ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Elektromagnetická kompatibilita energetických zařízení

vedoucí práce: **Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.**
autor: **Bc. Martin Uzel**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2011/2012**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Martin UZEL**
Osobní číslo:	**E10N0200P**
Studijní program:	**N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor:	**Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu:	**Elektromagnetická kompatibilita energetických zařízení**
Zadávající katedra:	**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte přehled rušivých vlivů působících v elektroenergetických zařízeních.
2. Popište principy ověřování odolnosti el. zařízení proti rušivým vlivům.
3. Vypracujte metodiku ověřování elektromagnetické odolnosti.
4. Proveďte kontrolní měření elektromagnetické imunity dosažitelnými metodami.
5. Vyhodnoťe a diskutujte výsledky měření.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

1. **Normy řady ČSN EN 61000-4-X**
2. **Norma ČSN EN 550 11**

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Jiří Laurenc, CSc.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **17. října 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2012**

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

L.S.

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta elektrotechnická

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Diplomová práce se zabývá elektromagnetickou kompatibilitou energetických zařízení. Práce pojednává o rušivých vlivech v elektroenergetických zařízeních a principech ověřování odolnosti elektrických zařízeních proti rušivým vlivům. V práci je zpracováno kontrolní měření elektromagnetické imunity na reálném zařízení, které bude použito v provozu.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, elektromagnetická imunita, zkouška odolnosti, rušivé vlivy

Abstract

This diploma thesis is concerned with the electromagnetic compatibility of power equipment. Thesis deals with disturbing influences in the power equipments, the immunity verification principles against disturbing influences of power equipment. In this thesis the control measurement of electromagnetic immunity on the real equipment, which will be used in industry operation is compiled.

Key words

Electromagnetic kompatibility, electromagnetic immunity, imunity test, disturbing influences.

Prohlášení

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

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.

V Plzni dne 8.5.2012 Jméno příjmení

……..

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Jiří Laurencovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a Ing. Miroslavu Hromádkovi za spolupráci při vykonávání praktické části diplomové práce.

Obsah

OBSAH **7**

ÚVOD **9**

SEZNAM ZKRATEK **10**

1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA **11**

1.1 DŮVODY ROZVOJE EMC 12
1.2 ČLENĚNÍ OBORU EMC 13
1.2.1 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů 13
1.2.2 Základní pojmy EMC 16

2 RUŠIVÉ VLIVY V ELEKTROENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ **18**

2.1 DRUHY SYSTÉMŮ 21
2.1.1 Rozlehlé systémy 21
2.1.2 Lokální systémy 21
2.1.3 Systémy přístrojového typu 21
2.2 INTERNÍ RUŠENÍ 22
2.3 EXTERNÍ ZDROJE RUŠENÍ 22
2.3.1 Bleskový výboj 22
2.3.2 Elektrostatický výboj 23
2.3.3 Nukleární elektromagnetický pulz 23

3 ELEKTROMAGNETICKÁ ODOLNOST A JEJÍ TESTOVÁNÍ **24**

3.1 OBECNÁ METODIKA ZKOUŠEK ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI 24
3.1.1 Úrovně elektromagnetických odolností v závislosti na druhu elektrotechnického prostředí: 25
3.2 KRITÉRIA ELEKTROMAGNETICKÉ ODOLNOSTI 27

4 VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSU RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ **29**

4.1 GALVANICKÁ VAZBA 29
4.2 KAPACITNÍ VAZBA 31
4.2.1 Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů 31
4.2.2 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem 32
4.2.3 Kapacitní vazba vůči zemi 33
4.3 INDUKTIVNÍ VAZBA 33
4.4 VAZBA VYZAŘOVÁNÍM 35

5 ZKOUŠKY ODOLNOSTI V OBLASTI EMC **36**

5.1 ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ 36
5.1.1 Postup zkoušky 37
5.1.2 Prověřování činnosti zkoušeného zařízení 38
5.1.3 Provádění zkoušky 38
5.2 RYCHLÉ ELEKTRICKÉ PŘECHODOVÉ JEVY/SKUPINY IMPULSŮ 39
5.2.1 Zkušební úrovně 41
5.2.2 Zkušební sestava 42
5.2.3 Postup zkoušky 42
5.2.4 Provedení zkoušky 43
5.3 RÁZOVÝ IMPULS 43

5.3.1 Postup zkoušky ... *46*
5.4 VYZAŘOVANÉ VYSOKOFREKVENČNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ POLE ... 48
5.4.1 Zkušební úrovně ... *49*
5.4.2 Zkušební zařízení ... *50*
5.4.3 Kalibrace pole ... *51*
5.4.4 Postup zkoušky ... *52*
5.5 ODOLNOST PROTI RUŠENÍ ŠÍŘENÝM VEDENÍM, INDUKOVANÝM VYSOKOFREKVENČNÍMI POLI ... 53
5.5.1 Zkušební úrovně ... *53*
5.5.2 Postup zkoušky ... *54*
5.6 KRÁTKODOBÉ POKLESY NAPĚTÍ, KRÁTKÁ PŘERUŠENÍ A POMALÉ ZMĚNY NAPĚTÍ ... 55
5.6.1 Zkušební úrovně ... *56*
5.6.2 Postupy zkoušky ... *57*
5.7 VÝSLEDKY ZKOUŠEK ... 58

6 KONTROLNÍ MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ IMUNITY REGULACE TOPENÍ RT1 ... 59

6.1 POPIS FUNKCE ... 60
6.2 ZPŮSOB ZKOUŠENÍ ... 61
6.2.1 Zkoušky odolnosti ... *61*
6.2.2 Seznam použitých přístrojů a zařízení ... *62*
6.3 PRŮBĚHY A VÝSLEDKY ZKOUŠEK TESTŮ ODOLNOSTI ... 63
6.3.1 Test odolnosti zařízení vůči elektrickému rychlému přechodovému jevu ... *63*
6.3.2 Test odolnosti proti vyzařovanému vf elektromagnetickému poli ... *66*
6.3.3 Test odolnosti vůči rázovému impulsu ... *68*
6.3.4 Test odolnosti zařízení vůči rušením šířeným vedením, indukovanými vysokofrekvenčními poli ... *69*

ZÁVĚR ... 71

CITOVANÁ LITERATURA ... 72

SEZNAM OBRÁZKŮ ... 74

SEZNAM TABULEK ... 76

PŘÍLOHY ... 77

Úvod

Koncem osmdesátých let došlo k zásadním společenským změnám, které poznamenaly i elektrotechniku a elektroniku. Tímto vlivem se změnilo postavení výzkumu a vývoje. Přišla velká zahraniční konkurence, které se vystavili domácí výrobci a jejich předvýrobní složky. Mnoho vynikajících techniků, kteří se v této době zabývali výzkumem a vývojem dnes pracují v různých malých firmách, kde kromě systémové integrace cizích komponentů a výrobků vyvíjejí a vyrábějí výrobky s použitím součástek a komponentů světových výrobců. Z tohoto pohledu nabývá dnes elektromagnetická kompatibilita nových rozměrů, protože společný výskyt různých systémů a komponentů je daleko rozsáhlejší, rozmanitější a rizikovější v porovnání s dobami monopolních výrobců motorů, měničů, součástek atd. Například v České republice jsou dnes stále ještě zastaralé provozy, kde byly neregulovatelné asynchronní motory s nestíněnými kabely a celkově s rozvody do kterých se zakomponovaly frekvenční měniče s IGBT tranzistory, které byly dovezeny ze zahraničí. Tyto motory a rozvody nebyly projektovány na takto silné zdroje rušení. Hlavní chybou projektantů je zúžený pohled na systémové nasazení, nerespektování zásad elektromagnetické kompatibility, což má často za následek větší náklady a vlivem silné konkurence se problémy často zamlčují.

Tato diplomová práce si klade za cíl Vás obeznámit se základními pojmy a rozdělením elektromagnetické kompatibility. Značná část diplomové práce je věnována zdrojům rušení (interní a externí) v elektroenergetických zařízení a principům ověřování odolnosti el. zařízení právě proti těmto rušivým vlivům. Poslední část diplomové práce se skládá z otestování odolnosti systému regulace topení v trolejbusu či tramvaji.

Seznam zkratek

EMC (Electromagnetic Compatibility)	Elektromagnetická kompatibilita
EMI (Electromagnetic Interference)	Elektromagnetické rušení
EMS (Elektromagnetic Susceptibility)	Elektromagnetická odolnost
ESD (ElectroStatic Discharge)	Elektrostatický výboj
EUT	Zkoušený objekt
DC (Direct Current)	Stejnosměrný proud
L (Line)	Fáze

1 Elektromagnetická kompatibilita

Elektromagnetická kompatibilita (slučitelnost) je označována zkratkou EMC a je definována jako schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní, umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nesmí ovlivňovat své okolí. Například nevyzařovat signály, které by mohly rušit ostatní zařízení.

Historie elektromagnetické kompatibility se začala psát v šedesátých letech 20. století v USA, kde vznikla jako samostatná vědecko-technická disciplína a poměrně dlouhou dobu 10 až 15 let byla předmětem zájmu jen úzkého druhu odborníků v elektrotechnice, pracující ve vojenském a kosmickém průmyslu. V posledních desetiletích se rozvoj elektroniky, zejména mikroprocesorové a komunikační techniky stále zvyšuje a více proniká do všech oblastní každodenního života. Tím pádem elektromagnetická kompatibilita přestává být exkluzivní technickou disciplínou a stále více se dotýká nás všech.

Název „elektromagnetická kompatibilita“ (z anglického „*Electromagnetic Compatibility*“, z něhož pochází i mezinárodně uznávaná zkratka EMC) vyjadřuje tedy schopnost současné správné funkce, tj. koexistence zařízení nebo systémů nacházejících se ve společném elektromagnetickém prostředí bez závažného ovlivňování jejich normálních funkcí. V němčině se používá pojmu „*Elektromagnetische Verträglichkeit*“, v ruštině „*Elektromagnitnaja sovměstimmost*“. V češtině byl dříve užíván rovněž pojem „*elektromagnetická slučitelnost*“, dnes se však dává přednost názvu elektromagnetická kompatibilita [1].

1.1 Důvody rozvoje EMC

Zařízení nebo systémy (a to jak technické, tak i biologické) nesmí nepříznivě ovlivňovat normální provoz a funkci jiných systémů či zařízení a zároveň musí být odolné vůči působení jiných zařízení. Přitom každý systém, zařízení nebo jejich určitá část může být současně vysílačem i přijímačem rušení. Elektromagnetická kompatibilita je tedy vyšší a širší pojem než prostá spolehlivost daného zařízení. Právě se spolehlivostí byla elektromagnetická kompatibilita v počátcích mylně zaměňována a ztotožňována [1].

S přibýváním elektrických zařízení a spotřebičů neúnosně stoupá úroveň rušení v kmitočtových pásmech prakticky od 0 Hz až do stovek GHz. Dnešní citlivá elektronická zařízení musí často pracovat v prostředí, kde dochází k silným rušením, což vede k obtížným situacím z hlediska elektromagnetické kompatibility. Tak například vstupní měřící ústředna řídícího počítače se spojuje s výrobním technologickým procesem prostřednictvím množství čidel, k nimž často vedou i několik set metrů dlouhé přívodní kabely nesoucí signály nízkých úrovní mV a μV. Kabely jsou přitom často vystaveny působení silných rušivých polí schopných do nich indukovat napětí, dosahující desítek až stovek voltů. Tyto parazitní signály – impulsní nebo harmonické – pak mohou být vyhodnoceny jako informace došlé z technologického procesu a mít za následek nesprávný zásah (mnohdy automatický) s možným rizikem hospodářských škod, havárií na technickém zařízení, ale i ohrožení lidského života či zdraví [1].

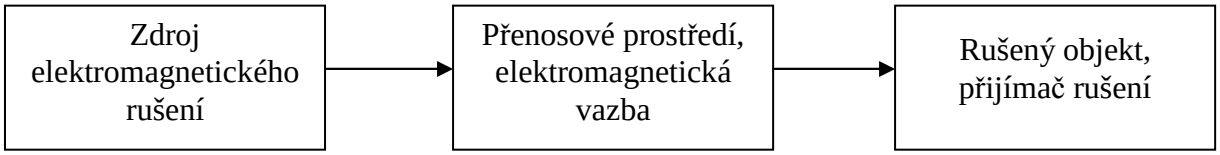
1.2 Členění oboru EMC

Obor elektromagnetická kompatibilita můžeme rozdělit na dvě hlavní části. První částí je EMC biologických systémů a druhou částí je EMC technických systémů a zařízení. Pro moji diplomovou práci je důležitá pouze část elektromagnetické kompatibility technických systémů, proto elektromagnetické kompatibilitě biologických systému nebudu věnovat pozornost.

1.2.1 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

EMC technických systémů a zařízení se zabývá vzájemným působením a koexistencí technických prostředků, zejména elektrotechnických a elektronických přístrojů a zařízení. Z původní disciplíny zabývající se pouze ochranou proti rušení rádiového příjmu se EMC v současnosti rozvinula ve velice široký obor, který se člení na několik dalších podoborů a oblastí. Principy a koncepce EMC lze chápat jako jednu oblast praktické aplikace obecných principů elektrotechniky a elektroniky [1].

Když se elektromagnetická kompatibilita zkoumá na daném zařízení či systému (a to jak technického, tak i biologického), vychází se z tzv. základního řetězce EMC, který je vyobrazen na obrázku 1. V obecném případě vždy vyšetřujeme všechny jeho tři složky [1].



Motory, spínače, relé	vzdušný prostor	číslicová technika
energetické rozvody	energetické kabely	počítače
polovodičové měniče	napájecí vedení	měřící přístroje
zářivky	zemnění, stínění	automatizační prostředky
obloukové pece, svářečky	signálové vodiče	telekomunikační systémy
oscilátory	datové vodiče	systémy přenosu dat
počítače, číslicové systémy		rozhlasové přijímače
elektrostatické výboje		televizní přijímače

Obrázek 1: Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí [1]

Mezi zdroje elektromagnetického rušení patří jak mechanismy vzniku rušení, tak i jejich charaktery a intenzity. Najdeme zde přírodní zdroje rušení rušivých signálů (Slunce, kosmos, elektrické procesy v atmosféře apod.) i tzv. umělé zdroje rušení, tj. zdroje vytvořené lidskou činností („man made noise“), které jsou vytvářeny různými technickými zařízeními – zapalovací systémy, elektrické motory, výroba přenos a distribuce elektrické energie, elektronická zařízení, elektronické sdělovací prostředky, tepelné a světelné prostředky apod.

Další oblastí řetězce EMC se zabývá elektromagnetickým přenosovým prostředím a vazbami. Jsou to způsoby cest, kterými se energie ze zdroje rušení dostává do rušených objektů (přijímače rušení) [1].

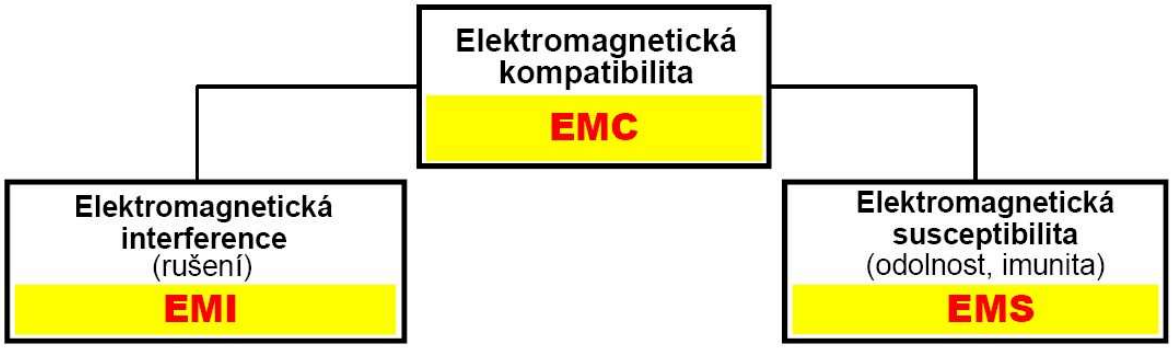
Poslední konečnou oblastní je problematika objektu či přijímačů rušení zabývajících se klasifikací typů a podrobnou specifikací rušivých účinků na základě analýzy konstrukčních a technologických parametrů zařízení a z toho plynoucí jejich elektromagnetickou odolností [1].

Obrázek 2 je zjednodušená verze základního řetězce EMC. Ve skutečnosti může být každý systém, zařízení nebo jeho určitá část současně jak zdrojem tak příjemcem elektromagnetického rušení. Přesto můžeme v technické praxi většinou označit element méně citlivý na rušení a generující větší úroveň rušení jako zdroj rušícího signálu a naopak, citlivější element s menší úrovní generovaného rušení za přijímač rušivých signálů. V obou směrech jsou přitom zdroj a přijímač vázány mezi sebou parazitní elektromagnetickou vazbou. Ve skutečném řetězci EMC se rovněž nikdy nejedná o působení jediného zdroje rušení a jediného přijímače, ale řeší se vždy vzájemné vztahy více systémů vzájemně se všestranně ovlivňujících [1].

Vzájemné působení různých systémů je tedy velmi složité a komplexní. Základní řetězec EMC na obrázku 1 má proto především metodologický význam. Současně je však vhodné si uvědomit, že pokud by se podařilo zcela odstranit kteroukoli část tohoto řetězce, ztratila by elektromagnetická kompatibilita svůj smysl, neboť dané zařízení či systém by byl absolutně kompatibilní. Ve snaze se v praxi tomuto stavu alespoň přiblížit zaměřujeme svou pozornost na jednu ze tří oblastí řetězce EMC. Výběr nejvhodnější z nich, jejíž úpravou dosáhneme nejvyššího efektu EMC, závisí samozřejmě na konkrétním systému a okolnostech jeho činnosti. Především musíme uvážit, zda rušivé účinky ovlivňujícího systému (zdroje rušení) jsou jeho funkční parametry (např. jiskření na kontaktech, vyšší harmonické složky apod.). Podle toho pak směřujeme prostředky pro minimalizaci těchto rušivých vlivů buď převážně na zdroj rušení, nebo na rušený objekt, příp. na přenosovou cestu mezi nimi [1].

1.2.1.1 Základní členění problematiky EMC

Celá problematika EMC se podle obrázku 2 člení do dvou základních skupin.



Obrázek 2: Základní členění problematiky EMC [2]

Elektromagnetická interference (EMI) neboli elektromagnetické rušení je proces, při kterém se signál vytvářený zdrojem rušení přenáší prostřednictvým elektromagnetické vazby do rušených systémů. Elektromagnetická interference tedy rozlišuje zdroje rušení popisem a měřením rušivých signálů a identifikací parazitních cest. Aby byl celý systém kompatibilní musí se použít technická opatření především na straně zdrojů rušení a jejich přenosových cest. EMI se tedy zabývá hlavně příčinami rušení a jejich odstraňováním [1].

Elektromagnetická susceptibilita či imunita (EMS) neboli elektromagnetická citlivost či odolnost vyjadřuje schopnost zařízení a systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v prostředí, ve kterém se vyskytuje elektromagnetické rušení. Elektromagnetická susceptibilita se tedy zabývá hlavně technickými opatřeními, které zvyšují u objektu jeho elektromagnetickou imunitu. Tudíž jeho odolnost proti vlivům rušivých signálů. EMS spíše odstraňuje důsledky rušení, bez odstraňování jejich příčin [1].

Obě tyto základní oblasti EMC v sobě zahrnují celou řadu kroků a nezbytných postupů. Hodně důležitou a rozsáhlou oblastí je měření elektromagnetické interference, která zahrnuje měřící metody a postupy pro kvantitativní hodnocení vybraných parametrů hlavně na rozhraních zdrojů a přijímačů rušení. Pro závěrečné posouzení EMC testovaného zařízení je rozhodující problematika měření, která je ještě zkomplikovaná tím, že zařízení může být současně zdrojem i přijímačem rušivých signálů. A na to musíme dát při testování pozor (technicky, kalibračně, početně) [1].

