elektromagnetické kompatibility přístroje. Proto je vždy důležité změřit maximální hodnoty rušivých signálů pro určený typ zařízení.

Všechny postupy, měření, metody, podmínky i použité přístroje jsou popsány a závazně předepsány příslušnými mezinárodními, příp. národními normami a dalšími regulačními předpisy. Toto je nutné kvůli rozdílnosti a různorodosti nejen pracovních podmínek, ale i samotných přístrojů, aby bylo možné dané výsledky porovnávat.

Veškerá volba přístroje, při měření rušivých signálů, závisí hlavně na způsobu šíření jednotlivých rušivých signálů. Základní rozřazení je znázorněno na Obr. č. 3.



Obr. č. 3 Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů

V případě přenosu vedením jsou rušivými veličinami především napětí, proud nebo rušivý výkon signálu. Další případ přenosu vazbou většinou bývá elektrickou či magnetickou. Vzniká mezi dvěma navzájem blízkými zařízeními. Rušivými veličinami jsou zde především intenzita elektrického nebo magnetického pole. Posledním možným šířením je přenos vyzařováním elektromagnetických vln, kde se jedná hlavně o ovlivnění vzdálených

předmětů na vyšších kmitočtech. Rušivými veličinami jsou intenzita elektrického či magnetického pole, hustota vyzářeného výkonu rušivého signálu.

DÍLČÍ ZÁVĚR

Tato kapitola vysvětluje pojem elektromagnetická kompatibilita. Součástí je několik složek, jako úroveň vyzařování, úroveň odolnosti, jejich meze a rozpětí EMC. Všechny tyto pojmy tvoří tuto již zmiňovanou veličinu.

Dále pak se kapitola zabývala rozdělením zdrojů rušení a přenosu, také popsala jejich vlastnosti. Způsob šíření rušení se rozděluje do tří složek: vedením, vazbou a vyzařováním. V této práci abych vyzvednul pojem vyzařování.

2 VLNOVOD S PŘÍČNÝM ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM (TEM)

Vlnovody jsou válcovitá dielektrická tělesa, jejichž plášť je tvořen dobře vodivým materiálem.

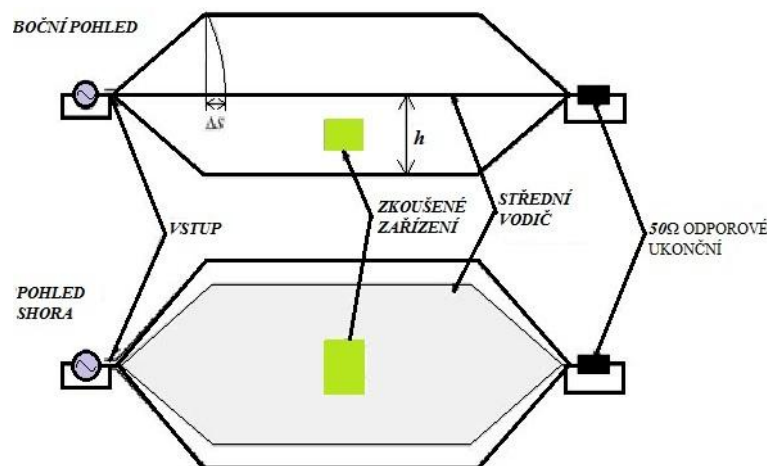
Vlnovody užívají následující označení:

- transverzálně elektromagnetické – *TEM* jsou vlnovody, které mají pouze příčné složky polí (jako ve volném prostoru),
- transverzálně magnetické - *TM* nebo elektrické – *E* jsou vlnovody, které mají podélnou složku elektrického pole,
- transverzálně elektrické - *TE* nebo magnetické – *H* jsou vlnovody s podélnou složkou magnetickou.

2.1 Vlastnosti TEM buňky

TEM buňka byla vytvořena na základě rozšířeného planárního přenosu provozovaného v TEM režimu simulace pro testování elektromagnetické odolnosti.

TEM buňka je hlavní částí koaxiálního vedení plochou a širokým středním vodičem a zúženým zakončením. Toto zakončení je uzpůsobeno jednoduchému přechodu standardním 50Ω koaxiálním konektorům,



Obr. č. 4 Schématický diagram TEM buňky

s cílem minimalizovat odrazy a tím dosáhnout charakteristické impedance po celé délce. Velikost zkoušeného zařízení je obvykle omezena na jednu třetinu výšky h , protože pole

EM je dostatečně homogenní pouze v této oblasti. Nehledě na to, že pro větší přístroje by byla intenzita záření příliš vysoká na to, aby se daly získat spolehlivé výsledky. Důležitá je také izolace samotné TEM buňky, aby nedošlo k jejímu ovlivnění vnějším rušením.

V testu odolnosti je zařízení napájeno přes jeden vstup buňky TEM. Odtud se elektromagnetické vlny sféricky šíří v zúžené části buňky, zatím co v hlavním objemu buňky se mění vlna na rovinnou, a proto ve střední části, kde je testované zařízení, je intenzita pole konstantní podélným rozšířením. Pokud testované zařízení způsobuje změnu pole, např. možnými vodivými či dielektrickými součástkami, jsou elektromagnetické vlny stejně jako proud ve středním vodiči ukončeny odpovídající impedancí na druhém vstupu buňky. Výhodou oproti zvukově izolované místnosti je odstranění antény pro stanovení elektromagnetického pole. Pro účel dosažení určité intenzity pole na pozici testovaného přístroje je buňka TEM výhodnější z důvodu nižšího příkonu než je tomu u antény v zvukově izolovaném pokoji.

Jasná nevýhoda buňky TEM je omezený kmitočtový rozsah vzhledem k buňce, sestávající se ze tří různě tvarovaných dílů. Kvůli dvěma rohům přechodů se délka vnitřního a vnějšího vodiče liší o Δs . Takže podél vnějšího vodiče je čas cesty vlny delší o $\Delta t = \Delta s/c_0$. Tato provozní deformace vede k vyššímu režimu šíření a tím je ovlivněna konstantní oblast uvnitř buňky stále vyšší frekvencí. Nejvyšší frekvence používá buňka především v závislosti na úhlu přechodu ze střední části zúžených konců.

Velikost buňky je dalším omezujícím faktorem. Buňka prokazuje dutinové efekty, jako jsou rezonance na frekvencích, kde mají rozměry buňky zhruba polovinu vlnové délky. Podle ČSN EN 61000-4-3 TEM buňka může být proto obvykle používána jen na cca 200 MHz.

Pro zvýšení horního limitu frekvence TEM buňky, s ohledem na dutinové účinky, může být umístěn na stěnách absorbující materiál tak, aby se minimalizovaly rezonance a odrazy. Tím frekvenční rozsah nabízí možnost rozšíření, ale horní mezní frekvence je stále pod 1 GHz.

2.2 Vlastnosti GTEM buňky

Díky rozvoji GTEM buňky v roce 1987 bylo možné provést EMC měření při frekvencích až do 1 GHz i vyšší. V té době to byl velký pokrok proti omezení použitelnosti frekvenčních rozsahů TEM buňky.

Princip GTEM buňky byl založen na snaze vyhnout se dvěma rohům přechodu. Ty jsou hlavním důvodem pro omezení rozsahu TEM buňky, a proto hlavní část GTEM buňky tvoří pouze jedna část rozšířeného obdélníkového vedení. To znamená, že délka vnitřního i vnějšího vedení je si rovna. Z toho vyplývá, že čas cesty vlny podél všech vodičů je stejný. Tato vlastnost je také důležitým faktorem pro způsob měření pulsu, protože disperze impulsu je snížena na minimum.

Obvykle rezonance vzniknou v uzavřené dutině. U GTEM buňky se toto neděje díky rozšiřujícímu se tvaru. Navíc je GTEM velmi dobře izolovaná stejně jako TEM a to přispívá k zamezení jakýchkoli vnějších vlivů.

Buňka má typickou odnímatelnou vstupní část, tzv. vrchol. Ve špičce je umístěn standardní 50Ω koaxiální konektor. Zde se nachází přechod ze standardního 50Ω konektoru k připojení asymetrického obdélníkového vlnovodu s plochou středního vodiče.

Buňka se otvírá pod úhlem 20° ve vertikální rovině a pod úhlem 30° v horizontální poloze. Důvodem je, že průřezové rozměry obdélníkového vlnovodu jsou 2 ku 3. Střední vodič je posunut svisle vzhůru kvůli zvětšení testovacího objemu oproti symetrickému uspořádání. Je zpravidla umístěn ve třech čtvrtinách výšky buňky. Efekt této asymetrie na konstantní pole uvnitř zařízení, pod středním vodičem, je zanedbatelná proti výhodě zvýšení množství zkoušené látky.

K dosažení charakteristické impedance 50Ω je poměr šířky středového a vnějšího vodiče 0,636 dle patentu přístroje. Zatím neexistuje žádný tvar rovnice pro výpočet impedance takového geometrického útvaru, takže daná hodnota je považována za schválenou a používá se numerických metodách a měření.

Testovací velikost je definována jako kolísání intenzity pole v rámci stanoveného limitu, kvůli zajištění spolehlivosti a opakovatelnosti měření. Při měření elektromagnetické odolnosti je umístěno elektronické zřízení do GTEM buňky a na vstup je připojen CW nebo pulzní generátor dle požadavků. K šíření je opět zvolena TEM vlna, ale v tomto případě je její tvar mírně kulovitý. To vše se děje vzhledem k malému úhlu otevření, který je velmi blízko volnému prostoru rovinné vlny. Proto mohou být měření GTEM buňkou dobře srovnávána se standardními měřeními jaká se provádí ve zvukově izolované místnosti.

Konstantní pole, uvnitř testovacího zařízení, do značné míry závisí na nízké úrovni odrazů od zadní části buňky. Aby bylo možné absorbovat většinu energie, která dosáhne zadní koncové stěny, je zde montováno širokopásmové uzavřené ukončení.

Intenzita pole uvnitř buňky se snižuje na $1/R$ v podélném směru. Je to díky tomu, že buňka je ve skutečnosti klín z koule s pevným prostorovým úhlem. Tj. $1/R$ chování je v souladu s kulovou vlnou.

Nominální intenzita pole v testovacím zařízení se typicky odkazuje na intenzitu pole ve středu zkušebního zařízení. Což je přibližně podíl mezi napětím a vzdáleností mezi stěnou vnitřního vodiče a spodní vnější stěnou $E = (U_{inner} - U_{outer})/h$. Respektive příslušný vstupní výkon je dán vstupním napětím na druhou a podílem charakteristické impedance přenosového vedení $P = U^2/Z$. Proto je důležité, aby nezbytný příkon v závislosti požadované intenzity pole na testovaný přístroj byl:

$$P = \frac{(E \cdot h)^2}{Z} [17].$$

Intenzita pole na testovaný přístroj tudíž bude:

$$E = \frac{\sqrt{P \cdot Z}}{h} [17].$$

Takže intenzita pole je funkcí vstupního napájení a vzdálenosti h od spodní části vnějšího vodiče do středního vodiče.

Nominální hodnoty intenzity pole v testovací oblasti 10 V/m splní většinu požadavků pro měření EMC. Pro malé přístroje se vzdáleností $h = 0,5\text{m}$ v poli nominální intenzity 10V/m lze dosáhnout podle rovnice příkonu $P = 0,5\text{W}$. I u větších zařízení je příkon mnohem nižší než u měření prováděných v zvukově izolované místnosti, kde se testované zařízení obvykle nachází 3 nebo 10 m od přenosové antény.

Předpokládáme, že pouze napájení směřující ke vstupu, podél osy buňky, se měří na vstupu. Jiným směrem, než k vstupní vlně vznikající ve zkoušeném zařízení, se nešíří nebo je ukončeno v hybridním ukončení v zadní části testovacího přístroje.

GTEM buňka může být používána k testování odolnosti pro frekvence do několika GHz kvůli širokopásmovému ukončení a skutečnosti, že neexistují žádné omezení pro frekvence plynoucí z mechanických rozměrů, jako u klasické TEM buňky.

2.3 Charakteristická impedance

GTEM buňka rozšiřuje přenosovou linku provozovanou v TEM režimu, takže zde musí být zajištěna charakteristická impedance 50Ω , aby se zabránilo odrazům. Pro konstrukci buňky musí být známa charakteristická impedance v geometrických rozměrech. Jelikož neexistují žádné uzavřené vzorce pro charakteristickou impedanci asymetrického pravoúhlého vedení, jsou nezbytné numerické metody.

Jsou známy dva různé způsoby, jak numericky aproximovat charakteristickou impedanci obdélníkové přenosové linky. Geometrie GTEM buňky, která je uvedena v patentu pro buňku GTEM se ověřuje pomocí těchto dvou metod. Kromě toho, je zde znázorněn vliv změny v geometrii takového přenosového vedení na jeho charakteristickou impedanci.

Kromě aproximace, v rámci číselné metody, dojde k dalšímu přiblížení v případě, pokud je zanedbán malý úhel otevření. Je to dáno hlavně tím, že způsob šíření vlny v GTEM buňce můžeme potom považovat za ideální TEM režim. Proto se přístup pro elektrostatické pole v nezúžené, obdélníkové, koaxiální, přenosové lince používá k aproximaci charakteristické impedanci GTEM buňky.

2.4 Hybridní ukončení

Vzhledem k rozdílným konceptům mezi TEM a GTEM buňkou je nutné použít ukončení v zadní části buňky.

V TEM buňce jsou distribuovány pouze proudy středního vodiče, které musí být ukončeny. Zde zcela postačí ukončení pomocí koncentrovaného zatížení 50Ω na vstupním konektoru. V GTEM buňce ukončení musí být vytvořeno tak, aby simulovalo širokopásmovou uzavřenou zátěž pro celý využívaný frekvenční rozsah. Nicméně, shoda nemusí být vždy perfektní.

Z tohoto důvodu je cílem nízká hodnota odrazu ukončení, aby se minimalizoval vliv stojatých vln na konstantní pole zkoušeného přístroje. Hybridní prvek, který splňuje tyto požadavky je popsán níže.

Rezistor 50Ω , spojující středový vodič a zadní stěnu, by měl dostatečně působit jako ukončení proudu ve středním vodiči při frekvencích až do řádů MHz. Šířka středového vodiče však umožňuje připojení k více než jednomu rezistoru, protože kapacitní a indukční účinky mohou způsobit odrazy vyšších frekvencí na spojení se zadní stěnou buňky.

V zásadě se používá větší množství paralelně připojených vodičů mezi středním vodičem a zadní stěnou, aby se minimalizovaly tyto účinky.

To znamená, že existuje určité frekvenční pásmo, ve kterém dochází ke křížení vln v TEM vlnovodu, a proto je důležité vytvořit vlnové ukončení. V této střední části kmitočtového pásma obě části nejsou zcela účinné a pouze kombinace vede k přijatelnému odrazu. To je třeba dobře zvážit při navrhování ukončení GTEM buňky.

2.4.1 Aktuální ukončení

Odporové ukončení musí mít vysokou ztrátu odrazem do frekvencí, alespoň 200 MHz. Pro provedení tohoto odporového ukončení je nutné vzít v úvahu dva hlavní aspekty.

První aspektem je rozložení proudu na střední vodič. Obvykle je považováno za přímé přizpůsobení hodnoty paralelních zakončovacích odporů na aktuálním rozdělení středního vodiče. Počet paralelních odporů má vliv na kvalitu ukončení (viz obr. č. 6). Podobně, jako v případě charakteristické impedance rozložení proudu, lze aproximovat pomocí numerických metod.

Druhý aspekt je vysoká vodivost ztrátových absorbérů. Směrem k zadní stěně jsou absorbéry otočeny větší částí svého průřezu. Tím se zvyšuje distribuovaná kapacita přenosového vedení, a tak charakteristická impedance buňky se snižuje směrem k zadnímu ukončení. Kompenzace tohoto efektu pomocí určité další konfigurace současného ukončení části je nutná, aby bylo možné udržet charakteristickou impedanci na konstantní úrovni kolem 50 Ω .

Teoreticky by tento problém mohl být zpracován následujícím způsobem:

podle třetí rovnice Maxwell náboj Q uvnitř objemu V je dán vzorcem:

$$Q = \oint \epsilon_0 \epsilon_c E dV [21].$$

V tomto případě je permitivita $\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon_0 \epsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega}$ komplexní číslo. Hodnotu relativní permitivity a vodivosti není možné snadno určit z absorpčního materiálu (není-li zadán výrobcem). Kromě toho, ani rozložení pole $E(x, y)$ a rozdělení permitivity $\epsilon(x, y)$ v profilu nelze snadno vypočítat, tak aby pyramidální absorbéry vyplnily pouze část průřezu. Takže modelování vlivu absorbérů na charakteristickou impedanci není příliš praktický způsob.

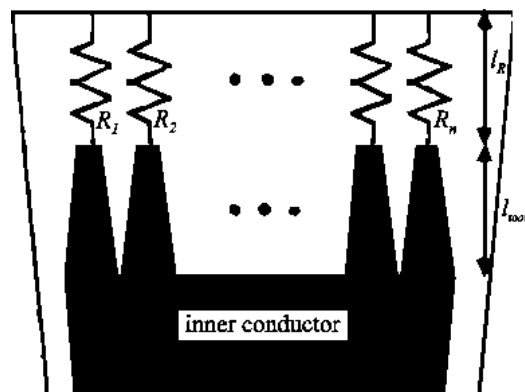
Pro realizaci náležitého ukončení aktuálně v praxi existují v zásadě dva základní pojmy. Oba přístupy mohou být na ukončení účinné až do frekvencí cca 200-500 MHz.

