

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektromagnetická kompatibilita energetických zařízení

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na elektromagnetickou kompatibilitu energetických zařízení, popisuje rušivé jevy působící v těchto zařízeních a principy zjišťování jejich elektromagnetické odolnosti.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetické rušení, elektromagnetická odolnost, zkouška odolnosti, zdroj rušení, zkušební úroveň, funkční kritéria.

Abstract

This final thesis deals with electromagnetic compatibility of energy systems. The thesis describes disturbing influences in energy systems and also the principles of determining of electromagnetic susceptibility.

Key words

Electromagnetic compatibility, electromagnetic interference, electromagnetic susceptibility, immunity test, source of interference, test level, functional criteria.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 9.5.2013

Jiří Berdych

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Ing. Miroslavu Hromádkovi za možnost spolupracovat s ním při kontrolním měření v praktické části této práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	11
1.1 VZNIK OBORU ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	12
1.2 DŮLEŽITÉ TERMÍNY A DEFINICE V ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITĚ	13
1.3 DĚLENÍ OBORU ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	15
1.3.1 <i>Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů</i>	15
1.3.2 <i>Elektromagnetická kompatibilita technických systémů</i>	15
1.3.3 <i>Elektromagnetické rušení</i>	16
1.3.4 <i>Elektromagnetická odolnost</i>	16
1.4 CÍLE A PROBLEMATIKA ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	17
1.4.1 <i>Popis základního řetězce elektromagnetické compatibility</i>	18
2 ELEKTROMAGNETICKÉ RUŠENÍ	19
2.1 ZDROJE ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ	19
2.2 ČLENĚNÍ ZDROJŮ ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ	20
2.2.1 <i>Přirozené rušení</i>	20
2.2.2 <i>Uměle vzniklé rušení</i>	20
2.3 PŘEHLED RUŠIVÝCH VLVIVŮ	22
2.4 POPIS NĚKTERÝCH RUŠIVÝCH JEVŮ	23
2.4.1 <i>Lokální elektrostatické výboje</i>	23
2.4.2 <i>Atmosférické výboje</i>	23
2.4.3 <i>Nukleární elektromagnetický impuls</i>	23
2.4.4 <i>Rušení v energetických sítích</i>	24
3 MECHANISMY PŘENOSU ELEKTROMAGNETICKÉHO RUŠENÍ	25
3.1 GALVANICKÁ VAZBA	25
3.2 KAPACITNÍ VAZBA	26
3.3 INDUKTIVNÍ VAZBA	26
3.4 VYZAŘOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	26
4 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST	27
4.1 ČLENĚNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI	27
4.2 KRITÉRIA ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI	28
4.3 METODIKA ZKOUŠEK ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI	30
4.3.1 <i>Postup zkoušení elektromagnetické odolnosti</i>	30
4.4 TŘÍDY ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI	32
5 KONTROLNÍ MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ IMUNITY	33
5.1 POPIS ZKOUŠENÉHO ZAŘÍZENÍ	33
5.1.1 <i>Rozhraní testovaného zařízení</i>	33
5.1.2 <i>Vlastnosti a funkce testovaného zařízení</i>	33
5.1.3 <i>Použití zkoušeného zařízení</i>	34
6 PRINCIPY OVĚŘOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ IMUNITY	35
6.1 ZKOUŠKA ODOLNOSTI - VYZAŘOVÁNÍ VYSOKOFREKVENČNÍHO ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	35
6.1.1 <i>Zkušební zařízení a popis zkušeben</i>	35
6.1.2 <i>Postup zkoušky</i>	37

6.1.3	Zkušební úrovně.....	39
6.1.4	Praktické provedení zkoušky podle normy ČSN EN 61000-4-3.....	39
6.1.5	Vyhodnocení kontrolního měření podle ČSN EN 61000-4-3.....	40
6.2	ZKOUŠKA ODOLNOSTI - RYCHLÉ ELEKTRICKÉ PŘECHODNÉ JEVY/SKUPINY IMPULZŮ.....	41
6.2.1	Zkušební zařízení a sestava.....	41
6.2.3	Průběh zkoušky podle normy ČSN EN 61000-4-4.....	44
6.2.4	Vyhodnocení zkoušky.....	45
6.2.5	Použité přístroje.....	45
6.3	ZKOUŠKA ODOLNOSTI – RÁZOVÝ IMPULZ.....	46
6.3.1	Zkušební úrovně.....	47
6.3.2	Zkušební sestava.....	48
6.3.3	Postup zkoušky.....	49
6.3.4	Vyhodnocení zkoušky.....	50
6.3.5	Použité přístroje.....	50
6.4	ODOLNOST PROTI RUŠENÍM ŠÍŘENÝM VEDENÍM, INDUKOVANÝM VYSOKOFREKVENČNÍMI POLI.....	51
6.4.1	Zkušební úrovně.....	51
6.4.2	Zkušební zařízení a sestava.....	51
6.4.3	Postup zkoušky.....	53
6.4.4	Vyhodnocení kontrolního měření podle normy ČSN EN 61000-4-6.....	54
6.4.5	Použité přístroje.....	54
6.5	ZKOUŠKA ODOLNOSTI – KRÁTKODOBÉ POKLESY NAPĚTÍ, KRÁTKÁ PŘERUŠENÍ A POMALÉ ZMĚNY NAPĚTÍ 55	
6.5.1	Zkušební úrovně.....	56
6.5.2	Zkušební sestava a zařízení.....	57
6.5.3	Postup zkoušky.....	57
6.5.4	Vyhodnocení zkoušky.....	58
6.5.5	Použité přístroje.....	58
6.6	ZKOUŠKA ODOLNOSTI – ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ.....	59
6.6.1	Zkušební úrovně a třídy instalace.....	60
6.6.2	Zkušební zařízení a sestava.....	60
6.6.3	Postup zkoušky.....	62
6.6.4	Vyhodnocení kontrolního měření.....	63
6.6.5	Použité přístroje.....	63
6.7	ZKOUŠKA ODOLNOSTI – MAGNETICKÉ POLE SÍŤOVÉHO KMITOČTU.....	64
6.7.1	Zkušební úrovně.....	64
6.7.2	Zkušební sestava.....	65
6.7.3	Postup zkoušky.....	66
6.7.4	Vyhodnocení zkoušky.....	67
6.7.5	Použité přístroje.....	67
ZÁVĚR.....		68
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....		69
SEZNAM OBRÁZKŮ.....		71
SEZNAM TABULEK.....		72
PŘÍLOHY.....		1

Seznam symbolů a zkratk

<i>EMC</i>	Elektromagnetická kompatibilita
<i>EMI</i>	Elektromagnetické rušení
<i>EMS</i>	Elektromagnetická odolnost
ČSN IEC	Česká státní norma převzatá z mezinárodní normy
ČSN EN	Česká státní norma převzatá z evropské normy
<i>ESD</i>	Elektrostatický výboj
<i>LEMP</i>	Atmosférický výboj

Úvod

Cílem předkládané práce je popsat základy elektromagnetické kompatibility, elektromagnetické rušivé jevy a elektromagnetickou odolnost vůči těmto rušivým jevům.

Samotná práce bude mít dvě části, a to teoretickou a praktickou. Teoretická část se bude věnovat problematice elektromagnetické kompatibility. Bude zde charakterizována jako samostatný vědecko-technický obor. Práce popíše vznik tohoto oboru, jeho dělení, i odborné termíny, které se v jeho rámci používají. Podobně se bude teoretická část práce zabývat i elektromagnetickým rušením, jeho dělením, či mechanismy přenosu. Posledním úsekem teoretické části práce bude problematika elektromagnetické odolnosti, budou popsány přesná kritéria, dělení, i metodika zkoušky této oblasti elektromagnetické kompatibility.

Praktická část práce se zaměří na ověřování elektromagnetické imunity v praxi u konkrétního zařízení, které bude užíváno v průmyslovém prostředí. Testování elektromagnetické imunity bude spočívat v provádění praktických zkoušek odolnosti podle požadavků norem řady ČSN EN 61000-4.

1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita je moderní vědecko-technický obor, který vznikl v šedesátých letech 20. století v USA. Tato vědecko-technická disciplína se zabývá správnou současnou funkcí několika zařízení, systémů ve společném elektromagnetickém prostředí. Souhrnně můžeme říci, že jde o vědní obor, který se zabývá otázkami nežádoucího ovlivňování funkce různých systémů a to technických i biologických, působením elektromagnetického pole, přičemž jednotlivé systémy mohou, ale nemusejí mít vzájemnou funkční souvislost. Termín elektromagnetická kompatibilita pochází z anglického termínu „Electromagnetic Compatibility“, odkud je převzata i mezinárodně uznávaná zkratka EMC [3].

Definice elektromagnetické kompatibility:

Schopnost zařízení, nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí, bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí [7].

Elektromagnetické prostředí je oblast, ve které se obvykle vyskytuje více zdrojů elektromagnetického rušení a zároveň rušené objekty. Přesný popis elektromagnetického prostředí je velmi složitý, určuje se pomocí různých měření a výpočtů, z tohoto důvodu je elektromagnetické prostředí definováno pouze takto:

Souhrn elektromagnetických jevů existujících v daném místě [7].

1.1 Vznik oboru elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita je známá již desítky let. V úplných začátcích tohoto vědního oboru se jen malá skupina odborníků zabývala problémy, které vznikají při nedodržení elektromagnetické kompatibility. Pomocí tehdy dostupných prostředků se snažili docílit možné koexistence technických výrobků, které byly technologicky svázané, nebo se nacházeli v blízkosti [4].

S rozvojem elektrotechniky se elektromagnetická kompatibilita stala postupně velmi důležitým oborem, se kterým se dnes můžeme setkat na každém kroku. Nasazení nových technologií, aplikace nových principů a úspěšný rozvoj elektroniky a výpočetní techniky umožnil průnik těchto oborů do oblasti strojírenství, dopravy a dalších průmyslů, které dříve jen v omezeném množství využívali elektrotechnické obory. Rozvoj technologií v elektrotechnice znamená téměř vždy i zvýšení úrovně výkonu zařízení, které nemůže v dnešní době fungovat bez svých řídicích jednotek, které pracují pomocí celé řady informačních technologií, například různá čidla, mikroprocesory a další citlivá zařízení, pracující s velmi malými úrovněmi signálu. Z toho je patrné, že existuje opravdu vysoké riziko vzájemného nežádoucího elektromagnetického ovlivňování. Toto nežádoucí elektromagnetické ovlivňování se může projevit například jako parazitní signál, který může být chybně vyhodnocen jako informace, což může mít někdy až fatální následky. Jsou známy případy, kdy měla špatná elektromagnetická kompatibilita za následek různé nehody, které způsobily velké hospodářské škody, nebo si dokonce vyžádaly oběti na životech. Jednalo se například o havárie letadel, lodí, velkých průmyslových podniků. Nutnost vzájemné součinnosti velkých, výkonných zařízení s menšími systémy vede k tomu, že je nutné uvažovat o elektromagnetické kompatibilitě komplexně [4].

Narůstající množství potíží způsobených nedodržením elektromagnetické kompatibility vedlo k zavedení mezí přípustného rušení a minimální odolnosti pro určité skupiny zařízení, výrobků a technologií, které určuje evropská normalizace. Postupem času docházelo k rozšíření skupiny zařízení, které jsou ošetřeny příslušnou normou. Přijetí mezinárodních norem byl důležitý krok k odstranění nežádoucích účinků elektromagnetického rušení. Dnes je nutné správně aplikovat příslušné normy pro daná zařízení, dodržet parametry v ní uvedené a prokázat splnění daných mezí a kritérií [4][5].

Bylo potvrzeno, že elektromagnetická kompatibilita systému je jedním ze spolehlivostních faktorů systému. Z tohoto důvodu jsou poznatky z oblasti elektromagnetické kompatibility respektovány již během vývoje nových zařízení a společně s dalšími technickými parametry je měření elektromagnetické kompatibility nedílnou součástí funkčnosti nového výrobku. To znamená, že oblast analýzy elektromagnetické kompatibility dnes patří do kategorie měření základních elektrických jevů [4][5].

1.2 Důležité termíny a definice v elektromagnetické kompatibilitě

Elektromagnetické rušení: Jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit činnost přístroje, zařízení, nebo systému, anebo nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu [6].

Elektromagnetická interference: Zhoršení provozu přístroje, zařízení, nebo systému způsobené elektromagnetickým rušením [6].

Elektromagnetická kompatibilita: Schopnost zařízení, nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí, bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoli v tomto prostředí [6].

Odolnost (proti rušení): Schopnost zařízení, přístroje, nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení [6].

Citlivost (na rušení): Neschopnost zařízení, přístroje, nebo systému být v provozu bez zhoršení charakteristik za přítomnosti elektromagnetického rušení [6].

Úroveň: Velikost veličiny vyhodnocené předepsaným způsobem [6].

Úroveň vyzařování: Úroveň elektromagnetického rušení vyzařovaného konkrétním přístrojem, zařízením, nebo systémem, měřené určeným způsobem [6].

Mez vyzařování: Maximální dovolená úroveň vyzařování [6].

Úroveň odolnosti: Maximální úroveň elektromagnetického rušení působícího na konkrétní přístroj, zařízení, nebo systém, při kterém se nevyskytuje zhoršení provozu [6].

Mez odolnosti: Nejnižší požadovaná úroveň odolnosti [6].

Kompatibilní úroveň (elektromagnetická): Předepsaná úroveň rušení, při které by měla být přijatelně vysoká pravděpodobnost elektromagnetické kompatibility [6].

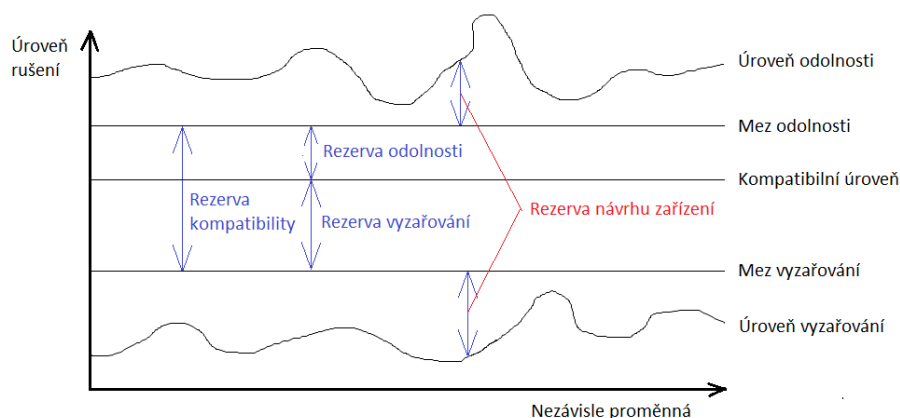
Rezerva vyzařování: Poměr úrovně elektromagnetické kompatibility a meze vyzařování [6].

Rezerva odolnosti: Poměr meze odolnosti a úrovně elektromagnetické kompatibility [6].

Rezerva elektromagnetické kompatibility: Poměr meze odolnosti a meze vyzařování [6].

Tyto základní termíny jsou tímto způsobem definovány v normách zabývajících se elektromagnetickou kompatibilitou například v normě ČSN IEC 1000-1-1 (Elektromagnetická kompatibilita: Všeobecně). Stejně definice se nacházejí i v mezinárodním elektrotechnickém slovníku, který je znám jako norma ČSN IEC 50(161), kdy kapitola 161 znamená elektromagnetická kompatibilita.

Definice úrovní, mezí a rezerv můžeme pro lepší představivost znázornit na následujícím obrázku, kde jsou úrovně odolnosti, vyzařování a k nim příslušné meze vyjádřeny jako funkce nezávislé proměnné (například frekvence). Stanovení těchto veličin se využívá při navrhování zařízení, systémů a přístrojů [7].



Obrázek 1: Úrovně, meze a rezervy v terminologii elektromagnetické kompatibility [7]

1.3 Dělení oboru elektromagnetická kompatibilita

Rozsáhlou problematiku elektromagnetické kompatibility můžeme rozdělit několika způsoby na dílčí části. Jak již bylo zmíněno, tento vědní obor se zabývá nežádoucími účinky elektromagnetického pole na technické i biologické systémy. Z toho je patrné, že můžeme základně dělit tuto problematiku na elektromagnetickou kompatibilitu biologických systémů a elektromagnetickou kompatibilitu technických systémů [3].

1.3.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

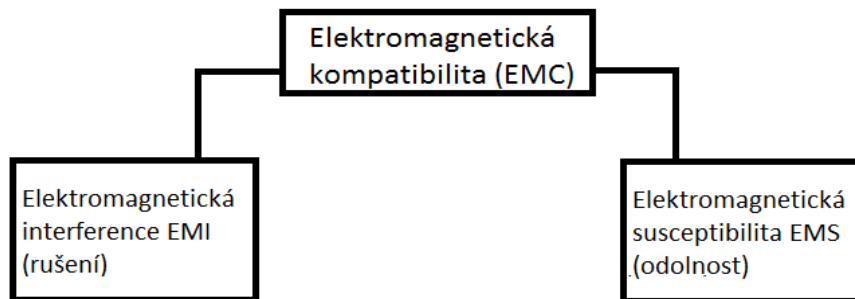
Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů je definována jako schopnost živých organismů fungovat v elektromagnetickém prostředí, aniž by bylo významně poškozeno jejich zdraví, zabývá se vlivem elektromagnetického prostředí na živé organismy a přípustnými úrovněmi rušivých i užitečných signálů. I přes celou řadu výzkumů nejsou tyto vlivy zatím přesně určeny, protože účinky prostředí se posuzují pouze podle nespecifických reakcí organismu a každý člověk reaguje na působení elektromagnetického prostředí jinak. Elektromagnetické jevy živých organismů nejsou pro své okolí významné, nicméně se dají využít k diagnostice některých orgánů živého organismu [4].

Tato práce se nezabývá problematikou biologických systémů, a proto se budu dále věnovat již pouze elektromagnetické kompatibilitě technických systémů.

1.3.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů se zabývá správnou funkcí vzájemně rušených elektrotechnických systémů, vznikem elektromagnetického rušení, způsoby omezení tohoto rušení a měřením rušení i odolnosti vůči němu.

Dva hlavní klíčové aspekty elektromagnetické kompatibility jsou vyzářování elektromagnetického rušení a citlivost na toto rušení. Citlivost a odolnost zařízení je velmi podobný termín. Citlivost na rušení je definována jako: *neschopnost zařízení fungovat bez zhoršení svých vlastností za přítomnosti rušení*, odolnost jako: *schopnost zařízení fungovat bez zhoršení svých vlastností za přítomnosti rušení*. Citlivost na rušení je základní vlastností každého přístroje, jedná se vlastně o nedostatečnou odolnost. Tyto termíny se v oboru elektromagnetické kompatibility nedají vzájemně nahradit, nicméně z funkčních požadavků na systémy, či zařízení je jasné, že jsou pro správnou funkci nutné elektromagneticky odolné systémy. Odolnost je tedy termínem, který ustanovuje elektromagnetickou kompatibilitu. Z toho vyplývá možnost dalšího dělení elektromagnetické kompatibility na *elektromagnetické rušení a elektromagnetickou odolnost* (susceptibilitu) [7].



Obrázek 2: Členění elektromagnetické kompatibility [7]

1.3.3 Elektromagnetické rušení

Elektromagnetické rušení neboli elektromagnetická interference, je děj, při kterém se rušivý signál přenáší pomocí elektromagnetické vazby ze zdroje rušení do rušeného objektu.

