



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LOAD SIMULATOR DLE ISO 11452 A CISPR25 KE SVĚTLOMETU URČENÝ PRO ZKOUŠKY EMC

LOAD SIMULATOR ACCORDING TO ISO 11452 AND CISPR25 FOR A HEADLAMP FOR EMC TESTING

DIPLLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Drápal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Ladislav Drápal

ID: 223285

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Load simulator dle ISO 11452 a CISPR25 ke světlometu určený pro zkoušky EMC

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se zapojením světlometů při EMC zkouškách dle [1], [2] a [3] prováděných ve firmě Marelli v Jihlavě. Navrhněte přípravek Load simulator dle standardů [1], [2] a [3] a dle vzorových světlometů měřených při EMC zkouškách ve firmě. Uvažujte akumulátorové napájení. Load simulator pomáhá aktivovat světlomet do příslušného operačního módu a prakticky tak při testování supluje funkci řídicí jednotky automobilu.

Připravte blokové schéma zařízení a popište základní části. Sestavte jednoduché schéma obvodu reprezentující základní principy, zkonstruujte prototyp zařízení a vyzkoušejte jeho funkčnost.

Navrhněte detailní schéma, proveďte výpočty kritických výkonových parametrů a zvolte vhodné komponenty.

Revidujte schéma připravené během semestrálního projektu, případně ho optimalizujte a navrhněte plošný spoj. Zkonstruujte prototyp přípravku. Vlastnosti ověřte při praktickém použití v následujících testech: Conducted emissions from components/modules – Voltage method a Radiated emissions from components/modules – ALSE method dle [1], dále testu BCI test method dle [2] nebo testu dle [3]. Přehledně zpracujte dosažené výsledky, zhodnoťte je a proveďte rozvahu možných vylepšení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] CISPR 25 – International standard; Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers; Edition 5.0; 2021-12

[2] ISO 11452-4 – International standard; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods; Fifth edition; 2020-04

[3] ISO 11452-2 – International standard; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 2: Absorber-lined shielded enclosure; Third edition; 2019-01

Termín zadání: 16.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultant: Ing. Josef Vochyán, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem Load simulátoru, který bude použit při měření v EMC komoře. Load simulátor obsahuje celkem pět výstupních úrovní. V diplomové práci jsou řešeny výstupy pro směrová světla a výstup pro poziční světlo. Load simulátor se pro dané výstupy skládá z analogového řešení PWM generátoru. Sestavením generátoru pulzně šířkové modulace na nepájivém poli byla ověřena základní funkčnost zapojení. Změřené parametry byly porovnány se simulovanými. Základní schéma PWM generátoru bylo rozšířeno o doplňující komponenty, a mimo PWM generátor se vytvořil výstup optického řízení. Z důvodu umístění DPS do krabičky jsou vytvořeny dvě desky – deska pro napájení a deska s řídicí a výkonovou částí. Měřením DPS se ověřila funkčnost zapojení a průběhy byly porovnány s realizací na nepájivém poli. Zkonstruovaný Load simulátor byl umístěn do EMC komory, kde se jednotlivými EMC testy ověřila jeho odolnost. Na závěr byly jednotlivé výsledky vyhodnoceny a popsána možná vylepšení.

Klíčová slova

Automobilový průmysl, zkoušky EMC, Load simulátor, poziční světlo, blinkry ECE a SAE, výstup řízený optikou.

Abstract

The diploma thesis with the design of a Load simulator, which will be used during measurements in the EMC chamber. The Load simulator contains a total of five output levels. The diploma thesis solves outputs for directional lights and output for position light. The Load simulator consists of an analog solution of the PWM generator. By assembling a pulse width modulation generator on a solderless field, the basic functionality of the circuit was verified. The measured parameters were compared with the simulated ones. The basic scheme of the PWM generator was expanded with additional components, and an optical control output was created outside the PWM generator. By placing the printed circuit board in an aluminium box, two separate boards were created: one for the power supply and other for the control and performance part. which was not realized yet. The functionality of the circuit was verified by measuring on the PCB, and the waveforms were compared with the implementation on the solderless field. The constructed Load simulator was placed in the EMC chamber, where its resilience was tested through various EMC tests. Finally, the individual results were evaluated, and potential improvements were described.

Keywords

Automotive, EMC tests, Load simulator, position light, ECE and SAE indicators, optically controlled output.

Bibliografická citace

DRÁPAL, Ladislav. *Load simulator dle ISO 11452 a CISPR25 ke světlometu určený pro zkoušky EMC* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/159061>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Michal Kubíček.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Bc. Ladislav Drápal
VUT ID studenta:	223285
Typ práce:	Diplomová práce
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	Load simulátor dle ISO 11452 a CISPR25 ke světlometu určený pro zkoušky EMC

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho 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 nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si 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.

V Brně dne:

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucím mé diplomové práce Ing. Jiřímu Dřínovskému, Ph.D., Ing. Michalu Kubíčkoví, Ph.D., a konzultantům Ing. Ladislavu Havlovi, Ing. Jaroslavu Vránovi, Ph.D. a Ing. Josefu Vochyánovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne:

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	13
ÚVOD	14
1. STUDIE POŽADAVKŮ NA FUNKCI LOAD SIMULÁTORU	15
1.1 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ OVLÁDANÉ FUNKCE SVĚTLOMETU.....	15
1.2 NAPÁJECÍ PROUD OVLÁDANÉ FUNKCE SVĚTLOMETU	16
1.3 FREKVENCE NAPÁJECÍHO PROUDU PŘI OBDÉLNÍKOVÉM SIGNÁLU NEBO PWM MODULACI.....	16
1.4 STRÍDA SIGNÁLU PŘI PWM MODULACI.....	16
1.5 TEPLOTA PRACOVNÍHO PROSTŘEDÍ.....	16
1.6 MÍRA VYZAŘOVÁNÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH EMISÍ.....	17
1.7 ODOLNOST VŮČI ELEKTROMAGNETICKÉMU POLI.....	18
1.8 ODOLNOST VŮČI ELEKTROSTATICKÉMU POLI	18
2. TESTY SVĚTLOMETŮ PŘI EMC ZKOUŠKÁCH.....	19
2.1 TEST DLE NORMY CISPR25 – RUŠENÍ PO VEDENÍ	20
2.2 TEST DLE NORMY CISPR25 – VYZAŘOVANÉ RUŠENÍ.....	21
2.3 TEST DLE NORMY ISO 11452-4 (BCI)	22
2.4 TEST DLE NORMY ISO 10605 (ESD).....	25
3. ROZVAHA NÁVRHU ZAPOJENÍ LOAD SIMULÁTORU	26
3.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ LOAD SIMULÁTORU	28
3.1.1 Zapojení napětím řízeného oscilátoru.....	28
3.1.2 Zapojení PWM generátoru pro řízení směrových světel.....	31
3.1.3 Zapojení PWM generátoru pro řízení pozičních světel.....	34
3.1.4 Vliv tolerance kapacity integračního kondenzátoru u generátoru PWM.....	35
3.2 VÝBĚR KOMPONENT PRO LOAD SIMULÁTOR.....	37
3.2.1 Návrh akumulátorového napájení.....	37
3.2.2 Stabilizátor napětí	38
3.2.3 Operační zesilovač.....	39
3.2.4 Unipolární tranzistor.....	39
3.2.5 Výkonový spínač.....	40
3.2.6 Výběr pasivních součástek	41
3.2.7 Výběr optického přijímače	42
3.2.8 Optický vysílač	44
3.3 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	44
4. REALIZACE ZÁKLADNÍHO ZAPOJENÍ SIGNÁLOVÉ ČÁSTI NA NEPÁJIVÉM POLI.	46
4.1 ZAPOJENÍ NA NEPÁJIVÉM POLI	46
4.2 MĚŘENÉ PRŮBĚHY PWM GENERÁTORU PRO SMĚROVÉ SVĚTLO	47
4.3 MĚŘENÉ PRŮBĚHY PWM GENERÁTORU PRO POZIČNÍ SVĚTLO.....	49
4.4 VLIV FREKVENCE A STRÍDY NA VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ	50
5. VÝROBA PROTOTYPU LOAD SIMULÁTORU	52
5.1 VÝBĚR KRABÍČKY A JEJÍ ROZLOŽENÍ.....	52

5.2	DÍLČÍ SCHÉMATA JEDNOTLIVÝCH BLOKŮ LOAD SIMULÁTORU	53
5.3	VÝKONOVÁ ROZVAHA NAD ZAŘÍZENÍM LOAD SIMULÁTOR	57
5.3.1	<i>Výkonová rozvaha ztrátového výkonu stabilizátoru LDO</i>	57
5.3.2	<i>Výkonová rozvaha ztrátového výkonu výkonového spínače při maximálním výkonu na zátěži</i> 58	
5.4	NÁVRH DPS LOAD SIMULÁTORU.....	58
5.4.1	<i>DPS napájecí části Load simulátoru</i>	58
5.4.2	<i>DPS řídicí a výkonové části Load simulátoru</i>	60
5.5	OSAZOVÁNÍ DPS	62
5.6	MĚŘENÍ NA REALIZOVANÉ DPS.....	63
5.7	MONTÁŽ DPS DO KOVOVÉ KRABÍČKY	68
5.8	ZKONSTRUOVANÝ VÝROBEK	70
6.	PRAKTICKÁ MĚŘENÍ S LOAD SIMULÁTOREM V EMC KOMOŘE	71
6.1	TEST DLE NORMY ISO 11452-4 (BCI) - UZAVŘENÁ SMYČKA	71
6.1.1	<i>Zapojení testu v EMC komoře</i>	71
6.1.2	<i>Naměřené průběhy</i>	73
6.1.3	<i>Zhodnocení výsledků</i>	75
6.1.4	<i>Použité přístroje</i>	77
6.2	TEST DLE NORMY ISO 11452-4 (BCI) – SUBSTITUČNÍ METODA	78
6.2.1	<i>Zapojení testu v EMC komoře</i>	78
6.2.2	<i>Naměřené průběhy</i>	81
6.2.3	<i>Zhodnocení výsledků</i>	86
6.2.4	<i>Použité přístroje</i>	87
6.3	TEST DLE NORMY CISPR25 – RUŠENÍ PO VEDENÍ	88
6.3.1	<i>Zapojení testu v EMC komoře</i>	88
6.3.2	<i>Naměřené průběhy</i>	89
6.3.3	<i>Zhodnocení výsledků</i>	98
6.3.4	<i>Použité přístroje</i>	98
6.4	TEST DLE NORMY CISPR25 – VYZAŘOVANÉ RUŠENÍ.....	99
6.4.1	<i>Měření dle normy CISPR25 (RE) s monopólovou anténou</i>	100
6.4.2	<i>Měření dle normy CISPR25 (RE) s bikonickou anténou</i>	103
6.4.3	<i>Měření dle normy CISPR25 (RE) s Logaritmicko-periodickou anténou</i>	107
6.4.4	<i>Měření dle normy CISPR25 (RE) s trychtýřovou anténou</i>	110
6.4.5	<i>Zhodnocení výsledků</i>	113
6.4.6	<i>Použité přístroje</i>	114
6.5	TEST DLE NORMY ISO 10605 (ESD).....	115
6.5.1	<i>Zapojení testu ESD</i>	115
6.5.2	<i>Zhodnocení výsledků</i>	117
6.5.3	<i>Použité přístroje</i>	117
7.	ZÁVĚR	118
	LITERATURA	119
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	121
	SEZNAM PŘÍLOH	123

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Vnitřní schéma zapojení LISN. Obr. převzat z normy [2].	19
Obr. 2 Blokové schéma zapojení pro měření dle normy CISPR25 (CE).	20
Obr. 3 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy CISPR25 (RE).	22
Obr. 4 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy ISO 11452-4 (BCI). Uzavřená smyčka.	23
Obr. 5 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy ISO 11452-4 (BCI). Substituční metoda.	24
Obr. 6 Blokové schéma pro testování dle normy ISO 10605.	25
Obr. 7 Očekávané výstupy Load simulátoru.	28
Obr. 8 Schéma zapojení VCO. Schéma vytvořeno v OrCAD Capture.	29
Obr. 9 Grafické znázornění principu VCO.	30
Obr. 10 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO.	31
Obr. 11 Schéma zapojení generátoru PWM s obvodem VCO pro výstup na TI. Obr. byl vytvořen v OrCAD Capture.	31
Obr. 12 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO s PWM výstupem.	32
Obr. 13 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 0,8s$.	33
Obr. 14 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 1s$.	33
Obr. 15 Schéma výstupu PWM generátoru pro POS. Schéma vytvořeno v OrCAD Capture.	34
Obr. 16 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO s PWM výstupem.	35
Obr. 17 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 5 ms$.	35
Obr. 18 Závislost kapacity $\pm 20\%$ od nominální hodnoty 100 nF integračního kondenzátoru na výstupní frekvenci PWM generátoru.	36
Obr. 19 Závislost kapacity $\pm 20\%$ od nominální hodnoty 470 pF integračního kondenzátoru na výstupní frekvenci PWM generátoru.	36
Obr. 20 Akumulátor Li-Po. Obrázek převzat ze zdroje [15].	38
Obr. 21 Vnitřní zapojení LDO. Obr. převzat z [16], str. 3.	39
Obr. 22 Unipolární tranzistor 2N7002KQ. Obr. převzat ze [18].	40
Obr. 23 Blokové schéma vnitřního zapojení výkonového spínače BTS6163D. Obr. převzat z [14], str. 1.	41
Obr. 24 Schéma vnitřního zapojení optického přijímače SFH551V. Obr. převzat z [20].	43
Obr. 25 Zapojení optického vysílače s pomocným obvodem dle katalogového listu výrobce [20].	44
Obr. 26 Blokové schéma zapojení Load simulátoru.	45
Obr. 27 Realizace zapojení na nepájivém poli.	46
Obr. 28 Změřený průběh na výstupu PWM generátoru, $T = 1 s$.	47
Obr. 29 Detail náběžné hrany na výstupu PWM generátoru, pro nízké kmitočty.	48
Obr. 30 Detail sestupné hrany na výstupu PWM generátoru, pro nízké kmitočty.	48
Obr. 31 Detail náběžné hrany na výstupu PWM generátoru, pro vyšší kmitočty.	49
Obr. 32 Detail sestupné hrany na výstupu PWM generátoru, pro vyšší kmitočty.	49
Obr. 33 Kmitočtová závislost výstupního napětí. Zapojení s integračním kondenzátorem $C_1 = 100nF$. Viz obr. 11.	50
Obr. 34 Kmitočtová závislost výstupního napětí. Zapojení s integračním kondenzátorem $C_1 = 450pF$. Viz obr. 15.	50
Obr. 35 Závislost maximální hodnoty výstupního napětí na střídě.	51
Obr. 36 Rozměry krabičky. Obr. převzat z katalogového listu [22].	52
Obr. 37 Rozvržení komponent na kovové krabičce.	53
Obr. 38 Napájecí část celkového schématu Load simulátoru.	54
Obr. 39 Řídící část celkového schématu Load simulátoru.	55
Obr. 40 Výkonová část celkového schématu Load simulátoru.	56

Obr. 41 Schéma zapojení optického přijímače Load simulátoru.	57
Obr. 42 Napájecí část vrchní DPS. Obrázek byl vytvořen v Cadence PCB editor.	59
Obr. 43 Výkonová a signálová část DPS. Obrázek byl vytvořen v Cadence PCB editor.	61
Obr. 44 Osazená DPS signálové a výkonové části.	63
Obr. 45 Foto z měření parametrů DPS.	64
Obr. 46 Výstupní průběh PWM generátoru pro směrové světlo, dle normy ECE.	65
Obr. 47 Výstupní průběh PWM generátoru pro směrové světlo, dle normy SAE.	65
Obr. 48 Výstupní průběh PWM generátoru pro poziční světlo.	66
Obr. 49 Výstupní průběh PWM generátoru pro poziční světlo.	66
Obr. 50 Výstup simulující směrové světlo, dle normy ECE, daný optickou komunikací.	67
Obr. 51 Výstup simulující směrové světlo, dle normy SAE, daný optickou komunikací.	67
Obr. 52 Konstrukce kovové krabičky.	68
Obr. 53 Montáž vstupních a výstupních zdířek.	68
Obr. 54 Kompletní montáž Load simulátoru.	69
Obr. 55 Foto zkonstruované krabičky – jednotlivé pohledy zvenku.	70
Obr. 56 Zapojení metody BCI – uzavřená smyčka.	71
Obr. 57 Zapojení metody BCI – uzavřená smyčka; detail.	72
Obr. 58 Měření proudového odběru pomocí digitálního osciloskopu.	72
Obr. 59 Kmitočtová závislost testovací úrovně a naměřené úrovně rušivého proudu.	73
Obr. 60 Kmitočtová závislost výkonu injektážní sondy.	73
Obr. 61 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln na injektážní sondě.	74
Obr. 62 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.	74
Obr. 63 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.	75
Obr. 64 Přidání blokových kondenzátorů na DPS.	76
Obr. 65 Zapojení metody BCI – substituční metoda.	78
Obr. 66 Zapojení metody BCI – detail zapojení před LISN.	79
Obr. 67 BCI – substituční metoda. Detail na průchod kabelového svazku BCI injektážní sondou.	79
Obr. 68 BCI – substituční metoda. Detail na průchod kabelového svazku injektážní sondou mimo GND.	80
Obr. 69 Zapojení měřicího pracoviště BCI substituční metody s pozičním světlem.	80
Obr. 70 Kmitočtová závislost testovací úrovně.	81
Obr. 71 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.	81
Obr. 72 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.	82
Obr. 73 Kmitočtová závislost výkonu injektážní sondy.	82
Obr. 74 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln.	83
Obr. 75 Kmitočtová závislost testovací úrovně.	83
Obr. 76 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.	84
Obr. 77 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.	84
Obr. 78 Kmitočtová závislost výkonu injektážní sondy.	85
Obr. 79 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln.	85
Obr. 80 Zapojení pracoviště pro metodu CE.	88
Obr. 81 Zapojení metody CE. Detail zapojení od napájecího zdroje do LISN.	88
Obr. 82 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	89
Obr. 83 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření se světlem.	89
Obr. 84 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	90
Obr. 85 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	90
Obr. 86 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	91
Obr. 87 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	91

Obr. 88 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	92
Obr. 89 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	92
Obr. 90 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	93
Obr. 91 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	93
Obr. 92 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	94
Obr. 93 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	94
Obr. 94 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	95
Obr. 95 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	95
Obr. 96 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	96
Obr. 97 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	96
Obr. 98 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.	97
Obr. 99 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.	97
Obr. 100 Zapojení pro měření RE. Detail zapojení od napájecího zdroje do LISN.	99
Obr. 101 Zapojení pro měření RE s monopólovou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.	100
Obr. 102 Zapojení pro měření RE s monopólovou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.	100
Obr. 103 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem. Měření bez světla.	101
Obr. 104 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem. Referenční měření.	101
Obr. 105 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem. Měření bez světla.	102
Obr. 106 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem. Referenční měření.	102
Obr. 107 Zapojení pro měření RE s bikonickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.	103
Obr. 108 Zapojení pro měření RE s bikonickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.	103
Obr. 109 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.	104
Obr. 110 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření. Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.	104
Obr. 111 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.	105
Obr. 112 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření. Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.	105
Obr. 113 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.	106
Obr. 114 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.	106
Obr. 115 Zapojení pro měření RE s Logaritmicko-Periodickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.	107
Obr. 116 Zapojení pro měření RE s Logaritmicko-Periodickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.	107
Obr. 117 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s Log.-Per. anténou – horizontální polarizace.	108
Obr. 118 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s Log.-Per. anténou – vertikální polarizace.	108
Obr. 119 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s Log.-Per. anténou – horizontální polarizace.	109

Obr. 120 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s Log.-Per. anténou – vertikální polarizace.....	109
Obr. 121 Zapojení pro měření RE s trychtýřovou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.....	110
Obr. 122 Zapojení pro měření RE s trychtýřovou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.....	110
Obr. 123 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – horizontální polarizace.....	111
Obr. 124 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – vertikální polarizace.....	111
Obr. 125 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – horizontální polarizace.....	112
Obr. 126 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – vertikální polarizace.....	112
Obr. 127 Zapojení testovaného pracoviště ESD.	115
Obr. 128 Detail na aplikaci výboje výstupu Load simulátoru.....	115
Obr. 129 Detail na aplikaci vybíjení výstupu Load simulátoru.	116
Obr. 130 Detail na aplikaci výboje a vybíjení krytu Load simulátoru.....	116

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Limity vedeného rušení napěťové metody pro 5. třídu [1].	17
Tab. 2 Třetí kategorie měření BCI. Viz [3] str. 46.	18
Tab. 3 Proudový odběr použitých součástek v Load simulátoru dle katalogových listů.	57
Tab. 4 Použité přístroje při měření dle normy ISO 11452-4 (BCI) – uzavřená smyčka.....	77
Tab. 5 Použité přístroje při měření dle normy ISO 11452-4 (BCI) – substituční metoda.	87
Tab. 6 Použité přístroje při měření dle normy CISPR25 – rušení po vedení.	98
Tab. 7 Použité přístroje při měření dle normy CISPR – vyzařované rušení.	114

ÚVOD

Všechna elektrická zařízení během svého provozu vyzařují elektromagnetické vlny. Pro zjištění vlivů vyzařování elektromagnetických vln se používá testování elektromagnetické kompatibility. U navrženého zařízení je potřeba otestovat, zdali nedochází k nadlimitnímu vyzařování elektromagnetického pole.

V České republice se měření elektromagnetické kompatibility nejvíce využívá v automobilovém průmyslu. Na vyzařování elektromagnetických vln se netestuje pouze samotný automobil, ale testují se i jednotlivé součásti automobilu samostatně. Jednou velmi důležitou součástí automobilu z hlediska bezpečnosti na pozemních komunikacích jsou přední světlomety. U předních světlometů jsou stanoveny maximální limity elektromagnetického rušení volným prostorem. Každý výrobce automobilů má stanovené své maximální interní limity vyzařování dle používaných norem.

Tato práce se ve své první části zabývá návrhem přípravku Load simulátor dle standardů a dle vzorových světlometů, které se měří při EMC zkouškách ve firmě Marelli Automotive Lighting. Load simulátor bude při své funkci z části nahrazovat řídicí jednotku automobilu.

V teoretické části budou popsány druhy měření elektromagnetické kompatibility, při kterých bude zapotřebí použít Load simulátor.

Praktická část diplomové práce se bude zabývat návrhem Load simulátoru, který bude obsahovat dva výstupy řízené PWM generátorem a jeden opticky řízený výstup. První výstup bude určen pro směrové světlo (TI) s přepínáním stanovené frekvence a střídy na základě norem ECE a SAE. Totožné přepínání bude obsahovat i druhý výstup, na poziční světlo (POS). Třetí výstup, který bude řízen přes optiku bude mít na výstupu frekvenci a střídu proměnnou, na základě nastavení externího generátoru.

Pro ověření základních parametrů se zapojení zrealizuje na nepájivém poli. Následným měřením se ověří a navzájem porovnájí výsledné průběhy ze simulace. Poté bude schéma doplněno o další komponenty vhodné do prostředí EMC komory a bude navržena deska plošného spoje. Dalším měřením se ověří navržená deska plošného spoje s výsledky zapojení na nepájivém poli.

Po ověření DPS bude celé zařízení zhotoveno do krabičky a jednotlivé parametry se ověří při měření EMC na předních světlometech. Zhotovený Load simulátor se otestuje při měření dle normy ISO 11452 – 4 (BCI – uzavřená smyčka a substituční metoda) a při měření dle normy CISPR25 (CE a RE).

Na závěr se z jednotlivých metod měření zpracují dosažené výsledky a budou se analyzovat případné nedostatky a možná vylepšení.

1. STUDIE POŽADAVKŮ NA FUNKCI LOAD SIMULÁTORU

Load simulátor lze zjednodušeně definovat jako simulátor řídicí jednotky automobilu. Jeho funkcí bude ovládání směrového světla (TI), pozičního světla (POS). Ostatní funkce světlometu např. potkávací světlo (LB), dálkové světlo (HB) atd. budou během testu připojeny přes lineární stabilizační síť (LISN). Load simulátor bude umístěn ve speciálním prostředí (EMC komoře) ve firmě Marelli Automotive Lighting. Při testování předních světlometů v EMC komoře budou na Load simulátor kladeny vysoké nároky. Z tohoto důvodu je nutné splnit veškeré limity rušení a odolnosti, které speciální prostředí představuje.

Load simulátor bude řešený jako tři výstupové zařízení. Prvním výstupem se bude ovládat směrové světlo, druhým výstupem se bude ovládat poziční světlo a třetím výstupem bude možné ovládat směrové i poziční světlo nestandardními parametry.

Základní parametry na každý výstup jsou:

- napájecí napětí ovládané funkce světlometu,
- napájecí proud ovládané funkce světlometu,
- frekvence napájecího proudu při obdélníkovém signálu nebo PWM modulaci,
- střída signálu při PWM modulaci,
- teplota pracovního prostředí,
- míra vyzařování elektromagnetických emisí,
- odolnost vůči elektromagnetickému poli,
- odolnost vůči elektrostatickému poli.

1.1 Napájecí napětí ovládané funkce světlometu

Standartní napájecí napětí pro většinu testů je 14 V. Tato hodnota byla zjištěna z EMC protokolů, dle specifikací zákazníka ve firmě Marelli Automotive Lighting. Dle normy [2] pro systémy s nominálním napětím 12 V je požadováno napětí 13 ± 1 V. Dle normy [1] pro systémy s nominálním napětím 12 V závisí velikost požadovaného napětí na režimu a způsobu provozu vozidla. U vozidel se spalovacími motory je pro režim s vypnutým motorem a zapnutým zapalováním požadováno napětí 12^{+2}_{-1} V. U běžného provozního režimu automobilu se spalovacím motorem se udává 13^{+3}_{-0} V. Pro elektrická vozidla a vozidla Plug-in hybrid je při módu nabíjení požadováno napětí 14^{+1}_{-1} V, stejné požadované napětí platí i pro provozní mód. Rozsah napájecího napětí ovládané funkce je požadován v rozmezí 0–40 V, z důvodu požadavků firmy Marelli pro potřebu testů dle norem [1] při nestandardním napájení.

1.2 Napájecí proud ovládané funkce světlometu

Standartní parametry výkonového spínače napětí se určují na základě zákaznické specifikace řídicí jednotky automobilu. Základní požadavky napájecího proudu jsou:

- Požadavky na pulzní proud.
- Požadavky na trvalý proud.

Dle těchto požadavků by měl být vybrán výkonový spínač, který bude mít pulzní proud alespoň 10 A, a minimální trvalý proud alespoň 5 A.

1.3 Frekvence napájecího proudu při obdélníkovém signálu nebo PWM modulaci

Pro použití pozičního světla (POS) se standardně udává 200 Hz. U frekvence směrových světel záleží, pro jaký trh je automobil určen. Pro evropský trh se používají směrová světla dle normy Evropské hospodářské komise (ECE), ve které se udává frekvence 1,25 Hz. Na americkém trhu se používají směrová světla dle normy sdružení automobilových inženýrů (SAE). Podle normy SAE se udává frekvence 1 Hz.

Dle normy [1] str. 28 je u všech typů testů povolena tolerance frekvence 1 %. Pro poziční světlo z toho vyplývá požadována frekvence 200 ± 2 Hz. Pro směrové světlo je podle normy ECE požadována frekvence $1,25 \pm 0,0125$ Hz a podle normy SAE je požadována frekvence $1 \pm 0,01$ Hz.

1.4 Střída signálu při PWM modulaci

Pro poziční světla se dle EMC protokolů požaduje standardně 10 % – 20 %. V některých speciálních případech je potřeba použít i nestandardní střidu. U směrových světel je podle jednotlivých norem pro evropský a americký trh střída přesně stanovena. Pro normu ECE je požadována střída 1:1 (50 %). Dle normy SAE je požadována střída 1:3 (33,3 %). Naopak u denních světel se používá střída 100%, které se napájí bez použití PWM modulace.

1.5 Teplota pracovního prostředí

Teplota se v EMC laboratoři ve firmě Marelli udává podle EMC protokolu standardně 25 °C. Podle normy [2] str. 14 se teplota, při které mají probíhat testy udává 23 ± 5 °C.

1.6 Míra vyzařování elektromagnetických emisí

Podle normy [1] str. 23 by měly mít zařízení používané při EMC měření rezervu 6 dB pod limitní úroveň produkovaných emisí. Dle normy [1] str. 56, se napěťová metoda u limit vedeného rušení dělí do 5 tříd. V EMC protokolech firmy Marelli se měření EMC provádí dle nejpřísnějších limitů 5. třídy, viz tab. 1. U analogových pásem ve frekvenčním rozsahu 0,15 MHz – 88 MHz je maximální míra vyzařování špičkového detektoru od 70 dB μ V do 34 dB μ V. U mobilních služeb ve frekvenčním pásmu 26 MHz – 87 MHz je maximální míra vyzařování špičkového detektoru od 44 dB μ V do 38 dB μ V.

Tab. 1 Limity vedeného rušení napěťové metody pro 5. třídu [1].

Pásmo	Frekvence [MHz]	Třída 5			RBW [kHz]
		Špička	Kvazi-špička	Průměr	
		[dB μ V]	[dB μ V]	[dB μ V]	
Analogový přenos					
LW	0,15 - 0,3	70	57	50	9
MW	0,53 - 1,8	54	41	34	9
SW	5,9 - 6,2	53	40	33	9
FM	76 - 108	38	25	18	120
TV pásmo 1	41 - 88	34	–	24	120
Mobilní komunikace					
CB	26 - 28	44	31	24	9
VHF	30 - 54	44	31	24	120
VHF	68 - 87	38	25	18	120

1.7 Odolnost vůči elektromagnetickému poli

Load simulátor musí mít nejvyšší požadovanou odolnost v celém měřeném frekvenčním rozsahu. Je důležité, aby při EMC měření testovaného zařízení (DUT) nedošlo k vypnutí Load simulátoru vlivem rušivých elektromagnetických polí.

Testování odolnosti vůči elektromagnetickému poli se provádí pomocí měření vyzařované imunity (RI). Mezi tyto testy patří např. injekce velkého proudu (BCI). Dle normy [3] str. 6 probíhá měření BCI ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 400 MHz. Ve firmě Marelli se EMC měření BCI provádí podle 3. kategorie, viz tab. 2, kde f označuje kmitočet v MHz. Do této kategorie patří test level IV, III a II.

Tab. 2 Třetí kategorie měření BCI. Viz [3] str. 46.

Frekvenční pásmo [MHz]	Test level II [mA]	Test level III [mA]	Test level IV [mA]
1 – 3	$100 \times f / 3$	$150 \times f / 3$	$200 \times f / 3$
3 – 200	100	150	200
200 – 400	$100 \times 200 / f$	$150 \times 200 / f$	$200 \times 200 / f$

1.8 Odolnost vůči elektrostatickému poli

Load simulátor musí být při EMC měření odolný i proti elektrostatickému výboji. Měření automobilových světel probíhá dle normy viz [4] str. 43, kategorie 3. Výboj se aplikuje na kontakt přímou vazbou nebo vzduchovou vazbou, dále vzduchem na plastový kryt atd. U přímé vazby na kontakt se dle normy udává ± 15 kV, ± 8 kV, ± 6 kV, ± 4 kV. U vazby vzduchem se dle normy udává ± 25 kV, ± 15 kV, ± 8 kV, ± 4 kV.

Load simulátor by měl být odolný dle normy [4] str. 43, podle kategorie 1. Pro přímou vazbu na kontakt se normě [4] udává ± 8 kV, ± 6 kV, ± 4 kV a ± 2 kV.

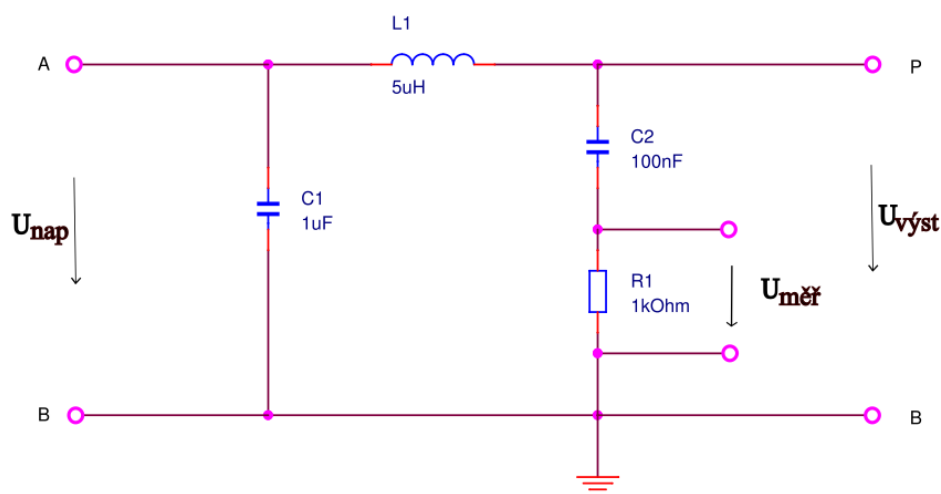
2. TESTY SVĚTLOMETŮ PŘI EMC ZKOUŠKÁCH

V této kapitole se budeme zabývat jednotlivými druhy testů elektromagnetické kompatibility, ve kterých bude použit navržený Load simulátor. Mezi tyto testy patří tzv. vedené rušení (Conducted emission – CE) a vyzařované rušení (Radiated emission – RE), které jsou součástí normy CISPR25. A tzv. injekce velkého proudu (Bulk current injection – BCI), která je součástí normy ISO 11452-4. Dle blokových schémat bude Load simulátor ovládat směrové světlo a poziční světlo. Dále bude z externího signálového generátoru přes optické vlákno skrze Load simulátor ovládáno směrové i poziční světlo. Výstup řízený přes optické vlákno bude v Load simulátoru z důvodu nastavení netypických hodnot frekvence a střídání, viz kapitola 1.

Před rozdělením samotných testů je důležité zmínit význam přípravku LISN (Line impedance stabilization network). LISN používáme za účelem oddělení rušivých signálů z napájecího zdroje a stanovení impedance na měřicím výstupu, obvykle 50Ω .

Uvnitř vedení impedance stabilizační sítě obvykle bývá filtr typu dolní propust, tzv. π článek, viz obr. 1, který má připojeny paralelně kondenzátory, v sérii s cívkou. Pro zapojení π článu se dle normy [2] udává velikost cívky $5 \mu\text{H}$. Síť pro stabilizaci impedance vedení lze také definovat jako nízkofrekvenční filtr.

V normě [2] se místo názvu LISN používá označení AN (artificial networks), v překladu umělá síť, určená pro stejnosměrné napájecí zdroje. V normě [2] str. 8, se udává napájecí napětí $U_{\text{NAP}} = 13 \pm 1 \text{ V}$. Dále se lze v normě [2] str. 18 dočíst, že je nutné LISN spojit přímo se zemní deskou. Při měření ve frekvenčním rozsahu od 100 kHz do 100 MHz je na svorkách $U_{\text{MĚŘ}}$, viz obr. 1, zapojena zátěž 50Ω , vstupní svorky A a B jsou zapojeny nakrátko a svorky P a B označují výstup na měřené zařízení. Schéma zapojení LISN s použitými součástkami a jednotlivými vstupy a výstupy je znázorněn na obr. 1.



Obr. 1 Vnitřní schéma zapojení LISN. Obr. převzat z normy [2].

Ve firmě Marelli se používá umělá síť od firmy Schwarzbeck s označením NNBM 8124, viz [5]. V katalogovém listu [5] se lze dočíst, že umělá síť je vhodná pro EMC měření, při testech dle norem CISPR25 a ISO 11452-4.

Každý test v EMC komoře obsahuje celkem tři LISN. Ve všech testech je LISN zapojována do obvodu stejným způsobem:

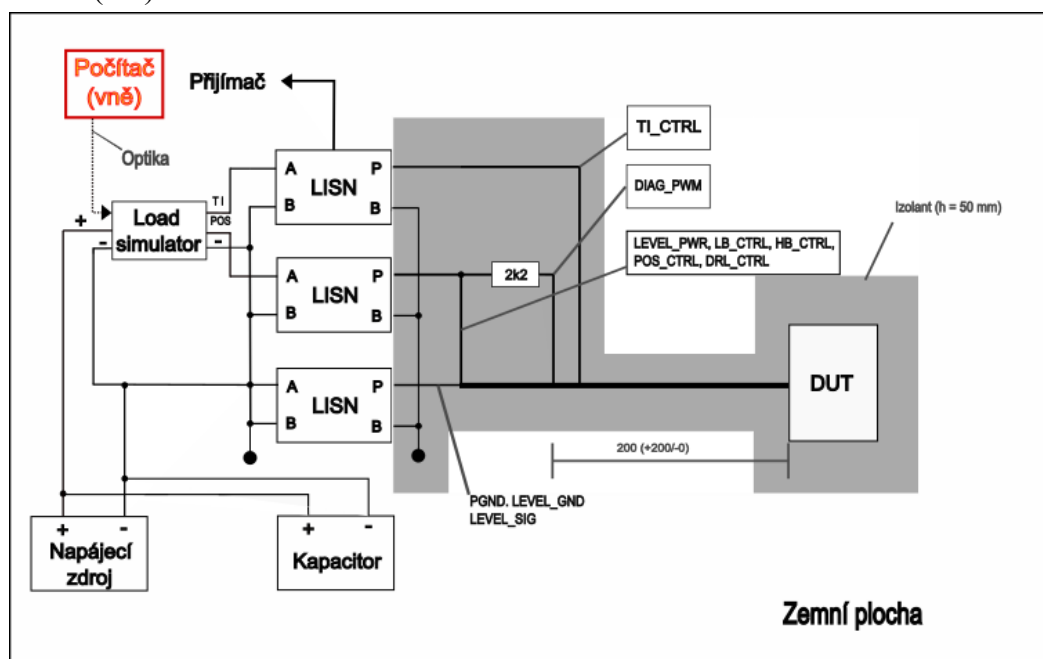
- prvním LISN je veden z Load simulátoru výstup na směrové světlo (TI),
- druhým LISN jsou vedeny obvykle výstupy na obrysové a dálkové světlo,
- třetím LISN je vedena zem.

Výstup Load simulátoru na poziční světlo je obvykle veden do světlometu napřímo, mimo LISN. Je to z toho důvodu, aby nedošlo při nastavené frekvenci pozičního světla 200 Hz, vlivem filtru dolní propusti, k odfiltrování vyšších harmonických složek.

2.1 Test dle normy CISPR25 – rušení po vedení

Vedené rušení (CE) se používá ke zjištění vlivů elektromagnetického pole po napájecím kabelovém svazku, od umělé sítě vedení do testovaného zařízení. Rušení obvykle vzniká mezi napájecím vodičem a zemí. Vliv na elektromagnetické záření mají i pomocné měřicí obvody. [6]

Dle normy [1] jsou dány maximální limity napěťové úrovně pro běžně používaná kmitočtová pásma v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 100 MHz. Na obr. 2 je znázorněno blokové schéma zapojení testového pracoviště pro měření rušení po vedení (CE).



Obr. 2 Blokové schéma zapojení pro měření dle normy CISPR25 (CE).

Takto zapojené pracoviště se používá při měření CE ve firmě Marelli Automotive Lighting. Napájecí zdroj dle normy [1] představuje automobilová baterie o jmenovitém napětí 12 V. Ve firmě Marelli není při měření CE použita automobilová baterie, ale je použit napájecí zdroj s paralelně připojeným superkondenzátorem o hodnotě 61,7 F [7]. Zapojením napájecího zdroje se superkondenzátorem je simulována autobaterie. Mezi napájecím zdrojem a LISN bude při měření umístěn vyrobený Load simulátor.

2.2 Test dle normy CISPR25 – vyzařované rušení

Vyzařované rušení (RE) vzniká při náhodnému uvolnění elektromagnetického pole z elektrického zařízení. Z hlediska toku proudu mohou RE vzniknout při protékáním proudu po rovném vodiči, anebo protékajícím proudem ve smyčce. Šířením po vodiči vzniká elektrické pole, naopak šířením ve smyčce vznikne magnetické pole. U EMC zkoušek, se měřením Radiated emission testuje vyzařování DUT (Device Under Test) do okolního prostředí. [8]

Dle normy [1] probíhá měření v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 5,925 GHz. Při měření vyzařovaného rušení se používá vertikální monopól, bikonická anténa, logaritmicke-periodická anténa a trychtýřová anténa. Antény se obvykle umísťují ve vzdálenosti jednoho metru od kabelového svazku.

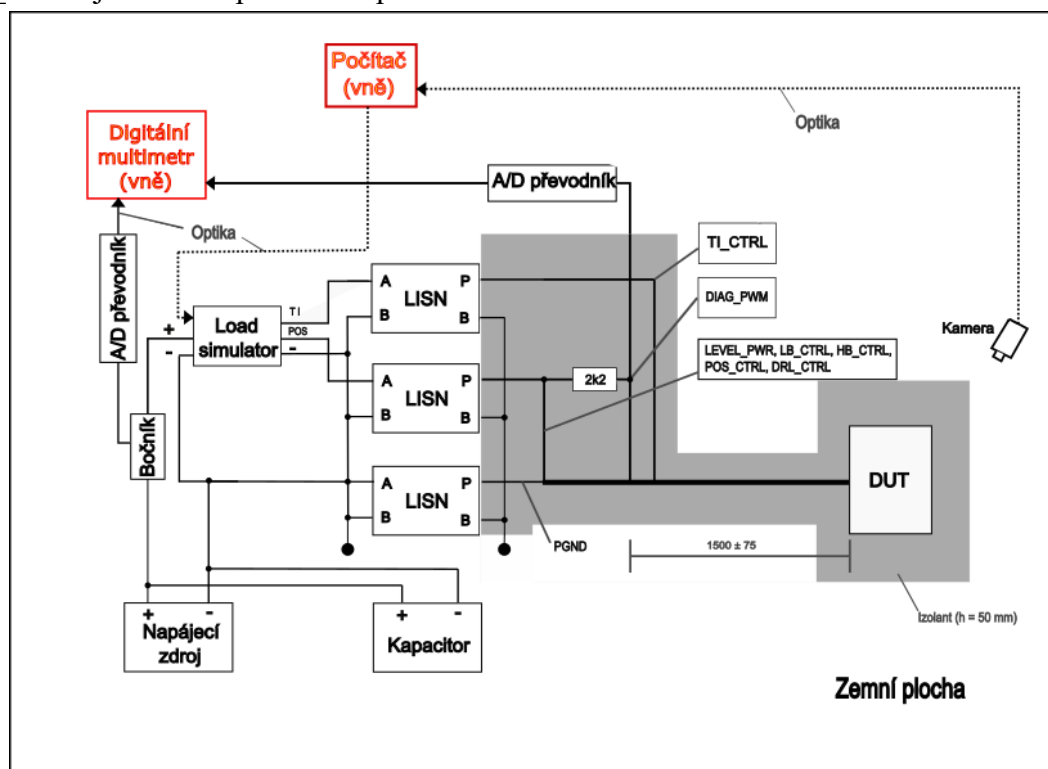
Na obr. 3 je znázorněno blokové schéma měřicího pracoviště pro měření vyzařovaného rušení. Červeně ohraničené bloky s červeným textem jsou zařízení, která se nachází mimo bezodrazovou komoru. Jedná se o počítač a digitální multimetr. Blok s označením digitální multimetr může v praxi zahrnovat digitální osciloskop nebo spektrální analyzátor. Zbylá zařízení jsou umístěna uvnitř bezodrazové komory.

V sériovém zapojení mezi napájecím zdrojem a Load simulátorem se nachází bočník. Takto zapojeným bočníkem se získává analogová informace o velikosti proudu. Následující komponentou za bočníkem je filtr dolní propusti, který má mezní kmitočet 100 kHz a optický převodník, který v blokovém schématu představuje blok A/D převodník. Součástí optického převodníku je převod analogového signálu na digitální signál a následný přenos informace optickým vláknem mimo EMC komoru. Mimo EMC komoru je zapojen další optický převodník, který digitální signál převede na analogový. Následně lze měřený analogový signál zobrazit na osciloskopu.

Pro vizuální kontrolu DUT je součástí zapojení v EMC komoře video kamera.

Definice LISN byla již řečena v úvodu kapitoly 2. Na jednotlivých výstupech LISN jsou pro představu znázorněny jednotlivé ovládací signály viz obr. 3. Z obr. 3 je patrné, že piny LEVEL_PWR jsou připojeny ke kladnému napájecímu napětí,

naopak piny s označením GND jsou připojeny k zápornému napájecímu napětí. Pin TI_CTRL je ovládán přes LISN pomocí Load simulátoru.



Obr. 3 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy CISPR25 (RE).

2.3 Test dle normy ISO 11452-4 (BCI)

Součástí testu BCI je injektážní sonda, pomocí které se do kabelového svazku indukují rušivé signály o výkonu až 100 W. Při měření v EMC komoře se testuje vliv testovaného zařízení (DUT) na rušivé signály po kabelové trase. Měření BCI se podle normy [3] dělí na dvě základní části:

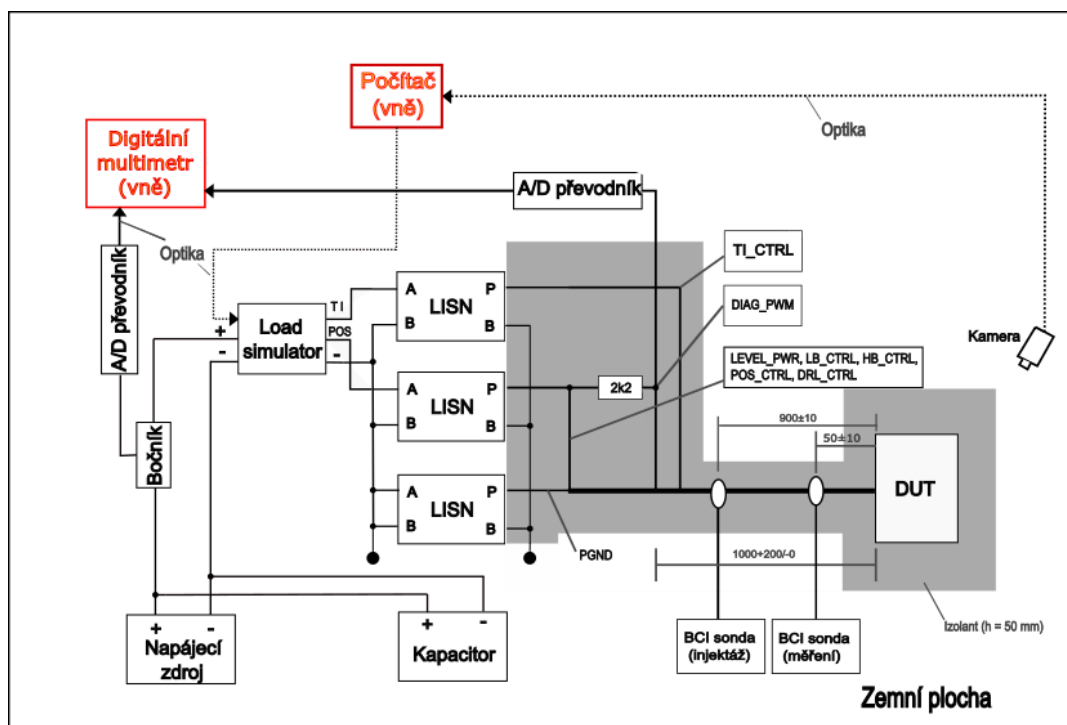
- uzavřená smyčka,
- substituční metoda.