- Dvojrozměrná síť rezistorů
 - V podélném směru zvyšující se úroveň odolnosti, v rámci sítě, kompenzuje rostoucí distribuovanou kapacitu linky a ve vodorovném směru se odporové rozdělení přizpůsobí aktuálnímu rozdělení středního vodiče. Celkový odpor sítě je 50Ω . Tento koncept je značně finančně nákladnější, vzhledem k velkému počtu rezistorů.
- Zúžující se vnitřní vodič směrem k zadní stěně v části, kde se nacházejí absorbéry
 - Klesající šířka středního vodiče by měla kompenzovat rostoucí vliv RF tlumičů a výnos v konstantní charakteristické impedanci vedení. Připojení pouze jednoho zubu na zadní stěně a 50Ω odpor přináší stejné problémy kvůli geometrii, jak je uvedeno výše pro jednodoprové ukončení. Takže v ukončované části je střední vodič rozdělen do několika zubů. Zúžením zubů by se pak současně daly minimalizovat odrazy, které vznikají v důsledku změny v geometrii středního vodiče.

V patentu buňky GTEM se koncepce současného ukončení skládá ze tří stejných paralelně zapojených odporů, které spojují vnitřní vodič k zadní stěně, zatímco vnitřní vodič ukazuje zvláštní zúžení se směrem k zadní stěně, kde jsou uspořádány v RF tlumiče. V rovině, kde se nacházejí špičky absorberu pyramid, je střed vodiče rozdělen do tří zubů, které se zužují směrem k zadní stěně, kde se připevňují odpory.

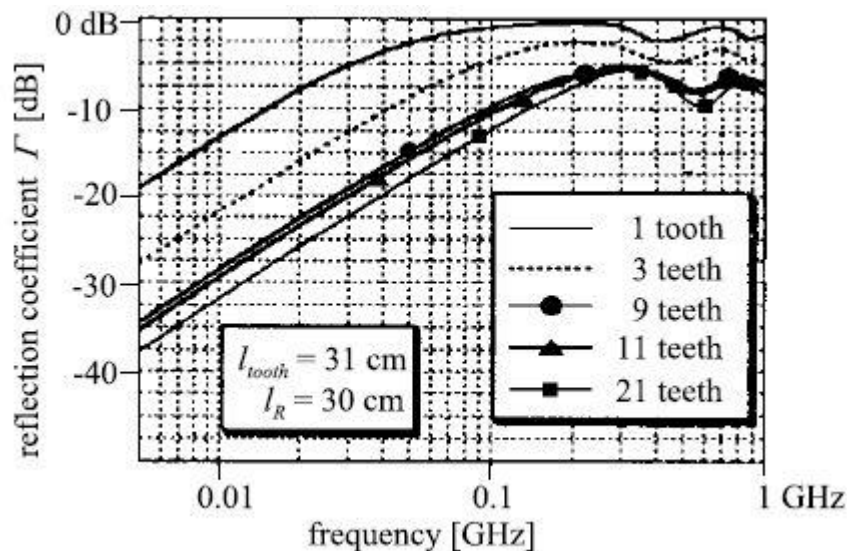
Počáteční šířka těchto zubů se přizpůsobuje aktuálnímu rozdělení ve středním vodiči. Zúžením se minimalizuje vliv RF tlumičů na charakteristickou impedanci. Zuby jsou připojeny k zadní stěně stejnými odpory, což vede k paralelnímu odporu 50Ω .

Rozložení proudu ve středním vodiči je považováno za distribuci různých paralelních odporů. Vliv RF tlumičů je považován za zúžení zubů. Paralelní odpory vycházejí v celkové odporové zátěži 50Ω .



Obr. č. 5 Aktuální ukočení na zadní straně buňky [21]

Za velkou GTEM buňku je považována buňka s maximální šířkou středního vodiče cca 3m. Z Obr. č. 5 vidíme uspořádání rezistorů na ukončení regionu. Na Obr. č. 6 je zobrazeno, jakým způsobem výkonnost současného ukončení zvyšuje s počtem distribuovaných odporů a zubů, resp. odraz se zvyšuje, když se zvyšuje počet zubů a odporů. Přesto celkový výkon nebude už výrazně lepší, když je překročen určitý počet zubů. Vše závisí to na velikosti buňky. V tomto případě, 3 m šířky středního vodiče odrazu, zvyšuje pouze o 3 dB pro změnu 9-21 zuby. Je třeba poznamenat, že stanovení distribuovaných odporových hodnot je třeba zvýšit.



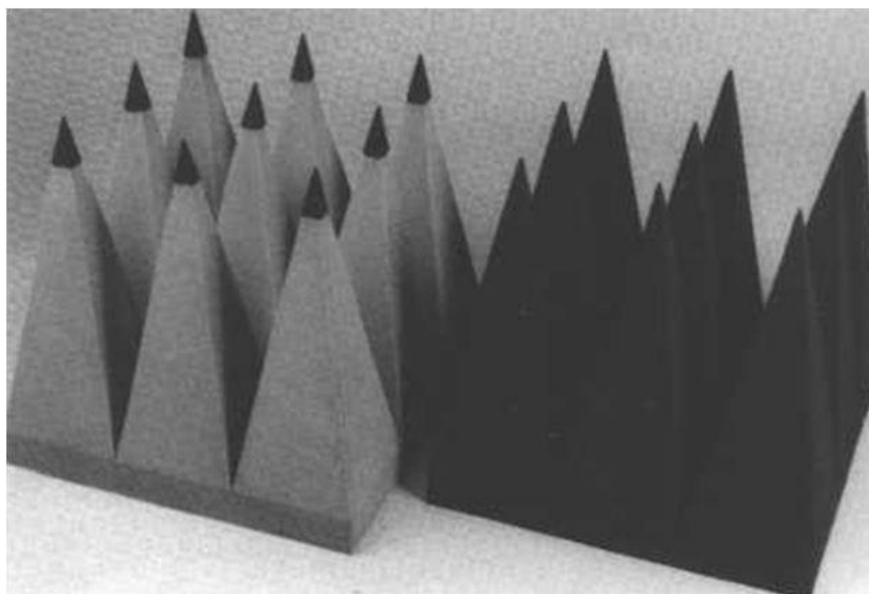
Obr. č. 6 Útlum ku frekvenci s různým počtem zubů a paralelních rezistorů [21]

2.4.2 Pole ukončení

RF tlumiče pro aplikace EMC se skládají z poměrně ztrátového materiálu, např. oxidu, vloženého do polyuretanové pěny, aby absorboval energii dopadající vlny. Obvykle mají pyramidový tvar (viz Obr. č. 7).

Zužující se tvar je vybrán kvůli svým dobrým nízkým odrazovým vlastnostem díky následujícím aspektům:

- Vzhledem k ostrým hrotům směřujícím na příchozí vlnoplochu je změna impedance kvazi-kontinuální.
- Impedance se mění postupně tak, jak se vlna šíří do absorbéru sestavy, který je vyplněn absorpčním materiálem, jenž se neustále zvyšuje.
- Zrcadlové odrazy od povrchu absorbérů směřují více do absorpční struktury než zpět do životního prostředí.



Obr. č. 7 Typický tvar širokopásmových pyramidových absorbérů [21]

Výška absorbéru pyramid určuje dolní limit frekvence, na které tlumiče mají dobrou ztrátovost. Jako pravidlo pro určení velikosti tlumiče lze použít, že výška tlumiče je polovina vlnové délky. Takže pro výšku 60 cm by se dolní mezní frekvence pohybovaly kolem 250 MHz. Tento limit bude jedním z kritérií pro výběr RF tlumičů.

V GTEM buňce jsou RF tlumiče uspořádány na kulové ploše zadní stěny buňky. Vzhledem ke kulovému uspořádání je impedance stejná pro celou vlnoplochu sférické vlny. Tak se dále snižují odrazy.

DÍLČÍ ZÁVĚR

Jsou zde popsány rozdíly vlastností TEM a GTEM buňky, hlavně v jejich konstrukci. GTEM buňka je v podstatě rozšířená verze TEM buňky, ale její charakteristické vlastnosti ji předčí. Nejdůležitější je tvar těchto buněk.

Dále je zde řešena intenzita pole uvnitř buňky a její výpočet. Charakteristická impedance vlnovodu GTEM je zvolena 50Ω . V poslední řadě se zabývám uspořádání absorbérů, jenž mají za úkol zachytit zbytky vyzářeného elektromagnetického pole, které mají tendence odrazet se zpět od zadní stěny buňky.

3 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST

Elektromagnetická odolnost (susceptibilita) je jednou za dvou nedílných součástí elektromagnetické kompatibility. Definujeme ji jako schopnost zařízení provádět úkon, pro něžž byly zkonstruovány bez omezení a také bez většího vlivu na okolní prostředí. EMS se tedy převážně zabývá technickou stránkou přístroje kvůli zvýšení jeho elektromagnetické imunity. Hlavním úkolem je tak ochránit přístroj před rušením jeho funkčnosti, ne zbavení se příčiny rušení.

3.1 Obecné testování elektromagnetické odolnosti

Při měření elektromagnetické odolnosti je třeba určit či předem vědět jeho meze narušení, které jsou obecně definovány dvěma způsoby:

- kvantitativně,
- kvalitativně.

Kvantitativní metoda měření mezí odolnosti je používána při vývoji samotného elektronického zařízení. Kdy je zjišťován tvar a velikost rušivých signálů v určených bodech zapojení. Je založena na určení hodnoty elektrické veličiny, při které již daný přístroj ztrácí své původní vlastnosti. To znamená, že je vyvolána nežádoucí změna ve funkčnosti přístroje. Tato hodnota je dále považována za pevně změřenou veličinu pro všechna ostatní zařízení toho typu.

Kvalitativní metoda zjištění elektromagnetické odolnosti je pro uživatele většinou důležitější, protože se u ní posuzuje změna stavu provozu nebo ovlivnění funkčnosti přístroje.

Funkční porucha je přitom definována jako změna provozní způsobilosti zkoušeného zařízení, tj. zhoršení jeho funkce během působení rušivého signálu (tj. během zkoušky odolnosti) či jako důsledek rušení (důsledek zkoušky odolnosti), který trvá po odeznění rušivého signálu (po ukončení zkoušky odolnosti). V praxi se nejčastěji rozlišuje pět základních funkčních kritérií: [11]

- Funkční kritérium A – všechny funkce zařízení či systému jsou vykonávány správně dle specifikace jak během zkoušky, tak i po jejím ukončení. Stručně řečeno: elektromagnetické rušení nemá a nezanechalo žádný vliv na chod zařízení či systému. [11]

- Funkční kritérium B - zařízení/systém pracuje dle specifikace, některé jeho části však během zkoušky vybočí z povolených tolerancí (nenastane však změna provozního stavu zařízení či změna dat v paměti). Po skončení zkoušky se všechny funkce musí automaticky (tj. bez zásahu operátora) obnovit v původním rozsahu a kvalitě a ve vymezených tolerancích. V tomto případě elektromagnetické rušení kvalitativně změní chod zařízení či systému, po jeho odeznění se však správný chod zařízení automaticky obnoví. [11]
- Funkční kritérium C - jedna či více funkcí zařízení či systému během zkoušky (během rušení) není plněna vůbec či správně dle specifikace. Po skončení zkoušky se všechny funkce musí automaticky (tj. bez zásahu operátora) obnovit v původním rozsahu a kvalitě. Elektromagnetické rušení tedy naruší chod zařízení, po jeho odeznění se plná funkčnost zařízení automaticky obnoví. [11]
- Funkční kritérium D - jedna či více funkcí zařízení či systému během zkoušky (během rušení) není plněna vůbec či správně dle specifikace. Po skončení zkoušky se funkce zařízení neobnoví automaticky, ale musí být obnovena (jednoduchým) zásahem operátora (uživatele) dle návodu k použití zařízení (např. reset). Rušení tedy naruší chod zařízení, po jeho odeznění je nutno plnou funkčnost zařízení obnovit zásahem operátora. [11]
- Funkční kritérium E - jedna či více funkcí zařízení či systému během i po skončení zkoušky (během i po ukončení působení rušivého signálu) není plněna správně dle specifikace. Všechny funkce zařízení lze následně obnovit jen profesionálním zásahem, tj. opravou či výměnou částí zařízení. Elektromagnetické rušení zde tedy narušilo chod zařízení, po jeho odeznění lze plnou funkčnost zařízení obnovit jen opravou. [11]

Výsledkem funkčního (kvalitativního) testování odolnosti tedy není změřená exaktní veličina, ale posouzení pokračující funkčnosti zařízení po provedené zkoušce (po odeznění rušivého signálu). Předchozí obecné definice funkčních kritérií je samozřejmě třeba pro každé jednotlivé zařízení přesněji specifikovat, tj. upřesnit charakter a druh jednotlivých poruch, příp. ztrát funkce v jednotlivých stavech A, B, C, D či E. [11]

3.1.1 Metodika zkoušek

Zkoušky elektromagnetické odolnosti se provádí v uměle vytvořeném elektromagnetickém poli. To z důvodu přílišné složitosti provádět měření v prostředí, kde se bude daný přístroj nacházet. Nelze totiž zajistit reprodukovatelnost naměřených výsledků, kvůli časově náhodnému výskytu elektromagnetického prostředí.

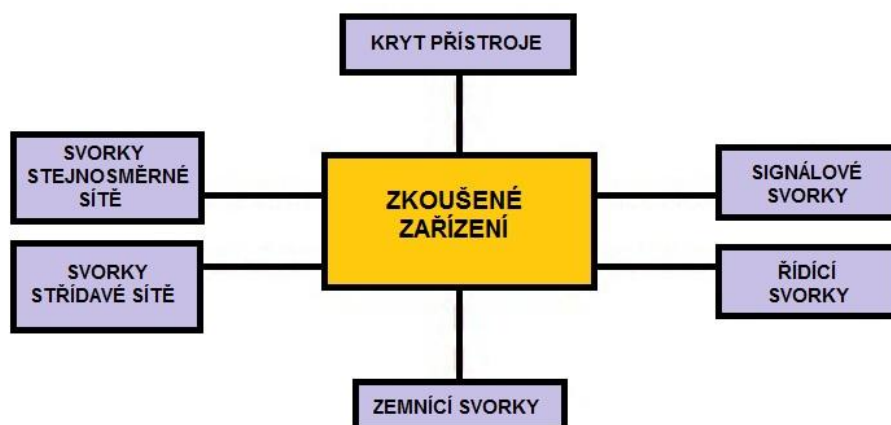
Uměle vytvořené prostředí se definuje z několika hledisek[11]:

- obvodového, skupinového a prostorového uspořádání testovacího (měřicího) pracoviště,
- kvalitativních a kvantitativních parametrů simulátoru (tj. umělého zdroje) elektromagnetického rušení,
- provozního stavu a nastavení zkoušeného systému, přístroje či zařízení.

Před zkouškou elektromagnetické odolnosti určitého zařízení je třeba zajistit několik důležitých faktorů v následujících bodech:

- stanovit rušivé elektromagnetické vlivy, které mohou vyšetřované zařízení v jeho předpokládaných budoucích pracovních podmínkách ovlivňovat. [11]
 - Jelikož spoustu měření nelze, hlavně z důvodů finančních, realizovat je nejdůležitější především určit takzvaný dominantní rušivý vliv. První se provede rozbor standardních provozních podmínek, v kterých se bude přístroj nacházet. Z tohoto rozboru, jenž obsahuje nějaké množství rušivých veličin, se vybere onen dominantní rušivý vliv. Tento vliv na specifikovaném vstupu přístroje může ovlivnit jeho funkčnost.
 - Základní druhy nežádoucích elektromagnetických vlivů se odvozují z reálných situací, které nastávají v provozních podmínkách daného zařízení. Tyto vlivy lze rozdělit na[11]:
 - nízkofrekvenční rušení v napájecí rozvodné síti nízkého napětí,
 - přechodné (transientní) jevy a vysokofrekvenční rušení,
 - elektrostatické výboje magnetická rušení,
 - rušení vyzařovaným elektromagnetickým polem.
- určit správnou konfiguraci a provozní stav zkoušeného zařízení[11].

- Elektromagnetická odolnost se musí též změřit za provozu daného zařízení a to ve všech provozních stavech přístroje. Jedinou výjimkou jsou stavy, při nichž je obtížné či zcela nemožné toto měření provést. Jedná se především o provoz, které trvají pouze velmi krátký časový úsek.
- Samostatné zkoušky se provádějí v nejnáchylnějším provozním režimu přístroje, při kmitočtovém pásmu klasického použití. Konfiguraci zkoušeného zařízení je nutno volit tak, aby se dosáhlo maximální elektromagnetické citlivosti.
- Pokud je zařízení součástí nějakého většího celku nebo se k němu připojují určité přístroje, pak je třeba provést zkoušku i s tímto přípojným zařízením, potažmo v celém celku přístrojů zda není ovlivněna funkčnost. Toto je třeba provést alespoň při minimálním zatížení celé soustavy.
- Všechny tyto údaje musí být zaznamenány ve zkušebním protokolu.
- určit možné brány vstupu rušivých signálů do vyšetřovaného zařízení [11].
 - Zkoušku elektromagnetické odolnosti lze provést pouze v případě, že stanovíme vstupy rušivých vlivů do přístroje.
 - Mezinárodní normy vstup definují jako přesně dané rozhraní mezi vnějším elektromagnetickým polem a přístrojem. Na Obr. č. 8 jsou uvedeny základní vstupy do zařízení.



