



Fakulta elektrotechnická
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jednoduché testovací metody zjišťování elektromagnetické kompatibility

Autor práce: Ondřej Jadlovský
Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej JADLOVSKÝ**
Osobní číslo: **E10B0306P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Jednoduché testovací metody zjišťování elektromagnetické kompatibility**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Uvedte přehled testů EMC pro oblast vyzařování a odolnosti elektronických zařízení.
2. Navrhněte možnosti nahrazení těchto testů jednoduššími, informačními metodami.
3. Realizujte některé postupy a ověřte možnost jejich využití.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant bakalářské práce:

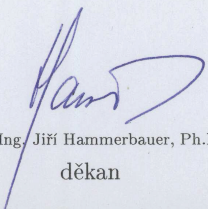
Doc. Ing. Jiří Skála, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

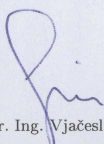
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**




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

L.S.


Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh alternativních měřících metod zjišťování elektromagnetické kompatibility v oblasti odolnosti a vyzařování. Cílem práce je přiblížit se výsledkům normovaných postupů. Návrh bude realizován běžnými elektronickými zařízeními, neboť alternativní postup by mohl použít každý, kdo by měl zájem provést přibližný informační test elektromagnetické kompatibility bez použití nákladných normovaných zařízení. Realizace byla provedena u zkoušek odolnosti proti elektrostatickým impulsům, odolnosti proti nízkenergetickým širokopásmovým impulsům, odolnosti vůči magnetickým polím síťového kmitočtu 50Hz a realizaci měřících sond pro zjišťování elektrického a magnetického pole ve vysokofrekvenční oblasti.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibility, elektromagnetická odolnost, vyzařování, elektrostatický výboj, nízkenergetické širokopásmové impulsy, magnetické pole síťového kmitočtu 50Hz , vysokofrekvenční elektromagnetické pole. . .

Abstract

Jadlovský, Ondřej. *Simple Testing Methods for EMC [Jednoduché testovací metody zjišťování elektromagnetické kompatibility]*. Pilsen, 2013. Bachelor thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Applied Electronics and Telecommunications. Supervisor: Jiří Skála

The presented bachelor thesis focuses on the design of the alternative methods for measuring the electromagnetic compatibility of immunity and radiation. The aim is to approach the results of the standardized procedures. The design will be realized by the conventional electronic devices. An alternative test could be used by anyone, who would want to have an approximate information test of electromagnetic compatibility, without using some expensive standard equipment. The implementation was performed the immunity tests against electrostatic impulses, immunity to the low-energy wideband pulse, immunity to magnetic fields power frequency 50 *Hz* and implementation of the measuring probes for the detection of the electric and magnetic fields in the high-frequency electromagnetic area.

Keywords

Electromagnetic compatibility, electromagnetic immunity and emissions, electrostatic discharge, low-energy wideband pulses, magnetic field power frequency 50 *Hz*, high-frequency electromagnetic field. . .

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

Také prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 6. června 2013

Ondřej Jadloviský

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	vii
Seznam symbolů a zkratek	viii
1 Úvod	1
1.1 Definice a formulace problému (důvod vzniku zadání)	1
2 Úvod do Elektromagnetické kompatibility	2
2.1 Přehled a dělení EMC testů	2
2.2 Elektromagnetické vazby	3
2.3 Testování elektromagnetických polí	4
3 Normalizace v EMC	7
3.1 Normy pro elektromagnetickou odolnost	8
3.1.1 ČSN EN 61000-4-1 Přehled zkoušek odolnosti	8
3.1.2 ČSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj	8
3.1.3 ČSN EN 61000-4-3 Vyřazované vysokofrekvenční elektromagnetické pole	9
3.1.4 ČSN EN 61000-4-4 Rychlé přechodové jevy a skupiny impulsů	10
3.1.5 ČSN EN 61000-4-5 Zkouška rázovým impulsem	11
3.1.6 ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli	13
3.1.7 ČSN EN 61000-4-8 Magnetické pole síťového kmitočtu	13
3.2 Normy pro vysokofrekvenční rušení (<i>RFI Standards</i>)	14
3.2.1 ČSN EN 55014 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízením s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnosti a podobné účely, elektrickým nářadím a podobnými elektrickými přístroji	14
3.2.2 ČSN EN 55022 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky	15

3.2.3	ČSN EN 55016 Specifikace metod pro měření vysokofrekvenčního rušení a odolnosti	16
4	Návrh alternativních měřících metod pro zjištění EMC	18
4.1	Realizace ESD	18
4.1.1	Podmínky pro zkoušení ESD	18
4.1.2	Alternativní zkušební ESD generátor	20
4.2	Realizace skupin rušivých impulsů	22
4.2.1	Podmínky pro realizaci zkoušky odolnosti vůči nízkoenergetickým širokopásmovým impulsům	23
4.2.2	Alternativní generátor nízkoenergetickým širokopásmovým impulsů	25
4.3	Realizace zkoušky odolnosti vůči magnetickým polím síťového kmitočtu 50 Hz	27
4.3.1	Podmínky pro realizaci zkoušky odolnosti vůči magnetickým polím	27
4.3.2	Alternativní generátor a jednozávitová indukční cívka pro test magnetické odolnosti	28
4.4	Realizace antén pro vysokofrekvenční elektromagnetické pole	30
4.4.1	Realizace sond pro snímání blízkého pole	30
4.4.2	Měření rušení ve vzdálených polích	34
5	Závěr	37
	Reference, použitá literatura	39

Seznam obrázků

4.1	Způsob zkoušení ESD Převzato z [1] 	19
4.2	Teoretický požadovaný časový průběh ESD normovaného generátoru Převzato z [1]	19
4.3	Časový průběh alternativního generátoru (1)	20
4.4	Časový průběh alternativního generátoru (2)	21
4.5	Fotografie alternativních generátorů ESD (1) zapalovač s měničem dole, (2) piezo-zapalovač nahoře	21
4.6	Programovatelný pojízdný robot	22
4.7	Skupiny rychlých přechodových dějů Převzato z [1] 	23
4.8	Schéma zapojení zkušební generátoru Převzato z [1] 	24
4.9	rozmístění přístrojů pro realizaci zkoušky odolnosti vůči nízkoenergetickým širokopásmovým impulsům Převzato z [1] 	24
4.10	Schéma alternativního generátoru nízkoenergetických širokopásmových im- pulsů	25
4.11	Ukázka časových průběhů alternativních generátorů realizovaných 100V a 12V stejnosměrným relé	26
4.12	Fotografie použitých stejnosměrných relé (100V, 12V a dvou 24V)	27
4.13	Indukční jednoválcová cívka pro zkoušení odolnosti vůči magnetickým po- lím Převzato z [1] 	28
4.14	Pájka jako generátor se zapojenou jednoválcovou cívkou	29
4.15	Rušený osciloskop jednoválcovou indukční cívkou	30
4.16	Druhy sond pro snímání magnetického pole. Převzato z [5] 	31
4.17	Frekvenční spektrum smyčky o průměru 5cm s centrálním přerušením stí- nění ve středu smyčky	32
4.18	Vlastní konstrukce sond pro snímání magnetického pole	32
4.19	Frekvenční spektrum rušivého generátoru naměřené prutovou anténou	34
4.20	Širokopásmová logaritmicko-periodická televizní anténa LP45F	36

Seznam tabulek

2.1	Přehled měřicích antén Převzato z [1] 	4
3.1	Hodnoty zkušební napětí pro ESD Převzato z [1] 	9
3.2	Úrovně pro simulaci ve vysokofrekvenčním poli Převzato z [1] 	9
3.3	Velikosti napětí a opakovací kmitočty zkušebních impulsů rychlých přechodů pro napájecí a zemnicí svorky Převzato z [1] 	11
3.4	Velikosti napětí a opakovací kmitočty zkušebních impulsů rychlých přechodů pro signálové datové a řídicí svorky Převzato z [1] 	11
3.5	Zkušební třídy rázových napěťových impulsů Převzato z [1] 	12
3.6	zkušební úrovně pro nemodulované vysokofrekvenční napětí Převzato z [1] 	13
3.7	Jednotlivé úrovně spojitých nízkofrekvenčních magnetických polí Převzato z [1] 	14
3.8	Meze rušivého napětí na svorkách přístroje Převzato z [1] 	16
3.9	Kmitočtová pásma pro měření rušivých veličin Převzato z [1] 	17
4.1	Hodnoty napětí změřené na přístrojích při měření stejnosměrného zdroje napětí 5V a s působením ESD výboje	22
4.2	Hodnoty napětí změřené na měřicích přístrojích při měření napětí 5V a s působením alternativního rušení	26
4.3	Hodnoty napětí změřené na měřicích přístrojích při měření napětí 5V a s působením rušícího normovaného generátoru EFT 500	27
4.4	Naměřené veličiny produkované jednozávitovou indukční cívkou	29
4.5	Sondy pro snímání blízkého magnetického pole HP 11941 a 11940	33
4.6	Sonda pro snímání blízkého magnetického pole o průměru smyčky 5cm s konstrukcí podle sondy 2a z obrázku 4.16	33
4.7	Sonda pro snímání blízkého magnetického pole o průměru smyčky 2,5cm bez centrálního přerušování stínění	33
4.8	Změření spektra zdroje rušení pomocí širokopásmové logaritmicko-periodické antény LP45F	35
4.9	Změření spektra zdroje rušení pomocí metrové prutové antény	35

Seznam symbolů a zkratek

CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques. Výbor pro rádiovou interferenci.
ČSN	Czech Technical Standard. Česká technická norma.
GSM	Groupe Special Mobile. Globální Systém pro Mobilní komunikaci.
EMC	The Electromagnetic compatibility. Elektromagnetická kompatibilita.
EMI	The electromagnetic emissions. Elektromagnetické vyzařování.
EMS	The electromagnetic immunity. Elektromagnetická odolnost.
EN	The European standard. Evropská norma.
ESD	The electrostatic discharge. Elektrostatický výboj.
LISN	Line Impedance Stabilizing Network. Umělá zátěž vedení.
PCM	Pulse-code modulation. Pulzně kódová modulace.
AV	Střední hodnota rušivého napětí [$dB\mu V$]
B	Magnetická indukce [T]
c	Rychlost světla $3 \cdot 10^8 [m/s]$
C	Kapacitor [F]
d	Průměr kružnice [m]
E	Elektrická intenzita [V/m]
f	Frekvence [Hz]
H	Magnetická intenzita [A/m]
I	Elektrický proud [A]
l	Délka [m]
L	Induktor [H]
L_u	Úroveň napětí [dBm]
P	Činný výkon [W]
QP	Kvazišpičková hodnota rušivého napětí [$dB\mu V$]
R	Elektrický odpor [Ω]
T	Perioda [s]
U	Elektrické napětí [V]
π	Matematická konstanta (Ludolfovo číslo) 3,14159265
τ	Časová konstanta [s]

λ	Vlnová délka [m]
μ_0	Permeabilita vakua $4\pi 10^{-7} [Hm^{-1}]$
μ_r	Relativní permeabilita [-]

1

Úvod

1.1 Definice a formulace problému (důvod vzniku zadání)

Předkládaná práce je zaměřena na navržení alternativních měřících metod zjištění elektromagnetické kompatibility (dále jen EMC). Bude uveden přehled testů pro EMC pro oblast vyzařování a odolnosti elektronických zařízení. Pro některé testy navrhne jednodušší informativní metody dle zadání. Tyto navržené metody byly realizovány v prostorách fakulty elektrotechnické, budou v této práci zdokumentovány a jejich výsledky v závěru práce srovnány pomocí normovaných měřících postupů.

Důvodem vzniku tohoto zadání je možnost nalezení EMC v amatérském prostředí bez možnosti použití normovaných postupů z důvodu finančních, časových, nebo jiných omezujících faktorů.

*„**Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) EMC** je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní elektromagnetickou činností nepřipustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyřazovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení.“*¹

¹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.5.

2

Úvod do Elektromagnetické kompatibility

2.1 Přehled a dělení EMC testů

„Měření rušivých signálů je jednou z nejdůležitějších částí problematiky EMC, neboť představuje praktické ověření dosaženého stupně EMC navrženého či testovaného zařízení z hlediska jeho rušivého vyzařování. Vzhledem k praktické nemožnosti dosáhnout absolutní – dokonalé – elektromagnetické kompatibility jakéhokoli zařízení, je nutno stanovit a měřením ověřit dodržení maximálních přípustných hodnot rušivých signálů pro daný typ zařízení.“¹

Zásadní problematikou zjišťování EMC je její měření, protože dokazuje určité množství dosažené úrovně vyřazování, proto je důležité stanovit maximální možné úrovně pro vyřazování u jednotlivých zařízení, aby nedocházelo k jejich vzájemnému rušení. Také musíme při měření respektovat, že sám měřicí přístroj může být rušen svým okolím a že může být také zdrojem určitého rušení pro měřené přístroje. Z důvodu velikého počtu elektronických zařízení, jejich odlišných funkcí a různých způsobů odolností proti rušení je třeba rozlišovat speciální postupy, podmínky a metody dané konkrétními mezinárodními normami.²

Způsoby měření jsou závislé na typu šíření elektromagnetického rušení daným prostředím. Elektromagnetické rušení může do přístroje vstupovat či vystupovat buď vedením, vazbou blízkého pole anebo vyřazováním ze vzdáleného pole.

