

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Elektromagnetická kompatibilita řídicího systému  
regulace PWR**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2018/2019**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Bc. Petr DĚDIČ**

**Osobní číslo: E16N0095P**

**Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika**

**Studijní obor: Elektroenergetika**

**Název tématu: Elektromagnetická kompatibilita řídicího systému regulace PWR**

**Zadávací katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Seznamte se s aplikovatelnými evropskými normami pro splnění kompatibility řídicích systémů regulace jaderných elektráren.
2. V souladu s normami navrhňte testovací postup pro systém pohonu regulačních tyčí.
3. Navrhňte modifikace v konstrukci za účelem zlepšení elektromagnetické kompatibility systému.
4. Otestujte a vyhodnoňte dopad navržených změn.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility.
2. Vaculíková, Vaculík: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů.


Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019

  
Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.  
děkan



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

V Plzni dne 5. října 2018

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá problematikou elektromagnetické kompatibility řídicího systému regulace výkonu reaktoru typu PWR. Práce obsahuje teoretický úvod do problematiky EMC od jejího vzniku, druhů rušivých signálů a vazeb, po měření a způsoby ochrany zařízení. Dále se věnuje obecnému popisu principu řízení jaderného reaktoru. Praktická část práce je zaměřena na charakteristiku vybraného řídicího systému a návrh zkoušek elektromagnetické kompatibility dle platných norem ČSN EN. Elektromagnetická kompatibilita byla otestována na kvalifikačním standu, který byl pro tento řídicí systém vyroben. Vybrané zkoušky jsou v praktické části blíže popsány a vyhodnoceny.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetická kompatibilita, EMC, řídicí systém jaderného reaktoru, zkoušky odolnosti.

## **Abstract**

The master thesis deals with electromagnetic compatibility of PWR reactor control rod system. The thesis contains theoretical introduction to EMC from its origin, types of disturbing signals and couplings, to measurements and methods of device protection. It also deals with the general description of principle of controlling nuclear reactor. The practical part of the thesis is focused on the characteristics of the selected control rod system and the suggestion of electromagnetic compatibility tests according to valid ČSN EN standards. Electromagnetic compatibility was tested on the qualifying stand that was made for this control rod system. Selected tests are described and evaluated in the practical part.

## **Key words**

Electromagnetic compatibility, EMC, immunity tests, nuclear reactor control rod system.

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne

Petr Dědič

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Miroslavu Hromádkovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Miroslavu Říšovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval firmě ZAT, a.s. za poskytnutí potřebného zařízení a za ochotu spolupracovat na diplomové práci.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA</b> .....	<b>12</b>
1.1 VZNIK EMC .....	12
1.2 DŮVODY A DŮSLEDKY EMC .....	12
1.3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ .....	13
1.4 POJMY V ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITĚ.....	15
<b>2 RUŠIVÉ SIGNÁLY A ZDROJE RUŠENÍ</b> .....	<b>17</b>
2.1 PRŮMYSLOVÉ ZDROJE RUŠENÍ .....	18
2.2 ZDROJE PŘEPĚTÍ .....	19
2.3 ZDROJE KONTINUÁLNÍHO RUŠENÍ .....	19
2.4 ZVLÁŠTNÍ ZDROJE RUŠENÍ .....	20
<b>3 ELEKTROMAGNETICKÉ VAZBY</b> .....	<b>21</b>
3.1 GALVANICKÁ VAZBA .....	21
3.2 INDUKČNÍ VAZBA .....	24
3.3 KAPACITNÍ VAZBA .....	26
3.4 VAZBA VYZAŘOVÁNÍM ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM.....	26
<b>4 MĚŘENÍ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ</b> .....	<b>28</b>
4.1 UMĚLÁ SÍŤ .....	28
4.2 NAPĚŤOVÁ SONDA .....	30
4.3 PROUDOVÁ SONDA .....	31
4.4 ABSORPČNÍ KLEŠTĚ .....	31
4.5 ANTÉNY .....	32
<b>5 ZPŮSOBY OCHRANY PŘED RUŠENÍM</b> .....	<b>34</b>
5.1 FILTRACE RUŠENÍ.....	34
5.1.1 Odrušovací tlumivky.....	34
5.1.2 Odrušovací kondenzátory.....	35



5.1.3	<i>Odrušovací vysokofrekvenční filtry</i> .....	37
5.2	OMEZOVÁNÍ PŘEPĚTÍ .....	37
5.3	STÍNĚNÍ .....	38
5.4	ZEMNĚNÍ .....	39
5.4.1	<i>Nízkofrekvenční zemnění</i> .....	39
5.4.2	<i>Vysokofrekvenční zemnění</i> .....	40
<b>6</b>	<b>VLASTNOSTI ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU</b> .....	<b>41</b>
6.1	PRINCIP ŘÍZENÍ REAKTORU JE .....	41
6.2	CHARAKTERISTIKA ŘÍDÍCÍHO SYSTÉMU EXMAB .....	41
6.3	KVALIFIKAČNÍ STEND .....	42
6.3.1	<i>Napájení</i> .....	43
6.3.2	<i>Sandra Z100</i> .....	44
6.3.3	<i>Ovládací zařízení (HMI)</i> .....	44
6.3.4	<i>Komunikace</i> .....	45
6.3.5	<i>Diagnostika</i> .....	45
6.3.6	<i>IPMAB</i> .....	45
6.3.7	<i>MAB</i> .....	45
6.4	ZAJIŠTĚNÍ SPOLEHLIVOSTI SYSTÉMU .....	45
<b>7</b>	<b>PROGRAM ZKOUŠEK ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY</b> .....	<b>47</b>
7.1	FUNKČNÍ KRITÉRIA .....	47
7.2	ZKOUŠKY ODOLNOSTI .....	48
7.2.1	<i>Zkouška odolnosti proti rušení elektrostatickými výboji</i> .....	48
7.2.2	<i>Zkouška odolnosti proti rušení vyzařovaným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem</i> .....	50
7.2.3	<i>Zkouška odolnosti proti rušení rychlými elektrickými přechodovými jevy / skupinami impulsů</i> .....	52
7.2.4	<i>Zkouška odolnosti proti rušení rázovým impulsem</i> .....	54
7.2.5	<i>Zkouška odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli</i> .....	57
7.2.6	<i>Zkouška odolnosti proti rušení magnetickým polem síťového kmitočtu</i> .....	59
7.2.7	<i>Zkouška odolnosti proti rušení impulsem magnetického pole</i> .....	60
7.2.8	<i>Zkouška odolnosti proti rušení tlumenými kmity magnetického pole</i> .....	61

7.2.9	<i>Zkouška odolnosti proti nesymetrickým rušením šířeným vedením.....</i>	<i>63</i>
7.2.10	<i>Zkouška odolnosti proti rušení tlumenou oscilační vlnou 100 kHz a 1 MHz 66</i>	
7.2.11	<i>Zkouška odolnosti proti kolísání napětí .....</i>	<i>69</i>
7.2.12	<i>Zkouška odolnosti proti kolísání síťového kmitočtu.....</i>	<i>71</i>
7.2.13	<i>Zkouška odolnosti proti rušení harmonickými a mezipharmonickými kmitočty 73</i>	
7.2.14	<i>Měření harmonických napětí a proudů a kolísání napětí .....</i>	<i>75</i>
7.2.15	<i>Měření rušivého svorkového napětí šířeného vedením .....</i>	<i>78</i>
7.2.16	<i>Měření elektromagnetických polí.....</i>	<i>81</i>
<b>ZÁVĚR</b>	<b>.....</b>	<b>84</b>
<b>ZDROJE</b>	<b>.....</b>	<b>86</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	<b>.....</b>	<b>89</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b>	<b>.....</b>	<b>90</b>
<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>.....</b>	<b>92</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>.....</b>	<b>94</b>
<b>PŘÍLOHY</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

## Úvod

Jaderná energetika je neustále se rozvíjející elektroenergetický obor. S přibývajícím počtem uživatelů elektroniky a stále se zvyšujícím počtem technologií a zařízení využívající elektrickou energii roste i její spotřeba. Jeden z jejích stálých zdrojů jsou jaderné elektrárny, které získávají energii na základě štěpení atomových jader. Tento proces by byl bez patřičného řízení velmi nebezpečný. Pro správný, a hlavně bezpečný provoz jaderných elektráren je nutné mít bezpečný řídicí systém, který zajistí, aby reakce v jaderném reaktoru probíhaly dle představ osob zodpovědných za jejich průběh. Jak je již výše zmíněno, ve světě stále přibývá technologií a zařízení využívajících elektrickou energii, a tedy i zdrojů elektromagnetického záření.

Elektromagnetické záření může velmi snadno narušit správný chod zařízení, může dokonce kompletně vyřadit z provozu řídicí systém jaderného reaktoru, a narušit tak jeho bezpečný a plánovaný provoz. Porucha v jaderném reaktoru a následný únik radiace by velmi intenzivně ovlivnil životní prostředí v blízkém i dalekém okolí a způsobil mnohé ztráty na životech. Proto je řídicí systém jaderného reaktoru klasifikován jako bezpečnostní a musí splňovat podmínky jaderné bezpečnosti. K otestování elektromagnetické kompatibility řídicího systému slouží řada normovaných zkoušek, kterými se prověří odolnost systému vůči jednotlivým typům elektromagnetického rušení a změří, zda samotné zařízení není zdrojem rušení. Zkoušky jsou velmi přísné a řídicí systém musí vykazovat maximální odolnost – musí splnit funkční kritérium A. V praxi to znamená, že nesmí být narušena správnost funkce systému dle specifikace, a to jak při samotné zkoušce, tak po jejím ukončení.

Cílem práce je seznámit čtenáře s problematikou elektromagnetické kompatibility, navrhnout seznam zkoušek a měření ze sad norem ČSN EN 61000–4, ČSN EN 55011, ČSN EN 55016–2 a ty následně aplikovat na kvalifikační stend, reprezentující funkci řídicího systému jaderného reaktoru. V případě nedosažení funkčního kritéria A v některé z aplikovaných zkoušek, či při měření emisí, je cílem navrhnout patřičná opatření pro dosažení tohoto kritéria. Měření byla provedena ve zkušebních prostorách firmy ZAT a.s. ve spolupráci s firmou ABEGU a.s.

# 1 Elektromagnetická kompatibilita

Definice elektromagnetické kompatibility (dále jen EMC) by mohla být vysvětlena jako schopnost systému, přístroje nebo zařízení vykonávat správnou činnost v prostředí, kde působí další zdroje elektromagnetického záření (rušení) a to jak přírodní, tak umělé. Zároveň by však tento systém, přístroj nebo zařízení neměly nepřipustně ovlivňovat svým elektromagnetickým zářením (rušením) své okolí, tedy nerušit svým zářením okolní systémy, přístroje nebo zařízení. [25] [24]

## 1.1 Vznik EMC

Vznik EMC se datuje do šedesátých let 20. století ve USA. Název elektromagnetická kompatibilita vznikl z anglického „Electromagnetic Compatibility“, ze kterého následně vznikla mezinárodně uznávaná zkratka EMC. Tato zkratka vyjadřuje tzv. koexistenci (plnění současně správné funkce) systémů, zařízení nebo přístrojů, které se nachází ve společném prostředí, a to bez závažného vzájemného ovlivňování svých funkcí.

Z počátku byla tato technicko–vědecká disciplína středem zájmů jen úzkého okruhu odborníků, kteří pracovali ve vojenském a kosmickém prostředí. Prudký rozvoj elektrotechniky, zejména v oblasti mikroprocesorů a komunikace v následujících desetiletích, donutil lidstvo hlouběji pronikat do problematiky EMC, která se díky tomu široce rozvinula a stále se rozvíjí. Dnes je EMC věc každodenního života a dotýká se nás všech.

Kapitola byla vypracována na základě [25].

## 1.2 Důvody a důsledky EMC

Jak už bylo zmíněno, každý elektrický systém, přístroj nebo zařízení musí být odolný vůči elektromagnetickému záření a zároveň nesmí negativně ovlivňovat funkci systémů, přístrojů nebo zařízení v okolí. Nejdříve byla disciplína EMC zaměřována se spolehlivostí. Jelikož každý systém, přístroj nebo zařízení může být zároveň přijímačem i vysílačem

elektromagnetického rušení, je EMC pojem výrazně širší. Jeden ze zakladatelů EMC, jakožto technicko–vědeckého oboru, H. M. Schlicke v roce 1968 učinil prohlášení:

*„Systém sám o sobě může být dokonale spolehlivý – bude však prakticky bezcenný v provozu, pokud současně nebude elektromagneticky kompatibilní. Spolehlivost a elektromagnetická kompatibilita jsou neoddělitelné požadavky na systém, který má fungovat v každé době a za všech okolností.“* [H. M. Schlicke, 1968]

Elektromagnetické rušení je s rostoucím počtem elektrických zařízení čím dál tím silnější a jeho úroveň neúnosně stoupá. Dnes elektronická zařízení obsahují části, které pracují na různých kmitočtech od 0 Hz prakticky až do stovek GHz a výkonech v rozsahu mW až MW. Problém nastává u zařízení obsahujících přístroje, které mohou pracovat na velmi nízkých úrovních výkonu (až 14 W), jako například přijímače pracující na stejných, či odlišných kmitočtech, zesilovače a zejména mikroprocesorové obvody a zároveň přístroje pracující na mnohem vyšších úrovních výkonu, které se nachází ve stejném zařízení či v zařízení sousedícím. Maximální poměr výkonů zde může dosáhnout až 200 dB, tj.  $10^{20}$ , což velmi zvyšuje pravděpodobnost vzájemného elektromagnetického rušení.

V praxi, kde pracují tyto citlivé přístroje v blízkosti zařízení pracujících na vyšších výkonech, může snadno dojít díky rušení ke špatnému vyhodnocení informace, což má za důsledek nesprávný zásah systému či obsluhy, který může vést k selhání systému a v horším případě i k neúmyslnému ohrožení lidského zdraví, ne-li dokonce k úmrtí.

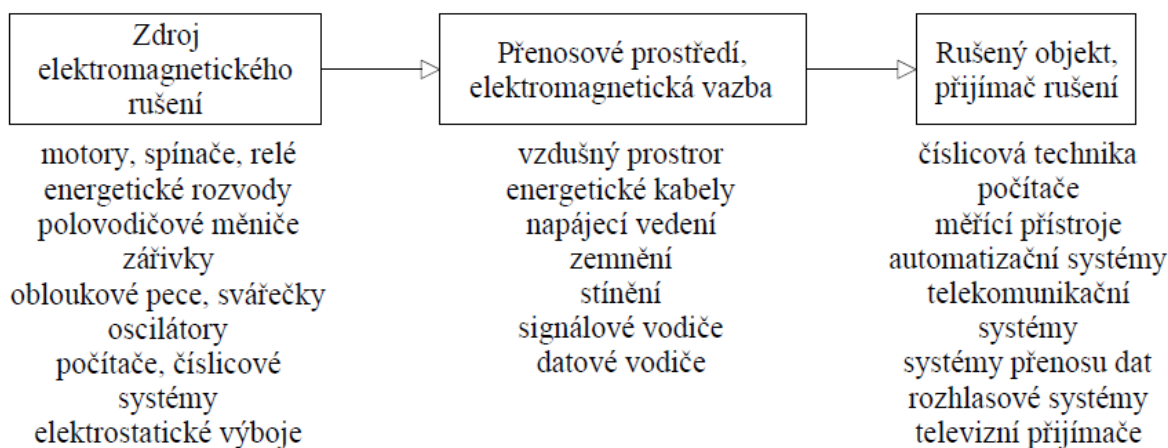
Jako příklad elektromagnetického rušení s katastrofálními následky může být považováno potopení britského křižníku Sheffield v roce 1982, který byl potopen argentinským letadlem během falklandské války. Příčina byla v nedodržení EMC mezi komunikačním zařízením lodi a rádiovým obranným protiletadlovým systémem. Rádiový obranný systém byl určen k rušení navigace nepřátelských raket. Tento systém způsoboval tak intenzivní rušení komunikačního zařízení lodi, že musel být při rádiovém spojení mezi lodí a velitelstvím ve Velké Británii odstaven, čehož nepřítel využil. Letadlo odpálilo raketu Exocet, která křižník potopila. Bylo zde zabito dvacet osob.

Kapitola byla vypracována na základě [25] a [20].

### **1.3 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů**

Disciplína okolo elektromagnetické kompatibility technických systémů se zabývá jejich vzájemným působením a možnostmi společného výskytu. Z původního oboru zabývajícího se pouze ochranou proti rušení příjmu radiových vln se obor elektromagnetické kompatibility

rozšířil na několik dílčích podoborů, které zkoumají jednotlivé dílčí problémy spojené s EMC. Při zkoumání dílčích problémů se vychází ze základního řetězce EMC, viz. obrázek 1, který zdůrazňuje systémový charakter elektromagnetické kompatibility. Vždy se vyšetřují všechny jeho složky.



Obr. 1– Základní řetězec EMC

Zdroj: vlastní zpracování dle [18].

Základní řetězec EMC se skládá ze tří hlavních oblastí. První z oblastí jsou zdroje elektromagnetického rušení, která zkoumá obecné mechanismy vzniku, intenzity a charakteru rušení. Tato oblast zahrnuje jak přirozené rušivé signály (Slunce, kosmos, atmosférické elektrické procesy apod.), tak umělé zdroje rušení. Umělé zdroje rušení lze chápat jako zdroje vytvořené člověkem, tedy nejrůznější technická zařízení, například sdělovací prostředky, systémy pro výrobu, přenos a distribuci elektřiny, elektrické motory, různé spotřebiče a podobně. Druhá oblast základního řetězce EMC je zaměřena na přenosové prostředí, kterým energie putuje od rušivých zařízení do rušených a vazbami mezi nimi. Poslední třetí oblast se zabývá problematikou přijímačů rušivých signálů, podrobnou specifikací rušivých signálů a jejich klasifikací. To je provedeno na základě analýz konstrukčních a technických parametrů.

Vzájemné působení systémů, či jejich částí, je mnohem složitější, než znázorňuje základní řetězec EMC. Každý systém či jeho jednotlivé části jsou jak zdrojem rušení, tak jeho přijímačem, a tudíž se téměř nikdy nejedná o působení jednoho zdroje a jednoho přijímače, ale o komplexnější řetězec. V praxi se pak postupuje zvolením jednoho systému za systém ovlivňující (zdroj rušení) a druhého systému jako systému ovlivňovaného (přijímač rušení). Pak se tento postup provede i v obráceném gardu.

Kapitola byla vypracována na základě [25] a [24].

## **1.4 Pojmy v elektromagnetické kompatibilitě**

**Elektromagnetická interference (EMI)** neboli elektromagnetické rušení, je signál generovaný zdrojem rušení, přenášený elektromagnetickou vazbou do rušených systémů (přijímačů rušení). EMI řeší problematiku příčin rušení a jejich odstraňování. Hlavním pozornost je zde věnována především identifikaci zdrojů rušení, měřením a popisem rušivých signálů a identifikaci parazitních přenosových cest.

**Elektromagnetická susceptibilita (EMS)** či imunita, odolnost, citlivost, je schopnost zařízení pracovat v bezporuchovém stavu v prostředí s elektromagnetickým rušením či ve stavu s přesně definovaným vlivem tohoto prostředí. EMS řeší technická opatření zvyšující odolnost proti elektromagnetickým rušivým signálům a problematiku odstraňování důsledků rušení, a to bez zásahu do zdroje rušení.

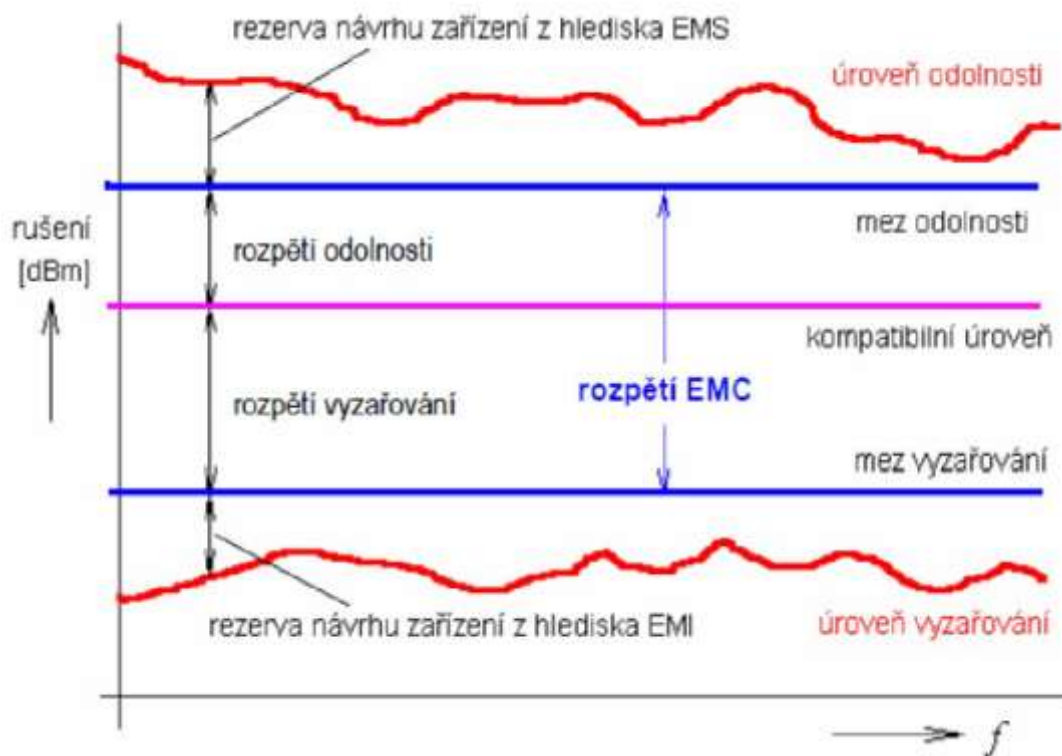
**Úroveň vyzařování** vyjadřuje rušení generované spotřebičem či zařízením. Měření probíhá dle předepsaného postupu a vyjadřuje se v jednotkách dBm. S úrovní vyzařování souvisí mez vyzařování, která vyjadřuje normou ČSN IEC 50 (161) povolenou maximální přípustnou úroveň vyzařování. Z hlediska EMI je pak rozdíl těchto úrovní vyjádřen jako rezerva návrhu zařízení.

**Úroveň odolnosti** vyjadřuje maximální úroveň rušení, která na konkrétním ovlivňovaném zařízení nezpůsobí zhoršení jeho provozu či funkce. Nižší požadovaná úroveň odolnosti je normou definována jako mez odolnosti. Z hlediska EMS je pak rozdíl těchto úrovní vyjádřen jako rezerva návrhu zařízení.

**Kompatibilní úrovně** jsou další pojem zavedený normou a vyjadřují maximální úrovně celkového rušení, při nichž je dosaženo ještě přijatelné pravděpodobnosti elektromagnetického záření.

Všechny tyto pojmy jsou definovány v normě ČSN IEC 50 (161). Jejich vzájemné vztahy jsou zobrazeny na obrázku 2.

Kapitola byla vypracována na základě [25] a [18].

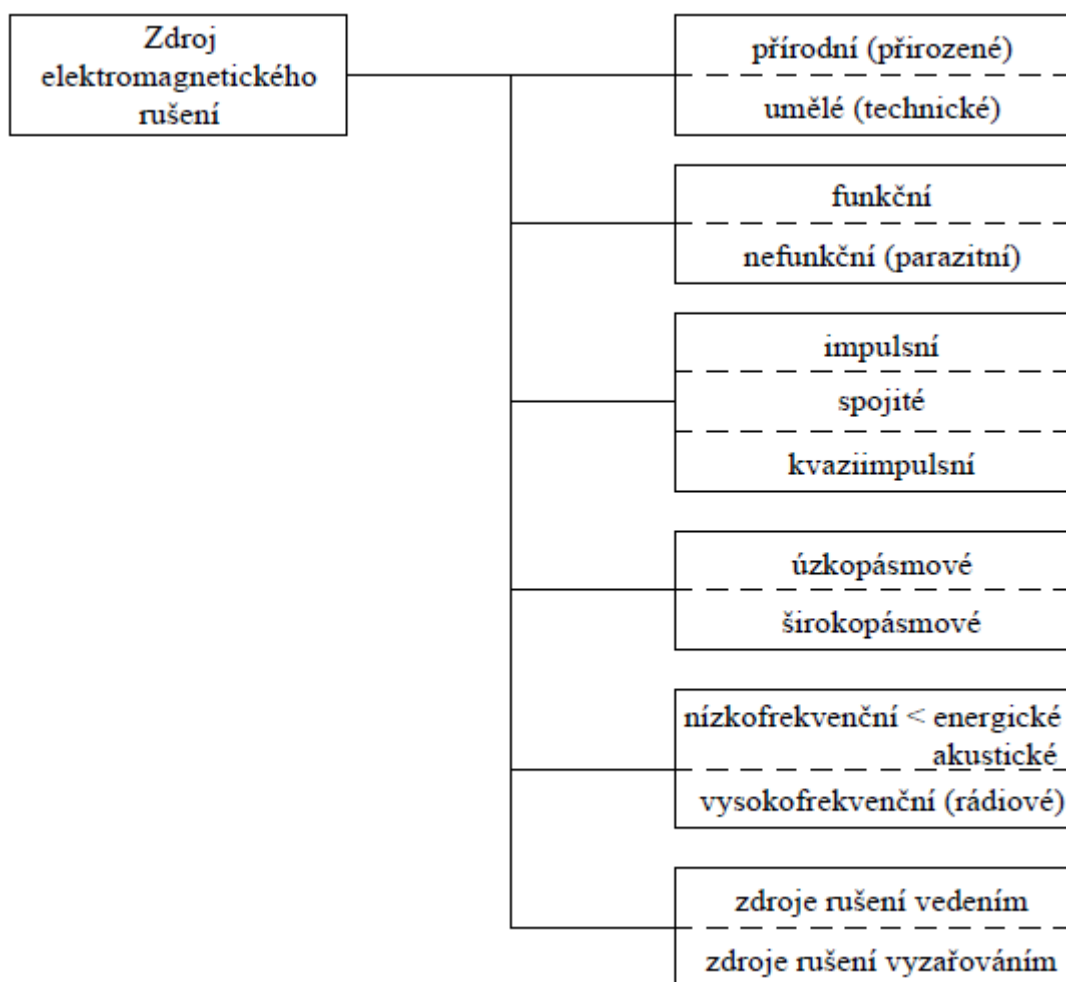


Obr. 2 – Definice úrovní a mezí vyzařování a odolnosti [18]



## 2 Rušivé signály a zdroje rušení

Pro elektromagnetickou kompatibilitu řídicího systému se zaměřujeme především na umělé zdroje elektromagnetického rušení – interferenční zdroje, tedy zdroje vytvořené lidskou činností. Tyto zdroje jsou součástí základní funkce jednoho systému a zároveň mohou ovlivňovat základní funkce systému druhého, tedy představují zdroj rušení pro druhý systém.



Obr. 3 – Klasifikace interferenčních signálů

Zdroj: vlastní zpracování dle [26].

Rušivé signály můžeme obecně rozdělit do třech skupin:

- **Šum** – značí se písmenem N (= noise), představuje změny projevující se svým účinkem na tvar napěťové křivky. Má především periodický charakter a typicky je generován rotačními motory a klasickými svářečkami.
- **Impulsy** – značí se písmenem S (= spikes), jsou to změny charakterizované velkým

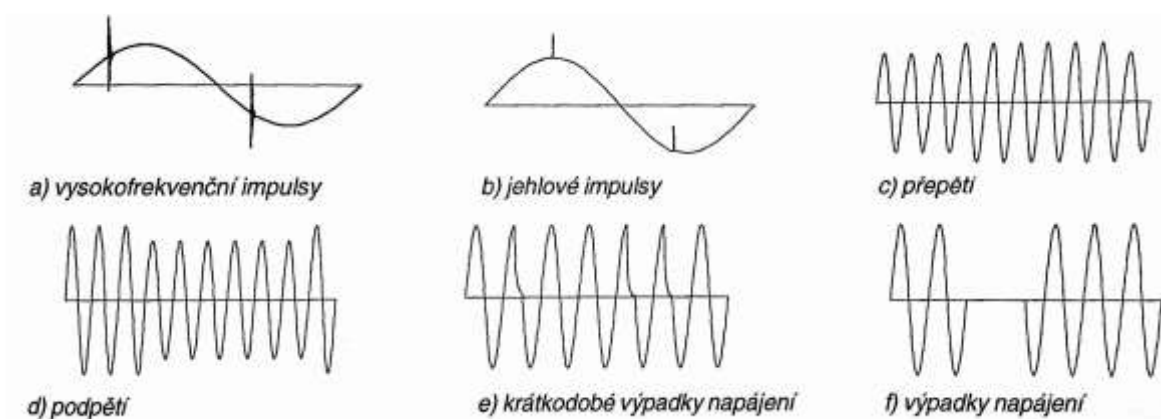
poměrem amplitudy k době trvání rušivého signálu. Impulsy jsou superponované na síťové napětí, jako kladné či záporné špičky. Nejčastěji jsou impulsy způsobeny spínacími obvody, kde jsou jejich zdroje zpravidla kontaktní spínací přístroje.

