

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Formula student – Koncept stínění z pohledu elektromagnetické
kompatibility

Autor práce: **Lukáš Pixa**
Vedoucí práce: **Ing. Jakub Novotný**

2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lukáš PIXA**
Osobní číslo: **E18B0133P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Formula Student – Koncept stínění z pohledu elektromagnetické kom-
patibility**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Stručně popište problematiku elektromagnetické kompatibility elektrického zařízení.
2. Popište způsoby omezení elektromagnetických emisí a zvýšení odolnosti vůči elektromagnetickému rušení.
3. Navrhněte schéma zapojení stínění dílčích komponent formule.
4. Provedte měření vybrané části formule.

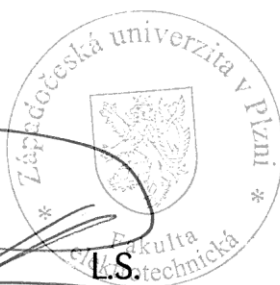
Rozsah bakalářské práce: **30-40**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **elektronická**

Seznam doporučené literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Novotný**
Research and Innovation Centre for Electrical
Engineering

Datum zadání bakalářské práce: **8. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2022**





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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 8. října 2021

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá otázkou možností zlepšování elektromagnetické kompatibility zařízení, která pro svou funkci využívají velké výkony napájení elektromotorů, modulované pomocí pulzně šířkové modulace. Tento druh modulace je sice velmi vhodný pro tvorbu střídavého výstupního napětí ze stejnosměrného zdroje, ale při tomto střídání je generováno velké rušení, které se může uvolňovat do okolí vodičů. Pro účely této práce byl jako praktický příklad využit projekt univerzitní elektro-formule (Formula student), na jejímž příkladu je proveden návrh metod zlepšení elektromagnetické kompatibility s hlavním důrazem na využití způsobů používání elektromagnetického stínění. Dále bylo provedeno měření s cílem ověření skutečných účinků použití elektromagnetického stínění na intenzitu uvolňovaného elektromagnetického rušení do okolí stíněného kabelu.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, Formula student, elektromagnetické rušení, SiC měnič, elektromagnetické stínění, střídač, elektromotor

Abstract

This bachelor's thesis deals with possibilities of improving the electromagnetic compatibility of devices that use for their function electric motors powered by high power supply of PWM generated signals. Although the PWM modulation is very suitable for generating AC signals from DC power supply, this type of modulation is also source of large amount of electromagnetic interferences that can be released in surrounding of conductors.

For purposes of this thesis a university project of electro-formula was used as practical example. On this example is shown a concept of method of improving electromagnetic compatibility, which is made with the main emphasis on the use of electromagnetic shielding.

Furthermore, measurements were performed in order to verify the actual effects of use of electromagnetic shielding on the intensity of released electromagnetic interference in the vicinity of the shielded cable.

Key Words

Electromagnetic compatibility, Formula student, electromagnetic interference, SiC converter, electromagnetic shielding, inverter, electric motor

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Jakobovi Novotnému za vedení a rady při tvorbě této práce.

Obsah

Úvod.....	- 10 -
Teoretická část	- 11 -
1 Základní shrnutí problematiky EMC	- 12 -
1.1 Význam EMC.....	- 12 -
1.1.1 Co je to EMC	- 12 -
1.1.2 Důvody zavedení EMC.....	- 12 -
1.1.3 Problémy EMC	- 13 -
1.2 Základní pojmy v EMC technických systémů	- 14 -
1.3 Způsoby šíření rušení	- 15 -
1.4 Rozdělení EMC na rušení a odolnost.....	- 16 -
1.4.1 Rušení (Interference)	- 16 -
1.4.2 Odolnost (Susceptibilita)	- 16 -
1.5 Druhy vazebních mechanismů v EMC	- 17 -
1.5.1 Galvanická vazba	- 17 -
1.5.2 Kapacitní vazba.....	- 18 -
1.5.3 Induktivní vazba	- 18 -
1.5.4 Vazba vyzařováním	- 19 -
1.6 Rušivé signály, zdroje a jejich vlastnosti	- 19 -
1.6.1 Přírodní/Umělé.....	- 20 -
1.6.2 Funkční/Parazitní	- 20 -
1.6.3 Impulzní/Kvazi-impulzní/Spojité	- 20 -
1.6.4 Šum/Impulzy/Přechodné děje	- 20 -
1.6.5 Úzkopásmové/Širokopásmové.....	- 21 -
1.6.6 Nízkofrekvenční/Vysokofrekvenční	- 21 -
1.6.7 Rušení vedením/vyzařováním.....	- 21 -
1.7 Běžné zdroje rušení	- 22 -
1.7.1 Zdroje spojitého rušení	- 22 -
1.7.2 Zdroje impulzního rušení.....	- 22 -
2 Metody Zlepšování EMC	- 23 -

2.1	Základní princip zlepšování EMC.....	- 23 -
2.2	Zabraňování vzniku parazitních vazeb.....	- 23 -
2.2.1	Galvanická vazba	- 23 -
2.2.2	Kapacitní vazba.....	- 23 -
2.2.3	Induktivní vazba	- 23 -
2.2.4	Vazba vyzařováním	- 24 -
2.3	Metody omezování šíření rušení vedením	- 24 -
2.3.1	Odrušovací tlumivky.....	- 24 -
2.3.2	Odrušovací kondenzátory	- 24 -
2.3.3	Odrušovací filtry	- 25 -
2.3.4	Přepět'ové ochranné prvky	- 26 -
2.4	Elektromagnetické stínění	- 26 -
2.4.1	Složky celkové účinnosti elektromagnetického stínění	- 27 -
2.4.2	Celková účinnost stínění	- 27 -
2.4.3	Vliv nehomogenit na účinnost stínění	- 28 -
	Praktická část	- 29 -
3	Návrh zlepšení EMC Formule.....	- 30 -
3.1	Popis základní konstrukce obvodů elektro-formule.....	- 30 -
3.2	Poznatky pro zajištění správné funkce použitého stínění.....	- 31 -
3.3	Návrh aplikace stínění na elektro-formuli.....	- 32 -
4	Měření účinků stínění na množství vyzařovaného rušení	- 35 -
4.1	Příprava měření	- 35 -
4.2	Měření velikosti intenzity uvolňovaného rušení	- 39 -
4.2.1	Měření v oblasti nízkých kmitočtů (0Hz až 300kHz).....	- 40 -
4.2.2	Měření vyšších kmitočtů (300kHz až 45MHz).....	- 40 -
4.3	Shrnutí výsledků měření.....	- 46 -
	Závěr	- 47 -
	Zdroje.....	I
	Seznam obrázků.....	II
	Seznam Grafů	III

Seznam symbolů a zkratk

Značka	Popisek	Jednotka
<i>A</i>	Útlum absorpci	[dB]
<i>CAN</i>	Controller Area Network	
<i>E</i>	Intenzita elektrického pole	[Vm ⁻¹]
<i>EMC</i>	Elektromagnetická kompatibilita	
<i>H</i>	Intenzita magnetického pole	[Am ⁻¹]
<i>M</i>	Útlum vlivem mnohonásobných odrazů	[dB]
<i>MLC</i>	Multi Level Controller	
<i>PWM</i>	Pulse width modulation (Pulzně šířková modulace)	
<i>R</i>	Útlum odrazem	[dB]
<i>RUMM</i>	RICE Universal Microcontroller Module	
<i>SE</i>	Celkový útlum	[dB]
<i>SiC</i>	Karbid křemíku	

Úvod

Tato bakalářská práce má za cíl stručně popsat základy problematiky elektromagnetické kompatibility a uvést její základní principy na příkladu projektu univerzitní elektro-formule.

V první části se tato práce věnuje především uvedením základních důvodů pro samostatný výzkum oborů elektromagnetické kompatibility a rozebírá motivace a historické pozadí těchto výzkumů, od doby prvních experimentů v oboru elektrotechniky, přes období jejího zavádění, do doby rozvoje bezdrátové komunikace a z toho plynoucí nutnosti řešit spolehlivé fungování mnoha různých zařízení ve stejném elektromagnetickém prostředí.

V druhé části se tato práce věnuje základnímu přiblížení postupů a metod zlepšování elektromagnetické kompatibility jak zdrojů elektromagnetického rušení, tak i rušených zařízení. Hlavní důraz je kladen na co nejširší popis různých metod, protože mnohé metody se mohou vzájemně doplňovat, nebo alespoň podporovat. Poněkud podrobnější popis je věnován problematice používání elektromagnetického stínění, které se řadí mezi nejběžnější a nejjednodušší metody zlepšování elektromagnetické kompatibility.

V třetí části se tato práce věnuje konkrétním metodám zlepšování elektromagnetické kompatibility na příkladu projektu univerzitní elektro-formule, kde je nejprve popsána konstrukce elektrických obvodů použitých v konstrukci této elektro-formule a následně se kapitola věnuje popisu několika metod zlepšování elektromagnetické kompatibility s důrazem na využívání pozitivních vlastností elektromagnetického stínění.

Ve čtvrté části se tato práce věnuje měření konkrétních účinků stínění na množství rušivých signálů uvolňovaných do okolí kabelu, který napájí RL zátěž, která napodobuje chování elektromotoru. Jako zdroj signálu je zde použit SiC střídač, který napodobuje chování střídače, který je plánován jako střídač pro projekt elektro-formule.

Teoretická část

Tato část práce se věnuje především základnímu uvedení do problematiky elektromagnetické kompatibility a vysvětlení základních spojitostí v tomto oboru.

V první části rozebírá především vysvětlení pojmu elektromagnetická kompatibilita, základní historii a důvody vzniku oborů věnujících se tomuto odvětví. Dále se věnuje popisu základních pojmů v EMC a způsobů dělení této problematiky podle nejběžnějších kritérií, jako jsou např. dělení na zdroje rušení a příjemce rušení. Nakonec se práce v této části věnuje popisu základních vazebních mechanismů, kterými se elektromagnetické rušení může šířit.

V druhé části se práce věnuje popisu metod omezování vzniku nechtěných elektromagnetických vazeb, jako je např. kapacitní, nebo induktivní vazba. Dále se věnuje popisu omezování šíření rušení vedením pomocí odrušovacích prvků jako např. tlumivek nebo filtrů. Nakonec se práce věnuje úvodu do problematiky elektromagnetického stínění a důvodů a metod jeho používání.

1 Základní shrnutí problematiky EMC

1.1 Význam EMC

1.1.1 Co je to EMC

Elektromagnetická kompatibilita (anglicky označované jako „Electromagnetic compatibility“, zkratka EMC) daného zařízení je definována jako schopnost daného zařízení vykonávat svou funkci správně a spolehlivě i v daném elektromagnetickém prostředí, ve kterém působí zdroje rušivých elektromagnetických signálů (přírodních nebo člověkem způsobených) a zároveň, zda dané zařízení do svého elektromagnetického okolí emituje pouze takové elektromagnetické rušení, aby jím nezamezovalo správné a spolehlivé funkci okolních zařízení a také aby neohrožovalo zdraví a bezpečnost osob v okolí. Daný přístroj také nesmí ohrožovat svým provozem svou vlastní činnost.

Každý systém, zařízení, nebo určitá jeho část, může být vždy současně vysílačem (zdrojem) i přijímačem (tedy obětí) rušivých signálů. Z toho plyne rozdíl oproti pojmu spolehlivost, který označuje pouze schopnost daného zařízení vykazovat správnou funkci navzdory svému okolí a poruchám. EMC zohledňuje vzájemné ovlivňování daného zařízení se zařízeními v jeho okolí a tedy i zařízení, které je naprosto spolehlivé, pokud nebude splňovat EMC, je naprosto bezcenné a neschopné provozu. Z tohoto důvodu bylo tedy nutné udělat samostatný výzkum pro správné pochopení problematiky EMC a následně vytvořit sestavu postupů a metod jejího správného určování.

Elektromagnetická Kompatibilita tedy označuje schopnost daného zařízení správně pracovat ve stejném elektromagnetickém prostředí spolu s jinými zařízeními, bez toho aby závažně ovlivňovalo jejich správnou funkci, tedy s nimi tzv. koexistovat. [1] [2]

1.1.2 Důvody zavedení EMC

Prvním problémem, který lze chápat jako součást problematiky EMC, byly následky úderu blesku a s tím spojený vynález bleskosvodu. Další problémy, spojené s úderem blesku, se začaly projevovat spolu s rozšiřováním využívání elektrické energie v průmyslu a domácnostech (zde se jednalo především o tepelné účinky proudů vznikajících jako následek indukovaného napětí v okolí úderu blesku), což vyústilo v postupný vývoj pojistek, bleskojistek a jiskřišť.

Další rozvoj EMC přišel spolu s rozšiřováním příjmu rozhlasového vysílání, kde se projevovaly další účinky elektromagnetického prostředí, které předtím nebyly známy

(např. méně výrazná přirozená rušení, odrazy vysílaného signálu, ...) a také bylo nutné vyřešit situace, kdy se jednotlivá vysílání mohla vzájemně rušit (zde jsou počátky rozdělení elektromagnetického prostředí na jednotlivá frekvenční pásma).

Samostatné obory věnující se problematice EMC začaly vznikat jako odvětví armádních výzkumů až v průběhu 50. a 60. let 20. století. Jednalo se především o reakci na opakovaná selhávání řídicích systémů střel a obranných prostředků lodí vlivem provozu výkonných komunikačních vysílačů, postupně se ale výzkum rozšířil ve snahu o co nejhlubší porozumění způsobů, jak se mohou různá elektronická zařízení vzájemně ovlivňovat a tyto poznatky co nejrychleji převádět do praxe.

Dále vedle počátečního cíle výzkumu, pouze minimalizovat selhávání zařízení, v rámci armád začaly vznikat i obory elektronického boje zkoumajících metody a způsoby vytváření umělého rušení, které se pak používá pro rušení nepřátelské komunikace a obranných prostředků. Tyto poznatky se také uplatňují při zkouškách elektromagnetické odolnosti zařízení.