Na obr. 4 je znázorněno blokové schéma pracoviště pro měření BCI – uzavřenou smyčkou. Základní zapojení měřících přístrojů je z části stejné, jako u měřícího pracoviště pro vyzařované rušení. Měření je rozšířeno o BCI injektážní sondu, která se dle typu měření umísťuje po kabelovém svazku. BCI sonda s označením měření je připojena ke spektrálnímu analyzátoru, který se nachází mimo bezodrazovou komoru.

Naopak pomocí BCI sondy s označením injektáž, se do kabelového svazku indukuje proud, který může dosahovat velikosti až 300 mA.

V normě se lze dočíst, že požadovaná vzdálenost BCI injektážní sondy od DUT je 900 ± 10 mm a vzdálenost měřicí BCI sondy od DUT je 50 ± 10 mm. Tyto parametry jsou pro představu znázorněny na obr. 4.

Dále si lze na obr. 4 všimnout, že zapojení jednotlivých komponent je stejné, jako u měření dle normy CISPR25 – vyzařované rušení.

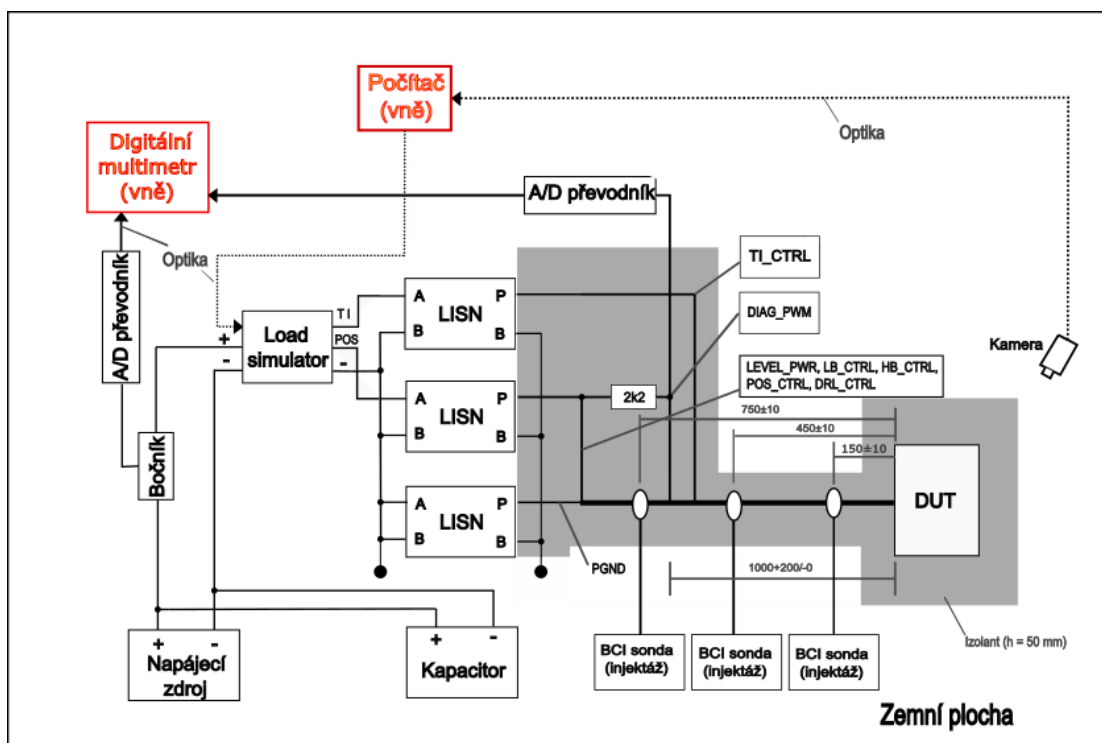


Obr. 4 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy ISO 11452-4 (BCI). Uzavřená smyčka.

Ve firmě Marelli se k injektáži velkého proudu používá BCI sonda, která má kmitočtový rozsah od 10 kHz do 400 MHz a je schopná až po dobu 30 minut dodat maximální výkon 100 W. Pro měření se používá BCI sonda, která má kmitočtový rozsah od 10 kHz do 1 GHz a je schopná změřit špičkový pulzní proud až o velikosti 100 A. Z hlediska požadavků dle kapitoly 1, je při EMC měření použití této měřicí sondy dostatečné.

Další část měření BCI je pomocí substituční metody. Oproti metodě s uzavřenou smyčkou se zde nenachází BCI měřící sonda, ale pouze BCI injektážní sonda. BCI injektážní sonda se u této metody umísťuje ve vzdálenosti 150 mm, 450 mm a 750 mm od testovaného zařízení. U každé vzdálenosti se udává tolerance ± 50 mm. Blokové schéma zapojení je znázorněno na obr. 5.

Samotné měření se dle normy [3] skládá ze dvou částí. Při první části měření prochází BCI injektážní sondou celý kabelový svazek. U druhé části měření, se zemní vodič vede mimo BCI injektážní sondu. Měření s BCI injektážní sondou, kterou prochází celý kabelový svazek, se měří v kmitočtovém rozsahu 100 kHz – 400 MHz. U měření se zemním vodičem, který je veden mimo injektážní BCI sondu je kmitočtový rozsah 100 kHz – 30 MHz.



Obr. 5 Blokové schéma zapojení pro zapojení testu dle normy ISO 11452-4 (BCI).
Substituční metoda.

Ve firmě Marelli se při měření BCI substituční metody používají totožné komponenty jako při měření BCI s uzavřenou smyčkou. Jednotlivé komponenty zapojení z obr. 5 byly již popsány v kapitole 2.2 (RE).

2.4 Test dle normy ISO 10605 (ESD)

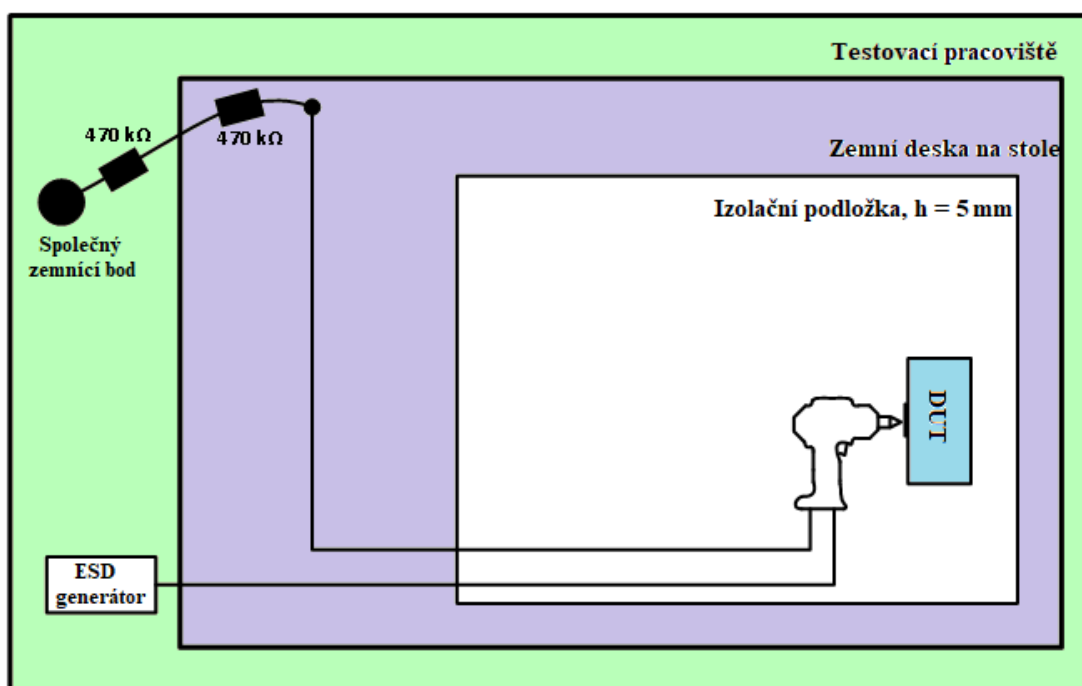
Norma ISO 10605 obsahuje zkušební metody pro elektrická zařízení, před poruchami, vlivem elektrostatického výboje. Pro testování ESD se používá hrot pro přímou vazbu (kovové části) a hrot pro vazbu vzduchem (plastový kryt).

Při testování DUT vůči odolnosti proti elektrostatickému výboji (ESD) se užívá dvou testovacích metod – napájeného a nenapájeného zařízení.

Testováním napájeného zařízení se na měděné desce testují tzv ostrůvky, které jsou rozmístěny pod kabelovým svazkem. Dále se testuje DUT, které vlivem elektrostatického výboje nesmí vykazovat žádné změny. U tohoto testu se obvykle aplikuje elektrický výboj na kovové části (chladiče světla) a plastový kryt.

Testováním nenapájeného zařízení se testují kovové části, piny napájecího konektoru a plastové části.

Load simulátor bude testován pouze na výstupní piny napájecího konektoru a kovový obal. Na obr. 6 je znázorněno blokové schéma zapojení testovacího pracoviště. Dle obr. 6 je patrné, že se do DUT aplikuje nastavený elektrostatický výboj pomocí ESD pistole z ESD generátoru. Vybíjecí ESD pistole je dále připojena k zemnicímu bodu. Je to z toho důvodu, aby všechna zařízení na pracovišti byla připojena k jednomu zemnímu potenciálu.



Obr. 6 Blokové schéma pro testování dle normy ISO 10605.

3. ROZVAHA NÁVRHU ZAPOJENÍ LOAD SIMULÁTORU

V této části se diplomová práce bude zabývat rozvahou základního jádra zapojení Load simulátoru.

V automobilovém průmyslu se pro návrh jednotlivých komponentů využívá mnoha norem. V této práci se budeme řídit hlavně normami SAE (sdružení automobilových inženýrů) a ECE (evropská hospodářská komise). Na základě těchto dvou norem je stanoven kmitočet a střída. U normy ECE se udává 1,25 Hz s poměrem střídy 1:1. U normy SAE se udává 1 Hz s poměrem střídy 1:3. Při návrhu zapojení je tyto normy potřeba zohlednit.

Nabízí se otázka, jak při návrhu postupovat a jaké zvolit základní řešení. Z hlediska efektivnosti by bylo nejvýhodnější při návrhu Load simulátoru použít digitální řešení, tedy zapojení s mikroprocesorem, pomocí kterého by byly velice jednoduše ovládány požadované parametry. Jelikož, je ale potřeba navrhnout Load simulátor, který bude umístěn do prostředí EMC komory, bylo by dle mého názoru velice složité vybrat nebo navrhnout pro ovládání Load simulátoru vhodný mikroprocesor, tak aby byly dodrženy stanovené limity, viz kapitola 1.

Při měření EMC ve firmě Marelli je výhodnější použít analogové řešení z následujících důvodů:

- při napájení Load simulátoru z vlastního akumulátoru chceme co nejdelší životnost bez nutnosti dobíjení,
- při zarušení Load simulátoru v EMC komoře nedojde k nastavení poslední úrovně,
- snazší návrh ochrany analogového zapojení vůči ESD.

Jelikož chceme Load simulátor napájet z vlastního akumulátoru je zapotřebí navrhnout obvod, který bude mít co nejmenší spotřebu. Pokud bude použito analogové zapojení, bude celková spotřeba Load simulátoru nižší než při zapojení s mikroprocesorem. Dle kapitoly 1.7 je nutné, aby byl Load simulátor odolný vůči elektromagnetickému poli při jednotlivých testech dle normy CISPR25 a ISO 11452-4. Pokud použijeme analogový návrh generování frekvence a střídy, dojde vlivem zarušení ke změně frekvence, např. z 1,25 Hz na 1,26 Hz a střídy z 50 % na 51 %. U digitálního obvodu by vlivem rušení zůstala nastavená poslední úroveň a následně by bylo zapotřebí Load simulátor resetovat [9]. Dle kapitoly 1.8 je nutné, aby Load simulátor byl odolný

vůči přímému elektrostatickému výboji na kontakt ± 8 kV a přímému elektrostatickému statickému výboji na kovový kryt ± 8 kV.

Z těchto uvedených důvodů bude navržen Load simulátoru s analogovým zapojením, a pouze s jednoduchou komunikací přes optické vlákno.

Nyní se nabízí otázka, jak nejefektivněji měnit frekvenci a střidu dle požadavků na Load simulátor, viz kap. 1.

Nejjednodušeji lze měnit kmitočet a střidu pomocí PWM generátoru. Pro správnou funkci PWM signálu, je potřeba vygenerovat signál pily. Pro vygenerování se nabízí řada způsobů, například obvod 555 nebo zapojení s operačními zesilovači. Nevýhodou obvodu 555 ve spojení s PWM generátorem je v regulaci frekvence a střidy v závislosti na řídicím napětí obvodu 555. Z toho důvodu, že komparátory v obvodu 555 mají omezenou prahovou úroveň nastavenou vnitřními odporovými děliči, by bylo nutné při každé změně frekvence přepočítat hodnotu rezistoru a kondenzátoru, viz [10].

Další podstatnou nevýhodou je použití obvodu 555 pro malé frekvence v řádech jednotek hertzů, protože by musel být použit rezistor s velkým odporem v řádu $1 \text{ M}\Omega$ a vysoká kapacita v řádu $1 \mu\text{F}$, viz [10], str. 11. Pro prostředí v EMC komoře by takto velká hodnota rezistoru nebyla dobrá, mohlo by dojít k rušení a zkreslení výstupního průběhu.

Další možností je použití tzv. chybového zesilovače s komparátorem a generátorem pilového průběhu viz [11]. U tohoto zapojení je nevýhoda nedostatečně velkého rozsahu regulace frekvence a střidy. Pokud je potřeba generovat jednotky nebo stovky hertzů, je potřeba změnit velikosti odporů a kondenzátorů. Toto schéma má svou jednoduchostí, výhodu při konstantním nastavením kmitočtu.

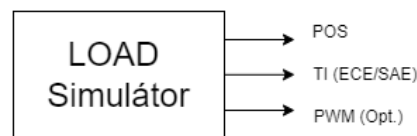
Aby bylo možné měnit frekvenci i střidu co nejpřesněji, bude použit pro generování pilového a obdélníkového průběhu napětím řízený oscilátor s komparátorem. Výhodou zapojení s napětím řízeným oscilátorem je možnost plynulého nastavování kmitočtu a střidy, bez nutnosti změny hodnoty rezistoru a kondenzátoru zároveň. VCO s PWM lze použít i pro konstantní nastavení frekvence a střidy.

Z důvodu každodenního používání Load simulátoru bude postupně docházet ke stárnutí součástek a mohlo by dojít k postupným změnám stanovené frekvence a střidy. Za účelem prodloužení životnosti Load simulátoru je vhodné použít analogového zapojení VCO s PWM s možností jemného doladění frekvence a střidy.

Nevýhodou tohoto typu zapojení je pouze nutné s vyšší frekvencí snížit hodnotu kondenzátoru v zapojení integrátoru. Dle nastavení poměru rezistorů Schmittova klopného obvodu v zapojení VCO je možné nastavovat pilový průběh.

3.1 Schéma zapojení Load simulátoru

Tato kapitola se zabývá podrobným návrhem zapojení celkem tří výstupů Load simulátoru. Kapitola 3.1.2 obsahuje návrh zapojení PWM generátoru pro směrové světlo (TI). Směrové světlo bude mít v Load simulátoru přepínatelný výstup, podle norem ECE a SAE. Kapitola 3.1.3 se zabývá návrhem zapojení PWM generátoru pro poziční světlo (POS). Třetí výstup Load simulátoru bude obsahovat PWM generátor s komunikací po optickém vláknu. Výstupy Load simulátoru jsou pro představu zjednodušeně znázorněny na obr. 7. Při návrhu zapojení je nutné dbát předepsaných požadavků na napájecí napětí a proud, frekvence a střihu a v neposlední řadě na odolnosti vůči elektromagnetickému a elektrostatickému poli, viz kapitola 1. Zejména je nutné z hlediska nízkého šumu a nízké citlivosti použít součástky vhodné pro automobilový průmysl.



Obr. 7 Očekávané výstupy Load simulátoru.

3.1.1 Zapojení napětím řízeného oscilátoru

Obvodů VCO (napětím řízených oscilátorů) existuje celá řada. Mezi tyto obvody v analogové technice patří nejčastěji zapojení s diodami, bipolárními a unipolárními tranzistory a operačními zesilovači. V této práci bude z hlediska jednoduchosti použito zapojení s operačními zesilovači.

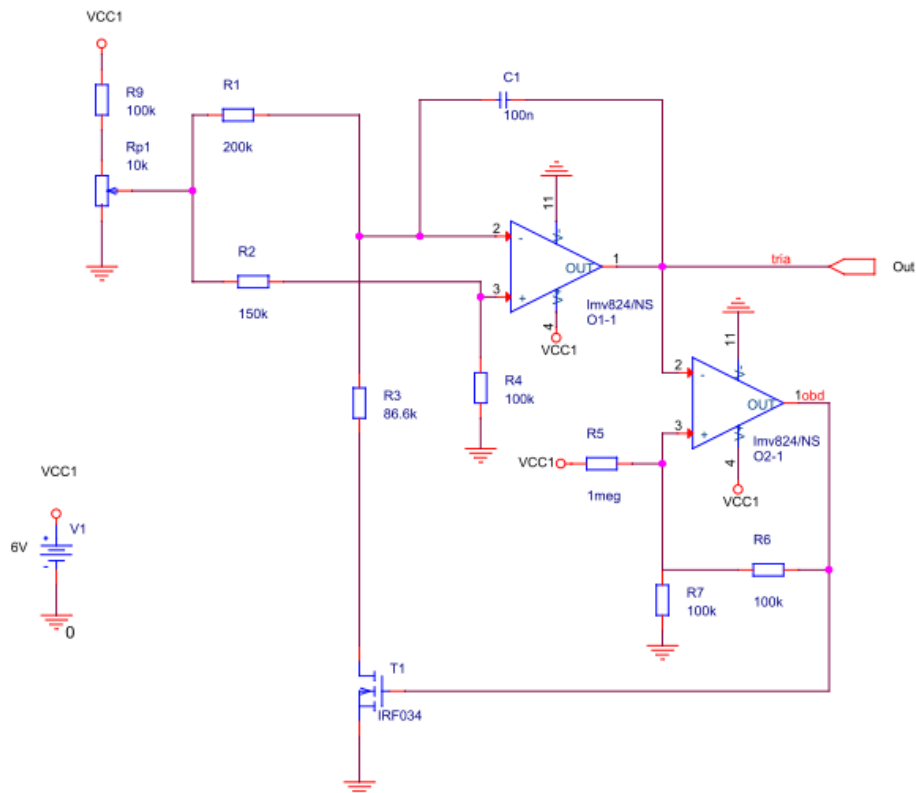
Při návrhu základního jádra zapojení pro generování PWM signálu Load simulátoru, se vyšlo z napětím řízeného oscilátoru ze zdroje [12]. Analogové schéma zapojení viz obr. 8 obsahuje dva operační zesilovače typu rail-to-rail, z toho důvodu, aby bylo možné dosáhnout na výstupu plného napájecího napětí. Ve schématu, viz obr. 8 jsou použity pro simulaci v OrCAD operační zesilovače dostupné z knihovny s označením LMV824 [13]. Tento operační zesilovač svým vnitřním zapojením a funkcí splňuje požadavky pro automobilový průmysl. Ve schématu zapojení, obr. 8, má operační zesilovač O_{1-1} na svou kladnou i zápornou svorku přivedenou stejnou úroveň napětí, která je nastavena jednotlivými odporovými děliči.

Hodnoty rezistorů R_1 , R_2 , R_3 a R_4 byly určeny dle simulace na základě zvolené hodnoty kondenzátoru $C_1 = 100$ nF. Potenciometrem R_{p1} s předřadným rezistorem R_9 se nastavuje vstupní napětí odporových děličů R_1 , R_3 a R_2 , R_4 . V závislosti změny

vstupního napětí se na výstupu O_{1-1} mění doba trvání jedné periody a tím i frekvence, v tomto případě frekvence pilového průběhu.

Aby bylo dosaženo rovnoramenného pilového průběhu je v zapojení VCO použit operační zesilovač O_{2-1} . Zapojení s operačním zesilovačem O_{2-1} představuje invertující Schmittův klopný obvod. Rezistory R_5 , R_6 a R_7 je nastavena hystereze.

Unipolární tranzistor T_1 je v obvodu zapojen jako vybíjecí tranzistor. To znamená, že v závislosti na spínání tranzistoru dochází k nabíjení nebo vybíjení kondenzátoru C_1 , a tedy k náběžné nebo sestupné hraně na výstupu integrátoru.



Obr. 8 Schéma zapojení VCO. Schéma vytvořeno v OrCAD Capture.

Pro kmitočet 1,25 Hz se zvolí kondenzátor 100 nF. Z hlediska dodržení rovnoramenného pilového průběhu, je potřeba dodržet správný poměr rezistorů. Rezistor R_3 by měl dosahovat poměru více než jedné poloviny hodnoty rezistoru R_1 . Rezistor R_2 je vůči rezistoru R_4 nastaven v poměru 1,5:1. Pomocí postupné analýzy obvodu se dojde k rovnici, viz. 3.1:

$$f = \frac{I_1 * I_2}{C_1(U_H - U_L) * (I_1 + I_2)} = \quad (3.1)$$

$$= \frac{723 \cdot 10^{-9} * 720 \cdot 10^{-9}}{100 \cdot 10^{-9} * (3,143 - 0,285) * (723 \cdot 10^{-9} + 720 \cdot 10^{-9})} =$$

$$= 1,26 \text{ Hz.}$$

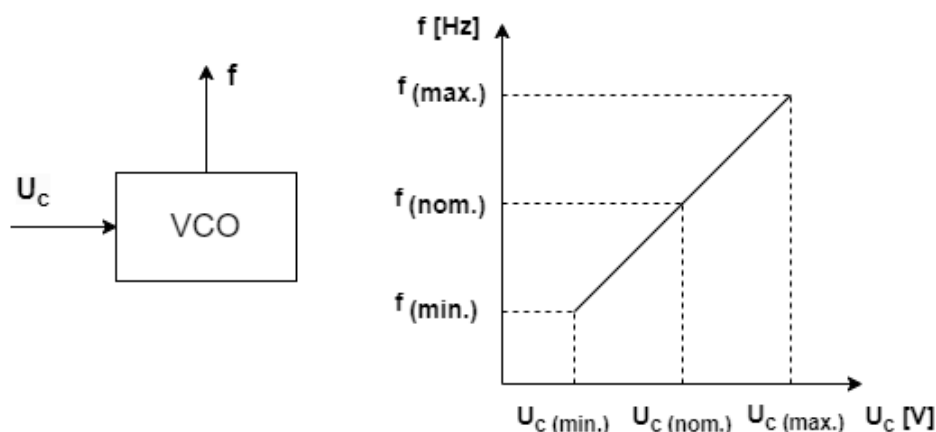
Vlivem nastavení hodnoty rezistoru R_{PI} se mění výstupní napětí děliče. Úroveň výstupního napětí z napěťového děliče je nastavena prahová hodnota na vstupu operačního zesilovače. Proud I_1 je proudem děliče R_1 a R_2 a proud I_2 je proudem děliče R_3 a R_4 .

Dle vzorce (3.1) je patrné, že s rostoucí frekvencí a konstantní hodnotou C_1 , bude zapotřebí snižovat hodnotu rezistoru R_{PI} . Pro zachování správného poměru mezi hodnotami rezistorů je výhodnější pro vyšší frekvenci změnit hodnotu kondenzátoru. Rezistory R_5 , R_6 , R_7 je nastaveno referenční napětí. To má vliv na obdélkový průběh. Referenční napětí lze vypočítat takto:

$$U_+ = \frac{R_5}{R_5 + R_6 || R_7} * U_{REF} + \frac{R_6 || R_7}{R_5 + R_6 || R_7} * U_{CC} =$$

$$= 1,779 \cdot 10^{-3} * \frac{1 \cdot 10^6}{1 \cdot 10^6 + 50 \cdot 10^3} + \frac{50 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6 + 50 \cdot 10^3} * 6 = 0,2845 \text{ V.} \quad (3.2)$$

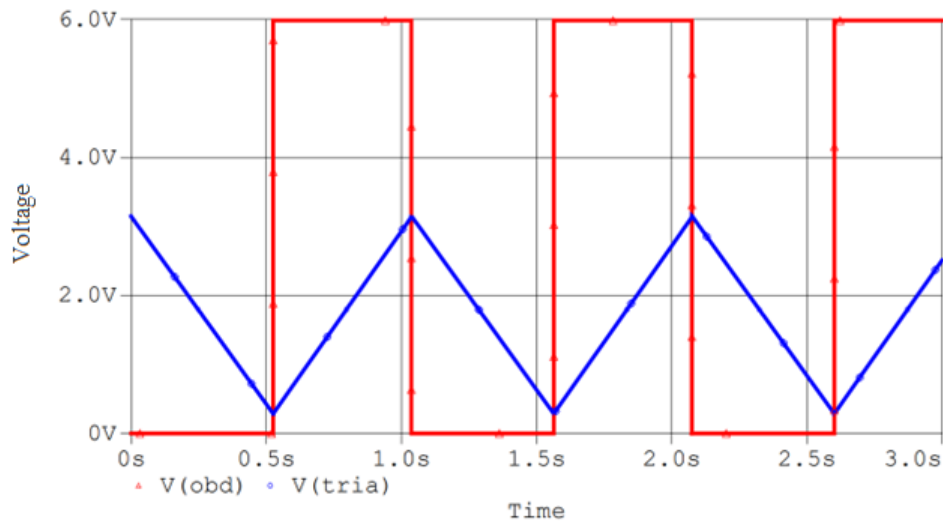
Z obr. 9 je patrné, že se zvyšujícím se vstupním napětím VCO roste kmitočet.



Obr. 9 Grafické znázornění principu VCO.

Dle výsledného schématu zapojení, viz obr. 8, je patrné, že operační zesilovač O_{1-1} je zapojen jako integrátor. Na výstupu z integrátoru je pilový průběh napětí, který má rozsah

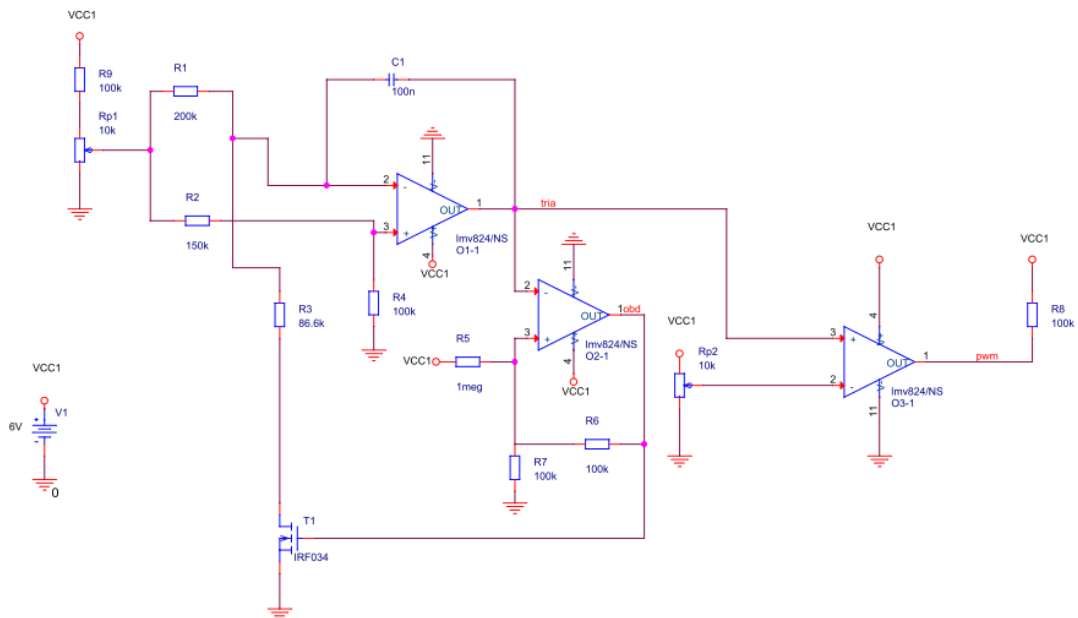
od 0,3 V do 3 V, viz obr. 10. Perioda obdélníkového a pilového signálu je jedna vteřina. Operační zesilovač O_{2-1} je ve schématu zapojen jako invertující Schmittův klopný obvod.



Obr. 10 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO.

3.1.2 Zapojení PWM generátoru pro řízení směrových světel

V této kapitole je schéma napětím řízeného oscilátoru doplněno o komparátor O_{3-1} , viz obr. 11. Na vstupu operačního zesilovače O_{3-1} je mezi kladnou a zápornou svorkou porovnáváno vstupní napětí. Invertující vstup komparátoru je připojen přes potenciometr R_{p2} , který v obvodu zajišťuje změnu střídy.



Obr. 11 Schéma zapojení generátoru PWM s obvodem VCO pro výstup na TI.
Obr. byl vytvořen v OrCAD Capture.

Výpočet střídy je dán vztahem, viz (3.3). Ve výpočtu jsou uvažovány teoretické hodnoty součástek bez tolerance. Jelikož bude ve výsledném schématu zapojení umístěn

trimr na přesné doladění střidy, nebylo nutné analyzovat vliv tolerance jednotlivých součástek. Střidu lze vypočítat z maximálního a z minimálního napětí pilového průběhu:

$$D = \frac{\frac{R_{17}}{R_{16} + R_{17}} * U_{CC}}{U_{out(tria)} + \frac{R_6 || R_7}{R_5 + R_6 || R_7} * U_{CC}} * 100 =$$

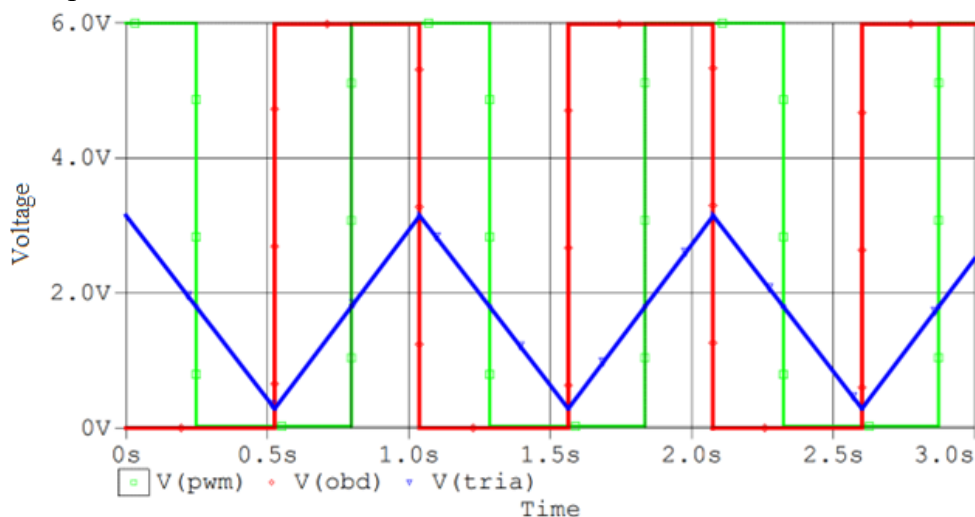
$$= \frac{\frac{2070}{10 \cdot 10^3 + 2070} * 6}{3,146 + \frac{50 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6 + 50 \cdot 10^3} * 6} * 100 = 30 \%, \quad (3.3)$$

kde jmenovatel $U_{out(tria)}$, značí výstupní napětí na výstupu integrátoru v součtu s napětím úrovně Schmittova klopného obvodu. V čitateli zlomku je referenční napětí na invertujícím vstupu komparátoru. Podíl těchto dvou hodnot udává výslednou střidu.

Dle vzorce je patrné, že snižováním rezistoru R_{17} , bude klesat i napětí invertujícího vstupu operačního zesilovače a dojde tak ke snižování střidy. Pokud se bude napětí zvyšovat, střida poroste. Rezistory s označením R_{16} a R_{17} představují napěťový dělič. Ve schématu viz obr. 11 je napěťový dělič nahrazen potenciometrem R_{p2} .

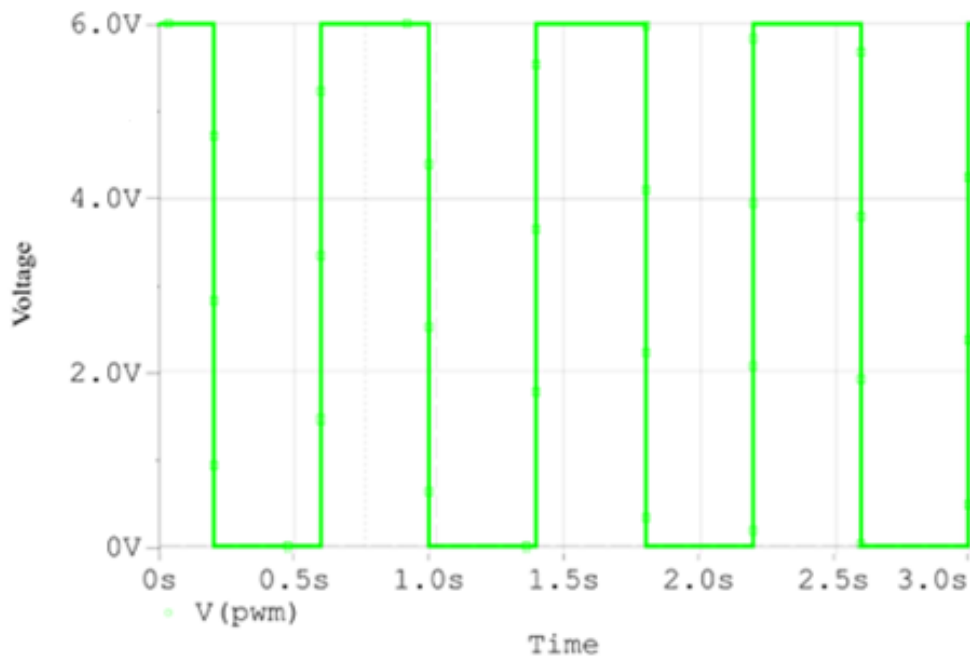
V zapojení Load Simulátor bude nutné měnit střidu v závislosti na použité normě ECE nebo SAE, při testování předního světlometu. Ve firmě Marelli Automotive Lighting se při měření obvykle používá střida 10%, 33%, 50% a 100%. Pro vyzkoušení změny střidy je do obvodu brán v úvahu potenciometr.

Na obr. 12 je znázorněn průběh na výstupu VCO (modře) a průběh na výstupu komparátoru PWM (zeleně). Červený průběh představuje nastavení komparačních úrovní pilového průběhu VCO.



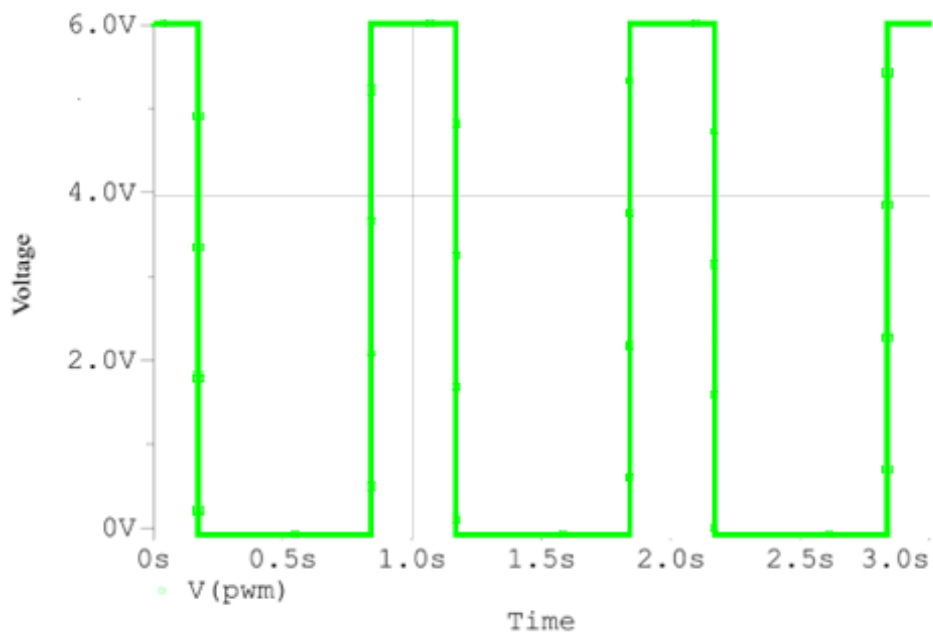
Obr. 12 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO s PWM výstupem.

Na obr. 13 je vidět výstupní signál PWM generátoru pro frekvenci 1,25 Hz, která představuje frekvenci dle normy ECE. Střída je nastavena na 50%. Dále je z průběhu patrné, že napěťová úroveň je využita v celém rozsahu napájecího napětí od 0 V do 6 V.



Obr. 13 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 0,8s$.

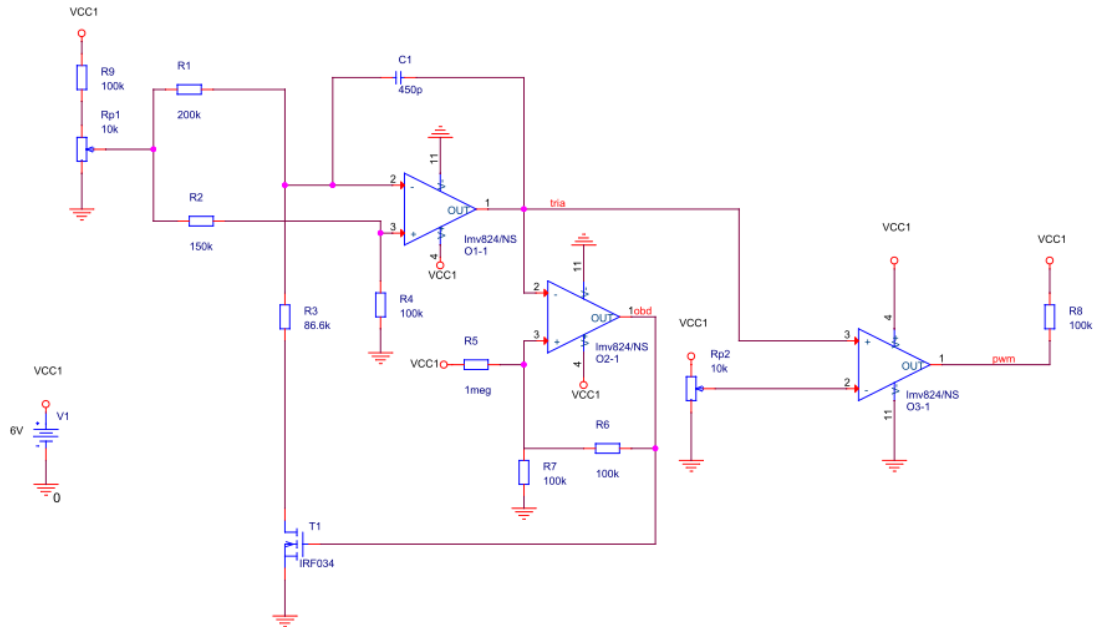
Obr. 14 obsahuje výstup PWM generátoru o frekvenci 1 Hz. Tato frekvence představuje signál dle normy SAE.



Obr. 14 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 1s$.

3.1.3 Zapojení PWM generátoru pro řízení pozičních světel

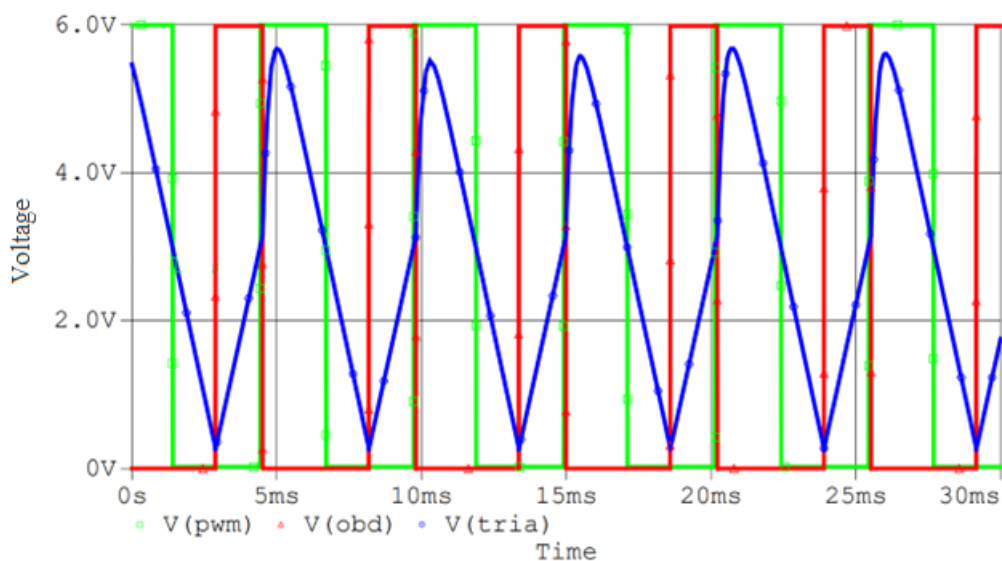
Druhý výstup Load simulátoru je pro poziční světlo. Návrh zapojení napěťového výstupu pozičního světla (POS), viz obr. 15, je téměř stejné, jako u směrového světla, pouze je potřeba snížit hodnotu integračního kondenzátoru C_1 , aby bylo možné dosáhnout kmitočtu od 100 Hz do 1 kHz.



Obr. 15 Schéma výstupu PWM generátoru pro POS.
Schéma vytvořeno v OrCAD Capture.

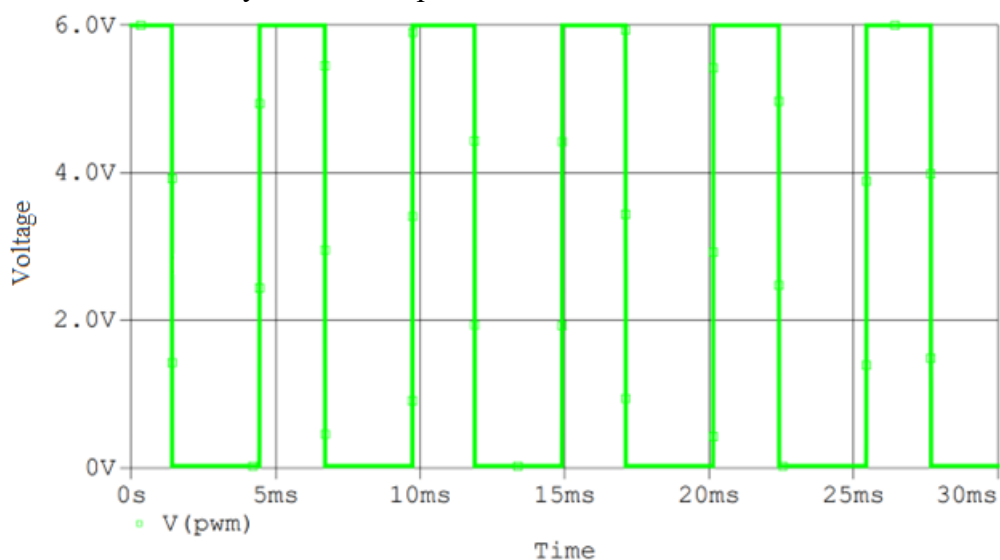
Na obr. 16 jsou simulovány průběhy z výstupu VCO a výstupu PWM generátoru. Nízkou hodnotou kondenzátoru došlo u simulace ke zkreslení pilového průběhu. Jelikož je pro nás důležitý výstup z PWM generátoru, nebylo toto zkreslení dále řešeno.

Dále je z průběhu viz obr. 16 patrné, že výstupní napětí je spínáno v celém rozsahu 0 V – 6 V.



Obr. 16 Průběh pilového a obdélníkového signálu VCO s PWM výstupem.

Na obr. 17 je znázorněn průběh na výstupu PWM generátoru pro výstup na poziční světlo. Pro znázornění byl simulován průběh o frekvenci 200 Hz a střídě 30 %.

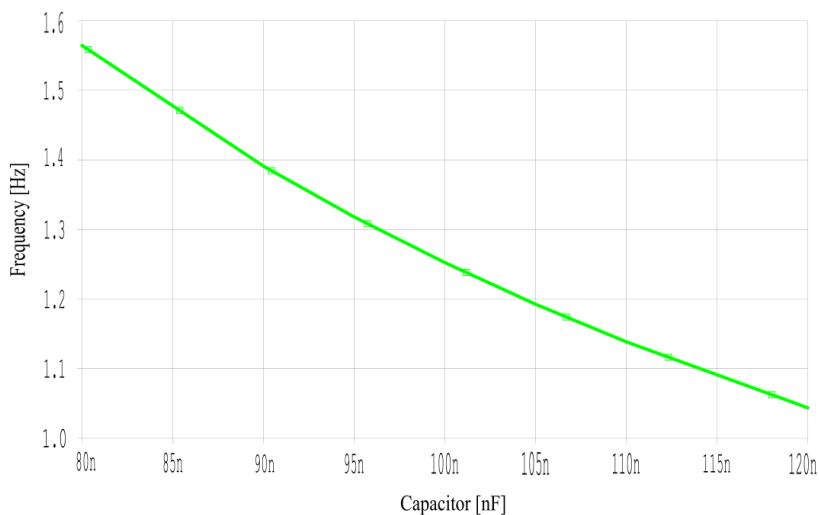


Obr. 17 Simulovaný průběh výstupního napětí generátoru PWM. $T = 5$ ms.

3.1.4 Vliv tolerance kapacity integračního kondenzátoru u generátoru PWM

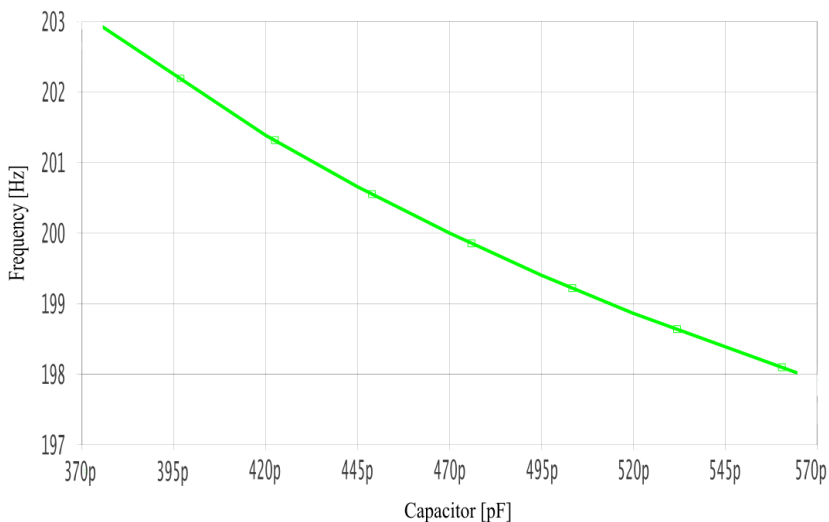
Tolerance kondenzátoru je důležitou součástí při návrhu obvodů určených pro automobilový průmysl. Je žádoucí ve schématu použít součástky s co nejmenší tolerancí. Hlavní vliv na toleranci u kondenzátorů má způsob provedení dielektrika. Nejpoužívanějšími dielektriky u kondenzátorů jsou X7R, které mají výrobní toleranci nejčastěji $\pm 5\%$ až $\pm 20\%$. Obr. 18 představuje vliv kapacity kondenzátoru s použitím

dielektrika X7R. Na obr. 18 je patrné, že s rostoucí hodnotou kapacity klesá frekvence a naopak. Pokud by byl použit kondenzátor s tolerancí 20 %, mohla by se frekvence změnit až o $\pm 0,2$ Hz. Z tohoto důvodu je zapotřebí použít kondenzátor s co nejnižší tolerancí. Pro účely co nejnižší tolerance jsou určeny kondenzátory s dielektrikem NP0 (C0G), které mají výrobní toleranci nejčastěji $\pm 1\%$ až $\pm 5\%$.



