



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

VLIV ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY NA PROVOZ BUDIČŮ LED V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

EFFECT OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY ON THE OPERATION OF AUTOMOTIVE LED DRIVERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Viktorie Vinklerová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Studentka: Bc. Viktorie Vinklerová

ID: 220859

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Vliv elektromagnetické kompatibility na provoz budičů LED v automobilovém průmyslu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je provést analýzu elektromagnetické kompatibility (EMC) budičů LED a navrhnout opatření pro optimalizaci jejich provozu s ohledem na EMC.

- Proveďte reprezentativní rešerši existující literatury a standardů v oblasti elektromagnetické kompatibility a jejího vlivu na budiče LED v automobilovém průmyslu.
- Podrobně se seznamte s integrovanými obvody NCV78964 a NCV78514 pro řízení LED od firmy onsemi. Zaměřte se zejména na princip činnosti těchto DC/DC měničů, způsob jejich provozu a systémovou architekturu s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu (EMC).
- Analyzujte základní obvodové zapojení těchto budičů a navrhněte vhodné podmínky pro měření, metody a vyhodnocení vlivu na EMC.

V rámci diplomové práce proměřte, na základě standardů EMC, stávající kity s uvedenými budiči. Výsledná měření vyhodnoďte a kvalifikovaně diskutujte dosažené výsledky. Na základě vámi provedených měření proveďte optimalizaci provozních parametrů budičů a také optimalizaci zapojení diskretních součástek nezbytných pro výslednou funkčnost driverů. Všechny uvedené úkony kvalifikovaně popište v textové části diplomové práce.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 21.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Vladimír Levek, Ph.D.

doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá elektromagnetickou kompatibilitou, jejími vazbami, měřicími přístroji i snímači rušení. Dále práce obsahuje pojednání o sondách blízkého pole, normách CISPR25 a metody TEM komory. Popisuje dva integrované obvody NCV78964 a NCV78514 budičů LED od společnosti onsemi i s jejich moduly. Cílem práce je navrhnout měření, následně je zrealizovat a vyhodnotit. Nakonec provést optimalizaci provozních parametrů budičů s ohledem jak na EMC, tak na funkcionalitu driverů.

Klíčová slova

Elektromagnetická kompatibilita, emise, měření, rušení

Abstract

The diploma thesis deals with electromagnetic compatibility, its bonds, measuring devices and interference sensors. Furthermore, the thesis includes a discussion of nearfield probes, standards CISPR25 and TEM chamber methods. It describes two integrated circuits NCV78964 and NCV78514 LED drivers from onsemi and their modules. The aim of the work is to design the measurements, then to implement and evaluate them. Finally, to optimize the operating parameters of the drivers with respect to both EMC and driver functionality.

Keywords

Electromagnetic compatibility, emission, measurement, interference

Bibliografická citace

VINKLEROVÁ, Viktorie. Vliv elektromagnetické kompatibility na provoz budičů LED v automobilovém průmyslu [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159949>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Vladimír Levek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Viktorie Vinklerová
VUT ID studenta:	220 859
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/2024
Téma závěrečné práce:	Vliv elektromagnetické kompatibility na provoz budičů LED v automobilovém průmyslu

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 21. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Levkovi, Ph.D. za účinnou pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce. Dále děkuji odborným konzultantům Ing. Jiřímu Danielovi a Ing. Martinu Milotovi ze společnosti ON Design Czech, s.r.o. za metodickou a odbornou pomoc pro vypracování mé diplomové práce.

V Brně dne: 21. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	13
1.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	13
1.2 TYPY VZÁJEMNÝCH VAZEB.....	14
1.2.1 Induktivní vazba	14
1.2.2 Kapacitní vazba	15
1.2.3 Galvanická vazba.....	17
1.2.4 Elektromagnetická vazba	18
1.3 MĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉ KOMPATIBILITY	20
1.3.1 Měřicí přístroje	20
1.3.2 Snimače rušení	21
1.3.3 Sondy blízkého pole.....	22
2. NORMY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	24
2.1 METODA CISPR25	24
2.1.1 Podmínky testu	24
2.1.2 Konfigurace testu	25
2.1.3 Stanovené limity.....	25
2.2 METODA TEM KOMORY.....	26
2.2.1 Podmínky testu	26
2.2.2 Konfigurace testu	27
2.2.3 Limity	27
3. INTEGROVANÉ OBVODY A MODULY LED DRIVERŮ SPOLEČNOSTI ONSEMI	28
3.1 INTEGROVANÝ OBVOD NCV78964.....	28
3.1.1 Popis zvyšujícího měniče	28
3.1.2 Popis snižujícího měniče.....	29
3.1.3 Modul ECU-light s integrovaným obvodem NCV78964	29
3.2 INTEGROVANÝ OBVOD NCV78514.....	32
3.2.1 Modul s integrovaným obvodem NCV78514.....	33
4. MĚŘENÍ MODULU NCV78514.....	35
4.1 MĚŘENÍ POMOCÍ METODY CISPR25	35
4.1.1 Vliv rozprostřeného spektra	36
4.1.2 Vliv provozního režimu	37
4.1.3 Vliv měřeného přívodu napájení	38
4.1.4 Vliv stínící krabičky.....	39
4.1.5 Vliv volitelných komponent	39
4.1.6 Vliv výstupního proudu	40
4.1.7 Shrnutí měření metodou CISPR25	41
4.2 MĚŘENÍ POMOCÍ KOMORY TEM	42
4.2.1 Vliv stínící krabičky.....	43

4.2.2	<i>Vliv pozice měřeného modulu</i>	44
4.2.3	<i>Vliv přidavného stínění</i>	45
4.2.4	<i>Shrnutí měření pomocí komory TEM</i>	46
4.3	MĚŘENÍ SONDAMI BLÍZKÉHO POLE	47
4.3.1	<i>Měření se sondou RSE02</i>	47
4.3.2	<i>Měření se sondou RSE10</i>	48
4.3.3	<i>Měření se sondou RSH400-1</i>	50
4.3.4	<i>Měření se sondou RSH2.5-2</i>	51
4.3.5	<i>Shrnutí měření pomocí sond blízkého pole</i>	52
5.	MĚŘENÍ MODULU ECU-LIGHT	53
5.1	MĚŘENÍ METODOU CISPR25 POMOCÍ VRCHOLOVÉHO DETEKTORU	53
5.1.1	<i>Vliv strmosti hran</i>	54
5.1.2	<i>Vliv výstupního napětí zvyšujícího měniče</i>	55
5.1.3	<i>Vliv PWM</i>	55
5.1.4	<i>Vliv frekvence zvyšujícího měniče</i>	56
5.1.5	<i>Shrnutí měření metodou CISPR25 vrcholovým detektorem</i>	58
5.2	MĚŘENÍ METODOU CISPR25 POMOCÍ KVAZIVRCHOLOVÉHO DETEKTORU	59
5.2.1	<i>Měření s hodnotou výstupního napětí zvyšujícího měniče 40 V</i>	59
5.2.2	<i>Měření s hodnotou frekvence zvyšujícího měniče 125 kHz</i>	60
5.2.3	<i>Shrnutí měření metodou CISPR25 s kvazivrcholovým detektorem</i>	60
5.3	MĚŘENÍ POMOCÍ SOND BLÍZKÉHO POLE	61
5.3.1	<i>Měření pomocí sondy RSE02</i>	61
5.3.2	<i>Měření pomocí sondy RSE10</i>	63
5.3.3	<i>Měření se sondou RSH400-1</i>	66
5.3.4	<i>Shrnutí měření sondami blízkého pole</i>	69
	ZÁVĚR	70
	LITERATURA	71
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Vymezení úrovní a mezi vyzářování a odolnosti [7].....	14
1.2	Model indukativní vazby přenosu rušivého signálu [7]	15
1.3	Model kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů [7]	16
1.4	Model kapacitní vazby obvodů se společným vodičem [7].....	16
1.5	Model kapacitní vazby obvodů vůči zemi [7]	17
1.6	Model galvanické vazby v jednotlivých vedeních [3].....	18
1.7	Princip elektromagnetické vazby [7].....	19
1.8	Blokové schéma měřicího přijímače [4].....	20
1.9	Schématický obrázek a typická charakteristika sondy elektrického pole RSE02 (nahore) a sondy RSE10 (dole) [5]	22
1.10	Schématický obrázek a typická charakteristika sondy magnetického pole RSH400-1 (nahore), sondy RSH50-1 (uprostřed) a sondy RSH2.5-2 (dole) [5]	23
2.1	Konfigurace testu CISPR25 [9].....	25
2.2	TEM komora [11].....	26
2.3	Konfigurace testu TEM komory [12]	27
3.1	Modul ECU-light s obvodem NCV78964.....	30
3.2	Schéma konektorů modulu ECU-light [15].....	30
3.3	Jedna fáze zvyšujícího měniče [15].....	31
3.4	Výstupní obvod snižujícího měniče [15].....	31
3.5	Typická aplikace obvodu NCV78514 [16].....	32
3.6	Výsledný modul s integrovaným obvodem NCV78514 ve stínící krabici (vlevo) a bez horní části stínící krabice (vpravo)	34
3.7	Část schéma modulu NCV78514 se spínáním zdrojem [16]	34
4.1	Měřicí stanoviště pro měření CISPR25 s modulem NCV78514	35
4.2	Vliv rozprostřeného spektra modulu NCV78514 (CISPR25)	36
4.3	Vliv provozního režimu modulu NCV78514 (CISPR25)	37
4.4	Vliv měření na pozitivním/negativním přívodu napájení modulu NCV78514 (CISPR25).....	38
4.5	Vliv stínící krabice na měření modulu NCV78514 (CISPR25)	39
4.6	Vliv kondenzátoru C8 modulu NCV78514 (CISPR25)	40
4.7	Vliv výstupního proudu modulu NCV78514 (CISPR25).....	41
4.8	Měřicí stanoviště pro měření TEM komory s modulem NCV78514 z čelního pohledu	42
4.9	Měřicí stanoviště pro měření metody TEM komory s modulem NCV78514 z bočního pohledu	42
4.10	Pozice modulu při jednotlivých měření.....	43
4.11	Vliv stínící krabice modulu NCV78514 (TEM komora)	44
4.12	Vliv pozice měřeného modulu NCV78514 (TEM komora)	45
4.13	Vliv přidavného stínění vodičů modulu NCV78514 (TEM komora).....	46
4.14	Vliv stínící krabice modulu NCV78514 (RSE02 sonda)	47
4.15	Popis vybraných součástí na modulu NCV78514	48
4.16	Měření modulu NCV78514 v režimu zvyšujícího měniče (RSE10 sonda).....	49
4.17	Měření modulu NCV78514 v režimu snižujícího měniče (RSE10 sonda).....	49
4.18	Jednotlivé pozice RSH400-1 sondy vůči modulu NCV78514	50
4.19	Měření modulu NCV78514 v režimu snižujícího měniče (RSH400-1 sonda).....	51
4.20	Měření modulu NCV78514 v režimu zvyšujícího měniče (RSH2.5-2 sonda).....	52
5.1	Měřicí stanoviště pro měření CISPR25 s modulem ECU-light.....	53
5.2	Vliv strmosti hran na měření s modulem ECU-light (CISPR25)	54
5.3	Vliv výstupního napětí zvyšujícího měniče na měření s modulem ECU-light (CISPR25)	55

5.4	Vliv PWM na měření s modulem ECU-light (CISPR25).....	56
5.5	Vliv frekvence zvyšujícího měniče na měření s modulem ECU-light (CISPR25).....	57
5.6	Přesazení limitu u měření vlivu frekvence zvyšujícího měniče s modulem ECU-light (CISPR25).....	58
5.7	Porovnání měření pro výstupní napětí 40 V s modulem ECU-light pro měření pomocí vrcholového detektoru a pomocí kvazivrcholového detektoru (CISPR25).....	59
5.8	Porovnání měření s frekvencí zvyšujícího měniče 125 kHz modulu ECU-light pro měření pomocí vrcholového detektoru a pomocí kvazivrcholového detektoru (CISPR25).....	60
5.9	Pozice pro měření sondou RSE02 na modulu ECU-light.....	61
5.10	Měření pro jednotlivé pozice na modulu ECU-light (sonda RSE02).....	62
5.11	Měření pro jednotlivé druhy stínění na modulu ECU-light (sonda RSE02).....	63
5.12	Modul ECU-light s popisem vybraných součástí.....	64
5.13	Vliv diod D41 a D40 na modulu ECU-light (sonda RSE10).....	65
5.14	Vliv snižujícího měniče na modulu ECU-light (sonda RSE10).....	65
5.15	Pozice na modulu ECU-light pro měření se sondou RSH400-1.....	66
5.16	Vliv pozice na desce modulu ECU-light (sonda RSH400-1).....	67
5.17	Pozice natočení pro měření se sondou RSH400-1 na modulu ECU-light (z levé strany pozice 1, pozice 2 a pozice 3).....	67
5.18	Vliv natočení sondy na modulu ECU-light (sonda RSH400-1).....	68
5.19	Vliv stínění modulu ECU-light (sonda RSH400-1).....	69

SEZNAM TABULEK

1.1	Výchozí nastavení měřicích pásem a rozlišení šířky pásma měřicích přístrojů [8]	21
2.1	Limitní hodnoty elektromagnetického rušení pro měření CISPR 25 [9]	25
3.1	Vybrané hodnoty výstupního proudu a jim odpovídající hodnoty externího rezistoru	32

ÚVOD

Elektromagnetická kompatibilita je disciplína zaměřená na správnou činnost zařízení nebo systémů, které mohou vyzařovat elektromagnetické rušení anebo na ně být citlivé. Jedná se tedy o schopnost zařízení správně fungovat v prostředí, ve kterém působí jiné zdroje signálů, a zároveň svým rušením nesmí nepřípustně ovlivňovat vlastní okolí.

V oblasti EMC (ElectroMagnetic Compatibility) jsou rozlišovány čtyři druhy vazeb. Galvanická vazba je vazba společnou impedancí, kapacitní vazba je způsobena přítomností parazitních kapacit, induktivní vazba vzniká ve vodičích, které jsou v časově proměnném magnetickém poli, a vazba vyzařováním je tvořena vyzářeným elektromagnetickým polem. Vzniklé elektromagnetické rušení je možné minimalizovat pomocí stínění, externích komponent (kondenzátory, tlumivky), přepětových prvků a odrušovacích filtrů.

Měření elektromagnetické kompatibility je prováděno v souladu s normami, které předepisují přesné podmínky měření pro jeho snadnou reprodukovatelnost. Měřený signál je zachycován snímačem a jeho hodnota je měřena například spektrálním analyzátozem. V rámci snímačů je rozlišována umělá zátěž vedení, napěťová a proudová sonda. Běžné měřiče jsou spektrální analyzátor a měřicí přijímač.

Toto téma jsem si zvolila proto, že bych se chtěla v této problematice zlepšit a dozvědět se o problematice EMC více. Samotnou mě také zajímalo, jaký vliv budou mít jednotlivé komponenty na výslednou hodnotu elektromagnetického rušení.

V první kapitole diplomové práce jsou popsány pojmy týkající se elektromagnetické kompatibility. Blíže jsou vysvětleny jednotlivé druhy vazeb a možnosti minimalizace jejich elektromagnetického rušení. Dále je popsáno měření EMC, a to konkrétně přijímače, snímače rušení a sondy blízkého pole. Ve druhé kapitole jsou popsány normy, pomocí kterých bude prováděno měření. Vybranými metodami jsou CISPR25 a metoda TEM (Transverse ElectroMagnetic) komory. V rámci třetí kapitoly jsou zmíněny integrované obvody NCV78964 a NCV78514 od společnosti onsemi a jejich moduly, na kterých budou probíhat veškerá měření. Čtvrtá kapitola pojednává o měření s modulem NCV78514, kde jsou rozebrána jednotlivá měření (CISPR25, TEM komora, sondy blízkého pole) a jejich následné vyhodnocení. V páté kapitole je následně obsaženo měření s modulem ECU-light (CISPR25 – detektor vrcholové hodnoty a detektor kvazivrcholové hodnoty, sondy blízkého pole) podobným způsobem jako v předchozí kapitole.

1. ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA

Zařízení a systémy jsou vždy vystaveny elektromagnetickému rušení a každé elektrotechnické zařízení je samo o sobě více či méně generátorem i přijímačem elektromagnetického rušení. Zařízení nacházející se ve společném elektromagnetickém prostředí mohou, ale nemusí mít vzájemnou souvislost. Rušivý vliv prostředí může způsobit nejen nesprávnou funkci zařízení, ale také jeho destrukci. [1, 2, 3]

1.1 Úvod do problematiky

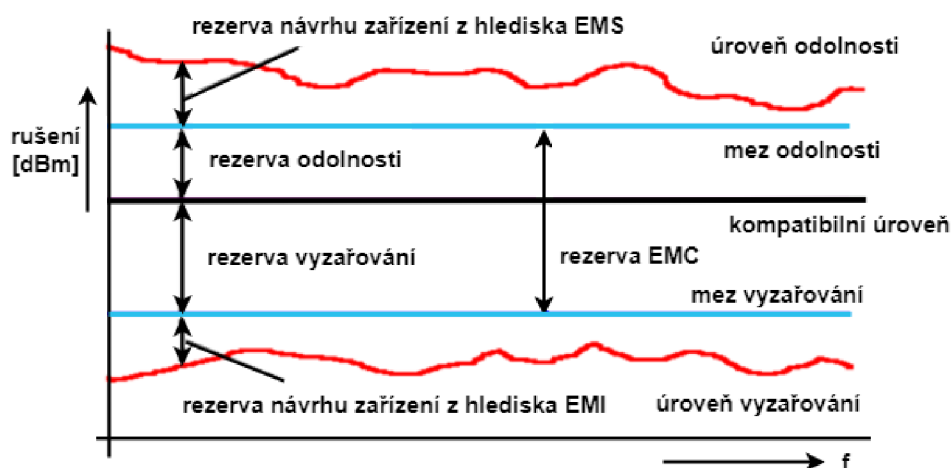
Základní řetězec EMC sestává ze zdroje elektromagnetického rušení, přenosového prostředí a přijímače rušení. Do zdrojů elektromagnetického rušení se řadí jak přirozené zdroje rušení (kosmická tělesa, blesky, výboje, sluneční aktivity), tak zdroje rušení vytvořené člověkem (elektrické motory, distribuce elektrické energie nebo například elektronické sdělovací prostředky). Přenosovým prostředím nazýváme vodiče, napájecí vedení, zemnění, či vzdušný prostor. Jako přijímač rušení potom může být měřicí přístroj, televizní přijímač nebo rozhlasový systém. Ve skutečném EMC řetězci nikdy nejde o jeden zdroj rušení a jeden přijímač rušení, ale vždy se zde jedná o vzájemné vztahy více systémů navzájem. [2, 3, 4]

Elektromagnetická kompatibilita je dělena do dvou hlavních kategorií:

- EMS (ElectroMagnetic Susceptibility) neboli elektromagnetická citlivost představuje odolnost systému vůči vnějšímu elektromagnetickému rušení. Zabývá se především původem rušení a jeho eliminací.
- EMI (ElectroMagnetic Interference) čili elektromagnetická interference vyjadřuje rušení, které je generováno daným systémem do okolí. Je předmětem odstraňování důsledků rušení. [2, 3, 4]

Vymezení úrovní a mezí vyzařování a odolnosti je popsáno na obrázku 1.1. Na obrázku jsou definovány vzájemné vztahy myšleného elektrického zařízení a jejich optimální úroveň kompatibility. Následně jsou popsány jednotlivé pojmy, které jsou použity na obrázku 1.1. Elektromagnetické rušení daného elektrického zařízení v závislosti na frekvenci je měřeno podle předepsaných metod a standardů, jeho naměřená hodnota se nazývá **úroveň vyzařování**. Maximální přípustná hodnota elektromagnetického rušení, která je povolena normou, je nazývána **mez vyzařování**. Rozdíl úrovně vyzařování a meze vyzařování se pak nazývá **rezerva návrhu** tohoto zařízení z hlediska elektromagnetického rušení. **Úroveň odolnosti** je nejvyšší možná hodnota elektromagnetického rušení působící na konkrétní elektrické zařízení, během které je stále zachována požadovaná funkce zařízení. **Mez odolnosti** je minimální úroveň odolnosti zařízení, která je dána normou. **Rezerva návrhu** ze strany odolnosti je potom dána rozdílem meze odolnosti a úrovně odolnosti. **Rezerva EMC** zařízení je dána rozdílem meze odolnosti a meze vyzařování. **Kompatibilní úroveň** vyjadřuje maximální

hodnotu celkového rušení zařízení, které může nastat v určitých podmínkách, kdy je konkrétní zařízení ovlivňováno. Tato úroveň se zpravidla určuje tak, aby její dosažení bylo málo pravděpodobné. Rozdíl kompatibilní úrovně a meze odolnosti/vyzařování se nazývá rezerva odolnosti/vyzařování. [3,7]



Obrázek 1.1 Vymezení úrovní a mezí vyzařování a odolnosti [7]

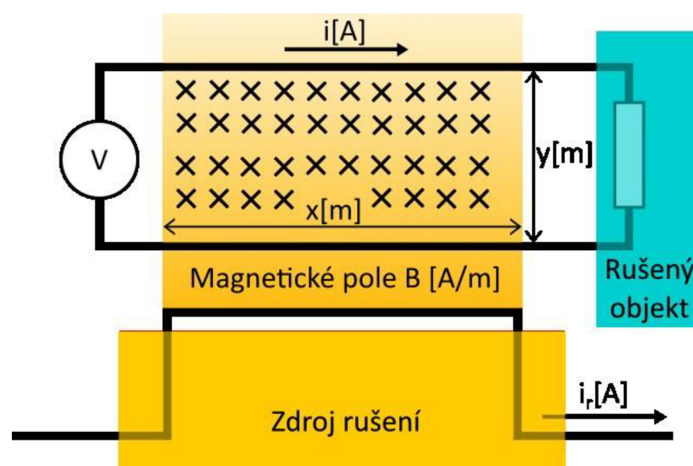
Velikost rezervy odolnosti či vyzařování je ve většině případů volena výrobcem. Pokud je zvolena příliš velká rezerva, rostou náklady na odrušení daného zařízení. Kdyby byly naopak vybrány rezervy příliš malé, mohlo by dojít k tomu, že zařízení nevyhoví EMC zkouškám. Následné dodatečné odrušování je často ještě nákladnější. [3, 7]

1.2 Typy vzájemných vazeb

Elektromagnetická kompatibilita závisí určitou měrou na elektromagnetickém vazebním prostředí. Z fyzikálního hlediska rozlišujeme vazbu induktivní, kapacitní, galvanickou a vazbu vyzařováním. [2, 3]

1.2.1 Induktivní vazba

Induktivní vazba vzniká mezi dvěma galvanicky oddělenými smyčkami elektrického obvodu, kdy alespoň jednou z nich protéká časově proměnlivý proud. Tento časově proměnlivý proud potom vytváří časově proměnlivé magnetické pole. Parazitní induktivní vazba je nebezpečná obzvláště při rychlých změnách proudu, například při elektrostatických výbojích. Model této vazby je zobrazen na obrázku 1.2. [2, 3, 4, 7]

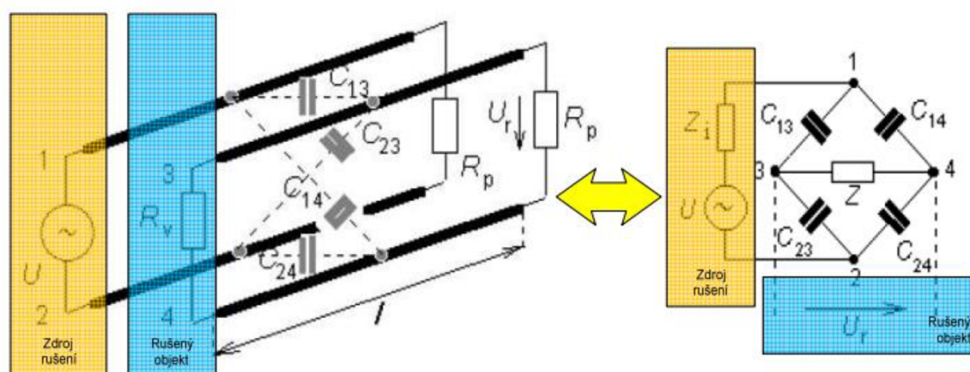


Obrázek 1.2 Model induktivní vazby přenosu rušivého signálu [7]

Pro minimalizaci parazitní induktivní vazby je potřeba, aby délka souběžně vedených vodičů obou smyček byla minimální, aby jejich vzájemná vzdálenost byla co největší, aby došlo ke snížení strmosti nárůstu nebo poklesu proudu, a aby velikost proudové smyčky přijímače rušení byla co nejmenší. Zmenšení délky vodičů rušeného a rušícího obvodu lze také dosáhnout pomocí zvýšení integrace součástek a miniaturizací výsledných obvodů. Dále je možné minimalizovat vazbu stíněním obvodu přijímače, kolmým natočením vazebních smyček, či kompenzací induktivní vazby zkroucením vodičů obvodu přijímače. [3, 7]

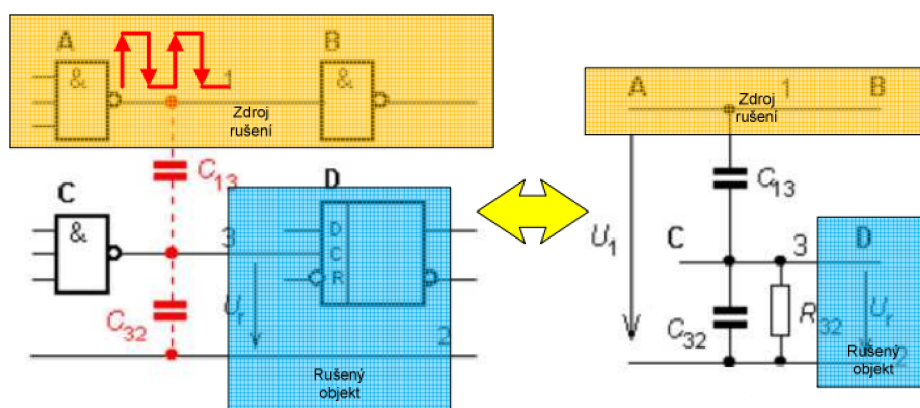
1.2.2 Kapacitní vazba

Kapacitní vazba vzniká v uzlech galvanicky oddělených elektrických obvodů, mezi kterými existuje vzájemné působení intenzity elektrostatického pole v důsledku rozdílného potenciálu. Kapacitní vazba se také může nacházet mezi dvěma vodiči. Rozlišujeme převážně tři případy kapacitních vazeb. Prvním je již zmíněná kapacitní vazba galvanicky oddělených obvodů. Její model se nachází na obrázku 1.3, tato parazitní vazba začleňuje jeden rušený obvod a druhý rušící obvod. Za předpokladu, že délka daného vedení je podstatně kratší než vlnová délka rušivého signálu o nejvyšším uvažovaném kmitočtu, víme, že nejmenší rušení nastane v případě vyvážení daného kapacitního můstku. Zkroucením obou párů vodičů lze dosáhnout eliminace kapacitní vazby. Touto úpravou je snižována také induktivní vazba, jak již bylo zmíněno. [2, 3, 4, 7]