Posledním významným krokem bylo rozšíření oborů EMC i mimo armádní výzkumy. K tomu přispělo především postupné rozšiřování tyristorových spínačů v průběhu 90. let 20. století a později i dalších druhů elektronických spínacích prvků mezi běžné obyvatelstvo a s tím rostoucí množství rušivých signálů v běžném prostředí. Z tohoto důvodu vznikají vedle armádních obranných standardů i civilní technické normy věnující se EMC a bezpečnosti. [1] [2]

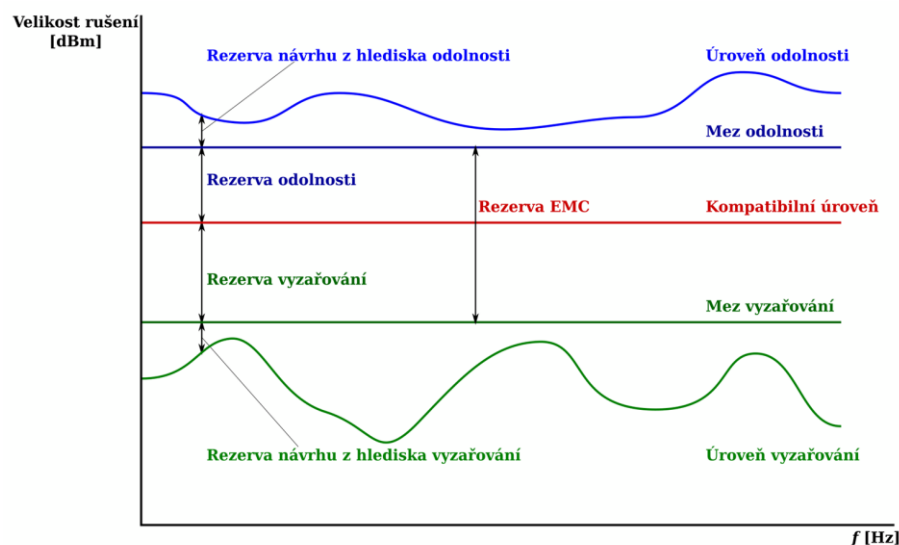
1.1.3 Problémy EMC

Hlavním problémem EMC je celková složitost a obsáhlost problematiky. V podstatě se nejedná o jeden konkrétní výzkumný obor elektrotechniky, ale jedná se o snahu využívat poznatky všech oborů elektrotechniky a v některých případech i strojírenství a tyto poznatky využívat pro omezování negativních účinků různých přístrojů mezi sebou. Z důvodu této složitosti je vhodné řešení konkrétního problému velmi často spíše otázkou správné intuice a konkrétního přístupu k problému, než uplatňování konkrétních postupů a výpočtů. To vede často k situaci, že se více uplatňují pouze základní poznatky z mnoha oborů najednou a vyhodnocení kvality řešení se provádí až pomocí praktických měření a zkoušek. [1] [2]

1.2 Základní pojmy v EMC technických systémů

V ČR je terminologie v oboru EMC definována normou ČSN IEC 50(161) (334201) [3]. Mezi základní pojmy EMC spadá:

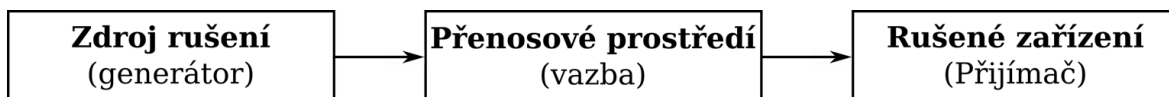
- **úroveň vyzařování** je úroveň rušení, kterou generuje konkrétní spotřebič nebo zařízení. Měření probíhá předepsaným způsobem a hodnoty se vyjadřují např. v [dBm] v závislosti na kmitočtu znázorněno na obr. 1;
- **mez vyzařování** je maximální přípustná úroveň vyzařování daného zařízení.
 - rozdíl těchto dvou úrovní se nazývá **rezerva návrhu z hlediska vyzařování**;
- **úroveň odolnosti** je maximální úroveň rušení, která působí na dané zařízení, tak aby nedošlo ke zhoršení jeho provozu;
- **mez odolnosti** je nejnižší požadovaná úroveň odolnosti zařízení v daném prostředí;
 - rozdíl těchto dvou úrovní se nazývá **rezerva návrhu z hlediska odolnosti**;
- rozdíl mezi mezí odolnosti a mezí vyzařování se nazývá **rezerva EMC**;
- také je zaveden pojem tzv. **kompatibilní úroveň**, jedná se o velikost rušení, které se v daném prostředí může vyskytovat;
- rozdíly mezi mezí vyzařování a mezí odolnosti oproti kompatibilní úrovni EMC se nazývají **rezerva vyzařování** a **rezerva odolnosti**;



Obr. 1 Základní pojmy v EMC [1]

1.3 Způsoby šíření rušení

Pro základní představu přenosu rušivých signálů lze použít tzv. **základní řetězec přenosu elektromagnetického rušení** (obr. 2), který zdůrazňuje tři základní části přenosového prostředí, kterým se všechny rušivé signály šíří.



Obr. 2 Základní řetězec přenosu elektromagnetického rušení [1]

První část řetězce představuje **zdroj rušivého signálu**, tím může být jakýkoliv druh generátoru elektromagnetického rušení, což jsou např. rozhlasové vysílače, polovodičové a mechanické spínací prvky, elektrická vedení velkých výkonů (např. energetická rozvodná síť), číslicové systémy a vlivy počasí (především jevy doprovázející bouřky jako např. elektrické výboje blesků, případně vlivy vesmírných jevů). V podstatě se může jednat o jakýkoliv přenos nebo přeměnu energie.

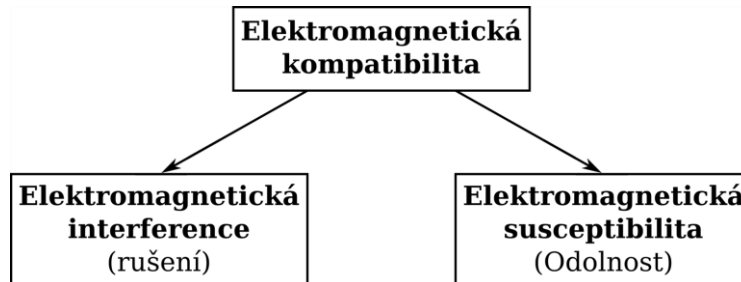
Druhá část řetězce představuje **přenosové prostředí**, kterým se rušivé signály šíří. Jeho vlastnosti mají zásadní vliv na míru a způsob šíření rušivých signálů. Spadají sem jakékoliv předměty a prostory mezi zdrojem rušení a rušeným přístrojem, jako jsou např.: napájecí kabely, energetická rozvodná síť, společná zem, datová a sdělovací vedení, stínění kabelů i volný prostor mezi přístroji. [3]

Třetí část řetězce představuje **rušené zařízení**, které je vystaveno účinkům příchozího rušení. Jedná se o jakékoliv zařízení, u kterého se ověřuje, zda v daném prostředí bude správně a spolehlivě pracovat navzdory rušení.

Protože se jedná pouze o základní řetězec, který slouží pouze pro základní pochopení způsobu přenosu rušivých signálů, jde pouze o velmi zjednodušenou představu. Ve skutečném provozu dochází k tomu, že každý zdroj rušení generuje mnoho druhů rušení, které se stejným prostředím přenáší různou měrou, zároveň se část rušení může přenášet i zcela jiným druhem prostředí, zároveň některé části rušení mohou být přenášeny i několika druhy prostředí zároveň. Současně každé zařízení, vystavené působení rušivých signálů, je proti různým druhům rušení, různě odolné. A současně může každé zařízení být samo sobě zdrojem rušení. [1] [2] [4]

1.4 Rozdělení EMC na rušení a odolnost

Jedná se o základní způsob rozdělení EMC, který vychází ze základního řetězce přenosu rušení (obr. 2). Rozděluje podle toho, zda jsou vyhodnocovány vlastnosti zdroje rušení (Elektromagnetická interference), nebo rušeného přístroje (Elektromagnetická susceptibilita).



Obr. 3 Dělení EMC na Rušení a Odolnost [1]

1.4.1 Rušení (Interference)

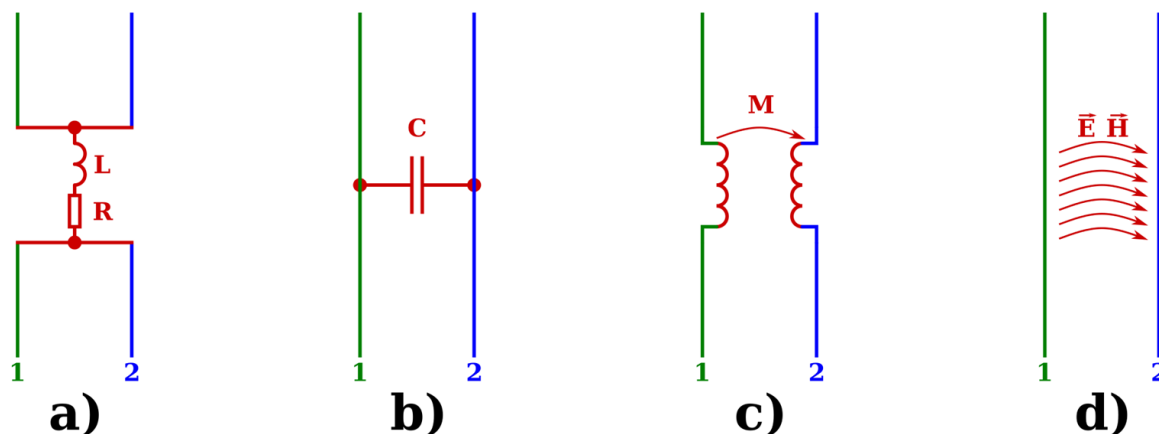
Při vyhodnocování vlastností zdrojů rušení, se zjišťuje především množství emitovaného rušení a jeho vlastnosti. Díky znalosti vlastností rušení, lze lépe dimenzovat odolnost okolních přístrojů, už při samotném návrhu a tím se předem vyhnout problémům. Velký problém je ale nejistota jak se zařízení mohou vzájemně ovlivňovat, což může způsobit velké změny v charakteru generovaného rušení a tím celou snahu zhatit.

1.4.2 Odolnost (Susceptibilita)

Při vyhodnocování vlastností rušeného zařízení, se sleduje odolnost proti různým druhům příchozího rušení. Lze vycházet ze znalostí prostředí, nebo provést přímé zkoušky v prostředí, kde bude přístroj používán. Velmi často se kombinuje měření v prostředí a přímé zkoušení, aby byla skutečně jistota, že daná zařízení jsou elektromagneticky kompatibilní. [1] [2] [4]

1.5 Druhy vazebních mechanismů v EMC

Protože přenos rušení je přímo závislý na vlastnostech přenosového prostředí, je nutné při popisu EMC uvažovat i vlastnosti tohoto prostředí tzv. **vazby**. Pro jeho popis lze vycházet z toho na jakém fyzikálním principu je daná vazba založena, což je také vhodné pro hledání metody jak danou nežádoucí vazbu potlačit. Lze rozlišovat čtyři základní druhy vazeb: galvanickou, kapacitní, induktivní a vazbu vyzařováním (elektromagnetickým polem). [1] [5]



Obr. 4 Elektromagnetické vazby (značeny červeně) [1]:
a) galvanická, b) kapacitní, c) induktivní, d) vyzařováním

1.5.1 Galvanická vazba

Galvanická vazba neboli vazba společnou impedancí je spojení dvou nebo více elektrických obvodů nebo systémů společnou impedancí (nejčastěji typu RL). Mezi běžné druhy společných impedancí patří: společné napájení, společné řídicí obvody, nebo společná zem.

Způsobem šíření rušení touto vazbou je, že proudy všech navázaných obvodů protékají stejným místem a projevy nelinearity (např. přechodové jevy) způsobené jedním z proudů ovlivňují všechny navázané obvody (např. skokovým zvýšením jednoho z proudů může dojít ke krátkodobému snížení napájecího napětí vlivem vnitřních odporů).

Velkým problémem této vazby je schopnost přenášet rušení jakéhokoliv kmitočtu včetně stejnosměrného rušení jako jsou např. změny velikosti napájecího napětí.

1.5.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká jako důsledek parazitních kapacit mezi různými vodiči, nebo částmi obvodů a konstrukcí zařízení a systémů. Vzhledem k faktu že jako parazitní kapacita se projeví jakékoliv elektrostatické pole mezi dvěma částmi různých zařízení, je velmi problematické tuto vazbu odstranit. Přenos touto vazbou je velmi závislý na kmitočtu rušivého signálu, pro nulový kmitočet se neuplatňuje a se zvyšujícím se kmitočtem roste.

Nejvýznamnější druhy kapacitní vazby jsou tři [1] [2] [6]:

- (1) **kapacitní vazba galvanicky oddělených** obvodů vzniká, pokud jsou různé části obvodů v těsné blízkosti. Vzniká především mezi souběžnými částmi vodičů a se zvětšující se délkou souběžných částí vodičů se zvětšuje. Pro přenos rušení vyžaduje vazbu mezi obvody na více místech;
- (2) **kapacitní vazba mezi obvody se společným (vztažným) vodičem** vzniká v případech, kdy mají vázané obvody jeden společný vodič (běžně se jedná např. o společnou vztažnou zem zesilovacích stupňů). Protože obvody už mají jednu společnou část, stačí pouze jediná parazitní kapacita pro přenos rušení;
- (3) **kapacitní vazba vůči zemi** vzniká u obvodů, nebo systémů s uzemněným bodem, nebo vodičem (např. rozvodná soustava). Vzniká tak, že nedokonale uzemněné, nebo izolované části obvodů mají parazitní kapacitu proti společné zemi, skrze kterou procházejí rušivé signály, šířící se zemí mezi obvody. Velký problém při vzniku této vazby je schopnost přenášet rušivé signály na velké vzdálenosti.

1.5.3 Induktivní vazba

Každá část obvodu obsahuje parazitní indukčnost, pokud touto indukčností protéká proud, je v jejím okolí vytvářeno magnetické pole, které se mění v přímé závislosti na změnách tohoto proudu. V případě, že se v tomto proměnném poli nachází část obvodu jiného zařízení, indukuje se v něm rušivé napětí.

Velkým problémem této vazby je, že v případě rychlé změny proudu ve zdroji rušení (např. úder blesku), může dojít k přenosu extrémně velkých výkonů i mezi galvanicky oddělenými obvody a tím je naprosto je zničit (po úderu blesku může dojít i ke spálení elektrických kabelů ve zdech budovy).

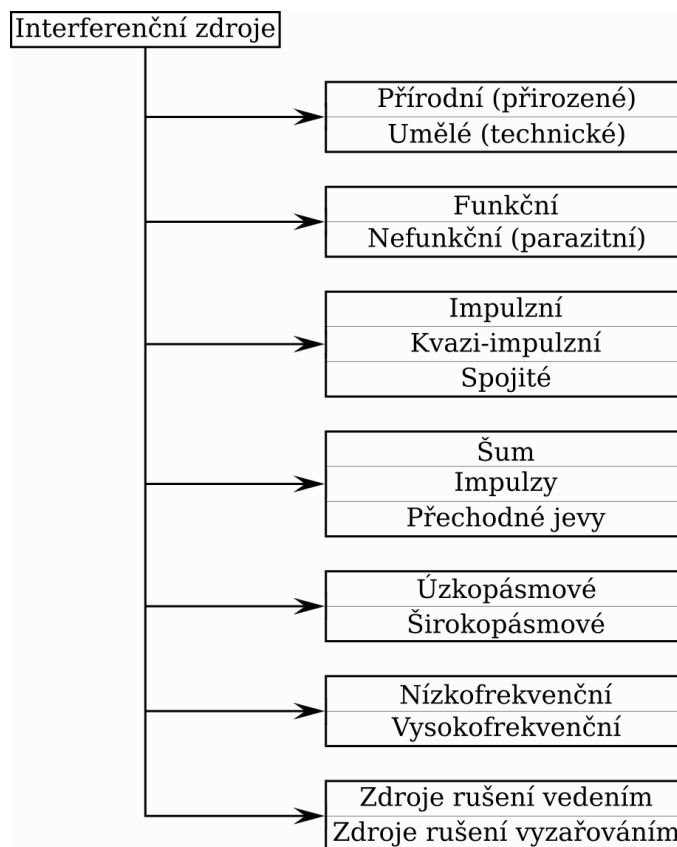
1.5.4 Vazba vyzařováním

Vazba vyzařováním vzniká přenosem elektromagnetického vlnění volným prostorem od zdroje rušení k přijímači. Vlastnosti této vazby jsou velmi závislé na kmitočtu a často dochází k přenosu pouze úzkého pásma kmitočtů, snadno může ale docházet i k přenosu různých pásem současně. Pro vytvoření této vazby musí být v daném přístroji vytvořena anténa, což v praxi znamená, že konstrukce daného zařízení přímo určuje, jaké kmitočty jsou schopny se přenášet. Velkým problémem této vazby je možnost působení i na velké vzdálenosti (především se jedná o komunikační prostředky).