Obr. 18 Závislost kapacity $\pm 20\%$ od nominální hodnoty 100 nF integračního kondenzátoru na výstupní frekvenci PWM generátoru.

Na obr. 19 je vidět vliv kondenzátoru 470 pF s tolerancí do 20 %. Rozdíl mezi tolerancí $\pm 20\%$ je téměř 3 Hz. Z tohoto důvodu je zapotřebí vybrat kondenzátor s tolerancí 1 %, u kterého dojde ke změně frekvence o 0,1 Hz.



Obr. 19 Závislost kapacity $\pm 20\%$ od nominální hodnoty 470 pF integračního kondenzátoru na výstupní frekvenci PWM generátoru.

Z obr. 18 a obr. 19 je patrné, že s rostoucí kapacitou kondenzátorů se snižuje frekvence a naopak. Podle kapitoly 1.3 je dán limit tolerance frekvence $\pm 1\%$. Z tohoto důvodu byl do schématu vybrán keramický kondenzátor s dielektrikem NP0 (C0G), který má deklarovanou toleranci maximálně $\pm 1\%$, což je frekvenčně posun maximálně od 1,24 Hz do 1,26 Hz.

Při návrhu schéma zapojení nebyl zkoumán vliv tolerance u rezistorů. V celkovém schéma zapojení budou použity rezistory s přesností $\pm 1\%$. Jelikož budou v zapojení pro přesné doladění frekvence a střídny použity trimry, nebylo nutné zkoumat vliv tolerance $\pm 1\%$ u rezistorů.

3.2 Výběr komponent pro Load simulátor

V této kapitole bude popsán výběr jednotlivých komponent Load simulátoru. Dle požadavků v kapitole 1 by komponenty měly mít co nejlepší odolnost vůči ESD, co nejmenší výrobní toleranci a co nejmenší napěťovou závislost. Z tohoto pohledu se jako nejlepší volba jeví komponenty vhodné pro automobilového prostředí, protože jsou na ně kladeny vysoké požadavky.

3.2.1 Návrh akumulátorového napájení

Největší součástí přípravku Load simulátor bude baterie. Z tohoto důvodu, je dobré se snažit vybrat co nejmenší možnou baterii. Nejlepším řešením jsou akumulátory LiPo, které jsou primárně určeny pro modelářský průmysl. Tyto akumulátory mají na svou velikost dostatečně velkou kapacitu a lze je dobíjet.

Akumulátor byl vybírán na základě jmenovitého napětí, které je nutné potřeba k zajištění sepnutí výkonového spínače. Pro sepnutí výkonového spínače BTS6163D viz [14], bylo nutné vybrat akumulátor s minimálním napětím 5,5 V.

Pro Load simulator byl vybrán akumulátor LiPo [14], viz obr. 20, který se skládá ze dvou článků. Výstupní napětí akumulátoru je 7,4 V a kapacita baterie je 1300 mAh. Z důvodu dostatečně velké kapacity baterie může být tato baterie použita i na zařízení s vyšším odběrem. Celkové rozměry akumulátoru jsou: 100 mm x 31 mm x 16 mm, takže jej lze díky svým rozměrům snadno implementovat do vybrané krabičky.

Nabíjení akumulátoru bude řešeno externí nabíječkou, která bude schopná nabíjet 2 bateriové články. Nabíjení akumulátoru [14] bude přes tři pinový bílý konektor

JST – XH, kdy červený a prostřední černý vodič je kladný pól jednotlivého článku a krajní černý vodič je společný záporný pól obou článků.



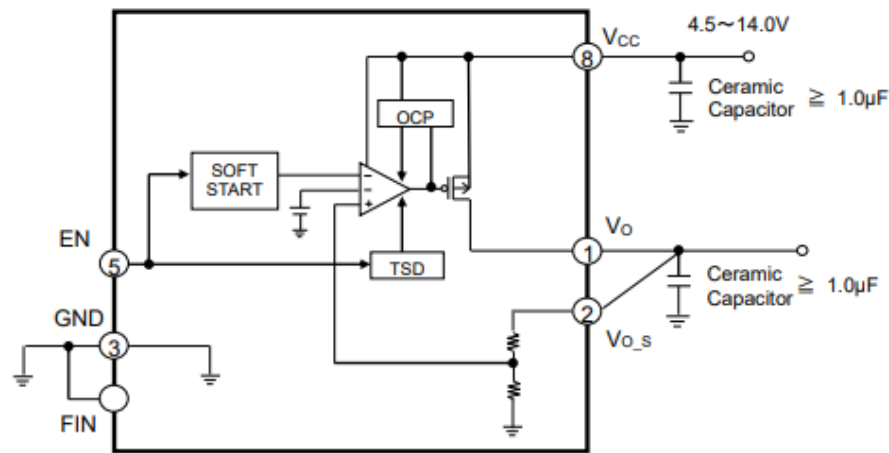
Obr. 20 Akumulátor Li-Po. Obrázek převzat ze zdroje [15].

3.2.2 Stabilizátor napětí

Aby nedocházelo při změnách proudu ke kolísání napětí z baterie, bylo potřeba vybrat vhodný napěťový stabilizátor. Jelikož napětí z akumulátoru je 7,4 V a na sepnutí tranzistoru je potřeba alespoň 5,5 V, byl vybrán napěťový regulátor s nízkým úbytkem napětí LDO (Low dropout regulator), který má rozsah vstupního napětí od 4,5 V do 14 V. Napěťový regulátor má označení BD60GA3MEFJ [16], dle katalogového listu se lze dočíst, že je vhodný i pro automobilový průmysl. Tento typ regulátoru udržuje na svém výstupu konstantní napětí 6 V. Pro sepnutí výkonového spínače, který potřebuje alespoň 5,5 V je v rezervě 0,5 V. Na základě technického listu dle [16], byly určeny blokovací kondenzátory C_{IN} a C_{OUT} . Oba kondenzátory byly zvoleny dle doporučení 2,2 μ F.

Z hlediska ochrany proti ESD je tato součástka velmi citlivá. Jelikož bude napěťový regulátor s nízkým úbytkem připojen pouze k akumulátoru LiPo, nebude tak vystaven přímému elektrostatickému výboji. Z tohoto důvodu zde potřeba zvláštní ochrana

proti ESD. Na obr. 21 je znázorněno vnitřní zapojení LDO s blokovacím kondenzátorem na jeho vstupu a výstupu.



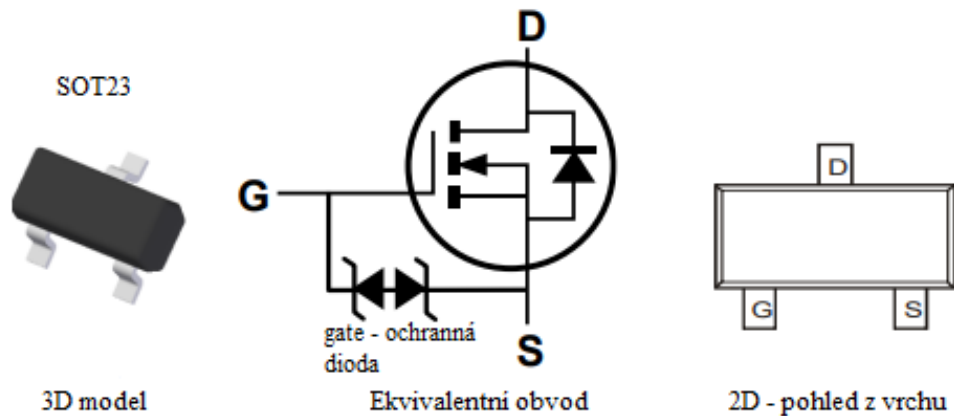
Obr. 21 Vnitřní zapojení LDO. Obr. převzat z [16], str. 3.

3.2.3 Operační zesilovač

Na základě požadovaného napájecího napětí a dostupnosti ve skladových zásobách ve firmě Marelli, byl vybrán operační zesilovač OP262GSZ [17]. Operační zesilovač má rozsah napájecího napětí od 2,7 V do 12 V. Z katalogového listu [16] se lze dočíst, že zesilovač je nízko šumový s nízkým maximálním offsetem 325 μ V. Jelikož je operační zesilovač nízko šumový, je u něj částečně minimalizován vznik rušení. Ochrana vůči ESD není pro tento typ operačního zesilovače nikde uvedena. Z tohoto důvodu je zapotřebí při návrhu DPS dbát zvýšené pozornosti na patřičné ochrany proti ESD.

3.2.4 Unipolární tranzistor

Dle návrhu schéma zapojení viz obr. 8, byl pro simulaci obvodu použit tranzistor *T1* s označením IRF034, který byl volně dostupný v knihovně PSPICE programu Capture. V reálném schématu zapojení bude použit unipolární tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem s označením 2N7002KQ [18], který se sice liší svými parametry od tranzistoru IRF034, ale byl vybrán i na základě dostupnosti ve skladových zásobách ve firmě Marelli. Ekvivalentní obvod je pro představu znázorněn na obr. 22. Z tohoto důvodu je tento typ tranzistoru vhodný i pro použití v automobilovém průmyslu. Na výslednou funkčnost zapojení nebude mít výběr unipolárního tranzistoru z hlediska svých parametrů vliv. Dle datového listu se lze dočíst, že tranzistor má ve svém pouzdru zabudovanou ESD ochranu pomocí ochranných diod, které jsou zapojeny mezi gain a source. Maximální ochrana tranzistoru proti elektrostatickému výboji je 2 kV.



Obr. 22 Unipolární tranzistor 2N7002KQ. Obr. převzat ze [18].

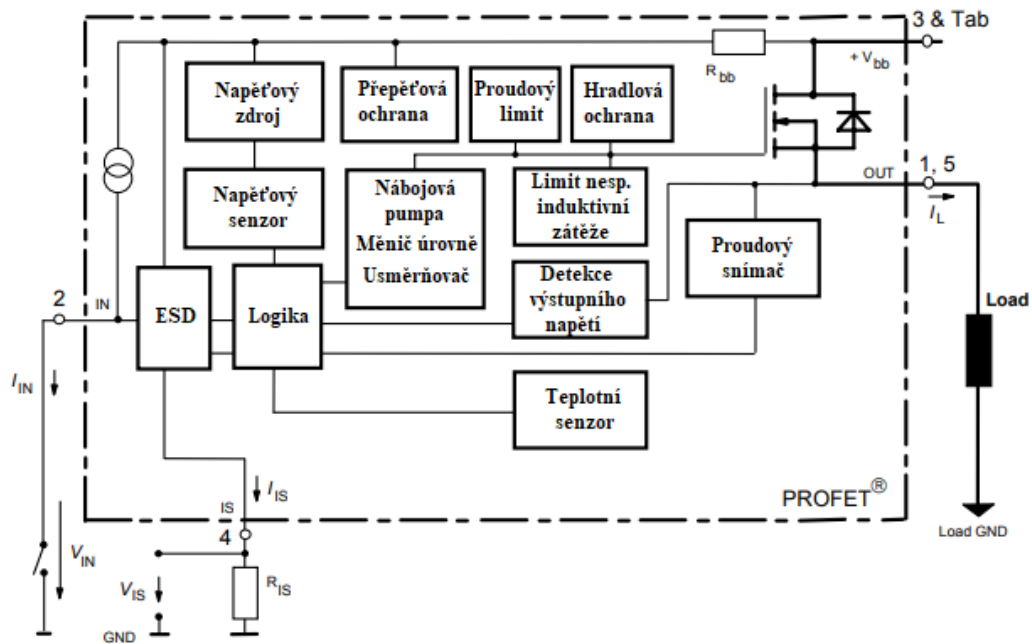
3.2.5 Výkonový spínač

Výkonový spínač [14] byl vybrán za účelem dostatečné ochrany Load simulátoru a koncového zařízení před rušivými elektro-magnetickými a elektrostatickými proudy, při měření v EMC komoře. Podle datového listu se lze dočíst, že výkonový spínač je nutné spínat v napěťovém rozsahu od 5,5 V do 62 V. Napájecí napětí bude přivedeno na svorku 3 a Tab, výstup výkonového spínače bude na svorkách 1 a 5, viz obr. 23. Při uvažování napájecího napětí 12 V z autobaterie a teplotě 25 °C bude odpor v sepnutém stavu typicky 16 mΩ. Díky nízkému odporu bude zajištěna velká rychlost spínání, nebudou tak vznikat velké ztráty a tranzistor se bude méně zahřívat. Z tohoto důvodu nebude nutné k tranzistoru doplňovat externě chladič.

Dle blokového schéma zapojení, viz obr. 23 je patrné, že výkonový spínač má mnoho vnitřních ochranných obvodů: ochranu proti elektrostatickému výboji, ochranu proti přepětí na výstupu a vnitřní logické části, dále ochranu proti přepólování, a nakonec detekce zkratu a přetížení. V datovém listu [14], na straně 9 až 11, jsou jednotlivá zapojení detailně popsána.

Ochrana proti elektrostatickému výboji je dle katalogového listu 3 kV. Jelikož bude na vstupu i výstupu z výkonového spínače připojen blokovací kondenzátor a zemní

potenciál bude uzemněn i s kovovou krabičkou, je z tohoto důvodu vnitřní ochrana výkonového spínače dostatečná.



Obr. 23 Blokové schéma vnitřního zapojení výkonového spínače BTS6163D.
Obr. převzat z [14], str. 1.

Ve schématu zapojení Load simulátoru je na vstupní svorce IN výkonového spínače zapojen externě tranzistor T2. Na obr. 23 lze vidět, že vstup je řízen proudem, pomocí proudového zdroje. Z tohoto důvodu tam je zapojen externí tranzistor T2, který slouží ke spínání v celém rozsahu řídicího napětí od 0 V do 6 V. Tranzistor T2 je na vstupu výkonového spínače připojen z důvodu doporučení výrobce, kde je viz obr. 23 znázorněn spínač proti zemi. Ve schématu zapojení bude obvod rozdělen na výkonovou část, potenciál bude mezi svorkami 3/Tab a Load GND. Dále řídicí část, potenciál bude mezi svorkami 3 a GND.

3.2.6 Výběr pasivních součástek

Při návrhu Load simulátoru je také nutné vybrat správné pasivní součástky, které jsou z hlediska svých vlastností vhodné pro automobilový průmysl. Je totiž zapotřebí, aby Load simulátor vydržel zátěžové testy při EMC měření u testů RE, CE a BCI. V automobilovém průmyslu se obvykle používají součástky, dle dokumentu AEC (Automotive Electronic Council). Pro pasivní součástky v automobilovém průmyslu spadá kvalifikace dle AEC-Q200 [19]. V této dokumentaci se lze například dočíst o tom, že součástky v automobilovém průmyslu musí mít rozšířenou teplotní stabilitu od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jelikož je samotný Load simulátor uvažován do laboratorního prostředí, bude uvažována teplota $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z tohoto důvodu není potřeba se detailněji zabývat teplotním rozsahem dle dokumentu [19], ale je potřeba se zabývat dalšími důležitými vlastnostmi

součástek, mezi které patří způsob provedení, tolerance komponenty a její výkonová zatížitelnost.

Na základě uvedených vlastností budou použity pasivní součástky v provedení SMD. Výhodou SMD součástek bude jejich snazší povrchová montáž, z toho důvodu, že bude DPS připevněna ke krabici a v případě optimalizace na DPS by se musela celá DPS vyndat. Pokud by byly použity THT součástky, musela by DPS být u každé součástky prokovená a její montáž by byla náročnější.

Dle dostupných součástek ve firmě Marelli budou vybrány pasivní součástky primárně s pouzdrem 0603. U rezistorů budou vybrány komponenty s tolerancí 1 %. Kondenzátory budou vybrány na základě kapitoly 3.1.4, ve které byly zkoumány vlivy tolerance kondenzátoru na funkčnost zapojení. Kondenzátory, které mají vliv na funkci zapojení budou vybrány s dielektrikem NP0/C0G, s tolerancí 1 %. Pro vazební kondenzátory budou vybrány kondenzátory s dielektrikem X7R, které mají toleranci 5 %.

3.2.7 Výběr optického přijímače

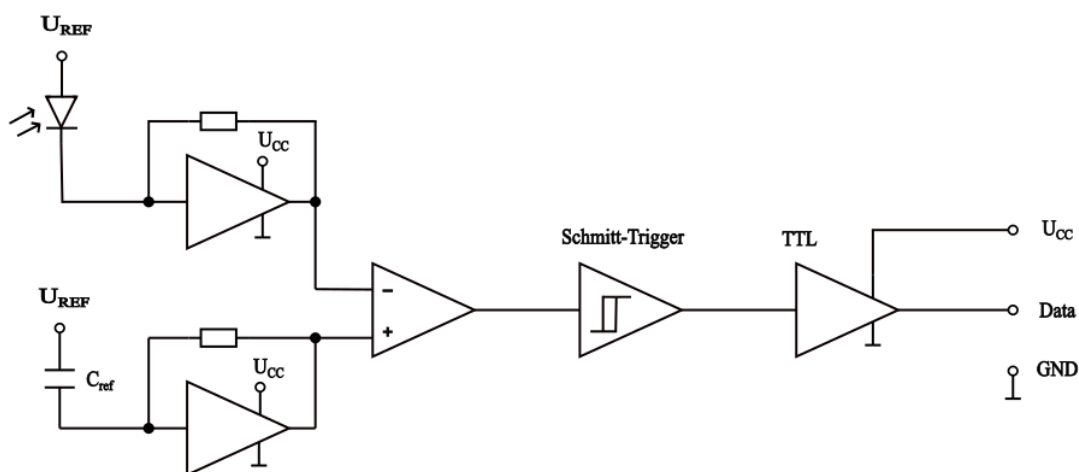
Třetím výstupem Load simulátoru bude směrové a poziční světlo řízené přes optické vlákno. Řízení přes optické vlákno je potřeba v případě, že je zapotřebí nastavit jinou (nestandardní) výstupní frekvenci nebo střidu, než je dáno dle norem viz kapitola 1. To nastává obvykle v případech, kdy se testuje světlomet určený pro asijský trh.

Funkce optického přijímače v Load simulátoru je z principu jednoduchá. Na vstup optického přijímače bude přiveden nastavený signál z externího signálového generátoru. Na výstupu z optického přijímače bude řídicí signál ovládat výkonový spínač. Výstup výkonového spínače, tedy třetí výstup Load simulátoru, bude ovládat definovaný nestandardní parametr, např. směrové světlo (TI), poziční světlo (POS) a další.

Z uvedeného důvodu je proto zapotřebí vybrat správný optický přijímač. Jako nejlepší se jeví přijímací fotodiody v kombinaci se zesilovačem v jednom pouzdru. Na základě vhodných parametrů byl vybrán optický přijímač SFH551V [20], který má na svém výstupu TTL logiku. Dle katalogového listu má optický přijímač nominální vlnovou délku 650 nm. Rozsah vlnové délky je od 600 nm do 780 nm. Z datového listu se lze dočíst, že typický útlum vlákna mezi vysílačem a přijímačem je 0,2 dB/m při teplotě 25 °C. Pokud budeme uvažovat umístění Load simulátoru (přijímače) od vysílače zhruba 5 m, bude útlum vlákna 1dB/5m. Výhodou optického přijímače SFH551V je jeho plná kompatibilita s optickým vysílačem SFH756V. Z katalogového listu se lze dále dočíst, že optický přijímač má nízkou hodnotu spínání, je zapotřebí alespoň 6 μ W. Strmost náběžné bude maximálně 30 ns a strmost sestupné hrany bude maximálně 15 ns.

Zapojení optického přijímače SFH551V, viz obr. 24, se skládá z fotodiody, trans-impedančního zesilovače, Schmittova spínače a TTL obvodu. Obvod funguje za principem zpracování světelného záření na výstupní data. Fotodiody, na kterou dopadají světelné paprsky, generuje elektrický proud. Následuje trans-impedanční zesilovač, který převede elektrický proud na napětí. Rezistorem ve zpětné vazbě trans-

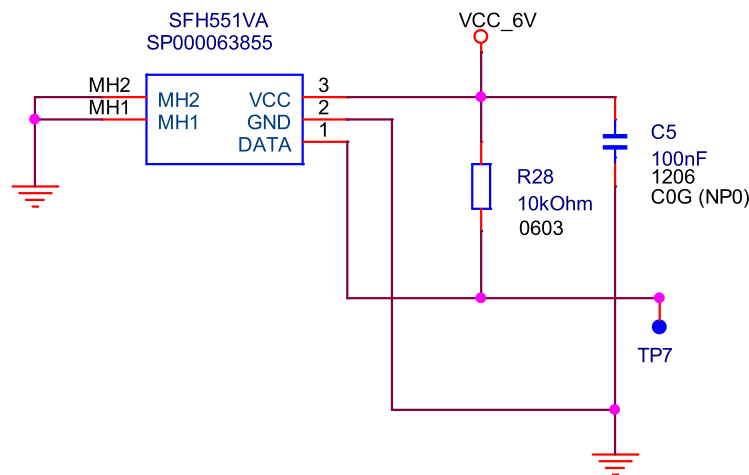
impedančního zesilovače je nastavována konverze proudu na napětí. Další součástí je diferenciální zesilovač, u kterého je na vstupu porovnáno výstupní napětí z trans-impedančního zesilovače s referenčním napětím. Podle referenčního napětí je nastavována vysoká nebo nízká úroveň. Aby při postupném zvyšování signálu k rozhodovacímu prahu nedošlo k šumu, a tedy k nedefinovanému stavu, je nutné použít Schmittův spínač. Díky tomu jsou přepínány různé prahové hodnoty. Posledním obvodem ve vnitřním zapojení optického přijímače je TTL. Na výstupu obvodu TTL dochází k přepínání mezi vysokou úrovní – logická jednička a nízkou úrovní signálu – logická nula.



Obr. 24 Schéma vnitřního zapojení optického přijímače SFH551V.
Obr. převzat z [20].

V katalogovém listu se lze dočíst, že optický přijímač SFH551V funguje při napájecím rozsahu napětí od 4 V do 15 V. V zapojení s výkonovým spínačem bude na napájecí vstup optického přijímače přivedeno napájecí napětí výkonového spínače, které bude 12 V. Z tohoto důvodu je rozsah napájecího napětí optického přijímače dostatečný. Dále se lze dočíst, že minimální hodnota pull up rezistoru by měla být 330 Ω .

Z důvodu snížení odběru bude v zapojení, viz obr. 25 použit rezistor 10 k Ω . Doporučená hodnota blokovacího kondenzátoru je 100 nF.



Obr. 25 Zapojení optického přimače s pomocným obvodem dle katalogového listu výrobce [20].

Z hlediska ochrany proti elektrostatickému výboji by měl být optický přijímač SFH551V schopen vydržet elektrostatický výboj 2 kV.

3.2.8 Optický vysílač

Optický vysílač bude umístěn na výstupu z externího signálového generátoru, který se bude nacházet mimo Load simulátor a mimo EMC komoru. Je zapotřebí, aby vlnová délka optického vysílače byla v rozsahu 600 nm – 780 nm. Optickým vysílačem byl vybrán SFH756V [21], který je plně kompatibilní s optickým přijímačem SFH551V [20], jehož vlnová délka je 660 nm. Součástí zapojení optického vysílače je parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou. Podle datového listu optického vysílače SFH756V je uvažován nominální proud 10 mA a nominální napětí je uvažováno 2,4 V. Tyto hodnoty jsou zvoleny na základě zapojení pomocného obvodu optického vysílače. Pro pull up rezistor byla vypočítána hodnota z uvažovaného napětí a proudu 240 Ω .

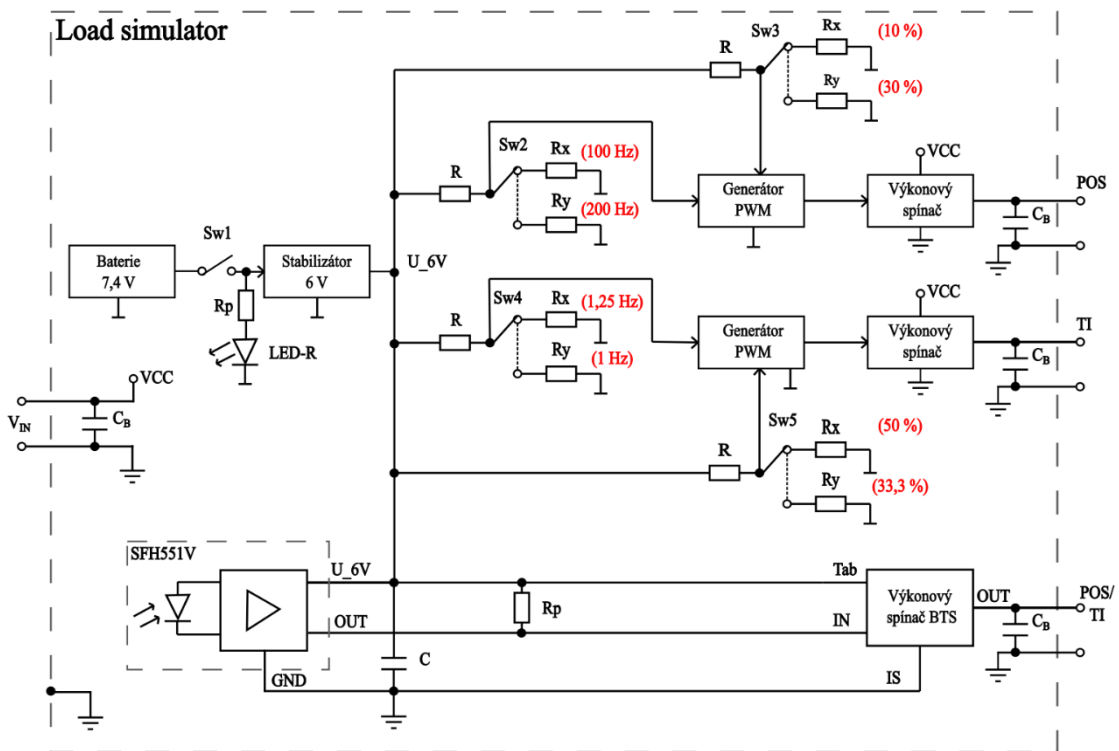
3.3 Blokové schéma

Blokové schéma zapojení Load simulátor, viz obr. 26, obsahuje akumulátorový zdroj napájení samotného zařízení, stabilizátor s nastaveným konstantním napětím 6 V, generátor pulzně šířkové modulace, optický přijímač a spínač výkonové zátěže. V blokovém schématu není znázorněn tranzistor T2, který je zapojen před výkonovým spínačem z důvodu spínání od 0 V do 6 V. Z blokového schématu lze vidět, že zapojení obsahuje 1 vstup a 3 výstupy. Vstupní napětí bude typicky 12 V (nominální napětí automobilové baterie), jednotlivé výstupy jsou rozděleny do tří „kanálů“, mezi které patří

výstup pro směrové světlo a poziční světlo. Z důvodu odrušení vstupu a výstupu, je na každé svorce připojen proti zemi blokovací kondenzátor.

Vlastní akumulátor Load simulátoru se stabilizátorem, slouží pouze k napájení PWM generátoru, tak aby bylo možné ovládat výkonový spínač. Samotné napájení měřícího zařízení (DUT) v EMC komoře, je řešeno přes vstupní napětí VCC. Aby nedošlo vlivem „standby“ režimu k postupnému vybíjení Load simulátoru, je zařízení doplněno o přepínač *Sw1* a LED diodu červené barvy, která při svícení znázorňuje Load simulátor v chodu.

Přepínání mezi jednotlivými frekvencemi a střídami, je řešeno pomocí přepínačů, které jsou určeny pro panelovou montáž. Přepínačem *Sw2* je řešena přepínání frekvence konstantních 100 Hz a 200 Hz a přepínačem *Sw4* lze přepínat frekvenci mezi 1 Hz a 1,25 Hz. Přepínač *Sw3* slouží k přepínání konstantní střídý pozičního světla, buď 10 % nebo 30 % a přepínač *Sw5* přepíná střídý 50 % nebo 33,3 % pro směrové světlo. Za pomoci optického přijímače je možné z generátoru umístěného mimo EMC komoru ovládat frekvenci a střídý libovolně, dle uživatelských preferencí. Obvykle se ale využívají standartní frekvence a střídý určené dle návrhu analogového zapojení.



Obr. 26 Blokové schéma zapojení Load simulátoru.

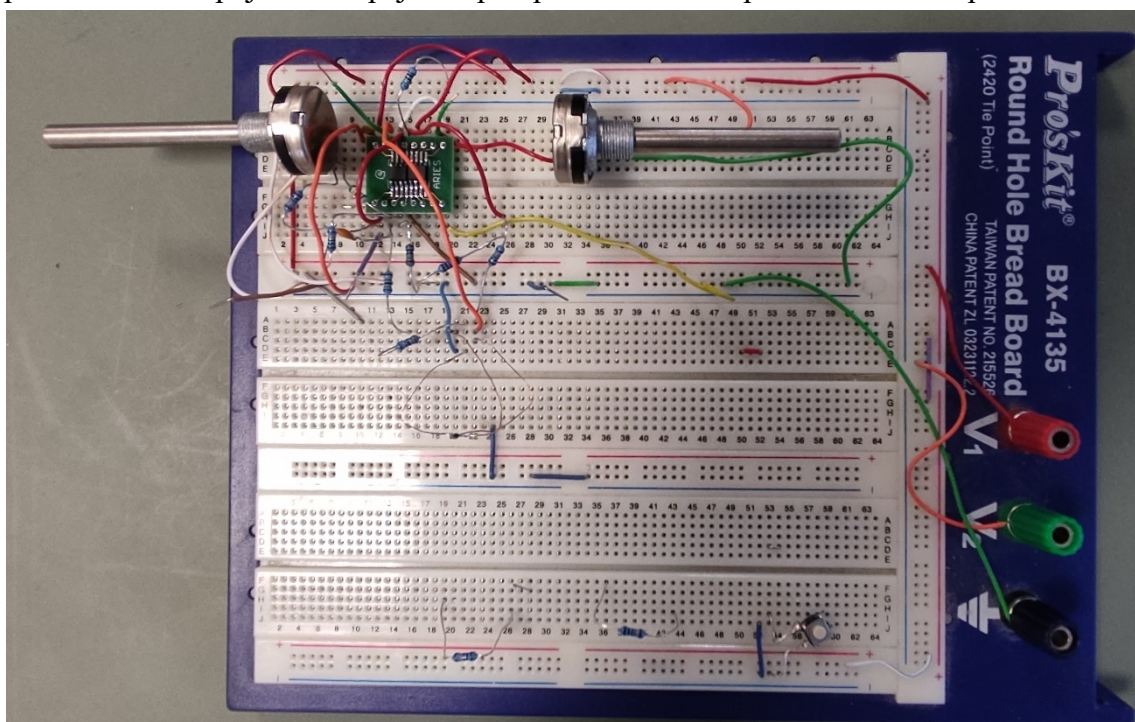
4. REALIZACE ZÁKLADNÍHO ZAPOJENÍ SIGNÁLOVÉ ČÁSTI NA NEPÁJIVÉM POLI

Na nepájivém poli bylo zkonstruováno základní zapojení generátoru PWM, které bylo navrženo viz kapitola 3.1, obr. 11. Oproti výslednému zapojení Load simulátoru byl na nepájivém poli zkonstruován pouze jeden kanál. Díky otočným potenciometrům se vyzkoušely jednotlivé výstupy dle uvedených standardů, viz kap. 1, které simulují směrové světlo a poziční světlo.

4.1 Zapojení na nepájivém poli

Na realizaci zapojení byly použity pasivní součástky THT s aktivními SMD, které byly dostupné ve firmě Marelli Automotive Lighting. Z důvodu pouhého otestování základní funkčnosti zapojení, byly THT součástky postačující. Pro nastavování frekvence a střídý byly použity potenciometry o hodnotě 10 k Ω .

V zapojení na nepájivém poli, viz obr. 27, byl použit operační zesilovač OP262GSZ [17]. Tento operační zesilovač bude použit i ve výsledném návrhu Load simulátoru. Jelikož se tento operační zesilovač vyrábí pouze v pouzdru SOIC-8, bylo nutné pro funkčnost zapojení na nepájivém poli použít redukci z pouzdra SOIC na pouzdro DIP.

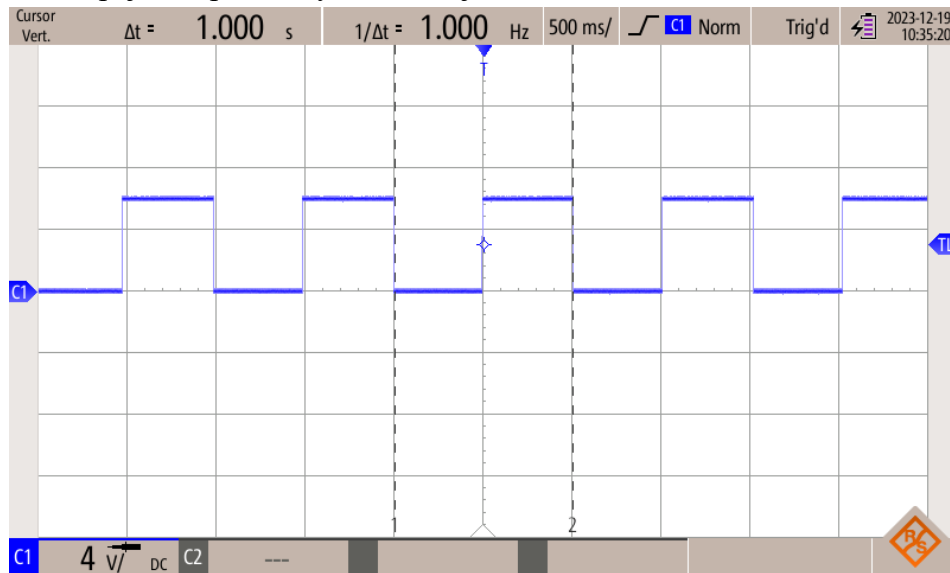


Obr. 27 Realizace zapojení na nepájivém poli.

4.2 Měřené průběhy PWM generátoru pro směrové světlo

Součástí této kapitoly je ověření simulovaných průběhů PWM generátoru pomocí měření. Prvním změřeným průběhem je výstup PWM generátoru s kmitočtem 1 Hz. Výstup z PWM generátoru simuluje průběh, který se udává u normy SAE. Jelikož byla frekvence a střída nastavována pomocí potenciometrů o velikosti 10k, bylo velmi obtížné nastavit kmitočet a střidu s maximální přesností. Pro měření jednotlivých průběhů byl použit ruční digitální osciloskop R&H RTH1002 se vzorkováním 5GSa/s.

Ze změřeného průběhu, viz obr. 28, je patrné, že signál je překlápen od 0 V do 6 V. Pokud porovnáme tento průběh se simulovaným, je patrné, že průběh je z hlediska generování signálu amplitudově zcela totožný. Vlivem nepřesného nastavování potenciometry, viz obr. 28, je průběh menší než 1 Hz. Pro základní vyzkoušení parametrů zapojení na nepájivém poli to bylo dostačující.



Obr. 28 Změřený průběh na výstupu PWM generátoru, $T = 1$ s.

Obdobně bylo vyzkoušeno i nastavení dle normy ECE s frekvencí 1,25 Hz a střidou 50 % dle kapitoly 1.

Na obr. 29 a 30 je změřen průběh náběžné a sestupné hrany PWM generátoru v zapojení pro nízké kmitočty. Dle obr. 29 je časová délka náběžné hrany 140 μ s. Délka sestupné hrany je 60 μ s, viz obr. 30. Z toho je patrné, že jedna perioda signálu

má zpoždění 200 μ s. Jelikož má jedna perioda signálu délku jednu vteřinu, je v tomto případě 200 μ s zanedbatelných.



Obr. 29 Detail náběžné hrany na výstupu PWM generátoru, pro nízké kmitočty.



Obr. 30 Detail sestupné hrany na výstupu PWM generátoru, pro nízké kmitočty.

4.3 Měřené průběhy PWM generátoru pro poziční světlo

Pro toto měření byl použit integrační kondenzátor 470 pF, protože byly měřeny průběhy výstupní úrovně PWM generátoru na vyšších kmitočtech. Obvykle se pro POS výstup používá frekvence 100 Hz a 200 Hz, se střídou 10 % a 30 %. Výstupní signál byl plynule přepínán v rozsahu 0 V – 6 V, tak jako při měření PWM generátoru u směrového světla.

Na obr. 31 a 32 je změřený průběh náběžné a sestupné hrany PWM generátoru v zapojení pro vyšší kmitočty. Dle obr. 31 je časová délka náběžné hrany 3 μ s. Sestupná hrana má délku 2 μ s, viz obr. 32. Jedna perioda signálu má tedy zpoždění 5 μ s. Velikost zpoždění 5 μ s by neměla mít vliv na výslednou funkčnost.



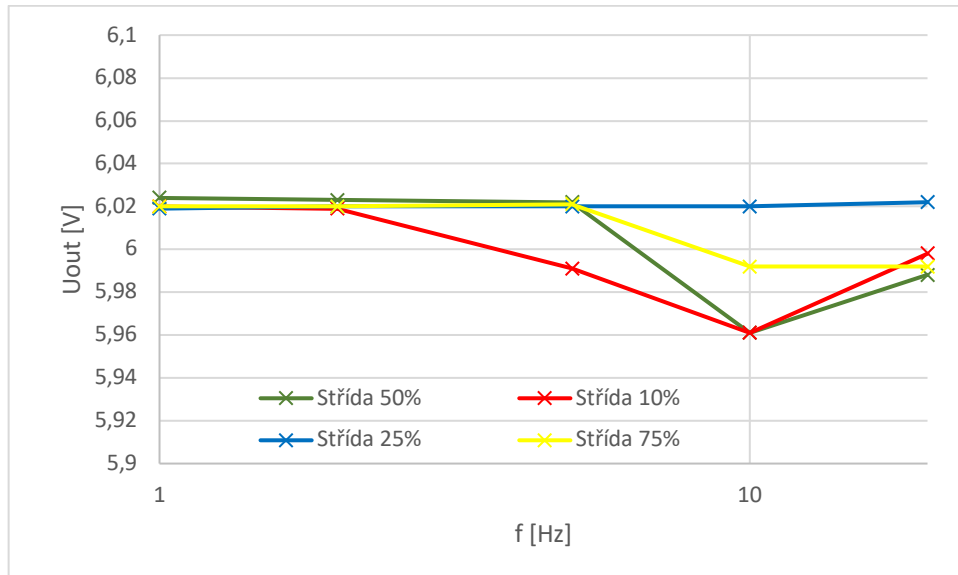
Obr. 31 Detail náběžné hrany na výstupu PWM generátoru, pro vyšší kmitočty.



Obr. 32 Detail sestupné hrany na výstupu PWM generátoru, pro vyšší kmitočty.

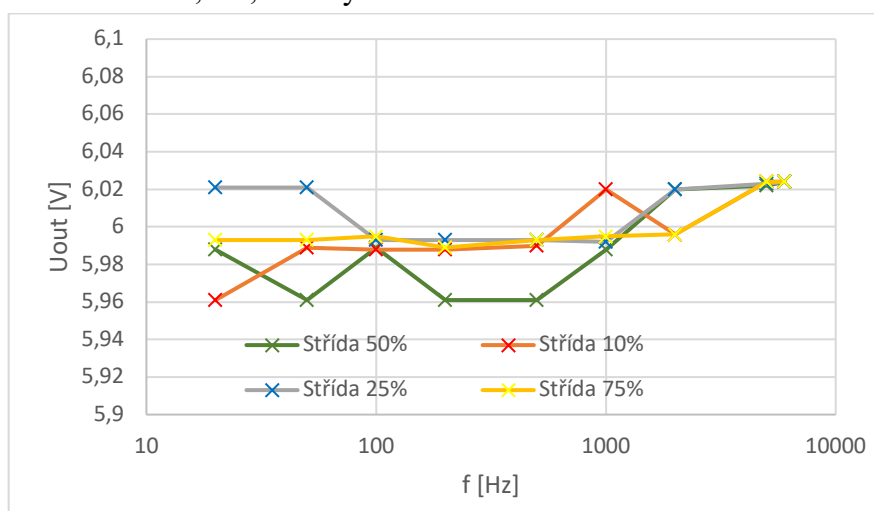
4.4 Vliv frekvence a střídy na výstupní napětí

V další části měření byly změřeny vlivy frekvence a střídy v závislosti na výstupním napětí. Oba vlivy byly změřeny pro nižší i vyšší kmitočty změnou vstupního napětí v zapojení VCO. Dle obr. 33 je patrné, že u nižších kmitočtů se výstupní napětí pohybovalo od 5,96 V do 6,02 V. Pro námi důležitý kmitočet 1 Hz a 1,25 Hz bylo napětí konstantní ve všech hodnotách střídy.



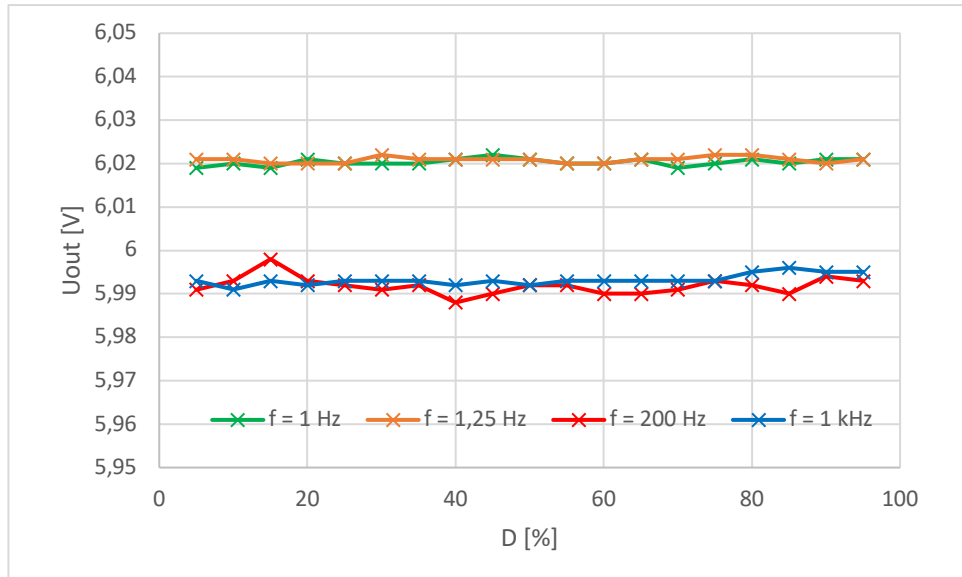
Obr. 33 Kmitočtová závislost výstupního napětí.
Zapojení s integračním kondenzátorem $C_1 = 100nF$. Viz obr. 11.

U měření na vyšších kmitočtech, viz obr. 34 lze říci, že námi důležitý kmitočtový rozsah od 100 Hz do 1 kHz má stálé napětí téměř přesně 6 V. Pouze u střídy 50 % se projevil úbytek napětí 40 mV. Jelikož je potřeba pro sepnutí výkonového spínače BTS6163D minimálně 5,5 V, lze úbytek 40 mV zanedbat.



Obr. 34 Kmitočtová závislost výstupního napětí.
Zapojení s integračním kondenzátorem $C_1 = 450pF$. Viz obr. 15.

Posledním měřením bylo proměření střídavy v celém rozsahu, viz obr. 35, pro námi důležité kmitočty. Ukázalo se, že u nižších kmitočtů je velikost napětí v celém svém rozsahu vyšší, naopak pro vyšší kmitočty došlo k úbytku napětí o 10 mV oproti referenčnímu. Vliv na měření patrně mají keramické kondenzátory, kterými byl přepínán rozsah mezi nižšími a vyššími kmitočty. Ve výsledku by na správnost měření v EMC komoře tak malý úbytek neměl mít vliv.



Obr. 35 Závislost maximální hodnoty výstupního napětí na střídě.

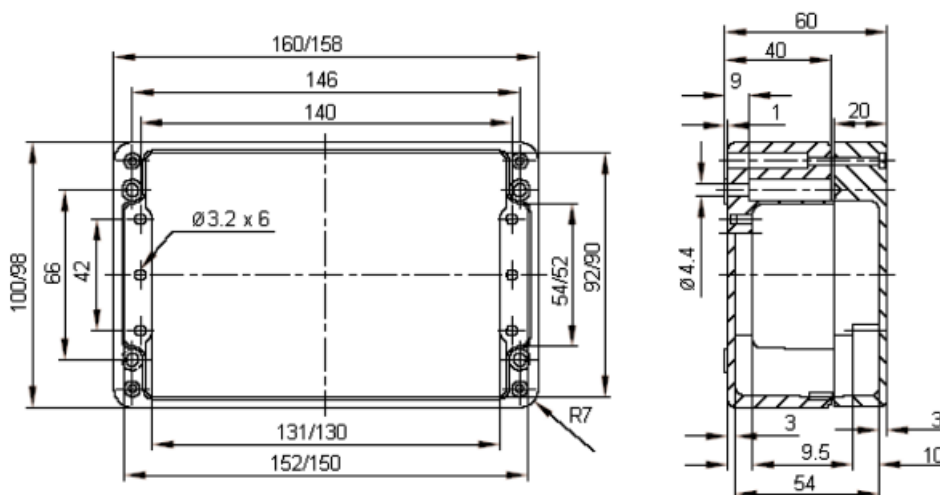
5. VÝROBA PROTOTYPU LOAD SIMULÁTORU

Součástí této kapitoly budou výběr vhodné krabičky pro Load simulátor. Následně bude dle ověřeného zapojení PWM generátoru zkonstruováno celkové zapojení Load simulátoru. Na základě navrženého zapojení se zkonstruuje a osadí deska plošného spoje, a nakonec se změří parametry na osazené DPS.

5.1 Výběr krabičky a její rozložení

V této kapitole bude popsán výběr krabičky pro Load simulátor a bude znázorněno rozložení jednotlivých vstupů a výstupů dle blokového schématu, viz kapitola 3.3.

Krabička byla vybrána na základě požadavků na Load simulátor. Z hlediska odolnosti Load simulátoru vůči elektromagnetickému rušení a elektrostatickému poli bylo nutné vybrat kovovou krabičku. Dalším faktorem při výběru krabičky byla vhodná montáž pro desku plošného spoje. Většina nabízených kovových krabiček totiž nemá montážní otvory. Dále byl kladen důraz na její velikost. Bylo zapotřebí vybrat rozměry krabičky tak, aby bylo možné do ní umístit akumulátor LiPo, mechanické konektory a vstupní a výstupní zdířky. Na základě těchto komponent byla vybrána krabička s označením Multicomp Pro G116, viz [22]. Základní rozměry krabičky jsou: 160 mm x 100 mm x 60 mm. Díky těmto rozměrům se do krabičky vejde základní deska plošného spoje i s jeho nadstavbou, která bude určena pro napájení. Konstrukční výkres znázorňuje obr. 36.