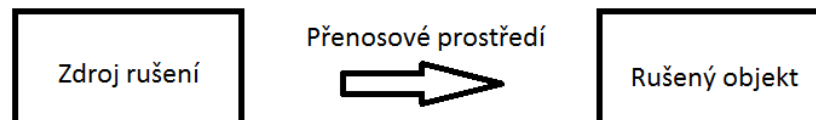
1.3.4 Elektromagnetická odolnost

Elektromagnetická odolnost, též imunita neboli elektromagnetická susceptibilita, je schopnost zařízení fungovat bez chyb, nebo s přípustným vlivem v prostředí, ve kterém se nachází elektromagnetické rušení [4].

Problematicke elektromagnetického rušení i odolnosti se budu podrobně věnovat v dalších kapitolách.

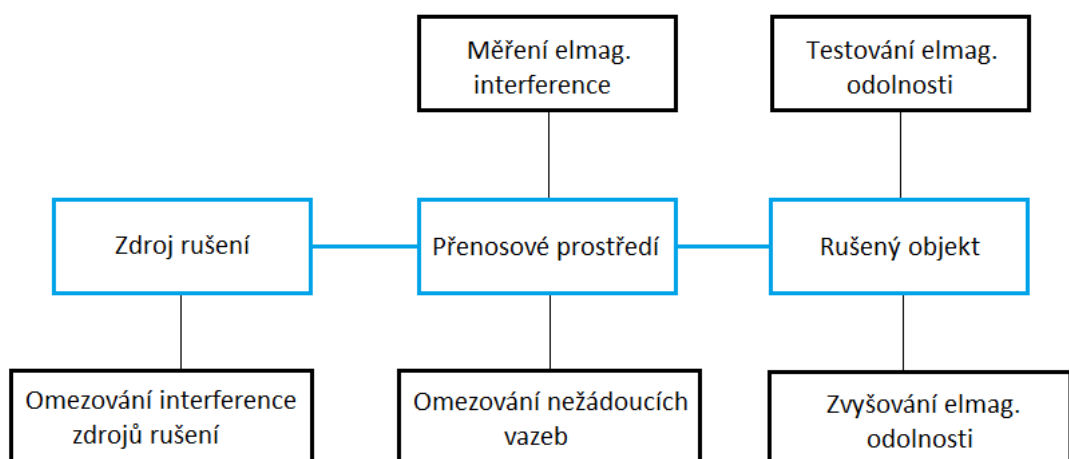
1.4 Cíle a problematika elektromagnetické kompatibility

Cílem elektromagnetické kompatibility je vytvořit systém, který by byl dokonale kompatibilní. To je samozřejmě nemožné, proto se v praxi snažíme pomocí různých prostředků alespoň tomuto stavu co nejvíce přiblížit. Při snaze o toto řešení se zaměřujeme na jednu z částí takzvaného základního řetězce elektromagnetické kompatibility, jejíž úpravou docílíme nejlepšího výsledku. To závisí na konkrétním případě a okolnostech. Přitom zvažujeme, že systém by byl dokonale kompatibilní v případě, že by se nám podařilo některou z oblastí řetězce zcela vyloučit. Ze základního řetězce elektromagnetické kompatibility vycházíme při zkoumání celé problematiky tohoto oboru i při testování elektromagnetického rušení a odolnosti [1].



Obrázek 3: Základní řetězec elektromagnetické kompatibility [1]

Problematika elektromagnetické kompatibility je zjednodušeně nastíněna na následujícím obrázku.



Obrázek 4: Problematika elektromagnetické kompatibility [2]

V praxi může být každý systém zdrojem rušení a zároveň i rušeným objektem, bereme ale v úvahu, že některá zařízení jsou odolnější a zároveň generují větší úroveň rušení a jiná zařízení jsou naopak citlivější a generují nižší úroveň rušení. Při zkoumání elektromagnetické kompatibility se vždy zvažují všechny části základního řetězce a obvykle se zkoumají vzájemné vazby více systémů. V tomto případě se postupuje tak, že jeden systém považujeme nejprve jako zdroj rušení a při dalším zkoumání jako rušený objekt [1].

1.4.1 Popis základního řetězce elektromagnetické kompatibility

Z obrázku (3) je patrné, že základní řetězec je složen ze tří hlavních částí.

1. Zdroj vyzařující elektromagnetické rušení.

Tato část řetězce se zabývá otázkou vzniku elektromagnetického rušení, jeho charakteru a intenzity. Mezi typické zdroje rušení patří například: polovodičové měniče, motory, spínací zařízení, tepelné a světelné spotřebiče, oscilátory, elektrostatické výboje [1].

2. Vazební cesty mezi zdrojem rušení a rušeným zařízením.

Střední část řetězce se zabývá přenosovým prostředím, vazbami mezi zdrojem rušení a rušeným objektem. Vazební cesty mohou být například: napájecí vedení, vzdušný prostor, signálové a datové vodiče [1].

3. Rušeno zařízení, které je citlivé na elektromagnetické rušení.

Oblast rušeného objektu zkoumá elektromagnetickou odolnost zařízení, popisuje typy rušení a jejich specifické účinky na testované zařízení. Mezi citlivá zařízení, která jsou často rušena, patří například počítače, řídicí a automatizační systémy, rozhlasové a televizní přijímače, měřicí technika či přenosové systémy [1].

2 Elektromagnetické rušení

Elektromagnetické rušení (electromagnetic disturbance) je podle normy ČSN EN 1000-1-1 definováno:

Jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit činnost přístroje, zařízení, nebo systému, anebo nepříznivě ovlivnit živou nebo neživou hmotu [7].

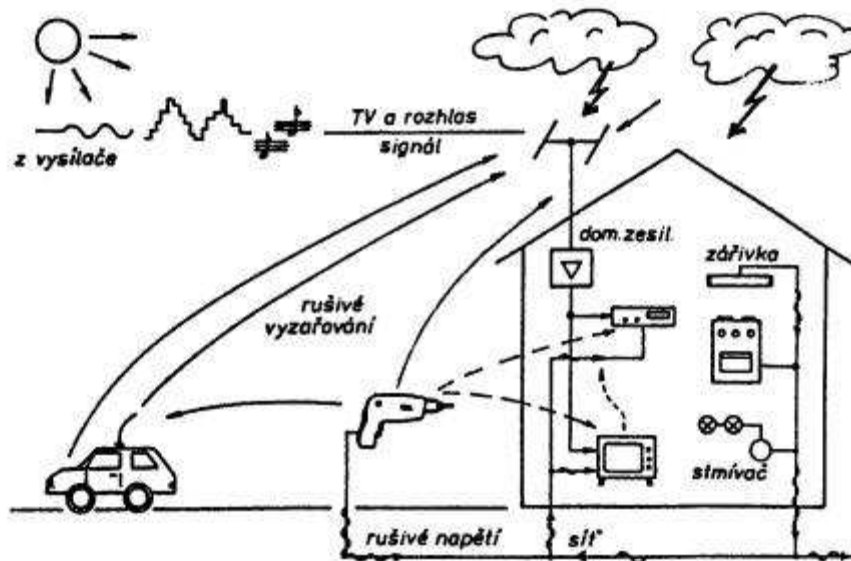
Elektromagnetická interference (EMI) je zhoršení funkce zařízení způsobené elektromagnetickým rušením. Zhoršení znamená nežádoucí odchylku od provozních vlastností zařízení. „Disturbance“ a „interference“ se často používají pro stejný význam, nicméně se dá říct, že rušení (disturbance) je příčina a interference je následek [7].

Samotná existence elektromagnetického rušení, jako zhoršení činnosti zařízení nám dává nutnost zvažovat elektromagnetickou kompatibilitu, neboť bez zhoršení činnosti zařízení by nebylo nutné zabývat se touto problematikou.

Elektromagnetické rušení může nežádoucím způsobem ovlivňovat funkční bezpečnost zařízení nebo systému. Elektromagnetická kompatibilita se zabývá posuzováním funkční bezpečnosti systému, aby nedocházelo k překročení tolerovatelného rizika, způsobeného tímto jevem.

2.1 Zdroje elektromagnetického rušení

Zdroje elektromagnetického rušení nazýváme interferenční zdroje. Jsou to zařízení, přístroje, nebo systémy, které vyzařují potenciální rušivé napětí, proudy nebo pole. Zdrojem elektromagnetického rušení je vlastně téměř každý elektrotechnický systém. V oblasti zdrojů elektromagnetického rušení se zabýváme hlavně způsoby vzniku rušení, jeho charakterem a intenzitou. Interferenční zdroje můžeme pro jednodušší popis problematiky elektromagnetického rušení rozdělit podle několika kritérií [4].



Obrázek 5: Rušivé vlivy působící v běžném životě [21]

2.2 Členění zdrojů elektromagnetického rušení

Základní způsob dělení interferenčních zdrojů je podle jejich původu na přirozené a uměle vytvořené [4].

2.2.1 Přirozené rušení

Přirozené, neboli přírodní zdroje rušení jsou taková rušení, která nevznikají lidskou technickou činností. Zdrojem takového rušení jsou zejména elektrické výboje v ovzduší, prudké změny zemského magnetického i elektrického pole. Další významný zdroj přirozeného rušení je působení kosmických těles [4].

2.2.2 Uměle vzniklé rušení

Uměle vzniklá rušení vznikají technickou činností člověka. Těchto rušení je velmi mnoho a je možné dále je dělit podle nejrůznějších kritérií například podle užitečnosti rušivého signálu na funkční a nefunkční rušení. Další možností dělení je podle šířky pásma na širokopásmová rušení a úzkopásmová, podle kmitočtu na nízkofrekvenční do 10 kHz a vysokofrekvenční nad 10 kHz, kam patří většina rušivých signálů. Jedou z nejvýhodnějších možností dělení umělých rušivých signálů, je dělení podle časového průběhu rušivého signálu na impulzní, spojitě a kvazi-impulzní, které je kombinací obou, nebo na šum, impulzy a přechodné jevy [4].

2.2.2.1 Funkční/ nefunkční rušivé signály

Rušivý signál je zde ve skutečnosti funkčním signálem nějakého systému, například vysílače. Tento funkční, užitečný signál přitom může být rušivým pro jiná zařízení. Rušivé signály, které nejsou základem funkce nějakého systému, jsou naopak označovány jako nefunkční signály [4].

2.2.2.2 Širokopásmové/úzkopásmové rušivé signály

Naprostá většina rušivých signálů má širokopásmový charakter, o úzkopásmovém rušení mluvíme zejména o funkčních rušivých signálech [4].

2.2.2.3 Nízkofrekvenční/vysokofrekvenční rušivé signály

Nízkofrekvenční rušivé signály můžeme dále rozdělit na akustické a energetické, kde akustické rušení působí v pásmu do 10kHz a ovlivňuje zejména funkci přenosových informačních technologií, jako například telefon, nebo rozhlas. Energetické rušení se projevuje v pásmu od 0 Hz do 2 kHz, způsobuje zkreslení napájecího napětí energetických sítí. Zdrojem tohoto rušení může být každá nelineární zátěž [4].

2.2.2.4 Dělení podle povahy rušivého signálu

Šum je jednou z možností tohoto dělení, projevuje se hlavně účinkem na tvar průběhu napětí. Jeho příčinou mohou být například motory. Další možností jsou impulsy, ty vznikají díky kontaktním spínacím procesům a superponují se na napětí jako kladné, nebo záporné špičky. Poslední jsou přechodné jevy, což jsou náhodné děje projevující se zejména v obálce křivky napětí. Bývají vyvolány náhlou změnou zátěže [1].

2.3 Přehled rušivých vlivů

V následujícím přehledu je zaznamenána většina elektromagnetických rušivých jevů, rozdělených podle frekvence a způsobu šíření rušení. Elektromagnetická rušení se mohou šířit dvěma způsoby a to buď vyzařováním, nebo po vedení.

a) Nízkofrekvenční rušivé jevy šířené vedením:

- Harmonické, meziharmonické
- Krátkodobé poklesy a přerušení napětí
- Nesymetrie napětí
- Kolísání napětí
- Změny síťového kmitočtu
- Indukovaná nízkofrekvenční napětí
- Stejnoseměrná složka ve střídavých sítích

b) Nízkofrekvenční rušivé jevy šířené vyzařováním:

- Magnetická pole
- Elektrická pole

c) Vysokofrekvenční rušivé jevy šířené vedením:

- Spojitá napětí nebo proudy šířená přímou vazbou nebo indukci
- Jednosměrné přechodné jevy
- Oscilační přechodné jevy

d) Vysokofrekvenční rušivé jevy šířené vyzařováním:

- Magnetická pole
- Elektrická pole
- Elektromagnetická pole
 - Spojité vlny
 - Přechodné jevy

e) Jevy elektrostatického výboje

f) Elektromagnetický impulz ve velkých výškách (uvažuje se při zvláštních podmínkách)

[8]

2.4 Popis některých rušivých jevů

2.4.1 Lokální elektrostatické výboje

Lokální elektrostatické výboje (ESD) jsou zdroje rušení, které se, s nárůstem počtu integrovaných obvodů v elektrických zařízeních, stávají velmi nebezpečnými. Mají sice nízkou energii, ale jejich napětí může dosáhnout až několika desítek kV, což je právě pro citlivé integrované obvody velmi nebezpečné. Tyto elektrostatické výboje mohou vzniknout při tření šatů vyrobených ze syntetických tkanin, náboj se pak při doteku vybíjí do zařízení. Přestože zařízení nemusí být hned při tomto výboji zničeno, může dojít k částečnému poškození obvodů, které vede ke snížení životnosti součástky, nebo celého zařízení [2].

2.4.2 Atmosférické výboje

Bleskové výboje způsobují vznik strmého elektromagnetického impulsu (LEMP). Tento impuls se může projevovat až destrukčními účinky a to nejen v místě zasaženém ale i ve vzdáleném. V praxi můžeme tyto zdroje rušení dělit podle místa zásahu blesku na přímé a nepřímé údery blesků do budov. Přímý úder blesku do budovy vyvolá rázový impuls, který je sveden bleskosvodem do země, zároveň se však může uzavírat i přes kovové části budovy a protékat v blízkosti elektronických zařízení. Rázový impuls může být zaveden do budovy prostřednictvím síťového vedení NN, nebo VN. V tomto případě mluvíme o nepřímém úderu blesku. Jeho účinky závisí zejména na přepěťových ochranách umístěných na vstupu vedení do budovy [2].

2.4.3 Nukleární elektromagnetický impuls

Tento rušivý impuls vzniká při explozi jaderné nálože, jeho rozsah závisí na velikosti nálože a na výšce exploze nad zemí. Podobně jako u atmosférického výboje zde dochází ke vzniku velmi strmého a výkonného elektromagnetického impulsu, který ovlivňuje elektrotechnická zařízení až do stádia destrukce. Jeho rušivé účinky jsou ve srovnání s účinky bleskového výboje mnohem vyšší [2].

2.4.4 Rušení v energetických sítích

V energetických sítích působí celá řada rušivých vlivů, například vysílače HDO, které vysílají impulzní signály, zářivková osvětlení, obrazovky a mnoho dalších. Nejdůležitějším rušením jsou však složky vyšších harmonických síťového signálu 50Hz. Tyto harmonické pak na nelineárních impedancích sítě vyvolávají vznik dalších harmonických. Vlivem kapacity a indukčnosti vedení dále při zapínání dochází často ke vzniku vysokofrekvenčních oscilací. U sítí NN často vznikají vysokonapěťové impulsy a to díky činnosti spínacích prvků jako jsou relé, nebo stykače. Další významné rušení vzniká na usměřovačích diodového typu, nebo v případě tyristorového řízení výkonových zařízení. Vznikají zde periodicky se opakující impulsy [2].

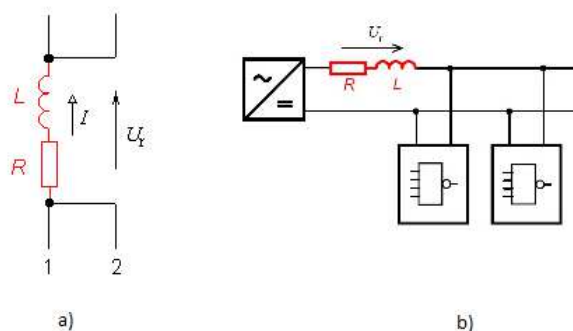
3 Mechanismy přenosu elektromagnetického rušení

Ze základního řetězce elektromagnetické kompatibility je patrné, že elektromagnetické rušivé vlivy působí na rušená zařízení prostřednictvím přenosových cest. Tyto přenosové cesty můžeme popsat podle média, kterým se rušení šíří například vzduchem, zemněním, kabely, stínícími materiály a mnoha dalšími. Pro lepší pochopení samotného principu přenosu rušivého signálu je však vhodné popsat přenosové cesty pomocí jejich fyzikálního principu. V tomto případě rozlišujeme čtyři základní principy přenosu, a to:

- *Galvanickou vazbou*
- *Kapacitní vazbou*
- *Induktivní vazbou*
- *Vyzařováním elektromagnetického pole*

3.1 Galvanická vazba

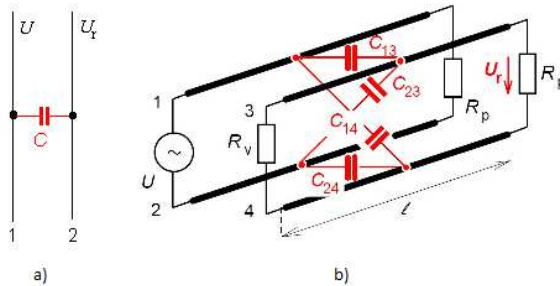
Tato vazba vzniká galvanickým spojením dvou elektrotechnických systémů, to znamená, že dvě různá zařízení mají část elektrických obvodů společnou. Typicky se jedná o společné napájení, nebo uzemňovací systém. Samotná vazba se dá ve schématu nahradit sériovou kombinací rezistoru R a indukčnosti L . Účinky galvanické vazby je možné omezit použitím oddělovacích transformátorů, nebo optočlenů k oddělení elektrických obvodů. Další způsob minimalizace vazby je dostatečně dimenzovat společné zemnicí vodiče, nebo různá zařízení vybavit vlastními napájecími zdroji [2][3].



Obrázek 6: a) Základní princip galvanické vazby b) Příklad rušivého působení společným napájením [22]

3.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká účinkem parazitních kapacit mezi souběžnými vodiči, nebo kapacitním působením různých částí konstrukce. Vzniku této vazby se dá zabránit užitím stíněného přívodu, kdy rušivý proud protéká stíněním [2].



Obrázek 7: Základní principy kapacitní vazby [22]

3.3 Induktivní vazba

Tato vazba je způsobena magnetickým polem, které vzniká proudem protékajícím vodičem. Elektrické obvody mohou vytvářet časově proměnné magnetické pole a tím nežádoucím způsobem ovlivnit jiné elektrické obvody nacházející se v tomto poli. Vazba může být omezena například užitím stínění, nebo vhodnou konfigurací obvodů, aby došlo k minimalizaci vzájemné indukčnosti M , nejjednodušším způsobem je zaručit co největší vzdálenost obou obvodů [2].