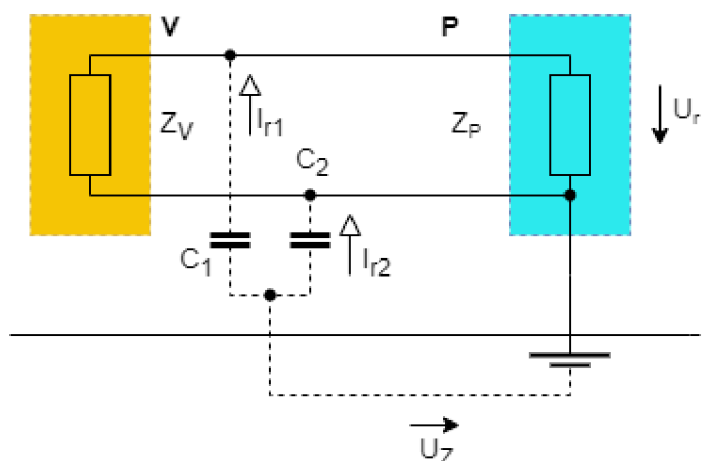
Obrázek 1.3 Model kapacitní vazby galvanicky oddělených obvodů [7]

Dalším případem je kapacitní vazba mezi obvody se společným vodičem, jejíž model se vyskytuje na obrázku 1.4. Vlivem parazitní kapacity může jeden nesouvisející obvod ovlivňovat druhý. Tento druh parazitní kapacity můžeme snížit oddálením dvou vodičů, které jsou příčinou rušení, nebo alespoň minimalizací jejich souběžného vedení. Dále můžeme tuto kapacitu snížit přiblížením rušeného obvodu k onomu vztažnému společnému vodiči. Naroste tak jejich vzájemná kapacita, která omezuje velikost rušení. Stínění ovlivňovaného vodiče a omezení rychlosti časových změn na minimální hodnotu, která postačuje ke správnému fungování zařízení, jsou dalšími opatřeními snižující velikost kapacitní vazby. Stínění rušeného vodiče má také za následek snížení kapacity rušícího vodiče a zvýšení kapacity rušeného vodiče, což jsou dva výše popsané a pro minimalizaci rušení vítané jevy. Aby tato ochrana byla co nejúčinnější, je potřeba stínění zhotovit z dobře vodivého materiálu. [2, 3, 4, 7]



Obrázek 1.4 Model kapacitní vazby obvodů se společným vodičem [7]

Následujícím typem je kapacitní vazba vůči zemi vyvolaná velkou kapacitou, která je zobrazena na obrázku 1.5. Tato kapacita lze omezit užitím stíněného přívodu. Tento způsob ochrany je nedostačující při vyšších kmitočtech, kdy se začne projevovat nedokonalost ve vodivosti stíněného přívodu. [2, 3, 4, 7]



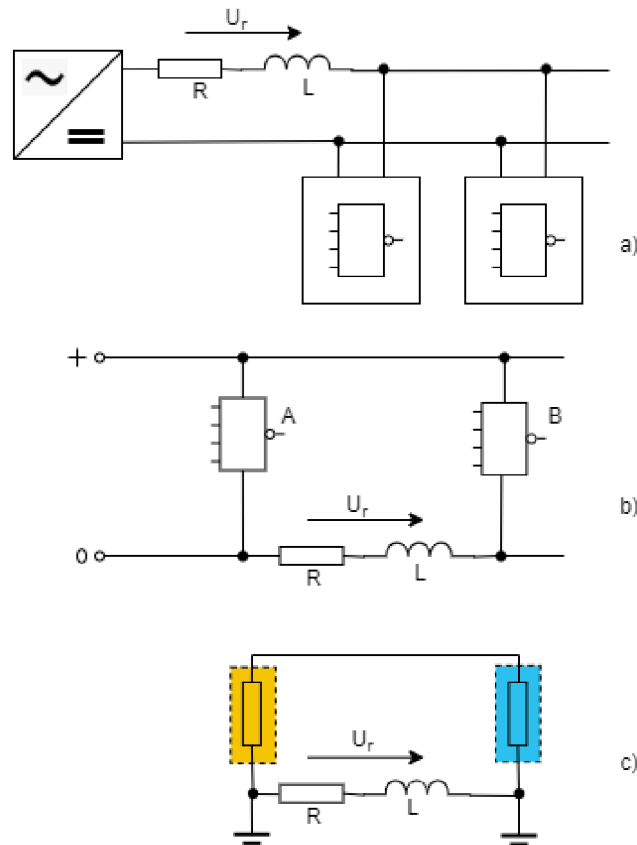
Obrázek 1.5 Model kapacitní vazby obvodů vůči zemi [7]

Obecně k poklesu kapacitní vazby potřebujeme zvýšit vzájemnou impedanci rušeného a rušícího obvodu. Toho můžeme dosáhnout zmenšením pracovní frekvence nebo snížením parazitní kapacity. Snížením pracovního kmitočtu se lze zabývat ve fázi návrhu obvodu, ale vždy musí být brán ohled na jeho funkčnost. Obecně platí, že je dobré vedle sebe umístit obvody se stejnou pracovní frekvencí. Parazitní kapacitu můžeme snížit zmenšením plochy elektrod, což provedeme opět miniaturizací obvodu. Tato změna povede ke zvýšení počtu vzájemných kapacitních vazeb, jejich účinek je ale menší než účinek elektromagnetického pole. Snížení kapacitní vazby oddálením obvodů je nejvhodnější pro obvody s rozdílným pracovním kmitočtem, nebo pro obvody s velkým rozdílem potenciálů elektrod. [3, 7]

1.2.3 Galvanická vazba

U daných elektrotechnických zařízení vzniká galvanická vazba tak, že společné vodiče, které propojují určitá zařízení, způsobují vzájemné rušení přes společnou impedanci. Ve všech případech, kdy dochází k ovlivňování ostatních zařízení prostřednictvím galvanické vazby, dochází k projevu toho, že elektronické součástky nejsou ideální, že mají parazitní kapacitu, odpor a indukčnost. Na obrázku 1.6 je model galvanické vazby společnou impedancí v různých typech vedení a) napájecím, b) řídicím a c) zemním. V oblasti nižších kmitočtů má na rušení obvodu nejvyšší vliv odporová smyčka vzniklé impedance, v oblasti vyšších kmitočtů pak svůj vliv uplatňuje více indukční složka. Indukčnost společné impedance navíc s kapacitou spojů tvoří rezonanční obvody, které na určitých frekvencích významně zvyšují společnou impedanci a tím i galvanickou vazbu. Častým případem parazitní galvanické vazby je vzájemná vazba dvou systémů zapříčiněná zemní smyčkou. Tato smyčka vzniká v důsledku separátního uzemnění ve dvou bodech. Tímto způsobem vzniklé rušení lze zmenšit nízkofrekvenčním přerušením zemní smyčky. Systém uzemníme jednobodově a obvody se galvanicky

oddělí pomocí malé zemní kapacity rušeného zařízení vůči zemi. Na nižších kmitočtech opravdu dochází k útlumu, zatímco na vyšších kmitočtech rušení narůstá, při velmi vysokých kmitočtech dochází k rezonančním jevům, kdy se hodnota útlumu mění periodicky. [2, 3, 4, 7]



Obrázek 1.6 Model galvanické vazby v jednotlivých vedeních [3]

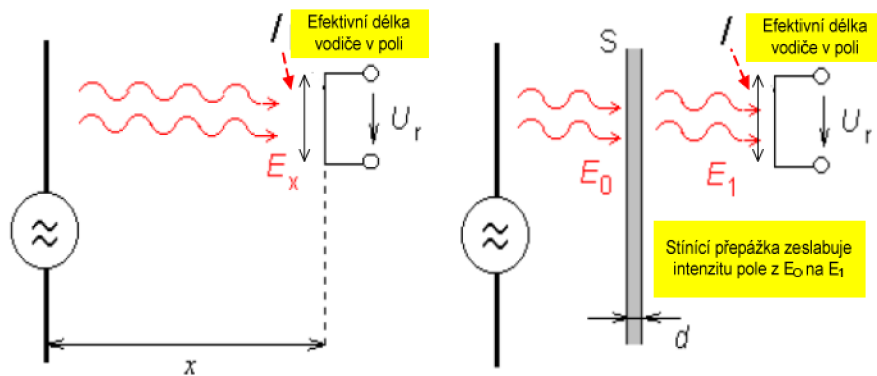
Galvanickou vazbu lze také minimalizovat pomocí oddělovacího transformátoru, případně ještě přidaným bočником, filtračním kondenzátorem, neutralizačním transformátorem, síťovým odrušovacím filtrem, vedením s útlumovým pláštěm, elektromechanickým relé, optočlenem, optickým kabelem nebo feritovými kroužky. Především pro minimalizaci této parazitní vazby je důležité dostatečně dimenzovat společný zemnicí vodič a jednotlivé bloky k němu připojovat přímou cestou masivním vodičem. Dále u signálových vodičů je potřeba neslučovat společný vodič, nevytvářet společné části napájecích přívodů k jednotlivým blokům a elektronická zařízení různých technologií vybavit samostatnými napájecími zdroji. [3, 7]

1.2.4 Elektromagnetická vazba

Elektromagnetická vazba vzniká mezi dvěma galvanicky oddělenými elektrickými obvody, které si vyměňují elektromagnetickou energii ve formě vyzářeného a absorbovaného výkonu. Její princip i vliv stínící přepážky je zobrazen na obrázku 1.7.

Stínící přepážka slouží jako fyzická bariéra k oddělení zařízení, nebo jejich částí od vnějších elektromagnetických polí. Nejčastěji bývá vyrobena z kovových materiálů, které mají vysokou schopnost stínění elektromagnetických polí. Může se jednat například o stínící kovovou krabičku daného zařízení.

Tyto obvody jsou od sebe vzdáleny natolik, že je prakticky vyloučena induktivní a kapacitní vazba. Působením elektromagnetické vlny se ve vodičích přijímače rušení indukuje rušivé napětí, které se v jeho obvodech sčítá s užitečným signálovým napětím, nebo jej dokonce úplně překryje. Zmíněný druh rušení se projevuje v rádiových přijímačích. [2, 3, 4, 7]



Obrázek 1.7 Princip elektromagnetické vazby [7]

Proti elektromagnetické vazbě lze rušené zařízení chránit pomocí stínícího krytu před rušivým zařízením. K zeslabení rušení pak dochází tím, že část elektromagnetické vlny je pohlcena materiálem stínícího krytu, a část vlny je odražena od krytu zpět ke zdroji rušení. Stínící kryty se v některých aplikacích nedělají hladké, ale jsou postříkány vodivou barvou, která vytvoří hrubší povrch. Dopomoci mohou také různé typy těsnění. Elektromagnetické rušení lze opět snížit miniaturizací obvodu a vyšší integrací součástek. [3, 7]

Elektromagnetická kompatibilita může být také narušena jiskřením kontaktů, či atmosférickým přepětím. Vzniklé přepětí může vést až na destrukci obvodu. Proti přepětí lze obvod chránit pomocí síťových filtrů a přepět'ových ochran. Elektromagnetickou kompatibilitu zlepšujeme omezováním rušení. Elektromagnetické rušení můžeme omezovat již u zdroje rušení, na přenosové trase nebo u přijímače rušení. Rušení vyzařováním je potlačováno pomocí stínění daného zařízení, zatímco rušení vedením je omezováno pomocí odrušovacích tlumivek, kondenzátorů, LC filtrů, nebo omezovačů napětí. [3]

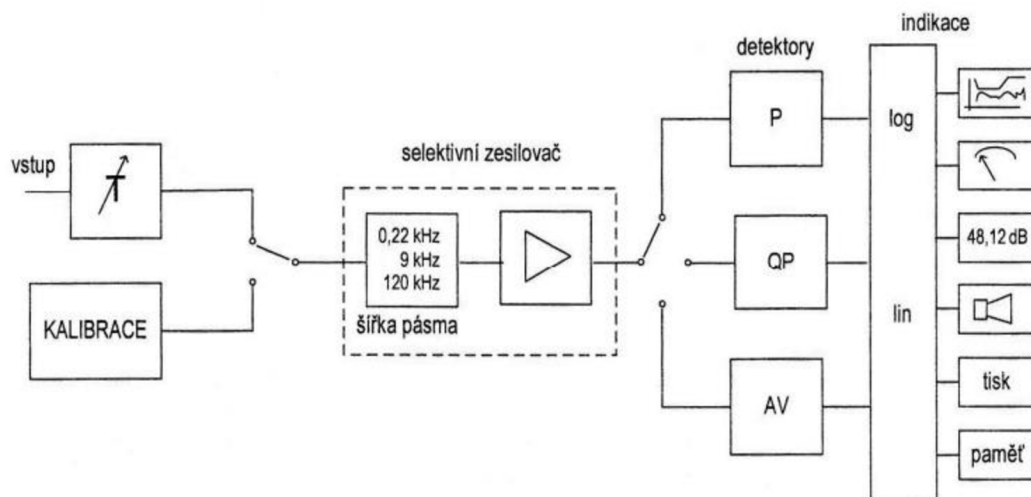
1.3 Měření elektromagnetické kompatibility

Měření elektromagnetické kompatibility je zpravidla přesně definované konkrétními normami, aby bylo možné výsledky pro dané měření srovnávat, a aby byla zajištěna reprodukovatelnost měření. U každého zařízení můžeme měřit kolik rušení z něj vyzařuje (jeho emise) a zároveň při jakém rušení dokáže dané zařízení stále ještě fungovat (imunita). Rozlišujeme také typ daného rušení, a to rušení vedením, které je měřeno jinými metodami než rušení vyzařováním nebo rušení blízkým elektromagnetickým polem. Měření výstupního rušivého napětí se provádí pomocí měřiče rušení, na jehož vstup je připojen snímač rušivého signálu. [3, 4, 7]

Dále je rozlišováno měření na úrovni modulu a na úrovni čipu. Tato práce se dále zabývá pouze měřením na úrovni modulu. Při tomto měření je čip umístěn na desce, se kterou dohromady tvoří modul. Měření jsou pouze emise, jelikož imunita má větší význam v případě měření na úrovni čipu. [3, 4]

1.3.1 Měřicí přístroje

Protože v oblasti EMC je pracováno se spektrálním rozložením signálů, nejvhodnějším měřičem rušení je spektrální analyzátor nebo speciální měřicí přijímač. Blokové schéma na obrázku 1.8 popisuje strukturu měřicího přijímače. Na vstupu je snížena velikost vstupního signálu pomocí attenuátoru. Signál následně prochází selektivním zesilovačem a jeho hodnota je vyhodnocena pomocí jednoho z detektorů. P je detektor vrcholové hodnoty, QP je detektor kvazivrcholové hodnoty a AV je detektor průměrné hodnoty. Naměřené logaritmické, či lineární hodnoty jsou pak zobrazeny ve formě grafu, zvukového signálu, či jiným způsobem. Kalibrační generátor slouží k přesné a operativní kalibraci měřiče. [3, 4]



Obrázek 1.8 Blokové schéma měřicího přijímače [4]

Výhoda spektrálního analyzátoru spočívá v rychlém zobrazení měřeného rušivého spektra na displeji a také v nižší ceně oproti měřicím přijímačům. Spektrální analyzátor je většinou širokopásmový, což znamená, že je dosaženo menšího dynamického rozsahu a často mají nižší citlivost než měřicí přijímače. Může tak dojít ke zkreslení měření, zejména v případě impulzního rušení. Dnešní měřicí přístroje kombinují výhody obou měřičů například tím, že spektrální analyzátor je navíc vybaveny preselektorem navyšujícím jejich dynamický rozsah. [3, 4]

V tabulce 1.1 jsou zobrazeny výchozí nastavení měřicích pásem a rozlišení šířky pásma (RBW) měřicího přijímače a spektrálního analyzátoru. Uvedené hodnoty vychází z normy IEC 61967-1. [8]

Tabulka 1.1 Výchozí nastavení měřicích pásem a rozlišení šířky pásma měřicích přístrojů [8]

Pásmo frekvence	RBW měřicího přijímače při 6 dB	RBW spektrálního analyzátoru při 3 dB
150 kHz–30 MHz	9 kHz	10 kHz
≥ 30 MHz	120 kHz	100 kHz

1.3.2 Snímače rušení

Druhy snímačů jsou například umělá zátěž vedení, napěťová sonda a proudová sonda. Umělá síť je častěji označovaná jako umělá zátěž vedení LISN (Line Impedance Stabilizing Network). Je vybavena 3 svorkami:

- Vstupní svorkou pro připojení vnější napájecí sítě.
- Výstupní svorkou pro připojení testovaného zařízení.
- Výstupní svorkou pro připojení měřicího zařízení.

Má funkci horní propusti, kdy zajišťuje připojení měřicího zařízení ke zkoušenému pro celý rozsah měřených kmitočtů. Funkce dolní propusti pak zajišťuje, že se na vstup měřicího zařízení dostane rušení pouze z testovaného objektu, a nikoliv z napájení. [3, 4]

Oproti tomu napěťová sonda umožňuje připojení měřicího přístroje do konkrétního bodu testovaného zařízení. Díky poměrně vysoké vstupní impedanci (více než 1500 Ω), má velké využití při měření nízkoimpedančních obvodů, které by umělá zátěž vedení příliš zatěžovala. Vstupní kapacita je potom menší než 10 pF a napěťové zeslabení je 35,4 dB. Velmi důležitým parametrem je maximální velikost vstupního napětí, která již běžně dosahuje hodnoty 250 V střídavého napětí. [3, 4]

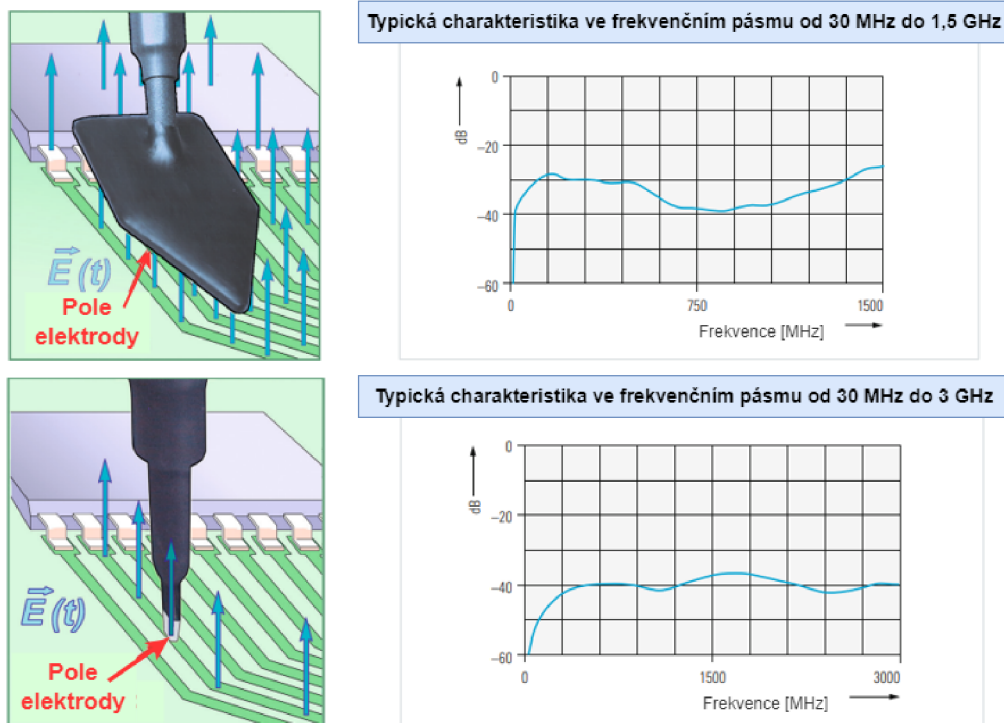
Proudová sonda měří hodnotu rušivého proudu vodičem bez jeho přerušování takovým způsobem, že měřený vodič obepíná. Základním parametrem je přenosová impedance, která je kmitočtově závislá tak, že na nízkých kmitočtech klesá se směrnici 20 dB/dek. Nejnižší pracovní kmitočet proudové sondy je určen překročením přípustné meze. [3, 4]

1.3.3 Sondy blízkého pole

Sondy blízkého pole umožňují bližší prozkoumání elektromagnetického rušení jednotlivých součástek a lokalizaci daných polí. Dále je možné pomocí těchto sond měřit také imunitu součástek nebo zařízení. Uvedené sondy jsou navrženy tak, aby byly citlivé na elektromagnetická pole v blízkém okolí a umožnily měření vysokofrekvenčních elektromagnetických signálů v reálném čase.

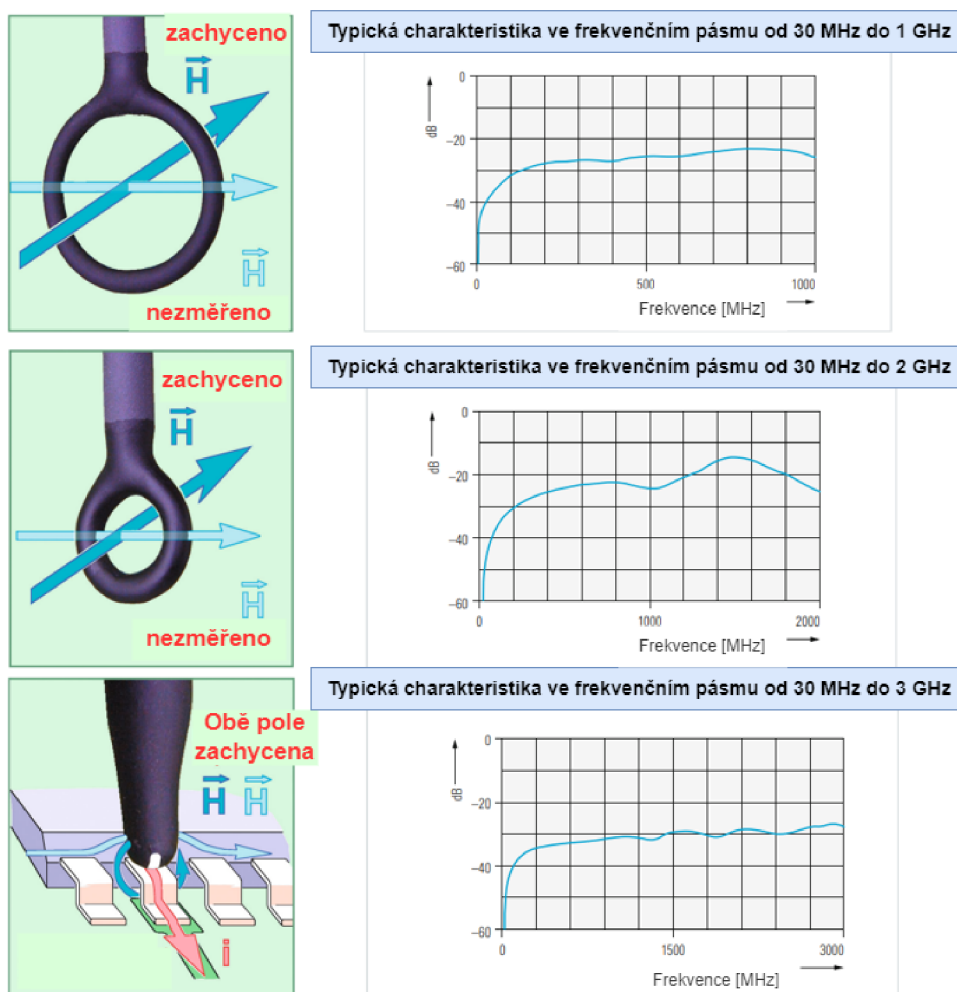
Tato kapitola se především zabývá popisem sond blízkého pole HZ-15 od firmy Rohde-Schwarz, které byly použity pro účely diplomové práce. Všechny sondy z dané sady jsou vhodné pro měření vysokofrekvenčních polí od 30 MHz až do 1-3 GHz, jsou pasivní a připojují se ke vstupu 50Ω testovacího přijímače, spektrálního analyzátoru nebo osciloskopu. Měření pomocí uvedených sond je spíše orientační z důvodu nepřesné reprodukovatelnosti vzájemné polohovatelnosti sondy a měřeného obvodu pro různá měření na různých zařízeních. Z výše zmíněných důvodů nejsou stanoveny normy pro tato měření. Zmíněná sada obsahuje dvě sondy elektrického a tři sondy magnetického pole, které jsou elektricky odstíněné. [5, 6]

Mezi sondy elektrického pole se řadí sonda RSE02, která detekuje elektrické pole o ploše $2 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. Může tak měřit velké součásti nebo povrchy sběrnicových struktur. Zatímco sonda RSE10 dokáže vybrat jednu stopu vodiče o šířce 0,2 mm. Na obrázku 1.9 jsou znázorněny obě zmíněné sondy včetně jejich typických charakteristik v daném frekvenčním pásmu, kdy sonda RSE02 se nachází nahoře a sonda RSE10 je dole. [5]



Obrázek 1.9 Schématický obrázek a typická charakteristika sondy elektrického pole RSE02 (nahore) a sondy RSE10 (dole) [5]

Sonda magnetického pole RSH400-1 má průměr 25 mm a poskytuje průměrnou hodnotu intenzity magnetického pole v oblasti smyčky sondy. Sonda může být používána ve vzdálenosti do 100 mm od modulu a zařízení. Sonda RSH50-1 má průměr 10 mm a má vyšší rozlišení a nižší citlivost než sonda RSH400-1. Je vhodná k měření na vzdálenost do 30 mm. U obou zmíněných sond je důležitá jejich orientace během měření. Třetí sonda magnetického pole RSH2.5-2 nemá již kruhový tvar a lze ji použít k detekci proudového spektra ve stopách vodičů a na přívodech součástek. Hrot sondy má magneticky aktivní drážku o šířce cca 0,5 mm. Všechny zmíněné sondy jsou na obrázku 1.10 včetně jejich typických charakteristik, kdy sonda RSH400-1 je nahoře, RSH50-1 je uprostřed a sonda RSH2.5-2 je dole. [5]



Obrázek 1.10 Schématický obrázek a typická charakteristika sondy magnetického pole RSH400-1 (nahore), sondy RSH50-1 (uprostřed) a sondy RSH2.5-2 (dole) [5]

S vybranými sondami z této kapitoly byla prováděna měření v rámci praktické části diplomové práce. Pro měření nebyla využita sonda RSH50-1, z důvodu dostatečného množství získaných informací pomocí dvou dalších sond magnetického pole.

2. NORMY PRO AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL

Při měření elektromagnetické kompatibility je nutné postupovat podle aktuálních norem. Je to z důvodu opakovatelnosti měření a také proto, aby se daly výsledky měření jednotlivých zařízení porovnat. Jelikož tato práce pojednává o měření elektromagnetické kompatibility obvodů pro automobilový průmysl, je nutné z níže popsané normativy vycházet.