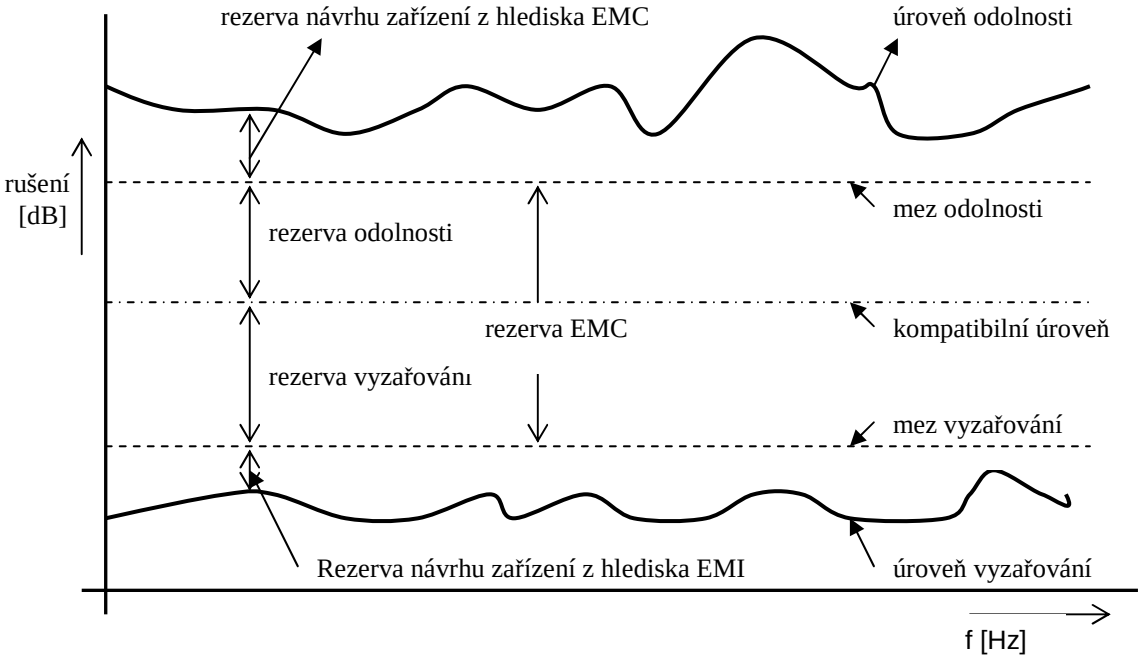
V dnešní době se stejně jako testování rušní rozvíjí i testování elektromagnetické odolnosti objektů. To se provádí za pomoci simulátorů rušení na hotových zařízeních, ale i na zařízeních během jejich výroby a vývoje [1].

Nemůžeme v šířce problematiky EMC pominout její některé speciální aspekty. Ve vojenské oblasti souvisejí tyto aspekty jak s bojeschopností složitých elektronických vojenských zařízení na jedné straně, tak i s vlivem jejich elektromagnetické činnosti na okolní „civilní“ sektor. Celá jedna oblast systému ochrany státu, tzv. radioelektronický boj, není ničím jiným, než narušování EMC protivníkovy techniky. K tomu je však nutno vědět, jak je této EMC dosaženo, kde jsou její slabá místa apod. Souvisí to i s nasazením výpočetní techniky jak ve vojenství, tak v civilních oblastech z hlediska zachování a ochrany důležitých dat. Proto vojenská pracoviště jak u nás tak v zahraničí věnují problematice EMC značnou pozornost již od jejího vzniku a obvykle mají náskok před civilním sektorem. Tím pádem jsou příslušné vojenské normy EMC přísnější a náročnější než odpovídající civilní normy [1].

1.2.2 Základní pojmy EMC

Definice a základní pojmy z oblasti EMC, které se v této práci vyskytují jsou převzaty z mezinárodního elektrotechnického slovníku, kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita a byl vydán jako norma ČSN IEC 50 (161) [1].

Úroveň vyzařování je rušení generované konkrétním spotřebičem či zařízením, měřené předepsaným způsobem v závislosti na kmitočtu.
Mez vyzařování je maximální normou povolená úroveň vyzařování daného zařízení. Rozdíl těchto úrovní vyjadřuje tzv. rezervu návrhu daného zařízení z hlediska EMI.
Úroveň odolnosti je maximální úroveň rušení působícího na konkrétní zařízení, při němž nedochází ještě ke zhoršení provozních podmínek zařízení.
Rezervu návrhu udává rozdíl těchto úrovní (úroveň odolnosti a úroveň vyzařování) z hlediska jeho odolnosti EMS.
Rozdíl mezí odolnosti a mezí vyzařování určuje **rezervu EMC** daného zařízení. Uvedená norma zavádí rovněž pojem tzv. **kompatibilní úrovně**, jakožto maximální předepsané úrovně celkového rušení, o němž se předpokládá, že bude ovlivňovat přístroje či zařízení provozované v konkrétních podmínkách. Rozdíly meze vyzařování a meze odolnosti vůči této kompatibilní úrovni určují rezervu vyzařování a rezervu odolnosti [1].



Obrázek 3: K definici úrovní a mezí vyzařování a odolnosti [1]

Elektromagnetické prostředí – souhrn elektromagnetických jevů existujících v daném místě.

Elektromagnetické rušení – jakýkoliv elektromagnetický jev, který může zhoršit provoz přístroje, zařízení nebo systému.

Odolnost – schopnost přístroje, zařízení nebo systému být v provozu bez zhoršení provozních vlastností za přítomnosti elektromagnetického rušení.

Impuls – prudká krátkodobá změna fyzikální veličiny s následným rychlím návratem k výchozí hodnotě [3].

2 Rušivé vlivy v elektroenergetických zařízení

Elektromagnetickou odolnost rozdělujeme na vnitřní elektromagnetickou odolnost systému a vnější elektromagnetickou odolnost systému. Interní elektromagnetická odolnost je odolnost systému vůči rušivým zdrojům nacházejícím se uvnitř vlastního systému. Externí elektromagnetická odolnost pak vyznačuje odolnost systému vůči vnějším zdrojům elektromagnetického rušení. Rozdělení na vnitřní a vnější zdroje rušení se v těchto definicích těžko určuje a závisí na vymezení zkoumaného systému. Druhy systému jsou rozlehlé systémy, lokální systémy a systémy přístrojového typu.

Hodně častou klasifikací umělých rušivých signálů, která se používá je jejich rozdělení do tří základních skupin:

1. **Šum** jsou rušivé signály, které ovlivňují především tvar užitečného signálu, což může být napájecí napětí. Pojem „šum“ používaný v oblasti elektromagnetické kompatibility ve smyslu rušivého signálu má jiný význam než obvykle používaný pojem šumu. Je to náhodný signál provázející činnosti elektrických a elektronických součástek a obvodů. Šum jakožto rušivý signál má periodický charakter a jeho zdrojem mohou být například elektrické motory a rotační svářečky [1].
2. **Impulzy** jsou rušivé signály, které mají impulzní charakter s velkým poměrem velikosti impulzů k době jejich trvání. Tyto pulzy se jako kladné či záporné „špičky“ superponují na signál, který je pro nás užitečný. Pulzy mohou vznikat zejména spínacími pochody, které vznikají při kontaktním spínání elektrických či energetických obvodů a soustav [1].
3. **Přechodné jevy** jsou náhodné jednorázové rušivé signály, které mají obvyklou dobu trvání od několika ms až do několika sekund. Příčiny vzniku, které jsou typické pro přechodné jevy jsou náhlé změny zatížení rozvodné energetické sítě při zapínání a vypínání velkých výkonů [1].

S časovým průběhem rušivého signálu je jednoznačné vázána i šířka jeho kmitočtového spektra, což je údaj velmi důležitý zejména z hlediska použití vhodných prostředků pro filtraci rušení. Úzkopásmové rušení je produkováno zejména užitečné signály rozhlasových a televizních vysílačů, charakter širokopásmového rušení je naopak většina tzv. průmyslových rušivých signálů, ať již mají časový průběh spojitý, impulzní či kvazi-impulzní. Rovněž všechna přírodní rušení jsou svou podstatou širokopásmová. Kmitočtové rozsahy rušivých signálů některých interferenčních zdrojů jsou v Tabulce 1 [4].

Zdroj rušivých signálů	Kmitočtové pásmo	Způsob šíření rušivého signálu
zářivka	0,1 Hz ÷ 3 MHz	po vedení
	100 Hz ÷ 3 MHz	prostorem
rtuťová výbojka	0,1 Hz ÷ 1 MHz	po vedení
kolektorové motory	2 Hz ÷ 4 MHz	po vedení
	10 Hz ÷ 400 kHz	prostorem
síťové vypínače	0,5 Hz ÷ 25 MHz	po vedení
výkonové vypínače	10 Hz ÷ 20 MHz	po vedení
	0,1 Hz ÷ 20 MHz	prostorem
spínané síťové zdroje	0,1 Hz ÷ 30 MHz	po vedení
	0,1 Hz ÷ 30 MHz	prostorem
korónový výboj	0,1 Hz ÷ 10 MHz	po vedení
klopné obvody	15 kHz ÷ 400 MHz	prostorem

Tabulka 1: Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení [5]

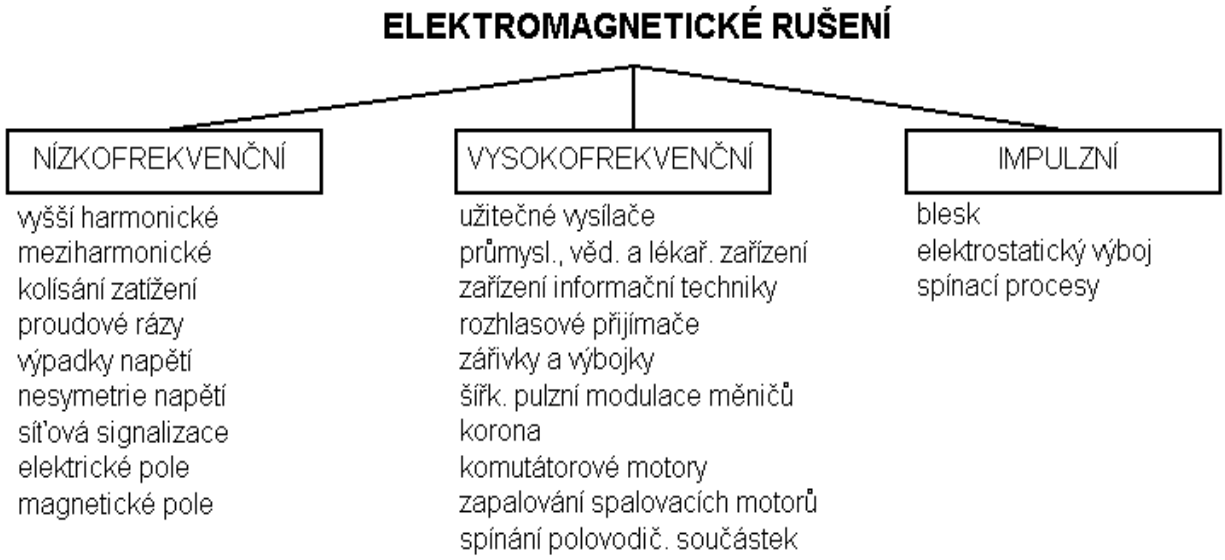
Rušení lze dále dělit z hlediska obsazení kmitočtového spektra a fyzikálního působení na nízkofrekvenční rušení a vysokofrekvenční rušení.

Nízkofrekvenční rušení rušení se projevuje dvojím způsobem a to energetickým nebo akustickým projevem. Energetické nízkofrekvenční rušení působí na napájecí energetickou soustavu v pásmu kmitočtů od nuly do 2 kHz a způsobuje hlavně deformaci (zkreslení) napájecího napětí a odebíraného proudu energetických sítí. To má rušivý vliv na provoz zařízení, která jsou závislá na tvaru křivky napájecího elektrického napětí. Mohou to být ovládací a sdělovací systémy, osvětlení, stroje a přístroje a další. Zdrojem energetického rušení je obecně každá nelineární zátěž napájecí sítě způsobující deformaci odebíraného proudu [4].

Akustické nízkofrekvenční rušení působí v pásmu do 10 kHz, kde negativně ovlivňuje funkci přenosových informačních systémů jako jsou telefony, rozhlas, měřící a řídící zařízení, komunikační a informační soustavy apod. Toto rušení je generováno energetickými zdroji, systémy číslicového přenosu dat, radary apod [4].

Vysokofrekvenční rušení, též označováno jako rádiové rušení leží podle Radiokomunikačního řádu v pásmu od 10 kHz do 400 GHz. Mezi zdroje rádiového rušení patří prakticky všechny existující interferenční zdroje, neboť jejich rušivé signály sahají prakticky vždy až do těchto kmitočtových oblastí [4].

Z každého interferenčního zdroje se šíří rušivý signál jak prostorem, tak i po napájecích či sdělovacích vedeních. Obvykle jeden z těchto dvou způsobů u různých zdrojů rušení převažuje. Z tohoto důvodu se interferenční zdroje někdy rozdělují na zdroje rušení šířených vedením a na zdroje rušení šířených prostorem (vyzařováním) [4].



Obrázek 4: Rozdělení elektromagnetického rušení [1]

2.1 Druhy systémů

2.1.1 Rozlehlé systémy

Prvním typem jsou rozlehlé systémy, též označovány jako distribuované systémy. Jejich jednotlivé subsystémy jsou od sebe navzájem geograficky vzdálené. Rušivé signály mohou být vnášeny do signálových cest celého rozlehlého systému při provozu subsystémů. Působení těchto rušivých signálů se zkoumá v rámci vnitřních zkoušek elektromagnetické odolnosti systému. Vnější odolnost rozlehlých systémů je složena převážně odolností vůči atmosférickým elektromagnetickým vlivům. Mezi rozlehlé systémy se zahrnují zejména systémy dálkového zpracování dat zahrnující dálková a místní vedení, přenosová zařízení, ústředny, datové měniče, koncová zařízení a další subsystémy [5].

2.1.2 Lokální systémy

Dalším typem jsou lokální systémy, též označovány jako systémy místní. Tento systém má subsystémy, které jsou umístěny v rámci jednoho areálu, budovy nebo místnosti. Zdrojem rušení zde jsou včetně vlastních signálových a napájecích rozvodů i další elektrické subsystémy v daném areálu. Mohou to být technologická zařízení, výtahy, osvětlení, ostatní zdroje a přístroje. Jako lokální systémy mohou být označovány výpočetní střediska, informační systémy podniků řídící centra apod. [5].

2.1.3 Systémy přístrojového typu

Třetím a posledním typem systémů jsou systémy přístrojového typu, které existují jako individuální kompaktní celky. Do této skupiny patří všechny přístroje spotřební elektroniky, přístroje vyskytující se v domácnosti, elektronické počítače apod. [5].

2.2 Interní rušení

Toto rušení, které je vnitřního charakteru je spojené se zdrojem napájecího napětí obvodu. S rostoucím zkušebním napětím toto rušení zpravidla roste. Mezi vnitřní rušení patří například částečné výboje ve vysokonapěťovém transformátoru, filtrech, vazebním kondenzátoru, na přívodech vysokého napětí apod. Rušení může vznikat i nedokonalým uzemněním předmětů a blízkými vodivými předměty bez fixovaného potenciálu. Zkušební napětí musí být regulováno a regulací také vzniká vnitřní rušení, které je způsobeno tyristorovým buzením, uhlíky generátorů, běžci regulačního ústrojí. Tyto druhy rušení se dají výrazně potlačit použitím vhodných vysokonapěťových filtrů [6].

2.3 Externí zdroje rušení

2.3.1 Bleskový výboj

Bleskový výboj je vybití atmosférické elektřiny a vzniká tím strmý elektromagnetický impuls, který se projevuje rušivými až destrukčními účinky v zasažených i vzdálenějších zařízeních. Velikost vyrovnávacích proudů bleskového výboje se pohybuje od několika kA až do 200 kA.

Po přímém úderu do budovy vznikne rázový impuls proudu, který se hromosvodem svede do země. Může se také i uzavírat přes kovové části konstrukce budovy, a tím pádem protéká uprostřed budovy ve stěnách místností v blízkosti elektronických zařízení. Kromě silného magnetického pole indukuje v blízkém síťovém rozvodu sekundární napěťové rázy [7].

Blesk má i nepřímý účinek. Ten spočívá v zavlečení napěťového rázového impulsu z vedení NN případně VN vně budovy do vnitřního silového rozvodu. V tomto případě záleží na použití primárních ochran budovy proti přepětí (bleskojistky) a na to jak je dokonalý zemnící systém budovy. Rázové impulsy mají společnou velkou strmost náběžné hrany (cca 1 µs) a pomalejší pokles, který je závislý na velikosti náboje. Působením přepěťových ochran bývá i doběh impulsu někdy uprostřed sestupné hrany prudce přerušen [7].

2.3.2 Elektrostatický výboj

V posledních letech vzrůstá význam lokálních elektrostatických výbojů. Tyto výboje mají velmi nízkou energii (menší než 10 mJ), ale i přes tuto nízkou energii mají vysokou napěťovou úroveň (až 15 kV). Pro toto rušení jsou nejvíce náchylné integrované obvody pracující s nepatrnými proudy a které mají vysokoohmové pracovní odpory.
K elektrostatickým výbojům často dochází na pracovištích při akumulaci například těchto skutečností:

- Oděv ze syntetické tkaniny – nevhodné oblečení z hlediska vzniku vysokého elektrostatického napětí.
- Povrchy stolů, židlí a podlahových krytin jsou také s umělých hmot s vysokým izolačním odporem.
- Nízká vlhkost vzduchu.

Při tření šatů a bot vzniká náboj o vysokém elektrickém napětí. Tento náboj se pak při dotyku vybije na povrch elektrického zařízení. Tento výboj může další indukcí ovlivnit funkci i životnost elektronického zařízení. Tyto výboje mikroskopického charakteru nemusí způsobit jeho okamžité zničení, ale třeba jiné drobné poškození dráhy, její zúžení, nebo jen zhoršení vnitřních izolačních parametrů. Toto poškození se projeví vážnou závadou až později v době, která je mnohem kratší, než je normální životnost součástky. Z tohoto důvodu se opakují výboje soustředěné do jednoho místa [7].

2.3.3 Nukleární elektromagnetický pulz

Tento pulz je velice strmý výkonový elektromagnetický pulz, který vzniká při výbuchu jaderné pumy. Účinky tohoto pulzu velmi silně ovlivňují veškeré okolní slaboproudé i silnoproudé elektrotechnické systémy, některé až do stadia destrukce. Dosah i rozsah těchto účinků závisí především na typu jaderné nálože a výšce jaderné exploze nad zemí. Rušící a destrukční účinky nukleárního elektromagnetického pulzu jsou relativně mnohem vyšší než účinky blesku [7].

3 Elektromagnetická odolnost a její testování

3.1 Obecná metodika zkoušek elektromagnetické odolnosti

Při sledování různých technologických celků obsahujících informační soustavy je jedním ze základních parametrů také stanovení spolehlivosti jejich dílčích prvků. K základním zjišťovaným parametrům patří právě elektromagnetická odolnost. Stanovení elektromagnetické odolnosti je realizováno dle parametrů, které zaručuje výrobce [7]. Parametry mohou být ve třech alternativách:

- Parametry elektromagnetické odolnosti lze definovat pro výrobce už ve fázi vývoje.
- Parametry odolnosti EMC jsou definovány mezinárodním doporučením a typově jsou ověřované v renomované zkušebně.
- Technická dokumentace neobsahuje potřebné informace o odolnosti a výrobce nezaručil dodržení mezinárodních standardů

Zkoušky odolnosti mají daný průběh. Měly by v každém případě probíhat ve čtyřech základních krocích:

1. Specifikace požadavků na zkoušku odolnosti
2. Provedení zkoušek dle specifikace
3. Dílčí vyhodnocení po každé zkoušce
4. Vypracování technické dokumentace o každé vykonané zkoušce

Požadavky na elektromagnetickou odolnost konkrétního typu zařízení se nejdříve specifikují následující požadavky a skutečnosti:

- Rušivé vlivy, které mohou vyšetřované zařízení v daných podmínkách provozu ovlivnit
- Možné brány vstupu rušivých signálů do testovaného zařízení
- Různé provozní stavy testovaného zařízení, při nichž je nutno odolnost kontrolovat
- Kategorie odolnosti, která je požadována pro testované zařízení
- Přípustné účinky rušivých vlivů

Jelikož některé zkoušky jsou dosti časově i finančně náročné, neprovádí se na každém testovaném zařízení všechny zkoušky odolnosti, ale realizují se jen ty druhy zkoušek, které

jsou spjaty s dominantními rušivými vlivy. Tyto dominantní rušivé vlivy se určí při úvodní specifikaci [7].