3.4 Vyzařování elektromagnetického pole

Elektromagnetické pole se vyjadřuje intenzitou elektrického pole E a intenzitou magnetického pole H . K vazbě vyzařováním elektromagnetického pole dochází mezi obvody, které vyzařují a absorbují elektromagnetickou energii. Elektromagnetické vlny šířící se prostorem mohou indukovat ve vodičích rušivé napětí. Typicky se projevuje u rádiových přijímačů. K omezení této vazby se užívají stínící kryty, které se umísťují mezi zdroj elektromagnetického pole a rušený objekt [2].

4 Elektromagnetická odolnost

Jedna z hlavních oblastí problematiky elektromagnetické kompatibility je elektromagnetická susceptibilita, neboli odolnost (EMS). Elektromagnetická susceptibilita je velice důležitá, protože nejsme schopni odstranit veškeré zdroje rušení, jako například rušení přírodní, nebo funkčními, užitečnými signály. Z tohoto důvodu je potřeba zajistit, aby bylo zařízení dostatečně odolné vůči všem rušivým signálům, které mohou pro dané zařízení připadat v úvahu [4].

4.1 Členění elektromagnetické odolnosti

V problematice elektromagnetické susceptibility uvažujeme dva druhy odolnosti:

- **Vnější elektromagnetickou susceptibilitu** – odolnost proti vnějším rušivým vlivům působících na systém [4].
- **Vnitřní elektromagnetickou susceptibilitu** – odolnost proti zdrojům rušení nacházejících se uvnitř samotného systému [4].

Vnější a vnitřní elektromagnetickou susceptibilitu posuzujeme dále z hlediska zkoumaných systémů, kdy musíme rozlišit tři základní systémy:

- **Rozsáhlé systémy** – jednotlivé části systému jsou od sebe geograficky vzdáleny. Jako vnější vlivy rušení zde působí zejména atmosférické vlivy [4].
- **Lokální systémy** – systémy v rámci jednoho areálu, budovy, místnosti. Zdrojem rušení zde mohou vlastní části systému, ale i ostatní elektrické systémy v areálu [4].
- **Systémy přístrojového typu** – všechny elektrické přístroje. Z vnějších vlivů zde zkoumáme jen ty, které jsou pro dané prostředí nejpravděpodobnější. Vnitřní odolnost závisí na návrhu daného přístroje [4].

4.2 Kritéria elektromagnetické odolnosti

Pro stanovení elektromagnetické odolnosti technického zařízení, nebo systému je nutné definovat meze narušení jeho funkce vlivem elektromagnetického rušení, to znamená stanovit kritéria elektromagnetické odolnosti. Tyto kritéria se běžně stanovují dvěma způsoby, kvantitativně a kvalitativně [4].

Kvantitativně znamená stanovit mez odolnosti dosažením určité úrovně hodnot příslušné veličiny. Je nutné stanovit takovou hodnotu veličiny, která nevyvolá nežádoucí změnu užitečného signálu. Tato hodnota se pak používá jako kritérium elektromagnetické odolnosti pro všechna zařízení stejného typu. Kvantitativní metoda se provádí zejména ve fázi vývoje zařízení, nebo systému [4].

Kritérium určené kvalitativně je pro uživatele daného zařízení mnohem důležitější, jedná se o takzvané „funkční kritérium“, kdy se posuzuje provozní stav a ovlivnění funkčnosti zařízení v závislosti na rušení. Výsledkem kvalitativní metody není přesná hodnota veličiny, ale posouzení funkčnosti zařízení při a po zkoušce. Existuje pět základních funkčních kritérií:

- **Funkční kritérium A** – Všechny funkce zařízení jsou vykonávány správně dle specifikace jak během zkoušky, tak i po jejím skončení [4].
- **Funkční kritérium B** – Zařízení pracuje podle specifikace, některé jeho části ale během zkoušky vybočí z povolené tolerance. Nenastává žádná změna provozního stavu, nebo ztráta dat. Po skončení zkoušky se musí všechny funkce zařízení samy vrátit do původních tolerancí, bez zásahu operátora [4].
- **Funkční kritérium C** – Jedna či více funkcí zařízení není během zkoušky plněna správně dle specifikace, nebo vůbec. Po skončení zkoušky se všechny funkce automaticky vrátí v původním rozsahu a kvalitě [4].
- **Funkční kritérium D** – Jedna či více funkcí zařízení není během zkoušky plněna správně dle specifikací, nebo vůbec. Po skončení zkoušky je nutný jednoduchý zásah operátora dle návodu, aby se všechny funkce obnovily v původním rozsahu a kvalitě [4].
- **Funkční kritérium E** – Jedna či více funkcí zařízení během i po skončení zkoušky není plněna správně dle specifikace. K obnovení všech funkcí je nutný profesionální zásah, tzn. oprava či výměna částí zařízení [4].

Tato funkční kritéria jsou v běžném použití nutná pro každé zařízení přesněji určit a definovat. Upřesnit chování konkrétního zařízení v jednotlivých stavech A,B,C,D,E.

V praxi se můžeme velmi často setkat se situací, kdy se jen obtížně posuzuje, které funkční kritérium zkoušené zařízení splňuje. To je způsobeno velmi podobnou definicí některých funkčních kritérii. Proto se ne vždy používá všech pěti funkčních kritérií, řada norem ČSN EN 61000-6 zabývající se elektromagnetickou odolností definuje dokonce pouze tři funkční kritéria a to právě z důvodu, že je jen obtížné definovat přesné funkční kritéria pro všechna zařízení, která se dle daných norem posuzují. Norma tedy rozlišuje pouze tyto následující funkční kritéria:

- **Funkční kritérium A** – Přístroj musí pracovat nepřetržitě během zkoušky i po ní podle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti, nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván dle určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Není-li stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti, nebo dovolená ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a dále z toho, co může uživatel rozumně očekávat od přístroje, je-li užíván dle svého určení [19].
- **Funkční kritérium B** – Přístroj musí po zkoušce pracovat nepřetržitě dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti, nebo ztráta funkce pod úroveň stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván podle svého určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Během zkoušky je však dovoleno zhoršení činnosti. Není dovolena změna aktuálního provozního stavu, nebo ztráta dat. Není-li stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti, nebo přípustná ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a z toho co může uživatel rozumně očekávat, je-li přístroj užíván dle svého určení [19].
- **Funkční kritérium C** – Je dovolena dočasná ztráta funkce za předpokladu, že funkce je samoobnovitelná, nebo může být obnovena řízením [19].

Přístroj, který se stal vlivem zkoušky nezpůsobilým, nebo nebezpečným je následně považován jako přístroj, který zkoušce dle normy nevyhověl [19].

4.3 Metodika zkoušek elektromagnetické odolnosti

Z poznatků o elektromagnetické kompatibilitě vyplývá nutnost testování odolnosti zařízení před elektromagnetickým rušením a zároveň měřit úroveň emisí rušivých signálů. Při provádění těchto měření se postupuje podle postupů uvedených v příslušných normách, jde o normy řady ČSN EN 61000-4. Jedním ze základních parametrů zařízení je jeho spolehlivost a elektromagnetická odolnost patří v tomto případě k základním zjišťovaným parametrům. Pro dosažení požadované spolehlivosti by mělo být zařízení testováno dostatečným množstvím zkoušek, počet zkoušek se omezuje z ekonomických důvodů na přijatelné množství. Běžně používané zkoušky jsou například:

- *Typové zkoušky*
- *Výrobní zkoušky*
- *Zkoušky návrhu během vývoje*
- *Přejímací zkoušky*

[11]

Pro výběr zkoušky a jeho aplikaci na určité zařízení je nutné zvažovat mnoho faktorů, jako třeba podmínky prostředí, typ rušení, požadovanou spolehlivost zařízení, charakteristiku zařízení, ekonomickou situaci a mnoho dalších [11].

Výběr zkoušek se určuje velmi obtížně, postupuje se však podle příslušných norem, pokud jsou k dispozici pro dané zařízení a to s následující prioritou:

- *Specializovaná norma výroby*
- *Norma skupiny výrobků*
- *Kmenová norma*

[11]

4.3.1 Postup zkoušení elektromagnetické odolnosti

V případě zkoušení elektromagnetické odolnosti se zaměřujeme na poslední část základního řetězce elektromagnetické kompatibility, tzn. na rušený objekt. Zbylé dvě části řetězce zdroj rušení a přenosovou vazbu musíme pro účely zkoušky uměle vytvořit.

Zkoušení elektromagnetické odolnosti probíhá tedy v uměle vytvořeném prostředí, definovaném s ohledem na konkrétní zařízení. Zkoušením elektromagnetické kompatibility se zabývá řada norem ČSN EN 61000-4. Struktura zkoušek se podle této normy řídí následujícím postupem:

- *Stanovení zkušebních mezí a úrovní*
- *Popis zkušebního zařízení*
- *Popis zkušební sestavy*
- *Popis postupu zkoušky*
- *Vyhodnocení výsledků*
- *Protokol o zkoušce*

[11]

Pro měření odolnosti konkrétního zařízení je pak nutné určit tyto položky:

- *Rušivé vlivy v předpokládaném pracovním prostředí zkoušeného zařízení*
- *Stanovit možné brány vstupu rušivých signálů do zkoušeného zařízení*
- *Kategorie požadované odolnosti zkoušeného zařízení*
- *Určit příslušná funkční kritéria*

[2]

Určením těchto důležitých položek by se měli zabývat odborníci na problematiku elektromagnetické kompatibility, provozovatel a výrobce zařízení. Vhodné je specifikovat tyto požadavky ještě před zahájením vývoje zařízení.

4.4 Třídy elektromagnetické odolnosti

Kategorie požadované odolnosti závisí zejména na prostředí, v němž má zkoušené zařízení pracovat. Normy řady ČSN EN 61000-4 definují tato prostředí podle několika tříd odolnosti. Tyto třídy odolnosti odpovídají úrovni rušení, které se běžně v těchto prostorech vyskytují [11].

Třída odolnosti 1: Do této třídy patří zařízení, která pracují s nízkou úrovní elektromagnetického rušení. Jedná se o dobře chráněná prostředí.

Třída odolnosti 2: Zařízením, která pracují s mírnou úrovní rušení. Jedná se o běžná prostředí s mírnou úrovní rušení, například obchody, kanceláře.

Třída odolnosti 3: Jedná se o prostředí náročná na rušení, kde se předpokládá vysoká úroveň rušení.

Třída odolnosti X: Předpokládá se velmi vysoká úroveň rušení a zařízení musí tomuto rušení odolat, jde o nechráněná průmyslová prostředí s velmi vysokou úrovní rušení.

5 Kontrolní měření elektromagnetické imunity

Součástí této práce bylo i provedení kontrolního měření elektromagnetické imunity. Měření probíhalo v laboratořích fakulty elektrotechnické ZČU. Všechny provedené zkoušky a principy ověření elektromagnetické imunity jsou detailně popsány v kapitole 6. Kromě testů elektromagnetické imunity bylo na zkoušeném zařízení provedeno také měření emisí elektromagnetického rušení, výsledky tohoto měření jsou uvedeny v příloze A.

5.1 Popis zkoušeného zařízení

Testům odolnosti bylo podrobena zařízení určené ke sledování neelektrických veličin, jako je například teplota, nebo vlhkost. Přestože se nejedná o energetické zařízení, pracuje právě toto zařízení v blízkosti různých jiných energetických systémů a musí být schopno odolat rušivým vlivům těchto systémů.

5.1.1 Rozhraní testovaného zařízení

- *2x relé výstup*
- *4x vstup pro připojení kontaktů*
- *2xRJ11*
- *1xRJ45*

5.1.2 Vlastnosti a funkce testovaného zařízení

K zařízení lze připojit až 5 čidel a různých detektorů. Může vyhodnocovat teplotu, vlhkost, detekovat kouř, průsak vody, vstup do místnosti, otevření dveří atd. V případě sepnutí kontaktu je zařízení vybaveno dvěma relé výstupy, které mohou spínat jiná zařízení třeba klimatizace, nebo ovládat napájení jiných zařízení. Vzhledem k tomu, že zařízení pracuje jako malý server, je vybaveno konektorem RJ45 a pomocí ethernetového kabelu může být tedy připojeno do internetové sítě a případné změny a detekce může oznamovat odesláním emailové zprávy, zároveň toto rozhraní umožňuje nastavení hodnot senzorů pomocí grafického rozhraní. U zařízení existuje i možnost odeslání informativní SMS zprávy, k tomu je však nutný externí software.

5.1.3 Použití zkoušeného zařízení

Zkoušené zařízení má velké množství možných použití, může se uplatnit všude, kde je potřeba kontrolovat, nebo řídit nějaké systémy na základě vyhodnocení nejrůznějších okolností.

Typické možnosti aplikace testovaného zařízení:

- *Monitoring záložních zdrojů jako jsou UPS, nebo diesel-agregáty*
- *Optimalizace vytápění a klimatizace ve velkých budovách*
- *Dohled na klimatizace – teplota, únik kondenzované vody*
- *Řízení topení a klimatizace – v případě potřeby sepne topení, nebo chlazení*
- *Hlídání provozních podmínek – teploty, vlhkosti*

Své uplatnění najde i v IT technice, umožňuje vypnout, zapnout, nebo resetovat servery, také v zabezpečovací technice a protipožární ochraně.



Obrázek 8: Zkoušené zařízení

6 Principy ověřování elektromagnetické imunity

Kontrolní měření elektromagnetické imunity se provádělo na výše popsaném zařízení. Počet zkoušek odolnosti a jejich parametry byl určen podle kmenové normy ČSN EN 61000-6-2, která definuje odolnost pro průmyslová prostředí. Samotné zkoušky elektromagnetické imunity pak probíhaly podle příslušných norem řady ČSN EN 61000-4 a jsou podrobně popsány a vyhodnoceny v dalších bodech této kapitoly.

6.1 Zkouška odolnosti - vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole

Jde o zkoušku odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-3. Je prováděna z důvodu, že každé elektronické zařízení je jistým způsobem ovlivňováno elektromagnetickým zářením. Tato zkouška se v dnešní době stává velmi důležitou, protože v moderním světě dochází k nasycení všech rozhlasových a televizních pásem, zároveň přibývá i počet používaných přenosných rádiových vysílačů a jiných vysokofrekvenčně vyzařujících přístrojů, pracujících na kmitočtu od 0,8-6 GHz [13].

Při zkoušce vyzařováním vysokofrekvenčního elektromagnetického pole je podstatnou veličinou intenzita elektromagnetického pole. Příslušná hodnota této veličiny odpovídá patřičné zkušební úrovni (viz tab.). Podle normy není nutné aplikovat jednu zkušební úroveň na celé kmitočtové pásmo, které je při zkoušce běžně od 80 MHz až do 6 GHz. Podle zkoušeného výrobku je nutné určit kmitočtové rozsahy a k nim příslušné zkušební úrovně. Intenzity pole jsou v tabulce uvedeny jako nemodulované hodnoty signálu nosné, při zkoušce je však tento signál modulován sinusovou vlnou 1kHz s hloubkou modulace 80% tak, aby bylo simulováno skutečné ohrožení [13].

6.1.1 Zkušební zařízení a popis zkušeben

Z důvodu odstranění vnějších nekontrolovatelných polí je vhodné tuto zkoušku provádět ve stíněných absorpčních komorách, takzvaných bezodrazových komorách (viz obrázek 9), ty navíc zabraňují i nežádoucímu rušení okolí během zkoušky. Bezodrazové komory musejí být pro měření konkrétního zařízení dostatečně velké, aby bylo možné udržet homogenní pole dostatečné velikosti. Dále musí být zajištěno, aby vodiče vstupující do zkušebního prostoru dostatečným způsobem zeslabovaly emise šířené vedením i zářením. Velice důležitým zařízením jsou vysokofrekvenční signální generátory, které musejí být schopny překrýt

požadované kmitočtové pásmo. Pro vytvoření elektromagnetického pole je nutný anténní systém, který bude vyhovovat kmitočtovým požadavkům. V praxi se běžně používá více antén, každá pro určitý kmitočtový rozsah [13].

1. **Bikónická (dvoukuželová) anténa.** Používá se pro kmitočtové pásmo 26-200MHz a skládá se z koaxiálně vinutého symetrizačního členu a trojrozměrného prvku [13][20].

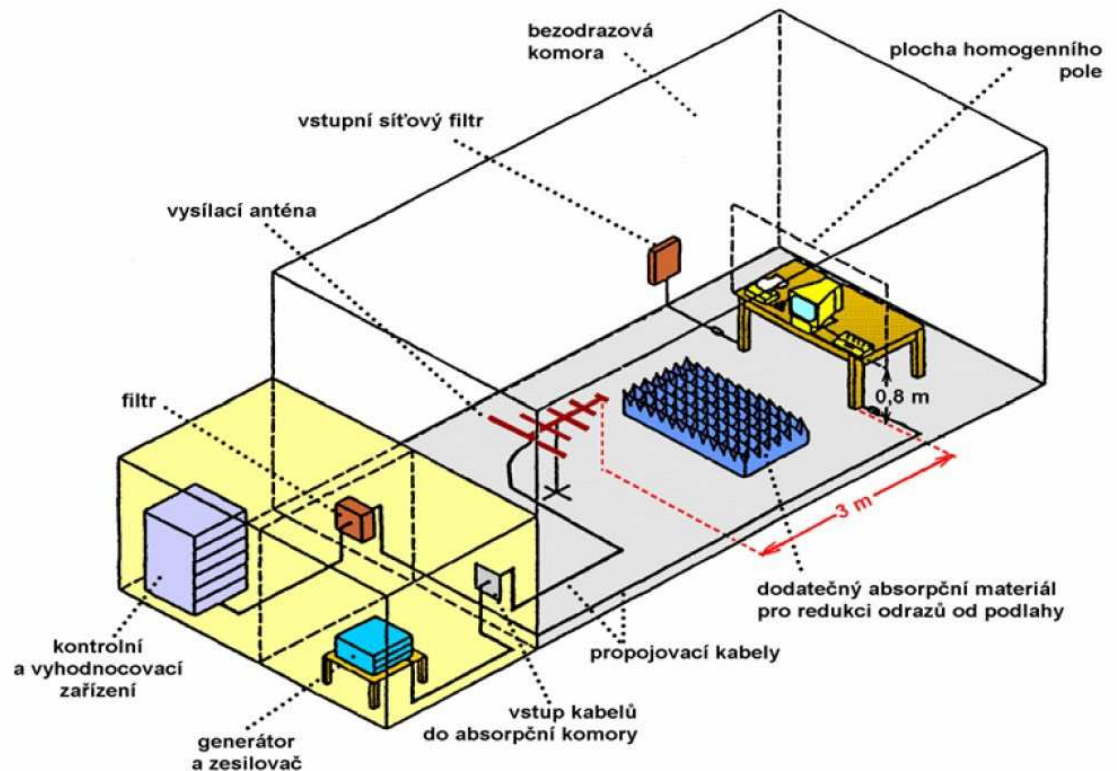
2. **Logaritmicko-periodická anténa.** Jedná se o směrovou soustavu dipólů různých délek, tato širokopásmová anténa má poměrně vysoký zisk, používá se pro signály od 200-1000MHz [13][20].

3. **Trychtýřová anténa, anténa s dvojitým vlnovodem.** Tyto antény produkují lineárně polarizované elektromagnetické pole. Jsou používány pro vysoké frekvence, typicky více než 1GHz [13].

Antény je potřeba napájet, proto jsou dalším požadovaným zařízením zkušebny výkonové zesilovače, které slouží k zesílení signálu antény vytvářející potřebnou úroveň pole. Pro správnou funkci zkušebny jsou nutná i další zařízení a přístroje, různé filtry například filtry EMI, dolní a pásmové propusti, zařízení k záznamu úrovní výkonu, izotropní čidla pole a další [13].