2.1 Metoda CISPR25

Metoda CISPR25 je popsána v příslušné normě CISPR25:2021. Byla vytvořena pro ochranu palubních přijímačů před rušením, které bylo způsobované emisemi vznikajícími ve vozidle a šířenými vedením či zářením. V této práci je pojednáváno pouze o části zabývající se emisemi šířenými vedením z modulu napěťovou metodou. Napěťovými měřeními jsou charakterizovány emise na jednotlivých vodičích. Zmíněnou metodou tedy nelze změřit celkovou emisi měřeného zařízení. [9]

2.1.1 Podmínky testu

Měřené zařízení musí být umístěno na nevodivé podložce o nízké relativní permitivitě (menší než 1,4) ve výšce $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ nad referenční zemní rovinou. Všechny strany měřeného zařízení musí být vzdáleny 100 mm od okraje referenční zemní roviny. [9]

Napájecí vedení mezi konektorem umělé sítě a konektorem měřeného zařízení musí mít standardní délku 200 mm. Napájecí vedení musí být umístěno přímkově na nevodivé podložce o nízké relativní permitivitě (menší než 1,4) ve výšce $50 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ nad referenční zemní rovinou. Aby byla minimalizována vazba mezi napájecími a vstupně-výstupními vodiči, musí být tyto vodiče od sebe vzdáleny minimálně 200 mm. Všechny vodiče a vedení musí být vzdáleny od okraje referenční zemní desky minimálně 100 mm. [9]

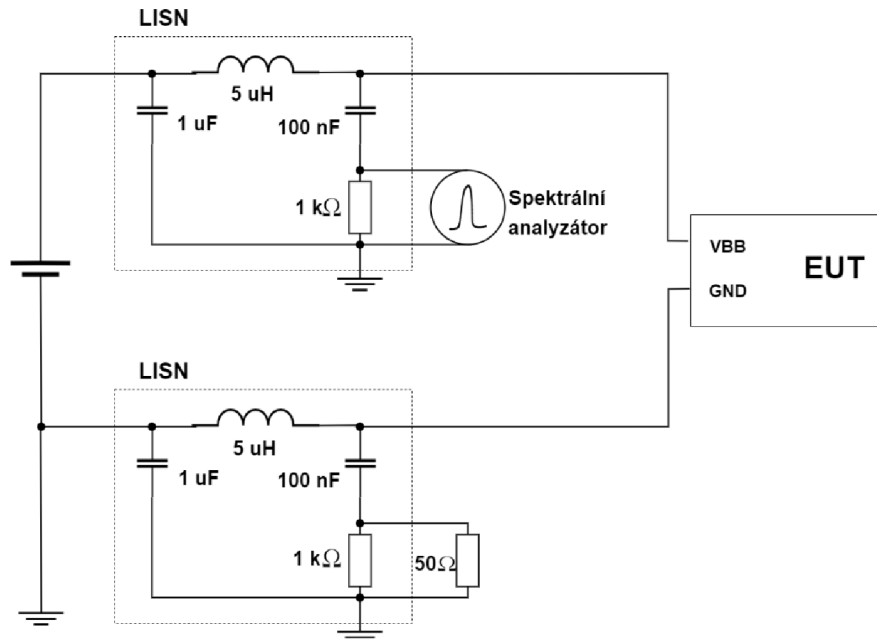
Simulátor zatížení musí být umístěn přímo na referenční zemní rovině. Pokud má kovový kryt, musí být tento kryt se zemní referenční rovinou spojen. Jestliže se simulátor zatížení nachází na zemní rovině, musí být jeho napájecí vodiče připojeny přímo k napájecímu zdroji, nikoliv přes umělou síť. [9]

Emise šířené vedením po napájecích vedeních jsou měřeny postupně na kladném přívodu a záporném přívodu napájení připojením k měřicí svorce, přičemž měřicí svorka je zakončena zátěží 50Ω . [9]

Pro napěťová měření vzdáleně uzemněných zařízení se musí provést měření napětí na každém vodiči proti referenční rovině. Naopak u měřeného zařízení uzemněného lokálně je potřeba provést měření napětí na napájecím vodiči proti referenční rovině. [9]

2.1.2 Konfigurace testu

Na obrázku 2.1 je vyobrazena konfigurace testu. LISN neboli síť pro stabilizaci impedance vedení je připojena mezi napájení a zkoušené zařízení. Její kovový kryt je uzemněn. Měřené zařízení je uzemněno vzdáleně. Spektrální analyzátor je připojen na jednom z přívodů napájení, na druhém přívodu je svorka zakončena 50 Ω zátěží. [9]



Obrázek 2.1 Konfigurace testu CISPR25 [9]

2.1.3 Stanovené limity

Norma CISPR25 stanovuje pro měření emisí vedením limity, které se dělí do několika tříd. Pro přijatelný příjem rozhlasu ve vozidle se doporučuje, aby šum šířený vedením nepřesáhl tyto hodnoty. Limity páté třídy jsou zobrazeny v tabulce 2.1. První tři řádky tabulky a pátý řádek obsahují limity pro rádiové pásmo a čtvrtý řádek tabulky odpovídá limitu pro CB (Citizen Band) pásmo. [9]

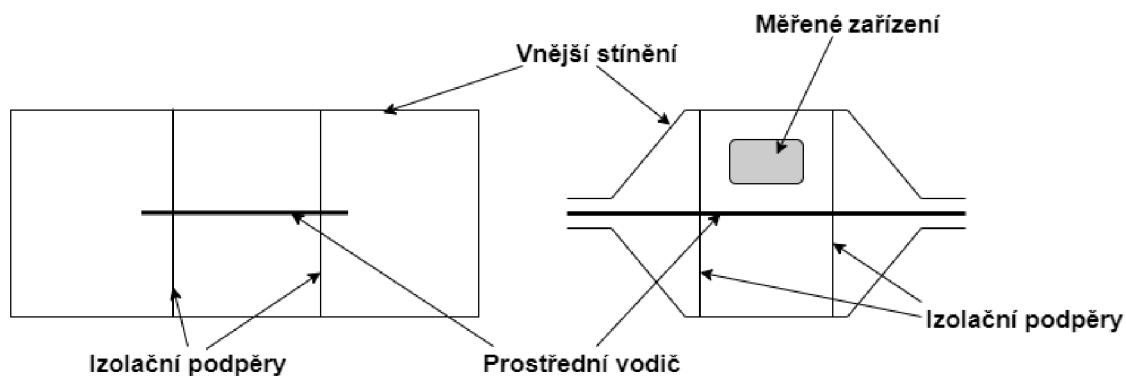
Tabulka 2.1 Limitní hodnoty elektromagnetického rušení pro měření CISPR 25 [9]

Frekvence	Limit [dBμV]		
	Průměrná hodnota	Kvazivrcholová hodnota	Špičková hodnota
150-300 kHz	50	57	70
0,53-1,8 MHz	34	41	54
5,9-6,2 MHz	33	40	53
26-28 MHz	24	31	44
76-108 MHz	18	25	38

Limity uvedené v tabulce se liší dle zvoleného detektoru. Pro detektor, který měří průměrnou hodnotu rušení, jsou stanovené limity nejpřísnější. Naopak nejvyšší hodnoty jsou povoleny u detektoru vrcholových hodnot.

2.2 Metoda TEM komory

Tato měřicí metoda se zabývá měřením elektromagnetických emisí i imunity daného zařízení. Protože součástí diplomové práce je měření emisí pomocí metody TEM komory, je tato kapitola věnována pouze popisu normy IEC 61967-2. Měření probíhá za pomoci TEM komory, která vytváří prostředí, ve kterém je elektrické i magnetické pole kolmé na směr šíření vlny. Komora je zobrazena z příčného i podélného řezu na obrázku 2.2. Je tvořena hlavním obdélníkovým vlnovodem, který poté přechází ke koncovým svorkám. Uprostřed komory je vodič, který je uchycen pomocí izolačních podpěr. Měřené zařízení se pak umísťuje do horní poloviny komory, a sice do jejího středu. Uvnitř komory je vytvářeno homogenní elektromagnetické pole do maximální frekvence 2 GHz. [11, 12]



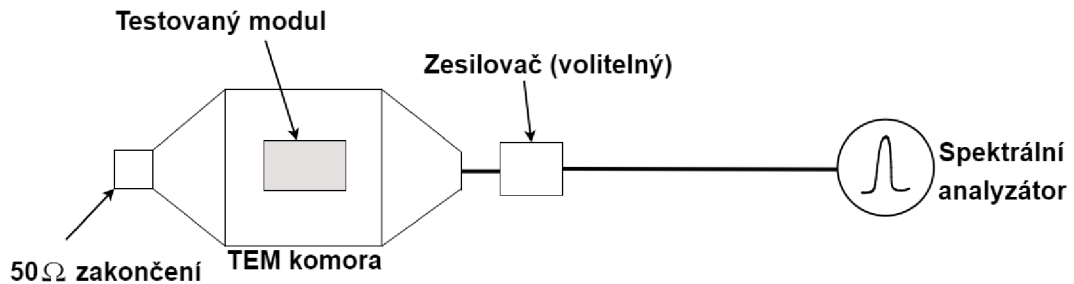
Obrázek 2.2 TEM komora [11]

2.2.1 Podmínky testu

Podmínky testu mají zaručit konzistentní prostředí pro měření. Okolní teplota musí být $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Hladina okolního VF šumu musí být nejméně 6 dB pod nejnižší měřenou hladinou emisí. Ověření probíhá tak, že je testovaný obvod nainstalován do zkušebního zařízení a nejnižší hladina šumu je pak měřena na nainstalovaném obvodu bez napájení. Všechny ostatní okolní podmínky, které by mohly ovlivnit měření musí být uvedeny v protokolu o měření. Dále je nutné, aby bylo funkční chování integrovaného obvodu stabilní v čase. To znamená, že dvě měření oddělená nějakým časovým intervalem musí poskytnout stejné výsledky v rámci očekávaných odchylek měřicí techniky. Rozsah frekvencí pro měření je daný použitou komorou. [8, 12]

2.2.2 Konfigurace testu

TEM komora musí být vybavena nástěnnou svorkou, která je dimenzována tak, aby se dala spojit s deskou uvnitř komory. Pro svorku TEM komory, která není připojena ke spektrálnímu analyzátoru, je vyžadováno zakončení 50Ω . Použití předzesilovače je libovolné, ale pokud je použit, musí být připojen přímo k měřicí svorce bez kabelu pomocí vhodného koaxiálního adaptéru s odporem 50Ω . Testovaný modul je umístěn uvnitř komory. Výše zmíněná konfigurace testu je zobrazena na obrázku 2.3. [12]



Obrázek 2.3 Konfigurace testu TEM komory [12]

2.2.3 Limity

Normou IEC 61967-2 nejsou pevně stanovené limity, většinou tak limity závisí například na požadavcích zákazníka. Důležitý je také poznatek, že konkrétní limity platí pouze pro dané rozměry určité TEM komory. Pokud bychom chtěli použít limity stanovené zákazníkem na jinou TEM komoru, je nutné provést jejich přepočítání podle převodního faktoru X , který se dle normy IEC 61967-8 vypočítá jako

$$X = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{h_1}{h_2} \right), \quad (2.1)$$

kde X je převodní faktor, h_1 je výška TEM komory, pro kterou jsou stanovené limity a h_2 je výška jiné komory, pro jejíž rozměry je potřeba limity vypočítat. [10]

3. INTEGROVANÉ OBVODY A MODULY LED DRIVERŮ SPOLEČNOSTI ONSEMI

Tato kapitola pojednává o integrovaných obvodech NCV78964 a NCV78514 pro řízení LED od společnosti onsemi. Zmíněné obvody jsou určeny k ovládání světel automobilu, kdy obvod NCV78964 je dvoukanálový, zatímco NCV78514 má jeden kanál. V následující kapitole jsou blíže popsány základní funkce těchto integrovaných obvodů a modulů LED driverů, které obsahují dané integrované obvody.

3.1 Integrovaný obvod NCV78964

Integrovaný obvod NCV78964 je obvod, který ovládá přední světla automobilů pomocí dvoufázového zvyšujícího měniče a synchronního dvoukanálového snižujícího měniče. NCV78964 je určen zejména pro LED s vysokým proudem a poskytuje kompletní řešení pro napájení dvou LED řetězců výstupním napětím až do 60 V. [13, 14]

Pokud jsou na jednom modulu požadovány více než dva LED kanály, lze kombinovat dvě, tři nebo více obvodů NCV78964. Díky možnosti nastavovat parametry sběrnice SPI (Serial Peripheral Interface) může jedna hardwarová konfigurace podporovat různé aplikační platformy. Obvod obsahuje paměť, která zahrnuje uživatelsky přístupné registry, ty umožňují volbu pracovní frekvence zdroje, velikosti výstupního proudu či nastavení velikosti výstupního napětí zvyšujícího měniče. [13, 14]

3.1.1 Popis zvyšujícího měniče

Zvyšující měnič obvodu NCV78964 představuje zdroj napětí pro LED řetězce napájený automobilovou baterií. Dále pak eliminuje kolísání napětí baterie při různých jevech, jako je například startování motoru. [13, 14]

Účinnost měniče nabývá nejvyšší hodnoty v trvalém provozním režimu při jmenovité zátěži. Ve zmíněném režimu je také nejmenší zvlnění vstupního proudu. V případě nespojitého režimu napájecí proud kmitá od nuly po požadovanou špičkovou hodnotu, při které se aktivuje zátěž. [13, 14]

V registrech lze pomocí komunikačního modulu sběrnice SPI nastavit výstupní hodnotu a maximální okamžitou hodnotu. Při překročení těchto hodnot dochází k vypnutí zvyšujícího měniče a k příznaku v registrech prostřednictvím SPI. Smyčka regulace špičkového proudu cívkou porovnává referenční napětí na kompenzačním vývodu s napětím snímaným na externím odporu. [13, 14]

Zvyšující měniče je možné pro výkonné systémy kombinovat s více obvody a získat tak vyšší počet fází, které jsou synchronizovány pomocí společného hodinového signálu. Tedy jeden zvyšující měnič může vykonávat svou funkci paralelně se zvyšujícími měniči dalšího integrovaného obvodu. Paralelní spojení umožňuje rozložení výkonového zatížení. Pro tuto konfiguraci se předpokládá, že má každý stupeň stejné externí

součástky. K synchronizaci hodin tyto zvyšující měniče využívají externí hodiny a dochází také k propojení kompenzačních sítí jednotlivých čipů, které zajišťují stabilitu daného zapojení. [13, 14]

3.1.2 Popis snižujícího měniče

Snižující měniče jsou napájeny ze zvyšujícího měniče nebo z napětí baterie s příslušným vstupním filtrem a ochranou proti přepólování. Každý kanál snižujícího měniče může být napájen z jiného vstupního napětí. Cílem snižujícího měniče v proudovém režimu je dodávat do zátěže konstantní proud definované hodnoty. Popisovaný snižující měnič má tři proudové režimy a jeden napěťový režim. [13, 14]

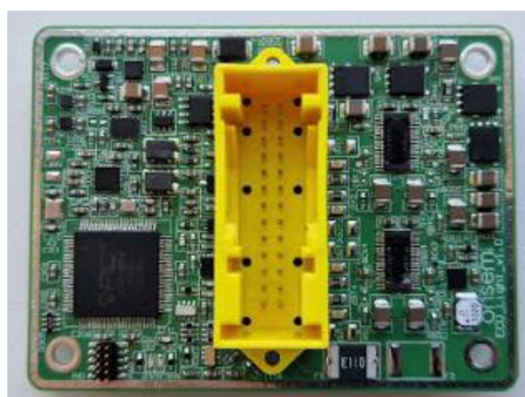
V napěťovém režimu je regulováno výstupní napětí. V tomto režimu musí být přidána zpětnovazební smyčka mezi výstupní napětí a vstupní pin LEDCTRL, který představuje referenční hodnotu napětí. Když napětí snímané pinem LEDCTRL stoupne nad prahovou hodnotu, PWM regulátor okamžitě přeruší fázi TON a spustí fázi TOFF. Následující fáze TON vynechá, dokud napětí neklesne pod nastavenou prahovou hodnotu. V případě, kdy je napětí nižší, pracuje v některém ze tří proudových režimů, které jsou zmíněny v následujícím odstavci. Tento režim umožňuje napájení jednoduchých zátěží. [13, 14]

Tři proudové režimy jsou rozlišovány průběhem proudu cívky. Proud cívky není konstantní, jelikož cívka je střídavě připojována k zemnímu pinu a napájecímu napětí. Pokud by byla hodnota proudu v celém rozsahu měření vyšší než nula, jedná se o režim trvalého proudu. Hraniční proudový režim má spojitý průběh proudu, ale jeho minimální hodnota je nulová. Jestliže ve sběrnici SPI není povolen hraniční režim, proud se může stát nespojitým a přejít tak do režimu nespojitého proudu. [13, 14]

Velikost zvlnění proudu je ovlivněna velikostí indukčnosti cívky, velikostí napětí a také hodnotou pracovní frekvence. Hodnota frekvence měniče je volena v registru prostřednictvím SPI. Je potřeba ji nastavit tak, aby vyzařované elektromagnetické rušení nepřekračovalo limity. Dalšími dvěma registry je potom možné nastavit regulaci průměrné hodnoty proudu. [13, 14]

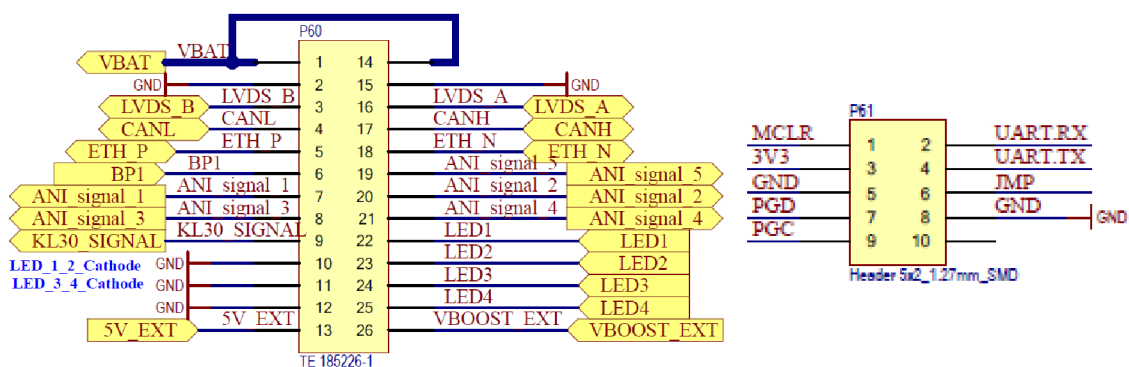
3.1.3 Modul ECU-light s integrovaným obvodem NCV78964

Jedná se o modul, který ovládá a napájí světlomety. Je umístěn přímo na světlo na jeho zadní straně. Je možné jej připojit na napájení, řídicí modul a LED. S řídicím modulem komunikuje prostřednictvím Ethernetu. Na obrázku 3.1 je zobrazen zmíněný modul ECU-light. Krabíčka pro stínění a chlazení modulu z kovu je vyrobena pouze pro spodní část modulu. Zatímco horní část krabíčky je plastová.[13]



Obrázek 3.1 Modul ECU-light s obvodem NCV78964

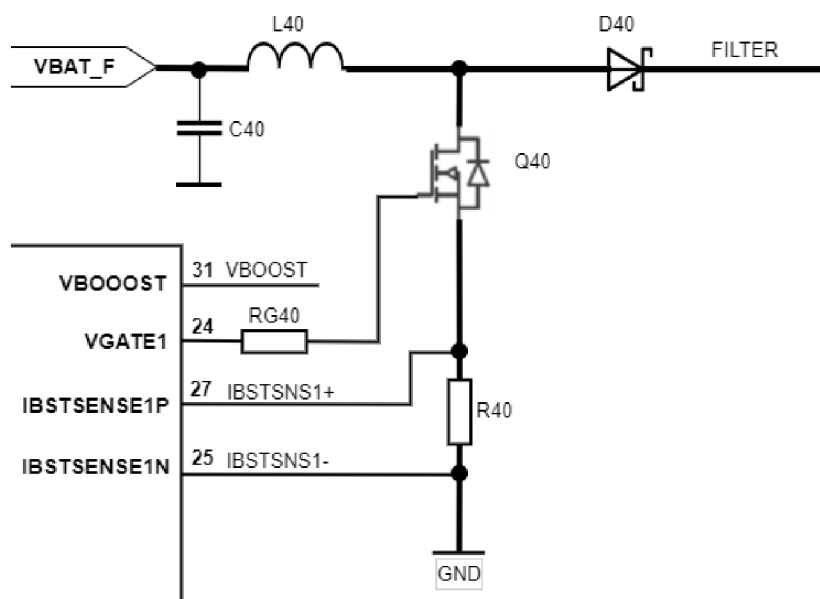
Na obrázku 3.2 je schéma hlavního konektoru modulu ECU-light. VBAT je vstupní pin pro napájení integrovaných obvodů a pomocí regulátorů jsou vytvořeny dvě napájecí úrovně 5 V a 3,3 V pro napájení interních bloků. Napájecí úroveň 5V_ext pak může sloužit pro napájení externích bloků. Dále jsou na konektor vyvedeny piny sběrnic LVDS (Low Voltage Differential Signaling), CAN (Controller Area Network) a Ethernetu. ANI_signal_x jsou piny pro analogové vstupy, které jsou následně převedeny pomocí AD převodníků na digitální signály. Výstupy snižujícího měniče, které jsou přivedeny na LED, jsou na konektoru označeny jako LEDx. VBOOST_EXT může sloužit k napájení externích zařízení. Druhý konektor slouží pro programování modulu.



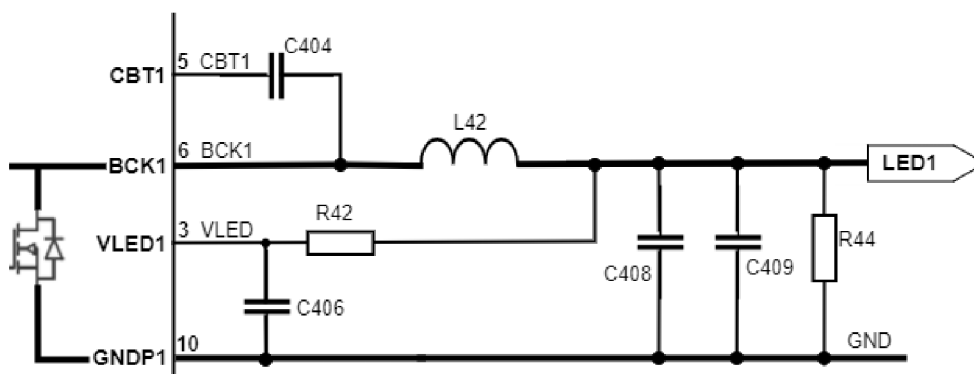
Obrázek 3.2 Schéma konektorů modulu ECU-light [15]

Schéma jedné fáze zvyšujícího měniče na modulu ECU-light je zobrazena na obrázku 3.3. Spínací tranzistor je ovládán signálem VGATE_x z čipu. Snímací odpor R40 umožňuje převod proudu tranzistorem na napětí, které je odečítáno integrovaným obvodem. Hodnota napětí je následně využívána k řízení činnosti zvyšujícího měniče. Za funkčním celkem zvyšujícího měniče je dále filtr. Výstup za filtrem může být mimo jiné využit pro napájení snižujícího měniče. Každý čip NCV78964 má dvě fáze zvyšujícího měniče. Na modulu ECU-light jsou tyto obvody pouze dva, jelikož u druhého čipu NCV78964 je tento integrovaný obvod používán pouze jako snižující měnič.

Zmíněné upořádání je dostatečné pro předpokládaný výkon maximálně 150 W. Výstupní obvod snižujícího měniče lze vidět na obrázku 3.4. [13, 14]



Obrázek 3.3 Jedna fáze zvyšujícího měniče [15]

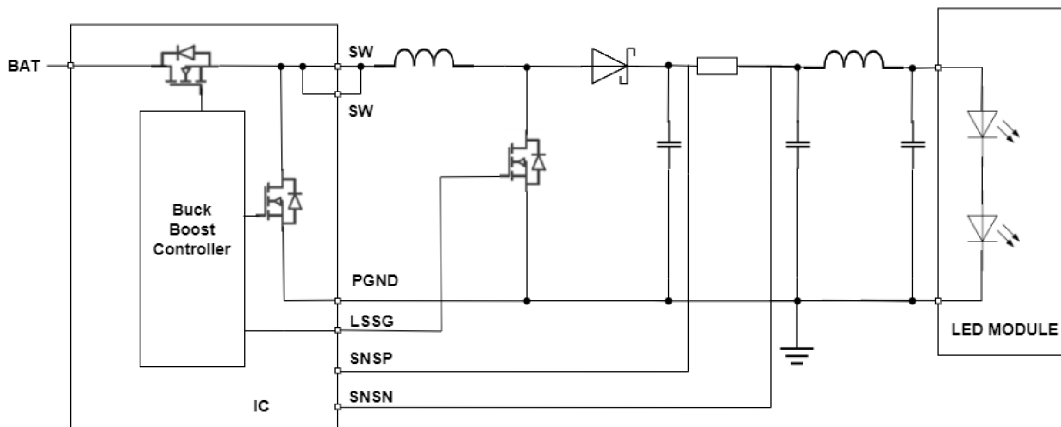


Obrázek 3.4 Výstupní obvod snižujícího měniče [15]

Kondenzátor C404 je nabíjen vnitřními obvody čipu a náboj, který je v něm uskladněný, ovládá horní spínač. Signál z rezistoru R42 je interně využíván pro výpočet doby TOFF. Výstupní kondenzátory snižují zvlnění proudu. Úbytek na rezistoru R44 je potřebný pro správnou činnost nabíjecího obvodu pro kondenzátor C404. Celý tento obvod je na modulu čtyřikrát. [13, 14]

3.2 Integrovaný obvod NCV78514

Dalším obvodem, o kterém je v této práci pojednáváno, je integrovaný obvod NCV78514 od společnosti onsemi. Jedná se o jednonábový ovladač automobilových světel, který je založen na topologii H-můstku. Může napájet jeden řetězec LED v rozsahu 2-20 LED. Proud LED řetězcem je nastavován pomocí externího rezistoru pro statické řízení nebo pomocí vnějšího napětí pro dynamické ovládání. Skutečná hodnota proudu je potom odečítána pomocí snímacího odporu. Typická aplikace obvodu se vyskytuje na obrázku 3.5. Obvod má pevnou spínací frekvenci 400 kHz, výstupní napětí může dosahovat až 60 V a externí programovatelný proud může dosahovat hodnot 200 mA-1500 mA [16]



Obrázek 3.5 Typická aplikace obvodu NCV78514 [16]

Rovnice pro výpočet proudu pomocí externího rezistoru je definována jako

$$I_{LED} = \frac{1000}{R_{SET}} + 0,1, \quad (3.1)$$

kde I_{LED} je výstupní proud a R_{SET} je externí rezistor, pomocí kterého je výstupní proud nastavován. V tabulce 3.1 je přehled vybraných hodnot výstupního proudu a jim odpovídající hodnoty externího rezistoru.