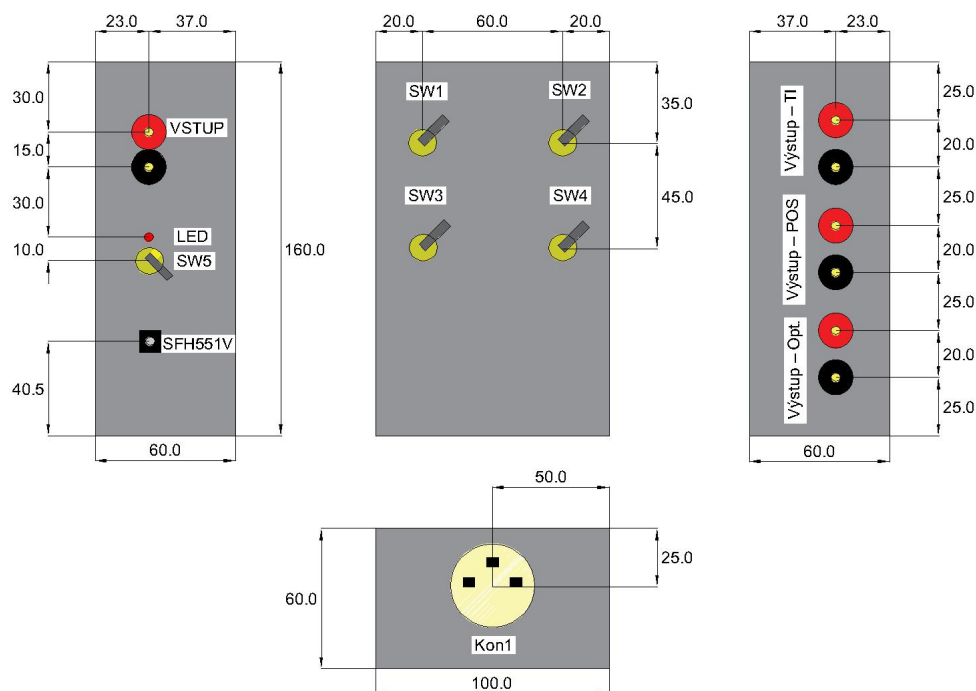


Obr. 36 Rozměry krabičky. Obr. převzat z katalogového listu [22].

Na obr. 37 je vidět návrh kovové krabičky Load simulátoru s jednotlivými komponenty. Na vrchní straně krabičky budou umístěny 4 přepínače, které mají za úkol přepínat frekvenci a střídu. Levý bok kovové krabičky bude obsahovat vstupní zdířky s kladným a záporným pólem, vypínač celého zařízení s červenou LED indikací a optický

přijímač SFH551V. Pravý bok obsahuje jednotlivé výstupy řízených funkcí s kladným a záporným pólem Load simulátoru.

Obr. 37 byl vytvořen v prostředí AutoCAD 2023 od firmy Autodesk. Jednotlivé rozměry jsou uvedeny v milimetrech.



Obr. 37 Rozvržení komponent na kovové krabici.

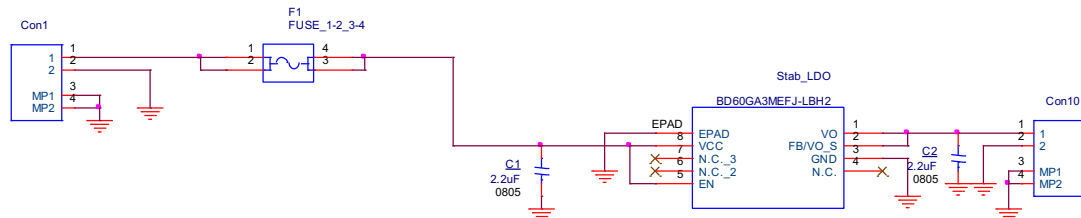
Prostřední náčrt na obr. 37 představuje horní stranu krabičky. Krajní náčrty představují levý a pravý bok krabičky. Spodní náčrt viz obr. 37, obsahuje náčrt konektoru, určeného pro nabíjení vnitřní baterie Load simulátoru. Jelikož bude Load simulátor obsahovat 2 patra desek plošných spojů, jsou z hlediska místa posunuty vstupní a výstupní zdířky ke spodní části kovové krabičky.

5.2 Dílčí schémata jednotlivých bloků Load simulátoru

V této kapitole bude popsán návrh celkového schématu. Pomocí tohoto schématu je vygenerováno zapojení pro návrh desky plošného spoje. Základní jádro schématu vychází z již ověřeného zapojení napětím řízeného oscilátoru s pulsně šířkovou modulací, viz kapitola 4, ke kterému nyní budou navrhnut další přídatné obvody.

Na obr. 38 je vidět první část zapojení. Ke konektoru s označením Kon1 bude přes vypínač připojen akumulátor LiPo o výstupním napětí 7,4 V. Aby nedošlo při testovacích zkouškách na DPS ke zničení zařízení, je v návrhu uvažována

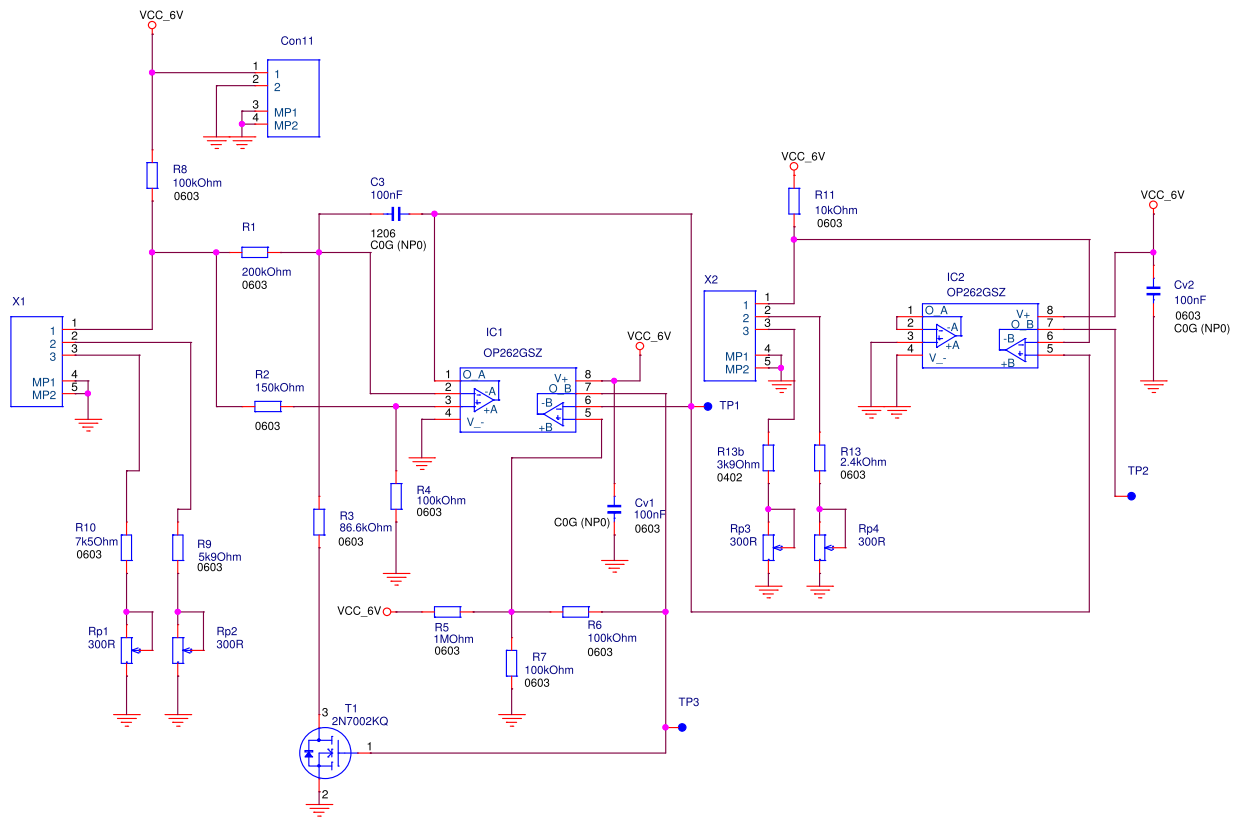
automobilová pojistka. Za pojistkou bude stabilizátor s nízkým úbytkem napětí, který bude mít na svém výstupu konstantní napětí 6 V. Jelikož bude toto zapojení samostatně na jedné desce plošného spoje, je na výstupu stabilizátoru umístěn konektor s označením Con10. Pomocí tohoto konektoru budou následně propojeny desky mezi sebou.



Obr. 38 Napájecí část celkového schématu Load simulátoru.

Druhá deska bude od konektoru Con11 obsahovat zbylé zapojení dle obr. 39. Aby bylo v krabici Load simulátoru vše rozebíratelné, jsou na desce plošného spoje doplněny konektory i na přepínání frekvence a střídý. Samotné přepínače jsou dle kapitoly 5.1 umístěny po stěnách kovové krabičky. Pro přesné nastavení frekvence a střídý, dle požadavků na Load simulátor, budou na DPS ještě navíc umístěny trimry. Jak již bylo řečeno v kapitole 3, která se zabývala návrhem a výběrem vhodných komponent pro Load simulátor, budou v zapojení použity primárně pouzdra součástek 0603. Jelikož jsou součástky vybírány z interních zásob firmy Marelli, jsou někde použity součástky s menším pouzdrům 0402, a naopak někde jsou použity součástky

s větším pouzdem 0805 a 1206. Na funkci Load simulátoru nebude mít velikost pouzder vliv.

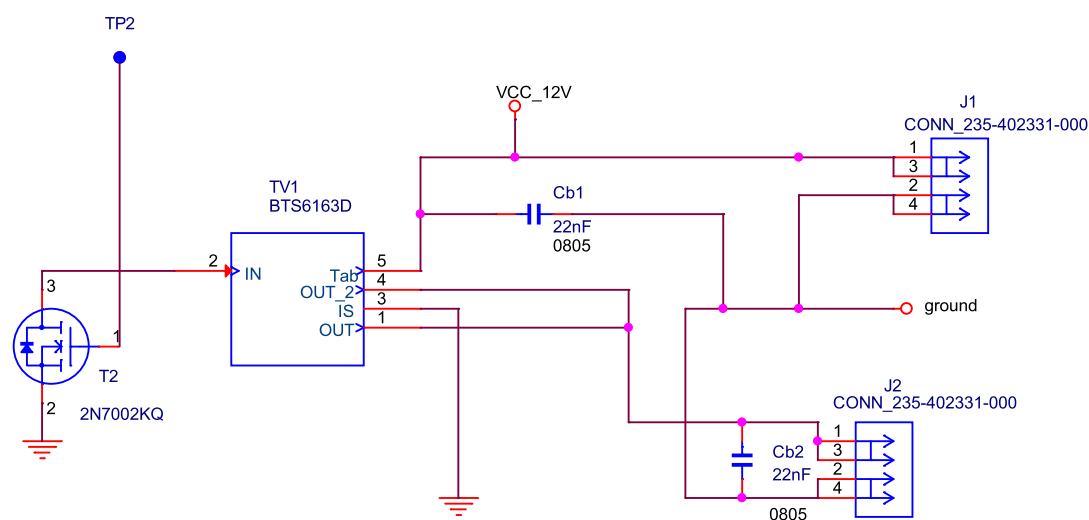


Obr. 39 Řídící část celkového schématu Load simulátoru.

Poslední částí schématu, viz obr. 40, je jeho výkonová část. Výkonová část obsahuje výkonový spínač s označením *BTS6163Daumal*. Ten má z důvodu přepínání v celém napětěovém rozsahu na ovládacím vstupu unipolární tranzistor. Vstup do výkonového spínače s označením *TV1* vede ze zdířky na konektor s označením *J1*. Konektor *J1* představuje výkonový vstup Load simulátoru. Výstup výkonového spínače je vyveden

rovněž na konektor s označením *J2* a dále na zdířku. Tato zdířka představuje výstup Load simulátoru. Jelikož toto schéma sloužilo pro návrh PCB, nejsou ve schématu zdířky.

Svorka s označením ground je název pro samostatnou zem, která má společný vstup a výstup pouze s výkonovým spínačem. Vstupní i výstupní zem bude mít vyvedenou samostatnou zdířku.

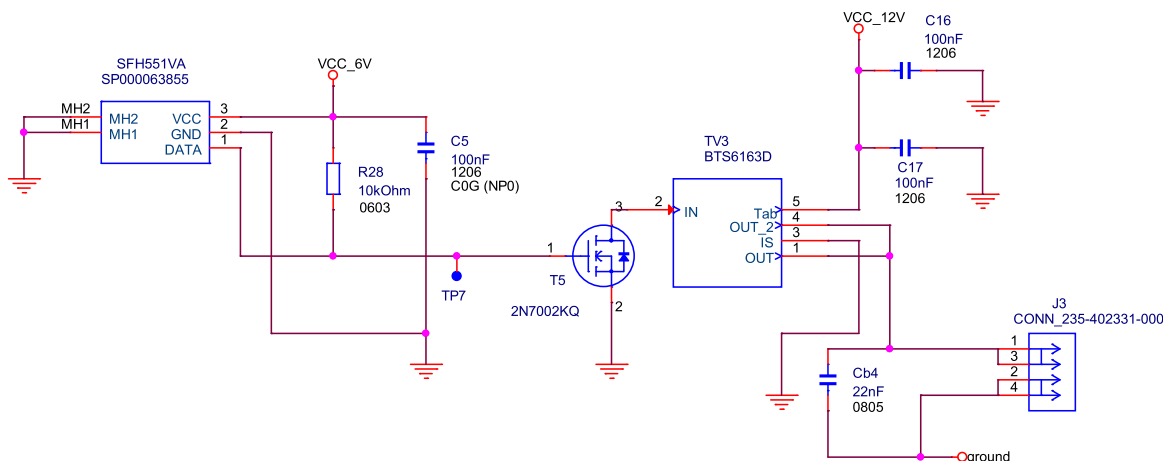


Obr. 40 Výkonová část celkového schématu Load simulátoru.

Z obrázků 39 a 40 je patrné, že řídicí a výkonová část má každá svůj zemní potenciál. U výkonové části se jedná o potenciál ground, který je kromě země výkonového vstupu a výstupu také přizemněn ke kovové krabici. U řídicí části se jedná o potenciál gnd, který má zem pouze ve své řídicí části Load simulátoru a je vyveden pouze k vlastnímu akumulátoru.

Na obr. 41 je vidět schéma zapojení optického přijímače Load simulátoru. Zapojení výkonové části je totožné, jako u předchozího obr. 40, pouze je zde změna v řídicí části. Místo analogového zapojení PWM generátoru je použit optický přijímač. Rezistor *R28* a kondenzátor *C5* byly určeny na základě katalogového listu výrobce optického přijímače SFH551V. Dle doporučení výrobce by měl být v zapojení použit kondenzátor $C5 = 100 \text{ nF}$ a pull up rezistor s minimální hodnotou $330 \text{ }\Omega$. Pokud by byl zvolen rezistor s minimální hodnotou $330 \text{ }\Omega$, byl by proud 18 mA , což je výkonově 107 mW . Aby byla spotřeba optického přijímače menší, bude v zapojení použit rezistor $R28 = 10 \text{ k}\Omega$. Poté bude proud $600 \text{ }\mu\text{A}$, výkonově $3,6 \text{ mW}$.

Stejně jako na obr. 40 je i zde vyveden výstup z výkonového spínače na konektor *J3* a z konektoru *J3* následně na zdířku.



Obr. 41 Schéma zapojení optického přijímače Load simulátoru.

Celkem je tedy Load simulátor rozdělen na 3 kanály. První 2 kanály mají totožné schéma zapojení. Vychází se ze zapojení PWM generátoru, viz kapitola 4. Třetí kanál má řízení směrového světla a pozičního světla přes optický přijímač.

5.3 Výkonová rozvaha nad zařízením Load simulátor

Důležitým parametrem při návrhu Load simulátoru je doba provozu zařízení na baterii. Dobu provozu zařízení lze určit z dostupných katalogových listů použitých součástek. Dle jednotlivých katalogových listů se zjistily hodnoty viz tab. 3.

Tab. 3 Proudový odběr použitých součástek v Load simulátoru dle katalogových listů.

Součástka	Proudový odběr
4x OP262GSZ	4x 500 μ A
BD60GA3MEFJ	600 μ A
SFH551V	600 μ A
LED – červená	2 mA

Pokud se bude uvažovat maximální odběr Load simulátoru viz tab. 3, $I = 5,2$ mA, měl by vybraný akumulátor s kapacitou 1300 mAh vydržet 175 hodin. Baterie by tak vydržela měření 21 pracovních dnů.

Dalším kritériem při návrhu, je určení nutnosti chlazení jednotlivých součástek na desce plošného spoje Load simulátoru. Celková vlastní spotřeba řídicí části je 72 mW.

5.3.1 Výkonová rozvaha ztrátového výkonu stabilizátoru LDO

Z katalogového listu napěťového regulátoru BD60GA3MEFJ [13] se lze dočíst, že maximální výkon, při kterém je součástku nutné chladit je 1,8 W. Z hlediska vlastní spotřeby Load simulátoru je to dostatečné, protože při proudovém odběru 5,2 mA,

při vstupním napětí 7,4 V a při výstupním napětí 6 V je ztrátový výkon 7,28 mW. Z tohoto důvodu není potřeba napěťový regulátor s nízkým úbytkem chladit.

5.3.2 Výkonová rozvaha ztrátového výkonu výkonového spínače při maximálním výkonu na zátěži

Další součástí, která by mohla potřebovat chlazení je výkonový spínač BTS6163D. Pokud vezmeme znovu v úvahu teplotu 25 °C a budeme uvažovat na zátěži výstupu Load simulátoru maximální proudový odběr 5 A, při napětí z autobaterie 12 V, bude maximální výkon na zátěži 60 W. Je potřeba brát v potaz, že u směrového světla (TI) nebude výkonový spínač trvale sepnutý, ale bude spínán na základě řídicího signálu obvykle v poměru 1:1. Z tohoto důvodu bude na zátěži při maximálním proudovém odběru 5 A, maximální výkon 30 W.

V katalogovém listu [14] na straně 3 se lze dočíst, že odpor výkonového spínače v sepnutém stavu je 16 mΩ. Z velikosti odporu lze snadno vypočítat ztrátový výkon na výkonovém spínači. Při uvažovaném maximálním proudovém odběru 5 A, bude ztrátový výkon 0,4 W, pro trvalé sepnutí. Při řízení směrového světla dle normy ECE, bude ztrátový výkon poloviční.

V katalogovém listu výkonového spínače [14] je na straně 3 v poznámce 6 uvedena velikost desky plošného spoje alespoň 50 mm x 50 mm. Jelikož deska plošného spoje bude svou velikostí větší a ztrátový výkon bude při uvažovaném maximálním proudu 5 A; $P = 0,4 \text{ W}$, nebude muset být na základě všech uvedených vlastností nutné výkonový spínač chladit. Z těchto uvedených důvodů není potřeba navrhovat externí chlazení.

Dále lze říct, že uvedený maximální výkon 30 W, je uvažovaný u směrového světla pouze pro maximální případ. V reálné situaci se bude odběr na výkonovém spínači o poznání nižší, v závislosti na typu použitého světlometu.

5.4 Návrh DPS Load simulátoru

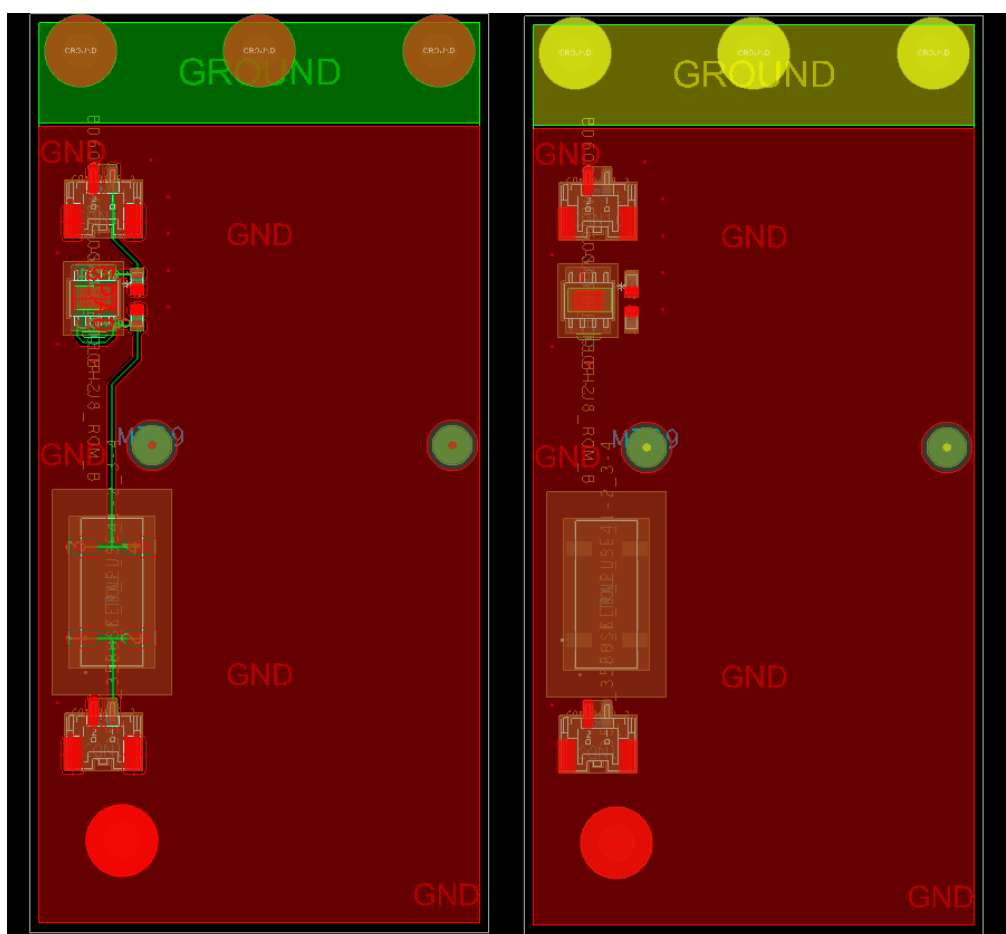
Pro vytvoření návrhu desky plošného spoje byl použit program OrCAD Cadence PCB editor. Jsou vytvořeny 2 desky plošného spoje. První návrh je pro napájení řídicí části Load simulátoru a druhý návrh je základní deska s řídicí a výkonovou částí Load simulátoru. V následujících kapitolách bude detailně popsán samotný návrh desek plošného spoje.

5.4.1 DPS napájecí části Load simulátoru

První deska, viz obr. 42, která slouží pro napájení řídicí části Load simulátoru bude pomocí uchycených kovových distančních sloupků umístěna nad řídicí a výkonovou částí DPS. Deska je navržena jako oboustranná, na obou stranách je rozlita zemní plocha řídicí části Load simulátoru. Pouze na straně s otvory je rozlita po obou stranách společná zem (ground) výkonové části. Je to z toho důvodu, že společná zem výkonové části je přizemněna ke kovové krabici přes kovové distanční sloupky.

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.2, která se zabývala samotným návrhem schématu, je na této napájecí DPS umístěn pouze držák pro pojistku, stabilizátor a konektory, které slouží pro propojení s druhou deskou a akumulátorem LiPo. Jednotlivé komponenty jsou mezi sebou propojeny vedením o šířce 0,3 mm. Tento rozměr nebyl nijak počítán. Vyšlo se ze standartních předpisů firmy Marelli pro výrobu, kde pro signálovou část, u které se nepředpokládá proud nad 12 mA, je šířka vedení 0,3 mm dostatečná.

Pomocí nevodivých děr uprostřed DPS bude pomocí plastového stahovacího pásku k desce připevněn akumulátor LiPo. Z důvodu mechanické pevnosti této desky (obr. 42), je na spodní straně umístěn jeden vodivý prokov, který je spojen se zemní plochou gnd řídicí části.



Obr. 42 Napájecí část vrchní DPS.
Obrázek byl vytvořen v Cadence PCB editor.

5.4.2 DPS řídicí a výkonové části Load simulátoru

Druhá deska obsahuje výkonovou a signálovou část Load simulátoru. Výkonová část Load simulátoru se nachází na pravé straně desky a je oddělena od signálové části. Signálová část, do které patří PWM generátor se nachází na levé části desky.

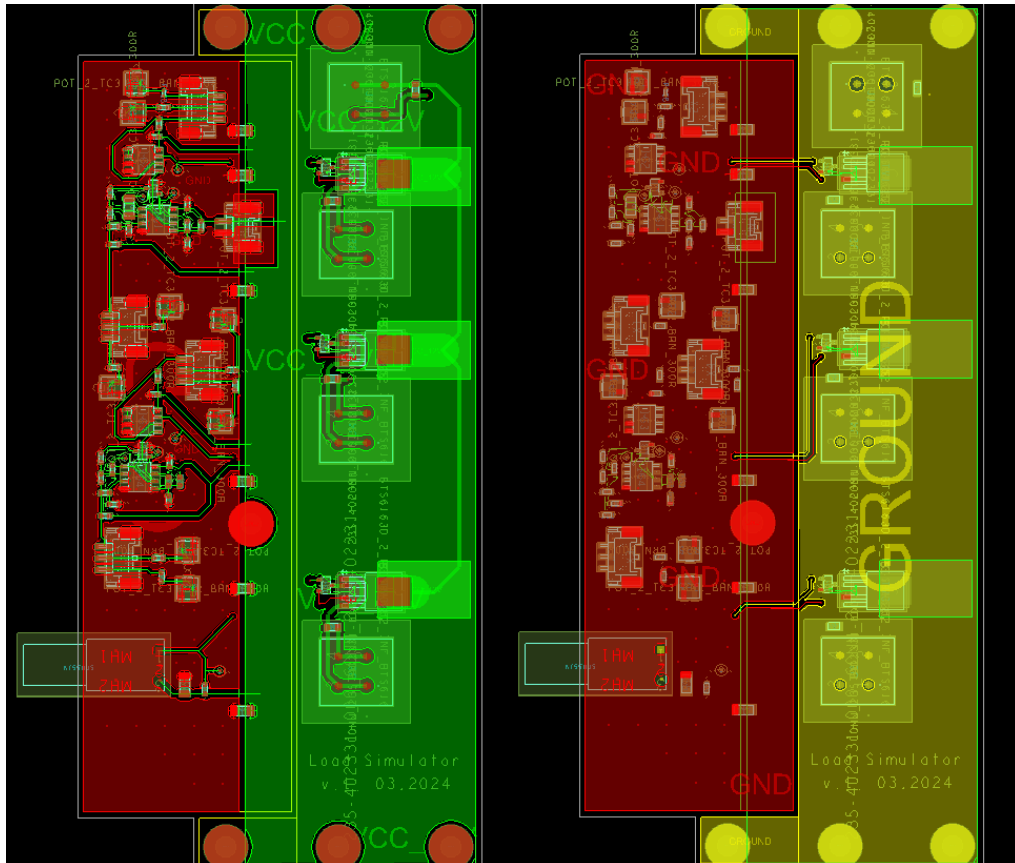
Návrh DPS z hlediska požadavků na Load simulátor viz kapitola 1 byl následující:

- oddělení výkonové a řídicí části,
- použít co nejkratší vodivé spojení jednotlivých komponent,
- zamezit křížení vodivých spojení z jedné a druhé strany DPS,
- u každého zemního pinu součástky použít prokov, aby byla cesta proudu co nejkratší,
- použít vazební a blokovací kondenzátory v místech s napájením.

Deska je navržena jako oboustranná. Při pohledu shora, viz obr. 43, je patrné, že deska je rozdělena na dvě půlky. Jedna půlka (signálová část) má po své ploše rozlitou zemní plochu gnd. Druhá půlka (výkonová část) má po své ploše rozlité napájecí napětí 12 V. Deska je takto rozdělena ze dvou důvodů. Prvním důvodem je zabezpečení proti křížení signálové a výkonové části DPS. Vlivem křížení spojů by mohlo dojít k vyzařování energie mimo Load simulátor, což je z hlediska požadavků viz kapitola 1 nežádoucí. Druhým důvodem je technologický proces výroby a cena, protože dvouvrstvá deska je oproti 4-vrstvé desce jednodušší na výrobu. Dále jsou mezi zemní a napájecí vodivou plochou použity blokovací kondenzátory o velikosti 100 nF. Kondenzátory tam jsou z hlediska ochrany vůči elektrostatickému výboji. Z hlediska zpětného proudu je zapotřebí, aby řídicí signál k výkonovému spínači byl veden v blízkosti zemního vedení gnd, viz obr. 43.

Dále si lze z hlediska návrhu layoutu na obr. 43 všimnout zapojených blokovacích kondenzátorů u napájení operačních zesilovačů. Blokovací kondenzátory jsou zapojeny

co nejbliže k napájecímu pinu operačního zesilovače a u každé země je použit prokov, z toho důvodu, aby byla cesta proudu co nejkratší.



Obr. 43 Výkonová a signálová část DPS.
Obrázek byl vytvořen v Cadence PCB editor.

5.5 Osazování DPS

Desky plošného spoje byly vyrobeny ve firmě Gatema a.s. Před samotným osazováním byla nejprve provedena vizuální kontrola DPS, zdali se všude nachází pájecí plochy a pomocí multimetru byla vyzkoušena vodivost všech prokůvů. Žádná chyba nebyla nalezena, a tak se mohlo začít s osazováním DPS. Z důvodu osazování dvou desek a malého počtu komponent bylo osazování ruční. Nejprve se začalo osazováním komponent v SMD provedení.

Při osazování byl dodržen tento technologický postup:

- nanesení pájecí pasty a lepidla na desku plošného spoje,
- osazení jednotlivých komponent,
- umístění DPS do tavicí pece,
- kontrola správného zalití pájecí pasty k jednotlivým pinům osazených součástek.

Nejprve byla na všechny pájecí plochy vyrobené desky plošného spoje nanášena ručně pájecí pasta. Pájecí pasta byla ze 70 % složena z cínu a z 30 % olova. Jelikož se jedná o desku, která bude sloužit pouze pro měření ve firmě Marelli, mohla být tato pájecí pasta s olovem použita. Na místa pod konektory bylo z důvodu jejich pevnosti nanášeno epoxidové lepidlo, viz obr. 44 (červená kapka).

Dle osazovacího výkresu, viz příloha, byly na pájecí plochy s nanášenou pájecí pastou umístěny jednotlivé komponenty. Následně byla osazená deska umístěna do tavicí pece, která se nachází přímo ve firmě Marelli a slouží zde pro prototypové účely.

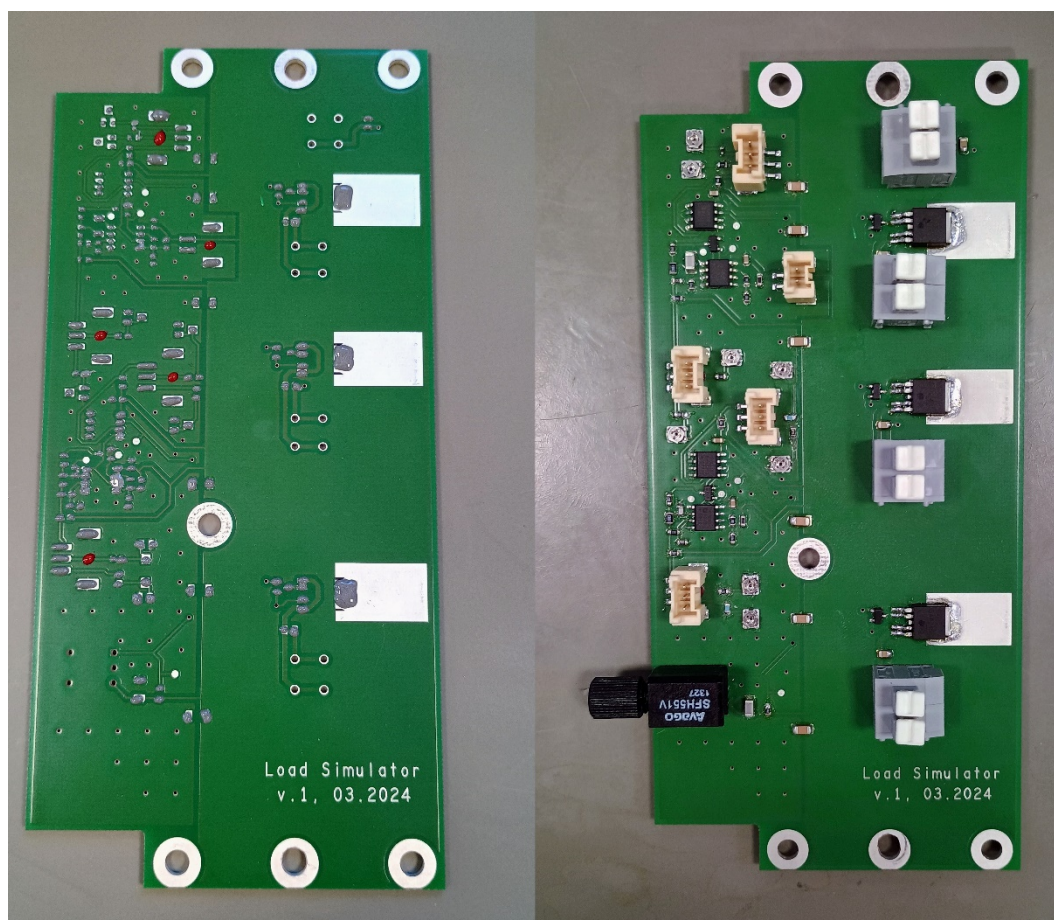
Po zatavení součástek následovala kontrola správného zalití jednotlivých součástek pod lupou. Při tavení v peci se vyskytly 2 problémy. První chybou bylo při osazování nepřilepení výkonových spínačů BTS6163D. Při tavicí teplotě v peci došlo k posunu výkonových spínačů mimo své pájecí plochy. Tyto výkonové spínače bylo nutné ručně pomocí pájecí stanice přepájet. Druhou chybou bylo pravděpodobně nanášení velkého

množství pájecí pasty u tří trimrů. Došlo tak, ke vzájemnému slítí jednotlivých pájecích ploch. Z tohoto důvodu bylo nutné trimry ručně pomocí pájecí stanice přepájet.

Dále byly při kontrole DPS pod lupou odstraněny pomocí pinzety pájecí kuličky, které vznikly u některých komponent vlivem většího množství pájecí pasty při tavení v tavicí peci.

Nakonec byly na DPS osazeny zbylé komponenty v THT provedení. Jednalo se o optický přijímač SFH551V a čtyři kusy Wago svorek.

Na obr. 44 je na levé části vyfocena DPS při nanesení pájecí pasty a epoxidového lepidla a na pravé části obrázku je již osazená DPS připravená k otestování.



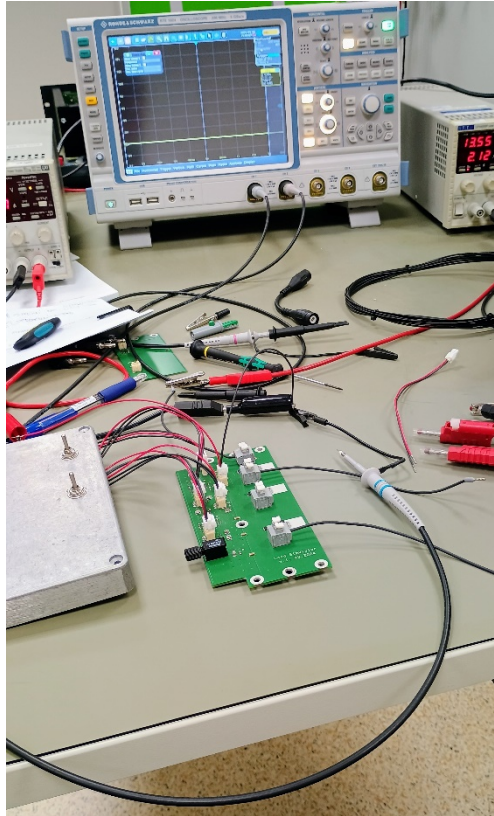
Obr. 44 Osazená DPS signálové a výkonové části.

5.6 Měření na realizované DPS

Měřením byl ověřen návrh zařízení a simulované parametry viz kapitola 3 a dále byly ověřeny osazené desky plošných spojů. Měření bylo realizováno pomocí dvou napěťových zdrojů Proskit TE-5305B a osciloskopu R&S RTE 1024.

Na obr. 45 je zobrazeno foto z měření parametrů osazené DPS a je patrné, že zařízení bylo pro zkoušení napájeno z laboratorních zdrojů. Nejprve bylo na prvním zdroji nastaveno napájecí napětí 6 V (napětí které bude přivedeno konstantě ze stabilizátoru)

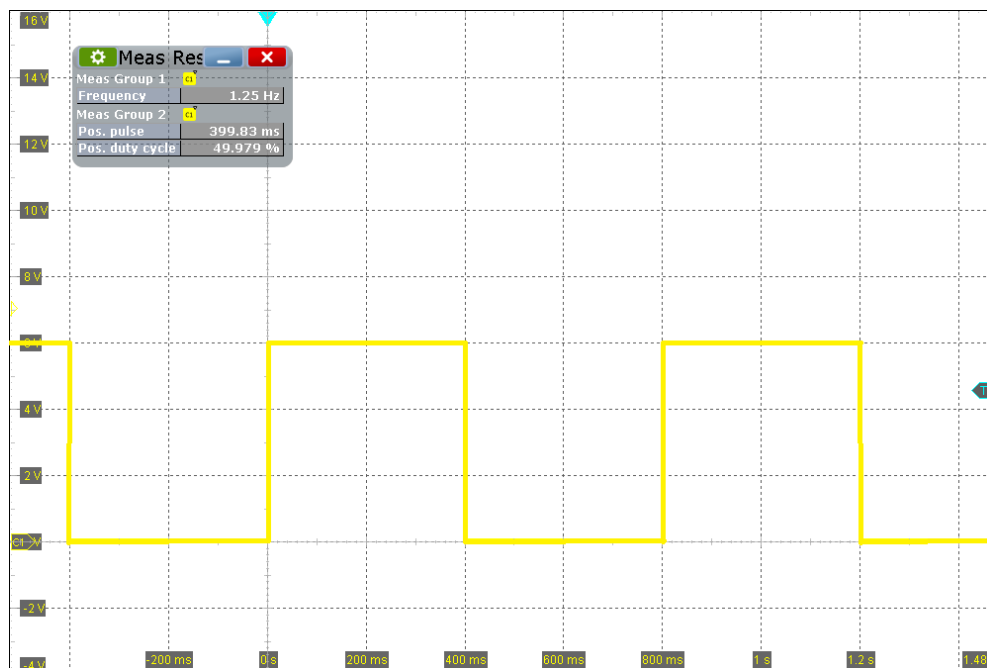
a byly vyzkoušeny výstupy z PWM generátoru. Při měření na DPS Load simulátoru viz obr. 45, při napájecím napětím 6 V byl změřen proudový odběr 2,34 mA. Na osciloskopu byly sledovány změny úrovně napětí v požadovaném časovém intervalu. Pomocí trimrů byly nastaveny přesně předepsané hodnoty jak pro směrové, tak pro poziční světlo.



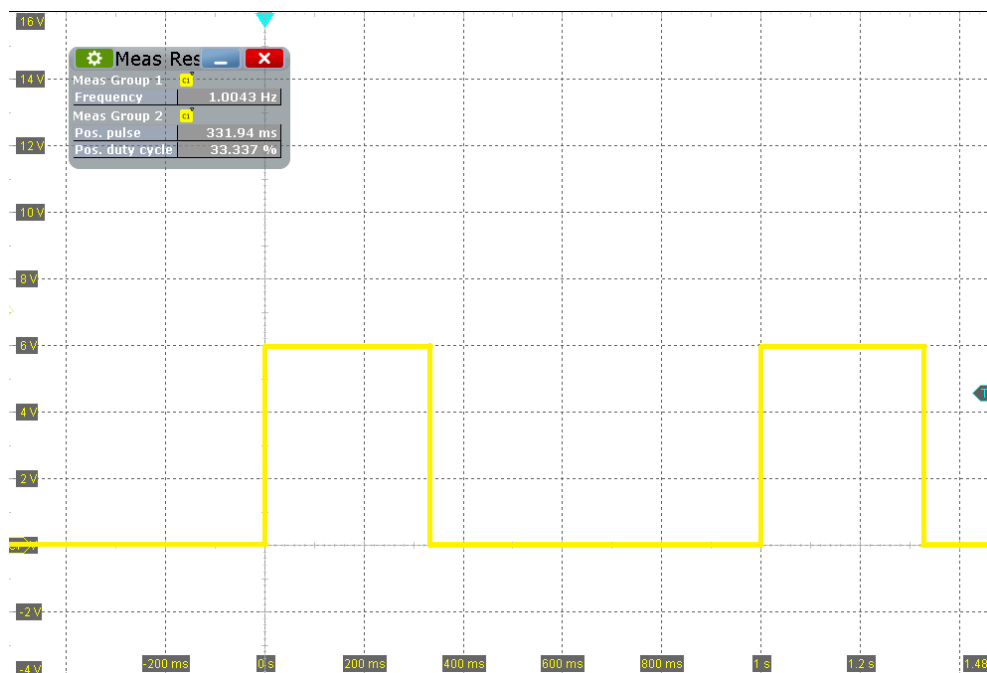
Obr. 45 Foto z měření parametrů DPS.

Na jednotlivých průbězích obr. 46 až obr. 49 jsou znázorněny jednotlivé výstupy PWM generátoru. Z průběhů je patrné, že některé parametry z PWM generátoru nejsou úplně přesné. Například na obr. 46 je vidět průběh dle normy ECE, který by měl mít nastavenou střídu 50 %, ale má dle měření z osciloskopu střídu 49,979 %. Z tohoto pohledu se jedná o chybu 0,021 %, která je v tomto případě zanedbatelná. Dále je ze všech průběhů vidět, že parametry frekvence a střídy jsou přesně nastavené a nikam tzv „neujíždí“.

Obr. 46 obsahuje výstup z PWM generátoru určený pro směrové světlo, dle předepsaných norem viz kapitola 1. Jedná se o normu ECE, kde je předepsána frekvence 1,25 Hz se střídou 50 %. Obr. 47 představuje normu SAE, která udává frekvenci 1 Hz se střídou 33,3 %.

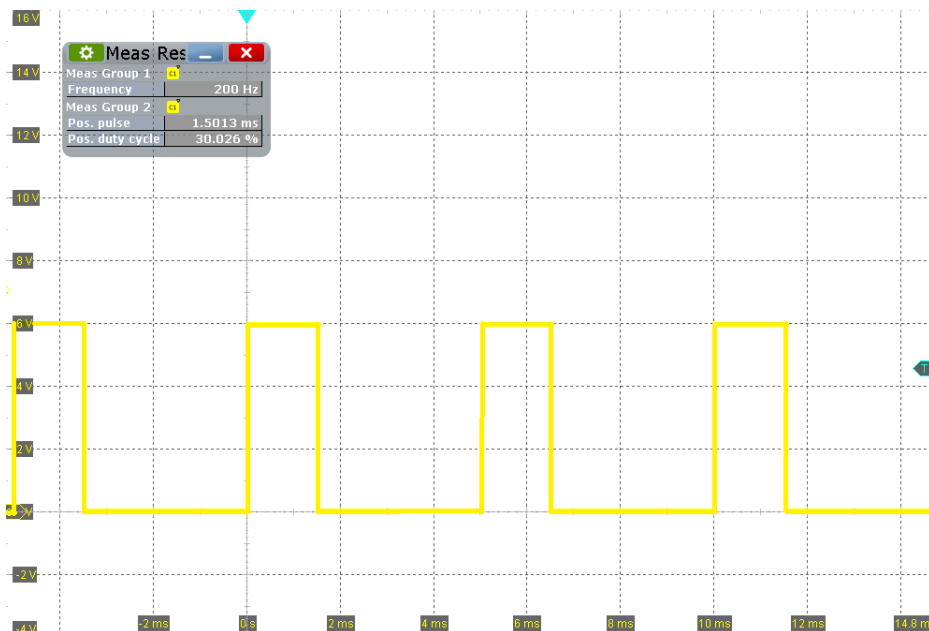


Obr. 46 Výstupní průběh PWM generátoru pro směrové světlo, dle normy ECE.

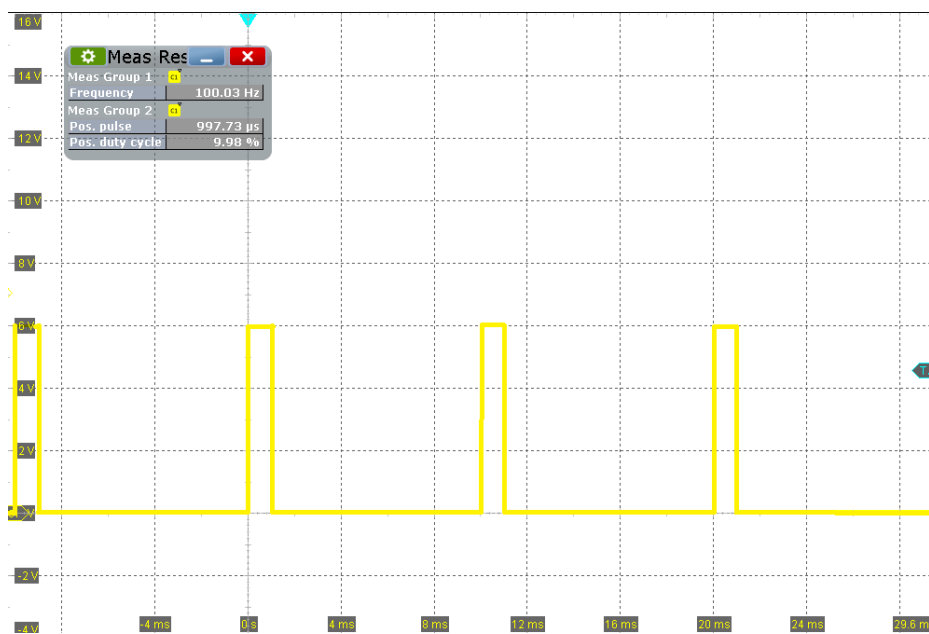


Obr. 47 Výstupní průběh PWM generátoru pro směrové světlo, dle normy SAE.

Obr. 48 a obr. 49 obsahuje výstupy z PWM generátoru určené pro poziční světlo o předepsaných frekvencích a stříd, dle kapitoly 1. Jedná se o frekvence 200 Hz a 100 Hz a střídu 10 % a 30 %.