Obrázek 9: Měření v bezodrazové komoře



Obrázek 10 : Nákres zkušební bezodrazové komory [23]

6.1.2 Postup zkoušky

Během zkoušky je zkoušené zařízení umístěno na nevodivém stole ve výšce 0,8m nad zemí a ve vzdálenosti 3m od anténního systému. Postup zkoušky je pak následující:

- *Ověření referenčních podmínek laboratoře*
- *Předběžné ověření správné činnosti zařízení*
- *Provedení zkoušky*
- *Vyhodnocení výsledků zkoušky [13]*

6.1.2.1 Ověření referenčních podmínek laboratoře

Pro správné měření je nutné provádět zkoušku při specifikovaných klimatických a elektromagnetických podmínkách. Obecně musejí být v laboratoři klimatické podmínky v mezích zkoušeného i zkušebního zařízení. Elektromagnetické podmínky laboratoře pak musejí být takové, aby zaručily správnou funkci zkoušeného zařízení a neovlivnily výsledky zkoušky [13].

6.1.2.2 Provedení zkoušky

Před vlastní zkouškou je nutné ověřit funkce zkoušeného zařízení dle technické specifikace. Zkoušené zařízení se musí testovat při normálních provozních podmínkách. Zkouška se podle normy provádí na základě plánu zkoušky, který musí specifikovat například:

- *Velikost zkoušeného zařízení*
- *Reprezentativní provozní podmínky zkoušeného zařízení*
- *Typy použitých antén*
- *Rozsahy kmitočtu, prodlevu a kmitočtový krok*
- *Zkušební úroveň, která má být použita*
- *Funkční kritéria*
- *Popis metod vyšetřování funkce zkoušeného zařízení*

Samotná zkouška probíhá tak, že se zkoušené zařízení, umístěné podle předepsaných instrukcí, ozařuje v kmitočtovém pásmu s patřičnou zkušební úrovní, ze všech stran a při změnách polarizace antény. Vyhodnocení zkoušky pak probíhá na základě sledování funkce zkoušeného zařízení během celé doby ozařování. Ze zdravotních důvodů se nedoporučuje sledovat funkci zkoušeného zařízení přímo ve zkušebním prostoru, kde bychom byli vystaveni působení vysokofrekvenčního pole. Přístroje na vyhodnocení funkce se tedy umísťují mimo oblasti, kde působí toto pole.

6.1.2.3 Vyhodnocení zkoušky

Výsledky zkoušky jsou klasifikovány z hlediska funkčnosti zkoušeného zařízení během samotné zkoušky. Sleduje se ztráta funkce, nebo zhoršení provozních vlastností daného zařízení, a to na základě úrovně funkce, kterou definuje výrobce, nebo žadatel o zkoušku. Doporučená klasifikace je následující:

- *Normální funkce v mezích stanovených výrobcem*
- *Dočasná ztráta funkce, nebo zhoršení provozu, které přestane po skončení rušení a sama obnoví normální funkce bez zásahu operátora*
- *Dočasná ztráta funkce, nebo zhoršení provozu, vyžaduje zásah operátora*
- *Ztráta funkce nebo zhoršení provozu, které není obnovitelné*

[13]

6.1.3 Zkušební úrovně

Norma ČSN EN 61000-4-3 definuje tyto zkušební úrovně a intenzity elektromagnetického pole (viz tabulka 1).

Zkušební úroveň	Intenzita zkušebního pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
X	Zvláštní

Tabulka 1: Zkušební úrovně podle ČSN EN 61000-4-3 [13]

Zkušební úroveň X je neomezená zkušební úroveň a jí přidružená intenzita pole může mít jakoukoliv hodnotu. Může být dána v normě výrobku [13].

6.1.4 Praktické provedení zkoušky podle normy ČSN EN 61000-4-3

Testované zařízení bylo podrobeno výše popsané zkoušce odolnosti podle ČSN EN 61000-4-3. Zkouška probíhala v bezodrazové komoře fakulty elektrotechnické ZČU (zkouška je zachycena na obrázku 9).

Zařízení bylo umístěno dle normy na nevodivý stůl ve výšce 0,8m nad zemí, ve vzdálenosti 3m od antény a bylo ozařováno vysokofrekvenčním signálem modulovaným sinusovou vlnou o kmitočtu 1kHz s hloubkou modulace 80% [13].

Kmitočtové rozsahy a příslušné úrovně intenzity elektromagnetického pole byly stanoveny podle kmenové normy ČSN EN 61000-6-2 Odolnost pro průmyslová prostředí. Konkrétní hodnoty kmitočtových rozsahů a intenzit elektromagnetického pole jsou zaznamenány v kapitole 6.1.5.

6.1.5 Vyhodnocení kontrolního měření podle ČSN EN 61000-4-3

. Podle specifikace zařízení a konzultace s výrobcem lze detekovat ztrátu funkce, nebo zhoršení provozu zařízení pomocí LED diod umístěných na viditelné části zařízení. Sledování zkoušeného zařízení se tedy z důvodu posouzení jeho funkčnosti provádělo pomocí kamerového systému uvnitř bezodrazové komory. Po skončení zkoušky bylo zařízení připojeno k počítači, za účelem ověření jeho správné funkce během zkoušky.

Norma ČSN EN 61000-6-2 udává hodnotu intenzity elektromagnetického pole v pásmu 2 – 2,7 GHz o velikosti 1 V/m, po konzultaci s výrobcem byla tato hodnota zvýšena na hodnotu 3 V/m, což umožnilo proměřit celé pásmo 1,4 – 2,7 GHz v jediném kroku. Výsledky měření můžete vidět v následujících tabulkách

Frekvenční interval	80 MHz -1000 MHz	1,4 GHz - 2 GHz	2 GHz - 2,7 GHz
Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	3 V/m	3 V/m
polarizace antény	Vertikální	Vertikální	Vertikální
Výsledek zkoušky	A	A	A

Tabulka 2: Výsledky zkoušení odolnosti zařízení podle ČSN EN 61000-4-3, vertikální polarizace antény

Frekvenční interval	80 MHz -1000 MHz	1,4 GHz - 2 GHz	2 GHz - 2,7 GHz
Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	3 V/m	3 V/m
polarizace antény	Horizontální	Horizontální	Horizontální
Výsledek zkoušky	A	A	A

Tabulka 3 : Výsledky zkoušení odolnosti zařízení podle ČSN EN 61000-4-3, horizontální polarizace antény

Z výsledků je patrné, že zkoušené zařízení vyhovělo zkoušce odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-3. Zařízení nevykazovalo žádné zhoršení své funkce během celé zkoušky a splňuje tedy funkční kritérium A.

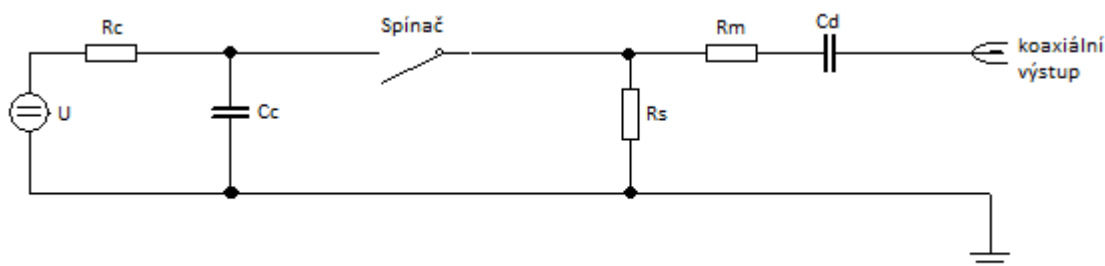
6.2 Zkouška odolnosti - rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů

Zkouška odolnosti definovaná normou ČSN EN 61000-4-4 simuluje rušení, které v praxi vzniká při kontaktním spínání zátěží s malým obsahem akumulované energie v kapacitách a indukčnostech. Rušení má přechodný charakter a velkou četnost výskytu [14].

Během vlastní zkoušky jsou všechny vstupy a výstupy zkoušeného zařízení vystaveny skupině impulzů obsahujících velký počet rychlých přechodných jevů. Charakteristické vlastnosti těchto impulzů jsou vysoká amplituda, krátká doba náběhu, vysoká frekvence opakování a nízká energie přechodových jevů.

6.2.1 Zkušební zařízení a sestava

Nejdůležitějším zařízením potřebným pro provedení této zkoušky je generátor skupiny impulzů. Zjednodušené schéma generátoru skupiny impulzů je zobrazeno na obrázku 11.



Obrázek 11: Zjednodušené schéma generátoru skupiny impulzů [14]

Generátor je složen z následujících součástí:

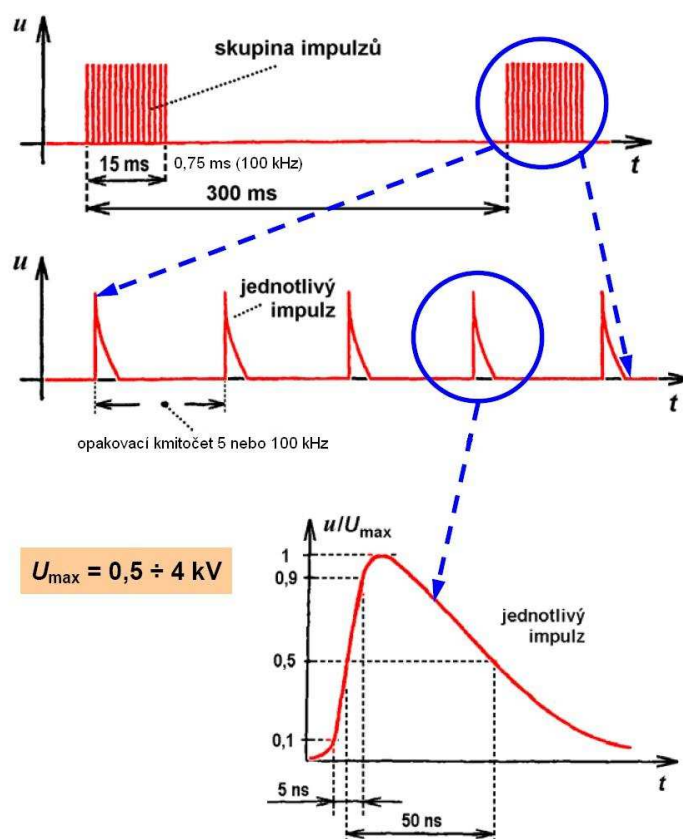
- U – vysokonapěťový zdroj
- R_c – nabíjecí rezistor
- C_c – kondenzátor akumulující energii
- R_s – rezistor tvarující dobu trvání impulzu
- R_m – rezistor přizpůsobující impedanci
- C_d – blokovací kondenzátor
- Spínač vysokého napětí

[14]

Správná konfigurace jednotlivých prvků formuje požadovanou náběžnou dobu.

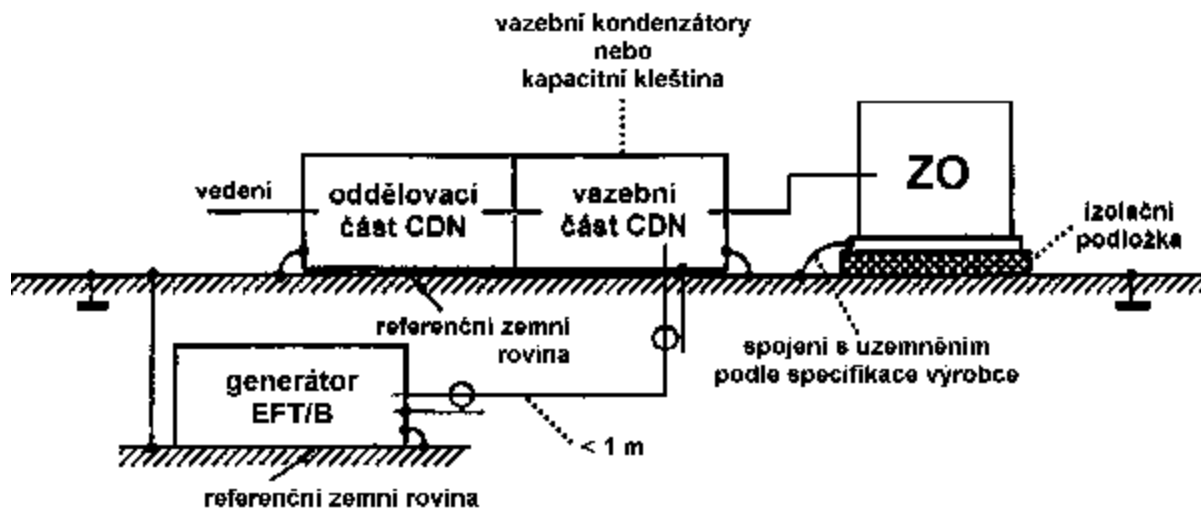
6.2.1.1 Vlastnosti generátoru skupiny impulzů

Generátor musí být schopen pracovat při spojení nakrátko a to bez poškození. Rozsahy výstupních napětí závisí na zatížení. Při zatížení 50Ω musí být rozsah výstupního napětí alespoň $0,125\text{kV} - 2\text{kV}$, při zatížení 1000Ω pak musí být alespoň $0,24\text{kV} - 3,8\text{kV}$. Na generátor je požadována schopnost kladných i záporných impulzů. Výstup je koaxiální (50Ω). Perioda skupiny impulzů je $300\pm 60\text{ms}$, tvar vlny impulzu (znázorněn na obrázku 12) má pro zatížení 50Ω dobu náběhu $5\pm 1,5\text{ns}$ s šířkou pulzu $50\pm 15\text{ns}$, pro zatížení 1000Ω je doba náběhu $5\pm 1,5\text{ns}$ a šířka pulzu 50ns s tolerancí -15ns a až $+100\text{ns}$. Jako opakovací kmitočet se používá 5kHz , nebo 100kHz . 100kHz je bližší reálnému rušení v praxi se však častěji používá kmitočet 5kHz , pro konkrétní výrobek by měly výrobní komise určit příslušný kmitočet [14].



Obrázek 12: průběh rychlých přechodných jevů a tvar vlny impulzu [24]

Zkušební sestava musí podle normy obsahovat referenční zemní rovinu, vazební zařízení, v případě nutnosti oddělovací síť a zkušební generátor. Viz obrázek 13



Obrázek 13: Schéma zkušebního pracoviště podle ČSN EN 61000-4-4 [25]

6.2.2 Zkušební úrovně

Norma ČSN EN 61000-4-4 definuje pro použití na napájecí, ovládací, zemnicí a signálové vstupy a výstupy tyto zkušební úrovně (viz tabulka 4):

Výstupní zkušební napětí naprázdno a opakovací kmitočet impulzů				
Úroveň	Vstupy/výstupy napájení, vstupy/výstupy uzemnění (PE)		Signálové a ovládací vstupy/výstupy	
	Vrcholové napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]	Vrcholové napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]
1	0,5	5 nebo 100	0,25	5 nebo 100
2	1	5 nebo 100	0,5	5 nebo 100
3	2	5 nebo 100	1	5 nebo 100
4	4	5 nebo 100	2	5 nebo 100
X	Speciální	Speciální	Speciální	Speciální

Tabulka 4: Zkušební úrovně definované normou 61000-4-4 [14]

Úroveň X může být jakákoliv úroveň a může být stanovena pro konkrétní zařízení [14].

6.2.3 Průběh zkoušky podle normy ČSN EN 61000-4-4

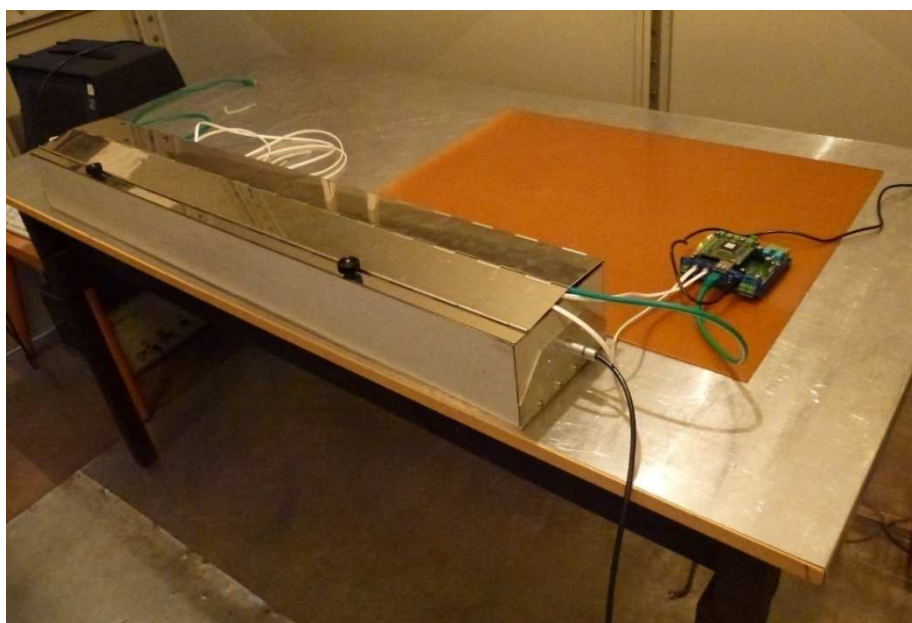
U zkoušeného zařízení bylo provedeno testování vstupů/výstupů napájení i čidel. Pro testování vstupů/výstupů napájení byla použita vazební/oddělovací síť připojená mezi generátor a adaptér napájení zkoušeného zařízení. Vodiče čidel i datové vodiče byly testovány pomocí kapacitní kleštiny. Zařízení bylo testováno pro obě polarity impulzů. Průběh zkoušky můžete vidět na obrázku 14 [14].

Zkouška musí probíhat při vhodných klimatických i elektromagnetických podmínkách. Z toho důvodu samotné zkoušky probíhají ve stíněných komorách, aby nedošlo k nežádoucímu ovlivnění zkoušeného zařízení vlivem elektromagnetického rušení z okolního prostředí. Klimatické podmínky musejí být takové, aby zaručily správnou činnost zkoušeného zařízení, pokud není normou stanoveno jinak [14].

Norma ČSN EN 61000-6-2 definuje parametry zkoušky pro zařízení pracující v průmyslovém prostředí. Tyto parametry jsou uvedeny v tabulce 5.

Zkušební napětí [kV]	doba náběhu/šířka pulzu [ns]	opakovací kmitočet [kHz]	
2	5/50	5	Síťový přívod (AC/DC adapter)
1	5/50	5	datové a signální vodiče

Tabulka 5: Parametry zkoušky podle ČSN EN 61000-6-2 [19]



Obrázek 14: Aplikace skupiny impulzů do vodičů testovaného zařízení pomocí kapacitní kleštiny

6.2.4 Vyhodnocení zkoušky

Výsledky zkoušek pro jednotlivé vstupy/výstupy zařízení jsou uvedeny v tabulce 6, všechny dílčí zkoušky vyšly pozitivně a testované zařízení tedy podle zkoušky odolnosti dle normy ČSN EN 61000-4-4 splňuje funkční kritérium A.