Obr. č. 8 Základní typy vstupů rušivých signálů do zkoušeného zařízení [11], upravil Vašík,

- Všimněme si rovněž, že kromě standardních vstupních svorek a konektorů zařízení je za vstup považován i kryt daného zařízení, neboť tvoří fyzickou hranici, přes níž může procházet rušivé elektromagnetické pole. [11]
- Obecné zásady pro zkoušku odolnosti na jednotlivé vstupy[11]:
 - zkoušky jsou předepsány pro každý zjištěný vstup zařízení,
 - zkoušky se provádějí na těch vstupech, které jsou během normální činnosti zařízení přístupné,
 - zkoušky na jednotlivých vstupech se provádějí v libovolném pořadí a vždy jako samostatné,
 - stanovit kategorie požadované odolnosti zkoušeného zařízení.
- Kategorie požadované odolnosti konkrétních zařízení jsou standardizovány normami řady ČSN EN 61000-4-. Rozhodující kritérium pro požadovanou odolnost má ovšem především prostředí, v němž se předpokládá provoz přístroje. Díváme se na tuto problematiku z hlediska elektromagnetické zarušení v onom prostředí.
- Normy třídí prostředí do následujících tříd[11]:
 - úroveň (třída) odolnosti 1 je vyžadována u zařízení pracujících v prostředí s nízkou, příp. velmi nízkou úrovní elektromagnetického rušení. Jde o tzv. dobře chráněná prostředí,
 - úroveň (třída) odolnosti 2 popisuje odolnost zařízení, které má pracovat v prostředí s mírnou úrovní elektromagnetického rušení. Jde o běžná, tj. mírně chráněná, příp. nechráněná pracovní prostředí (typicky domácnosti, obchody, kanceláře),
 - úroveň (třída) odolnosti 3 je požadována pro zařízení určená pro tzv. náročná prostředí s předpokládanou vysokou úrovní elektromagnetického rušení. Jde o typická průmyslová prostředí,

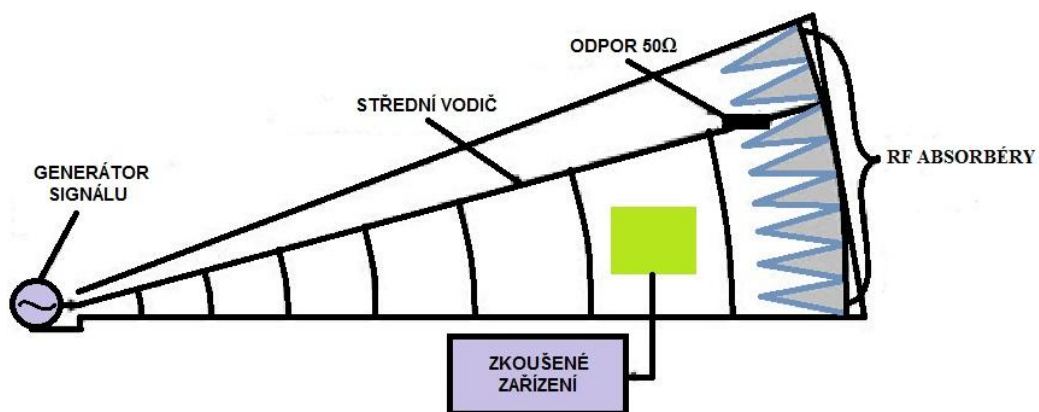
- úroveň (třída) odolnosti 4, příp. X musí mít zařízení určená pro prostředí s velmi vysokou úrovní předpokládaného rušení. Jde o nechráněná silně rušená průmyslová prostředí.
- definovat přípustné rušivé účinky pro zkoušené zařízení, tj. vymežit příslušnou kategorii funkčního kritéria odolnosti daného zařízení. [11]

Po provedení předchozích kroků jsou testy elektromagnetické odolnosti prováděny v těchto několika bodech[11]:

- simulace, tj. umělé vytvoření rušivých signálů a jejich navázání do zkoušenému objektu,
- provedení vlastních zkoušek a testů dle specifikace,
- dílčí vyhodnocení po každé zkoušce,
- vypracování podrobné dokumentace o provedených zkouškách.

3.2 Testování elektromagnetické odolnosti pomocí GTEM buňky

Při testování na náchylnost ke kontinuálnímu nebo pulznímu typu elektromagnetických polí je testované zařízení umístěno do testovací buňky a generátor signálu je připojen na vstup buňky (viz Obr. č. 9). Výkon zkoušeného zařízení je pak sledován v závislosti na příkonu energie.



Obr č. 9 Připojení generátoru k GTEM buňce

Vzhledem k malému úhlu otevření buňky jsou vlny jen mírně kulovité, takže můžeme říct, že testované zařízení bylo vystaveno rovinné vlně. To je důležitý aspekt, který dělá řízení standardizované a výsledky získané z GTEM buňky srovnatelné s těmi z jiných standardních měření.

Proud ve středním vodiči je ukončen odporovou zátěží s velikostí celkem 50Ω , přičemž odpovídá rozložení proudu do středního vodiče. Elektromagnetické vlny, které jsou generovány v prostoru buňky a užitě na zkoušeném zařízení jsou pohlceny v RF absorbéry, které jsou uspořádány na zadní stěně v kulovité rovině (viz obr. č. 9).

3.2.1 Zkušební postupy

Zkouška se zpravidla provádí s každým ze čtyř stran zkoušeného zařízení směrem k portu generátoru.

Pro vlnovody TEM, je elektrické pole polarizováno v jednom směru (typicky vertikálně), tak, aby se zajistilo, že zkoušené zařízení je plně vystaveno ekvivalentu, jak v horizontální, tak ve vertikální polarizaci, je třeba otočit zkoušené zařízení. Například, pro vertikálně polarizované elektrické pole je ekvivalentní horizontální polarizace dosaženo tím, že nejprve otáčením zkoušeného zařízení 90° kolem osy kolmé na homogení prostor (směr šíření režimu TEM) přeorientujeme první snímek zkoušeného zařízení, pak následují další tři rotace zkoušeného zařízení po vodorovné ose. To může zabránit testování v TEM vlnovodech určitému druhu zkoušeného zařízení, které je závislé na prostorové orientaci.

Alternativně, může být TEM vlnovodu otáčen kolem zkoušeného zařízení nebo může být užito více polarizačního TEM vlnovodu, který může být použit takovým způsobem, aby bylo dosaženo stejné polarizace.

Velikost zvětšení kmitočtu se musí rovnat 1% předchozího kmitočtu. Doba prodlevy na každém kmitočtu nesmí být menší, než je čas nezbytně nutný pro reakci zkoušeného zařízení, ale v žádném případě nesmí být kratší než 0,5 s. Nicméně, většinou je vhodná doba prodlevy 1 sekunda.

Frekvenční pásma, která je třeba zvažovat, mají být zahrnuta v kmitočtových krocích, podle výše uvedeného požadavku. V 80% signálu amplitudově modulovaného se sinovou vlnou 1 kHz je třeba, v případě potřeby, pozastavit měření kvůli nastavení úrovně signálu RF nebo přepnutí oscilátorů.

3.2.2 Výsledky zkoušky a protokol o zkoušce

Kromě obvyklé zprávy o stavu elektromagnetické imunity, se vypisují také informace o TEM vlnovodu velikosti, typu a ověřování metody.

DÍLČÍ ZÁVĚR

Obecně lze napsat, že přístroje, s nimiž se pracuje v prostředí s nízkou silou elektromagnetických rušivých signálů, řadíme do nižších úrovní odolnosti. Zatím co přístroje, které jsou určeny do náročných prostor, například elektrárenské objekty, musí být řazeny do vyšších úrovní odolnosti.

Zařízení se při zkouškách odolnosti považuje za přijmač rušení. Především jsou zkoumány především jeho vlastnosti a chování během vystavení elektromagnetickému poli.

Pokud se díváme na zkoušky z praktického hlediska, není možné je provést v reálném prostředí, proto se využívá simulovaného. To se snaží co nejvěrněji přiblížit danou situaci realitě, ve které zařízení pracuje.

4 TECHNICKÉ PARAMETRY ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ

Zkušební zařízení se skládá z několika částí. Ovšem ty nejdůležitější části jsou zkušební komora TEM nebo GTEM, RF generátor signálu a zesilovač signálu.

4.1 Technické parametry zkušební komory GTEM

4.1.1 Specifikace

Cílem této kapitoly je technické přiblížení GTEM buňky, která umožňuje testování EMC vlastností malých elektronických zařízení, alespoň o velikosti PIR detektoru v kmitočtovém rozsahu od 30 MHz do 1 GHz, podle mezinárodních norem pro EMC měření.

Podle ČSN EN 61000-4-3 se vyžaduje konstantní pole ± 3 dB, které je kolmé na příchozí vlnu a nachází se těsně před pozicí zkoušeného zařízení. Chování intenzity pole v závislosti na vzdálenosti není stanoveno. Konstantního pole o ± 3 dB by mělo být dosaženo v celém testovacím objemu GTEM buňky. Lze očekávat od zkušebního prostoru, že v rovině kolmé na dopadající vlny je odchylka intenzity pole asi $\pm 1,5$ dB. Chování pole v podélném směru vede k odchylce o $\pm 0,6$ dB na přiměřenou délku zkušebního objemu asi 18 cm. Třetím faktorem, který je třeba vzít v úvahu, je poměr stojatých vln vzhledem k ukončení zařízení. K dosažení poměru stojatých vln asi $\pm 0,9$ dB = 1,23 návrat ztrát ukončení zařízení musí být lepší než $\frac{1,23-1}{1,23+1} = 0,1 = 20$ dB. Součet všech odchylek je pak ± 3 dB.

Intenzita pole, uvnitř zkušebního prostoru, by se jako funkce frekvence neměla lišit o více než ± 3 dB od Hz až nejméně po 1 GHz. Odchyly by měly být zaznamenány při kalibraci buňku tak, aby se mohly později výsledky měření korigovat.

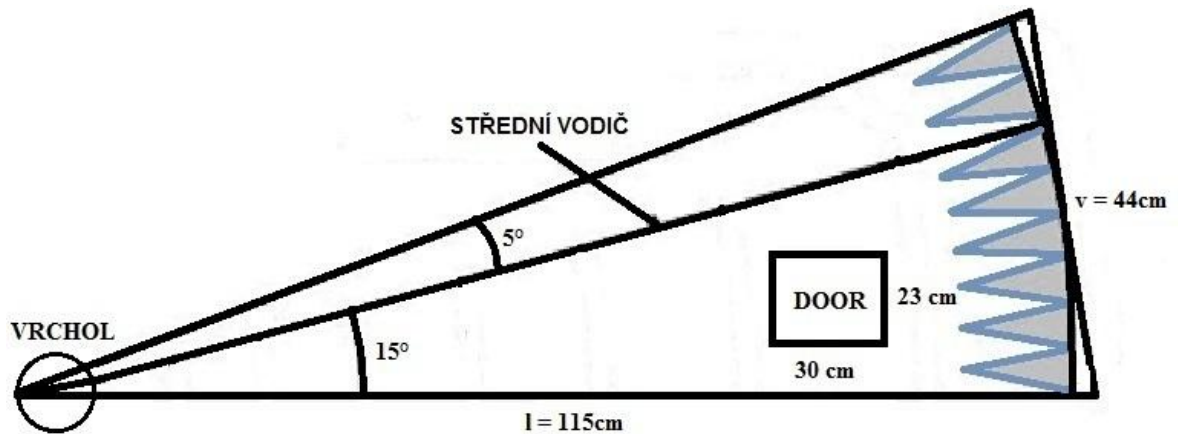
Ukončení buňky je vhodné zkonstruovat pro napájecí napětí minimálně 10 V/m, které vede k jmenovité hodnotě intenzity pole ve zkušebním prostoru.

4.1.1.1 Rozměry

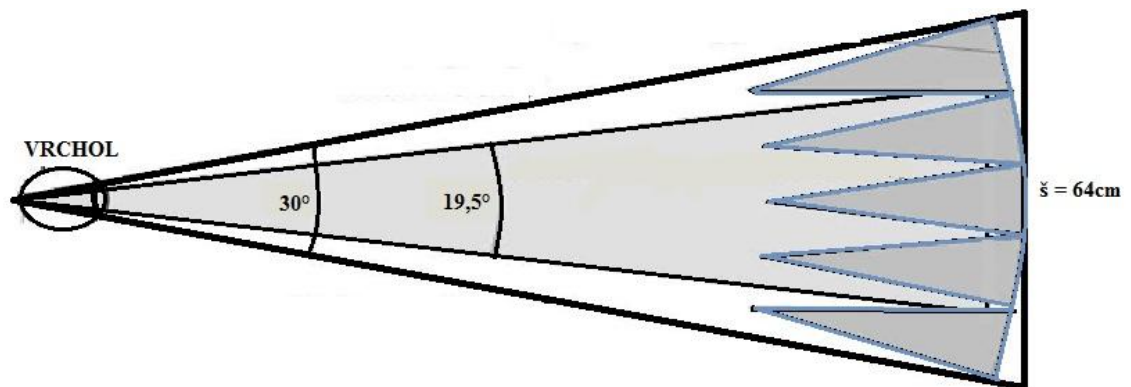
Velikost GTEM buněk, které se obvykle používají pro průmyslové EMC testování může překročit délku 9m a vhodný zkušební objekty o objemu více než 1m^3 . Pro naše účely ovšem postačí buňka menší velikosti.

Celková délka popisované buňky nepřesahuje 1,5 m a hmotnost je nižší než 80 kg. Rozměry buňky GTEM, která je používána v této práci, jsou uvedeny na Obr. č. 10 a Obr. č. 11 .

Vnější vodič je vyroben z 2 mm hliníkového plechu pro mechanickou stabilitu. Dveře o velikosti 30 cm x 23 cm se nachází na boční stěně. Buňka je stíněná, aby se zabránilo úniku nebo rušení od vnějších polí.



Obr. č. 10 GTEM buňka boční pohled



Obr. č. 11 GTEM buňka vrchní pohled

Zadní část buňky se skládá z tuhého rámu a hliníkového plechu. List je ohnutý do kulového tvaru na podporu sférického uspořádání RF absorbérů. Absorbéry jsou připevněny k zadní stěně, stejně jako stávající ukončení buňky.



Obr. č. 12 Ukázka GTEM komory [12]

4.1.1.2 Testovací prostor v buňce

Testovací prostor se nachází v centru pod středním vodičem přímo před špičkami RF absorbérů. V tomto případě je vzdálenost od zadní stěny cca 60 cm. V této poloze je vzdálenost od středového a spodního vnějšího vodiče asi 39 cm a šířka buňky zhruba 64 cm.

Vertikální rozšíření testovacího prostoru je omezeno na 1/3 vzdálenosti h od spodní části vnějšího a středního vodiče. To ze je dvou důvodů:

- Konstantní elektromagnetické pole má být, jen v této oblasti, v souladu s výše uvedeným požadavkem.
- Větší zařízení by měnilo pole intenzity příliš mnoho, než aby bylo možné spolehlivě měřit.

Šířka zkušebního prostoru je obvykle rovněž omezena na jednu třetinu šířky buňky, která je v tomto případě asi $a_{\text{near}} = 70$ cm. Takže celková velikost elektrických zařízení, která mohou být testována buňkou, není větší než 20 cm x 20 cm x 15 cm (šířka podle délky podle výšky).

4.1.2 Vrchol

Vrchol je přechod z 50Ω koaxiálního kabelu do obdélníkového vedení. To je v tomto případě vyrobeno z mosazi a zabírá asi 10% z celkové délky buňky. Přední panel je vyroben co nejmenší, a přesto dost velký pro m obvyklý 50Ω konektor.

Rozměry příčného průřezu na začátku vrcholu jsou $d_1 = 13$ mm, a $a_1 = 19,5$ mm. Tloušťka u středního vodiče v souvislosti s výškou d_1 vrcholu je rovna $\frac{u}{d_1} = 0,18$, a proto nemůže být opomenuta při stanovení šířky středního vodiče v místě napojení na středový kolík konektoru. Šířka $w_2 = \frac{0,56}{a_1} = 11$ mm středního vodiče, v místě napojení na středový kolík konektoru, byla stanovena tak, aby bylo dosaženo charakteristické impedance 50Ω .

Místo napojení na vrcholu na tělo buňky musí být mezi středem a vnějším vodičem na šířku $\frac{w_2}{a_2} = 0,64$. Přesná šířka na střední vodič může být určena pro více bodů po celé délce hrotu. Lineární interpolace, s dvěma uvedenými hodnotami, je dobrá právě v tomto případě. Z tohoto důvodu šířka středního vodiče a vrcholu roste lineárně podél vrcholu. Zde je střední vodič konečně ve správné svislé poloze $h_2 = \frac{3}{4}a_2$.

Aby se zabránilo odrazu, vlivem náhlé změny průměru, v místě, kde je středový kolík konektoru N připevněn k střednímu, vodiči musí být přechod proveden velmi hladce. Tedy na délce cca 1 cm má střední vodič zužující se tvar.

4.1.3 RF absorbéry

Vysokofrekvenční absorbéry ukončují vlny ve frekvenčním rozsahu od počáteční frekvence, která závisí především na délce pyramid. Pravidlo výšky absorberu pyramidy je, že by měla být větší než polovina vlnové délky. Takže pro výšku 60 cm by se dolní meze frekvence pohybovaly kolem 250 MHz.

Jsou sestaveny na kulové ploše zadní stěny, kvůli ovlivnění jedné stejnorodé vlnoplochy. Dostatečně široká mezera 2-3 cm musí být ponechán na odporové ukončení montáže, protože RF tlumiče mají větší vliv na charakteristickou impedanci, čím více jsou situovány do centra vodiče.

4.2 Technické a funkční parametry generátoru signálu

RF (rádiové frekvence) a mikrovlnné generátory signálů se používají pro testování komponentů, přijímačů a testovacích systémů, v široké řadě aplikací, včetně mobilních komunikací, Wi-Fi, WiMAX, GPS, audio a video vysílání, satelitní komunikace, radar a elektronického boje.