- **Přechodné jevy** – značí se písmenem T (= transients), jsou charakterizovány jako jednorázové náhodné děje, které se objevují především na obálce křivky napětí. Trvají v rámci od několika period síťového kmitočtu (20 ms) po jednotky sekund. Vyvolávají je náhlé změny zatížení v síti, především připojování/odpojování přístrojů velkých výkonů.
- **Trvalé (spojité) signály** – jedná se o rušivé signály působící nepřetržitě, nejedná se tedy o posloupnost oddělených jevů, jako u předchozích. Kombinace trvalých a impulsních rušivých signálů jsou kvazi-impulsní rušivé signály.

Kapitola byla vypracována na základě [24] a [26].

## 2.1 Průmyslové zdroje rušení

Největšími průmyslovými zdroji rušení jsou v současné době výkonové polovodičové měniče, spínací mechanismy (vypínače, odpojovače) a výkonová zařízení vn a nn, především generátory a transformátory. Problémem jsou zde periodické spojité rušivé signály – vyšší harmonické složky napájecí sítě 50 Hz. Ty jsou generovány často již při výrobě energie a výkonové polovodičové měniče dokáží generovat harmonické do kmitočtů 30 MHz. Vyšší harmonické vyvolávají na nelineárních impedancích sítě úbytky napětí, které se projevují jako rušivá napětí o amplitudách v řádech tisíce voltů. Různé typy deformací křivky napětí sítě, způsobených rušivými signály, jsou zobrazeny na obrázku 4. [26] [24]



Obr. 4 – Deformace křivky napětí sítě rušivými signály [24]

## **2.2 Zdroje přepětí**

V dnešní době, kdy jsou elektronická zařízení tvořena stovkami až tisíci součástek, klesá odolnost proti přepětí, a naopak poruchovost zařízení, způsobena přepětím, roste. Zdroje přepětí lze obecně rozdělit do dvou skupin – zdroje přírodní a zdroje umělé.

Přírodní zdroje přepětí lze v podstatě shrnout do jednoho slova – blesk. Při bleskovém výboji vzniká úzký elektromagnetický impuls (LEMP = Lightning Electromagnetic Pulse), který má silné rušivé, až destrukční účinky a ohrožuje tak elektrická zařízení do vzdáleností až několika kilometrů. Velikost vyrovnávacího proudu při blesku může dosahovat i 200 kA. I při nepřímém úderu blesku může být způsobena značná škoda, jelikož rázový napěťový impuls vytvořený bleskovým výbojem je do elektronických obvodů zařízení přenesen přes parazitní vazby.

Za umělé zdroje přepětí lze považovat všechna spínací zařízení. Velikost generovaného přepětí je závislá na spínaném výkonu – na velikosti spínaného proudu a napětí, kvalitě mechanických prvků spínacích zařízení, na rychlosti spínání a na impedančních poměrech v síti. Lokální elektrostatické výboje (ESD), které se také řadí mezi umělé zdroje přepětí, jsou v posledních letech čím dál více rozšířenější. Vznikají všude, kde vzniká tření. To znamená při pohybu mechanických částí, a to jak kovových, tak dielektrických nebo například u lidí při chůzi, kdy se o sebe tře oblečení. Energie těchto výbojů je velmi malá (<10 mJ), ačkoliv amplituda napětí dosahuje až 15 kV. ESD mají největší vliv na vysokoimpedanční integrační obvody s velmi nízkými pracovními proudy (CMOS obvody).

Kapitola byla vypracována na základě [26] a [24].

## **2.3 Zdroje kontinuálního rušení**

Kontinuální rušení lze vysvětlit jako rušení spojitého charakteru, trvající velmi dlouhou dobu. Může být úzkopásmové, čistě spojitého charakteru, nespojitě impulsní, nebo spojitě s velmi krátkými přerušeními. Zdroje tohoto rušení jsou nejčastěji vysílače televizního, satelitního či radarového signálu, taktovací signály elektronických systémů, mobilní telefony atp. Rušivé signály se šíří vyzařováním nebo jsou parazitně injektovány do kabelových a venkovních vedení. [26]

## 2.4 Zvláštní zdroje rušení

Nejznámějším zvláštním zdrojem rušení je NEMP – nukleární elektromagnetický impuls. Vzniká jako doprovodný jev při nukleárním výbuchu. Charakteristická je pro NEMP strmá náběžná hrana s dobou trvání v řádech  $\mu\text{s}$  a amplitudou proudu v řádech stovek kA. Následky jsou, oproti LEMP, mnohem silnější a je zde velmi pravděpodobná destrukce elektrických zařízení. Dosah tohoto impulsu je v řádech stovek kilometrů a závisí především na typu jaderné bomby a výšce výbuchu. V tabulce 1 je porovnání hlavních parametrů mezi nukleárním a bleskovým elektromagnetickým impulsem. [26] [24]

*Tab. 1 – Srovnání nukleárního a bleskového elektromagnetického impulsu*

	$E_{\text{MAX}}$ [kV/m]	$H_{\text{MAX}}$ [A/m]	náběžná hrana [ns]	kmitočtové spektrum [MHz]	dosah [km]
LEMP	10–100	100–1000	100–10000	0,001 – 0,005	jednotky
NEMP	30–100	100–1000	5–8	0,1 – 100	stovky až tisíce

Poznámky:

$E_{\text{MAX}}$  – maximální intenzita elektrického pole,

$H_{\text{MAX}}$  – maximální intenzita magnetického pole.

Zdroj: vlastní zpracování dle [26].

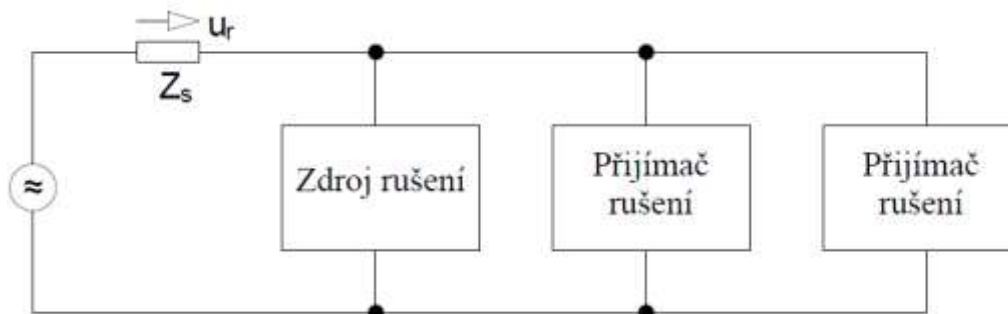
### 3 Elektromagnetické vazby

Řídicí systém jaderného reaktoru se skládá ze soustavy masivních, kovových, uzemněných rozvaděčů, které jsou mezi sebou propojeny krátkými spoji. Převládá zde tedy rušení vedením, které se mezi vodiči šíří třemi základními vazbami – galvanickou, indukční a kapacitní. [24]

#### 3.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba, jinými slovy vazba společnou impedancí, je vazba vznikající mezi dvěma či více systémy či jejich částmi, vytvořená společnou impedancí, která mezi nimi tvoří vazební člen s výraznou galvanickou složkou, tedy vodivostí. Tato společná impedance má většinou charakter RL sériového obvodu. Obecně tato vazba vzniká všude, kde prochází pracovní proudy z obou systémů stejným vedením. Vzniklý úbytek napětí vyvolaný průchodem proudu prvního ze systémů představuje rušivé napětí pro systém druhý. U sériového RL obvodu, tvořícího tuto vazbu, je při nízkých frekvencích rozhodující odporová složka společné impedance. U vysokých frekvencí je uplatňována především induktivní složka společné impedance. Galvanickou vazba je rozdělena do několika základních typů:

- Vazba společnou impedancí napájecí sítě, vzniká například díky vysokému přechodovému odporu nevhodného typu kontaktů spínače nebo konektoru, vazbou na společném vedení nebo na společném distribučním transformátoru, malou šířkou spoje na DPS.



Obr. 5 – Vazba společnou impedancí napájecí sítě

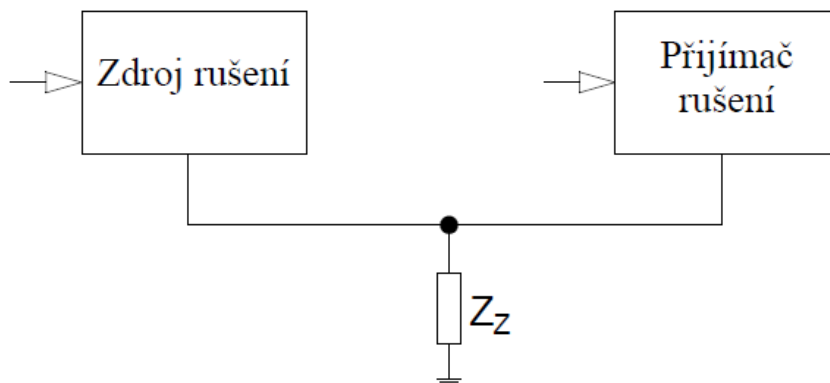
Poznámky:

$u_r$  – rušivá složka napětí zdroje rušení,

$Z_s$  – společná impedance sítě.

Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

- Vazba společnou impedancí zemnicího systému je velmi nebezpečná. Zemnicí systém je aktivní především při poruchových stavech systému. Vzniká na něm napětí, které je zemnicím systémem vedeno přes všechna připojená zařízení, čímž se rapidně zvyšuje pravděpodobnost rozšíření poruchy.



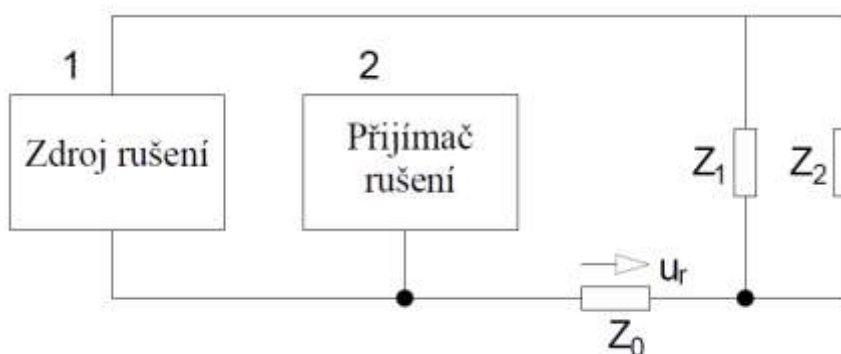
Obr. 6 – Vazba společnou impedancí zemnicího systému

Poznámky:

$Z_z$  – impedance společného zemnicího systému.

Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

- Vazba, velmi podobná vazbě společnou impedancí napájecí sítě, je vazba společnou impedancí zpětného vodiče. Rozdílem mezi těmito vazbami je fakt, že vazba je tvořena zpětným vodičem – je tvořena na jiné části vedení. Zpětný vodič je často využíván i jako ochranný vodič, což s sebou nese různé následky. V praxi je nutné oddělení zemnicí a zpětné smyčky, a to v závislosti na citlivosti zařízení – citlivější zařízení znamená pečlivější oddělení těchto smyček. Tato nutnost vychází ze skutečnosti, že zpětný vodič je velmi často považován jako vodič s referenčním nulovým potenciálem.



Obr. 7 – Vazba společnou impedancí zpětného vodiče

Poznámky:

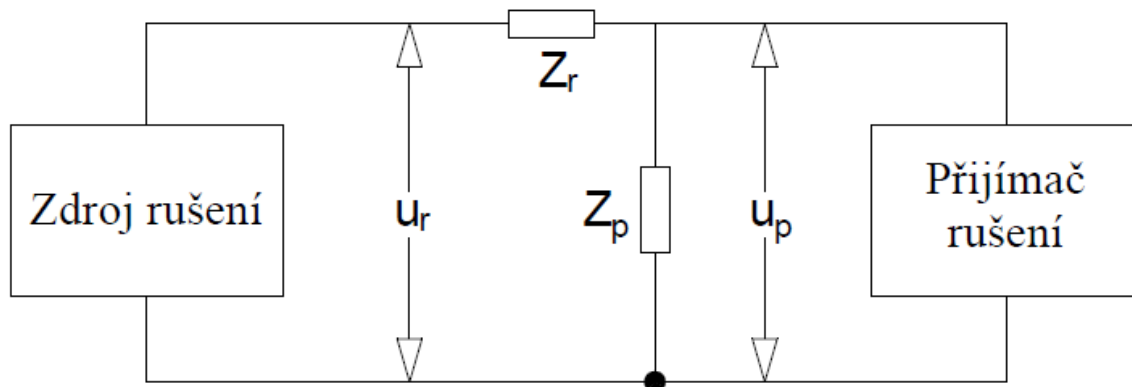
$Z_0$  – společná impedance zpětného vodiče,

$u_r$  – rušivá složka napětí zdroje rušení,

$Z_1, Z_2$  – impedance zátěže.

Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

- Vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení je uskutečňována v obvodech pro zpracování signálů, kde například rušení z distribuční sítě proniká do řídicích obvodů, snímačů, převodníků apod.



Obr. 8 – Vazba společnou impedancí mezi zdrojem a přijímačem rušení

Poznámky:

$u_r$  – rušivá složka napětí zdroje rušení,

$u_p$  – rušivé napětí, které se přivádí na přijímač rušení.

Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

Tyto základní typy galvanických vazeb lze minimalizovat následujícími opatřeními:

- dostatečně dimenzovaný společný zemnicí vodič,
- nevytvářet společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům,
- zařízení různých technologií napájet ze samostatných zdrojů,
- galvanicky oddělit výkonové a signálové obvody.

S galvanickou vazbou je úzce spojován pojem zemní smyčka, která je nejčastějším případem této vazby. Vzniká u systémů, kde jsou oba systémy uzemněny odděleně v různých bodech. Bludné zemní proudy průchodem mezi body uzemnění způsobují rušivé zemní napětí, které se uzavírá přes zemní smyčku a způsobuje rušení na vstupu spotřebiče. Zemní smyčku lze přerušit například oddělovacím transformátorem (galvanické rozpojení smyčky), feritovými kroužky (účinně zvyšují impedanci smyčky), vedením s útlumovým pláštěm (silně ztrátový materiál pláště absorbuje rušivé, elektromagnetické signály), optickým kabelem a podobně.

Kapitola byla vypracována na základě [24] a [26].

### 3.2 Indukční vazba

Základní princip indukční vazby se zakládá na principu elektromagnetické indukce mezi dvěma nebo více obvody. Principiálně se jedná o průchod proměnného či konstantního proudu v závislosti na čase, a to alespoň jedním z obvodů. Ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli se naindukuje napětí, které se zvyšuje se zvyšujícím se kmitočtem. Indukované rušivé napětí je dané Faradayovým indukčním zákonem

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -S * \frac{\Delta B}{\Delta t} = -\mu_0 * S * \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad (1) [26],$$

kde:

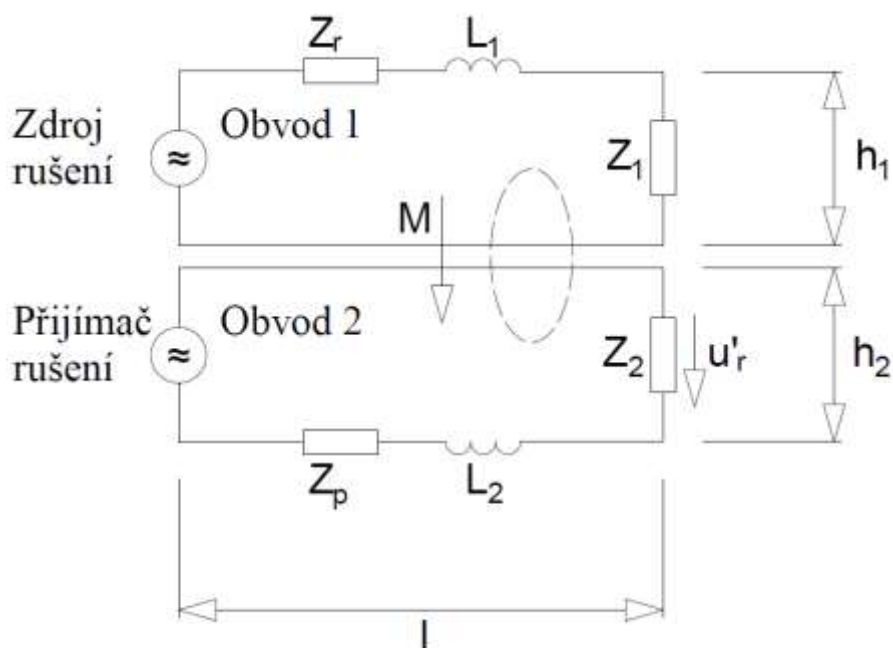
$$H = \frac{I}{2 * \pi * r} \quad (2) [26],$$

a výsledné indukované napětí je po dosazení:

$$U_i = -\frac{\mu_0 * S}{2 * \pi * r} * \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3) [26].$$

Za obecný příklad indukční parazitní vazby můžeme použít základ funkce principu transformátoru, viz. obrázek 9. Zde se ze zdroje rušení (Obvod 1) naindukuje rušivý signál do přijímače rušení (Obvod 2) a to díky časové změně proudu, nebo ustálenému střídavému rušivému proudu. Indukční vazba je závislá na mnoha faktorech, např. vzájemné konfiguraci, vzájemné indukčnosti obvodů, vzdálenosti mezi obvody, frekvenci rušivého proudu atd.





Obr. 9 – Indukční vazba

Poznámky:

$M$  – vzájemná indukčnost,

$L_1, L_2$  – indukčnosti vedení,

$Z_r, Z_p$  – impedance zdroje a přijímače rušení,

$Z_1, Z_2$  – impedance zátěže obvodů 1 a 2,

$d$  – vzdálenost mezi obvody,

$h_1, h_2$  – výška smyčky obvodů,

$l$  – délka obvodu,

$u'_r$  – rušivé napětí na zátěži obvodu 2, indukované obvodem 1.

Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

Největší nebezpečí představuje indukční vazba v případech, kdy dojde k velmi rychlé změně proudu o velké velikosti. Jedná se zejména o elektrostatické výboje, a to jak přírodní (blesky), kde je strmost proudového impulsu v rozsahu jednotek až stovek  $\text{kA}/\mu\text{s}$ , tak umělé lokální výboje (ESD), kde je strmost proudového impulsu v rozsahu jednotek až desítek  $\text{A}/\text{ns}$ . Díky těmto vysokým hodnotám dochází k indukovaní rušivého napětí o obrovských velikostech.

Indukční vazba vzniká především při souběžném vedení silových kabelů s datovými, řídicími, či signálovými kabely. Dále mezi stínícími pláště kabelů, uzemňovacími vodiči a konstrukčními mechanickými prvky, které mohou tvořit uzavřené pasivní obvody. Především je ale indukční vazba dominantní u nízkoimpedančních obvodů. Pro minimalizaci indukční vazby je nutné snížit délku souběhu výše zmíněných druhů kabelů, maximalizovat vzdálenost mezi obvody zdroje a přijímače rušení a snížit velikost obvodu proudové smyčky na straně přijímače rušení.

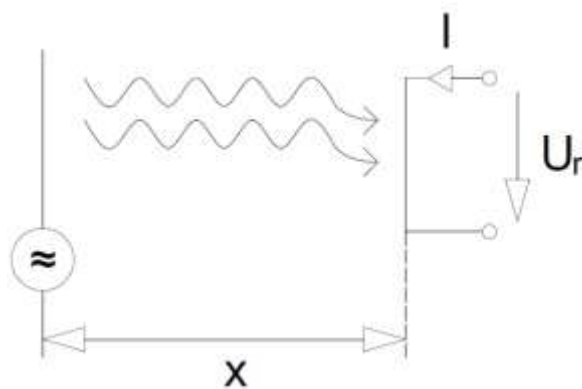
Kapitola byla vypracována na základě [24] a [26].

### **3.3 Kapacitní vazba**

Kapacitní vazba je vazba elektrickým polem mezi každými dvěma vodiči, či vodivými částmi s různým potenciálem. Je způsobena existencí parazitních kapacit mezi vodiči. Vzniká růstem impedancí obvodů, tedy se zvyšující se frekvencí a je dominantní vazbou u vysokoimpedančních obvodů, na rozdíl od vazby impedanční. Kapacitní vazba může vzniknout mezi vodiči, nebo vodičem a zemí. Její intenzita se logaritmicky zmenšuje se vzdáleností vodičů a s výškou vodiče nad zemí, naopak se zvětšuje s průměrem vodiče. Možnosti pro zmenšení vazby jsou obdobné jako u indukční vazby, a to vzdálením zdroje rušení od ostatních obvodů. Dále lze kapacitní vazbu omezit kroucením párů vodičů, snížením impedance obvodu, omezením rychlosti časových změn všech napětí v obvodu či vzájemným odstíněním vodičů. [24] [26]

### **3.4 Vazba vyzařováním elektromagnetickým polem**

Při velké vzdálenosti obvodů zdroje rušení a přijímače rušení, kdy je vyloučena vazba indukční i kapacitní, vzniká parazitní vazba vyzařováním elektromagnetického pole. Rušivý signál způsobený parazitní vazbou vyzařováním elektromagnetického pole se do přijímače rušení dostává pomocí antény nebo jejího svodu. Anténa zde nepředstavuje pouze přístroj určený k přijímání signálů, ale může se jednat o jakýkoliv nevyužitý vstup nebo konektor, které nejsou uzavřeny stínící krytkou. Působením elektromagnetické vlny se v obvodech rušeného zařízení indukuje rušivé napětí, které se sčítá s užitečným signálovým napětím. V horších případech je užitečné signálové napětí překryto naindukovaným rušivým napětím. Jako hlavní zdroje rušení touto vazbou jsou například blízké vysílače nebo atmosférická rušení, či různé průmyslové poruchy. Tato vazba je dominantní v pásmu krátkých a velmi krátkých vln. Výkon rušivého elektromagnetického pole se zmenšuje s intenzitou tohoto rušivého pole, délkou ovlivňovaného vedení, průměrem ovlivňovaného vodiče a s rostoucí vzdáleností mezi zdrojem a přijímačem rušení. Dále lze zařízení před tímto typem vazby chránit pomocí stínícího krytu či přepážky mezi zdrojem a přijímačem rušení, která sníží intenzitu rušivého elektromagnetického pole. [24] [26]



Obr. 10 – Vazba vyzařováním elektromagnetickým polem

Poznámky:

$E_x$  – Intenzita elektrického pole ve vzdálenosti  $x$  od zdroje,

$l$  – délka antény,

$U_r$  – rušivé napětí.

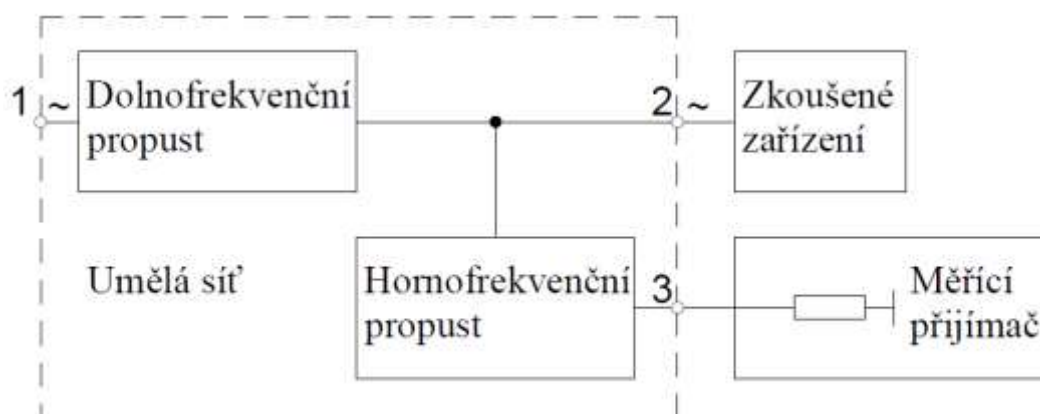
Zdroj: vlastní zpracování dle [26].

## 4 Měření rušivých signálů

Jedná se o velmi důležitou část problematiky elektromagnetické kompatibility. V praxi není zařízení s dokonalou elektromagnetickou kompatibilitou, a proto je nutné měřit a vyhodnocovat naměřené výsledky s předem stanovenými limity. Veškerá zařízení, pomocí kterých lze měření provádět, postupy, podmínky, za kterých lze měřit a metody jsou předepsány v mezinárodních a národních normách. Vhodný výběr způsobu měření, postupu a podmínek pro měření, závisí na způsobu šíření rušivého signálu. Jedná-li se o přenos rušivého signálu vedením, měří se především rušivé napětí, rušivý proud a případně i rušivý výkon. U přenosu rušivého signálu vazbou elektrickou, či elektromagnetickou, se měří rušivé elektrické pole a intenzita rušivého magnetického pole. Při přenosu vyzařováním se jako v případě přenosu elektrickou vazbou měří intenzita elektrického a magnetického pole, popřípadě se měří hustota vyzářeného výkonu rušivého signálu. [28]

### 4.1 Umělá síť

Umělá síť AMN (=Artificial Mains Network), často označována zkratkou LISN (=Line Impedance Stabilizing Network), je metoda používaná při měření rušivých signálů vystupujících ze zařízení napájecím vedením, kdy jsou tato zařízení napájena stejným vedením z rozvodné elektrické sítě 230/400 V. Blokové schéma umělé sítě je znázorněno na obrázku 11.



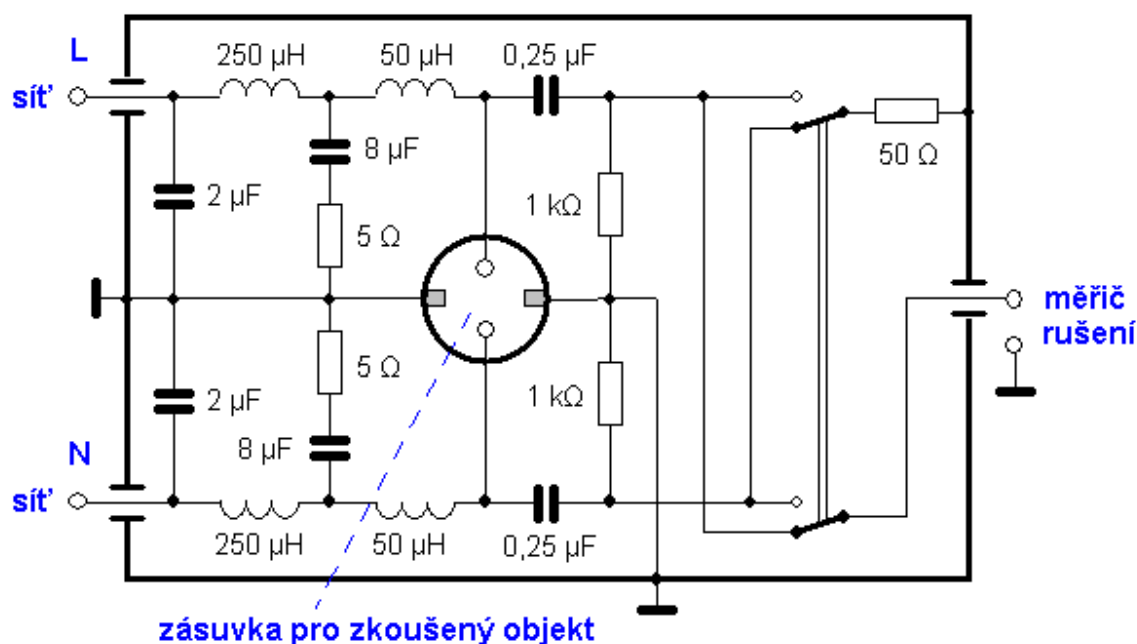
Obr. 11 – Blokové schéma umělé sítě

Poznámky:

- 1 – vstupní napěťové svorky pro napájecí síť,
  - 2 – výstupní síťové svorky pro zkoušené zařízení,
  - 3 – výstupní přístrojové svorky pro připojení měřicího přijímače.
- Zdroj: vlastní zpracování dle [24].

Plní tři funkce:

- Horní propust – zajišťuje připojení přijímače rušení ke zkoušenému objektu pro celý rozsah měřených kmitočtů. Je obvykle tvořena oddělovacím kondenzátorem s kapacitou stovek nF.
- Dolní propust (50 Hz) – zajišťuje, aby se do měřicího zařízení dostaly pouze rušivé signály ze zkoušeného objektu a aby měřicí zařízení nebylo ovlivňováno vnější napájecí sítí. Útlum rušivých signálů z vnější napájecí sítě musí být minimálně 30 dB, a to v celém kmitočtovém pásmu. Dolní propust tvoří obvykle LC článek.
- Impedance umělé sítě – zajišťuje impedanční přizpůsobení zkoušeného objektu ke vstupu měřicího zařízení. To znamená, že impedance umělé sítě, ze strany horní propusti, je přibližně stejná, jako vstupní impedance měřicího zařízení – obvykle 50 Ω, nebo 150 Ω, a to v celém využívaném pásmu.



