

Testování odolnosti elektrického zařízení vůči impulzu elektromagnetického pole

Bc. Zdeněk Koryťák

Diplomová práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Koryták**
Osobní číslo: **A12275**
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Testování odolnosti elektrického zařízení vůči impulzu elektromagnetického pole**

Téma anglicky: **Testing the Electromagnetic Susceptibility of Electrical Appliances**

Zásady pro vypracování:

1. Nastudujte si problematiku elektromagnetické susceptibility včetně současně platných norem.
2. Zpracujte literární rešerši.
3. Připravte pracoviště pro testování elektromagnetické susceptibility na měření na modulech pro injektáž napájecího napětí do zařízení napájených metodou Power over Ethernet.
4. Provedte měření na několika vzorcích.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **PAUL, Clayton R.** Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, c2006, xxi, 983 s. ISBN 0471755001.
2. **SVAČINA, J.** Elektromagnetická kompatibilita, 2001. VUT Brno. ISBN 80-21418737.
3. **VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK.** Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vf rušení. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 8071695688.
4. **KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH.** EMC z hlediska teorie a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
5. **ČSN EN 61000-4-3 ed. 3** Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti. Praha: Český normalizační institut, 2006, 51 s.
6. **ČSN EN 61 000-4-4.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-4: Zkušební a měřicí technika – Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů – Zkouška odolnosti. Praha: Český normalizační institut: [s.n.], 1.5.2005.
7. **ČSN EN 61 000-4-5.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impulz – Zkouška odolnosti. Praha: Český normalizační institut: [s.n.], 1.7.2007.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Martin Pospíšilík

Ústav počítačových a komunikačních systémů

Datum zadání diplomové práce:

7. února 2014

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2014

Ve Zlíně dne 7. února 2014


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Teoretická část této diplomové práce se zabývá testováním elektromagnetické odolnosti speciálně zaměřenou na odolnost vůči elektrostatickému výboji. Jsou zde také zastoupeny normy zastřešující oblast elektromagnetické kompatibility. Práce dále přechází na problematiku antén a měření jejich vyzařování. Praktická část představuje samotné testování vybraného modulu, a to zkouškou na elektrostatický výboj, poté následuje předvedení výsledků měření zacílené na vyzařování daného modulu.

Klíčová slova: ESD, elektromagnetická kompatibility, elektromagnetická odolnost, RFID,

ABSTRACT

The theoretical part of this thesis deals with testing of electromagnetic resistance, specially focused on the resistance to electrostatic discharge. There are also represented norms regarding the area of electromagnetic compatibility. Afterwards, the work concerns issues of antennas and measurement of their radiation. The practical part introduces testing of a chosen module through test on electrostatic discharge followed by presentation of measurement results aimed at radiation of the given module.

Keywords: ESD, Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Susceptibility, RFID

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Pospíšilíkovi za vedení, odbornou pomoc a poskytnutí potřebných informací při tvoření mé diplomové práce. Také bych také rád poděkovat své rodině za podporu při studiu na vysoké škole.

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	8
I TEORETICKÁ ČÁST	9
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	10
1.1 ZÁKLADNÍ ČLENĚNÍ EMC	11
1.2 TERMINOLOGIE A ZÁKLADY EMC.....	12
1.3 SYSTÉMOVÉ DĚLENÍ EMC	15
1.3.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů	15
1.3.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů	16
2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A ZDROJE	18
2.1 LOKÁLNÍ ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	20
2.1.1 Aplikace ochrany ESD	24
2.1.2 Strategie ochrany ESD	25
2.1.3 Bezpečný prostor EPA	26
2.1.4 Typy poškození vlivem ESD	28
2.1.5 Testovací modely ESD	30
3 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST A JEJÍ TESTOVÁNÍ	35
3.1 KRITÉRIA EMS	36
3.2 OBECNÁ METODIKA ZKOUŠEK EMS.....	37
3.3 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ – ZKOUŠKA ODOLNOSTI	40
4 ANTÉNY A VLASTNOSTI EM POLE	44
4.1 ANTÉNY.....	44
4.1.1 Vlastnosti antén	45
II PRAKTICKÁ ČÁST	47
5 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI	48
5.1 TESTOVANÉ ZAŘÍZENÍ	48
6 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PRO ESD	50
6.1 PŘÍPRAVA PRACOVÍŠTĚ	50
6.2 ZKUŠEBNÍ GENERÁTOR	52
6.3 POSTUP ZKOUŠKY	52
6.4 VYHODNOCENÍ ZKOUŠKY ODOLNOSTI.....	53
7 INTENZITA POLE RFID ANTÉNY	56
7.1 MĚŘÍCÍ SESTAVA.....	56
7.2 POSTUP MĚŘENÍ.....	57
7.3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	58
ZÁVĚR	60
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	64
SEZNAM OBRÁZKŮ	65
SEZNAM TABULEK	66

ÚVOD

Problematika ochrany proti účinkům elektrostatického výboje a testování zařízení proti jeho vlivům je v dnešní době velmi žádoucí. Ačkoli elektrostatický výboj v povědomí výrazně vzrostl až v posledních letech, problém existuje již dlouhou řadu let. Účinky ESD byly poprvé zaznamenány ve vojenských aplikacích, kde by jeho účinky mohly mít devastující následky pro munici, a to zejména u střelného prachu. Později, kolem roku 1800, byly nuceny papírny instalovat základní uzemňovací systémy, a to z důvodu několika neštěstí, kdy se vlivem elektrostatického výboje vznítily prach z papíru. Využívaly také páry pro snížení účinků statické elektřiny.[6]

Ačkoli jsou znalosti o problematice ESD stále dokonalejší, současné trendy v mnoha průmyslových odvětvích vyvíjí tlak na vývoj stále sofistikovanějších a kompaktnějších zařízení a systémů. Z těchto důvodů vzniká celá řada součástek se zvýšenou citlivostí na výboj statické elektřiny, před kterou je nutné tyto produkty chránit.

Cílem této diplomové práce je zpracovat literární rešerši v oblasti elektromagnetické kompatibility zejména pak částí zabývajících se elektromagnetickou odolností. Tato část se bude zaměřovat na zkoušky odolnosti proti účinkům elektrostatického výboje. Bude zde nastíněna jak metodika zkoušení dle současně platných norem, tak samotný popis vzniku ESD a možnosti ochrany proti jeho vlivům. Zmíněna bude také pasáž o anténách a jejich vlastnostech. Součástí praktické části této práce bude provedení testu na elektromagnetickou odolnost pro ESD dle normy a požadavků zadavatele. Bude zde také popsáno měření pro stanovení intenzity elektromagnetického pole.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

Definice:

Schopnost zařízení, nebo systému fungovat vhodným způsobem tak, že ve svém elektromagnetickém prostředí dokáže správně pracovat a samo nevytváří nepřijatelné elektromagnetické rušení, které by negativně ovlivňovalo cokoli nacházející se v tomto prostředí.

Na pojem elektromagnetická kompatibilita se lze dívat ve dvou úhlech. Buďto jako vědní obor, nebo jako vlastnost systému.

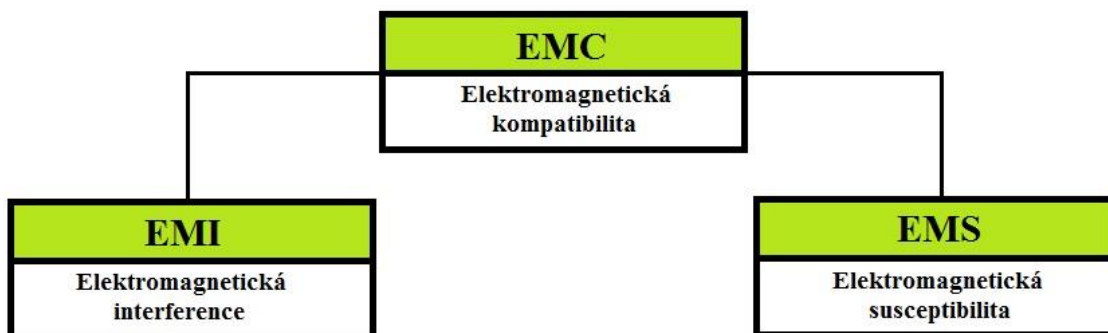
Bereme-li EMC jakožto vědecko-technickou disciplínu, její historie sahá do šedesátých let 20. století v USA. Následujících 10 až 15 let od tohoto období se rozvíjela jen v úzkém okruhu odborníků na tuto problematiku, a to především v oblasti vojenského a kosmického průmyslu. Až s rozsáhlým rozvojem komunikační a mikroprocesorové techniky zejména v sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století vzrostl zájem o problematiku EMC také do širšího okruhu veřejnosti. Postupně se tak EMC stalo součástí všech oblastí civilního života. Jakožto vědní obor nabývá celosvětového měřítka, neboť stále roste počet a hustota elektronických zařízení, nebo systémů a může tak docházet ke stále častěji k narušení jejich činností, nebo vzájemnému ovlivňování. Zabývá se otázkou nežádoucího ovlivňování funkčnosti biologických a technických systémů při působení elektromagnetického pole. [1], [2]

Jako vlastnost zařízení, nebo systému vyjadřuje pojem EMC z anglického „Electromagnetic Compatibility“ schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení, nebo systémů nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí bez závažného vzájemného ovlivňování jejich normálních funkcí. Z definice tedy vyplývá, že jde o schopnost dvou a více systémů společně pracovat v jednom elektromagnetickém prostředí bez toho, aby se vzájemně negativně ovlivňovaly. [2]

"Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý. Bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností".

H. M. Schlike 1968, zakladatel EMC jako vědního oboru

1.1 Základní členění EMC



Obr. 1 Základní členění EMC[2], upravil Koryťák 2014

Elektromagnetická interference nebo také elektromagnetické rušení je proces, vyznačující se tím, že se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do zasaženého systému. Porucha může přerušit, překážet, jinak zhoršit nebo omezit efektivní výkon zařízení. Tyto účinky mohou být v rozsahu například od zhoršení televizního signálu u televizního přijímače až k úplné ztrátě cenných dat v paměťovém uložení. Zdrojem rušení může být jakýkoliv objekt, přirozený nebo vytvořený člověkem. Příkladem mohou být elektrické obvody, Slunce, polární záře aj. [2]

EMI také může být záměrně použita pro rušení radiového signálu, tedy jako určitá forma elektronické zbraně nebo může dojít k neúmyslnému rušení v důsledku rušivých emisí. Kupříkladu ovlivnění AM radiových vln v městských oblastech, může také docházet k ovlivnění mobilních telefonů, FM radiových vln nebo televizního příjmu, ale to dochází v daleko menší míře. EMI je proto zaměřena především na identifikaci zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů a identifikaci parazitních přenosových cest. Elektromagnetické kompatibility celého systému je dosaženo pomocí technických opatření, zejména na straně zdrojů rušení a omezení jejich přenosových tras. EMI se tak týká především způsobu narušení a jeho odstranění. [1], [2]

Elektromagnetická susceptibilita také lze označovat jako elektromagnetická odolnost či vlastnost do jaké míry je ovlivňovaný objekt citlivý na účinky elektromagnetického rušení. Vyjadřuje tedy schopnost zařízení či systému správně a bez

poruch pracovat v elektromagnetickém prostředí, nebo v přesně definované míře intenzity rušení, které nesmí mít vliv na jeho správnou funkci. EMS se tedy zabývá otázkou jak pomocí technických prostředků dosáhnout dostatečného z odolnění k bezporuchovému fungování proti rušivým signálům. Obecně se snaží odstraňovat důsledky rušení než hledat jejich příčiny a zdroje. [2], [3]

1.2 Terminologie a základy EMC

Elektromagnetická kompatibilita – (Electromagnetic Compatibility) - (EMC)

Schopnost zařízení nebo systému pracovat uspokojivě ve svém elektromagnetickém prostředí, aniž by byly zdrojem nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoli v tomto prostředí. [7]

Elektromagnetické rušení – (Electromagnetic Disturbance)

Jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršovat funkci přístroje, zařízení nebo systému, nebo nepříznivě ovlivňovat živou nebo neživou hmotu. [7]

Elektromagnetická interference – (Electromagnetic Interference) - (EMI)

Zhoršení činnosti zařízení, přenosového kanálu nebo systému způsobené elektromagnetickým rušením. [7]

Elektromagnetická susceptibilita – (Electromagnetic Susceptibility) - (EMS)

Nebo také odolnost proti rušení schopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení. [7]

Úroveň časově proměnné veličiny – (Level of a Time Varying Quantity)

Úroveň veličiny, například výkonu nebo intenzity pole, měřená a/nebo hodnocená předepsaným způsobem za určitý čas. [7]

Úroveň vyzařování – (Emission Level)

Úroveň elektromagnetického rušení vyzařovaného konkrétním přístrojem, zařízením nebo systémem. [7]

Mez vyzařování – (Emission limit)

Předepsaná maximální úroveň vyzařování zdroje elektromagnetického rušení. [7]

Úroveň odolnosti – (Immunity Level)

Maximální úroveň elektromagnetického rušení působícího na konkrétní přístroj, zařízení nebo systém, při kterém se zachovává požadovaná kvalita provozu. [7]

Mez odolnosti – (Immunity Limit)

Nejnižší předepsaná úroveň odolnosti. [7]

Elektromagnetická kompatibilní úroveň – (Electromagnetic Compatibility Level)

Předepsaná maximální úroveň elektromagnetického rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje, zařízení, nebo systémy provozované v konkrétních podmínkách. [7]

Rezerva ve vyzařování – (Emission Margin)

Rozdíl mezi elektromagnetickou kompatibilní úrovní a mezí vyzařování zdroje rušení. [7]

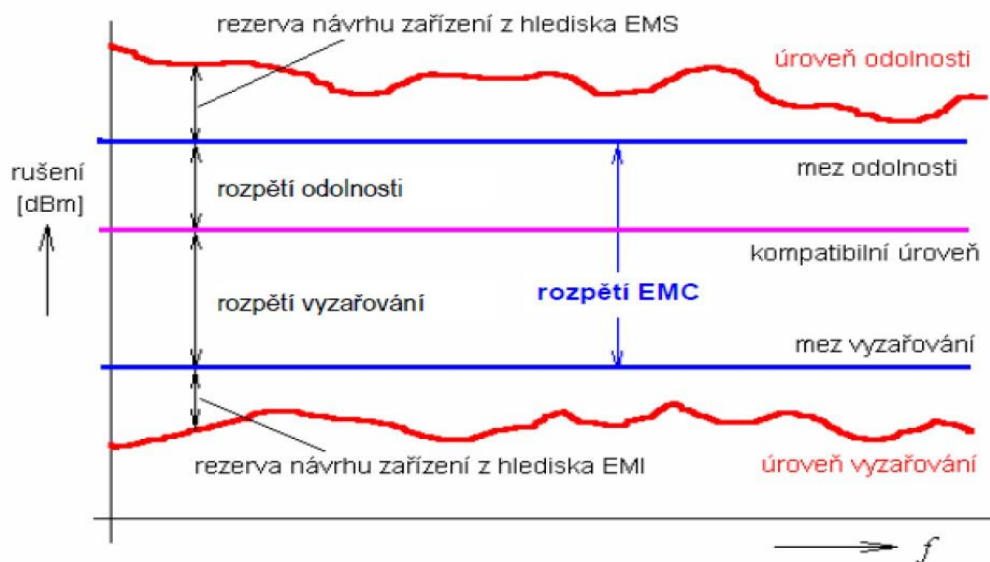
Rezerva odolnosti – (Immunity Margin)

Rozdíl mezi mezní odolností přístroje, zařízení, nebo systému a kompatibilní úrovní. [7]

Rezerva elektromagnetické kompatibility - (Electromagnetic Compatibility Margin)

Rozdíl mezi úrovní odolnosti přístroje, zařízení nebo systému a mezí vyzařování zdroje rušení. [7]