Šíření rušení vedením – Jedná se o šíření rušení v napájecích, datových nebo sdělovacích vedeních. Zjišťujeme zde hodnoty rušivých napětí U , proudů I a výkonu P .

Šíření rušení blízkým polem – Parazitní vazba mezi dvěma přístroji, zde sledujeme hodnoty rušivého pole, a to elektrickou intenzitu E a magnetickou intenzitu H .

¹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibility*, Brno 2002, s.66.

²Svačina J., *Elektromagnetická kompatibility*, Brno 2002, s.66.

Šíření rušení vyřazováním – Jde o rušení mezi vzdálenými objekty při vyšších kmitočtech. Taktéž nás zde zajímá elektrická intenzita E a magnetická intenzita H .

Obvykle se k měření rušivých signálů používají přístroje, jako je selektivní voltmetr, spektrální analyzátor, osciloskop nebo speciální měřicí detektory jako proudová sonda, napěťová sonda, absorpční kleště, použití umělé zátěže LISN a různé typy měřicích antén pro snímání jak magnetického, tak i elektrického pole.

Při měření je nezbytně nutné mít správné rozmístění měřicích přístrojů i zkoušeného objektu na měřicím pracovišti v jeho nezbytném okolí. Musí být respektováno, že do měření mohou zasahovat okolní rušivé vlivy, které mohou rušit jak měřicí přístroje, tak i zkoušený objekt. Tuto skutečnost můžeme eliminovat pouze měřením ve speciálních stíněných komorách, nebo bezodrazových absorpčních prostorách, kde můžeme získat přesné hodnoty ze zdroje rušení (měřeného zařízení). Ale v praxi je třeba otestovat správnou funkci přístroje přímo v daném prostředí, jelikož v reálném prostředí dochází k elektromagnetickým vazbám mezi zařízeními.³

2.2 Elektromagnetické vazby

Můžeme s jistotou tvrdit, že při jakémkoliv přenosu elektrických veličin dochází k vazebním vlivům mezi zdrojem a spotřebičem. Rozlišujeme mezi čtyřmi základními typy vazeb.⁴

Galvanická vazba – Také nazývána vazba společnou impedancí, je elektromagnetickou vazbou dvou elektrických zařízení. Proud obou zařízení se uzavírají přes společnou sériovou RL impedanci. Může ji vytvářet vnitřní impedance společného zdroje, rozvod řídicích obvodů či společné zemnění.⁵

Způsobů, jak potlačit galvanickou vazbu, je několik. Můžeme použít například oddělovací transformátor, feritové kroužky nebo útlumový plášť vedení.

Kapacitní vazba – Kolem každého vodiče, kterým protéká elektrický proud I , i v jeho okolí vzniká elektrická intenzita E .

Tato intenzita E způsobuje kapacitní vazbu se zemí v jakémkoli bodě vedení. Pokud se v okolí bude nacházet další vodič s proudem I v paralelní pozici k prvnímu vodiči, bude docházet ke společné kapacitní vazbě mezi vodiči a vazbě se zemí. Parazitní kapacitní vazby lze eliminovat vzájemným kroucením obou žil vodičů, nebo využít stíněné kabely. Klasický příklad parazitní kapacity je v číslicových systémech a jiných obvodech se společným vodičem.⁶

³Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.86-94.

⁴Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.23.

⁵Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.23-27.

⁶Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.27-30.

Induktivní vazba – Kolem každého elektrického vodiče, kterým protéká elektrický proud I , vzniká magnetické pole v závislosti na frekvenci, pokud uvažujeme střídavý harmonický proud i . Bude-li docházet k časovým změnám magnetického toku, do obvodu se začne indukovat rušivé napětí podle Faradayova indukčního zákona. Pokud bude proud konstantní bude i magnetické pole konstantní. Parazitní induktivní vazby jsou rychlé situace jako například elektrostatický výboj (přírodní blesk) či místní umělé ESD výboje, kde proudové impulsy dosahující stovek až tisíců ampér za mikrosekundu.⁷

Vazba vyzařováním – Vzniká elektromagnetickým polem na větších vzdálenostech, kde můžeme vyloučit kapacitní a induktivní vazbu. Můžeme si zde představovat rušení vysílači nebo průmyslové prostředí, které lze zachytit rádiovými přijímači. Pro vazbu vyzařováním je charakteristický vstup rušení anténou přímo do zařízení, kde se počítá s žádaným signálem.⁸

2.3 Testování elektromagnetických polí

Měřicí antény

Měření rušivých EMC polí v okolním prostoru se dá realizovat pomocí různých typů antén. Ty dokážou zachytit vyzařování od $10kHz$ do několika jednotek GHz . Použití je nejběžnější v oblastech vyšších kmitočtů od $300MHz$ výše, jelikož přímé měření elektrických veličin při takto vysokých frekvencích lze jen špatně realizovat, „*neboť realizace přímého měření rušivých napětí či proudů je na těchto kmitočtech velmi problematická, někdy zcela nemožná.*“⁹ Proto se používá měřicí přijímač s anténou, obvykle spektrální analyzátor s anténou určenou pro dané kmitočty (přehled druhů měřících antén je v následující tabulce 2.1).

Druh antény	Rozsah $f[MHz]$	Složka
Rámová	0,009-30	H
Prutová	0,009-30	E
Symetrický dipól	30-1000	E
Bikónická	20-300	E
Logaritmicko- periodická	200-3000	E
Kónicko- logaritmická	200-3000	E
Složená širokopásmová	30-2000	E
Trychtýřová	1000-40000	E, H

Tab. 2.1: Přehled měřících antén |Převzato z [1]|

⁷Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.30-32.

⁸Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.32-33.

⁹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.74.

Měřicí antény snímají elektrickou nebo magnetickou složku pole, pro snímání magnetické intenzity H se používá rámová, neboli smyčková anténa o maximální velikosti $60 \times 60 \text{ cm}$. Vnitřní vodič je umístěn v kovovém stínění, aby byly eliminovány nežádoucí složky elektrického pole. Anténa může být doplněna měřicím zesilovačem pro zesílení slabších signálů. Rámová anténa se používá v rozsahu 9 kHz až 150 kHz , jelikož v tomto nízkém frekvenčním pásmu působí většinu rušení právě magnetická složka pole.

Stejně typy antén se používají pro zjišťování magnetického pole i v pásmu 150 kHz až 30 MHz . Pro snímání elektrického pole se v tomto pásmu využívá vertikální prutová anténa. Měření blízkého pole touto anténou je nepřesné, protože vysokofrekvenční signál zde způsobuje přímou kapacitní vazbu mezi zdrojem vyřazování a měřicí anténou.

Pro přesné měření elektrické intenzity E v těchto kmitočtech je potřeba místo monopolní prutové antény použít symetrický dipól, který umožní zjistit směr měřeného pole. Jejich velká nevýhoda ovšem spočívá v tom, že je navržen na jeden určitý rezonanční kmitočet, který je závislý jedné určité délce ramen dipólu. Proto se v praxi měření provádí prutovými anténami a dipólové antény se využívají jen v laboratorních podmínkách.

Pro rozsahy desítky MHz až jednotky GHz se nejlépe uplatní širokopásmové antény typu bikónické, logaritmicko-periodické nebo kónické (spirálové) antény. Všecky zmíněné typy zachycují elektrickou intenzitu E . Klasickou širokopásmovou měřicí anténou v oblasti 20 MHz až 300 MHz je bikónická anténa. Pro rozsahy 200 MHz až 3 GHz je běžně využívaná logaritmicko-periodická anténa. Anténu tvoří sada vhodně uspořádaných rezonančních unipólů, jejichž sousední unipóly jsou v přesném logaritmickém podílu vzhledem k rezonančním frekvencím. Pracovní pásmo v uvedeném rozsahu je díky této konstrukci všude konstantní.

Měřicí antény pracující ve vysokých gigahertzových pásmech, jsou realizovány jako trychtýřové antény. Jejich nevýhodou je úzkopásmost, která se dá konstrukčně ovlivňovat. Ale v zásadě pokryjí jen relativně malý rozsah kmitočtů. Kvůli zmíněným omezením je třeba disponovat sadou těchto antén k pokrytí několika dílčích frekvencí.¹⁰

Měřicí sondy

V praxi je třeba lokalizovat zdroj rušení přímo u konkrétní součástky v obvodu, to nám měřicí antény pro vzdálená pole najít nedokážou. Proto se používají malé, takzvané "očíhávací", speciální anténky. Nejčastěji se používají v diagnostice při výrobě elektronických zařízení, kde je potřeba sledovat nežádoucí rušení jednotlivých prvků a co nejlépe lokalizovat jejich zdroje.¹¹

¹⁰Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.75-85.

¹¹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.77.

Pro lokalizaci magnetické intenzity H se musí vytvořit smyčka o rozměrech několika centimetrů, pokud vytvořena nebude, bude anténa snímat elektrické pole E . Měření pomocí těchto sond není nijak přesné. Záleží při měření na mnoha podmínkách, se kterými nelze předem počítat, jako je úhel natočení ke zdroji rušení, vzdálenost od zdroje rušení, rychlost přiblížení a tak dále.¹²

Proto měření pomocí těchto snímacích sond není definované žádnými normami, jde jen o relativní hodnotu vyřazování. Jejich výhoda je snadná kontrola elektromagnetického stínění a snadné nalezení místa úniku vyzařování.

¹²Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 1 - Radiated Emissions, Associate of EMC-UK, [parafráze 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old`archive/010327.html>

3

Normalizace v EMC

„Důležitou součástí všech oblastí elektromagnetické kompatibility je tvorba příslušných norem a předpisů, která je motivována různými cíli.“¹

Každá elektrická, elektrotechnická a elektronická zařízení vytvářejí ve svém okolí určité hodnoty elektromagnetického rušení a vykazují určitou míru elektromagnetické odolnosti. Takto jsou i vytvářeny základní normy v oblasti EMC. Předepisují nepřekračování maximálních dovolených hodnot pro vyřazování a také určitou úroveň odolnosti, kterou by mělo mít každé zařízení. Tyto požadavky se realizují pomocí různých odrušovacích metod nebo opatření. Normy rozdělujeme do tří základních skupin:

1. Normy rušivého vyřazování (EMI)
2. Normy elektromagnetické odolnosti (EMS)
3. Normy pro odrušovací prostředky

Celkově nejstarší jsou normy v oblasti vyřazování (EMI), které tvoří standardní ochranu a zároveň odrušení rádiového spektra. Zatímco normy pro elektromagnetickou odolnost (EMS) jsou mladší a je jich v poměru s normami o EMI podstatně méně, průběžně se dopracovávají. Třetí normy pro odrušení nejsou legislativně závazné a mají pouze doporučující charakter.²

V následující části této kapitoly budou vysvětleny normy pro elektromagnetickou odolnost ČSN EN - 61000-4-x a vybrané normy pro vysokofrekvenční rušení, u kterých bude cílem nalézt náhradní jednodušší metody zjištění EMC. V další kapitole poté bude podrobně rozebrán postup, jakým danou normu zjednodušit, co bylo nahrazeno, změněno a jak byly ovlivněny naměřené výsledky.

¹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibility*, Brno 2002, s.128.

²Svačina J., *Elektromagnetická kompatibility*, Brno 2002, s.128.

3.1 Normy pro elektromagnetickou odolnost

Tyto normy obsahuje několik částí, které podrobně vysvětlují jednotlivé druhy měření elektromagnetické odolnosti.