Pro informační systémy je nutno komplexně sledovat jakou galvanickou vazbou jsou připojeny k telekomunikačním sítím, tedy jakým typem vedení (nadzemní, podzemní, stíněné, nestíněné apod.) [7].

Pro zkoušky elektromagnetické odolnosti je obecně třeba volit vyšší úroveň při nasazování zařízení, které se nacházejí v prostředích těžce definovatelných. V prostředí s vlivy, které se dají předpokládat se používají zařízení pro nižší úroveň elektromagnetického rušení.

3.1.1 Úrovně elektromagnetických odolností v závislosti na druhu elektrotechnického prostředí:

Dle druhu prostředí, kde se testovaný předmět zkouší se rozlišují různé úrovně. Tyto úrovně elektromagnetické odolnosti odpovídají velikosti zkušebního napětí. Velikosti zkušebních impulsů napětí jsou uvedeny v tabulce 2.

Úroveň odolnosti	Zkušební pulzy [kV]	
	Vstupní, výstupní, ovládací a další svorky	Napájecí svorky
1	0,25	0,5
2	0,5	1
3	1	2
4	2	4
5	Dle ujednání	Dle ujednání

Tabulka 2: Velikost zkušebních napěťových impulsů [7]

3.1.1.1 Úroveň 1

První úrovní elektromagnetické odolnosti se myslí prostředí, které je dobře chráněné. Vyznačuje se tím, že rušení od rychlých transientů, vznikajících od bezkontaktních řízených obvodů je potlačeno. Napájení je odděleno od řídících a měřících obvodů přicházejících z jiného prostředí, vyznačujících se vyššími nároky na úroveň odolnosti. Dalším požadavkem je, že musí být napájení provedeno stíněnými kabely, jejichž stínění je uzemněno na obou koncích na referenční zem instalace a napájecí zdroj je chráněn filtrem. Příkladem takového prostředí může být počítačová místnost se kterou se běžně setkáváme [7].

3.1.1.2 Úroveň 2

Druhou úrovní elektromagnetické odolnosti se rozumí prostředí chráněné. Tyto druhy prostředí se vyskytují v elektrárnách a průmyslových podnicích jako velíny a dozorny. Instalace je zde charakterizována částečným potlačením rychlých transientů v řídících obvodech, které jsou spínány jen pomocí relé. Jsou oddělené všechny vlastní obvody od jiných obvodů, spojených s prostředím s vyššími nároky na úroveň elektromagnetické odolnosti. Atributem je také fyzické oddělení nestíněných napájecích kabelů a řídících kabelů od signálových a sdělovacích obvodů [7].

3.1.1.3 Úroveň 3

Úrovní typickou pro průmyslové prostředí je úroveň 3. Tato úroveň je charakterizována tím, že zde není žádné potlačení rychlých transientů v řídících obvodech, které jsou spínané jen relé. Silové obvody zde nejsou dostatečně oddělené od jiných obvodů, spojených s prostředím s vyššími nároky na úroveň odolnosti. Jsou zde společné kabely pro přenos napájení, řízení, signály a komunikace. Mohou se tu vyskytovat zemní smyčky a zemnící systém využívající vodivé trubky, zemní vodiče v kabelových žlabech spojených s ochranou zemní soustavou. Mezi prostředí s těmito vlastnostmi patří výrobní plochy průmyslových podniků, elektrárny, otevřené rozvodny VN a jiné [7].

3.1.1.4 Úroveň 4

Představiteli těchto prostředí jsou vnější plochy průmyslových podniků, elektrárny, otevřené rozvodny VN a VVN s napětím až do 500 kV. Tyto prostředí jsou charakterizována tím, že nedochází k žádnému potlačení rychlých transientů od řídících a silových obvodů, které se spínají pomocí relé a stykačů. Silové průmyslové obvody nejsou odděleny od jiných, spojených s prostředím vyžadujícím vyšší úroveň odolnosti. Kabely pro silové napájení, řízení a signalizaci nejsou odděleny. Používá se zde propojení mnohožilovými kabely pro společný přenos řídících povelů a signalizace [7].

3.1.1.5 Úroveň 5

Tato úroveň prostředí se používá výjimečně a to v případech, kde na základě analýzy dochází k speciálnímu ujednání [7].

3.2 Kritéria elektromagnetické odolnosti

Kritérium elektromagnetické odolnosti určitého technického systému musíme znát již před zjišťováním jeho elektromagnetické odolnosti. Kritériem se rozumí definované meze narušení jeho funkcí. Tyto meze jsou definovány kvantitativně nebo kvalitativně [8].

Kvantitativní mez odolnosti je stanovena jako dosažení určité hodnoty vybrané veličiny. Používá se zejména v etapě vývoje elektronického zařízení, kdy zjišťujeme velikost a tvar rušivých signálů ve vybraných bodech zapojení (například na sekundárním vinutí napájecího transformátoru, na výstupech usměrňovače, na signálových vstupech apod.). Analyticky či empiricky pak stanovíme takovou hodnotu sledované veličiny, která by například u číslicového zařízení právě ještě neměla vyvolat nežádoucí změnu užitečného signálu logických obvodů (nežádoucí změnu jejich stavu). Takto určená hodnota je pak považována za kritérium elektromagnetické odolnosti pro všechna zařízení daného typu [8].

Pro uživatele a běžného provozovatele elektronického zařízení se však častěji užívá systémového přístupu založeného na stanovení kvalitativního (funkčního) kritéria elektromagnetické odolnosti, jakožto změny provozního stavu či ovlivnění funkce daného zařízení. Formy funkčních poruch, které jsou přípustné jsou uvedeny a definovány v normě ČSN EN 50082. Funkční porucha je zde definována jako změna provozní způsobilosti zkoušeného zařízení. Tím může být zhoršení jeho funkce během zkoušení. Kritérií je několik, ale mezi tři základní kritéria řadíme:

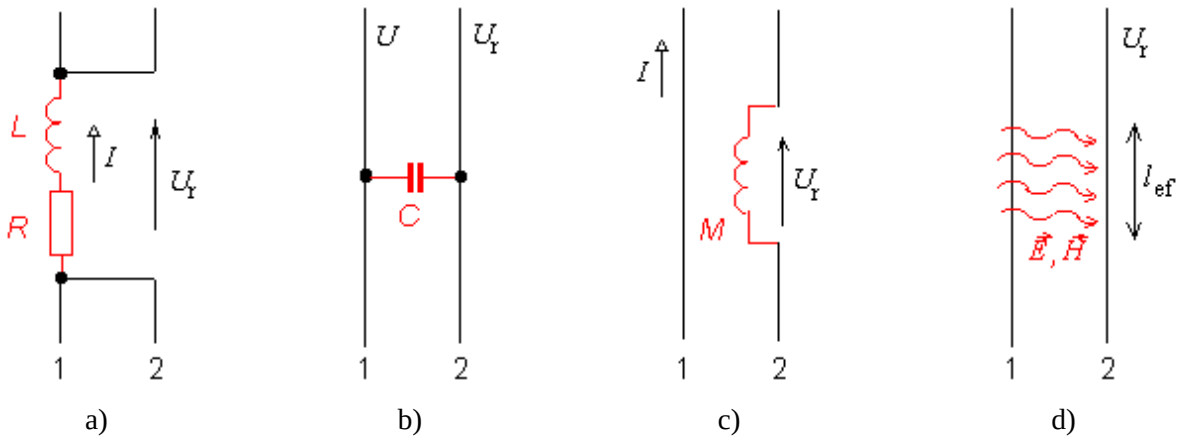
- **Funkční kritérium A** - Během zkoušky musí zařízení pracovat ve své činnosti dle určení. Není zde dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či ztráta jeho funkce [8].
- **Funkční kritérium B** - Zařízení musí po skončení zkoušky pokračovat dál ve své činnosti dle svého určení. Během zkoušky je dovoleno zhoršení činnosti zařízení, není však dovolena změna aktuálního provozního stavu zařízení ani změna dat v paměti. Po skončení zkoušky není dovoleno žádné zhoršení činnosti zařízení či úplná ztráta jeho funkce [8].
- **Funkční kritérium C** - Je dovolena výsledná dočasná ztráta funkce zařízení, za předpokladu, že se tato funkce po skončení zkoušky odolnosti obnoví sama, nebo může být obnovena činností řídícího systému, nebo zásahem operátora dle specifikace v návodu k použití zařízení [8].

4 Vazební mechanismy přenosu rušivých signálů

Budeme-li soustředit pozornost na vazební médium, můžeme jej rozdělovat jak z hlediska fyzické realizace, tak i z hlediska vlastního fyzikálního principu vazby. Dle tohoto může být médium tvořeno vzdušným prostorem, stínícími materiály, absorpčními materiály, filtry, kabely, zemněním, elektroenergetickými soustavami a dalšími jinými mezisystémovými vazbami [7].

Abychom pochopily i další širší souvislosti je potřeba si definovat blíže i elektrické rozhraní na kterém je definovaná složka tvořena vazebním rušivým napětím. Toto rušivé napětí bývá potom přenášeno obdobně jako užitečný signál včetně všech vazebních modifikací [7].

Z hlediska fyzikálního principu rozlišujeme vazbu galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu vyzařováním. Základní princip vazebního působení je schematicky znázorněn na obrázku 5.



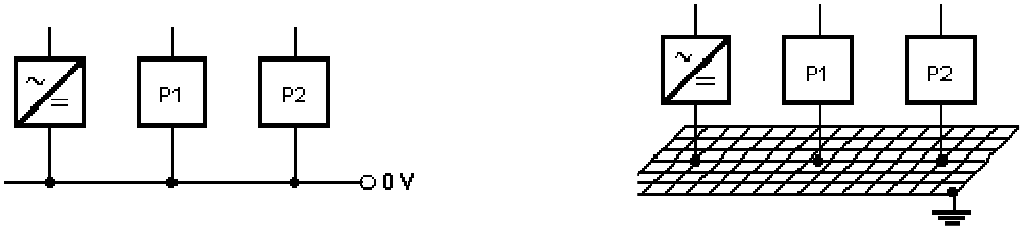
Obrázek 5: Základní druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním [9]

4.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba nebo také vazba se společnou impedancí je vazbou dvou elektrických systémů, bloků či částí, jejichž proudové smyčky se uzavírají přes společné úseky spojovacích vedení, tedy přes společnou impedanci. Tato společná impedance se chová jako sériový obvod RL. Tento sériový obvod může být tvořen např. vnitřní impedancí společného napájecího zdroje či společného zemnícího systému. Každý blok (dva elektrické systémy) potom na společné impedanci vytvoří určitý úbytek, který se v podobě rušivého napěťového signálu přenese do elektricky svázaného druhého systému (bloku) [1].

Pro minimalizaci galvanických vazeb je nutné zejména:

- Dostatečně dimenzovat společný zemnící vodič (obrázek 6) [7].
- Nevytvářet zemnícím vodičem uzavřené kontury, ale naopak vše propojit do jednoho bodu [7].
- Zařízení různých generací vybavit vlastním napájecím zdrojem (obrázek 8) [7].
- U signálových vodičů neslučovat společný vodič (obrázek 7) [7].
- Elektrické obvody oddělit – oddělovacím transformátorem, optočlenem nebo pomocí relé [7].



Obrázek 6: Rozvod napájení systémů [7]

Obrázek 7: Propojení signálových vodičů [7]

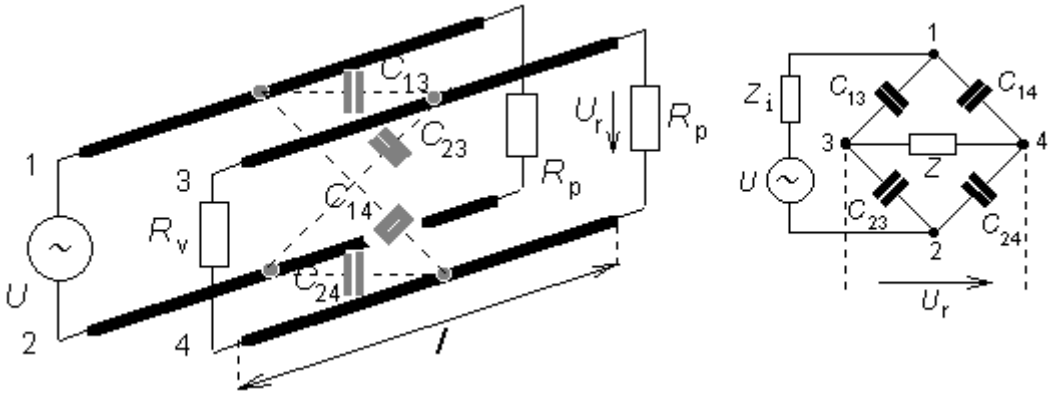
Obrázek 8: Napájení bloků různých generačních technologií [7]

4.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba je způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči (rušícím a rušeným) nebo mezi jednotlivými částmi obvodů či konstrukce zařízení. Mezi každými dvěma vodiči s různým potenciálem existuje elektrické pole, které parazitní kapacitou modelujeme. Tato situace je typická pro souběžné vedení energetických a signálových či datových kabelů a linek. Může vzniknout i při paralelním vedení vodivých drah plošných spojů. V praxi existuje velké množství kapacitních vazeb mezi různými typy obvodů. Prakticky jsou zajímavé v první řadě tři případy, které jsou uvedeny níže [1].

4.2.1 Kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů

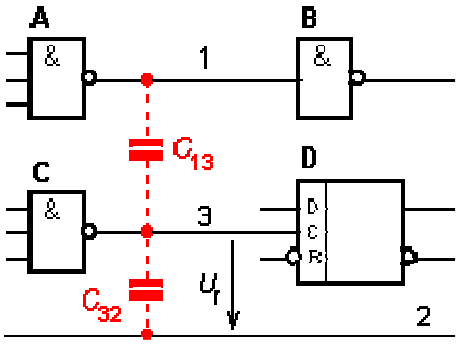
Její model je vyobrazen na obrázku 9. Vodiče 1 a 2 představují rušící obvod, vodiče 3 a 4 rušený obvod. V případě, že délka obou vedení *l* je výrazně kratší než vlnová délka rušivého signálu o nejvyšším uvažovaném kmitočtu, lze obvod nahradit náhradním schématem na obrázku 9. V něm náhradní impedance Z_i je závislá na impedančních parametrech rušícího obvodu a náhradní impedance Z závisí na impedančních parametrech rušeného obvodu. Z tohoto schématu je zřejmé, že výstupní rušivé napětí U_r rušeného obvodu bude nejmenší při vyvážení kapacitního můstku. Vyvážení můstku lze dosáhnout zkroucením obou párů vodičů, případně aspoň rušeného vedení. Touto modifikací se rovněž sníží i induktivní vazba obou vedení. Další možnost jak snížit kapacitní vazbu je použití stíněných vodičů [1].



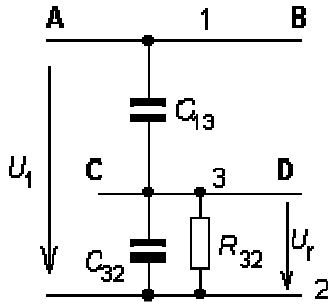
Obrázek 9: Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů [1]

4.2.2 Kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem

Tato parazitní vazba se často vyskytuje v analogových a číslicových obvodech. Příklad takovéto vazby je uveden na obrázku 10. Vlivem parazitní vazební kapacity C_{13} ovlivňuje signálový výstup obvodu A stav na vstupu klopného obvodu D. Oba tyto obvody mají společný vztažný vodič 2. Typ takovéto vazby může nastat též ve vícežilovém kabelu. Když analyzujeme náhradní schéma na obrázku 11 zjistíme kmitočtový průběh parazitního kapacitního přenosu mezi vodiči 1 (rušícím) a 3 (rušeným). Velikost přeneseného rušivého napětí s rostoucí frekvencí nejprve roste a až na vysokých frekvencích zůstává konstantně na maximální hodnotě [1].



Obrázek 10: Parazitní kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem v číslicových obvodech [9]



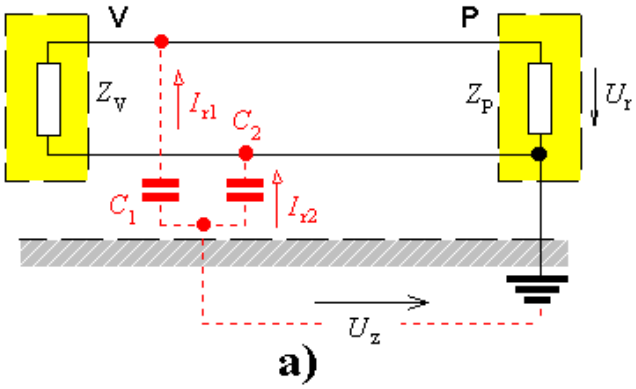
Obrázek 11: Náhradní schéma [9]

Opatření, které můžeme provést pro snížení tohoto druhu kapacitní vazby:

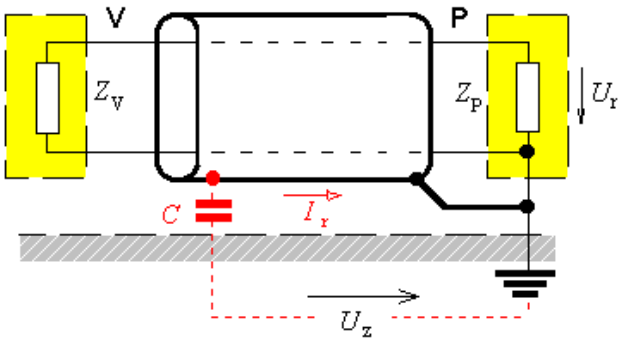
- Co nejvíce zmenšit vazební kapacitu C_{13} – např. maximálním oddálením vodičů 1 a 3, zamezením jejich souběžnému vedení, volnou co nejmenších průřezů vodičů [1].
- Realizovat co největší kapacitu C_{32} – např. těsným přiblížením či zkroucením vodiče 3 se vztažným vodičem 2 [1].
- Elektricky odstínit oba vodiče, které se ovlivňují. Například stíněním vodiče 3 nebo zavedením pomocného „stínícího „ spoje s nulovým potenciálem na desce plošného spoje mezi vodiče 1 a 3 [1].

4.2.3 Kapacitní vazba vůči zemi

Tato kapacitní vazba může být vyvolána velkou kapacitou přívodů obvodu vůči zemi jako na obrázku 12. Rušivé napětí v zemi U_z se průtokem rušivých proudů I_{r1} a I_{r2} parazitními vazebními kapacitami C_1 a C_2 přenáší jako rušivé napětí na vstupní svorky obvodu P (přijímač rušení). Kapacitní vazbu lze skoro celou odstranit použitím stínění jako na obrázku 13, protože rušivý proud I_r teď protéká stíněním mimo vstup obvodu P. Po praktické stránce není ale tato metoda odstínění dokonalá, a to zejména při vyšších frekvencích [1].