1.6 Rušivé signály, zdroje a jejich vlastnosti

Další způsob dělení EMC je podle vlastností rušivého signálu. To umožňuje snáze vyhodnocovat, zda je dané zařízení elektromagneticky kompatibilní a co lze udělat pro zlepšení. Vzhledem k celkové složitosti, ale nelze popsat dané rušení jako celek a přitom tak vytvořit využitelnou informaci, proto se vyhodnocují jednotlivé vlastnosti postupně a tedy se jedná pouze o zjednodušený návrh.

Nejčastější rozdělení rušivých signálů jsou [1]:



Obr. 5 Způsoby dělení rušivých signálů podle vlastností [1]

1.6.1 Přírodní/Umělé

Toto rozdělení uvažuje, zda lze daný zdroj rušení vůbec jakkoliv ovlivňovat. Jako přírodní zdroje rušení jsou tedy myšleny veškeré zdroje vzniklé bez účasti člověka (např. vlivy počasí) a tedy je nelze jakkoliv omezovat a pouze lze zvyšovat odolnost zařízení tomuto rušení vystavovaná.

Jako umělé zdroje rušení jsou myšleny zdroje vzniklé činností člověka a tedy jsou vždy alespoň z části ovlivnitelná a lze měnit alespoň některé vlastnosti.

1.6.2 Funkční/Parazitní

Toto rozdělení uvažuje, zda je vzniklé rušení k nějakému účelu využíváno. V případě kdy ano (např. rozhlasové vysílání), jej nelze odstranit. V případě kdy se jedná pouze o parazitní jev (např. rušení rozvodné sítě), je možné se jej tedy snažit odstranit.

1.6.3 Impulzní/Kvazi-impulzní/Spojité

Toto rozdělení uvažuje výskyt rušivého signálu v čase, tedy jak často se dané rušení v prostředí vyskytuje. Dělení na rušení **Spojité** (tedy rušení působící neustále a nelze jej chápat jen jako sérii impulzů) a **Impulzní** (tedy rušení projevující se jako občasný pulz rušivého signálu). Pokud nelze zcela jistě určit do které kategorie dané rušení spadá, používá se pojem **Kvazi-impulzní**.

Pro přesné vyhodnocení je v ČR zavedena norma **ČSN EN 55014-1 ED.4 (334214)** [7], která definuje tzv. mžikovou (impulzní) poruchu jako poruchu, která trvá maximálně 200ms a je oddělena od následující mžikové poruchy nejméně časem 200ms a za dobu 2s se nezopakuje více než dvakrát.

1.6.4 Šum/Impulzy/Přechodné děje

Toto rozdělení uvažuje základní charakter daného rušivého signálu a rozděluje rušení do tří kategorií:

- (1) **šum** (anglicky „Noise“) je trvalý a obvykle periodický rušivý signál. Projevuje se především jako deformace užitečných signálů;
- (2) **impulzy** (anglicky „Spikes“) jsou rušivé signály, kde amplituda významně převyšuje dobu trvání. Projevují se především jako kladné nebo záporné pulzy superponované na užitečný signál;

- (3) **přechodné děje** (anglicky „**Transiens**“) jsou náhodné rušivé jevy s dobou trvání až několik sekund. Projevují se jako deformace užitečných signálů.

1.6.5 Úzkopásmové/Širokopásmové

Toto rozdělení uvažuje charakter signálu z pohledu šířky frekvenčního pásma, ve kterém se dané rušení projevuje [1] [8]:

- (1) **úzkopásmové rušení** zahrnuje šířku přibližně pásma jednoho radiového kanálu. Spadá sem především rušení vzniklé jako důsledek užitečných signálů;
- (2) **šírokopásmové rušení** zahrnuje veškerá rušení obsahující široké pásmo frekvencí. Spadají sem především přírodní a parazitní rušení.

1.6.6 Nízkofrekvenční/Vysokofrekvenční

Toto rozdělení uvažuje, v jaké části frekvenčního spektra dané rušení působí.

- (1) **vysokofrekvenční rušení** zahrnuje rušení vyšších kmitočtů než 10kHz. Do této kategorie spadá naprostá většina rušení, z důvodu že téměř každý zdroj rušení zasahuje do tohoto frekvenčního pásma;
- (2) **nízkofrekvenční rušení** zahrnuje rušení, která nepřesahují kmitočet 10kHz. Zde se rozlišují **Energetické** a **Akustické** rušení;
 - (1) energetické nízkofrekvenční rušení zahrnuje oblast do kmitočtu 2 kHz a projevuje se především jako deformace napájecích napětí (odtud název energetické);
 - (2) akustické nízkofrekvenční rušení zahrnuje oblast 2 kHz až 10 kHz a projevuje se především deformací signálů přenosových informačních systémů, jako jsou např. akustické signály (odtud název Akustické).

1.6.7 Rušení vedením/vyzařováním

Toto rozdělení uvažuje způsob, jakým se dané rušení šíří od zdroje.

- **Rušení vedením** zahrnuje rušení, které se šíří např. napájecím nebo sdělovacím vedením;
- **Rušení vyzařováním** zahrnuje rušení, které se šíří volným prostorem.

Vzhledem k faktu, že veškeré druhy rušení se šíří oběma způsoby, tak se zde dělí podle toho, který z těchto dvou způsobů převažuje.

1.7 Běžné zdroje rušení

1.7.1 Zdroje spojitého rušení

Hlavním zdrojem spojitého rušení v běžném provozu jsou především generátory pro výrobu elektrické energie pro napájecí síť (v případě ČR se tedy jedná především o kmitočty 50Hz), důsledkem různých nelinearit ale následně vznikají i vyšší harmonické složky. Dalším významným zdrojem spojitého rušení, jsou měniče s polovodičovými prvky (především usměrňovače), které mohou generovat rušení až do kmitočtů v oblasti 30MHz. Posledním zdrojem stálého rušení jsou různé vysílače pro komunikační prostředky.

1.7.2 Zdroje impulzního rušení

Hlavním zdrojem impulzního rušení jsou především různé spínací prvky (především relé a stykače). Impulzní rušení vzniká také jako důsledek mnoha přírodních jevů. [1] [2]

2 Metody Zlepšování EMC

2.1 Základní princip zlepšování EMC

Způsob jakým se šíří rušivé signály, umožňuje jejich přenos omezovat na třech místech, popsanych v základním řetězci přenosu rušení (Obr. 2).

U **zdroje rušení** lze EMC zlepšovat omezením velikosti emitovaného rušení a to především snížením množství rušivých signálů, které daný zdroj produkuje, nebo alespoň změnit charakter těchto signálů, tak aby se snížila jejich nebezpečnost.

V **přenosovém prostředí** lze EMC zlepšovat snížením průchodnosti prostředí pro rušivé signály především omezováním vzniku parazitních vazeb.

U **přijímače rušení** lze EMC zlepšovat především zvyšováním odolnosti daného zařízení proti působícímu rušení.

2.2 Zabraňování vzniku parazitních vazeb

Jednou ze základních metod zlepšování EMC je omezení velikosti parazitních vazeb mezi zdrojem rušení a přijímačem rušení [1] [8].

2.2.1 Galvanická vazba

Tato vazba vzniká, pokud různé systémy mají společnou část obvodu. Pokud tedy lze systémy nepropojovat jedná se o nejvhodnější metodu potlačení této vazby. V některých případech ale nelze systémy naprosto oddělit, zde je tedy vhodné snažit se o zmenšení společných částí a dostatečně je dimenzovat, aby zde nedocházelo ke generování rušivých signálů. Na místech oddělení systémů je vhodné použít odrušovací prvky.

2.2.2 Kapacitní vazba

Tato vazba je způsobena parazitní kapacitou mezi částmi systémů a je tedy nutné snižovat tuto kapacitu. Toho lze dosáhnout např. zvětšením vzdálenosti mezi částmi systémů, minimalizací plochy kde se tyto systémy setkávají anebo volbou vhodných materiálů které tyto systémy oddělují. Lze také využít stínění mezi systémy, které parazitní kapacity rozdělí a tím zmenší.

2.2.3 Induktivní vazba

Tato vazba vzniká, pokud mezi dvěma systémy prochází společný magnetický tok a lze ji tedy omezovat zmenšením velikosti tohoto vazebního toku. Toho lze dosáhnout buď

omezením vlivu, který tento vazební tok má na rušený obvod např. použitím kroucených vodičů, nebo umístováním vodičů kolmo vůči sobě. Nebo konstrukcí prvků, které umožní uvolnění energie toku mimo rušený systém a tím jej efektivně zmenšit, toho lze dosáhnout např. instalací pomocného závitů nakrátko nebo použitím stínění.

2.2.4 Vazba vyzářováním

Tato vazba vzniká ve volném prostoru, a proto je nejčastější metodou použití stínění. Pokud je v obvodu zapojena anténa, lze v některých případech využít směrovosti některých druhů antén k omezení nežádoucí vazby.

2.3 Metody omezování šíření rušení vedením

Dalším způsobem zlepšování EMC je omezení šíření rušení ve vedeních a vodičích, které jsou přímo připojeny k danému zařízení a tím vytvářejí cestu, kterou lze narušit užitečné signály uvnitř daných zařízení. Pro účel zamezení šíření tohoto rušení se v místech připojení vedení k zařízení zapojují prvky pro odrušení, které zamezují průchodu rušivých signálů, ale neomezují šíření užitečných signálů. Mezi běžně používané prvky pro odrušení jsou: odrušovací tlumivky, kondenzátory nebo filtry a přepěťové ochranné prvky.

2.3.1 Odrušovací tlumivky

Tlumivka slouží pro odstranění vysokofrekvenčních složek rušení a lze ji zapojit na výstup ze zařízení, jako zábrana pro šíření rušení vzniklého uvnitř zařízení, nebo zapojit na vstup zařízení, jako ochranu proti účinkům přichozícího rušení. Zapojuje se sériově, tak aby se výkon rušení, které se šíří vedením, ztratil na reaktanci tlumivky. Je vhodné ji zapojit co nejblíže k místu vstupu vnějšího vedení do obvodů zařízení, aby nechráněná část vedení byla pokud možno co nejkratší. Jedná se sice o konstrukčně jednoduché řešení, ale nemusí být vždy vhodné z důvodu ceny a velikosti samotné tlumivky. Velmi důležité je také uvažovat parazitní vlastnosti tlumivky, jako je odpor vinutí, parazitní kapacita nebo rezonanční kmitočty, které pokud jsou příliš významné, mohou EMC naopak ještě snížit. Obecně také platí, že tlumivky je vhodné používat především v případech, kdy impedance zdroje i přijímače rušení je velmi malá ve srovnání s reaktancí tlumivky [1] [9].

2.3.2 Odrušovací kondenzátory

Kondenzátor slouží stejně jako tlumivka pro odstranění rušení, které se šíří vedením. Zapojuje paralelně mezi rušený vodič a společnou zem systému, tak aby výkon rušení, které se šíří vedením, byl tímto kondenzátorem sveden do společné země a tím se nemohl

dále nešířit systémem. Protože kondenzátor výkon rušení v podstatě zkratuje do společné země, je důležité zajistit, aby použitý kondenzátor byl schopný vydržet účinky průchodu proudu, který je rušením vyvolán. U kondenzátorů je také velmi důležité sledovat parazitní vlastnosti použitých kondenzátorů, aby bylo zaručeno, že jeho použití skutečně zlepší EMC. Obecně je použití kondenzátoru vhodné v případech, kdy je impedance zdroje i přijímače v porovnání s reaktancí kondenzátoru velmi velká [1] [9].

2.3.3 Odrušovací filtry

Filtry slouží pro dosažení vyšší kvality odstranění rušivých signálů, než v případě použití samostatných tlumivek nebo kondenzátorů. Jedná se o vhodné kombinace těchto součástek do tzv. LC filtrů (někdy lze využít i filtry tvořené odpory tedy tzv. RC nebo RL filtry). Tyto filtry lze lépe navrhnout pro odstranění konkrétních druhů rušení, a lze vytvořit i pásmové propusti nebo zádrže, které umožňují ovlivňovat konkrétní frekvenční pásma, která mohou být rušená. Vhodnou kombinací součástek lze i potlačit parazitní vlastnosti použitého vedení a tím tedy šíření rušení předcházet [1] [9].

Lze rozlišovat tři kategorie filtrů, které se liší především účelem použití:

(1) Síťové (napájecí) odrušovací filtry

Jedná v současnosti o nejčastěji využívaný druh odrušovacího filtru. Jeho účelem je zvýšení kvality napájecího napětí pro dané zařízení, tím že odstraní nežádoucí rušivé složky. Z tohoto důvodu jsou sestavovány, tak aby nepropouštěly vyšší harmonické střídavé složky, než jaké se mají uplatňovat v daném napájení. V případě stejnosměrného napájení se jedná o jakékoliv střídavé složky, nebo v případě střídavého napájení všechny kmitočty, které jsou vyšší než používaný napájecí kmitočet, v případě síťového kmitočtu se v ČR jedná o kmitočty vyšší než 50Hz [10] [11].

(2) Filtry EMP

Účelem těchto filtrů je ochrana elektronických systémů proti impulzům napětí vysoké intenzity. Jedná se v podstatě o napájecí filtry, které ale mají na vstupu zapojenou součástku omezující průchod přepětí (bleskojistku, varistor, ...). Jejich použití je vhodné všude, kde je zvýšené riziko výskytu přepětíových impulzů vlivem např. počasí.

(3) Datové filtry

Účelem těchto filtrů je ochrana dat proti účinkům rušení. Hlavní rozdíly oproti napájecím filtrům jsou především, že nejsou určeny pro přenos velkých výkonů a jsou na

ně kladeny velké nároky na strmost útlumové charakteristiky, aby bylo možné propouštět pouze užitečné pásmo kmitočtů.

2.3.4 Přepět'ové ochranné prvky

Přepět'ové ochranné prvky slouží jako ochrana zařízení proti vysokému napětí, které by mohlo poškodit dané zařízení. Jedná se o polovodičové součástky s nelineární V-A charakteristikou, u které se využívá jevu, kdy při dosažení určitého spínacího napětí dochází k rychlému nárůstu protékajícího proudu. Podle velikosti spínacího napětí a rychlosti reakce se přepět'ové prvky dělí na prvky **pro jemnou** a **pro hrubou** ochranu. Pro zaručení dobré funkce by měly být přepět'ové prvky zapojeny co nejbliže k chráněnému obvodu za pomoci co nejkratších vodičů [1] [12].