3.1.1 ČSN EN 61000-4-1 Přehled zkoušek odolnosti

Jedná se o přehled jednotlivých zkoušek, včetně jejich popisu. Dozvíme se zde doporučení, kterou zkoušku je nejhodnější zvolit pro konkrétní měření. Druhy těchto zkoušek jsou následujících částí dané normy.³

3.1.2 ČSN EN 61000-4-2 Elektrostatický výboj

Zkouška odolnosti pro **elektrostatický výboj** vysvětluje postup při měření a zhodnocení výsledného chování zkoušených zařízení a přístrojů za působení elektrostatického výboje (ESD).⁴

Elektrostatický výboj vzniká převážně v obydlých místnostech, kde je nízká vlhkost a umělá podlaha. Jejich největším nebezpečím je velikost vybíjecího impulsu, který může dosahovat až $15kV$, ale s nízkou velikostí energie většinou pod $10mJ$, což postačuje ke zničení polovodičových zařízení o vysoké integraci. K výboji dochází při kontaktu zařízení s obsluhou, kde je akumulovaný elektrostatický náboj. Zkouška je realizována pomocí elektrostatické pistole s vybíjecím hrotem, kdy jedním kabelem je pistole připojena ke zdroji vysokého napětí a druhým uzemňovacím vodičem ke kovové podložce, na které je umístěno zkoušené zařízení.⁵

Při vybíjení impulsu je velikost, tvar a časový průběh vybíjecího proudu značně závislý na individuálních podmínkách a nahodilých faktorech, které při měření nelze eliminovat. Úroveň ESD se usuzuje podle provozních a pracovních podmínek. Hodnoty zkoušených napětí jsou v následující tabulce 3.1. Norma rozlišuje zkoušená napětí pro kontaktní výboj a výboj vzduchovou mezerou.⁶

³ČSN EN 61000-4-1 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Přehled o souboru IEC 61000-4, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.11.2007

⁴ČSN EN 61000-4-2 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Elektrostatický výboj - Zkouška odolnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.11.2009

⁵Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.115-118.

⁶Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old/archive/010619.htm>

Úroveň odolnosti	Kontaktní výboj [kV]	Výboj vzduchovou mezerou [kV]
1	2	2
2	4	2
3	6	8
4	8	15
X	dle ujednání	dle ujednání

Tab. 3.1: Hodnoty zkušebního napětí pro ESD |Převzato z [1]|

3.1.3 ČSN EN 61000-4-3 Vyřazované vysokofrekvenční elektromagnetické pole

Odolnost proti vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli je zkouškou odolnosti zařízení proti vyřazování v pásmu 80 - 1000 MHz vůči spojitým elektromagnetickým polím, která vytvářejí vysílací stanice, pozemní vysílače, satelity mobilních, rozhlasových, televizních a jiných telekomunikačních systémů. Jednotlivé úrovně odolnosti zkoušeného pole jsou shrnuty v tabulce 3.2.⁷

Úroveň odolnosti	Intenzita zkušebního pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
X	zvláštní

Tab. 3.2: Úrovně pro simulaci ve vysokofrekvenčním poli |Převzato z [1]|

Jelikož tyto zařízení vyřazují elektromagnetické pole neustále, můžeme pouze zvyšovat EMS elektronických zařízení proti těmto vysokofrekvenčním polím. V uvedené zkoušce je úroveň intenzity elektrického pole E amplitudově modulována do hloubky 80% napětím o kmitočtu 1 kHz. Takovýto průběh dostatečně simuluje skutečné rušivé signály, které jsou také nějakým způsobem modulovány (PCM, GSM...)⁸

Základní metodou měření odolnosti proti vysokofrekvenčním polím je použití vhodných antén, kterými následně ozařujeme zkoušené zařízení stanovenými úrovněmi. Ve zkoušce je dále doporučeno měřit zpravidla ve stíněných absorpčních komorách kvůli eliminování rušivých vlivů.

Třída 1 – zde popisuje běžné pracovní prostředí s nízkou úrovní vyřazování, kde všechny

⁷ČSN EN 61000-4-3 ed. 3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Vyřazované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - Zkouška odolnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.11.2006

⁸Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.152.

rušivé zdroje jsou ve větší vzdálenosti než 1 km od zkoušeného zařízení. Jedná se o televizní, rádiové a jiné telekomunikační vysílače.

Třída 2 – se uplatní v prostředí s mírnou úrovní vyzařování - pracovní prostředí, v jehož blízkosti pracují vysílače o výkonu menším než 1 W .

Třída 3 – popisuje prostředí s vysokou úrovní rušivého vyzařování. Tato třída je běžná pro průmyslové prostředí, kde v blízkosti zkoušeného zařízení budou pracovat vysílače o vysokých výkonech. Jedná se o rušivé vysílače s výkonem nad 2 W a se vzdáleností minimálně jeden metr od zkoušeného přístroje.

Třída X – Popisuje speciální prostředí s velmi vysokou úrovní rušivého vyřazování.

3.1.4 ČSN EN 61000-4-4 Rychlé přechodové jevy a skupiny impulsů

*„Tato část uvádí požadavky na odolnost a postupy zkoušky týkající se rychlých elektrických přechodných jevů/skupin impulsů. Dále definuje rozsahy a zkušební úrovně a uvádí postupy zkoušky. Cílem této normy je vytvoření obecné a reprodukovatelné základny pro vyhodnocení odolnosti elektrického a elektronického zařízení vystaveného opakovaným rychlým elektrickým přechodným jevům/skupinám impulsů na napájecích, signálových, ovládacích a zemních vstupech/výstupech.“*⁹

Jedná se zátěžový odolnostní test, kde generátor impulsů produkuje rychlé změny napětí po $5/50\text{ ns}$ po dobu 15 ms , takto skupinu impulsů periodicky opakuje po 300 ms . Norma se rozděluje na určité úrovně odolnosti, kterým přiřazuje jednotlivé druhy elektromagnetických prostředí.¹⁰

Úroveň 1 – Dobře chráněné prostředí je prostředím, v němž jsou potlačeny rychlé přechody vznikající ve spínačích a řídicích obvodech. Rozvod napájecích kabelů je stíněný a na obou koncích uzemněný k referenční zemi.

Úroveň 2 – v chráněném prostředí je částečně ochráněno potlačením rychlých přechodových impulsů v obvodech spínanými pouze pomocí relé. Dále jsou zde fyzicky strukturované kabeláže, aby nevedly spolu nestíněné napájecí či řídicí kabely od vodičů signálových či datových.

Úroveň 3 – v typickém průmyslovém prostředí je charakteristické, že se zde nenachází žádná ochrana proti rychlým přechodovým impulsům v obvodech napájecích i řídicích, ve kterých je pro spínání použito relé. Vzájemné oddělení společných cest kabelů zde není dostatečné.

⁹ČSN EN 61000-4-4 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulsů - Zkouška odolnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.5.2005

¹⁰Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.152-153.

Úroveň 4 – v **nechráněném průmyslovém prostředí** neexistuje žádná potlačující ochrana proti rychlým přechodovým impulsům v obvodech, které jsou spínány pomocí relé, nebo stykače. Pro kabeláž jsou použity shodné cesty, kterými vedou společně napájecí i signálové kabely bez řádného oddělení.

Jednotlivé hodnoty zkoušených napětí na prázdno a opakovací kmitočty impulsů jsou uvedeny v následujících dvou tabulkách 3.3, 3.4. První tabulka ukazuje velikosti napětí pro parametry jednotlivých úrovní u napájecích a zemnicích svorek, druhá tabulka ukazuje velikosti napětí pro jednotlivé úrovně u signálových, datových a řídicích svorek.

Úroveň odolnosti	Vrcholová hodnota napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]
1	0,5	5
2	1	5
3	2	5
4	4	2,5
X	zvláštní	zvláštní

Tab. 3.3: Velikosti napětí a opakovací kmitočet zkušebních impulsů rychlých přechodů pro napájecí a zemnicí svorky |Převzato z [1]|

Úroveň odolnosti	Vrcholová hodnota napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]
1	0,25	5
2	0,5	5
3	1	5
4	2	5
X	zvláštní	zvláštní

Tab. 3.4: Velikosti napětí a opakovací kmitočet zkušebních impulsů rychlých přechodů pro signálové datové a řídicí svorky |Převzato z [1]|

3.1.5 ČSN EN 61000-4-5 Zkouška rázovým impulsem

*„Tato část souboru norem se týká požadavků na odolnost zařízení proti jednosměrným rázovým impulsům způsobeným přepětími od spínacích a atmosférických přechodných jevů, zkušebních metod a rozsah doporučených úrovní zkoušky zařízení. Je definováno několik zkušebních úrovní týkajících se různých prostředí a podmínek instalace. Cílem této normy je vytvoření obecné a reprodukovatelné základny pro vyhodnocení odolnosti elektrického a elektronického zařízení vystaveného rázovým impulsům.“*¹¹

¹¹ČSN EN 61000-4-5 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Rázový impuls - Zkouška odolnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.7.2007

Norma navazuje na předchozí zkušební normu, rozšiřuje zkoušky odolnosti o pomalejší napěťové rázové impulsy $1,2/50\mu s$ pro měření naprázdno a proudové rázové impulsy $8/20\mu s$ pro zapojení nakrátko s odstupem jednotlivých impulsů alespoň jedna minuta. Zkouška se provádí alespoň deseti impulsy, z toho pěti kladnými a pěti zápornými. Tato zkušební norma také rozděluje jednotlivé zkoušky odolnosti do definovaných tříd podle druhu instalace a umístění zkoušeného přístroje. Jednotlivé třídy jsou charakterizovány v následujícím odstavci a tabulce 3.5.¹²

Třída 0 – rázový napěťový impuls zde nemůže být vyšší než $25V$. Jedná se o dobře chráněné prostředí, které se nachází ve speciální místnosti.

Třída 1 – rušivý rázový napěťový impuls zde nepřekročí $500V$, jde o částečně chráněné prostředí.

Třída 2 – rušivý rázový napěťový impuls v tomto elektrickém prostředí nesmí být vyšší než $1kV$.

Třída 3 – rušivý rázový napěťový impuls zde nepřekročí $2kV$. Společná kabeláž je zde vedena paralelně vedle sebe.

Třída 4 – rušivý rázový napěťový impuls zde nesmí být vyšší než $4kV$. Vedle sebe probíhají silové i signálové kabely.

Třída 5 – prostředí pro elektronické přístroje, které pracují v telekomunikační technice a jsou připojena k venkovnímu rozvodnému systému.

Třída X – speciální požadavky stanovené specifickými podmínkami.

Třída odolnosti	Zkušební napětí naprázdno [kV]
0	0,025
1	0,5
2	1
3	2
4	4
X	zvláštní

Tab. 3.5: Zkušební třídy rázových napěťových impulzů [Převzato z [1]]

¹²Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.153-154.

3.1.6 ČSN EN 61000-4-6 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Cílem zkoušky je nalézt anténní efekty vodičů připojených k měřenému přístroji. Zdrojem rušení jsou obvykle vysokofrekvenční vysílače ve frekvenčním spektru 9kHz až 80MHz . Dále norma definuje způsoby testování této elektromagnetické odolnosti, její parametry a také jednotlivé stupně úrovní pro zařízení, „*vyloučena jsou zařízení, pokud nemají alespoň jeden přívodní kabel (jako je síťové napájení, signální vedení nebo připojení k uzemnění), který může vytvářet vazbu zařízení na rušivá vysokofrekvenční pole.*“¹³ Stanovené úrovně při zkoušce odolnosti jsou modulovány amplitudovou sinusovou vlnou o kmitočtu 1kHz a o hloubce 80 %. Zdrojem je vysokofrekvenční normovaný generátor, který má definovaných 11 specifických druhů připojení ke měřenému objektu.¹⁴

Úroveň odolnosti	úroveň napětí naprázdno [dB μ V]	napětí naprázdno [V]
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X	zvláštní	zvláštní

Tab. 3.6: zkušební úrovně pro nemodulované vysokofrekvenční napětí [Převzato z [1]]

3.1.7 ČSN EN 61000-4-8 Magnetické pole síťového kmitočtu

„*Tato norma se týká požadavků na odolnost zařízení jen při provozních podmínkách, proti magnetickým rušením na síťových kmitočtech 50Hz a 60Hz . Vztahuje se na domovní a obchodní lokality, průmyslové instalace, elektrárny a rozvodny vysokého a velmi vysokého napětí.*“¹⁵ K měření se může například použít jednozávitová cívka čtvercového závitů o délce 1m . Indukční cívky 1m dovolují zkoušení jen malých zařízení. Při měření se testuje odolnost zařízení ze všech tří prostorových pohledů při natáčení cívky.¹⁶

Norma rozděluje intenzity magnetického pole do jednotlivých tříd.¹⁷

Třída 1 – prostředí, kde se mohou vyskytovat přístroje citlivé na magnetická pole jako na příklad monitory nebo mikroskopy.

¹³ČSN EN 61000-4-6 ed. 3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.11.2009

¹⁴Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.154.

¹⁵ČSN EN 61000-4-8 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zkušební a měřicí technika - Magnetické pole síťového kmitočtu - Zkouška odolnosti, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.10.2010

¹⁶Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.119-120.