Obrázek 12: Kapacitní vazba vůči zemi [9]



Obrázek 13: Odstranění kapacitní vazby za pomoci stínění [9]

4.3 Induktivní vazba

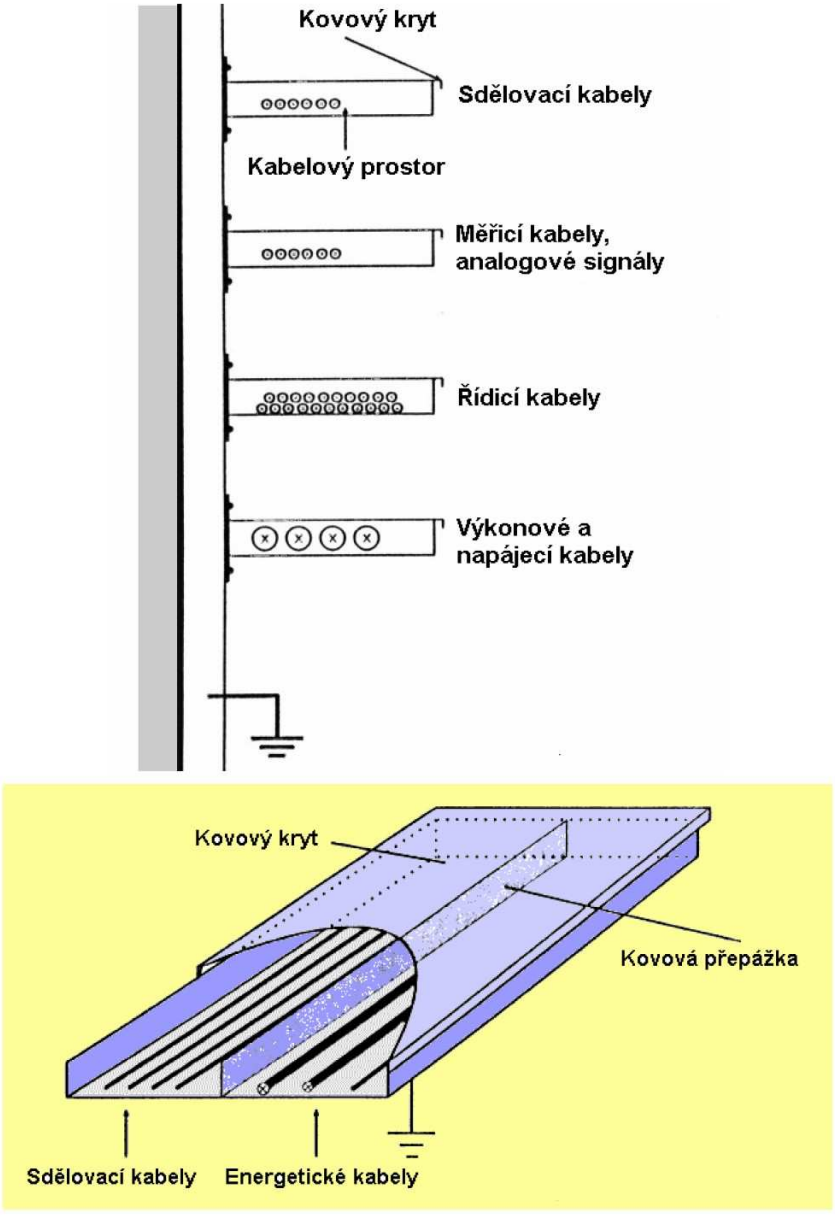
Při průchodu elektrického proudu obvodem, vzniká v prostoru kolem obvodu magnetické pole, které může být konstantní nebo proměnné (závislé na časovém průběhu proudu). Při časově proměnném magnetickém poli se ve vodičích indukuje napětí, jehož velikost roste se zvýšením kmitočtu.

Tato parazitní induktivní vazba je nebezpečná zejména v případech kdy dochází k velmi rychlým změnám proudu velké velikosti (blesk, elektrostatické výboje).

Abychom minimalizovali induktivní vazby mezi obvody je třeba, aby:

- Délka souběžně probíhajících vodičů obou obvodů byla minimální.
- Vzdálenost obou obvodů byla co největší.
- Velikost proudové smyčky rušeného obvodu (obvodu přijímače) byla co nejmenší.

K významným parazitním induktivním, ale i kapacitním vazbám dochází v běžných stavbách při souběžném vedení energetických silových kabelů s datovými a signálovými kabely či s kabely řídících obvodů a systémů. Vedení těchto kabelů vede nejčastěji paralelně společnými šachtami. A proto z hlediska maximálního omezení je nezbytně nutné jejich rozdělení do samostatných elektromagneticky stíněných sekcí.

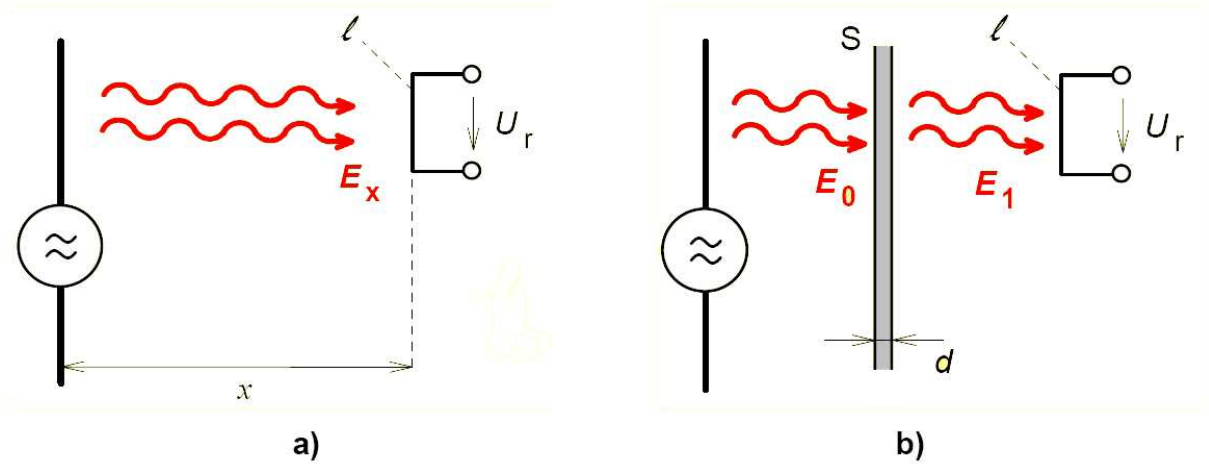


Obrázek 14: Omezení parazitních vazeb mezi souběžnými kabely jejich separátním vedením ve stíněných sekcích [9]

4.4 Vazba vyzařováním

Když je mezi zdrojem a přijímačem rušení větší vzdálenost při které je prakticky vyloučena jak kapacitní, tak induktivní parazitní vazba je možná vzájemná vazba obou objektů vyzářeným elektromagnetickým polem. Mezi tyto rušení lze zařadit rušení blízkými vysílači, atmosférická rušení, ale i řadu průmyslových poruch. Tento druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích do nichž se dostává anténou. Při působení této elektromagnetické vlny se ve vodičích rušeného přijímače indukuje rušivé napětí. Toto rušivé napětí se v obvodech sčítá s užitečným signálovým napětím nebo jej dokonce zcela překryje. Situace vazby vyřazováním je naznačena na obrázku 15a, kde x je vzdálenost zdroje a přijímače rušení. Zdroj vysílá signál s výkonem *P* [1].

Chránit zařízení proti elektromagnetickému rušení vyzařováním lze provádět pomocí stínícího krytu nebo přepážky, která se umístí mezi zdroj a přijímač rušení (obrázek 15b). Touto přepážkou je zeslabena intenzita E_0 na hodnotu E_1 na jejím „výstupu“. Zeslabení má na svědomí absorpce energie v materiálu ze kterého je přepážka vyrobena a také odražení elektromagnetické vlny zpět ke zdroji rušení. Velikost zeslabení je závislá na tloušťce přepážky *d*, na její vodivosti a permeabilitě a také na velikosti frekvence signálu [1].



Obrázek 15: Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním (a) a vliv vložené stínící přepážky (b) [9]

5 Zkoušky odolnosti v oblasti EMC

5.1 Elektrostatický výboj

Rušení elektrostatickými výboji vzniká zejména v obytném prostředí a všude tam, kde jsou vhodné podmínky pro jejich vznik. Může to být prostředí s nízkou vlhkostí vzduchu nebo prostředí, kde jsou použity umělé podlahové krytiny. Tyto lokální elektrostatické výboje se označují ESD [1].

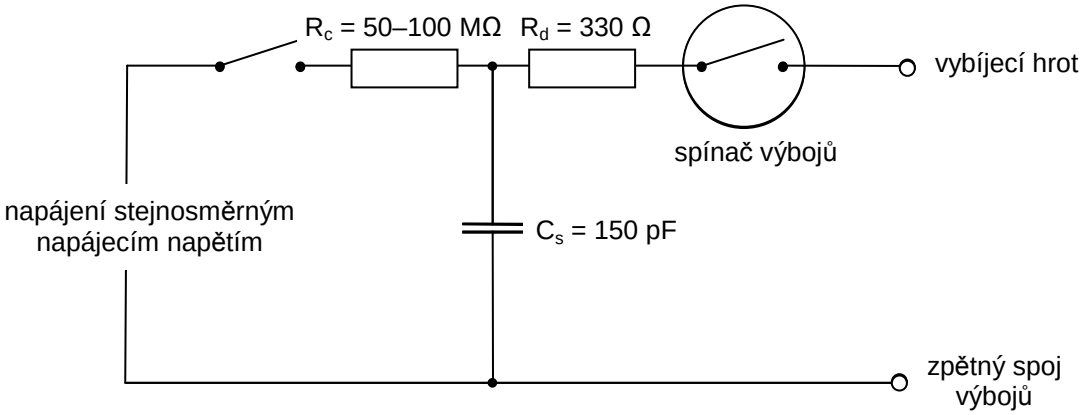
Člověk tyto výboje cítí až od 2000 až 4000 V (může dosahovat hodnot až 15 kV, někdy i více), ale k poškození elektronických součástek postačuje mnohem menší napětí. Tento nebezpečný výboj pro elektronické součástky není vidět ani cítit. Elektrostatický výboj vzniká triboelektrickým nabíjením. Je to jev, při kterém je náboj generován kontaktem a oddělením dvou povrchů, které mohou být tuhé, kapalné nebo částice přenášené plynem. V reálném životě mohou vzniknout např.: kráčející osoba po podlaze, elektrická součástka vkládaná, nebo vyjímaná z obalu, součástka pohybující se v zásobníku osazovacího stroje apod. Velikost vzniklého elektrostatického výboje závisí zejména na:

- Velikosti plochy kontaktu materiálů
- Rychlosti oddělení
- Relativní vlhkosti okolního vzduchu – s větší relativní vlhkostí se podstatně snižuje velikost generovaného náboje
- Druhem materiálů podle velikosti a polarity náboje vytvořeného při jejich kontaktu a oddělení

Zkouška odolnosti pomocí elektrostatických výbojů se provádí pomocí vybíjecích zařízení, které se většinou podobají tvaru „pistole“ s výměnným vybíjecím hrotem. Vybíjecí zařízení je kabely připojeno ke zdroji zkušebního náboje a druhým kabelem k referenční zemní rovině [7].

Obrázek 16: Testovací zařízení ESD

Zdroj, který poskytuje náboj simulující elektrostatické rušení se sestává z akumulačního kondenzátoru C_0 = 150 pF, který se nabíjí ze zdroje vysokého stejnosměrného napětí U = 2 ÷ 15 kV přes odpor R_0 = 50 ÷ 100 MΩ. Když nastane výboj, tak se náboj kondenzátoru vybije do zkoušence přes vybíjecí odpor, který má dle normy ČSN-EN 61000-4-2 předepsanou velikost 330 Ω [7].



Obrázek 17: Zjednodušené schéma generátoru elektrostatického výboje [10]

5.1.1 Postup zkoušky

5.1.1.1 Laboratorní referenční podmínky

Pro minimalizování vlivu parametrů prostředí na výsledky zkoušek se zkoušky musí provádět při ideálních klimatických a elektromagnetických referenčních podmínkách [10].

5.1.1.1.1 Klimatické podmínky

Klimatické podmínky pro případ zkoušení vzduchovým výbojem musí být v následujících mezích:

- Okolní teplota: 15 °C až 35 °C
- Relativní vlhkost: 30% až 60%
- Atmosférický tlak: 86 kPa (860 mbar) až 106 kPa (1060 mbar)

Mohou být nastaveny i jiné hodnoty. Tyto hodnoty jsou stanoveny ve specifikacích výrobku. Zkoušené zařízení musí být provozováno v rozmezí jeho předpokládaných klimatických podmínek [10].

5.1.1.1.2 Elektromagnetické podmínky

Elektromagnetické prostředí laboratoře nesmí mít vliv na výsledky zkoušek [10].

5.1.2 Prověřování činnosti zkoušeného zařízení

Programy zkoušek a programové vybavení musí být zvoleny tak, aby bylo možno prověřovat běžné režimy činnosti zkoušeného zařízení. Pro prověřování činnosti zkoušeného zařízení se doporučuje použití speciálního programového vybavení, ale je dovoleno jen tam, kde lze prokázat, že zkoušené zařízení se zevrubně prověřuje.

Pro schvalovací zkoušky musí být zkoušené zařízení trvale provozováno v nejcitlivějším režimu jeho činnosti (programového cyklu), který musí být určen předběžným zkoušením.

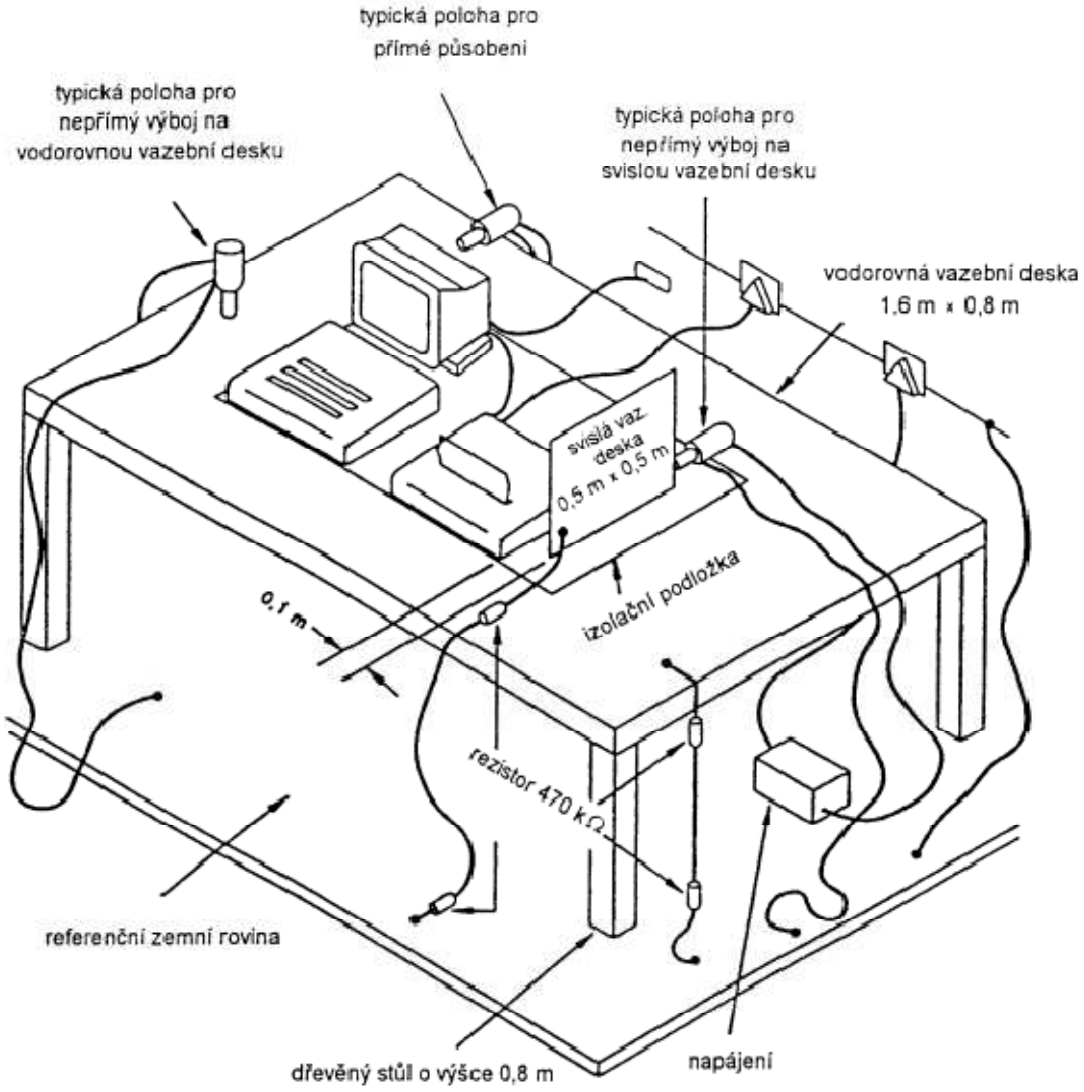
Požaduje-li se zařízení umožňující sledování, mělo by být odděleno k omezení možnosti nesprávného hlášení poruchy [10].

5.1.3 Provádění zkoušky

Zkoušení musí být prováděno přímým a nepřímým působením výbojů na zkoušené zařízení podle zkušebního plánu. Ten by měl zahrnovat:

- Typické provozní podmínky zkoušeného zařízení
- Zda se zkoušené zařízení má zkoušet jako umístěné na stole nebo stojící na podlaze
- Místa, na kterých se provádí výboje
- U každého místa, zda se provede kontaktní výboj nebo vzduchový výboj
- Jaké se požijí zkušební výboje
- Kolik výbojů se provede u každého místa při schvalovací zkoušce
- Zda se budou provádět také zkoušky po instalaci

Může být nutné provést i některé průzkumné zkoušky pro stanovení některých aspektů zkušebního programu [10].



Obrázek 18: Příklad zkušební sestavy zařízení umístěného na stole, laboratorní zkoušky [10]

5.2 Rychlé elektrické přechodové jevy/skupiny impulsů

Zkouška opakovaným rychlým přechodovým jevem je zkouška skupinami obsahujícími velký počet rychlých přechodových jevů, zavedených do vstupů napájení, ovládání a signálů elektrického a elektronického zařízení. Významné pro tuto zkoušku jsou krátká doba náběhu, opakovací kmitočet a nízká energie přechodových dějů [11].

Rychlé přechodové jevy vznikají při spínání vysokonapěťových vypínačů, při odskakování relé a při spínání induktivních zátěží. Od těchto přechodových jevů nejčastěji přichází pouze rušení elektronických zařízení a ne jejich poškození. Rušení je nebezpečné svým vysokofrekvenčním obsahem (2 – 200 MHz), který způsobuje nesymetrické šoky systému. Dalším nebezpečným faktorem je opakování impulsů v řadě (burst signál). Jednotlivé impulsy mají nízkou energii (10^{-3} J), ale při jejich opakování může být až o dva

řády vyšší a může tedy poškodit méně citlivá zařízení. Rušení se váže na napájecí vodiče galvanicky a na datové a signálové vodiče kapacitně [11].

Zkouška se provádí zkušebním generátorem, který je složen ze zdroje vysokého napětí, nabíjecího rezistoru, kondenzátoru akumulujícího energii, jiskřiště, rezistoru pro tvarování průběhu impulsu, rezistoru pro přizpůsobení impedance a blokovacího kondenzátoru stejnosměrného napětí. Rozsah výstupního napětí naprázdno (napětí na svorkách akumulujícího energii) je 0,25 kV – 10 % až 4 kV + 10 %. Zjednodušené zapojení zkušebního generátoru je na obrázku 20. Simulované rušení je reprezentováno skupinou exponenciálních impulsů 5/50 ns s opakovací frekvencí 5 nebo 2,5 kHz, délkou trvání 15 ms a opakovací periodou 300 ms. Maximální amplituda impulsů je 4 kV. Obecný průběh skupin impulsů je na obrázku 19 [11].

Aby se mohly porovnávat výsledky zkoušek prováděných s různými generátory, musí být charakteristiky zkušebního generátoru ověřeny. Ověření se provede připojením výstupu zkušebního generátoru k osciloskopu přes koaxiální útlumový článek 50 Ω. Šířka pásma měřícího zařízení musí být alespoň 400 MHz.