4.2.1 Typy RF generátorů

Je možné navrhnout RF generátory signálu mnoha různými způsoby. S ohledem na vývoj elektronického obvodu v průběhu let, se dá říci, že existují dvě formy generátoru signálu, které lze použít:

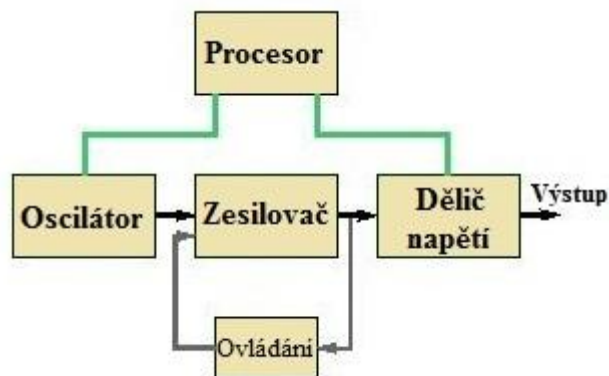
- volnochodé RF generátory signálu,
 - Tento typ generátorů signálu se dnes používá jen zřídka. Nicméně mají tu výhodu, že produkují velmi čistý signál a fázový šum není po obou stranách hlavního signálu, jako je tomu u některých jiných radiofrekvenčních generátorů signálu.
 - Tyto generátory signálů používají formu frekvenční uzamčené smyčky. To poskytuje prostředek k přidání určité frekvenční stability a přitom je zachována velmi nízká hladina fázového šumu. Toto nejsou dnes běžné generátory, protože výkon generátorů signálu RF pomocí technologie frekvenčních syntetizátorů se výrazně zlepšila.
- syntetizované RF generátory signálu,
 - Prakticky všechny RF generátory signálu, používané dnes, jsou vybaveny frekvenčním syntezátorem. Díky této technologii je možné, aby kmitočty, jež jsou zadány přímo z klávesnice nebo pomocí dálkového ovládání, byly velmi přesné. Také je důležité, aby toto všechno umožňovala úroveň výstupního signálu. Přesnost je závislá na vnitřním referenčním oscilátoru, který je specifický velmi vysokou přesností a proto může být signál udržen na externí referenční frekvenci.

Existují dvě hlavní techniky, které se používají v syntetizovaných RF generátorech signálu:

- fázový závěsný syntezátor,
 - Fázový závěsný syntetizátor je používán v mnoha RF generátorech signálu. Umožňuje generovat signály v širokém rozsahu frekvencí, s relativně nízkou úrovní rušivých elementů. Technologie fázového závěsného syntezátoru je dobře vyvinutá a umožňuje vysoký výkon RF signálů, které mají být vytvořeny použitím RF generátoru.
- přímý digitální syntezátor.
 - Technika přímého digitálního syntezátoru může být použita u generátorů signálu RF. Umožňuje poměrně snadno velmi jemné změny frekvencí, nicméně maximální limit přímého digitálního syntezátoru je obvykle mnohem nižší, než je nejvyšší udávaná frekvence pro generátor signálu. Většinou jsou používány ve spojení se smyčkou fázového závěsného syntezátoru, kvůli dosažení požadovaného frekvenčního rozsahu.

4.2.2 Provoz RF generátoru

Abychom lépe porozuměli ovládání obecného mikrovlnného nebo radiofrekvenčního generátoru signálu, je důležité pochopit, co je jeho součástí.



Obr. č. 13 Diagram obecného generátoru signálu

Diagram ukazuje zjednodušené blokové schéma pro RF a mikrovlnný generátor signálu.

Z toho je vidět, že generátor má několik hlavních bloků:

- oscilátor,
 - Nejdůležitější blok v generátoru signálu RF je oscilátor sám. Může to být jakákoliv forma oscilátoru, ale v dnešní době by zcela jistě byla vytvořena z frekvenčního syntezátoru. Tento oscilátor přijímá příkazy z regulátoru a musí být nastaven na požadovanou frekvenci.
- zesilovač,
 - Výstup z oscilátoru bude potřebovat jisté zesílení. Toho dosáhneme pomocí speciálního modulu zesilovače. Zároveň zesílíme signál, obvykle na pevnou úroveň. Měl by mít kontrolní smyčku, která udržuje výstupní úroveň, přesně na určených frekvencích a teplotách.
- dělič napětí,
 - Dělič napětí je umístěn na výstupu z generátoru signálu. Slouží k zajištění přesné impedance při výstupu signálu, stejně jako umožňuje generátoru, být nastaven na velmi přesnou hodnotu. Toto je nutné zejména u relativních úrovní výkonu, tj. při přechodu z jedné úrovně do druhé, kde musí být hodnoty velmi přesné a představují přesnost v samotném děliči napětí. Stojí za zmínku, že výstupní impedance se hůře přesně určuje pro nejvyšší úroveň signálu, kde je útlum menší.
- ovládání.
 - Další komponenty se používají k zajištění snadné ovladatelnosti RF a mikrovlnného generátoru signálu. Také je možné, aby se generátorem manipuloval pomocí dálkového ovládání, které zároveň kontroluje všechny aspekty provozu zkušebního zařízení.

4.2.3 Funkce RF generátoru

Mikrovlnné a RF generátory signálu jsou dnes schopny nabídnout širokou škálu funkcí a vybavení. Níže popsány jsou příklady některých funkcí:

- frekvenční rozsah,
 - Frekvenční rozsah RF generátoru signálu má prvořadý význam. Musí být schopen pokrýt všechny frekvence, které budou pravděpodobně generovány. Například při testování přijímače, jako součást zařízení, ať už se jedná o mobilní telefon nebo jiný rozhlasový přijímač, je nutné, aby bylo možné ověřit nejen pracovní frekvenci, ale i jiné kmitočty, kde mohou nastat problémy.
- úroveň výstupu,
 - Výstupní rozsah pro RF a mikrovlnné generátory signálu je obvykle řízen s relativně vysokým stupněm přesnosti. Výstup, v samotném generátoru, je udržován na konstantní úrovni, který prochází vysoce kvalitním variabilním děličem napětí. Ten zpravidla poskytuje nejvyšší míru přesnosti. Rozsah je obvykle omezen na horním konci konečného zesilovače v RF generátoru signálu.
- modulace,
 - Některé RF nebo mikrovlnné generátory signálu mají zabudované oscilátory, které lze použít k modulaci výstupního signálu. Ostatní mají možnost použít modulaci z externího zdroje. Modulační formáty pro aplikace, například mobilní komunikace, jsou neustále složitější, takže možnosti generátorů signálu RF se musely stát pružnější, některé z nich umožňují složité modulační formáty jako QPSK, QAM a podobně. Generátory signálu, které podporují komplexní modulace, jsou často označovány jako generátory vektorové signálu.
- ovládání.
 - V dnešní době existuje mnoho možností, jak ovládat RF a mikrovlnné generátory signálu. Jednou z takových jsou tradiční ovládací prvky na předním panelu, ale je zde také mnoho jiných pro dálkové ovládání. Spoustu zkušebních laboratorních zařízení přicházejí s komunikací GPIB, která je již součástí standardní výbavy, ale jsou i jiné, například RS-232 a Ethernet. Také jsou populární rack technologie, které jsou uzpůsobeny, jako nástrojové karty s drážkou do stojanu s ostatními položkami zkušebního

zařízení. První z nich byla VXI. Jsou i levnější možnosti, jako PXI a PXI Express.

4.2.4 Frekvenční rozsah

Jedna z klíčových specifikací pro každý RF generátor signálu je frekvenční rozsah, který pokrývá. Při výběru frekvenčního pásma, požadovaného pro generátor signálu, je třeba vzít v úvahu všechny aspekty, pro které bude generátor používán, například zkoušky odolnosti. Frekvence u generátoru signálu nemusí nutně pokrývat jen potřeby testované jednotky. Zkoušíme-li radiopřijímače, je třeba testovat jejich odolnost i mimo pásmo signálů na obrazu a jiné frekvence. Ty mohou být mimo pracovní frekvenční rozsah testované jednotky. Kvůli tomu se generátorem signálu budou muset přizpůsobit podmínky a další požadavky.

4.2.5 Harmonické a rušivé signály

Všechny generátory signálu produkují určité úrovně rušivých signálů. Harmonické jsou obecně mnohem vyšší, protože značné úsilí, vynaložené na snižování intermodulačních a jiných neharmonických signálů, je spojené s rušivými signály.

4.2.6 Výkon RF generátoru

Další důležitou specifikací generátoru signálu je jeho výkon. Pro většinu generátorů signálu RF se výkon udává v dBm, tj. dB v poměru k jednomu mW.

Úroveň výkonu v dBm	Úroveň výkonu v mW
0	1
3	2
10	10
13	20
20	100
23	200

Tab č. 1 Konverze dBm na mW

Ačkoli signální generátory mají různé úrovně výstupů, nejčastější z nich je maximální výstupní úroveň +13 dBm. S ohledem na přesnou maximální úroveň je obvykle uváděn rozsah 10 až 100 miliwattů, tj. 10 až 20 dBm.

4.2.7 Přesnost napájení

Pro mnoho testovacích scénářů je nutné, aby na výstupu z generátoru signálu byla přesně určená hodnota. To je z důvodu, že reakce testované jednotky se velmi pravděpodobně liší v závislosti na síle výstupního signálu generátoru. V některých případech se zdá, že naměřená data jsou velmi citlivá na sílu výstupního signálu generátoru. Z toho vyplývá, že přesná specifikace síly výstupního signálu má velký význam.

Používáme dva prvky na měření přesnosti výstupní úrovně generátoru signálu. Volba závisí na tom, jakým způsobem je výstupní síla kontrolována. Obecně se skládá z děliče napětí, a to dává možnost měnit onu výstupní sílu. Před výstupním děličem napětí v generátoru signálu, je zesilovač zpětné vazby, který se používá k udržení přesné úrovně signálu. Exaktnost děliče napětí, jenž vytváří relativní přesnost jednotlivých kroků, zajišťuje absolutní přesnost síly signálu, zatímco se udržuje úroveň zesílení zesilovačem.

4.2.8 Fázový šum

Jednou z informací, jenž musí být uvedeny na generátorech signálu, je úroveň fázového šumu, který se vyrábí. Důvod pro toto označení je, že mnoho generátorů signálu spadá do kategorie syntetizovaných. Syntetizovaný generátor signálu nabízí spoustu výhod z pohledu přesného výběru frekvencí, stability a vysoké úrovně programovatelnosti. Problém fázového šumu se naskýtá v některých generátorech a je třeba jeho specifikace pečlivě zvážit.

Při obecném měření šumu systému, může fázový ovlivnit měření. V souladu s tím je třeba přesně určit tolerovatelnou hranici.

Hodnoty fázového šumu v signálu vysokofrekvenčního generátoru se obvykle sníží, když se posun nosných vln zvyšuje. Skutečné hodnoty mohou být na několika místech ve specifikaci a někdy i o celou délku fázového šumu posunuty.

Úroveň fázového šumu se měří v dBc nebo Hz. Úroveň šumu v 1 Hz šířky pásma je ve vztahu k úrovni nosných vln. Pokud šum není na jedné frekvenci, tak čím větší je šířka pásma, tím víc šumu je viděno. Podle toho je tedy nutné specifikovat šířku pásma a 1 Hz je vzat jako standard.

4.2.9 Podporované modulační formáty

Aby testy mohly být prováděny s generátorem signálu, je třeba specifikovat, jak může být jeho signál modulován. Touto cestou se dá skutečné signály simulovat a požadované zkoušky provádět. Většina generátorů signálu má schopnost modulovat signály různými způsoby. Některé mají vyšší míru flexibility, než ostatní, v důsledku toho je nutné zkontrolovat specifikace generátoru, aby se zajistilo, zda má požadované parametry.

Původně mívaly generátory signálů pouze amplitudovou modulaci - AM a frekvenční modulaci - FM. Nicméně využitím spojením rozhlasových a bezdrátových systémů vznikly mnohem pokročilejší formy modulace. Mnoho generátorů signálů má nyní velmi komplexní modulační schopnost, některé z nich mohou být použity i pro další možnosti. V současné době je celá řada formátů modulace, které jsou k dispozici v generátoru signálu. Ty mohou zahrnovat různé formy PSK, PSK (včetně BPSK, QPSK, 8PSK, atd.), jakož i další složitější modulační formáty, včetně kvadraturní amplitudové modulace QAM (včetně 16 a 64 bodu QAM). K dispozici jsou i jiné druhy modulace, včetně CDMA a OFDM. Je nezbytné zajistit, aby vysokofrekvenční generátor signálu byl schopen nabídnout požadované modulační formáty.

4.2.10 Zkušební interval kalibrace

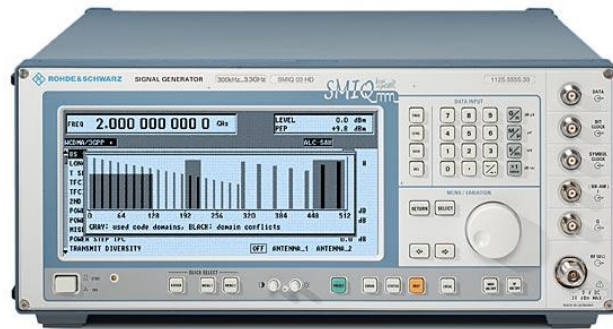
Kalibrační interval je důležitý pro každou položku z testovacího zařízení a to v případě všech generátorů signálu, ať už se jedná o nový nebo použitý. Pro mnoho generátorů signálu je intervalem rok, ale v případě vyššího stupně přesnosti pro některé specifikace jsou zapotřebí kratší časové intervaly.

4.2.11 Vektorový generátor signálu

Vektorový signálový generátor - VSG se objevil jako důsledek potřeby pro generaci mnohem složitějších průběhů.

Generátory signálu nebo vektorové VSG uspokojí potřeby rozhlasových, bezdrátových a mobilních systémů z W-CDMA / UMTS a Wi-Fi - IEEE 802.11, IEEE 802.16 WiMAX -, LTE a mnoho dalších.

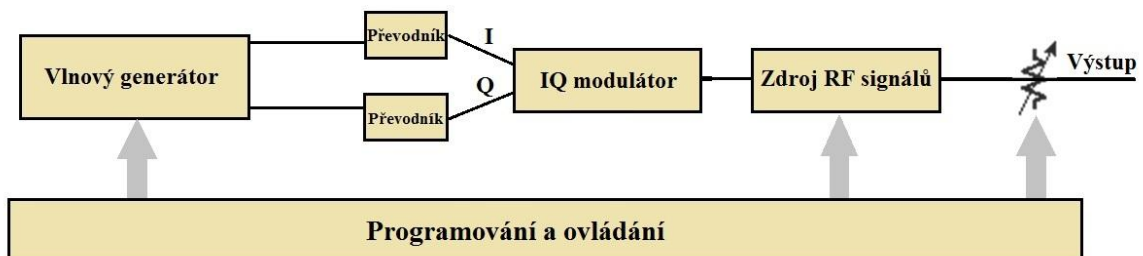
Tyto systémy využívají velmi komplikované průběhy pomocí digitální modulace. V důsledku toho bylo nutné vytvořit přístroj, označující se jako generátor vektorového signálu nebo digitální signální generátor, aby mohl generovat požadované vysokofrekvenční křivky.



Obr. č. 14 Generátor RF signálu [14]

Předchozí generace RF generátorů signálu umožňovaly budoucí přidání modulace signálu. Aby vyhovovaly potřebám některých nových buněčných a bezdrátových systémů, je nezbytné přidat složité formy modulace.

Klíčovým prvkem generátoru signálu je vektor, který je schopen být přizpůsoben komplexním signálům, tj. těm, které obsahují v-fáze a kvadraturu IQ signálů. Generátor signálu dokáže pojmout informace IQ signálové spíše než amplitudové. To znamená, že pojme dříve vektorový prvek signálu modulace, než jen skalární nebo základní fázovou modulaci.



Obr. č. 15 Diagram vektorového generátoru signálu

Generátory signálu vektorového typu obvykle obsahují high-end RF generátor signálu s modulátorem IQ a jsou často spojeny s libovolným vlny tvarujícím generátorem. Používá se k výrobě složitých základních signálů modulace. Tímto způsobem je vektorový signálový generátor schopen generovat všechny signály potřebné pro některé z moderních komunikačních systémů.

S rostoucí složitostí mnoha radiových komunikačních systémů od mobilních telefonů až po Wi-Fi, se využití generátorů vektorového signálového v oblasti zkušebního vývoje a výroby pravděpodobně zvýší, aby inženýři mohli vytvářet testovací křivky, které potřebují.

4.3 Technické a funkční parametry zesilovače signálu

RF zesilovače se používají v široké škále aplikací, včetně bezdrátové komunikace, televizních přenosu, radarů a RF topení nebo pro zkušební techniku zabývající se testy elektromagnetické odolnosti.

Základní techniku pro zesílení výkonu RF lze rozdělit do tříd A, B, C, D, E, a F, pro frekvence od VLF (Very Low Frequency) až po mikrovlnné frekvence.

Výstupní výkon se může pohybovat od několika mW do MW, závisící podle určení přístroje.

Zavedení polovodičových energetických zařízení RF přineslo využívání nižšího napětí, vyšších proudů a relativně nízkých zátěžových odporů.

Nejdůležitější parametry, které definují výkon RF zesilovač jsou:

- výstupní výkon,
- zesílení,
- linearita,
- stabilita,
- stejnosměrné napájecí napětí,
- účinnost,
- robustnost.

Výběr zkreslujícího bodu u výkonového zesilovače může určit jeho úroveň. Srovnáním zkreslených přístupů výkonového zesilovače lze vyhodnotit kompromisy pro:

- výstupní výkon,
- účinnost,
- linearitu,
- jiné parametry pro různé aplikace.

Výkonové třídy zesílení určují typ zkreslení, jež působí na tranzistorové napájení RF výkonového zesilovače.

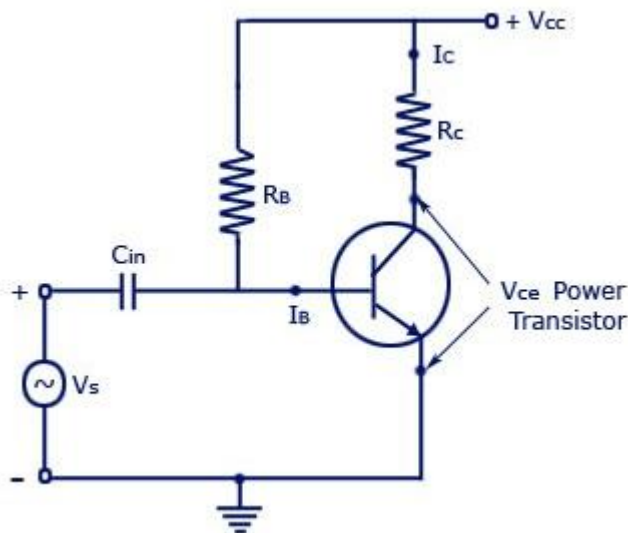
Výkon, který není převeden na užitečný signál, se rozptýlí ve formě tepla. Zesilovač, který má nízkou účinnost, mívá zpravidla vysokou hladinu odvodu tepla, což může být limitujícím faktorem, zejména na návrhu.