¹⁷Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.154.

Třída 2 – jedná se o domácnosti, obchody, nemocnice.

Třída 3 – klasická místa lehkého průmyslu a kvalitně chráněná místa těžkého průmyslu.

Třída 4 – klasické průmyslové prostředí, jako jsou elektrárny, továrny nebo dozorčí rozvodny velmi vysokého napětí.

Třída 5 – běžný těžký průmysl a elektrárny, kde nejsou chráněné rozvodny vysokého a velmi vysokého napětí z provozních důvodů.

Třída odolnosti	Intenzita magnetického pole [A/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
5	100
X	zvláštní

Tab. 3.7: Jednotlivé úrovně spojitých nízkofrekvenčních magnetických polí |Převzato z [1]|

3.2 Normy pro vysokofrekvenční rušení (*RFI Standards*)

Obsahují mezinárodní normy CISPR 11 až CISPR 23, z nichž vycházejí evropské normy EN 55000. Normy CISPR jsou vůbec prvními normami, které vznikly z důvodu ochrany před elektromagnetickým rušením v padesátých letech minulého století, v době, kdy EMC nebyla samostatnou vědeckotechnickou problematikou. Zabývaly se především ochranou rádiového příjmu. Dnes mají normy CISPR rozsáhlé požadavky na ochranu před vysokofrekvenčním elektromagnetickým rušením.¹⁸

3.2.1 ČSN EN 55014 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení způsobeného zařízením s elektrickým pohonem, tepelným zařízením pro domácnosti a podobné účely, elektrickým nářadím a podobnými elektrickými přístroji

Tato norma odpovídá mezinárodní normě CISPR 14. Ta je platná ve frekvenčním rozsahu $9kHz$ až $400GHz$. Mezní velikosti vyřazovaných napětí pro měření elektromagnetických

¹⁸Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.143.

polí se udává jen v rozsahu spektra 150kHz až 300MHz . Mezní hodnoty uvádí pro celé skupiny elektrických výrobků, kde pro naši problematiku bude stačit vyjmenovat jen některé body, které norma obsahuje.¹⁹

1. Veškeré ruční elektrické nářadí (vrtačky, pily, brusky, řezačky, nože, nůžky, pájky...), které je připojeno přes transformátor nebo připojeno rovnou k rozvodné síti.
2. Elektrické hračky (auta, vláčky, letadla, roboty...).
3. Různá zařízení a elektrické přístroje jako mohou být elektrické zapalovače plynu, nabíječe, usměrňovače, měniče.

„Meze v této normě jsou stanoveny na pravděpodobnostním základě, aby se dosáhlo ekonomicky proveditelného potlačení rušení při ještě přijatelné ochraně rádiového příjmu.“²⁰

Norma obsahuje údaje o vybraných mezních rušivých napětích a výkonů na svorkách pro trvalé i mžikové rušení. Norma také samozřejmě podrobně popisuje postupy měření, metody vyhodnocování veličin a požadavky na měřicí přístroje.

3.2.2 ČSN EN 55022 Meze a metody měření charakteristik rádiového rušení zařízením informační techniky

Odpovídá mezinárodní normě **CISPR 22**. Tato norma se zaměřuje na postupy zjištění elektromagnetického rušení produkovaného přístrojem informační techniky ve frekvenčním spektru 9kHz až 400GHz . Jednotlivé meze vyzařování specifikuje v pásmu 150kHz až 1GHz . Přístrojem informační techniky zde může být jakékoliv zařízení splňující funkční požadavky pro vstup, výstup, ukládání, zpracování, zobrazení dat nebo telekomunikačních zpráv. Dále obsahuje alespoň jeden konektor určený pro přenos informačních dat, jehož vstupní napájení nepřesahuje 600V . Přístrojem informační techniky je tedy jakékoliv elektronické a telekomunikační zařízení s výjimkou rádiových vysílačů a přijímačů. Zařízení spadající pod normu ČSN EN 55022 jsou automaticky rozdělovány do třídy A, nebo třídy B podle nároků na odrušení, které dané zařízení dosahuje.²¹

Třída A – je třídou, do které spadají všechna zařízení informační techniky, jež splňují podmínky parametrů rušení ve třídě A, ale zároveň nevyhovují parametrům třídy B. V manuálu k nastavení takového přístroje proto musí být upozornění, že tento výrobek je třídy A a ve vnitřním prostředí může způsobit rádiové rušení.

¹⁹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.146-147.

²⁰ČSN EN 55014-1 ed. 3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Požadavky na spotřebiče pro domácnost, elektrické nářadí a podobné přístroje - Část 1: Emise, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.6.2007

²¹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.148-149.

Třída B – jsou přístroje používající se ve vnitřním prostředí, ve kterém budou pracovat zařízení informační techniky s přístroji rozhlasových a televizních přijímačů se vzdáleností od sebe max. 10m. Zařízením informační techniky tedy mohou být přenosné přístroje napájené z baterií, osobní počítače a jejich periferie nebo telekomunikační koncová zařízení.

„Účelem této normy je stanovení jednotných požadavků na úrovně vysokofrekvenčního rušení zařízení zde specifikovaných, stanovení mezních úrovní, popsání měřících metod a standardizování provozních podmínek a interpretace výsledků.“²²

Meze svorkového napětí informačních zařízení pro třídu A i B jsou v následující tabulce 3.8, parametr QP značí kvazišpičkovou hodnotu a AV střední hodnotu rušivého napětí.

Pásmo kmitočtů kmitočtů [MHz]	Třída A	Třída A	Třída B	Třída B
	QP [dBμV]	AV [dBμV]	QP [dBμV]	AV [dBμV]
0,15-0,5	79	66	66-56	56-46
0,5-5	73	60	56	46
5-30	73	60	60	50

Tab. 3.8: Meze rušivého napětí na svorkách přístroje |Převzato z [1]|

3.2.3 ČSN EN 55016 Specifikace metod pro měření vysoko-frekvenčního rušení a odolnosti

Norma je základem, který v první části určuje specifikace přístrojů pro měření rušivých veličin (U , I , P) a pro rušivá vyzařovací pole signálů v pásmu 9KHz až 1GHz. V normě jsou uvedeny základní požadavky na přístroje pro měření EMI pomocí měřících přijímačů, spektrálních analyzátorů, umělých sítí LISN, proudových sond, napěťových sond, absorpčních kleští nebo pomocí měřících antén. Dále norma určuje požadavky na měřicí stanoviště, na bezodrazové (absorpční) a stíněné komory. Rušivé veličiny a jejich parametry norma rozděluje na třídy A až D podle kmitočtového spektra v tabulce 3.9. Dále norma podrobně popisuje měřicí systémy, konstrukci pomocných obvodů nebo kalibraci měřících přístrojů. Také definuje stanovené meze, statistické odchylky a nejistoty měřících zařízení.²³

²²ČSN EN 55022 ed. 3, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Zařízení informační techniky - Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení - Meze a metody měření, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.11.2011

²³Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.150-151.

Pásmo	Rozsah kmitočtů	Měřená rušivá veličina
A	9KHz-150kHz	U, I, P, H
B	150KHz-30MHz	U, I, P, H, E
C	30MHz-300MHz	P, E
D	300MHz-1GHz	P, E

Tab. 3.9: Kmitočtová pásma pro měření rušivých veličin [Převzato z [1]]

4

Návrh alternativních měřících metod pro zjištění EMC

Tato kapitola bude věnována vlastnímu měření, ve které byly navrženy jednodušší metody zjištění elektromagnetické kompatibility. Jednodušší metody zjištění EMC byly navrženy u měření odolnosti proti elektrostatickému výboji, měření odolnosti rychlými přechodovými skupinovými impulsy. Dále byly navrženy vlastní sondy pro snímání blízkého rušivého elektrického a magnetického pole a také pro snímání vzdáleného pole pomocí měřících antén.

4.1 Realizace ESD

Cílem zkoušky **ESD** je simulovat účinky elektrostatického výboje způsobeného kontaktním dotykem obsluhy s uzemněným přístrojem. Obvykle dochází k nabití lidské osoby na vysoké napětí třením bot a oblečení při chůzi po nějakém typu izolační podlahy.¹

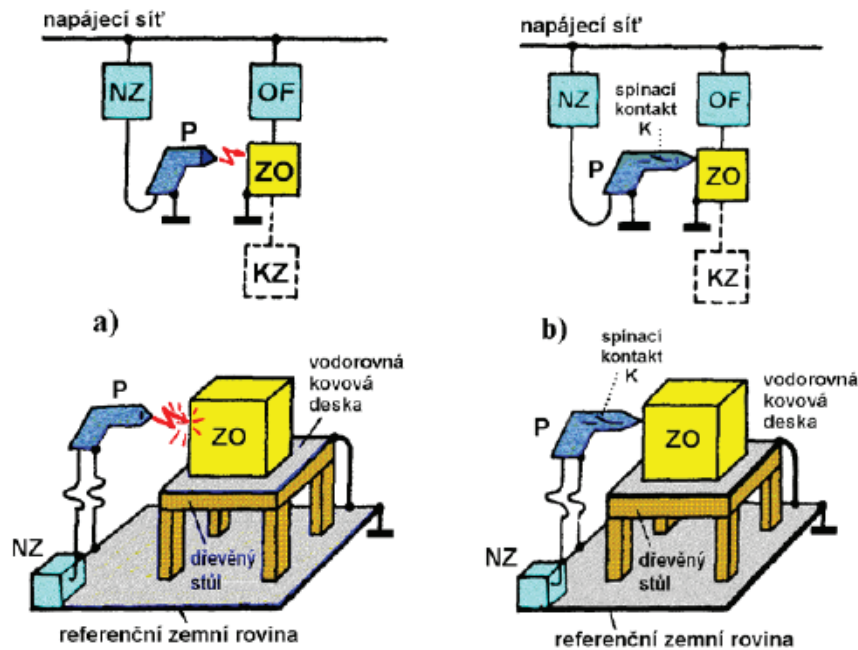
4.1.1 Podmínky pro zkoušení ESD

Pro provedení zkoušky **ESD**, bude potřeba znát zkušební normu ČSN EN 61000-4-2. Dále bude potřeba zkušební ESD simulační pistole, která generuje vysokonapěťový impuls až $15kV$, a bude třeba mít správnou organizaci pracoviště.

Základní uspořádání pracoviště je jednoduché obr.4.1. Zkoušené zařízení je umístěno na izolační podložce, která leží na kovové podložce. Ta je spojená s referenční zemnicí rovinou, přes kterou se ESD simulátor vybíjí. ESD generátor v podobě pistole je jedním vodičem připojen k napájení a druhým uzemňovacím vodičem ke kovové podložce.

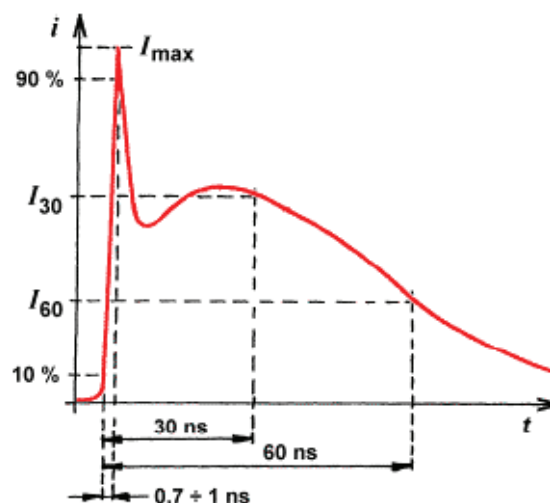
Simulační pistole pro ESD je schopná vytvořit vysokonapěťový výboj přes vzduchovou mezeru, nebo se výboj provádí přímým kontaktem se zařízením. Přednost se dává simulaci

¹Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old/archive/010619.htm>



Obr. 4.1: Způsob zkoušení ESD [Převzato z [1]]

přímého kontaktního výboje, jelikož při přiložení hrotu zkušební pistole přímo k zařízení se zajistí přijatelná reprodukovatelnost výsledků. Zatímco při zkoušení vzduchovou mezerou je reprodukovatelnost výsledků velice malá, závisí zde na mnoha nahodilých faktorech, které nelze při vlastním měření eliminovat. Výsledný tvar vybíjecího impulsu se vždy bude lišit od teoretického žádaného průběhu obr.4.2. V podstatě závisí pouze na šikvosti obsluhy simulační pistole, na individuálních podmínkách a jiných nahodilých faktorech.²



Obr. 4.2: Teoretický požadovaný časový průběh ESD normovaného generátoru [Převzato z [1]]