Opakovací kmitočet impulsů a vrcholové hodnoty výstupního napětí:

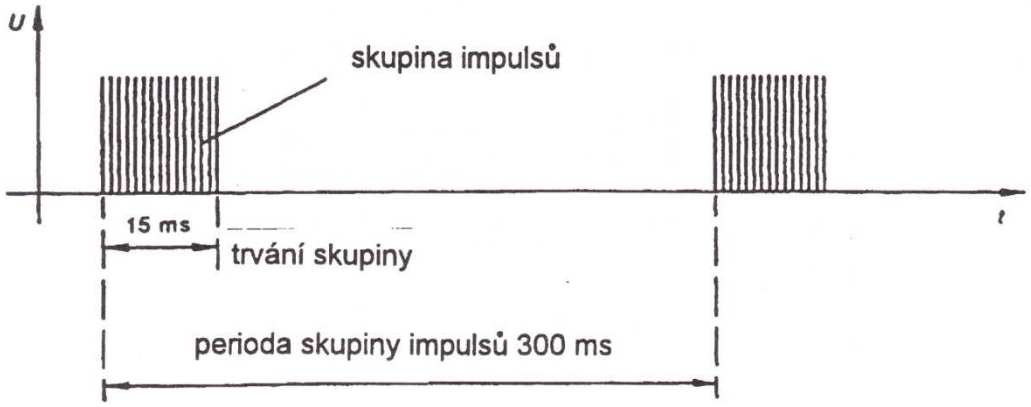
5 kHz ±20 % při 0,125 kV;

5 kHz ±20 % při 0,25 kV;

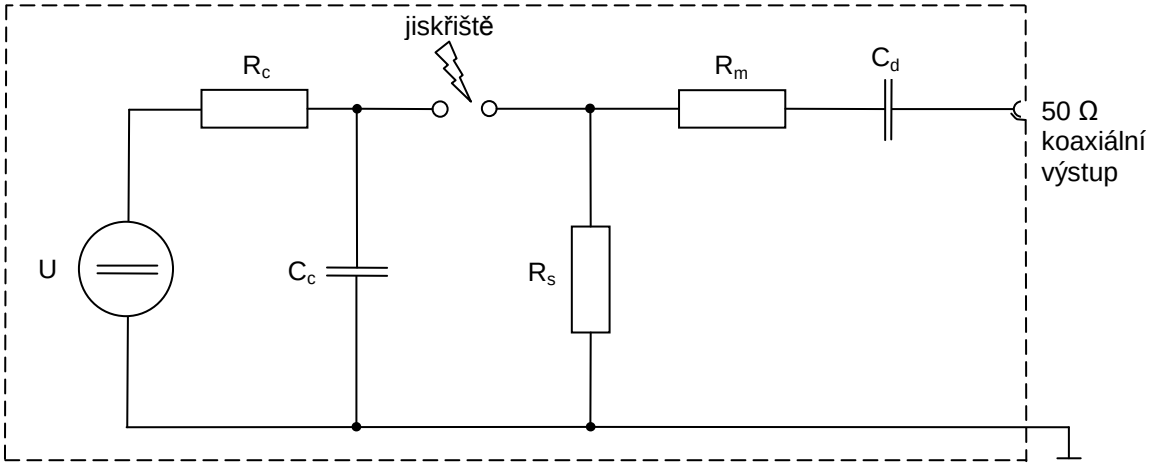
5 kHz ±20 % při 0,5 kV;

5 kHz ±20 % při 1,0 kV;

5 kHz ±20 % při 2,0 kV;



Obrázek 19: Obecný průběh rychlých přechodových jevů/skupin impulsů [11]



U – Zdroj vysokého napětí
R_c – Nabíjecí rezistor
C_c – Kondenzátor akumulující energii
R_s – Rezistor pro tvarování doby trvání impulsu
R_m – Rezistor přizpůsobující impedanci
C_d – Blokovací kondenzátor stejnosměrného napětí

Obrázek 20: Zjednodušené schéma generátoru rychlých přechodových jevů/skupin impulsů [11]

5.2.1 Zkušební úrovně

Přednostní rozsah zkušebních úrovní pro zkoušku rychlými elektrickými přechodovými jevy, které jsou použitelné na vstupy napájení, ochranná zem (PE), na vstupy signálů a ovládání, je uveden v tabulce 3.

Zkušební napětí naprázdno (±10 %) a opakovací kmitočet impulsů (±20 %)				
Úroveň	Vstup: napájení, ochranná zem (PE)		Vstup: I/O (vstupní a výstupní signály, data, ovládání)	
	Napětí (vrcholová hodnota) [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]	Napětí (vrcholová hodnota) [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]
1	0,5	5	0,25	5
2	1	5	0,5	5
3	2	5	1	5
4	4	2,5	2	5
x	zvláštní	zvláštní	zvláštní	zvláštní

Tabulka 3: Zkušební úrovně [11]

„x“ je otevřená úroveň, která musí být stanovená ve specifikaci konkrétního zařízení [11].

5.2.2 Zkušební sestava

Pro testování této odolnosti se rozlišují dva typy zkoušek. Jsou to typové zkoušky prováděné v laboratoři a zkoušky prováděné po instalaci zařízení v podmínkách jeho konečné montáže. Zkušební zařízení musí být uspořádáno podle instrukcí výrobce pro instalaci a zkouška preferovaná je metoda prováděná v laboratoři. Zkušební sestava se skládá z referenční zemní roviny, vazebního zařízení (síť nebo kleště), oddělovací sítě a zkušebního generátoru včetně kalibračních nebo měřících prostředků [11].

5.2.3 Postup zkoušky

Pro minimalizování vlivu parametrů prostředí na výsledky zkoušek se musí provádět zkoušky při klimatických a elektromagnetických referenčních podmínkách [11].

5.2.3.1 Klimatické podmínky

Zkouška musí být provedena za standartních klimatických podmínek podle IEC 68-1:

- Okolní teplota: 15 ^{o}C až 35 ^{o}C
- Relativní vlhkost: 30% až 60%
- Atmosférický tlak: 86 kPa (860 mbar) až 106 kPa (1060 mbar)

Zkoušené zařízení musí být provozováno v rozmezí jeho předpokládaných klimatických podmínek [11].

5.2.3.2 Elektromagnetické podmínky

Elektromagnetické prostředí laboratoře nesmí mít vliv na výsledky zkoušek [11].

5.2.4 Provedení zkoušky

Zkouška musí být provedena podle zkušebního plánu včetně ověření vlastností zkoušeného zařízení tak, jak jsou definované v technické specifikaci. Zkušební plán musí obsahovat:

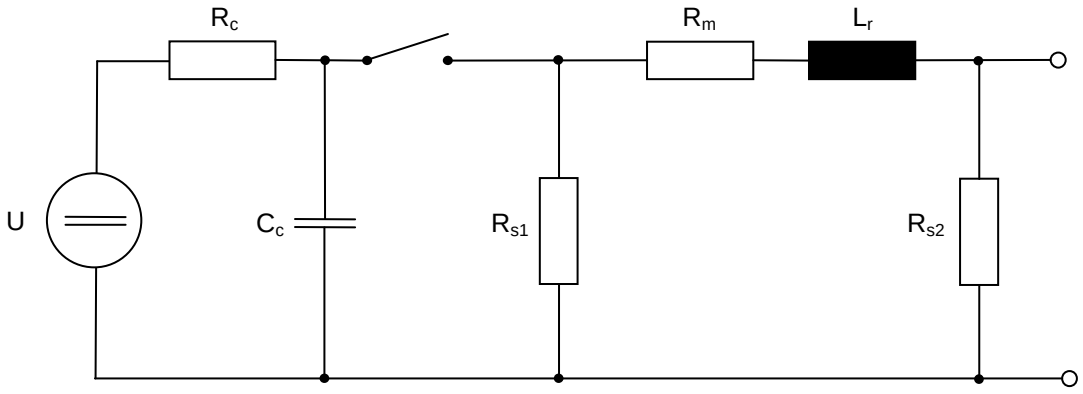
- Typ zkoušky, která bude prováděna;
- zkušební úroveň;
- polaritu zkušebního napětí (povinné jsou obě polarity);
- trvání zkoušky, ne kratší než 1 minuta;
- počet aplikací zkušebního napětí;
- vstupy zkoušeného zařízení, které se podrobují zkoušce;
- reprezentativní provozní podmínky zkoušeného zařízení;
- pomocná zařízení [11].

5.3 Rázový impuls

Rázový impuls vzniká při výskytu atmosférických poruch (přímém či nepřímém úderu blesku), při spínacích pochodech či poruchách v energetické vysokonapěťové síti a dostává se do rozvodů nízkého napětí. Rázové impulsy mají velkou energii v řádu až 50 J, které se mohou projevovat i tepelnými účinky. Kmitočtové spektrum impulsů sahá do oblasti 1 kHz až 1 MHz a díky svému vysokoenergetickému obsahu mohou způsobit škody na elektronických zařízeních i bez přímé galvanické vazby jen prostřednictvím elektromagnetické indukce. Tyto rázové impulsy se projevují různě podle velikosti impedance zdroje a impedance zkoušeného zařízení [12].

a) Když je vstupní impedance na napájecích svorkách zkoušeného zařízení velká ve srovnání s výstupní impedancí zdroje, vytváří rázový impuls na svorkách zkoušeného zařízení impuls napětí [12].
b) Když je příslušná impedance malá oproti výstupní impedanci zdroje, vytváří rázový impuls na svorkách zkoušeného zařízení impulz proudu [12].

Takovéhle chování musí simulovat i příslušná zkouška elektromagnetické odolnosti a zkušební generátor musí být proto schopný generovat napěťový impulz na velké impedanci, tak i proudový impuls na malé impedanci [12]. Tyto rázové impulsy jsou vytvářeny generátorem kombinované vlny (hybridním generátorem). Zjednodušené schéma obvodu generátoru je uvedeno na obrázku 21. Hodnoty použitých součástek jsou vybrány, aby generátor dodával rázový impuls napětí 1,2/50 μs (při podmínkách obvodu naprázdno) a rázový impuls proudu 8/20 μs při obvodu nakrátko. Regulátor je tvořen regulovatelným zdrojem vysokého napětí U, nabíjecím rezistorem R_c a sběrným kondenzátorem C_c. Volbou hodnot součástek C_c, R_{s1}, R_{s2}, R_m, L_r lze nastavit parametry rázového impulsu napětí a proudu. Dle dohody je efektivní výstupní impedance generátoru rázového impulsu definována jako poměr vrcholové hodnoty napětí naprázdno a vrcholové hodnoty proudu nakrátko. Generátor s těmito parametry vlny napětí a proudu se nazývá generátor kombinované vlny (CWG) nebo hybridní generátor [13].



U – Zdroj vysokého napětí
R_c – Nabíjecí rezistor
C_c – Kondenzátor akumulující energii
R_s – Rezistor pro tvarování doby trvání impulsu
R_m – Rezistor přizpůsobující impedanci
L_r – Indukčnost pro tvarování náběžné hrany

Obrázek 21: Zjednodušené schéma generátoru kombinované vlny [13]

Charakteristika generátoru kombinované vlny:

Vstupní napětí naprázdno:

Od alespoň	0,5 kV do alespoň 4 kV
Tvar vlny rázového impulsu napětí	viz obrázek 22a a tabulka 4
Tolerance výstupního napětí naprázdno	±10 %

Výstupní proud naprázdno:

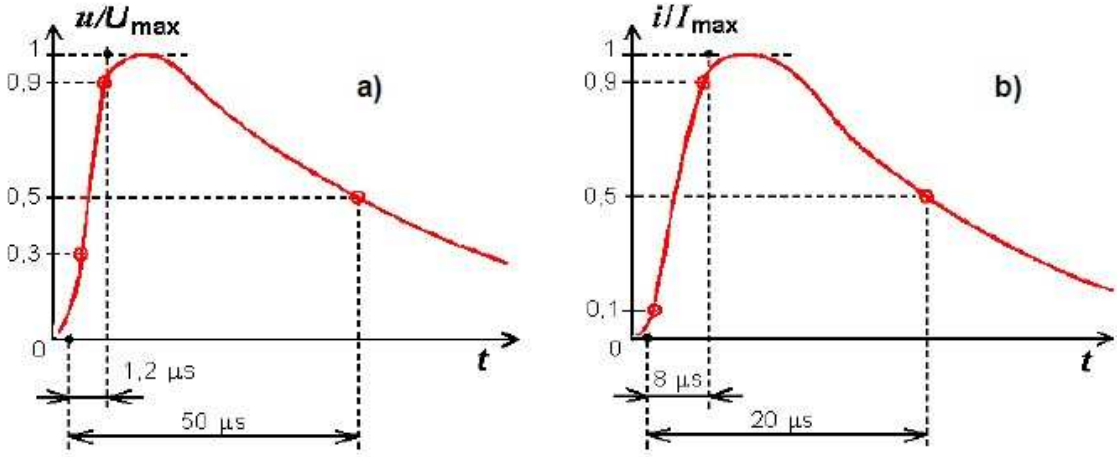
Od alespoň	0,25 kA do alespoň 2 kA
Tvar vlny rázového impulsu proudu	viz obrázek 22b a tabulka 4
Tolerance výstupního proudu nakrátko	±10 %

Polarita:	kladná/záporná
Fázový posuv:	v rozsahu mezi 0^o a 360^o proti fázovému úhlu v síti
Četnost opakování:	alespoň jednou za minutu

Pro specifikované zkušební podmínky musí být pro zvětšení požadované impedance zdroje vloženy dodatečné rezistory. Přidáním těchto rezistorů je zapříčiněna změna parametrů vlny napětí naprázdno a vlny proudu nakrátko [13].

Definice	Podle IEC 60 - 1		Podle IEC 469 - 1	
	Náběžní doba µs	Doba na poloviční hodnotu µs	Doba náběhu (10 % - 90 %) µs	Doba trvání (50 % - 50 %) µs
Napětí naprázdno	1,2	50	1	50
Proud nakrátko	8	20	6,4	16

Tabulka 4: Definice parametrů vlny 1,2/50 µs [13]



Obrázek 22: Zkušební signál rázové vlny a) napětí naprázdno, b) proudu nakrátko [12]

5.3.1 Postup zkoušky

5.3.1.1 Laboratorní referenční podmínky

Aby byl vliv na výsledky zkoušky co nejmenší, musíme zkoušku provádět v referenčních klimatických i elektromagnetických podmínek.

5.3.1.1.1 Klimatické podmínky

Klimatické podmínky musí vyhovět následujícím požadavkům:

- Okolní teplota: 15 ^{o}C až 35 ^{o}C
- Relativní vlhkost: 30% až 60%
- Atmosférický tlak: 86 kPa (860 mbar) až 106 kPa (1060 mbar)

Mohou být nastaveny i jiné hodnoty. Tyto hodnoty jsou stanoveny ve specifikacích výrobku. Zkoušené zařízení musí být provozováno v rozmezí jeho předpokládaných klimatických podmínek [13].

5.3.1.1.2 Elektromagnetické podmínky

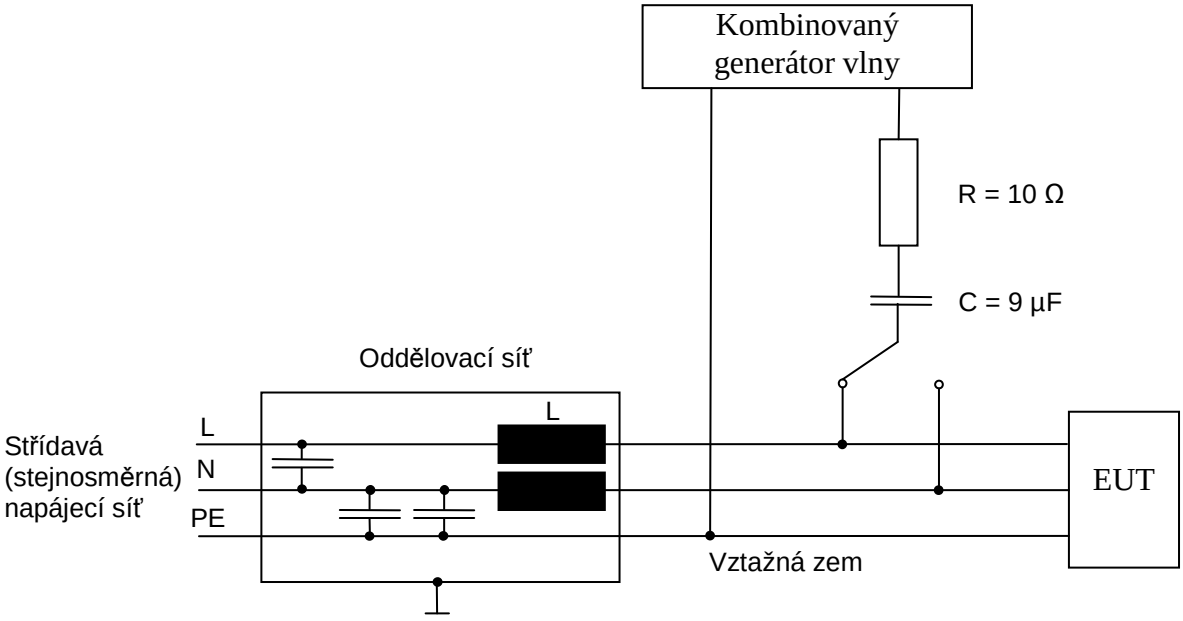
Elektromagnetické prostředí laboratoře nesmí mít vliv na výsledky zkoušek [13].

5.3.1.2 Aplikace rázového impulsu v laboratoři

Zkouška se musí držet programu o provedení zkoušky, který musí stanovit zkušební sestavu a zároveň:

- Generátor a ostatní použitá zařízení
- Zkušební úroveň napětí a proudu
- Výstupní impedanci generátoru
- Polaritu rázového impulsu
- Interní nebo externí spouštění
- Počet zkoušek (mělo by být provedeno alespoň pět kladných a pět záporných impulsů)
- Četnost opakování
- Zkoušené vstupy a výstupy
- Reprezentativní provozní podmínky zkoušeného zařízení
- Pořadí aplikace rázových impulsů na obvody
- Fázový úhel v případě střídavého síťového napájení
- Skutečné instalační podmínky [13]

Pokud není stanoveno jinak, použijí se rázové impulsy, které jsou synchronizované s fází síťového napětí v průchodu napětí nulou a ve vrcholové hodnotě vlny střídavého napětí (kladné a záporné). Rázové impulsy se musí pouštět mezi vodiče a mezi vodič a zem. Když se před zkouškou nestanoví jinak, musí se při zkoušce mezi vodičem a zemí zkušební napětí použít postupně na každý vodič a zem [13].

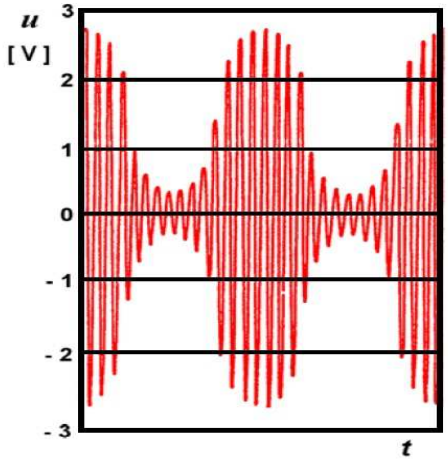


Obrázek 23: Příklad zkušební sestavy pro kapacitní vazbu na střídavá či stejnosměrná vedení; vazba mezi živým vodičem a zemí [13]

5.4 Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole

V dnešní době je obrovský rozmach pozemních sítí, družicových, rozhlasových sítí a TV vysílačů a zejména celosvětový rozvoj systémů mobilních radiokomunikačních služeb, radiotelefonů, občanských stanic apod. To má za následek zvýšený vliv elektromagnetických polí na všechny druhy zařízení, a proto se musí EMC zabývat i odolností proti rušivému vlivu elektromagnetických polí [1].

Tato metoda zkoušky odolnosti se nejčastěji používá v kmitočtovém rozsahu 80 MHz až 2 GHz dle normy ČSN EN 61000-4-3. Dle této normy jsou předepsány zkušební úrovně o hodnotách 1, 3, 10 a 30 V/m (viz tab. 5 a tab. 6). Tyto úrovně odpovídají efektivním hodnotám intenzity pole harmonického nemodulovaného signálu. Ovšem pro vlastní zkoušku je tento signál modulován amplitudovou modulací do hloubky 80 % nízkofrekvenčním harmonickým napětím 1 kHz. Namodulovaný zkušební signál je uveden na obr 24 [1].



Obrázek 24: Průběh zkušebního signálu s 80 % AM [14]

Základním principem těchto zkoušek je ozařování zkoušeného zařízení příslušnými úrovněmi pole pomocí antén. Tato měření je doporučeno provádět ve stíněných absorpčních prostorech v tzv. bezodrazové komoře (schéma bezodrazové komory je uveden na obr. 26), protože potřebná intenzita buzených zkušebních elektromagnetických polí dosahuje až několik desítek V/m a to při kmitočtech sahajících do oblastí až kolem 1 GHz. Výhoda měření v bezodrazových komorách je odstranění vlivu vnějších polí na zkoušený objekt (EUT) a ochrana jak obsluhy tak vyhodnocovacího zařízení [1].