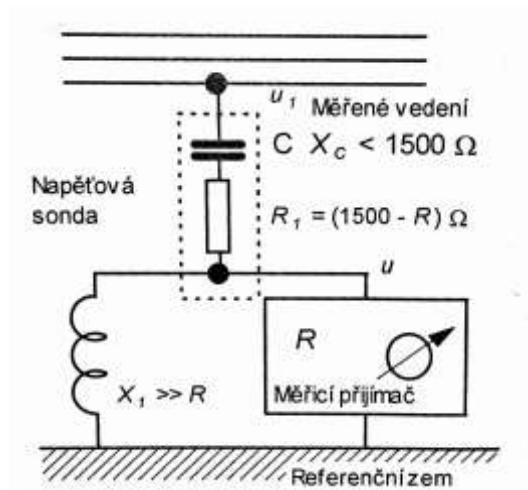
Obr. 12 – Zapojení jednofázové umělé sítě pro kmitočtové pásmo 10 kHz ÷ 30 MHz [28]

Při měření elektrických spotřebičů, které jsou při provozu drženy v lidských rukou, se k umělé síti často využívá doplněk zvaný standardní umělý operátor. Je to obvod tvořen sériovým zapojením rezistoru ( $510 \Omega \pm 10 \%$ ) a kondenzátoru ( $220 \text{ pF} \pm 20 \%$ ), který má za úkol simulovat vliv lidského doteku. V praxi je to provedeno ovinutím místa doteku kovovou fólií a spojením tohoto místa s referenční zemí, právě pomocí standardního umělého operátora.

Kapitola byla vypracována na základě [28] a [24].

## 4.2 Napět'ová sonda

Napět'ová sonda je principiálně pouze kapacitně vázaný napět'ový dělič. Na obrázku 13 je obecné schématické zapojení napět'ové sondy. Je složena z blokovacího kondenzátoru  $C$  a rezistoru  $R_1$ , který je tak velký, aby celková rezistence mezi referenční zemí a měřeným objektem nebyla menší, než  $1500 \Omega$ . Paralelně ke vstupu měřicího přístroje je připojena indukčnost o reaktanci  $X_1$ , která musí být podstatně větší, než vstupní impedance měřicího přístroje  $R$  ( $50 \Omega$ ). Takto navržená sonda se může použít při měření rušivého napětí do 250 VAC. V případě potřeby měření rušivého napětí na vyšší napět'ové hladině je sondu třeba dimenzovat pro připojení napětí v řádech kV, a to i z konstrukčního hlediska, aby byly splněny veškeré izolační vzdálenosti a pevnosti.



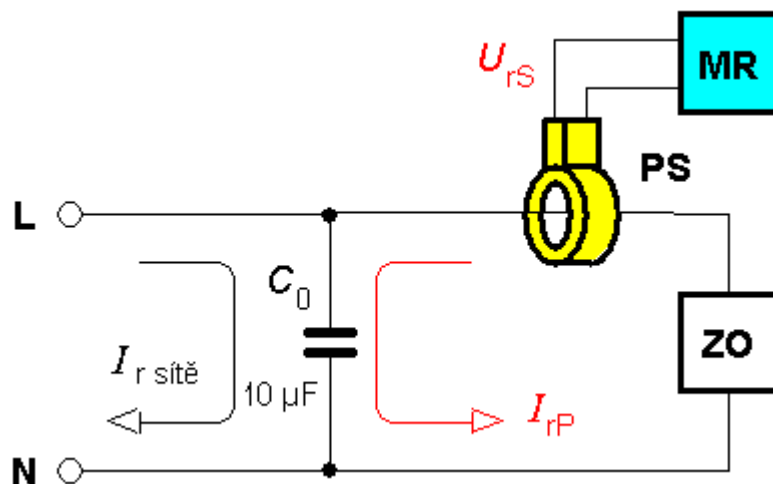
Obr. 13 – Obecné schématické zapojení napět'ové sondy [24]

Její využití je opodstatněné zejména v případech, kde se měří na jiných místech, než jsou napájecí svorky, tedy při měření na svorkách řídicích, svorkách zátěže, anténních svorkách apod. Další případ, kdy je vhodné použít měření napět'ovou sondou, je u obvodů s vysokou impedancí, a to díky její vysoké vstupní impedanci. Měření umělou sítí zde není vhodné z důvodu nízké impedance umělé sítě, která by nepřípustně zatěžovala měřený vysokoimpedanční obvod. Vedle pasivní RC napět'ové sondy existuje aktivní napět'ová sonda, která má na vstupu polem řízné FET tranzistory. Vyznačují se velmi širokým kmitočtovým pásmem a vysokým vstupním odporem.

Kapitola byla vypracována na základě [28] a [24].

### 4.3 Proudová sonda

Měření proudovou sondou se používá k měření rušivého proudu protékajícího vodičem. Konstrukce proudové sondy umožňuje měření bez přerušení měřeného vodiče. Při měření sonda obepíná vodič a funkčně odpovídá jednozávitovému vinutí proudového transformátoru, kde primární vinutí obepíná vodič a sekundární vinutí je vlastní proudová sonda. Na obrázku 14 je naznačené zapojení pro měření rušivého proudu.



Obr. 14 – Měření rušivého proudu proudovou sondou [28]

Poznámky:

- ZO – zkoušený objekt,
- MR – měřič rušení,
- PS – proudová sonda,
- $I_{rP}$  – primární rušivý proud,
- $U_{rS}$  – rušivé napětí proudové sondy,
- $C_0$  – zkratovací kondenzátor.

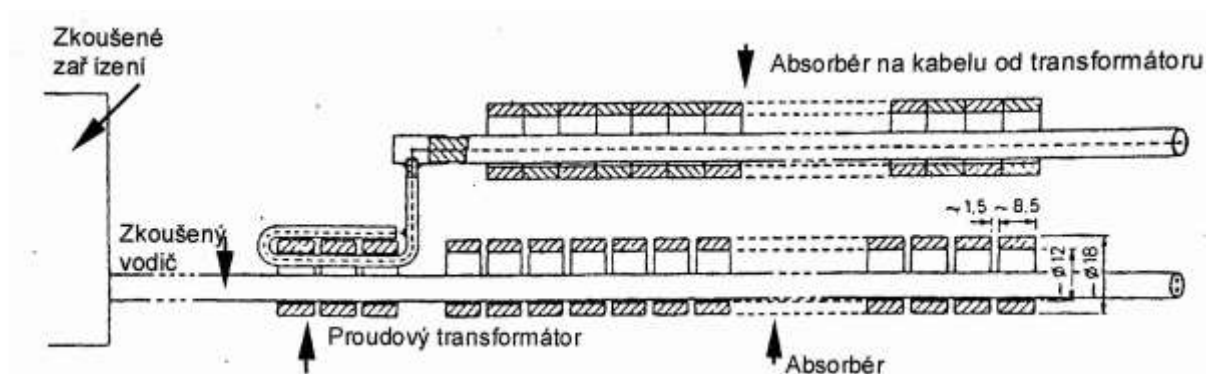
Princip je založen na převodu primárního rušivého proudu procházejícího měřeným vodičem na napětí, které je pak měřeno na výstupu vinutí sondy měřičem rušení. Zkratovací kondenzátor uzavírá vysokofrekvenční cestu měřeného rušivého proudu a chrání proudovou sondu před průnikem rušivých signálů z vnější napájecí sítě, tedy zabraňuje zkreslení měření. Hlavním parametrem proudové sondy je přenosová admitance  $Y_T$  vyjadřovaná obvykle v dBS, či  $\text{dB}/\Omega$  a její frekvenční závislost v pracovním kmitočtovém pásmu.

Kapitola byla vypracována na základě [28].

### 4.4 Absorpční kleště

Absorpční kleště se využívají při měření rušivého signálu vyzařovaného prostřednictvím síťových kabelových přívodů a vedení, a to v kmitočtovém pásmu 30–1000 MHz. Konstrukční provedení absorpčních kleští je znázorněno na obrázku 15. Skládají se

z širokopásmového vysokofrekvenčního proudového transformátoru (proudové smyčky), širokopásmového vysokofrekvenčního feritového absorbéru a sestavy feritových kroužků, které omezují vysokofrekvenční proud tekoucí na povrchu kabelu vedoucího do měřiče rušení. Kromě proudové sondy jsou kleště tvořeny 60 feritovými kroužky absorbujícími vysokofrekvenční rušivé signály, které se šíří napájecím vedením. Absorpční kleště mají vysokou přesnost a opakovatelnost výsledků. [28] [24]



Obr. 15 – Konstrukční provedení absorpčních kleští [24]

#### 4.5 Antény

Antény se využívají pro měření elektromagnetického pole, vyzařovaného vyšetřovaným zařízením do okolí. Používají se v širokém kmitočtovém spektru, od 10 kHz až do kmitočtů přesahujících 1 GHz. Měření pomocí antén začíná nabývat významu při velmi vysokých kmitočtech rušivého signálu, protože přímé měření rušivých signálů o těchto kmitočtech je téměř nemožné. Pro měření se využívá několik typů antén, které jsou dodávány jako příslušenství k měřicím přístrojům. Výběr antény závisí na druhu měření (v blízkém či vzdáleném poli), na polaritě pole a vlastnostech samotné antény, měřeného signálu a elektromagnetického pole. U vlastností antén je brán zřetel na jejich zesílení (zisk), vyzařovací diagram a geometrické rozměry. Z vlastností měřeného signálu ovlivňují výběr antény jeho šířka pásma, kmitočet a velikost.

Druhy antén:

- Rámová anténa – měří intenzitu magnetického pole H a využívá se v nejnižším kmitočtovém pásmu 9 kHz – 150 kHz, kde je majoritní podíl rušivých jevů způsoben magnetickým polem. Maximální rozměry antény jsou 60 x 60 cm.
- Prutová anténa (monopól) – měří intenzitu elektrického pole E a využívá se v kmitočtovém pásmu 150 kHz – 30 MHz, kde má vyrovnané zesílení. Při měření



v blízkém poli je měření nepřesné – neuplatňuje se zde pouze vazba vysokofrekvenčním polem, ale i kapacitní vazba. Maximální délka antény je 1 m.

- Symetrický dipól – měří intenzitu elektrického pole E a využívá se ve stejném kmitočtovém pásmu, jako prutové antény. Používá se pro přesné učení intenzity elektrického pole E při blízkém měření a umožňuje určit i směr jeho šíření.
- Bikónická anténa – měří intenzitu elektrického pole E a využívá se v kmitočtovém pásmu 20–300MHz. Má složitou konstrukci a dá se říci, že je to druh širokého zkráceného dipólu.
- Logaritmicko-periodická anténa – měří intenzitu elektrického pole E a využívá se v kmitočtovém pásmu 200 MHz – 3GHz. Její výhodou je v praxi téměř konstantní tvar vyzařovacího diagramu a hodnota výstupní impedance v celém pracovním pásmu. Je složena z rezonančních unipólů.
- Trychtýřová anténa – měří intenzitu jak elektrického pole E, tak magnetického pole H a využívá se pro měření v pásmech jednotek až desítek GHz. Je relativně úzkopásmová – pro jednotlivé dílčí kmitočty je nutné použít sadu antén, která pokryje požadované pásmo.

Kapitola byla vypracována na základě [28], [18], [24] a [20].

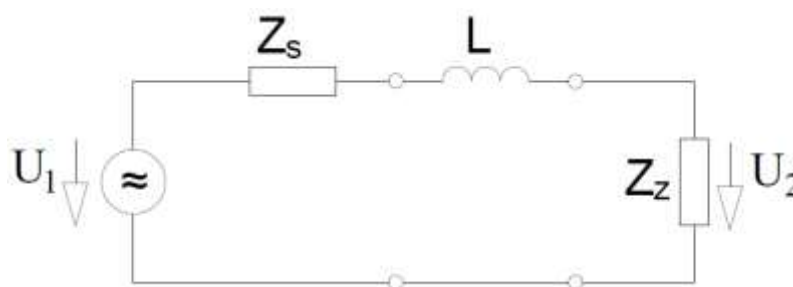
## 5 Způsoby ochrany před rušením

### 5.1 Filtrace rušení

Pro filtrování rušivého signálu se užívají odrušovací prostředky, tedy zařízení, která eliminují úroveň generovaného elektromagnetického rušení zdroji rušení a zároveň zvyšují odolnost zařízení proti rušení. Při výběru odrušovacího prostředku musí být brán zřetel na typ šíření rušení, zda se jedná o šíření po vedení, či šíření vyzařováním. Nevhodná aplikace odrušovacích prostředků může úroveň rušení zvýšit, v horších případech může narušit i funkci zařízení, či ho trvale vyřadit z provozu. [27]

#### 5.1.1 Odrušovací tlumivky

Jedná se o nejdražší a nejobjemnější pasivní prvky užívané v odrušovací technice. Lze je použít samostatně, nebo jako součást filtrů. Jelikož vyrobit ideální tlumivku, tedy čistou indukčnost, je nereálné, je návrh takovéto tlumivky velmi komplexní záležitost. Základním parametrem je vložný útlum vyjadřovaný v dB, který vyjadřuje logaritmický poměr výkonu dodaného do zařízení před vložením filtru a výkonu dodaného po vložení filtru. Zapojují se sériově s vnitřní impedancí sítě a vstupní impedancí chráněného přístroje.



Obr. 16 – Zapojení odrušovací tlumivka

Poznámky:

$U_1$  – síťové napětí,

$Z_s$  – impedance sítě,

$L$  – odrušovací tlumivka,

$Z_z$  – impedance chráněného přístroje,

$U_2$  – napětí zátěže.

Zdroj: vlastní zpracování dle [27].

Tlumivka je tvořena cívkou s magnetickým, či nemagnetickým jádrem. Jelikož se nejedná o dokonalou indukčnost, vykazuje tlumivka ztrátový odpor vinutí a parazitní kapacity. Reálná tlumivka se pak pro určité frekvence chová jako rezonanční obvod, který má nad rezonančním kmitočtem kapacitní charakter a při vysokých kmitočtech je odrušovací

efekt snižován. Objemnost tlumivky je určována především procházejícím pracovním proudem. Ideální tlumivka by měla splňovat následující:

- maximální indukčnost při co nejmenších rozměrech, hmotnosti, ceně a co nejmenším počtu závitů,
- co nejvyšší rezonanční frekvence, tedy co nejmenší parazitní kapacita,
- maximální činné ztráty pro oblast síťových kmitočtů (50–400 Hz),
- u tlumivek s feromagnetickým jádrem nesmí docházet k přesycení při průchodu pracovního proudu.

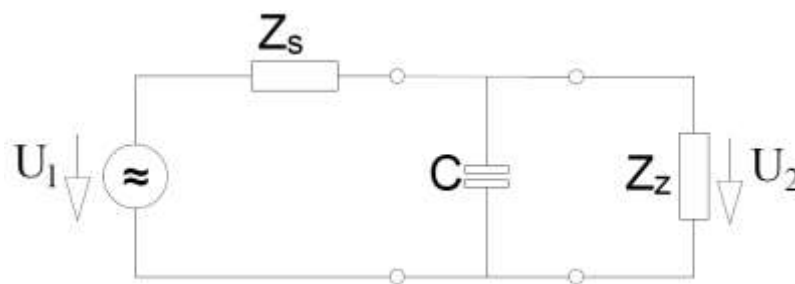
Z funkčního hlediska lze rozdělit odrušovací tlumivky do dvou skupin:

- Tlumivky pro potlačení symetrické složky rušení – zapojují se podélně do proudových vodičů a pracovní proud zde protéká ve směru rušivého proudu. Konstrukčně se neliší od tlumivek užívaných v ostatních oborech vysokofrekvenční elektrotechniky.
- Tlumivky pro potlačení nesymetrické složky rušení – fázový a zpětný vodič jsou navinuty na společném jádru ve stejném smyslu. To zajistí, že magnetické toky pracovního proudu a protifázového rušivého proudu mají opačný směr a vzájemně se vyruší. Výsledná indukčnost je pak pro pracovní proud téměř nulová. Konstrukce těchto tlumivek je specifická pouze pro odrušovací techniku.

Kapitola byla vypracována na základě [27].

### **5.1.2 Odrušovací kondenzátory**

V odrušovací technice se využívají samostatně, nebo jako součást kondenzátorových, LC, či RC filtrů. Jejich funkce spočívá v potlačení vyzařování elektromagnetického rušení při provozu elektrických zařízení, kde jsou impedance sítě a vnitřní impedance zdroje rušení velmi vysoké. Základním parametrem je zde také vložný útlum. Zapojují se paralelně k vnitřní impedanci sítě a vstupní impedanci chráněného přístroje.



Obr. 17 – Zapojení odrušovacího kondenzátoru

Poznámky:

$U_1$  – síťové napětí,

$Z_s$  – impedance sítě,

$L$  – odrušovací tlumivka,

$Z_z$  – impedance chráněného přístroje,

$U_2$  – napětí zátěže.

Zdroj: vlastní zpracování dle [27].

Princip odrušovacího kondenzátoru je založen na jeho základní vlastnosti, a to že s rostoucí frekvencí protékajícího proudu klesá jeho impedance. Při frekvenci blízké se k nekonečnu je pak impedance rovna nule a kondenzátor se chová jako zkrat. V praxi má každý kondenzátor, kromě kapacity, také parazitní indukčnost přívodů a ztrátový odpor. V oblasti nízkých kmitočtů jsou zanedbatelné, avšak při vysokých frekvencích, kdy se impedance odrušovacího kondenzátoru blíží k nule, mohou výrazně ovlivňovat jeho funkci. Další nežádoucí vliv má parazitní indukčnost spolu s vlastní kapacitou kondenzátoru, kdy tvoří rezonanční obvod, jako u odrušovacích tlumivek. Zde je naopak charakter rezonančního obvodu nad rezonančním kmitočtem induktivní a vložený útlum s rostoucím kmitočtem klesá.

Kapacita odrušovacích kondenzátorů se volí v závislosti na kmitočtovém spektru rušivého signálu. Čím nižší kmitočet chceme potlačovat, tím větší kapacitu musíme zvolit.

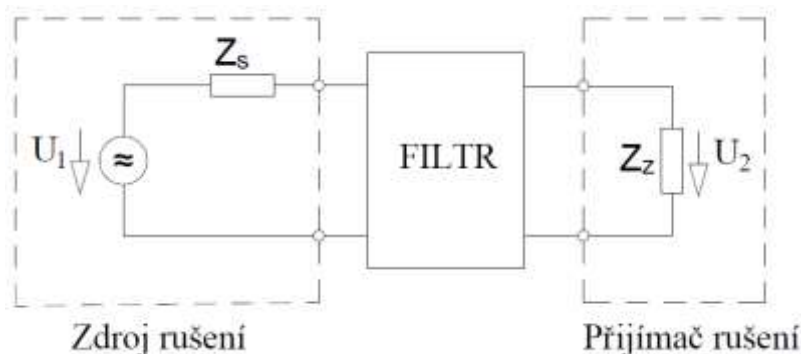
Z bezpečnostního hlediska je velmi důležité věnovat dostatek pozornosti také elektrické pevnosti, jelikož odrušovací kondenzátory v podstatě zkratují rušivé signály. Dělí se dle třídy bezpečnosti:

- Třída X – používají se u zařízení, kde není hodnota svodového proudu omezena a v prostředí, kdy průraz nemůže ohrozit lidský život.
- Třída Y – používají se všude, kde je normami omezena přípustná hodnota svodového proudu. Zapojují se mezi fázový a ochranný vodič, či mezi fázový vodič a uzemněný kryt přístroje.

Kapitola byla vypracována na základě [27] a [24].

### 5.1.3 Odrušovací vysokofrekvenční filtry

Obecně může být filtr definován jako dvojbran, který propouští signály v definovaném spektru kmitočtů s minimálním potlačením, naopak mimo definované spektrum signály nepropouští, tedy maximálně potlačuje. Ideální filtr by měl mít v propustném kmitočtovém pásmu nulový útlum a v nepropustném pásmu kmitočtů útlum nekonečně velký. Prakticky je tento stav nemožný a jsou definovány hranice v obou pásmech, které nesmí být překročeny. V současné době je v praxi nejčastější odrušovací filtr, který je zapojený do napájecí sítě, či do napájecího vstupu přístroje. [27]



Obr. 18 – Principiální zapojení filtru mezi zdroj a přijímač rušení

Zdroj: vlastní zpracování dle [27].

## 5.2 Omezování přepětí

Přepět'ové ochrany ochraňují zařízení před přepětími vzniklými v důsledku přechodových dějů, vyvolaných atmosférickými poruchami, elektrostatickými výboji, spínání především induktivní zátěže, či přepětím vzniklým při nukleárním elektromagnetickém impulsu. V praxi se využívají omezovací členy – přepět'ové ochrany.

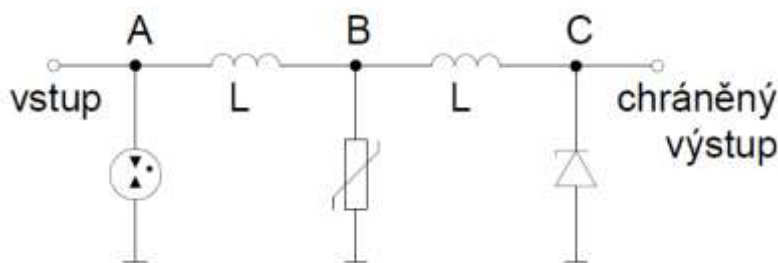
Dělí se na:

- Hrubé přepět'ové ochrany – jiskřiště a plynem plněné bleskojistky, chrání proti přepětím řádově od 1 kV do několika MV. Principem je rapidní snížení izolačního odporu, ke kterému dochází pokud nebezpečné přepětí přesáhne hodnotu zápalného napětí.
- Jemné přepět'ové ochrany – varistory, Zenerovy diody, transily, RC členy, supresorové diody a jejich kombinace, chrání před napětím v rozmezí jednotek V až jednotek kV. Principem je omezení nebezpečného přepětí na určitou hodnotu, a to nezávisle na protékajícím proudu.

Při výběru či projekci přepětových ochranných zařízení je třeba brát zřetel, zda přepětová ochrana chrání zařízení jako celek před vnějšími přepětími, či přepětová ochrana chrání určitou součástku nebo obvod před přepětími vzniklými uvnitř přístroje.

Na přepětové ochrany jsou kladeny vysoké nároky. Propustný proud a výkonové zatížení by měly být co nejvyšší, zároveň by měla být rychlost reakce přepětové ochrany maximální. Takové požadavky jsou si protichůdné z fyzikálních důvodů, a tudíž v praxi jsou používány kombinované ochrany. Ty jsou utvořeny kaskádním zapojením několika typů ochranných zařízení, viz. obrázek 19. Toto zapojení je tvořeno hrubou přepětovou ochranou – plynem plněnoubleskojistkou a kaskádou jemné přepětové ochrany – varistorem a supresorovou Zenerovou diodou.

Kapitola byla vypracována na základě [27].



Obr. 19 – Kombinovaná přepětová ochrana

Poznámky:

A – plynem plněnábleskojistka,

B – varistor,

C – supresorová Zenerova dioda.

Zdroj: vlastní zpracování dle [27].

### 5.3 Stínění

Stínění je základní a zároveň jeden z nejdůležitějších pasivních odrušovacích prostředků používaných pro zamezení či omezení interferenčního jevu v elektrických zařízeních. Ve své podstatě stínění zeslabuje tok energie, buď zesílením elektromagnetické odolnosti u přijímačů rušení nebo zeslabením interference na straně zdrojů rušení. Základním stínícím prvkem je celková mechanická konstrukce. Při návrhu mechanického krytí, tedy volbě materiálu, tvaru a technologie, je nutné brát v potaz nejen stínění proti průniku a vyzařování elektromagnetického pole, ale také odolnost vůči vnějším klimatickým a seismickým jevům. V praxi je často zvyšováním odolnosti vůči jednomu vlivu snižována odolnost vůči jevům jiným a musí se volit kompromis.

Elektromagnetické stínění lze charakterizovat koeficientem stínění  $K_S$ . Je definován jako poměr intenzity elektrického pole  $E_t$  v určitém bodě stíněného prostoru a intenzity

elektrického pole  $E_i$  ve stejném bodě, ale bez stínící stěny. Koeficient stínění lze určit také z intenzit magnetického pole  $H$ , viz. rovnice 4.

$$K_S = \frac{E_t}{E_i} = \frac{H_t}{H_i} \quad (4) [27]$$

Koeficient stínění v logaritmické míře je nazýván efektivnost neboli účinnost stínění  $SE$ , udávaná v dB.

$$SE = 20 * \log * \left| \frac{E_t}{E_i} \right| = 20 * \log * \left| \frac{H_t}{H_i} \right| [dB] \quad (5) [27]$$

Nejrozšířenějšími materiály používanými pro stínění elektromagnetického rušení jsou kovy. Moderním trendem je používání vodivých polymerů, které se zatím nestačily rozšířit.

Kapitola byla vypracována na základě [28], [24] a [18].

## 5.4 Zemnění

Zemnění je propojení elektrických zařízení, či jeho částí se zemí. Může být dočasné, trvalé nebo úmyslné a hlavními důvody uzemnění jsou zejména provozního a ochranného charakteru. Obecně je zemnění dále rozděleno dle kmitočtového pásma, pro které je vytvářeno, a to na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční zemnění. [24]

### 5.4.1 Nízkofrekvenční zemnění

Nízkofrekvenční zemnění se obvykle vztahuje k výkonovým zařízením střídavého proudu napěťové soustavy 3 x 230/400 V o síťové frekvenci 50 Hz. Tento typ zemnění lze rozdělit do dvou skupin.

- Pracovní uzemnění – zřizuje se na ustálení napětí proti zemi, ochranu před vniknutím napětí u sítí nad 1000 V do sítí s napětím pod 1000 V a na ochranu před atmosférickým přepětím.
- Ochranné uzemnění – zabezpečuje všechny neživé kovové části strojů, přístrojů, kabelů, průchodek. Jedná se o všechny části, které ačkoliv proud za normálního stavu nevedou, při poruchovém stavu se na nich může objevit nebezpečné napětí.

Účinnost nízkofrekvenčního zemnění je posuzována hodnotou přechodového odporu mezi zemí a zemničem, tzv. zemní odpor. Čím je menší, tím větší je účinnost zemnění. Využívají se strojené i náhodné zemniče. Mezi nejehospodárnější strojené zemniče se řadí kovové pásky, trubky, desky apod. Náhodné zemniče, například konstrukce budov, či uzemněné kovové pláště kabelů se mohou používat pouze jako pomocné zemniče.

Technologie užitá pro nízkofrekvenční zemnění musí zabezpečovat stálost a životnost. To znamená, že korozní a jiné vlivy prostředí nesmí ovlivnit parametry zemnění. To lze dosáhnout vhodnou kombinací spojovacích materiálů. Kmitočtově závislé složky impedance se při nízkých frekvencích u nízkofrekvenčního zemnění mohou zanedbat, rozhodující vliv má rezistence.

Kapitola byla vypracována na základě [24], [27] a [18].

#### **5.4.2 Vysokofrekvenční zemnění**

Obecně z fyzikálního hlediska vyplývá, že zemnicí plocha musí mít velkou kapacitu a velmi malé indukčnosti připojovacích částí. Kapacita musí být tak velká, aby byla schopna absorbovat všechny signály, a to bez ztráty schopnosti další absorpce. Mechanická konstrukce zemnicí plochy musí být udělána z nízkoimpedančního materiálu s dostatečnými rozměry ve všech směrech. Kapacita zemnicí plochy by měla představovat, oproti skutečné ekvipotenciální zemi, co největší funkční kapacitu. Pro zemnění se používají tři způsoby:

- systém s plovoucí zemí,
- jednobodový zemnicí systém (jednotlivé body jsou spojeny s jedním bodem, který je uzemněn),
- mnohabodový zemnicí systém (každý obvod je uzemněn zvlášť).

Kapitola byla vypracována na základě [24].



## 6 Vlastnosti řídicího systému

### 6.1 Princip řízení reaktoru JE

Jaderný reaktor obsahuje palivové kazety a regulační tyče rozdělené do skupin. Každá z palivových kazet je přizpůsobena pro zasouvání regulační tyče, která má prstencový tvar. Samotné absorpční elementy jsou z nerezové oceli. Výkon reaktoru je řízen regulačními tyčemi, kde je účinnou složkou absorbující volné neutrony většinou bór ve formě legované oceli a chemickou reakcí, kdy je reaktivita řízena kyselinou boritou obsaženou v chladiivu.

Samotné řízení reakce jaderného reaktoru se provádí pohybem regulačních tyčí v aktivní zóně. Pohyb tyčí – zasouvání, vysouvání, či zastavení v určité poloze, je zajištěn pomocí krokových motorů. Ty jsou řízeny buď manuálně operátorem, nebo automaticky řídicím systémem.

Regulační tyče lze organizačně rozdělit na bezpečnostní a řídicí. Řídicí tyče zajišťují okamžité změny výkonu reaktoru způsobené jinými faktory. Řídicí systém reaguje na jakoukoliv změnu výkonu a podle okamžité potřeby jsou tyče do aktivní zóny zasouvány (snižování výkonu), nebo vysouvány (zvyšování výkonu). Bezpečnostní tyče jsou za normálního stavu mimo aktivní zónu a slouží k okamžitému zastavení štěpné reakce v případech, kdy výkon reaktoru neplánovaně a významně přesáhne mezní hodnoty.

V případě havárie způsobí havarijní ochrana jaderného reaktoru, která přeruší napájení pohonů, regulační tyče spadnou za působení gravitační síly do dolní koncové polohy a dojde k okamžitému zastavení štěpné reakce a odstavení reaktoru.

Kapitola byla vypracována na základě [21].

### 6.2 Charakteristika řídicího systému EXMAB

EXMAB je řídicí systém experimentálního PWR reaktoru o výkonu 50 MWt, jehož výkon je řízen polohou regulačních tyčí. Je umístěn v laboratoři pro výrobu „jaderné“ elektřiny LABGENE, v technologickém centru v São Paulu v Brazílii. Tento systém řídí zařízení ovládající aktivační mechanismus regulačních tyčí – MAB. Princip řídicího systému EXMAB je realizován posíláním elektrických signálů do MAB na základě informací o výkonu reaktoru z příslušného nadřazeného systému. MAB se skládá z krokového pohonu a aktivačního mechanismu tyčí, který je spojen s regulačními tyčemi reaktoru.