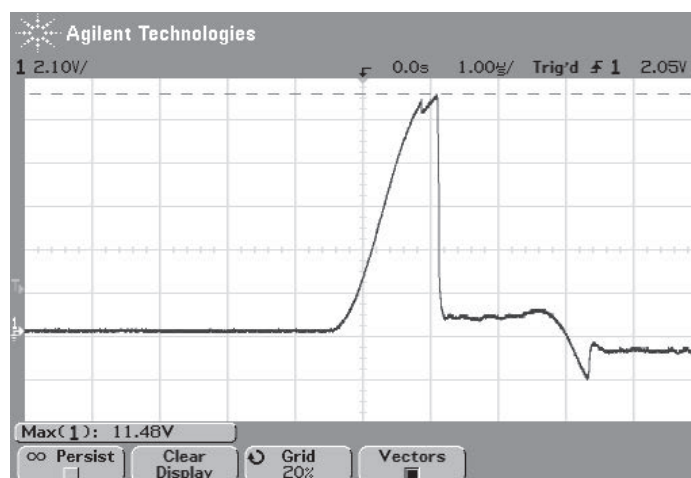
ESD pistoli je nutné držet kolmo ke zkoušenému objektu, každá odchylka ovlivňuje

²Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.115-118.

rozptylovou kapacitu. Zkouška se vyžaduje u všech částí zařízení, které může přijít do kontaktu s obsluhou. Jelikož se jedná o relativně jednoduchý test, na který není třeba mnoho vybavení, není problém zkoušku provádět přímo v pracovním prostředí zkoušeného zařízení.³

4.1.2 Alternativní zkušební ESD generátor

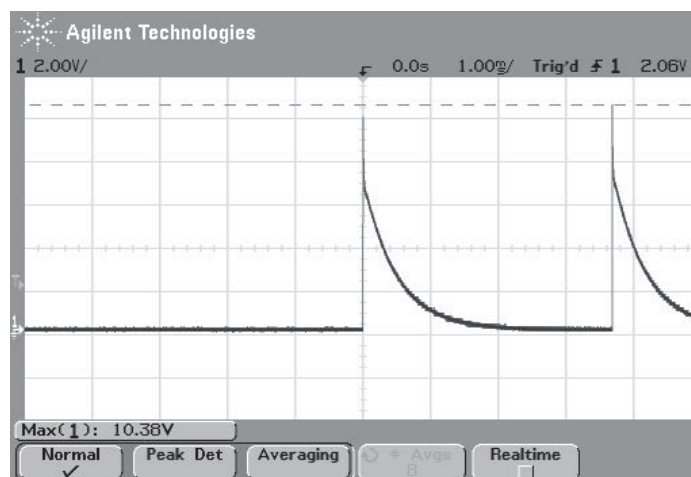
Alternativním zkušebním generátorem byl v tomto měření použit upravení zapalovač plynu, který lze pořídit za velmi nízkou částku v každém obchodě s domácími či kuchyňskými potřebami. Byli zakoupeny a upraveny dva různé zapalovače piezoelektrický a měničový zapalovač. Jejich výstupní průběh byl změřen osciloskopem Agilent 54642A 500MHz 2Gs/s s vysokonapěťovou pasivní sondou Agilent N2771B, 100MHz, vstupní kapacita 1pF 1 : 1000. Oběma zapalovačům byla s přihlédnutím ke špatné reprodukovatelnosti naměřena velikost amplitudy kolem 10kV. Časové průběhy ale byly odlišných charakterů. První zapalovač (1) s měničem měl pomalou vzestupnou hranu impulsu kolem 1,5μs a téměř skokovou sestupnou hranu z 10kV na 0 voltů, zatímco druhý zapalovač (2) piezoelektrický disponoval vzestupnou hranu téměř skokovou, ovšem sestupná hrana klesala exponenciálně po dobu až 2ms.



Obr. 4.3: Časový průběh alternativního generátoru (1)

V porovnání s teoretickým průběhem nelze dosáhnout u prvního zapalovače velmi rychle rostoucí hrany jako u normovaného ESD testu, u druhého zapalovače s rychlou vzestupnou hranou se pravděpodobně teoretickému průběhu přiblížíme, ale s obrovským časovým rozdílem sestupné hrany, která by měla u teoretického průběhu být do desítek nanosekund, nikoli jednotek milisekund. Změřené výsledky nejsou shodné s normou, ale pro rychlý přibližný orientační test, by tento alternativní generátor postačil.

³Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old/archive/010619.htm>



Obr. 4.4: Časový průběh alternativního generátoru (2)

Důležité upozornění: ESD test není pro zdravého člověka nebezpečný, ale osobám, které mají implantovaný například kardiostimulátor nebo jinou elektronickou pomůcku, která řídí tělesné funkce, může ESD test způsobit poruchu implantovaného zařízení a zapříčinit smrt.⁴

Upravený zapalovač plynu je na obrázku 4.5. Zásadní úpravou bylo odstranění krytu okolo vybíjecího hrotu, který slouží jako zem obvodu. Z toho důvodu všechny generované výboje přeskakovaly z hrotu na kryt a pro obsluhu nebyly nijak nebezpečné. Zatímco úpravou bylo přesunout zem na kovovou podložku pod zkoušeným zařízením a tím vytvořit alternativní generátor ESD.



Obr. 4.5: Fotografie alternativních generátorů ESD (1) zapalovač s měničem dole, (2) piezo-zapalovač nahoře

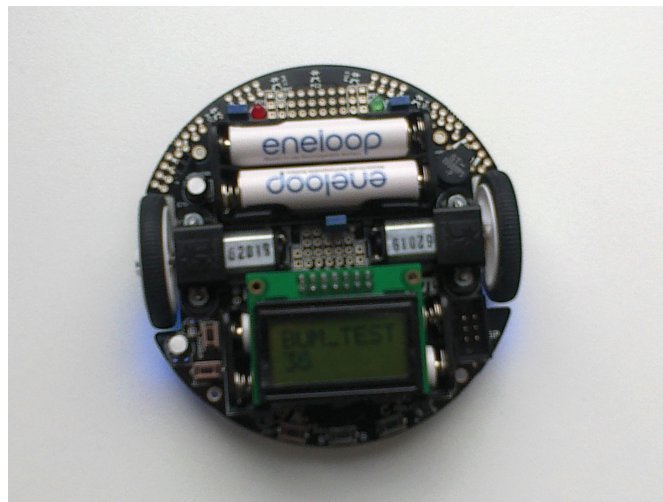
Alternativní generátor ESD byl použit pro vygenerování impulsu k testování několika elektronických zařízení, kterými byly multi-metry a programovatelný pojízdný robot. V následující tabulce jsou výsledky testu ESD na měřicích multi-metrech. V tabulce tab.4.1 jsou aktuální hodnoty, které ukazoval displej přístrojů při ESD výboji.

⁴Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old%20archive/010619.htm>

Přístroj	Bez rušení $U[V]$	Kontaktní výboj na svorky $U[V]$	Vzduchový výboj $U[V]$
M-3800(1)	5,06	vyšší než rozsah	4,8-5
M-3800(2)	5,11	vyšší než rozsah	4,2-6,1
M-3860D	5,01	4.98	5,01
D.M.-V560	5,5	vyšší než rozsah	5,5

Tab. 4.1: Hodnoty napětí změřené na přístrojích při měření stejnosměrného zdroje napětí 5V a s působením ESD výboje

Programovatelný pojízdný robot 4.6 byl otestován oběma alternativními generátory, programovatelný logický obvod pro představu obsahoval LCD display, dva motory s pojízdnými kolečky, řadu kontrolních LED diod, dvě tužkové baterie pro napájení a další součástky. Při vybíjení ESD výboje v okolí LCD displeje docházelo k chybnému vypisování dat nebo k jeho úplnému odstavení, které se dalo odstranit pouze manuálním resetováním obvodu. Dále byl ESD výboj nebezpečný v okolí přívodních napájecích cest k motorům, kde ESD výboj způsobil naprosté zastavení programu, ten bylo nutné poté znovu spustit. V ostatních místech byl obvod proti ESD testu odolný.



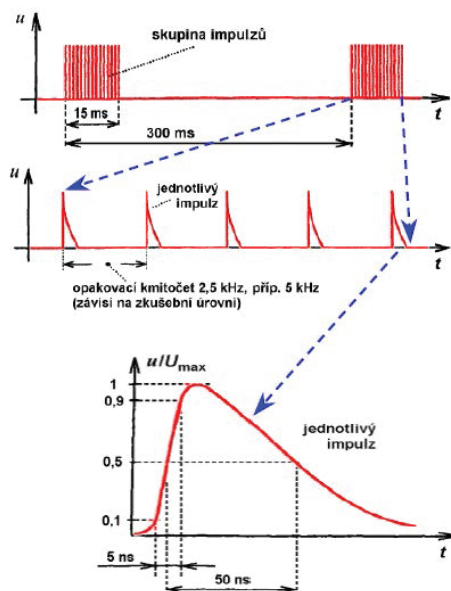
Obr. 4.6: Programovatelný pojízdný robot

4.2 Realizace skupin rušivých impulsů

„Rušivé impulsy s malou energií ve formě skupin krátkých přechodných jevů vznikají obvykle vlivem indukčnosti při spínacích pochodech v napájecích, signálových či datových sítích, vlivem odsakování kontaktů elektromechanických relé, příp. při spínání vysokonapěťových vypínačů. Jejich typickými vlastnostmi jsou velmi krátká náběžná hrana, krátké trvání a celkově malá energie (1mJ), avšak vysoká četnost opakování.“⁵

⁵Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.113.

Zkoušky odolnosti vůči nízkoenergetickým širokopásmovým impulsům se snaží simulovat rušení vytvořené pomocí kontaktů ve spínacích obvodech. Zkouška se skládá z jednoho jednosměrného impulsu opakujícího se frekvencí 5kHz , dávka trvající 15ms o třech dávkách za sekundu. Časový průběh impulsů je na obrázku 4.7. Minimální doba zkoušky je jedna minuta.



Obr. 4.7: Skupiny rychlých přechodových dějů [Převzato z [1]]

4.2.1 Podmínky pro realizaci zkoušky odolnosti vůči nízkoenergetickým širokopásmovým impulsům

Pro provedení zkoušky bude potřeba se seznámit s normou ČSN EN 61000-4-4. Dále bude potřeba v podstatě jen tři věci, které norma popisuje. První je generátor rušení, který produkuje požadovaný shluk impulsů daný normou, druhým popis uspořádání pracoviště, kde bude probíhat samotné měření, a posledním bodem jsou pokyny pro zkušební postup.⁶

Zkušební generátor rušení je na obrázku 4.8. V samotném zapojení spínač S1 vytváří dobu periody skupin impulsů a spínač S2 vytváří jednotlivé impulsy ve skupině.

Jeden impuls ve skupině se vzestupnou hranou 5ns je definován pole časové konstanty τ_1 :

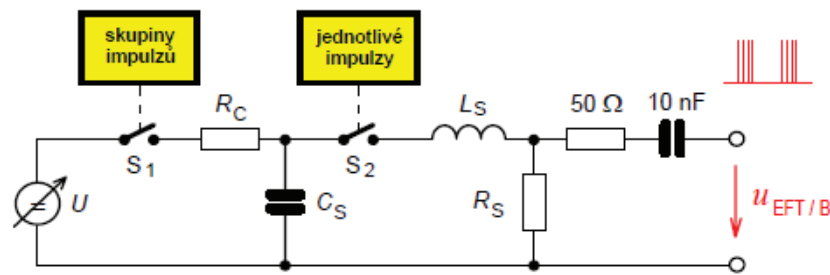
$$\tau_1 = \frac{L_s}{R_s} \quad (4.1)$$

a doběžnou hranu 50ns podle časové konstanty τ_2 :

$$\tau_2 = R_s C_s \quad (4.2)$$

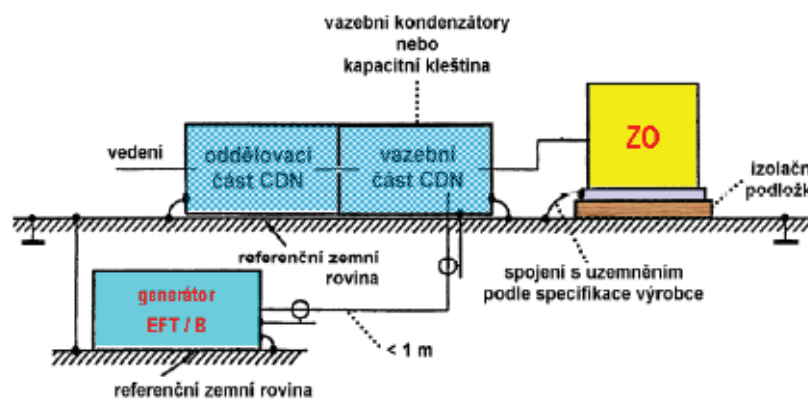
⁶Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old%20archive/010619.htm>

V praxi je tento spínač vytvořen vysokonapěťovým jiskřištěm nebo výkonovým tranzistorem.