Tabulka 3.1 Vybrané hodnoty výstupního proudu a jim odpovídající hodnoty externího rezistoru

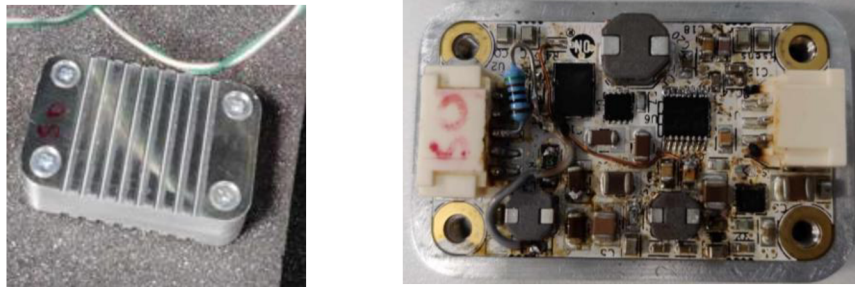
Výstupní proud I_{LED} [A]	Hodnota externího rezistoru R_{SET} [k Ω]
0,2	12
0,55	2,2
1,1	1
1,5	0,51

Tento čip je napájen z vývodu BAT, na který může být připojena automobilová baterie. Popisovaný DC/DC měnič zahrnuje 3 různé režimy, a to režim snižujícího, snižujícího/zvyšujícího a zvyšujícího měniče. V jakém režimu se obvod právě nachází, je dáno velikostí napětí na vstupu BAT a velikostí napětí na LED řetězci. Pokud je počet připojených LED takový, že je napětí na LED řetězci menší než napájecí napětí, měnič přejde do režimu snižujícího měniče. V důsledku toho je pak pin LSSG, který se používá k řízení dolního spínače v režimu zvyšujícího měniče, deaktivován. Při provozu snižujícího měniče přenášejí integrované tranzistory energii ze vstupu na induktor. Pokud je napětí BAT menší než výstupní napětí na LED, obvod se uvede do režimu zvyšujícího měniče, kdy je ve fázi TON pin LSSG aktivován, externí tranzistor je sepnut a přes Schottkyho diodu neteče žádný proud, jelikož napětí na anodě je menší než napětí na LED. V TOFF fázi je potom vypnut spodní spínač. Třetí režim nastává v případě, kdy se napětí VLED přiblíží na hodnotu napětí BAT, obvod je v režimu snižujícího/zvyšujícího měniče, kdy ovládání tří spínačů závisí na tom, zda je výstupní napětí těsně nad nebo pod napětím BAT. [16]

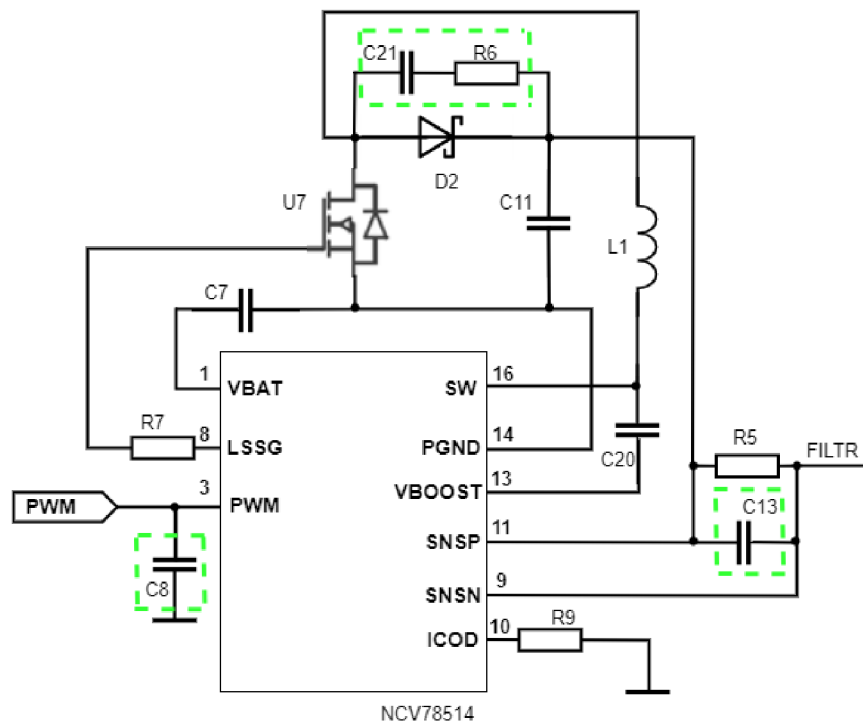
Obvod NCV78514 má také funkci rozprostřeného spektra. Jedná se o techniku využívající frekvenční modulaci k dosažení nižšího špičkového elektromagnetického rušení. Modulaci spínací frekvence dochází k rozprostření šířky pásma vnitřních hodin, tím se sníží špičková amplituda na středním kmitočtu a na harmonických kmitočtech. Výsledkem jsou právě nižší špičky elektromagnetického rušení. [16]

3.2.1 Modul s integrovaným obvodem NCV78514

Integrovaný obvod NCV78514 je měřen v rámci modulu se vstupním Π filtrem a s ochranou proti přepólování. Na výstupu je potom umístěn výstupní Π filtr. Dále jsou v modulu obsaženy blokovací kondenzátory a také RC odrušovací filtr. Celý modul je potom umístěn v hliníkové krabici, která má stínící a chladící funkci. Na obrázku 3.6 na levé straně je ukázán výsledný modul s integrovaným obvodem NCV78514, který je již uzavřen ve hliníkové stínící krabici. Na pravé straně obrázku je pak horní část stínící krabice odstraněna. Na zmíněném obrázku lze vidět drobné úpravy v modulu. Úpravy se zde vyskytují proto, že se jedná o čip NCV78514 v modulu SCV78565. Zmíněná dvě zařízení jsou téměř kompatibilní až na pár drobných rozdílů. Nejdůležitější nedostatek byl chybějící pull up rezistor, který byl nahrazen drátkem a jeden chybějící rezistor, který byl dopájen. Dále na obrázku 3.7 je zobrazena část schéma modulu NCV78514. Zmíněný dopájený rezistor je ve schématu označen jako R9. Současně se jedná rezistor, kterým je nastavována hodnota výstupního proudu. [16]



Obrázek 3.6 Výsledný modul s integrovaným obvodem NCV78514 ve stínící krabičce (vlevo) a bez horní části stínící krabičky (vpravo)



Obrázek 3.7 Část schéma modulu NCV78514 se spínaným zdrojem [16]

Uvedené schéma odpovídá typické aplikaci z obrázku 3.5. Snímací rezistor je označen jako R5. Za ním následuje filtr a výstup vedoucí na LED. Rezistor, pomocí kterého je nastavována hodnota výstupního proudu je R9. Volitelné komponenty, které se nachází ve schématu jsou označeny zeleným orámováním.

4. MĚŘENÍ MODULU NCV78514

Předchozí část diplomové práce byla věnována metodice a teorii, které se týká tato práce. Následující část práce se zabývá popisem jednotlivých měření, nastavení měřicích pracovišť a kvalifikovanému popisu výsledků měření. Se zmíněným modulem bylo provedeno měření pomocí metody z normy CISPR25 – kapitoly 6.3 o emisích šířených vedením z modulu napěťovou metodou, a také měření pomocí metody TEM komory z normy IEC 61967-2. Ve třetí části této kapitoly se práce zabývá měřením pomocí sond blízkého pole.

4.1 Měření pomocí metody CISPR25

Nejprve bylo provedeno měření CISPR25, konkrétně dle kapitoly 6.3 této normy o emisích šířených vedením z modulu napěťovou metodou. Na obrázku 4.1 je zobrazeno měřicí stanoviště pro měření CISPR25 s modulem NCV78514. Měřicí pracoviště bylo zapojeno v souladu s konfigurací testu uvedenou v kapitole 2.1.2 a také na obrázku 2.1. Modul je napájen z 12 V akumulátoru a je k ní připojen přes síť pro stabilizaci impedance vedení (LISN). Na výstupu modulu jsou připojeny LED. Počet připojených LED se odvíjí od daného režimu, ve kterém modul pracuje. Speciální měřicí přijímač je potom připojen k LISN, která je připojena k pozitivnímu přívodu napájení. Speciální měřicí přijímač je od firmy Rohde&Schwarz – ESRP EMI testovací přijímač. S tímto přístrojem je možné měřit ve frekvenčním rozsahu od 9 kHz do 3,6 GHz. Použité LISN byly také značky Rohde&Schwarz, konkrétně model ESH3-Z6, který má rozpětí frekvence 0,1 MHz – 200 MHz, se simulovanou impedancí 5 μH paralelně s 50 Ω . Přístroje byly kalibrovány v souladu s měřicí metodou CISPR25. Měření bylo prováděno v rozsahu frekvence od 0,1 do 120 MHz. Modul byl napájen z baterie.



Obrázek 4.1 Měřicí stanoviště pro měření CISPR25 s modulem NCV78514

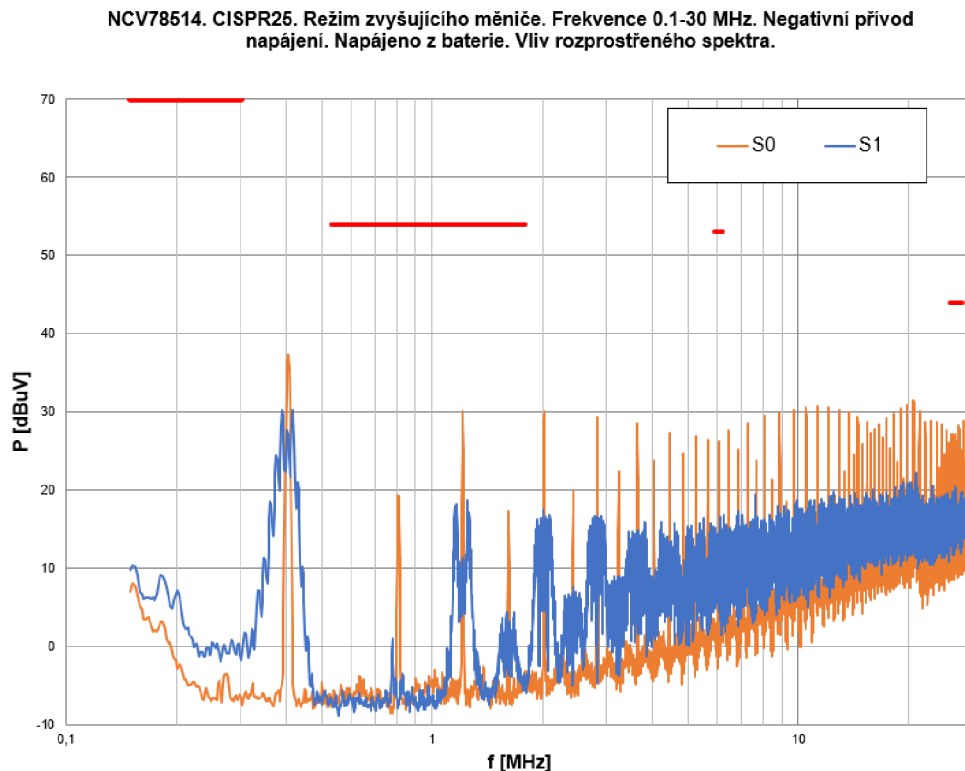
Měření bylo realizováno pro několik různých nastavení. Byl měřen vliv:

- Funkce rozprostřeného spektra.
- Provozního režimu (snižující, snižující/zvyšující, zvyšující měnič).
- Přívodu napájení (pozitivní, negativní).
- Stínící krabičky.
- Volitelných komponent.
- Výstupního proudu.

Všechna vyjmenovaná měření jsou popsána níže.

4.1.1 Vliv rozprostřeného spektra

Vliv rozprostřeného spektra je zobrazen na obrázku 4.2. Jedná se o měření, kdy modul je v režimu zvyšujícího měniče a emise jsou měřeny na negativním přívodu napájení. Oranžová křivka zobrazuje průběh měření modulu s vypnutou funkcí rozprostřeného spektra a modrá křivka se zapnutou funkcí rozprostřeného spektra.



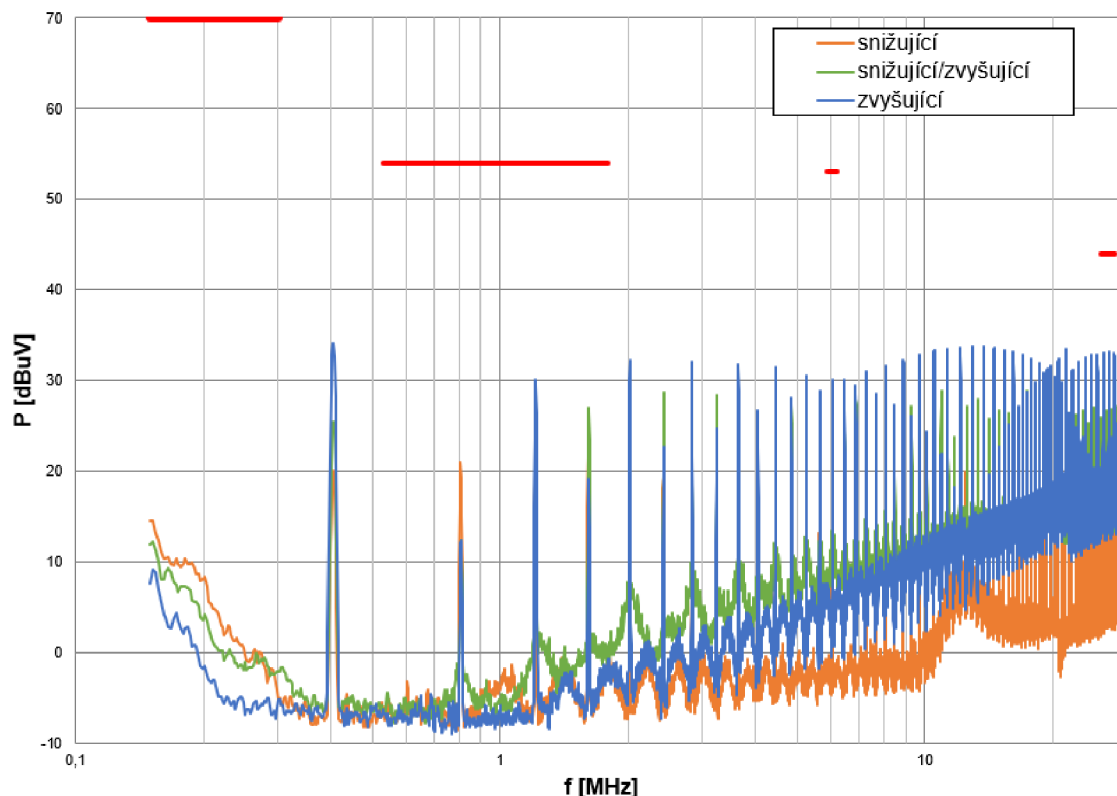
Obrázek 4.2 Vliv rozprostřeného spektra modulu NCV78514 (CISPR25)

Limity stanovené normou, které se nachází v tabulce 2.1, nepřesahuje ani jedno ze zobrazených měření. Na obrázku jsou limity zobrazeny červeně, je tomu tak v rámci celé práce. U modulu s aktivní funkcí rozprostřeného spektra můžeme pozorovat nižší vrcholové hodnoty naměřených emisí. Je zobrazena část grafu do 30 MHz, kde má funkce rozprostřeného spektra na výsledné hodnoty emise pozorovatelný vliv.

4.1.2 Vliv provozního režimu

Vliv provozního režimu je zobrazen na obrázku 4.3. Jedná se o měření s vypnutou funkcí rozprostřeného spektra na pozitivním přívodu napájení. Pro režim snižujícího měniče, který je na obrázku vyznačen oranžovou barvou, jsou hodnoty emise nejnižší. V případě režimu zvyšujícího měniče, který je zobrazen modrou barvou, jsou vrcholové hodnoty ve většině měřicího rozsahu nejvyšší. Křivka, kde jsou měřeny emise v režimu snižujícího/zvyšujícího měniče je vyznačena zelenou barvou.

NCV78514. CISPR25. Frekvence 0.1-30 MHz. Neaktivní funkce rozprostřeného spektra. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie. Vliv provozního režimu.

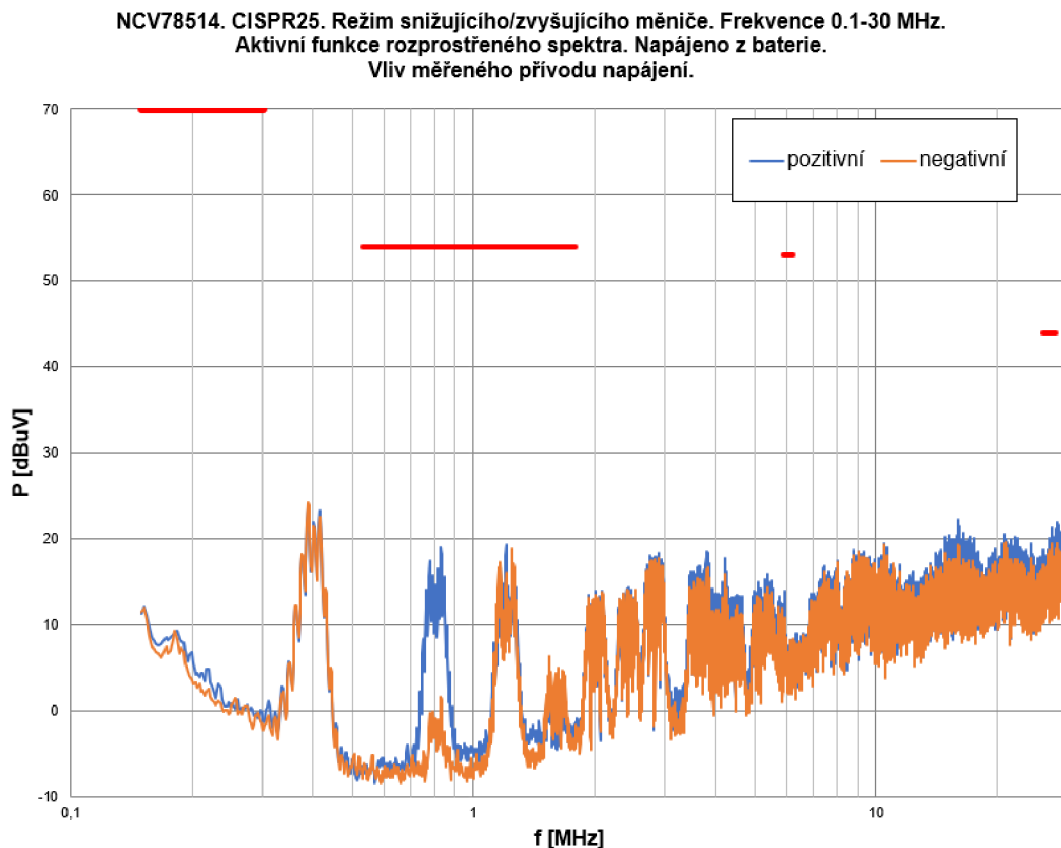


Obrázek 4.3 Vliv provozního režimu modulu NCV78514 (CISPR25)

Daný režim se mění počtem připojených LED na výstupu. Pro režim zvyšujícího měniče je na výstupu připojeno 7 LED, pro snižující/zvyšující režim 4 LED a pro režim snižujícího měniče pouze 2 LED.

4.1.3 Vliv měřeného přívodu napájení

Na obrázku 4.4 je zobrazeno měření, kdy je modul NCV78514 v režimu snižujícího/zvyšujícího měniče, má aktivní funkci rozprostřeného spektra. V grafu jsou vyneseny výsledky jak pro měření na pozitivním přívodu napájení (modrá), tak na negativním (oranžová). Tento příklad poukazuje na to, že výsledky jednotlivých měření se téměř neliší.

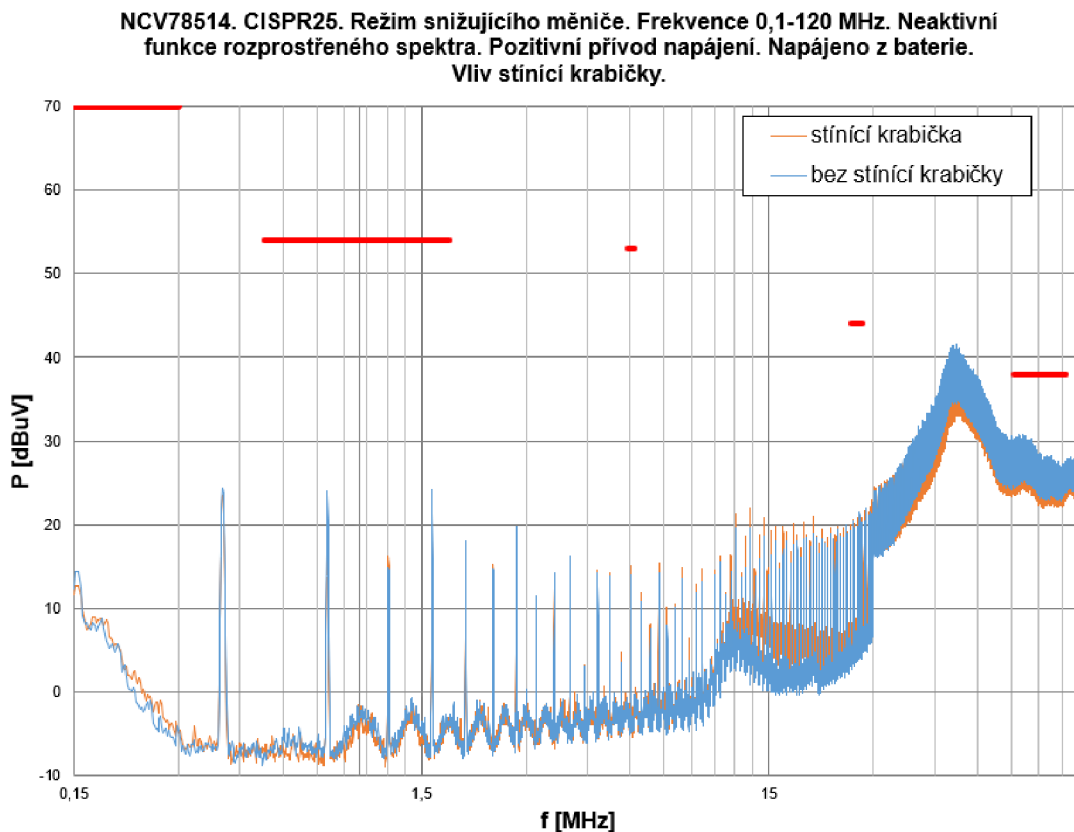


Obrázek 4.4 Vliv měření na pozitivním/negativním přívodu napájení modulu NCV78514 (CISPR25)

Následně byla provedena další měření k ověření jednotlivých vlivů na velikost emisí. Pro zkrácení doby měření byly vynechány některé kombinace měření. Byl vybrán režim snižujícího a režim zvyšujícího měniče jako dva krajní případy. Následně byl zvolen modul s vypnutou funkcí rozprostřeného spektra, jelikož v tomto případě emise dosahují vyšších hodnot, je možné detekovat případné překročení normou stanoveného limitu.

4.1.4 Vliv stínící krabičky

Vliv stínící krabičky při měření CISPR25 je zobrazen na obrázku 4.5. Jedná se o měření modulu v režimu snižujícího měniče s aktivní funkcí rozprostřeného spektra. Emise byly měřeny na pozitivním přívodu napájení. Je zobrazen celý měřený frekvenční rozsah. Křivka odpovídající měření bez stínící krabičky má na obrázku modrou barvu a křivka, která znázorňuje měření se stínící krabičkou je oranžová.



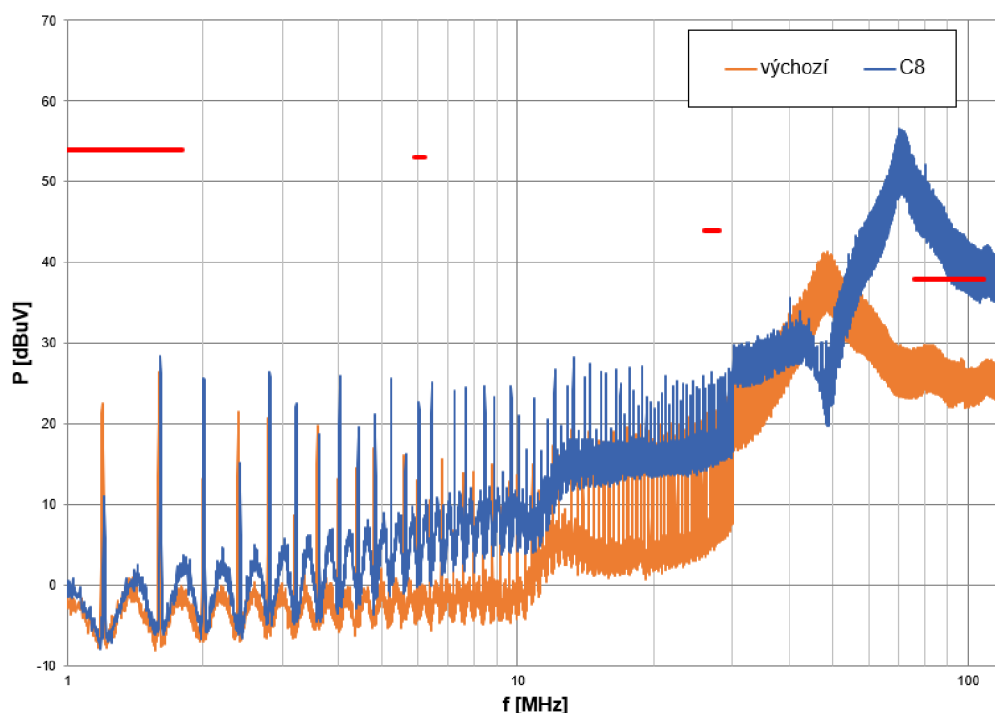
Obrázek 4.5 Vliv stínící krabičky na měření modulu NCV78514 (CISPR25)

Z obrázku je patrné, že žádný vliv nebyl zpozorován. Odpovídá to podstatě samotné měřicí metody, která měří emise na vodičích, na které nemá stínící krabička vliv. Pro měření vlivu krabičky je nutné zvolit jinou měřicí metodu.

4.1.5 Vliv volitelných komponent

Volitelné komponenty jsou na schéma modulu NCV78514 na obrázku 3.7 vyznačeny zeleným orámováním. Na obrázku 4.6 je zobrazen vliv jedné z volitelných komponent modulu NCV78514, a to kondenzátoru C8 na vstupním PWM pinu, který je vyveden přes vstupní konektor ven z modulu. Graf zobrazující vliv C8 je vyznačen modrou barvou. Pro srovnání byl přidán také graf naměřených hodnot v původním nastavení, který má oranžovou barvu. Jedná se o měření v režimu snižujícího měniče na pozitivním přívodu napájení.

NCV78514. CISPR25. Režim snižujícího měniče. Frekvence 1-120 MHz. Neaktivní funkce rozprostřeného spektra. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie. Vliv kondenzátoru C8.



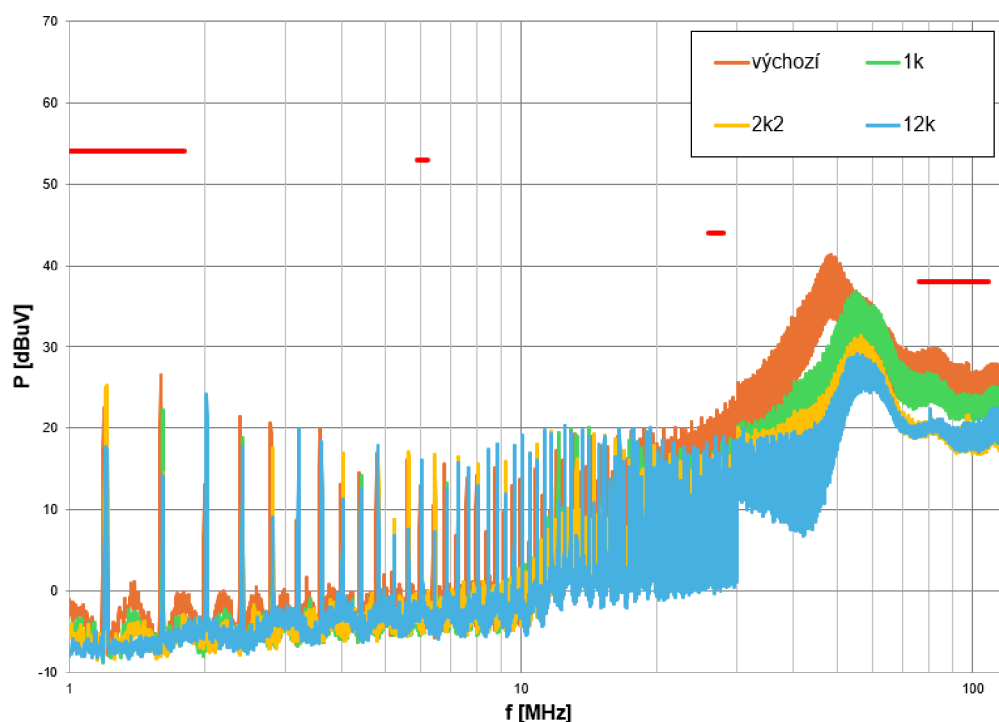
Obrázek 4.6 Vliv kondenzátoru C8 modulu NCV78514 (CISPR25)

Z grafu je patrné, že při odstranění kondenzátoru C8 by již modul nespĺňoval limity stanovené normou pro CISPR25. Ostatní součástky, ačkoliv byly měřeny všechny volitelné komponenty, vykazovali minimální vliv na výsledek měřených emisí.