Kromě třídy provozu, je celková účinnost výkonového zesilovače ovlivněna více faktory, jako dielektrikum, či vodičové ztráty. Nejprve je třeba vyčíslit ztrátu v obvodu, tu se pak snažíme minimalizovat. Neméně důležité je, aby mechanické a tepelné konstrukce byly vhodné za jakýchkoliv podmínek.

4.3.1 Třídy výkonu

4.3.1.1 Třída – A

Zesilovač, v této třídě, je definován jako zkreslený. To značí, že výstupní proud teče po celou dobu provozu a úroveň vstupního signálu je stále dost malá na to, aby nemusel nastat mezní bod tranzistoru. Další způsob se uvádí, že úhel vedení tranzistoru je 360° , což znamená, že tranzistor provádí pro vstupní signál celý cyklus. To dělá z třídy A tu nejvíce lineární ze všech typů zesilovačů. Zde linearita ukazuje, jak moc se výstupní signál zesilovače podobá vstupnímu signálu.



Obr. č. 16 Schéma zesilovače třídy A [3]

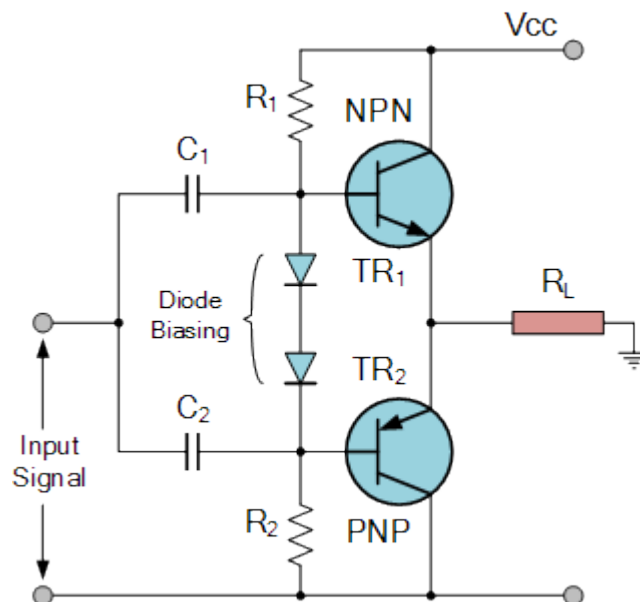
4.3.1.2 Třída – B

Tento typ zesilovače způsobuje, že úhel vedení tranzistoru je přibližně 180° .

Tranzistor provádí činnost jen polovinu času, a to buď na pozitivní, nebo negativní polovině cyklu vstupního signálu.

Stejně, jako ve třídě A, zkreslení stejnoměrným proudem určuje provoz tranzistoru třídy B.

Zesilovače třídy B jsou účinnější než třídy A. Okamžitá účinnost třídy B se liší podle výstupního napětí a ideální výkonný zesilovač dosahuje $\Omega/4$ (78,5%) na PEP (Peak Envelope Power), jsou ovšem mnohem méně lineární. Proto typický zesilovač třídy B vytvoří o něco víc vyšších harmonických vln, které musí být filtrovány pryč od zesíleného signálu.



Obr. č. 17 Schéma zesilovače třídy B [5]

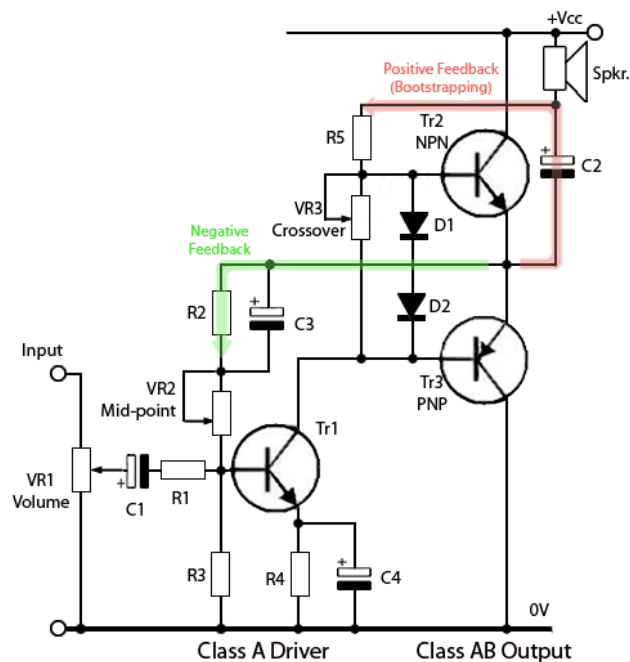
Společná konfigurace pro zesilovače třídy B je „push-pull“ zesilovač. V této konfiguraci se jedním tranzistorem provádí pozitivní polovina cyklů vstupního signálu a druhým tranzistorem se provádí průběh záporné půlvlny. Tímto způsobem je celý vstupní signál reprodukován na výstupu.

4.3.1.3 Třída – AB

Tento zesilovač je kompromisem mezi třídou A a třídou B z hlediska účinnosti a linearity.

Tranzistor je zkreslený obvykle do klidového bodu, který je někde v oblasti mezi mezním bodem a bodem zkreslení třídy A, tj. mezi 10 až 15 procenty I_{Cmax} .

V tomto případě, bude tranzistor zapnut na více než půl cyklu, ale méně než jeden celý cyklus vstupního signálu.



Obr. č. 18 Schéma zesilovače třídy AB [4]

Úhel vedení třídy AB je mezi 180° a 360° a účinnost se pohybuje mezi 50% a 78,5%.

Třída AB má vyšší účinnost než třída A na úkor linearity.

Třída AB není lineární zesilovač. Signál s modulovanou amplitudou prostředků bude významně zkreslen v této úrovni výkonu. Důvodem je skutečnost, že ve třídě AB je úhel vedení funkcí hnací jednotky.

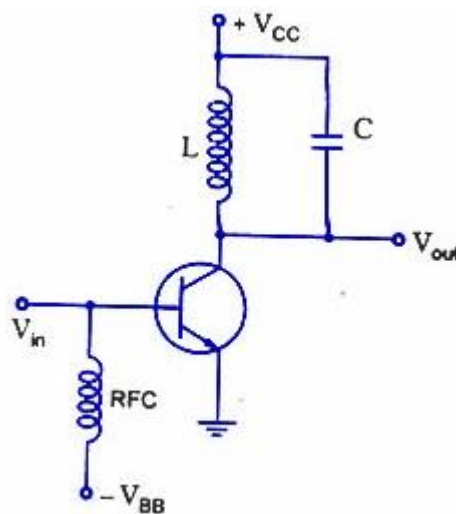
Experimentálně bylo zjištěno, že se ve třídě AB často poskytuje širší dynamický rozsah, než kterékoliv třídě A nebo B. To je proto, že kompresní zisk třídy AB pochází z jiných zdrojů, než je tomu u třídy A.

4.3.1.4 Třída – C

Zesilovač, jehož úhel vedení tranzistoru je podstatně menší než 180° .

Zkreslení tranzistoru je takové, aby při ustálených podmínkách nevznikly žádné toky kolektorového proudu.

Linearita zesilovače třídy C je nejmenší ze všech tříd zesilovačů. Účinnost třídy C se přibližuje 85%, což je mnohem vyšší, než u zesilovače třídy B nebo třídy A.



Obr. č. 19 Schéma zesilovače třída C [6]

Aby bylo možné potlačit zkreslení tranzistoru v provozu zesilovače třídy C, musíme převrátit zkreslení funkce základního emitoru. Vnější ovlivnění obvykle není nutné, protože tento tranzistor může provádět své vlastní zkreslení, pomocí RF sytiče od základny k zemi.

Jedním z hlavních problémů využití třídy C, v aplikacích polovodičového typu, je velký negativní výkyv vstupního napětí, což se shoduje s kolektorem vypouštění špiček výstupního napětí. Toto jsou nejhorší podmínky pro průraz v závěrném směru u jakéhokoliv tranzistoru. Dokonce i malé množství unikajícího proudu, tekoucího v této fázi cyklu, má významný vliv na účinnost. Z tohoto důvodu zesilovače, typu třídy C, nejsou často používány u polovodičů na vyšších RF a mikrovlnných frekvencích.

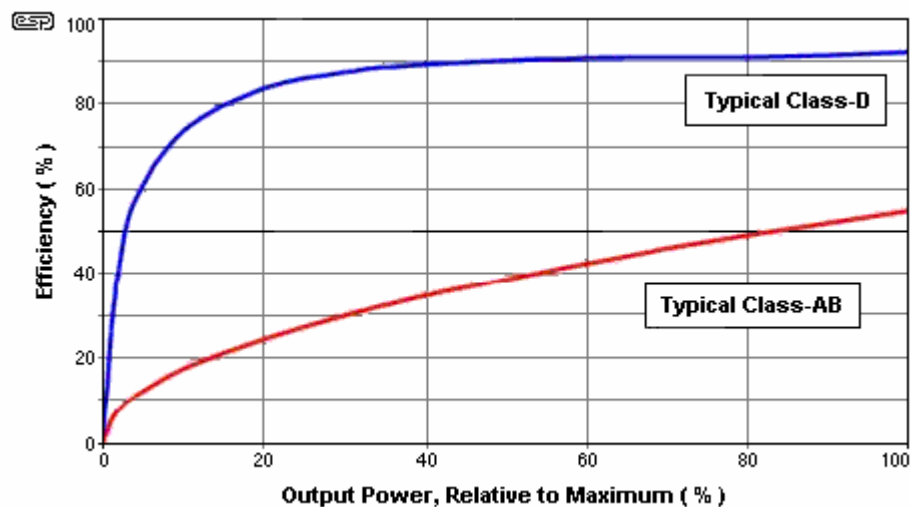
Tranzistor, v zesilovači třídy C, z důvodu výdrže zařízení, by měl vypnout kolektorové napětí ve chvíli kdy, stejnosměrný proud třikrát překročí určenou hranici. Zesilovače třídy C mají nízký průměrný výstupní výkon (protože tranzistor provádí pulsy pouze po krátký

časový úsek), ale vyžadují velmi vysokou úroveň vstupního napětí. Pokud je hlavní tranzistor třídy C v poruchovém režimu, je v aktivním zařízení nízká hodnota vlastního napětí v závěrném směru, který se bohužel zhoršil v důsledku vstupu napětí RF signálu a proto bude záporný. Tak kolektor tranzistoru napětí dosahuje pozitivního vrcholu. To je zvláště problematické a nebezpečné, pokud se očekávají změny zatížení konstrukce, například systém počítající s poškozenou či chybějící anténou, nebo chybějícím přívodním potrubím během provozu.

4.3.1.5 Třída – D

V zesilovači třídy D je definován režim napětí jako spínací okruh, který vede k generaci napětí stávajícího se napůl ze sinusoidy a čtverce. Výkonný zesilovač třídy D používá dva nebo více tranzistorů, jako přepínače na generování obdélníkového průběhu vlnového napětí. Sériově laděným výstupním filtrem projdou pouze fundamentální frekvence v závislosti na zatížení. Zesilovače třídy D trpí řadou problémů, které je obtížné definovat, a to zejména při vysokých frekvencích. Za prvé, je zde omezená dostupnost vhodných zařízení pro horní přepínač. Za druhé, parazitní zařízení, jako například kolektorová kapacita, může vést k indukčním ztrátám v každém cyklu.

Pak si tedy uvědomíme, (které jsou běžné při nízkých RF a audio frekvencích) že zesilovače třídy D teoreticky mohou dosáhnout 100% účinnosti, protože neexistuje během cyklu doba, kde by se průběhy napětí a proudu překrývaly (proud je čerpán pouze přes tranzistor, který je zapnut).



Graf č. 1 Účinnost třídy D proti třídě AB [7]

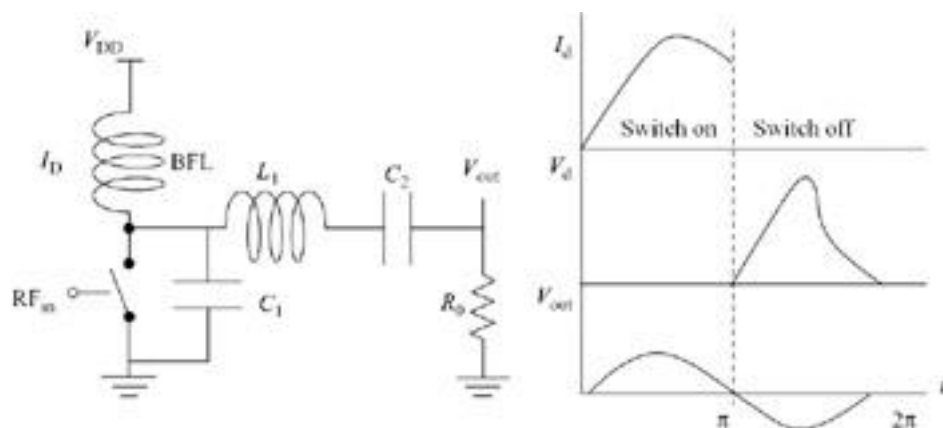
Žádný skutečný zesilovač nemůže patřit do třídy D neboť nemá nulové odpory a kapacitní spínače, jakož i induktivní parazitní omezení tvaru křivky napětí při zátěži.

Jedinečným aspektem třídy D (s nekonečně rychlým přepínáním) je to, že účinnost není degradována přítomností jalového odporu při zatížení.

4.3.1.6 Třída – E

Zesilovač třídy E používá jediný tranzistor, který pracuje jako spínač. Kolektorový průběh napětí je výsledkem součtu stejnosměrného a radiofrekvenčního proudu, nabíjející uzemňovací kapacitní odpor C_1 , který je rovnoběžný s tranzistorovou vnitřní kapacitou c_o . U zesilovače třídy E, v optimálním případě, ve chvíli zapnutí tranzistoru, tekoucí napětí klesne na nulu a má nulový sklon.

Výsledkem je ideální účinnost 100%, eliminace ztrátových spojení s nabíjecím uzemňovacím kapacitním odporem ve třídě D, snížení spínacích ztrát a dobrá tolerance variace komponentů.



Obr. č. 20 Schéma zesilovače třídy E [24]

Zesilovač třídy E při provozu vykazuje horní meze frekvence na základě výstupní kapacity, potřebné pro přizpůsobení výkonu obvodu, který produkuje výše popsané křivky.

Konkrétně zesilovač třídy E, pro svou optimální účinnost, vyžaduje kapacitní odpor C_2 na hranici horního limitu.

Používá se velká vysokofrekvenční tlumivka. Díky tomu může zařízením protékat pouze stejnosměrný proud I_{dc} .

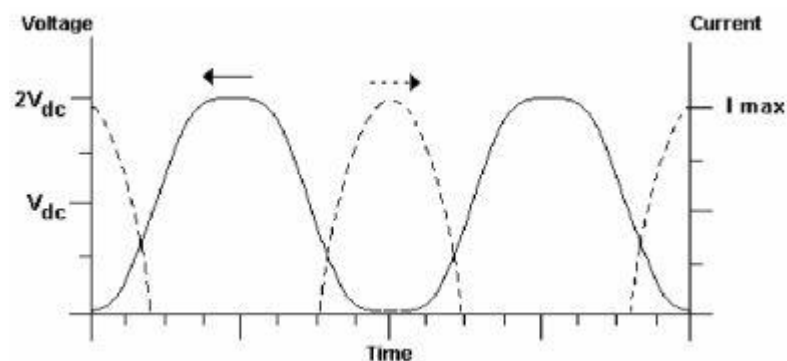
Náboj výstupního obvodu, skládající se z L_1 a C_2 , je dostatečně velký, aby mohly výstupní proud I_o a výstupní napětí U_o tvořit pouze základní složky. To znamená, že tímto filtrem jsou všechny harmonické vlny odstraněny.

Je-li zemnicí kolektorové napětí nula a je-li v případě vypnutí kolektorový proud nulový tranzistor se chová jako ideální přepínač.

Má-li daný tranzistor vnitřní kapacitu C_O větší než C_{pmax} není použitelný pro požadovanou frekvenci. Tím je dáno, že C_s je určen pro vysoký výkon při vysokých frekvencích. Vyšší hustoty proudu vyžadují, aby průřezová plocha spínače odpovídala přímo vnitřní kapacitě zařízení.

4.3.1.7 Třída – F

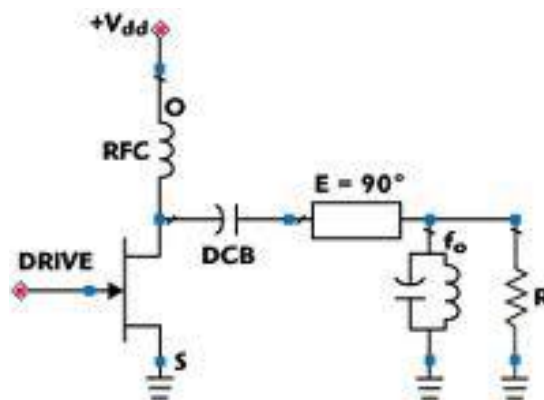
Zesilovač třídy F zvyšuje účinnost i výkon pomocí harmonických rezonátorů, které ve výstupní síti utváří zemnicí vlny. Průběh napětí obsahuje jednu nebo i více lichých harmonických vln, blížících se k čtvercové vlně a současně směřuje k harmonické vlně blížící se půl sinusoidě. Střídavě ("inverzní třída F") je výstupní napětí přibližně polovina sinusového a obdélníkového vlnového průběhu



Graf č. 2 Průběh vlny zesilovače třídy F [18]

Požadované harmonické vlny mohou být v zásadě produkovány ve zdrojovém provozním tranzistoru. Nicméně, v praxi je tranzistor řízen nasycením během části RF cyklu a harmonické vlny jsou vyráběny samoregulačním mechanismem, podobně jako u nasycení v třídě C. Použití harmonického napětí vyžaduje vytvoření vysoké impedance (3 až 10 krát zatěžové impedance) na zemnicím kolektoru, zatímco použití harmonického proudu vyžaduje nízkou impedanci (1/3 až 1/10 ze zatěžové impedance). Zesilovače třídy F vyžadují složitější výstupní filtr než jiné výkonové zesilovače, protože přesná impedance

musí být pouze u několika přesně určených frekvencí. Obvykle je zkratová svorka umístěna ve čtvrtině nebo polovina vlnové délky od zemnicího kolektoru.