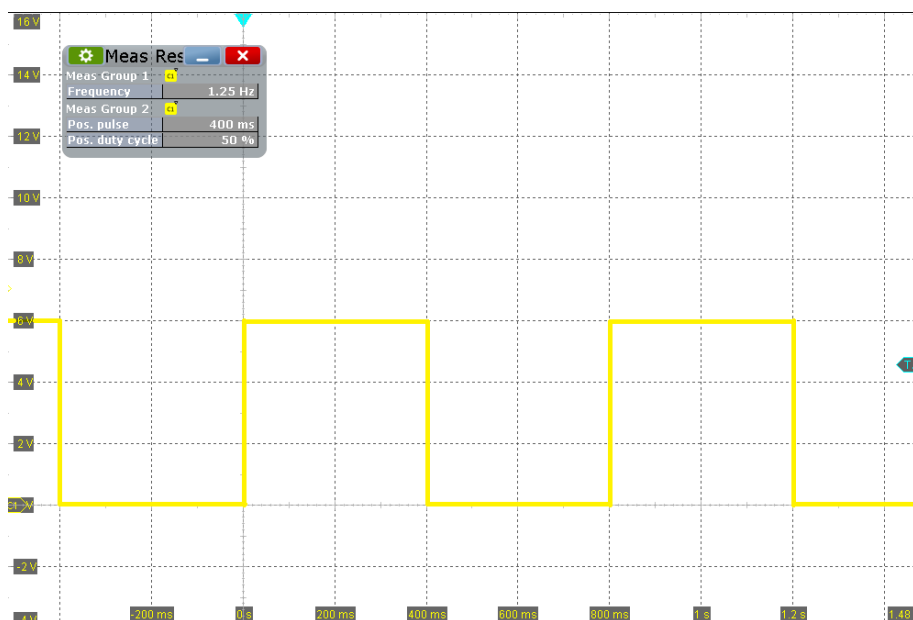


Obr. 48 Výstupní průběh PWM generátoru pro poziční světlo.

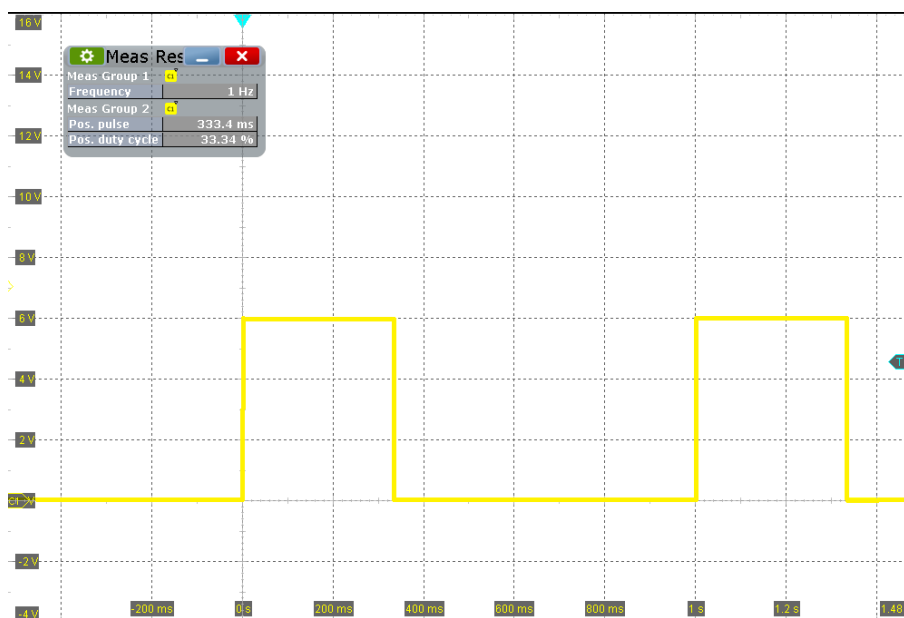


Obr. 49 Výstupní průběh PWM generátoru pro poziční světlo.

Na obr. 50 a 51 jsou změřeny výstupy ze signálového generátoru dané přes optickou komunikaci. Pro měření byl použit signálový generátor Tektronix AFG3011C. Z průběhů je patrné, že frekvence i střída jsou nastaveny přesně na základě nastavení signálového generátoru.



Obr. 50 Výstup simulující směrové světlo, dle normy ECE, daný optickou komunikací.



Obr. 51 Výstup simulující směrové světlo, dle normy SAE, daný optickou komunikací.

5.7 Montáž DPS do kovové krabičky

Jak již bylo řečeno v kapitole 5.1, byla vybrána již hotová kovová krabička, která měla uvnitř pouze montážní otvory. V této kapitole bude popsán způsob zhotovení kovové krabičky.

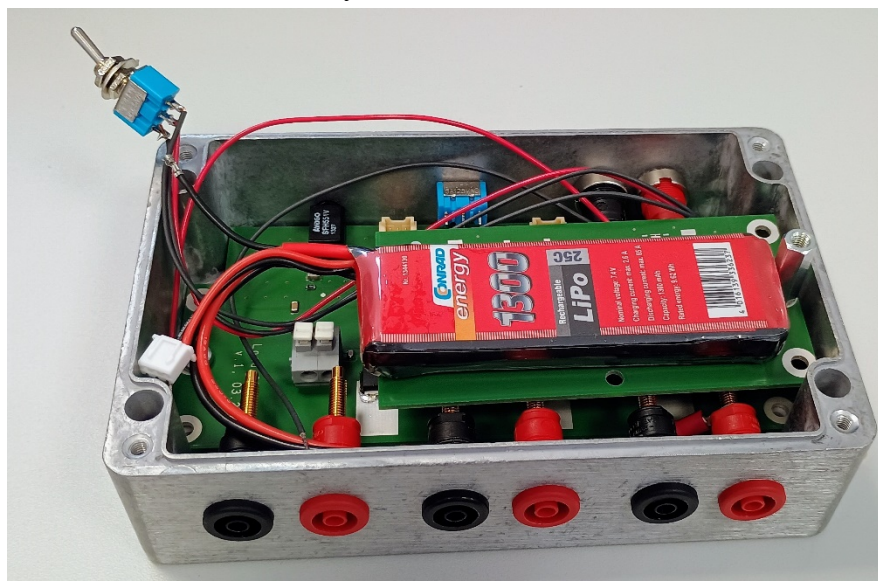
Nejprve byly dle výkresu z kapitoly 5.1 vyvrtány do kovové krabičky otvory, viz obr. 52. Do těchto otvorů se následně umístí zdířky, přepínače, vypínač, Led dioda určená pro signalizaci a nabíjecí konektor pro baterii.

Dále bylo zapotřebí do montážních otvorů kovové krabičky vyvrtat závit M4 pro uchycení distančních sloupků. Na těchto sloupcích bude poté umístěna DPS.



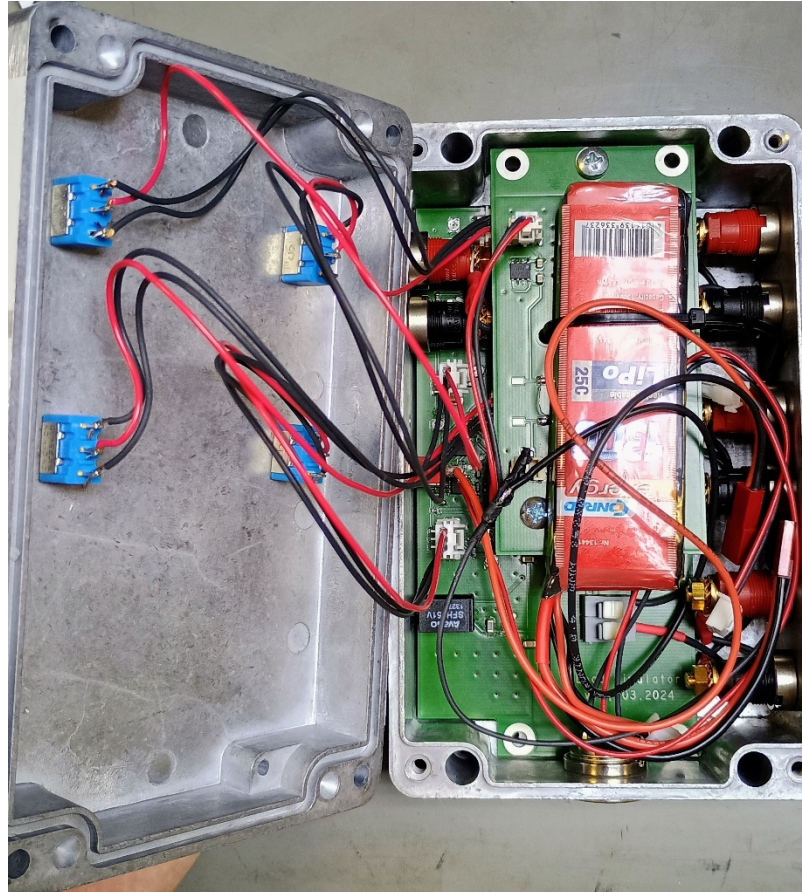
Obr. 52 Konstrukce kovové krabičky.

Na obr. 53 je vidět zkompletovaná jedna půlka krabičky Load simulátoru. Na tuto půlku krabičky bude umístěna druhá půlka krabičky, na kterou budou namontovány přepínače k ovládání frekvence a střídý.



Obr. 53 Montáž vstupních a výstupních zdířek.

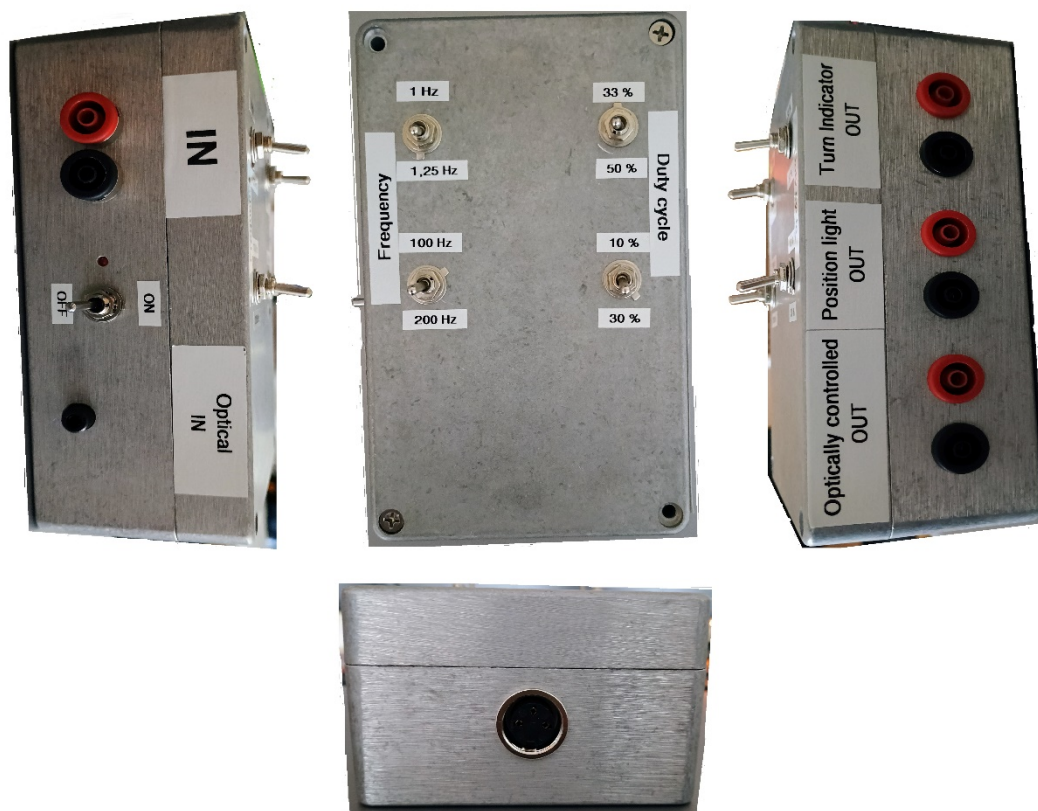
Obr. 54 obsahuje pohled na vnitřní kompletní konstrukci Load simulátoru. Z obrázku je patrné, že pro návrh Load simulátoru byla použita nejmenší možná velikost krabičky. Dále je z obr. 54 patrné, že jsou jednotlivé vstupy a výstupy přepínače barevně odděleny. Červená barva vodiče značí vstupy a černá barva vodiče značí výstupy. Průřez vodičů řídicí a napájecí části Load simulátoru je $0,35 \text{ mm}^2$ a průřez vodičů výkonové části, tzn od vstupních a výstupních zdírek k Wago svorkám je $0,75 \text{ mm}^2$.



Obr. 54 Kompletní montáž Load simulátoru.

5.8 Zkonstruovaný výrobek

Na obr. 55 je znázorněno foto jednotlivých pohledů krabičky Load simulátoru. Kovová krabička je osazena jednotlivými komponenty včetně popisů funkce. Dle obr. 55 je patrné, že vrchní 2 přepínače slouží pro přepínání frekvence a střídy směrového světla. Naopak spodní 2 přepínače slouží k přepínání frekvence a střídy pozičního světla.



Obr. 55 Foto zkonstruované krabičky – jednotlivé pohledy zvenku.

6. PRAKTICKÁ MĚŘENÍ S LOAD SIMULÁTOREM V EMC KOMOŘE

Pro praktická měření jednotlivých testů s Load simulátorem v EMC komoře byly použity 2 typy světla. Pro otestování výstupu Load simulátoru pro operační mód směrového světla byl použit světlomet Stellantis. K otestování výstupu Load simulátoru pro operační mód pozičního světla byl použit vzorek LED čipu z automobilu Renault.

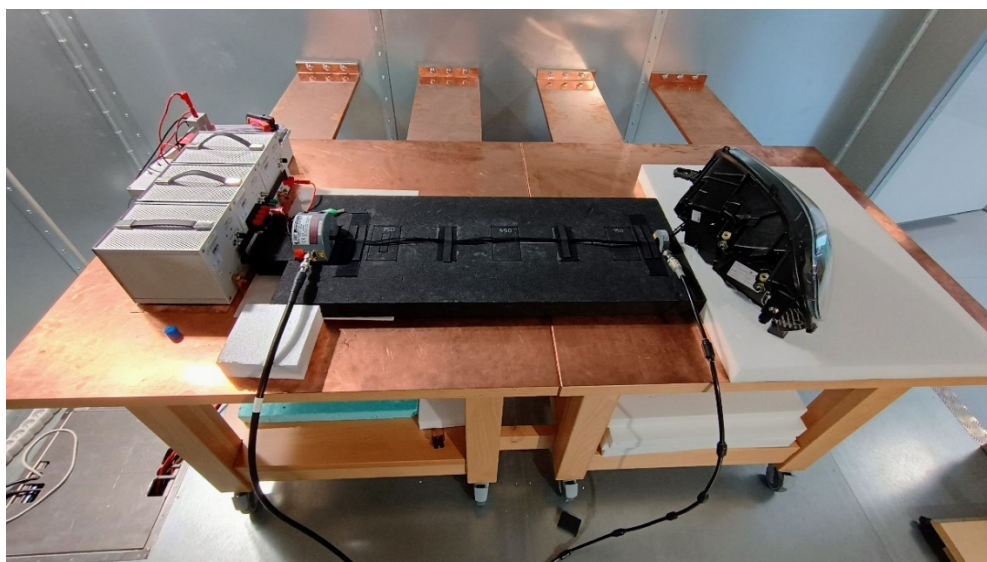
6.1 Test dle normy ISO 11452-4 (BCI) - uzavřená smyčka

Load simulátor byl připojen mezi napájecí zdroj a LISN. BCI injektážní sonda zde byla po trase umístěna nejbližší k Load simulátoru. Pro měření se použily komponenty viz tabulka 4.

6.1.1 Zapojení testu v EMC komoře

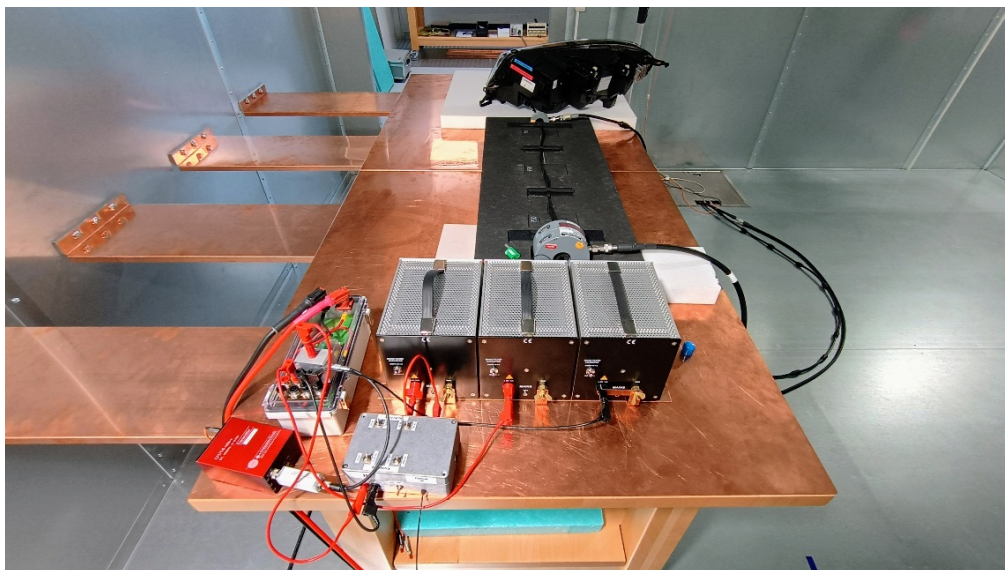
Měřicí pracoviště bylo sestaveno na základě kapitoly 2.3. Mezi LISN a DUT byl pro měření použit kabelový svazek o celkové délce 1000 mm. Vzdálenost měřicí sondy BCI byla od DUT 50 mm a vzdálenost BCI injektážní sondy byla od DUT 900 mm, viz obr. 56. Na sestaveném pracovišti obr. 56 jsou použity pěnové polystyreny o výšce 50 mm. Tato výška je předepsaná, viz blokové schéma kapitola 2.3. Pro upevnění kabelového svazku jsou na polystyrenu připravena místa pro uchycení pomocí suchých zipů, popřípadě je možné použít PVC lepicí pásku.

Během testu byl měřen proudový odběr světla a světelný výstup byl monitorován kamerou.



Obr. 56 Zapojení metody BCI – uzavřená smyčka.

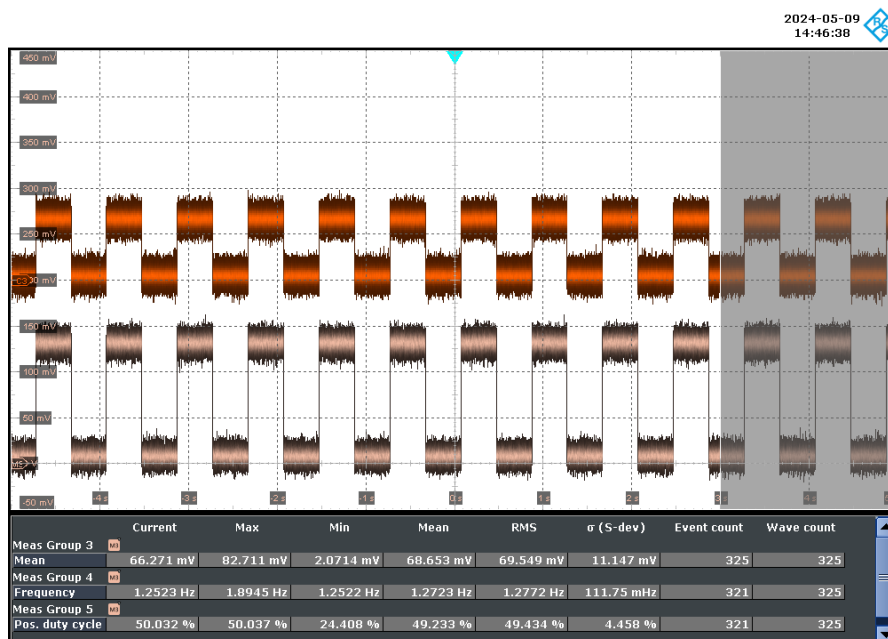
Obr. 57 představuje foto zapojení Load simulátoru mezi napájecím zdrojem a LISN.



Obr. 57 Zapojení metody BCI – uzavřená smyčka; detail.

Pomocí takto zapojeného pracoviště metody BCI – uzavřená smyčka, byl změřen výstup Load simulátoru pro směrové světlo, poziční světlo a opticky řízený výstup.

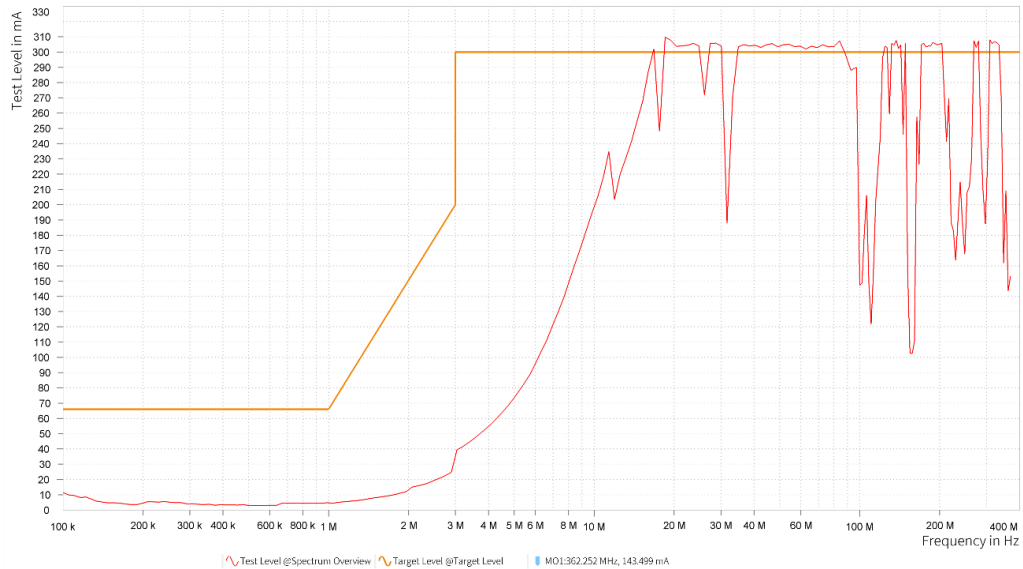
Pomocí digitálního osciloskopu byl sledován proudový odběr DUT. Podle průběhu proudového odběru DUT byly měřeny frekvence a střída na výstupu Load simulátoru, viz obr. 58.



Obr. 58 Měření proudového odběru pomocí digitálního osciloskopu.

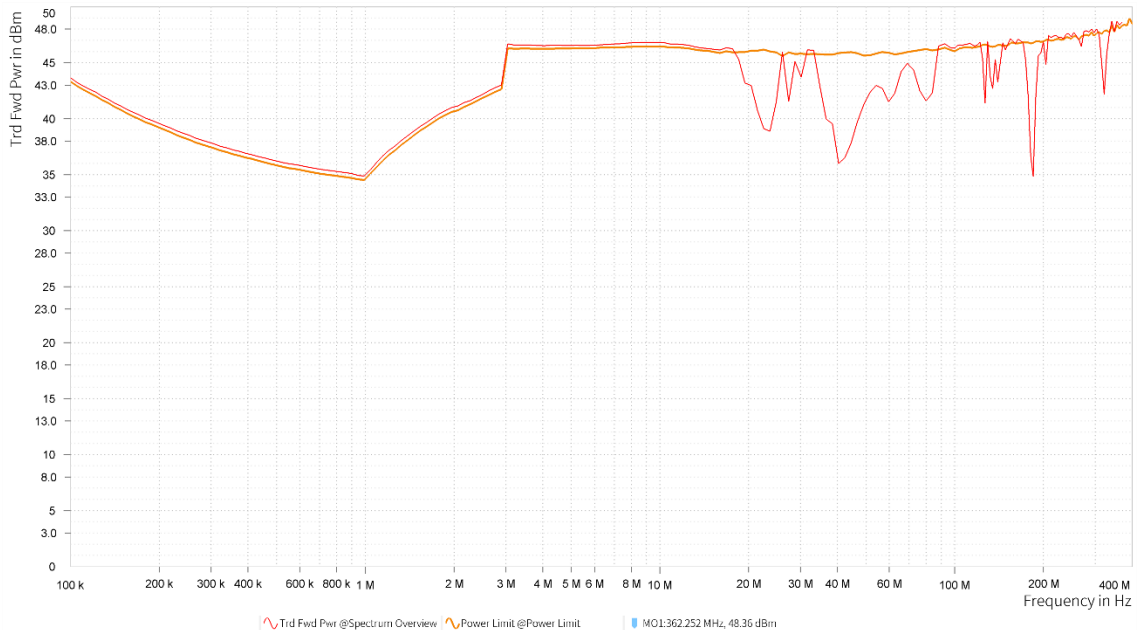
6.1.2 Naměřené průběhy

Oranžový průběh, viz obr. 59 představuje úroveň požadovaného rušivého proudu. Červený průběh znázorňuje naměřený rušivý proud. Z průběhu na obr. 59 je patrné, že při kmitočtu 18 MHz došlo k překročení kalibrované úrovně rušivého proudu naměřenou úrovní.



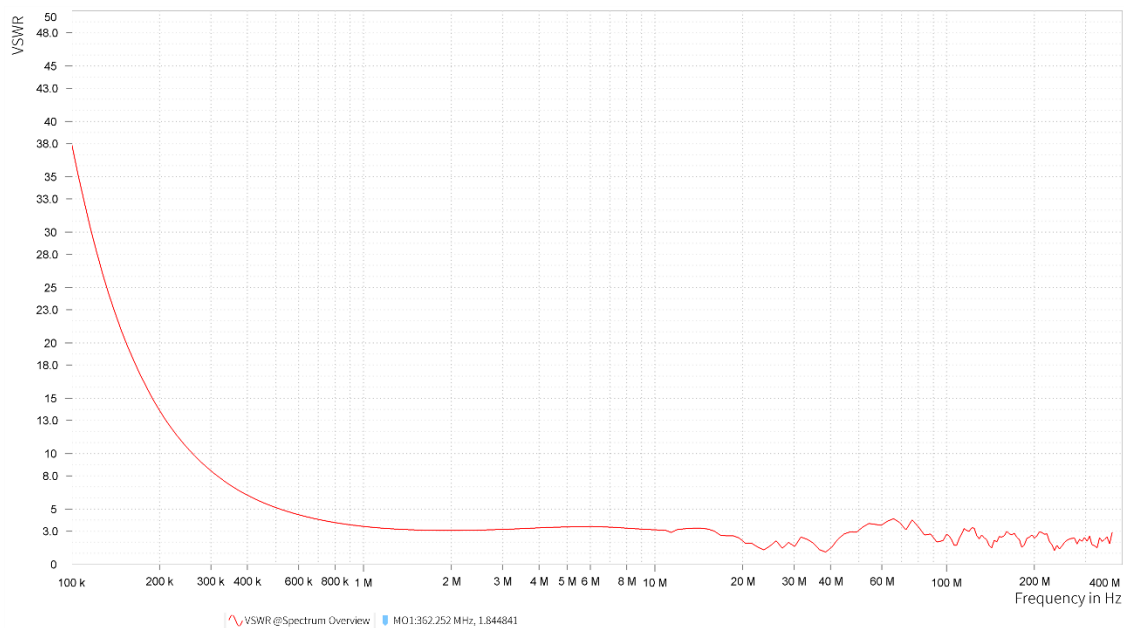
Obr. 59 Kmitočtová závislost testovací úrovně a naměřené úrovně rušivého proudu.

Na obr. 60 je znázorněn výkon dodávaný do injektážní sondy. Oranžový průběh znázorňuje maximální výkon, který odpovídá kalibrovanému výkonu vynásobenému čtyřmi. Červený průběh znázorňuje měřený dodávaný výkon do injektážní sondy.



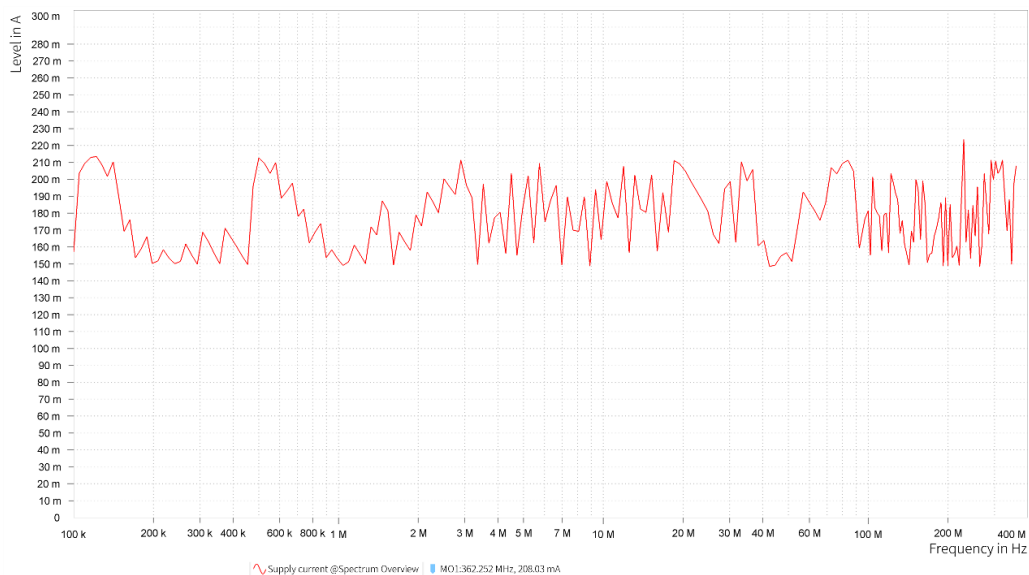
Obr. 60 Kmitočtová závislost výkonu injektážní sondy.

Na obr. 61 je vidět průběh kmitočtové závislosti poměru stojatých vln na injektážní sondě.



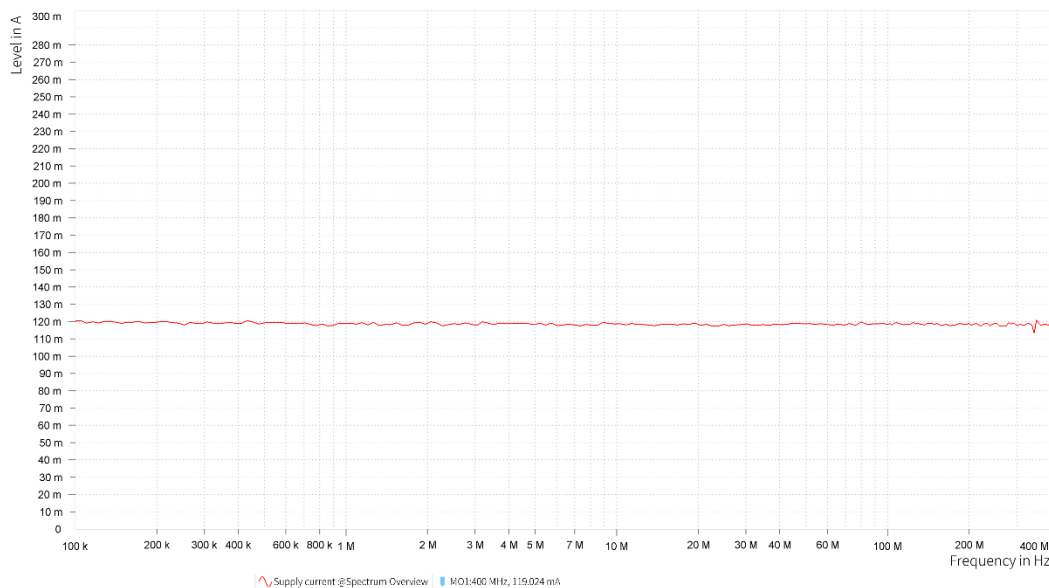
Obr. 61 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln na injektážní sondě.

Na obr. 62 je znázorněna kmitočtová závislost střední hodnoty napájecího proudu směrového světla změřená pomocí digitálního osciloskopu. Střední hodnota napájecího proudu je z časového intervalu 2 vteřiny, interval odpovídal délce aplikovaného rušení.



Obr. 62 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.

Na obr. 63 je znázorněna velikost napájecího proudu pozičního světla. U pozičního světla je stejně jako u směrového světla zachycena střední hodnota napájecího proudu z časového intervalu 2 vteřiny, po dobu aplikovaného rušení.



Obr. 63 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.

Bylo provedeno několik měření, na světlech Stellantis (směrové světlo) a Renault (poziční světlo). Měření s opticky řízeným výstupem Load simulátoru bylo provedeno na obou uvedených světlech. Několik dalších kol měření proběhlo s optimalizovanými návrhy Load simulátoru, viz následující kapitola 6.1.3.

6.1.3 Zhodnocení výsledků

Při měření výstupu na směrové světlo došlo k zarušení Load simulátoru na kmitočtu 174 MHz a na kmitočtovém rozsahu 309 MHz – 400 MHz. Vlivem zarušení nebyl schopný Load simulátor dodržet nastavenou frekvenci a střidu. Obdobný problém nastal i při měření výstupu na poziční světlo. Vlivem zarušení Load simulátoru došlo k nedodržení nastavené frekvence a střidy na kmitočtu od 164 MHz do 175 MHz a v kmitočtovém rozsahu 310 MHz – 360 MHz. Load simulátor byl dále optimalizován:

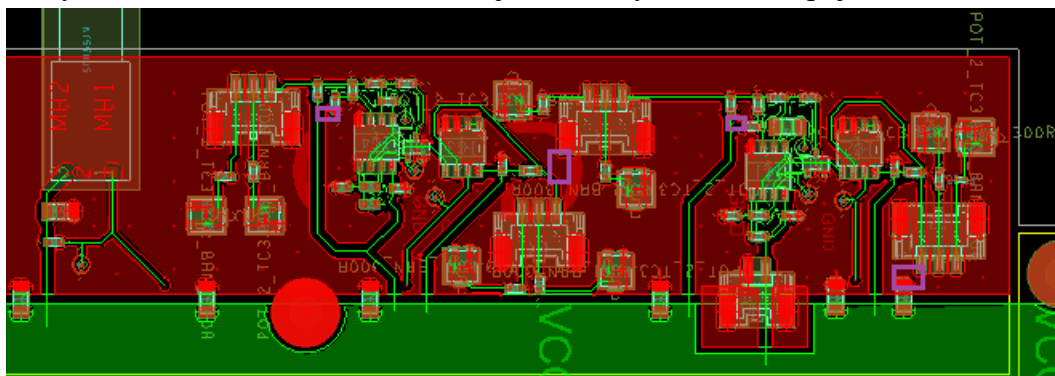
- zkrácení vodičů z konektorů na DPS k přepínačům,
- odpojení přepínačů a spojení pinů na konektoru mezi sebou,
- přidání kondenzátorů k přívodu konektoru frekvence a střidy na DPS,
- přidání feritu na napájecí napětí za stabilizátor LDO.

První optimalizací bylo zkrácení vodičů, které propojují DPS a přepínače. Touto optimalizací se problém se zarušením Load simulátoru nezlepšil.

Následně byly odpojeny všechny přepínače a spojily se dva piny konektoru, které nastavují frekvenci a střidu mezi sebou přímo na DPS. Ukázalo se, že tímto propojením přímo na DPS došlo ke zlepšení, protože již nedošlo k zarušení Load simulátoru.

Díky tomuto poznatku byly diagnostikovány možné příčiny, v okolí vedení k přepínačům, kvůli kterým dochází k zarušení Load simulátoru.

Propojení dvou pinů na DPS se zrušilo. Na každý vstup napěťového děliče, který slouží k přepínání frekvence a střidy byl přidán blokovací kondenzátor o hodnotě 100 nF, viz obr. 64, fialové rámečky. Hodnota kondenzátoru byla vybrána na základě již použitých blokovacích kondenzátorů stejné hodnoty v návrhu zapojení.



Obr. 64 Přidání blokovacích kondenzátorů na DPS.

Následným měřením se ukázalo, že při měření výstupu na směrové světlo došlo k zarušení Load simulátoru při kmitočtovém rozsahu 370 MHz – 380 MHz a při měření výstupu na poziční světlo došlo k zarušení na frekvenci 370 MHz. Oproti původní navržené verzi došlo ke zlepšení. Load simulátor je vhodný pro testování do úrovně rušivého proudu 100 mA při vyšším rušivém proudu 300 mA je zapotřebí opatřit napájení Load simulátoru feritovým jádrem s označením 74271142(S) [23], což bylo prakticky ověřeno dalším měřením.

6.1.4 Použité přístroje

V tab. 4 jsou vypsaný všechny použité přístroje pro měření BCI – uzavřená smyčka. Měření dle normy ISO 11452-4 (BCI) bylo realizováno v reverberační komoře ETS-Lindgren.

Tab. 4 Použité přístroje při měření dle normy ISO 11452-4 (BCI) – uzavřená smyčka

	Druh	Typ	Parametr
V komoře	Kondenzátor	Eaton XTM-18R0626-R	61,7 F / 18 V
	Optický převodník	Messtechnik Transmitter	DC.. 100 kHz, +/- 0,75 V
	Měření proudu	Bočník	10 mΩ / 20 mΩ
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	BCI injektážní sonda	FCC F-120-6A	10 kHz - 400 MHz
	BCI měřicí sonda	FCC F-65	10 kHz – 1 GHz
Mimo komoru	Napájecí zdroj	Gossen Metrawatt SYSKON P1500	0 V - 60 V
	Širokopásmový zesilovač	R&S BBA150	4 kHz - 400 MHz / 200 W
	Signálový generátor	R&S SMB100A	9 kHz - 3,2 GHz
	Měřič výkonu	R&S NRX	
	Testovací přijímač	R&S ESPI	9 kHz - 3 GHz
	Frekvenční generátor	Tektronix AFG 3011	0 Hz - 10 MHz / 250 MSs/s
	CAN optický oddělovač	Messtechnik optoCAN-FD	
	Osciloskop	R&S RTE 1024	200 MHz / 5GSa/s
	Počítač	IPC AutoCont	

6.2 Test dle normy ISO 11452-4 (BCI) – substituční metoda

Druhou metodou měření dle normy ISO 11452-4 s Load simulátorem byla substituční metoda BCI. Měřením se ukázalo, že při této metodě jsou na rušení Load simulátoru kladeny nižší nároky, protože oproti metodě s uzavřenou smyčkou, se injektážní sonda nachází po kabelovém svazku dále od Load simulátoru.

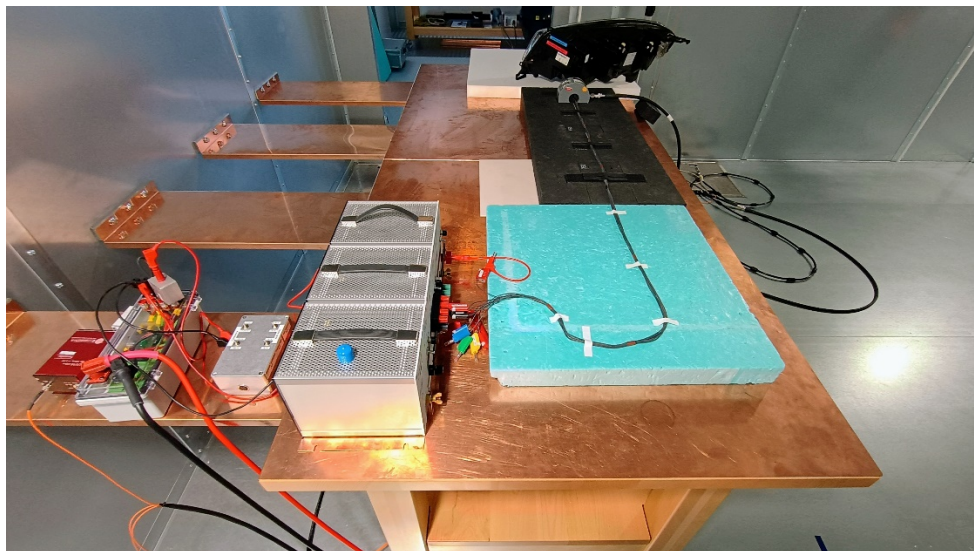
6.2.1 Zapojení testu v EMC komoře

Na obr. 65 je vyfoceno zapojení dle normy ISO 11452-4 (BCI) – substituční metoda. Oproti zapojení s uzavřenou smyčkou si lze všimnout pozměněného rozložení přístrojů. Je to z toho důvodu, že při tomto měření je od LISN do DUT k zapotřebí dvoumetrovy kabel.



Obr. 65 Zapojení metody BCI – substituční metoda.

Zapojení od napájecího zdroje do LISN, viz obr. 66, je stejné, jako u metody BCI – uzavřená smyčka.



Obr. 66 Zapojení metody BCI – detail zapojení před LISN.

V kapitole 2.3 o substituční metodě BCI se dalo dočíst, že měření se provádí ve dvou částech. V první části je veden celý kabelový svazek BCI injektážní sondou. Detail je znázorněn na obr. 67.



Obr. 67 BCI – substituční metoda.
Detail na průchod kabelového svazku BCI injektážní sondou.

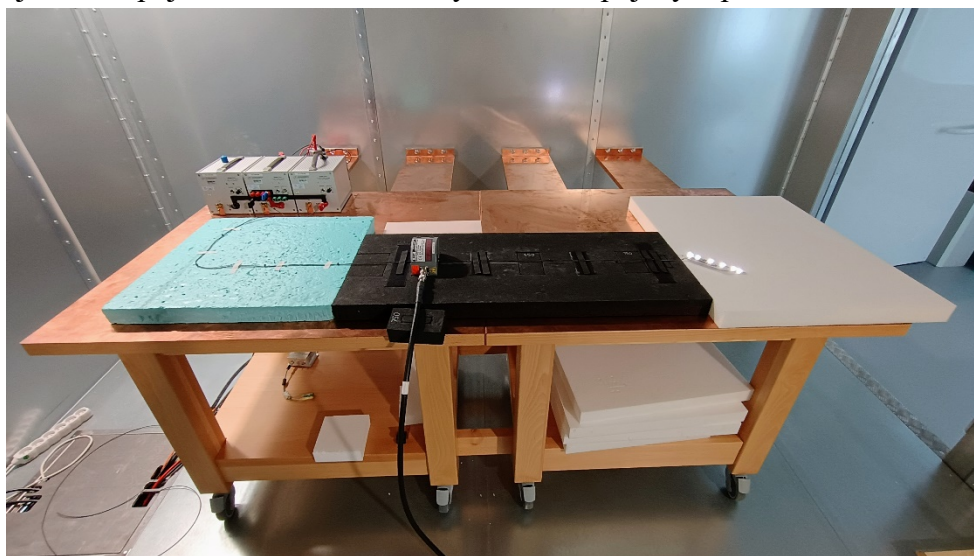
Ve druhé části měření je zemní vodič veden mimo BCI injektážní sondu, viz obr. 68.



Obr. 68 BCI – substituční metoda.

Detail na průchod kabelového svazku injektážní sondou mimo GND.

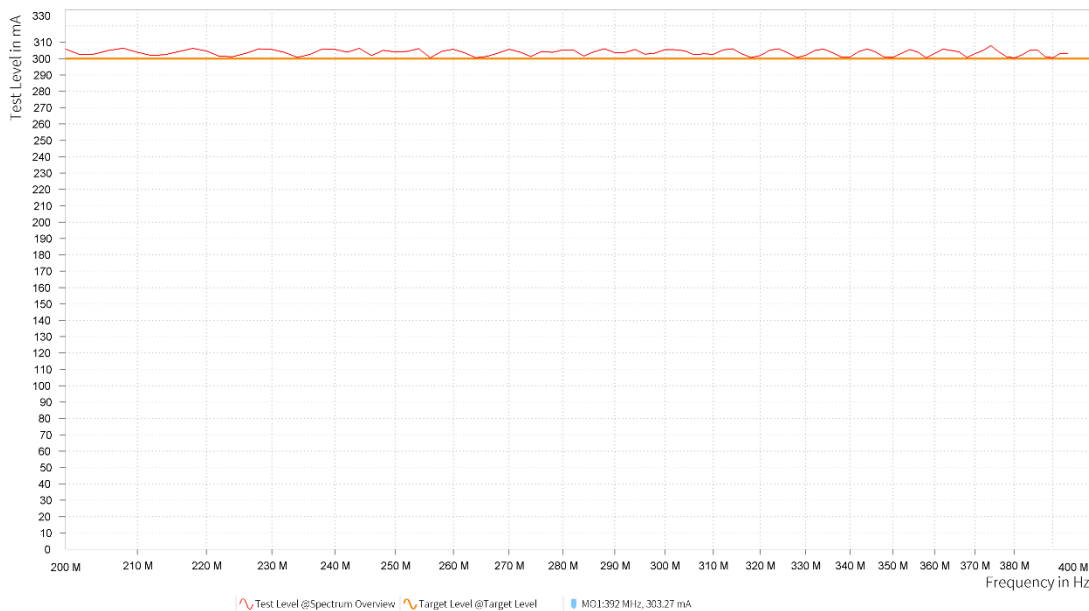
Stejným způsobem byl testován u Load simulátoru i výstup na poziční světlo. Obr. 69 znázorňuje foto zapojení substituční metody BCI se zapojeným pozičním světlem.



Obr. 69 Zapojení měřicího pracoviště BCI substituční metody s pozičním světlem.

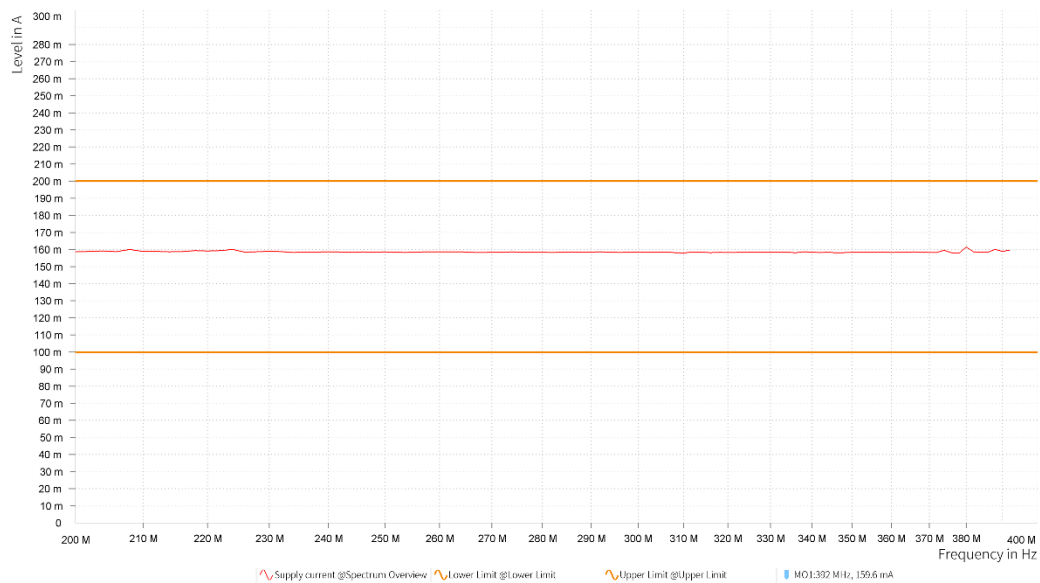
6.2.2 Naměřené průběhy

Oranžová čára představuje úroveň rušivého proudu. Oproti BCI – uzavřená smyčka byla substituční metoda měřena v kmitočtovém rozsahu od 200 MHz do 400 MHz. Testovací úroveň rušivého proudu byla nastavena na 300 mA, viz obr. 70.