4.1.6 Vliv výstupního proudu

Vliv výstupního proudu při měření metodou CISPR25 na modulu NCV78514 je zachycen na obrázku 4.7. Dle předpokladu se snižujícím se proudem klesají také naměřené hodnoty emisí. Křivka odpovídající měření s výstupním proudem o velikosti 2 A (510 Ω -výchozí nastavení) je vyznačena oranžovou barvou, zelenou barvu má křivka korespondující hodnotě výstupního proudu 1,1 A (1 k Ω). Měření znázorněné žlutou barvou náleží výstupnímu proudu o velikosti cca 550 mA (2,2 k Ω). Křivka, která poukazuje na měření s nastavenou minimální hodnotou proudu 200 mA (12 k Ω) má modrou barvu.

NCV78514. CISPR25. Režim snižujícího měniče. Frekvence 1-120 MHz. Neaktivní funkce rozprostřeného spektra. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie. Vliv výstupního proudu.



Obrázek 4.7 Vliv výstupního proudu modulu NCV78514 (CISPR25)

Hodnota výstupního proudu se nastavuje pomocí odporu R9 na modulu. Čím vyšší je hodnota odporu, tím nižší je výstupní proud. Rovnice pro výpočet je uvedena v kapitole 3.2, vypočítané hodnoty se nacházejí v tabulce 3.1.

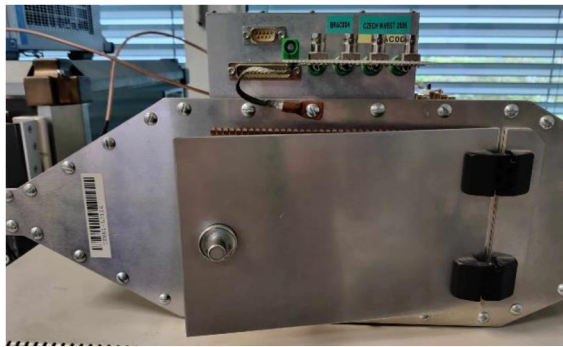
4.1.7 Shrnutí měření metodou CISPR25

Měření metodou CISPR25 na modulu NCV78514 ukázalo, že stínící krabice a přívod napájení, na kterém je připojen měřicí přijímač, nemají na výsledné emise vliv. Modul s aktivní funkcí rozprostřeného spektra má na měření pozitivní vliv. Jako kritická součástka, důležitá pro správnou činnost modulu a splnění limitů stanovených normou, se ukázal kondenzátor C8. Nejmenší emise na vodičích byly naměřeny v případě režimu snižujícího měniče, zatímco nejvyšších emisí bylo dosaženo u modulu v režimu zvyšujícího měniče. Vliv výstupního proudu byl dle očekávání takový, že v případě nižšího výstupního proudu byly naměřeny nižší emise a naopak.

Uvedená metoda ukázala, že modul NCV78514 je vhodné používat s aktivní funkcí rozprostřeného spektra a s kondenzátorem na vstupu PWM. Volba ostatních parametrů se odvíjí od konkrétní aplikace. Kromě modulu bez kondenzátoru C8 žádné z měření nepřesáhlo stanovené limity.

4.2 Měření pomocí komory TEM

Následující sada měření s modulem NCV78514 je měření metodou TEM komory, které vychází z normy 61967-2. Jelikož zmíněná metoda měří vyzařované emise ze zařízení, byl tímto způsobem měřen vliv stínící krabice. Na obrázku 4.8 a 4.9 je zobrazeno měřicí pracoviště, na kterém je TEM komora, která má z čelní strany otevírací dvířka. Na boční straně lze vidět zakončovací svorku se zátěží 50 Ω . Ke druhé straně komory je potom připojen speciální měřicí přijímač. Jedná se o stejný měřicí přijímač, který je použit i při měření metodou CISPR25. Modul včetně akumulátoru, kterým je zařízení napájeno, je umístěn uvnitř komory. LED, které jsou připojeny na výstupu modulu byly položeny na horní straně komory, jelikož se již dovnitř nedaly umístit z důvodu omezeného prostoru uvnitř komory. Vodič, kterým je modul spojen s LED, je ale dostatečně tenký, tudíž při jeho vyvedení horním otvorem ven, nevznikají žádné netěsnosti a horní kryt je možné upevnit bez jakýchkoli komplikací. Popsané zapojení koresponduje s konfigurací zapojení dle normy, které je na obrázku 2.3.

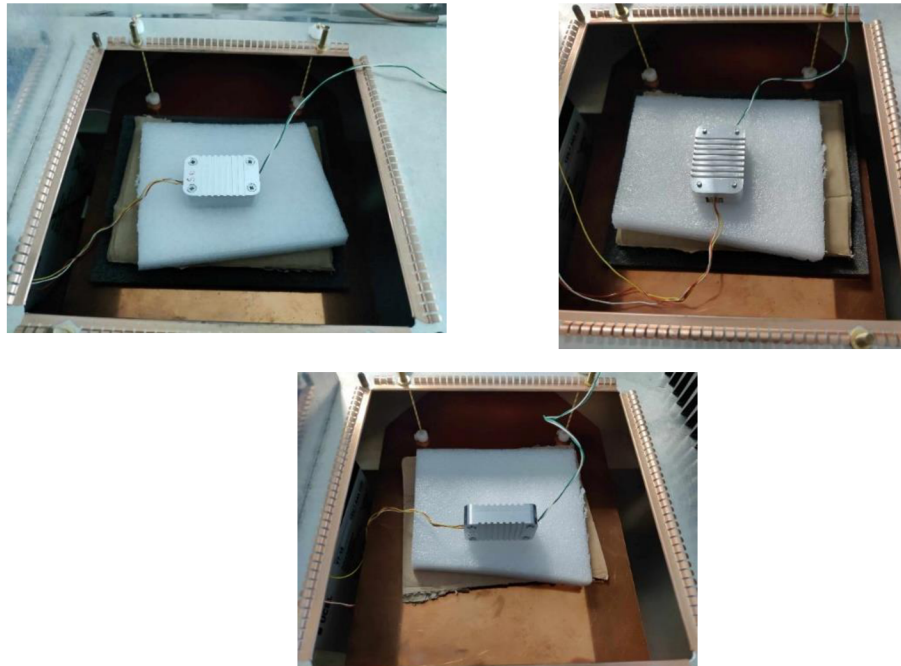


Obrázek 4.8 Měřicí stanoviště pro měření TEM komory s modulem NCV78514 z čelního pohledu



Obrázek 4.9 Měřicí stanoviště pro měření metody TEM komory s modulem NCV78514 z bočního pohledu

Modul je nutné umístit do středu horní poloviny komory, a to jak do středu horního otvoru (středního vodiče), tak také do středu horní poloviny komory mezi středním vodičem a horní stranou vnější části komory. Rovněž záleží na orientaci a poloze měřeného modulu v komoře. Jelikož je elektromagnetické pole uvnitř komory rovnoměrně rozložené, může dojít při rozdílné poloze modulu k naměření jiných hodnot. Na obrázku 4.10 jsou zobrazeny jednotlivé pozice, ve kterých je modul měřen. Nahoře vlevo je pozice 1, nahoře vpravo je pozice 2 a dole se nachází obrázek pozice 3. Tímto způsobem jsou jednotlivé pozice při vyhodnocování výsledků pojmenovávány.



Obrázek 4.10 Pozice modulu při jednotlivých měření

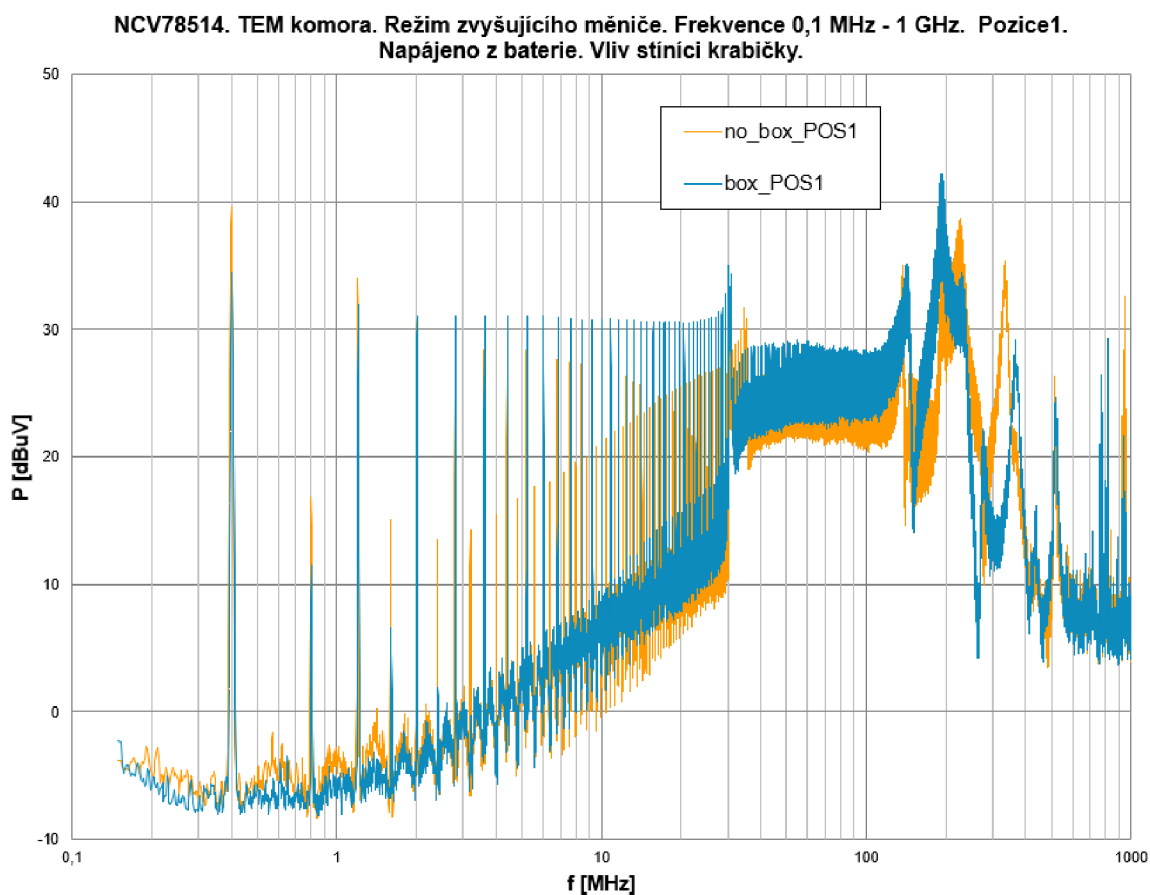
Bylo provedeno několik měření, která ověřují vliv:

- Stínící krabičky.
- Pozice modulu.
- Přídavného stínění.

Rozsah měřících frekvencí je různý pro jednotlivé TEM komory. V případě použité TEM komory bylo možné měřit v rozsahu frekvence od 0,1 MHz do 1 GHz. Všechna zmíněná měření jsou popsána níže v této kapitole.

4.2.1 Vliv stínící krabičky

Vliv stínící krabičky je zobrazen na obrázku 4.11. Jedná se o měření modulu v režimu zvyšujícího měniče, kdy je modul v pozici 1. Modrou barvou je tvořena křivka, která byla naměřena se stínící krabičkou. Křivka bez stínící krabičky je potom znázorněna pomocí oranžové barvy.



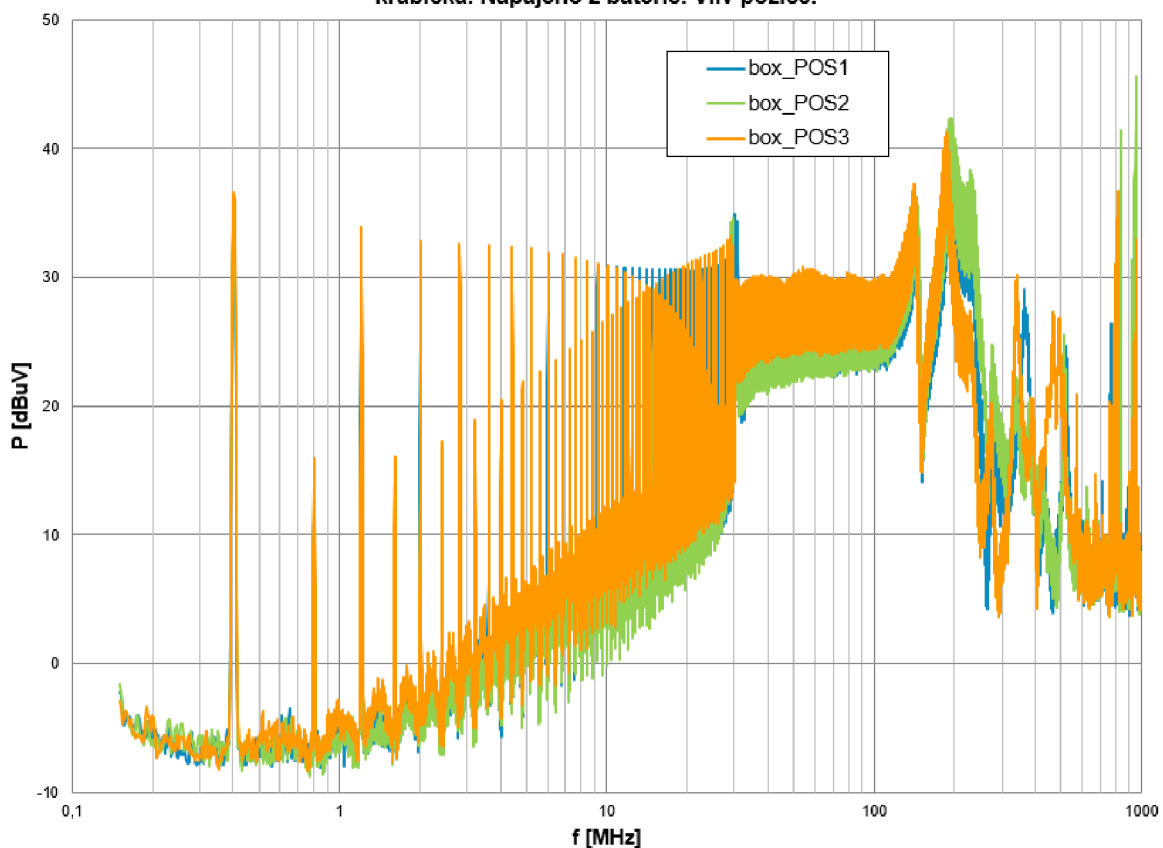
Obrázek 4.11 Vliv stínící krabičky modulu NCV78514 (TEM komora)

Jak lze vidět, vliv stínící krabičky na vyzařované emise není pozorován. Vzhledem k tomu, že se uvnitř nenachází pouze samotný modul, ale i vodiče vedoucí z modulu a baterie, tak zřejmě došlo k tomu, že emise vyzařované zmíněnými vodiči jsou v porovnání s emisemi vyzařovanými modulem podstatně větší.

4.2.2 Vliv pozice měřeného modulu

Na obrázku 4.12 je zobrazen vliv pozice měřeného modulu. Jedná se o měření, kdy je modul v režimu zvyšujícího měniče, má připevněnou stínící krabičku a mění se jednotlivé pozice. Pozice 1 je znázorněna modrou barvou, pozice 2 zelenou a pozice 3 oranžovou barvou.

NCV78514. TEM komora. Režim zvyšujícího měniče. Frekvence 0,1 MHz - 1 GHz. Stínící krabice. Napájeno z baterie. Vliv pozice.

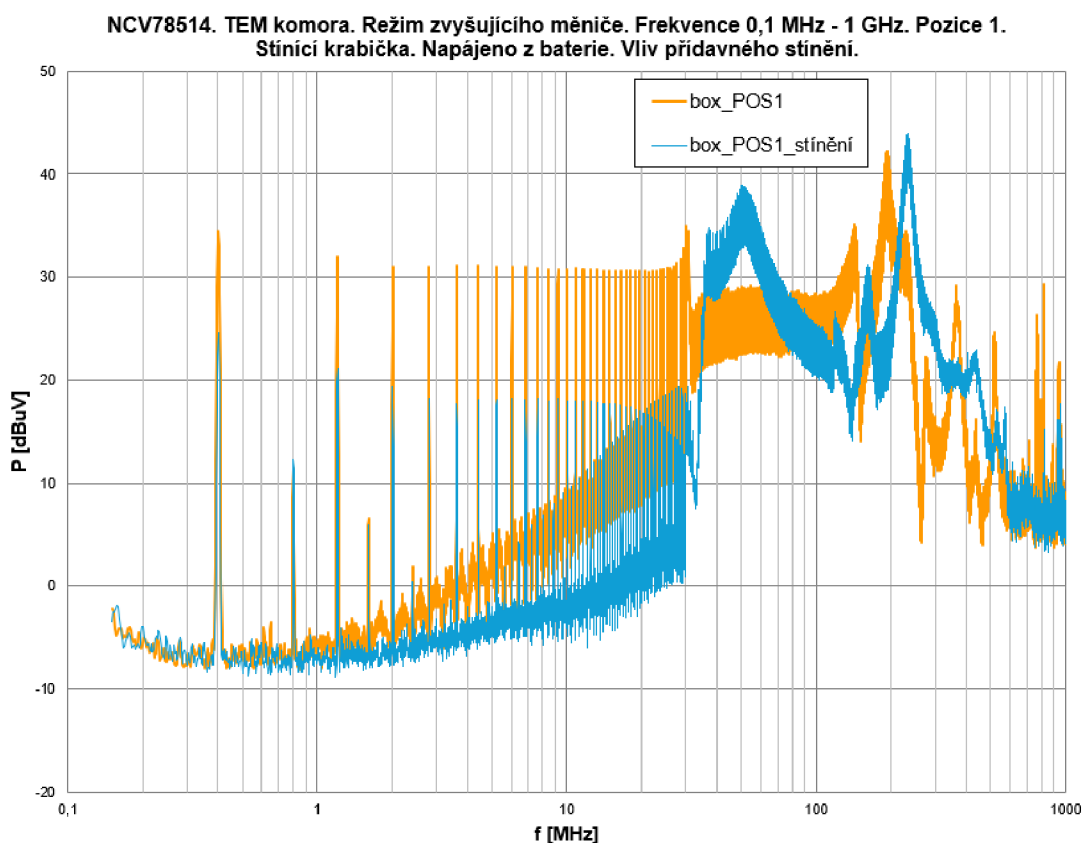


Obrázek 4.12 Vliv pozice měřeného modulu NCV78514 (TEM komora)

Z obrázku je patrné, že opět není zcela možné pozorovat vliv jednotlivých pozic modulu na měření. Pravděpodobně se jedná o působení stejného vlivu, zapříčiněného vysokým podílem emisí vodičů modulu, které jsou uvnitř komory.

4.2.3 Vliv přidavného stínění

Vzhledem k předešlým měřením byl navržen následný měřicí pokus, kdy vodiče, které vedou do baterie, a které vedou ven z komory do LED, byly odstíněny hliníkovou fólií. Na obrázku 4.13 je zobrazen zmíněný vliv přidavného stínění vodičů vedoucích z modulu. Měření bez přidavného stínění je znázorněno oranžovou barvou a měření s přidavným stíněním je tvořeno křivkou modré barvy.



Obrázek 4.13 Vliv přidavného stínění vodičů modulu NCV78514 (TEM komora)

Modul NCV78514 byl při uvedeném měření v režimu zvyšujícího měniče a nacházel se v pozici 1. Vliv odstínění vodičů je pozorovatelný do frekvence 30 MHz, kdy opravdu lze konstatovat, že určitá část emisí byla potlačena.

4.2.4 Shrnutí měření pomocí komory TEM

Pomocí měření komory TEM bylo zjištěno, že ani stínící krabíčka, ani pozice modulu uvnitř komory nemají téměř žádný vliv na výsledné naměřené emise. Zřejmě je tomu tak z důvodu uvedené konfigurace testu, kdy se v komoře kromě modulu nachází ještě vodiče vedoucí z modulu a také baterie. Bohužel v případě měření modulu není možné tyto vlivy odstranit. Ale vzhledem k tomu, že je zájem o komplexní pohled na měřený modul včetně jeho okolí, je zvolená konfigurace jediná možná.

Pokus o odstranění, alespoň části tohoto vlivu byl realizován pomocí odstínění vodičů vedoucích z modulu pomocí alobalu. Tato změna měla na měřené emise vliv do frekvence 30 MHz.

4.3 Měření sondami blízkého pole

Třetí sada má za úkol lokalizovat součástky, které největší měrou přispívají k vyzařovanému rušení na modulu NCV78514, pomocí sond blízkého pole. Jedná se o sondy, které jsou popsány v kapitole 1.3. Měření je konfigurováno tak, že modul je napájen z baterie, na výstupu jsou připojeny LED (2 pro režim snižujícího měniče, 7 pro režim zvyšujícího měniče) a k měřicímu přijímači je připojena sonda blízkého pole. Všechna měření se sondami blízkého pole v případě modulu NCV78514 jsou opět provedena s modulem, který nemá aktivní funkci rozprostřeného spektra, pro režim snižujícího i pro režim zvyšujícího měniče.

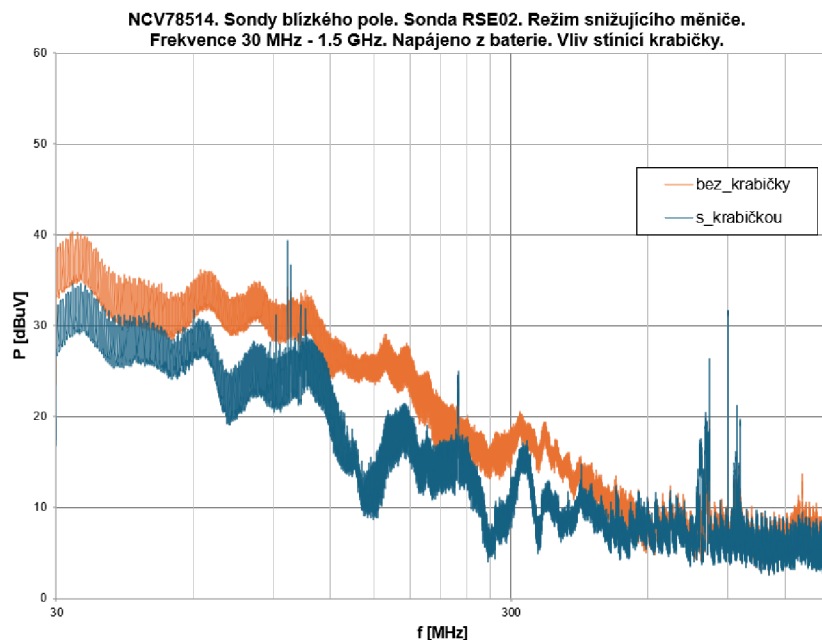
V případě sond blízkého pole je měřeno pomocí:

- Sondy elektrického pole RSE02 (vliv stínící krabíčky).
- Sondy elektrického pole RSE10 (součástky vykazující největší rušení).
- Sondy magnetického pole RSH400-1 (vliv pozice sondy).
- Sondy magnetického pole RSH2.5-2 (součástky vykazující největší rušení).

Vyjmenovaná měření jsou blíže popsána v následujících podkapitolách.

4.3.1 Měření se sondou RSE02

Velikost sondy RSE02 je srovnatelná s velikostí modulu, tudíž pro měření vlivu stínící krabíčky jsou dostačující dvě měření, a to se stínící krabíčkou a bez ní. Na obrázku 4.14 je zobrazeno zmíněné měření. Oranžovou barvou je znázorněna křivka, která odpovídá měření bez stínící krabíčky, měření se stínící krabíčkou je znázorněno modrou barvou.

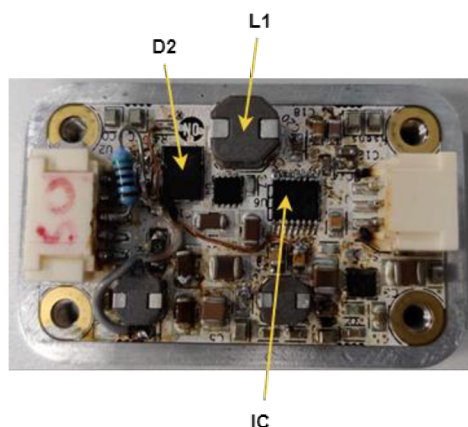


Obrázek 4.14 Vliv stínící krabíčky modulu NCV78514 (RSE02 sonda)

Narozdíl od měření metodou CISPR25 lze v tomto případě pozorovat určitý vliv stínící krabičky na frekvencích do cca 550 MHz. Měření bylo provedeno v režimu snižujícího měniče i v režimu zvyšujícího měniče, ale zmíněný vliv je viditelný ve stejném rozsahu frekvencí, a proto byl vybrán jen jeden obrázek ilustrující danou situaci.

4.3.2 Měření se sondou RSE10

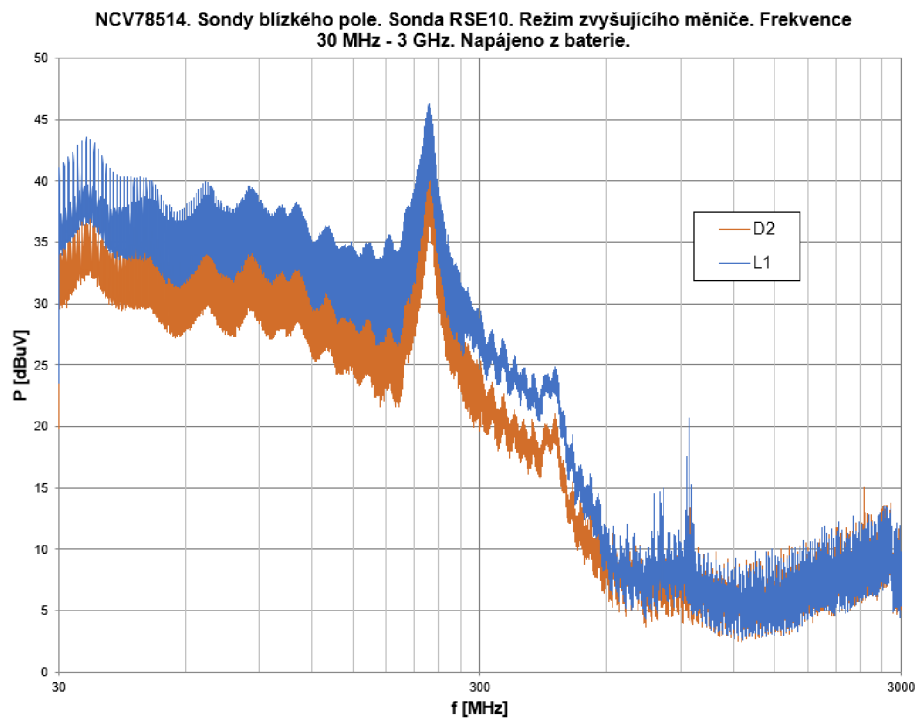
Na obrázku 4.15 je zobrazen modul NCV78514, na kterém jsou popsány vybrané součástky, které jsou využity při následném popisu jednotlivých měření. Jedná se o diodu D2, která pracuje jako spínač ve druhé fázi spínacího zdroje. Cívku L1, která je zapojena v obvodu napájecího zdroje, a integrovaný obvod NCV78514, který je na obrázku označen jako IC.