Obr. 4.8: Schéma zapojení zkušební generátoru [Převzato z [1]]

Zkušební pracoviště, které podrobně popisuje norma. Musí být uspořádáno následujícím způsobem. Měřené zařízení je umístěno na kovové podložce, která se spojena s uzemněním. Pod kovovou podložkou musí být izolační deska o tloušťce $0,1\text{ m}$, jež leží na dřevěném stole, který je ve výšce $0,8\text{ m}$ nad zemí. Referenční zemnicí rovina má minimální rozměr 1 m^2 a přesahuje měřené zařízení minimálně o $0,1\text{ m}$. Vazební nebo oddělovací obvod s generátorem rušení musí ležet přímo na referenční uzemňovací rovině. Propojovací spojky musí být co nejkratší kvůli parazitní vazební indukčnosti. Minimální vzdálenost mezi přístroji je $0,5\text{ m}$. Názorná ukázka rozmístění přístrojů je na obrázku 4.9.⁷

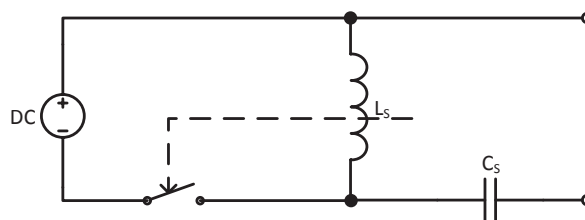


Obr. 4.9: rozmístění přístrojů pro realizaci zkoušky odolnosti vůči nízkenergetickým širokopásmovým impulsům [Převzato z [1]]

⁷ČSN EN 61000-4-4 ed. 2, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC), Zkušební a měřicí technika - Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulsů - Zkouška odolnosti*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1.5.2005

4.2.2 Alternativní generátor nízkoenergetickým širokopásmovým impulsů

Alternativní zkušební generátor se dá realizovat pomocí stejnosměrného relé nebo pomocí elektrického zvonku na principu Wagnerova kladívka. Kmitání relé je možné použít mnoha různými způsoby, jak generovat vyzařování. Jedna strana cívky může být připojena k referenční rovině a v druhá strana cívky může být připojena přes vysokonapěťový kondenzátor $33pF$ k vazební kleštině, kterou mohou procházet zkoušené vodiče. V kovové kleštině se bude vytvářet rušení a kapacitní vazbou bude vstupovat do procházejících kabelů, a tím způsobovat rušení ve zkoušeném zařízení.⁸



Obr. 4.10: Schéma alternativního generátoru nízkoenergetických širokopásmových impulsů

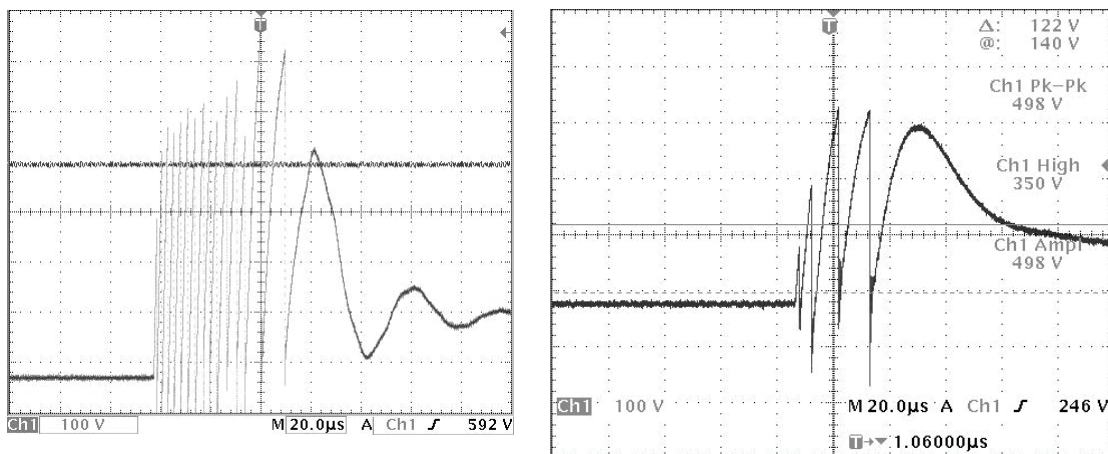
Pro realizaci alternativního generátoru rušení bylo vyzkoušeno několik stejnosměrných relé pro různá napájecí napětí pro $12V$, $24V$ a $100V$. Jejich generovaný časový průběh byl změřen na osciloskopu TEKTRONIX TDS 3012, $100MHz$, $1,26GS/s$ a poté byly vyzkoušeny jako generátory rušení na několika měřících přístrojích, kterým rušily přírodní měřící kabely, jež procházely kleštěnou, kde byly rušeny kapacitní vazbou.

Časové průběhy, které byly snímány osciloskopem, vzhledem k principu generování měli náhodnou úroveň. Ale i přes toto náhodné chování se daly díky jednotlivému snímání časové průběhy analyzovat. Analýzou bylo zjištěno, že spínač stejnosměrného relé se choval, podobně jako ideální časový průběh pro zkoušku širokopásmových impulsů. Spínač produkoval skupiny impulsů o amplitudě několik stovek voltů, které se na určitou dobu utlumily, a pak opět produkoval další skupinu impulsů, amplituda dosahovala až $600V$.

I přes to, že časový průběh byl principiálně podobný ideálnímu časovému průběhu normovaného zdroje rušení, z obrázku 4.11 je patrné, že jednotlivé shluky impulsů se opakovaly mnohem rychleji než udává norma ($300ms$), ale po cca $3 - 30\mu s$, a jednotlivé impulsy ve shluku se opakovaly mnohem pomaleji, než udává norma ($5/50ns$), ale po $16 - 400ns$. Změřené výsledky nejsou shodné s normou, ale pro rychlý přibližný orientační test, by tento alternativní generátor zcela určitě postačil.

V tabulkách 4.2, 4.3, jsou naměřená data, kde byly alternativním i normovaným generátorem rušení ovlivněny měřící multi-metry řady METEX. Srovnáním tabulek rušení

⁸Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [parafráze 22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old/archive/010619.htm>



(a) Časový průběh alternativního generátoru z relé 100V

(b) Časový průběh alternativního generátoru z relé 12V

Obr. 4.11: Ukázka časových průběhů alternativních generátorů realizovaných 100V a 12V stejnosměrným relé

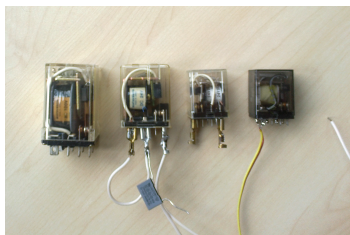
normovaného a alternativního generátoru je patrné, že při nižších napěťových úrovních normovaného generátoru 260V, 500V a 1000V je velikost rušení podobná s alternativním generátorem. Při velikosti napětí normovaného generátoru 2000V a vyšší takového rušení pomocí alternativního generátoru pravděpodobně nepůjde dosáhnout.

Přístroj	Bez rušení $U[V]$	relé 12V $U[V]$	relé 24V $U[V]$	relé 100V $U[V]$
M-3800(1)	5,06	5,03-5,07	5,05-5,07	4,9-5,15
M-3800(2)	4.96	4,8-4,9	4,8-4,9	4,6-4,7
M-3860D	4.97	4,8-4,9	4,8-4,9	4,6-4,8

Tab. 4.2: Hodnoty napětí změřené na měřicích přístrojích při měření napětí 5V a s působením alternativního rušení

U zdroje	$U[V]$				
	0	260	500	1000	2000
M-3800(1)	5,06	5,06	4,5-5,1	4,9-5,15	vyšší než rozsah
M-3800(2)	4,96	4,96	5,7-7,2	4,6-4,7	vyšší než rozsah
M-3860D	4,97	4,97	4,8-4,9	4,6-4,8	vyšší než rozsah

Tab. 4.3: Hodnoty napětí změřené na měřicích přístrojích při měření napětí 5V a s působením rušícího normovaného generátoru EFT 500



Obr. 4.12: Fotografie použitých stejnosměrných relé (100V, 12V a dvou 24V)

4.3 Realizace zkoušky odolnosti vůči magnetickým polím síťového kmitočtu 50Hz

„Elektronická zařízení pracující v blízkosti rozvodů nízkého či vysokého napětí, v průmyslových a elektrárenských provozech, případně v blízkosti středně-napěťových a vysokonapěťových zařízení, jsou pod vlivem silných magnetických polí vyvolaných proudy těchto zařízení.“⁹

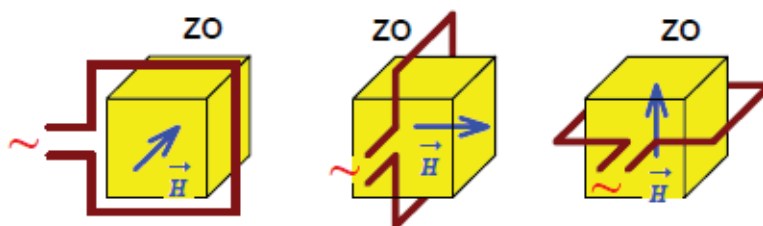
4.3.1 Podmínky pro realizaci zkoušky odolnosti vůči magnetickým polím

Pro testování odolnosti proti magnetickým polím se používají zkušební generátory a speciální indukční cívky ve tvaru kruhu nebo čtverce, kde průtokem střídavého proudu vzniká v okolí cívky zkušební magnetické pole. Přesný postup měření a parametry cívek popisuje norma ČSN EN 61000-4-8.

K produkování magnetického pole se používá jednozávitová cívka, dvojitá cívka (tzv. Helmholtzova) či velká jednoúčelová cívka. S jejich pomocí se realizují testy takzvanou ponornou metodou, kde zkoušené zařízení je umístěno uvnitř cívky, jelikož v tomto místě se hromadí siločáry magnetického pole. Pro běžné posouzení u větších zařízení se používá metoda přiblížení, kde s malou indukční cívkou se pohybuje po povrchu zařízení, mění se prostorová orientace smyčky, aby zařízení bylo vystaveno různým směrům pole a aby bylo nalezeno nejcitlivější místo zařízení.¹⁰

⁹Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.119.

¹⁰Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.119-120.



Obr. 4.13: Indukční jednozávitová cívka pro zkoušení odolnosti vůči magnetickým polím
[Převzato z [1]]

Specifikace zkušební generátoru je jednoduchá. Generátor musí být schopen dodat dostatečný sinusový proud (s maximálním celkovým zkreslením 8%) pro napájení indukční cívky a dosáhnout požadované intenzity pole s vhodně dimenzovaným transformátorem napájeným z elektrické sítě.

Různé úrovně pole této zkoušky jsou stanoveny od 1 A/m do 100 A/m , ale obecné skupiny výrobků této normy vyžadují odolnost obvykle okolo 3 A/m pro domácí, komerční a lehké průmyslové prostředí, do 30 A/m pro průmyslové prostředí. U některých výrobků, zejména těch používaných v těžkých elektrických prostředích nebo v těsné blízkosti jiných zařízení či napájecích kabelů, mohou vyžadovat speciální úrovně zkoušky.

Prostředí pro zkušební podmínky není náročné - teplota $15 - 30^\circ\text{C}$, relativní vlhkost 25-75%, okolní elektromagnetické rušení musí být natolik nízké, že nemá vliv na výsledky testu.

Citlivá zařízení, která nejsou spojena s testem, musí být dostatečně daleko, aby nemohla být rušena. **Bezpečnostní upozornění:** Lidé vybavení kardiostimulátory a podobnými implantovanými elektronickými zařízeními nebo nosící na těle zdravotnické prostředky by neměli provádět či být vystaveni magnetickým polím generovaným při těchto testech.¹¹

4.3.2 Alternativní generátor a jednozávitová indukční cívka pro test magnetické odolnosti

Pokud například při měření v laboratořích se budou používat pro zobrazování dat monitory CRT technologie a v jejich blízkosti se bude používat zařízení produkující střídavé magnetické pole, pak ta způsobí chvění obrazu na monitoru. Pokud by se v okolí monitoru nacházela vytápěná podlaha či by v blízkosti pracovaly motory, nebo velké transformátory, obraz monitoru by rovněž nebyl v pořádku kvůli velkým magnetickým polím, která by ovlivňovala zobrazovací systém.