(1) Prvky pro hrubou přepět'ovou ochranu

Účelem těchto prvků je ochrana před extrémním přepětím (jednotky kV až MV), která by mohla naprosto zničit chráněná zařízení a rozvody. Pro tento účel se používají např. jiskřiště nebo plynem plněné výbojky (bleskojistky), které jsou sice pomalé a nepřesné, ale jsou schopné opakovaně vydržet účinky těchto vysokých přepětí.

(2) Prvky pro jemnou přepět'ovou ochranu

Účel těchto prvků je ochrana před přepětím, které vzniká např. spínáním stykačů, nebo slouží jako doplněk hrubých ochranných prvků, kdy zamezují šíření druhů přepětí, na které hrubé ochrany už nemohou, nestíhají reagovat. Pro tento typ ochrany zařízení se používají především součástky jako např. varistory, zenerovy nebo supresorové diody. Rozsah spínacích napětí těchto součástek se pohybuje od jednotek do tisíce Voltů.

2.4 Elektromagnetické stínění

Elektromagnetické stínění je jedním z nejvýznamnějších typů odrušení v EMC, jeho hlavní výhodou oproti jiným druhům odrušení je schopnost omezovat jak velikost rušení emitovaného se zdroje rušení, tak i schopnost zvýšit odolnost zařízení proti rušení. Stínění je velmi efektivní způsob jak zlepšování EMC daného zařízení, protože v případě správné konstrukce je možné chráněné zařízení v podstatě oddělit od okolního elektromagnetického prostředí a tím zamezit přenosu veškerých rušivých signálů.

2.4.1 Složky celkové účinnosti elektromagnetického stínění

V elektromagnetickém poli se v účinnosti stínění uplatňují celkem tři části útlumu, které společně tvoří celkovou účinnost stínění $SE[dB]$ (vztah 2.1).

$$SE [dB] = R [dB] + A [dB] + M [dB] \quad (2.1)$$

(1) Útlum odrazem

Útlum odrazem (ve vztahu 2.1 značen R) vzniká tak, že část rušení se od povrchu stínění odráží zpět do okolí a tím tedy neovlivňuje chráněný prostor uvnitř stínění. Velikost útlumu odrazem je velmi závislá na impedanci materiálu stínění, a proto je důležité, aby stínění bylo vyrobeno z dobrého elektrického vodiče.

(2) Útlum absorpcí

Útlum absorpcí (ve vztahu 2.1 značen A) vzniká tak, že při průchodu rušivého signálu skrz materiál stínění se část jeho energie přemění v tepelné ztráty a tím tedy neovlivňuje chráněný prostor uvnitř stínění. Velikost útlumu absorpcí je velmi závislá na kmitočtu rušivého signálu a exponenciálně roste s kmitočtem rušení.

(3) Útlum vlivem mnohonásobných odrazů

Poslední složkou celkového útlumu SE (vztah 2.1) je útlum vlivem mnohonásobných odrazů. Tento útlum je významný především v případě, kdy je konstrukce stínění z velmi tenkého materiálu. Projevuje se tím, že snižuje velikost celkového útlumu SE , tento jev se zvyšuje s velikostí rozdílu tloušťky stínění a vlnové délky rušení a tedy se projevuje především při nízkých kmitočtech.

2.4.2 Celková účinnost stínění

Pro celkovou velikost útlumu jsou nejvýznamnější útlum odrazem (vztah 2.1) a útlum absorpcí (vztah 2.1). Vztah mezi jednotlivými složkami celkového útlumu je takový, že při nízkých kmitočtech je významný pouze útlum odrazem (ten je zpočátku trochu snižován účinky útlumu vlivem mnohonásobných odrazů), který pomalu lineárně klesá s kmitočtem. Dále s rostoucím kmitočtem roste význam útlumu absorpcí, až se postupně tento útlum stane dominantní složkou celkového útlumu SE (vztah 2.1). Celkový útlum má tedy od nulového kmitočtu přibližně konstantní hodnotu, která poté vlivem útlumu absorpcí začne rychle vzrůstat.

2.4.3 Vliv nehomogenit na účinnost stínění

Aby elektrostatické stínění mohlo fungovat ideálně, je nutné, aby v něm byly odstraněny jakékoliv nehomogenity. Toho v praxi nelze dosáhnout především z funkčních a konstrukčních důvodů, vzhledem ke skutečnosti že stínění je často součástí nosné konstrukce, do které jsou elektrické obvody ukotveny. Další důvody, které omezují účinnost stínění, jsou např. nutnost přítomnosti větracích otvorů, nutnost možnosti rozmontování konstrukce nebo problémy při výrobě. Celkem lze druhy nelinearit, které se ve stínění vyskytují, lze rozdělit na tři skupiny:

(1) Otvory, štěrbiny a další druhy otvorů v konstrukci

Jedná se o nehomogenity vzniklé nedokonalou konstrukcí stínění, jako jsou např. spáry mezi oddělenými částmi krytů nebo dveře pro přístup dovnitř konstrukce. Většinou se jedná o důsledky nedokonalého návrhu konstrukce a lze je při návrhu také nejsnáze řešit.

(2) Špatně vodivé části stínění

Jedná se o nehomogenity vzniklé špatnou vodivostí částí stínění. To mohou být skleněné plochy, jako jsou skla měřicích přístrojů nebo místa špatného propojení jednotlivých částí. Jedná se tedy buď o důsledky specifických požadavků na konstrukci, nebo chyb při sestavování konstrukce stínění.

(3) Vnější přívodní kabely a přípojná vedení

Jedná se o nehomogenity vzniklé tím, že do chráněného prostoru uvnitř stínění je přivedena nestíněný vodivý materiál, který tak vytvoří cestu, kterou do chráněného prostoru může vstupovat rušení. Jedná se o velmi závažnou chybu v celkové konstrukci stínění, která může i naprosto znehodnotit celkovou funkci stínění a nemělo by k ní nikdy docházet. Situaci kdy je nutné přivádět do stíněného prostoru užitečné signály z nestíněného prostoru, je vhodné řešit použitím odrušovacího filtru těsně u povrchu stínění. Tento filtr je často samotný uzavřen do odděleného stíněného prostoru, aby se zabránilo situaci, že by rušení mohlo procházet prostorem okolo filtru.

Praktická část

Tato část se věnuje aplikaci poznatků v problematice EMC na příkladu univerzitní elektro-formule v rámci projektu formula student. Z důvodu velké rozpracovanosti tohoto projektu je v této části řešen pouze koncept možného řešení problematiky EMC s hlavním důrazem na možnosti aplikace a využití elektromagnetického stínění.

V první části je řešena problematika možného návrhu využití elektromagnetického stínění na konkrétních částech obvodů elektro-formule, stejně jako možnosti zlepšení elektromagnetické kompatibility pomocí vhodného rozvržení jednotlivých částí po prostoru uvnitř formule.

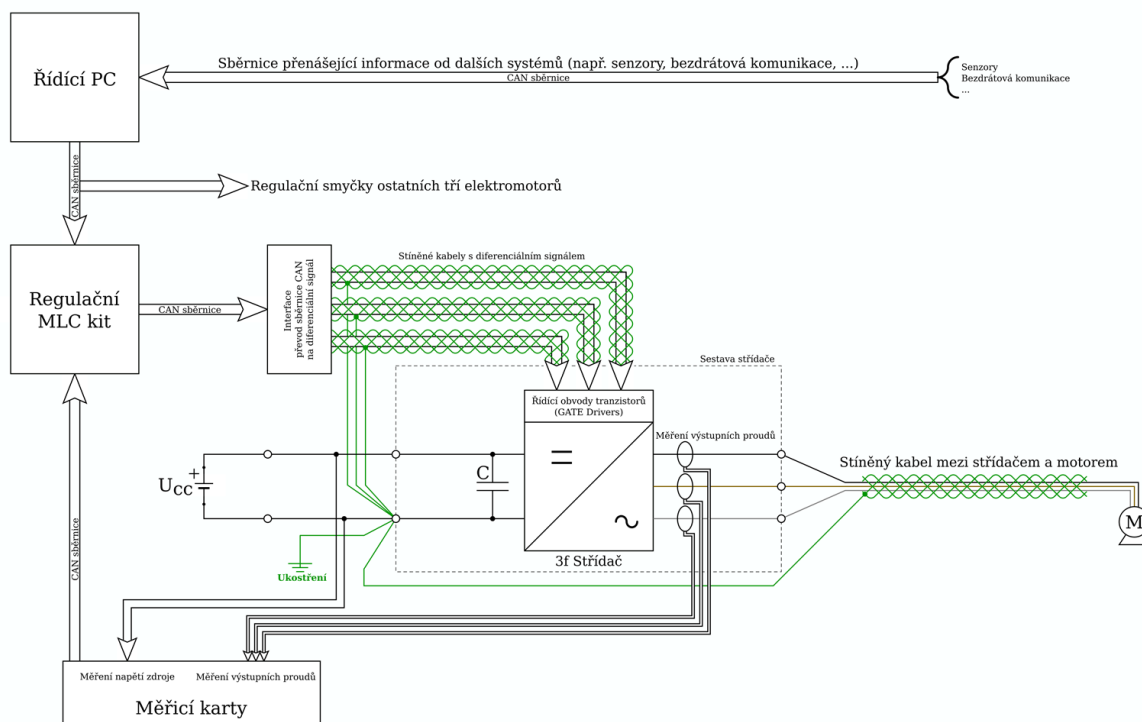
Druhá část se věnuje ověření účinků stínění kabelu na intenzitu rušení uvolňovaného do okolí tohoto kabelu. Důraz zde je věnován popisu frekvenčního spektra rušení v blízkosti tohoto kabelu, kterým protéká proud vytvořený střídačem využívající principy PWM modulace.

3 Návrh zlepšení EMC Formule

3.1 Popis základní konstrukce obvodů elektro-formule

Základní konstrukce elektro-formule obsahuje celkem čtyři elektromotory (každé kolo má samostatný pohon), ke každému z nich náležející obvody regulace a střídač dále centrální řídicí PC a senzory potřebné pro měření veličin, které mohou být významné pro systémy formule, případně přímo pro řidiče (např. měření rychlosti nebo tlaku v pneumatikách).

V podstatě lze obvody formule rozdělit na dvě základní části – část výkonovou a část řídicí. Výkonová část sestává ze zdroje stejnosměrného napětí (baterie), čtyř střídačů, čtyř elektromotorů a kabelů potřebných pro propojení těchto částí. Řídicí část sestává z řídicího PC, obvodů pro regulaci a řízení střídačů, senzory a datové sběrnice.



Obr. 6 Schéma obvodů motokáry se základním stíněním (značeno zeleně)

Jako hlavní zdroj rušení se v případě této formule projevuje především polovodičový střídač, který vytváří výstupní sinusové napětí pomocí PWM modulace. Intenzita rušení generovaného tímto střídačem je ještě zvýšena použitím spínacích tranzistorů na bázi SiC (Karbid křemíku), které vykazují extrémní rychlost přechodu mezi vodivým a nevodivým stavem, což velmi zvyšuje účinnost celého střídače, rychlé změny výstupního výkonu jsou

ale zdrojem vysokofrekvenčních rušivých signálů, které se jsou schopny velmi dobře šířit volným prostorem mezi jednotlivými částmi obvodů.

Dalším druhem rušení, které je generováno použitým střídačem, je rušení spínací frekvencí. Jedná se sice o nízkofrekvenční rušení, je ale schopno významným způsobem ovlivňovat napájecí rozvody, což může velmi snadno ovlivňovat funkci všech obvodů uvnitř formule. Z tohoto důvodu je vhodné používat na vstupech do obvodů prvky pro filtraci střídavých signálů ze stejnosměrného napájení.

Aby se dále snížilo šíření tohoto nízkofrekvenčního rušení, způsobeného náhlým zvyšováním proudu střídačem, je napájení střídače doplněno akumulací kapacitou C (260uF), která je zapojena na vstupu střídače co nejbližší spínacím pólům, kde svou schopností dodávat nárazově velké proudy zabraňuje přetěžování zdroje a přívodních vodičů, což by mohlo způsobovat poklesy napájecího napětí.

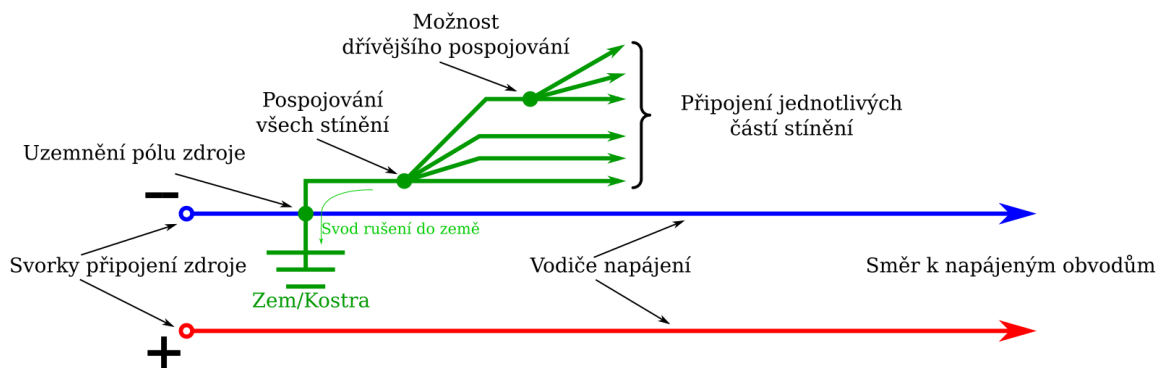
Další metodou použitou pro zlepšení odolnosti v EMC je použití diferenciálního signálu pro řízení driverů (řídících desek), což jsou komplexní obvody zodpovídající za správné spínání výkonových tranzistorů. Diferenciální signál se od běžného signálu v datových sběrnicích liší tím, že využívá logické úrovně kladného a záporného napětí, čímž má mnohem vyšší odolnost proti rušivým signálům (běžně používané signály používají logické úrovně kladného napětí a 0V). Hlavním problémem diferenciálních logických úrovní je, že pro svou funkci vyžadují obvody s větší složitostí a proto nejsou vhodné pro konstrukci výpočetních systémů. Aby bylo možné diferenciální řízení používat ve spolupráci s běžně dostupnými řídicími systémy, musí být propojení mezi těmito systémy vyřešeno za pomoci převodních obvodů (tzv. Interface). Touto úpravou obvodů dojde k vytvoření části řídicích obvodů, které mají mnohem vyšší odolnost proti rušivým signálům a mohou být tedy umístěny i v blízkosti střídačů, nebo jiných zdrojů rušení, aniž by došlo ke znehodnocení jejich signálů. Dále pro další zvýšení odolnosti diferenciálních linek jsou vedeny stíněnými kabely, které zvyšují jejich ochranu proti rušení o vysokých kmitočtech.