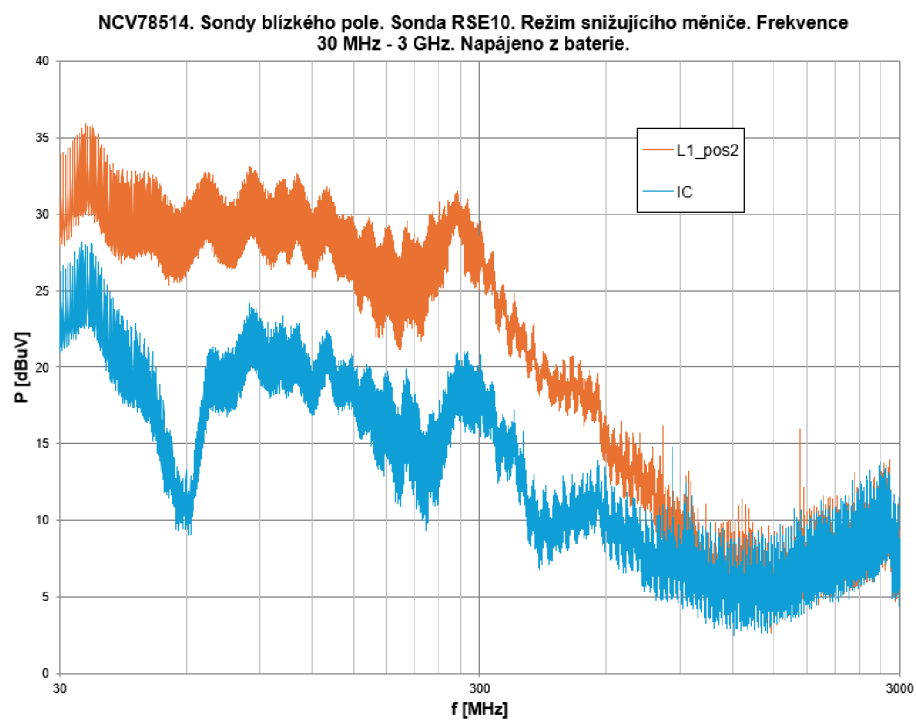
Obrázek 4.15 Popis vybraných součástek na modulu NCV78514

Měření sondou elektrického pole RSE10 umožňuje úzce lokalizovat zdroje rušení, které tvoří největší podíl výsledného rušení. Dané měření probíhá tak, že nejprve je na měřicím přijímači nastaveno měření, které měří opakovaně. Sonda je přikládána na jednotlivé součástky na modulu a je pozorováno, kde se nachází oblast s největším vyzařovaným elektrickým polem. Potom jsou určeny součástky, které jsou měřeny pomocí jednotlivého měření s následným zpracováním naměřeného výsledku do grafu.

Na obrázku 4.16 jsou zobrazeny křivky odpovídající součástkám s největším podílem na výsledném rušení pro modul v režimu zvyšujícího měniče. Měřením bylo zjištěno, že je to právě dioda D2 (oranžová), která se podílí největší měrou spolu s cívkou L1 (modrá) na velikosti výsledného vyzařovaného elektrického pole. Na obrázku 4.17 jsou dále zobrazeny křivky, které znázorňují součástky s největším podílem na výsledném rušení pro modul NCV78514 v režimu snižujícího měniče. Patří sem opět cívka L1 a integrovaný obvod NCV78514, konkrétně spínací piny pro připojení cívky L1 dle aktuálního režimu, ve kterém modul pracuje.



Obrázek 4.16 Měření modulu NCV78514 v režimu zvyšujícího měniče (RSE10 sonda)

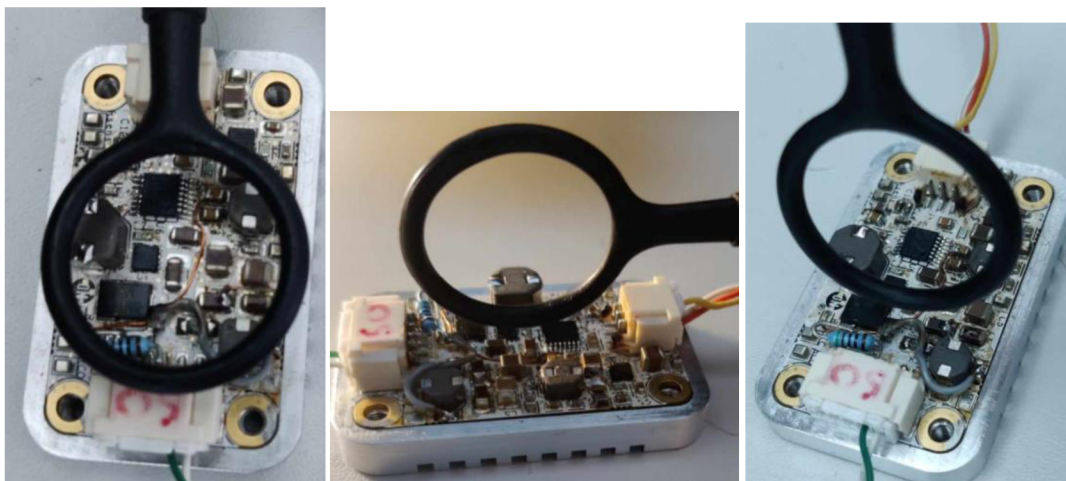


Obrázek 4.17 Měření modulu NCV78514 v režimu snižujícího měniče (RSE10 sonda)

V případě zvyšujícího měniče, kdy se v jedné fázi akumuluje energie v cívce L1 a ve druhé fázi je tato energie dodávána cívkou L1 přes diodu D2 na výstup, je největší rušení naměřeno u těchto součástek. U snižujícího měniče, kdy je energie do cívky dodávána horním a dolním spínačem, které jsou v čipu, je největší elektrické pole naměřeno mezi přepínacími piny a cívkou L1. Z měření vyplývá, že největší elektrické pole je vyzařováno součástkami, jejichž činnost odpovídá režimu, ve kterém se modul právě nachází.

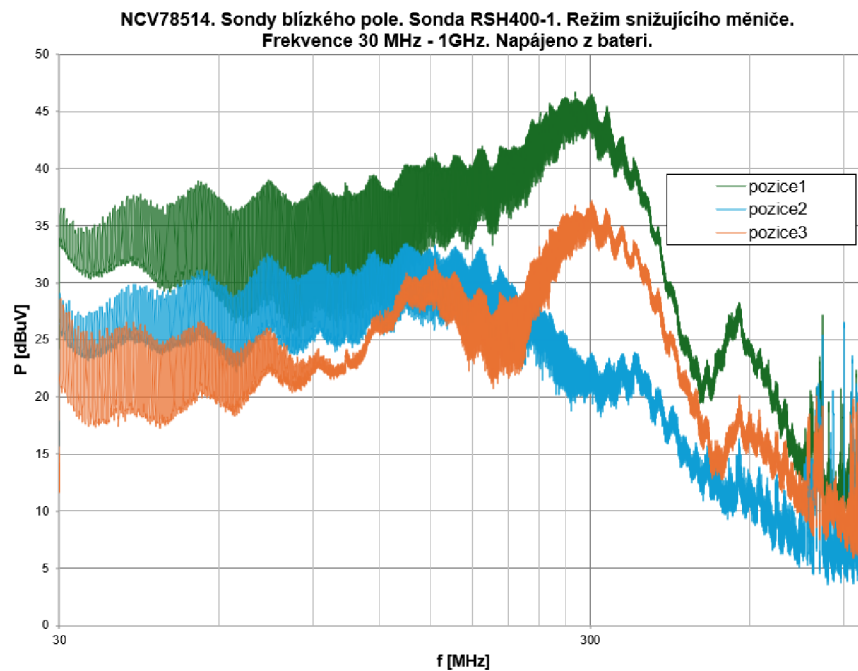
4.3.3 Měření se sondou RSH400-1

U sondy magnetického pole RSH400-1 mnohem více záleží na její orientaci během měření, jelikož zachycuje proudové smyčky pouze v jejím směru a na proudové smyčky, které jsou na ni kolmé, není citlivá. Jednotlivé pozice sondy RSH400-1 vůči modulu NCV784514 jsou zachyceny na obrázku 4.18, kde pozice 1 je vlevo, pozice 2 se nachází uprostřed a pozice 3 je vpravo.



Obrázek 4.18 Jednotlivé pozice RSH400-1 sondy vůči modulu NCV78514 (z levé strany pozice 1, pozice 2 a pozice 3)

Na obrázku 4.19 je pak zobrazeno měření v režimu snižujícího měniče, kde jsou porovnány jednotlivé pozice sondy během měření. Křivka odpovídající měření sondy v pozici 1 je zelená, modrá je křivka měření v pozici 2 a pozice 3 je znázorněna křivkou oranžové barvy.

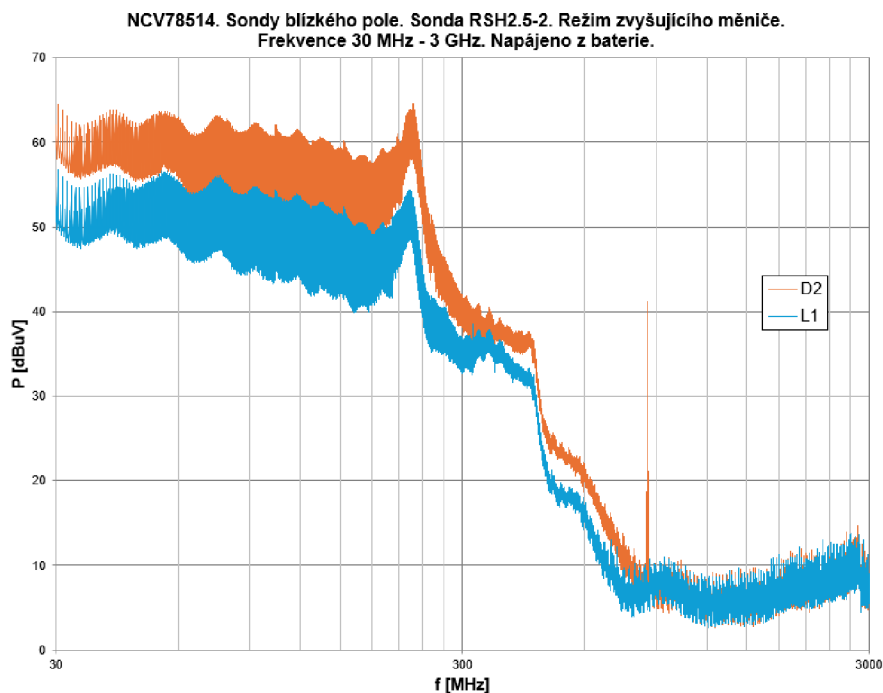


Obrázek 4.19 Měření modulu NCV78514 v režimu snižujícího měniče (RSH400-1 sonda)

Největší magnetické pole je naměřeno v případě, kdy se sonda nachází v pozici 1. Znamená to, že vyzařované magnetické pole má největší intenzitu ve směru kolmo nahoru z desky.

4.3.4 Měření se sondou RSH2.5-2

Sonda RSH2.5-2 již není tak náchylná na přesnou polohu a natočení jako předchozí sonda RSH400-1. Na obrázku 4.20 lze vidět, že má opět v případě modulu v režimu zvyšujícího měniče dominantní vliv součástka L1 (modrá) a D2 (oranžová).



Obrázek 4.20 Měření modulu NCV78514 v režimu zvyšujícího měniče (RSH2.5-2 sonda)

V případě měření modulu v režimu snižujícího měniče bylo naměřeno největší magnetické pole opět na cívce L1 a integrovaném obvodu NCV78514. U integrovaného obvodu se opět jednalo o spínací piny SW. Z důvodu dostatečného množství obrázků již tento obrázek není v práci uveden.

4.3.5 Shrnutí měření pomocí sond blízkého pole

Pomocí sondy elektrického pole RSE02 byl změřen vliv stínící krabice modulu NCV78514, u tohoto měření byl vliv stínění pozorovatelný. Pomocí sondy magnetického pole RSH400-1 bylo změřeno, že největší magnetické pole je vyzařováno do okolí v případě měření v pozici 1, což znamená, že intenzita magnetického pole je v tomto směru největší.

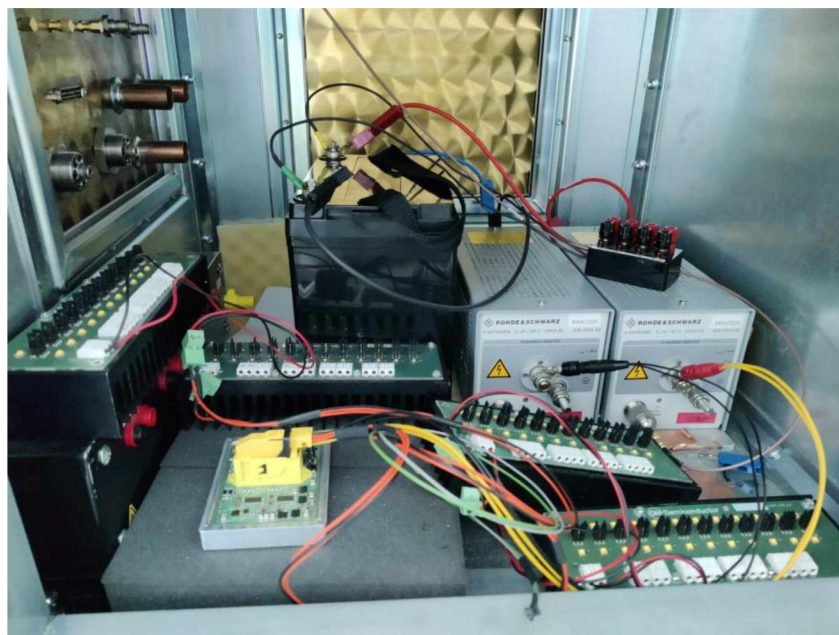
Pomocí měření se sondami RSE10 a RSH2.5-2 bylo shodně prokázáno, že nejvyšší podíl na rušení patří cívce L1, diodě D2 a integrovanému obvodu NCV78514, konkrétně spínacím pinům SW. Měření pomocí sond blízkého pole nejsou dobře reprodukovatelná, proto nejsou stanoveny žádné limity pro tato měření.

5. MĚŘENÍ MODULU ECU-LIGHT

Měření modulu ECU-light, který obsahuje dva čipy NCV78964, je popsáno v aktuální kapitole. Tento modul má 4 výstupní kanály, na každém z nich je připojených 10 LED. Celkový výkon výsledného zapojení u všech měření je 86 W, což reprezentuje typickou aplikaci. Měření modulu proběhlo pomocí metody z normy CISPR 25, konkrétně kapitoly 6.3 této normy o emisích šířených vedením z modulu napěťovou metodou pomocí vrcholového detektoru. Další sada měření byla pro vybrané oblasti měřena kvazivrcholovým detektorem. Následně bylo provedeno měření pomocí sond blízkého pole.

5.1 Měření metodou CISPR25 pomocí vrcholového detektoru

Použité měřicí přístroje a výsledná konfigurace testu byla stejná jako v případě modulu s NCV78514 ve 4. kapitole. Na obrázku 5.1 je zobrazeno měřicí stanoviště. Kvůli vysokému výkonu a indukčnosti LISN byl nejprve problém se spuštěním měření. Při zapnutí poslední skupiny LED (nezáleželo na tom, v jakém pořadí byly spouštěny jednotlivé kanály) došlo k zhasnutí všech LED a modul byl neaktivní. Zřejmě k této chybě docházelo v důsledku indukčnosti LISN v kombinaci s velkými počátečními proudy, jelikož v případě zapojení uvedeného modulu pouze k laboratornímu zdroji, se tyto problémy se nevyskytovaly. Po přidání kondenzátoru o kapacitě 33 μF na vstup modulu, již bylo možné zahájit měření, jelikož bylo možné modul spustit a fungoval při požadovaném výkonu.



Obrázek 5.1 Měřicí stanoviště pro měření CISPR25 s modulem ECU-light

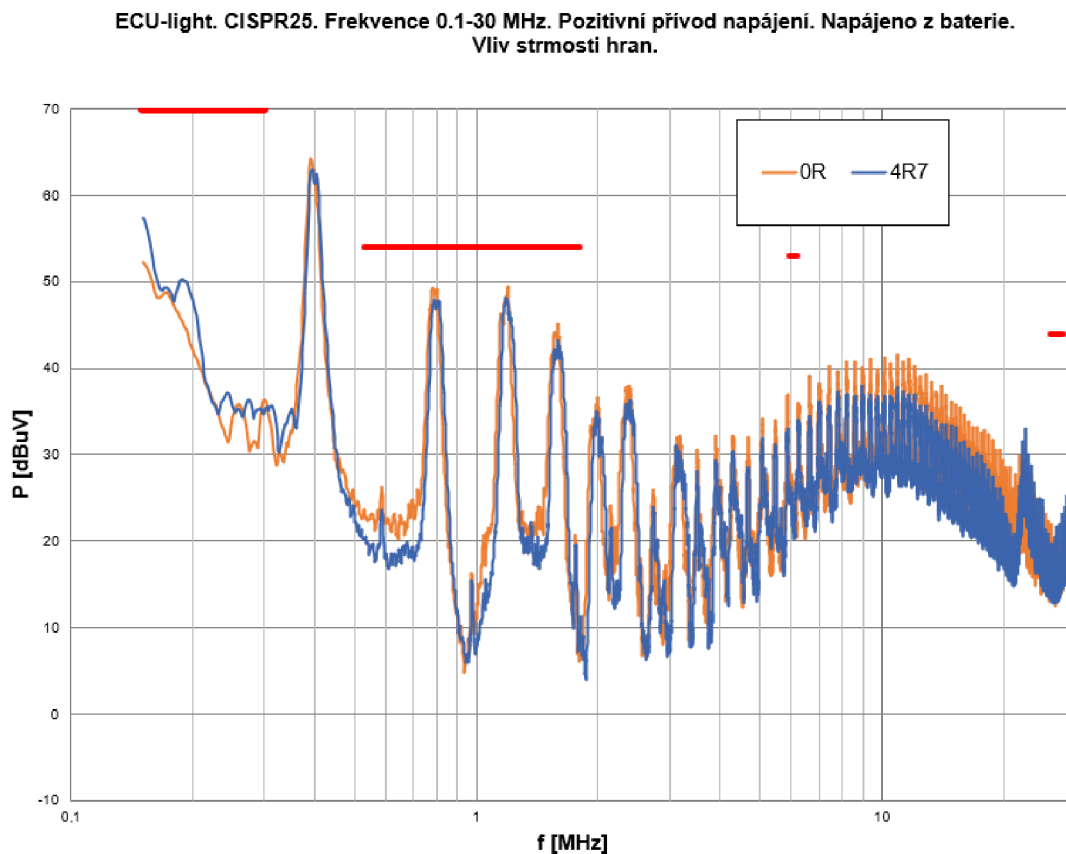
V případě měření pomocí metody CISPR25, byly proměřeny následující vlivy:

- Vliv strmosti hran.
- Vliv výstupního napětí zvyšujícího měniče.
- Vliv PWM.
- Vliv frekvence zvyšujícího měniče.

Všechny uvedené vlivy jsou popsány v podkapitolách níže.

5.1.1 Vliv strmosti hran

Pro měření strmosti hran byly měněny odpory na hradle tranzistoru zvyšujícího měniče. Při původní hodnotě rezistoru $4,7 \Omega$ byla naměřená doba náběžné hrany na osciloskopu $29,6 \text{ ns}$. Po změně hodnoty rezistoru na 0Ω byla hrana zrychlena na 19 ns . Na obrázku 5.2 je zobrazen vliv strmosti hran. Křivka s vyšší strmostí hran (rezistorem 0Ω) má oranžovou barvu a křivka s nižší strmostí hran (rezistorem $4,7 \Omega$) má modrou barvu.

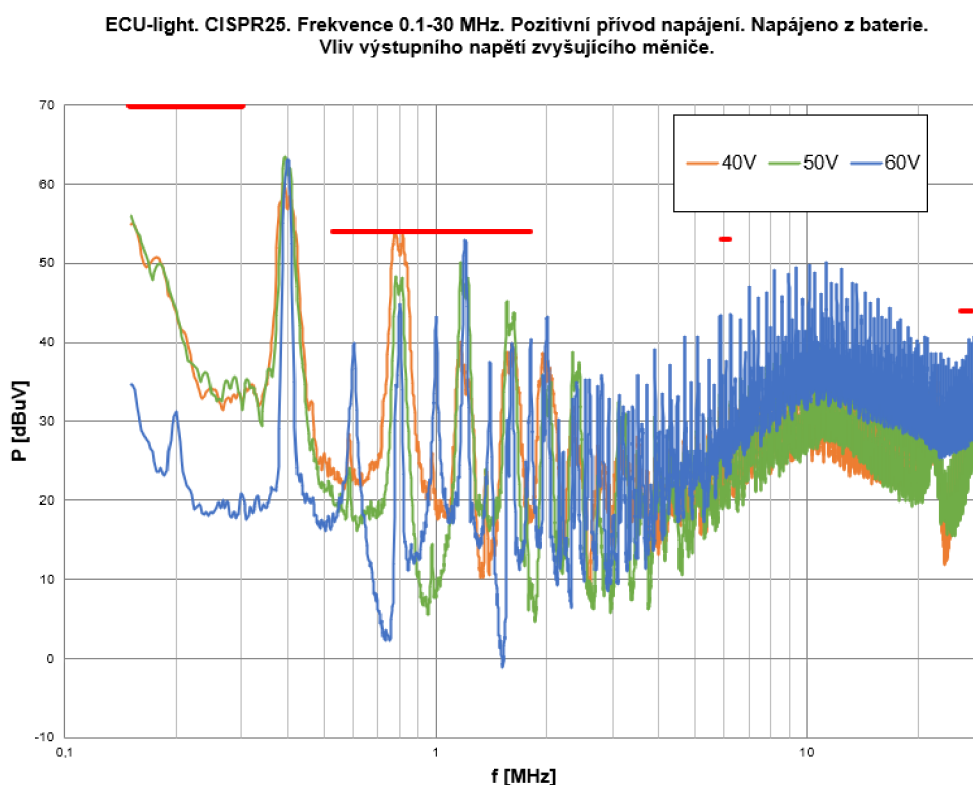


Obrázek 5.2 Vliv strmosti hran na měření s modulem ECU-light (CISPR25)

Tento vliv se začíná projevovat až při vyšších frekvencích, ale není příliš velký. Rozdíl v naměřených hodnotách se pohybuje okolo $3 \text{ dB}\mu\text{V}$. Ani jedno ze zobrazených měření nepřesahuje stanovené limity. Volba strmosti hran závisí především na konkrétní aplikaci a požadavcích zákazníka.

5.1.2 Vliv výstupního napětí zvyšujícího měniče

Měření bylo provedeno pro hodnoty napětí 40 V, 50 V a 60 V. Na obrázku 5.3 jsou zobrazeny výsledky měření. Modrou barvu má křivka odpovídající měření s hodnotou výstupního napětí zvyšujícího měniče 60 V. Výstupní napětí zvyšujícího měniče bylo nastaveno na hodnotu 50 V (zelená křivka). Oranžová křivka znázorňuje výsledek měření pro hodnotu výstupního napětí zvyšujícího měniče 40 V.



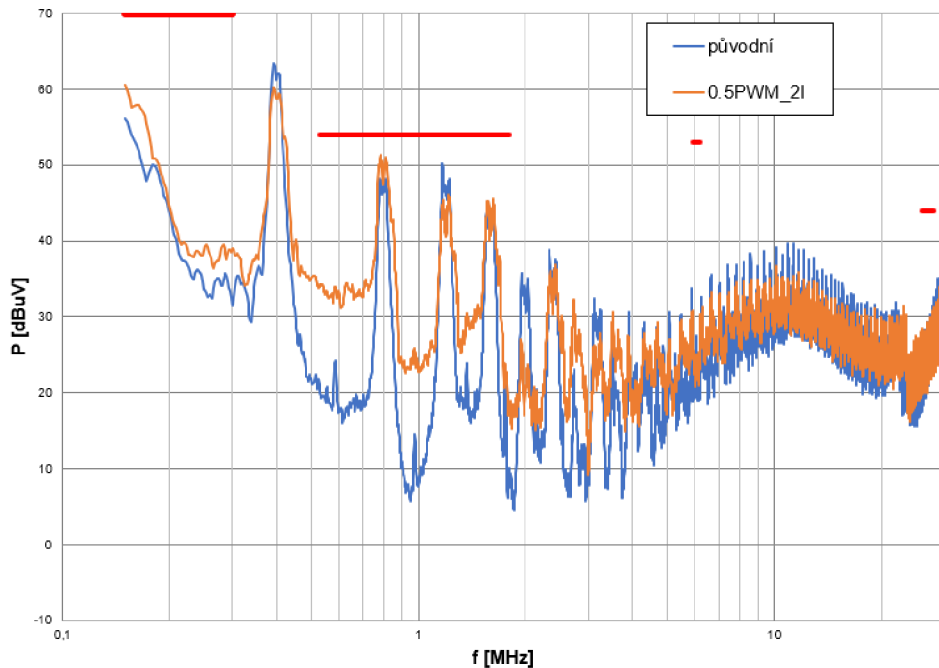
Obrázek 5.3 Vliv výstupního napětí zvyšujícího měniče na měření s modulem ECU-light (CISPR25)

Všechny křivky jsou nejbližší limitu v oblasti frekvence 0,53 – 1,8 MHz. Tato oblast je proto znovu proměřena kvazivrcholovým detektorem pro hodnotu výstupního napětí 40 V. Nejvyšších hodnot emisí pak dosahuje křivka, která odpovídá výstupnímu napětí zvyšujícího měniče 60 V.

5.1.3 Vliv PWM

Vliv PWM byl měřen tak, že střída byla snížena na polovinu a zároveň byla hodnota výstupního proudu navýšena na dvojnásobek, aby byl zachován výstupní výkon. Na obrázku 5.4 je zmíněný vliv vynesena. Modrá křivka znázorňuje původní nastavení modulu, zatímco oranžová křivka odpovídá měření s poloviční hodnotou PWM a dvojnásobným výstupním proudem.

ECU-light. CISPR25. Frekvence 0.1-30 MHz. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie.
Vliv PWM.