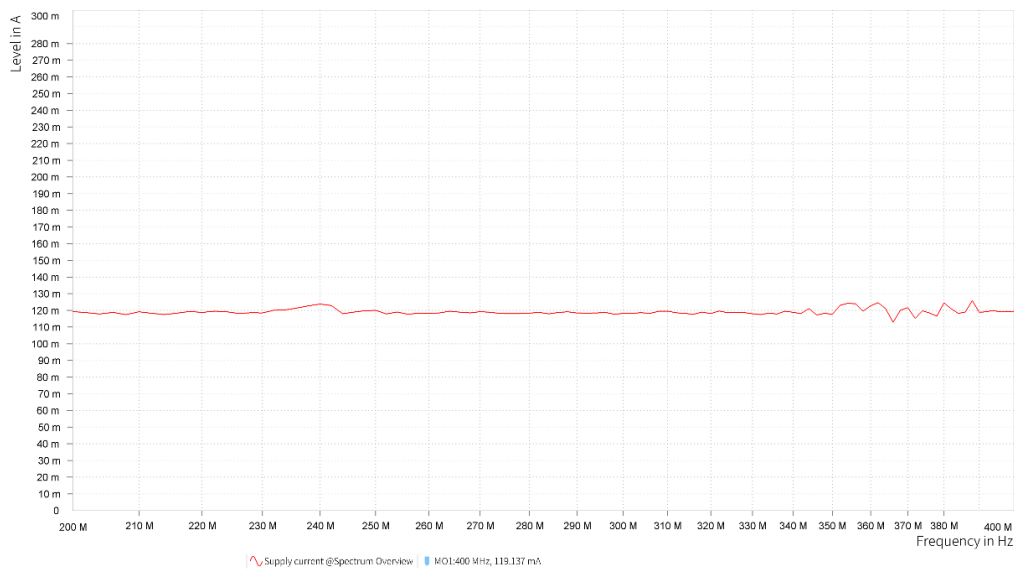
Obr. 70 Kmitočtová závislost testovací úrovně.

Na obr. 71 je zaznamenána kmitočtová závislost střední hodnoty napájecího proudu za dobu jedné periody. Dle změřeného průběhu má střední hodnota napájecího proudu velikost 160 mA. Z průběhu lze dále vyčíst, že při 394 MHz došlo k zarušení Load simulátoru a k celkovému výpadku.



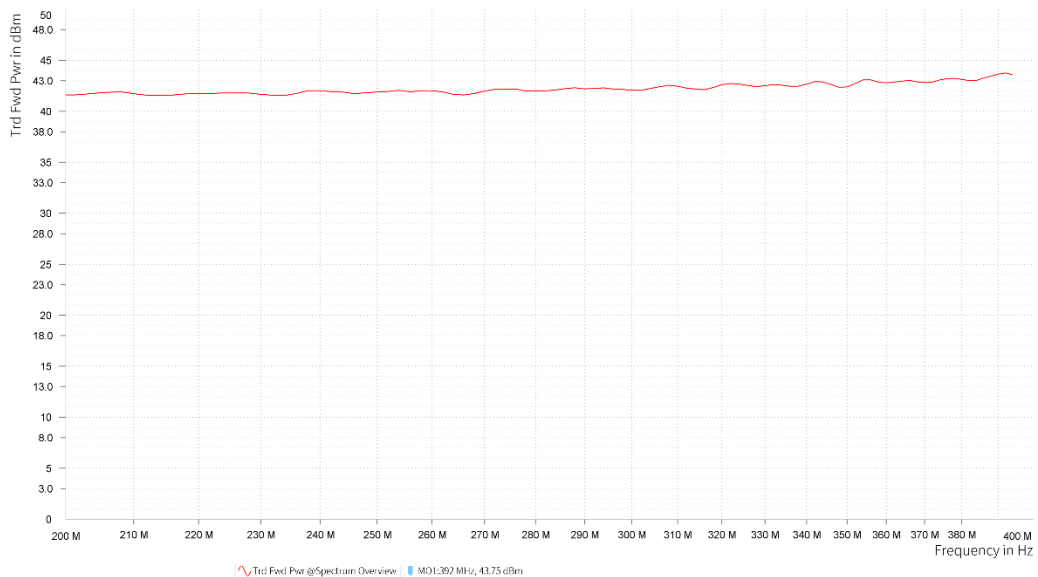
Obr. 71 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.

Na obr. 72 je vidět napájecí proud pozičního světla, který je 120 mA v celém kmitočtovém rozsahu. Dále je patrné, že při měření pozičního světla nedošlo k výpadku Load simulátoru.



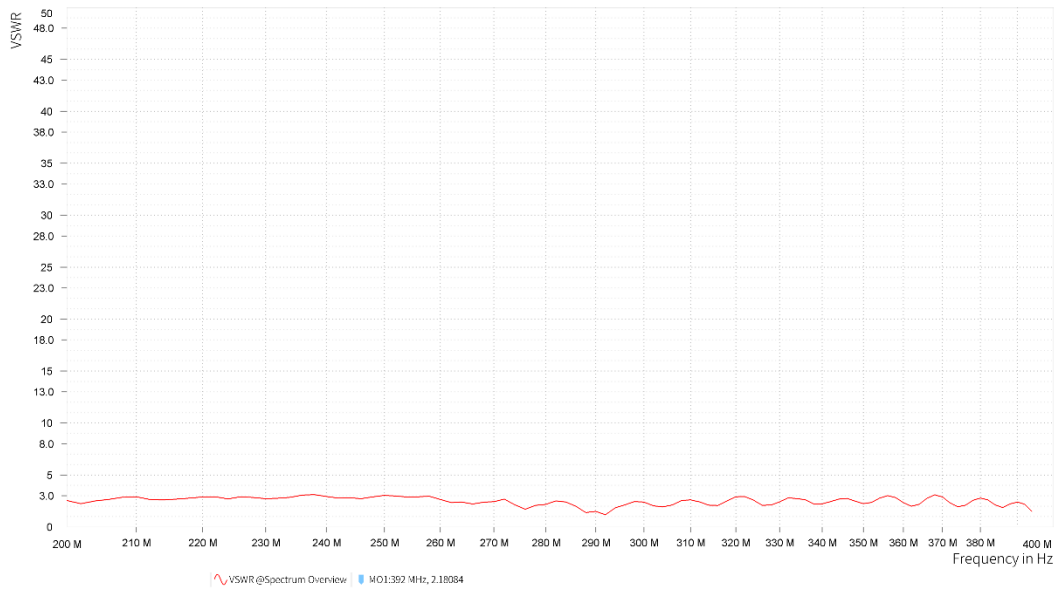
Obr. 72 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.

Dle obr. 73 je patrné, že výkon dodávaný do injektážní sondy se s rostoucím kmitočtem zvyšuje. Při výpadku měření na kmitočtu 394 MHz byl dodávaný výkon 43 dBm.



Obr. 73 Kmitočtová závislost výkonu injektážní sondy.

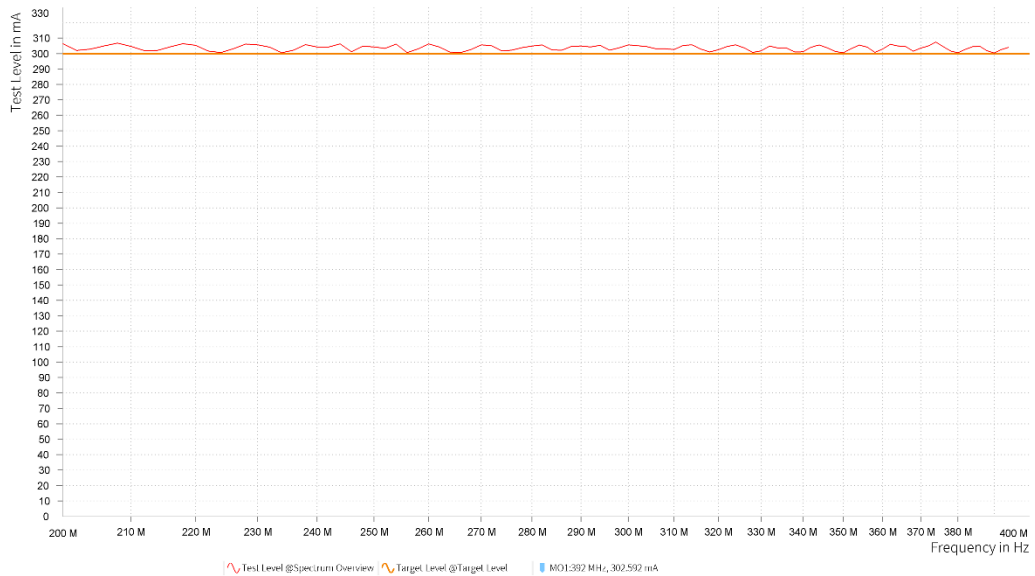
Z kmitočtové závislosti poměru stojatých vln, viz obr. 74, lze vyčíst, že $PSV < 3$.



Obr. 74 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln.

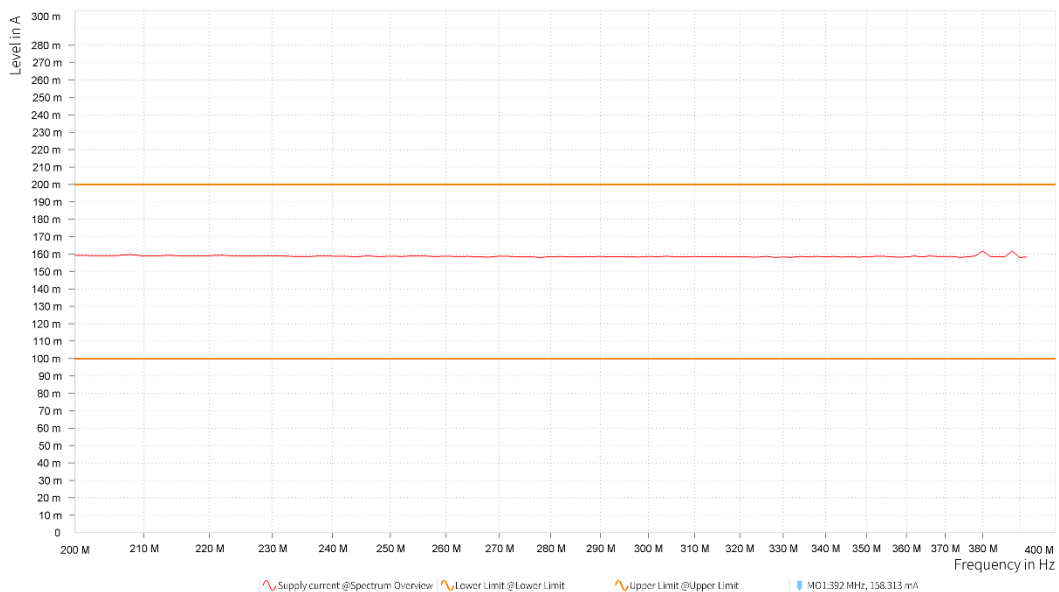
Následujícím měřením bylo měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo a poziční světlo s vodičem GND mimo BCI injektážní sondu, viz obr. 75 až obr. 79.

Z obr. 75 je patrné, že je nastaven kmitočtový rozsah od 200 MHz do 400 MHz a je nastavená testovací úroveň rušivého proudu na 300 mA, tak jako při měření s kabelovým svazkem uvnitř BCI injektážní sondy.



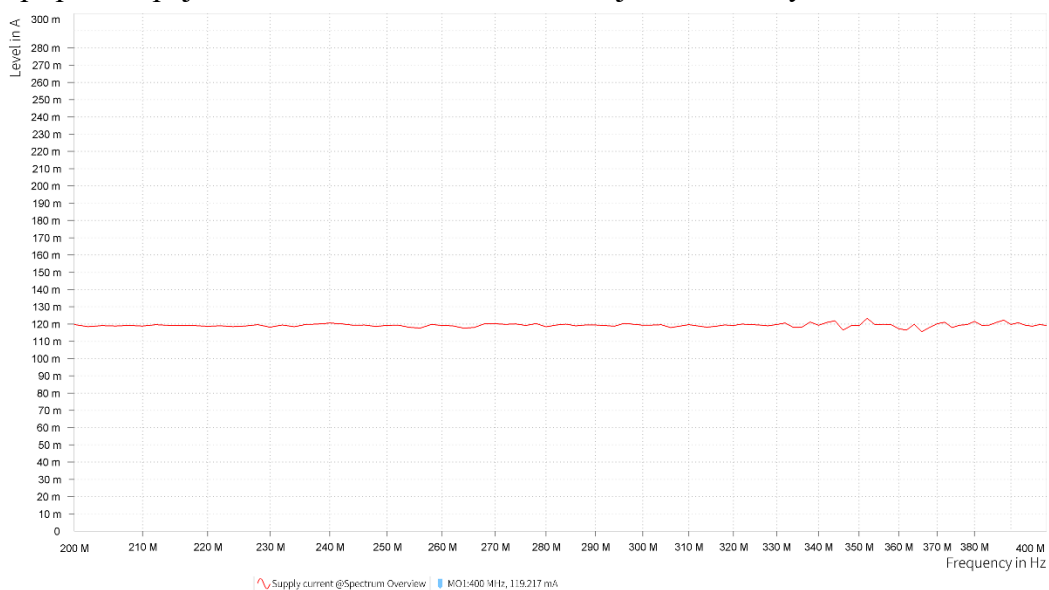
Obr. 75 Kmitočtová závislost testovací úrovně.

Stejný průběh, viz obr. 76, jako v předchozím měření se všemi vodiči uvnitř BCI injektážní sondy je velikost střední hodnoty napájecího proudu 160 mA.



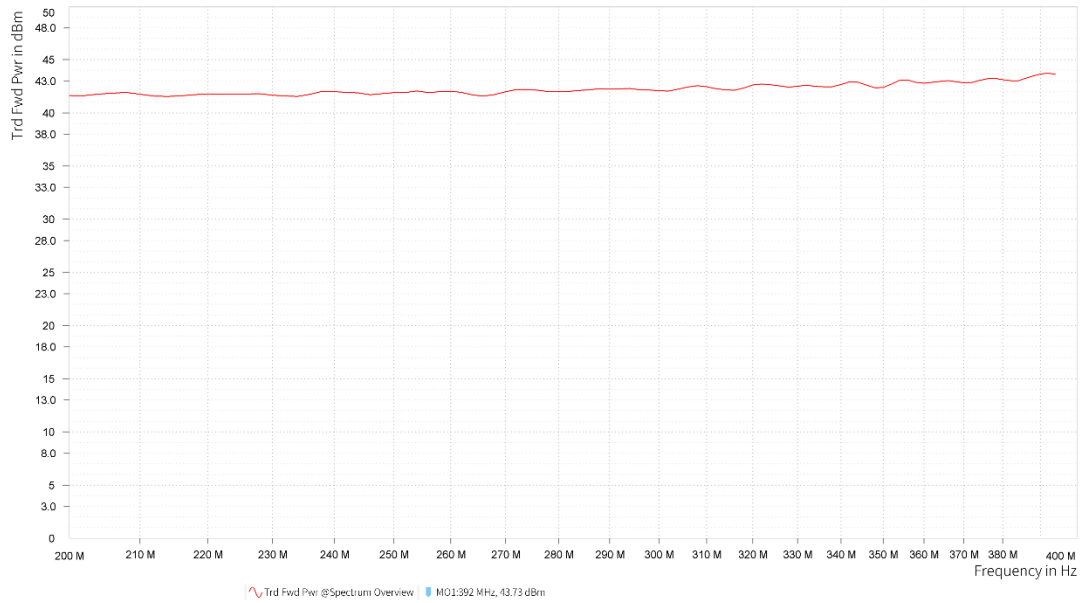
Obr. 76 Kmitočtová závislost napájecího proudu směrového světla.

Z obr. 77 je patrné, že se jedná o stejnou velikost napájecího proudu pozičního světla, jako v případě zapojení BCI se všemi vodiči uvnitř injektážní sondy.



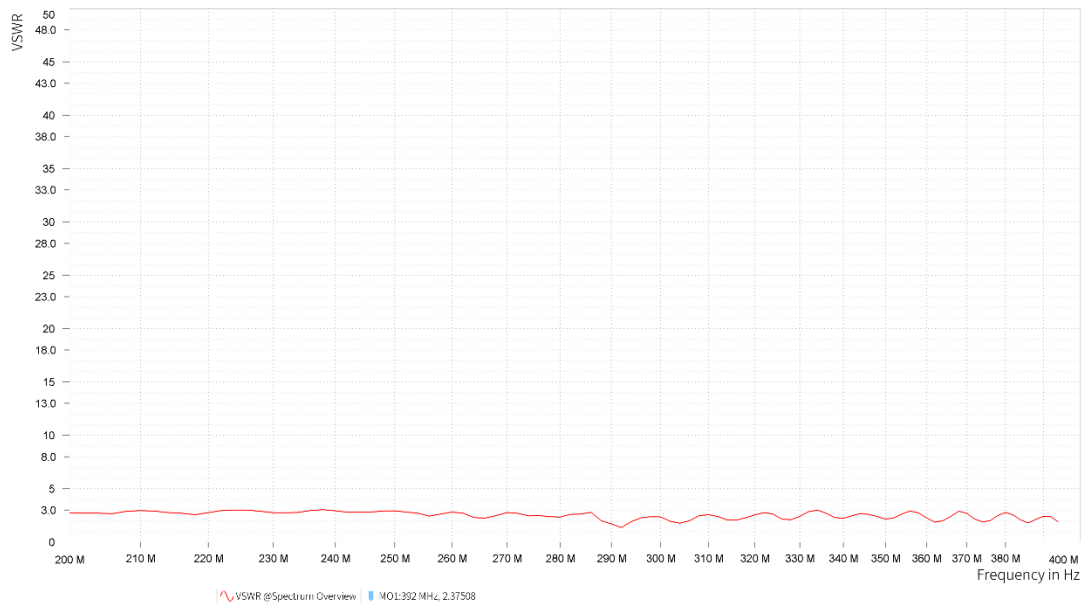
Obr. 77 Kmitočtová závislost napájecího proudu pozičního světla.

Oproti měření se všemi vodiči uvnitř BCI injekční sondy zůstává nezměněná i kmitočtová závislost výkonu injekční sondy, viz obr. 78.



Obr. 78 Kmitočtová závislost výkonu injekční sondy.

Beze změny zůstává také poměr stojatých vln, viz obr. 79, PSV < 3.



Obr. 79 Kmitočtová závislost poměru stojatých vln.

Stejným způsobem jako při měření metody BCI s uzavřenou smyčkou byla měřena také substituční metoda BCI. Bylo provedeno několik měření BCI injektážní sondy ve vzdálenosti 750 mm, 450 mm a 150 mm od DUT. Měření bylo provedeno na světlech Stellantis (směrové světlo) a Renault (poziční světlo). Opticky řízený výstup Load simulátoru byl měřen pouze ve vzdálenosti 750 mm, protože z hlediska odolnosti při měření nevykazoval výstup Load simulátoru žádná rušení.

6.2.3 Zhodnocení výsledků

Zapojení dle normy ISO 11452-4 (BCI) substituční metoda bylo měřeno na již optimalizovaném Load simulátoru.

Při měření výstupu na směrové světlo s vedením kabelového svazku uvnitř BCI injektážní sondy, došlo k výpadku Load simulátoru při kmitočtu 394 MHz. Aby došlo ke správnému fungování Load simulátoru, bylo zapotřebí snižovat úroveň napájecího proudu z 300 mA na 100 mA. Při napájecím proudu 100 mA bylo zajištěno správné funkce Load simulátoru.

Při měření výstupu na směrové světlo s vedením GND mimo BCI injektážní sondu došlo také k zarušení Load simulátoru při kmitočtu 394 MHz. Postupným snižováním úrovně napájecího proudu z 300 mA, bylo zaručeno správné funkce Load simulátoru při napájecím proudu 130 mA.

Ukázalo se, že pro test dle normy ISO 11452-4 (BCI) – substituční metoda, je vhodné použít Load simulátor pro nižší úroveň napájecího proudu.

6.2.4 Použité přístroje

V tabulce 5 jsou uvedeny použité komponenty, při měření ve firmě Marelli pro měření dle normy ISO 11452-4 (BCI).

Tab. 5 Použité přístroje při měření dle normy ISO 11452-4 (BCI) – substituční metoda.

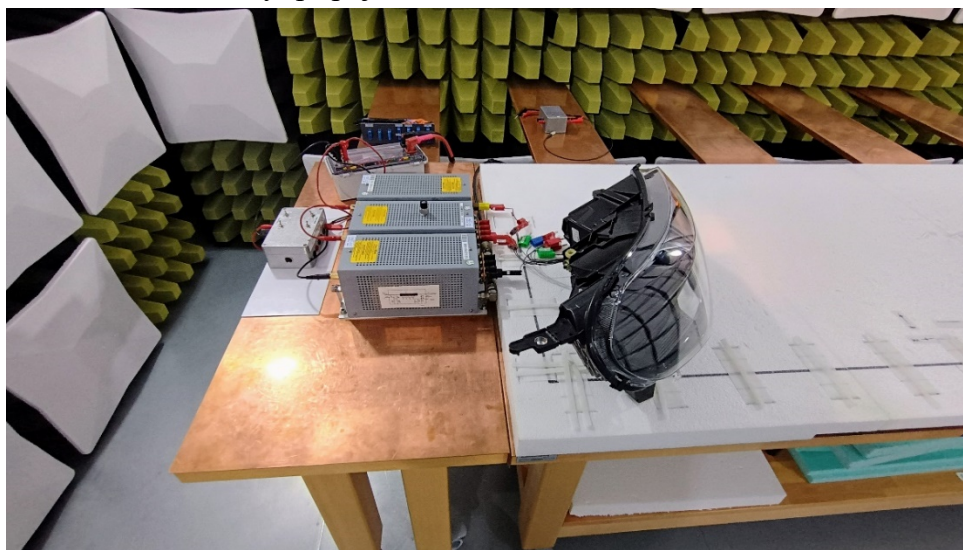
	Druh	Typ	Parametr
V komoře	Kondenzátor	Eaton XTM-18R0626-R	61,7 F / 18 V
	Optický převodník	Messtechnik Transmitter	DC.. 100 kHz, +/- 0,75 V
	Měření proudu	Bočník	10 mΩ / 20 mΩ
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	LISN	Schwarzbeck NNBM-8124	5 μH / 70 A / 500 V
	BCI injektážní sonda	FCC F-120-6A	10 kHz - 400 MHz
Mimo komoru	Napájecí zdroj	Gossen Metrawatt SYSKON P1500	0 V - 60 V
	Širokopásmový zesilovač	R&S BBA150	4 kHz - 400 MHz / 200 W
	Signálový generátor	R&S SMB100A	9 kHz - 3,2 GHz
	Měřič výkonu	R&S NRX	
	Testovací přijímač	R&S ESPI	9 kHz - 3 GHz
	Frekvenční generátor	Tektronix AFG 3011	0 Hz - 10 MHz / 250 MSs/s
	CAN optický oddělovač	Messtechnik optoCAN-FD	
	Osciloskop	R&S RTE 1024	200 MHz / 5GSa/s
	Počítač	IPC AutoCont	

6.3 Test dle normy CISPR25 – rušení po vedení

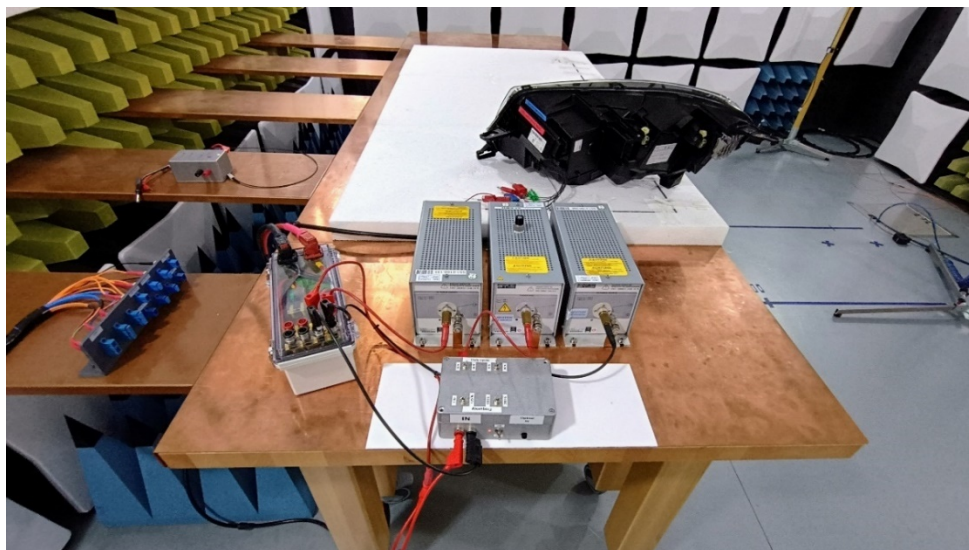
Test rušení po vedení (CE), dle normy CISPR25, byl měřen v EMC komoře ETS-Lindgren. Pro tento test bude vyzkoušen výstup Load simulátoru na směrové světlo, výstup Load simulátoru na poziční světlo a výstup Load simulátoru řízený přes optické vlákno. Samotné měření rušení po vedení bylo nejprve změřeno se zapojeným světlem a následně s odpojeným světlem.

6.3.1 Zapojení testu v EMC komoře

Na obr. 80 a obr. 81 je vidět zapojení měřicího pracoviště pro metodu CE, viz kapitola 2.1. Světlo byl připojen ve vzdálenosti 200 mm od LISN.



Obr. 80 Zapojení pracoviště pro metodu CE.



Obr. 81 Zapojení metody CE.
Detail zapojení od napájecího zdroje do LISN.

6.3.2 Naměřené průběhy

Měření CE proběhlo na zapojeném a odpojeném světle v kmitočtovém rozsahu od 100 kHz do 108 MHz, celkem ve třech krocích:

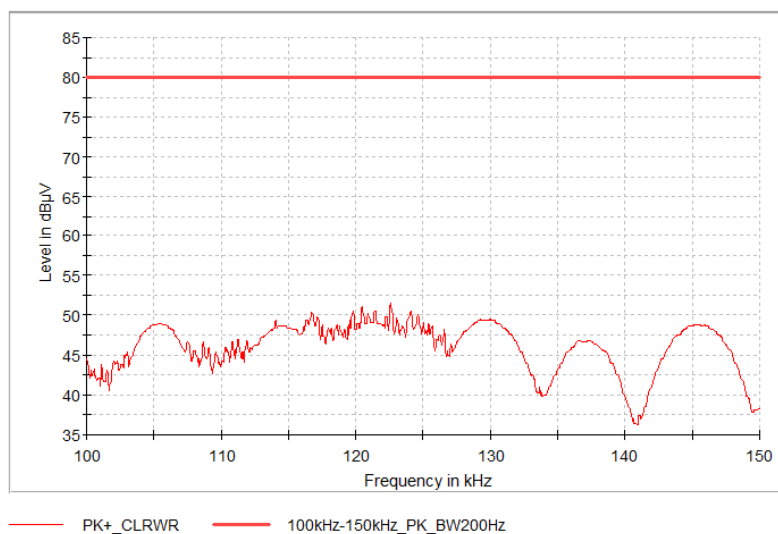
- kmitočtový rozsah od 100 kHz do 150 kHz, s šířkou pásma 200 Hz,
- kmitočtový rozsah od 150 kHz do 87 MHz, s šířkou pásma 9 kHz,
- kmitočtový rozsah od 30 MHz do 108 MHz, s šířkou pásma 120 kHz.

Změřená napěťová úroveň bez světla, viz obr. 82 má v kmitočtovém rozsahu 100 kHz až 150 kHz hodnotu až 17 dB μ V. Rezerva pod stanovenou limitní úrovní světla je 63 dB μ V. Z tohoto důvodu je vyzařování Load simulátoru zanedbatelné.



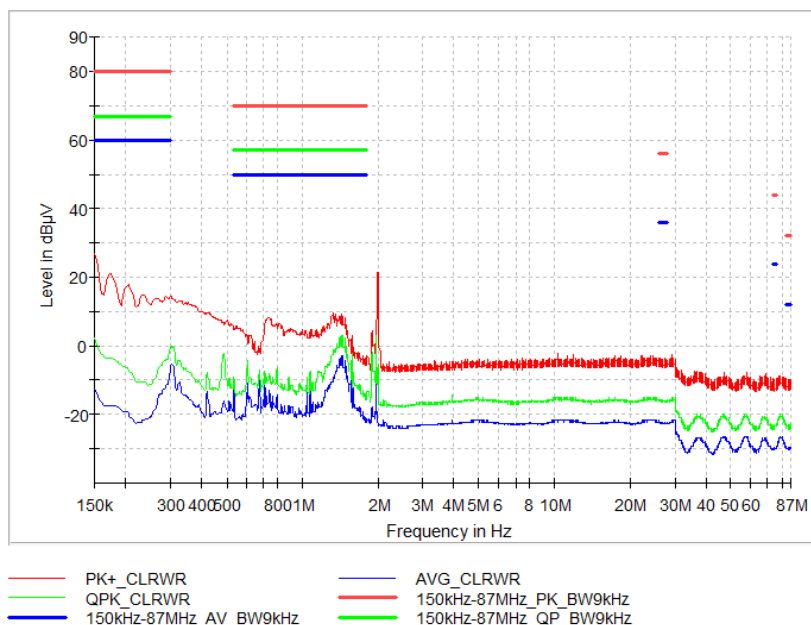
Obr. 82 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Při připojení světla, viz obr. 83, je patrné, že napěťová úroveň vzrostla. Maximální úroveň napětí je s připojeným světlem 52 dB μ V. Pod stanovenou limitní úroveň je rezerva 28 dB μ V.



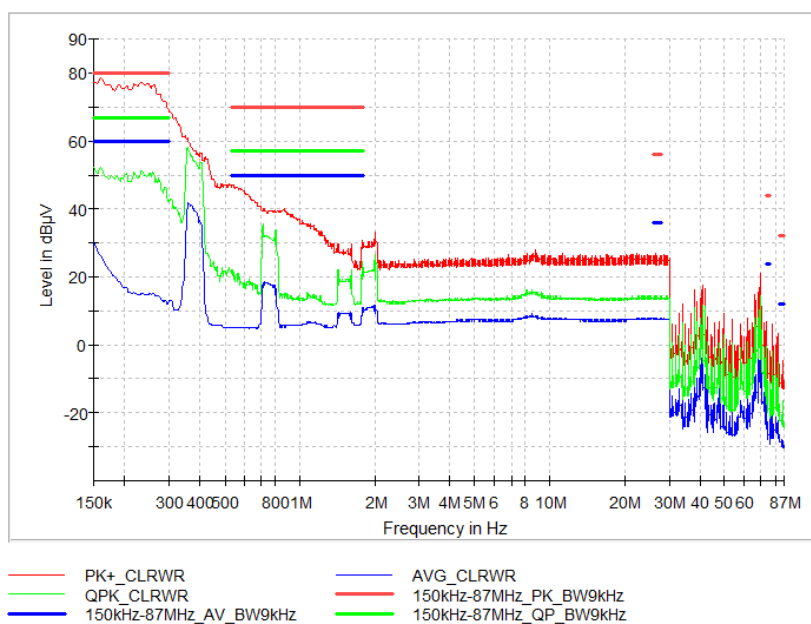
Obr. 83 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření se světlem.

Při kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 87 MHz je patrné, že hodnoty špičkové (červená), kvazi-špičkové (zelená) a průměrné (modrá) úrovně napětí jsou pod limitními úrovněmi světla, viz obr. 84. Z průběhu viz obr. 84 je dále patrné, že při kmitočtu 2 MHz došlo k nárůstu napěťové úrovně. Tento nárůst nebyl nijak řešen, protože se jedná o napěťovou úroveň 20 dB μ V, kterou lze zanedbat.



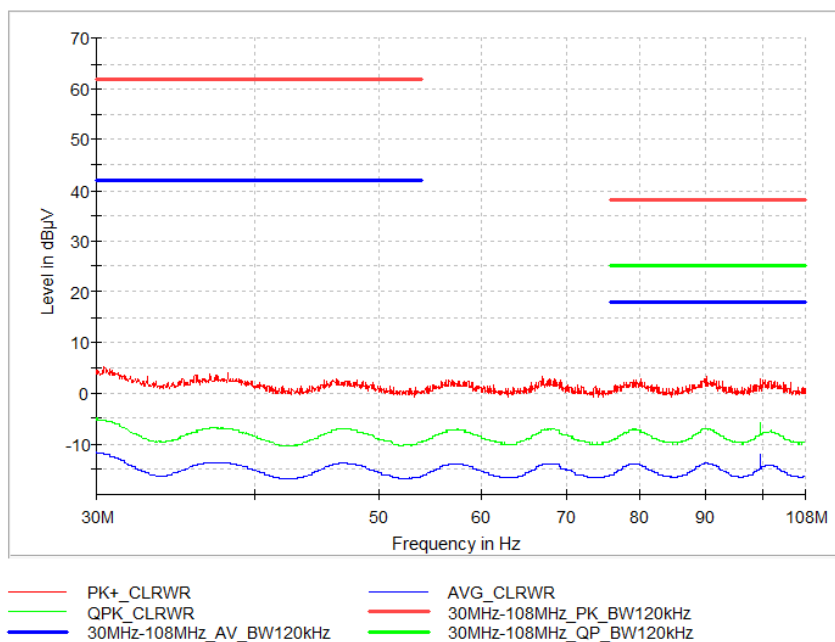
Obr. 84 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Na obr. 85 je znázorněn průběh s připojeným světlem. Z průběhu je patrné, že nedošlo k překročení stanovených limitních úrovní.



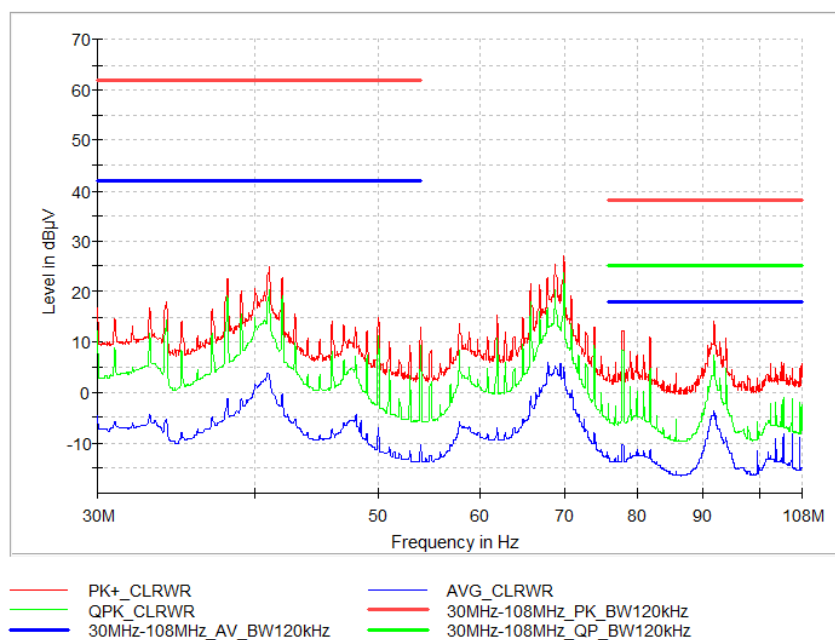
Obr. 85 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

V kmitočtovém rozsahu od 30 MHz do 108 MHz, obr. 86, je patrné, že Load simulátor má bez připojeného světla maximální úroveň napětí do 5 dB μ V.



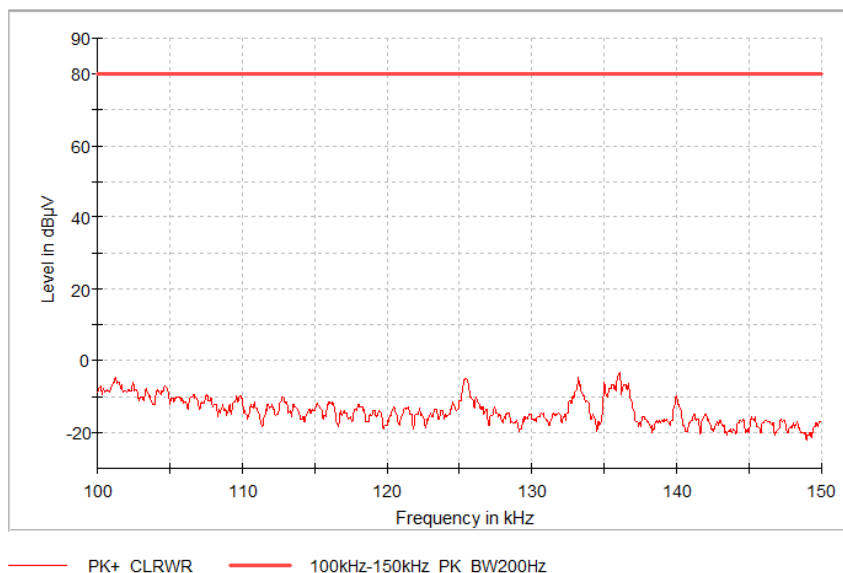
Obr. 86 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Při měření Load simulátoru se zapojeným světlem, obr. 87, se míra vyzařování zvýšila na maximální úroveň 25 dB μ V. I v tomto kmitočtovém rozsahu nedošlo k překročení stanovených limitních úrovní.



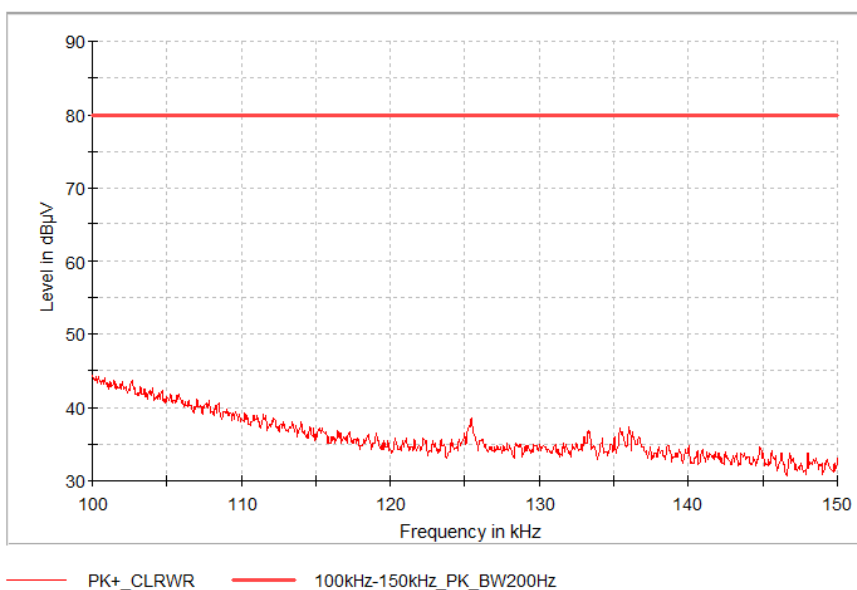
Obr. 87 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

Následujícím měřením dle normy CISPR25 je výstup Load simulátoru na poziční světlo. Dle obr. 88, který představuje zapojený Load simulátor bez připojeného světla, byla na kmitočtovém rozsahu od 100 kHz do 150 kHz maximální napěťová úroveň - 5 dB μ V. Z průběhu je patrné, že rušení vzniklo při kmitočtu 125 MHz a okolo 135 MHz. Toto rušení mohlo být způsobeno kabelovým svazkem, nikoli samotným Load simulátorem. Z hlediska nízké napěťové úrovně je patrné, že Load simulátor do okolí při kmitočtu 100 kHz – 150 KHz nevyzařuje.



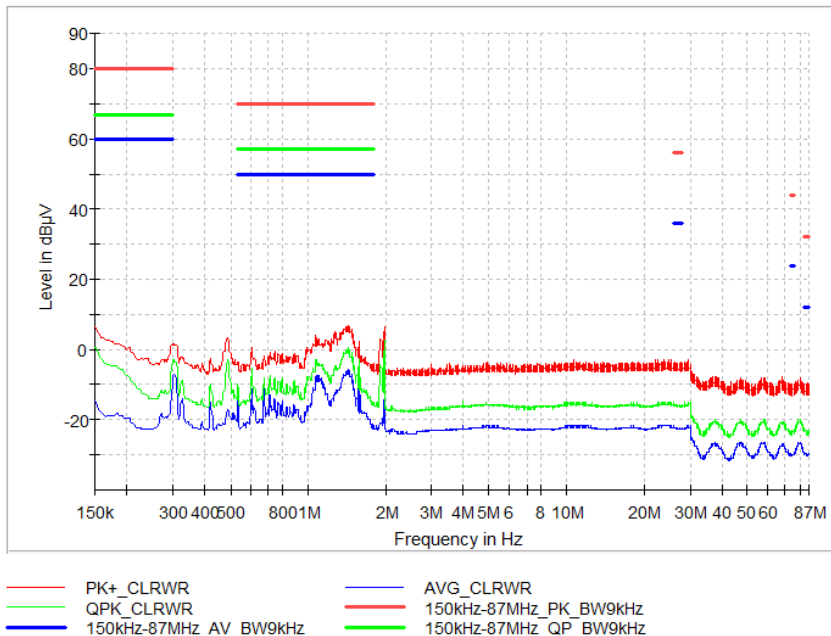
Obr. 88 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Po připojení světla, viz obr. 89 byla maximální napěťová úroveň 45 dB μ V, při kmitočtu 100 kHz.



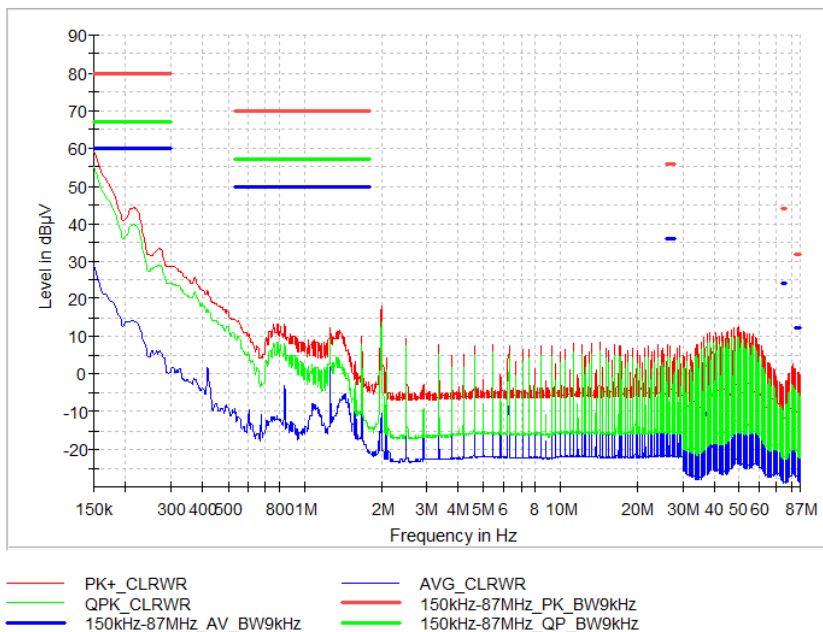
Obr. 89 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

Na obr. 90 je znázorněno měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 87 MHz. Maximální změřená napěťová úroveň je 8 dB μ V. Dle obr. 90 je patrné, že při kmitočtu 2 MHz došlo k nepatrnému nárůstu napěťové úrovně. Z hlediska napěťové úrovně 8 dB μ V je takovýto nárůst zanedbatelný.



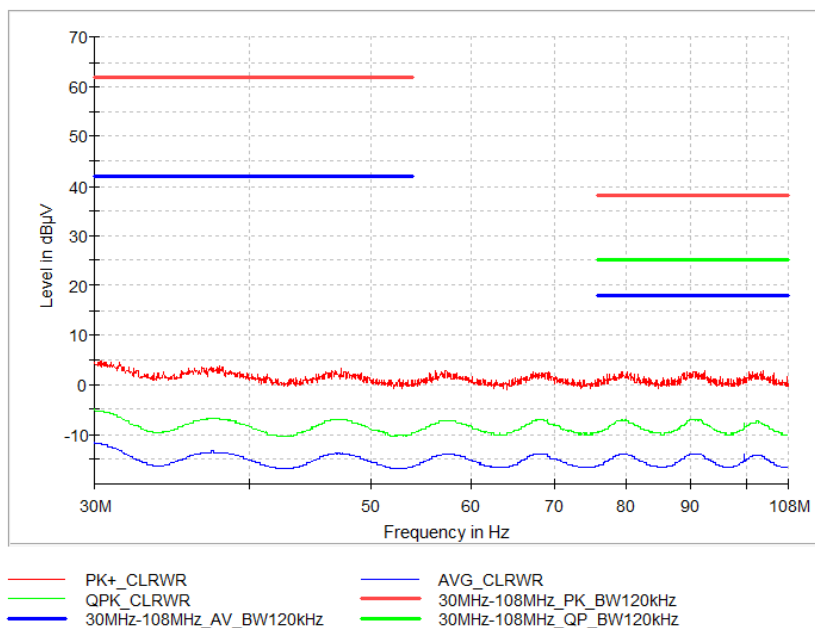
Obr. 90 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

S připojeným pozičním světlem, viz obr. 91, se maximální napěťová úroveň na kmitočtu 100 kHz oproti měření s nepřipojeným světlem zvýšila o 50 dB μ V. Stále je zde dostatečná rezerva do maximální limitní úrovně.



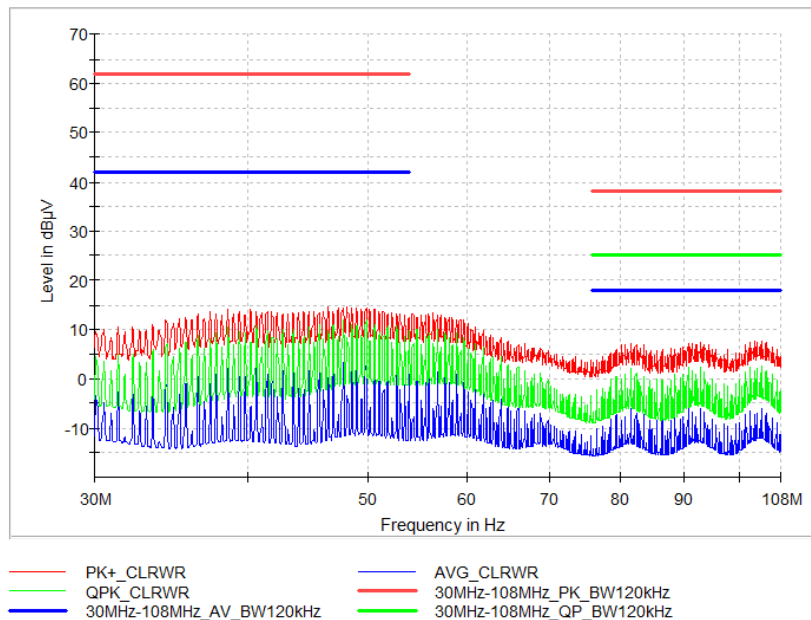
Obr. 91 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

Bez připojeného světla, obr. 92, v kmitočtovém rozsahu od 30 MHz do 108 MHz má výstup Load simulátoru na poziční světlo maximální napětovou úroveň 5 dB μ V.