Obecně lze tvrdit, že jakékoli elektronické zařízení je jak zdrojem elektromagnetického rušení tak zároveň i jeho přijímačem, pracujícím v určitém elektromagnetickém prostředí. Tyto zařízení se také mohou stát zdrojem elektromagnetického rušení, které obvykle nelze odstranit nebo omezit. Všeobecná norma IEC-IEC 1000-1-1 popisuje a interpretuje termíny zásadně významné pro koncipování a praktické použití při navrhování a vyhodnocování elektromagneticky kompatibilních systémů. Na Obr.2: Mez vyzařování a odolnosti budou vysvětleny základní vztahy a vazby mezi vybranými základními pojmy. [2]



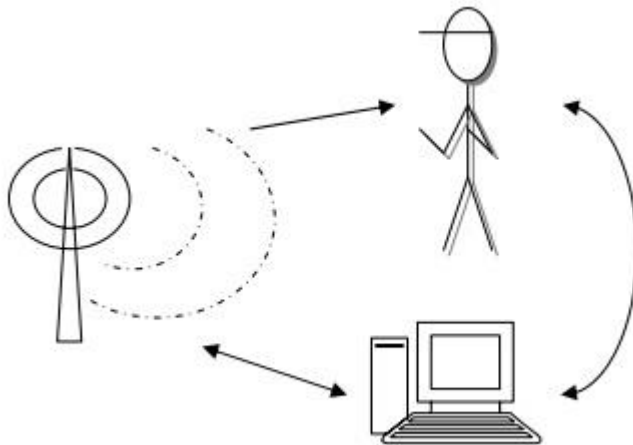
Obr. 2 Mez vyzařování a odolnosti [2]

Úroveň elektromagnetické odolnosti označuje nejvyšší možný stupeň elektromagnetické interference působící na zařízení, který nemá vliv na jeho provoz. Nejnižší hranice pro mez odolnosti je normou požadovaná odolnost zařízení. Rezerva návrhu zařízení z hlediska EMS udává právě rozdíl mezi úrovní elektromagnetické odolnosti a mezí odolnosti. Úroveň vyzařování udává míru rušení vydávané samotným zařízením, měřené předepsaným způsobem a vyjádřené v [dB/m] v závislosti na frekvenci. Mez vyzařování je maximální normou přípustná úroveň vyzařování u konkrétního zařízení. Je-li vyjádřen rozdíl těchto dvou výše zmíněných úrovní dostáváme tzv. rezervu návrhu zařízení z hlediska EMI. Dále je zaveden pojem rezerva EMC, který jak je patrné i z obrázku, určuje rozdíl mezi maximální hranicí určující mez odolnosti a hranicí pro mez vyzařování. V normě je také zakotven pojem kompatibilní úroveň což lze chápat jako maximální předepsanou úroveň celkového rušení, u kterého se předpokládá, že za určitých podmínek bude ovlivňovat zařízení či přístroje. Rozdíl mezi zmíněnou kompatibilní úrovní a mezemi pro odolnost a vyzařování dostáváme pojem rezerva odolnosti, nebo rezerva vyzařování. [7]

Z obrázku lze vydedukovat, že pokud chceme zajistit, aby zkoušené zařízení vyhovělo požadavkům EMC, musí být úroveň jeho odolnosti a zároveň úroveň vyzařování vždy pod hranicí maximální předepsané úrovně. Také vyplívá nutnost zajistit, aby mez odolnosti byla vyšší než mez vyzařování, a to z důvodu dosažení přijatelně velkého rozpětí pro EMC zařízení. Limitní určení velikosti rezerv u návrhu zařízení z hlediska EMI a EMS nejsou přesně stanoveny, záleží tak pouze na výrobci jak velké rezervy zvolí. Navrhne-li však výrobce příliš velké rezervy projeví se to na nákladech na výrobu a finální ceně produktu. V opačném případě, tzn. jsou-li stanoveny limity příliš nízko, vzrůstá tím riziko, že zařízení nevyhoví zkouškám EMC a bude muset být dodatečně odrušováno a tím by se náklady mohli zvýšit mnohem více. [2],[7]

1.3 Systémové dělení EMC

EMC problematiku lze členit podle mnoha různých kritérií. Obecně ho je možné rozdělit z pohledu vnímaného jako systém. Dle tohoto hlediska rozlišujeme EMC biologických systémů a EMC technických systémů a zařízení.



Obr. 3 Působení elektromagnetického pole [13]

1.3.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Zabývá se celkově elektromagnetickým prostředím vyskytujícím se v dnešní době téměř všude kolem nás. Zkoumá přípustné úrovně rušivých i užitečných elektromagnetických signálů s ohledem na jejich vlivy na živé organismy. Může se jednat o přímé působení na tkáň a nervovou soustavu, a také v případě překročení přípustných hranic může dojít

i k poškození zdraví. Každý živý organismus včetně člověka reaguje na působení elektromagnetického pole jinak. Jednou z mnoha příčin může být individuální schopnosti přizpůsobit se těmto vlivům, nebo také individuální schopnost regenerace. Proto je velmi obtížné analyzovat změny v organismu a na jejich základě určit obecné závěry jak elektromagnetické pole na člověka a celkově na živé organismy působí. Z tohoto důvodu v dnešní době neexistuje mnoho studií a expertíz, které by mohly přesně určit vliv elektromagnetického pole na biologické systémy. V současnosti se výzkum zaměřuje zejména na lidi, kteří se vystavují tomuto prostředí vlivem pracovního procesu. Zkoumá se zde dlouhodobý vliv a maximální doba expozice přípustná pro člověka. Za nežádoucí vlivy na člověka lze dnes považovat nejen přímé působení elektromagnetického pole na jeho pracovišti, jako jsou obsluha vysílačů, radiolokátorů, výpočetních středisek a podobně, ale i samotné užívání běžných elektronických zařízení a spotřebičů a dlouhodobé pobývání zejména v obytných prostorech, kde většina lidí tráví hodiny svého času ve společnosti televizních a rozhlasových přijímačů, kuchyňských spotřebičů, osobních počítačů a podobně. Navíc v takových prostorách na nás působí elektromagnetické pole z různých bezdrátových komunikačních sítí příkladem může být Wi-Fi, telefonní síť GSM a jiné. Tato práce se dále bude zabývat pouze elektromagnetickou kompatibilitou zaměřenou na technice systémy. [2],[13]

1.3.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Toto odvětví se zabývá otázkou vzájemného působení a koexistenci technických prostředků především elektronických a elektrotechnických zařízení a přístrojů.

Pro zkoumání EMC u daného systému či zařízení lze vycházet z tzv. základního řetězce EMC, který je uveden na obrázku 1.1. Tento řetězec zdůrazňuje již zmíněný systémový charakter EMC a v obecném případě vždy vyšetřujeme všechny tři jeho složky.



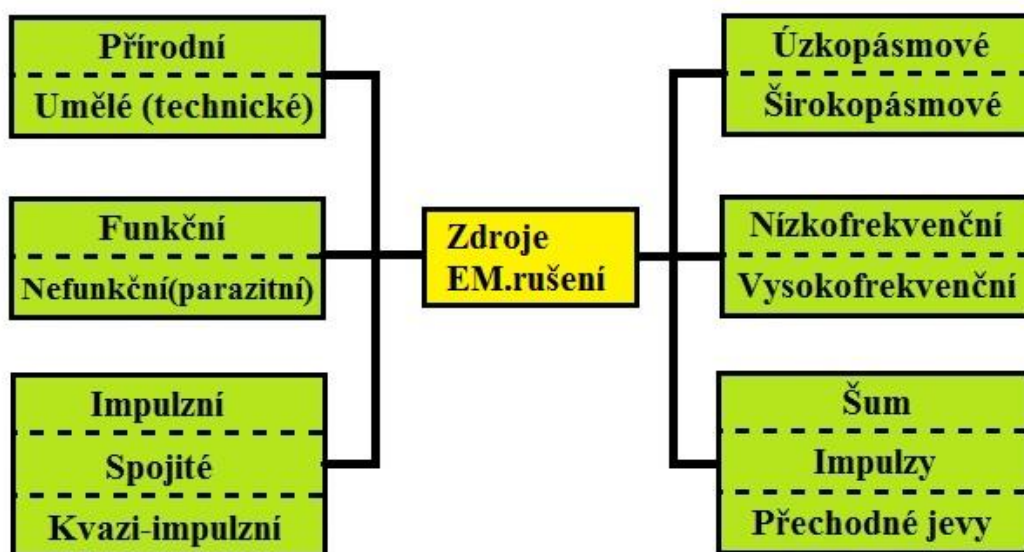
Obr. 4 Řetězec EMC [2], upravil Korytář

První buňka zmíněného obrázku představuje zdroje elektromagnetického rušení. Ta v sobě zahrnuje původ rušení, jeho charakter a míru intenzity. Rušivými signály a jejich zdroji se práce podrobněji zabývá v kapitole 2 Rušivé signály a jejich zdroje. Druhá buňka představuje elektromagnetické vazby a přenosové cesty. To znamená způsob, jakým se energie ze zdroje rušení dostává k rušenému objektu. Poslední třetí oblastí je objekt nebo zařízení vystavené rušení. Zde se problematika zaměřuje jakými způsoby z hlediska technických a konstrukčních parametrů je zařízení ovlivňováno. Oblast tedy vyšetřuje elektromagnetickou odolnost.

Základní řetězec EMC představuje výchozí bod ke správnému určení elektromagnetické kompatibility systému ať už to zjištěním zdroje rušení určením přenosových cest a vazeb rušení, anebo zvolení vhodné ochrany proti rušení koncového, tedy rušeného zařízení či objektu. Výběr úpravy nevhodnější oblasti z tohoto řetězce umožňuje dosáhnout nevyššího efektu EMC. Zde je zapotřebí vzít v potaz, zda rušivé signály jsou zároveň funkčními signály (signál TV vysílače), nebo jsou to parazitní produkty signálu (jiskření na kontaktech). Na základě takovýchto zjištění je pak možné vhodnými prostředky minimalizovat tyto rušivé vlivy, a to omezením zdroje rušení, z odolněním rušeného objektu, nebo zaměřením se na přenosové cesty a vazby.

2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A ZDROJE

Zdrojem elektromagnetického rušení rozumíme takové zařízení nebo přírodní jev, u kterého se předpokládá generování či produkce rušivých signálů v mnohem vyšší míře než je jejich samotný příjem nežádoucích signálů. Klasifikaci i zdroje rušení lze určit mnoha způsoby na Obr. 5 Zdroje EM. Rušení je znázorněno několik skupin a zdrojů rušení.



Obr. 5 Zdroje EM. rušení [2], upravil Korytář

Přírodním, nebo také přirozeným zdrojům rušivých signálů téměř nelze zabránit. Jsou součástí běžného prostředí a v ochraně proti nim lze pouze odstraňovat příčiny vzniklé působením těchto zdrojů. Do této skupiny patří například Slunce, blesky nebo různé elektrické procesy v atmosféře, aj.

Umělé zdroje elektromagnetického rušení jsou způsobeny technickou činností člověka. Jsou tedy ovlivnitelné a lze upravovat a omezovat jejich působení. Patří zde například nejrůznější elektrotechnické a elektronické zařízení a přístroje aj.

Funkční signály jsou takové, které jsou podstatou dané funkce zařízení, avšak pro ostatní zařízení mohou být rušivé. Jinými slovy nepříznivě ovlivňují činnost jiného systému. Tyto signály však nelze odstranit a jsou to například TV signál AM vlny aj.

Nefunkční nebo-li parazitní signály jsou vedlejším produktem při provozu zařízení a jsou nežádoucí.

Další rozdělení je dle časového průběhu rušivého signálu. To může být impulzní, spojitý nebo kvazi-impulzní. Impulzním signálem se rozumí takový signál, kdy přichází v určité časové posloupnosti je tedy přerušovaný a nestálý. Může se také jednat o přechodové jevy v čase. Spojitými signály jsou takové, které působí neustále a nejedná se o sekvenci oddělených jevů. Posledním z trojice je kvazi-impulzní rušení. Zde se jedná o kombinaci dvou předešlých signálů, a to impulzního a spojitého rušení.

Umělé rušivé signály se velmi často dělí do následujících tří skupin. První z nich jsou šумы. Jde o takový rušivý signál, který ovlivňuje tvar užitečného signálu a ve většině případů má periodický charakter. Druhou skupinou jsou impulzy. Charakter rušení zde spočívá v impulzech, které se po určitou dobu trvání projevují ve velkém poměru vzhledem k jejich velikosti, a také způsobují v užitečném signálu takzvané kladné a záporné špičky. Vyskytují se především u kontaktního spínání velkých elektrických nebo energetických soustav, při úderu blesku, elektrostatickém výboji a jiné. Třetí skupinou jsou přechodné jevy, u nichž je jejich výskyt čistě náhodný a jednorázový. Doba trvání se může pohybovat od několika milisekund až do jednotek sekund. Vznikají při náhlých změnách zatížení energetické sítě především při zapínání a vypínání spotřebičů s velkým výkonem.

Mezi další dělení rušivých signálů patří úzkopásmové rušení. Zde se nejčastěji jedná o užitečné signály, jako je rozhlas nebo TV. Následuje rušení širokopásmové, do kterého řadíme většinu průmyslových zdrojů rušení.

Posledním zmíněným rozdělením je nízkofrekvenční a vysokofrekvenční rušení. Kde nízkofrekvenční rušení se projevuje dvojím způsobem:

- Energetické nízkofrekvenční rušení působící na napájení zařízení, což může mít za následek ovlivnění jeho funkce. Jedná se o frekvence od 0 do 2 kHz.
- Akustické nízkofrekvenční rušení má nepříznivý vliv na přenosové informační systémy jako jsou telefony či rozhlas. Jejich kmitočet je do 10 kHz.

Vysokofrekvenční rušení obsahuje většinu zdrojů rušení. Protože se vyskytují v rozsahu od 10 kHz do 400 GHz a sem zasahuje právě téměř každé rušení. [2],[8]

2.1 Lokální elektrostatický výboj

Statická elektřina je přírodní jev, který se vyskytuje jako součást každodenního života. Jeho účinky lze často cítit, při doteku kovové rukojeti dveří, potom co jsme prošli přes koberec z umělých vláken. Další účinek může být vidět při česání vlasů, když se vlivem tření postaví. Obzvláště působivá forma elektrostatického výboje je blesk. Zde stupnice hodnot napětí, proudu a energie je o mnoho řádů vyšší než u běžného přeskocení jiskry při kontaktu s kovovou klikou dveří. [6]

Tyto výboje se buďto uvolní okamžitě, nebo mohou probíhat velmi pomalu. V našem prostředí je spousta látek a materiálů vykazující vysokou odolnost proti výboji, a tak se může stát, že náboj se bude hromadit pomalu, dokud nenajde „správnou cestu“ k vyrovnání potenciálu. Obecně tedy, i když se určitá míra náboje nahromadí, nemusí vždy dojít k spontánnímu výboji. [10]

Lokální elektrostatický výboj z anglického „Electrostatic Discharge“ zkratka ESD. Vzniká při akumulování elektrostatického napětí mezi objektem a jeho blízkým okolím. Dochází k přebytku elektronů na jednom povrchu, oproti nedostatku na straně druhé. Povrch s přebytkem elektronů se nabíjí záporným potenciálem, zatímco plocha s deficitem elektronů je nabitá kladně. Poté dochází ke spontánnímu výboji v podobě impulzu elektrického proudu. Za velmi malý čas přeskóčí elektrický výboj a vzniká tak vysoké napětí a velký proud. Pokud se v blízkosti nachází nějaké citlivější zařízení například integrovaný obvod, může ho tento elektrostatický výboj zcela zničit. [9]

ESD patří z hlediska rušení jak k přírodním, tak k umělým zdrojům přepětí. Je to z důvodu příčiny vzniku ESD, která může být následující:

- elektrostatický výboj mezi nabitým obvodem a uzemněným zařízením. Dochází k němu při strojové manipulaci s integrovanými obvody, při dotyku testovacím nástrojem apod.
- elektrostatický výboj mezi nabitým předmětem což může být například lidské tělo a uzemněným obvodem. V praxi se jedná o manipulaci člověka s elektrickým zařízením

Způsob, jakým elektrostatický výboj probíhá, závisí na velkém počtu proměnných. Většinu z nich je obtížné identifikovat. Obecně však platí, že ke vzniku umělého ESD může

docházet v těch případech, kde dochází ke tření tedy ke třecímu pohybu. Objevit se může v případech, kdy dochází ke třecímu pohybu mechanických částí:

- kovových,
- pevného dielektrika,
- kapalných,
- plynných.