Testované vstupy/výstupy	Způsob vazby	Zkušební napětí [kV]	polarita	výsledek zkoušky
Vstup AC/DC síťového napájení, vodič L	vazební/oddělovací síť	2	+	A
		2	-	A
Vstup AC/DC síťového napájení, vodič N		2	+	A
2		-	A	
Připojení čidla konektor RJ11 (1)	Kapacitní kleštinou	1	+	A
Připojení čidla konektor RJ11 (2)		1	-	A
		1	+	A
Připojení ethernetového kabelu		1	-	A
		1	+	A
Připojení ethernetového kabelu		1	-	A
		1	+	A

Tabulka 6: Výsledky zkoušky odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-4

6.2.5 Použité přístroje

- Generátor EM TEST – UCS500
- Kapacitní kleština EM TEST – HFK

6.3 Zkouška odolnosti – rázový impulz

Zkouška odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-5 rázovým impulzem je zkouška, která simuluje rušení vznikající při atmosférických výbojích, nebo při spínacích pochodech v napájecí síti, kdy dochází ke vzniku přechodných jevů. Vzniklé impulzy jsou velmi nebezpečné díky jejich vysoké energii, která se může projevit i tepelnými účinky. Kmitočtový rozsah toho rušení je od 1kHz do 1MHz.

Atmosférické přechodné jevy mohou vznikat následujícími způsoby:

- *Přímý úder blesku – vznikají velké proudy, které při průchodu přes zemní odpor, nebo impedanci obvodu vytvářejí napětí.*
- *Nepřímý úder blesku - tj. úder mezi mraky, nebo do okolních objektů, vzniká elektromagnetické pole a do vodičů se indukuje napětí/proud.*
- *Průchod zemního proudu blesku, následkem přímého zemního výboje do společné zemní cesty uzemňovacího systému instalace.*

[15]

Spínací přechodné jevy v napájecí síti vznikají takto:

- *Spínáním kondenzátorových baterií*
- *Změnami zátěže v distribuční síti*
- *Rezonančními obvody spojenými se spínacími prvky*
- *Síťovými poruchami – zkratami, zemní spojení*

[15]

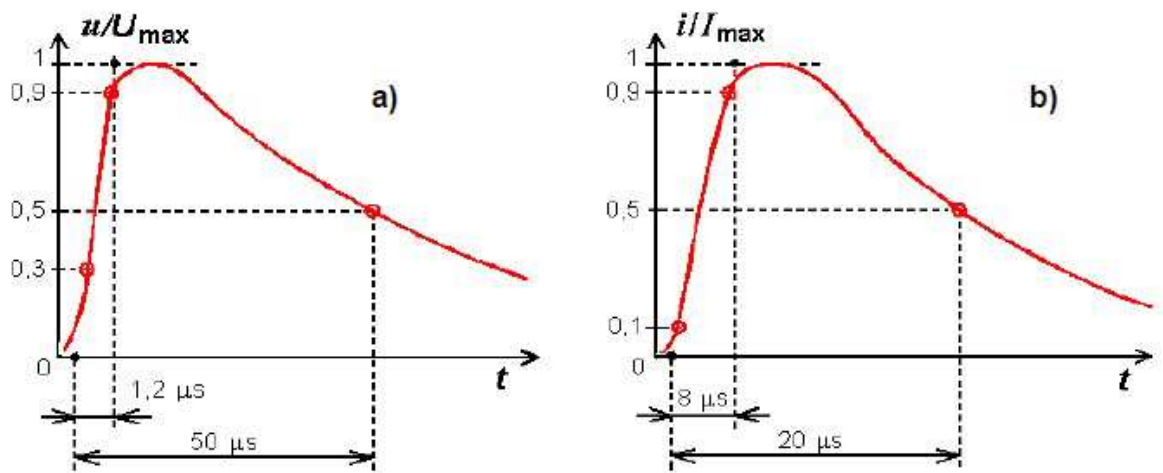
Zkušební generátory rázových impulzů musejí mít takové charakteristiky, aby mohly co nejlépe simulovat zmíněné rušivé jevy, nazývají se generátory kombinované vlny. Vytvářené impulzy vznikají skokovým vybitím kapacity do tvarovacího obvodu. Nejčastěji používaný generátor vytváří rázové impulzy následujících parametrů:

- *Doba náběhu napětí naprázdno je 1,2 μ s a doba „půltýla“ vlny 50 μ s s amplitudou až 4kV.*
- *Doba náběhu proudu nakrátko je 8 μ s, doba „půltýla“ vlny pak 20 μ s, amplituda proudu je až 2kA.*

[15]

Tvar rázového impulsu je zobrazen na obrázku 15, hodnoty napětí a proudů jsou uvedeny v tabulce 7 [15].

Další používaný je generátor kombinované vlny 10/700 μ s, kdy je 10 μ s doba náběhu napětí naprázdno, 700 μ s je doba poklesu na poloviční hodnotu napětí naprázdno, proud nakrátko má v tomto případě časy 5 μ s/320 μ s. Tento generátor se používá pro zkoušení vstupů/výstupů určených pro připojení symetrických komunikačních vedení [15].



Obrázek 15: tvar zkušebního signálu generátoru kombinované vlny, a) rázový impuls napětí naprázdno, b) rázový impuls proudu nakrátko [25]

hodnota napětí naprázdno +/- 10%	hodnota proudu nakrátko +/-10%
0,5 kV	0,25 kA
1 kV	0,5 kA
2 kV	1 kA
4 kV	2 kA

Tabulka 7: Vztah mezi vrcholovou hodnotou napětí naprázdno a vrcholovou hodnotou proudu nakrátko [15]

6.3.1 Zkušební úrovně

zkušební úroveň	zkušební napětí naprázdno +/- 10% [kV]
1	0,5
2	1
3	2
4	4
X	speciální

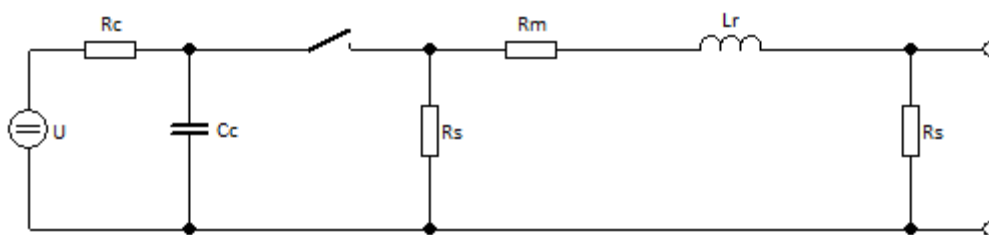
Tabulka 8: Zkušební úrovně definované normou ČSN EN 61000-4-5 [15]

6.3.2 Zkušební sestava

Příslušná norma udává následující části zkušební sestavy:

- *Zkoušené zařízení*
- *Pomocné zařízení, pokud je požadováno*
- *Kabely předepsaného typu a délek*
- *Vazební/oddělovací síť*
- *Generátor kombinované vlny*
- *Oddělovací/ochranné prostředky*
- *Referenční zem - požaduje se, jen pokud je zkoušené zařízení při běžném provozu připojeno na referenční zem*

[15]



Obrázek 16: Zjednodušené schéma generátoru kombinované vlny (1,2/50) [15]

Na obrázku 16 je znázorněno zjednodušené schéma generátoru kombinované vlny, skládá se ze zdroje vysokého napětí, nabíjecího rezistoru R_c , kondenzátoru akumulujícího energii C_c , rezistorů pro tvarování doby trvání impulzu R_s , indukčnosti pro tvarování náběžné doby L_r a rezistoru přizpůsobujícího impedanci R_m [15].

Generátory kombinovaných vln musí splňovat různé požadavky na jejich funkci. Musí umožňovat generování rázových impulzů kladné i záporné polarity, dále je nutná možnost fázového posuvu vztaheného k fázovému úhlu střídavého síťového napětí zkoušeného zařízení v rozsahu $0-360^\circ$ a to s tolerancí $\pm 10\%$. Dalším požadavkem je hodnota vrcholového výstupního napětí od 0,5kV do 4kV, rychlost opakování rázového impulzu nejméně jednou za minutu, velikost efektivní vstupní impedance $2\Omega \pm 10\%$ a v neposlední řadě zejména požadovaný tvar vlny rázového impulzu napětí i proudu (viz obrázek 13) [15].

Pro připojení zkoušeného zařízení ke generátoru kombinované vlny se využívají tzv. vazební/oddělovací sítě, ty se skládají z oddělovací sítě a vazebního prvku. Norma ČSN EN 61000-4-5 definuje několik vazebních/oddělovacích sítí a způsobů připojení ke zkoušenému zařízení například: vazební sítě pro napájecí obvody, vazební sítě pro propojovací vedení, vazební sítě pro vysokorychlostní komunikační vedení, vazební sítě používající bleskojistky pro vazbu na symetrická vedení. Výběr vhodné metody vazební/oddělovací sítě dále závisí na způsobu vazby, tzn. mezi vodiče, nebo mezi vodič a zem [15].

6.3.3 Postup zkoušky

Při kontrolním měření zkoušeného zařízení byla zkouška aplikována na vstupy/výstupy jeho síťového napájení. Pomocí kapacitní vazební sítě byl rázový impulz 1,2/50 přenesen na svorky síťového napájení zkoušeného zařízení. Při měření je nutné použít oddělovací síť, aby bylo zamezeno nežádoucího ovlivnění jiných zařízení, která mohou být připojena na stejné vedení [15].

Zkouška musí probíhat za referenčních klimatických a elektromagnetických podmínek, stejně jako je tomu u předešlých zkoušek (viz kapitola 6.1.2.1).

Samotná zkouška pak probíhá podle programu zkoušky, který definuje:

- **Zkušební úroveň**
- **Počet rázových impulzů – pět kladných a pět záporných impulzů, pokud není stanoveno jinak (pro střídavé napájení každý pro fázový posuv 0° , 90° , 180° a 270°)**
- **Doba mezi po sobě jdoucími impulzy jedna minuta nebo méně**
- **Reprezentativní provozní podmínky zkoušeného zařízení**
- **Místa, ve kterých jsou rázové impulzy aplikovány**

[15]

Podle kmenové normy ČSN EN 61000-6-2 bylo zkoušené zařízení testováno s vazbou mezi vodiče napájecího obvodu, s charakterem vlny 1,2/50 (8/20) μ s. Vrcholová hodnota napětí naprázdno byla 1kV, zkouška proběhla pro kladnou i zápornou polaritu rázových impulzů. Tyto zkušební impulzy byly na síťové napětí superponovány s fázovým posuvem 0° , 90° a 270° vůči fázovému úhlu síťového napětí, pro každý fázový posuv bylo generováno pět rázových impulzů s odstupem deset vteřin mezi po sobě jdoucími impulzy.

6.3.4 Vyhodnocení zkoušky

Během zkoušky nebylo zaznamenáno žádné zhoršení provozu zkoušeného zařízení. Podrobné výsledky jednotlivých měření jsou shrnuty v tabulce 9. Z výsledků je patrné, že zařízení ve zkoušce odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-5 uspělo a splňuje tedy funkční kritérium A.

Zkušební napětí [kV]	Fázový posun [°]	polarita impulzu	výsledek zkoušky
1	0	+	A
1	0	-	A
1	90	+	A
1	90	-	A
1	270	+	A
1	270	-	A

Tabulka 9: Výsledky zkoušky odolnosti rázovými impulzy

6.3.5 Použité přístroje

- Generátor EM TEST – UCS500

6.4 Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Na celou délku kabelů připojenou k instalovaným zařízením mohou působit rušivá elektromagnetická pole vyzařovaná vysokofrekvenčními vysílači. Zkouška odolnosti podle ČSN EN 61000-4-6 zkoumá odolnost testovaných zařízení na tento druh rušení. Přívodní vedení, komunikační, propojovací kabely a všechny ostatní pohyblivé vstupní a výstupní přívody elektrických a elektronických zařízení fungují jako pasivní anténní sítě, kde jejich délka může být několikanásobkem délky vlny, stejně tak rozměry samotného zařízení se srovnávají s délkou vyšetřované vlny. Zkoušky se provádějí pro rušení vzniklá elektromagnetickými poli od vysokofrekvenčních vysílačů v kmitočtovém pásmu 150kHz-80MHz, pro nižší kmitočty nejsou zkoušky požadovány. Při této zkoušce jsou testovaná zařízení vystavena rušením obsahujícím elektrická a magnetická pole, tato rušivá pole jsou následkem napětí a proudů vytvářených zkušební sestavou a jsou pomocí vhodných vazebních a oddělovacích prostředků injektována do vedení [4][16].

6.4.1 Zkušební úrovně

Úroveň	Úroveň napětí	
	U_0 [dB(μ V)]	U_0 [V]
1	120	1
2	130	3
3	140	10
X	zvláštní	

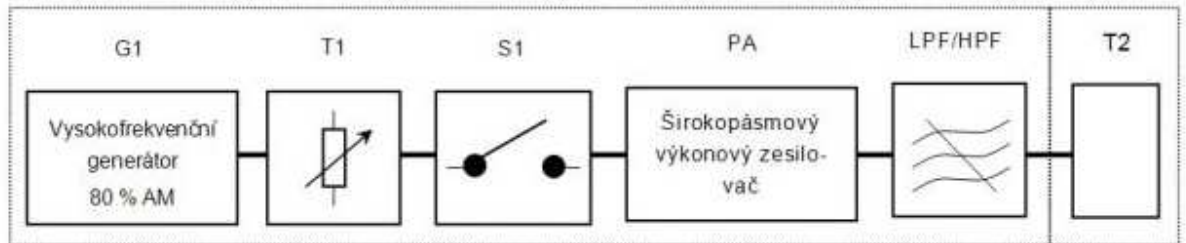
Tabulka 10: Zkušební úrovně podle normy ČSN EN 61000-4-6 [16]

6.4.2 Zkušební zařízení a sestava

Příslušná norma definuje umístění zkoušeného zařízení na izolační podložce ve výšce 0,1m nad referenční zemní rovinou a veškeré kabely připojené ke zkoušenému zařízení musejí být podepřeny ve výšce alespoň 30mm nad touto zemní rovinou. Zařízení určená pro instalaci ve skříních, stojanech atd. musejí být zkoušena v této konfiguraci. Podle fyzikální konfigurace pravděpodobné instalace zařízení například podle délky kabelů se volí typ a počet kabelů, které je pro účely zkoušky potřeba vybavit vazebními a oddělovacími prostředky. Nejdůležitějším zařízením ve zkušební sestavě je zkušební generátor, dále pak vazební/oddělovací prostředky [16].

6.4.2.1 Zkušební generátor

Zkušební generátor musí být schopen napájet každý vazební prostředek rušivým signálem v požadované úrovni a v požadovaném bodu. Typické uspořádání zkušebního generátoru je zobrazeno na obrázku 17.



Obrázek 17: Blokové schéma zkušebního generátoru [16]

Zkušební generátor obsahuje následující součásti:

- **Vysokofrekvenční generátor G1** – musí být schopen pokrýt požadované kmitočtové pásmo a umožnit amplitudovou modulaci sinusovou vlnou 1kHz s hloubkou modulace 80%, dále se vyžaduje možnost ručního, nebo programovatelného řízení.
- **Útlumový člen T1** – musí být dostatečně kmitočtově dimenzovaný, k řízení zkušební úrovně zkušebního zdroje rušení. Typické hodnoty 0-40dB.
- **Vysokofrekvenční spínač S1** – slouží pro zapínání a vypínání zkušebního rušivého signálu během zkoušky odolnosti.
- **Širokopásmový výkonový zesilovač** - zesiluje signál, pokud je výstupní signál z generátoru nedostatečný.
- **Filtry dolní (LPF) a horní (HPF) propusti** – nutné pro omezení rušení vzniklého vyššími harmonickými.
- **Útlumový člen T2** – redukce nepřizpůsobení výkonového zesilovače k síti. Je pevně nastaven na hodnotu 6dB ($Z_0=50\Omega$).

[16]

Výstupní impedance zkušebního generátoru je 50Ω . Z hlediska zkrácení generátoru platí pravidlo, že každá rušivá spektrální čára musí být alespoň 15dB pod úrovní nosné. Vyžaduje se možnost amplitudové modulace sinusovou vlnou o frekvenci 1kHz s tolerancí $\pm 10\%$ a hloubkou modulace 80% s tolerancí $\pm 5\%$. Výstupní úroveň generátoru musí být dostatečná pro pokrytí příslušné zkušební úrovně [16].

6.4.2.2 Vazební a oddělovací prostředky

Na kabely připojené ke zkoušenému zařízení je nutné přenést rušivý signál a zároveň zabránit nežádoucímu ovlivňování jiných přístrojů tímto rušivým signálem, k tomu se využívají vhodné vazební a oddělovací prostředky. Preferovaný způsob je použití vazební/oddělovací sítě CDN, kde jsou vazební i oddělovací prvky kombinovány v jednom zařízení, a to z důvodu dobré reprodukovatelnosti zkoušky. Pokud však není vhodné použít tuto metodu, existují další způsoby injektování rušivého signálu do vodičů. Jedním z těchto způsobů je metoda klešťového injektování, v tomto případě jsou zvlášť prováděny funkce vazby i oddělení. Vazba je realizována prostřednictvím proudových, nebo elektromagnetických kleští, oddělovací funkce jsou vytvořeny v pomocném zařízení. Proudové kleště vytvářejí induktivní vazbu, elektromagnetické kleště pak vytvářejí induktivní i kapacitní vazbu na kabel připojený ke zkoušenému zařízení. Dalším způsobem vazby je přímé injektování, kdy se rušivý signál injektuje do stíněného kabelu přes 100Ω odpor [4][16].

6.4.3 Postup zkoušky

Zkouška se musí provádět při předpokládaných klimatických podmínkách a je nutné tyto podmínky zaznamenat ve zkušebním protokolu. Z hlediska vyzařování elektromagnetického rušení není všeobecně nutné používat stíněný kryt, protože úroveň vyzařovaného rušení nebude pravděpodobně příliš vysoká, pokud však tato úroveň překračuje dovolené úrovně, je nutné stínící kryt použít. Zkouška se provádí pro všechny použité vazební prostředky. Veškeré nezkoušené kabely je nutné odpojit od zařízení, nebo vybavit oddělovacími sítěmi. Z důvodu zabránění rušení zkoušeného zařízení harmonickými je v některých případech nutné použít filtry dolní nebo horní propusti. Rušivý signál je generován v kmitočtovém pásmu 150kHz – 80MHz, citlivé kmitočty je nutné analyzovat zvlášť. Doba prodlévání amplitudy modulované nosné musí být na každém kmitočtu dostatečně dlouhá, aby bylo možné vyšetřit správnou funkci zkoušeného zařízení, minimálně však 0,5s. Během zkoušky by mělo být prováděno posuzování funkce zkoušeného zařízení a vyšetřeny všechny jeho režimy vybrané pro určení citlivosti zařízení [16].

6.4.4 Vyhodnocení kontrolního měření podle normy ČSN EN 61000-4-6

Parametry zkoušky odolnosti byly opět převzaty z kmenové normy ČSN EN 61000-6-2. Bylo nutné provést zkoušku pro kmitočtový rozsah 0,15 - 80MHz a pro napětí 10V. Rušivý signál byl modulován podle požadavků amplitudovou modulací o frekvenci 1kHz s hloubkou modulace 80%. Jako vazebního prostředku bylo využito klešťové metody injektování rušivého signálu. Rušivý signál byl aplikován do vodičů napájení, signálních vodičů, čidel i datového ethernetového kabelu. Průběh vlastní zkoušky je zachycen na obrázku 18.