Obr. č. 21 Schéma zesilovače třídy F [18]

Zesilovač třídy F úmyslně navrhuje průběh napětí přes obsah vyšších harmonických vln ve výstupním signálu. Toho je dosaženo zavedením odpovídající výstupní sítě, která zajišťuje vysokou impedanci na lichých harmonických vlnách a nízkou na sudých harmonických vlnách. To má za následek čtvercový (pro třídu F skutečně čtvercový) průběh napětí.

Zesilovače třídy F jsou schopny vysoké účinnosti (88,4% pro tradičně definované třídy F, nebo 100% pokud je použito nekonečné harmonické vyladění).

Obtížně se navrhují zejména díky složité konstrukci na výstupu odpovídající sítě.

DÍLČÍ ZÁVĚR

Zkušební zařízení se skládá z několika klíčových částí. Nejdůležitější z nich je samotný vlnovod GTEM. Aby tento přístroj byl schopen provozu musí být do soustavy neodmyslitelně zapojen i radiofrekvenční generátor signálu. Jelikož signál, vyslaný tímto generátorem, nemá dostatečnou sílu, musí přijít na řadu zesilovač, který vyslaný signál zesílí na hodnotu, jíž je potřeba k dosažení určené intenzity elektromagnetického pole.

GTEM buňka má charakteristický jehlanový tvar, který je důležitý pro zachování jejich vlastností. Uvnitř je tvořena vodičem, vytvářejícím elektromagnetické pole a na zadní stěně je ukončena absorbéry, jež zachytávají zbytky elektromagnetického záření, aby se neodrazily zpět.

Generátor signálu je jednou z nejdůležitějších součástí testovacího systému. Vytváří samotnou elektromagnetickou vlnu o určitém tvaru, intenzitě a výkonu, která se má co nejvěrněji podobat elektromagnetickému rušení, působícímu v reálném prostředí.

Zesilovač elektromagnetického signálu je určen pouze k zesílení vlny vyslané generátorem. Zesilovače jsou rozděleny do několika tříd, z nichž každá ovlivňuje jiným signál jiným způsobem.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NASTAVENÍ TECHNIKY DLE NORMY ČSN EN 61000-4-20

Norma nastavuje podmínky zkušebního zařízení v místnosti. To vyžaduje, aby provedení zkoušky a zkušební limitů nebo úrovně bylo provedeno dle požadavků na konkrétní produkty, nebo specifikací norem výrobků. Popisuje limity a nastavení zkušebních přístrojů a konstantního pole. Uvádí také zkušební úrovně pro než se zkoušené zařízení testuje.

Neobejdeme se bez souladu s normami ČSN EN 61000-4-3 ed.3 a ČSN EN 50130-4 ed.2, kde jsou uvedeny další potřebné údaje k nastavení techniky, jako například rozmezí frekvencí, pro které se daná zkouška provádí.

5.1 Výpis zkušebního zařízení

Doporučují se následující typy zkušebního zařízení:

- TEM vlnovod o dostatečné velikosti k udržení konstantního pole schopný pojmout zamýšlené testované zařízení,
- RF generátor signálu,
 - Je užitečné sledovat výkyvy energie v TEM vlnovodu při stanovení úrovně pole. Směrová vazební spojka s voltmetrem nebo RF power metr umožňuje měření skutečného příkonu do vlnovodu TEM (na rozdíl od jmenovitého výkonu generátoru signálu RF).
- výkonový zesilovač,
- senzory, které jsou schopny samostatného monitorování elektrického pole podél všech tří kolmých os,
 - Každá hlavová sonda a opto-elektronické obvody musí mít dostatečnou imunitu vůči intenzitě pole. TEM vlnovody vyžadují pole sondy, jež umožňuje, aby elektrické pole bylo měřeno individuálně po všech třech ortogonálních osách. Pokud je použita malá jednoosá anténa, musí být převedena na míru pro každé pole složky zvlášť.
- přidružená zařízení pro záznam úrovně spotřeby.

5.2 Popis zkušebního zařízení TEM

Režim TEM je pro vlnovody TEM ekvivalentem k dopadající rovinné vlně určené pro testování odolnosti. Vzhledem k této skutečnosti je ideální neměnná rovinná vlna pro každou konstantní fázi. TEM režim pole v přenosové lince se bude měnit v průběhu přední konstantní fáze, v souladu s geometrií průřezu. Obě metody, jak ta ve zvukotěsné komoře, tak metoda použití vlnovodu TEM, jsou založeny na vytvoření konstantního pole v oblasti zkoušeného zařízení. Díky tomu je již zmíněný TEM režim pole podobný vertikální polarizaci ve zvukotěsné komoře.

5.2.1 Ověření konstantního pole

Ověření se provádí v pravoúhlé rovině na nejméně 5 měřicích bodech (4 v rozích a 1 uprostřed), je-li rovnice $E_{Limit} \leq E_i \leq E_{limit} + E_{margin}$ (5) se směrodatnou odchylkou podle rovnice $E_{limit} \leq E_i \leq E_{limit} + 2 \cdot K \cdot \sigma_{\bar{E}}$ (6) splněna:

- 75% naměřené intenzity pole E_i , které je velikostí primárního elektrického pole komponentu přes vymezené oblasti, musí splňovat následující rovnici (6)[10]:

$$E_{limit} \leq E_i \leq E_{limit} + 2 \cdot K \cdot \sigma_{\bar{E}}$$

- E_i je hodnota udávána jako standart
- Podle normy je K při 75% voleno 1,15
- Pokud je $2 \cdot K \cdot \sigma_{\bar{E}}$ menší než 6dB, pak je směrodatná odchylka následovně spočítána pomocí rovnice (6):

$$\begin{matrix} 0 \\ +6 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_{\bar{E}} \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} \leq 2,61 [dB]$$

- Pokud se při 75% interval blíží k 10 dB, pak je směrodatná odchylka rovna:

$$\begin{matrix} 0 \\ +10 \end{matrix} \Rightarrow \sigma_{\bar{E}} \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} \leq 4,34 [dB]$$

- Pokud jsou velikosti obou sekundárních (neúmyslných) elektrických složek polí alespoň o 6 dB nižší, než je primární složka, tak procento těchto naměřených vztahů musí splňovat rovnici (7)

$$\frac{E_{sec_i}}{E_{pri_i}} \leq \left(\frac{E_{sec}}{E_{pri}} \right)_{dB} + K \cdot \sigma_{\frac{E_{sec}}{E_{pri}}} \leq \begin{cases} -6dB \\ -8dB \end{cases} [7]$$

- K je voleno podle normy

- Směrodatná odchylka série měření $\frac{E_{sec_i}}{E_{pri_i}}$ musí splňovat následující rovnici:

$$\sigma_{\frac{E_{sec}}{E_{pri}}} \leq \frac{1}{K} \left(\begin{matrix} -6dB \\ -2dB \end{matrix} - \left(\frac{E_{sec}}{E_{pri}} \right)_{dB} \right)$$

Primární složka elektrického pole tolerance (rovnice $\sigma_{\bar{E}} \leq \frac{Margin}{2 \cdot K}$ (7)) větší než $^{-0}_{+6} dB$ až $^{-0}_{+10} dB$, a vedlejší složky elektrického pole budou až na úrovni -2 dB od primárního pole složky. Je povolena maximální procentuální frekvence testu, jak je definováno v normě za předpokladu, že skutečná tolerance a frekvence jsou uvedeny v protokolu o zkoušce.

Podle rovnice (7) jsou standartní odchylky určeny takto:

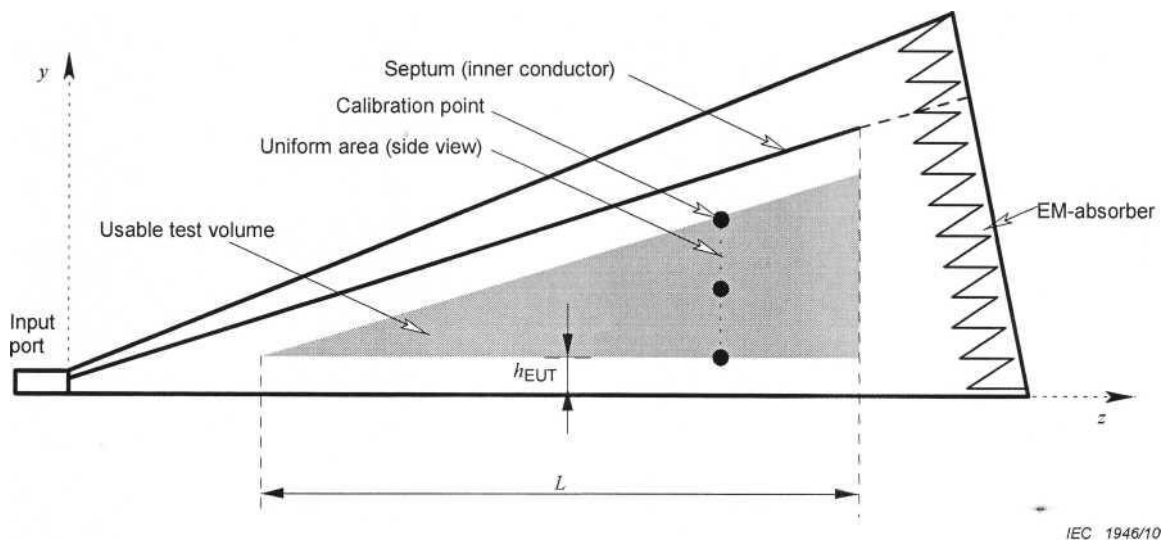
$$^{-0}_{+6} \Rightarrow \sigma_{\bar{E}} \leq \frac{6}{2 \cdot 1,15} = 2,61 [dB] ; \quad ^{-0}_{+10} \Rightarrow \sigma_{\bar{E}} \leq \frac{10}{2 \cdot 1,15} = 4,34 [dB]$$

Oblast jednotné kalibrace bodů je vypsána v Tab. č. 2:

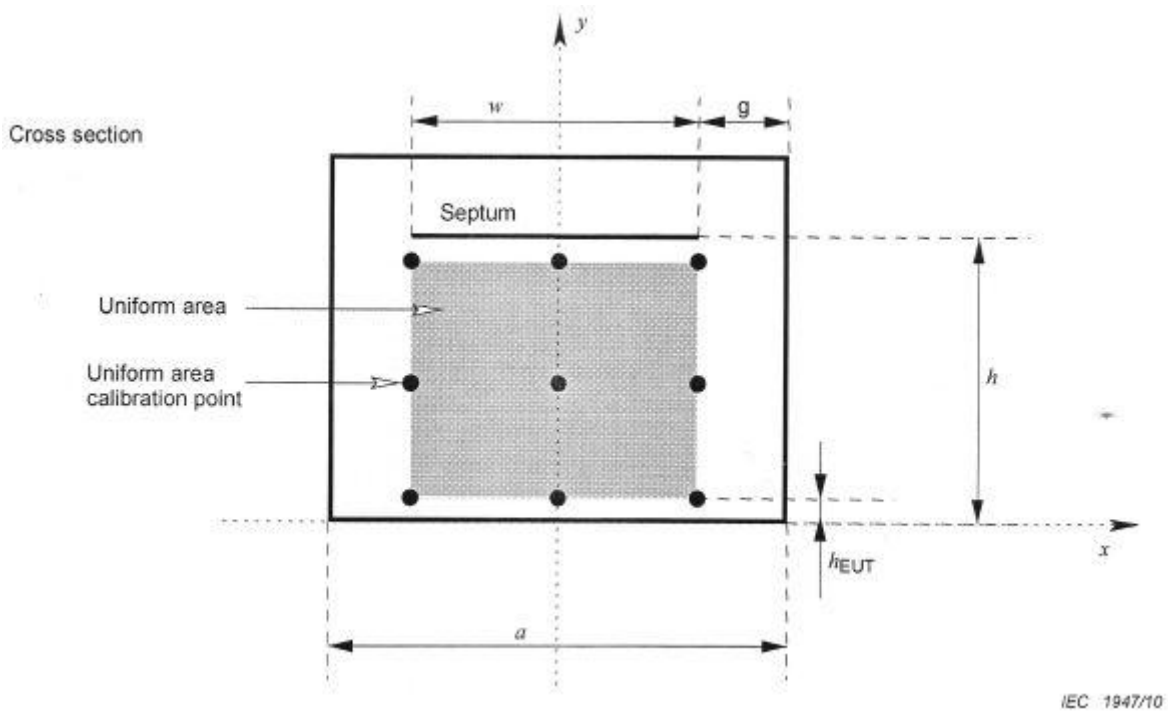
Rozměry	Rozmístění měřících bodů	Počet měřících bodů
1,5m x 1,5m	4 x 4	16
1,0m x 1,5m	3 x 4	12
1,0m x 1,0m	3 x 3	9
0,5m x 1,0m	2 x 3	6
0,5m x 0,5m	4 + 1 (uprostřed)	5
0,25m x 0,25m	4 + 1 (uprostřed)	5

Tab č. 2 Body oblasti kalibrace

Oblasti, které nejsou uvedeny v Tab č. 2, se kalibrují pomocí mřížky. Číslo definované jako nejmenší rozteč sítě je 0,5m, to plně obsáhne navrhovaný prostor. Rozteč je rovnoměrná po každé straně. V nastaveném testu musí být zkoušené zařízení zepředu umístěno shodně s touto rovinou (viz Obr. č. 22 a Obr. č. 23).



Obr. č. 22 Jednoduchá polarizace pohled z boku [10]



Obr. č. 23 Jednoduchá polarizace pohled zevnitř [10]

Požadavek na konstantní pole je ověřen na základě TEM režimu metodou, uvedenou v normě. V zásadě to je z hlediska primárního pole TEM režimu. Pokud je používána výsledná intenzita pole, musí být splněny všechny výše uvedené podmínky a musí být prokázáno, že požadavky na sekundární složky jsou taktéž splněny.

5.3 Zkušební zařízení RF generátor

Radiofrekvenční generátor signálu je nedílnou součástí zkušební sestavy, bez nějž by nebylo možné testovat žádné zařízení na elektromagnetickou odolnost

5.3.1 Výkon a frekvence

Výkon a frekvence jsou hlavními výstupními veličinami generátoru. Ve většině generátorů lze nastavit obě tyto veličiny manuálně nebo automaticky.

5.3.1.1 Frekvence

Při měření elektromagnetické odolnosti se nastavuje frekvence postupně, od nejnižších po nejvyšší.

Podle normy se jako první hodnota nastavuje na 80MHz. Po té je frekvence zvyšována o maximálně 1% z velikosti předchozího kmitočtu. Doba změny frekvence se liší podle reakčnosti zkoušeného zařízení, to musí mít dostatečný prostor na případnou změnu stavu. Doba prodlevy změny frekvence nesmí být kratší než 0,5s. Pro většinu přístrojů postačuje čas prodlevy 1s.

Dále jsou pak frekvence rozděleny dle účelu měření pro dané rozmezí

5.3.1.1.1 Zkušební úroveň vztahující se na všeobecné účely

Zkoušky se normálně provádějí v kmitočtovém rozsahu 80MHz až 1000 MHz. V některých případech může komise výrobku, pro zkoušené zařízení, rozhodnout o změně kmitočtu na nižší hodnotu.

5.3.1.1.2 Zkušební úroveň vztahující se k přístrojům s vysokofrekvenčním vyzařováním

Zkoušky se obvykle provádějí ve frekvenčním rozsahu 1,4GHz až 6GHz. Toto není povětšinou nutno aplikovat v plném rozsahu. Bývají zde vybrána rozmezí frekvencí, která odpovídají reálnému prostředí, ve kterém je bude zařízení umístěno.

5.3.2 Výkon

V případě testování pomocí vlnodů TEM, případně GTEM, je třeba výkon, který má dávat konečná soustava, spočítat pomocí rovnic, uvedených v kapitole 2.2. Protože daný výkon jen stěží dokážeme samotným generátorem signálu vytvořit, používáme zesilovače, které jej znásobí.

K vypočtení výkonu je třeba také určit intenzitu pole, ve kterém se daný přístroj bude nacházet. V příslušné normě jsou uvedeny testovací úrovně, podle kterých se běžně nastavuje intenzita testovacího pole.

5.3.2.1 Testovací úrovně

Zkušební úrovně jsou uvedeny v Tab. č. 3:

Zkušební úroveň	Testovací intenzita pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
x	Special

Tab č. 3 Zkušební úrovně

5.3.2.1.1 Zkušební úroveň 1

Prostředí elektromagnetického vyzařování nízké úrovně. Úroveň je typická pro místní rádio či televizní stanici vzdálenou více než 1km a vysílače/přijmače nízkého výkonu

5.3.2.1.2 Zkušební úroveň 2

Mírné prostředí elektromagnetického vyzařování. Jsou používány přenosné vysílače nízkého výkonu, s předepsaným omezením použití v blízkosti zařízení.

5.3.2.1.3 Zkušební úroveň 3

Náročné prostředí elektromagnetického vyzařování. Přenosné vysílače, používané v blízkosti zařízení, ne však blíže než 1m. Typickým příkladem jsou výkonové rozhlasové vysílače nebo průmyslová, vědecká či lékařská zařízení.