Obrázek 5.4 Vliv PWM na měření s modulem ECU-light (CISPR25)

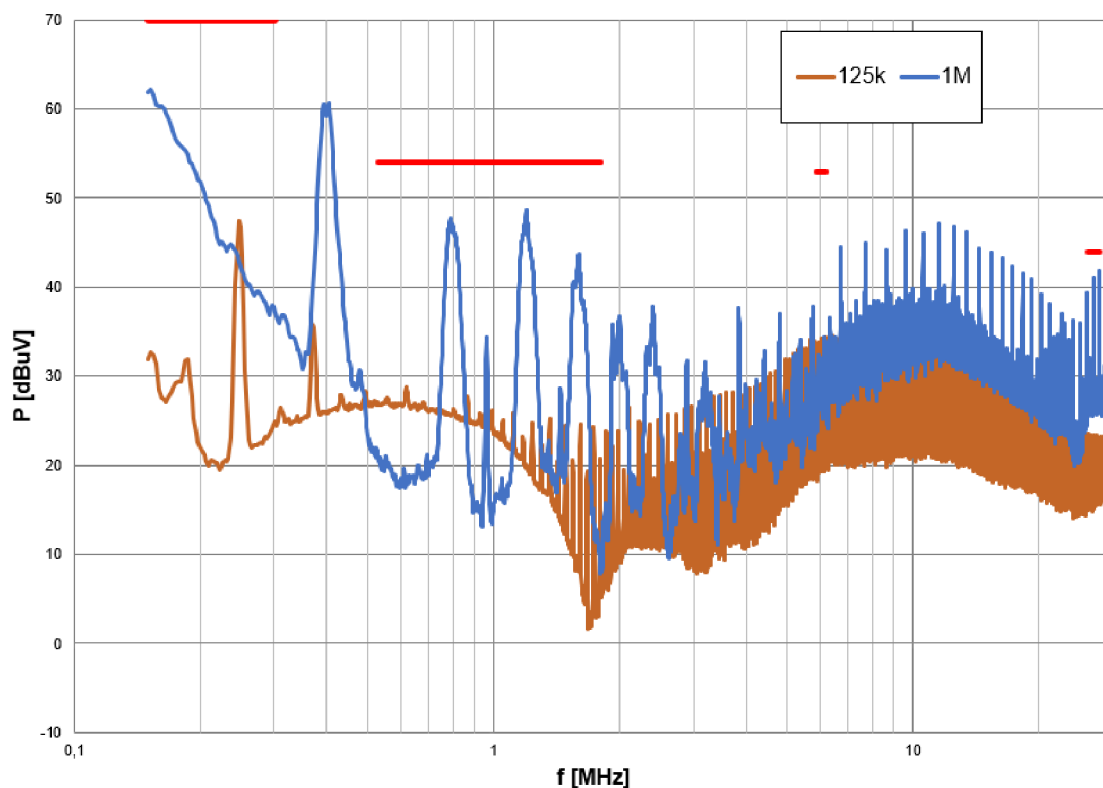
Lze vidět, že změna PWM při zachování stejného výstupního výkonu nemá na hodnotu naměřených emisí příliš velký vliv. Opět záleží na požadavcích zákazníka, která z variant pro něj bude v konkrétní aplikaci vhodnější.

5.1.4 Vliv frekvence zvyšujícího měniče

Vliv frekvence zvyšujícího měniče byla měřena pro frekvence v rozsahu 125 kHz-1,5 MHz. Měření je zobrazeno na obrázku 5.5. Oranžová křivka odpovídá frekvenci zvyšujícího měniče 125 kHz, modrá křivka potom odpovídá frekvenci 1 MHz.

Periodické střídání vzrůstu a poklesu amplitudy signálu ve spektru se děje v závislosti na frekvenci. Zmíněné chování vychází z charakteristiky funkce sinc. Změnou frekvence zvyšujícího měniče dochází k přesouvání vyzařované energie k vyšším, nebo nižším frekvencím, což lze pozorovat na již zmíněném obrázku 5.5.

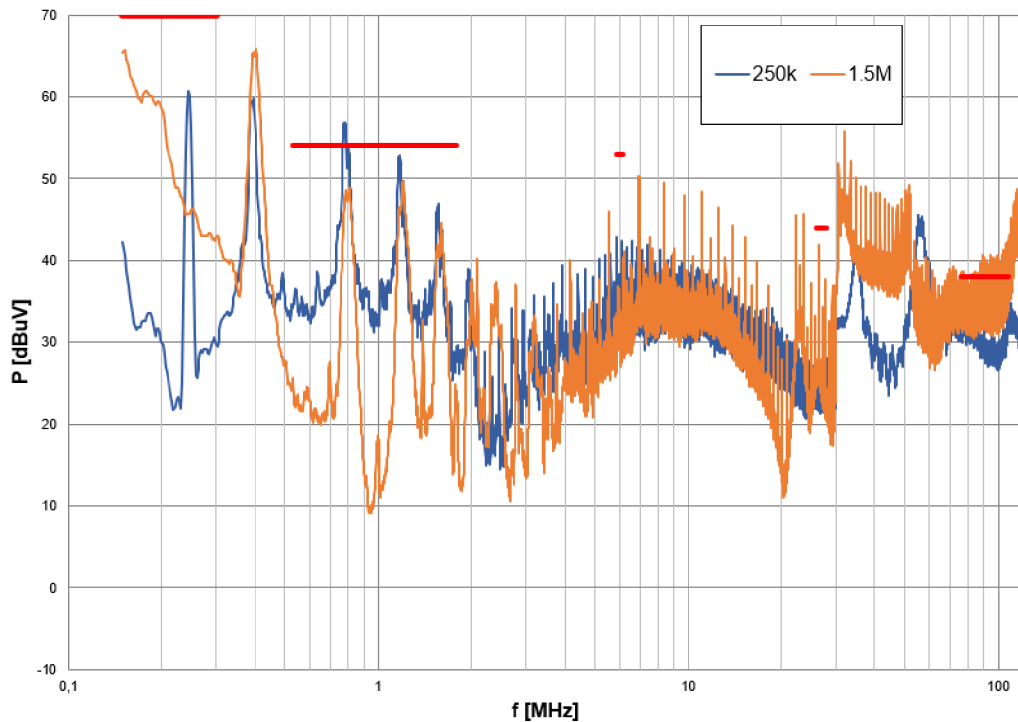
ECU-light. CISPR25. Frekvence 0.1-30 MHz. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie.
Vliv frekvence zvyšujícího měniče.



Obrázek 5.5 Vliv frekvence zvyšujícího měniče na měření s modulem ECU-light (CISPR25)

Limity stanovené normou byly překročeny u vyšších hodnot frekvence zvyšujícího měniče. K překročení došlo až v případě posledního limitu, který je pro frekvence v rozsahu 76-108 MHz. Jeho hodnota, která nemá být přesáhnuta, je 38 dB μ V. Na obrázku 5.6 je zobrazen průběh měření emisí pro hodnotu frekvence zvyšujícího měniče 1,5 MHz oranžovou barvou. Tento limit byl ale přesáhnut již u hodnoty frekvence zvyšujícího měniče 750 kHz. U hodnoty frekvence 250 kHz byl přesažen druhý limit, který je dán pro frekvence v rozsahu 0,53 – 1,8 MHz a jehož hodnota je 54 dB μ V. Zmíněná křivka je znázorněna modrou barvou.

ECU-light. CISPR25. Frekvence 0.1-30 MHz. Pozitivní přívod napájení. Napájeno z baterie.
Vliv frekvence zvyšujícího měniče.



Obrázek 5.6 Přesazení limitu u měření vlivu frekvence zvyšujícího měniče s modulem ECU-light (CISPR25)

Druhý limit byl přesazen v případě modré křivky v blízkosti frekvence 750 kHz, zřejmě se tedy jedná o třetí harmonickou frekvenci, která způsobila větší zákmit a náhlý nárůst hodnoty emisí. Některé kritické oblasti naměřených hodnot jsou proměřeny kvazivrcholovým detektorem.

5.1.5 Shrnutí měření metodou CISPR25 vrcholovým detektorem

U modulu ECU-light byl naměřen pomocí metody CISPR25 minimální vliv strmosti hran. Což je zřejmě způsobeno optimalizací designu predriveru integrovaného obvodu. Nejvyšší emise byly naměřeny u výstupního napětí o velikosti 60 V. V případě měření pro hodnotu výstupního napětí 40 V, byla tato křivka nejbližší druhému limitu. Při snížení PWM na polovinu a zanechání stejného výkonu, není pozorován žádný vliv u naměřených emisí. U vlivu frekvence zvyšujícího měniče došlo k překročení posledního limitu u vyšších hodnot frekvence. U velikosti frekvence zvyšujícího měniče 250 kHz byl přesazen limit v oblasti 0,53 – 1,8 MHz.

Podle měření pomocí metody CISPR25 je vhodné nastavení s výstupním napětím o velikosti 50 V a frekvencí zvyšujícího měniče 400 kHz. Ostatní parametry včetně strmosti hran, či PWM si může určit zákazník, jelikož na emise zařízení nemají příliš velký vliv.

5.2 Měření metodou CISPR25 pomocí kvazivrcholového detektoru

U některých měření byl přesažen limit stanovený normou, a proto byla určitá místa přeměřena pomocí kvazivrcholového detektoru pro ucelnější přehled. Měření probíhalo stejně jako v případě s vrcholovým detektorem, jen došlo ke změně detektoru v rámci nastavení přístroje.

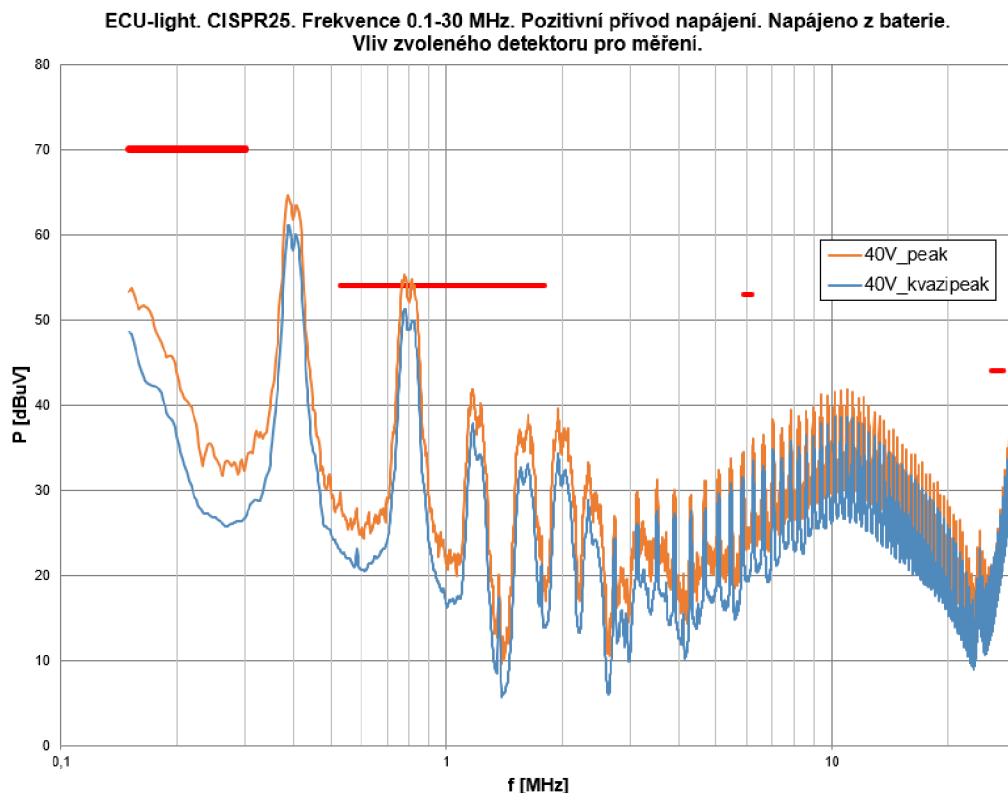
Bylo provedeno měření pro:

- Hodnotu výstupního napětí zvyšujícího měniče 40 V.
- Hodnotu frekvence zvyšujícího měniče 125 kHz.

Zmíněná měření jsou popsána níže.

5.2.1 Měření s hodnotou výstupního napětí zvyšujícího měniče 40 V

Měření s nastaveným výstupním napětím 40 V je zobrazeno na obrázku 5.8. Měření pomocí vrcholového detektoru je tvořeno křivkou oranžové barvy, modrou barvou je pak znázorněno měření kvazivrcholovým detektorem.

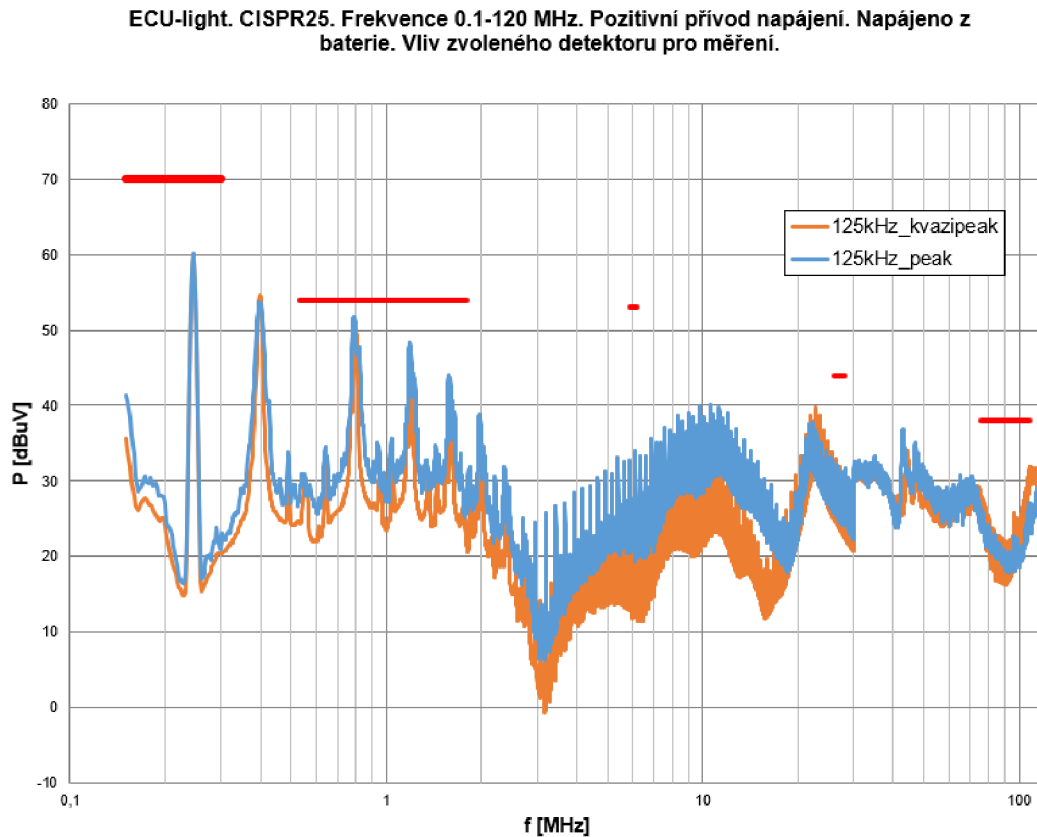


Obrázek 5.7 Porovnání měření pro výstupní napětí 40 V s modulem ECU-light pro měření pomocí vrcholového detektoru a pomocí kvazivrcholového detektoru (CISPR25)

U měření vrcholovým detektorem došlo k přesažení druhého limitu. Zatímco u kvazivrcholového detektoru, u kterého je výsledná hodnota měření ovlivňována amplitudou i opakovací frekvencí signálu, již k přesažení limitu nedochází.

5.2.2 Měření s hodnotou frekvence zvyšujícího měniče 125 kHz

Měření s hodnotou frekvence zvyšujícího měniče 125 lze vidět na obrázku 5.8. Měření kvazivrcholovým detektorem odpovídá křivce oranžové barvy, modrou barvu pak má křivka měřená pomocí vrcholového detektoru.



Obrázek 5.8 Porovnání měření s frekvencí zvyšujícího měniče 125 kHz modulu ECU-light pro měření pomocí vrcholového detektoru a pomocí kvazivrcholového detektoru (CISPR25)

Výstupní napětí zvyšujícího měniče je v tomto případě nastavené na 50 V. Dle předpokladu hodnoty odpovídající měření kvazivrcholovým detektorem jsou nižší oproti hodnotám reprezentující měření vrcholovým detektorem.

5.2.3 Shrnutí měření metodou CISPR25 s kvazivrcholovým detektorem

Měření pomocí kvazivrcholového detektoru se nejčastěji využívá po měření pomocí vrcholového detektoru, jelikož měření vrcholovým detektorem je rychlejší a lze tak získat přehled o průběhu emisí v celém měřicím rozsahu. Pomocí kvazivrcholového detektoru lze potom doměřit pouze určitá kritická místa.

V případě měření s kvazivrcholovým detektorem na modulu ECU-light pro hodnotu výstupního napětí 40 V došlo ke snížení naměřené hodnoty natolik, že již limit stanovený normou nepřesahovala. Krátkodobá špičková hodnota naměřená kvazivrcholovým detektorem se v případě tohoto měření promítá do celkové úrovně rušení tak, že nedochází k přesazení daného limitu.

5.3 Měření pomocí sond blízkého pole

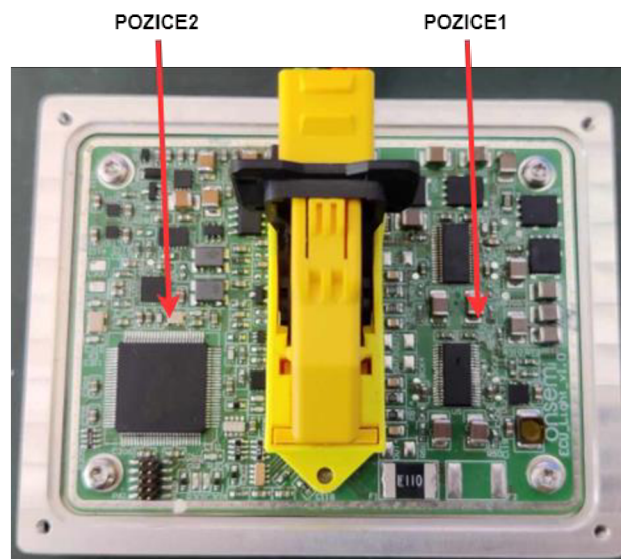
Měření pomocí sond blízkého pole bylo provedeno stejným způsobem jako u modulu NCV78514, tedy bylo měřeno pomocí

- Sondy elektrického pole RSE02 (vliv stínění, pozice na desce).
- Sondy elektrického pole RSE10 (součástky s nejvyšší mírou rušení).
- Sondy magnetického pole RSH400-1 (vliv pozice sondy).

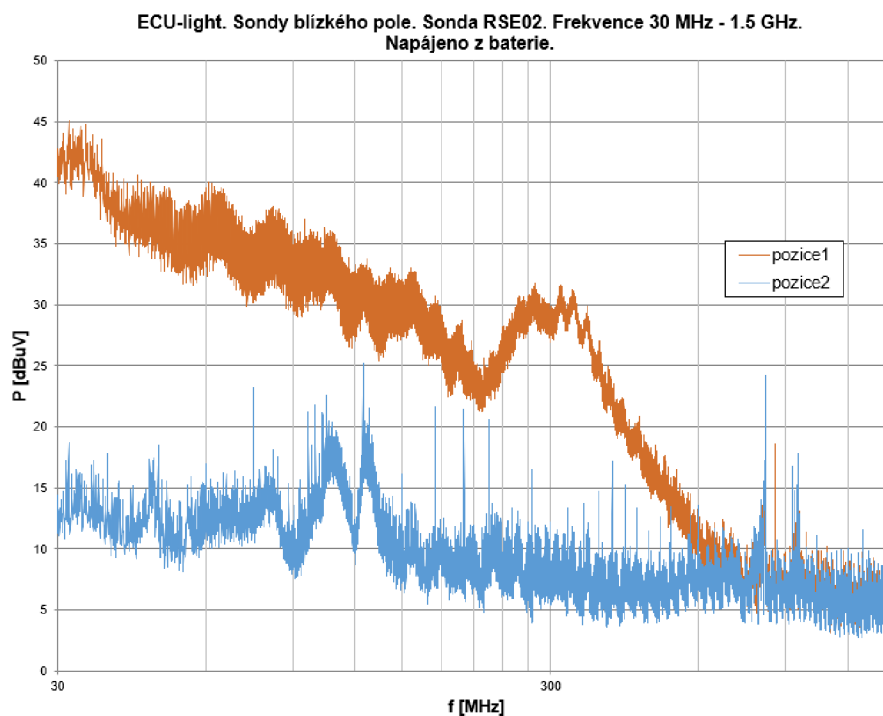
Měření pomocí sondy RSH2.5-2 z důvodu již dostatečného množství dat nebylo realizováno se zaznamenáním měřených hodnot do grafu. Navíc při opakovaném měření, bylo naměřeno největší vyzařované magnetické pole u stejných součástek jako v případě sondy elektrického pole.

5.3.1 Měření pomocí sondy RSE02

Nejprve bylo měřeno pomocí sondy RSE02. Vzhledem k tomu, že modul ECU-light je rozměrově větší oproti modulu NCV78514, tak bylo v případě této sondy provedeno měření ve dvou pozicích, jak je uvedeno na obrázku 5.9. Měření sondou elektrického pole RSE02 pro pozici 1 (oranžová) a pro pozici 2 (modrá) je zobrazeno na obrázku 5.10.



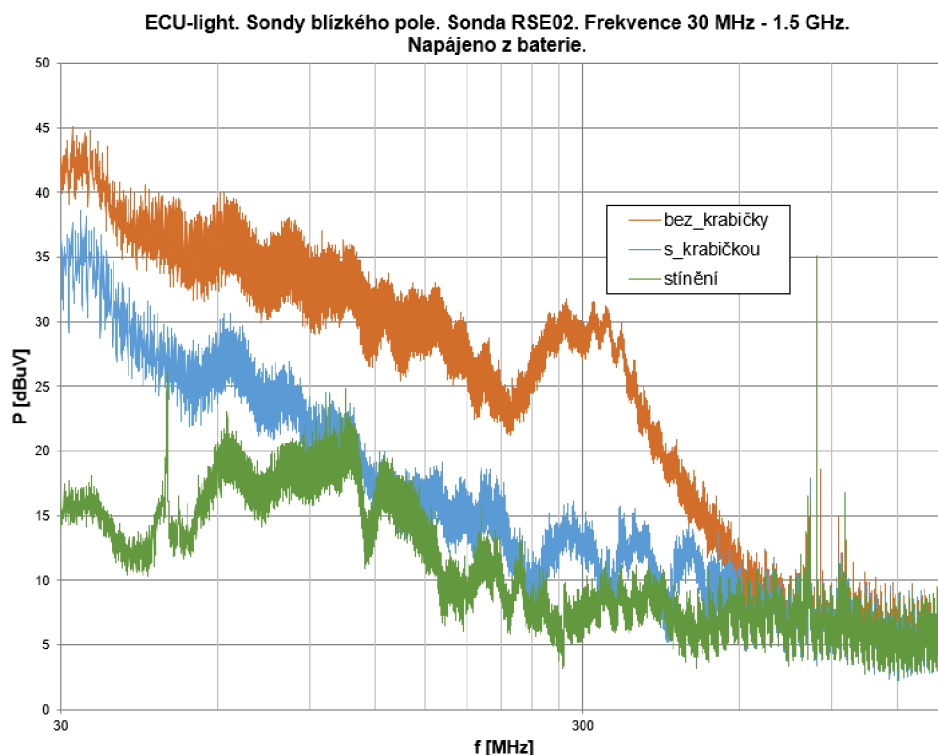
Obrázek 5.9 Pozice pro měření sondou RSE02 na modulu ECU-light



Obrázek 5.10 Měření pro jednotlivé pozice na modulu ECU-light (sonda RSE02)

Větší elektrické pole je vyzařováno na pozici 1, kde se zároveň nachází dva integrované obvody NCV78964 a ostatní součástky, které podporují funkci měniče. Zatímco na straně pozice 1 se nachází převážně komunikace a napájení se vstupním filtrem.

Následně bylo provedeno měření pomocí RSE02 sondy, kdy byla přidána na modul krabice, která je plastová, a následně bylo dodáno přídatné stínění pomocí kovové pásky. Měření je zobrazeno na obrázku 5.11. Měření bez stínění je znázorněno oranžovou barvou, modrou barvou je tvořena křivka popisující stínění plastovou krabíčkou. Křivka odpovídající měření s přídatným stíněním je zelená.



Obrázek 5.11 Měření pro jednotlivé druhy stínění na modulu ECU-light (sonda RSE02)

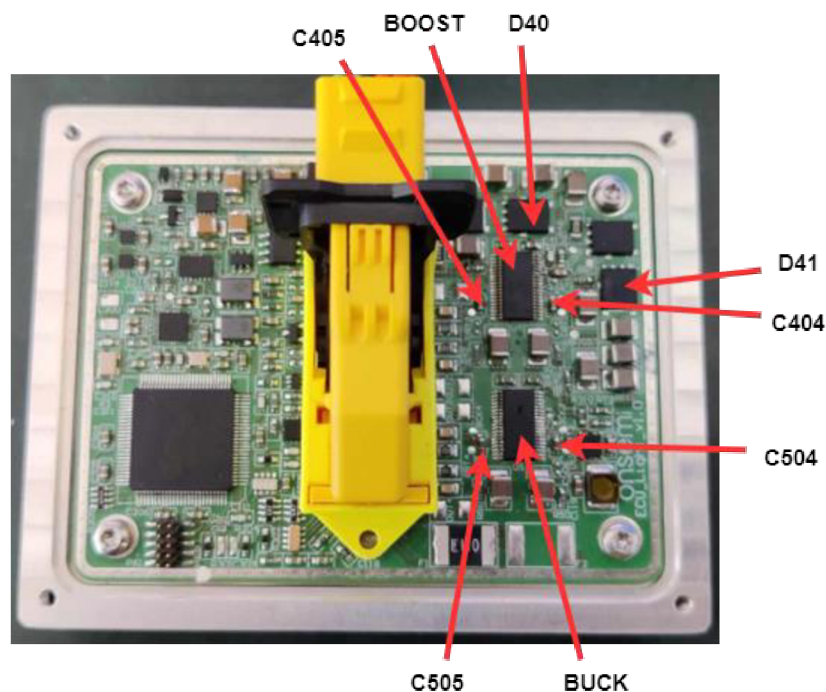
Je patrný vliv jednotlivých druhů stínění. Poměrně velký vliv má v případě stínění elektrického pole i plastová krabička. Přídavné stínění v podobě kovové pásky se projevuje nejvíce na nižších frekvencích.

5.3.2 Měření pomocí sondy RSE10

Měření pomocí měřicí sondy RSE10 byla provedena stejně jako v případě modulu NCV78514. Nejprve byla nalezena místa s největší mírou vyzařování elektrického pole. Nejdříve probíhalo měření na měřicím přijímači opakovaně a sonda byla přikládána na různá místa na desce, aby bylo zjištěno, které součástky budou měřeny v následujícím kroku.