Tato zkouška byla časově velmi náročná, během samotného testu bylo nutné proměřit 631 frekvenčních kroků, kdy jednotlivé kroky měly odstup tři vteřiny. Posuzování správné funkce zkoušeného zařízení při takto dlouhém testu je velmi náročné na pozornost osoby provádějící zkoušku, z tohoto důvodu bylo po skončení zkoušky zařízení dodatečně diagnostikováno pomocí připojení k počítači, kde bylo možné odhalit výpadky a zhoršení provozu testovaného zařízení. Diagnostika zařízení neodhalila žádný výpadek ani zhoršení činnosti. Během celé zkoušky zařízení splnilo požadavky funkčního kritéria A.



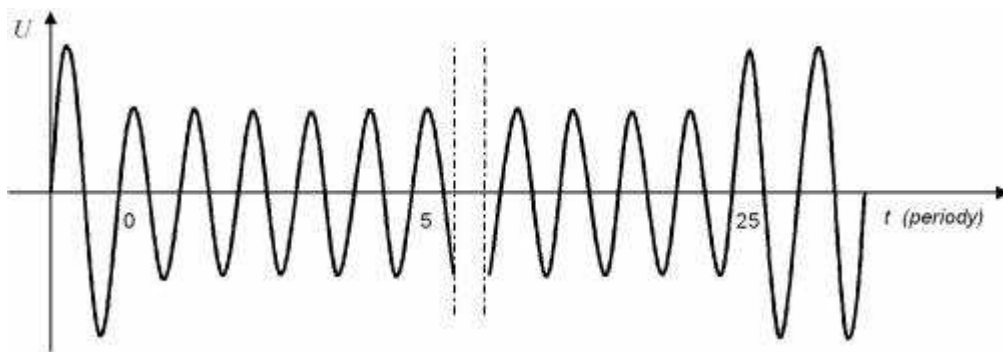
Obrázek 18: Kontrolní měření testovaného zařízení dle normy ČSN EN 61000-4-6

6.4.5 Použité přístroje

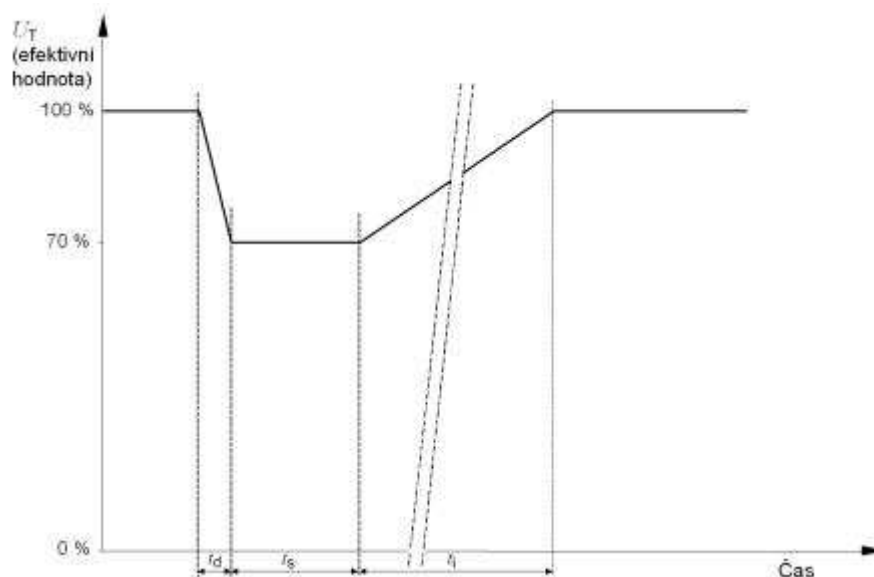
- Zkušební generátor EM TEST – CWS500
- Elektromagnetické kleště EM 101

6.5 Zkouška odolnosti – krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí

Cílem zkoušky odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-11 je ověřit odolnost zkoušeného zařízení před krátkodobými poklesy napětí, krátkými přerušeními a pomalými změnami napětí v rozvodné síti, které mohou mít nežádoucí účinky na elektrická zařízení. Tento typ rušení může vzniknout poruchami v síti, například zkraty. Další možností vzniku poklesu napětí nebo krátkého přerušení může být výrazná skoková změna zátěže. Pomalé změny napětí naopak vznikají při spojitě změně zátěže. Jedná se o náhodné jevy, které mohou být pro simulaci v laboratorních podmínkách určeny pouze hodnotou odchylky od jmenovitého napětí a dobou trvání.



Obrázek 19: Typický průběh sinusového signálu při poklesu napětí na 70% jmenovité hodnoty [18]



Obrázek 20: Průběh pomalé změny napětí [18]

6.5.1 Zkušební úrovně

Příslušná norma v tomto případě definuje zkušební úrovně pro každý typ rušení, základem těchto zkušebních úrovní je pak jmenovité napětí zařízení U_T . Používají se následující úrovně zkušebních napětí v % U_T : 0%, 40%, 70% a 80%. Doporučené zkušební úrovně a doby trvání poklesů podle ČSN EN 61000-4-11 jsou uvedeny v následujících tabulkách [18].

Třída	Zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy napětí pro kmitočty 50Hz				
1	podle požadavků konkrétního zařízení				
2	0% během 1/2 periody	0% během 1 periody	70% během 25 period		
3	0% během 1/2 periody	0% během 1 periody	40% během 10 period	70% během 25 period	80% během 250 period
X	X	X	X	X	X

Tabulka 11: Doporučené zkušební úrovně pro krátkodobé poklesy napětí [18]

Třída	Zkušební úrovně a doby trvání pro krátká přerušení napětí (50Hz)
1	podle požadavků konkrétního zařízení
2	0% během 250 period
3	0% během 250 period
X	X

Tabulka 12: Doporučené zkušební úrovně pro krátká přerušení napětí [18]

Zkušební úroveň napětí	Doba klesání napětí	Doba sníženého napětí	Doba stoupání napětí (50Hz)
70%	strmý přechod	1 periodu	25 period
X	X	X	X

Tabulka 13: Časové hodnoty krátkodobých pomalých změn síťového napětí [18]

U zkoušky odolnosti proti pomalým změnám síťového napětí se bere v úvahu definovaný přechod mezi jmenovitým napětím a změněným napětím. Úroveň X může být stanovena výrobkovou komisí.

6.5.2 Zkušební sestava a zařízení

Zkušební sestava je složena pouze z generátoru a příslušného napájecího zdroje, kmitočty napájecího napětí musí být v toleranci $\pm 2\%$. Zkoušené zařízení musí být připojeno ke generátoru silovým kabelem co nejkratší vhodné délky, není-li stanoveno jinak. Zkušební generátor musí být schopen vytvářet všechny rušivé jevy, a to krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení i pomalé změny napětí [18].

6.5.2.1 Vlastnosti zkušebního generátoru

Na zkušební generátor jsou kladeny speciální požadavky, kterým musí vyhovět. Normou je požadována tolerance výstupního napětí naprázdno $\pm 5\%$, změna napětí způsobená zatížením generátoru musí být menší než 5% jmenovitého napětí. Generátor musí být také schopen generovat proud a to 16A do každé fáze při jmenovitém napětí, 20A při 80% jmenovitého napětí po dobu 5s, 23A při 70% jmenovitého napětí po dobu 3s a 40A při 40% jmenovitého napětí po dobu 3s. Dalším požadavkem je schopnost generování špičkového spínacího proudu o velikosti 1000A pro napětí 250-600V, 500A pro napětí 200-240V a 250A pro napětí 100-120V. Je-li požadován fázový posuv, musí být v rozmezí $0-360^\circ$ [18].

6.5.3 Postup zkoušky

Před začátkem samotné zkoušky se musí připravit plán zkoušky, který by měl obsahovat a definovat následující části:

- *Označení typu zkoušeného zařízení*
- *Informaci o možných připojeních a periferních zařízeních*
- *Vstup napájení zkoušeného zařízení*
- *Provozní režimy zkoušeného zařízení pro zkoušku*
- *Použitá a definovaná funkční kritéria*
- *Popis zkušební sestavy*

Zkouška musí probíhat za vhodných klimatických i elektromagnetických podmínek, obdobně jako u výše popsaných zkoušek elektromagnetické imunity. Během zkoušky se musí zaznamenat každé zhoršení provozu zkoušeného zařízení. Monitorovací zařízení by mělo neustále zobrazovat provozní stav zařízení. Po sérii zkoušek se vyžaduje úplná funkční kontrola testovaného zařízení [18].

Při zkoušce krátkodobých poklesů a krátkých přerušení se aplikují pro každou kombinaci zkušební úrovně a doby trvání tři krátkodobé poklesy/přerušení s minimálním intervalem 10s. Zkoušky probíhají pro každý režim zkoušeného zařízení [18].

Zkouška pomalých změn napětí není závazná, během této zkoušky se zařízení testuje pro všechny specifické pomalé změny napětí a to třikrát při intervalu 10s [18].

6.5.4 Vyhodnocení zkoušky

Během tohoto kontrolního měření bylo testované zařízení připojeno k požadovanému generátoru, podle kmenové normy ČSN EN 61000-6-2 pak probíhala krátká přerušení a poklesy napětí, jejichž parametry jsou uvedeny i s výsledky zkoušek v tabulce 13. Všechny krátkodobé poklesy a krátká přerušení napětí se prováděly třikrát s odstupem 10s mezi jednotlivými jevy.

Zbytkové napětí	doba trvání poklesu/přerušení napětí	výsledek zkoušky
Krátkodobé poklesy napětí		
0% (0V)	1 perioda (20ms)	A
40% (92V)	10 period (200ms)	A
70% (160V)	25 period (500ms)	A
Krátká přerušení		
0% (0V)	250 period (5s)	B

Tabulka 14: Úrovně napětí, patřičné doby poklesu/přerušení napětí a výsledky zkoušek podle normy ČSN EN 61000-4-11

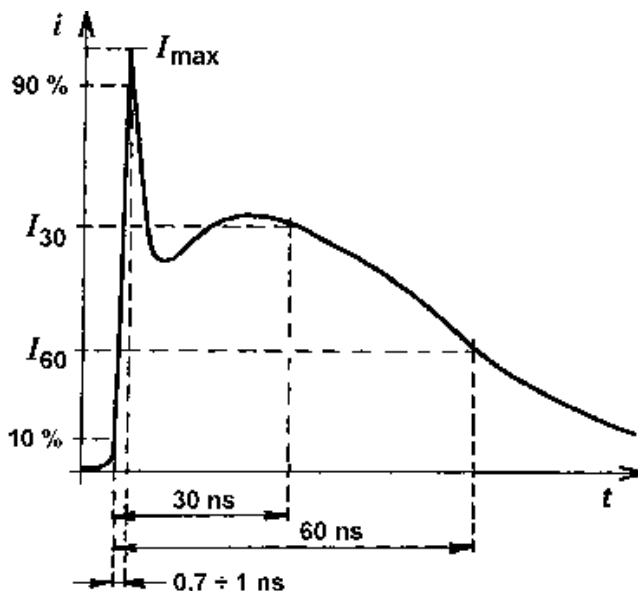
Během zkoušení zařízení na krátkodobé poklesy napětí nevykázalo testované zařízení ani v jednom případě zhoršení své činnosti. Zařízení tedy splnilo tuto část zkoušky s funkčním kritériem A. V případě předepsaného krátkého přerušení napětí došlo vlivem ztráty napájení k přerušení činnosti zkoušeného zařízení, po skončení tohoto jevu zařízení samo obnovilo svou činnost bez zásahu operátora a splnilo tedy požadavky na funkční kritérium B.

6.5.5 Použité přístroje

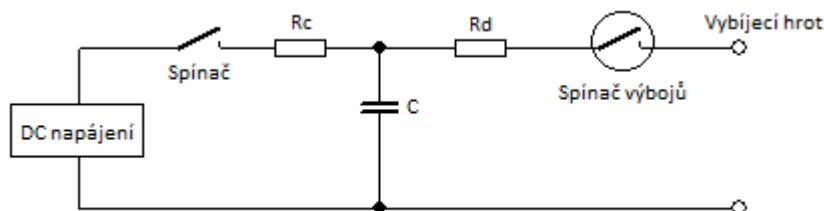
- Generátor EM TEST – UCS500
- Napájecí zdroj EM TEST – MV2616

6.6 Zkouška odolnosti – elektrostatický výboj

Elektrostatický výboj je rušivý jev, který je velmi nebezpečný pro elektrická a elektronická zařízení. Na vznik tohoto rušivého jevu má značný vliv prostředí a způsob instalace rušeného zařízení, jako je nízká vlhkost vzduchu, použití syntetických materiálů krytin například koberců, nebo oděvů obsluhy zařízení. Výboj statické elektřiny, který se nahromadí na těle obsluhy, je pak na rušené zařízení přiveden samotnou obsluhou tohoto zařízení. Zkouška odolnosti simulující účinky elektrostatického výboje je definována normou ČSN EN 61000-4-2, která udává zkušební úrovně závislé na různých podmínkách prostředí a instalace, typický tvar vlny vybíjecího proudu (obrázek 21), definuje zkušební sestavu a popisuje průběh zkoušky, která má za úkol ověřit správnou funkci zkoušeného zařízení vystaveného rušivým vlivům elektrostatického výboje [1][5].



Obrázek 21: časový průběh zkušebního signálu [25]



Obrázek 22: Zjednodušené schéma zkušebního generátoru [12]

6.6.1 Zkušební úrovně a třídy instalace

Zkušební úrovně se stanovují v závislosti na podmínkách prostředí a instalace. Vzhledem ke znalosti vlastností jednotlivých materiálů a prostředí jsou doporučeny následující třídy instalace a prostředí:

Třída	minimální relativní vlhkost [%]	Antistatický materiál	Syntetický materiál	Maximální napětí [kV]
1	35	ano	ne	2
2	10	ano	ne	4
3	50	ne	ano	8
4	10	ne	ano	15

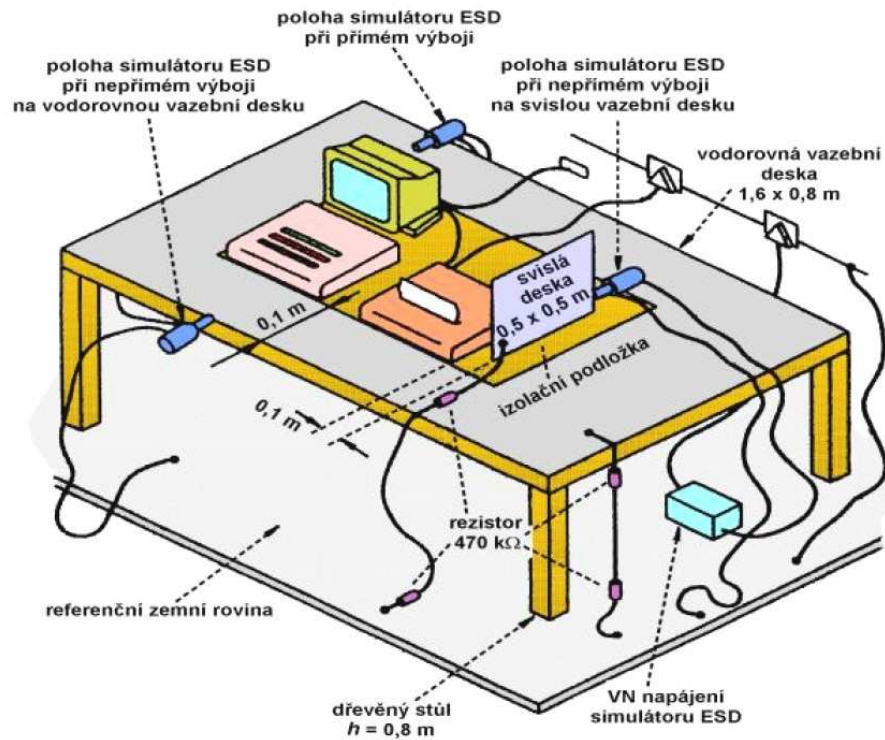
Tabulka 15: Doporučené třídy instalace a prostředí [12]

Výboj dotekem		výboj vzduchem	
úroveň	zkušební napětí [kV]	úroveň	zkušební napětí [kV]
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
X	speciální	X	speciální

Tabulka 16: Zkušební úrovně pro výboj dotekem a výboj vzduchem [12]

6.6.2 Zkušební zařízení a sestava

Zkušební sestava zahrnuje zkušební generátor a pomocná zařízení nutná k provádění přímých a nepřímých výbojů na zkoušené zařízení. Pro účely zkoušky je nutná referenční zemnicí rovina tvořená plochým vodivým povrchem, která musí přesahovat zkoušené zařízení minimálně o 0,5m ve všech směrech, dále pak vodorovná vazební deska o rozměrech 1,6x0,8m umístěná na dřevěném stole vysokém 0,8m. Testované zařízení je odděleno od vodorovné vazební desky pomocí izolační podložky o síle 0,5mm. Svislá vazební deska o rozměru 0,5x0,5m je ve vzdálenosti 0,1m od zkoušeného zařízení. Zkušební sestava je zobrazena na obrázku 23 [12].



Obrázek 23: Zkušební sestava pro zkoušku odolnosti elektrostatickým výbojem [25]

6.6.2.1 Zkušební generátor

Zjednodušené schéma zkušební generátoru je zobrazeno na obrázku 20. Generátor se skládá z následujících částí:

- **Nabíjecí rezistor R_c**
- **Kondenzátor akumulující energii C**
- **Vybíjecí rezistor R_d**
- **Spínače nabíjení a spínače výbojů**
- **Stejnoseměrné vysokonapěťové napájení**
- **Vybíjecí elektrody**
- **Kabel zpětného spojení**

[12]

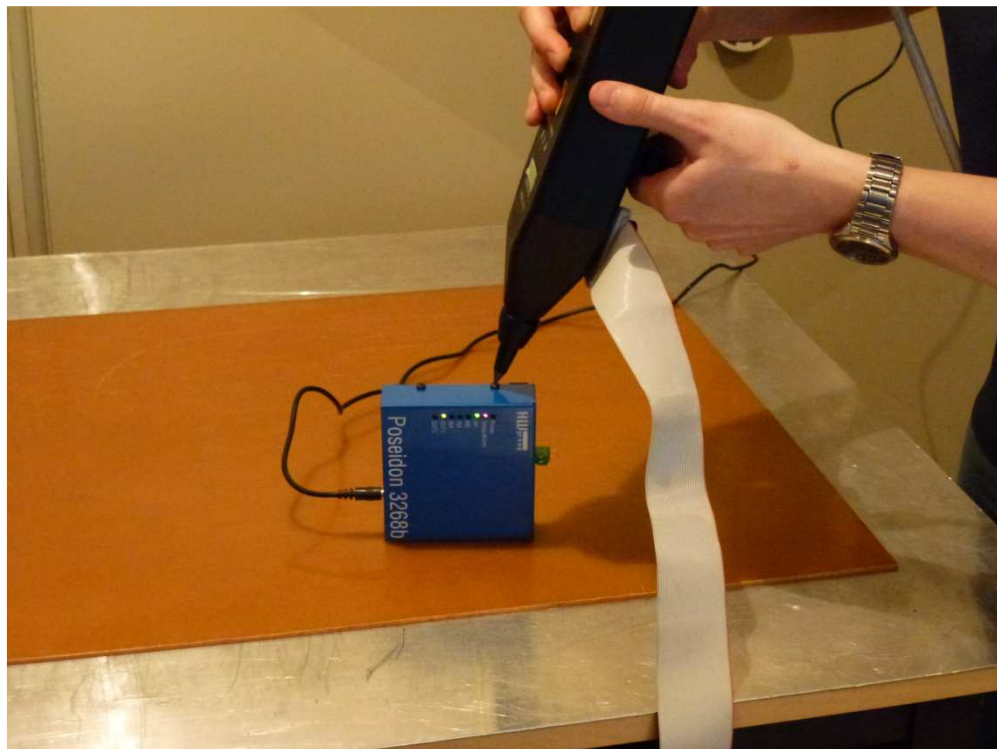
Kapacita kondenzátoru má typickou hodnotu 150pF, hodnota vybíjecího rezistoru je obvykle 330Ω. Výstupní napětí zkušební generátoru je 1-8kV pro dotykové výboje, 2-15kV pro výboje vzduchem, to vše s tolerancí +/-5%. Na generátor je také kladen požadavek možnosti kladné i záporné polarity [12].