I když se vyprodukovaná energie lokálních výbojů pohybuje jen v řádech jednotek mJ, napěťová úroveň může dosahovat až desítek kV, což je velmi nebezpečné pro většinu elektronických prvků a zařízení. Nejčastěji dochází ke vzniku elektrostatického náboje u člověka. Tento druh ESD je s velkou pravděpodobností největší nebezpečí pro bezpečný provoz elektronických zařízení a integrovaných obvodů a vůbec produkty se kterými přichází člověk do kontaktu. Náboj opět vzniká třením například při chůzi, pohybem končetin nebo otíráním se částmi oděvů o sebe. Takto „nabitá“ osoba pak může běžně dosáhnout napětí proti zemi 5 až 15 kV. [2], [9]

K elektrostatickému výboji pak dochází zejména při neplnění základních pravidel proti omezení vzniku ESD:

- Osoby, které pracují a obsluhují s elektronickými přístroji, používají nevhodné oblečení z hlediska vzniku vysokého elektrostatického napětí. Jejich oděvy jsou ze syntetických tkanin.
- Povrchy stolů, židlí i podlahová krytina jsou z umělých hmot s vysokým izolačním odporem.
- Nízká vlhkost vzduchu v místnosti.

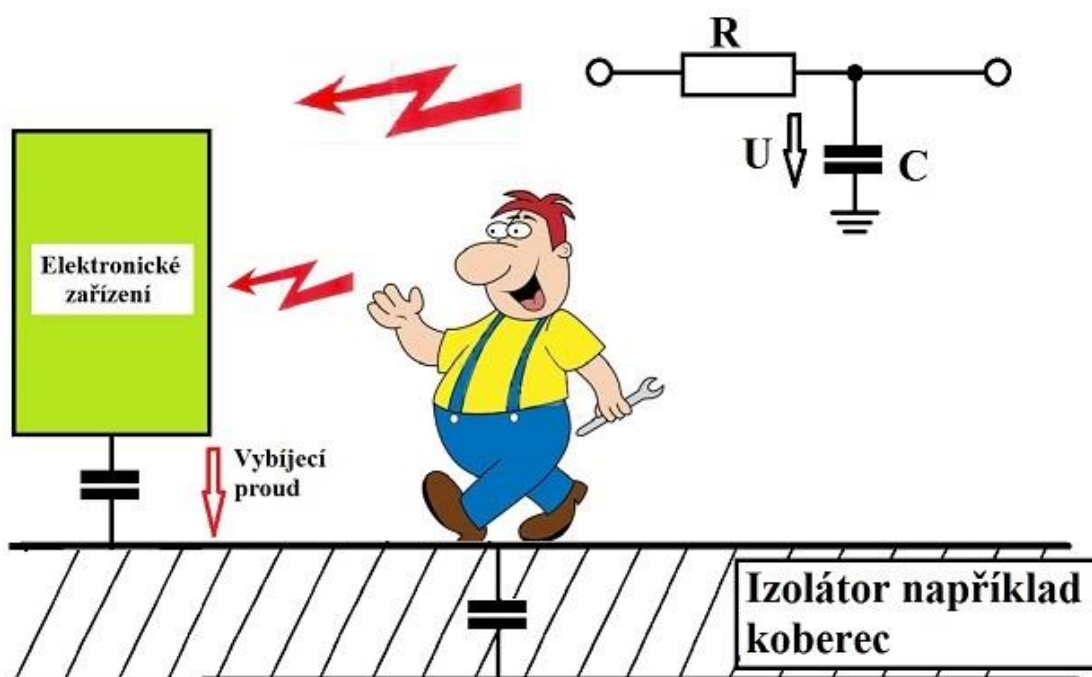
Tyto podmínky pak nejčastěji mohou nastat v běžném obývaném prostředí jako byty a kanceláře, a to z důvodu, že zde není kladen takový důraz na dodržování těchto pravidel zejména pak nízká vlhkost vzduchu a nesprávná podlahová krytina. Především v zimním období klesá vlhkost vlivem topení v obytných prostorech pod hranici 40 %, a tím roste pravděpodobnost vzniku elektrostatického výboje, kde napětí může narůst až na 15 kV. V následující tabulce je zobrazeno několik příkladů, jaký může mít různá relativní vlhkost

vzduchu vliv na stejné činnosti. Zcela jasně pak prokazuje, že čím je vlhkost vzduchu větší, tím klesá i šance vzniku ESD.

Tab. 1 Příklady relativní vlhkosti [9], upravil Koriťák

Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti (RV)	20% RV [kV]	80% RV [kV]
Chůze po vinylové podlaze	12	0,25
Chůze po syntetickém koberci	35	1,5
Zdvihnutí plastové tašky	20	0,6
Posun polystyrenové krabice po koberci	18	1,5
Odstranění krycí pásky z PC desky	12	1,5
Smršťovací fólie na PC desce	16	3
Zaměření odsavače cínu	8	1
Použití mrazicího spreje	15	5

Těmto nežádoucím stavům jde zabránit například klimatizací v místech, kde nelze dostatečně větrat daný prostor, používáním antistatických materiálů u stolů, židlí a podlah, a také používáním přírodních materiálů.

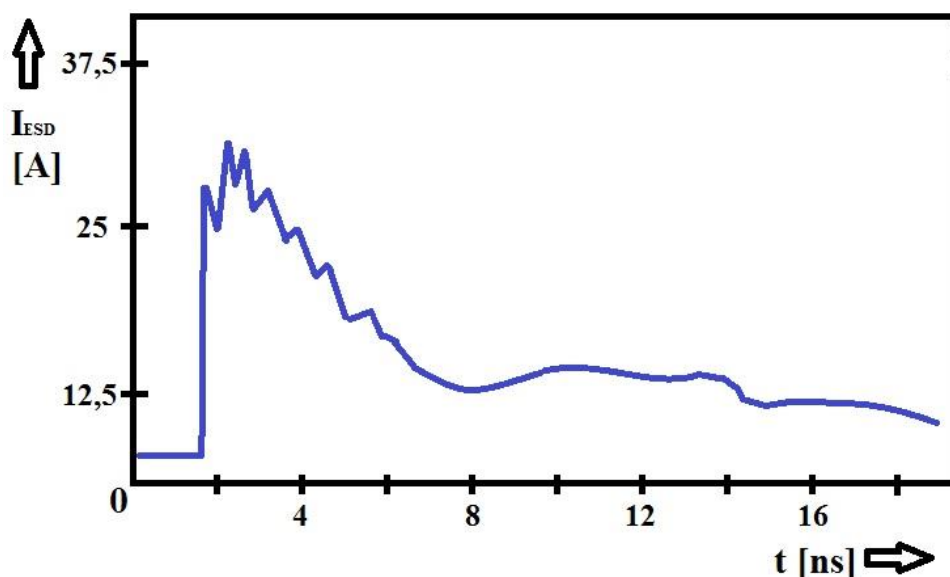


Obr. 6 Vznik ESD [2], upravil Koryťák

Na Obr.6: Vznik ESD lze vidět pracovníka, který chůzí po izolačním povrchu v tomto případě koberci, každým krokem zvyšuje elektrický náboj na svém těle. Především díky tření oblečení o sebe, a také pohybem bot po koberci. Při kontaktu s elektronickým zařízením se pak veškerý vytvořený náboj přes paži pracovníka vybije do zmíněného zařízení. Způsob, jakým výboj probíhá se také liší. Pokud je použit kovový předmět, jako pinzeta nebo kleště proudová špička je vyšší a je dosažena v kratším čase, než v případě, kdy výboj probíhá pomocí doteku rukou. Je to z toho důvodu, že kov má mnohem nižší odpor než lidská ruka. Nicméně bez ohledu na způsob výboje, se vždy musí rozptýlit náboj o stejné velikosti. Jak již bylo zmíněno elektrostatický výboj dosahuje při poměrně malé energii velmi vysokého napětí až 15 kV. V následující rovnici je znázorněn výpočet vzniklé energie při ESD. Je bráno v úvahu, že kapacita lidského těla proti zemi je přibližně 100 až 200 pF. [2]

$$W = \frac{1}{2} \cdot C U^2 = \frac{1}{2} \cdot (100 \div 200) \cdot 10^{-12} \cdot ([15 \cdot 10^3])^2 \approx (10 \div 20) mJ \quad (1)$$

Elektrostatický výboj, který vznikl při kontaktu „nabitého“ pracovníka s elektronickým zařízením, má tedy relativně malou energii, velmi vysoké napětí, ale také impuls vybíjecího proudu je velmi velký a rychlý. Jak je patrné z následujícího Obr 7, kde je zobrazena charakteristická křivka průběhu proudového impulsu ESD.



Obr. 7 Impulz vybíjecího proudu [10], upravil Koryťák

Tento impulz se projevuje tím, že proud během jedné nanosekundy prudce naroste, a to k hodnotám desítek ampér a následně pozvolna klesá, až k nule ovšem po dobu ještě několika desítek nanosekund. To může vést k zhoršení funkce zařízení, latentnímu poškození a v nejhorším případě i úplnému zničení součástky či přístroje. Je to zejména ze dvou důvodů, buďto zasažený objekt nevydrží přímý výboj o velkém napětí a proudu nebo vlivem pozvolného klesání proudu patrného z Obr. 7 Impulz vybíjecího proudu může dojít k indukci do jiných částí obvodů. Účinky některých „mikro-výbojů“ nemusí být na první pohled, tedy co se týče funkčnosti, zcela patrné a projevují se až za delší čas. Takovým případem je například zmenšení vodivých cest v obvodu, což by mohlo vést ke zkrácení doby životnosti.

2.1.1 Aplikace ochrany ESD

Dnešní úroveň spolehlivosti elektronických zařízení musí být velmi vysoká, aby splňovala očekávání obchodního trhu, ale zároveň miniaturizace a rozvoj integrovaných obvodů a sofistikovanějších zařízení znamená, že jsou i více citlivé na tento druh rušení. Z toho vyplývá, že je nezbytné se zabývat vhodnou ochranou elektronických zařízení před účinky ESD. Aplikovat ochranu je nezbytné ve všech fázích životnosti zařízení od počátku návrhu, přes výrobu a testování zařízení a elektroniky až do své konečné instalace a používání. ESD ochrana je proto klíčovým prvkem každého výrobce elektroniky. Bez dostatečných ochranných opatření proti ESD mohou zařízení vykazovat špatnou spolehlivost a během provozu se u nich vyskytovat latentní chyby vedoucí například ke zkrácení životnosti. [6]



Obr. 8 Chráněno proti vzniku ESD[11]

Existuje mnoho způsobů, jak může být ochrana proti elektrostatickému výboji realizována. V zásadě je můžeme rozdělit do následujících oblastí:

- **ESD ochrana v oblasti a vývoje a návrhu:** Aby elektronické obvody mohly přežít elektrostatické výboje, které se vyskytují při běžném použití, je nezbytné, aby již s tímto záměrem počítalo při jejich návrhu. Rovněž je důležité počítat s ochranou při spojení s okolním prostředím, jako jsou různé periférie a komunikační porty. [6]
- **Dodržovat specifikace bezpečného prostoru:** Při manipulaci s elektronickými zařízeními, je nutné zabránit, aby byly komponenty vystaveny vlivům ESD. Úroveň ochrany ESD pro požadované prostředí, je dosažena použitím tzv. chráněné oblasti EPA. Ta bude podrobněji rozebrána v kapitole 2.1.3 Bezpečný prostor EPA. Důležité jsou přísné kontroly, aby bylo zajištěno, že se případný ESD rozptýlí a prostředí poskytuje ochranu veškeré elektronice. Použití chráněného území EPA je dnes standardem v každém výrobním procesu zaměřeném na elektronická zařízení. [6]
- **Uložení a přeprava:** Je nezbytné zajistit nejen, aby elektronické komponenty a přístroje byly vyráběny a provozovány v prostředí, ve kterém je ESD ochrana prvořadá. Je také nutné zajistit, aby všechny komponenty byly skladovány a přepravovány v prostředí, ve kterém je implementována ESD ochrana. [6]
- **Zavádění procesu řízení ESD:** Zvolení vhodných ochranných prostředků ESD je prvním krokem k vytvoření chráněné oblasti ESD, je však rovněž nezbytné zavést správné postupy a poskytovat školení pracovníkům a obsluze. Pouze v případě, že pracovníci budou dobře proškolení a pochopí způsob, jakým zacházet s komponenty a vybavením, tak aby se zabránilo poškození z ESD, budou mít tato opatření smysl. ESD školení a ESD procesy jsou klíčem ke správnému dodržování postupů. [6]

2.1.2 Strategie ochrany ESD

Elektrostatický výboj vzniká rozdílem potenciálů. Proto základem každého postupu při zavádění strategie ochrany ESD je buď to uzemnění, nebo zaručit, aby byl každý prvek v chráněné oblasti ESD přiveden na stejný potenciál. Do chráněné krajinné oblasti je třeba zahrnout všechny možné prvky, které se v ní mohou vyskytovat nebo nějakým způsobem do ní zasahovat. Patří sem ESD nástroje, ESD podložky a ESD povrchy, stejně jako elektronické sestavy a samotné komponenty. V neposlední řadě je zapotřebí brát v potaz obsluhu pracující v tomto prostředí. [6]

Při zavádění opatření na ochranu ESD, je nutné pokud je to možné co nejpřesněji určit, na co je potřeba se zaměřit. Některá opatření nemusí být z hlediska nákladů efektivní, zatímco jiná mohou mít zásadní význam. Podíváme-li se na opatření, která vedou k ochraně ESD, je to velmi snadné, všechna opatření musí být provedena tak, aby byly zájmové prvky v „bezpečí“. Tento přístup však stojí peníze, a to je nutné vzít v potaz při hledání správného opatření na ochranu před ESD. Je zapotřebí najít takovou možnost, která budou účinná a zároveň poskytne návratnost investovaných peněz. [6]

2.1.3 Bezpečný prostor EPA

Bezpečný prostor EPA z anglického „ESD Protected Area“ se v rámci opatření pro zajištění dostatečné úrovně ochrany ESD zaměřuje na následující kategorie:

- **ESD prostředí:** Je jedním z klíčových prvků EPA. V závislosti problematiky z hlediska prostředí by měla být prvním aspektem řešení podlaha. Ta by měla být vyrobena z anti-statických materiálů. Na podlahu může být instalována jak vhodná dlažba, tak i koberec. Přičemž odpor podlahové krytiny by měl být menší než $R < 10^9 \Omega$ při zkouškách podle ESD. Dalším prvkem pro zajištění bezpečného prostředí jsou zvlhčovače vzduchu nebo klimatizace. Velmi nízká vlhkost vzduchu má za následek větší riziko vzniku ESD. [6]
- **ESD pracovní stůl a plocha:** Použití vhodného pracovního stolu spolu se židlemi případné použití náramků. Všechny tyto prvky jsou vyrobeny z antistatických materiálů. Zde je z hlediska bezpečnosti obsluhy vhodné volit spíše prostředky z vhodných materiálů, než použít pouze uzemnění pracovní plochy.
- **ESD nástroje:** Další velmi důležitou oblastí je použití vhodných ESD nástrojů. Patří sem nejrůznější vybavení nutné pro práci na konkrétním pracovišti, které má být chráněno proti vzniku elektrostatického výboje. Jedním příkladem za všechny může být pájka. Ty snadno přenášejí elektrostatický náboj přímo na komponenty, navíc jejich hroty jsou z kovu, a to poskytuje mimořádně dobrou přenosovou cestu.