Jádro reaktoru laboratoře LABGENE tvoří 21 palivových sad a sad regulačních tyčí, které jsou organizačně rozděleny na řídicí a bezpečnostní tyče. Každá regulační tyč má pak vlastní MAB se sledováním polohy tyče. MAB slouží k pohybu regulačních tyčí v aktivní zóně, nebo k udržení těchto tyčí v jakékoliv poloze v rozsahu aktivní zóny reaktoru, to vše pro bezpečné řízení výkonu reaktoru. Systém musí přijímat povely o zasouvání, vysouvání, či zastavování tyčí a na jejich základě generovat signály potřebné pro aktivaci pohonu podle nutnosti změny polohy u každé z 21 tyčí. Dále musí systém obsahovat čítač kroků motoru, které jsou počítány na základě pohybu tyčí.

Kapitola byla vypracována na základě [21] a [19].

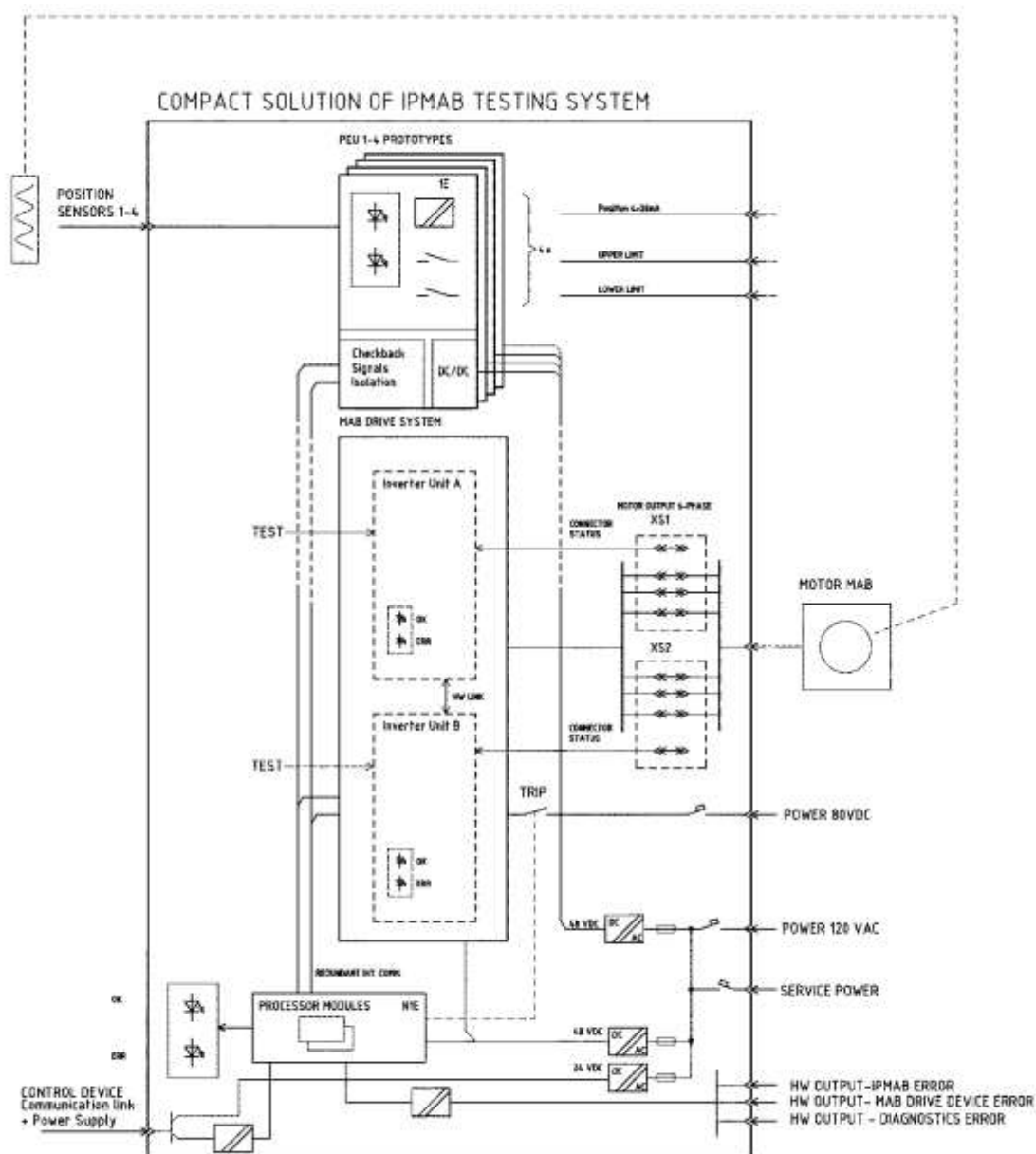
### **6.3 Kvalifikační stand**

Ověření elektromagnetické kompatibility celého systému by bylo velmi náročné a riskantní. Z toho důvodu se vytváří kvalifikační stand (dále jen KS), viz. příloha A. Je to typový rozvaděč obsahující prvky, které jsou vyhodnoceny jako kritické z hlediska funkčnosti systému. Vytvořením KS je finální zařízení ušetřeno náročným kvalifikačním testům, které by mohly snížit celkovou spolehlivost a životnost finálního zařízení. Dalším důvodem vytvoření KS je možné odstoupení zákazníka od smlouvy při případném nevyhovění stanoveným požadavkům.

Kvalifikační stand pro systém EXMAB představuje kompaktní řešení celého řídicího systému, vhodné pro provedení kvalifikačních zkoušek. Skládá se z prvků zajišťujících napájení, prvků ovládajících elektromagnetické pohony, platformy Sandra Z100 a přenosného ovládacího zařízení (HMI). Tyto prvky tvoří dva subsystémy – IPMAB a MAB. Kvalifikační stand zajišťuje funkce:

- napájení systému,
- ověřování funkčnosti elektronického subsystému pro vyhodnocování polohy a diagnostiku samotného snímače polohy,
- manipulace s mechanismem pohonu tyče aktivací příslušného 6–fázového motoru,
- indikace technologických a diagnostických dat,
- zpracování a vyhodnocení vstupních signálů a generování výstupních signálů.

Kapitola byla vypracována na základě [21].



Obr. 20 – Blokové schéma kvalifikačního stendu [21]

### 6.3.1 Napájení

Napájení systému je zajištěno jedním přívodem 120 VAC a jedním přívodem 80 VDC. Oba napájecí obvody jsou opatřeny vlastní přepětovou ochranou. Systém si sám vytváří vnitřní napětí 48 VDC pomocí oddělených a izolovaných napěťových zdrojů. Případné přetížení systému z důvodu zkratu zapříčiněného vnitřními, či vnějšími obvody, je omezeno ochrannými obvody. Diagnostické obvody řídicího systému jsou napájeny stejnosměrným napětím 24 VDC vytvářeným taktéž uvnitř systému pomocí oddělených a izolovaných napěťových zdrojů. [21]

### **6.3.2 Sandra Z100**

Sandra Z100 je platforma tvořena jednotlivými moduly s různou funkcí a skříňkou, ve které jsou moduly uloženy. Stanice je koncipována jako modulární, tedy rozsahy I/O signálů, komunikace, napájení, výpočetní výkon atd. závisí na konfiguraci stanice. Každá stanice je vybavena jedním či dvěma moduly napájení, které zajišťují galvanické oddělení interních elektronických obvodů. Platforma je vybavena funkcí hot-swap, čili možností nahrazení či připojení modulu bez nutnosti vypnutí systému. Pro tento řídicí systém je platforma Sandra Z100 tvořena moduly pro:

- řízení reaktorové tyče,
- vyhodnocení polohy,
- RDD komunikace,
- procesoru,
- analogových vstupů a výstupů,
- binárních vstupů a výstupů,
- napájení. [21]

### **6.3.3 Ovládací zařízení (HMI)**

Základní ovládací zařízení (HMI) je součástí rozvaděče a je umístěno v jeho dveřích. Volitelně lze připojit přenosné ovládací zařízení s identickou funkcí, které umožňuje při ovládání systému sledovat technologii v provozu. Ovládací zařízení má několik funkcí, které lze rozdělit na informační a řídicí. Mezi informační funkce patří:

- nepřetržité zobrazování provozních stavů rozvaděče (stav napájení, teplota v rozvaděči, stav testovacích zásuvek),
- nepřetržité zobrazování sledovaných vstupních a výstupních signálů,
- zobrazování poruch systému,
- zobrazování doby pádu regulační tyče,
- zobrazování povelů a řídicích signálů.

Řídicí funkce jsou:

- povel k aktivaci fází motoru,
- povel k vysunutí tyče,
- povel k zasunutí tyče,
- povel k zastavení tyče. [21]

#### **6.3.4 Komunikace**

Jednotlivé moduly platformy Sandra Z100 mezi sebou komunikují pomocí redundantní sériové komunikační linky SSIO. Komunikace s HMI je zajištěna pomocí komunikace založené na principu Ethernetu. [21]

#### **6.3.5 Diagnostika**

Systém nepřetržitě diagnostikuje napěťové úrovně, teplotu uvnitř rozvaděče, polohu dveřních spínačů, hodnoty redundantních vstupních signálů a komunikaci. Všechna data jsou přístupná a možná k zobrazení na obou ovládacích zařízeních. [21]

#### **6.3.6 IPMAB**

Subsystém IPMAB zpracovává vstupní napěťové signály a generuje výstupní signály v souladu s vyhodnocenou polohou regulační tyče. Snímač polohy je individuálně připojen k funkčně nezávislé jednotce vyhodnocení polohy (PEU). Ta se skládá z hardwaru třídy 1E – elektrická zařízení související s bezpečností, který je doplněn kvalifikovanými izolačními zařízeními pro přenos diagnostických signálů. Poruchový režim jednotky je signalizován a po její výměně je funkce systému automaticky obnovena. [21]

#### **6.3.7 MAB**

Subsystém MAB slouží k samostatnému řízení pohonu regulační tyče. Modul procesoru řídicí vany obsahuje algoritmus, který generuje interní řídicí signály, zpracovává externí zpětnovazební signály s předem definovanou prioritou a řídí pohon. Řízení pohonu, ve smyslu řízení pohybu regulační tyče, spočívá v určování směru točení motoru, popřípadě jeho zastavení a držení v poslední poloze. Díky binárním výstupům procesoru, kterými jsou řízena spínací relé, lze pro účel zkoušky vypnout napájení a způsobit pád tyče. Všechny řídicí procesy a příkazy jsou prováděny pomocí přenosného ovládacího zařízení. [21] [19]

### **6.4 Zajištění spolehlivosti systému**

Řídicí systém EXMAB je klasifikován dle pravidel jaderné bezpečnosti jako systém s vlivem na jadernou bezpečnost a tomu také odpovídají vysoké nároky, kladené na spolehlivé zajištění všech jeho funkcí. Systém se skládá z několika subsystémů, které v případě výpadku nemají vliv na zajištění hlavní funkce, popřípadě způsobí akceptovatelné omezení funkce. Spolehlivost je zajištěna redundancí jednotlivých subsystémů.

Z hlediska EMC je odolnost zajištěna několika faktory. Konstrukce rozvaděče tvoří ve své podstatě Faradayovu klec. Přední i zadní dveře jsou spojeny pomocí měděného zemnicího pásku s kostrou skříně v mechanických uzlech. Všechny těsnící profily kolem dveří tvoří elektricky vodivý materiál. Otvory pro přívod a odvod chladícího vzduchu jsou vyplněny kovovými mřížkami. Přívody napájecího napětí jsou vybaveny EMC filtry, signálové i napájecí obvody jsou vybaveny přepětovými ochranami a komunikace je zajištěna kabely pro Ethernet kategorie 6. Kabelové průchodky na dně skříně jsou v EMC provedení. Pro výstupy ze střídačů, které řídí pohony, jsou použity stíněné vodiče a pro vodiče vstupních signálů jsou použity kroucené, stíněné páry vodičů. [23]

## 7 Program zkoušek elektromagnetické kompatibility

Program zkoušek elektromagnetické kompatibility je sestaven na základě faktu, že se jedná o zařízení třídy 1E, související s bezpečností jaderné elektrárny. Takové zařízení musí splňovat nejpřísnější bezpečnostní požadavky, v oblasti elektromagnetické kompatibility se jedná o funkční kritérium A. Zařízení bude podrobena zkouškám, které byly vybrány na základě požadavků zákazníka. Jako podklad byla uvedena technická zpráva Guidelines for Electromagnetic Interference Testing of Power Plant Equipment [22], dle které byly následně vybrány ekvivalentní normy z řad ČSN EN 61000–4, ČSN EN 55016-2 a normy ČSN EN 55011. [23]

### 7.1 Funkční kritéria

Vzhledem k faktu, že nelze dosáhnout dokonalých výsledků a eliminovat všechny zdroje rušivých signálů, je třeba zajistit, aby zařízení plnila svou funkci i za jejich přítomnosti. Funkce zařízení je pak porovnávána se stanovenými funkčními kritérii, která charakterizují odolnost zařízení či systému vůči elektromagnetickému rušení a vyjadřují způsobilost systému při stanovených okolních vlivech. Výsledkem zkoušek elektromagnetické kompatibility, dle norem zmíněných v kapitole 7, je pak zařazení zkoušeného zařízení do dosažené úrovně funkčního kritéria. Úroveň odolnosti je rozdělena do třech funkčních kritérií.

*„**Funkční kritérium A:** Přístroj musí pracovat nepřetržitě během zkoušky i po ní dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván dle svého určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Není-li stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti nebo přípustná ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a dále z toho, co může uživatel rozumně očekávat od přístroje, je-li užíván dle svého určení.*

***Funkční kritérium B:** Přístroj musí po zkoušce pracovat nepřetržitě dle svého určení. Není dovoleno žádné zhoršení činnosti nebo ztráta funkce pod úroveň činnosti stanovenou výrobcem, pokud je přístroj užíván dle svého určení. Úroveň činnosti může být nahrazena dovolenou ztrátou činnosti. Během zkoušky je však dovoleno zhoršení činnosti. Není dovolena změna aktuálního provozního stavu nebo ztráta uložených dat. Není-li*

stanovena výrobcem minimální úroveň činnosti nebo přípustná ztráta činnosti, pak obojí může být odvozeno z popisu výrobku a dokumentace a z toho, co může uživatel rozumně očekávat od přístroje, je-li užíván dle svého určení.

**Funkční kritérium C:** Je dovolena dočasná ztráta funkce za předpokladu, že funkce je samoobnovitelná nebo může být obnovena řízením.“ (ČSN EN 61000 6-2 ED.3, 2006, s. 11)

## 7.2 Zkoušky odolnosti

### 7.2.1 Zkouška odolnosti proti rušení elektrostatickými výboji

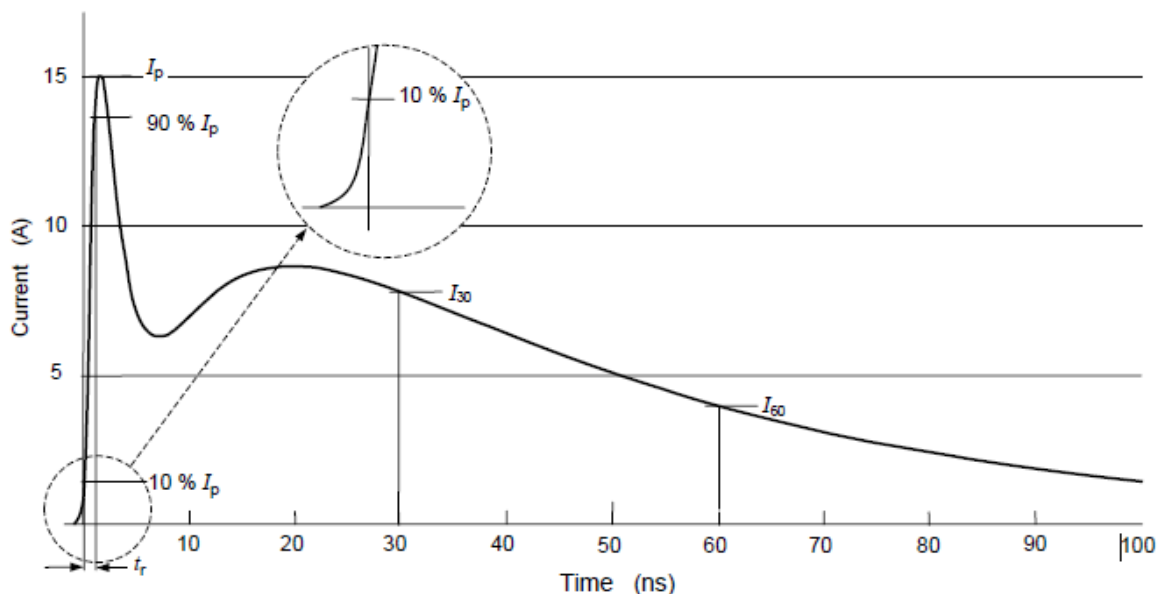
Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000-4-2 ed.2. Účelem zkoušky je simulovat účinky výbojů statické elektřiny, které za vhodných podmínek (nízká vlhkost vzduchu, umělé podlahové krytiny a oděvy pracovníků apod.) představují nebezpečné rušivé signály. Zkouška je prováděna zkušebním zařízením – generátorem impulsů, jehož koncová část tvoří zkušební nástavec s vybíjecím hrotem, pomocí něhož se přivádí zkušební napětí ke vnějšímu povrchu volně přístupnému obsluze. Zkouška se provádí proudovým impulsem 0,7-1 / 30 / 60 ns, a to jak v kladné, tak záporné polaritě.

Tab. 2 – Parametry průběhu kontaktního výboje

Úroveň	Napětí	Špičkový proud	Doba náběhu	Amplituda proudu po uplynutí 30 ns	Amplituda proudu po uplynutí 60 ns
1	2 kV	7,5 A	0,8 ns	4 A	2 A
2	4 kV	15 A	0,8 ns	8 A	4 A
3	6 kV	22,5 A	0,8 ns	12 A	6 A
4	8 kV	30 A	0,8 ns	16 A	8 A

Zdroj: vlastní zpracování dle [1].





Obr. 21 – Ideální průběh proudového impulsu pro zkoušku kontaktním výbojem se zkušební napětím 4 kV [1]

Poznámky:

$I_p$  – špičkový proud,

$t_r$  – náběžná hrana impulsu 0,7–1 ns,

$I_{30}$  – amplituda proudu po uplynutí 30 ns,

$I_{60}$  – amplituda proudu po uplynutí 60 ns.

Hodnoty zkušební napětí závisí na podmínkách instalace a prostředí, ve kterém zařízení pracuje. Normalizované hodnoty zkušební napětí jsou uvedeny v tabulce 2. Aplikace zkušební napětí se provádí vzduchovým, nebo kontaktním výbojem.

Tab. 3 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-2

Úroveň	Amplituda zkušební signálu	
	Kontaktní výboj [kV]	Vzduchový výboj [kV]
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15

Zdroj: vlastní zpracování dle [1].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A pro všechny čtyři zkušební úrovně, a to jak pro vzduchový výboj, tak pro kontaktní výboj. Elektrostatické výboje byly aplikovány na přední dveře rozvaděče, rám dveří a na ovládací panel. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 4 a 5.

Tab. 4 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–2 – vzduchový výboj

Typ vazby	vzduchový výboj			
Úroveň odolnosti	1	2	3	4
Zkušební hodnota	2 kV	4 kV	8 kV	15 kV
Místo rušení	Dosažené funkční kritérium			
• rám dveří	A	A	A	A
• přední dveře	A	A	A	A
• ovládací panel	A	A	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 5 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–2 – kontaktní výboj

Typ vazby / počet impulsů	kontaktní výboj / 10 v intervalu 1 s			
Úroveň odolnosti	1	2	3	4
Zkušební hodnota	2 kV	4 kV	8 kV	15 kV
Místo rušení	Dosažené funkční kritérium			
• rám dveří	A	A	A	A
• přední dveře	A	A	A	A
• ovládací panel	A	A	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–2.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [1].

## 7.2.2 Zkouška odolnosti proti rušení vyzařovaným vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem

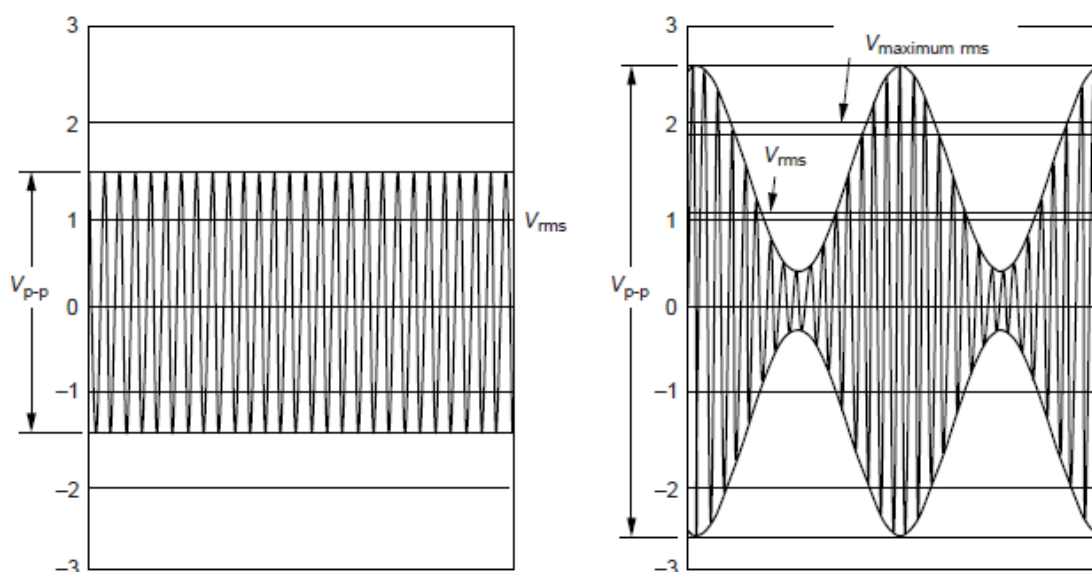
Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–3 ed.3. Účelem zkoušky je simulovat vysokofrekvenční elektromagnetické pole, jemuž může být zkoušené zařízení vystaveno např. v blízkosti vysílačů, mobilních telefonů, či mobilních vysílaček. Zkušební generované elektromagnetické pole musí být homogenní, o požadované frekvenci a dle zkušební úrovně o patřičné intenzitě elektrického pole.

Tab. 6 – Zkušební úrovně vztahující se na všeobecné účely, digitální radiotelefony a jiné přístroje s vysokofrekvenčním vyzařováním ČSN EN 61000–4–3

Úroveň	Intenzita vysokofrekvenčního elektromagnetického pole [V/m]
1	1
2	3
3	10
4	30

Zdroj: vlastní zpracování dle [2].

Zkouška je prováděna ozařováním zkoušeného zařízení ze všech stran anténou vhodného typu, generující rušivý signál. Z důvodu vysokých kmitočtů a elektrické intenzity vyzařovaného elektromagnetického pole je doporučeno provádět zkoušku ve stíněných prostorách. Tím je minimalizován dopad vyzařovaného pole na ostatní přístroje a zároveň i vliv vnějších polí na zkoušené zařízení. Rušení je prováděno amplitudovou modulací rušivého sinusového signálu. Rušivý signál je amplitudově modulován nízkofrekvenčním harmonickým napětím o frekvenci 1 kHz s hloubkou modulace 80 %, viz. obrázek 22. Signál je přeladován v kroku 1 % a každá vyzařovaná frekvence působí na zařízení 2 s.



Obr. 22 – Nemodulovaný vf signál a modulovaný vf signál 80 % AM [2]

Poznámky:

$V_{p-p}$  – napětí špička – špička,

$V_{rms}$  – efektivní hodnota napětí.

$V_{maximum\ rms}$  – maximální efektivní hodnota napětí.

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve frekvenčním pásmu 80–4000 MHz pro zkušební úroveň 3 a ve frekvenčním pásmu 800–2000 MHz pro zkušební úroveň X, ve které byla požadována intenzita elektrického pole 20 V/m. Vyzařované elektromagnetické pole bylo vyzařováno anténou na přední a zadní stranu rozvaděče ve výšce 1,7 m a ze vzdálenosti 3 m. Vyzařované elektromagnetické pole bylo monitorováno v blízkosti zkoušeného zařízení a ve zpětné vazbě regulováno na požadovanou hodnotu. Zkouška byla provedena s vertikální i horizontální polarizací antény. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 7.

Tab. 7 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–3

<b>Typ vazby</b>	vyzařované pole	
<b>Umístění / polarizace antény</b>	vzdálenost 3 m, výška 1,7 m / horizontální a vertikální	
<b>Frekvenční pásmo / krok / trvání</b>	80–4000 MHz / 1 % / 2 s	800–2000 MHz / 1 % / 2 s
<b>Úroveň odolnosti</b>	3	X
<b>Zkušební hodnota</b>	10 V/m	20 V/m
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>	
• přední strana (horizontální polarizace)	A	A
• přední strana (vertikální polarizace)	A	A
• zadní strana (horizontální polarizace)	A	A
• zadní strana (vertikální polarizace)	A	A

Poznámka: úroveň odolnosti X je zákazníkem stanovená úroveň.  
Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

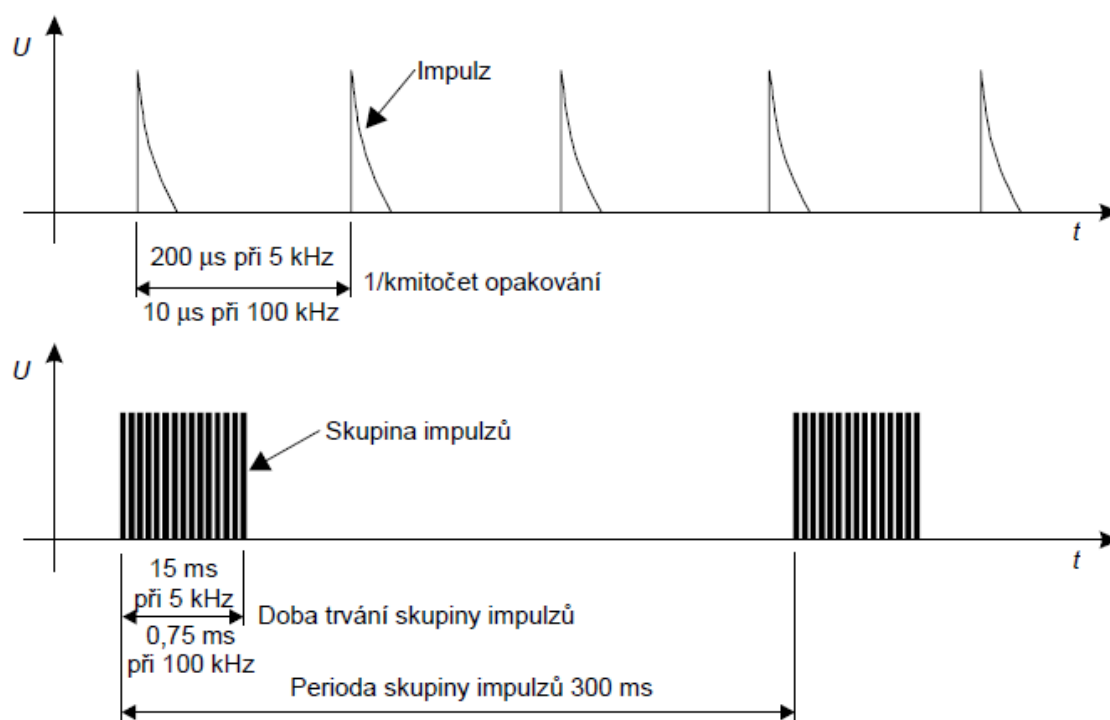
KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–3.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [2].

### 7.2.3 Zkouška odolnosti proti rušení rychlými elektrickými přechodovými jevy / skupinami impulsů

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–4 ed.3. Účelem zkoušky je simulovat výskyt opakovaných přechodových jevů vznikajících při spínacích procesech v sítích nn a vn, např. při přerušení indukční zátěže a odsakování kontaktů relé. Tyto jevy jsou charakterizovány velmi krátkou dobou náběhu, krátkou dobou trvání a nízkou energií, ale s vysokým počtem opakování.

Simulovaný rušivý signál představuje skupina impulsů s náběžnou hranou 5 ns a sestupnou hranou 50 ns. Frekvence opakování impulsů je 5, nebo 100 kHz. Časový průběh rychlého elektrického přechodového jevu a skupiny impulsů je na obrázku 23.



Obr. 23 – Časové průběhy rychlého elektrického přechodového jevu a skupiny impulzů [3]

Zkouška je prováděna přivedením rušivého signálu v obou polaritách do komunikačních, řídicích, signálních vstupů a výstupů a do svorek napájení. Zkušební úrovně se volí v závislosti na podmínkách instalace zařízení a na prostředí. Hodnoty zkušebního napětí pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8 – Zkušební úrovně ČSN EN 610004–4

Úroveň	Vstupy a výstupy napájení, vstupy a výstupy uzemnění		Signálové a ovládací vstupy a výstupy	
	Vrcholové napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]	Vrcholové napětí [kV]	Opakovací kmitočet [kHz]
1	0,5	5 nebo 100	0,25	5 nebo 100
2	1	5 nebo 100	0,5	5 nebo 100
3	2	5 nebo 100	1	5 nebo 100
4	4	5 nebo 100	2	5 nebo 100
X	speciální	speciální	speciální	speciální

Poznámka: úroveň X může být jakákoliv zkušební úroveň pod nebo mezi ostatními úrovněmi.  
Zdroj: vlastní zpracování dle [3].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve všech 4 zkušebních úrovních pro vstupy a výstupy napájení a uzemnění napěťových soustav ~ 230 V/50 Hz a 2–80 V IT. Byla použita vazba 33 nF kapacitní sondou v módu vodič – zem s asynchronním fázovým úhlem.