5.4.1 Zkušební úrovně

5.4.1.1 Zkušební úrovně vztahující se na všeobecné účely

Kmitočtové pásmo od 80 MHz až 1000 MHz

Úroveň	Intenzita zkušebního pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
x	Zvláštní
x je neomezená zkušební úroveň. Tato zkušební úroveň může být dána v normě výrobku	

Tabulka 5: Zkušební úrovně [15]

5.4.1.2 Zkušební úrovně týkající se ochrany před vysokofrekvenčním vyzařováním z dig. radiotelefonů

Preferovaný rozsah zkušebních úrovní pro kmitočtové rozsahy od 800 MHz do 960 MHz a od 1,4 GHz do 2 GHz:

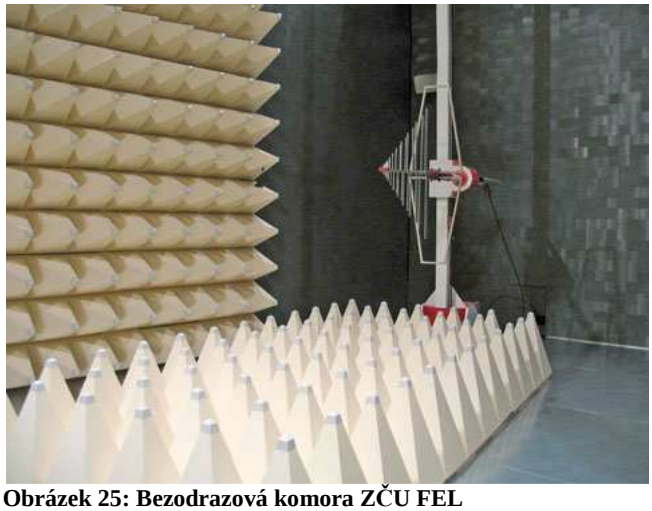
Úroveň	Intenzita zkušebního pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
4	30
x	Zvláštní
x je neomezená zkušební úroveň. Tato zkušební úroveň může být dána v normě výrobku	

Tabulka 6: Zkušební úrovně pro kmitočtové rozsahy od 800 MHz do 2 GHz [15]

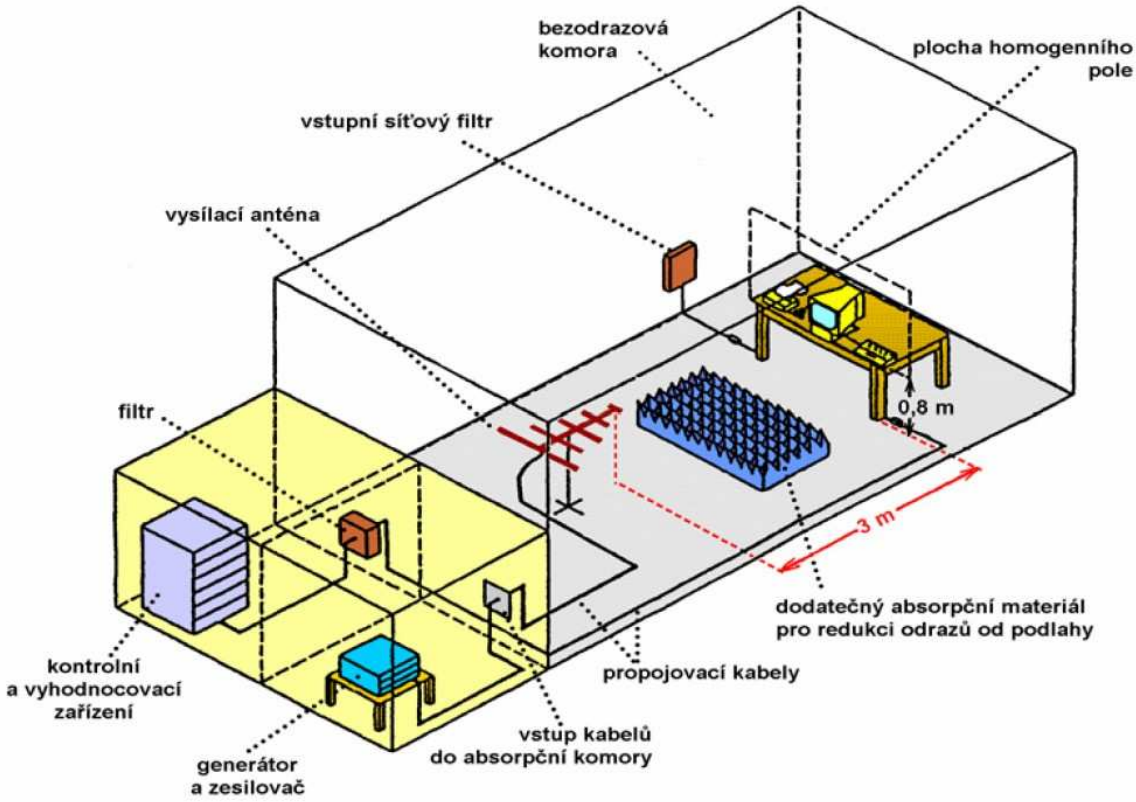
5.4.2 Zkušební zařízení

K základnímu technickému a přístrojovému vybavení bezúrazové komory patří:

- Vysokofrekvenční signální generátor, který pokrývá vyšetřované kmitočtové pásmo včetně 80 % amplitudové modulace. Musí mít buď možnost automatického rozmítání 1,5 x 10-3 dekády/s nebo nižší. Musí mít též možnost ručního nastavení [15].
- Bezodrazová komora je velká s ohledem na zkoušené zařízení, aby bylo udržováno uniformní pole dostatečné velikosti. Komory, které nejsou dostatečně obloženy mohou být pro utlumení odrazů vybaveny dodatečnými absorbéry [15].
- Elektrické filtry zapojené ve všech vstupech a výstupech kabelů a vedení do zkušební komory [15].
- Antény, které generují pole. Mohou to být antény: dvoukuželová, logaritmicko-periodická nebo jakýkoliv jiný lineárně polarizovaný systém, který je schopný vyhovět kmitočtovým požadavkům [15].
- Pomocné zařízení k záznamu úrovní výkonu nezbytných pro požadovanou intenzitu pole a pro řízení generování této úrovně pro účely zkoušky. Tyto zařízení se umisťují zásadně vně komory a do jejího vnitřního prostoru jsou často navázána pomocí optočlenů či optických zařízení [15].



Obrázek 25: Bezodrazová komora ZČU FEL



Obrázek 26: Schéma bezodrazové komory (absorpční obložení stropu a stěn není vyobrazeno) [14]

5.4.3 Kalibrace pole

Účelem kalibrace pole je zajištění, aby jednotnost pole přes celý zkušební vzorek byla dostatečná k zajištění platnosti výsledků zkoušky. Pro zajištění správné indikace jakéhokoliv čidla pole se provádí kalibrace bez modulace signálu [15].

Při kalibraci se používá koncepce plochy jednotného pole, která je hypotetickou vertikální rovinou pole. Tato plocha je 1,5 m x 1,5 m, ledaže EUT a jeho vodiče mohou být plně ozářeny uvnitř menšího povrchu. Velikost plochy jednotného pole nesmí být menší než 0,5 m x 0,5 m [15].

Postup kalibrace pole:

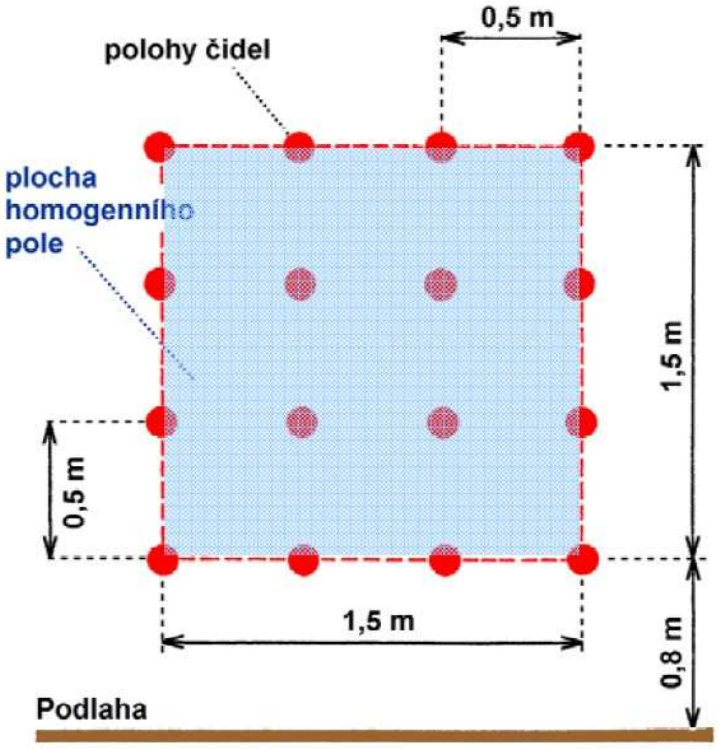
a) Čidlo pole se umístí do jednoho z 16 bodů mříže (viz obr 27).
b) Použije se příkon antény generující pole tak, aby získaná intenzita pole byla v rozsahu od 3 V/m do 10 V/m přes kmitočtový rozsah v krocích o velikosti 1 % počátečního kmitočtu (a potom vždy předcházejícího kmitočtu) a zapíše se výkon a intenzita pole.
c) Se stejným příkonem se změří a zaznamená intenzita pole ve zbývajících 15 bodech.
d) Při uvažování všech 16 bodů se vypustí maximálně 25 % bodů v nichž je největší odchylka od střední hodnoty vyjádřená ve V/m.

e) Zbývající body musí ležet v rozsahu ±3 dB.

f) Ze zbývajících bodů se označí místo s nejnižší intenzitou pole jako reference.

g) Ze znalosti příkonu a intenzity pole může být vypočten potřebný výkon pro požadovanou zkušební intenzitu pole (např. dává-li příkon 80 W v daném bodě intenzitu 9 V/m, pak pro 3 V/m je potřeba 8,9 W).

h) Opakují se body a) až g) jak pro horizontální tak pro vertikální polarizaci [15].



Obrázek 27: Kalibrace pole [5]

5.4.4 Postup zkoušky

Zkoušené zařízení musí být zkoušeno za předpokládaných provozních a klimatických podmínek. Teplota a relativní vlhkost musí být zapsány ve zkušebním protokolu.

Před samotným zkoušením musí být zkontrolována intenzita vytvořeného pole umístěním čidla pole do bodu kalibrační mříže, zároveň anténa generující pole a kabely jsou ve stejné poloze jako při kalibraci, vstupní výkon potřebný pro vytvoření kalibrované intenzity pole může být změřen. Tento výkon musí být stejný jako údaje zaznamenané během kalibrace. Musí se zkontrolovat obě polarizace [15].

Polarizace pole generovaného každou anténou vyžaduje zkoušení každé strany dvakrát. Jednou pro vertikální polohu antény a druhou pro horizontální polohu antény [15].

5.5 Odolnost proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Zdrojem rušení je v zásadě elektromagnetické pole přicházející z úmyslných vysokofrekvenčních vysílačů, které může působit na celou délku kabelů připojených k instalovanému zařízení. Přívodní a výstupní pohyblivé přívody, tj. síťové přívody, komunikační vedení a propojovací kabely se chovají jako pasivní přijímače anténní sítě, jejichž délka může být několikanásobkem délky vlny. Citlivé zařízení je vystaveno proudům protékající přes zařízení mezi těmito kabelovými sítěmi. Předpokládá se, že kabelové systémy připojené na zařízení jsou v režimu rezonance ($\lambda/4$, $\lambda/2$ otevřené nebo skládané dipóly) a jako takové jsou reprezentovány vazebními a oddělovacími prvky jejichž nesymetrická impedance proti referenční rovině je 150 Ω. Zkoušené zařízení je touto zkušební metodou vystaveno zdroji rušení zahrnující elektrická a magnetická pole, která modelují pole přicházející z úmyslných vf vysílačů [16].

Skutečnou situaci, kde rušící zdroje působí na všechny kabely současně s rozsahem různých amplitud a fází, je možno aproximovat jen použitím vazebních oddělovacích prvků pro působení rušivého signálu na jeden kabel a současně udržováním všech ostatních kabelů v nevybuzeném stavu [16].

5.5.1 Zkušební úrovně

Pro indukovaná rušení způsobená elektromagnetickými poli přicházejícími od záměrných vf vysílačů v kmitočtovém pásmu 9 kHz až 150 MHz nejsou požadovány žádné zkoušky [16].

Kmitočtový rozsah 150 kHz - 80 MHz		
Úroveň	Úroveň napětí (ems)	
	U_0[dB(μV)]	U_0 [V]
1	120	1
2	130	3
3	140	10
x	zvláštní	

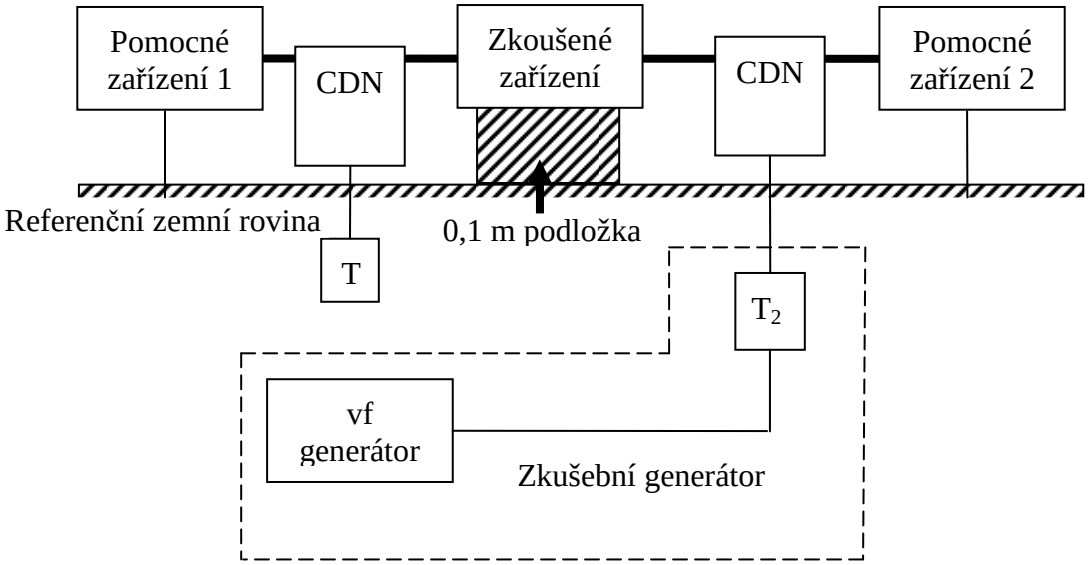
Tabulka 7: Zkušební úrovně [16]

5.5.2 Postup zkoušky

Zkoušené zařízení musí být provozováno za svých předpokládaných klimatických podmínek. Teplota a relativní vlhkost by měly být zaznamenány ve zkušebním protokolu. Pokud se týče vyzařování zkušební sestavy musí být dodrženy místní předpisy. Jestliže vyzářená energie překračuje dovolené úrovně, musí být použit stínící kryt [16].

Zkouška musí být provedena s generátorem připojeným střídavě ke každému z vazebních a oddělovacích členů, zatímco jiné nevybuzené vf vstupy vazebních členů jsou zakončeny zatěžovacím rezistorem 50 Ω. K zabránění rušení zkoušeného zařízení harmonickými musí být použity filtry. Za zkušebním generátorem může být požadován filtr horní propusti 100 kHz. Charakteristiky pásmové zádrže filtru dolní propustě musí být dostatečné k potlačení harmonických tak, aby neovlivňovaly výsledky [16].

Kmitočtový rozsah je rozmítán od 150 kHz do 80 MHz při použití úrovní signálu vytvořených při procesu nastavování a s rušivým signálem modulovaným sinusovou vlnou 1 kHz s amplitudou 80% a pokud je to nutné s přestávkami na nastavení úrovně vf signálu nebo na přepínání vazebních prvků. Rychlost rozmítání nesmí překročit $1{,}5 \times 10^{-3}$ dekády/s. Kde je kmitočet rozmítán po krocích, nesmí velikost kroku být větší než 1 % začátečního kmitočtu [16].



T - zakončení 50 Ω
T_2 - výkonový útlumový člen (6 dB)
CDN - vazební a oddělovací člen

Obrázek 28: Schematické znázornění sestavy pro zkoušku odolnosti proti vf rušením šířeným vedením [16]

5.6 Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí

Poklesy napětí a krátká přerušení napětí jsou způsobena poruchami v síti a v instalaci nebo náhlými velkými změnami zatížení. V některých případech se může vyskytnout i více krátkodobých poklesů nebo přerušení za sebou. Pomalé změny napětí jsou způsobeny spojitě proměnnými zátěžemi připojených do sítě. V praxi jsou tyto změny v napájecím napětí důsledkem vypínání stykačů, nesprávná funkce regulačních přístrojů, chyby v komutaci měničů či ztráta dat v pamětech počítačů [1].

Pro zkoušku se používá generátor používaný pro krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí.

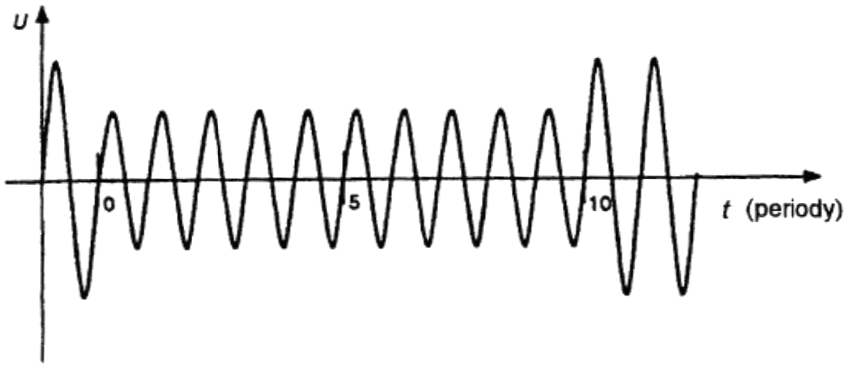
5.6.1 Zkušební úrovně

Krátkodobé poklesy napětí a krátká přerušení

Pro 0,5 periody musí být zkouška provedena jak v kladné polaritě tak i v záporné polaritě, tj. pro 0º i 180º [17].

Zkušební úroveň % U_T	Pokles a krátké přerušení napětí % U_T	Doba trvání (počet period)
0	100	0,5 1 5 10 25 50 x
40	60	
70	30	

Tabulka 8: Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy a krátká přerušení napětí [17]



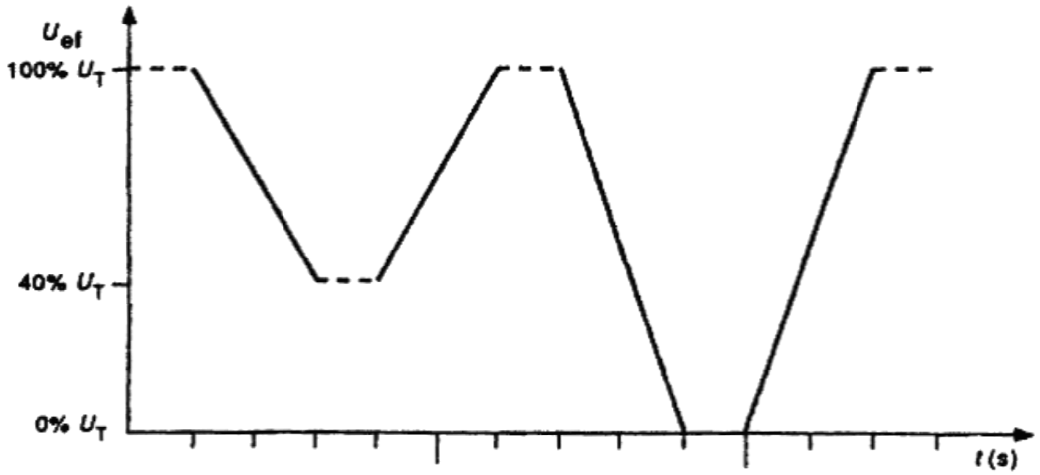
Obrázek 29: Krátkodobé poklesy napětí (napětí klesne na 70 % po dobu 10 period) [17]

Krátkodobé změny napětí (nezávazné)

Tato zkouška bere ohled na definovaný přechod mezi jednotlivým napětím U_T a změněným napětím. *X* je nestanovená doba trvání a může být dána ve specifikaci výrobku [17].