Alternativní zkušební generátor se realizoval ruční transformátorovou pájkou. Z pájky

¹¹Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 6 – Low-frequency magnetic fields (emissions and immunity)..., Associate of EMC-UK, [parafráze 8.5.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old/archive/020122.htm>

se odstranil pájením hrot, který se nahradil vodičem o délce 1 m a $0,5\text{ m}$. Ten pak reprezentoval jednozávitovou indukční cívku. Ve středu cívky byl umístěn snímač magnetického pole EMF 827 pro změření magnetické indukce B , tímto jsme mohli dopočítat výslednou velikost magnetické intenzity H podle vzorce:

$$B = \mu_0 H \quad \text{a také platí} \quad H = 1[\text{Am}^{-1}] \longrightarrow B = 1,26[\mu\text{T}] \quad (4.3)$$

Hodnota změřené magnetické indukce B , byla také ověřena teoretickým výpočtem, podle vzorce pro jednozávitovou cívku:

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2r} = 4\pi 10^{-7} 1 \frac{63}{20,5} = 79[\mu\text{T}] \quad (\text{Cu } 1\text{ m tabulka 4.4}) \quad (4.4)$$

V následující tabulce jsou naměřené velikosti pole pro různé délky indukčních cívek.

Druh kabelu	$d[\text{m}]$	$I[\text{A}]$	$B[\mu\text{T}]$	$H[\frac{\text{A}}{\text{m}}]$
Al	0,5	75	180	142
Al	1	62	47	37
Cu	0,5	103	290	230
Cu	1	63	86	68

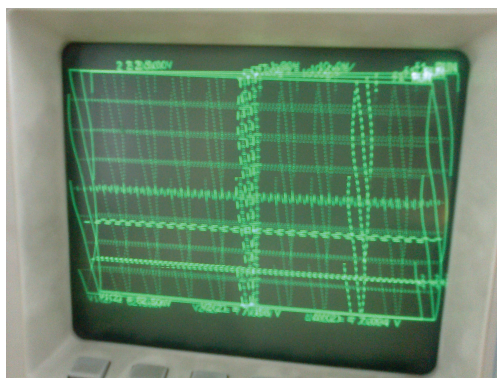
Tab. 4.4: Naměřené veličiny produkované jednozávitovou indukční cívkou



Obr. 4.14: Pájka jako generátor se zapojenou jednozávitovou cívkou

V magnetickém poli cívky byl rušen osciloskop s CRT obrazovkou, výsledný vliv rušení je na obrázku 4.15.

Rušení se projevovalo i při nízkých polích, při velkých (100 A/m) nebylo možné obraz pozorovat.



Obr. 4.15: Rušený osciloskop jednozávitovou indukční cívkou

4.4 Realizace antén pro vysokofrekvenční elektromagnetické pole

„V posledních deseti letech výrazně nabývá na významu posuzování elektromagnetické odolnosti všech elektronických zařízení vůči vlivu rušivých elektromagnetických polí. Tato skutečnost je dána současným obrovským rozmachem sítí pozemních i družicových rozhlasových a TV vysílačů a zejména mohutným celosvětovým rozvojem systémů mobilních radiokomunikačních služeb, radiotelefonů, občanských stanic apod.“¹²

Zkoušky měřicími anténami se nejčastěji využívají ve frekvenčním pásmu 80 MHz až 1000 MHz, jež popisuje všeobecná norma ČSN EN 50081-1,2 a norma ČSN EN 55022 pro informační techniku. Základní metodou měření vysokofrekvenčních polí je použití vhodných antén, kterými lokalizujeme zdroj rušení.

Měření elektromagnetických polí se rozděluje na pole blízká a vzdálená v závislosti na frekvenci. V blízkém poli musíme odděleně měřit magnetickou a elektrickou složku pole, zatímco v poli vzdáleném snímáme pouze jednu složku. Pole blízké a vzdálené rozdělujeme následující vzorec pro hraniční vzdálenost:

$$r = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (4.5)$$

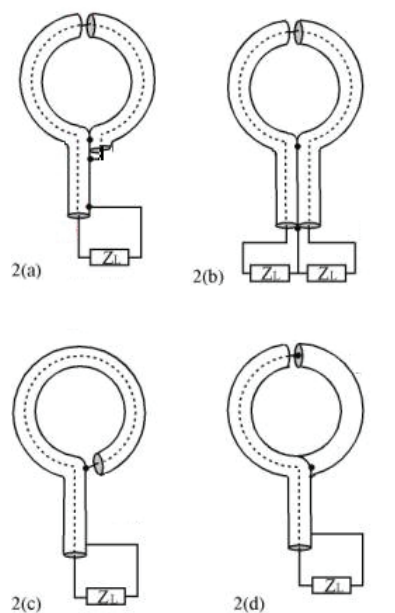
4.4.1 Realizace sond pro snímání blízkého pole

V praxi je třeba lokalizovat zdroj rušení přímo u konkrétní součástky v obvodu, to nám měřicí antény pro vzdálená pole najít nedokážou, proto se používají malé, speciální anténky. Nejčastěji se využívají v diagnostice při výrobě elektronických zařízení, kde je potřeba sledovat nežádoucí rušení jednotlivých prvků a co nejlépe lokalizovat jejich zdroje.¹³

Měření pomocí těchto snímacích sond není regulovatelné žádnými normami, jde jen o relativní hodnotu vyzařování. Jejich výhodou je snadná kontrola elektromagnetického stínění a snadné nalezení místa úniku vyzařování. Jejich výroba není složitá.

¹²Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.120.

¹³Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.77.



Obr. 4.16: Druhy sond pro snímání magnetického pole. [Převzato z [5]]

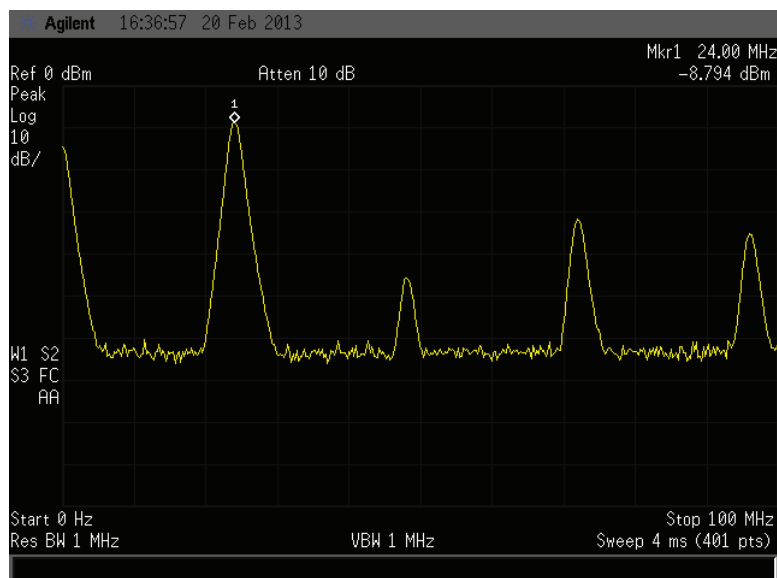
Obrázek 4.16 ukazuje různé příklady sond pro lokalizaci pole. V obrázku sonda 2a znázorňuje symetrický typ sondy s centrálním přerušením stínění tato sonda je účinná při lokalizaci pole o frekvenci cca 880MHz (při průměru 30mm). Sonda 2b ukazuje také symetrickou sondu s přerušením stínění s vyváženým anténním přizpůsobením, tato sonda je účinná pro frekvence na 1500MHz (při průměru 30mm). 2c ukazuje nesymetrický typ sondy, kde je vnitřní vodič připojený na stínění. V místě připojení vzniká kapacitní vazba (mezi stíněními). 2d ukazuje typ sondy s centrální mezerou ve stínění a s vnitřním vodičem, který je připojený ke stínění v místě centrální mezery. Sondy 2c a 2d také rezonují frekvenčně okolo 1500MHz (při průměru 30mm).¹⁴

Pro lokalizaci magnetické intenzity H se musí vytvořit smyčka o rozměrech několika centimetrů. Pokud vytvořena nebude, anténa bude snímat elektrické pole E . Měření pomocí těchto sond není nijak přesné. Záleží při něm na mnoha podmínkách se kterými nelze předem počítat, úhel natočení ke zdroji rušení, vzdálenost od zdroje rušení, rychlost přiblížení a tak dále.

Sondy pro blízká pole by měly být vyrobeny z 50Ω koaxiálních kabelů, vstupní impedance měřících přístrojů by také měla být 50Ω a sonda by také měla mít nainstalovaný vhodný konektor pro připojení na měřící přístroj.

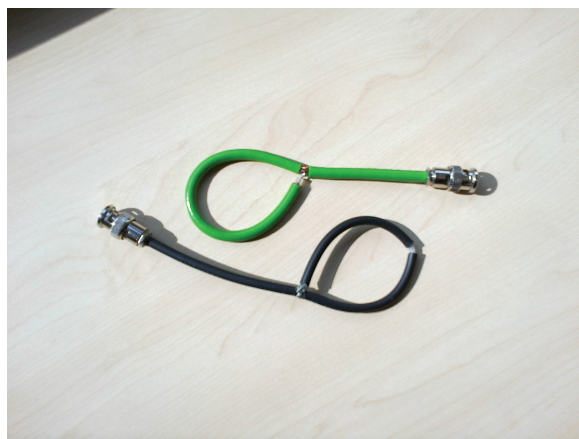
Všechny smyčky jsou směrové, takže při hledání zdroje rušení by měly být použity dva nebo i tři směry, abychom se ujistili, že nejsilnější signál byl nalezen. Velikost smyčky sondy je závislá na kmitočtu, s menším průměrem smyčky (např. 10mm) je lepší vysokofrekvenční odezva, ale objevuje se pak menší citlivost na nízkých frekvencích. Sondy s více než jednou otáčkou jsou citlivější na nižších frekvencích, ale jejich vzájemná kapacita

¹⁴Ediss R. *Probing the Magnetic Field Probe* [online], Philips Semiconductors UK, [parafráze 17.5.2013]. Dostupné z: [http://www.compliance-club.com/archive/old`archive/030718.htm](http://www.compliance-club.com/archive/old%20archive/030718.htm)



Obr. 4.17: Frekvenční spektrum smyčky o průměru 5 cm s centrálním přerušením stínění ve středu smyčky

výrazně snižuje jejich vysokofrekvenční odezvu. Většina návrhů byla zaměřena na různé typy konstrukcí a na velikosti smyček.¹⁵



Obr. 4.18: Vlastní konstrukce sond pro snímání magnetického pole

Bylo vytvořeno několik druhů smyček pro snímání magnetického pole. Jejich základní rozdíly spočívaly, kromě rozdílných průměrů smyček, hlavně v konstrukci. Odlišnosti v konstrukci jsou patrné z obrázku 4.16. V následujících tabulkách 4.5, 4.6, 4.7 je změřena frekvence generátoru a jeho útlum pomocí spektrálního analyzátoru AGILENT 4402B pro dvě sondy vlastní výroby a sondy od firmy Hewlett Packard pro srovnání.