Pro signálové a ovládací vstupy měření teploty, polohy a výstupy k motorům bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušebních úrovních 2, 3 a 4. Vazba byla zajištěna pomocí vazebních kleští.

Rušivý signál byl pro všechny vstupy a výstupy tvořen skupinou impulsů o frekvenci 5 kHz s dobou trvání 15 ms, skupiny byly opakovány po 60 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 9 a 10.

Tab. 9 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000-4 – vazba kapacitní sondou

<b>Typ vazby / mód / impedance</b>	kapacitní sonda (33 nF) / vodič – zem / 50 Ω			
<b>Fázový úhel</b>	asynchronní			
<b>Kmitočet impulsů / doba trvání</b>	5 kHz / 15 ms, 60 s			
<b>Úroveň odolnosti</b>	1	2	3	4
<b>Zkušební hodnota</b>	500 V	1 kV	2 kV	4 kV
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>			
• X11:L1 – PE (~ 230 V/50 Hz)	–	–	A	A
• X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	–	–	A	A
• X11:L1 + X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	A	A	A	A
• X31:C – PE (2–80 V IT)	A	A	A	A
• X31:D – PE (2–80 V IT)	A	A	A	A
• X31:C + X31:D – PE (2–80 V IT)	A	A	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 10 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000-4 – vazba vazebními kleštěmi

<b>Typ vazby</b>	vazební kleště		
<b>Kmitočet impulsů / doba trvání</b>	5 kHz / 15 ms, 60 s		
<b>Úroveň odolnosti</b>	2	3	4
<b>Zkušební hodnota</b>	500 V	1 kV	2 kV
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>		
• kabel analogového vstupu měření teploty	A	A	A
• kabel analogového vstupu měření polohy	A	A	A
• kabel výstupu k motoru	A	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000-4-4.

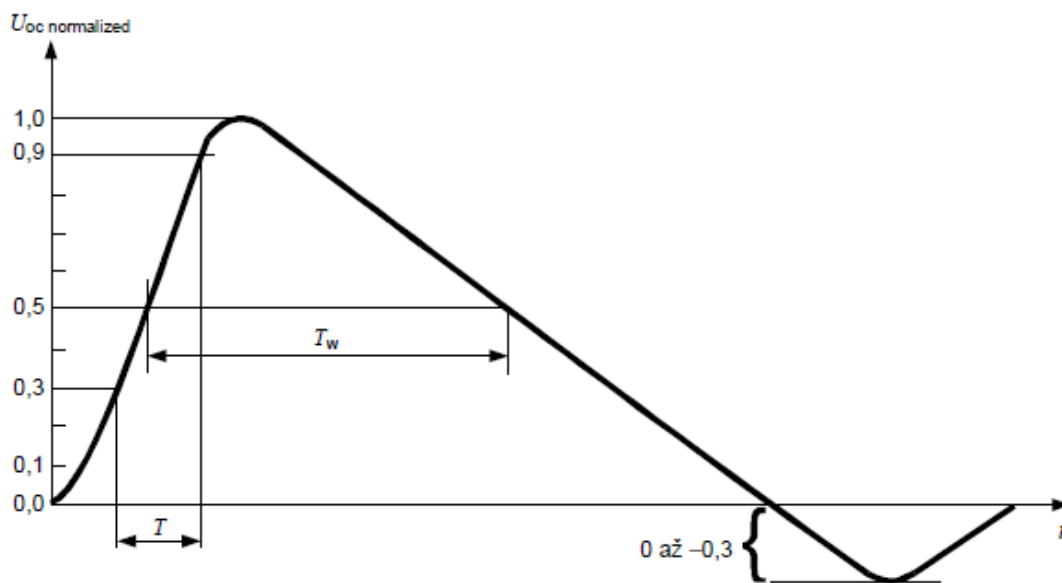
Kapitola byla vypracována na základě [23] a [3].

#### 7.2.4 Zkouška odolnosti proti rušení rázovým impulsem

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000-4-5 ed.3. Účelem zkoušky je simulovat nebezpečná přepětí vyvolaná spínacími přechodovými jevy v síti, poruchami v distribuční síti, či atmosférickými přechodovými jevy.

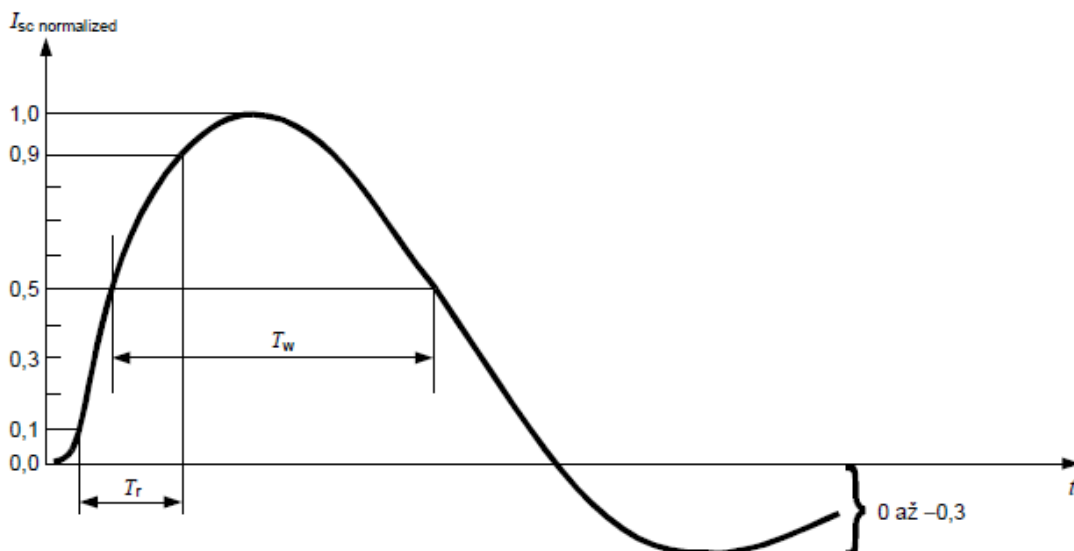
Rušivým signálem je rázový impuls parametricky rozdělený do dvou mezních stavů, dle výstupu z generátoru:

- výstup z generátoru naprázdno – napěťová vlna s náběžnou hranou  $1,2 \mu\text{s}$  a sestupnou hranou  $50 \mu\text{s}$ ,
- výstup z generátoru nakrátko – proudová vlna s náběžnou hranou  $8 \mu\text{s}$  a sestupnou hranou  $20 \mu\text{s}$ .



Obr. 24 – Napěťová vlna ( $1,2/50 \mu\text{s}$ ) na výstupu generátoru naprázdno [4]

Poznámky:  
 T – náběžná doba,  
 T<sub>w</sub> – doba trvání.



Obr. 25 – Proudová vlna ( $8/20 \mu\text{s}$ ) na výstupu generátoru nakrátko [4]

Poznámky:  
 T<sub>r</sub> – náběžná doba,  
 T<sub>w</sub> – doba trvání.

Zkouška je prováděna injektováním rušivého rázového impulsu do všech napájecích, řídicích, signálních a komunikačních rozhraní, která mohou být vystavena výše zmíněným spínacím jevům. Rušivý signál je injektován v obou polaritách nejméně pěti samostatnými impulsy. Zkušební úrovně se volí v závislosti na podmínkách instalace zařízení a na prostředí. Hodnoty zkušební napětí pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 11.

Tab. 11 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000–4–5

Úroveň	Zkušební hodnota napětí [kV]							
	AC napájení a AC vstupy/výstupy				DC napájení a DC vstupy/výstupy			
	Externí vstupy/výstupy		Interní vstupy/výstupy		Externí vstupy/výstupy		Interní vstupy/výstupy	
	vodič – vodič	vodič – zem	vodič – vodič	vodič – zem	vodič – vodič	vodič – zem	vodič – vodič	vodič – zem
1	–	0,5	–	–	–	–	–	–
2	0,5	1	–	–	–	–	–	–
3	1	2	1	2	–	–	–	–
4	2	4	2	4	2	4	2	4

Zdroj: vlastní zpracování dle [4].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušebních úrovních 1, 2 a 3 pro zkoušku napět'ovou vlnou na výstupu generátoru naprázdno. Pro tento stav byla použita vazební/oddělovací síť v módu vodič – zem, pro fázové úhly 0 °, 90 °, 180 ° a 270 °. Mezi fázový vodič – zem a nulový vodič – zem napájecí soustavy ~ 230 V/50 Hz, bylo přivedeno 40 impulsů s 5 s intervalem mezi jednotlivými impulsy.

Pro zkoušku proudovou vlnou na výstupu generátoru nakrátko bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušebních úrovních 2 a 3. Pro tento stav byla vazba zajištěna vazební/oddělovací sítí a 18 µF kapacitní sondou v módu vodič – vodič, pro fázové úhly 0 °, 90 °, 180 ° a 270 °. Do fázového a nulového vodiče napájecí soustavy ~ 230 V/50 Hz bylo přivedeno 40 impulsů s 5 s intervalem mezi jednotlivými impulsy. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v tabulkách 12 a 13.

Tab. 12 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–5 – napět'ová vlna na výstupu generátoru naprázdno

<b>Typ vazby / mód / impedance</b>	vazební/oddělovací síť / vodič – zem / 12 Ω		
<b>Fázový úhel</b>	0° – 90° – 180° – 270°		
<b>Počet impulsů</b>	40 v intervalu 5 s		
<b>Úroveň odolnosti</b>	1	2	3
<b>Zkušební hodnota</b>	500 V	1 kV	2 kV
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>		
• X11:L1 – PE (~ 230 V/50 Hz)	A	A	A
• X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	A	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



Tab. 13 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–5 – proudová vlna na výstupu generátoru nakrátko

Typ vazby / mód / impedance	vazební/oddělovací síť / vodič – vodič / 2 Ω	
	kapacitní sonda (18 μF) / vodič – vodič / 2 Ω	
Fázový úhel	0° – 90° – 180° – 270°	
Počet impulsů	40 v intervalu 5 s	
Úroveň odolnosti	2	3
Zkušební hodnota	500 V	1 kV
Místo rušení	<b>Dosažené kritérium</b>	
• X11:L1 – X11:N (~ 230 V/50 Hz)	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–5.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [4].

### 7.2.5 Zkouška odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–6 ed.4. Účelem zkoušky je simulovat vysokofrekvenční elektromagnetické rušení, které může na zařízení působit především v blízkosti radiových vysílačů.

Rušivé vysokofrekvenční elektromagnetické záření je simulováno sinusovým signálem v rozsahu frekvencí od 150 kHz do 80 MHz. Pro simulaci skutečných ohrožení je tento signál amplitudově modulován s frekvencí 1 kHz a amplitudou 80 %, viz. obrázek 22 v kapitole 7.2.2.

Rušivý signál je aplikován pomocí kleští či vazební/oddělovací sítě na přívodní vodiče, komunikační vedení a propojovací kabely. Zkušební úrovně se volí v závislosti na prostředí, kde je zařízení instalováno. Úrovně zkušebního napětí jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000–4–6

Úroveň	Úroveň napětí	
	U <sub>0</sub> [V]	U <sub>0</sub> [dB(μV)]
1	1	120
2	3	129,5
3	10	140

Zdroj: vlastní zpracování dle [5].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 3. Rušení bylo aplikováno pomocí feritových kleští v módu vodič – zem na přívodní vodiče ~ 230 V/50 Hz, 2–80 V IT, kabel měření teploty, kabel měření polohy a kabel výstupu k motorům. Rušivý signál byl přeladován v kroku 1 % ve frekvenčním pásmu od 150 kHz – 80 MHz. Každá

frekvence byla vyzařována do vodičů a kabelů po dobu 1 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 15.

Tab. 15 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–6

<b>Typ vazby / mód / impedance</b>	feritové kleště / vodič – zem / 150 Ω	
<b>Modulace</b>	amplitudová modulace 80 %, 1 kHz	
<b>Frekvenční pásmo / krok / trvání</b>	0,15 – 80 MHz / 1 % / 1 s	
<b>Úroveň odolnosti</b>	2	3
<b>Zkušební hodnota</b>	3 V	10 V
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>	
• X11:L1 + X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	–	A
• X31:C + X31:D – PE (2–80 V IT)	–	A
• kabel analogového vstupu měření teploty	–	A
• kabel analogového vstupu měření polohy	A	B
• kabel výstupu k motoru	A	B

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Z výsledků zkoušky je zřejmé, že zařízení v případě rušení aplikovaného na kabel výstupu k motoru a kabel analogového vstupu měření polohy dosáhlo pouze funkčního kritéria B, tedy nesplnilo zadané požadavky. Z toho důvod bylo provedena zkouška v nižší úrovni 2, kde zařízení uspělo.

Rušivý signál ve zkušební úrovni 3 způsobil po aplikaci na kabel analogového vstupu měření polohy dočasnou ztrátu informace o stavu KS a značné kolísání hodnoty polohy čidla. Tento nepříznivý stav byl zpozorován ve frekvenčním rozsahu 4–17 MHz.

U výstupního kabelu k motoru nastala po aplikaci rušivého signálu znatelná změna hodnoty polohy čidla a změna stavu některých monitorovacích relé, která začala nekontrolovaně spínat a tím vyvolávat chybová hlášení. Tyto změny byly zpozorovány ve frekvenčním rozsahu 10–70 MHz.

Odhálil jsem, že nepříznivé stavy byly zapříčiněné vytvořením kabelového svazku z výše zmíněných kabelů. Ačkoliv byly použity kabely se stíněním a zapojeny v galvanicky oddělených svorkovnicích, stínění nebylo dostatečné. Po aplikaci rušivého napětí do jednoho kabelu se rušivý signál naindukoval do kabelu druhého.

Jako řešení jsem navrhl dodatečně vybavit kabel analogového vstupu měření polohy pasivním filtrem WE–MAPI SMD Shielded Power Inductor, který by měl zaručit dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 3. Po nainstalování filtru bude zkouška opakována.

Opatření pro zajištění funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 3 pro kabel výstupu k motoru nutná nejsou. U kompletního systému EXMAB bude subsystém MAB pro řízení

pohonu fyzicky oddělen od subsystému IPMAB. Tím bude zajištěno oddělení kabeláže pro měření polohy a výstupu motorů, takže tento nepříznivý stav nastat nemůže.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [5].

### 7.2.6 Zkouška odolnosti proti rušení magnetickým polem síťového kmitočtu

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000-4-8 ed.2. Účelem zkoušky je simulovat účinky magnetického pole síťového kmitočtu, které by mohly ovlivnit spolehlivý a bezpečný provoz zařízení. Pole je tvořeno proudem o síťovém kmitočtu 50 Hz. Vzniká nejčastěji v okolí síťových vodičů či přístrojů v okolí zařízení (např. rozptyl transformátorů).

Z hlediska vlivu na zařízení je magnetické pole síťového kmitočtu rozděleno na:

- spojitě pole – simuluje provozní, bezporuchový stav zařízení, intenzita magnetického pole se pohybuje v řádu desítek A/m a zařízení je tomuto záření vystaveno po dobu jednotek až desítek minut,
- krátkodobé pole – simuluje poruchový stav, intenzita pole se pohybuje v řádu stovek A/m a zařízení je tomuto záření vystaveno po dobu 1–3 s.

Zkouška je prováděna indukovaním rušivého magnetického pole do zařízení indukční cívkou, kterou protéká budící proud. Cívka by měla být ve vzdálenosti minimálně 1 m od zkoušeného zařízení. Volba zkušebních úrovní závisí na podmínkách instalace a prostředí, kde je zařízení provozováno. Hodnoty intenzity zkušebního magnetického pole pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 16.

Tab. 16 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-8

Úroveň	Intenzita magnetického pole [A/m]	
	spojité pole	krátkodobé pole
1	1	–
2	3	–
3	10	–
4	30	300
5	100	1000

Poznámky: pro zkušební úrovně 1, 2 a 3 zkoušky krátkodobým magnetickým polem se zkouška neprovádí.  
Zdroj: vlastní zpracování dle [7].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 5 a to jak pro zkoušku spojitým polem, tak pro zkoušku krátkodobým polem. Rušivé elektromagnetické záření bylo do zařízení indukováno indukční cívkou v horizontální a vertikální orientaci. Cívka byla v obou orientacích natočena k zařízení v úhlech 120 ° a 240 °. Zkoušce byla

vystavena přední a zadní strana KS po dobu 5 min při zkoušce spojitým polem a po dobu 3 s při zkoušce krátkodobým polem. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab. 17 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–8

Typ vazby	indukované pole s horizontálně (HO) a vertikálně (VO) orientovanou indukční cívkou	
Doba trvání	dlouhodobé působení (5 min)	krátkodobé působení (3 s)
Úroveň odolnosti	5	5
Zkušební hodnota	100 A/m	1000 A/m
Místo rušení	Dosažené kritérium	
• přední strana – 1/3 HO	A	A
• přední strana – 1/3 VO	A	A
• přední strana – 2/3 HO	A	A
• přední strana – 2/3 VO	A	A
• zadní strana – 1/3 HO	A	A
• zadní strana – 1/3 VO	A	A
• zadní strana – 2/3 HO	A	A
• zadní strana – 2/3 VO	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–8.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [7].

### 7.2.7 Zkouška odolnosti proti rušení impulsem magnetického pole

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–9 ed.2. Účelem zkoušky je simulovat účinky impulsního magnetického pole. To vzniká při úderu blesku, na počátku přechodových jevů v elektrických sítích, či v rozvodnách vvn spínáním vypínačů sběrnic a vedení.

Rušivý signál je simulován pěti samostatnými impulsy s náběžnou hranou 8  $\mu$ s a sestupnou hranou 20  $\mu$ s, tvar vlny je specifikovaný jako zkratový proud, viz. obrázek 25 v kapitole 7.2.4. Zařízení je testováno oběma polaritami budícího proudu protékajícího indukční cívkou, který vytváří zkušební magnetické pole. Volba zkušebních úrovní závisí na podmínkách instalace a prostředí, kde je zařízení provozováno. Hodnoty intenzity zkušebního magnetického pole pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 18.

Tab. 18 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000–4–9

Úroveň	Intenzita pulzů magnetického pole [A/m]
1	–
2	–
3	100
4	300
5	1000

Poznámky: pro zkušební úrovně 1 a 2 se zkouška neprovádí.  
Zdroj: vlastní zpracování dle [8].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 5. Rušivé magnetické pole bylo do zařízení indukováno indukční cívkou, a to jak na přední, tak na zadní stranu KS. Cívka byla vůči zařízení orientována vertikálně a horizontálně s úhlem natočení 120 ° a 240 °. Do každé zkoušené strany KS, v každé orientaci a úhlu natočení indukční cívky, bylo do zařízení naindukováno 10 impulsů v 5 s intervalu mezi jednotlivými impulsy. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 19.

Tab. 19 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–9

<b>Typ vazby</b>	indukované pole s horizontálně (HO) a vertikálně (VO) orientovanou indukční cívkou
<b>Fázový úhel</b>	asynchronní
<b>Počet impulsů</b>	10 v intervalu 5 s
<b>Úroveň odolnosti</b>	5
<b>Zkušební hodnota</b>	1000 A/m
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>
• přední strana – 1/3 HO	A
• přední strana – 1/3 VO	A
• přední strana – 2/3 HO	A
• přední strana – 2/3 VO	A
• zadní strana – 1/3 HO	A
• zadní strana – 1/3 VO	A
• zadní strana – 2/3 HO	A
• zadní strana – 2/3 VO	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–9.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [8].

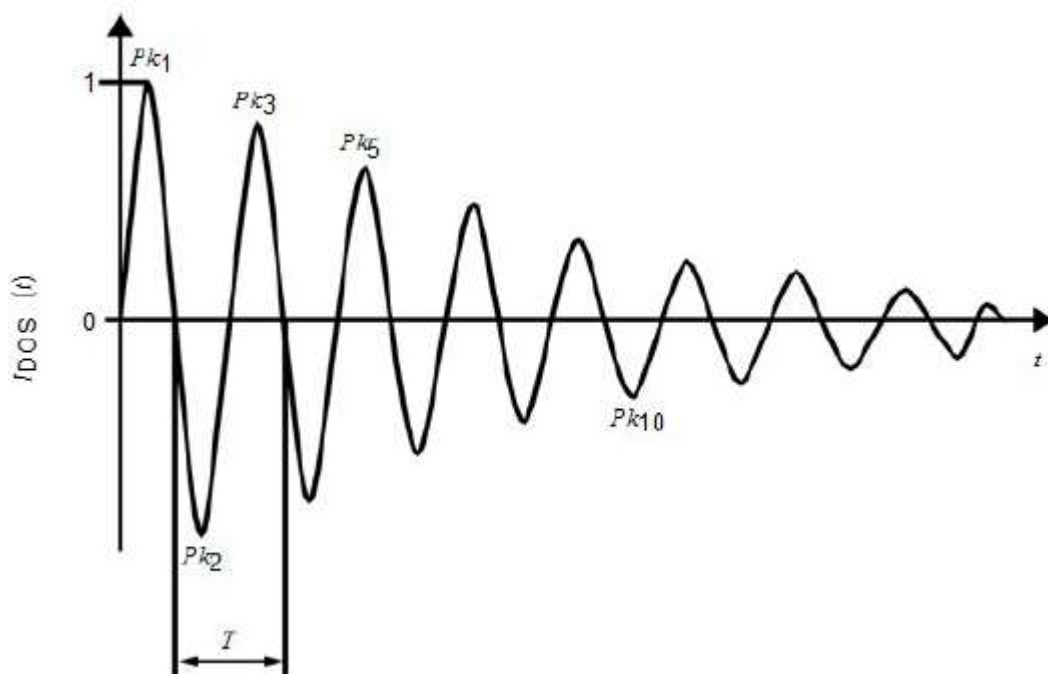
### 7.2.8 Zkouška odolnosti proti rušení tlumenými kmity magnetického pole

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–10 ed.2. Účelem zkoušky je simulovat účinky přechodových dějů vznikajících při spínacích procesech venkovních

rozveden vvn (např. při rozpínání odpojovačů nebo vypínačů) a v instalacích těžkého průmyslu. Tato magnetická pole mohou nepříznivě ovlivnit správný a spolehlivý provoz zařízení.

Rušivý signál je reprezentován tlumenou oscilační vlnou s frekvencí kmitů 100 kHz s četností opakování 40 Hz a tlumenou oscilační vlnou s frekvencí kmitů 1 MHz s četností opakování 400 Hz. Tvar vlny je specifikován jako zkratový proud a jeho průběh je na obrázku 26.

Do povrchu zařízení je rušivý signál injektován indukční cívkou po dobu nejméně 2 s. Volba zkušebních úrovní závisí na podmínkách instalace a prostředí, kde je zařízení provozováno. Hodnoty intenzity zkušebního magnetického pole pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 18.



Obr. 26 – Tvar oscilační vlny [9]

Poznámky:

T = 1  $\mu$ s pro 1 MHz, nebo 10  $\mu$ s pro 100 kHz.

Tab. 20 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-10

Úroveň	Intenzita tlumených kmitů magnetického pole [A/m]
1	–
2	–
3	10
4	30
5	100

Poznámky: pro zkušební úrovně 1 a 2 se zkouška neprovádí.

Zdroj: vlastní zpracování dle [9].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 5. Rušivé magnetické pole bylo indukováno do přední a zadní strany KS pomocí indukční cívky. Ta byla vůči zařízení orientována vertikálně a horizontálně s úhly natočení 120 ° a 240 °. Tlumeným oscilačním vlnám o frekvencích 100 kHz a 1 MHz bylo zařízení vystaveno po dobu 60 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 21.

Tab. 21 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–10

<b>Typ vazby</b>	indukované pole s horizontálně (HO) a vertikálně (VO) orientovanou indukční cívkou
<b>Fázový úhel</b>	asynchronní
<b>Kmitočet oscilací / doba trvání</b>	100 kHz, 1 MHz / 60 s
<b>Úroveň odolnosti</b>	5
<b>Zkušební hodnota</b>	100 A/m
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>
• přední strana – 1/3 HO	A
• přední strana – 1/3 VO	A
• přední strana – 2/3 HO	A
• přední strana – 2/3 VO	A
• zadní strana – 1/3 HO	A
• zadní strana – 1/3 VO	A
• zadní strana – 2/3 HO	A
• zadní strana – 2/3 VO	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–10.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [9].

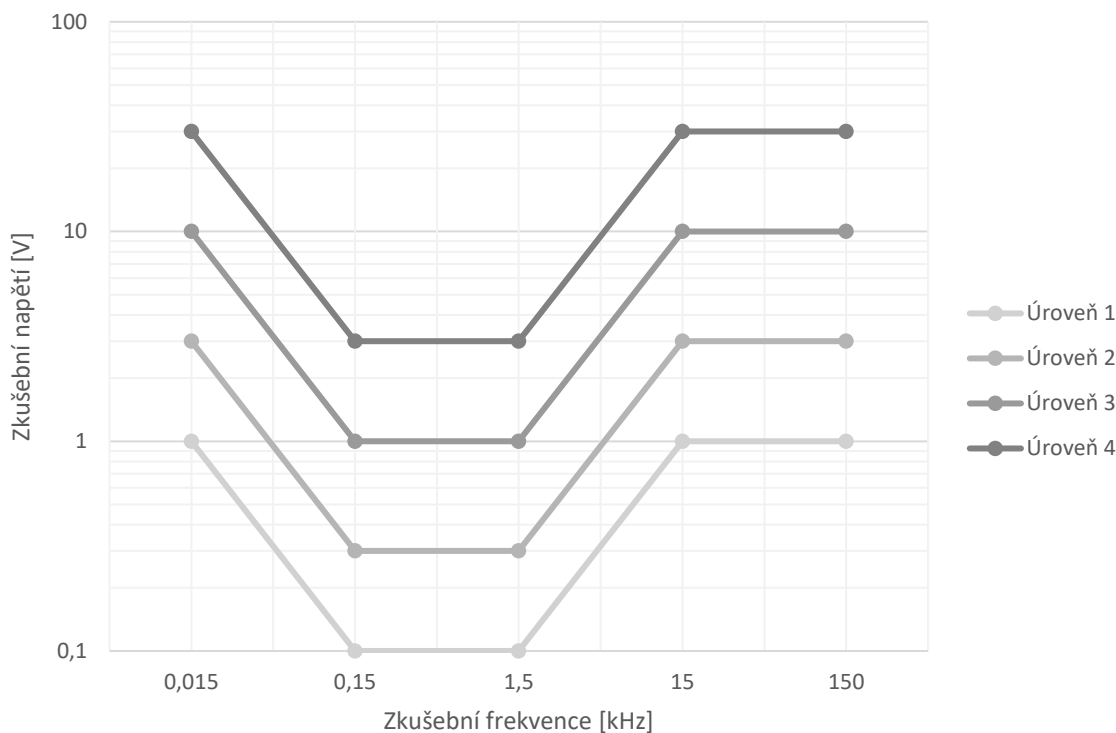
### 7.2.9 Zkouška odolnosti proti nesymetrickým rušením šířeným vedením

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–16 ed.2. Účelem zkoušky je simulovat účinky nesymetrických rušení, která se šíří vedením a mohou ovlivnit spolehlivý provoz zařízení v obytných či průmyslových oblastech. Zdroje rušení s frekvencí sítě a vyšších harmonických jsou napájecí distribuční soustavy, rušení o frekvencích nad rámeč harmonických, až do frekvence 150 kHz, jsou výkonová spínací zařízení (např. výkonové měniče).

Rušení je reprezentováno sinusovým napěťovým signálem a rozděleno dle kmitočtového rozsahu na dvě skupiny:

- rušení signálem síťového kmitočtu – rušení je aplikováno spojitě, nebo krátkodobě,
- rušení signálem v kmitočtovém rozsahu 15 Hz – 150 kHz.

Signál se aplikuje do napájecích, ovládacích, signálních a komunikačních vstupů a výstupů pomocí vazební/oddělovací sítě. Profil zkušebního napětí v závislosti na změně frekvence je uveden na obrázku 27.



Obr. 27 – Zkušební napětí v závislosti na změně frekvence

Zdroj: vlastní zpracování dle [10].

Volba zkušebních úrovní závisí na podmínkách instalace a prostředí, kde je zařízení provozováno. Hodnoty zkušebního napětí pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 22 pro rušení signálem síťového kmitočtu a v tabulce 23 pro rušení signálem v kmitočtovém rozsahu 15 Hz – 150 kHz.

Tab. 22 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-16 – rušení signálem síťového kmitočtu

Úroveň	Zkušební napětí [V]	
	Spojité rušení	Krátkodobé rušení
1	1	10
2	3	30
3	10	100
4	30	300

Zdroj: vlastní zpracování dle [10].