6.6.2.2 Pomocná zařízení pro provádění výbojů

K přivedení elektrostatického výboje na zkoušené zařízení se využívá speciální vybíjecí elektrody (tzv. vybíjecí pistole). Zkouška definuje několik možností aplikace výbojů na zkoušené zařízení. Metody aplikace elektrostatických výbojů můžeme rozdělit na přímou a nepřímou aplikaci. Přímá aplikace znamená výboj dotykem kontaktního kuželového hrotu do zkoušeného zařízení nebo přibližování kulového hrotu k zařízení až do doteku. Poslední metodou je výboj vzduchem. Nepřímou aplikací se rozumí kontaktní výboj pomocí kuželového hrotu do svislé i vodorovné vazební desky [5].

6.6.3 Postup zkoušky

Preferovaná metoda aplikace elektrostatického výboje je přímá aplikace dotekem vybíjecí elektrody. Zkušební elektrostatický výboj se přivádí do míst zkoušeného zařízení, která jsou přístupná obsluze, provádí se deset kladných a deset záporných výbojů do každého zkoušeného místa. V případě nutnosti provádět údržbu zařízení je možné přivádět zkušební výboje i do míst uvnitř zařízení. Průběh zkoušky přímou aplikací elektrostatického výboje dotekem je zachycen na obrázku 24 [5][12].



Obrázek 24: Aplikace elektrostatického výboje dotekem pomocí vybíjecí pistole

6.6.4 Vyhodnocení kontrolního měření

Při kontrolním měření byla provedena přímá aplikace výbojů na zkoušené zařízení dotekem vybíjecího hrotu (viz obrázek 24), dále pak nepřímá aplikace, kdy byl výboj přiveden na svislou a vodorovnou vazební desku umístěnou dle normy vůči testovanému zařízení, čímž se simuloval vliv elektrostatického výboje do objektu v blízkosti samotného zařízení. Dle příslušné kmenové normy byla zvolena hodnota nabíjecího napětí 4kV pro kontaktní výboje a 8kV pro nepřímé výboje, prováděno vždy pro kladnou i zápornou polaritu elektrostatických výbojů. Výsledky zkoušky jsou shrnuty v následující tabulce.

Místo aplikace výboje na zkoušené zařízení	Nabíjecí napětí	Polarita	Výsledek zkoušky
Shora uprostřed	4	+	A
		-	
Zadní strana uprostřed	4	+	A
		-	
Spodní strana uprostřed	4	+	A
		-	
Šroub na levé straně	4	+	A
		-	
Objímka konektoru RJ45	4	+	A
		-	
Vodorovnou vazební deskou	8	+	A
		-	
Svislou vazební deskou z čela	8	+	A
		-	
Svislou vazební deskou z boku	8	+	A
		-	

Tabulka 17: Výsledky zkoušky dle ČSN EN 61000-4-2

Z výsledků je patrné, že testované zařízení nevykazovalo během celé zkoušky žádné zhoršení svoji činnosti a splnilo tedy ve všech dílčích testech požadavky funkčního kritéria A.

6.6.5 Použité přístroje

- Generátor elektrostatických výbojů EM TEST – ESD30

6.7 Zkouška odolnosti – magnetické pole síťového kmitočtu

Norma ČSN EN 61000-4-8 se zabývá odolností zařízení před magnetickými rušivými vlivy síťového kmitočtu 50Hz (60Hz). Tato rušení jsou vytvářena především napájecími rozvody, kterými teče provozní, nebo poruchový proud. Níže popsaná zkouška odolnosti je určena pro zařízení, která pracují zejména v domovních lokalitách, průmyslových instalacích, elektrárnách a rozvodnách vysokého napětí. Norma definuje doporučené zkušební úrovně, zkušební zařízení, zkušební sestavu a postup zkoušky.

6.7.1 Zkušební úrovně

Pro jednotlivé zkušební úrovně jsou normou doporučeny příslušné hodnoty intenzity magnetického pole vyjádřené v jednotkách A/m. Norma dále udává vztah mezi jednotkami A/m a T, kdy 1A/m odpovídá hodnotě magnetické indukce $1,26\mu\text{T}$ [17].

Zkušební úroveň	Intenzita magnetického pole [A/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
5	100
X	Speciální

Tabulka 18: Doporučené zkušební úrovně pro nepřetržitě magnetické pole [17]

Zkušební úroveň	Intenzita magnetického pole [A/m]
1	Nepoužívá se
2	Nepoužívá se
3	Nepoužívá se
4	300
5	1000
X	Speciální

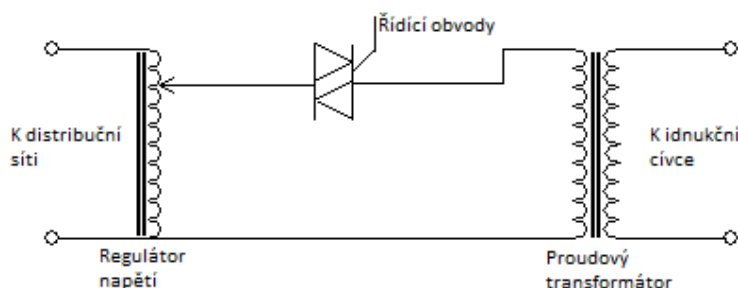
Tabulka 19: Doporučené zkušební úrovně pro krátkodobé magnetické pole [17]

6.7.2 Zkušební sestava

Zkušební sestavu tvoří zkušební generátor proudu 50Hz a indukční cívky. Zkušební generátor je zdroj proudu síťového kmitočtu, který se skládá z napěťového regulátoru, proudového transformátoru a obvodu pro řízení aplikace krátkodobých polí. Zjednodušené schéma zkušebního generátoru je zobrazeno na obrázku 25. Pro běžnou indukční cívku o rozměrech 1x1m jsou na generátor kladeny tyto požadavky:

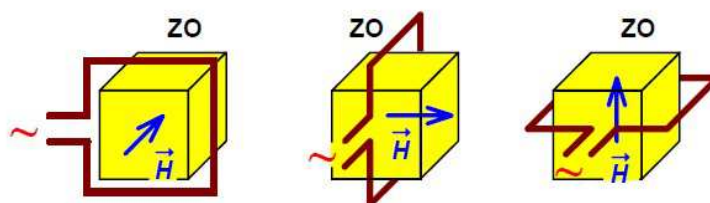
- **Rozsah výstupního proudu pro nepřetržité pole:** **1-120 A**
- **Rozsah výstupního proudu pro krátkodobá pole:** **320-1200 A**
- **Činitel zkreslení:** **$\leq 8\%$**
- **Doba trvání aplikace nepřetržitého pole:** **více než 8 hodin**
- **Doba trvání krátkodobého pole** **1-3 s**

[17]



Obrázek 25: Zjednodušené schéma zkušebního generátoru [17]

Indukční cívky jsou jednozávitové rámy z vodivého magnetického materiálu o přesně definovaných rozměrech. Standardní cívky mají rozměr 1x1m, nebo 1x2,6m. Jiné, například více závitové cívky mohou být použity pro nižší proud, nebo pro zařízení, které se nehodí do standardních cívek. Zkoušené zařízení se umísťuje do středu indukční cívky a cívkou se pohybuje tak, aby bylo zkoušené zařízení ovlivňováno ze všech stran [1][17].



Obrázek 26: Příklad orientace cívek vůči zkoušenému zařízení

6.7.3 Postup zkoušky

Stejně jako u výše popsaných zkoušek je i u této zkoušky odolnosti nutné dodržet referenční klimatické a elektromagnetické podmínky. Zkoušené zařízení se umístí uvnitř indukční cívky, která vytváří homogenní magnetické pole. Pro cívku s rozměrem 1x1m je toto homogenní pole s požadovanou tolerancí 3dB velké přibližně jen 60x60x50cm. Zařízení je vystaveno účinkům tohoto pole po určitou dobu při všech orientacích indukční cívky, zároveň se neustále posuzuje správná funkce zkoušeného zařízení. Průběh kontrolního měření této zkoušky odolnosti je zachycen na obrázku 27 [4][17].



Obrázek 27: Průběh zkoušky odolnosti dle normy ČSN EN 61000-4-8

6.7.4 Vyhodnocení zkoušky

Během kontrolního měření bylo zkoušené zařízení umístěno na dřevěném stole uvnitř standardní indukční cívky o rozměru 1x1m. Kmenová norma ČSN EN 61000-6-2 stanovila pro tuto zkoušku intenzitu magnetického pole o hodnotě 30A/m. Během samotné zkoušky byla indukční cívka orientována vůči zkoušenému zařízení vertikálně i horizontálně, a to vždy tak, aby pokryla všechny možné roviny. Pro každou možnou orientaci cívky bylo zkoušené zařízení vystaveno rušivému magnetickému poli po dobu jedné minuty, kdy se současně sledovala správná činnost zkoušeného zařízení. Po dobu celé zkoušky nebyl zaznamenán jediný případ zhoršení činnosti zařízení, to znamená, že zařízení vyhovělo zkoušce a pro tuto zkoušku bylo tedy ohodnoceno funkčním kritériem A.

6.7.5 Použité přístroje

- Zkušební generátor EM TEST – UCS500
- Napájecí zdroj EM TEST – MV2616
- Rámová anténa 1x1m

Závěr

Tato práce se zabývá problematikou vědního oboru elektromagnetická kompatibilita. V teoretické části jsem se obecně věnoval elektromagnetické kompatibilitě, rušivým vlivům působícím v elektroenergetických zařízeních a elektromagnetické odolnosti.

Praktická část této diplomové práce byla zaměřena na ověřování elektromagnetické odolnosti. Dosažitelnými metodami bylo provedeno kontrolní měření elektromagnetické imunity na reálném zařízení určeném pro běžný provoz v průmyslu. Toto zařízení bylo podrobena zkouškám odolnosti dle příslušných norem řady ČSN EN 61000-4. Principy ověřování elektromagnetické odolnosti, popisy a vyhodnocení jednotlivých zkoušek jsou také obsahem této práce. Pro zkoušené zařízení bylo požadováno provedení zkoušek odolnosti vůči elektrostatickému výboji, vyzařovanému vysokofrekvenčnímu elektromagnetickému poli, rychlým elektrickým přechodným jevům, rázovému impulzu, rušením šířeným vedením indukovaným vysokofrekvenčními poli, magnetickému poli síťového kmitočtu, krátkodobým poklesům a krátkým přerušením napětí.

Z dílčích výsledků všech prováděných zkoušek je patrné, že zkoušené zařízení v jednotlivých testech elektromagnetické imunity uspělo a celkově tedy vyhovuje požadavkům elektromagnetické kompatibility na zařízení určená pro provoz v průmyslovém prostředí.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] VACULÍKOVÁ, Polina, VACULÍK, Emil a kolektiv. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů*. 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1998. 504 s.
- [2] SVOBODA, Jaroslav, VACULÍKOVÁ, Polina, VONDRÁK, Miroslav, ZEMAN, Tomáš. *Základy elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1993. 99 s.
- [3] KOVÁČ, Dobroslav, KOVÁČOVÁ, Irena, KAŇUCH, Ján. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006. 216 s.
- [4] DRÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zdeněk, RŮŽEK, Václav, ZACHAR, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2010. 266 s. ISBN 987-80-214-4202-3.
- [5] VONDRÁK, Miroslav. *Vybrané stati z elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 2006. 131 s. ISBN 80-01-03573-5.
- [6] ČSN IEC 50(161). *Mezinárodní elektrotechnický slovník: kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita*. Praha: Český normalizační institut, 1993. 52 s.
- [7] ČSN IEC 1000-1-1. *Elektromagnetická kompatibilita: část 1: všeobecně: díl 1: použití a interpretace základních definic a termínů*. Praha: Český normalizační institut, 1995. 24 s.
- [8] ČSN EN 61000-1-2. *Elektromagnetická kompatibilita: část 1-2: všeobecně – metodika pro dosažení funkční bezpečnosti elektrického a elektronického zařízení s ohledem na elektromagnetické jevy*. Praha: Český normalizační institut, 2002. 60 s.
- [9] ČSN EN 61000-2-2. *Elektromagnetická kompatibilita: část 2-2: prostředí – kompatibilní úrovně pro nízkofrekvenční rušení šířené vedením a signály ve veřejných rozvodných sítích nízkého napětí*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 28 s.
- [11] ČSN EN 61000-4-1. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-1: zkušební a měřicí technika – přehled o souboru IEC 61000-4*. Praha: Český normalizační institut, 2007. 24 s.
- [12] ČSN EN 61000-4-2. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-2: zkušební a měřicí technika – elektrostatický výboj – zkouška odolnosti*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2009. 76 s.
- [13] ČSN EN 61000-4-3. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-3: zkušební a měřicí technika – vyzářované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2006. 52 s.
- [14] ČSN EN 61000-4-4. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-4: zkušební a měřicí technika – rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů – zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2013. 44 s.
- [15] ČSN EN 61000-4-5. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-5: zkušební a měřicí technika – rázový impulz – zkouška odolnosti*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2007. 44 s.
- [16] ČSN EN 61000-4-6. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-6: zkušební a měřicí technika – odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli – zkouška odolnosti*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2009. 68 s.
- [17] ČSN EN 61000-4-8. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-8: zkušební a měřicí technika – magnetické pole síťového kmitočtu – zkouška odolnosti*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2010. 44 s.
- [18] ČSN EN 61000-4-11. *Elektromagnetická kompatibilita: část 4-11: zkušební a měřicí technika – krátkodobé poklesy, krátká přerušení a pomalé změny napětí – zkoušky odolnosti*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2005. 28 s.

- [19] ČSN EN 61000-6-2. *Elektromagnetická kompatibilita: část 6-2: kmenové normy – odolnost pro průmyslová prostředí*. 3. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2006. 20 s.
- [20] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů*. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>
- [21] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 1: Základní pojmy a členění oboru EMC*. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [22] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zdeněk, RŮŽEK, Václav. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility - Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů*. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node12>
- [23] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zdeněk, RŮŽEK, Václav. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility - Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím*. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66>
- [24] DŘÍNOVSKÝ, Jiří, FRÝZA, Tomáš, SVAČINA, Jiří, KEJÍK, Zdeněk, RŮŽEK, Václav. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility - Zkoušky odolnosti vůči nízkofrekvenčním širokopásmovým impulzům*. [online]. [cit. 2013-04-21]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node62>
- [25] SVAČINA, Jiří. *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 5: Elektromagnetická odolnost a její testování*. [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01025/index.html>

Seznam obrázků

Obrázek 1: Úrovně, meze a rezervy v terminologii elektromagnetické kompatibility.....	13
Obrázek 2: Členění elektromagnetické kompatibility.....	15
Obrázek 3: Základní řetězec elektromagnetické kompatibility.....	16
Obrázek 4: Problematika elektromagnetické kompatibility.....	16
Obrázek 5: Rušivé vlivy působící v běžném životě.....	19
Obrázek 6: a) Základní princip galvanické vazby b) Příklad rušivého působení společným napájením.....	23
Obrázek 7: Základní principy kapacitní vazby.....	24
Obrázek 8: Zkoušené zařízení.....	32
Obrázek 9: Měření v bezodrazové komoře.....	34
Obrázek 10: Náskres zkušební bezodrazové komory.....	35
Obrázek 11: Zjednodušené schéma generátoru skupiny impulzů.....	39
Obrázek 12: Průběh rychlých přechodných jevů a tvar vlny impulzu.....	40
Obrázek 13: Schéma zkušebního pracoviště podle ČSN EN 61000-4-4.....	41
Obrázek 14: Aplikace skupiny impulzů do vodičů testovaného zařízení pomocí kapacitní kleštiny.....	42
Obrázek 15: Tvar zkušebního signálu generátoru kombinované vlny, a) rázový impulz napětí naprázdno, b) rázový impulz proudu nakrátko.....	45
Obrázek 16: Zjednodušené schéma generátoru kombinované vlny (1,2/50).....	46
Obrázek 17: Blokové schéma zkušebního generátoru.....	50
Obrázek 18: Kontrolní měření testovaného zařízení dle normy ČSN EN 61000-4-6.....	52
Obrázek 19: Typický průběh sinusového signálu při poklesu napětí na 70% jmenovité hodnoty.....	53
Obrázek 20: Průběh pomalé změny napětí.....	53
Obrázek 21: Časový průběh zkušebního signálu.....	57
Obrázek 22: Zjednodušené schéma zkušebního generátoru.....	57
Obrázek 23: Zkušební sestava pro zkoušku odolnosti elektrostatickým výbojem.....	59
Obrázek 24: Aplikace elektrostatického výboje dotekem pomocí vybíjecí pistole.....	60
Obrázek 25: Zjednodušené schéma zkušebního generátoru.....	63
Obrázek 26: Příklad orientace cívek vůči zkoušenému zařízení.....	63
Obrázek 27: Průběh zkoušky odolnosti dle normy ČSN EN 61000-4-8.....	64