¹⁵Armstrong, K. *EMC Testing* [online], Part 1 - Radiated Emissions, Associate of EMC-UK, [parafráze 20.4.2013]. Dostupné z: [http://www.compliance-club.com/archive/old`archive/010327.html](http://www.compliance-club.com/archive/old%27archive/010327.html)

vzdálenost od zdroje		$l = 30[mm]$	$l = 60[mm]$
harmonická	$f[MHz]$	$L[dbm]$	$L[dbm]$
f_0	24	-40	-50
f_1	48	-57	-66
f_2	72	-55	-66

Tab. 4.5: Sondy pro snímání blízkého magnetického pole HP 11941 a 11940

vzdálenost od zdroje		$l = 30[mm]$	$l = 60[mm]$
harmonická	$f[MHz]$	$L[dbm]$	$L[dbm]$
f_0	24	-8	-20
f_1	48	-41	-55
f_2	72	-33	-45

Tab. 4.6: Sonda pro snímání blízkého magnetického pole o průměru smyčky 5cm s konstrukcí podle sondy 2a z obrázku 4.16

vzdálenost od zdroje		$l = 30[mm]$	$l = 60[mm]$
harmonická	$f[MHz]$	$L[dbm]$	$L[dbm]$
f_0	24	-19	-35
f_1	48	-51	-60
f_2	72	-40	-50

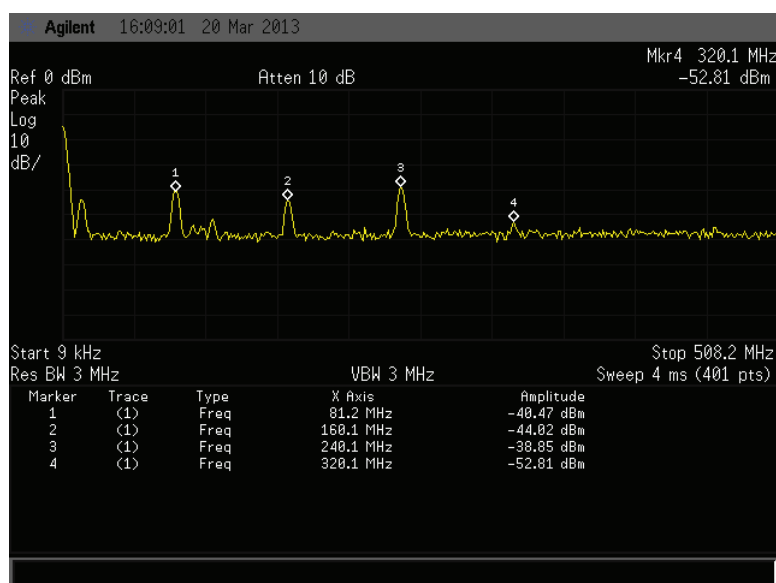
Tab. 4.7: Sonda pro snímání blízkého magnetického pole o průměru smyčky 2,5cm bez centrálního přerušování stínění

4.4.2 Měření rušení ve vzdálených polích

Veškerá anténní měření jsou závislá na místě měření, nejjednodušším způsobem je měření uskutečnit na volném prostranství. Měl by se zajistit půdorysný tvar elipsy, zkoušené zařízení a zdroj rušení jsou umístěny v ohniscích elipsy. Ohniska by měla od sebe být vzdálena $3m$, $10m$, $30m$, nebo $100m$. Vlastní měřicí stanoviště musí být na rovném terénu bez překážek (budovy, stromy, elektrická vedení, ploty...). Dále by se v místě měření neměla vyskytovat žádná jiná silná elektromagnetická pole. Eliptický tvar zajistí, že odražené vlny urazí ke zkoušenému zařízení dvojnásobnou vzdálenost, než vlny přímé.¹⁶

Způsoby testování elektromagnetických polí různými typy antén je popsáno v kapitole 2.3.

Byl vyroben generátor rušení o kmitočtu 80MHz a s následnými harmonickými kmitočty, k němuž byl připojen vodič o délce $1m$ a $20cm$, který charakterizoval klasickou prutovou monopolní anténu. Bylo změřeno vyzařování pomocí metrové prutové antény a pomocí širokopásmové logaritmicko-periodické antény na spektrálním analyzátoru AGILENT 4402B a za pomoci vysokofrekvenčního zesilovače se ziskem 13dB . V následujících tabulkách 4.8, 4.9 je měření zdokumentováno.



Obr. 4.19: Frekvenční spektrum rušivého generátoru naměřené prutovou anténou

Výhodou širokopásmové antény je její dobré přizpůsobení a velká širokopásmovost. Logaritmicko-periodická anténa má totiž frekvenční rozptyl (tabulka 2.1), který by kupříkladu antény typu Yagi nedosahovaly. Zisk v celém přijímaném pásmu je velmi vyrovnaný. Na druhou stranu má tato anténa nízkou směrovost a nižší zisk. Pro příjem analogové televize nebyla ideální volbou, protože použitím těchto antén se mohl lehce projevit odraz. Pro vysílání digitální televize DVB-T je vliv odrazů menší a tak jsou logaritmicko-periodické antény vhodnější.¹⁷

¹⁶Svačina J., *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002, s.81-83.

¹⁷DigiZone.cz [online], Antény pro digitální příjem televize, [parafráze 5.6.2013]. Dostupné z:

Vyzařovací antény bylo vybrány podle kmitočtů, které zdroj produkuje. Jeden metr dlouhá prutová anténa vyhovuje pro šíření základní harmonické podle vzorce pro vlnovou délku, kde byl zvolen poměr $\lambda/4$ pro anténu.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{80 * 10^6} = 3,75m \quad (4.6)$$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{3,75}{4} = 0,94m \quad (4.7)$$

Prutová anténa 20cm vyhovuje pro zachycení páté harmonické, podle vzorce pro vlnovou délku, kde byl zvolen poměr $\lambda/4$ pro anténu.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 * 10^8}{5 * 80 * 10^6} = 0,75m \quad (4.8)$$

$$\frac{\lambda}{4} = \frac{0,75}{4} = 0,19m \quad (4.9)$$

anténa zdroje rušení		$l = 20[cm]$	$l = 1[m]$
harmonická	$f[Mhz]$	$L[dbm]$	$L[dbm]$
f_0	80	-54	-40
f_1	160	–	-42
f_2	240	-49	-47
f_3	320	–	-48
f_4	400	-46	-46
f_5	480	-34	-34
f_6	560	-42	-41

Tab. 4.8: Změření spektra zdroje rušení pomocí širokopásmové logaritmicko-periodické antény LP45F

anténa zdroje rušení		$l = 20[cm]$	$l = 1[m]$
harmonická	$f[Mhz]$	$L[dbm]$	$L[dbm]$
f_0	80	-26	-15
f_1	160	-35	–
f_2	240	-38	-25
f_3	320	-43	–
f_4	400	-32	-35
f_5	480	-50	-48
f_6	560	–	–

Tab. 4.9: Změření spektra zdroje rušení pomocí metrové prutové antény



Obr. 4.20: Širokopásmová logaritmicke-periodická televizní anténa LP45F

5

Závěr

Bakalářská práce měla za úkol ověřit možnost nalezení elektromagnetické kompatibility jednoduššími informačními metodami.

Práce se v první části zabývá normami pro oblast vyzařování a odolnost elektronických zařízení. Dále se zabývá možností nahrazení těchto testů jednoduššími informačními metodami. V poslední části jsou některé postupy realizovány a ověřeny možnosti jejich využití.

Byl uveden přehled běžně používaných měřicích metod zjišťování EMC, včetně rozboru problematiky, diagnostiky, testování a měření parametrů v oblasti vyzařování a odolnosti elektronických zařízení.

Výsledky realizace jednoduchých testů EMC lze shrnout do následujících poznatků.

Zkouška ESD – Z měření vyplývá, že velikost amplitudy alternativního elektrostatického výboje, vygenerovaného běžným elektrickým zapalovačem plynu, je dostačující pro dosažení normovaného ESD výboje. Amplituda dosahuje hodnot 8 až 11kV. Časové průběhy se však oproti od normovaného průběhu rozcházejí. Impuls, má mít šířku 60ns, impulsy alternativních generátorů se rozcházejí až o dva řády. V případě zapalovače s měničem se jednalo o šířky impulsů jednotky μs , u piezozapalovače až o jednotky ms. Jedná se tedy o energeticky obsažnější impulsy a lze předpokládat, že bude docházet k intenzivnějšímu rušení. Z výsledků testování alternativních rušivých ESD generátorů na měřicích multimetrech je patrné veliké ovlivnění všech přístrojů při zkoušce kontaktním výbojem přímo na svorky měřicího přístroje, kde rušení způsobovalo větší zobrazovanou hodnotu, než bylo skutečné měřené napětí. Výjimku představoval dražší a kvalitnější přístroj M-3860D, který jevil jen malé odchylky od snímané hodnoty.

Zkouška skupin širokopásmových nízkoenergetických impulsů – Z naměřených časových průběhů stejnosměrných relé zapojených do podoby alternativních generátorů je patrné, že stejnosměrné relé je vhodné pro generování skupin impulsů do velikosti amplitudy 600V. Z měřených časových průběhů jednotlivých impulsů ve skupině vyplývá, že signál nesplňuje parametry požadované na normovaný časový

průběh zkoušky. Liší se jak ve strmosti náběhu pulsu od $400ns$ místo požadovaných $5ns$, tak v šířce shluku impulzů od $30\mu s$, místo požadovaných $15ms$. Z výsledků testování alternativních generátorů na měřicích multimetrech a po porovnání s měřením využívající normovaný generátor EFT 500 je patrné, že alternativní generátory dokázaly poskytovat stejné velikosti intenzit rušení na měřicích přístrojích jako normovaný generátor do napěťové úrovně odpovídající $1000V$, tedy hodnotě pro průmyslové prostředí.

Zkouška odolnosti vůči magnetickým polím síťového kmitočtu – Z naměřených hodnot vyplývá, že pomocí transformátorové pájky a připojené jednozávitové cívky o velikosti $1m$ vyrobené z hliníkového nebo měděného vodiče s průřezem přibližně $30mm^2$ bylo dosaženo rušení, které odpovídá těžkému průmyslovému prostředí, podle normy ČSN EN 61000-4-8. Ve středu cívky bylo dosaženo intenzit až $230A/m$ při procházejícím proudu $103A$.

Konstrukce sond pro snímání blízkého magnetického pole – Analýzou měřicích metod pro lokalizaci magnetického pole a možností praktické realizace byly provedeny návrhy a konstrukce jednoduchých snímacích sond z koaxiálních vodičů. Ty byly dále použity pro lokalizaci generovaného rušivého magnetického pole o známém kmitočtu. Z výsledků provedených měření magnetického pole je patrné, že získané hodnoty jsou závislé na konstrukci sondy, především pak na navržené velikosti smyčky, centrálního přerušování či symetrického vyvážení, přičemž hodnota je dále závislá na orientaci smyčky v prostoru a vzdálenostech od objektu. Přesto je možné dosáhnout dobré lokalizace zdroje rušení a posoudit relativní velikost intenzity rušivého magnetického pole.

Lokalizace vzdáleného rušivého pole – Pro lokalizaci vzdáleného zdroje rušení bylo vyzkoušeno několik měřicích antén. Jednak širokopásmová anténa používaná pro příjem televizního signálu. Tato anténa byla určena pro kmitočty v rozsahu $470MHz$ - $900MHz$. Vzhledem ke generovanému kmitočtu $80MHz$. Byl takto lokalizován vysoký počet harmonických kmitočtů, ale s nízkou úrovní. Naproti tomu prutová anténa, byla vhodná pro měření základní harmonické, pro niž byla navržena její délka. Logicky tedy délka antény má přímý vliv na velikost snímaného signálu.

Stanovené cíle bakalářské práce byly splněny, podařilo se dosáhnout stanovených cílů, které jsou uvedeny v zadání, s výsledky je možné konstatovat, že jednodušší informační metody zjišťování EMC, které byly navrženy a prakticky zrealizovány jsou využitelné pro informativní testování EMC u elektronických zařízení.

Literatura

- [1] Svačina Jiří, *Elektromagnetická kompatibilita*, Brno 2002.
- [2] Svačina Jiří, *Základy elektromagnetické kompatibility*, Brno 2005.
- [3] ČSN EN 61000-4, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [4] ČSN EN 55 000, *Elektromagnetická kompatibilita (EMC)*, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [5] Ediss Roy, *Probing the Magnetic Field Probe* [online], Philips Semiconductors UK, [17.5.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old'archive/030718.htm>
- [6] Armstrong, Keith, *EMC Testing* [online], Part 1 - Radiated Emissions, Associate of EMC-UK, [20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old'archive/010327.html>
- [7] Armstrong, Keith, *EMC Testing* [online], Part 3 – Fast Transient Burst, Surge, Electrostatic Discharge, Associate of EMC-UK, [22.4.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old'archive/010619.htm>
- [8] Armstrong, Keith, *EMC Testing* [online], Part 6 – Low-frequency magnetic fields (emissions and immunity), Associate of EMC-UK, [8.5.2013]. Dostupné z: <http://www.compliance-club.com/archive/old'archive/020122.htm>
- [9] Dřínovský Jiří, Frýza Tomáš, Svačina Jiří, Kejík Zdeněk, Růžek Václav *Encyklopedie EMC*, Ústav radioelektroniky, FRVŠ, [20.3.2013]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=home>
- [10] *Sbírka řešených úloh z fyziky* [online], katedra didaktiky fyziky Matematicko-fyzikální fakulty UK., [29.3.2013]. Dostupné z: <http://fyzikalniulohy.cz/uloha.php?uloha=395>
- [11] *Elektrina a magnetismus* [online], VŠB-TU Ostrava [29.3.2013]. Dostupné z: <http://imhfyzikafbi.wz.cz/prednaskyIFpdf/mgpole.pdf>

- [12] Drexler Petr, *Elektronická část měřicí sondy magnetického pole s požadovanými parametry* [online], Diplomová práce, Brno 2004, [29.3.2013] Dostupné z: <http://www.ieee.cz/mtt/soutez04/prace/DP'petr'drexler.pdf>
- [13] *DigiZone.cz* [online], Antény pro digitální příjem televize, [5.6.2013]. Dostupné z: <http://www.digizone.cz/specialy/anteny/logaritmicko-periodicke-anteny/>