Tab. 23 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000–4–16 – rušení signálem 15 Hz – 150 kHz

Úroveň	Zkušební napětí [V]			
	15 Hz – 150 Hz	150 Hz až 1,5 kHz	1,5 kHz – 15 kHz	15 kHz – 150 kHz
1	1 až 0,1	0,1	0,1 až 1	1
2	3 až 0,3	0,3	0,3 až 3	3
3	10 až 1	1	1 až 10	10
4	30 až 3	3	3 až 30	30

Zdroj: vlastní zpracování dle [10].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušebních úrovních následovně:

- pro spojitě rušení signálem síťového kmitočtu v úrovních 3 a 4, kdy rušivý signál s kmitočtem 50 Hz byl aplikován po dobu 300 s,
- pro krátkodobé rušení signálem síťového kmitočtu v úrovních 2 a 3, kdy rušivý signál s kmitočtem 50 Hz byl aplikován po dobu 1–3 s,
- pro rušení signálem v kmitočtovém rozsahu 15 Hz – 150 kHz v úrovních 3 a 4, kdy byl kmitočet přeladován v kroku 3 % a každý krok byl aplikován po dobu 3 s.

Rušivé napětí bylo injektováno do přírodních svorek napájecího napětí 2–80 V IT, kabelu analogového vstupu měření teploty a kabelu analogového vstupu měření polohy. Vazba se zkoušeným zařízením byla zprostředkována pomocí vazební/oddělovací sítě v módu vodič – zem. Vazba se stíněním kabelů byla zprostředkována proudovou vazbou. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 24 a 25.

Tab. 24 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–16 – rušení signálem síťového kmitočtu

Typ vazby / mód / impedance	vazební/oddělovací síť / vodič – zem / 100 Ω			
	proudová vazba do stínění kabelu / vodič – zem / 100 Ω			
<b>Typ rušení</b>	spojitě rušení		krátkodobé rušení	
<b>Zkušební kmitočet / doba trvání</b>	50 Hz / 300 s		50 Hz / 1 ÷ 3 s	
<b>Úroveň odolnosti</b>	3	4	2	3
<b>Zkušební hodnota</b>	10 V	30 V	30 V	100 V
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>			
• X31:C + X31:D – PE (2–80 V IT)	–	A	–	A
• kabel analogového vstupu měření teploty	A	–	A	–
• kabel analogového vstupu měření polohy	A	–	A	–

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 25 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–16 – rušení signálem v kmitočtovém rozsahu 15 Hz – 150 kHz

Typ vazby / mód / impedance	vazební/oddělovací síť / vodič – zem / 100 Ω	
	proudová vazba do stínění kabelu / vodič – zem / 100 Ω	
Zkušební kmitočet / krok / doba trvání	15 Hz ÷ 150 kHz / 3 % / 3 s	
Úroveň odolnosti	3	4
Zkušební hodnota	10 / 1 V	30 / 3 V
Místo rušení	<b>Dosažené kritérium</b>	
• X31:C + X31:D – PE (2–80 V IT)	–	A
• kabel analogového vstupu měření teploty	A	–
• kabel analogového vstupu měření polohy	A	–

Zdroj: vlastní zpracováno dle [23].

KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–16.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [10].

### 7.2.10 Zkouška odolnosti proti rušení tlumenou oscilační vlnou 100 kHz a 1 MHz

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–18. Účelem zkoušky je simulovat účinky tlumené oscilační vlny. Ta je z hlediska kmitočtu rozdělena na vlnu pomalou a rychlou. Pomalá tlumená vlna zahrnuje kmitočty oscilací 100 kHz – 1 MHz a reprezentuje spínací procesy ve venkovních rozvodnách vvn/vn (spínání sběrnic) a spínací přechodné jevy v oblasti průmyslových závodů. Rychlá tlumená vlna zahrnuje kmitočty oscilací nad 1 MHz a reprezentuje účinky elektromagnetického impulsu ve velkých výškách (HEMP) a jevy vyvolané spínači a ovladači v rozvodnách napájecí sítě.

Rušivý signál je reprezentován pomalou tlumenou oscilační vlnou o kmitočtu 100 kHz a 1 MHz a rychlou oscilační vlnou o kmitočtu 3 MHz, 10 MHz nebo 30 MHz. Zařízení může být vystaveno spojitému rušivému signálu po dobu nejméně 60 s, nebo šesti skupinám signálů o délce 10 s a intervalem mezi jednotlivými skupinami 10 s. Tento signál se aplikuje na napájecí, ovládací a signalizační vstupy a výstupy zkoušeného zařízení. Volba zkušebních úrovní závisí na podmínkách instalace a prostředí, kde je zařízení provozováno. Hodnoty zkušebního napětí pro jednotlivé úrovně pomalé a rychlé tlumené oscilační vlny jsou uvedeny v tabulkách 26 a 27. Zkušební napětí je definováno jako hodnota první napěťové špičky na tvaru vlny zkušebního napětí. Tvar vlny zkušebního napětí je zobrazen na obrázku 28.

Tab. 26 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-18 – pomalá tlumená oscilační vlna

Úrovně	Zkušební napětí [V]	
	Nesymetricky (vodič – zem)	Symetricky (vodič – vodič)
1	500	250
2	1000	500
3	2000	1000

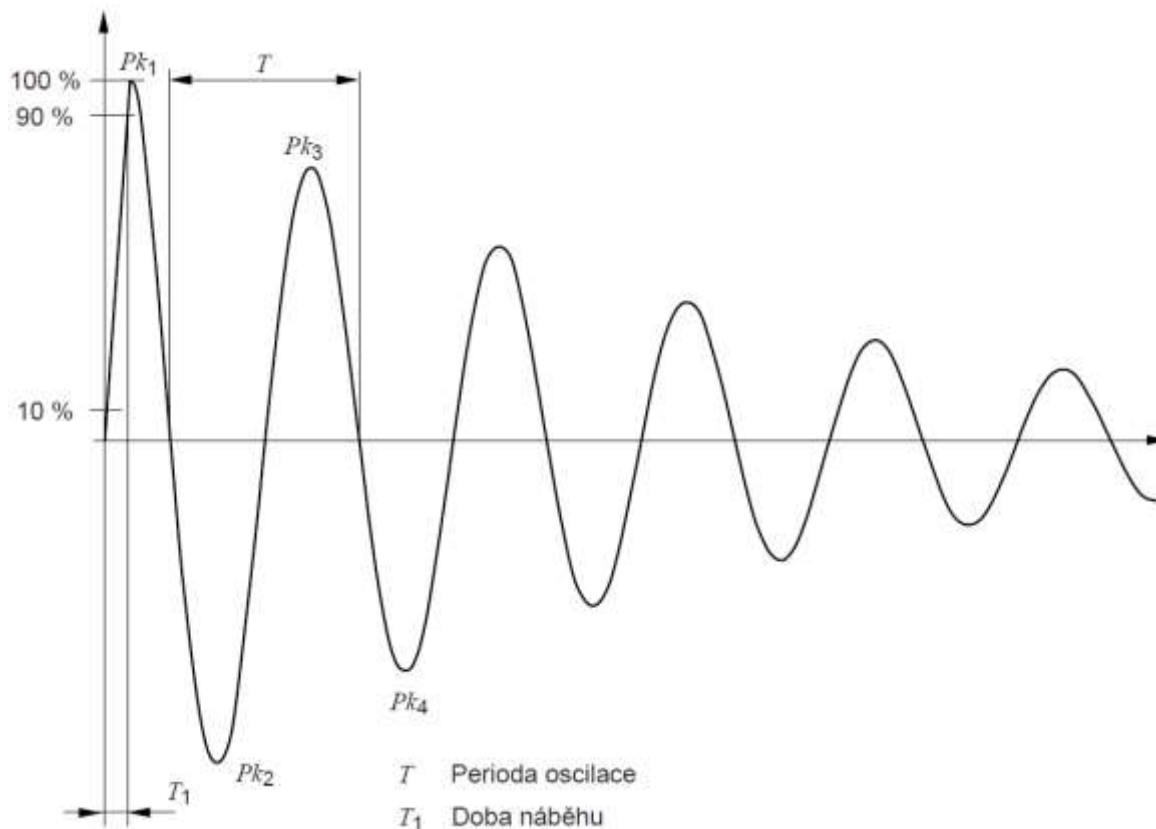
Poznámky: pro zkušební úroveň 4 se zkouška neprovádí.

Zdroj: vlastní zpracování dle [11].

Tab. 27– Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-18 – rychlá tlumená oscilační vlna

Úrovně	Zkušební napětí [V]
	Nesymetricky (vodič – zem)
1	500
2	1000
3	2000
4	4000

Zdroj: vlastní zpracování dle [11].



Obr. 28 – Tvar tlumené oscilační vlny [11]

Poznámky:

Pk<sub>1</sub> – první napěťová špička,

Pk<sub>2</sub> – druhá napěťová špička,

Pk<sub>3</sub> – třetí napěťová špička.

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A pro rušení pomalou tlumenou oscilační vlnou následovně:

- Ve zkušebních úrovních 2 a 3, kdy byla vazba zprostředkována pomocí vazební/oddělovací sítě v módu vodič – zem. Rušivý signál s asynchronním fázovým úhlem o kmitočtech 100 kHz a 1 MHz byl injektován do přívodních napěťových svorek ~ 230 V/50 Hz a 2–80 V IT po dobu 60 s.
- Ve zkušebních úrovních 2 a 3, kdy byla použita induktivní vazba do stínění kabelů v módu vodič – zem. Rušivý signál s asynchronním fázovým úhlem o kmitočtech 100 kHz a 1 MHz byl injektován do fázového a nulového vodiče napěťových soustav ~ 230 V/50 Hz a 2–80 V IT po dobu 60 s.
- Ve zkušební úrovni 3, kdy byla vazba zprostředkována pomocí vazební/oddělovací sítě v módu vodič – vodič. Rušivý signál s asynchronním fázovým úhlem o kmitočtech 100 kHz a 1 MHz byl injektován do fázového a nulového vodiče napěťových soustav ~ 230 V/50 Hz a 2–80 V IT po dobu 60 s.

Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 28, 29 a 30.

Tab. 28 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000-4-18 – nesymetrické rušení do přívodních napěťových svorek

Typ vazby / mód / impedance	vazební/oddělovací síť / vodič – zem / 200 Ω	
Fázový úhel	asynchronní	
Kmitočet oscilací / doba trvání	100 kHz, 1 MHz / 60 s	
Úroveň odolnosti	2	3
Zkušební hodnota	1 kV	2 kV
Místo rušení	<b>Dosažené kritérium</b>	
X11:L1 – PE (~ 230 V/50 Hz)	–	A
X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	–	A
X11:L1 + X11:N – PE (~ 230 V/50 Hz)	A	A
X31:C – PE (2–80 V IT)	–	A
X31:D – PE (2–80 V IT)	–	A
X31:C + X31:D – PE (2–80 V IT)	A	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 29 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–18 – nesympetrické rušení do kabelů

<b>Typ vazby / mód / impedance</b>	induktivní vazba do stínění kabelu / vodič – zem / 200 Ω	
<b>Fázový úhel</b>	asynchronní	
<b>Kmitočet oscilací / doba trvání</b>	100 kHz, 1 MHz / 60 s	
<b>Úroveň odolnosti</b>	2	3
<b>Zkušební hodnota</b>	1 kV	2 kV
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>	
Kabel analogového vstupu měření teploty	A	A
Kabel analogového vstupu měření polohy	A	A
Kabel výstupu k motoru	–	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 30 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–18 – symetrické rušení do přívodních napěťových svorek

<b>Typ vazby / mód / impedance</b>	vazební/oddělovací síť / vodič – vodič / 200 Ω
<b>Fázový úhel</b>	asynchronní
<b>Kmitočet oscilací / doba trvání</b>	100 kHz, 1 MHz / 60 s
<b>Úroveň odolnosti</b>	3
<b>Zkušební hodnota</b>	1 kV
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>
X11:L1 – X11:N (~ 230 V/50 Hz)	A
X31:C – X31:D (2–80 V IT)	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

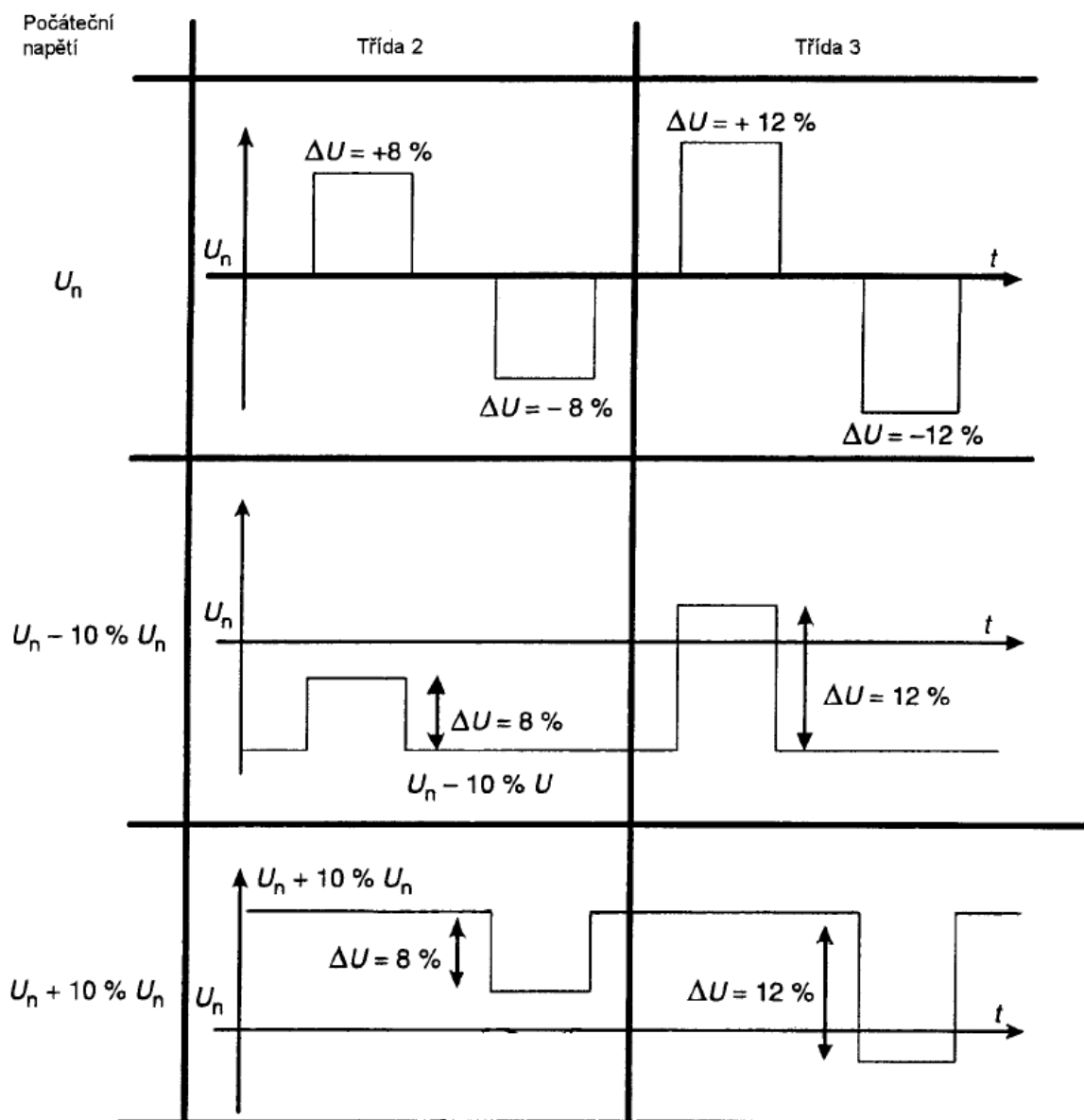
KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–18.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [11].

### 7.2.11 Zkouška odolnosti proti kolísání napětí

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–14. Účelem zkoušky je simulovat účinky kolísání napětí, která jsou způsobena jednotlivým zapínáním a vypínáním zátěží, náhodně proměnnými velkými zátěžemi (odporové svářečky, válcovací stolice, obloukové pece, ...) a stupňovitými změnami napětí.

Rušení je reprezentováno jako stupňovité změny napájecího napětí. Zařízení je nejprve provozováno při ustáleném napájecím napětí ( $U_n$ ,  $U_n - 10 \% U_n$ ,  $U_n + 10 \% U_n$ ), poté je vystaveno stupňovitým změnám, které trvají 2 s a jsou opakovány v intervalu 5 s. Průběh zkušebního napětí je zobrazen na obrázku 29. Rozsah změn zkušebního napětí je dán zkušebními úrovněmi, uvedenými v tabulce 31.



Obr. 29 – Časový průběh zkoušky [12]

Tab. 31 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000-4-14

Úroveň	Zkušební napětí [V]		
	$U_n$	$U_n - 10\% U_n$	$U_n + 10\% U_n$
1	–	–	–
2	$\Delta U = \pm 8\% U_n$	$\Delta U = +8\% U_n$	$\Delta U = -8\% U_n$
3	$\Delta U = \pm 12\% U_n$	$\Delta U = +12\% U_n$	$\Delta U = -8\% U_n$
X	speciální	speciální	speciální

Poznámky: pro zkušební úroveň 1 se zkouška neprovádí, úroveň X může být jakákoliv zkušební úroveň pod nebo mezi ostatními úrovněmi.

Zdroj: vlastní zpracování dle [12].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni X. Zkušební napětí pro tuto úroveň bylo zákazníkem definováno na  $\pm 20\% U_n$  při ustáleném napájecím napětí  $U_n$ . Vazba se zařízením byla přímá z generátoru v módu vodič – vodič. Rušivý signál

s nulovým fázovým úhlem byl injektován mezi fázový a nulový vodič napěťové soustavy ~ 230 V/50 Hz. Zkušební napětí bylo 3x sníženo a 3x zvýšeno dle definované úrovně, jednotlivé změny trvaly 2 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 32.

Tab. 32 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–14

<b>Typ vazby / mód</b>	přímá vazba z generátoru / vodič – vodič
<b>Fázový úhel / doba trvání / počet změn</b>	0° / 2 s / 3
<b>Úroveň odolnosti</b>	X
<b>Zkušební hodnota</b>	± 20 % U <sub>n</sub>
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>
X11:L1 – X11:N (~ 230 V/50 Hz)	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

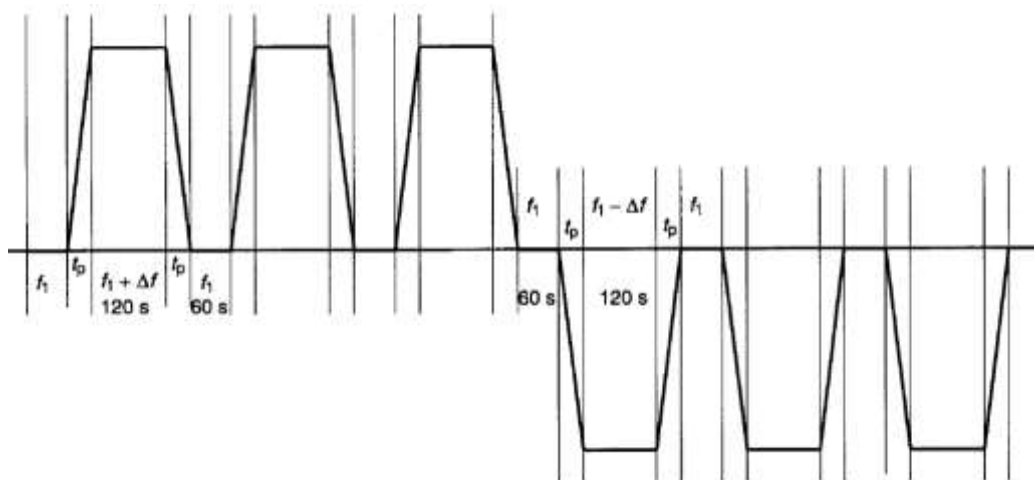
KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–14.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [12].

### 7.2.12 Zkouška odolnosti proti kolísání síťového kmitočtu

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–28. Účelem zkoušky je simulovat účinky kolísání síťového kmitočtu. Ten je ve veřejných elektrizačních soustavách udržován na jmenovitých hodnotách (50/60 Hz) a to s velmi vysokou přesností. U malých izolovaných sítí, provozovaných v ostrovním režimu, jsou však změny kmitočtu znatelnější, jak v době trvání, tak ve velikosti. Zařízení citlivá na změnu kmitočtu (např. časově závislé řídicí systémy a zařízení s pasivními filtry) mohou být tímto druhem rušení nepříznivě ovlivněna a vyřazena z funkce.

Rušení je reprezentováno jako sled změn kmitočtu napájecího napětí. Zařízení je nejprve provozováno při jmenovitém napájecím napětí se síťovým kmitočtem 50 Hz, poté je vystaveno sledu změn kmitočtu. Změna kmitočtu je definována jako procentní hodnota síťového kmitočtu a každá změna musí trvat alespoň 120 s a proběhnout 3x (viz. obrázek 30).



Obr. 30 – Sled změn kmitočtu [13]

Poznámky:

$f_1$  – síťový kmitočet,

$t_p$  – přechodná doba.

Procentuální hodnoty změn kmitočtu a přechodné doby mezi jednotlivými změnami pro jednotlivé úrovně jsou uvedeny v tabulce 33.

Tab. 33 – Zkušební úrovně ČSN EN 61000–4–28

Úroveň	Změna kmitočtu $\Delta f/f_1$ [%]	Doba přechodu $t_p$ [s]
1	–	–
2	$\pm 3$	10
3	+4 / -6	10
4	$\pm 15$	1

Poznámky: pro zkušební úroveň 1 se zkouška neprovádí.

Zdroj: vlastní zpracování dle [13].

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 4. Vazba se zařízením byla přímá z generátoru v módu vodič – vodič. Rušivý signál s nulovým fázovým úhlem byl injektován mezi fázový a nulový vodič napěťové soustavy  $\sim 230$  V/50 Hz. Dohromady byl rušivý signál tvořen třemi změnami kmitočtu, kdy jedna změna byla aplikována po dobu 120 s a přechodná doba mezi změnami byla 1 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulce 34.

Tab. 34 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–28

<b>Typ vazby / mód</b>	přímá vazba z generátoru / vodič – vodič
<b>Fázový úhel / doba trvání</b>	$0^\circ$ / 120 s
<b>Doba přechodu / počet změn</b>	1 s / 3
<b>Úroveň odolnosti</b>	4
<b>Zkušební hodnota</b>	$\pm 15$ %
<b>Místo rušení</b>	<b>Dosažené kritérium</b>
X11:L1 – X11:N ( $\sim 230$ V/50 Hz)	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000-4-28.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [13].

### **7.2.13 Zkouška odolnosti proti rušení harmonickými a mezipharmonickými kmitočty**

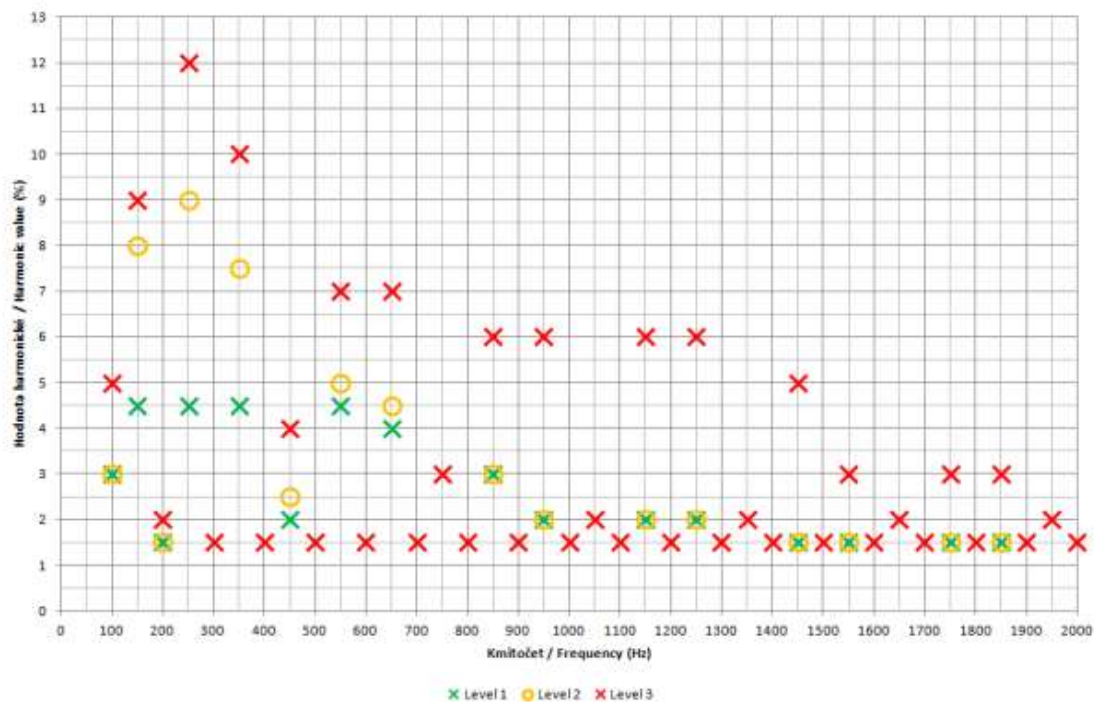
Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000-4-13. Účelem zkoušky je simulovat účinky harmonických a mezipharmonických signálů.

Harmonické signály jsou napětí a proudy sinusového průběhu, jejichž kmitočty jsou celočíselnými násobky síťového kmitočtu. Rušení těmito signály jsou způsobena zejména zařízeními s nelineárními voltampérovými charakteristikami, které generují významné harmonické a zařízeními, které mají periodické a se sítí synchronizované spínání zátěže. Harmonické proudy, které jsou generovány v zařízení výroby, přenosu a distribuce a průmyslovými a domácími spotřebiči pak vytváří v zařízení úbytky harmonických napětí.

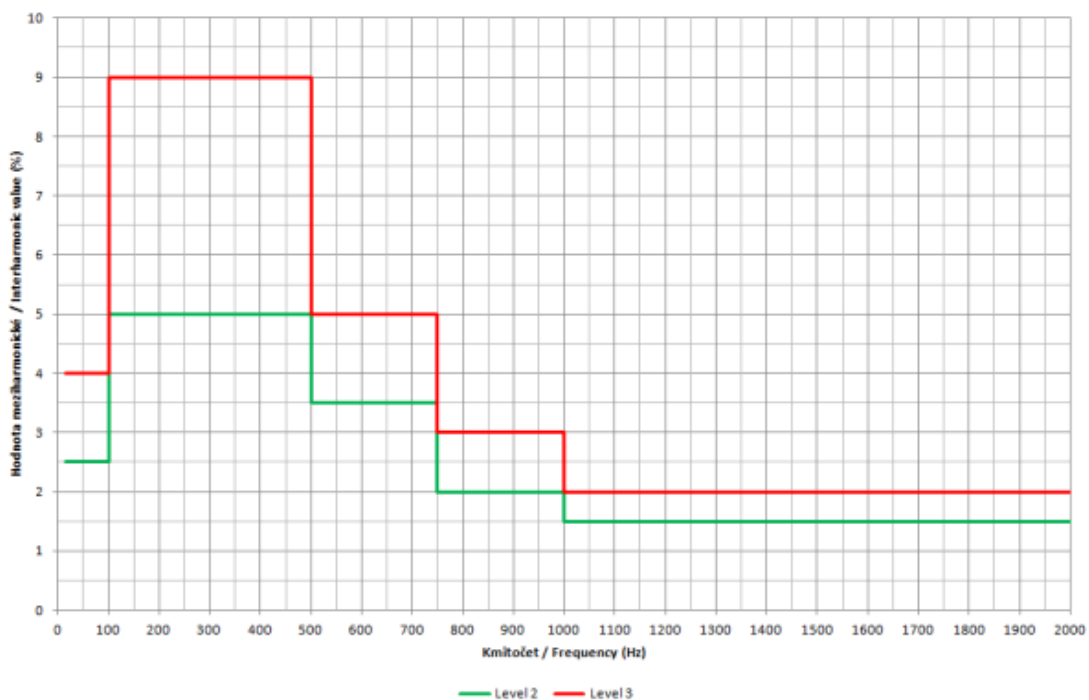
Mezipharmonické signály jsou napětí a proudy sinusového průběhu, jejichž kmitočty se nacházejí mezi kmitočty harmonických – nejsou celočíselným násobkem síťového kmitočtu. Mohou se vyskytovat buď jako celé širokopásmé spektrum, nebo jako diskrétní kmitočty. Jejich hlavními zdroji jsou svářečky, obloukové pece a nepřímé a přímé statické měřiče.

V rozvodných sítích se využívají signály o kmitočtech 110 Hz – 3 kHz, které jsou normálně mezipharmonické, za účelem přenosu informací a řídicích signálů pro ovládání zařízení (např. osvětlení či nastavení tarifu elektroměru), je kmitočtový rozsah této normy omezen na 2 kHz při síťovém kmitočtu 50 Hz.

Rušivý signál je reprezentován jako jmenovité napájecí napětí o základním kmitočtu 50 Hz, na které je superponovaný signál harmonických a mezipharmonických. Tento signál je přiveden do svorek napájecího napětí zkoušeného zařízení, které je provozováno v normálním provozním režimu. Zkušební úroveň je definována jako harmonické napětí specifikované jako procentní hodnota ze základního napětí, tedy jmenovité hodnoty napájecího napětí. Během zkoušky je nutné, aby hodnota výsledného napětí zůstala jmenovitá. Toho se docílí nastavením velikosti základního napětí a harmonických podle procent, uvedených na obrázku 31 pro harmonické a obrázku 32 pro mezipharmonické.