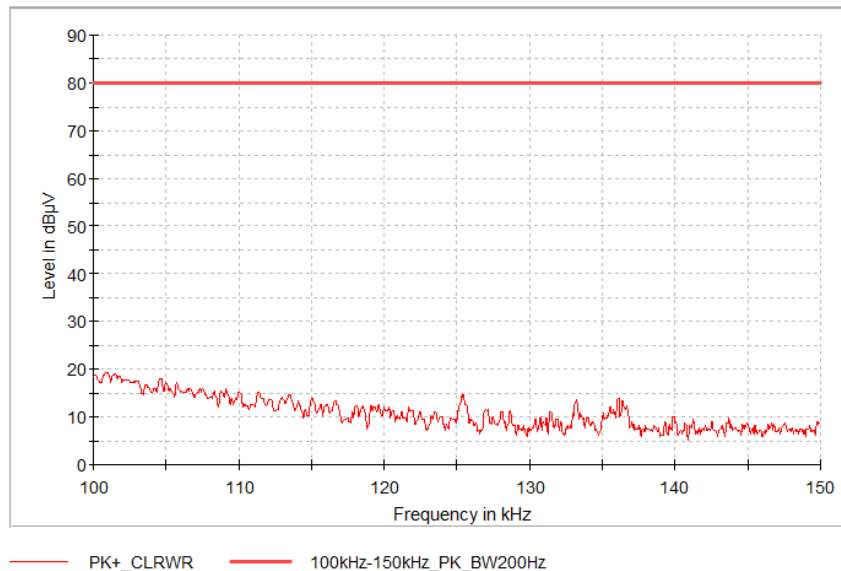
Obr. 92 Kmitočtová závislost napětové úrovně. Měření bez světla.

Při připojení pozičního světla, obr. 93, dosahuje maximální napětová úroveň 15 dB μ V. Z hlediska limitní úrovně světla je rezerva dostatečná.



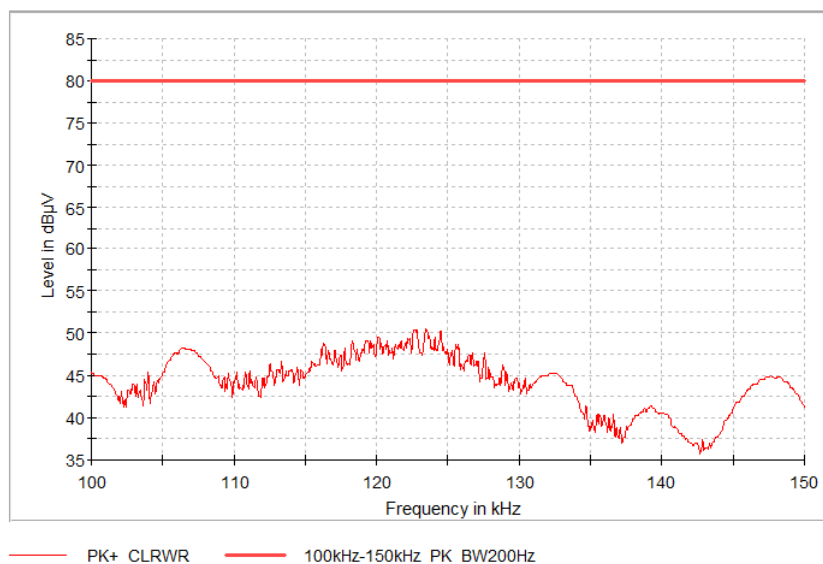
Obr. 93 Kmitočtová závislost napětové úrovně. Referenční měření.

Třetím výstupem, a tedy i třetím měřením Load simulátoru, při testu CE, je měření opticky řízeného výstupu, pro připojené směrové světlo. Na obr. 94 je znázorněna změřená úroveň napětí v kmitočtovém rozsahu od 100 kHz do 150 kHz. Dle průběhu je patrné, že maximální úroveň napětí je 20 dB μ V, při kmitočtu 100 kHz.



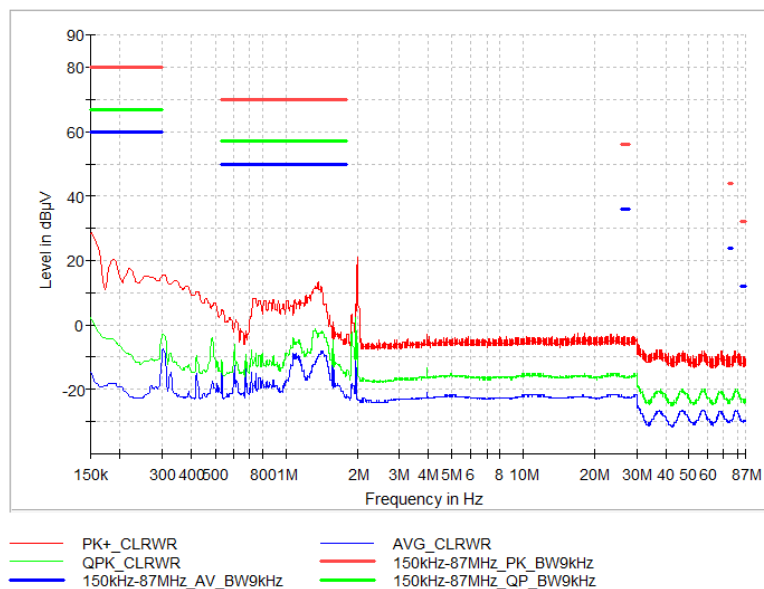
Obr. 94 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Na obr. 95 je znázorněno měření s opticky řízeným výstupem Load simulátoru s připojeným světlem. Z průběhu je patrné, že maximální úroveň napětí je 50 dB μ V, při kmitočtu 124 MHz. Z hlediska předepsané limitní úrovně světla, je zde rezerva 30 dB μ V.



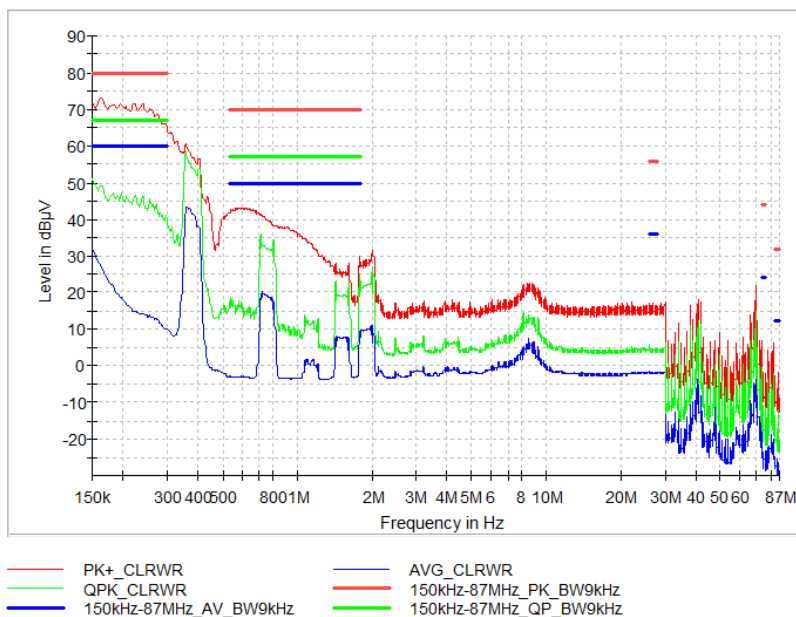
Obr. 95 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

V kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 87 MHz, viz obr. 96, je napěťová úroveň pod předepsanou limitní úrovní. Z průběhu, viz obr. 96, je patrné, že při kmitočtu 2 MHz došlo ke zvýšení napěťové úrovně na 20 dB μ V. Dle průběhu měla být při kmitočtu 2 MHz očekávaná napěťová úroveň -5 dB μ V. Z hlediska takto malé úrovně napětí lze vlastní rušení Load simulátoru zanedbat.



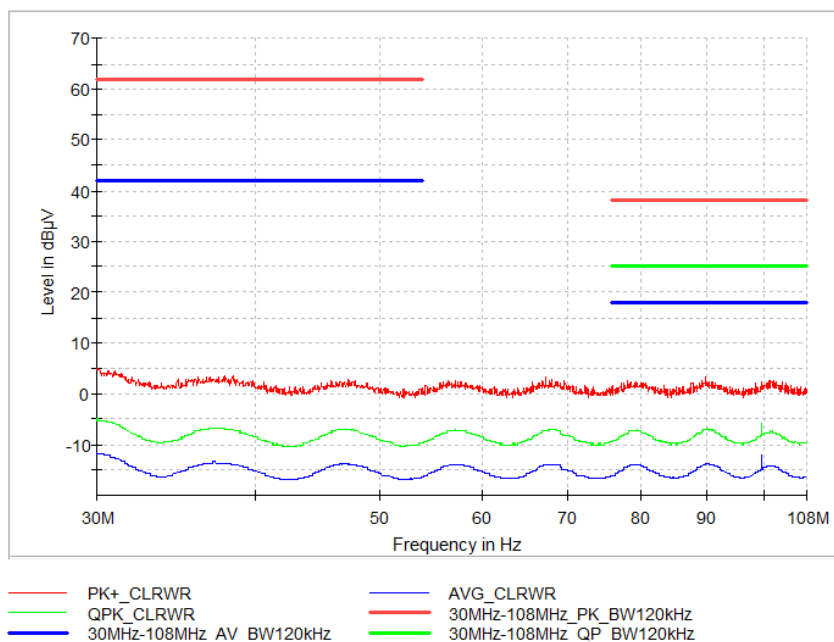
Obr. 96 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

S připojeným světlem, viz obr. 97, došlo na kmitočtu od 150 kHz do 87 MHz k nárůstu napěťové úrovně. Úroveň napětí s připojeným světlem je stále pod stanovenými limitními úrovněmi.



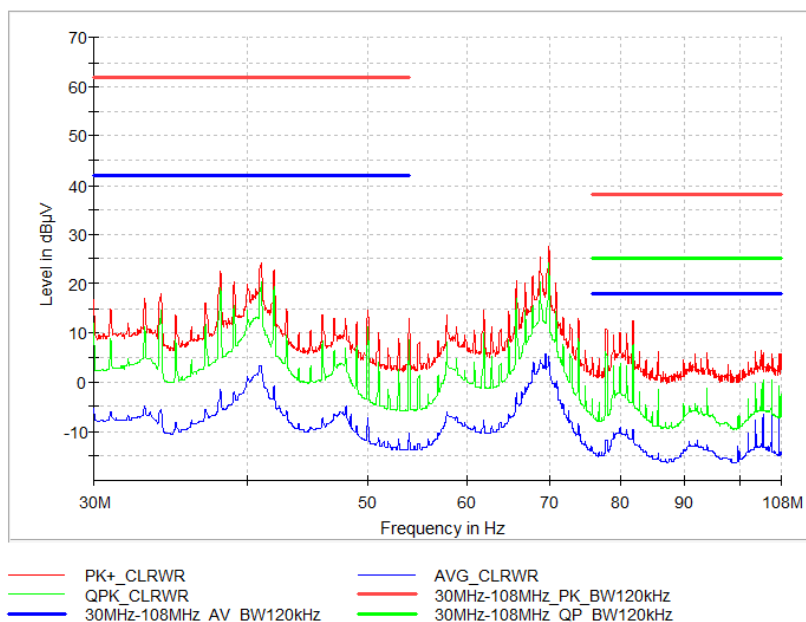
Obr. 97 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

V kmitočtovém pásmu od 30 MHz do 108 MHz, viz obr. 98, je maximální napěťová úroveň bez zapojeného světla 5 dB μ V.



Obr. 98 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.

Na obr. 99 jsou znázorněny průběhy napěťových úrovní v kmitočtovém pásmu od 30 MHz do 108 MHz s připojeným světlem. Ze změřených průběhů je patrné, že rezerva po stanovenou limitní úroveň je dostatečná.



Obr. 99 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.

6.3.3 Zhodnocení výsledků

Zapojení dle normy CISPR25 – rušení po vedení, bylo měřeno na již optimalizovaném Load simulátoru. Měřením Load simulátoru vůči rušení po vedení bylo zjištěno, že Load simulátor splňuje všechny stanovené maximální limity.

Při měření jednotlivých výstupů Load simulátoru se ukázalo, že Load simulátor vyzařuje do okolí při kmitočtu 2 MHz. Z hlediska měření se světlometem se ukázalo, že maximální úroveň napětí nepřekročila předepsané limity určené pro světlo. Vlivem nízkých hodnot napěťových úrovní lze vlastní rušení Load simulátoru zanedbat.

Z hlediska normy CISPR25 je navržený Load simulátor vhodný pro měření rušení po vedení.

6.3.4 Použité přístroje

V tabulce 6 jsou přehledně zaznamenány použité přístroje pro měření CE ve firmě Marelli.

Tab. 6 Použité přístroje při měření dle normy CISPR25 – rušení po vedení.

	Druh	Typ	Parametr
V komoře	Kondenzátor	Eaton XTM-18R0626-R	61,7 F / 18 V
	Optický převodník	Messtechnik Transmitter	DC.. 100 kHz, +/- 0,75 V
	Měření proudu	Bočník	10 mΩ / 20 mΩ
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
Mimo komoru	Napájecí zdroj	Gossen Metrawatt SYSKON P1500	0 V - 60 V
	EMI Testovací přijímač	R&S ESW 8	2 Hz - 8 GHz
	Frekvenční generátor	Tektronix AFG 3011	0 Hz - 10 MHz / 250 MSs/s
	CAN optický oddělovač	Messtechnik optoCAN-FD	
	Osciloskop	R&S RTE 1024	200 MHz / 5GSa/s
	Počítač	Advantech IPC 610L	

6.4 Test dle normy CISPR25 – vyzařované rušení

Dalším měřením s Load simulátorem byla metoda vyzařovaného rušení (RE). Jak již bylo řečeno v kapitole 2.2, měření probíhá ve čtyřech různých kmitočtových pásmech s různými anténami. Každé měření se pomocí jednotlivých antén měří v horizontálním i vertikálním směru.

U měření dle normy CISPR25 – vyzařované rušení byl použit kabelový svazek o délce 2 metry. U měření vyzařovaného rušení byl měřen výstup Load simulátoru na směrové světlo a výstup Load simulátoru na poziční světlo.

Na obr. 100 je znázorněno zapojení od napájecího zdroje do LISN pro měření dle normy CISPR25.



Obr. 100 Zapojení pro měření RE.
Detail zapojení od napájecího zdroje do LISN.

V následujících podkapitolách budou jednotlivé typy měření RE probrány více detailněji.

6.4.1 Měření dle normy CISPR25 (RE) s monopólovou anténou

Nejprve byla měřena metoda vyzařovaného rušení s monopólovou anténou. Měření probíhalo v kmitočtovém rozsahu od 10 kHz do 30 MHz. Obr. 101 a obr. 102 zobrazují pro představu zapojení měřicí metody daného testu.

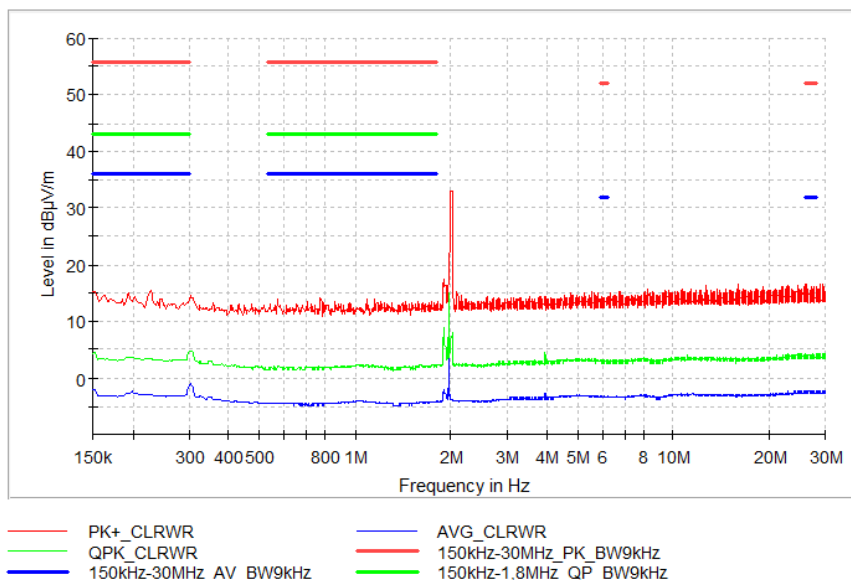


Obr. 101 Zapojení pro měření RE s monopólovou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.



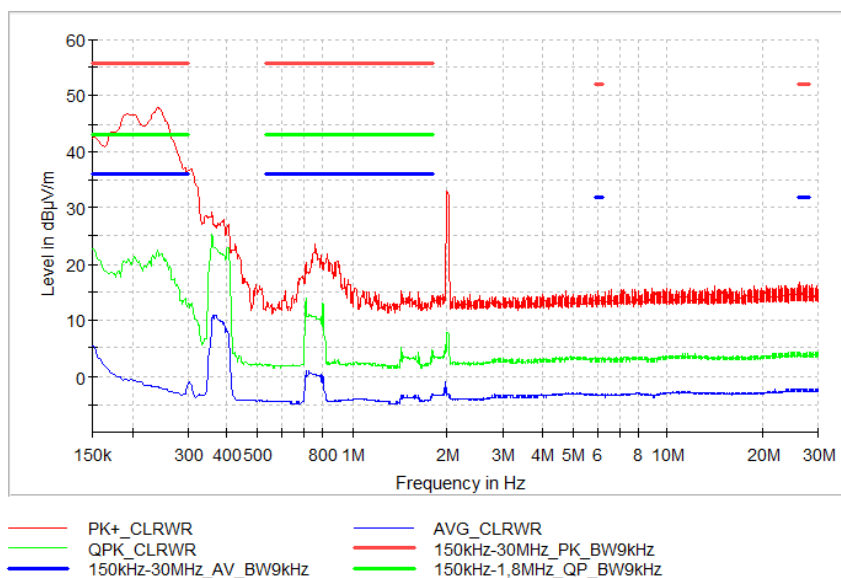
Obr. 102 Zapojení pro měření RE s monopólovou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.

Pro měření výstupu Load simulátoru bez zapojeného směrového světla byla v kmitočtovém rozsahu od 150 kHz do 30 MHz velikost napěťové úrovně do 15 dB μ V. Pouze při kmitočtu 2 MHz byla maximální napěťová úroveň 33 dB μ V. Změřený průběh je znázorněn na obr. 103.



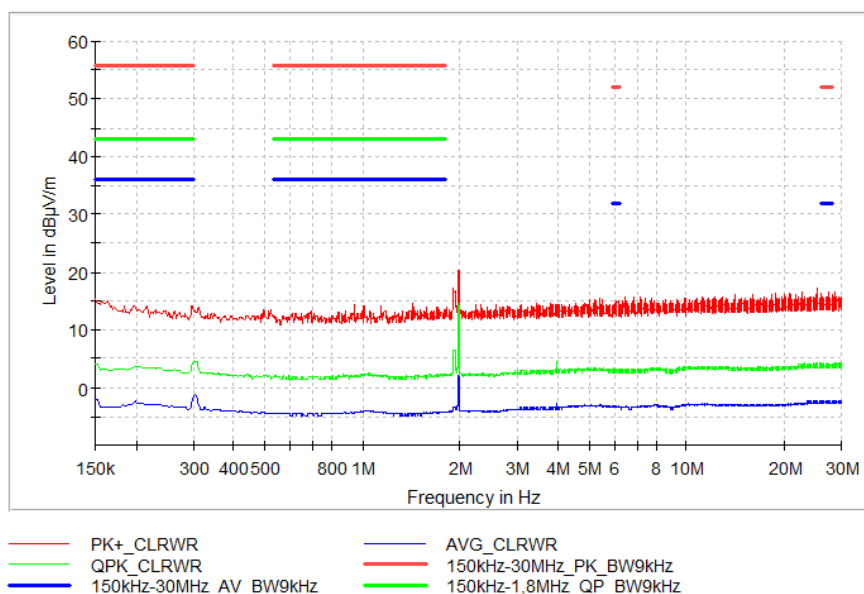
Obr. 103 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem.
Měření bez světla.

Při připojeném světlu je napěťová úroveň v celém kmitočtovém rozsahu pod stanovenými limity. Z průběhu viz obr. 104 je patrné, že při kmitočtu 2 MHz je napěťová úroveň 33 dB μ V/m.



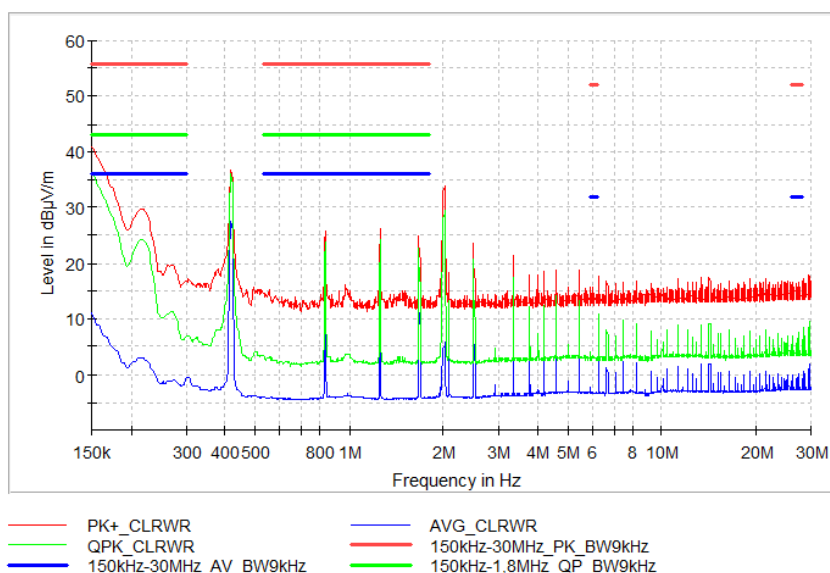
Obr. 104 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem.
Referenční měření.

Při měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo, viz obr. 105 se i zde objevila vyšší napěťová úroveň při kmitočtu 2 MHz. Velikost špičkové napěťové úrovně je 20 dB μ V/m.



Obr. 105 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem.
Měření bez světla.

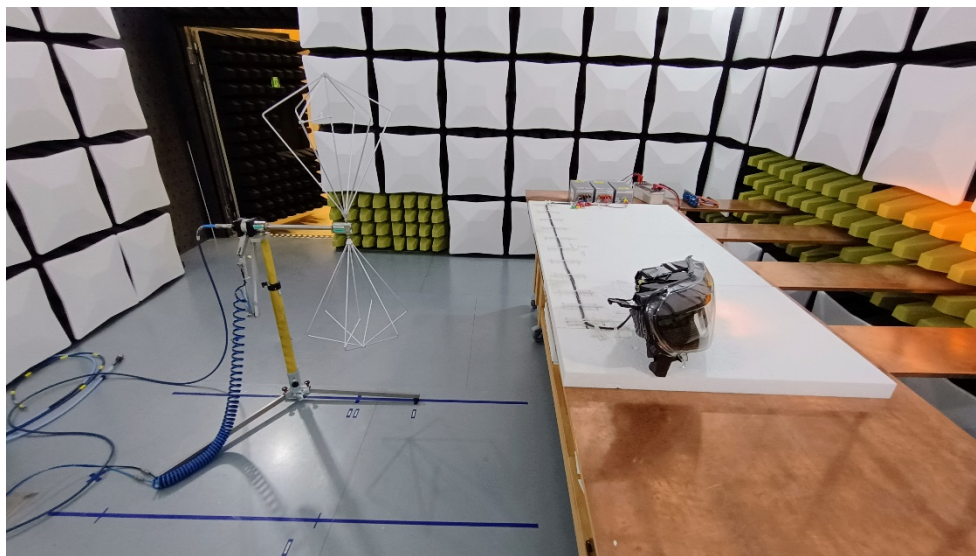
Na obr. 106 jsou znázorněny měřené průběhy napěťové úrovně s připojeným světlem. Dle změřených průběhů je patrné, že napěťová úroveň je vyšší, ale stále je pod stanovenými limity.



Obr. 106 Kmitočtová závislost napěťové úrovně při měření s monopólem.
Referenční měření.

6.4.2 Měření dle normy CISPR25 (RE) s bikonickou anténou

Měření vyzařovaného rušení s bikonickou anténou probíhalo v kmitočtovém rozsahu od 30 MHz do 200 MHz. Měření s bikonickou anténou probíhá ve dvou rovinách, v rovině vertikální a v rovině horizontální. Na obr. 107 a obr. 108 je znázorněno měřicí pracoviště pro měření s bikonickou anténou.

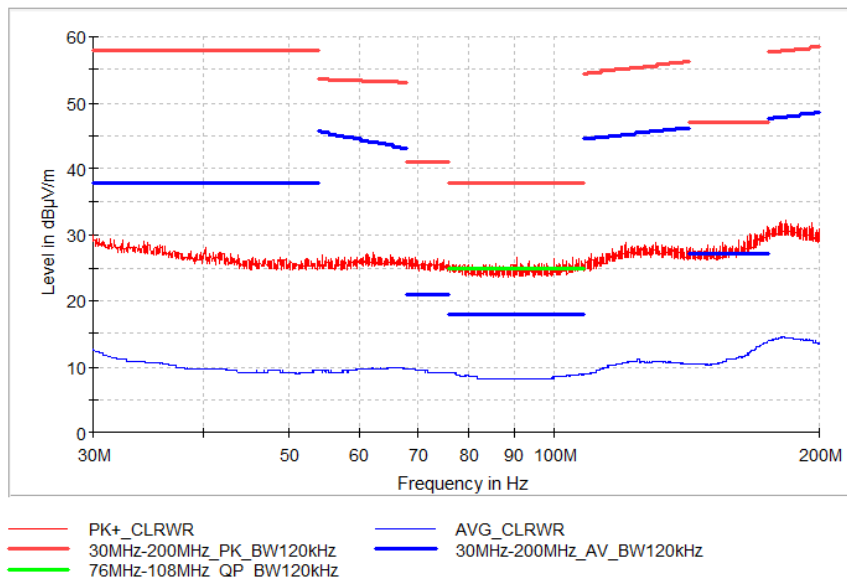


Obr. 107 Zapojení pro měření RE s bikonickou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.



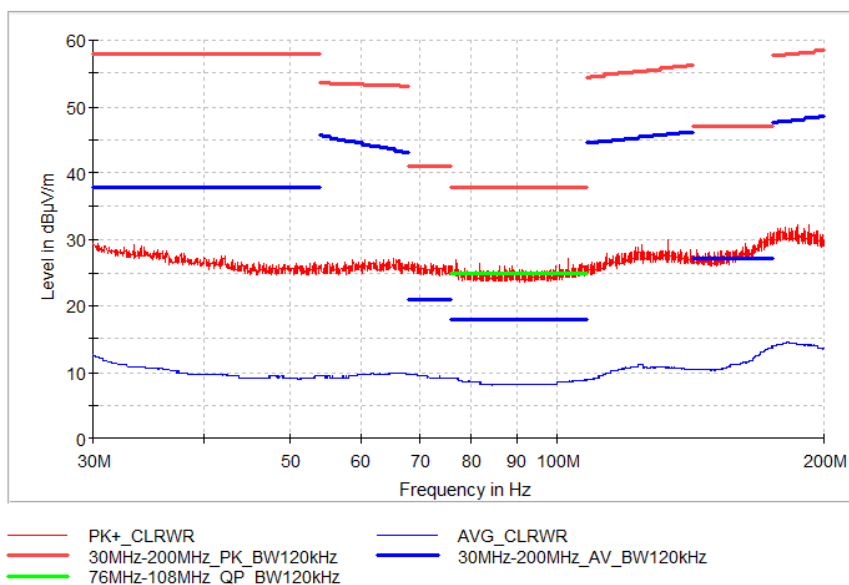
Obr. 108 Zapojení pro měření RE s bikonickou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.

Na obr. 109 jsou znázorněny měřené průběhy v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru bez připojeného světla. Ze změřených průběhů viz obr. 109 je patrné, že maximální úroveň napětí je 30 dB μ V. Z hlediska takto malé hodnoty lze vlastního rušení Load simulátoru zanedbat.



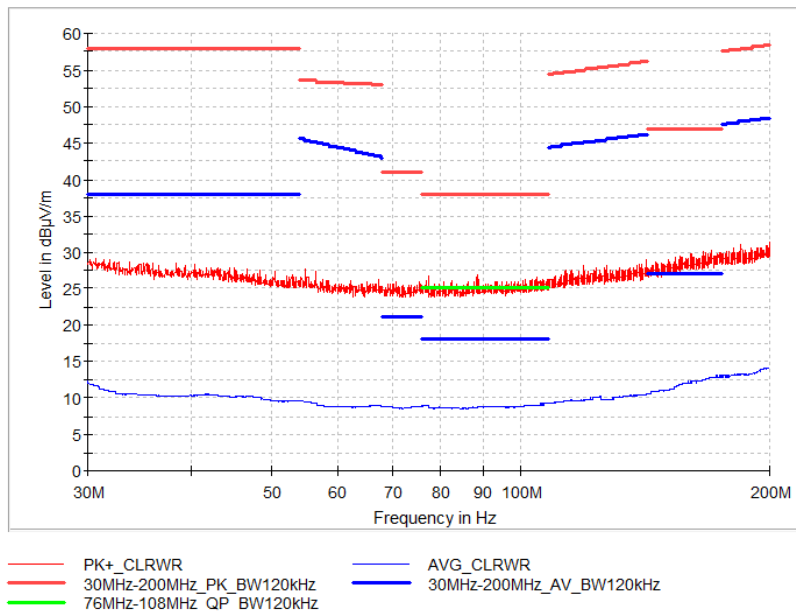
Obr. 109 Kmitočtová závislost napět'ové úrovně. Měření bez světla.
Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.

Na obr. 110 jsou znázorněny měřené průběhy v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru s připojeným směrovým světlem. Ze změřených průběhů je patrné, že napět'ová úroveň je totožná s napět'ovou úrovní nepřipojeného světla.



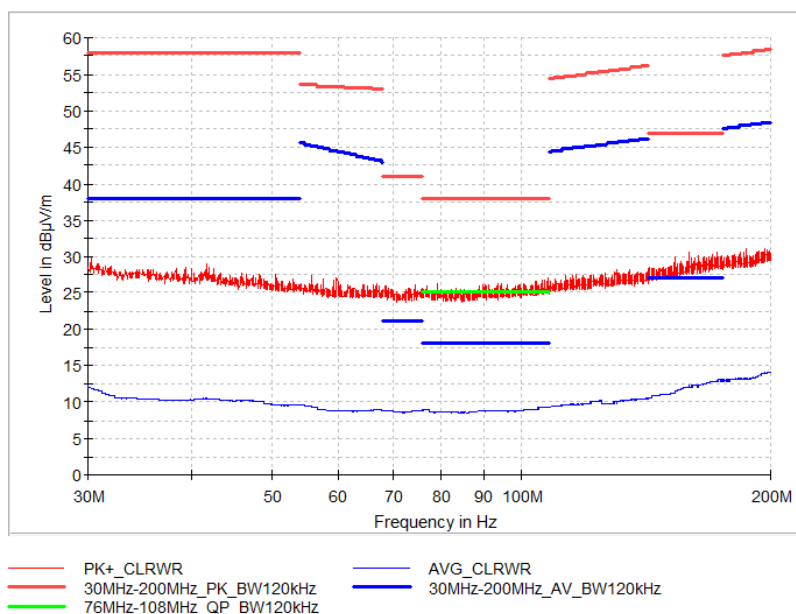
Obr. 110 Kmitočtová závislost napět'ové úrovně. Referenční měření.
Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.

Na obr. 111 jsou znázorněny měřené průběhy ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru bez připojeného světla. Ze změřených průběhů viz obr. 111 je patrné, že maximální úroveň napětí je 30 dB μ V, což je rozdíl 27 dB μ V od stanovených limit světla.



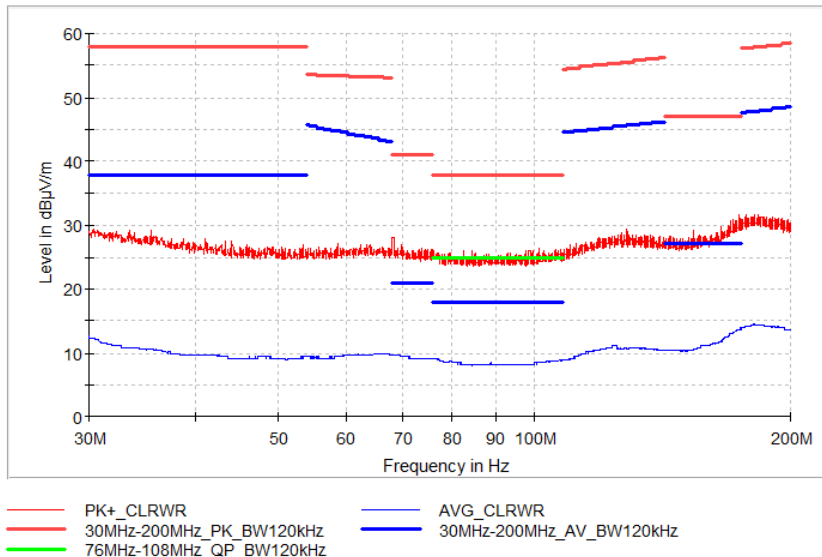
Obr. 111 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.

Na obr. 112 jsou znázorněny měřené průběhy ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru s připojeným směrovým světlem. Ze změřených průběhů je patrné, že napěťová úroveň je totožná s napěťovou úrovní nepřipojeného světla.



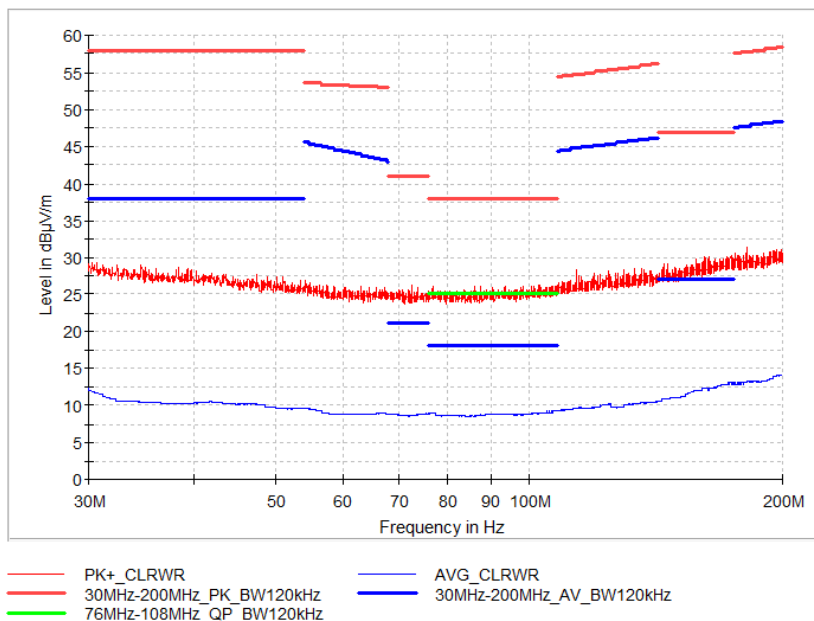
Obr. 112 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Referenční měření.
Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.

Na obr. 113 jsou znázorněny měřené průběhy v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru bez připojeného pozičního světla. Ze změřených průběhů viz obr. 113 je patrné, že maximální úroveň napětí je 30 dB μ V, což je rozdíl 27 dB μ V od stanovených limit světla. Totožné změřené průběhy byly i pro připojené poziční světlo.



Obr. 113 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s bikonickou anténou – horizontální polarizace.

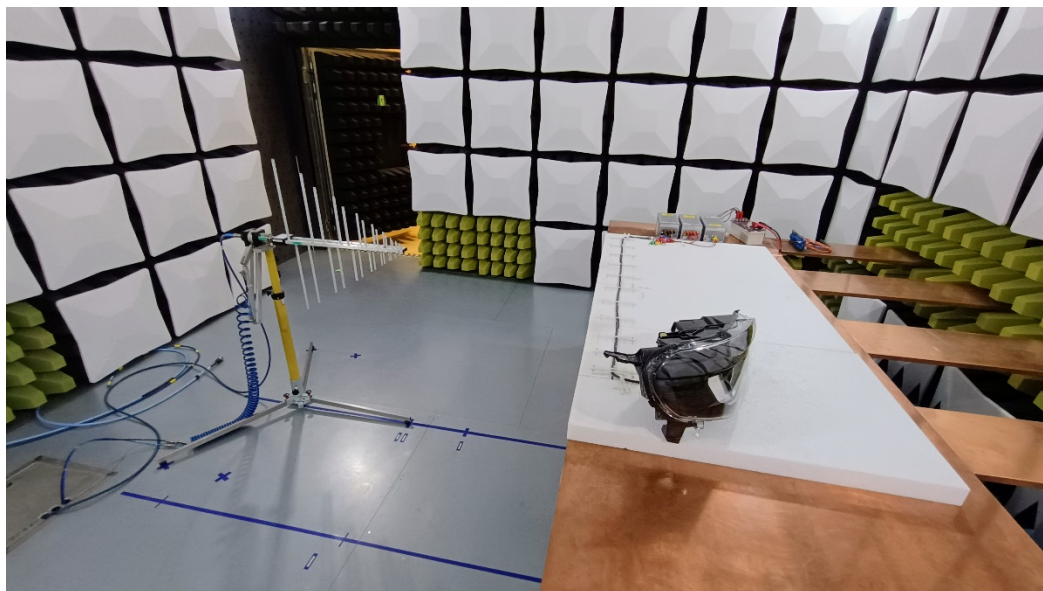
Na obr. 114 jsou znázorněny měřené průběhy ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru bez připojeného pozičního světla. Ze změřených průběhů viz obr. 114 je patrné, že maximální úroveň napětí je 30 dB μ V, což je rozdíl 27 dB μ V od stanovených limit. Totožné změřené průběhy byly i pro připojené poziční světlo.



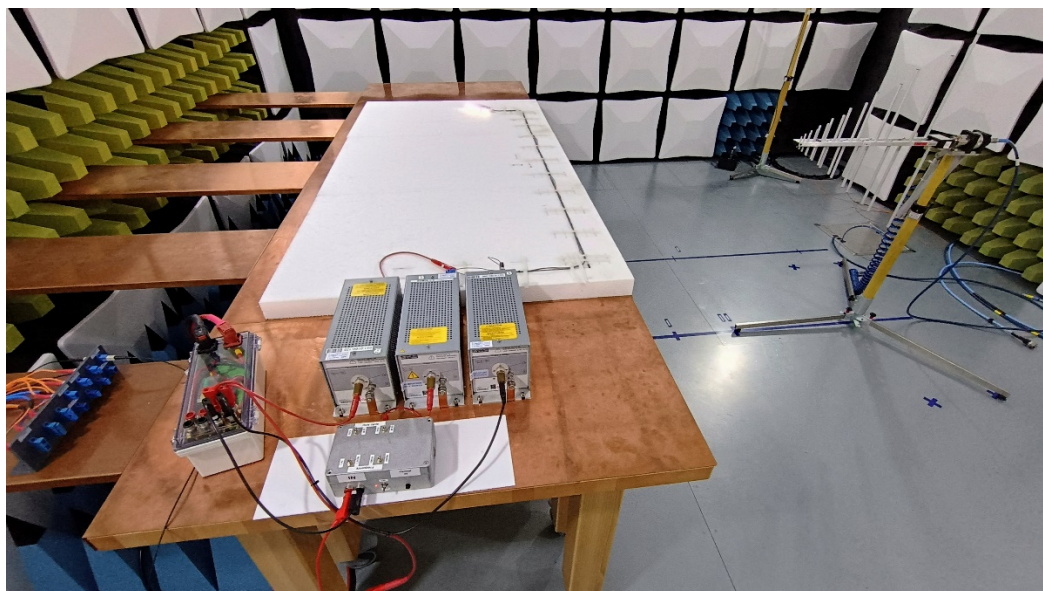
Obr. 114 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s bikonickou anténou – vertikální polarizace.

6.4.3 Měření dle normy CISPR25 (RE) s Logaritmicko-periodickou anténou

Dále se měřilo vyzařované rušení s logaritmicko-periodickou anténou, viz obr. 115 a obr. 116. Měřilo se v kmitočtovém rozsahu od 200 MHz do 800 MHz. Jelikož jsou na těchto frekvencích průběhy téměř totožné, stačí již pouze měřit vyzařované rušení bez připojeného světla.

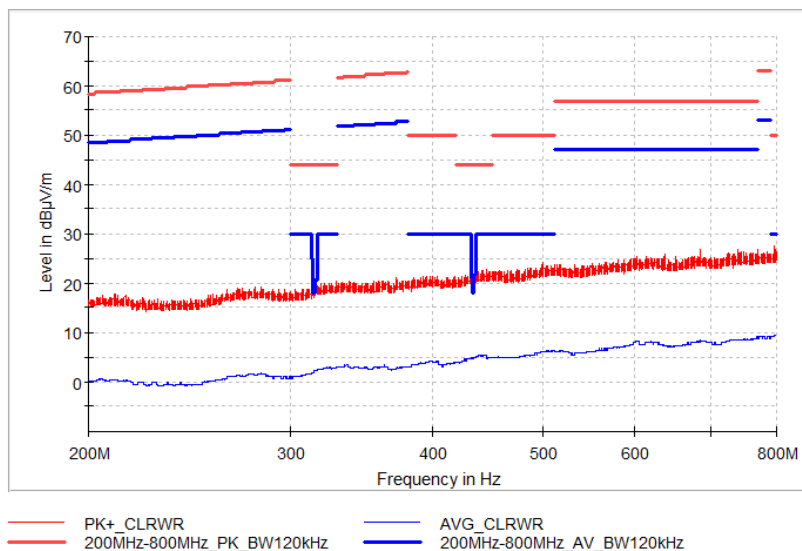


Obr. 115 Zapojení pro měření RE s Logaritmicko-Periodickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.



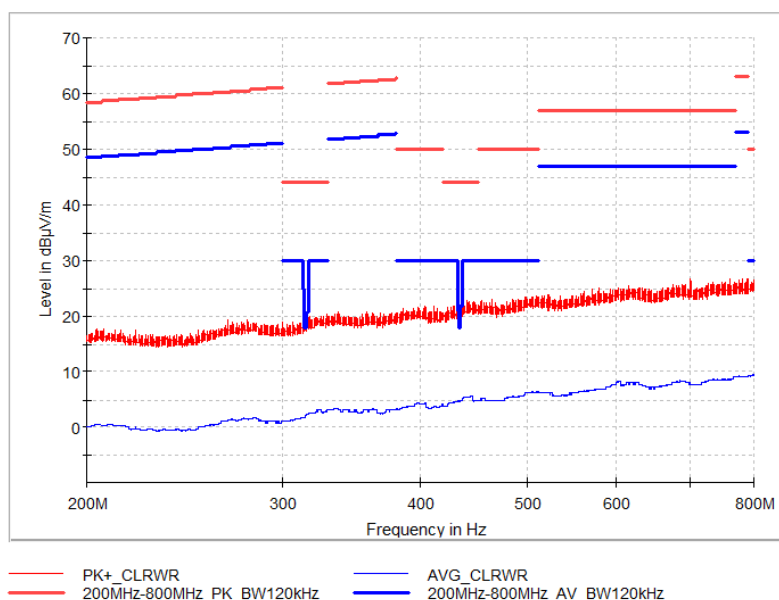
Obr. 116 Zapojení pro měření RE s Logaritmicko-Periodickou anténou. Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.

Na obr. 117 jsou znázorněny měřené průběhy v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru pro směrové světlo. Ze změřených průběhů viz obr. 117 je patrné, že maximální úroveň napětí je 25 dB μ V, což je rozdíl 25 dB μ V od stanovených limit světla. Z hlediska malé urovně napětí lze vlastní rušení Load simulátoru zanedbat.



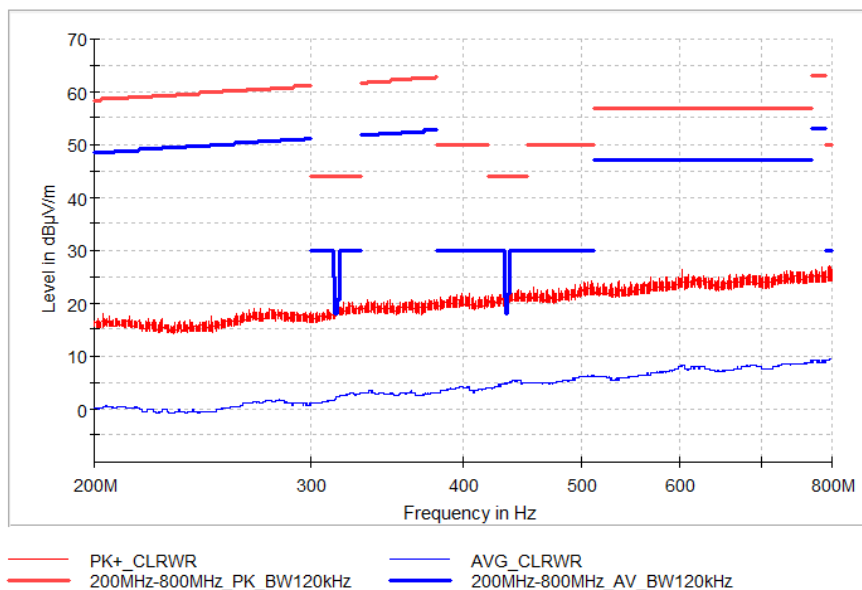
Obr. 117 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s Log.-Per. anténou – horizontální polarizace.

Na obr. 118 jsou znázorněny měřené průběhy ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru pro směrové světlo. Ze změřených průběhů viz obr. 118 je patrné, že maximální úroveň napětí je 25 dB μ V.



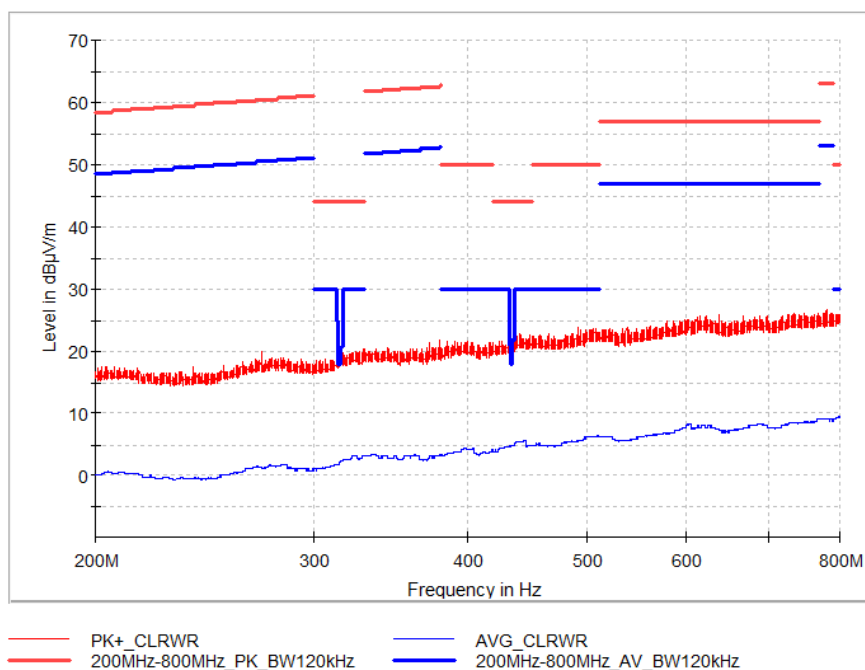
Obr. 118 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s Log.-Per. anténou – vertikální polarizace.

Na obr. 119 jsou znázorněny měřené průběhy v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.



Obr. 119 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s Log.-Per. anténou – horizontální polarizace.