Zkušební úroveň napětí	Doba klesání napětí	Doba sníženého napětí	Doba stoupání napětí
40 % U_T	2 s ±20 %	1 s ±20 %	2 s ±20 %
0 % U_T	2 s ±20 %	1 s ±20 %	2 s ±20 %
	x	x	x

Tabulka 9: Časové hodnoty krátkodobých pomalých změn síťového napětí [17]



Obrázek 30: Pomalé změny napětí [17]

5.6.2 Postupy zkoušky

Před zahájením zkoušky daného zařízení je potřeba připravit plán zkoušky.

Krátkodobé poklesy a krátká přerušení napětí

EUT musí být zkoušeno pro každou vybranou kombinaci zkušební úrovně a doby trvání v pořadí tři krátkodobé poklesy/krátká přerušení s minimálními intervaly 10 sekund. Musí být zkoušen každý reprezentativní režim provozu. Náhlé změny napájecího napětí se musí projevit při průchodu napětí nulou a při dodatečných úhlech považovaných předmětovými komisemi za kritické nebo podle individuálních specifikací výrobků, přednostně vybraných z 45º, 90º, 135 º, 180 º, 225 º, 270 º a 315 º v každé fázi. U třífázových systémů je dávána přednost zkoušce po jednotlivých fázích [17].

Pomalé změny napětí (nezávazné)

EUT musí být zkoušeno pro každou stanovenou pomalou změnu napětí, třikrát při intervalu 10 sekund pro každý reprezentativní režim provozu [17].

5.7 Výsledky zkoušek

Zařízení, která jsou zkoušena jsou velice různorodá. To způsobuje, že stanovení účinků těchto zkoušek na činnost zkoušených zařízení a systémů je velice obtížné.

Výsledky zkoušek jsou rozlišovány na základě pozorování provozních podmínek a funkčních specifikací zkoušeného zařízení v průběhu zkoušky odolnosti. Každá třída funkčnosti má své označení (od A až po D). Tyto funkční specifikace jsou tříděny na:

1. Normální činnost v rozsahu daném stanovenými mezemi **(označení třídy A)** [10]**.**
2. Dočasné zhoršení nebo ztráta funkce nebo činnosti, která se sama obnovuje **(označení třídy B)** [10]**.**
3. Dočasné zhoršení nebo ztráta funkce nebo činnosti, která vyžaduje zásah obsluhy nebo znovu nastavení systému **(označení třídy C)** [10]**.**
4. Zhoršení nebo ztráta funkce, která není obnovitelná vlivem poškození zařízení programového vybavení nebo ztráty dat **(označení třídy D)** [10]**.**

Ve většině prostředí se dle norem posuzuje za vyhovující třídu třída A, ale existují i prostředí, kde se dle provozních podmínek můžeme spokojit s třídou B. Třída B bývá vyhovující tam, kde krátký výpadek nemá na celkovou funkci zkoušeného zařízení vliv.

Protokol o zkoušce musí zahrnovat podmínky zkoušky a výsledky zkoušky [10].

6 Kontrolní měření elektromagnetické imunity regulace topení RT1

Kontrolní měření elektromagnetické imunity se týkalo ověření systému regulace topení v prostoru pro cestující v trolejbusech a tramvajích pod označením RT1. Tento systém zapíná, reguluje a vypíná topení v prostoru pro cestující bez jakéhokoliv zásahu řidiče trolejbusu či tramvaje. Systém využívá stávajících stykačů ke spínání topných těles v prostoru pro cestující dle následujícího algoritmu:

- Teplota, při níž se regulace spustí je 10 °C (venkovní teplota)
- Teplota v interiéru vozidla je cca 18 °C
- Regulace poběží po celou dobu, kdy bude vozidlo nastartované

Testovaný systém je tvořen řídící jednotkou RJ, dvěma teplotními jednotkami TJ s teplotními čidly TC pro snímání teploty venkovní a teploty ve voze. K dispozici jsme měli dvě řídící jednotky. První řídící jednotka je vybavena DC/DC měničem a druhá řídící jednotka je vybavena místo DC/DC měniče lineárním stabilizátorem 7805. Nevýhodou lineárního stabilizátoru je teoreticky menší odolnost z hlediska EMC, ale jeho velikou výhodou jsou 10x menší pořizovací náklady. Otestujeme obě řídící jednotky a dle toho jaké budou výsledky testů se rozhodneme, kterou řídící jednotku v systému regulace použijeme.

Kabely teplotních čidel budou vedeny mimo silové vodiče, aby nedocházelo k souběhu vodičů a tím i k rušení. Polohopisné schéma systému regulace je uveden v příloze 1.

Obrázek 31: Zleva: Řídící jednotka RJ s DC/DC měničem, řídící jednotka RJ s lineárnim měničem 7805, teplotní jednotka TJ

6.1 Popis funkce

Řídící systém regulace topení se skládá z řídící jednotky RJ a dále z teplotních jednotek TJA a TJB. Teplotní jednotky zajišťují měření teplot pomocí teplotních snímačů. Teplotní jednotka TJA s teplotním čidlem TCA měří venkovní teplotu a čidlo TJB s teplotními čidly TCB1 a TCB2 měří teplotu uvnitř vozu. Předávání hodnot teplot mezi teplotními jednotkami a řídící jednotkou probíhá po jednovodičové sběrnici.

Systém obsahuje spínač automatického režimu SI-1. Pokud je spínač SI-1 rozepnut, je topení ovládáno ručně přepínačem S6. Pokud je však spínač SI-1 sepnut a tím i relé KI-1 sepnuté, pak je topení ovládáno v automatickém režimu a k sepnutí topení se používá relé KI-2. V automatickém režimu je podmínkou pro topení též nastartování vozu. Řídící jednotka vyhodnocuje sepnutí spínače SI-1 a také sleduje zda je vůz nastartován pomocí digitálních vstupů a k ovládání relé KI-2 používá digitální tranzistorový výstup. Blokové schéma řídícího systému je uvedeno v příloze 2.

Celé zařízení se ovládá velice jednoduše. Buď se spuštění topidel provede zcela ručně přepínačem v kabině řidiče nebo je topení ovládané zcela automaticky řídící jednotkou na základě venkovní teploty a teploty uvnitř vozu.

K zajištění kontroly správné funkce systému slouží dvojice LED diod (zelená, oranžová), které jsou umístěné na řídící jednotce i na každé teplotní jednotce. Blikající diody signalizují komunikaci mezi řídící jednotkou RJ a teplotními jednotkami TJA a TJB.
Vysvětlení indikace LED diod na řídící jednotce RJ:

- 2 bliknutí – komunikace RJ a TJA (vyslání a přijmutí dat)
- 2 krátké bliknutí – komunikace RJ a TJB (vyslání a přijmutí dat)
- Obě LED diody blikají 2 sekundy současně – došlo k chybě (restart systému)

6.2 Způsob zkoušení

6.2.1 Zkoušky odolnosti

Zkoušky odolnosti proti elektromagnetickému rušení se orientovaly na:

- test odolnosti proti vyzařovanému elektromagnetickému poli dle ČSN EN 61000-4-3, ed.3:2006+A1+A2+Z1,
- test odolnosti vůči elektrickému rychlému přechodovému jevu rušení v napájecích a signálových vodičích dle ČSN EN 61000-4-4, ed.2:2005 + A1:2010
- test odolnosti proti rázovému impulzu dle ČSN EN 61000-4-5, ed.2:2007
- test odolnosti proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli dle ČSN EN 61000-4-6,ed.2:2008

  Zkoušky byly vyhodnoceny z hlediska těchto kritérií:

Kritérium A: V podmínkách elektromagnetického rušení si zkoušené zařízení zachovává všechny vlastnosti garantované technickými podmínkami.

Kritérium B: Dojde ke krátkodobému snížení provozuschopnosti zkoušeného zařízení, avšak jen po dobu působení rušivého signálu. Po vypnutí rušícího signálu se automaticky (tedy bez zásahu obsluhy) obnoví všechny funkce garantované technickými podmínkami. Přitom nesmí dojít ke změně navoleného stavu, tedy již zadané parametry a výstupní signály nezmění navolený stav.

Kritérium C: V podmínkách elektromagnetického rušení dojde k takové disfunkci zkoušeného zařízení, že opětovné zprovoznění si vyžádá zásah obsluhy, např. nový restart.

Kritérium D: V podmínkách elektromagnetického rušení dojde ke zhoršení činnosti, nebo ke ztrátě funkce, která není odstranitelná v důsledku poškození zařízení, programového vybavení, nebo ztrátě dat.

6.2.2 Seznam použitých přístrojů a zařízení

Simulátor rušení dle ČSN EN 61000-4-4, 5 a 11 typ UCS 500-M4, v.č.0402-37

Kapacitní kleština typ HFK v.č. 6895-31

Simulátor rušení dle ČSN EN 61000-4-6 typ CWS 500, ev.č. 22840

Souprava pro simulaci rušení dle ČSN EN 61000-4-3 obsahující:

Vf generátor SML 03, ev. č. 500235

Zesilovač FLH 200B, ev. č. 500236

Zesilovač FLG 30C, ev. č. 500237

Spínací skříň RSU, ev. č. 500242

Power metr PMS 1084, ev. č. 500239

Anténa BTA-M, ev. č. 500240

Měřicí přijímač PMM 8000 Plus v.č. 0100 J11002

Anténa BC-01 30-200 MHz, v.č. J10105

Anténa LP-02 0,2-1,2 GHz, v.č.J10105

Umělá síť PMM L3-25, v.č. 266

Měřicí přijímač ESU Emi test 20Hz-8GHz, v.č. 500499

Přístroje a zařízení, podléhající pravidelné metrologické kontrole, byly ve stanovených termínech kontrolovány a potvrzeny správnými.

6.3 Průběhy a výsledky zkoušek testů odolnosti

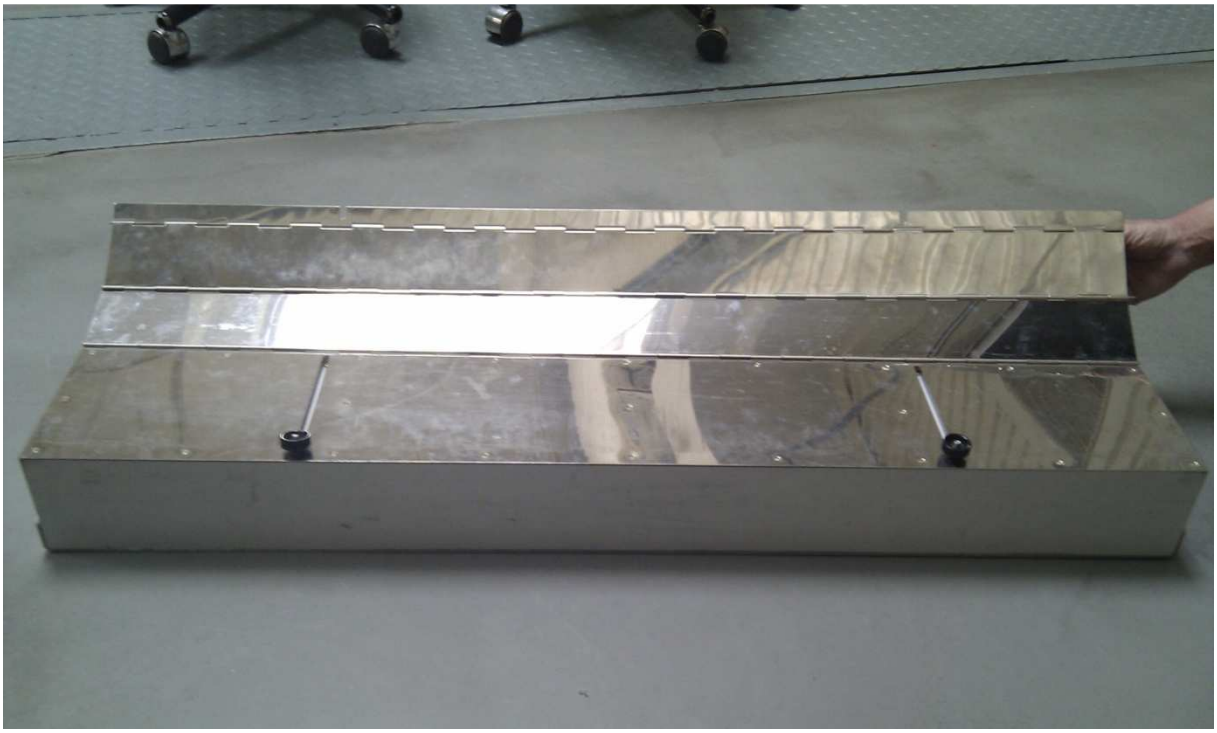
Zkoušky byly přizpůsobeny požadavkům dle normy ČSN 50121-3-2 pro drážní vozidla – zařízení.

Zkoušené zařízení regulace topení RT1 bylo zapojeno v pracovní konfiguraci. Zkoušky probíhaly při jmenovitém napájecím napětí, které bylo realizováno 24 V baterií.

6.3.1 Test odolnosti zařízení vůči elektrickému rychlému přechodovému jevu

6.3.1.1 Průběh měření

Hodnoty rušení byly určeny po dohodě s výrobcem a v souladu s normou uvedenou výše. Rušivý signál byl aplikován do AC napájení pomocí kapacitní kleštiny (kapacitní vazba) po dobu jedné minuty s opakovací frekvencí pulsů ve skupině 5 kHz. Doba pulzu byla 15 ms s opakovací periodou 300 ms.



Obrázek 32: Kapacitní kleština

6.3.1.2 Výsledky zkoušky

Řidící jednotka s DC/DC měničem

Napájení řídící jednotky RJ 24V DC

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do L+,L-	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 10: Napájení řídící jednotky RJ 24V DC

Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 11: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 12: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB

Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 13: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 14: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB

Řidící jednotka s DC/DC měničem

Napájení řídící jednotky RJ 24V DC

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do L+,L-	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 15: Napájení řídící jednotky RJ 24V DC

Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 16: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 17: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB

Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

Tabulka 18: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB

Aplikováno	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
kapacitní kleštinou do propojky	1	0,5	**A**	**A**
	2	1	**A**	**A**
	3	2	**A**	**A**

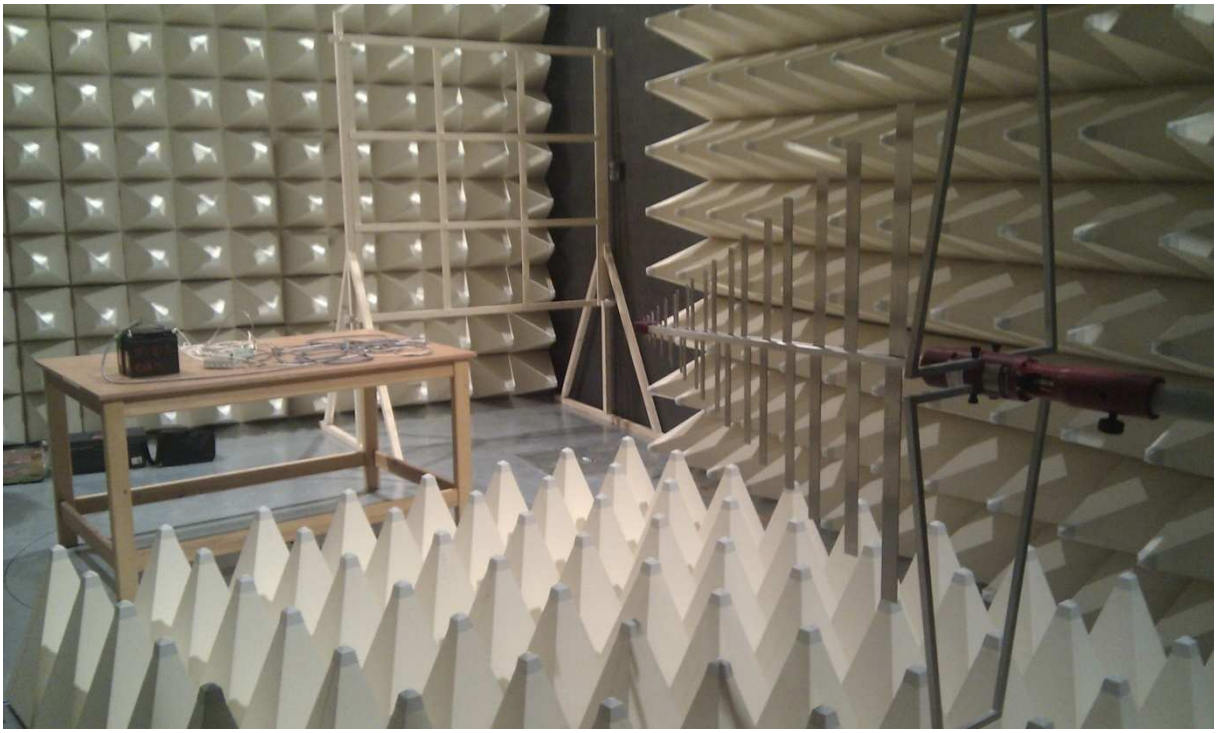
Tabulka 19: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB

Z výsledkových tabulek vyplývá, že testovaný systém regulace topení zkouškou odolnosti vůči elektrickému rychlému přechodovému jevu prošel jak s řídící jednotkou vybavenou DC/DC měničem tak i s řídící jednotkou vybavenou lineárním usměrňovačem 7805.

6.3.2 Test odolnosti proti vyzařovanému vf elektromagnetickému poli

6.3.2.1 Průběh zkoušky

Hodnoty úrovně rušení elektromagnetickým polem byly stanoveny po dohodě s výrobcem a v souladu s normou. Vysokofrekvenční signál byl modulován sinusovou vlnou 1 kHz s hloubkou modulace 80%. Velikost kroku zvyšování frekvence je zvýšení základní složky o 1%. V této zkoušce jsme pokračovali už jenom s řídící jednotkou vybavenou lineárním stabilizátorem 7805, protože jsme usoudili, že řídící jednotka s lineárním stabilizátorem 7805 má stejné parametry z hlediska EMC jako řídící jednotka s DC/DC měničem. Zkouška probíhala v bezodrazové komoře ZČU FEL. Parametry zkoušky jsou uvedeny v tabulkách níže.



Obrázek 33: Zkouška odolnosti protii vf elektromagnetickému poli v bezodrazové komoře ZČU FEL

6.3.2.2 Výsledky zkoušky

Frekvenční interval 80→1000 MHz

Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	
Vzdálenost mezi anténou a zkoušencem	3 m	
Výška antény nad podložkou	1,2 m	
Poloha antény	horizontální	verikální
Výsledek zkoušky	**A**	**A**

Tabulka 20: Vf pole. frekvenční interval 80→1000 MHz

Frekvenční interval 800→1000 MHz

Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	
Vzdálenost mezi anténou a zkoušencem	3 m	
Výška antény nad podložkou	1,2 m	
Poloha antény	horizontální	vertikální
Výsledek zkoušky	**A**	**A**

Tabulka 21: Vf pole, frekvenční interval 800→1000 MHz

Frekvenční interval 1400→2100 MHz

Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	
Vzdálenost mezi anténou a zkoušencem	3 m	
Výška antény nad podložkou	1,2 m	
Poloha antény	horizontální	vertikální
Výsledek zkoušky	**A**	**A**

Tabulka 22: Vf pole, frekvenční interval 1400→2100 MHz

Frekvenční interval 2100→2500 MHz

Intenzita elektromagnetického pole	10 V/m	
Vzdálenost mezi anténou a zkoušencem	3 m	
Výška antény nad podložkou	1,2 m	
Poloha antény	horizontální	vertikální
Výsledek zkoušky	**A**	**A**

Tabulka 23: Vf pole, frekvenční interval 2100→2500 MHz

Z výsledkových tabulek vyplývá, že testovaný systém regulace topení s řídící jednotkou vybavenou lineárním usměrňovačem 7805 prošel zkouškou odolnosti proti vyzařování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole.

6.3.3 Test odolnosti vůči rázovému impulsu

6.3.3.1 Průběh měření

Hodnoty úrovně rázového impulsu v souladu s normou ČSN EN 61000-4-5 a ČSN 50121-3-2. Testování bylo prováděno pouze na řídící jednotce vybavené lineárním stabilizátorem 7805. Signál předepsaného tvaru a amplitudy byl aplikován do napájecích vodičů 5-krát. Signál byl aplikován do L+ a L-.