- **ESD oblečení:** Použití ESD oblečení je důležité, protože předměty z běžných materiálů mohou vytvářet statický náboj. Míra rizika roste s oblečením vyrobeném z umělých vláken. Oblečení lze rozdělit na tyto kategorie:
 - **ESD plášť:** Měl by překrýt veškeré oblečení, které nesplňuje požadovanou úroveň odolnosti vůči vzniku ESD. Mnoho oblečení je dnes vyrobeno z umělých vláken například kravaty, které mohou lehce přijít do styku při práci s citlivou elektronikou. Typicky odpor ESD oblečení jako je plášť by měl být mezi 10^5 až $10^{11} \Omega$.
 - **ESD obuv:** Je důležité zajistit, aby obuv nevytvářela statický náboj pohybem po podlaze. V případě, že ESD operátor při práci stojí, může se uzemnit přes ESD antistatickou obuv a podlahu. Odpor obuvi by měl být 10^5 až 10^8 Ohmů.
 - **Pásky pro boty ESD:** Mnoho lidí bude chtít používat své vlastní boty, alternativou je použít pásky na boty, které se hodí přes operátora nebo jeho boty a ty poskytují uzemnění. Další alternativou mohou být ještě speciální ESD návleky fungující na stejném principu.



Obr. 9 Pásky pro boty ESD [12]

- **ESD skladování a transport:** Je důležité přijmout preventivní opatření nejen při práci a manipulaci s citlivými zařízeními, ale také zajistit jejich vhodné skladování nebo bezpečný transport a zabránit tak poškození. V ideálním případě by se měl skladovací prostor řídit stejnými pokyny jako EPA. K těmto účelům slouží nejrůznější ESD obaly a tašky, které byly vyvinuty k těmto účelům.



Obr. 10 ESD Obaly [12]

- **Vyloučení nevhodného materiálu:** Mnoho materiálů, kterých se používá v každodenním životě, vytváří velké množství statického náboje. Tyto materiály by měly být za každou cenu z EPA vyloučeny. Materiály, jako je pěnový polystyren, vytváří velmi velké množství statické elektřiny, vyplývají ze skutečnosti, že se zkrátka lepí na všechno. Také některé formy bublinkové fólie nejsou vhodné, i když byly vyvinuty i některé typy pro použití balení citlivých zařízení, většinu mají narůžovělou barvu. Dalším problémem jsou plastové kelímky a láhve v oblasti pracovního prostoru, protože plast je velmi dobrý izolant. Existuje celá řada dalších potenciálně nebezpečných druhů látek. Někteří lidé dokonce používají speciální ESD papír namísto běžného papíru pro poznámky, i když taková opatření jsou už nad míru běžného standardu ochrany. [6]

Vytvoření EPA je nezbytným předpokladem pro jakéhokoliv výrobce, laboratoř nebo místa, kde je nezbytné zamezit vzniku ESD. Je důležité, aby elektronická zařízení byla chráněna vůči účinkům elektrostatického výboje, které mohou buďto komponenty zničit okamžitě, nebo zanechat skryté vady, které se objeví až později. [6]

2.1.4 Typy poškození vlivem ESD

Vlivem elektrostatického výboje dochází k různým typům poškození. Nejčastější se poškození projevuje jako zvětšený zbytkový proud, anebo zkrat odporového charakteru. Zaměříme-li se na konkrétní poškození vlivem ESD, lze je dělit následovným způsobem:

- Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů.
- Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů.

- Poškození dielektrické izolace.

Dále lze poškození dělit podle příčiny:

- vlivem velkého proudu – nejčastěji se projevuje konkrétním poškozením vodivých spojů nebo rezistorů a poškození polovodičových přechodů,
- vlivem velkého napětí – projevuje se poškození dielektrické izolace. [15]

Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů:

Příčinou tohoto poškození je zvýšený proud z elektrostatického výboje. Při průchodu proudu rezistory nebo tenkými spoji v integrovaném obvodu dochází k zahřívání těchto prvků. Překročí-li teplota hranici pro tavení křemíku nebo vodiče dochází k samotnému poškození. Ohroženy jsou především tenké kovové spoje, tenkovrstvé nebo tlustovrstvé rezistory a křemíkové polykrystalické rezistory a spoje. [15]

Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů:

K poškozením tohoto typu dochází u mělkých polovodičových přechodů PN. Například přechod emitor-báze u bipolárních tranzistorů, dostanou-li se do lavinového průrazu. Průraz nastává po náhlém nárůstu proudu. Zjednodušený průběh poškození je následující

- Napětí na přechodu PN překročí napětí lavinového průrazu.
- Nastává druhý průraz, jelikož se PN přechod ohřeje na vyšší teplotu vlivem průchodu proudu
- Místem druhého průrazu protéká velmi velký proud a způsobuje lokální zahřívání materiálu.
- Lokální zahřívání způsobuje další lokální růst proudu, vyvrcholením je, když teplota překročí 1 415 °C a dochází k roztavení křemíku.
- Pokud vyprodukované teplo dokáže roztavit kovový vodič v oblasti kontaktu mezi kovovým vodičem a křemíkem, elektrické pole může zapříčinit, že se roztavený kov dostane do oblasti polovodičového přechodu a způsobí odporový zkrat polovodičového přechodu.

Po následném ochlazení a ztuhnutí materiálu, je poškozen polovodičový přechod a může dojít i ke změně krystalické mřížky křemíku. To vše způsobí snížení napětí přechodu PN. Projevit se můžou různá poškození: zvýšení svodového proudu, až nefunkčnost IO. Nefunkčnost IO může být také způsobena odporovým zkratem. [15]

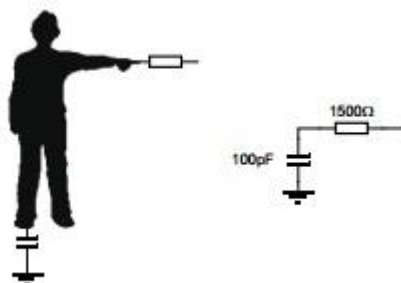
Průraz dielektrika:

Dielektrická izolace je např. z nitridu křemíku nebo oxidu křemíku. K průrazu dielektrika dojde, je-li překročeno závěrné napětí dielektrika. To vede k tomu, že tímto místem protéká velký proud. Ten se přeměňuje na teplo a vyvolává lokální zahřívání. V tomto místě se dielektrikum vlivem tepla prorazí a vzniká přetavený amorfní nebo polykrystalický křemík. [15]

2.1.5 Testovací modely ESD

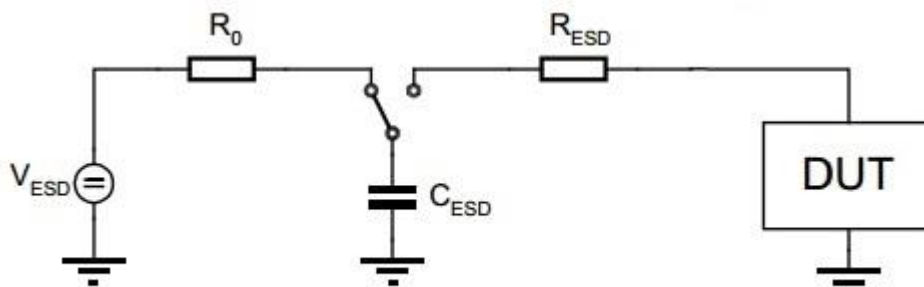
Za účelem boje proti ESD, tedy, aby se zabránilo poškození citlivých součástek, byly vyvinuty testovací scénáře. Ty charakterizují určité reálné situace, které mohou nastat v praxi. Tyto scénáře například vykazují různé úrovně nárůstu napětí nebo různé vlastnosti vybíjení. V současné době existuje celá řada metod pro hodnocení integrovaných obvodů pro plnění ESD ve výrobním prostředí. V následujících bodech budou předvedeny některé z nich. [10]

Human Body Model (HBM): Tento model simuluje elektrostatický výboj při doteku člověka s elektronickým zařízením. Test představuje stojící osobu, která „uvolní“ ESD přes konečky prstů na ruce. Tuto situaci znázorňuje Obr. 13 Human Body Model.



Obr. 11 Human Body Model [10]

Při testování součástek je nutné brát v potaz, že samotný test může vést až k destruktivním účinkům. Tyto procesy, si mohou vyžádat mnoho vzorků, což v konečném důsledku může být velice nákladné. Na druhou stranu pro uvedení na trh, zajištění stability a ochrany proti vlivům ESD je to někdy nezbytné. Testování touto metodou podává informace o imunitě zařízení vůči účinkům ESD, která vede k odpovědi, zda je testovaný prvek připraven odolávat požadovaným kritériím a pomůže k uvedení na trh. Další informace získané z testů slouží spíše pro výrobce, a to jak reagují systémy, které mají sloužit k ochraně proti ESD. Každá součástka má nastaveny určité mechanismy, které se „zničí“ namísto celého prvku. [10],[16]

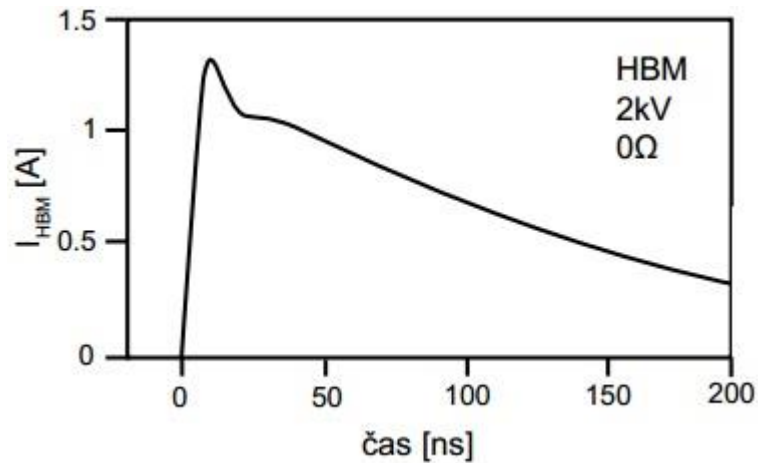


Obr. 12 Náhradní obvod modelu HBM [10]

Obr. 14 znázorňuje zjednodušený náhradní obvod modelu HBM. Skládá se z Kondenzátoru C_{ESD} , který simuluje vybíjení do testovaného zařízení (DUT). Odpor R_0 je použit pro omezení proudu při nabíjení kondenzátoru C_{ESD} . Kondenzátor $C_{ESD} = 150\text{pF}$ tato velikost v realitě odpovídá průměrné hodnotě kapacity lidského těla. Odpor $R_{ESD} = 1500\ \Omega$, který zase odpovídá hodnotě odpovídající odporu lidské ruky (paže). Postup testu je pak následovný:

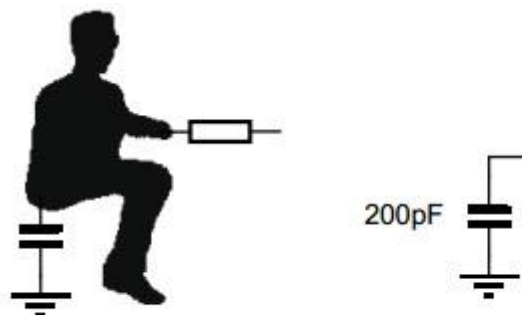
- Pomocí vysokonapěťového zdroje V_{ESD} se nabije kondenzátor C_{ESD} na požadovanou úroveň napětí.
- Až je kondenzátor nabit, je přepnut přepínač do druhé polohy.
- Kondenzátor C_{ESD} je v tu chvíli vybit přes odpor R_{ESD} a impuls prochází do testovaného zařízení DUT.

Proud, který vstupuje do testovaného zařízení je zobrazen na Obr. 13 vybíjecí proud. Obvyklé hodnoty elektrického napětí 1000 až 8000 V záleží na typu použitého integrovaného obvodu. [10],[16]

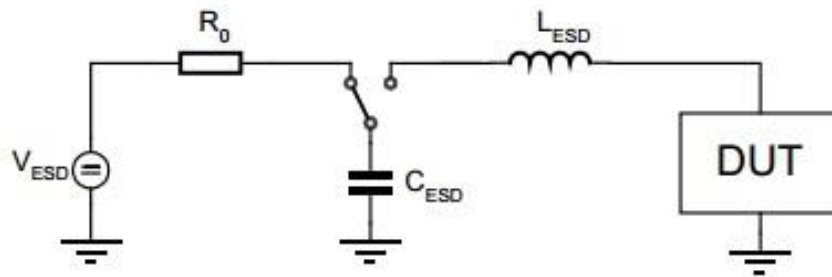


Obr. 13 Vybíjecí proud [10]

Machine Model (MM): Tento model byl vyvinut v Japonsku a představuje nejhorší formu HBM. Simuluje nabitý výrobní přístroj nebo nástroj kupříkladu pájka, která se přes testované zařízení uzemní. Jelikož je vodivý povrch nástroje většinou z kovu, dochází k intenzivnějšímu impulzu než u klasického modelu HBM avšak po kratší dobu. Test představuje výboj ze sedícího člověka skrz vodivý nástroj do zařízení, jak je znázorněno na Obr. 14 Model MM. [9],[17]



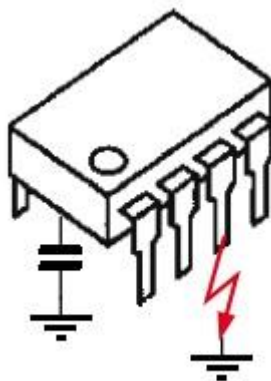
Obr. 14 Model MM [10]



Obr. 15 Náhradní schéma modelu MM [10]

Obr. 15 představuje zjednodušené náhradní schéma modelu MM. Ve schématu se nachází RC model, kdy kondenzátor $C_{ESD} = 200\text{pF}$, a to z důvodu, že při pozici člověka v sedě se zvětší jeho celková kapacita těla. Odpor R je zde roven nule z důvodů vybití náboje přes kovový, velmi dobře vodivý nástroj, proto se s odporem počítá jako s nulovým. Sériová indukčnost je zde důležitá, z důvodu nízké impedančního výboje s velkým proudem, která pro nízkou úroveň impedance osciluje. Postup testování je pak totožný s modelem HBM. Poruchy způsobené MM jsou v zásadě totožné, jako u HBM jen se projevují při daleko nižším napětí. [10],[17]

Charged Device Model (CDM): Tento model simuluje integrovaný obvod, který je stále nabitý a následně je položen na uzemněnou kovovou plochu. Simuluje reálné případy ESD v průběhu automatické manipulace, značení, zvedání a umístování komponentů. Znázorňuje vybití nabitého zařízení do uzemnění přes jediný pin integrovaného obvodu.



Obr. 16 Model CDM [10]

Tyto metody fungují dobře pro testování integrovaných obvodů ve výrobním prostředí, ale nejsou použitelné pro aplikace na úrovni systému. Elektronika jako například mobilní telefony, digitální fotoaparáty, laboratorní zařízení a mnoho dalších, které mají externí připojení zdroje, musí být také schopny odolávat elektrostatickým výbojům. To určují nejrůznější normy. V České Republice je to ČSN EN 61000 4-2 Elektrostatický výboj. Zde jsou podrobně popsány podmínky pro testování a kritéria, která musí zařízení splňovat.

3 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST A JEJÍ TESTOVÁNÍ

Elektromagnetickou odolnost nebo také elektromagnetickou susceptibilitu chápeme jako jistou schopnost zařízení odolávat rušivým signálům. Lze tedy mluvit o jisté imunitě zařízení vůči nepříznivým vlivům. Jak už bylo zmíněno, některé zdroje rušení nelze omezit nebo utlumit, jelikož se může jednat o funkční signály. Proto přichází na řadu EMS, aby zajistila správnou funkci zařízení i za těchto podmínek.