3.2 Poznatky pro zajištění správné funkce použitého stínění

V obvodech projektované formule je použito poměrně velké množství stíněných kabelů, které mají zajistit co nejlepší funkci všech použitých obvodů. To vyžaduje dodržení dvou hlavních zásad, aby byla tato funkce stínění zachována.

Jako první zásada je provedení uzemnění všech částí stínění. Pokud nelze dosáhnout dostatečně dobře vodivého spojení se zemí, což u vozidla, které se musí pohybovat, nejde, používá se tzv. ukostření. Ukostřením se označuje místo připojení k vodivým částem

konstrukce vozidla a jeho funkce je založena na předpokladu, že tyto části konstrukce vozidla slouží jako dostatečně rozlehlý prostor mimo samotné obvody, ve kterém se může veškerý výkon příchozího rušení rozložit a spotřebovat, aniž by došlo k rušení okolních obvodů.



Obr. 7 Schéma ukostření všech stínění a jednoho pólu napájení

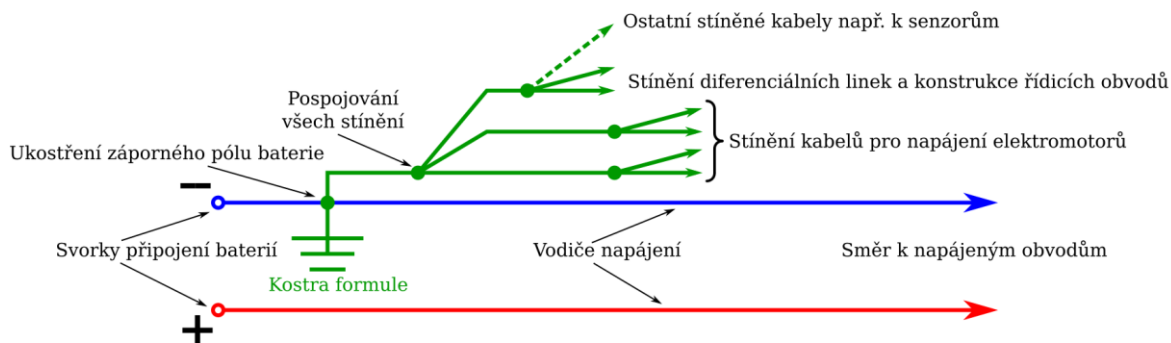
Druhou zásadou je, aby všechny části stínění byly spojeny pouze v jednom místě a nevznikaly tak žádné možné cesty pro průtok vyrovnávacích proudů, které by vytvářely ve svém okolí rušení a vlivem odporu materiálu stínění, by také vznikala rozdíly potenciálu mezi jednotlivými částmi stínění. Aby bylo také zajištěno pokud možno neměnicí se napětí napájecích obvodů proti kostrě, propojuje se vždy jeden z pólů napájení vodič s kostrou (většinou záporný v případě stejnosměrného napájení a střední v případě střídavého). [13]

3.3 Návrh aplikace stínění na elektro-formuli

Aplikaci poznatků EMC na elektro-formuli lze rozdělit na dvě základní oblasti, které se mohou vzájemně doplňovat. První oblastí je samotné použití stínění.

Samotná elektro-formule obsahuje celkem čtyři stíněné kabely pro napájení elektromotorů a čtyři trojice stíněných diferenciálních linek pro řízení střídačů. Všechny tyto části stínění musejí být pospojovány a ukostřeny.

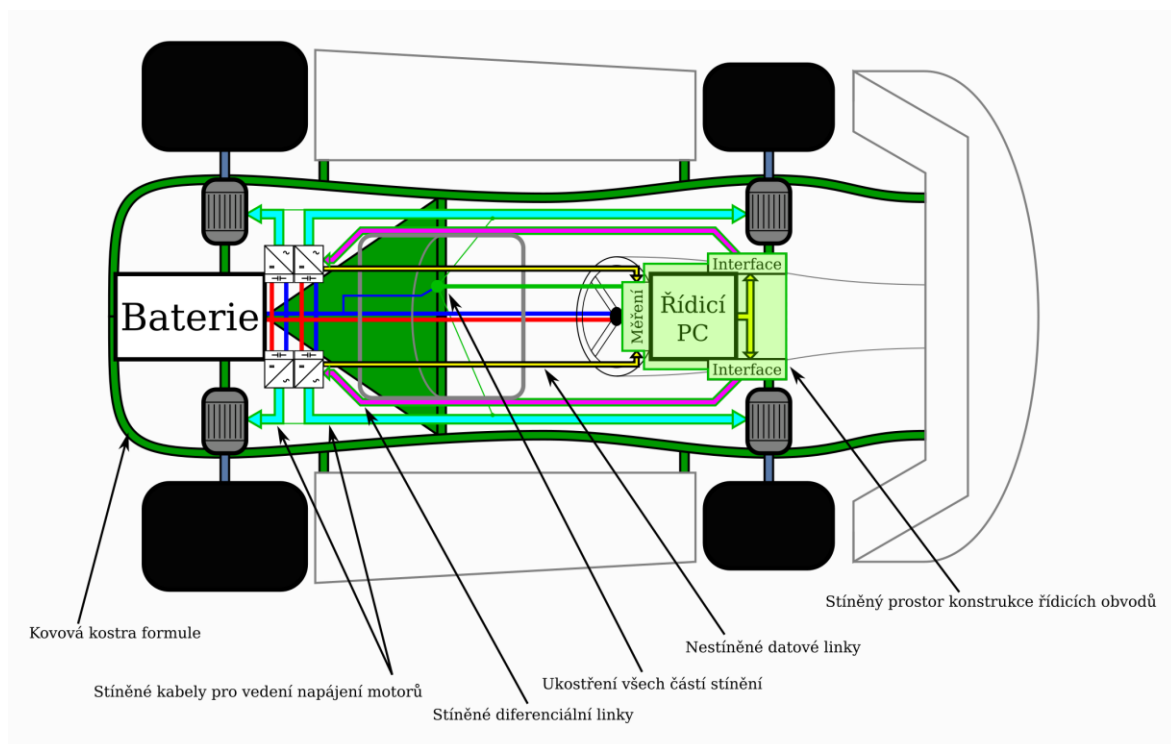
Dále by bylo vhodné využít konstrukce, ve které jsou uzavřeny řídicí obvody, pokud by tato konstrukce byla uzavřeným vodivým obalem všech vnitřních obvodů, plnila by funkci dalšího stínění a sloužila tedy jako ochrana těchto obvodů proti rušení. Pro dobrou funkci by ale musela být také propojena s místem ukostření ostatních stínění. Pokud by byly přidány do systému další stíněné kabely (např. k senzorům pro měření rychlosti) musely by tyto přidané kabely být také připojeny k místu ukostření ostatních částí.



Obr. 8 Schéma všech ukostřených částí formule

Druhou částí aplikace poznatků EMC jsou veškeré další poznatky, jako je například snaha, aby zdroj rušení a rušený obvod nebyly vedeny v blízkosti rovnoběžně. Toho je u stroje velikosti a tvaru formule v podstatě nemožné dosáhnout, lze ale např. pro řízení střídačů využít diferenciálních linek, které jsou proti rušení velmi odolné a převodní interface umístit do obvodu ještě před tím než řídicí linky opustí chráněný prostor okolo řídicích obvodů a tedy celou délku, kde je linka rovnoběžná s kabelem pro motor na předku vozidla, vést už pouze pomocí diferenciální stíněné linky.

Další problém jsou linky od měřicích přístrojů střídače. Ty lze vést co nejdále od tras kabelů k motorům a pokud by to nebylo dostatečné a signály těchto linek byly příliš zarušené, lze pro jejich vedení opět použít stíněné kabely, čímž se opět zvýší odolnost celého systému.



Obr. 9 Schématický návrh rozložení kabelů a linek po prostoru elektro-formule

Celkově lze v rámci zlepšování EMC elektro-formule říci, že je nutné dodržovat snahu o co největší možnou vzdálenost mezi kabely k motorům a datovými linkami. Bylo by také možné vyrobit velký stíněný žlab pro veškeré ohrožené linky.

Důležitým parametrem ale také u elektro-motokáry je váha a cena výsledného řešení a v podstatě je potřeba použít pouze tak malé množství ochranných prvků, aby stále byla zachována elektromagnetická kompatibilita, ale stroj byl co nejméně zatížen. To je ale problematika konkrétních řešení, která se více odvíjejí spíše od mechanických vlastností celého vozidla.

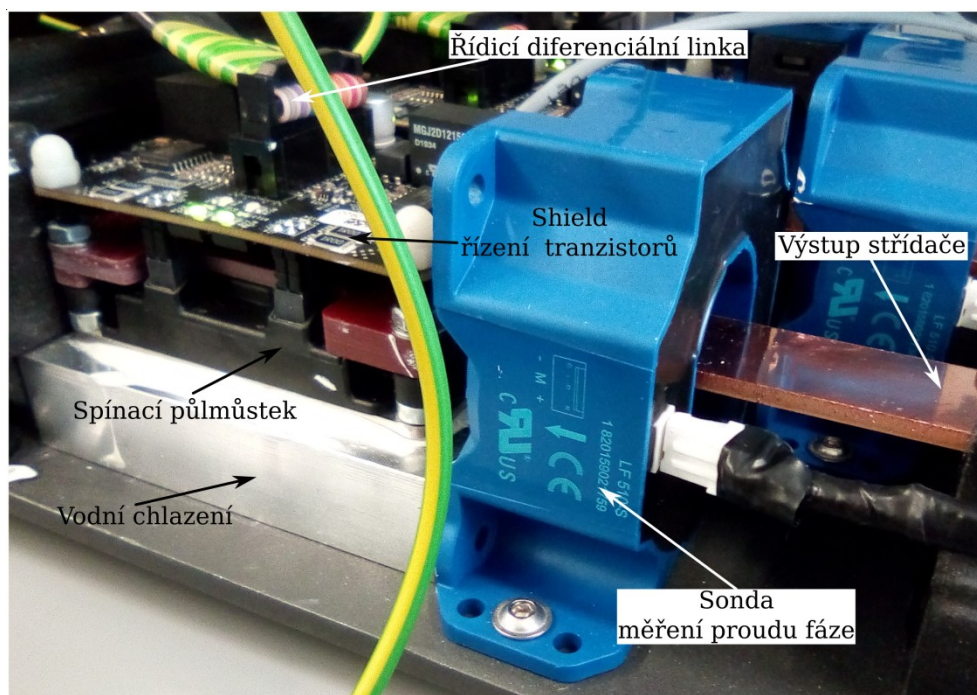
Celkově má tato kapitola spíše účel nastínění možných problémů, které se mohou při finálních fázích návrhu postupně projevovat, a bude nutné je řešit postupným odlaďováním celého systému [6] [13].

4 Měření účinků stínění na množství vyzařovaného rušení

Dále bylo provedeno měření s cílem zjistit, konkrétní účinky stínění na množství uvolňovaného rušení do okolí kabelu. Z důvodu že hlavním zdrojem rušení, které se šíří volným prostorem, jsou v projektované formuli kabely propojující střídače a elektromotory, bylo pro toto měření vybráno rušení právě v okolí jednoho z těchto kabelů.

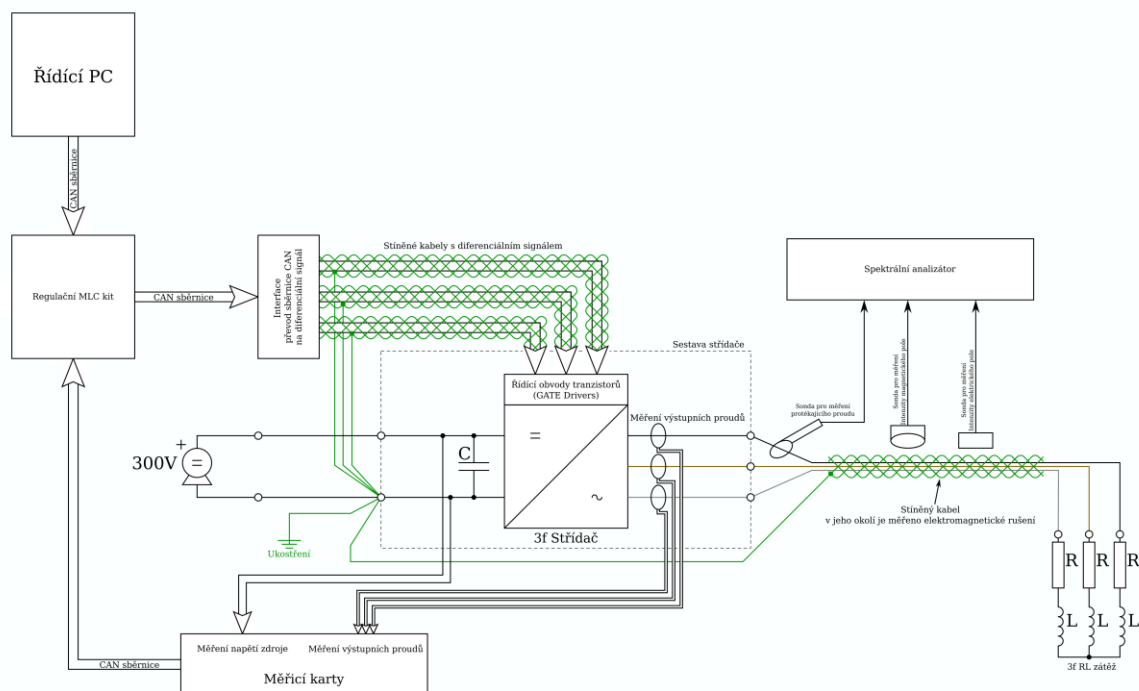
4.1 Příprava měření

Protože stavba samotné elektro-formule je pouze ve fázi projektu, byly vybrány střídače a řídicí obvody podle předběžného návrhu. Jedná se tedy o střídač tvořený trojicí spínacích půl můstků typu **CAB450M12XM3** a k nim připojených řídicích driverů **CGD12HBXMP**. Tyto spínací polovodičové prvky jsou schopny řídit průtok proudu až do velikosti **450A** při spínací frekvenci v řádu desítek kHz (při měření použito **25kHz**) [14] [15].