Obrázek 34: Generátor kombinované vlny pro rázový impuls

6.3.3.2 Výsledky zkoušky

Napájení řídící jednotky RJ 24 V DC

Aplikováno do	Úroveň	Amplituda [kA]	Polarita +	Polarita -
L+→L-	2	0,5	**A**	**A**
	3	1	**A**	**A**

Tabulka 24: Rázový impuls

Z výsledkových tabulek vyplývá, že testovaný systém regulace topení s řídící jednotkou vybavenou lineárním usměrňovačem 7805 prošel zkouškou odolnosti vůči rázovému impulsu.

6.3.4 Test odolnosti zařízení vůči rušením šířeným vedením, indukovanými vysokofrekvenčními poli

6.3.4.1 Průběh zkoušky

Hodnoty rušení byly stanoveny po dohodě s výrobcem a v souladu s normou ČSN EN 61000-4-6 a ČSN 50121-3-2. Vysokofrekvenční signál byl modulován sinusovou vlnou 1 kHz s hloubkou modulace sinusové vlny 80%. Velikost kroku zvyšování frekvence je zvýšení základní složky o 1%. Tato zkouška byla provedena pouze na řídící jednotce vybavené lineárním stabilizátorem 7805. Signál byl do napájecích a sdělovacích kabelů navázán pomocí elektromagnetické kleštiny. Další parametry zkoušky jsou dále uvedené ve výsledcích zkoušky.

Obrázek 35: Vkládání vodičů do elektromagnetické kleštiny

6.3.4.2 Výsledky zkoušky

Napájení řídící jednotky RJ 24 V DC

Frekvenční interval	150 kHz→80 MHz
Úroveň napětí	10 V
Způsob aplikace	elektromagnetická kleština
Výsledek zkoušky	**A**

Tabulka 25: Šíření vedením, napájení řídící jednotky RJ 24 V DC

Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Frekvenční interval	150 kHz→80 MHz
Úroveň napětí	10 V
Způsob aplikace	elektromagnetická kleština
Výsledek zkoušky	**A**

Tabulka 26: Šíření vedením, propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA

Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Frekvenční interval	150 kHz→80 MHz
Úroveň napětí	10 V
Způsob aplikace	elektromagnetická kleština
Výsledek zkoušky	**A**

Tabulka 27: Šíření vedením, propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA

Z výsledkových tabulek vyplývá, že testovaný systém regulace topení s řídící jednotkou vybavenou lineárním usměrňovačem 7805 prošel zkouškou odolnosti vůči rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo seznámit Vás s problematikou vědecko-technického oboru elektromagnetické kompatibility se zaměřením především na rušivé vlivy působící v elektroenergetických zařízeních. V dalších částech teoretické části byly popsány principy ověřování odolnosti elektrických zařízení proti rušivým vlivům.

Praktická část diplomové práce se zabývá jednou ze základních částí oblastí EMC, což je elektromagnetická odolnost. Elektromagnetická odolnost byla ověřována na systému regulace topení (označení RT1) v prostoru pro cestující v trolejbusech či tramvajích. K dispozici jsme měli dvě různé řídící jednotky. Jednotku s DC/DC měničem a jednotku s lineárním stabilizátorem 7805. Úkolem bylo otestovat odolnost zařízení RT1 vůči elektrickému přechodovému jevu, vyzařovanému elektromagnetickému poli, rázovému impulzu, vysokofrekvenčním rušením šířeným po vodičích a indukovaným vysokofrekvenčními poli. Dalším úkolem bylo ze zjištěných výsledků stanovit, která ze dvou testovaných řídících jednotek bude z hlediska funkce a ceny vhodnější. Celý systém se skládal z řídící jednotky RJ, teplotních jednotek TJA a TJB a teplotních čidel TC.

Z dosažených výsledků vyplývá, že všemi testy elektromagnetické odolnosti regulace topení jak s řídící jednotkou s DC/DC měničem, tak i s řídící jednotkou s lineárním stabilizátorem 7805 prošly bez problémů. Z toho vyplývá, že na funkci regulace nemá druh řídící jednotky vliv. Po technicko-ekonomické analýze bude pro výrobu výhodnější použití řídící jednotky s lineárním stabilizátorem 7805, neboť pořizovací náklady jsou 10x menší než u řídící jednotky s DC/DC měničem.

Citovaná literatura

1. **Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.** *Základy elektromagnetické kompatibility.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2005. ISBN 80-214-2864-3.

2. **Ing. Jiří Dříčovský, Ph.D., Ing. Tomáš Frýza Ph.D.** Elektromagnetická komaptibilita technických systémů. *Encyklopedie EMC.* [Online] VUTBR. [Citace: 28. 2 2012.] http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node5.

3. **Ing. Polina Vaculíková, CSc. a kolektiv.** *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů.* Havlíčkův Brod : Grada publishing, spol s r.o., 1998.

4. **Ing. Jiří Dříčovský, Ph.D., IngTomáš Frýza, Ph.D.** Rušivé signály a jejich zdroje. *Encyklopedie EMC.* [Online] VUTBR. [Citace: 20. 2 2012.] http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node7.

5. **Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.** Základy elektromagnetické kompatibility. *Elektrorevue.* [Online] 4. 6 2001. [Citace: 15. 2 2012.] http://www.elektrorevue.cz/clanky/01025/index.html.

6. **Prskavec, Ladislav.** *Měření částečných výbojů.* Praha : české vysoké učení technické v Praze, 1999.

7. **doc. Ing. Jaroslav Svoboda, CSc., Ing Polina Vaculíková, CSc., Ing. Miroslav Vondrák, CSc., Ing. Tomáš Zeman.** *Základy elektromagnetické kompatibility.* Praha : Vydavatelství ČVUT, 1993.

8. **Ing. Jiří Dříčovský, Ph.D., IngTomáš Frýza, Ph.D.** Kritéria elektromagneticé odolnosti. *Encyklopedie EMC.* [Online] VUTBR. [Citace: 20. 2 2012.] http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node56.

9. **Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc.** Zdroje rušivých signálů a vazební mechanismy jejich přenosu. *Elektrorevue.* [Online] 21. 8 2000. [Citace: 29. 2 2012.] http://www.elektrorevue.cz/clanky/00031/index.html#kap5.

10. **ČSN EN, 61000-4-2.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Elektrostatický výboj - zkouška odolnosti.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, červenec 1997.

11. **ČSN EN, 61000-4-4.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Rychlé přechodové jevy/skupiny impulsů.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Červenec 1997.

12. **Ing. Jiří Dříčovský, Ph.D., IngTomáš Frýza, Ph.D.** Zkoušky odolnosti vůči vysokoenergetickým širokopásmovým impulzům. *Encyklopedi EMC.* [Online] VUTBR. [Citace: 21. 2 2012.] http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node61.

13. **ČSN EN, 61000-4-5.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Rázový impuls - zkouška odolnosti.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, 1995.

14. **Ing. Jiří Dříčovský, Ph.D., IngTomáš Frýza, Ph.D.** Zkoušky odolnosti vůči vysokofrekvenčním elektromagnetickým polím. *Encyklopedie EMC.* [Online] VUTBR. [Citace: 6. 3 2012.] http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node66.

15. **ČSN EN, 61000-4-3.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole - zkouška odolnosti.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, červen 2003.

16. **ČSN EN, 61000-4-6.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Listopad 1997.

17. **ČSN EN, 61000-4-11.** Elektromagnetická kompatibilita (EMC). *Krátkodobé poklesy napětí, krátká přerušení a pomalé změny napětí.* Praha : ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, únor 1996.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Základní řetězec EMC a příklady jednotlivých oblastí 13
Obrázek 2: Základní členění problematiky EMC 15
Obrázek 3: K definici úrovní a mezí vyzařování a odolnosti 17
Obrázek 4: Rozdělení elektromagnetického rušení 20
Obrázek 5: Základní druhy elektromagnetických vazeb: a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním 29
Obrázek 6: Rozvod napájení systémů 30
Obrázek 7: Propojení signálových vodičů 30
Obrázek 8: Napájení bloků různých generačních technologií 30
Obrázek 9: Parazitní kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů.....31
Obrázek 10: Parazitní kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem v číslicových obvodech 32
Obrázek 11: Náhradní schéma 32
Obrázek 12: Kapacitní vazba vůči zemi 33
Obrázek 13: Odstranění kapacitní vazby za pomoci stínění 33
Obrázek 14: Omezení parazitních vazeb mezi souběžnými kabely jejich separátním vedením ve stíněných sekcích 34
Obrázek 15: Princip vazby elektromagnetickým vyzařováním (a) a vliv vložené stínící přepážky (b) 35
Obrázek 16: Testovací zařízení ESD.....36
Obrázek 17: Zjednodušené schéma generátoru elektrostatického výboje 37
Obrázek 18: Příklad zkušební sestavy zařízení umístěného na stole, laboratorní zkoušky 39
Obrázek 19: Obecný průběh rychlých přechodových jevů/skupin impulsů [.....40
Obrázek 20: Zjednodušené schéma generátoru rychlých přechodových jevů/skupin impulsů 41
Obrázek 21: Zjednodušené schéma generátoru kombinované vlny 44
Obrázek 22: Zkušební signál rázové vlny a) napětí naprázdno, b) proudu nakrátko 46
Obrázek 23: Příklad zkušební sestavy pro kapacitní vazbu na střídavá či stejnosměrná vedení; vazba mezi živým vodičem a zemí 47
Obrázek 24: Průběh zkušebního signálu s 80 % AM 48
Obrázek 25: Bezodrazová komora ZČU FEL.....50

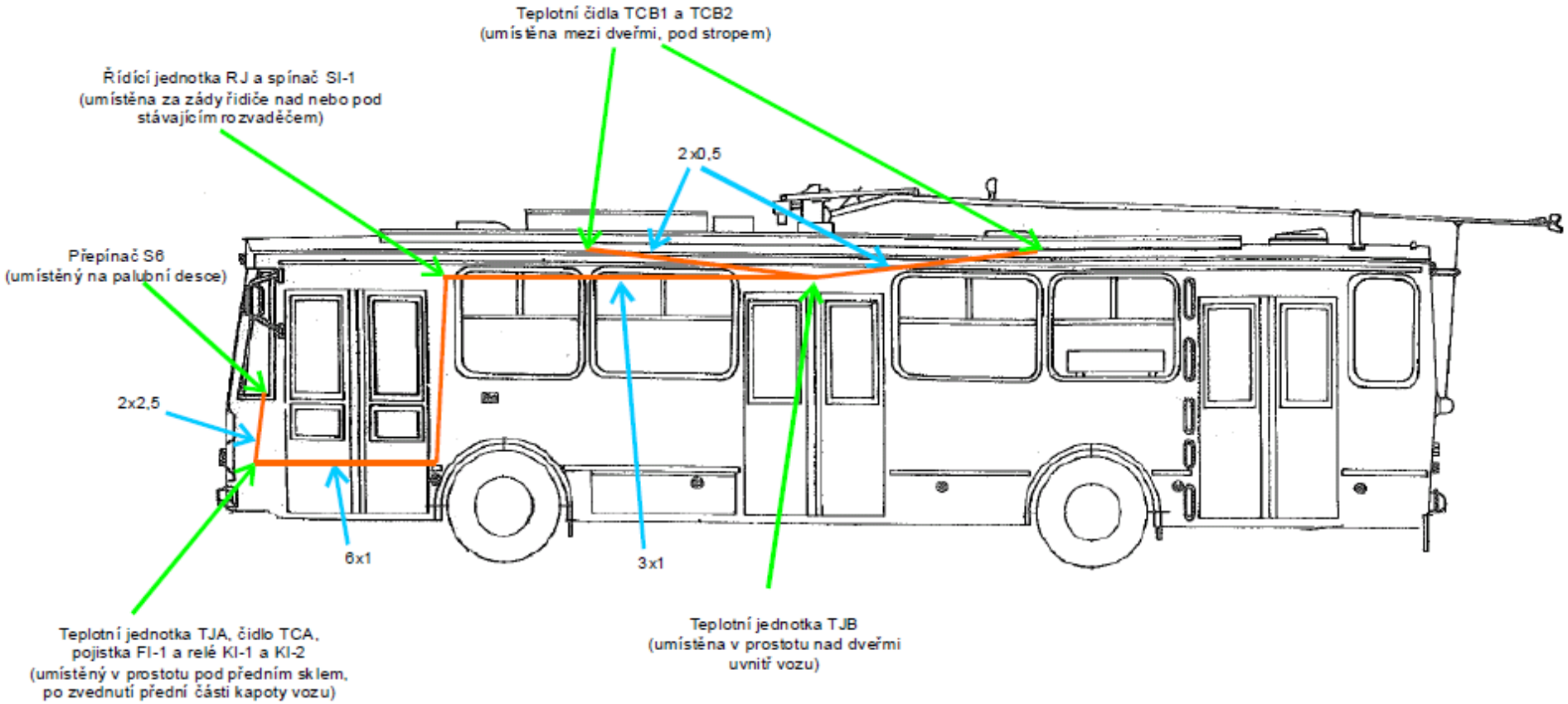
Obrázek 26: Schéma bezodrazové komory
(absorpční obložení stropu a stěn není vyobrazeno) 51
Obrázek 27: Kalibrace pole 52
Obrázek 28: Schematické znázornění sestavy pro zkoušku odolnosti proti vf rušením
šířeným vedením 55
Obrázek 29: Krátkodobé poklesy napětí (napětí klesne na 70 % po dobu 10 period) 56
Obrázek 30: Pomalé změny napětí 57
Obrázek 31: Zleva: Řídící jednotka RJ s DC/DC měničem, řídící jednotka RJ s lineárnim
měničem 7805, teplotní jednotka TJ 59
Obrázek 32: Kapacitní kleština.....63
Obrázek 33: Zkouška odolnosti protii vf elektromagnetickému poli v bezodrazové komoře
ZČU FEL.....66
Obrázek 34: Generátor kombinované vlny pro rázový impuls.....68
Obrázek 35: Vkládání vodičů do elektromagnetické kleštiny.....69

Seznam tabulek

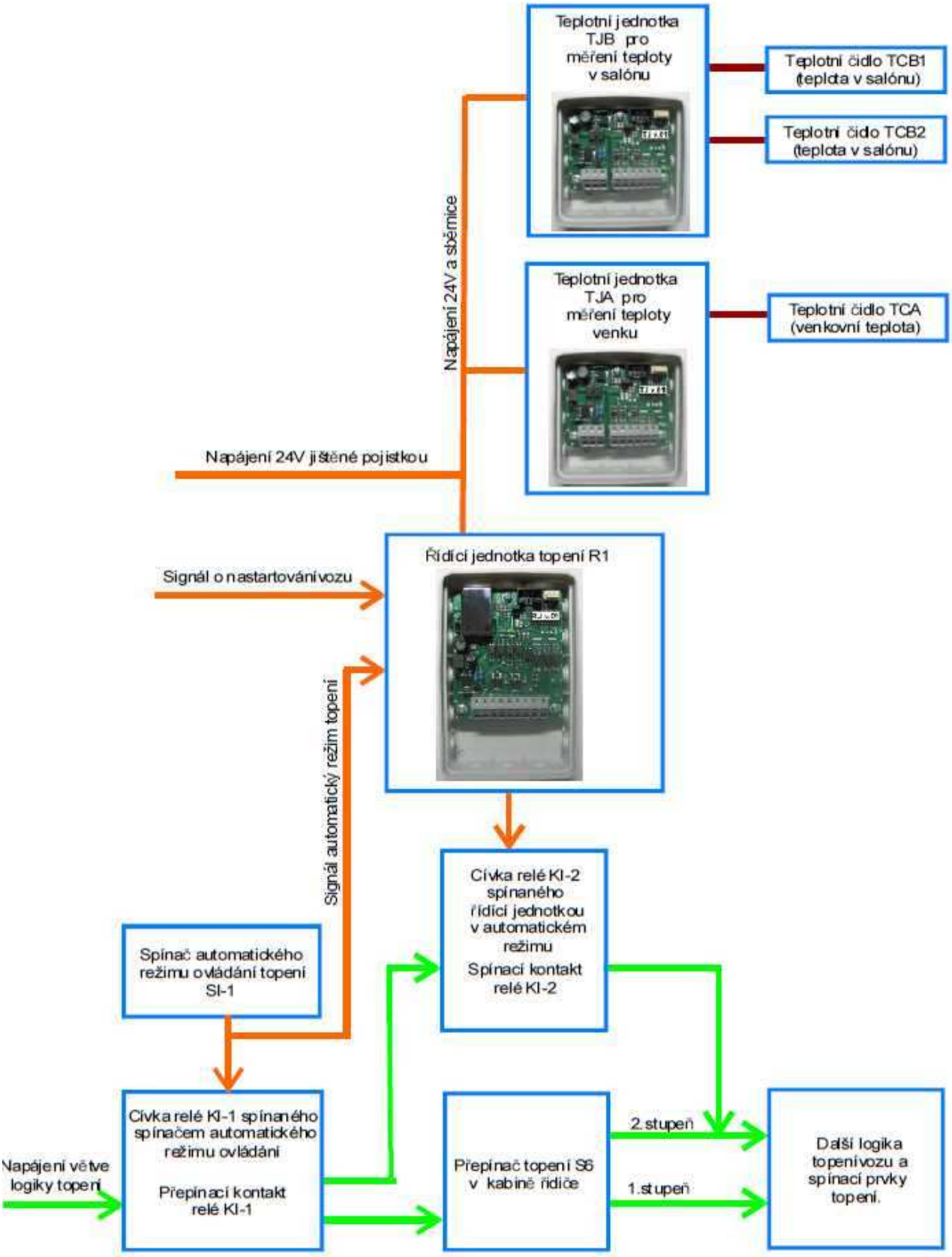
Tabulka 1: Kmitočtové spektrum některých zdrojů rušení 19
Tabulka 2: Velikost zkušebních napěťových impulsů 25
Tabulka 3: Zkušební úrovně 41
Tabulka 4: Definice parametrů vlny 1,2/50 µs 45
Tabulka 5: Zkušební úrovně 49
Tabulka 6: Zkušební úrovně pro kmitočtové rozsahy od 800 MHz do 2 GHz 49
Tabulka 7: Zkušební úrovně 53
Tabulka 8: Přednostní zkušební úrovně a doby trvání pro krátkodobé poklesy a krátká přerušení napětí 56
Tabulka 9: Časové hodnoty krátkodobých pomalých změn síťového napětí 56
Tabulka 10: Napájení řídící jednotky RJ 24V DC.....64
Tabulka 11: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA 64
Tabulka 12: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB 64
Tabulka 13: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA.....64
Tabulka 14: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB 64
Tabulka 15: Napájení řídící jednotky RJ 24V DC.....65
Tabulka 16: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA 65
Tabulka 17: Propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJB 65
Tabulka 18: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA.....65
Tabulka 19: Propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCB 65
Tabulka 20: Vf pole. frekvenční interval 80→1000 MHz.....67
Tabulka 21: Vf pole, frekvenční interval 800→1000 MHz.....67
Tabulka 22: Vf pole, frekvenční interval 1400→2100 MHz.....67
Tabulka 23: Vf pole, frekvenční interval 2100→2500 MHz.....67
Tabulka 24: Rázový impuls 68
Tabulka 25: Šíření vedením, napájení řídící jednotky RJ 24 V DC 70
Tabulka 26: Šíření vedením, propojení řídící jednotky RJ a teplotní jednotky TJA 70
Tabulka 27: Šíření vedením, propojení teplotní jednotky TJA a teplotního čidla TCA.....70

Přílohy

Příloha A – Polohopisné schéma umístění RT1 – umístění ve vozidle



Příloha B – Blokové schéma RT1



Evidenční list

Souhlasím s tím, aby moje diplomová práce byla půjčovaná k prezenčnímu studiu v Univerzitní knihovně ZČU v Plzni.

Datum 27.4.2012 Podpis:

Uživatel stvrzuje svým čitelným podpisem, že tuto bakalářskou práci použil ke studijním účelům a prohlašuje, že ji uvede mezi použitými prameny.

Jméno	Fakulta/katedra	Datum	Podpis