Seznam tabulek

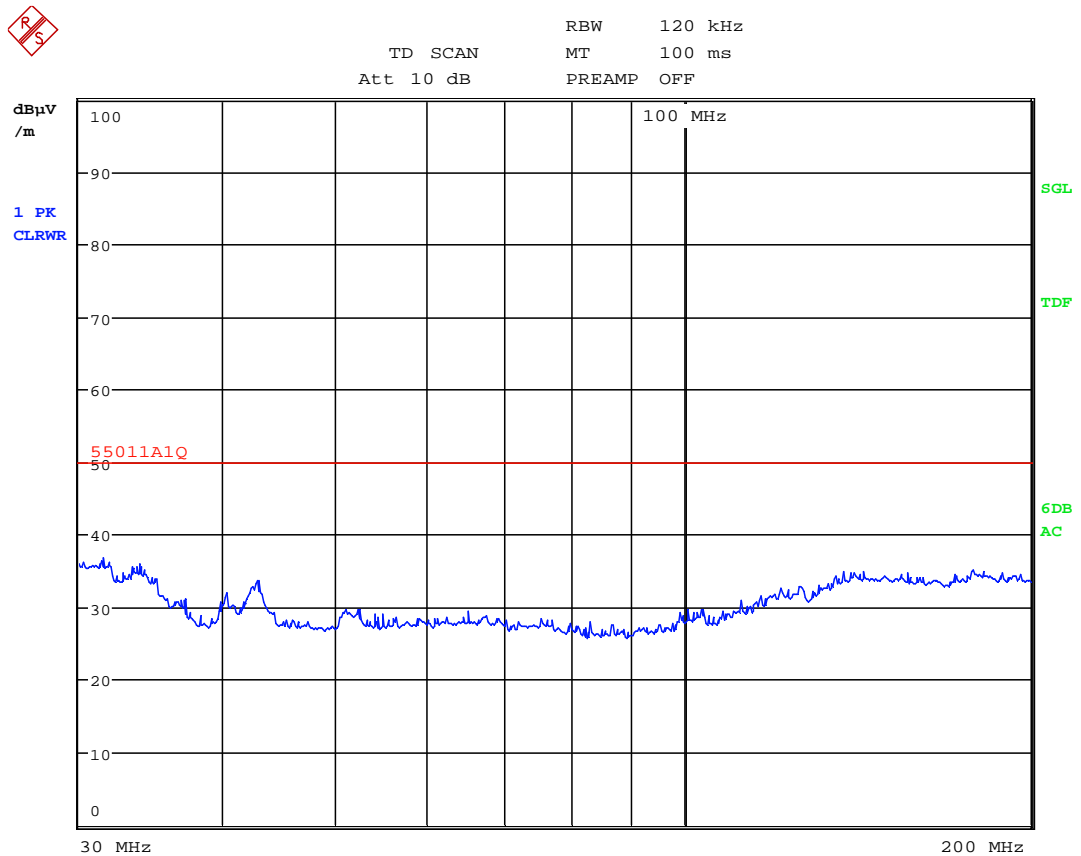
Tabulka 1: Zkušební úrovně podle ČSN EN 61000-4-3.....	37
Tabulka 2: Výsledky zkoušení odolnosti zařízení podle ČSN EN 61000-4-3, vertikální polarizace antény.....	38
Tabulka 3: Výsledky zkoušení odolnosti zařízení podle ČSN EN 61000-4-3, horizontální polarizace antény.....	38
Tabulka 4: Zkušební úrovně definované normou 61000-4-4.....	41
Tabulka 5: Parametry zkoušky podle ČSN EN 61000-6-2.....	42
Tabulka 6: Výsledky zkoušky odolnosti podle normy ČSN EN 61000-4-4.....	43
Tabulka 7: Vztah mezi vrcholovou hodnotou napětí naprázdno a vrcholovou hodnotou proudu nakrátko.....	45
Tabulka 8: Zkušební úrovně definované normou ČSN EN 61000-4-5.....	45
Tabulka 9: Výsledky zkoušky odolnosti rázovými impulzy.....	48
Tabulka 10: Zkušební úrovně podle normy ČSN EN 61000-4-6.....	49
Tabulka 11: Doporučené zkušební úrovně pro krátkodobé poklesy napětí.....	54
Tabulka 12: Doporučené zkušební úrovně pro krátká přerušení napětí.....	54
Tabulka 13: Časové hodnoty krátkodobých pomalých změn síťového napětí.....	54
Tabulka 14: Úrovně napětí, patřičné doby poklesu/přerušení napětí a výsledky zkoušek podle normy ČSN EN 61000-4-11.....	56
Tabulka 15: Doporučené třídy instalace a prostředí.....	58
Tabulka 16: Zkušební úrovně pro výboj dotekem a výboj vzduchem.....	58
Tabulka 17: Výsledky zkoušky dle ČSN EN 61000-4-2.....	61
Tabulka 18: Doporučené zkušební úrovně pro nepřetržitá magnetická pole.....	62
Tabulka 19: Doporučené zkušební úrovně pro krátkodobé magnetické pole.....	62

Přílohy

Příloha A – Výsledky měření emisí elektromagnetického rušení zkoušeného zařízení

Zkouška proběhla v bezodrazové komoře ZČU. Zkoušené zařízení bylo v provozu a citlivou anténou se měřila úroveň vyzařovaného elektromagnetického rušení generovaného zkoušeným zařízením. Další zkouškou bylo měření vysokofrekvenčního rušení šířeného po napájecích vodičích, k tomuto měření se využívá umělá síť. Při těchto zkouškách nesmí úroveň vyzařovaného rušení překročit povolenou mez vyzařování stanovenou příslušnou normou, v následujících obrázcích je tato mez zobrazena červeně a vyzařované rušení modře.

Výsledky měření vyzařovaného elektromagnetického rušení:

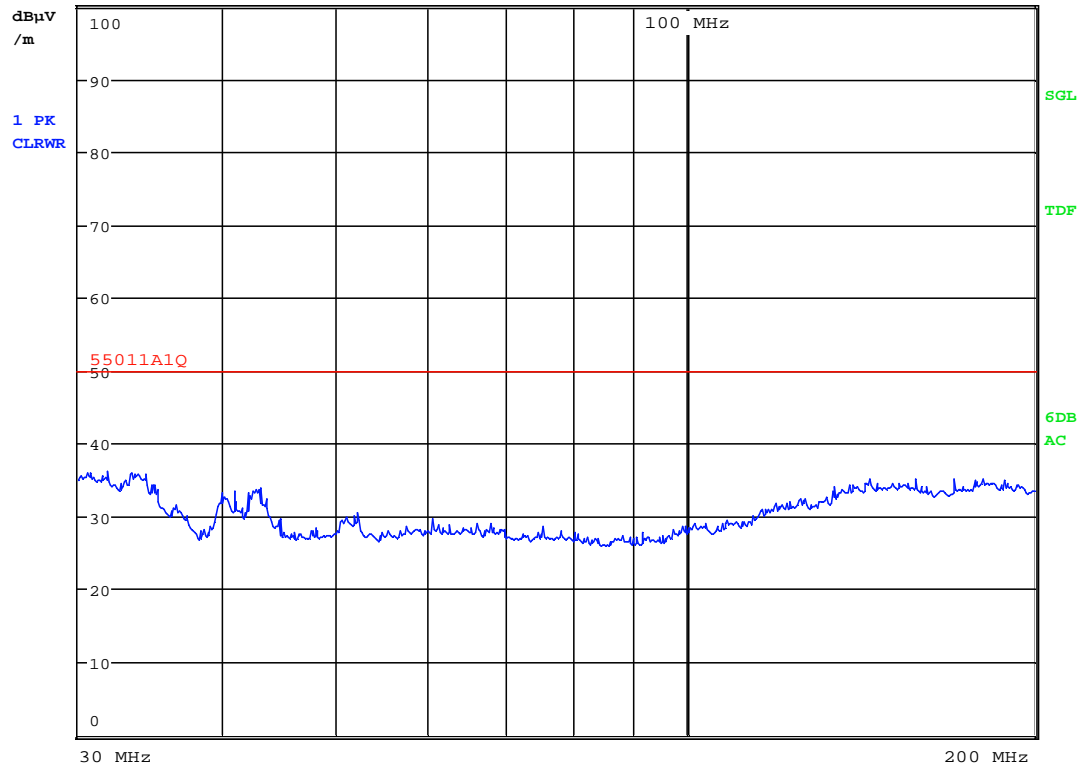


Poseidon2 3268 - 30 MHz az 200 MHz - antena horizontalne

Date: 19.APR.2013 10:06:25

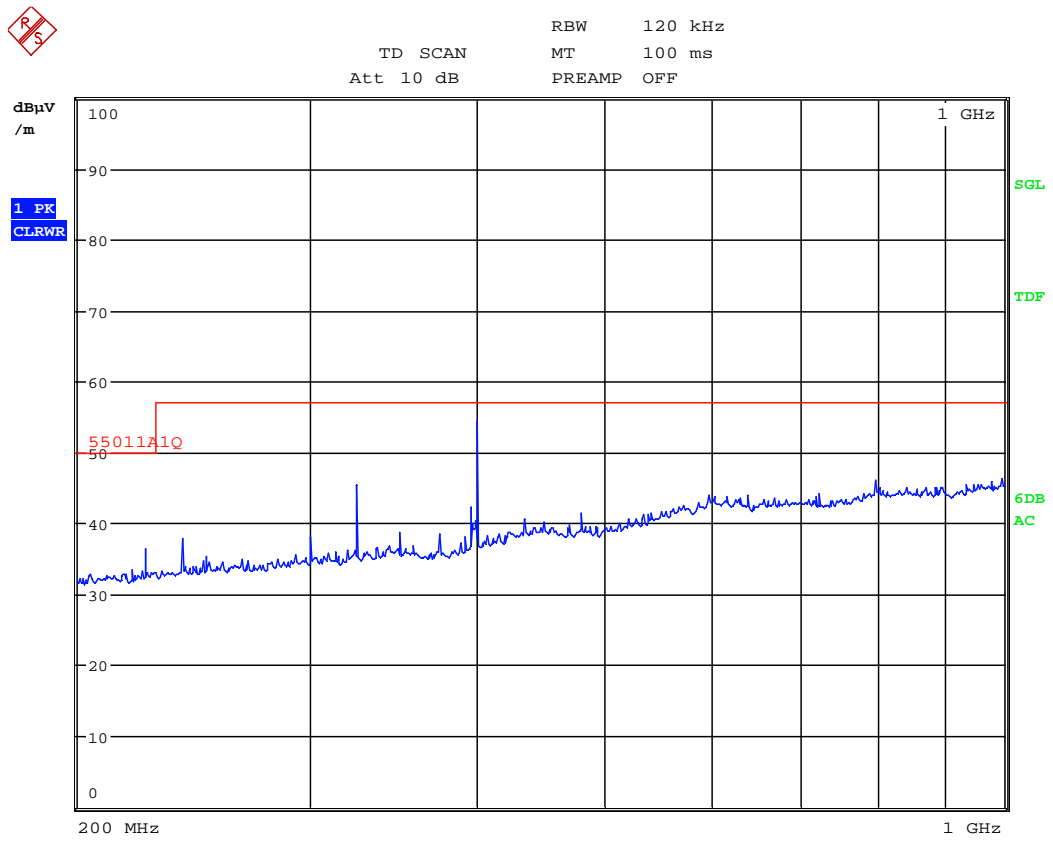


TD SCAN RBW 120 kHz
 Att 10 dB MT 100 ms
 PREAMP OFF



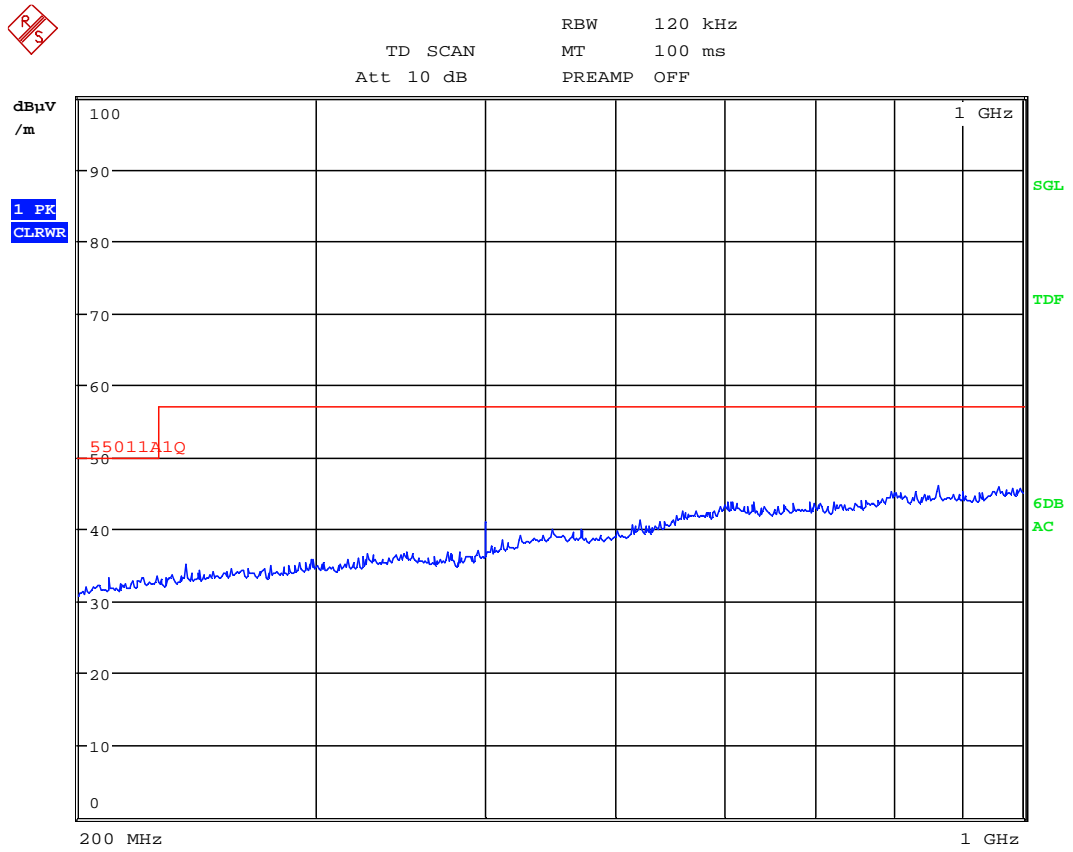
Poseidon2 3268 - 30 MHz az 200 MHz - antena vertikálne

Date: 19.APR.2013 10:08:01



Poseidon2 3268 - 200 MHz az 1 GHz - antena horizontalne

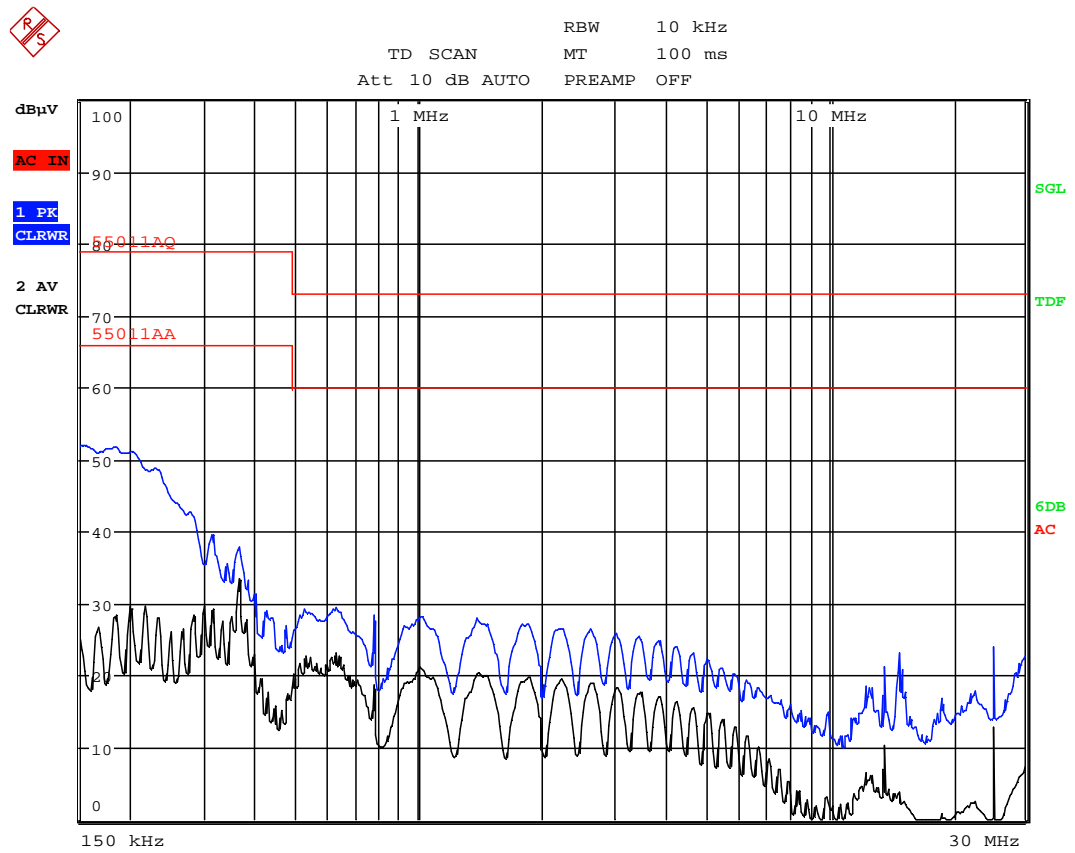
Date: 19.APR.2013 10:12:18



Poseidon2 3268 - 200 MHz az 1 GHz - antena vertialne

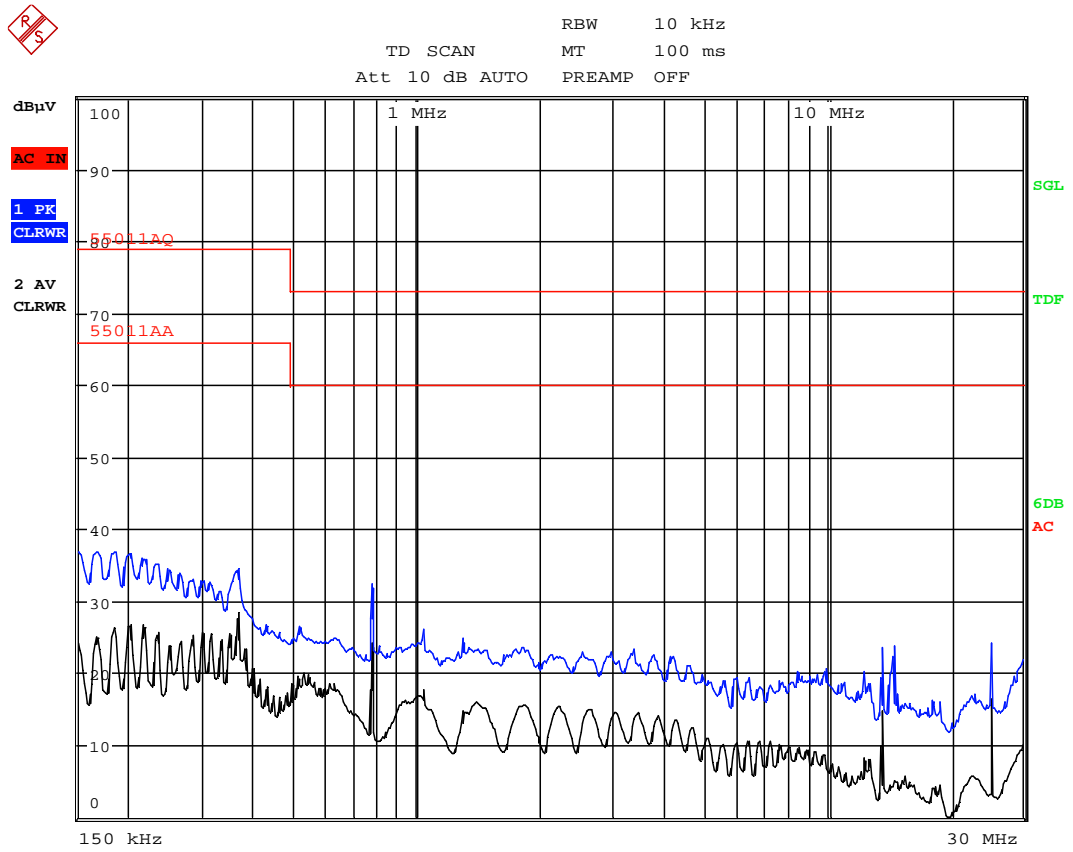
Date: 19.APR.2013 10:15:23

Výsledky měření rušení šířeného po napájecích vodičích zkoušeného zařízení:



Poseidon2 3268 - 150 kHz az 30 MHz - fazovy vodíc

Date: 19.APR.2013 10:18:54



Poseidon2 3268 - 150 kHz az 30 MHz - nulovy vodice

Date: 19.APR.2013 10:20:29