Obr. 10 Detail na konstrukci jednoho z půl můstků střídače použitého při měření

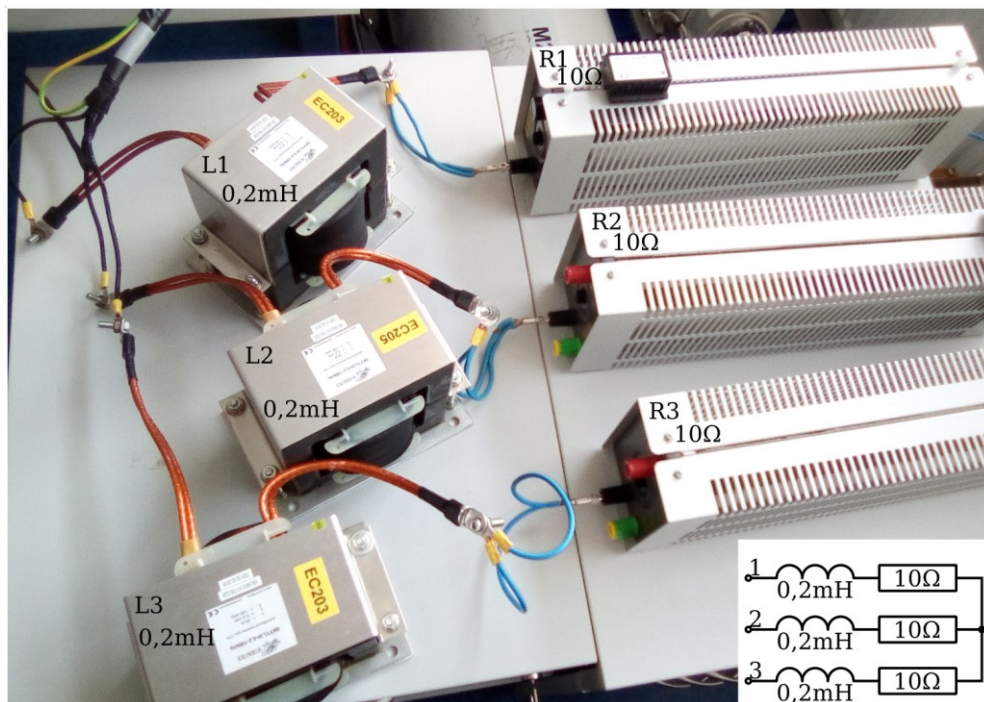
Jako zdroj stejnosměrného napětí bylo zapojeno dynamo s výstupním napětím 300V a jako zátěž byla zapojena třífázová RL zátěž zapojená do hvězdy.



Obr. 11 Schéma zapojení obvodů při provedeném měření rušení v okolí kabelu (stínění je značeno zelenou barvou)

Jako přístroj pro měření uvolňovaného rušení byl použit osciloskop firmy Tektronix typu **MDO 3034** umožňující funkci spektrálního analyzátoru, který byl vybaven sondami pro měření blízkého elektrostatického pole firmy Rohde&schwartz ze sady **HZ-15** (konkrétně H-sonda **RS H 400-1** a E-sonda **RS E 10**) a proudovou sondou firmy Tektronix **TCP 0030A**.

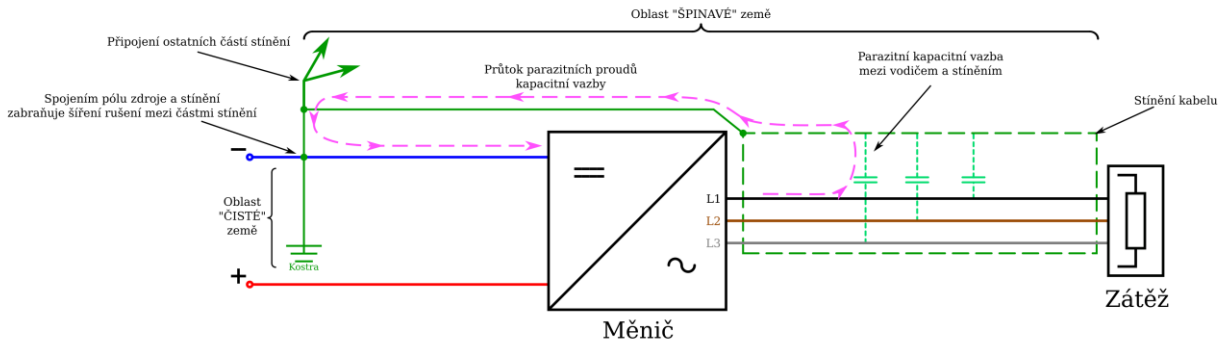
Pro měření byla nastavena spínací frekvence tranzistorů střídače na 25kHz a výstupní proud jedné fáze byl regulován na efektivní hodnotu 7A při kmitočtu 50Hz. Parametry součástek zátěže byly odpor $R = 10\Omega$ a indukčnost $L = 0,2\text{mH}$.



Obr. 12 Sestavená RL zátěž připojená k měřenskému kabelu

Důležitou částí zapojení měření bylo místo připojení země a pospojování všech stínění, pro tento účel bylo vybráno místo připojení záporného pólu dynama ke střídači a to z důvodu dobré přístupnosti tohoto bodu na prototypu střídače. Tím byla zároveň také splněna podmínka, aby bylo stínění připojeno mezi zdroj a filtrační kapacitu na vstupu střídače.

Dalším důvodem proč je velmi důležité propojit všechny části stínění v jednom bodě je vznik parazitních kapacitních vazeb mezi stíněním a vodiči uvnitř zařízení, především se jedná o jev vyskytující se v kabelech. Velkým problémem těchto vazeb je průchod rušivých proudů těmito kapacitami do stínění, kde se dále šíří tímto stíněním mezi různými částmi zařízení. Tím že se všechna stínění propojí, vznikne bod kudy se tyto kapacitní proudy mohou uzavírat a tedy nic nenutí tyto proudy opouštět prostor obvodu, ze kterého pochází a vrací se nejkratší možnou cestou zpět do obvodu a nešíří se tak náhodně mezi připojenými zařízeními.



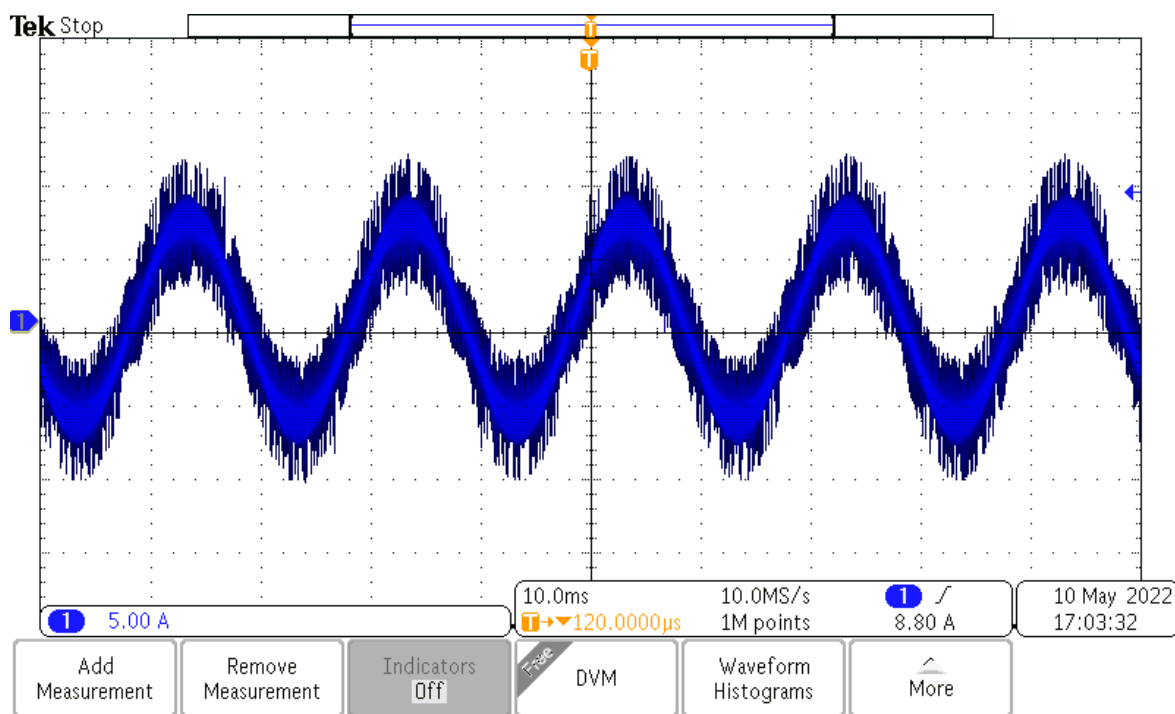
Obr. 13 Znáornění průtoku proudu kapacitní vazkou mezi vodiči a stíněním

V celkové sestavě použité při měření jsou celkem čtyři stíněné kabely. Jedná se o tři kabely stíněných diferenciálních linek vedoucích do driverů řídicích tranzistorů a stínění měřeného kabelu (to bylo při měření uvolňovaného rušení obyčejného kabelu odpojeno). Stínění diferenciálních linek bylo pro snazší manipulaci nejdříve stranou pospojováno ve svorkovnici a pak jedním společným vodičem připojeno na šroub pro připojení napájení, stínění měřeného kabelu bylo připojeno přímo na šroub napájení. Jako uzemnění byl pro měření využit ochranný vodič PE.

4.2 Měření velikosti intenzity uvolňovaného rušení

V rámci první části měření byl nejprve zkoumán základní charakter proudu procházejícího měřeným vodičem a rušení v okolí kabelu.

Nejprve byl proudovou sondou změřen průběh proudu jednou fází. Tento proud má sice základní tvar sinového průběhu, je ale viditelné velké množství deformací a lze předpokládat, že se jedná o část signálu, která může být zdrojem rušení v okolí kabelu.

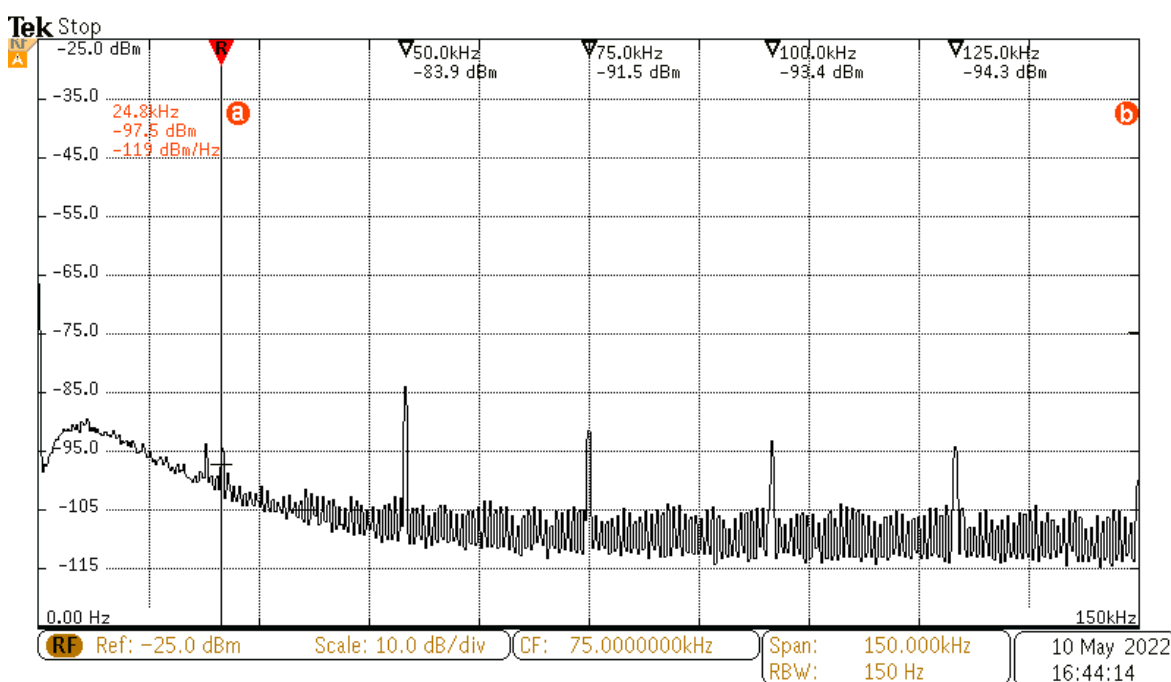


Graf 1 Změřený průběh proudu jedné fáze

Dále byl kontrolován charakter rušení v okolí kabelu a lze jej rozdělit na tři základní oblasti kmitočtů. Jako první oblast lze označit kmitočty 0 až 300kHz, druhá oblast je mezi kmitočty 300kHz až 45MHz a poslední oblast jsou kmitočty vyšší než 45MHz. První dvě oblasti mají složitější charakter, ale ve třetí oblasti (nad 45MHz) se nepodařilo změřit žádné viditelné rušení a je proto vyhodnocena jako oblast, kam rušení kabelu už nezasahuje.

4.2.1 Měření v oblasti nízkých kmitočtů (0Hz až 300kHz)

První oblast zahrnující kmitočty **0Hz** až **300kHz** obsahuje především velké množství rušení pozadí, lze zde ale rozlišit výrazné špičky rušení vytvářené vlivem spínacího kmitočtu tranzistorů střídače. Na změřeném spektru rušení lze první projev rušení kabelu nalézt na kmitočtu spínání tranzistorů (**25kHz**) a následně lze podobný pulz nalézt na každém celém násobku tohoto kmitočtu. Zároveň je viditelné pozvolné klesání intenzity tohoto rušení směrem k vyšším kmitočtům. Protože se jedná o nízkofrekvenční rušení, tak zde nemá stínění dostatečně velký vliv, aby toto rušení potlačilo, a je tedy nutné jako řešení použít filtry na vstupech a výstupech rušených zařízení, aby se toto nízkofrekvenční rušení nešířilo napájecím vedením do dalších obvodů elektro-formule.



Graf 2 Rušení v okolí měřeného kabelu v oblasti kmitočtů do 150kHz

4.2.2 Měření vyšších kmitočtů (300kHz až 45MHz)

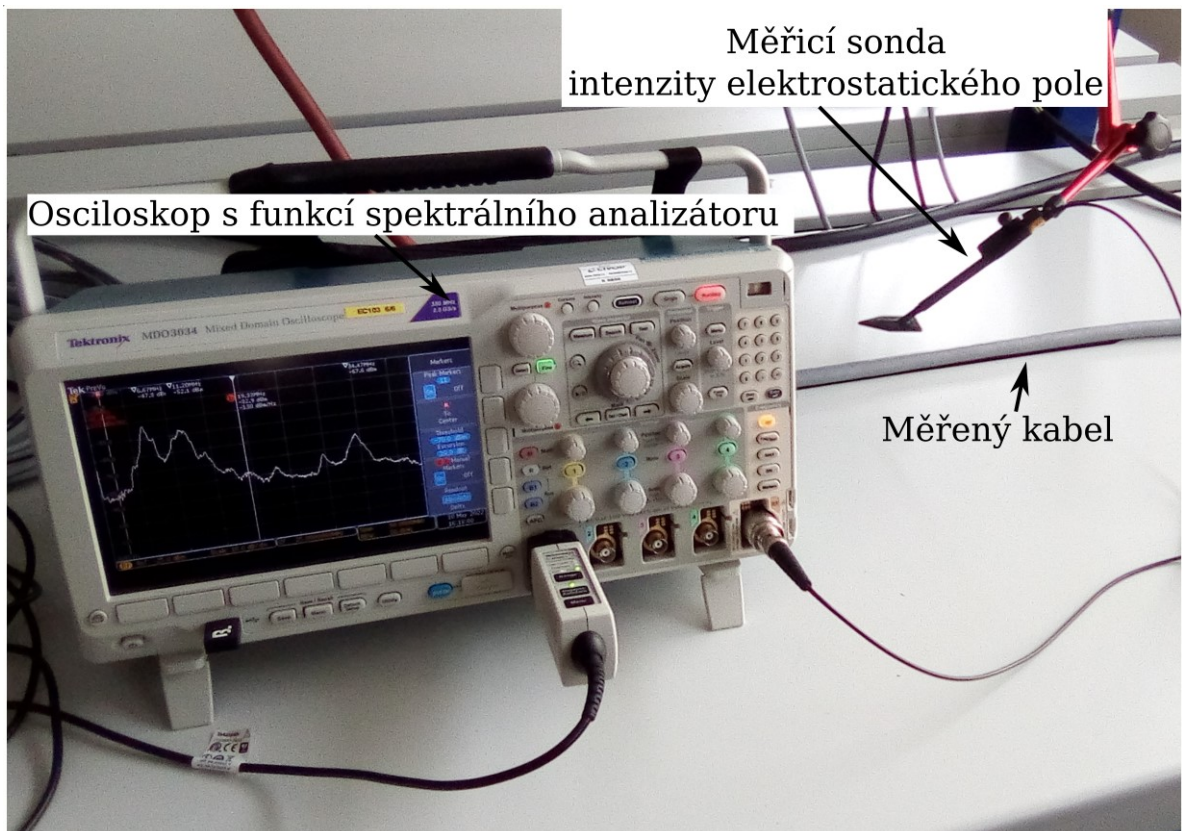
Druhá oblast zahrnující kmitočty **300kHz** až **45MHz** obsahuje složitější skladbu rušení. Jako hlavní oblasti tohoto rušení lze označit rušení v okolí kmitočtů **10MHz** a **35MHz**, pravděpodobný zdroj tohoto rušení by mohla být vzestupná a sestupná hrana při spínání tranzistorů střídače.