5.3.2.1.4 Zkušební úroveň x

Neomezená úroveň, která bývá většinou stanovena v příslušné normě či ve specifikaci výrobku.

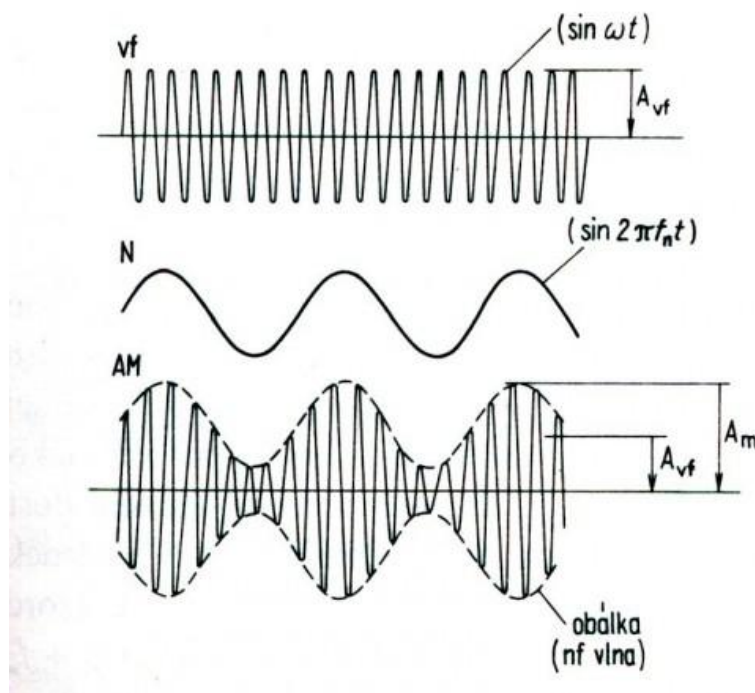
5.3.3 Modulace

Podle příslušných norem je pro testování elektromagnetické odolnosti potřeba modulace amplitudová.

5.3.3.1 Amplitudová modulace signálu

Normou je určeno, že pro testování elektromagnetické odolnosti má být amplitudově modulovaný signál, kde bude modulační činitel 0,8. Čili hloubka modulace je rovna 80%, tím upravíme vysokofrekvenční nosnou vlnu pomocí modulačního signálu. Toto se přidává kvůli většímu přiblížení reálných podmínek při práci přístroje.

RF generátor ji provádí automaticky při zadání modulačního činitele.

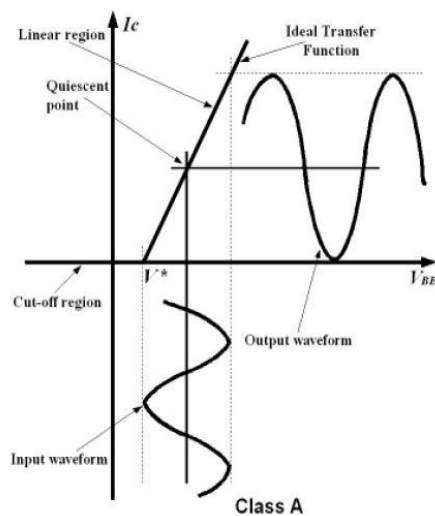


Obr č. 24 Amplitudová modulace signálu [1]

5.4 Zesilovač

Předem je třeba určit, jaký typ musíme použít pro účely testování elektromagnetické odolnosti.

V tomto případě je nutné zvolit zesilovač třídy A, kvůli jeho linearitě a co nejmenšímu zkreslení výchozí vlny. Tento zesilovač pouze zesílí onen signál, ale v podstatě nezmění jeho průběh, navíc je ideální pro zesílení amplitudově modulovaného signálu.



Obr. č. 25 Zesílení signálu [3]

Dalším aspektem, podle kterého vybíráme zesilovač, je frekvenční rozpětí, pro něž je určen. V dnešní době jsou zesilovače vyráběny pro různá rozpětí. Pro naši testovací soustavu jsme zvolil tři typy s různým rozpětím, abychom mohli pokrýt všechny testovací frekvence, jenž nám udává norma.

Jsou to zesilovače z rozpětím 20MHz až 1GHz, 0,8GHz až 2GHz a poslední 2GHz až 6GHz. Tyto jsou schopny pokrýt všechny požadované frekvence.

DÍLČÍ ZÁVĚR

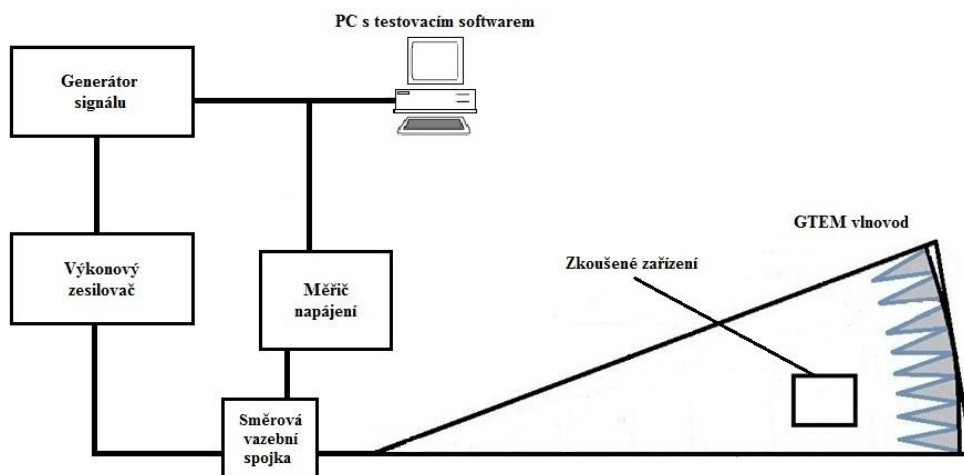
Nastavení techniky, podle normy, má velký dopad na samotnou zkoušku. Bez příslušných předpisů nelze žádnou zkoušku provést, jelikož neznáme parametry, podle kterých je nutné testovat. (například testovací úrovně, způsob ověření konstantního pole, rozmezí frekvencí, pro které se testy provádějí). Způsob nastavení generátoru a zesilovače je takový, aby se výsledné pole co nejvíce podobalo reálným podmínkám.

6 METODIKA TESTOVÁNÍ ZA POUŽITÍ GTEM

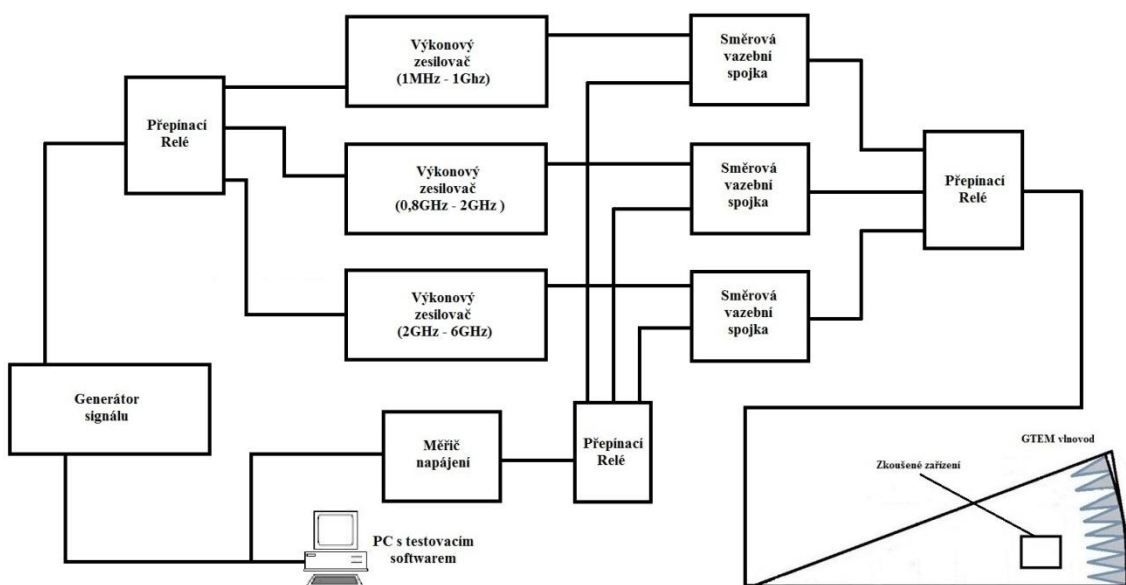
Samotná metodika testování je důležitou součástí každé zkoušky. Musí se zde brát zřetel hlavně na zapojení celé sestavy, aby byla zaručena její funkčnost. Dále musíme ověřit, zda sestava správně pracuje. U zkoušeného zařízení je také důležité, zda kontrolujeme již zavedený výrobek, tudíž testujeme zda-li výrobce uvádí pravdivé údaje o odolnosti, nebo jestli zkusíme zcela nový výrobek, u kterého teprve zjišťujeme jeho limity.

6.1 Systematický návrh zkušební sestavy

V této práci jsou zpracovány dva návrhy zkušební sestavy. První je pouze základní sestava pro testování. U druhé je více možností pro test odolnosti.



Obr. 26 Základní návrh testovací soupravy



Obr. 27 Komplexnější návrh testovací soustavy

6.2 Zkušební vlnovod GTEM

Pro testování elektromagnetické odolnosti poplachových systémů jsme zvolili vlnovod GTEM 250, protože je rozměrově i výkonnostně dostačující.



Obr. č. 28 Zkušební vlnovod GTEM [25]

6.2.1 Uspořádání stolního zařízení

Jako typické vybavení pro test odolnosti pomocí vlnovodu TEM se používá 0,8 m vysoký nevodivý stůl. Zkoušené zařízení je umístěno uvnitř buňky na zkušebním podstavci, nebo manipulátoru vhodného tvaru a velikosti, tak aby přední plocha ležela za každé polohy v oblasti konstantního pole.

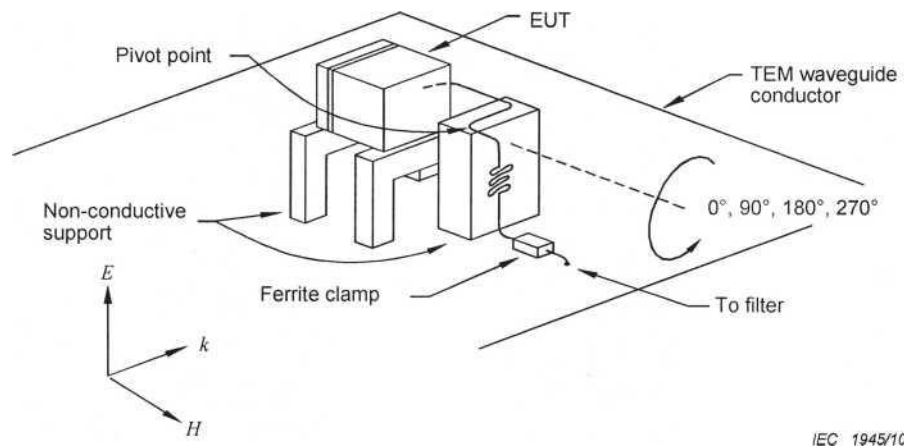
6.2.1.1 Zkušební podstavec

Vlastnosti podstavce jsou striktně dané normou. Tento podstavec musí být nevodivý, neodrazivý, s nízkou permitivitou. Zkoušeným zařízením musí být možné otáčet podle požadavků.

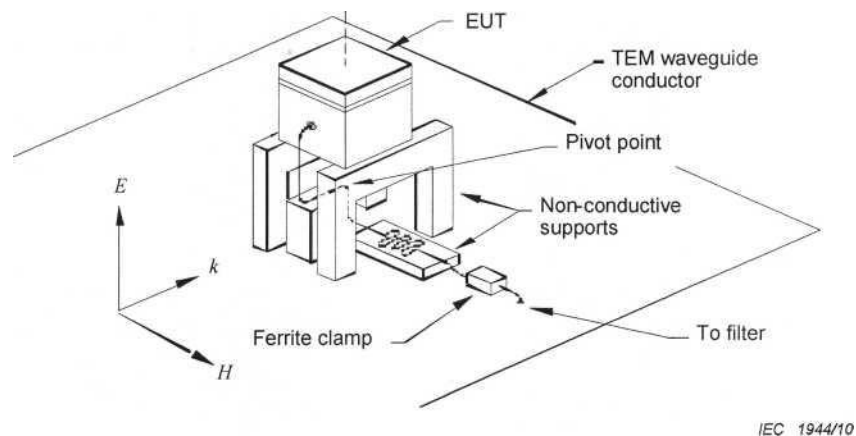
6.2.1.2 Manipulátor

Zařízení, podobné otočnému stolu z nekovového materiálu, schopné zafixovat zkoušený výrobek v mnoha pozicích, dle požadavků testu.

Typické nastavení pro zkoušené zařízení je na Obr. č. 29 a Obr. č. 30



Obr. č. 29 Vertikální polarizace zkoušeného zařízení [10]



Obr. č. 30 Horizontální polarizace zkoušeného zařízení [10]

6.2.2 Uspořádání uvnitř GTEM buňky

Ve vlnovodu GTEM je umístěno zkoušené zařízení na zkušebním podstavci tak, že přední část přístroje leží v oblasti konstantního pole. K tomuto účelu se používá nevodivý podstavec, zabraňující náhodnému uzemnění zkoušeného zařízení a narušení pole. Tento musí mít vyšší nevodivé vlastnosti, než izolační vrstvy na kovové konstrukci zkušebního přístroje.

6.2.3 Uspořádání kabeláže

Kabeláž je ponechána v elektromagnetickém poli do vzdálenosti 1 m od zkoušeného zařízení a je vedena nad podlahou, v jedné úrovni se zkoušeným zařízením nebo podél úhlopříčky v rovině xy , na výchozím místě vnějšího vodiče TEM vlnovodu. Při instalaci

kabelů je třeba se plně vyhnout ve směru osy z podélnému vnějšímu nebo vnitřnímu vodiči. Kabely TEM vlnovodu, vedené rovnoběžně s vnitřním nebo vnějším vodičem, musí být od sebe vzdáleny minimálně 0,1 m. Výstupní kabely jsou ukončeny absorbujícími svorkami, jenž jsou umístěny na hranici konstantního pole.

6.3 Generátor signálu

Pro generování signálu při testování elektromagnetické odolnosti byl zvolen přístroj R&S SMB 100A.



Obr. č. 31 R&S SMB 100A [2]

6.3.1 Specifikace

- Frekvenční rozsah
 - 9kHz – 6GHz
- Minimální krok přepínání frekvence
 - 0,01Hz
- Maximální rozsah výstupních výkonů
 - -145 dBm – +30 dBm
- Rozsah výstupních výkonů pro frekvence 1MHz až 6GHz
 - -120dBm – +18 dBm

6.3.2 Nastavení

Při zapnutí přístroje se nastaví požadované frekvence a výkon. Po té nastavíme příslušnou modulaci, v našem případě amplitudovou. Výchozí parametry modulační volíme jako klasickou amplitudovou modulaci 1kHz s hloubkou modulační 80%.

6.4 Zesilovače

Pro zesílení signálu vygenerovaného RF generátorem signálu byly zvoleny zesilovače FLH-120B, FLG-100A a FLG-50F, byly vybírány vzhledem k rozsahu frekvencí, které jsou schopny pojmout.



Obr. č. 32 Ilustrační obrázek podoby zesilovače [2]

6.4.1 Zesilovač FLH-120B

- Frekvenční rozsah
 - 20MHz – 1GHz
- Max. výstupní výkon
 - 120 Wattů
- Výstupní výkon s 1dB kompresí
 - 75 Wattů
- Vstupní a výstupní odpor
 - 50Ω

6.4.2 Zesilovač FLG-100A

- Frekvenční rozsah
 - 0,8GHz – 2GHz
- Max. výstupní výkon
 - 100 Wattů
- Výstupní výkon s 1dB kompresí
 - 80 Wattů
- Vstupní a výstupní odpor
 - 50Ω

6.4.3 Zesilovač FLG-50F

- Frekvenční rozsah
 - 2GHz – 6GHz
- Max. výstupní výkon
 - 50 Wattů
- Výstupní výkon s 1dB kompresí
 - 30 Wattů
- Vstupní a výstupní odpor
 - 50Ω

6.5 Kontrolní počítač a software na testování odolnosti

Pro testování elektromagnetické odolnosti byl zvolen kontrolní software CR – Lab software od firmy Frankonia.

6.5.1 Kontrolní počítač

Kontrolní počítač je standardní průměrný počítač a klávesnicí, monitorem, tiskárnou a operačním systémem Windows. Musí ovšem obsahovat kartu s rozhraním sériové sběrnice RS232, USB, popřípadě i podporu dalších busových systémů.

6.5.2 Kontrolní software

Software RF-Lab je vytvořen na základě platných norem ČSN EN 61000-4-3 ed. 3 a ČSN EN 61000-4-20 ed. 2.

Tento software je plně uzpůsoben řídit veškeré zkoušky elektromagnetické odolnosti a má schopnost některé z nich automaticky provádět. Samostatně vykonává generaci referenčních kalibračních dat, dále pak měřené data zapisuje do paměti přístroje, na němž program běží. Po dokončení měření vytváří předepsaný protokol o provedené zkoušce.

Test sám o sobě lze uskutečnit automaticky nebo manuálně. Je možný také plně automatický monitoring funkčnosti zkoušeného zařízení během testu, pomocí přednastavených mezí tolerance.