Obr. 31 – Zkušební úrovně harmonických pro jednotlivé zkušební úrovně [14]



Obr. 32 – Zkušební úrovně meziharmonických pro jednotlivé zkušební úrovně [14]

Na KS bylo požadováno dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 3 pro zkoušku rušení harmonickými i meziharmonickými. Vazba se zařízením byla přímá z generátoru v módu vodič – vodič. Rušivý signál s nulovým fázovým úhlem byl injektován mezi fázový a nulový vodič napěťové soustavy ~ 230 V/50 Hz po dobu 5 s. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v tabulkách 35 a 36.

Tab. 35 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–13 – rušení harmonickými kmitočty

Typ vazby / mód	přímá vazba z generátoru / vodič – vodič
Fázový úhel / doba trvání	0° / 5 s
Úroveň odolnosti	3
Místo rušení	<b>Dosažené kritérium</b>
X11:L1 – X11:N (~ 230 V/50 Hz)	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Tab. 36 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–13 – rušení mezipharmonickými kmitočty

Typ vazby / mód	přímá vazba z generátoru / vodič – vodič
Fázový úhel / doba trvání	0° / 5 s
Úroveň odolnosti	3
Místo rušení	<b>Dosažené kritérium</b>
X11:L1 – X11:N (~ 230 V/50 Hz)	A

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

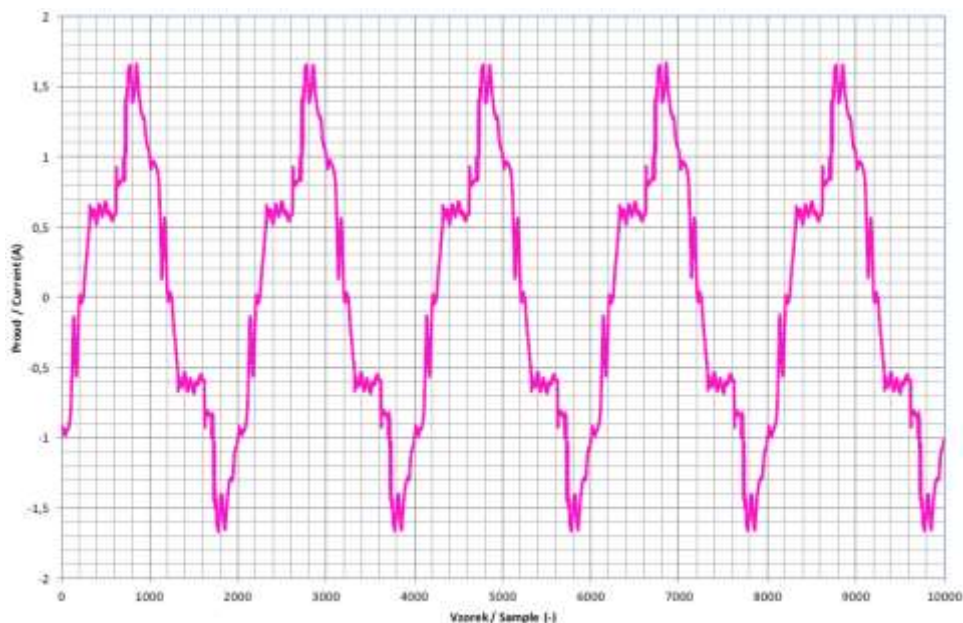
KS dosáhl ve všech požadovaných zkušebních úrovních funkčního kritéria A a úspěšně prošel zkouškou dle normy ČSN EN 61000–4–13.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [14].

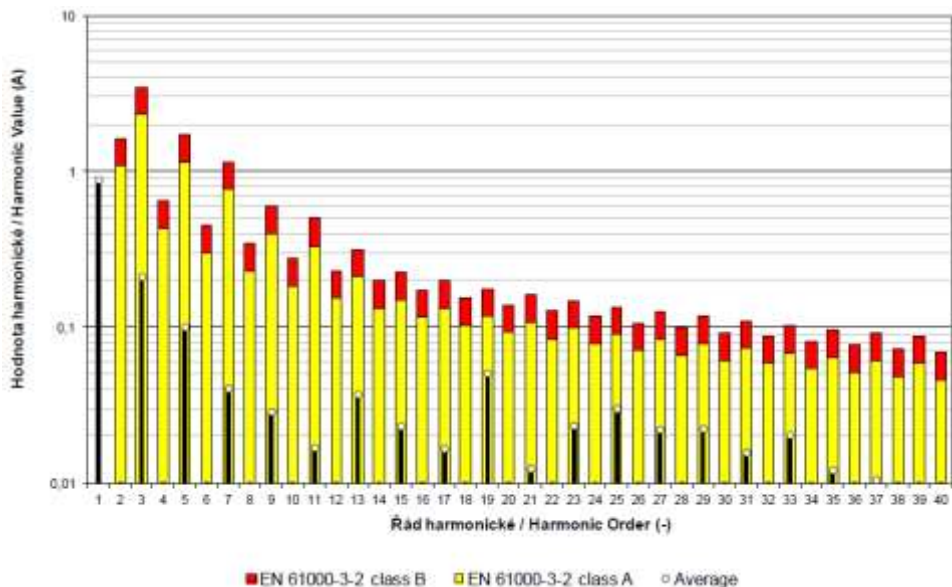
#### 7.2.14 Měření harmonických napětí a proudů a kolísání napětí

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 61000–4–7 ed.2. Účelem zkoušky je změřit emise harmonických a mezipharmonických signálů, superponovaných na základní složku napájecího napětí 50 Hz v kmitočtovém rozsahu do 9 kHz a kolísání napětí. Meze pro emise harmonických a mezipharmonických proudů jsou stanoveny normou ČSN EN 61000–3–2 ed.4, uvedeny jsou v tabulce 37. Pro kolísání napětí jsou meze stanoveny normou ČSN EN 61000–3–3 ed.3. [6]

Na KS bylo požadováno vyhovění požadavkům na emise harmonických a mezipharmonických proudů ve třídě A, dle ČSN EN 61000–3–2 ed.4. Harmonické a mezipharmonické proudy, v kmitočtovém rozsahu 50–2000 Hz, byly měřeny průměrujícím detektorem po dobu 10 s. Vazba se zařízením byla zajištěna proudovou sondou. Výsledky byly vyhodnoceny DFT analýzou časového průběhu proudu a porovnáním s kompatibilními úrovněmi. Časový průběh proudu je uveden na obrázku 33. Harmonická analýza je uvedena na obrázku 34 a její výsledky pak v tabulce 37.



Obr. 33 – Časový průběh proudu [23]



Obr. 34 – Harmonická analýza [23] [16]

Tab. 37 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000-4-7 – harmonická analýza

Parametr	Jednotka	Hodnota	Třída A	Třída B	Třída C	Třída D
Příkon	[W]	177,7	–	–	–	–
Efektivní hodnota průběhu	[A]	0,919	–	–	–	–
Efektivní hodnota základní harmonické	[A]	0,882	–	–	–	–
Činitel harmonického zkreslení THD	[%]	29	–	–	–	–
Činitel harmonického zkreslení PWHD	[%]	45,8	–	–	–	–
Činitel výkyvu	[–]	1,82	–	–	–	–
Činitel tvaru	[–]	1,13	–	–	–	–
Hodnocení dílčích harmonických	[–]		OK	OK	–	–

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

Pro měření kolísání napětí a flickr bylo na KS požadováno splnění těchto podmínek dle ČSN EN 61000–3–3 ed.3:

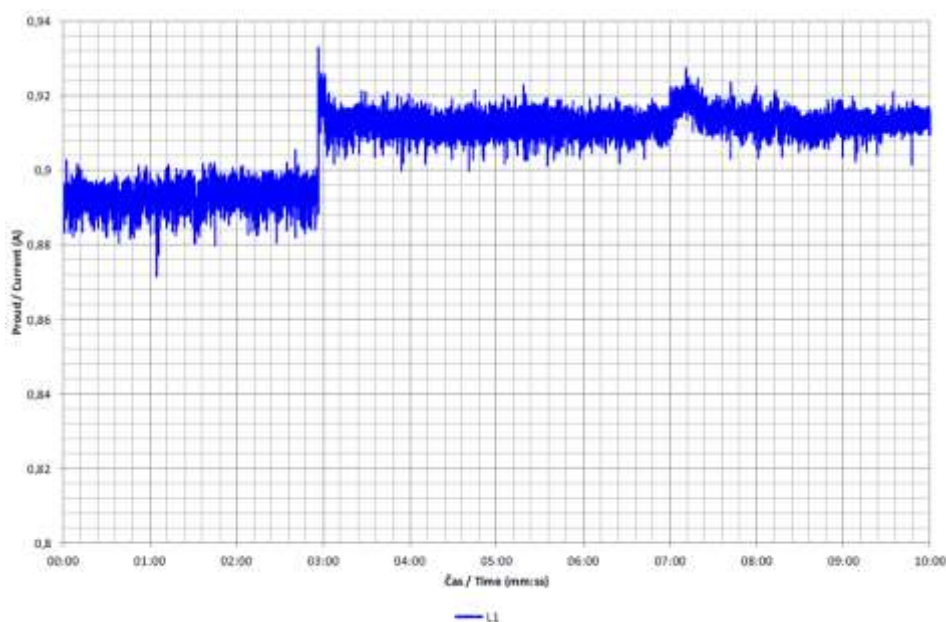
- krátkodobý nepříznivý vjem flickru  $P_{st} \leq 1$ ,
- maximální doba trvání, po kterou odchylka napětí, během doby sledování, překračuje mez pro maximální změnu ustáleného stavu napětí ( $d_{c\ max} \leq 3,3\%$ )  $T_{\max(3,3\%)} \leq 500\ ms$ ,
- maximální absolutní hodnota změny napětí během doby sledování  $d_{\max} \leq 4\ \%$ .

Vazba se zařízením byla zprostředkována pomocí proudové sondy, rušení pak bylo detekováno vzorkujícím detektorem a detektorem umožňujícím výpočet RMS po dobu 600 s. Výsledky byly vyhodnoceny flickr analýzou časového průběhu proudu a následným porovnáním vypočtených hodnot s kompatibilními úrovněmi. Výsledky flickr analýzy jsou uvedeny v tabulce 38, časový průběh proudu pak na obrázku 35.

Tab. 38 – Výsledky zkoušky ČSN EN 61000–4–7 – flickr analýza

Parametr	Označení	Jednotka	Hodnota	Limit	Klasifikace
Průměrná hodnota napětí	U	[V]	229,6	–	–
Nejčtenější hodnota napětí	U	[V]	229,6	–	–
Minimální hodnota napětí	U	[V]	229,6	207	OK
Maximální hodnota napětí	U	[V]	229,6	253	OK
Doba měření	T	[h]	0:10:00	–	–
Krátkodobá míra vjemu	$P_{st}$	[–]	0	1	OK
Max. relativní změna	$d_{\max}$	[%]	0	4	OK
Max. změna ustáleného stavu	$d_{c\ max}$	[%]	0	3,3	OK
Max. doba pro $d(t) > 3,3\ \%$	$t_{\max(3,3\%)}$	[s]	0	0,5	OK

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



Obr. 35 – Časový průběh proudu [23]

KS vyhověl jak emisním požadavkům dle normy ČSN EN 61000–3–2 ed.4 pro harmonické a meziharmonické proudy, tak emisním požadavkům dle normy ČSN EN 61000–3–3 ed.3 pro měření kolísání napětí a flikru.

Kapitola byla vypracována na základě [16], [17] a [23].

### 7.2.15 Měření rušivého svorkového napětí šířeného vedením

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 55016–2–1 ed.3. Účelem zkoušky je změřit emise rušivého svorkové napětí v kmitočtovém rozsahu 150 kHz až 30 MHz, které se šíří vedením. Meze pro emise rušivých napětí pro jednotlivé kmitočtové intervaly jsou stanoveny normou ČSN EN 55011 ed.4. Pro zařízení třídy A jsou uvedeny v tabulce 39.

Tab. 39 – Mezní hodnoty rušivých napětí pro zařízení třídy A

Kmitočtový rozsah [MHz]	Jmenovitý příkon zařízení ≤ 20 kVA	
	Kvazivrcholová [dBμV]	Střední [dBμV]
0,15 až 0,5	79	66
0,5 až 5	73	60
5 až 30	73	60

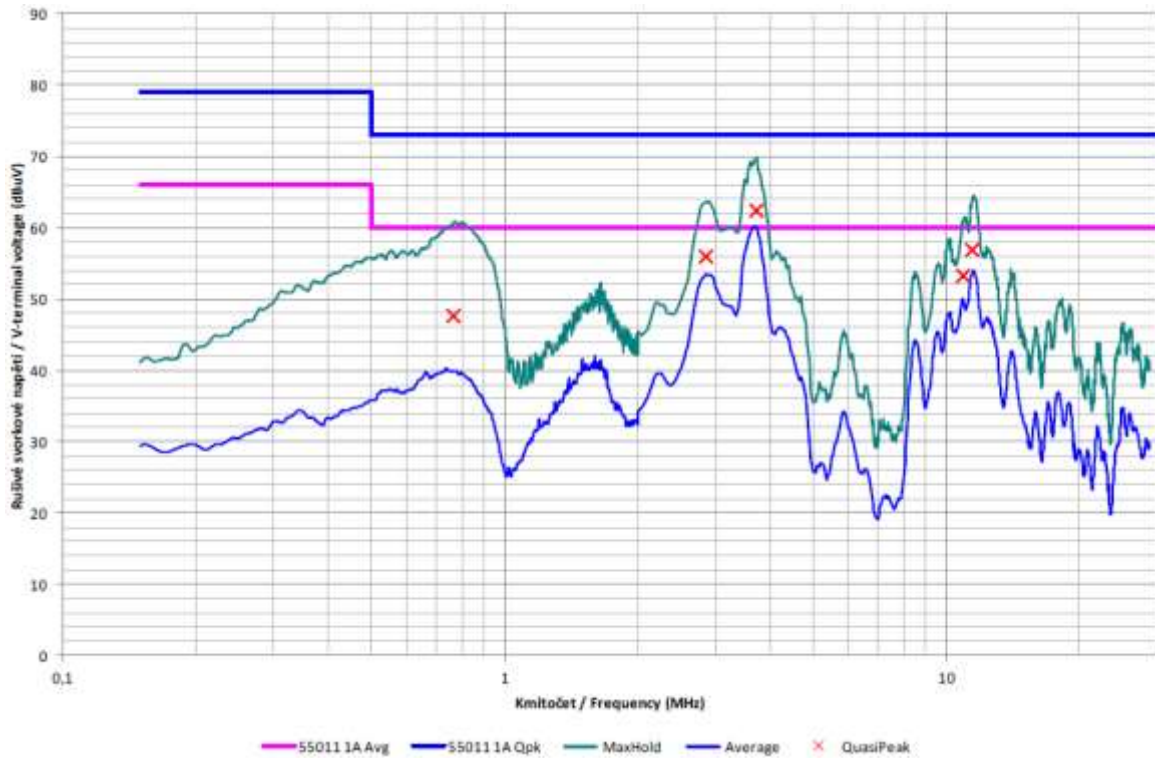
Zdroj: vlastní zpracování dle [15].

Na KS bylo požadováno vyhovění emisním požadavkům třídy A, normy ČSN EN 55011 ed.4. Vazba se zařízením byla zajištěna pomocí napěťové sondy v módu vodič – zem. Rušivé svorkové napětí v rozsahu 150 kHz až 30 MHz bylo detekováno vrcholovým detektorem a detektorem střední hodnoty. Na kmitočtech, při kterých vrcholová hodnota dosáhla limitu, byla provedena zkouška kvazivrcholovým detektorem. Zkouška byla provedena u všech kabelů přívodního napájecího napětí. Maximální naměřené hodnoty pro fázový a nulový vodič jsou uvedeny v tabulkách 40 a 41, frekvenční charakteristiky rušivého svorkového napětí pro fázový a nulový vodič jsou uvedeny na obrázcích 36 a 37.

Tab. 40 – Výpis maximálních naměřených hodnot ve vodiči L

Frekvence [MHz]	PeakDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dB $\mu$ V]
3,717	69,8	3,68	60,3	3,717	62,4
11,557	64,6	11,52	54,1	11,445	56,9
2,859	63,7	2,859	53,5	2,859	55,9
10,96	61,4	10,213	48,1	10,923	53,2
0,774	60,8	12,379	47,5	0,767	47,6
0,806	60,7	9,504	45,5	–	–
10,213	58,5	8,496	44,1	–	–
12,341	57,2	13,984	42,7	–	–
0,619	56,8	1,6	42	–	–
0,557	56,7	1,499	41,6	–	–

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



Obr. 36 – Frekvenční charakteristika rušivého svorkového napětí ve vodiči L [23]



Tab. 41 – Výpis maximálních naměřených hodnot ve vodiči N

Frekvence [MHz]	PeakDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dB $\mu$ V]
3,717	69,2	3,717	60	3,643	61,8
10,176	63,4	2,896	53,4	2,933	54,9
2,896	62,9	10,213	52,8	10,139	54,7
0,791	61,6	12,752	49,3	0,767	47,8
12,752	59,3	8,496	44,1	0,732	47,6
0,601	57,9	0,663	42,1	0,841	46,3
0,55	57,8	13,835	41,6	–	–
8,459	54	0,759	41	–	–
13,872	52	1,6	39,7	–	–
1,677	50,5	1,699	39,6	–	–

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



Obr. 37 – Frekvenční charakteristika rušivého svorkového napětí ve vodiči N [23]

Z frekvenčních charakteristik je v obou případech zřejmé, že rušivé svorkové napětí v několika případech při měření vrcholovým detektorem překročilo povolené meze. Na těchto kmitočtech byla poté provedena zkouška kvazivrcholovým detektorem. Po provedení této zkoušky byly všechny kvazivrcholové hodnoty pod normou stanovenou limitou. Při měření průměrujícím detektorem bylo zaznamenáno překročení povolené meze rušení 60 dB pouze při frekvenci 3,68 MHz při měření na vodiči L. Na této frekvenci bylo naměřeno



rušení 60,3 dB $\mu$ V. Po započtení nejistoty měření  $\pm 3,2$  dB byla na základě praktických zkušeností a porovnání s frekvenční charakteristikou pozadí hodnota tohoto rušení vyhodnocena firmou ABEGU a.s. jako vyhovující. KS vyhověl emisním požadavkům pro zařízení třídy A dle normy ČSN EN 55011 ed.4.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [15].

### 7.2.16 Měření elektromagnetických polí

Metodika zkoušky vychází z normy ČSN EN 55016–2–3 ed.3. Účelem zkoušky je změřit emise vyzařovaného elektromagnetického záření v kmitočtovém rozsahu 150 kHz až 1 GHz. Pro kmitočtové pásmo 150 kHz až 30 MHz nejsou stanoveny žádné meze, měření se tedy provádí od 30 MHz až do zmiňovaného 1 GHz. Meze pro emise vyzařování elektromagnetického záření jsou staveny normou ČSN EN 55011 ed.4. Pro zařízení třídy A jsou uvedeny v tabulce 42.

Tab. 42 – Mezní hodnoty rušivého elektromagnetického vyzařování pro zařízení třídy A

Kmitočtový rozsah [MHz]	Jmenovitý příkon zařízení $\leq 20$ kVA
	Kvazivrcholová [dB $\mu$ V/m]
30 až 230	40
230 až 1000	47

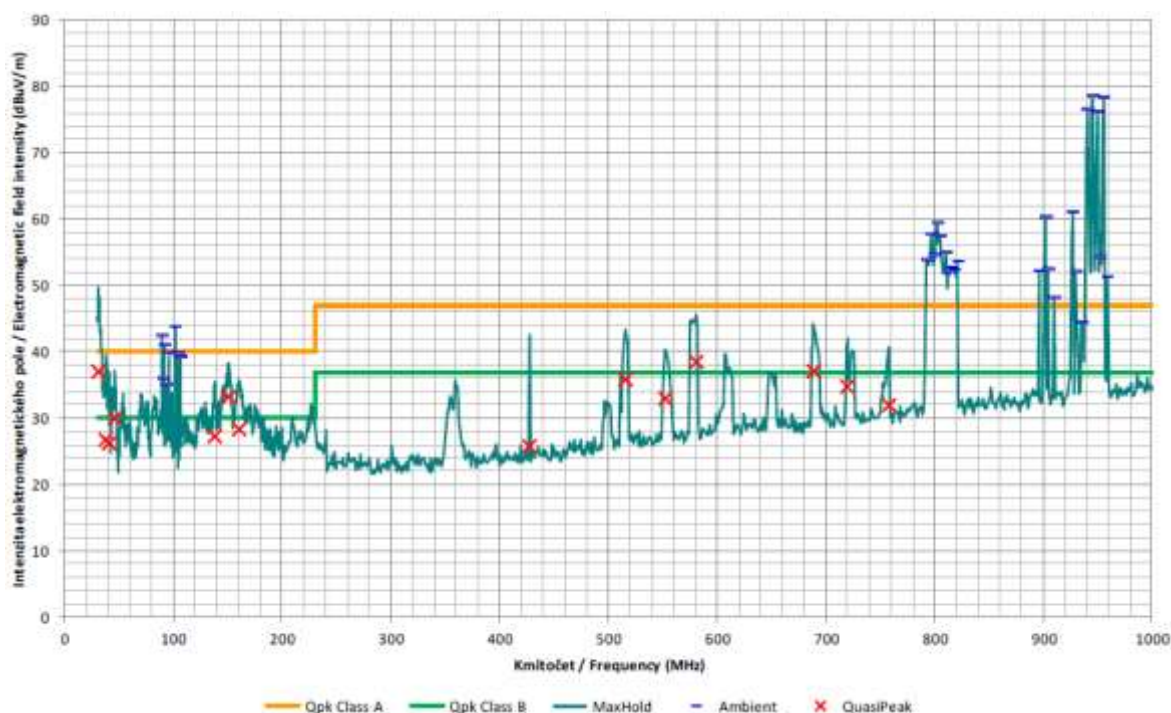
Poznámky: uvedené hodnoty jsou pro jmenovitou měřicí vzdálenost 10 m.  
Zdroj: vlastní zpracování dle [15].

Na KS bylo požadováno vyhovění emisním požadavkům třídy A, normy ČSN EN 55011 ed.4. Vazba se zařízením byla pomocí vyzařovaného pole, kdy polarizace antény vůči zařízení byla horizontální i vertikální. Anténa byla umístěna ve výšce 1 – 2,5 m a vzdálenosti 3 m od zařízení. Pro detekci rušivého signálu v kmitočtovém pásmu 30–1000 MHz byl použit vrcholový detektor. Na kmitočtech, při kterých vrcholová hodnota dosáhla limitu, byla provedena zkouška kvazivrcholovým detektorem. Zkouška byla provedena pro přední a zadní stranu KS. Jelikož byla zkouška provedena v nestíněném prostředí, pro vyhodnocení rádiového rušení na kmitočtech ovlivněných okolními signály byla použita metodika dle přílohy A normy ČSN EN 55016–2–3 ed.4. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v příloze B diplomové práce, v tabulce 43 je pak typový příklad. Frekvenční charakteristiky rušivého elektromagnetického pole jsou uvedeny v příloze B, na obrázcích 38 je pak typový příklad.

Tab. 43 – Výpis maximálních naměřených hodnot – přední strana, horizontální polarizace

Frekvence [MHz]	PeakDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dB $\mu$ V]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dB $\mu$ V]
802,667	59,5	803,733	42,6	802,667	46,3
820,8	53,7	577,6	36,5	580,8	38,4
30,907	49,6	688,533	34,8	688,533	37,1
580,8	45,6	516,8	34,3	30,907	37
688,533	44,3	150,587	33	515,733	35,8
515,733	43,2	30,907	32,8	719,467	34,7
427,2	42,5	719,467	32,5	150,587	33,2
719,467	42	756,8	30,7	552	32,9
757,867	40,7	552	30,6	757,867	31,9
552	40,3	607,467	29,8	46,093	30

Zdroj: vlastní zpracování dle [23]



Obr. 38 – Frekvenční charakteristika elektromagnetického pole – přední strana, horizontální polarizace [23]

V grafech frekvenčních charakteristik elektromagnetického pole pro přední a zadní stranu KS s vertikální polarizací antény je vidět, že na frekvenci okolo 30 MHz bylo naměřeno vrcholovým detektorem rušení přesahující povolenou mez. Rušení na této frekvenci bylo následně změřeno kvazivrcholovým detektorem, ale i zde hodnota rušení přesáhla limit, viz příloha B obrázek 1 a 3. Zdrojem tohoto rušení je pravděpodobně KS, a proto je nutné lokalizovat a eliminovat zdroj tohoto rušení. Pro lokalizaci zdroje navrhuji použít sondu blízkého pole se spektrálním analyzátozem. Sondy blízkého pole slouží k měření rušení dílčích komponent, či samotných součástí uvnitř zařízení. Ačkoliv je měření pomocí sond blízkých polí spíše orientační, pro lokalizaci zdroje je dostačující.

Pokud je zdrojem rušení některý z přístrojů uvnitř KS, je pro jeho odrušení nutné nainstalovat filtrační zařízení. Jedná-li se o samotný vodič, chovající se jako anténa, je nutné ho nahradit vodičem stíněným, či použít feritové kroužky. Z časových a finančních důvodů nebyla tato identifikace zatím uskutečněna, ačkoliv do budoucna je pro vyhovění KS nutná.

Dále je možné vidět ve všech grafech frekvenčních charakteristik elektromagnetického pole vrcholy, které také přesahují, či se blíží k mezi stanovené normou. Na kmitočtech kolem 40 MHz se nejspíše jedná o vnitřní rušení, vrcholy okolo 150 MHz pak byly pravděpodobně způsobeny zdrojem napětí. Další hodnoty, které přesáhly normovanou hodnotu rušení, pohybující se od 400 MHz do 760 MHz, byly způsobeny televizním vysílačem. Tyto vrcholy, ať už blíží se či přesahující meze rušení, byly otestovány kvazivrcholovým detektorem a vyhodnoceny jako vyhovující vzhledem k normou stanoveným mezím.

Vrcholy kolem kmitočtu 100 MHz byly způsobeny vysíláním FM rádií. Vrcholy okolo kmitočtu 800 MHz (LTE pásmo 20) a okolo kmitočtu 900 MHz (GPRS, EDGE) byly způsobeny telefonními radiovémi signály, a to kvůli přítomnosti vysílače a přijímače radiových signálů BTS mobilního operátora.

Kvůli překročení mezních hodnot vyzařovaného rušení na frekvenci 30 MHz KS nevyhověl emisním požadavkům pro zařízení třídy A dle normy ČSN EN 55011 ed.4. V místě instalace je proto možné, že bude díky vyzařovanému elektromagnetickému poli zhoršený lokální radiový příjem.

Kapitola byla vypracována na základě [23] a [15].

## **Závěr**

Cílem práce bylo sestavit seznam zkoušek elektromagnetické kompatibility, aplikovat tyto zkoušky na kvalifikační stand a navrhnout modifikace, které by případné nedostatky vylepšily, či eliminovaly. Seznam těchto zkoušek byl sestaven na základě poskytnutých podkladů od zákazníka a vybráním vhodných, ekvivalentních zkoušek ze sad norem ČSN EN 61000–4, ČSN EN 55016–2 a normy ČSN EN 55011. Přehled všech zkoušek odolnosti a měření emisí je uveden v tabulce 44, včetně jejich výsledků.

Kvalifikační stand vyhověl, kromě jednoho případu, ve všech požadovaných zkušebních úrovních všech zkoušek odolnosti. Při zkoušení odolnosti proti rušení šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli dle normy ČSN EN 61000–4–6 ed.4, dosáhlo zařízení ve zkušební úrovni 3 pouze funkčního kritéria B. Při aplikaci rušivého signálu na kabel analogového vstupu měření polohy byla zaznamenána dočasná ztráta informace o stavu kvalifikačního standu a značné kolísání hodnoty polohy čidla. Tyto změny byly zpozorovány při rušení v kmitočtovém rozsahu 4–17 MHz. Při aplikaci rušivého signálu na kabel výstupu k motoru byla zpozorována změna stavu u některých monitorovacích relé, která začala nekontrolovaně spínat a systém vyhodnocoval a indikoval poruchu. Tyto změny se projevovaly při rušení v kmitočtovém rozsahu 10–70 MHz.

Zaznamenané nepříznivé stavy byly zapříčiněny způsobem uložení obou kabelů, které byly smotány do kabelového svazku. I přes to, že oba kabely byly stíněny a zapojeny do galvanicky oddělených svorkovnic, rušivý signál se i tak při aplikaci do jednoho kabelu naindukoval do druhého.

Řešením pro kabel analogového vstupu měření polohy by bylo nainstalování pasivního filtru WE–MAPI–SMD Shielded Power Inductor, který by měl zaručit dosažení funkčního kritéria A ve zkušební úrovni 3. Pro kabel výstupu k motoru nebylo navrženo žádné řešení, a to z důvodu, že u kompletního systému EXMAB budou subsystémy MAB a IPMAB fyzicky odděleny (každý v jiné místnosti) a výše zmíněné kabely tedy nebudou tvořit kabelový svazek.