V oblasti vyšších kmitočtů už ale lze také sledovat mnohem výraznější účinky použití stínění na množství uvolňovaného rušení do okolí kabelu, lze ale také vidět postupné snižování velikosti naměřeného rušení v oblasti **40MHz** až **45MHz** a proto nebyly už zaznamenány kmitočty vyšší než **50MHz**.

Z důvodu přesnosti a proveditelnosti měření byly intenzity magnetického a elektrostatického pole měřeny samostatně pomocí dvou různých druhů sond pro měření blízkého elektromagnetického pole a celkové měření se tedy sestává ze dvou částí. Je také viditelné, že účinky stínění jsou rozdílné pro magnetické a elektrostatické pole.

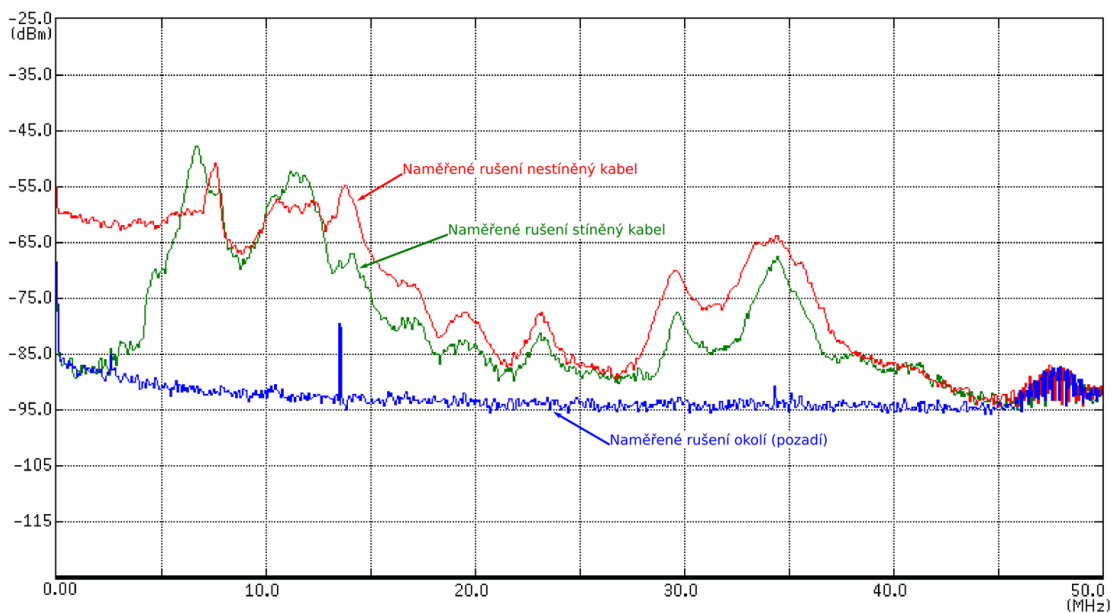
(1) Měření intenzity elektrostatického pole (pole E)

Prvním měřením bylo měření intenzity elektrostatického pole v okolí měřeného kabelu. Pro toto měření byla použita osciloskopická sonda pro měření blízkého elektrostatického pole RS E 10.



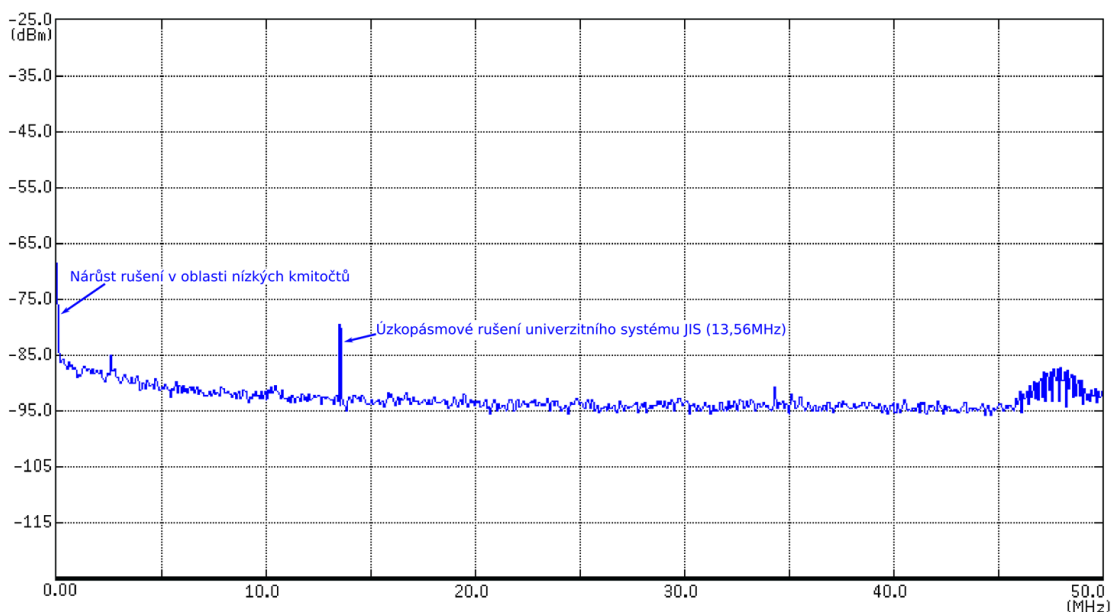
Obr. 14 Snímek z měření intenzity elektrostatického pole v okolí kabelu

Při tomto měření byly provedeny celkem tři měření intenzity pole v závislosti na kmitočtu: měření rušení na pozadí (na Obr. 16 značeno modře), měření v okolí nestíněného kabelu (na Obr. 16 značeno červeně) a měření v okolí stíněného kabelu (na Obr. 16 značeno zeleně). Pro přehlednost a možnost porovnání byly všechny tři naměřené průběhy složeny do jednoho společného grafu s upraveným značením os, tak aby nezasahovalo do oblasti grafu.



Graf 3 Závislosti velikostí elektrostatičké rušení na kmitočtu – rušení na pozadí (modře), rušení nestíněného kabelu (červeně) a rušení stíněného kabelu (zeleně)

Nejprve bylo provedeno měření intenzity rušení na pozadí, které působilo v průběhu měření. Zde lze nalézt především dvě významné oblasti kmitočtů, ve kterých intenzita elektrostatičké pole vykazuje zvýšené hodnoty, které mohly ovlivnit zbylá měření.

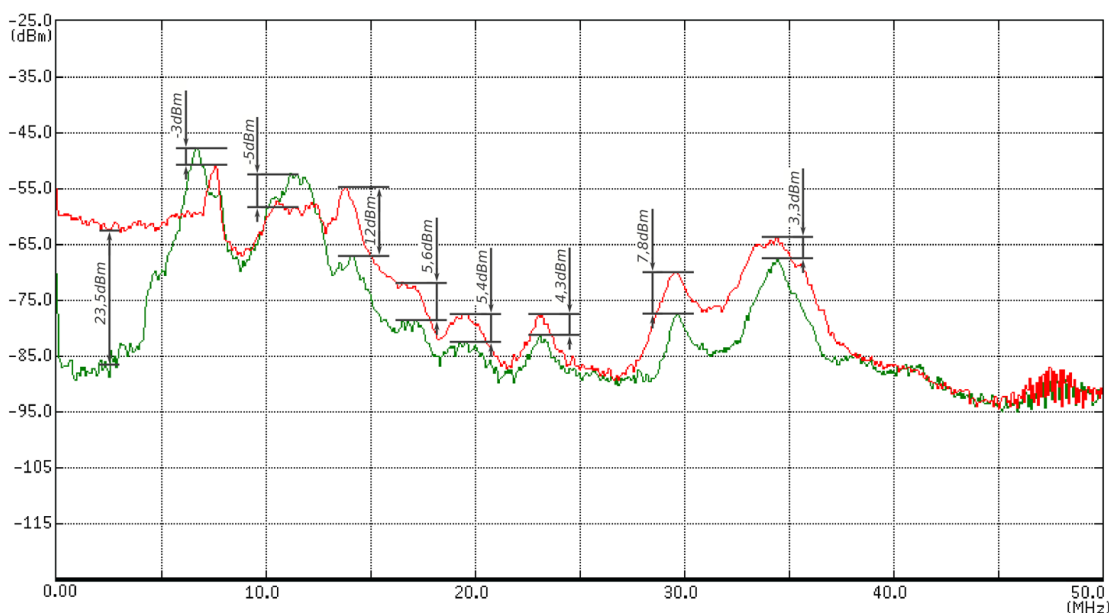


Graf 4 Elektrostatičké rušení na pozadí v závislosti na kmitočtu

Jako první je viditelná oblast nízkofrekvenčního rušení mezi kmitočty **0Hz** až **300kHz**, zde lze vidět výrazný nárůst intenzity rušení, z čehož lze vyvodit, že v této oblasti kmitočtů je úroveň rušení zvýšená natolik, že je nutné vždy ověřit dostatečnou odolnost zařízení

proti rušení těchto kmitočtů. Jako druhá viditelná oblast je úzké pásmo v těsném v okolí kmitočtu **13,56MHz**. Toto úzkopásmové rušení je generováno univerzitním přístupovým systémem JIS, který tento kmitočet používá jako nosnou vlnu. Jedná se tedy o problém konkrétního vysílání v dané oblasti.

Jako další byly změřeny průběhy intenzity rušení nejdříve v okolí **stíněného** a poté **nestíněného** kabelu. Při porovnání těchto dvou průběhů lze celkově říci, že stínění významným způsobem snižuje množství uvolňovaného rušení. Důležitým faktem ale je, že tento jev má velmi rozdílné účinky pro různé kmitočty. Při provedeném měření se rozdíl v intenzitách elektrostatického rušení mezi měřenými kabely pohyboval na hodnotách mezi **útlumem 23,8dB** až **zesílením 5dB**. Z toho vyplývá také fakt, že ačkoliv stínění celkově pomáhá omezovat šíření rušení, může pro určité kmitočty naopak množství rušení zvýšit.

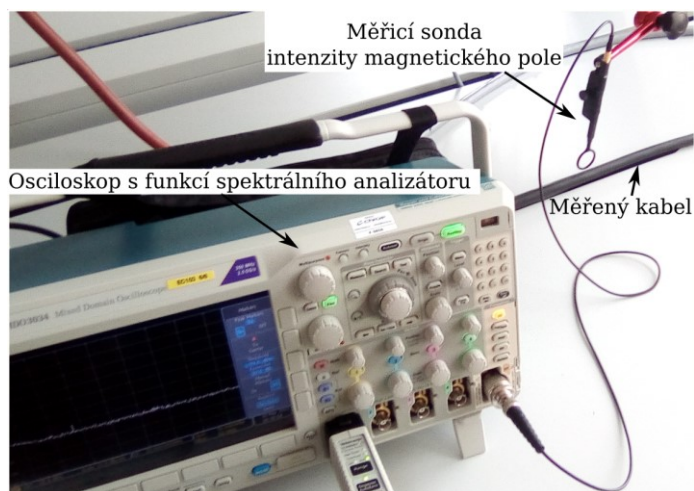


Graf 5 Porovnání velikostí elektrostatického rušení v okolí měřených kabelů – stíněný kabel (zeleně) a nestíněný kabel (červeně)

Porovnáním všech tří změřených průběhů lze tedy zjistit několik poznatků. První poznatek je, že v oblasti mezi kmitočty **300kHz** až **3MHz** je účinek stínění v podstatě naprosté potlačení elektrostatického rušení kabelu v jeho okolí, v případě provedeného měření bylo rušení na těchto kmitočtech nerozpoznatelné od rušení pozadí. Dále ale také lze nalézt oblasti kmitočtů, kde se účinky stínění nemusejí nijak viditelně projevovat (při měření nalezeno v oblasti kmitočtů **37,5MHz** až **45MHz**), nebo může docházet i k negativním účinkům a tedy zvýšení intenzity elektrostatického rušení uvolňovaného do okolí (při měření nalezeno ve dvou oblastech kmitočtů, a to nejprve **6MHz** až **8MHz** a pak také mezi **10MHz** až **12,5MHz**).

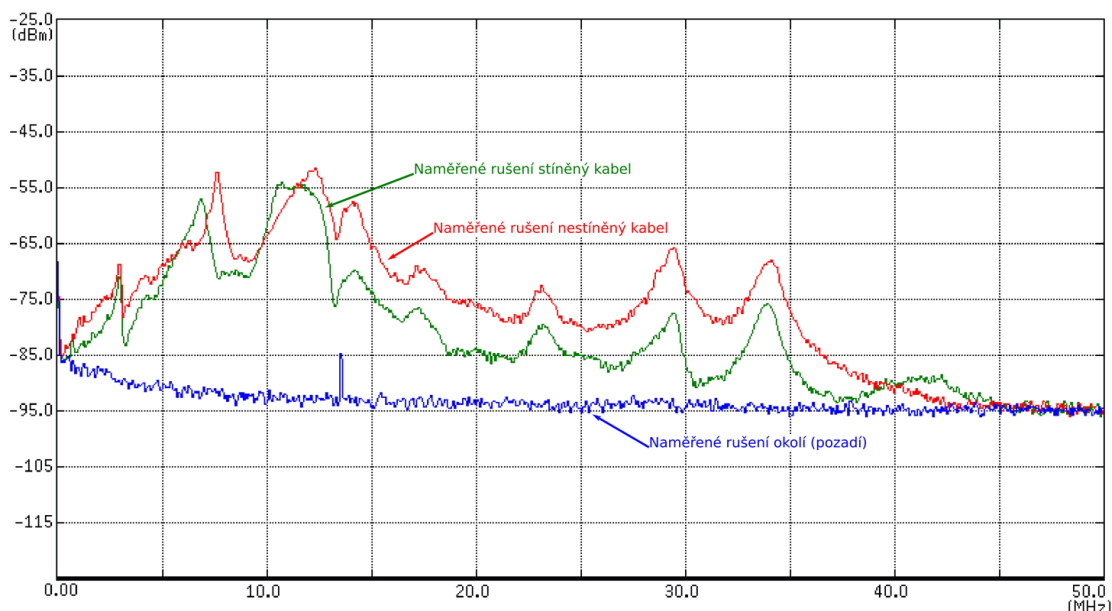
(2) Měření intenzity magnetického pole (pole H)

Druhým měřením bylo měření intenzity magnetického pole v okolí kabelu. K měření byla použita osciloskopická sonda pro měření blízkého pole **RS H 400-1**.