6.5.2.1 Základní údaje

- Práce na platformě Windows
- Online nápověda

- Presentace výsledků grafiky a zpráv online
- Export dat do jiných souborů v rámci Windows
- Měření homogenního pole vč. hodnocení
- Výpočet referenčních údajů
- 2dB saturační test na homogenní bázi, který vyhovuje standardnímu měření v terénu
- Měření referenčních dat s pevnou zkušební úrovní nebo profilem úrovní vs. frekvence
- Permanentní PVS (poměr stojatých vln) ovládání během zkoušky
- Možnost nastavení různých omezení, například maximální vstupní úroveň zesilovače nebo maximální povolený výkon
- Režim automatického opakování testu
- Manuální testovací režim
- Ruční zvýšení/snížení testovací úrovně
- Automatický testovací režim vč. monitorování zkoušeného zařízení
- Prozkoušení funkčnosti zkoušeného zařízení přes sériové rozhraní
- Možnost tisku výstupní zprávy, včetně veškerých grafických záznamů
- Kontrola testovacího rozhraní GPIB, USB, RS232
- Možnost upravit přednastavené hodnoty

6.6 Popis způsobu testování navrženými soustavami

Prvním krokem je sestavení plánu zkoušky.

Plán musí obsahovat u zkoušeného zařízení:

- velikost a provozní podmínky,
- typy a počty propojovacích vodičů,
- popis funkce a přípustných funkčních kritérií,
- polohy, ve kterých má být test prováděn,
- popis monitorování funkčnosti.

Plán musí u testovacího zařízení obsahovat:

- typ použitého technického vybavení,
- velikost a tvar homogenního pole,

- zkušební úroveň intenzity pole,
- rozsahy frekvencí, prodleva, frekvenční kroky.

Dalším krokem je složení sestav podle navržených schémat Obr č. 26 a Obr č. 27. Rozdíly mezi těmito návrhy nejsou nijak markantní, pouze v druhém případě máme o něco více možností pro použití některých zařízení při testu.

6.6.1 Testování pomocí zkušebních sestav

Po sestavení základní soustavy je důležité odzkoušet, zda zkušební systém pracuje správným způsobem.

Dále je třeba odzkoušet intenzitu konstantního kalibrovaného pole.

Krom těchto nezbytností postupujeme dle následujících bodů:

- popis testovacího zařízení dle pokynů popsaných výše,
 - Tento popis je, po té, přiložen k výslednému protokolu o zkoušce
- zapnutí systému,
 - Zapínáme každé zařízení systému zvlášť. Zároveň kontrolujeme jejich technický stav a způsob propojení jednotlivých komponentů
- ověření pracovní připravenosti testovacího zařízení,
 - Sestava se nejprve zapíná bez jakýchkoli zkoušených zařízení. Na základě této zkoušky se určí, zda je zařízení schopno provést dané testy odolnosti
- nastavení testovacího zařízení dle základní specifikace,
 - Toto nastavení je udáno ve zkušebním protokolu. Je to především nastavení výstupního výkonu a počáteční frekvence, dále pak velikost zesílení zesilovače. Vše se odvíjí od určení zkušební úrovně, pro kterou danou zkoušku provádíme.
 - Může být trojího typu: plně manuální, manuální z části, automatická. V praxi to znamená, že si musíme zjistit, zda u daných přístrojů vyhovuje automatický režim nebo aspoň jeho část. To znamená, že určitý úsek lze plně automatizovat, ale některé části musí být ovládány ručně.

- popis zkoušeného zařízení dle pokynů popsanych výše,
 - Tento popis je přiložen k výslednému protokolu o zkoušce.
 - Obsahuje též výpis veškerých použitých přístrojů.
- vložení zkoušeného zařízení do GTEM komory,
 - Zařízení vkládáme většinou na manipulátor, abychom mohli zajistit zkoušky ze všech úhlů zkoušeného zařízení.
- uvedení zkoušeného zařízení do provozu,
 - Zařízení musí být připojeno k přívodu elektrické energie tak, jak to specifikuje výrobce. Pokud se skládá z více částí, musí být zapnuty všechny jeho součásti.
- zapojení monitorovacího zařízení kvůli dokumentaci funkčnosti zkoušeného zařízení,
 - Na tomto zařízení, v němž bývá počítač se zkušebním programem, se ukládá veškerá dokumentace k dané zkoušce, jakož to i záznam o fungování zkoušeného zařízení.
- odzkoušení funkčnosti zkoušeného zařízení,
 - Tento krok je nutný kvůli zjištění, zda testované zařízení pracuje správně již před samotnou zkouškou.
 - I toto ověření se příkládá k výstupnímu protokolu.
- nastavení zkušebních parametrů,
 - Jedná se především nastavení rozsahu frekvence, krok a rychlost změny frekvence dle platných norem.
- provedení zkoušky odolnosti dle zkušebních parametrů,
 - Podle výše zmíněných přednastavených parametrů provedeme samotnou zkoušku odolnosti.
- vyhodnocení výsledků zkoušky,
 - Výsledky zkoušky musí být hodnoceny na základě ztráty funkce nebo zhoršení provozu zkoušeného zařízení.
 - Norma doporučuje toto rozřazení:
 - normální funkčnost,
 - dočasná ztráta funkčnosti, která odezní po zastavení rušení,
 - dočasné ztráta funkčnosti, která vyžaduje odborného zásahu,
 - ztráta funkčnosti, která není obnovitelná.

- protokol o provedené zkoušce,
 - Tento dokument v dnešní době je schopen vytvořit téměř každý příslušný testovací program s veškerou dokumentací.



Page 1 (12)

EMC TEST REPORT

No. E74902.I

Immunity to electromagnetic disturbances

EQUIPMENT UNDER TEST

Equipment : Noise generator module for computers
 Type / model : SG 100
 Manufacturer : Protego Information AB
 Tested by request of : Protego Information AB

SUMMARY

Referring to the performance criteria and the operating mode during the tests specified in this report the equipment complies with the requirements according to the following standard.

EN 50082-2:1995

Date of issue: December 19, 1997

Tested by: 
 Stefan Hagdahl

Postadress Företagsadress Box 13060 S-251 13 HELSINGBORG	Besöksadress Väringvägen 22 MÖRARP-HELSINGBORG	Telefon Telefax Fax 46 42 22 00 00	Telefax Telefax Telefax 46 42 22 01 82
---	--	---	---

Obr. č. 33 Přední strana výstupní zprávy [15]

Testování, pomocí komplexnější sestavy je ve své podstatě stejné, jako testování základní sestavou, pouze s tím rozdílem, že máme možnost většího výběru zesilovacích zařízení. Záleží, jakých frekvencí generovaný signál dosahuje, protože každé zařízení použito v těchto návrzích, zesiluje signál v jiných frekvencích. Způsob přepínání mezi zařízeními je proveden pomocí relé přepínačů. Může se tak dít manuálně nebo automaticky podle, aktuálního nastavení zkušební soustavy.

ZÁVĚR

Testování elektromagnetické odolnosti je nezbytnou součástí při zkoušení kvality poplachových systémů. Jeho metodika je stejně důležitá jako samotné navržení zkušební soustavy.

Testování pomocí vlnodů GTEM má obrovskou výhodu hlavně, v náročnosti na zkušební místo, protože samotné testování probíhá, dá se říci, v uzavřeném, maximálně odstíněném přístroji, tvaru čtyřbokého jehlanu. Tento přístroj se skládá z několika částí. Hlavními jsou středový vodič, kterým se distribuuje elektromagnetické pole při samotném měření a absorbéry, jež pohlcují zbytky elektromagnetických, vlny které by se mohly odrazit od zadní stěny.

I ostatní přístroje, jako jsou generátory signálu, zesilovače či počítač s měřícím a záznamovým softwarem, jsou nesmírně důležité pro celou zkoušku. Bez generátoru signálu a zesilovače by nebylo možné dosáhnout, normou požadované, intenzity pole zkoušení. Bez počítače bychom nemohli danou zkoušku dále prezentovat.

V této práci byly navrženy dvě zkušební soustavy. První sestava obsahuje pouze základní testovací přístroje nezbytné pro provedení předem určených částí zkoušky. Například v případě testování ve velkém frekvenčním rozsahu bychom museli ručně měnit zesilovač signálu. Druhá z nich je plně automatizována a nemusí se zde po jejím zprovoznění nic přepojovat. Stačí pouze nastavovat příslušné hodnoty pro měření odolnosti. Všechny zvolené komponenty vyhovují platným normám pro testování elektromagnetické odolnosti. Jejich nastavení je popsáno blíže v příslušných kapitolách.

Důležité je předem si zvolit správnou zkušební úroveň neboli intenzitu testovacího pole. Podle tohoto údaje se dále odvíjí veškeré nastavení techniky měření, její limity a způsoby fungování.

Samotná metodika se skládá z několika po sobě jdoucích bodů, v nichž je popsán postup při provádění zkoušky a to od popisu testovacího a testovaného zařízení až po konečný protokol o provedené zkoušce. Navíc u každého bodu je napsáno stručné vysvětlení, co má obsahovat nebo jakým způsobem je myšlen či se má provést.

Zkouška může být prováděna manuálně, automaticky nebo jejich kombinací. Záleží vždy na příslušné specifikaci u zařízení, které hodláme prověřit. Většinou jsou tyto hodnoty známy od výrobce a my pouze ověřujeme jejich platnost pro daný přístroj.

Na konci samotné zkoušky je ovšem nejdůležitější protokol o provedené zkoušce, který prezentuje naše údaje o průběhu celého testování.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

Testing electromagnetic immunity is an essential part of the quality testing of alarm systems. The methodology is as important as the design of the test system.

Testing waveguides GTEM has a huge advantage especially in the performance of the test site because the actual testing takes place, so to speak, in a closed, most shielded device, a four-sided pyramid shape. This device consists of several parts. The main center conductor, which distributes the electromagnetic field in the actual measurement and absorbers that absorb the remnants of electromagnetic, waves that could be reflected from the back wall.

The other instruments such as signal generators, amplifiers and computer with measuring and recording software are extremely important for the entire test. No signal generator and amplifier would not be achieved the required standard, field strength testing. Without the computer, we could not test further the present.

In this work, two test systems designed. The first set contains only basic test instrumentation needed to perform the predetermined sections of the test. For example, in the case in a large frequency range, we had to manually change a signal amplifier. The second one is fully automated and may not be here after launching anything forwarded. You only need to set the appropriate values for the measurement of resistance. All selected components conform to the applicable standards for testing electromagnetic immunity. The setting is described in detail in the relevant chapters.

It is important to choose the correct pre-test level or intensity of the test field. According to this data also depends on the settings of all measurement techniques, its values and ways of functioning.

Methodology itself consists of several consecutive points at which describe the procedure for performing the test and the test description and test equipment to the final test reports. In addition, each point written a brief explanation of what to include or how it is meant to be or do.

The test may be performed manually, automatically, or a combination thereof. It always depends on the specification of the device you intend to scan. Mostly, these values are known from the manufacturer and we only verify their validity for the instrument.

At the end of the test itself, however, is the most important test reports, which presents our data throughout the testing.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Ackoo - učební texty - Modulace - úvod, amplitudová modulace. [online]. [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: www.ackoo.estranky.cz
- [2] Anechoic chamber, EMC, test system, Emission measuring, Fully-anechoic, IEC/EN 61000-4-3, 61000-4-6. [online]. [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: <http://frankoniagroup.com/cms/en/>
- [3] Class A power amplifiers - Electronic Circuits and Diagram-Electronics Projects and Design. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.circuitstoday.com
- [4] Class AB Power Amplifiers. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.learnabout-electronics.org
- [5] Class B Amplifier - Transistor Amplifier Tutorial. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.electronics-tutorials.ws
- [6] Class C power amplifier - Electronic Circuits and Diagram-Electronics Projects and Design. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.circuitstoday.com
- [7] Class D Amplifiers. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: sound.westhost.com
- [8] CRIPPS, Steve C. *Advanced techniques in RF power amplifier design*. Boston: Artech House, 2002, xv, 320 s. ISBN 15-805-3282-9
- [9] ČSN EN 50130-4 ed.2. Poplachové systémy. Část 4: Elektromagnetická kompatibilita - Norma skupiny výrobků: Požadavky na odolnost komponentů požárních systémů, poplachových zabezpečovacích a tísňových systémů a systémů CCTV, kontroly vstupu a přivolání pomoci. Praha: ÚNMZ, 2012, 28 s.
- [10] ČSN EN 61000-4-20 ed.2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-20: Zkušební a měřicí technika - Zkoušky emise a odolnosti ve vlnovodech s příčným elektromagnetickým polem (TEM). Praha: ČNI, 2004, 88 s.
- [11] Encyklopedie elektromagnetické kompatibility. [online]. 2009 [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=home>
- [12] [Http://www.gigatest.net/frankonia](http://www.gigatest.net/frankonia). [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.gigatest.net/frankonia/emc_test_instruments.pdf
- [13] CHATTERTON, Paul A a Michael A HOULDEN. *EMC: electromagnetic theory to practical design*. Chichester: Wiley, c1992, xiv, 295 s. ISBN 04-719-2878-X

- [14] Choosing an RF Signal Generator. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: http://www.ab4oj.com/test/sig_gen.html
- [15] Immunity-SG100. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.protego.se
- [16] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. EMC z hlediska teorie a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-730-0202-7.
- [17] M.L.Crawford, Generation of Standart EM Fields Using TEM Transmission Cells, IEEE Transmission on Elektromagnetic Compatibility.1974, vol 16, pp 189-195, ISSN: 0018-9375.
- [18] Microwave journal. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.microwavejournal.com
- [19] OTT, Henry W. Electromagnetic compatibility engineering. Hoboken: Wiley, c2009, xxv, 843 s. ISBN 978-0-470-18930-6.
- [20] R&S®SMIQ Vektorsignalgenerator (Rohde & Schwarz Deutschland - Produkte - Messtechnik - Signalgeneratoren). [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: <http://www.rohde-schwarz.de/product/SMIQ.html>
- [21] SOCIETY, IEEE EMC. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility: symposium record : August 21-25, 2000, Washington Hilton. Piscataway, N.J: IEEE, 2000. ISBN 07-803-5677-2
- [22] SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility: přednášky. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2005, 155 s. ISBN 80-214-2864-3.
- [23] SVOBODA, Jaroslav. *Základy elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993, 99 s. ISBN 80-010-0982-3.
- [24] Sun Y. Wireless Communication Circuits and Systems / 9.4 RF circuit syntheses. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: flylib.com
- [25] Teseq Schaffner GTEM 250 - Testing Other Types of Equipment. [online]. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z: www.testequipmentconnection.com
- [26] VACULÍKOVÁ, Polina. Elektromagnetická kompatibility elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vf rušení. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 80-716-9568-8.

- [27] VALOUCH, Jan. Elektromagnetická kompatibility poplachových - testování a měření elektromagnetických parametrů: Security magazín. Praha: Security Media, 2012, 24 – 29. ISSN 1210-8273.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

TEM	Význam první zkratky.
GTEM	Význam druhé zkratky.
EMC	Elektromagnetická kompatibility
EMS	Elektromagnetická odolnost
EMI	Elektromagnetická interference
Hz	Herz
dBm	Decibelmetr
Ω	Ohm
P	Výkon
E	Intenzita pole
Z	Impedance
h	Vzdálenost
W	Watt
U	Napětí
V	Volt
m	Metr
ϵ_0	Permitivita vakua
ϵ_c	Permitivita
Q	Náboj
RF	Radiofrekvenční
dB	Decibel
kg	kilogram
Wi-Fi	Wireless Fidelity
GPS	Globální triangulační systém

WiMAX Worldwide Interoperability for Microwave Access

QPSK Quadrature Phase Shift Keying

QAM Quadrature Amplitude Modulation

GPIB General Purpose Interface Bus

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr č. 1 Mez vyzařování a odolnosti [11]	12
Obr č. 2 Klasifikace interferenčních signálů [11], upravil Vašík, 2013	13
Obr č. 3 Způsoby šíření rušivých elektromagnetických signálů.....	15
Obr č. 4 Schématický diagram TEM buňky	17
Obr č. 5 Aktuální ukočení na zadní straně buňky [21]	24
Obr č. 6 Útlum ku frekvenci s různým počtem zubů a paralelních rezistorů [21].....	24
Obr č. 7 Typický tvar širokopásmových pyramidových absorbérů [21]	25
Obr č. 8 Základní typy vstupů rušivých signálů do zkoušeného zařízení [11], upravil Vašík, 2013.....	30
Obr č. 9 Připojení generátoru k GTEM buňce.....	32
Obr č. 10 GTEM buňka boční pohled.....	36
Obr č. 11 GTEM buňka vrchní pohled	36
Obr č. 12 Ukázka GTEM komory [12].....	37
Obr č. 13 Diagram obecného generátoru signálu	40
Obr č. 14 Generátor RF signálu [14]	46
Obr č. 15 Diagram vektorového generátoru signálu.....	46
Obr č. 16 Schéma zesilovače třídy A [3]	48
Obr č. 17 Schéma zesilovače třídy B [5]	49
Obr č. 18 Schéma zesilovače třídy AB [4]	50
Obr č. 19 Schéma zesilovače třídy C [6]	51
Obr č. 20 Schéma zesilovače třídy E [24]	53
Obr č. 21 Schéma zesilovače třídy F [18].....	55
Obr č. 22 Jednoduchá polarizace pohled z boku [10].....	61
Obr č. 23 Jednoduchá polarizace pohled zevnitř [10]	61
Obr č. 24 Amplitudová modulace signálu [1].....	64
Obr č. 25 Zesílení signálu [3]	65
Obr č. 26 Základní návrh testovací soupravy	66
Obr č. 27 Komplexnější návrh testovací soustavy.....	66
Obr č. 28 Zkušební vlnovod GTEM [25]	67
Obr č. 29 Vertikální polarizace zkoušeného zařízení [10].....	68
Obr č. 30 Horizontální polarizace zkoušeného zařízení [10].....	68
Obr č. 31 R&S SMB 100A [2]	69

Obr č. 32 Ilustrační obrázek podoby zesilovače [2]	70
Obr č. 33 Přední strana výstupní zprávy [15]	75

SEZNAM TABULEK

Tab č. 1 Konverze dBm na mW	43
Tab č. 2 Body oblasti kalibrace	60
Tab č. 3 Zkušební úrovně	63

SEZNAM GRAFŮ

Graf č. 1 Účinnost třídy D proti třídě AB [7]	52
Graf č. 2 Průběh vlny zesilovače třídy F [18].....	54