EMS u technických systémů lze vidět ve dvou rovinách. První je z nich interní elektromagnetickou odolnost, tedy odolnost vůči rušivým vlivům nacházejícím se uvnitř vlastního systému. Druhou rovinou je externí elektromagnetická odolnost, jejíž charakter spadá do oblasti odolnosti vůči zdrojům rušení přicházející zvenčí. V tomto případě pojmy vnitřní a vnější nelze jednoznačně specifikovat. Proto je použito ještě následující dělení:

Rozlehlé systémy: Označované také jako distribuované systémy. Jsou to takové systémy, které jsou od sebe geograficky vzdálené. Dílčí jednotky tohoto systému mohou být samotným zdrojem rušení a ovlivňovat tak celý rozlehlý systém. Jejich působení se zkoumá v rámci interní elektromagnetické odolnosti. Za externí působení se zde považují zdroje rušení atmosférického charakteru, popřípadě z rozvodné napájecí sítě. [2]

Lokální systémy: Dílčí jednotky jsou v okruhu místnosti či budovy. Mezi zdroje rušení zde patří nejen samotné subsystemy, ale i další systémy instalované v dané budově nebo místnosti. Patří sem výtahy, osvětlení, technologická zařízení a jiné. [2]

Systémy přístrojového typu: Jsou chápány jako individuální souvislé celky. Patří jsem veškerá elektronika, přístroje pro domácnost, laboratorní a měřicí přístroje apod.

Interní i externí elektromagnetickou odolnost u těchto systémů zkoumáme vždy a ve všech případech. Pro posuzování celkové odolnosti daného systému platí následující pravidla:

1. Interní elektromagnetická odolnost systému je závislá na odolnosti jeho dílčích systémech.
2. Celková interní elektromagnetická odolnost systému je určena odolností subsystemu s nejnižší elektromagnetickou odolností.
3. Celková externí elektromagnetická odolnost systému, může být závislá na jeho interní odolnosti, čemuž dochází při skládání rušivých signálů. To vede k celkovému snížení odolnosti systému. [2]

3.1 Kritéria EMS

Pro správné určení elektromagnetické odolnosti konkrétního technického systému je zapotřebí stanovit mez narušení, neboli určit kritérium jeho odolnosti vůči rušivým vlivům. Tyto meze lze definovat buďto kvantitativně nebo kvalitativně.

Kvantitativní kritérium: Používá se především v prvotní fázi cyklu, a to při vývoji samotného elektronického zařízení. Cílem je zjistit charakteristické prvky rušivých signálů, jako je tvar a velikost pro vybrané části zařízení. V praxi to pak znamená to, že je stanovena určitá míra sledovaného rušivého signálu, která zajišťuje, že ještě není vyvolán nežádoucí účinek pro zájmové zařízení. Stanovení této míry je na příklad číslo to znamená, že je určeno kvantum jinak řečeno mez odolnosti, při které bude ještě zařízení pracovat správně. Tato vybraná hodnota pak udává kritérium pro elektromagnetickou odolnost daného zařízení. [2]

Kvalitativní kritérium: Je uživatelsky přívětivější než kvantitativní kritérium. Jsou zde posuzovány změny funkčnosti a provozního stavu při vlivu rušivých signálů na zájmové zařízení. Funkční porucha je zde definována, jako změna provozuschopnosti zkoušeného zařízení. Jinými slovy jde o zhoršení funkce během vystavení zařízení rušivému signálu a poté jako důsledek rušení, který zaznamenává stav po odeznění rušivého signálu. Nejčastěji je rozlišováno pět základních funkčních kritérií:

- **Funkční kritérium A:** všechny funkce zařízení či systému jsou vykonávány správně dle specifikace, jak během zkoušky, tak i po jejím ukončení. Jinými slovy elektromagnetické rušení nikterak neovlivňuje ani nezanechává žádné „stopy“ na chodu zařízení či systému. [2]
- **Funkční kritérium B:** Zařízení či systém pracuje dle specifikace, některé funkce mohou během zkoušky vybočit z normálů. Nesmí však nastat změna provozního stavu zařízení či změna dat v paměti. Po ukončení zkoušky se automaticky všechny funkce musí navrátit k původnímu rozsahu a kvalitě. U tohoto případu elektromagnetické rušení změní chod zařízení či systému, po jeho odeznění se však správný chod zařízení automaticky obnoví. [2]
- **Funkční kritérium C:** Zde jsou během zkoušky ovlivněny jedna a více funkcí zařízení či systému a nejsou plněny vůbec nebo nepracují správně dle specifikace. Po ukončení prováděné zkoušky se musejí všechny funkce automaticky navrátit

k normálu, a to v původním rozsahu a kvalitě. Elektromagnetické rušení tedy naruší chod zařízení, po jeho odeznění se plná funkčnost zařízení automaticky obnoví. [2]

- **Funkční kritérium D:** U tohoto kritéria jsou během zkoušky i po ní ovlivněny jedna a více funkcí zařízení či systému a nejsou plněny vůbec nebo nepracují správně dle specifikace. Po ukončení prováděné zkoušky se všechny funkce nenavrátní k normálu, obnova funkce je provedena jednoduchým zásahem operátora. Jednoduchým zásahem se rozumí například restart zařízení. Zařízení i po skončení testu neplní správně svou funkčnost k obnově je zapotřebí obsluha. [2]
- **Funkční kritérium E:** U tohoto kritéria jsou během zkoušky i po ní ovlivněny jedna a více funkcí zařízení či systému a nejsou plněny vůbec nebo nepracují správně dle specifikace. Všechny funkce zařízení lze následně obnovit jen profesionálním zásahem, tj. opravou či výměnou částí zařízení. [2]

Kvalitativní testování odolnosti tedy neurčuje přesně konkrétní veličinu, za jakých podmínek bude mít vliv na dané zařízení, ale posuzuje testovaný objekt z hlediska jeho funkce při a po provádění zkoušky odolnosti. V praxi se všechna funkční kritéria používají jen v některých oblastech jako je lékařství nebo automobilový průmysl. Navíc je někdy velmi složité správně určit funkční kritérium. Tyto nastíněná kritéria jsou obecná, pro konkrétní skupinu zařízení je zapotřebí nahlédnout do norem pro testování konkrétních zařízení. Pro problematiku EMC jsou funkční kritéria zanesena v kmenové normě ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 Odolnost. Zde jsou zavedena Pouze tři funkční kritéria a to A, B a C. [2]

3.2 Obecná metodika zkoušek EMS

Nejvhodnější pro posouzení elektromagnetické odolnosti je umístit testované zařízení tam, kde má být instalováno nebo tam, kde má plnit svou funkci. Problém nastává v tom, že takové prostředí je proměnné a nelze zajistit reprodukovatelnost výsledků měření. Proto je nutné zavést umělé elektromagnetické prostředí, kde jsou přesně definovány kritéria zkoušky. Patří sem příprava pracoviště, kvalitativní a kvantitativní parametry umělého zdroje EM rušení, tedy simulátoru, posuzování stavu a nastavení zkoušeného zařízení. [3]

Při posuzování elektromagnetické odolnosti konkrétního elektrotechnického zařízení je nutné před vlastní zkouškou provést následující kroky:

- Určit rušivé elektromagnetické vlivy, které budou mít vliv na testované zařízení v jeho prostředí, kde bude pracovat. Cílem je nalézt zdroje rušivých signálů, které v tomto prostředí převažují a budou mít na testované zařízení největší vliv. Z hlediska časové a finanční náročnosti nelze vždy všechny rušivé signály definovat. Proto jsou z praxe vybrány jevy, které se v těchto případech objevují. Patří sem:
 - Nízkofrekvenční rušení v napájecí rozvodné síti nízkého napětí
 - Přechodné jevy a vysokofrekvenční rušení
 - Elektrostatické vývoje
 - Magnetická rušení
 - Rušení vyzařováním elektromagnetickým polem
- Určit správnou konfiguraci a provozní stav zkoušeného zařízení. Testované zařízení musí správně pracovat ve všech jeho provozních stavech. Zkouška odolnosti proto probíhá v takovém režimu nebo stavu, ve kterém je zařízení nejvíce citlivé. Je-li zařízení součástí systému nebo je k němu připojeno jiné zařízení zajišťující jeho činnost měla by zkouška probíhat i s těmito komponenty. [3]
- Určit kudy mohou do zařízení vstupovat rušivé signály. Pro lepší orientaci jsou možné vstupy znázorněny na Obr. 17 Vstupy rušivých signálů do zařízení. [3]



Obr. 17 Vstupy rušivých signálů do zařízení [2]

- Stanovit požadované kategorie odolnosti zkoušeného zařízení. Tyto kategorie jsou zastoupeny v normách ČSN EN 61000-4-. Rozhodující je pro požadovanou odolnost charakter prostředí, ve kterém bude testované zařízení pracovat. Pro prostředí jsou kategorizována do následujících tříd:
 - **Úroveň odolnosti 1:** Je vyžadována u zařízení pracujících v prostředí s nízkou, příp. velmi nízkou úrovní elektromagnetického rušení. Jde o tzv. dobře chráněná prostředí.
 - **Úroveň 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 odolnosti 3:** Je požadována pro zařízení určená pro tzv. náročná prostředí s předpokládanou vysokou úrovní elektromagnetického rušení. Jde o typická průmyslová prostředí.
 - **Úroveň odolnosti 4, příp. X:** Musí mít zařízení určená pro prostředí s velmi vysokou úrovní předpokládaného rušení. Jde o nechráněná silně rušená průmyslová prostředí. [3]

- Definovat jaké rušivé účinky jsou pro zkoušené zařízení přípustné. Z toho vyplývá vymezit příslušnou kategorii funkčního kritéria odolnosti daného zařízení. [3]

3.3 Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti

Tuto zkoušku odolnosti specifikuje česká norma ČSN EN 61000-4-2 ed.2 z roku 2009 Zkušební a měřicí technika – Elektrostatický výboj - Zkouška odolnosti. Při testech pro zjištění elektromagnetické odolnosti se simulace elektrostatických výbojů provádí pomocí zkušebního zařízení tzv. simulátoru ESD. Obvykle mívá podobu pistole, jak lze vidět na obrázku Obr. 18 Simulátor ESD. Na konci mívá vybíjecí hrot, který je výměnný, podle toho jaký typ je zrovna zapotřebí.

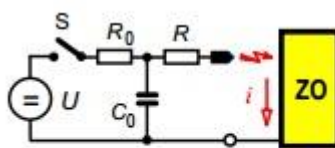


Obr. 18 Simulátoru ESD [18]

To jak bude vypadat časový průběh a tvar proudu, který při testu odolnosti vznikne ve zkoušeném zařízení, závisí na tom, jak bude elektrostatický výboj proveden. Výše uvedená norma proto rozlišuje tři druhy zkušebních výbojů. Lze je tedy rozlišit takto:

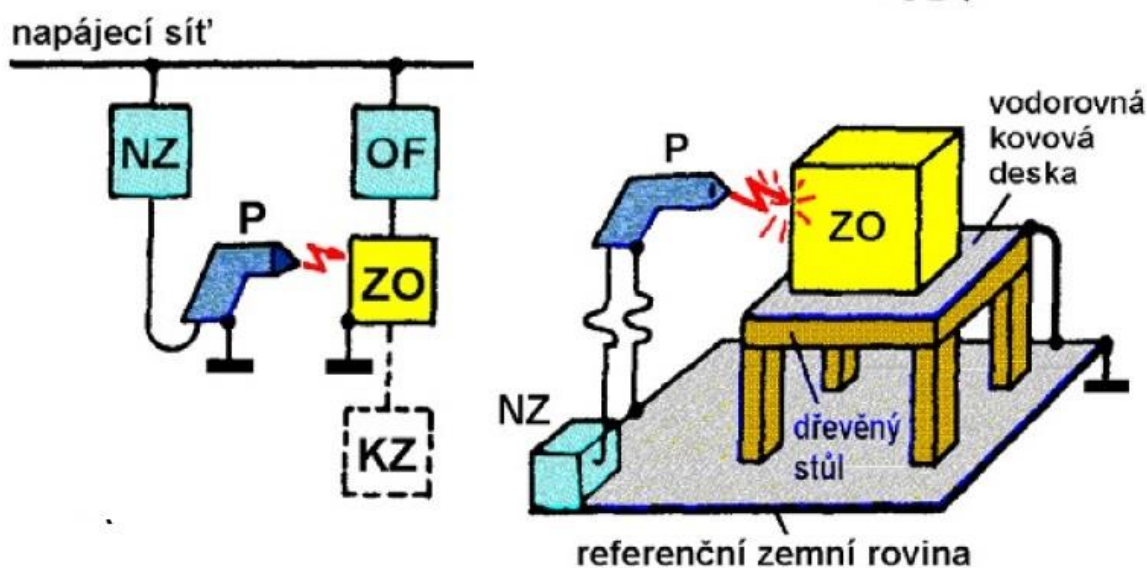
Výboj vzduchovou mezerou:

Zkušební generátor pro výboj vzduchem je zapojen podle obrázku Obr. 19 a skládá se z akumulčního kondenzátoru $C_0 = 150 \text{ pF}$, který se nabíjí ze zdroje vysokého stejnosměrného napětí $U = 2 \div 15 \text{ kV}$, přes odpor $R_0 = 50 \div 100 \text{ M}\Omega$. Kondenzátoru se následně vybije do zkoušeného zařízení přes sériový vybíjecí odpor R . Jeho hodnota je předepsána českou normou ČSN EN 61000-4-2 ed. 2 je na $R = 330 \text{ }\Omega$. [2],[3],[5]



Obr. 19 Schéma vybíjecího obvodu pro
vzduchovou mezeru [5]

U zkoušky pro výboj vzduchovou mezerou se podle obrázku Obr. 20 vybíjecí pistole označená písmenem P, u které je zároveň stisknut spínač pro „odpálení“ výboje, přibližuje k testovanému zařízení ZO. K výboji dojde, pokud napětí mezi hrotem a ZO klesne pod úroveň napětí nabitého kondenzátoru C_0 , který se vybije do zkoušeného zařízení ZO. Po kontaktu se ZO se pistole od objektu opět oddálí a pokračuje se v dalším testování. Tento proces by se měl vždy opakovat nejméně desetkrát pro vybraná místa zkoušeného zařízení, a to buď to pro obě polarilty anebo pro tu, na kterou je zařízení nejcitlivější. [2],[3]

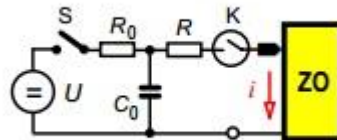


Obr. 20 Průběh zkoušky vzduchovou mezerou [2]

Tvar vybíjecího proudu při výboji vzduchovou mezerou je velmi proměnlivý. Nedá se přesně určit, protože jej ovlivňuje spousta faktorů. Jedním z nich je rychlost přibližování hrotu směrem ke zkušebnímu zařízení. Z těchto důvodů je více upřednostňován další způsob a to kontaktní výboj. [2],[3]

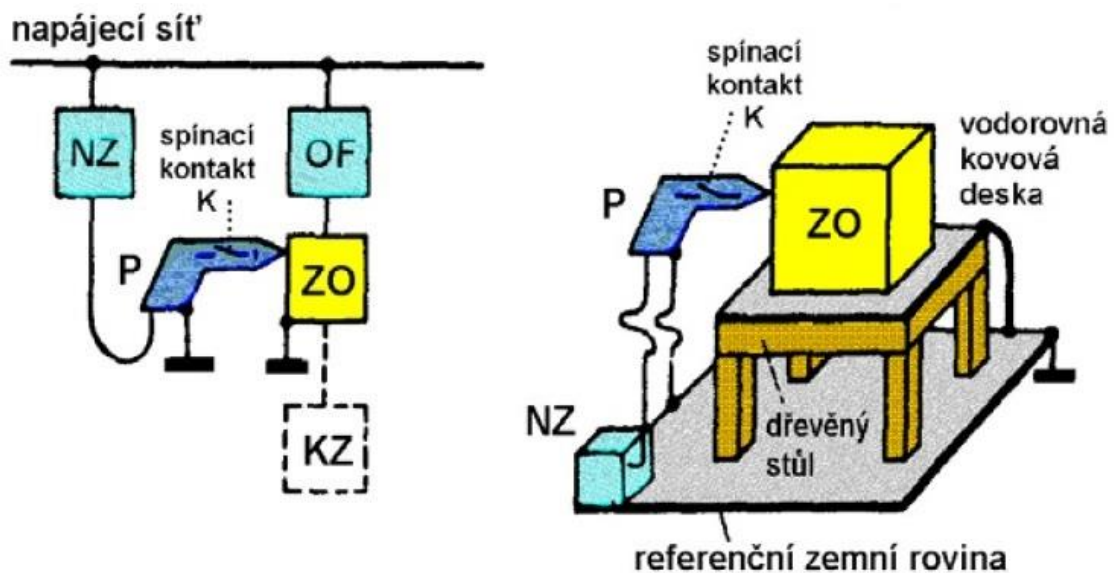
Kontaktní výboj:

Je dalším způsobem, jak lze provést zkoušku odolnosti vůči elektrostatickému výboji. Jedná se o simulaci přímého vybití. Zapojení zkušebního generátoru je naznačeno na obrázku Obr. 21



Obr. 21 Zapojení zkušebního generátoru pro kontaktní výboj [5]

Hrot simulátoru ESD se přiloží ke zvolenému místu zkoušeného zařízení ZO. Kondenzátor C_0 , který je nabitý na napětí stejnosměrného zdroje se při stisku spínače pistole vybije přes odpor R do ZO. Takto vznikne elektrostatický výboj. [2],[3]

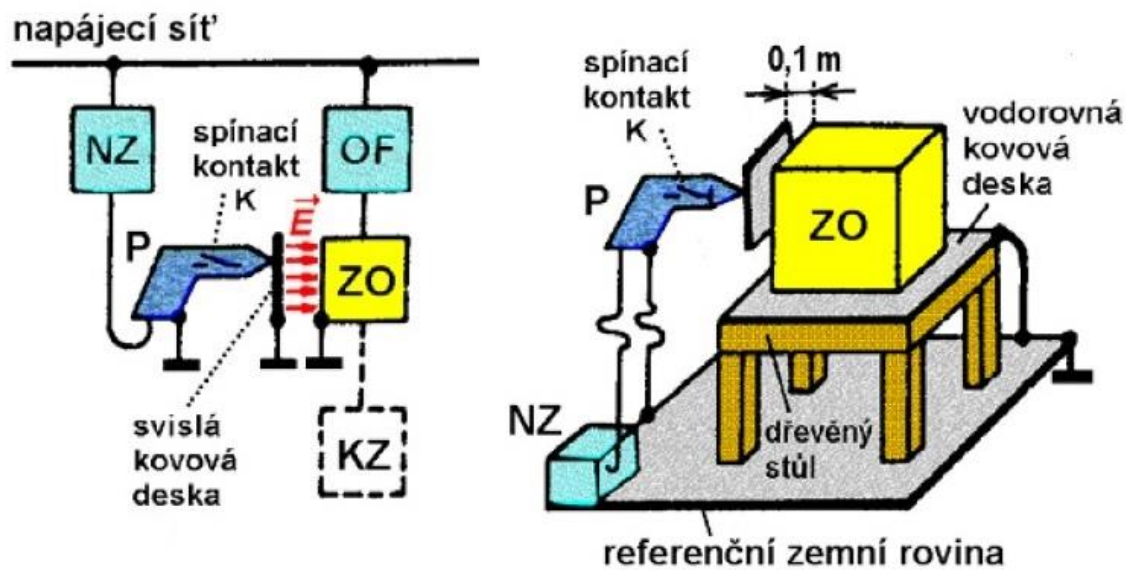


Obr. 22 Průběh zkoušky vzduchovou mezerou [2]

Nepřímý výboj:

Oba z uvedených typů ESD, tedy výboj vzduchovou mezerou i kontaktní výboj lze řadit do „přímých výbojů“. Znamená to, že jsou přiváděny přímo na zkoušené zařízení.

V praxi však může ESD vyvolat změnu funkce nebo poruchu zařízení když není přímo zasaženo. Jde o případy, kdy jsou zasaženy blízké kovové předměty. Následnou indukci je proud přenesen do vlastního zařízení. Norma ČSN EN 61000-4-2 ed. 2 proto předepisuje další zkoušku odolnosti a to tzv. nepřímým výbojem. Při této zkoušce se simulátor ESD vybíjí kontaktním výbojem do kovové desky v blízkosti zkoušeného zařízení. Deska může přitom být situována svisle či vodorovně. Svislá vazební deska VCP (Vertical Coupling Plane) má normou stanovené rozměry $0,5 \times 0,5$ m a je umístěna vždy rovnoběžně s příslušnou stranou zkoušeného zařízení ve vzdálenosti 10 cm od něj. Pozice vazební desky se během zkoušky postupně mění kolem všech čtyř stran zkoušeného zařízení a v každé poloze se provede nejméně 10 jednotlivých výbojů do středu jedné ze svislých hran desky. U horizontální vazební desky HCP (Horizontal Coupling Plane) se využívá vrchní kovová deska umístěna na stole na kterém je zkoušené zařízení. Zkouška nepřímým výbojem je naznačena na Obr. 23. [2],[3],[5]



Obr. 23 Průběh zkoušky nepřímým výbojem [2]

4 ANTÉNY A VLASTNOSTI EM POLE

Elektromagnetické pole vzniká u elektricky nabitých předmětů. Rozprostírá do nekonečna v celém prostoru a popisuje elektromagnetické interakce. Když se elektromagnetické pole šíří konečnou rychlostí, hovoříme o elektromagnetickém vlnění. Dělíme jej na dvě složky:

- Elektrická složka reprezentovaná vektorem \vec{E}
- Magnetická složka reprezentovaná vektorem \vec{H}

Šíření elektromagnetických vln je kolmé na rovinu vlnění. Intenzita elektromagnetického záření je reprezentována jako výkon přenášený jednotkovou plochou kolmou ke směru toku energie. Pro určení velikosti hustoty vyzářeného výkonu tedy výkon prošlý jednotkou plochy v daném místě slouží střední hodnota Poyntingova vektoru, který se skládá z intenzity elektrického a magnetického pole. [19]

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (2)$$

V prostředí by se za ideálních podmínek vlny šířily přímočaře a ve všech směrech. Je však nutné zohlednit nerovnost zemského povrchu. Také anténa nevyzařuje zcela rovnoměrně a do všech směrů. Určité procento výkonu se ztrácí v prostoru, protože její anténa vysílá vzhůru. Obecně je tedy snaha o to, aby šíření elektromagnetických vln směřovalo vodorovně se zemí. Směr a tvar u elektromagnetického vlnění mění pouze jeho elektromagnetické pole. Z toho vyplývá, že částice hmoty, které se nacházejí v prostředí ve kterém se vlna šíří, nemění svou polohu, jinými slovy zůstávají v klidu. Díky této skutečnosti se vlnění dokáže šířit i kosmickým prostorem. [19]

4.1 Antény

Každý vodič, kterým prochází střídavý elektrický proud je zdrojem elektromagnetického vyzařování. Tohoto jevu využívá právě anténa, kde se jedná o vhodně úpravné části vedení, které slouží k vyzařování elektromagnetických vln. Anténa zprostředkovává přechod vysokofrekvenční energie do okolního prostoru. Děje vznikající na anténě jsou vratné. Z toho vyplývá, že anténa je schopna energii nejen vyzařovat a také přijímat. Tento fakt se nazývá reciprocita. To do jaké vzdálenosti je schopna anténa šířit

signál určuje její vysílací výkon, ale také konstrukce antény. Podle jejich dosahu se tedy antény odlišují velikostí a tvarem. Rozdělení antén lze provést podle mnoha kritérií. Ku příkladu podle jejich konstrukce, oboru použití, pracovní frekvence, na které pracují nebo materiálu ze kterého jsou vyrobeny. [19]

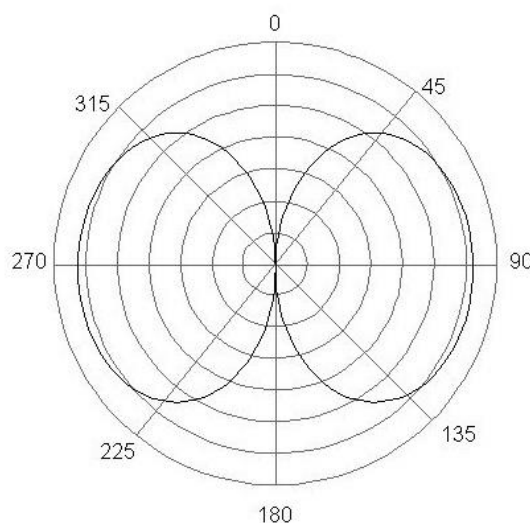
4.1.1 Vlastnosti antén

Je-li brán obecný pohled na antény z hlediska jejich vlastností, není mezi vysílací a přijímací anténou velký rozdíl. Každá anténa je určitý komplex skládající se z více dílů, avšak pro vysílací antény platí mnohem přísnější požadavky. Kritéria jsou následující:

- Musí obsahovat vlastní zářič o definované délce, který je umístěn nad zemí. Jen tato část smí vyzařovat vysokofrekvenční energii.
- Napáječ sloužící k přivádění vysokofrekvenční energie k zářiči musí vykazovat co nejmenší ztráty a zároveň nesmí vyzařovat vysokofrekvenční energii.
- Aby nedošlo k poškození vysílače vlivem nepřizpůsobení antény, je zapotřebí připojit vazební členy. Ty vzájemně spojují zmíněné celky, přizpůsobují je a brání vzniku odrazu na konci vedení.

V následujících odstavcích budou popsány charakteristické parametry antén. [19]

Směrnost antény: Jedná se o schopnost antény vyzařovat nebo přijímat elektromagnetické vlny v požadovaném směru, tuto směrnost posuzujeme dle tzv. vyzařovacích charakteristik. K posouzení směrnosti antény slouží směrový vyzařovací diagram, který lze vidět na obrázku Obr. 24 Vyzařovací charakteristika půlvlnného dipólu. [19]



Obr. 24 Vyzařovací charakteristika půlvlnného dipólu [14]

Maximální napětí antény: Charakteristické především pro vysílací antény. Udává se z důvodu bezpečnosti jako ochrana před zářením v důsledku vysoké intenzity pole při povrchu anténních vodičů.

Účinnost antény: Poměr výkonu mezi vyzářeného anténou a výkonu přivedeného do antény.

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_{rad} + R_{ztr}} \quad (3)$$

- R_{rad} jsou ztráty vyzářením
- R_{ztr} jsou ztráty přívodu [19]

Zisk antény: Lze chápat jako poměr intenzity vyzářování vytvářeného anténou ve stanoveném směru k intenzitě vyzářování, která by byla dosažena, kdyby výkon dodaný anténě byl rovnoměrně a bezztrátově vyzářován do všech směrů. Z tohoto důvodu záleží na směru, ve kterém je měřen. Nejčastěji se ziskem antény rozumí maximální zisk antény ve směru jejího maximálního vyzářování. Zisk antény je bezrozměrná veličina představující poměr intenzity vyzářování mezi konkrétní anténou a anténou referenční. Jako referenční se nejčastěji používá izotropická anténa, nebo elementární dipól. [19]

Vstupní impedance antény: Impedance antény Z [Ω] je vlastní impedance, neměla by obsahovat reaktanční složku pouze složkou reálnou. Anténa by měla mít přibližně stejnou impedanci jako má impedance přívodních kabelů. Je to z důvodu, aby nedocházelo k odrazům ve vedení a tím k nárůstu odraženého výkonu. [19]

Polarizační vlastnosti: Lze charakterizovat jako polarizaci vlny vyzářované anténou do konkrétního směru v oblasti vzdáleného pole. Není-li směr uveden, předpokládá se směr maximální intenzity vyzářování. Polarizace vlny je definována jako průmět koncového bodu vektoru intenzity elektrického pole do roviny kolmé na směr šíření. [19]

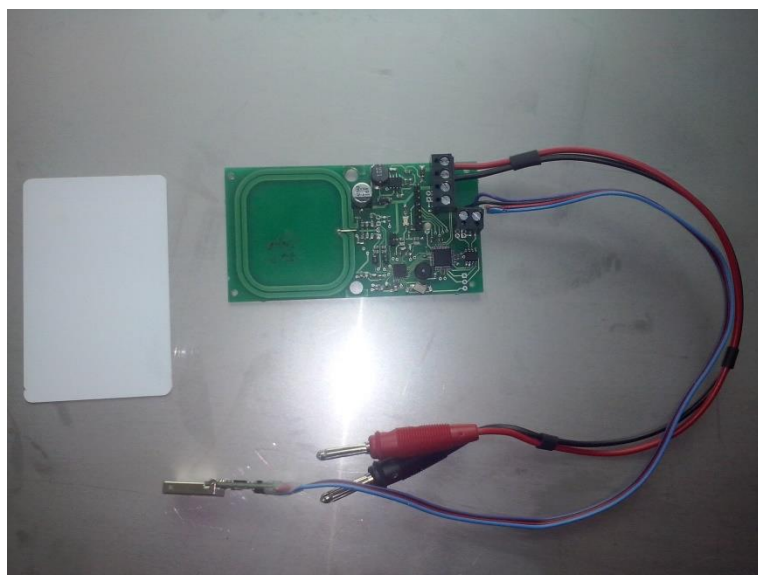
II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Tato diplomová práce se dle původních bodů zadání měla zabývat přípravou pracoviště a měření na modulech napájených pomocí metody PoE (Power over Ethernet). Což je metoda, při níž je napájecí napětí vedeno pomocí datového síťového kabelu. Tyto moduly měly být vyrobeny v rámci školního projektu, avšak bohužel nebyly dodrženy termíny dodání. To zapříčinilo, že musel být vybrán jiný modul. Po konzultaci s vedoucím diplomové této práce byl vybrán modul RFID čtečky. Změnou testovaného zařízení musela být poupravena i měření, která byla v plánu zpracovat v rámci praktické části. Z těchto důvodů byl u RFID čtečky proveden test elektromagnetické odolnosti elektrostatickým výbojem a měření intenzity vyzařovaného pole antény RFID modulu.

5.1 Testované zařízení

RFID systém (Radio Frequency IDentification): Jedná se o zařízení sloužící k identifikaci pomocí rádio-frekvenčních vln. Informace jsou ukládány do paměti čipu nebo-li tagu. Tag může být v podobě plastové karty, náramku nebo etikety na zboží. Výhodou tohoto systému je rychlost vyhodnocení, a také to, že RFID snímač nemusí přicházet do přímého kontaktu s tagem. To umožňuje čtení i v pohybu, navíc tak může být ukryt například v peněžence. Pasivní tagy v sobě mají ukrytý čip a anténu ve tvaru cívky. Pasivní v tomto případě znamená, že nemají žádný vlastní zdroj napájení. Tyto tagy získávají veškerou energii pro napájení a komunikaci od RFID čtečky. Čtečka generuje vysokofrekvenční elektromagnetické pole, to se na závitech cívky mění na napětí.



Obr. 25 RFID Čtečka, vlastní zdroj

Specifikace RFID čtečky:

- Pracovní frekvence: 13,56 MHz
- Druh tagu: pasivní
- Paměť: EEPROM, 512 Bytů
- Provozní vzdálenost: do 80 mm
- Napájení: 5V DC
- Rozměry: 85 mm × 50 mm × 10 mm

Do této RFID čtečky byl nahrán program pro ověření funkce pro testování na magnetickou odolnost. Program plnil funkci tak, že po přiložení RFID tagu se na čtečce rozsvítila LED dioda a ozvalo se pípnutí. Tato funkce simuluje spínání relé pro odemykání dveří. Pro napájení byl použit stabilizovaný regulovatelný zdroj napětí.

6 ZKOUŠKA ODOLNOSTI PRO ESD

Prvotním záměrem ze strany výrobce bylo otestovat modul proti účinkům elektrostatického výboje. Modul měl být instalován do rozvodných skříní spolu s jinými zařízeními, a to bez nějakého ochranného krytu. Proto vznikl požadavek, zda-li modul vydrží výboj elektrostatického impulzu u případného neodborného zacházení při instalaci nebo manipulaci. Vzhledem k událostem již z miněných v úvodu, kdy byl modul PoE nahrazen RFID systémem, musela být změněna i kmenová norma charakterizující prostředí. Celou zkoušku odolnosti pro elektrostatický výboj tedy zastřešuje kmenová norma ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 Odolnost – Prostorové prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu.