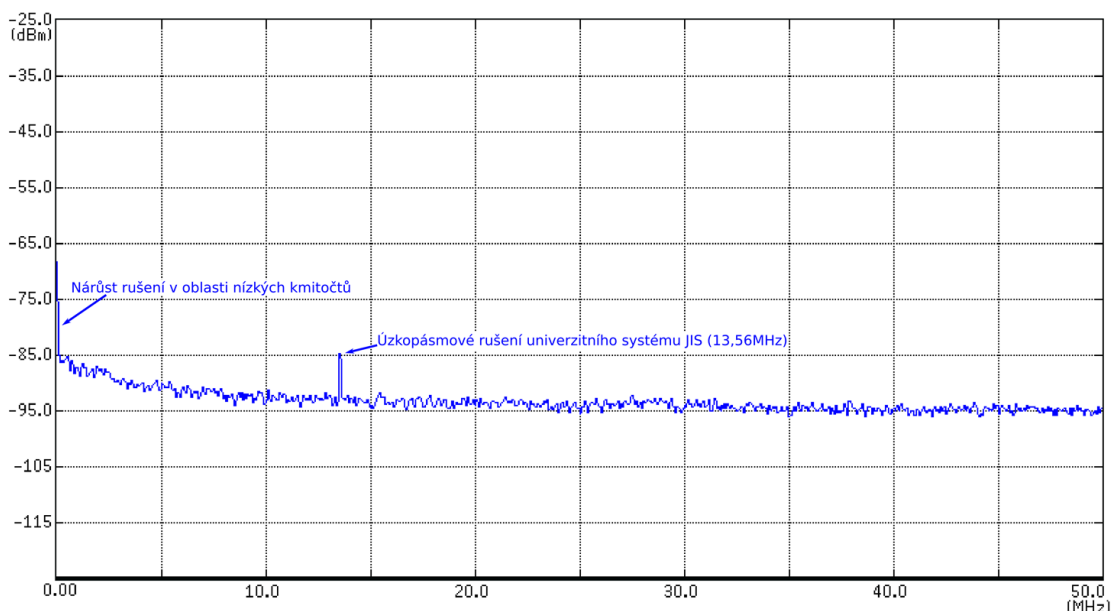
Obr. 15 Snímek z měření intenzity magnetického pole v okolí kabelu

Stejně jako při měření elektrostatického rušení byly i pro měření magnetického rušení provedeno celkem tři měření intenzity rušení: měření rušení na pozadí, měření v okolí nestíněného kabelu a měření v okolí stíněného kabelu. Tyto průběhy jsou na Obr. 20 značeny stejnými barvami jako při měření elektrostatického pole (Obr. 16).



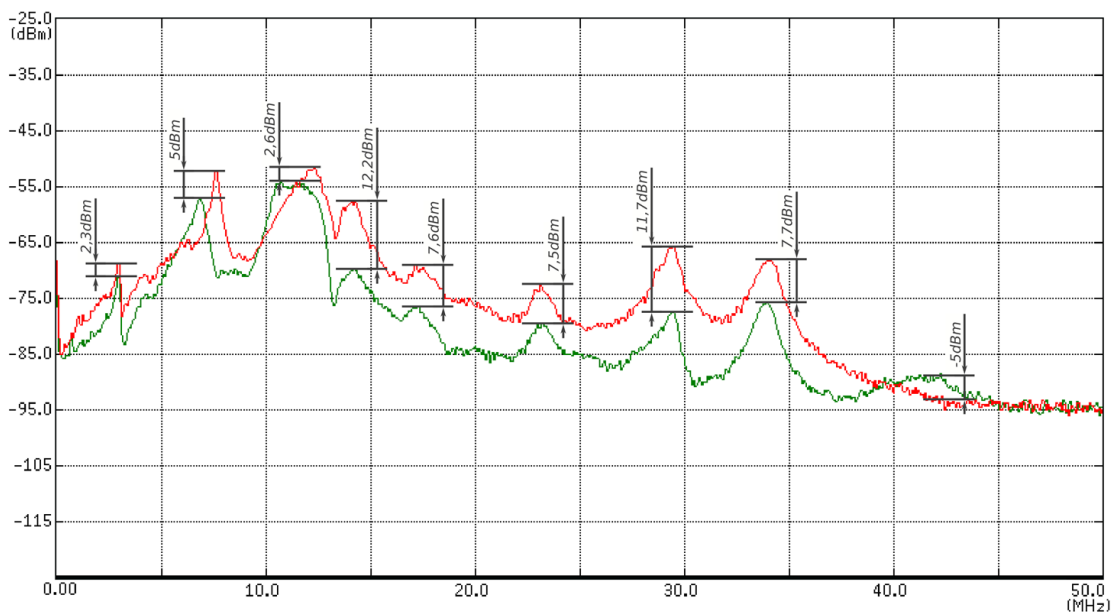
Graf 6 Závislosti velikostí magnetického rušení na kmitočtu – rušení na pozadí (modře), rušení nestíněného kabelu (červeně) a rušení stíněného kabelu (zeleně)

Nejprve byla změřena intenzita magnetického rušení pozadí, kde byla zjištěna zvýšená intenzita rušení na stejných kmitočtech jako v případě elektrostatického rušení. Lze zde nalézt nárůst intenzity rušivých signálů na nízkých kmitočtech v rozmezí **0Hz** až **300kHz** a úzkopásmové rušení na kmitočtu **13,56MHz** způsobované univerzitním systémem JIS stejně jako při měření elektrostatického pole.



Graf 7 Magnetické rušení na pozadí v závislosti na kmitočtu

Dále byly změřeny průběhy intenzit rušení v okolí stíněného a nestíněného kabelu. Oproti účinkům stínění na šíření elektrostatického rušení, které jsou velmi nepravidelné, jsou účinky stínění na velikost uvolňovaného magnetického rušení v měřeném pásmu více rovnoměrné a s výjimkou oblasti **40 až 45MHz**, kde se množství rušení uvolňovaného do okolí použitím stínění zvýšilo, jsou ve zbytku měřeného pásma účinky stínění pozitivní a intenzita uvolňovaného rušení se v okolí kabelu použitím stínění snížila. Účinky stínění ale ani v oblasti magnetického rušení nejsou zcela konstantní a je nutné uvažovat, že útlum na stínění se pohybuje od **2dB** až **11,7dB** v závislosti na kmitočtu.



Graf 8 Porovnání velikostí magnetického rušení v okolí měřených kabelů – nestíněného kabelu (červeně) a stíněného kabelu (zeleně)

4.3 Shrnutí výsledků měření

Měřením účinků použití stínění kabelu na intenzitu uvolňovaného rušení, vzniklého jako parazitní efekt průtoku proudu generovaného pomocí modulační PWM, se povedlo ověřit pozitivní účinky tohoto stínění. Je ale důležité uvažovat fakt, že účinky tohoto stínění nejsou v žádném případě konstantní a pro některá pásma kmitočtů může nastat i situace, kde stínění místo utlumení rušení jej naopak zesílí. Další problematickou vlastností elektromagnetického stínění je snižující se účinnost v pásmu nízkých kmitočtů, kde se v případě provedeného měření v oblasti kmitočtů pod cca 300 kHz účinky stínění nijak viditelně neprojevují.

Přes veškeré problémy stínění se ale jedná o vhodný způsob zlepšení elektromagnetické kompatibility jak v případě zdroje tak přijímače elektromagnetického rušení.

Závěr

Tato práce se snažila představit základní problematiku elektromagnetické kompatibility.

V první části byla uvedena základní teoretická problematika důvodů a příčin vzniku samostatných vědních oborů věnujících se této problematice. Byly zde uvedeny základní mechanismy vzniku a šíření elektromagnetického rušení, které se běžně vyskytují a ovlivňují zařízení v běžném prostředí.

V druhé části byly uvedeny základní způsoby omezování elektromagnetických vazeb, jako je např. kapacitní, nebo induktivní vazba. Dále zde byly popsány základní druhy prvků pro zlepšování EMC, jako jsou např. filtry, bleskojistky, a byla představena základní problematika elektromagnetického stínění.

Ve třetí části byla popsána možnost aplikace poznatků EMC na příkladu projektu elektro-formule. Zde byla věnována snaha předně o popis základních zařízení použitých pro tuto formuli a z jejich činnosti plynoucích komplikací pro EMC. Následně byla nastíněna možnost řešení těchto problémů, především použitím vhodného rozmístění obvodů a využití elektromagnetického stínění. Byla zde rozpracována především pravděpodobně nejvhodnější varianta využití oddělených tras a stínění kabelů. Lze ale zmínit další varianty jako např. nevyužit žádné stínění, což by vedlo sice k významným úsporám za materiál, ale s velkou pravděpodobností by došlo k nedostatečné ochraně datových linek a následně k nefunkčnosti celého systému. Další možnou variantou by mohla být snaha o co nejlepší proveditelnou elektromagnetickou kompatibilitu, zde by mohly být použity kupříkladu stíněné kabelové žlaby pro vedení datových linek, což by vedlo sice ke spolehlivé funkci celého systému, ale extrémně by narostla cena materiálu a pravděpodobně i váha celé motokáry což je naprosto nežádoucí.

Ve čtvrté části bylo provedeno měření účinků použití stínění na intenzitu elektromagnetického rušení uvolňovaného do okolí kabelu, kterým protéká proud ze střídače do elektromotoru, což je na příkladu elektro-formule hlavní zdroj elektromagnetického rušení, který ohrožuje správnou funkci použitých obvodů. Zde byly naměřeny velmi pozitivní výsledky (v nejlepším případě útlum stínění až 23,5dB) zároveň ale bylo zjištěno, že v určitých frekvenčních pásmech se může aplikace stínění projevovat i negativně a zesilovat rušení uvolňované kabelem.

Celkově lze říci, že problematika EMC obsahuje množství problematik, které se mnohdy ovlivňují nepředvídaným způsobem. Proto je správná metoda zlepšení EMC často otázkou správné intuice a co nejširších znalostí mnoha oborů elektrotechniky.

Zdroje

- [1] SVOBODA, J. Základy elektromagnetické kompatibility, Skripta FEL ČVUT. Praha: ČVUT, 1993
- [2] SVAČINA, J. Elektromagnetická kompatibilita, Skripta VUT v Brně. Brno: Ústav radiotechniky, 2002
- [3] Česká státní norma ČSN IEC 50(161) (334201)
- [4] KOČMAN Stanislav. Základní pojmy a normalizace v EMC, Skripta VŠB-TU Ostrava. Ostrava: Fakulta elektroniky a informatiky, 2017
- [5] DVOŘÁČEK, Jaroslav. Kurs radiotechniky. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1975. ISBN 04-517-75
- [6] HAVLÍČEK, Miroslav. Příručka radiotechnické praxe. Praha: Naše Vojsko, 1961
- [7] Česká státní norma ČSN EN 55014-1 ED.4 (334214) Elektromagnetická kompatibilita
- [8] HAVELKA, Jiří. Novodobé přijímací antény pro příjem rozhlasu a televise. Praha: Technickovědecké vydavatelství, 1951
- [9] KONAŠINSKIJ. Elektrické filtry - překlad Ing. Stanislav Vojtášek. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1955
- [10] KŮS, Václav. Vliv polovodičových měničů na napájecí soustavu. Praha: BEN - technická literatura, 2002. ISBN 80-7300-062-8
- [11] KŮS, Václav. Nízkofrekvenční rušení. Plzeň: Západočeská univerzita, 2003. ISBN 80-7082-976-1
- [12] FIBICH, HORNA, ŠMAHA. Zenerovy diody. Praha: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1966. ISBN 04-505-66
- [13] CepTechnogies. Understanding EMI/RFI Shielding to Manage Interference. Dostupné z WWW: <https://ceptech.net/resources/understanding-emi-rfi-shielding-to-manage-interference/>
- [14] Datasheed spínacího půl můstku **CAB450M12XM3**. Lze nalézt na stránkách výrobce Wolfspeed: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/CAB450M12XM3.pdf>
- [15] Datasheed driveru pro spínací půl můstek **CGD12HBXMP**. Lze nalézt na stránkách výrobce Wolfspeed: <https://assets.wolfspeed.com/uploads/2020/12/CGD12HBXMP.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 Základní pojmy v EMC	- 14 -
Obr. 2 Základní řetězec přenosu elektromagnetického rušení.....	- 15 -
Obr. 3 Dělení EMC na Rušení a Odolnost.....	- 16 -
Obr. 4 Elektromagnetické vazby	- 17 -
Obr. 5 Způsoby dělení rušivých signálů podle vlastností.....	- 19 -
Obr. 6 Schéma obvodů motokáry se základním stíněním	- 30 -
Obr. 7 Schéma ukostření všech stínění a jednoho pólu napájení.....	- 32 -
Obr. 8 Schéma všech ukostřených částí formule.....	- 33 -
Obr. 9 Schématický návrh rozložení kabelů a linek po prostoru elektro-formule.....	- 34 -
Obr. 10 Detail na konstrukci jednoho z půlmůstků střídače použitého při měření ...	- 35 -
Obr. 11 Schéma zapojení obvodů při provedeném měření rušení v okolí kabelu	- 36 -
Obr. 12 Sestavená RL zátěž připojená k měřenému kabelu	- 37 -
Obr. 13 Znázornění průtoku proudu kapacitní vazkou mezi vodiči a stíněním.....	- 38 -
Obr. 14 Snímek z měření intenzity elektrostatického pole v okolí kabelu	- 41 -
Obr. 15 Snímek z měření intenzity magnetického pole v okolí kabelu	- 44 -

Seznam Grafů

Graf 1 Změřený průběh proudu jedné fáze	- 39 -
Graf 2 Rušení v okolí měřeného kabelu v oblasti kmitočtů do 150kHz.....	- 40 -
Graf 3 Závislosti velikostí elektrostatického rušení na kmitočtu	- 42 -
Graf 4 Elektrostatické rušení na pozadí v závislosti na kmitočtu.....	- 42 -
Graf 5 Porovnání velikostí elektrostatického rušení v okolí měřených kabelů	- 43 -
Graf 6 Závislosti velikostí magnetického rušení na kmitočtu	- 44 -
Graf 7 Magnetické rušení na pozadí v závislosti na kmitočtu.....	- 45 -
Graf 8 Porovnání velikostí magnetického rušení v okolí měřených kabelů.....	- 46 -