Po zjištění toho, které součástky vykazují největší míru rušení, byl měřicí přijímač přepnut do režimu jednotlivého měření a byla provedena kolekce měření. Při prvním měření bylo zjištěno, že většina vyzařovaného elektrického pole se nachází na polovině desky, která odpovídá pozici 1. Proto zmíněné přesnější měření, které má za cíl lokalizovat rušení, bylo realizováno pouze na této polovině. Na obrázku 5.12 je modul ECU-light s popisem vybraných součástek. Tyto součástky mají největší podíl na výsledném vyzařovaném elektrickém poli. Pro přehlednost je proto uvedena jejich poloha na desce. Jedná se o oba integrované obvody NCV78964, kdy jeden je ve funkci zvyšujícího měniče a druhý je ve funkci snižujícího měniče. Dále diody D40 a D41,

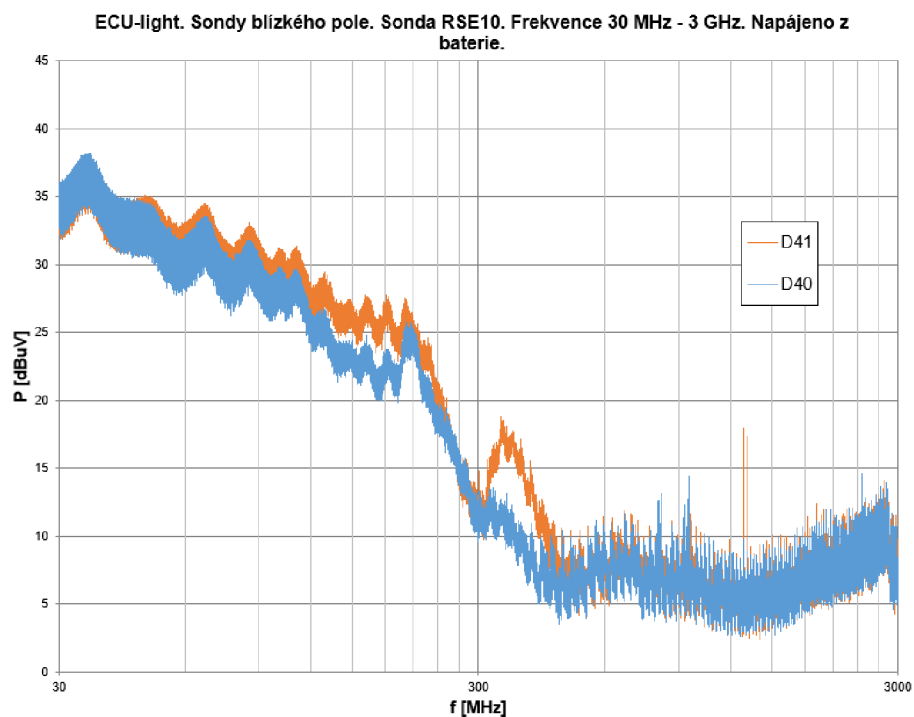
které mají funkci spínače ve druhé fázi spínacího obvodu zvyšujícího měniče. Kondenzátory C404, C405, C504 a C505. Jedná se o startovací kondenzátory, které jsou připojené přes cívku na výstup daného kanálu LED.



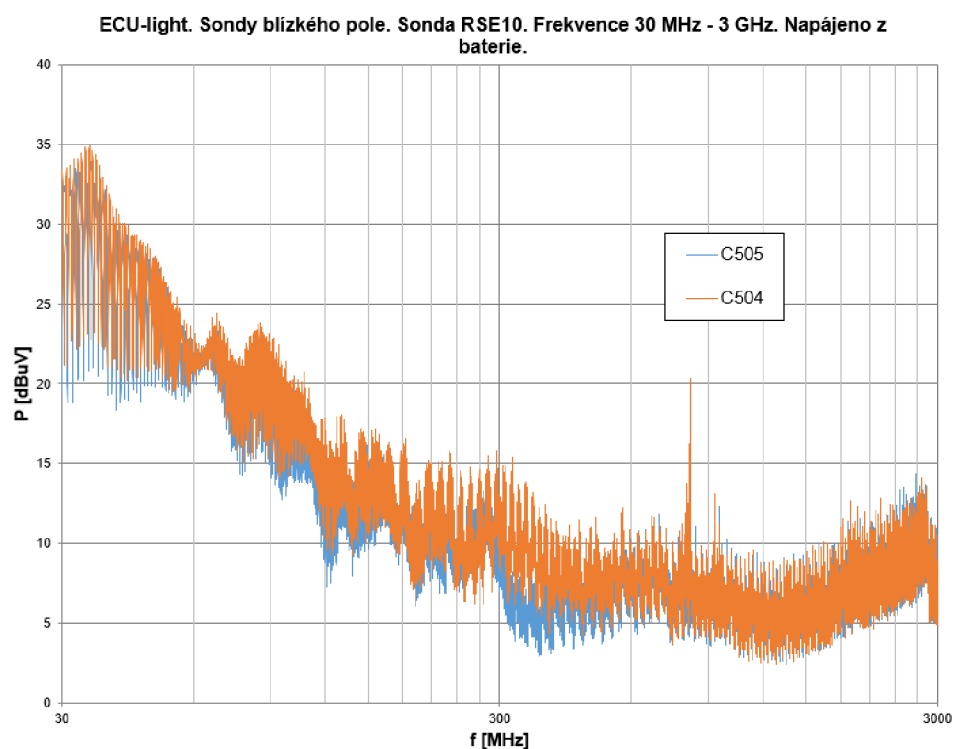
Obrázek 5.12 Modul ECU-light s popisem vybraných součástek

Na obrázku 5.13 jsou zobrazeny naměřené křivky, které odpovídají vyzařovanému elektrickému poli diody D41 (oranžová) a diody D40 (modrá). Diody u zvyšujícího měniče vykazovali velkou míru rušení i v případě modulu NCV78514. Zde obě diody, z nichž každá náleží jednomu kanálu zvyšujícího měniče, vykazují téměř totožné rušení. Bohužel nebylo možné proměřit cívky zvyšujícího měniče, jelikož se nachází na spodní straně desky a modul by tak během měření nebyl chlazen pomocí kovové krabičky, což by při celkovém výstupním výkonu cca 86 W nebylo vhodné. Vzhledem k tomu, že krabička je na modulu umístěna po celou dobu, poskytuje těmto součástkám nepřetržité stínění. Kdyby byl vliv cívek na výsledné emise příliš velký, projevil by se již u předchozích měření.

Vyzařované elektrické pole snižujícího měniče je na obrázku 5.14. Největší rušení bylo naměřeno v oblasti, ve které se nacházejí kondenzátory C505 a C504 a přilehlé piny integrovaného obvodu. Na obrázku jsou křivky odpovídající právě zmíněným kondenzátorům, a to oranžová křivka odpovídá kondenzátoru C504 a modrá křivka C505. Každý z kondenzátorů opět náleží jednomu ze dvou kanálů snižujícího měniče. Piny, které vyzařovali největší elektrické pole byly zejména výstupní piny snižujícího měniče.



Obrázek 5.13 Vliv diod D41 a D40 na modulu ECU-light (sonda RSE10)

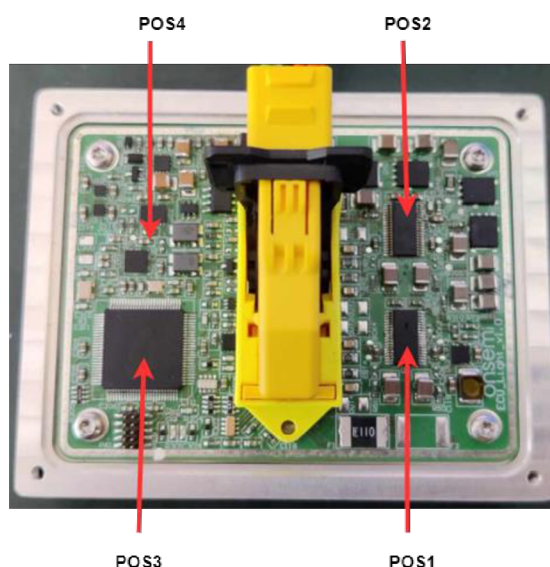


Obrázek 5.14 Vliv snižujícího měniče na modulu ECU-light (sonda RSE10)

Velmi podobné výsledky ukázalo i měření v okolí zvyšujícího měniče, kde opět bylo naměřeno největší rušení v blízkosti kondenzátorů C404 a C405. Z důvodu již dostatečného množství obrázků, není zmíněný obrázek uveden.

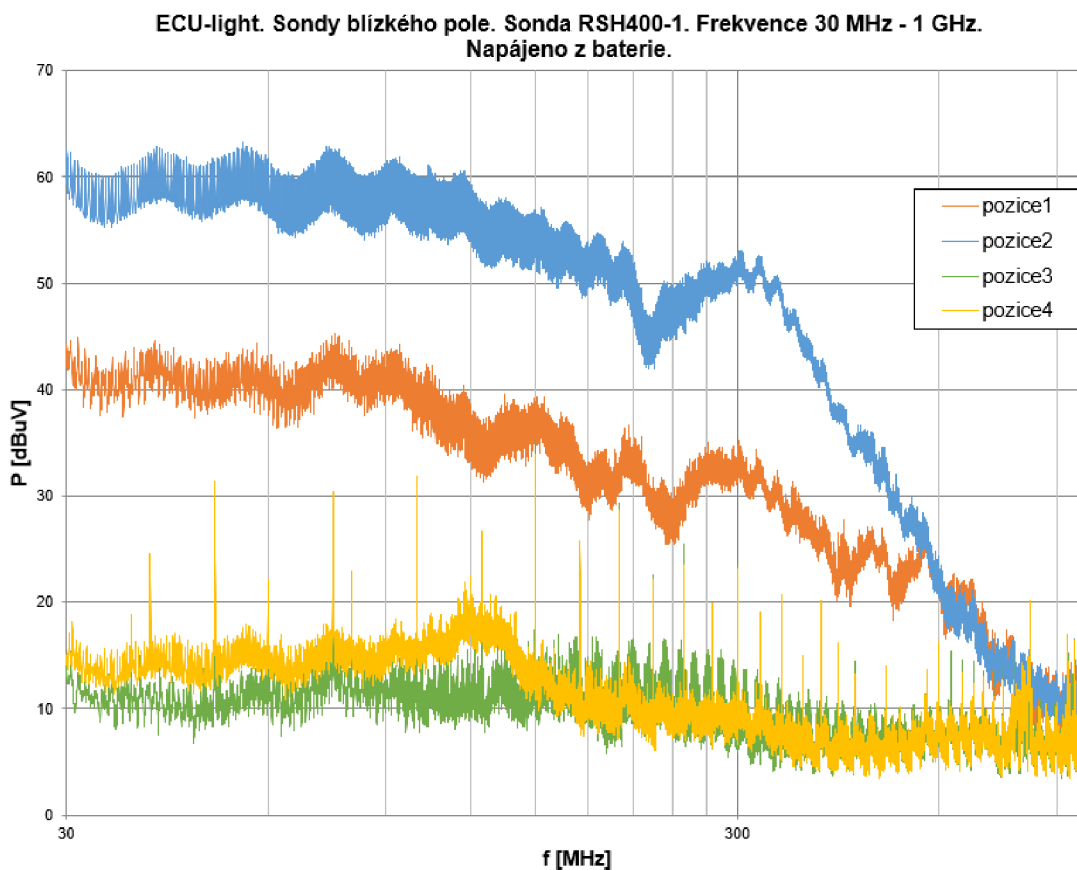
5.3.3 Měření se sondou RSH400-1

Měření se sondou magnetického pole RSH400-1 bylo provedeno nejprve ve čtyřech různých pozicích na desce viz obrázek 5.15. Kdy byla sonda vždy přiložena tak, aby při pohledu shora na desku byl vidět její kruhový tvar. Na obrázku 5.16 je graf, ve kterém jsou křivky odpovídající jednotlivým pozicím na desce. Stejně jako u měřicí sondy elektrického pole RSE02 se nacházejí křivky s vyšším rušením na straně s integrovanými obvody i v případě sondy magnetického pole. Největší magnetické pole je pak vyzařováno součástkami, které se nacházejí v oblasti pozice 2, tato křivka je znázorněna modrou barvou.

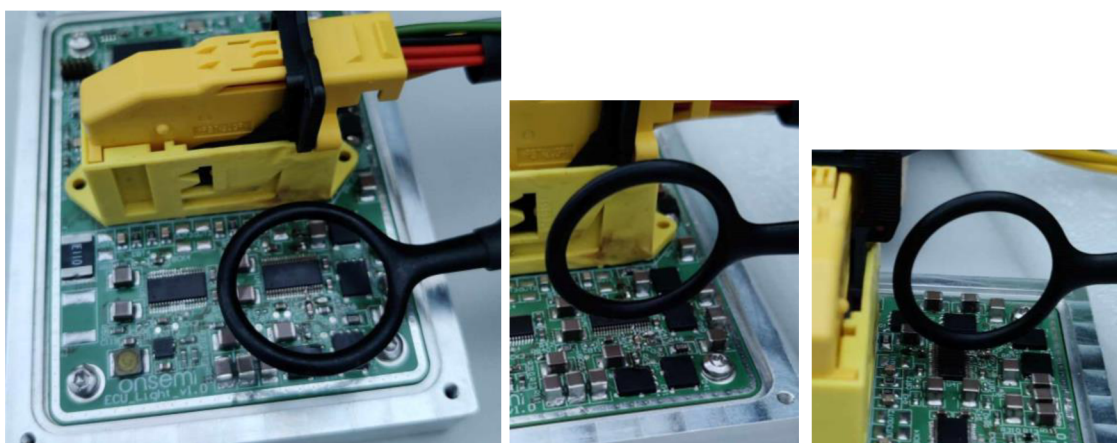


Obrázek 5.15 Pozice na modulu ECU-light pro měření se sondou RSH400-1

Jelikož u této sondy magnetického pole má vliv i natočení samotné sondy, bylo provedeno měření, kde se měnilo právě natočení dané sondy. Na obrázku 5.17 jsou popsány jednotlivé pozice. Nalevo je pozice 1, uprostřed pozice 2 a napravo je pozice 3. Zmíněné měření bylo provedeno na části desky, která v předešlém měření měla výsledky s nejvyššími hodnotami vyzařovaného magnetického pole, a sice pozice 2 na desce, tedy oblast se zvyšujícím měničem.



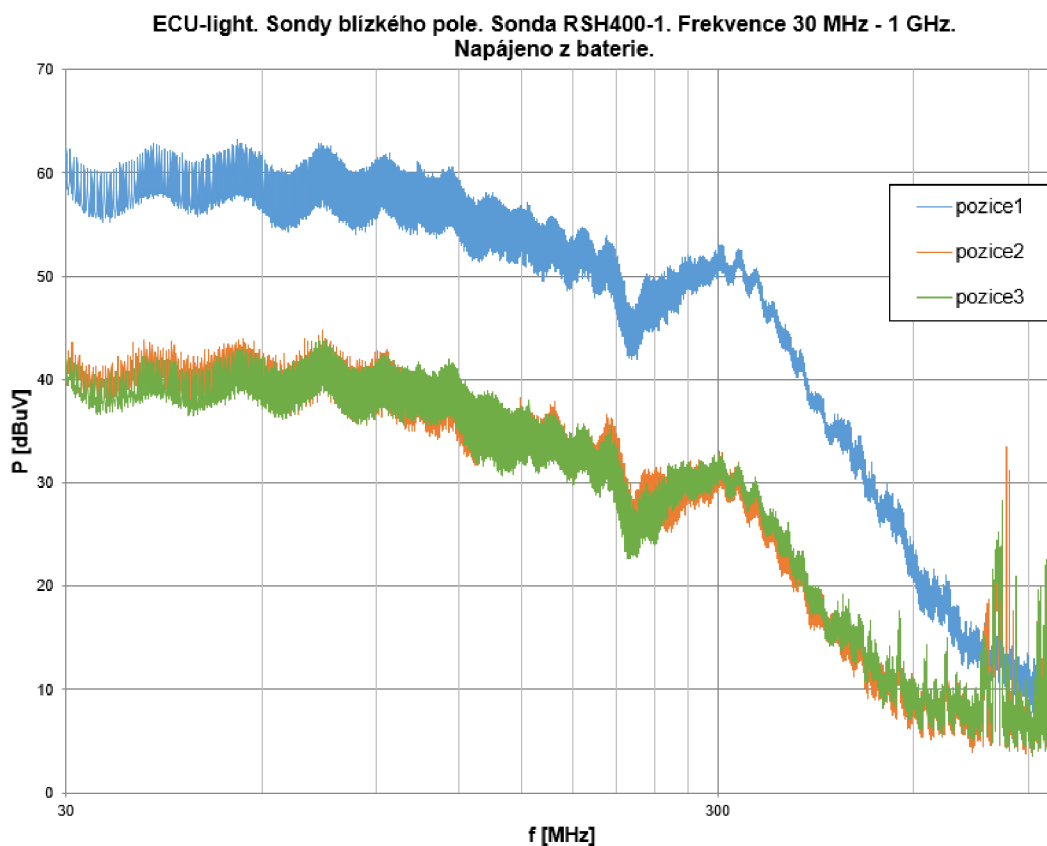
Obrázek 5.16 Vliv pozice na desce modulu ECU-light (sonda RSH400-1)



Obrázek 5.17 Pozice natočení pro měření se sondou RSH400-1 na modulu ECU-light (z levé strany pozice 1, pozice 2 a pozice 3)

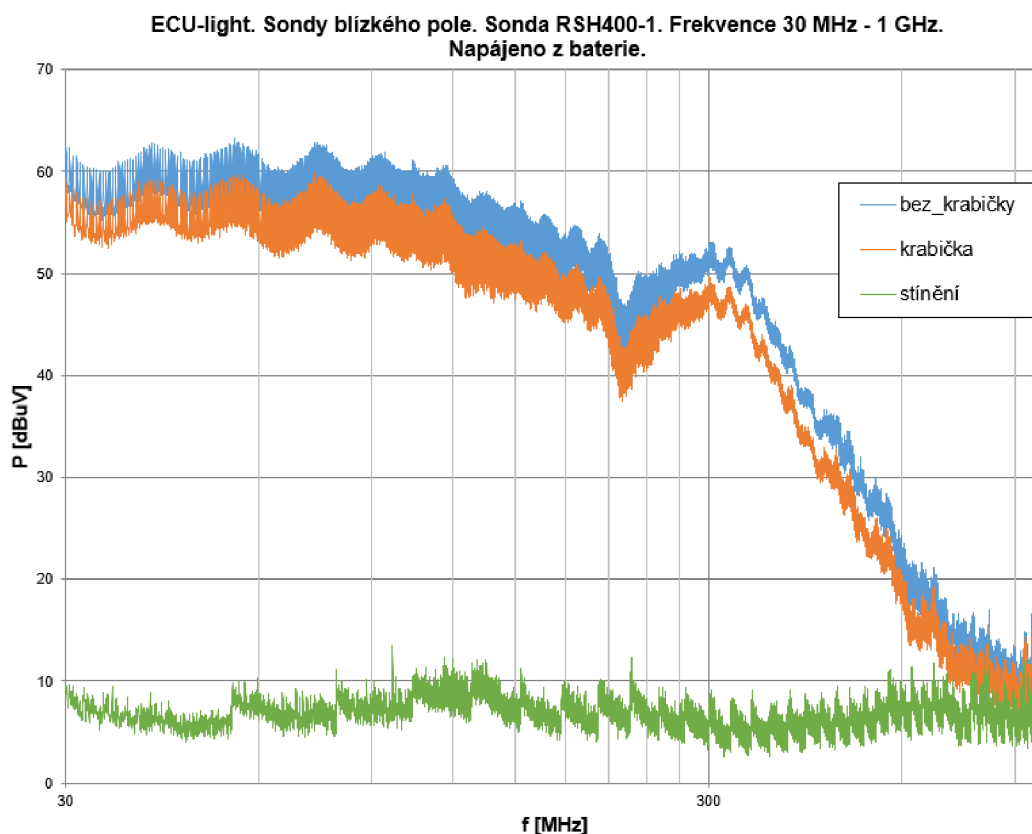
Na obrázku 5.18 jsou zobrazeny výsledky měření při jednotlivých natočení. Původní orientace sondy (natočení 1), které je vyznačeno na obrázku modrou barvou, má nejvyšší

hodnoty vyzařovaného magnetického pole. Další dvě orientace sondy vykazují téměř shodné výsledky.



Obrázek 5.18 Vliv natočení sondy na modulu ECU-light (sonda RSH400-1)

Dále byl i v případě sondy magnetického pole měřen vliv stínění, jehož výsledky jsou zobrazeny v grafu na obrázku 5.19. Křivka měření bez krabičky je modrá, křivka měření s krabičkou má oranžovou barvu. Měření s přidavným odstíněním modulu pomocí kovové pásky je znázorněno zelenou barvou.



Obrázek 5.19 Vliv stínění modulu ECU-light (sonda RSH400-1)

V případě magnetického pole má plastová krabička menší vliv na výslednou velikost vyzařovaného pole, než tomu bylo v případě elektrického pole. Naopak přídavné stínění má výrazný vliv v celém frekvenčním rozsahu. Všechna tato měření byla provedena v oblasti zvyšujícího měniče se sondou natočenou v pozici 1.

5.3.4 Shrnutí měření sondami blízkého pole

U měření sondami blízkého pole v případě modulu ECU-light byly jako součástky největšího rušení stanoveny diody zvyšujícího měniče, startovací kondenzátory, které jsou připojeny přes cívku na výstup, a piny integrovaných obvodů, které odpovídají výstupu měniče.

Vliv stínění plastovou krabičkou se více uplatnil u vyzařovaného elektrického pole než u pole magnetického. S přídavným stíněním v podobně kovové pásky došlo k výraznému potlačení obou vyzařovaných polí.

ZÁVĚR

V rámci diplomové práce jsem se musela seznámit se základními pojmy týkající se elektromagnetické kompatibility, typy vazeb, měřicími snímači, či měřicími přístroji a sondami. Úkolem diplomové práce bylo naměření EMC modulů. Nejprve jsem musela prostudovat normy pro měření EMC. Následně jsem se zabývala integrovanými obvody NCV78514 a NCV78964 od společnosti onsemi a moduly, kterých jsou tyto čipy součástí. Jednalo se o modul ECU-light a modul s integrovaným obvodem NCV78514. Dalším úkolem bylo naměřené výsledky vyhodnotit a optimalizovat provozní parametry budičů.

Měřila jsem oba moduly metodou CISPR25 i pomocí metody TEM komory. Metoda CISPR25 je základní měřicí metodou v oblasti EMC automobilového průmyslu. Metoda komory TEM byla zvolena pro odhalení vlivu stínění modulu. Z dosažených výsledků jsem dospěla k závěru, že největší vliv na emise modulu NCV78514 má funkce rozprostřeného spektra, kondenzátor C8 a stínící krabice. Naopak žádný vliv nemají ostatní volitelné komponenty, kromě právě zmíněného kondenzátoru na vstupu PWM. U modulu ECU-light má největší vliv frekvence zvyšujícího měniče, velikost výstupního napětí a stínění kovovou páskou. Žádný vliv pak nemá zvolená hodnota PWM při zachování stejného výkonu. Zajímavostí u modulu ECU-light bylo, že z důvodu velkých počátečních proudů a indukčnosti měřicí soustavy bylo nutné na vstup modulu přidat kondenzátor. Výsledkem všech měření je, že moduly splňují při doporučené konfiguraci limity stanovené normou. Cíle zadání byly splněny. Výsledky měření slouží jako podklad pro eliminaci nevhodných nastavení modulů, které můžou zapříčinit chyby během provozu. Dále jsou nápomocné při vylepšování konkrétních aplikací.

Textová práce nejprve popisuje samotný pojem elektromagnetická kompatibility, typy vzájemných vazeb, snímače rušení, měřicí přístroje i sondy blízkého pole. Dále nastiňuje problematiku norem pro měření EMC, konkrétně normy CISPR25 a normy pro měření metodou komory TEM. Poté práce popisuje integrované obvody a moduly od společnosti onsemi. Kapitoly 4 a 5 jsou věnovány popisu konkrétních měření na jednotlivých modulech a interpretaci výsledků.

Díky tvorbě diplomové práce jsem si osvojila pojmy jako je elektromagnetická kompatibility, její emise a imunita. Prostudovala jsem jednotlivé způsoby měření EMC a také normy, které tato měření definují. Nabyla jsem nových zkušeností při měření s danými moduly od firmy onsemi. Celý proces měření a následné vyhodnocování mi poskytl ucelený přehled o tom, jak jednotlivé vlivy mohou zasahovat, jak do hodnot elektromagnetického rušení, tak do funkčnosti daného zařízení.

LITERATURA

- [1] DELABALLE, Jacques. EMC: electromagnetic compatibility. Online. In: . S. 36. Dostupné z: https://www.studiecd.dk/cahiers_techniques/emc_electromagnetic_compatibility.pdf. [cit. 2023-11-11].
- [2] KOVÁČ, Dobroslav; KOVÁČOVÁ, Irena a KAŇUCH, Ján. EMC z hlediska teorie a aplikace. BEN, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [3] DŘÍNOVSKÝ, Jiří; FRÍZA, Tomáš; SVAČINA, Jiří; KEJLÍK, Zdeněk; RŮŽEK, Václav et al. Elektromagnetická kompatibilita. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. ISBN 978-80-214-4202-3.
- [4] LEVKO, Martin. Měření elektromagnetických emisí. Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2017.
- [5] R&S@HZ-15/R&S@HZ-17 Probe Sets R&S@HZ-16 Preamplifier E and H near-field emission measurements with test receivers, spectrum analyzers and oscilloscopes. Online. Rohde&Schwarz GmbH&Co. KG. 2017, s. 8. Dostupné z: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/service_support_30/HZ-15_16_17_bro_en_5213-6687-12_v0100.pdf. [cit. 2024-05-06].
- [6] Sondy blízkého pole pro měření v elektromagnetické kompatibilitě. Online, Bakalářská práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/23188/1/BP_Jakub_Kopp.pdf. [cit. 2024-05-06].
- [7] CHROMÝ, Stanislav. VAZEBNÍ MECHANISMY PŘENOSŮ RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické, 2013.
- [8] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION [IEC]. IEC 61967-1-ed.2, Measurement of electromagnetic emissions - Part. 1: General conditions and definitions. 2.
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION [IEC]. CISPR25:2021, Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers. 4.
- [10] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION [IEC]. IEC 61967-8, Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions - Part 8: Measurement of radiated emissions - IC stripline method. 2.
- [11] HALODA, Jiří. Návrh a konstrukce dvojité Crawfordovy komory. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické, 2010.
- [12] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION [IEC]. IEC 61967-2, Integrated circuits - Measurement of electromagnetic emissions, 150 kHz to 1 GHz - Part 2: Measurement of radiated emissions - TEM cell and wideband TEM cell method.

- [13] NCV78964: High Efficiency Single-chip 2 Phase Booster and Synchronous Dual Buck LED Driver for Automotive Front Lighting. onsemi. 2023, s. 50.
- [14] REJTHAR, Martin. EFEKTIVNÍ ODVOD TEPLA Z BUDIČŮ LED NCV78964 A NCV78925. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické, 2022.
- [15] ECU_Light_v1.0(No Variations) - Schematic Drawings: schéma modulu ECU-light společnosti onsemi. 2023.
- [16] 1 NCV78514: 1-Channel Automotive LED Driver H-Bridge 1.5 A, 60 V – TSSOP16-EP. onsemi. 2023, s. 24.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AN	umělá síť
CAN	Controller Array Network
CB	Citizen Band
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
EMC	elektromagnetická kompatibilita
EMI	elektromagnetické rušení
EMS	elektromagnetická odolnost
IC	integrovaný obvod
IEC	mezinárodní elektrotechnická komise
LISN	síť pro stabilizaci impedance vedení
LVDS	Low Voltage Differential Signaling
RBW	rozlišení šířky pásma
SPI	Serial Peripheral Interface
TEM	Transverse ElectroMagnetic
VF	vysokofrekvenční