6.1 Příprava pracoviště

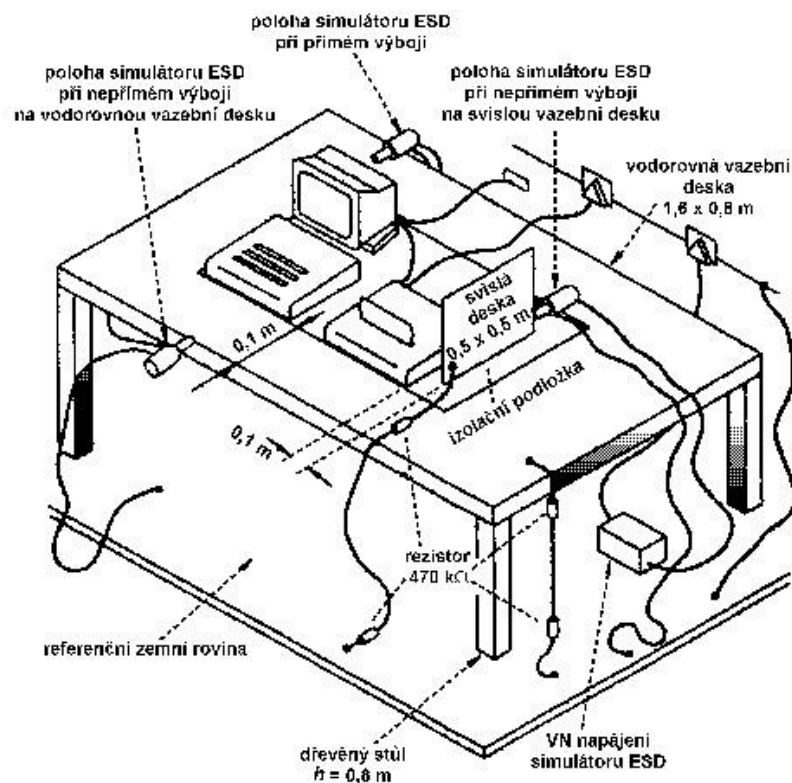
Specifikace a nároky pro přípravu pracoviště je zakotveno v normě ČSN EN 61000-4-2 ed. 2, Elektrostatický výboj – Zkouška odolnosti. Ta definuje zkušební úrovně, jež jsou závislé na různých podmínkách prostředí. Také ukazuje typický tvar impulzu vybíjecího proudu, definuje zkušební sestavu a popisuje průběh zkoušky. [5]

Jedním z nutných prvků při přípravě pracoviště je vytvoření referenční zemní roviny z anglického „Ground Reference Plane“. GRP musí být umístěna na podlaze laboratoře. Vyrobená musí být z kovu, pro měď a hliník je minimální tloušťka desky 0,25 mm, pro ostatní kovové materiály minimální tloušťka stanovena na 0,65 mm. Referenční zemní rovina musí přesahovat zkoušené zařízení z anglického „Equipment Under Test“ (EUT) nejméně o 0,5 m na všech stranách a musí být připojena k ochrannému uzemňovacímu systému. Vždy je také nutnost dodržovat místní bezpečnostní předpisy. Testované zařízení musí být uspořádáno a připojeno podle svých funkčních požadavků. Zároveň vzdálenost EUT musí být vzdálena minimálně 0,8 m od stěn laboratoře. ESD generátor musí být uzemněn v souladu se specifikací jejich instalace. Žádné další propojení se zemí není dovoleno. [5]

Dle velikosti testovaného zařízení lze rozdělit zkoušku, kdy je umístěno buď to „na stole“ nebo „na podlaze“. Pro účel této diplomové práce je vyhovující způsob testů, které se uskutečňují „na stole“. Na referenční zemní rovině je umístěn dřevěný stůl, jehož minimální výška je 0,8 m. Mezi testovaným zařízením a stolem musí být umístěna vazební deska za anglického „Coupling Plane“. Rozeznáváme dva druhy vazebních desek, a to:

- Vodorovná vazební deska „Horizontal Coupling Plane“: Je deska nacházející se mezi stolem a EUT
- Svislá vazební deska „Vertical Coupling Plane“: Je umístěna kolmo k EUT, a to v minimální vzdálenosti 0,1 m. Není v kontaktu s horizontální vazební deskou. [5]

Vazební roviny musí být připojeny k referenční zemní rovině kabelem s odporem o velikosti $R = 470 \text{ k}\Omega$, tento odpor se musí nacházet na každém konci kabelu. Tyto odpory musí být schopny odolat vybíjecímu napětí ze ESD generátoru. Odpory a kabely musí být izolovány, aby se zabránilo zkratu. Na Obr. 26 je zobrazen příklad přípravy pracoviště. [5]



Obr. 26 Schéma postupu při zkoušce ESD [5]

6.2 Zkušební generátor

K testům byl použit zkušební generátor ONYX 16 od firmy Haefely EMC Technology. Jedná se o generátor elektrostatického výboje, který je opatřen dotykovým displejem, pomocí kterého lze nastavovat parametry nutné k provedení zkoušky. Je u něj také možnost výměny hrotů, zaoblený pro výboj vzduchovou mezerou, nebo špičatý (ostrý) hrot pro výboj kontaktem.

Technické specifikace:

- Napětí pro výboj vzduchem: 1 až 16 kV
- Napětí pro výboj kontaktem: 1 až 16 kV
- Vybíjecí polarity: kladná a záporná
- Vybíjecí počítadlo: 1 až 9999
- Životnost baterie: až 16 hodin
- Přednastavený R / C článek: 150 pF / 330 Ω
- Spotřeby energie: 17 VA
- Rozměry (Š x H x D): 290 x 270 x 110 mm
- Hmotnost: 1,7 kg [18]

6.3 Postup zkoušky

Zkouška probíhala za specifikací dané kmenovou normou ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 Odolnost – Prostředí obytné, obchodní a lehkého průmyslu a podružené normy ČSN EN 61000-4-2 ed. 2, Elektrostatický výboj – Zkouška odolnosti. U RFID čtečky byly vybrány body, do kterých se následně přiváděl ESD výboj ze zkušební generátoru. Do každého vybraného bodu zařízení byl desetkrát vpraven impulz vybíjecího proudu, a to pro každou z obou polarit, tedy kladnou i zápornou. U zkoušky byly použity všechny tři typy výbojů. Vzduchovou mezerou, kontaktem i pomocí vazební desky, u tohoto posledního typu byla zvolena horizontální vazební deska. Zkušební napětí ESD generátoru bylo postupně zvyšováno, od nejmenšího po největší. Na Obr. 27 je fotka z průběhu zkoušky



Obr. 27 Aplikace ESD na zkoušené zařízení, vlastní zdroj

6.4 Vyhodnocení zkoušky odolnosti

Všechny výsledky z průběhu testu byly kvalitativně hodnoceny. Výsledky tedy byly stanoveny na základě funkčních kritérií z kmenové normy ČSN EN 61000-6-1 ed. 2 zavádí pro elektrostatický výboj. Norma deklaruje následující funkční kritéria:

- **Funkční kritérium A:** Přístroj musí pracovat nepřetržitě během zkoušky i po ní dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem. [20]
- **Funkční kritérium B:** Přístroj musí po zkoušce pracovat nepřetržitě dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem. [20]
- **Funkční kritérium C:** Je dovoleno dočasná ztráta funkce za předpokladu, že funkce je samo obnovitelná nebo může být obnovena řízením. [20]

Norma dále stanovuje úrovně zkušebního napětí:

- **Kontaktní výboj:** ± 4 kV
- **Vzduchový výboj:** ± 8 kV

V následující tabulce (7:5) jsou výsledky provedených zkoušek elektromagnetické odolnosti pro elektrostatický výboj.

Tab. 2 Výsledky měření

Místo aplikace výboje na zkoušené zařízení	Nabíjecí napětí	Typ výboje	Polarita	Výsledek zkoušky
Vstupní /výstupní piny	4 kV	Kontaktem	(+)	B
			(-)	B
LED dioda	4 kV	Kontaktem	(+)	B
			(-)	B
RFID anténa	4 kV	Kontaktem	(+)	C
			(-)	B
Svislá vazební deska	4 kV	SVD	(+)	A
			(-)	B
Vstupní/výstupní piny	8 kV	Vzduchem	(+)	B
			(-)	B
LED dioda	8 kV	Vzduchem	(+)	B
			(-)	B
RFID anténa	8 kV	Vzduchem	(+)	B
			(-)	B

Dle kmenové normy je k vyhovění u zkoušky nutno dosáhnout funkčního kritéria B. Z tabulky lze vyčíst, že až na jeden případ, všechna místa, vybrána k testu obstála. Při zkoušce odolnosti zařízení vykazovalo dočasnou ztrátu funkce. Po ukončení série testů se stav opět uvedl do normálu. U výboje kontaktem při kladném potenciálu do RFID antény zařízení zcela ztratilo svou funkci, a to i po ukončení testu. Zařízení muselo být odpojeno od zdroje napájení a až poté se stav navrátil k normálu. Dle normy by test neměl být zaměřen na „živé“ části, ale pouze na vstupy a výstupy. Z tohoto důvodu by zařízení splnilo požadované funkční kritérium B a zkouškou prošlo. Test byl však zaměřen i na „živé“ části, a to z důvodu požadavků zadavatele zkoušky, který chtěl zjistit účinky ESD při neodborné instalaci nebo neopatrné manipulaci se zařízením. Z důvodu absence více vzorků nebyly provedeny destrukční testy. Ty by sloužily k určení mezních hodnot poukazujících na maximální přípustnou úroveň napětí, které by zařízení „přežilo“. Celkově lze konstatovat, že při zmíněných normou daných úrovních nabíjecího napětí tj. ± 4 kV a ± 8 kV, zařízení nebylo poškozeno a po odeznění účinku ESD se funkce vrátila zpět do normálu. V jednom výše popsaném případě by nejspíše musela zasáhnout obsluha. Posledním bodem zhodnocení výsledků je fakt, že zařízení během všech testů vykazovalo změnu funkce. Jak již bylo zmíněno, funkce RFID čtečky byla programem nastavena tak, že přiložení tagu indikovala rozsvícením LED diody spolu se zvukovým signálem. Změna funkce při testech se právě projevovала tím, že při výboji se rozsvítila LED a zazněl

zvukový signál. Je otázkou, zda-li ESD výboj ovlivňoval EEPROM paměť, a tím i program v ní uložený, nebo docházelo k jiným poruchám. Pokud by ale byla RFID čtečka připojena na spínací relé a odemykala zámek dveří, mohl by mít ESD výboj fatální vliv na její funkci.

7 INTENZITA POLE RFID ANTÉNY

V této části bude zpracován postup měření charakteristiky zobrazující intenzitu pole tedy o směrové charakteristice antény. Jedná se o grafické vyjádření funkce záření dané antény, v tomto případě RFID anténu. Anténa obecně vysílá i přijímá v různých směrech různě velkou elektromagnetickou energii. Směrová charakteristika je reprezentována směrovými vlastnostmi antény v závislosti na souřadnicích v prostoru. Pojmem směrové vlastnosti zahrnuje komplexní intenzitu elektrického pole a polarizační vlastnosti.

7.1 Měřicí sestava

K měření intenzity elektromagnetického pole u RFID čtečky byla využita sonda pro měření blízkého magnetického pole. Tyto sondy se využívají pro měření elektrického či magnetického pole, které je vyzařováno deskami plošných spojů, integrovanými obvody, kabely, a jinými drobnými zařízeními. Sonda je také využívána pro detekci problémových míst EMC, jinými slovy umožňuje identifikaci pro případné odstranění rušivých zdrojů. Konkrétně se jednalo o typ R&S[®] HZ -14 od firmy Rohde & Schwarz



Obr. 28 Měřicí sonda R&S[®] HZ -14 [21]

Technické parametry sondy:

- Pasivní H pole sondy: od 9 kHz do 30 MHz
- Pasivní H pole sondy: od 30 MHz do 1 GHz
- Aktivní E pole sondy: od 9 kHz do 1 GHz
- 30 dB širokopásmový předzesilovač pro H pole sondy: od 9 kHz až 1 GHz
- DC napájení provozovat E - pole sondy [21]

7.2 Postup měření

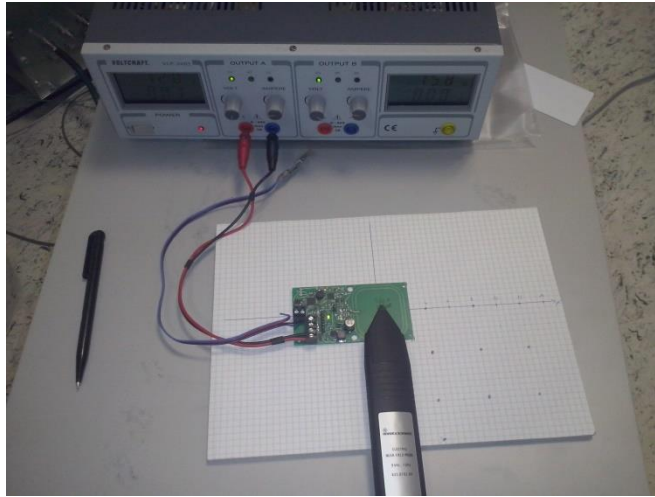
Sonda pro měření blízkého elektromagnetického pole byla připojena na spektrální analyzátor. Díky spektrální analýze můžeme rozložit signál na fázové a amplitudové spektrum. Jde především o zakreslení amplitudy a počáteční fáze jednotlivých harmonických složek na základě časového průběhu a tím vytvořit spektrum. Na Obr. 29 Připojení sondy ke spektrálnímu analyzátoru je zobrazeno měřicí pracoviště



Obr. 29 Připojení sondy ke spektrálnímu analyzátoru, vlastní zdroj

Pro změření vyzařovaného pole bylo zapotřebí zjistit intenzitu pole pro každý vybraný bod v oblasti RFID antény. Anténa byla rozdělena osou x a y do 4 kvadrantů. Střed os byl zároveň střed antény. Vybrané body pro měření pak byly zakresleny na papír do jednotlivých kvadrantů až do vzdálenosti 12 cm. Tímto způsobem byla následně změřena každá vytyčená oblast. Grafické znázornění vytyčených bodů lze vidět na obrázku Obr. 30. Při měření intenzity pole anténa zachycuje jak elektrickou tak magnetickou složku pole, tu pak lineárně převádí na napětí. Tento převod mezi vstupní intenzitou pole a výstupním napětím charakterizuje anténní faktor. Výrobce HZ -14 udává u sondy anténní faktor 67 dB. Aby výsledky měření byly správné, je nutné tuto hodnotu přičíst k naměřeným hodnotám. Měření probíhalo v laboratoři stíněné bezodrazové komory, kde je nainstalován program pro zpracování dat ze spektrálního analyzátoru. Pomocí tohoto

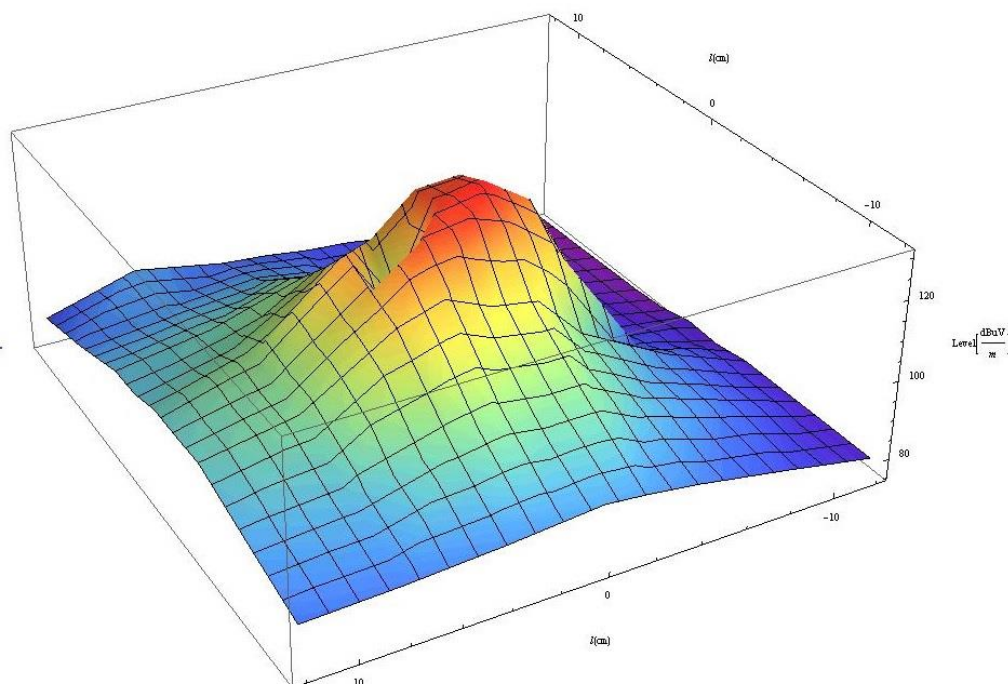
programu byly naměřené hodnoty zpracovány do formy tabulek, z nichž lze vytvořit výsledný obraz charakteristiky vyzařování RFID antény.