Kvalifikační stand nevyhověl při měření emisí elektromagnetických polí dle normy ČSN EN 55016–2–3 ed.3 požadavkům na zařízení třídy A. Na kmitočtu okolo 30 MHz, při měření přední i zadní strany kvalifikačního standu s vertikálně polarizovanou anténou, byl naměřen vyzařovaný rušivý signál přesahující normou stanovenou mez 40 dB. Řešení by spočívalo v lokalizaci zdroje rušení pomocí sondy blízkých polí a spektrálního analyzátoru. Pro

eliminaci rušení by bylo pak nutné, dle typu zdroje, nainstalovat filtrační zařízení, použít stíněné vodiče, či aplikovat feritové kroužky na vodiče stávající.

Dodatečné zkoušky odolnosti a měření emisí, pro ověření výše zmíněných modifikací, zatím nebylo z časových a finančních důvodů možné realizovat.

Tab. 44 – Přehled výsledků zkoušek odolnosti a měření emisí

Zkoušky odolnosti							
Pořadí	Zkušební předpis	Zkušební úrovně					Poznámka
		1	2	3	4	5	
1	ČSN EN 61000-4-2 ed.2	A	A	A	A	–	Vzduchový výboj
		A	A	A	A	–	Kontaktní výboj
2	ČSN EN 61000-4-3 ed.3	–	–	A	–	–	<1 GHz
		–	–	–	A	–	0,8–2 GHz, 20 V/m
		–	–	A	–	–	2–4 GHz
3	ČSN EN 61000-4-4 ed.3	A	A	A	A	–	Napájení
		–	A	A	A	–	Vstupy/výstupy
4	ČSN EN 61000-4-5 ed.3	A	A	A	–	–	Napájení
		–	A	A	–	–	Vstupy/výstupy
5	ČSN EN 61000-4-6 ed.4	–	–	A	–	–	Napájení
		–	A	B	–	–	Vstupy/výstupy
6	ČSN EN 61000-4-8 ed.2	–	–	–	–	A	Síťový kmitočet
7	ČSN EN 61000-4-9 ed.2	–	–	–	–	A	
8	ČSN EN 61000-4-10 ed.2	–	–	–	–	A	
9	ČSN EN 61000-4-16 ed.2	–	–	A	A	–	Napájení
		–	A	A	–	–	Vstupy/výstupy
10	ČSN EN 61000-4-18	–	A	A	–	–	Napájení
		–	A	A	–	–	Vstupy/výstupy
11	ČSN EN 61000-4-14	–	–	–	A	–	Kolísání ±20 %
12	ČSN EN 61000-4-28	–	–	–	A	–	
13	ČSN EN 61000-4-13	–	–	A	–	–	
Měření emisí							
Pořadí	Zkušební předpis	Výsledky zkoušek					Poznámka
1	ČSN EN 61000-4-7 ed.2	Třída A					
	ČSN EN 61000-3-2 ed.4						
	ČSN EN 61000-3-3 ed.3						
2	ČSN EN 55011 ed.4	Třída A					Rušivé svorkové napětí
	ČSN EN 55016-2-1 ed.3						
3	ČSN EN 55011 ed.4	Třída < A					Vyzařování elektromagnetického pole
	ČSN EN 55016-2-3 ed.3						

Poznámky: „–“ znamená, že zkouška nebyla aplikována, požadována nebo definována.  
Zdroj: vlastní zpracování.

## Zdroje

- [1] ČSN EN 61000-4-2 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-2: Zkušební a měřicí technika – Elektrostatický výboj – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [2] ČSN EN 61000-4-3 ED.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-3: Zkušební a měřicí technika – Vyzařované vysokofrekvenční elektromagnetické pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [3] ČSN EN 61000-4-4 ED.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-4: Zkušební a měřicí technika – Rychlé elektrické přechodné jevy/skupiny impulzů – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [4] ČSN EN 61000-4-5 ED.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-5: Zkušební a měřicí technika – Rázový impulz – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [5] ČSN EN 61000-4-6 ED.4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-6: Zkušební a měřicí technika – Odolnost proti rušením šířeným vedením, indukovaným vysokofrekvenčními poli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [6] ČSN EN 61000-4-7 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-7: Zkušební a měřicí technika – Všeobecná směrnice o měření a měřicích přístrojích harmonických a meziharmonických pro rozvodné sítě a zařízení připojovaná do nich*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [7] ČSN EN 61000-4-8 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-8: Zkušební a měřicí technika – Magnetické pole síťového kmitočtu – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [8] ČSN EN 61000-4-9 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-9: Zkušební a měřicí technika – Pulzy magnetického pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

- [9] ČSN EN 61000–4–10 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–10: Zkušební a měřicí technika – Tlumené kmity magnetického pole – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [10] ČSN EN 61000–4–16 ED.2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–16: Zkušební a měřicí technika – Zkouška odolnosti proti nesymetrickým rušením šířeným vedením v kmitočtovém rozsahu 0 Hz až 150 kHz*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [11] ČSN EN 61000–4–18. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–18: Zkušební a měřicí technika – Tlumená oscilační vlna – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [12] ČSN EN 61000–4–14. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–14: Zkušební a měřicí technika – Kolísání napětí – Zkouška odolnosti pro zařízení se vstupním fázovým proudem nepřekračujícím 16 A*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- [13] ČSN EN 61000–4–28. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–28: Zkušební a měřicí technika – Kolísání síťového kmitočtu – Zkouška odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2001.
- [14] ČSN EN 61000–4–13. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4–13: Zkušební a měřicí technika – Harmonické a meziharmonické včetně signálů v rozvodných sítích na střídavém vstupu/výstupu napájení – Nízkofrekvenční zkoušky odolnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003.
- [15] ČSN EN 55011 ED.4. *Průmyslová, vědecká a zdravotnická zařízení – Charakteristiky vysokofrekvenčního rušení – Meze a metody měření*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [16] ČSN EN 61000–3–2 ED.4. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3–2: Meze – Meze pro emise proudu harmonických (zařízení se vstupním fázovým proudem  $\leq 16$  A)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

- [17] ČSN EN 61000–3–3 ED.3. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 3–3: Meze – Omezování změn napětí, kolísání napětí a flikru v rozvodných sítích nízkého napětí pro zařízení se jmenovitým fázovým proudem  $\leq 16$  A, které není předmětem podmíněného připojení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
- [18] DRÍNOVSKÝ, Jiří, Tomáš FRÝZA, Václav RŮŽEK a Jiří ZACHAR. *Elektromagnetická kompatibilita: Přednášky ver. 2017/10/06*. Brno, 2017. Přednášky. Vysoké učení technické v Brně.
- [19] GAZOLA ANDRADE, Cleber. *PRIMARY – ROD ACTIVATION MECHANISM EXCITER (EXMAB): TECHNICAL SPECIFICATION*. São Paulo, Brazílie, 2013.
- [20] PAUL, Clayton R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Second Edition. New Jersey: Wiley, 2006. ISBN 9780471549277.
- [21] ŘÍŠ, Miroslav. *COMPACT SOLUTION OF IPMAB TESTING SYSTEM*. Plzeň, 2018.
- [22] SHANK, J. a J. CUNNINGHAM. *Guidelines for Electromagnetic Interference Testing of Power Plant*. Revision 3 to TR–102323. United States, 2004. 10.2172/837279.
- [23] ŠŤASTNÝ, Zdeněk. *Protokol o zkoušce č. P/19/01/03*. Desná, 2019.
- [24] VACULÍK, Emil a Polina VACULÍKOVÁ. *Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů: praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vřrušení*. Praha: Grada, 1998. ISBN 8071695688.
- [25] *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 1 – Základní pojmy a členění oboru EMC* [online]. Brno: Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., 2000 [cit. 2019–02–26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [26] *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 2 – Zdroje rušivých signálů a vazební mechanismy jejich přenosu* [online]. Brno: Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., 2000 [cit. 2019–02–26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00031/index.htm>
- [27] *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 3: Způsoby omezování rušení – odrušovací prostředky a elektromagnetické stínění* [online]. Brno: Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., 2000 [cit. 2019–02–26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00041/index.html>
- [28] *Základy elektromagnetické kompatibility: Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů* [online]. Brno: Prof. Ing. Jiří Svačina, CSc., 2001 [cit. 2019–02–26]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>



## Seznam symbolů a zkratek

B .....	Magnetická indukce [T]
E.....	Elektrická intenzita [V/m]
H.....	Intenzita magnetického pole [A/m]
I.....	Proud [A]
r.....	Poloměr kružnice [m]
S.....	Plocha [m <sup>2</sup> ]
U <sub>i</sub> .....	Indukované napětí [V]
Φ.....	Magnetický tok [Wb]
μ <sub>0</sub> .....	Relativní permeabilita [-]
Δ.....	Změna [-]
AM.....	Amplitudová modulace
AMN (LISN) .....	Umělá síť
EMC .....	Elektromagnetická kompatibilita
EMI.....	Elektromagnetická interference
EMS .....	Elektromagnetická susceptibilita
ESD.....	Lokální elektrostatický výboj
EXMAB.....	Řídicí systém experimentálního reaktoru PWR
HMI .....	Rozhraní člověk – stroj
KS.....	Kvalifikační stend
LABGENE .....	Laboratoř pro výrobu elektřiny
LEMP .....	Elektromagnetický impuls způsobený bleskem
MAB .....	Aktivační mechanismus regulačních tyčí
NEMP.....	Nukleární elektromagnetický impuls
PEU.....	Jednotka vyhodnocení polohy

## Seznam obrázků

OBR. 1 – ZÁKLADNÍ ŘETĚZEC EMC.....	14
OBR. 2 – DEFINICE ÚROVNÍ A MEZÍ VYZAŘOVÁNÍ A ODOLNOSTI [18] .....	16
OBR. 3 – KLASIFIKACE INTERFERENCEČNÍCH SIGNÁLŮ .....	17
OBR. 4 – DEFORMACE KŘIVKY NAPĚTÍ SÍTĚ RUŠIVÝMI SIGNÁLY [24].....	18
OBR. 5 – VAZBA SPOLEČNOU IMPEDANCÍ NAPÁJECÍ SÍT .....	21
OBR. 6 – VAZBA SPOLEČNOU IMPEDANCÍ ZEMNÍČÍHO SYSTÉMU .....	22
OBR. 7 – VAZBA SPOLEČNOU IMPEDANCÍ ZPĚTNÉHO VODIČE.....	22
OBR. 8 – VAZBA SPOLEČNOU IMPEDANCÍ MEZI ZDROJEM A PŘIJÍMAČEM RUŠENÍ..	23
OBR. 9 – INDUKČNÍ VAZBA .....	25
OBR. 10 – VAZBA VYZAŘOVÁNÍM ELEKTROMAGNETICKÝM POLEM.....	27
OBR. 11 – BLOKOVÉ SCHÉMA UMĚLÉ SÍTĚ.....	28
OBR. 12 – ZAPOJENÍ JEDNOFÁZOVÉ UMĚLÉ SÍTĚ PRO KMITOČTOVÉ PÁSMO 10 KHZ ÷ 30 MHZ [28].....	29
OBR. 13 – OBECNÉ SCHÉMATICKÉ ZAPOJENÍ NAPĚŤOVÉ SONDY [24] .....	30
OBR. 14 – MĚŘENÍ RUŠIVÉHO PROUDU PROUDOVOU SONDOU [28] .....	31
OBR. 15 – KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ ABSORPČNÍCH KLEŠTÍ [24] .....	32
OBR. 16 – ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍ TLUMIVKA.....	34
OBR. 17 – ZAPOJENÍ ODRUŠOVACÍHO KONDENZÁTORU .....	36
OBR. 18 – PRINCIPIÁLNÍ ZAPOJENÍ FILTRU MEZI ZDROJ A PŘIJÍMAČ RUŠENÍ .....	37
OBR. 19 – KOMBINOVANÁ PŘEPĚŤOVÁ OCHRANA .....	38
OBR. 20 – BLOKOVÉ SCHÉMA KVALIFIKAČNÍHO STENDU [21] .....	43
OBR. 21 – IDEÁLNÍ PRŮBĚH PROUDOVÉHO IMPULSU PRO ZKOUŠKU KONTAKTNÍM VÝBOJEM SE ZKUŠEBNÍM NAPĚTÍM 4 KV [1] .....	49
OBR. 22 – NEMODULOVANÝ VF SIGNÁL A MODULOVANÝ VF SIGNÁL 80 % AM [2]..	51
OBR. 23 – ČASOVÉ PRŮBĚHY RYCHLÉHO ELEKTRICKÉHO PŘECHODOVÉHO JEVU A SKUPINY IMPULSŮ [3].....	53
OBR. 24 – NAPĚŤOVÁ VLNA (1,2/50 $\mu$ S) NA VÝSTUPU GENERÁTORU NAPRÁZDNO [4] .....	55
OBR. 25 – PROUDOVÁ VLNA (8/20 $\mu$ S) NA VÝSTUPU GENERÁTORU NAKRÁTKO [4]..	55
OBR. 26 – TVAR OSCILAČNÍ VLNY [9].....	62
OBR. 27 – ZKUŠEBNÍ NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA ZMĚNĚ FREKVENCE.....	64
OBR. 28 – TVAR TLUMENÉ OSCILAČNÍ VLNY [11].....	67
OBR. 29 – ČASOVÝ PRŮBĚH ZKOUŠKY [12].....	70
OBR. 30 – SLED ZMĚN KMITOČTU [13].....	72

OBR. 31 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ HARMONICKÝCH PRO JEDNOTLIVÉ ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ .....	74
OBR. 32 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ MEZIHARMONICKÝCH PRO JEDNOTLIVÉ ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ .....	74
OBR. 33 – ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU [23] .....	76
OBR. 34 – HARMONICKÁ ANALÝZA [23] [16].....	76
OBR. 35 – ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDU [23] .....	77
OBR. 36 – FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA RUŠIVÉHO SVORKOVÉHO NAPĚTÍ VE VODIČI L [23].....	79
OBR. 37 – FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA RUŠIVÉHO SVORKOVÉHO NAPĚTÍ VE VODIČI N [23].....	80
OBR. 38 – FREKVENČNÍ CHARAKTERISTIKA ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE – PŘEDNÍ STRANA, HORIZONTÁLNÍ POLARIZACE [23] .....	82

## Seznam tabulek

TAB. 1 – SROVNÁNÍ NUKLEÁRNÍHO A BLESKOVÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO IMPULSU.....	20
TAB. 2 – PARAMETRY PRŮBĚHU KONTAKTNÍHO VÝBOJE.....	48
TAB. 3 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-2.....	49
TAB. 4 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-2 – VZDUCHOVÝ VÝBOJ.....	50
TAB. 5 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-2 – KONTAKTNÍ VÝBOJ.....	50
TAB. 6 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ VZTAHUJÍCÍ SE NA VŠEOBECNÉ ÚČELY, DIGITÁLNÍ RADIOTELEFONY A JINÉ PŘÍSTROJE S VYSOKOFREKVENČNÍM VYZAŘOVÁNÍM ČSN EN 61000-4-3.....	50
TAB. 7 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-3.....	52
TAB. 8 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4.....	53
TAB. 9 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4 – VAZBA KAPACITNÍ SONDOU.....	54
TAB. 10 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4 – VAZBA VAZEBNÍMI KLEŠTĚMI.....	54
TAB. 11 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-5.....	56
TAB. 12 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-5 – NAPĚŤOVÁ VLNA NA VÝSTUPU GENERÁTORU NAPRÁZDNO.....	56
TAB. 13 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-5 – PROUDOVÁ VLNA NA VÝSTUPU GENERÁTORU NAKRÁTKO.....	57
TAB. 14 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-6.....	57
TAB. 15 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-6.....	58
TAB. 16 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-8.....	59
TAB. 17 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-8.....	60
TAB. 18 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-9.....	61
TAB. 19 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-9.....	61
TAB. 20 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-10.....	62
TAB. 21 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-10.....	63
TAB. 22 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-16 – RUŠENÍ SIGNÁLEM SÍŤOVÉHO KMITOČTU.....	64
TAB. 23 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-16 – RUŠENÍ SIGNÁLEM 15 HZ – 150 KHZ.....	65
TAB. 24 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-16 – RUŠENÍ SIGNÁLEM SÍŤOVÉHO KMITOČTU.....	65
TAB. 25 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-16 – RUŠENÍ SIGNÁLEM V KMITOČTOVÉM ROZSAHU 15 HZ – 150 KHZ.....	66

TAB. 26 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-18 – POMALÁ TLUMENÁ OSCILAČNÍ VLNA.....	67
TAB. 27– ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-18 – RYCHLÁ TLUMENÁ OSCILAČNÍ VLNA.....	67
TAB. 28 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-18 – NESYMETRICKÉ RUŠENÍ DO PŘÍVODNÍCH NAPĚŤOVÝCH SVOREK .....	68
TAB. 29 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-18 – NESYMETRICKÉ RUŠENÍ DO KABELŮ.....	69
TAB. 30 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-18 – SYMETRICKÉ RUŠENÍ DO PŘÍVODNÍCH NAPĚŤOVÝCH SVOREK .....	69
TAB. 31 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-14 .....	70
TAB. 32 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-14 .....	71
TAB. 33 – ZKUŠEBNÍ ÚROVNĚ ČSN EN 61000-4-28 .....	72
TAB. 34 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-28 .....	72
TAB. 35 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-13 – RUŠENÍ HARMONICKÝMI KMITOČTY .....	75
TAB. 36 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-13 – RUŠENÍ MEZIHARMONICKÝMI KMITOČTY .....	75
TAB. 37 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-7 – HARMONICKÁ ANALÝZA.....	76
TAB. 38 – VÝSLEDKY ZKOUŠKY ČSN EN 61000-4-7 – FLIKR ANALÝZA.....	77
TAB. 39 – MEZNÍ HODNOTY RUŠIVÝCH NAPĚTÍ PRO ZAŘÍZENÍ TŘÍDY A.....	78
TAB. 40 – VÝPIS MAXIMÁLNÍCH NAMĚŘENÝCH HODNOT VE VODIČI L .....	79
TAB. 41 – VÝPIS MAXIMÁLNÍCH NAMĚŘENÝCH HODNOT VE VODIČI N.....	80
TAB. 42 – MEZNÍ HODNOTY RUŠIVÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VYZAŘOVÁNÍ PRO ZAŘÍZENÍ TŘÍDY A.....	81
TAB. 43 – VÝPIS MAXIMÁLNÍCH NAMĚŘENÝCH HODNOT – PŘEDNÍ STRANA, HORIZONTÁLNÍ POLARIZACE .....	82
TAB. 44 – PŘEHLED VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK ODOLNOSTI A MĚŘENÍ EMISÍ .....	85

## **Seznam příloh**

PŘÍLOHA A – KVALIFIKAČNÍ STEND .....	I
PŘÍLOHA B – VÝSLEDKY MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VYZAŘOVÁNÍ .....	V

## **Přílohy**

### **Příloha A – Kvalifikační stand**



*Obr. 1 – Kvalifikační stand – přední pohled*



Obr. 2 – Kvalifikační stand – pohled na otevřený rozvaděč



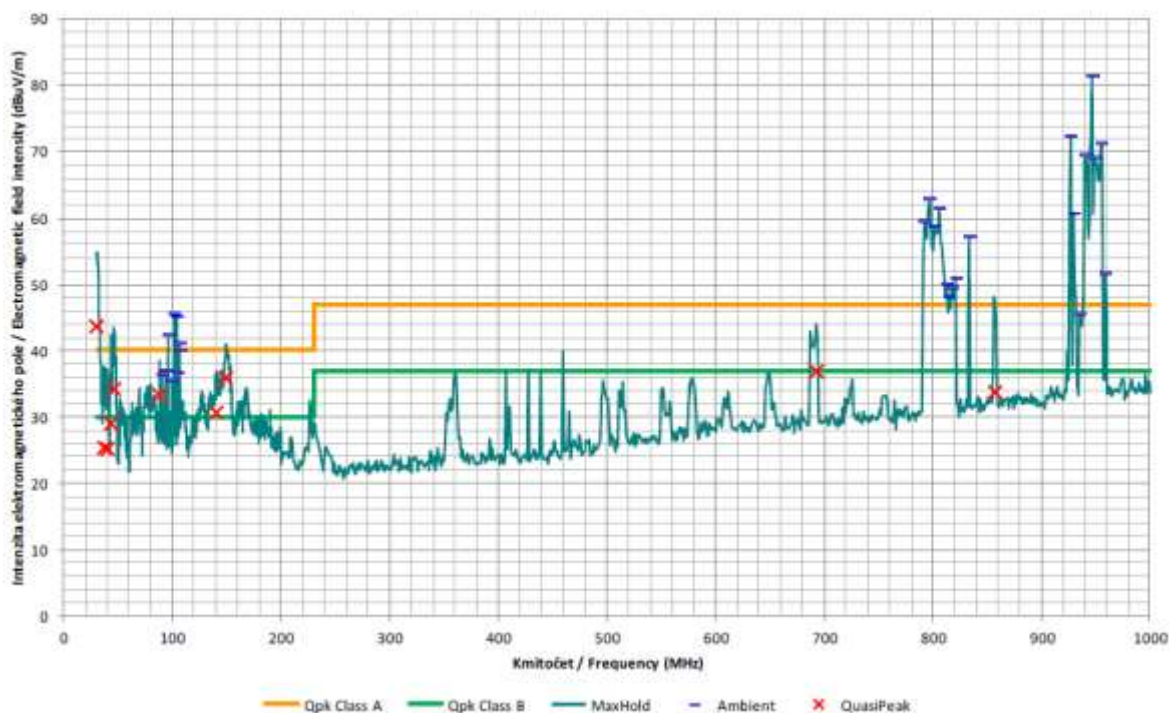


*Obr. 3 – Přenosné ovládací zařízení (HMI)*



Obr. 4 – Přenosné ovládací zařízení (HMI) při provozu

**Příloha B – Výsledky měření elektromagnetického vyzářování**

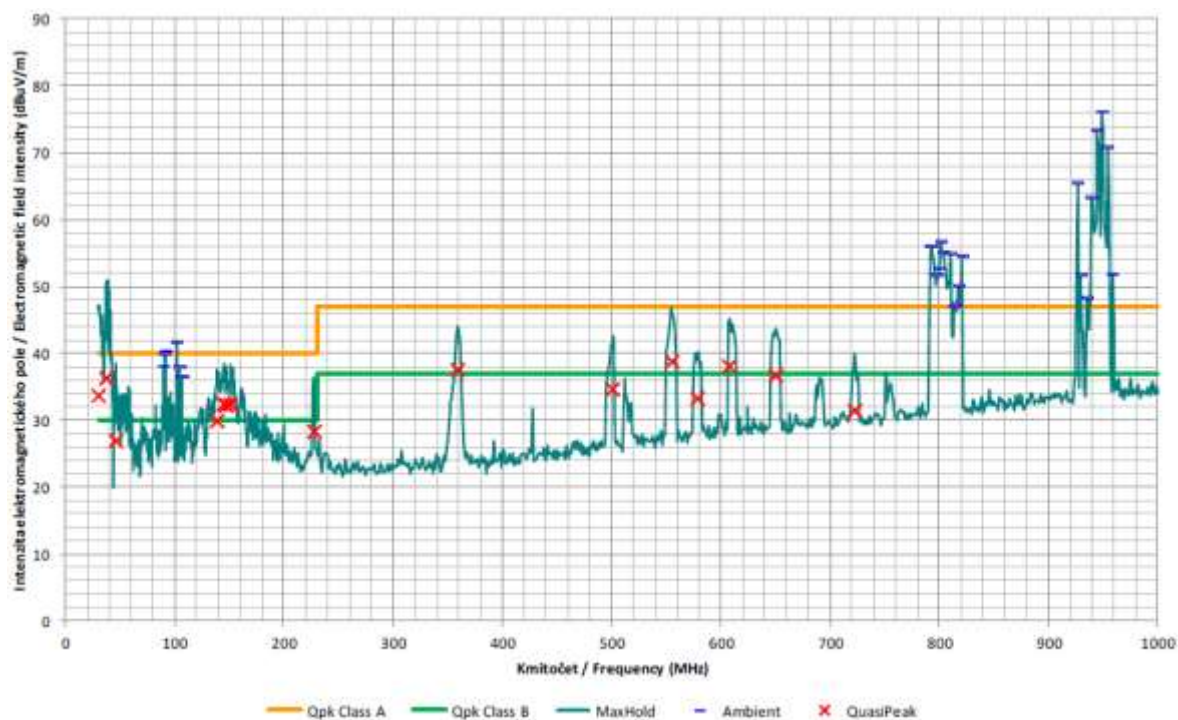


Obr. 1 – Frekvenční charakteristika elektromagnetického pole – přední strana, vertikální polarizace [23]

Tab. 1 – Výpis maximálních naměřených hodnot – přední strana, vertikální polarizace

Frekvence [MHz]	PeakDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dBµV]
31,133	54,8	30	40,1	30	43,7
856	48,1	149	35,8	692,8	36,9
692,8	44	692,8	34,7	149	35,9
46,093	43,6	87,8	33,3	46,093	34,2
43,373	42,4	46,093	31,1	857,067	33,7
149	41	140,387	30,3	87,8	33,3
459,2	39,9	857,067	29,2	140,387	30,7
87,8	38,4	360	29	43,373	29
37,027	37,6	79,64	28,6	37,253	25,3
40,2	37,2	648	28	40,2	25,2

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].

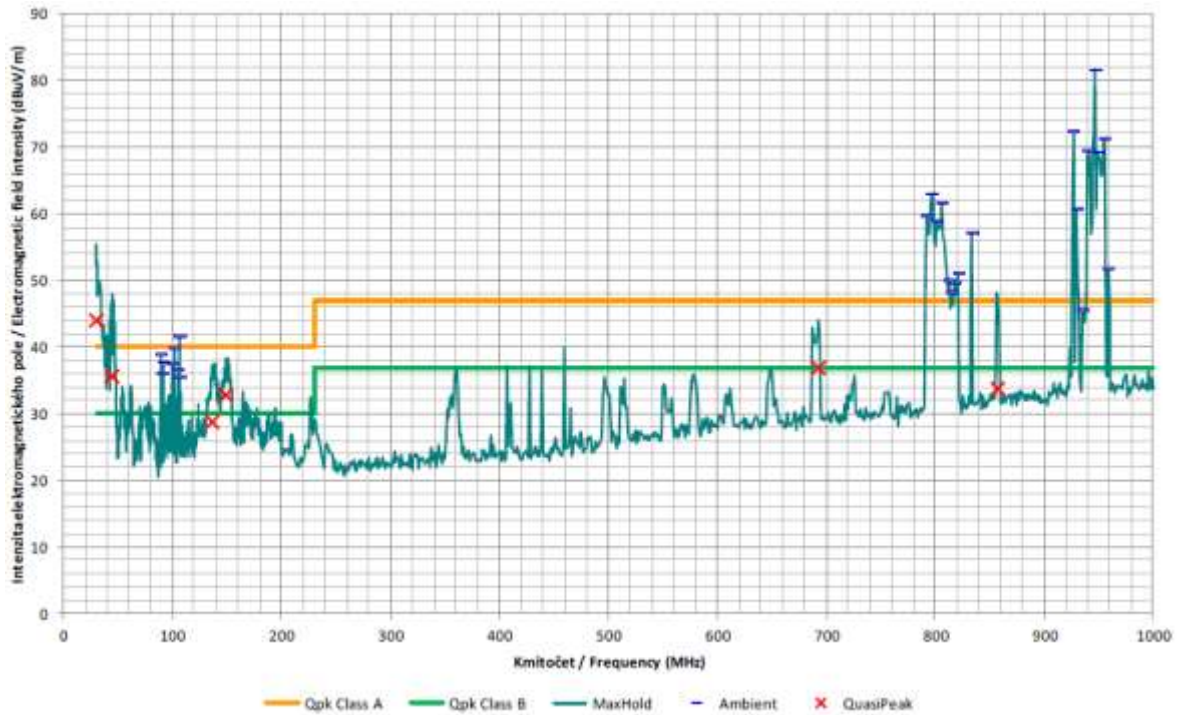


Obr. 2 – Frekvenční charakteristika elektromagnetického pole – zadní strana, horizontální polarizace [23]

Tab. 2 – Výpis maximálních naměřených hodnot – zadní strana, horizontální polarizace

Frekvence [MHz]	PeakDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dBµV]
37,253	51	555,2	36,8	555,2	38,7
30,227	47,3	607,467	36,1	607,467	38
554,133	47	358,933	36	358,933	37,5
608,533	45,1	650,133	34,8	650,133	36,7
358,933	44	500,8	33,1	37,253	36,3
650,133	43,6	145,373	32,2	500,8	34,6
501,867	42,6	151,267	31,9	30	33,6
579,733	40,2	37,253	31,4	578,667	33,2
722,667	40	578,667	31,3	144,693	32,4
45,867	38,5	30	29,4	151,267	32,3

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].



Obr. 3 – Frekvenční charakteristika elektromagnetického pole – zadní strana, vertikální polarizace [23]

Tab. 3 – Výpis maximálních naměřených hodnot – zadní strana, vertikální polarizace

Frekvence [MHz]	PeakDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	AvgDet [dBµV]	Frekvence [MHz]	QpkDet [dBµV]
30	55,4	30	40,2	30	44
856	48,1	692,8	34,7	692,8	36,9
44,28	48	46,093	32,4	44,28	35,6
692,8	44	149	32,3	857,067	33,7
459,2	39,9	857,067	29,2	149	32,8
150,587	38,3	360	29	136,307	28,8
139,027	37,5	648	28	–	–
406,933	37,2	578,667	26,7	–	–
427,2	37,1	724,8	26,2	–	–
438,933	37	136,307	26	–	–

Zdroj: vlastní zpracování dle [23].