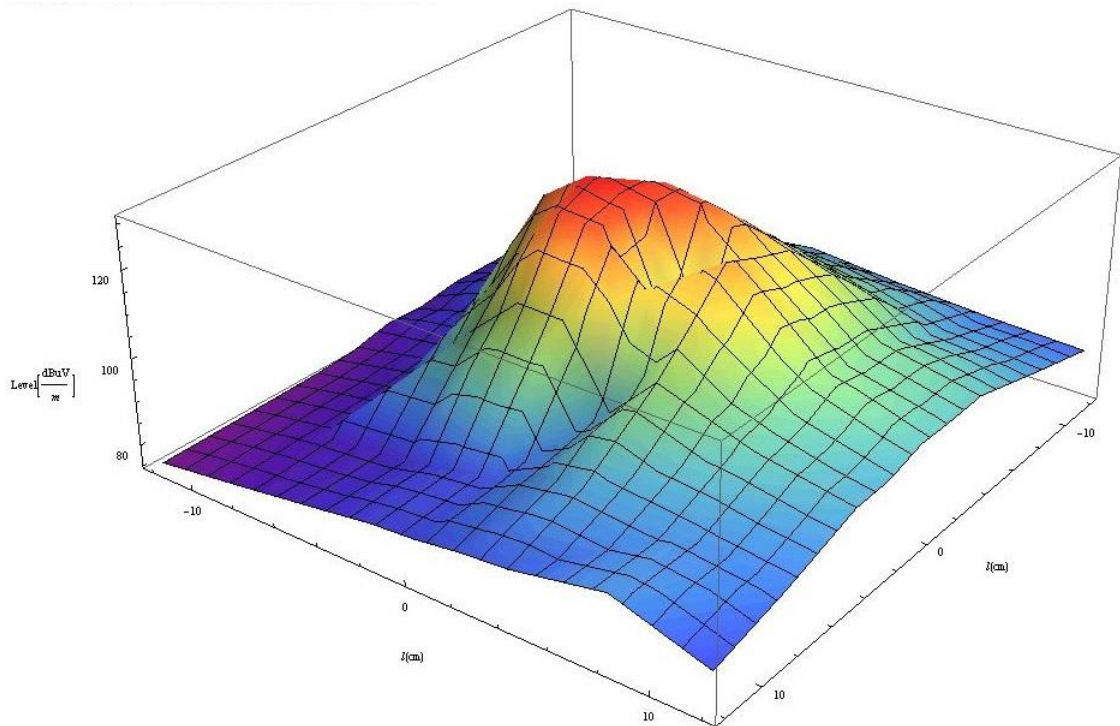
Obr. 30 Měření intenzity pole pro RFID anténu, vlastní zdroj

7.3 Výsledky měření

Naměřené hodnoty byly upraveny v MS Excel a výsledný graf vykreslen v programu Wolfram Mathematica. Následující grafy představují výslednou plochu intenzity vyzařovanou RFID anténou. Obrázky jsou zachyceny z více úhlů pro lepší zobrazení detailů.



Obr. 31 Graf vyzařené intenzity I, vlastní zdroj



Obr. 32 Obr. 33 Graf vyzářené intenzity 2, vlastní zdroj

Jedná se o nejvyšší dosažené hodnoty intenzity vztažené pro jednu frekvenci. Vzhledem k tomu, že pracovní frekvence RFID čtečky je 13,56 MHz jsou i nejvyšší dosahované hodnoty při měření blízké právě této frekvenci. Veškerá maxima byla naměřena při frekvenci 13,57 MHz. Z grafů je patrná nesymetričnost při vyzářování. Ta je zapříčiněna vlivem okolního prostředí, které v tomto případě bylo různorodé. Příčinou bylo umístění antény, kdy z jedné strany signál ovlivňovala pouze permitivita papíru a desky stolu a ze strany druhé navíc i permitivita cuprextitu a elektronické součástky. Měření proběhlo přibližně v 70 bodech, avšak pouze v rovině RFID antény. Aby byla vyzářovaná intenzita zakreslena zcela, bylo by zapotřebí měřit tuto veličinu nad i pod cíleným objektem. Pro účel zjištění směru vyzářování to však bylo dostačující. Lze tedy konstatovat, že nejvyšších hodnot bylo dosahováno vně čtvercové RFID antény, tedy tam kam se přikládá tag. Zároveň vyzářované pole není nikterak nahnuto ani posunuto mimo oblast antény a vytváří se tam, kde to lze předpokládat, tedy uvnitř okolí antény. Deformaci, která je viditelná ve středu grafu, způsobila skutečnost, kdy se měřicí sonda nacházela přímo nad vodičem antény.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo připravit a realizovat měření v rámci testování elektromagnetické susceptibility pro moduly napájené pomocí metody PoE (Power over Ethernet). Výroba těchto modulů měla proběhnout v rámci projektu realizovaného Fakultou Aplikované Informatiky. Naneštěstí došlo ke zpoždění termínů celého projektu, do kdy měly být moduly k dispozici. Z tohoto důvodu byla po konzultaci s vedoucím práce zvolena jiná alternativa. Bylo tedy vybráno jiné zařízení, na kterém byly provedeny vybrané testy a měření. K tomuto účelu byla vybrána RFID čtečka, která umožňovala snímat pasivní tagy.

Dle požadavků ze strany zadavatele bylo určeno zjistit, do jaké míry je zařízení ohroženo proti účinkům elektrostatického výboje v případě neodborné instalace, eventuálně při nesprávné manipulaci s tímto modulem. Tento test měl být proveden v rámci platné české technické normy. V dalším bodě, dle požadavků zadavatele, měla být zjištěna intenzita pole vyzařovaná anténou, která je součástí RFID čtečky. Konkrétně mělo být určeno, kde působí největší síla elektromagnetického pole a zda-li není nějakým způsobem vychýlena. Toto zjištění je platné pro případný návrh obalu či krytu zařízení, aby bylo zajištěno načtení a rozpoznání přiloženého tagu.

Diplomová práce se tedy zabývala problematikou ochrany proti účinkům elektrostatického výboje a testování zařízení proti jeho vlivům. Elektromagnetická odolnost je v dnešní době velmi důležitá, a to především díky stále rostoucímu počtu elektrických a elektronických zařízení. Dále se také čím dál více rozvíjí komunikační a bezdrátové sítě a neustále vznikají nové. Napříč tomu dochází k miniaturizaci a integraci elektronického světa. Všechny tyto aspekty přispívají ke zvýšenému vlivu rušivých signálů, jež nepříznivě ovlivňují zařízení a systémy v jejich dosahu. Elektromagnetická odolnost je tím důležitější, že vzniklé rušivé signály jsou často signály funkčními, a z toho důvodu je nelze odstranit. Proto se musí s EMS počítat již při návrhu či výrobě a zajistit tak nejefektivnější ochranu vůči rušivým vlivům. Jako zpětná vazba slouží zkoušky elektromagnetické odolnosti. Ty určují jakým způsobem a za jakých podmínek lze otestovat zařízení tak, aby bylo jednoznačným způsobem určeno, zda vyhovuje kritériím dané zkoušky odolnosti. Těmito zkouškami se dále zabývají technické normy.

U RFID čtečky byl proveden test na elektromagnetickou odolnost dle normy ČSN EN 61000-4-2 ed. 2, Elektrostatický výboj. Podle této normy bylo připraveno pracoviště

pro vykonání zkoušky odolnosti. Tato zkouška byla podřízena kmenové normě ČSN EN 61000-6-1 ed.2, podle které byla stanovena oblast, ve kterém mělo testované zařízení pracovat. Prostředí bylo zvoleno jako obytné, obchodní a lehkého průmyslu, do kterého lze zařadit zmíněnou RFID čtečku. Podle kmenové normy u zkoušky na elektrostatický výboj byl pro úspěšné absolvování testu minimální požadavek pracovat dle funkčního kritéria B. Testované zařízení tento požadavek splnilo v plném rozsahu a zkoušce tedy vyhovělo. Co se týče požadavku, jaký vliv má na RFID čtečku elektrostatický výboj, lze konstatovat, že pokud není zasažena přímo anténa modulu, zařízení je schopno samo obnovit svou funkci a nedochází k trvalému poškození. Účinky ESD však mohou ovlivnit chování zařízení, protože při testech se prokázalo, že zařízení vykazovalo změnu funkce v případě, kdy bylo zasaženo impulzem proudu.

Posledním krokem bylo měření intenzity elektromagnetického pole, jehož výsledkem bylo vytvoření grafů. Ty prokázaly, že vyzařování antény není nikterak vychýleno a nejvyšší hodnoty intenzity byly dosahovány ve směru kolmém k anténě. Zároveň tyto nejvyšší hodnoty byly soustředěny uvnitř okolí čtvercové antény RFID čtečky, což ohraničuje místo, kde je možné snímat přiložený tag. Závěrem lze konstatovat, že stanový cíl diplomové práce byl naplněn.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, c2006, xxi, 983 s. ISBN 0471755001.
- [2] SVACINA, J. Elektromagnetická kompatibilita, 2001. VUT Brno. ISBN 80-21418737.
- [3] VACULÍKOVÁ, Polina a Emil VACULÍK. Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 8071695688.
- [4] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. EMC z hlediska teorie a aplikace. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
- [5] ČSN EN 61 000-4-2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-2: Zkušební a měřicí technika - Elektrostatický výboj - Zkouška odolnosti. Praha: Český normalizační institut: [s.n.], 1.11.2009.
- [6] POOLE, Ian. Radio-Electronic.com: ESD Protection. [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/>
- [7] ČSN IEC 50(161). Mezinárodní elektrotechnický slovník: kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita. Praha: Český normalizační institut, 1994. 52 s
- [8] OTT, Henry W. Electromagnetic Compatibility Engineering. Hoboken: Wiley, c2009, xxv, 843 s. ISBN 978-0-470-18930-6.
- [9] HORSKÝ, Pavel. AUTOMA: Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/>
- [10] HORSKÝ, Pavel. Design.georgius: Elektrostatický výboj (ESD) a testování jeho vlivu u integrovaných obvodů. [online]. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: http://design.georgius.cz/sites/infocube/eem/horsky_eem081.pdf
- [11] Vermason. [online]. 2006 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: <http://www.vermason.co.uk/ESDSymbols.aspx>
- [12] MP Electronic. [online]. 2008 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.mp-elektronik.cz/category.php?id_category=48

- [13] STEINMETZ, Martin. EMC biologických systémů. 2005.
- [14] KŘÍŽ, David. DigiZone.cz: Podrobněji o fungování antén na televizních vysílačích. [online]. [cit. 2014-05-18]. Dostupné z:<http://www.digizone.cz/clanky>
- [15] AntiStatika: Poškození integrovaných obvodů (IO) vlivem elektrostatického výboje. [online]. 2010 [cit. 2014-05-18]. Dostupné z:<http://www.antistatika.cz/>
- [16] AEC – Q100-002 REV-D. HUMAN BODY MODEL ELECTROSTATIC DISCHARGE TEST. Automovie Electronics Council, 2003. 12 s.
- [17] AEC – Q100-003 – REV-E MACHINE MODEL ELECTROSTATISTIC DISCHARGE TEST. Automovie Electronics Council, 2013. 11s.
- [18] ONYX: Electrostatistic Discharge ESD Simulaor. [online]. 2012 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://onyx.haefely.com/>
- [19] MAZÁNEK, Miloš a Pavel PECHAČ. Šíření elektromagnetických vln a antény. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, 259 s. ISBN 80-010-3032-6.
- [20] ČSN EN 61000-6-1. Elektromagnetická kompatibilita (EMC): Kmenové normy - Odolnost - Prostředí obytné, obchodní, a lehkého průmyslu. ed. 2. Český normalizační institut, 2007.
- [21] Rohde & Schwarz: R&S®HZ-14 Probe Set for E and H Near-field Measurements. [online]. 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z:<http://www.rohde-schwarz.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EUT	Equipment Under Test
GRP	Ground Reference Plane
EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
EPA	ESD Protected Area
ESD	Electrostatic Discharge
HBM	Human Body Model
MM	Machine Model
RFID	Radio Frequency IDentification
VF	Vysokofrekvenční

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Základní členění EMC [2], upravil Koryťák 2014</i>	11
<i>Obr. 2 Mez vyzařování a odolnosti [2]</i>	14
<i>Obr. 3 Působení elektromagnetického pole [13]</i>	15
<i>Obr. 4 Řetězec EMC [2], upravil Koryťák</i>	17
<i>Obr. 5 Zdroje EM. rušení [2], upravil Koryťák</i>	18
<i>Obr. 6 Vznik ESD [2], upravil Koryťák</i>	22
<i>Obr. 7 Impulz vybíjecího proudu [10], upravil Koryťák</i>	23
<i>Obr. 8 Chráněno proti vzniku ESD [11]</i>	24
<i>Obr. 9 Pásky pro boty ESD [12]</i>	27
<i>Obr. 10 ESD Obaly [12]</i>	28
<i>Obr. 11 Human Body Model [10]</i>	30
<i>Obr. 12 Náhradní obvod modelu HBM [10]</i>	31
<i>Obr. 13 Vybíjecí proud [10]</i>	32
<i>Obr. 14 Model MM [10]</i>	32
<i>Obr. 15 Náhradní schéma modelu MM [10]</i>	33
<i>Obr. 16 Model CDM [10]</i>	33
<i>Obr. 17 Vstupy rušivých signálů do zařízení [2]</i>	39
<i>Obr. 18 Simulátoru ESD [18]</i>	40
<i>Obr. 19 Schéma vybíjecího obvodu pro vzduchovou mezeru [5]</i>	41
<i>Obr. 20 Průběh zkoušky vzduchovou mezerou [2]</i>	41
<i>Obr. 21 Zapojení zkušební generátoru pro kontaktní výboj [5]</i>	42
<i>Obr. 22 Průběh zkoušky vzduchovou mezerou [2]</i>	42
<i>Obr. 23 Průběh zkoušky nepřímým výbojem [2]</i>	43
<i>Obr. 24 Vyzařovací charakteristika půlvlnného dipólu [14]</i>	45
<i>Obr. 25 RFID Čtečka, vlastní zdroj</i>	48
<i>Obr. 26 Schéma postupu při zkoušce ESD [5]</i>	51
<i>Obr. 27 Aplikace ESD na zkoušené zařízení, vlastní zdroj</i>	53
<i>Obr. 28 Měřicí sonda R&S® HZ -14 [21]</i>	56
<i>Obr. 29 Připojení sondy ke spektrálnímu analyzátoru, vlastní zdroj</i>	57
<i>Obr. 30 Měření intenzity pole pro RFID anténu, vlastní zdroj</i>	58
<i>Obr. 31 Graf vyzářené intenzity 1, vlastní zdroj</i>	58
<i>Obr. 32 Obr. 33 Graf vyzářené intenzity 2, vlastní zdroj</i>	59

Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Příklady relativní vlhkosti [9], upravil Korták</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 2 Výsledky měření</i>	<i>54</i>