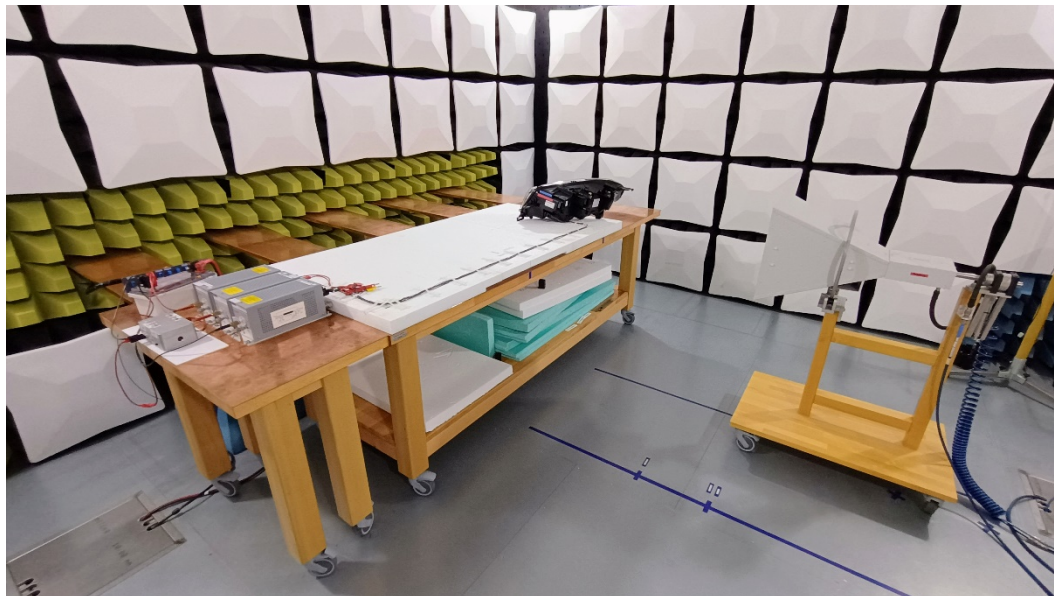
Na obr. 120 jsou znázorněny měřené průběhy ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.



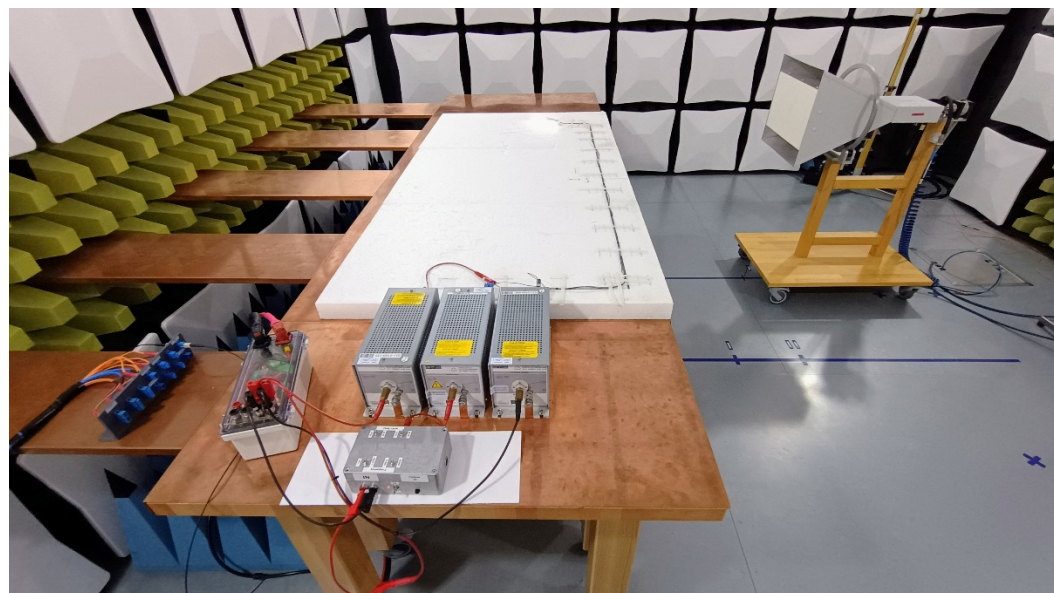
Obr. 120 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s Log.-Per. anténou – vertikální polarizace.

6.4.4 Měření dle normy CISPR25 (RE) s trychtýřovou anténou

Poslední anténou pro měření vyzařovaného rušení (RE) byla trychtýřová anténa, viz obr. 121 a obr. 122. S použitím této antény se měřilo v kmitočtovém rozsahu od 800 MHz do 6 GHz.

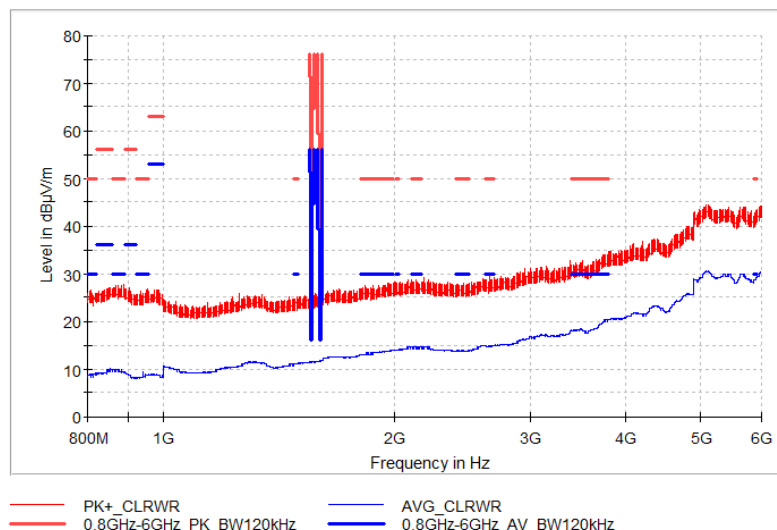


Obr. 121 Zapojení pro měření RE s trychtýřovou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro směrové světlo.



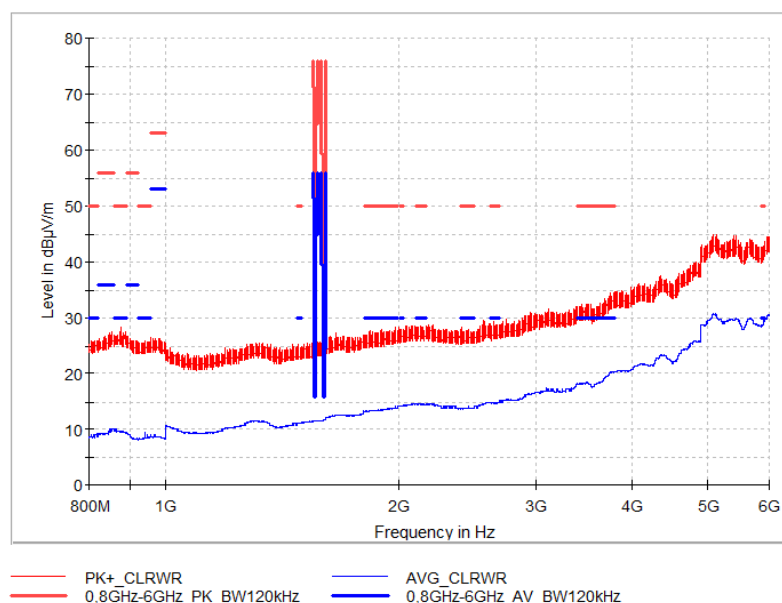
Obr. 122 Zapojení pro měření RE s trychtýřovou anténou.
Měření výstupu Load simulátoru pro poziční světlo.

Na obr. 123 jsou znázorněny měřené průběhy s trychtýřovou anténou v horizontální rovině na výstupu Load simulátoru pro směrové světlo. V kmitočtovém rozsahu od 800 MHz do 6 GHz je patrné, že napěťová úroveň je pod stanovenou limitní úrovní světla.



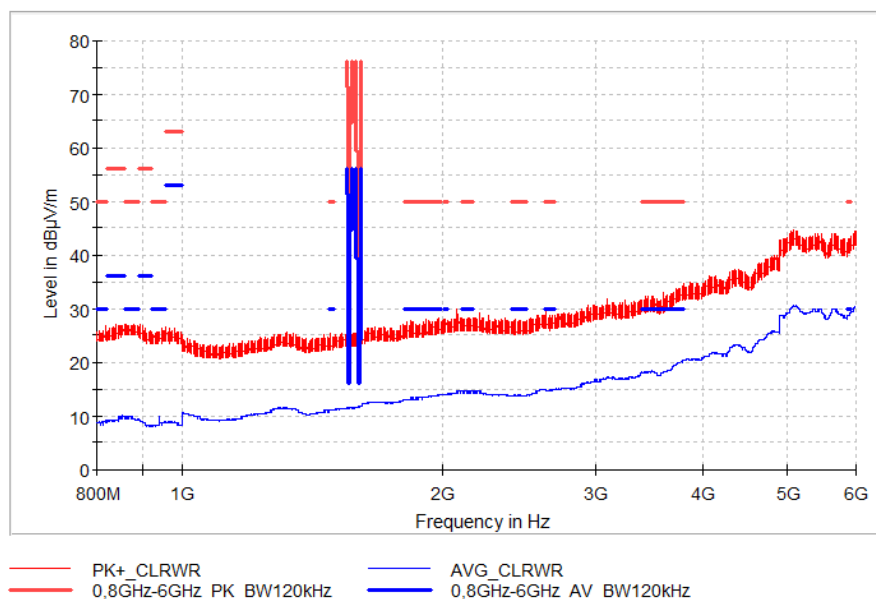
Obr. 123 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – horizontální polarizace.

Na obr. 124 jsou znázorněny měřené průběhy s trychtýřovou anténou ve vertikální rovině na výstupu Load simulátoru pro směrové světlo. Změřené průběhy jsou zcela totožné, jako u měření s horizontální polarizací. V kmitočtovém rozsahu od 800 MHz do 6 GHz je patrné, že napěťová úroveň je pod stanovenou limitní úrovní.



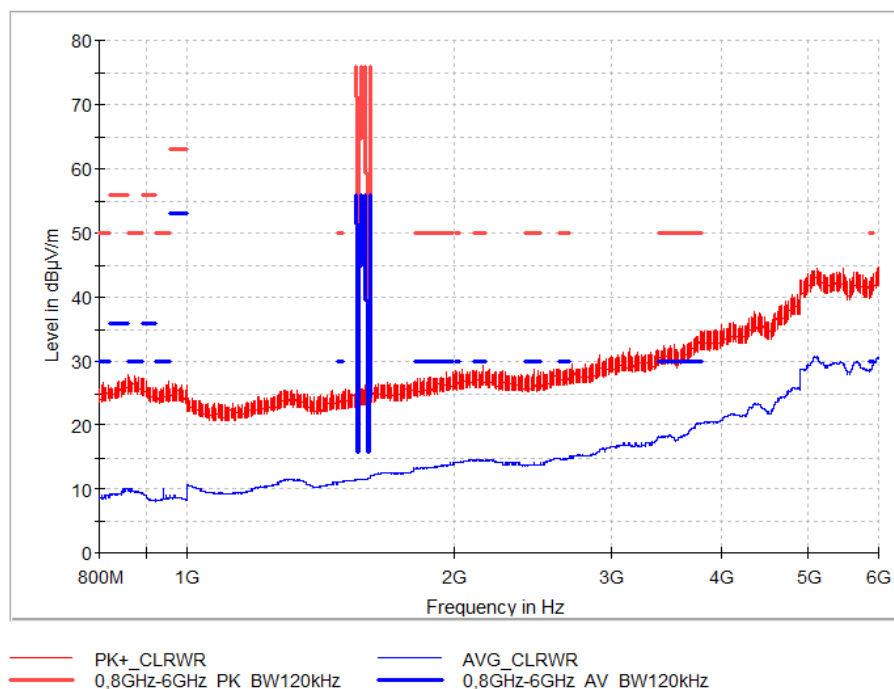
Obr. 124 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla. Měření s trychtýřovou anténou – vertikální polarizace.

Zcela totožné průběhy při horizontální polarizaci jsou změřeny i na výstupu Load simulátoru pro poziční světlo, viz obr. 125.



Obr. 125 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s trychtýřovou anténou – horizontální polarizace.

Totožné průběhy jsou změřeny také u vertikální polarizace. I zde je viz obr. 126 patrné, že změřené výstupy Load simulátoru pro směrové světlo i poziční světlo jsou totožné.



Obr. 126 Kmitočtová závislost napěťové úrovně. Měření bez světla.
Měření s trychtýřovou anténou – vertikální polarizace.

6.4.5 Zhodnocení výsledků

Zapojení dle normy CISPR25 – vyzařované rušení, bylo měřeno na již optimalizovaném Load simulátoru. Měřením Load simulátoru vůči rušení po vedení bylo zjištěno, že Load simulátor splňuje všechny stanovené maximální limity nastavené pro světlo.

Při měření pouze s Load simulátorem bylo zjištěno nízké rušení. Následně byl Load simulátor měřen se světlomety. Vzhledem k požadovaným limitům, které má splňovat světlo, lze vlastní rušení Load simulátoru zanedbat. Z tohoto důvodu je navržený Load simulátor vhodný pro měření vyzařovaného rušení (RE).

6.4.6 Použité přístroje

V této kapitole jsou popsány v tabulce 7 všechny komponenty, které byly součástí při měření dle normy CISPR25 (RE).

Tab. 7 Použité přístroje při měření dle normy CISPR – vyzařované rušení.

	Druh	Typ	Parametr
V komoře	Kondenzátor	Eaton XTM-18R0626-R	61,7 F / 18 V
	Optický převodník	Messtechnik Transmitter	DC.. 100 kHz, +/- 0,75 V
	Měření proudu	Bočník	10 mΩ / 20 mΩ
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μH / 100 A / 600 V
	Monopól	Schwarzbeck VAMP 9243	9 kHz - 30 MHz
	Bikonická anténa	Schwarzbeck VHBB 9124 + BBA 9106	30 MHz - 200 MHz
	Log. - Per. anténa	Schwarzbeck VUSLP 9111 B	200 MHz - 3 GHz
	Trychtýřová anténa	Schwarzbeck BBHA 9120 J	800 MHz - 6,2 GHz
Mimo komoru	Napájecí zdroj	Gossen Metrawatt SYSKON P1500	0 V - 60 V
	Předzesilovač s přepínáním polarizace	S-7624A	4 kHz - 400 MHz / 200 W
	Ovládací prvek	R&S OSP230	
	EMI Testovací přijímač	R&S ESW 8	2 Hz - 8 GHz
	Frekvenční generátor	Tektronix AFG 3011	0 Hz - 10 MHz / 250 MSs/s
	CAN optický oddělovač	Messtechnik optoCAN-FD	
	Osciloskop	R&S RTE 1024	200 MHz / 5GSa/s
	Počítač	Advantech IPC 610L	

6.5 Test dle normy ISO 10605 (ESD)

V této kapitole bude popsáno měření odolnosti Load simulátoru vůči elektrostatickému vybíjení. Výboj ESD bude aplikován na výstupní zdířky Load simulátoru a v jednom místě na kovový kryt Load simulátoru. Pro vyzkoušení bude Load simulátor testován nejprve na izolační podložce a poté pouze na zemní desce měřicího stolu. Po aplikování kladného a záporného výboje stanovené hladiny budou všechny výstupy Load simulátoru vyzkoušeny na světlech.

6.5.1 Zapojení testu ESD

Na obr. 127 je znázorněno zapojení pracoviště pro testování odolnosti Load simulátoru vůči ESD.



Obr. 127 Zapojení testovaného pracoviště ESD.

Na obr. 128 je znázorněno aplikování výboje na výstupní zdířku Load simulátoru. Tímto způsobem bylo aplikováno 5x výboj kladného potenciálu a 5x výboj záporného potenciálu, na všech šesti výstupních zdířkách.



Obr. 128 Detail na aplikaci výboje výstupu Load simulátoru.

Po každém výboji kladného nebo záporného potenciálu byl z hlediska vyrovnání potenciálu uvnitř Load simulátoru použit vybíjecí vodič, viz obr. 129.



Obr. 129 Detail na aplikaci vybíjení výstupu Load simulátoru.

Na obr. 130 je znázorněno testování kovového krytu Load simulátoru. Elektrostatický výboj byl aplikován na kovové krabičce do znázorněného místa, viz obr. 130.



Obr. 130 Detail na aplikaci výboje a vybíjení krytu Load simulátoru

6.5.2 Zhodnocení výsledků

Při testování odolnosti Load simulátoru vůči ESD byla aplikována velikost výboje ± 2 kV, ± 4 kV, ± 6 kV, ± 8 kV na všechny výstupní zdirky. Stejná velikost výboje byla aplikována i na kovový kryt Load simulátoru. Po každé aplikaci jedné velikosti výboje došlo k testování výstupu Load simulátoru na směrové světlo, poziční světlo a opticky řízený výstup.

V příloze A.3 je znázorněn vyplněný protokol firmy Marelli o měření ESD. Ve sloupci u políčka Funkční status je zapsáno Status I. To znamená, že měřené zařízení vyhovělo odolnosti vůči velikosti výboje.

Z jednotlivých testů je patrné, že Load simulátor je odolný vůči elektrostatickému výboji do ± 8 kV, dle normy ISO 10605, kategorie 1.

6.5.3 Použité přístroje

	Druh	Typ	Parametr
ESD pracoviště	ESD pistole	Teseq NSG 438	± 30 kV (hrot/vzduch)
Testování Load simulátoru	Napájecí zdroj	Gossen Metrawatt SYSKON P1500	0 V - 60 V
	Kondenzátor	Eaton XTM-18R0626-R	61,7 F / 18 V
	Optický převodník	Messtechnik Transmitter	DC.. 100 kHz, +/- 0,75 V
	Měření proudu	Bočník	10 m Ω / 20 m Ω
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μ H / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μ H / 100 A / 600 V
	LISN	R&S ESH 3-Z6	5 μ H / 100 A / 600 V
	Frekvenční generátor	Tektronix AFG 3011	0 Hz - 10 MHz / 250 MSs/s
	CAN optický oddělovač	Messtechnik optoCAN-FD	
	Osciloskop	R&S RTE 1024	200 MHz / 5GSa/s

7. ZÁVĚR

Úkolem diplomové práce bylo seznámení s měřicími metodami v EMC komoře a návrh Load simulátoru pro jednotlivá měření. V první části byly na základě jednotlivých metod měření stanoveny požadavky napájecího napětí a proudu a požadavky na frekvenci a střidu pro výstupy Load simulátoru. Na blokových schématech bylo znázorněno zapojení měřících metod dle normy CISPR25 – CE a RE a měřící metody podle normy ISO 11452-4 – BCI (uzavřená smyčka a substituční metoda).

Pro realizaci zapojení vzhledem k vlastnímu napájení z akumulátoru a celkové spotřebě bylo vybráno analogové řešení návrhu se zapojeným generátorem PWM signálu. Dle simulovaných průběhů se ukázalo, že při takto řešeném schéma zapojení je nutné mezi výstupy na směrové světlo a poziční světlo změnit hodnotu integračního kondenzátoru. Z důvodu zajištění stability obvodu je v reálném zapojení použit SMD keramický kondenzátor s dielektrikem NP0 a pro přesné nastavení požadované frekvence a střidy je zapojen v každém napěťovém děliči trimr.

V další kapitole byly vybírány jednotlivé komponenty, včetně akumulátoru podle vhodnosti pro EMC prostředí. Zapojení PWM generátoru bylo zkonstruováno nejprve na nepájivém poli, aby se ověřily základní parametry. Měřením se dokázalo, že z hlediska navrženého PWM generátoru lze Load simulátor použít při požadovaném kmitočtovém rozsahu. Zapojení tak splnilo svůj účel a bylo vhodné ho použít v Load simulátoru.

Doplněním generátoru PWM o zbylé komponenty byla navržena deska plošného spoje. Následně byla deska vyrobena, ručně osazena a následně oživena. Pomocí trimrů byly na desce plošného spoje nastaveny požadované frekvence a střidy. Změřené průběhy z desky plošného spoje se porovnaly se simulovanými průběhy a se změřenými průběhy na nepájivém poli. Poté byla deska plošného spoje umístěna do vybrané krabičky. Po zapojení všech částí v krabičce, byly pomocí Load simulátoru v EMC komoře testovány uvedené měřící metody.

Měřením na výstupu pro směrové světlo, poziční světlo a výstupem řízeným přes optiku dle normy ISO 11452-4 (BCI) se ukázalo, že Load simulátor bude zapotřebí optimalizovat, z důvodu jeho nízké odolnosti v kmitočtovém rozsahu od 310 MHz do 400 MHz. Po optimalizaci, viz kapitola 6.1.3 se zvýšila odolnost Load simulátoru vůči rušení u metody s uzavřenou smyčkou. U substituční metody BCI se po optimalizaci podařilo zvýšit odolnost Load simulátoru až do úrovně rušivého proudu 100 mA. U měření dle normy CISPR25 (rušení po vedení a vyzařované rušení) se ukázalo, že Load simulátor významně nevyzařuje rušivé elektromagnetické složky do okolí a je použitelný pro obě měřící metody. Měřením dle normy ISO 10605 (ESD) se ukázalo, že Load simulátor je odolný vůči elektrostatickému výboji do ± 8 kV.

LITERATURA

- [1] CISPR 25 – International standard; Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers; Edition 5.0; 2021-12
- [2] ISO 11452-1 – International standard; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology; Fourth edition; 2015-06
- [3] ISO 11452-4 – International standard; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 4: Harness excitation methods; Fifth edition; 2020-04
- [4] ISO 10605 – International standard; Road vehicles — Test methods for electrical disturbances from electrostatic discharge; First edition; 2008-07
- [5] Single path vehicle AMN (LISN) NNBM 8124. Online. *Schwarzbeck Mess-Elektronik*. 2019, roč. 2020, č. Rev C, s. 9. Dostupné z: <https://www.schwarzbeck.de/Datenblatt/k8124.pdf>. [cit. 2024-05-12].
- [6] Conducted Emissions Testing of Electrical and Electronic Devices. Online. *Cadence system analysis*. 2023, roč. 2023, č. 1, s. 1. Dostupné z: <https://resources.system-analysis.cadence.com/blog/msa2021-conducted-emissions-testing-of-electrical-and-electronic-devices>. [cit. 2023-11-03].
- [7] XTM-18 Supercapacitor. Online. *Eaton Electronics Components*. 2019, roč. 2019, č. 10941, s. 3. Dostupné z: <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/data-sheet/eaton-xtm-18-supercapacitor-module-data-sheet.pdf>. [cit. 2024-05-04].
- [8] Radiated emission. Online. *Wikiversity*. 2020, roč. 2020, č. 1, s. 1. Dostupné z: https://en.wikiversity.org/wiki/Radiated_emission. [cit. 2023-11-03].
- [9] Rušení a krátkodobé změny v napájení. Jak si s nimi dohlížecí obvody poradí? Online. *DPS Elektronika od A do Z*. 2024, roč. 2024, č. 2, s. 4. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/clanky/id:98163/ruseni-a-kratkodobe-zmeny-v-napajeni-jak-si-s-nimi-dohlizeci-obvody-poradi->. [cit. 2024-05-16].
- [10] LM555 Timer. Online. *Texas Instruments datasheet*. 2015, roč. 2015, č. 1, s. 29. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555.pdf>. [cit. 2024-05-11].
- [11] PWM Generator Circuit. Online. *CIRCUIT060010*. 2019, roč. 2019, č. REV A, s. 6. Licence: Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated. Dostupné z: Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/an/sboa212a/sboa212a.pdf?ts=1700672993798&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FCIRCUIT060010. [cit. 2023-11-22].
- [12] Voltage-controlled oscillator. Online. *Wikipedia*. 2023, roč. 2023, č. 1, s. 1. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Voltage-controlled_oscillator. [cit. 2023-11-23].

- [13] Quad, 5.5-V, 5.6-MHz, RRO operational amplifier. Online. *LMV824-N*. 2016, roč. 2019, č. 1, s. 56. Licence: Copyright © 2023, Texas Instruments Incorporated. Dostupné z: Texas Instruments, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmv824-n.pdf?ts=1700751404427&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLMV824-N. [cit. 2023-11-23].
- [14] PROFET® BTS 6163 D. Online. *Infineon datasheet*. 2007, roč. 2007, č. 1, article 1, s. 18. Licence: © 2007 Infineon Technologies AG. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/196/Infineon_BTS6163D_DS_v01_00_EN-1731318.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [15] CONRAD.CZ. *Conrad energy akupack Li-Pol*. Online. CONRAD ELECTRONIC. Conrad.cz. 2016, 2023. Dostupné z: <https://www.conrad.cz/cs/p/conrad-energy-akupack-li-pol-modelarstvi-7-4-v-1300-mah-pocet-clanku-2-25-c-softcase-bec-1344130.html?refresh=true#productDownloads>. [cit. 2023-12-27].
- [16] Automotive 300mA Variable Output LDO Regulator. Online. *ROHM semiconductor*. 2015, roč. 2015, č. 1, s. 24. Licence: © 2015 ROHM Co., Ltd. All rights reserved. Dostupné z: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/power/linear_regulator/bdxxga3mefj-m-e.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [17] Operational Amplifiers. Online. *OP262GSZ*. 2013, roč. 2013, č. 1, s. 20. Licence: ©2013 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Dostupné z: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/OP162_262_462.pdf. [cit. 2023-12-27].
- [18] 2N7002KQ. Online. *Diodes - N-CHANNEL ENHANCEMENT MODE MOSFET*. 3/2021n. 1., roč. 2021, č. Rev. 1 - 2, s. 7. Dostupné z: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/2N7002KQ.pdf>. [cit. 2024-02-24].
- [19] STRESS TEST QUALIFICATION FOR PASSIVE COMPONENTS. Online. *Automotive Electronics Council*. 2023, roč. 03.2023, č. AEC - Q200 - REV E, s. 107. Dostupné z: http://www.aecouncil.com/Documents/AEC_Q200_Rev_E_Base_Document.pdf. [cit. 2024-03-08].
- [20] SFH551/1-1V - 5MBd Receiver Diode with TTL out, and Direct Fiber Connector. Online. *Broadcom - SP000063855*. 2011, roč. 2011, č. 1, s. 5. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/doc/AV02-3033EN>. [cit. 2024-02-24].
- [21] SFH756V - 10MBd Transmitter with Direct Fiber Connector. Online. *Broadcom - SP000063814*. 2007, roč. 2007, č. 1, s. 6. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/doc/AV01-0715EN>. [cit. 2024-02-24].
- [22] MULTICOMP PRO G116. Online. *Multicom PRO*. 2021, roč. 03.2021, č. 1, article v1.0, s. 1. Dostupné z: <https://www.farnell.com/datasheets/3204422.pdf>. [cit. 2024-03-25].
- [23] WE-STAR-TEC Snap Ferrite with safety key technology. Online. *Würth Elektronik*. 2021, roč. 2021, č. 008.001, s. 6. Dostupné z: <https://www.wer-online.com/components/products/datasheet/74271142S.pdf>. [cit. 2024-05-13].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

AN	Artificial Network, umělá síť
BCI	Bulk current injection, hromadná injekce proudu
Capture	Software pro návrh elektronických obvodů
CE	Conductive emission, vedené rušení
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
DIAG	Diagnostika
DPS	deska plošného spoje
DRL	Day Running Light, světlo denního svícení
DUT	Device Under Test, testované zařízení
ECE	Economic Commission for Europe, Evropská hospodářská komise
EMC	ElectroMagnetic Compatibility, elektromagnetická kompatibilita
ESD	ElectroStatic Discharge, elektrostatické vybíjení
GND	Ground, uzemnění
HB	High Beam, dálkové světlo
ISO	International Organization for Standardization, Mezinárodní organizace pro normalizaci
LB	Low Beam, tlumené světlo
LDO	Low DropOut regulator, regulátor s nízkým úbytkem napětí
LEVEL	Úroveň
LiPo	Lithium-Polymer
LISN	Line Impedance Stabilization Network, umělá síť vedení
PCB	Printed Circuit Board, deska plošného spoje
POS	POSition light, obrysové světlo
PSV	poměr stojatých vln
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
PWR	Power Resistor, napájení výkonových odporů
RE	Radiated emission, vyzařované rušení
SAE	Society of Automotive Engineers, normy pro automobilový průmysl
SMD	Surface Mounted Device, povrchová montáž
THT	Through-hole technology, drátová technologie
TI	Turn Indicator, směrové světlo
VCO	Voltage Control Oscillator, napětím řízený oscilátor
VSWR	poměr stojatých vln

Symbols:

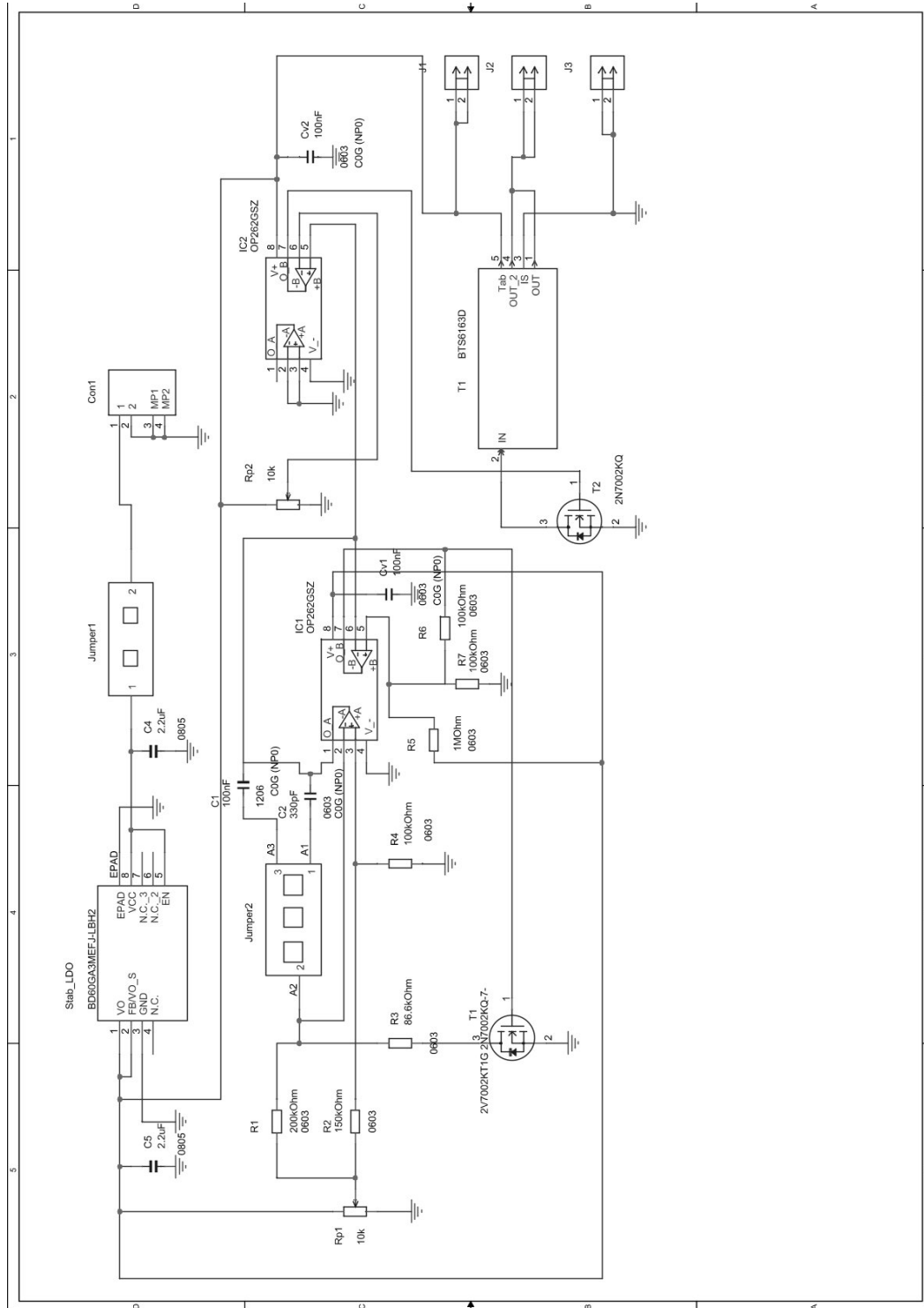
U_{CC}	napájecí napětí	(V)
U_{REF}	referenční napětí	(V)
U_{SET}	nastavovací napětí	(V)
U_H	napětí vysoké úrovně	(V)
U_L	napětí nízké úrovně	(V)
U_{IN}	vstupní napětí	(V)
U_{OUT}	výstupní napětí	(V)
I	proud	(A)
R	odpor	(Ω)
R_I	vnitřní odpor	(Ω)
D	střída	(%)
T	perioda	(s)
f_0	mezní kmitočet	(Hz)
h	výška	(m)

SEZNAM PŘÍLOH

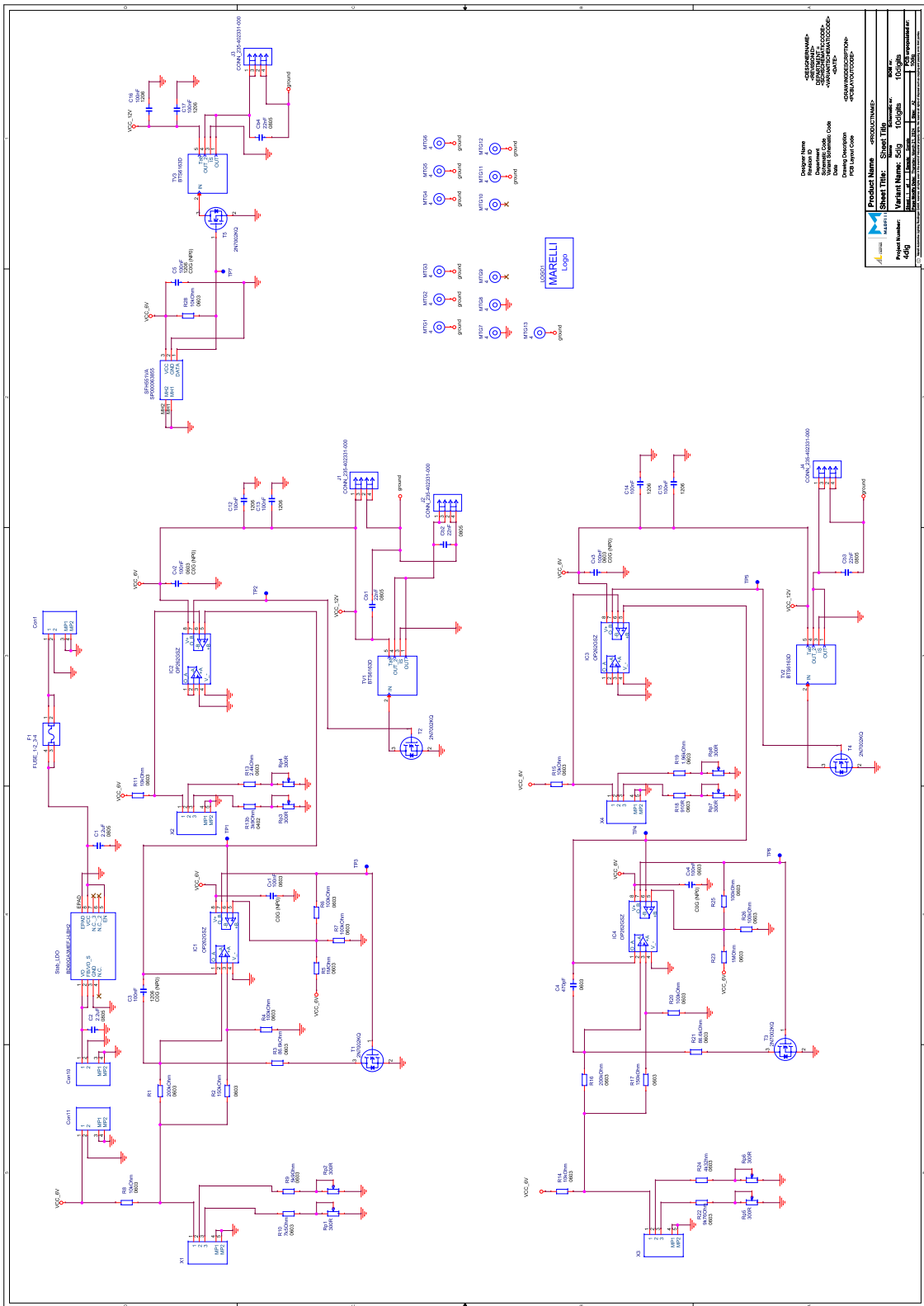
PŘÍLOHA A - LOAD SIMULÁTOR.....	124
---------------------------------	-----

Příloha A - Load simulačtor

A.1 Schéma PWM generátoru pro nepájivé pole



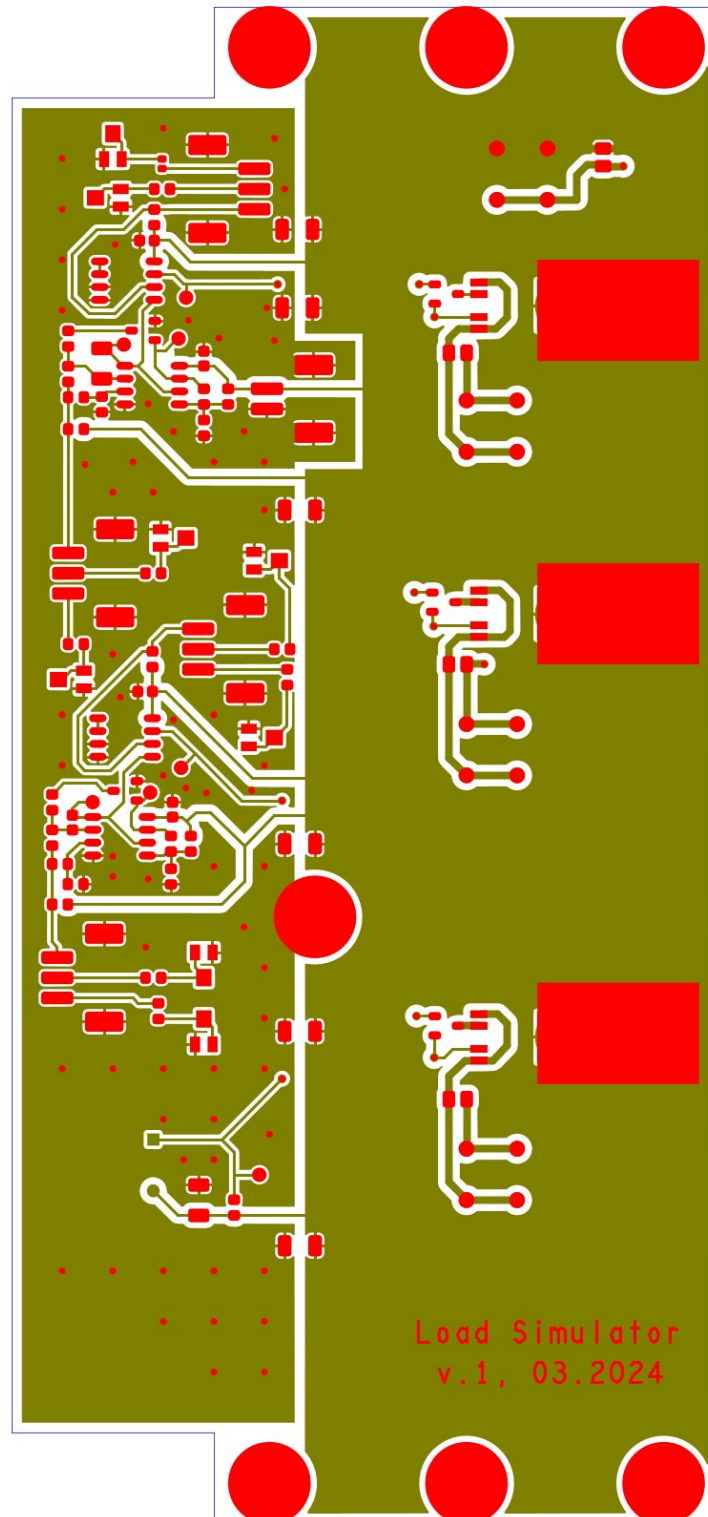
A.2 Schéma Load simulátoru



A.3 Deska plošného spoje Load simulátoru

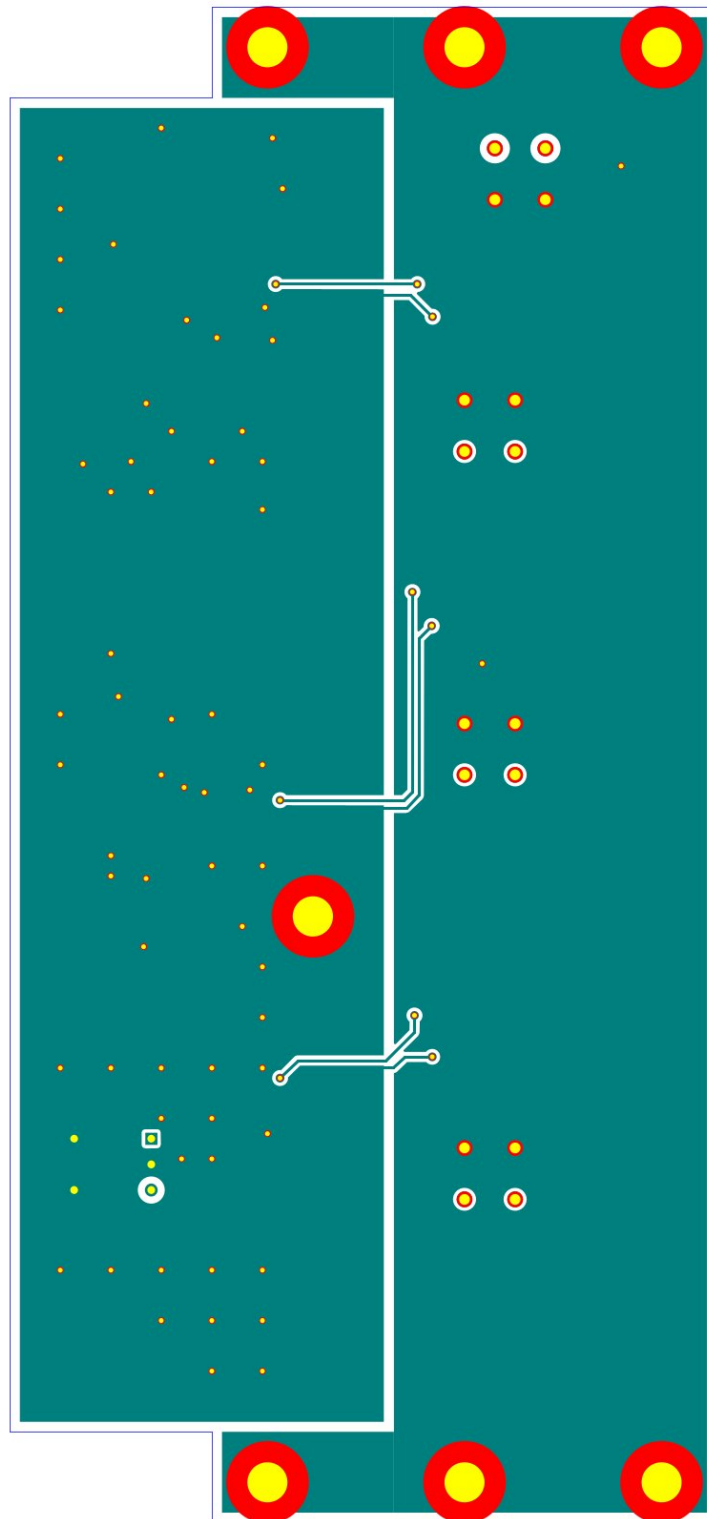
Vrchní vrstva desky řídicí a výkonové části

TOP_soldermask (Visible layers) Scale=1.87 Thu Mar 21 12:59:00 2024



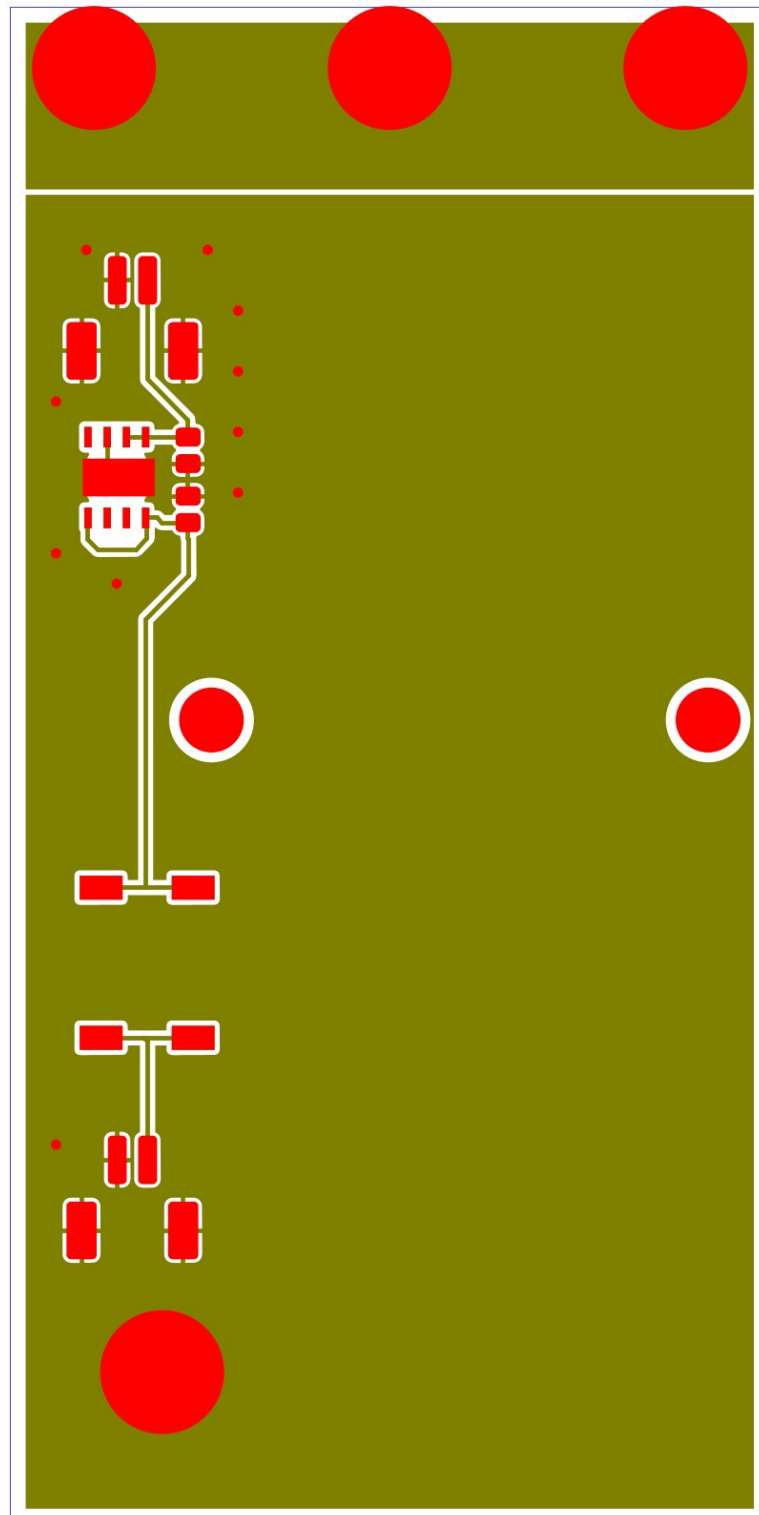
Spodní vrstva desky řídicí a výkonové části

TOP_soldermask (Visible layers) Scale=1.87 Thu Mar 21 13:01:54 2024



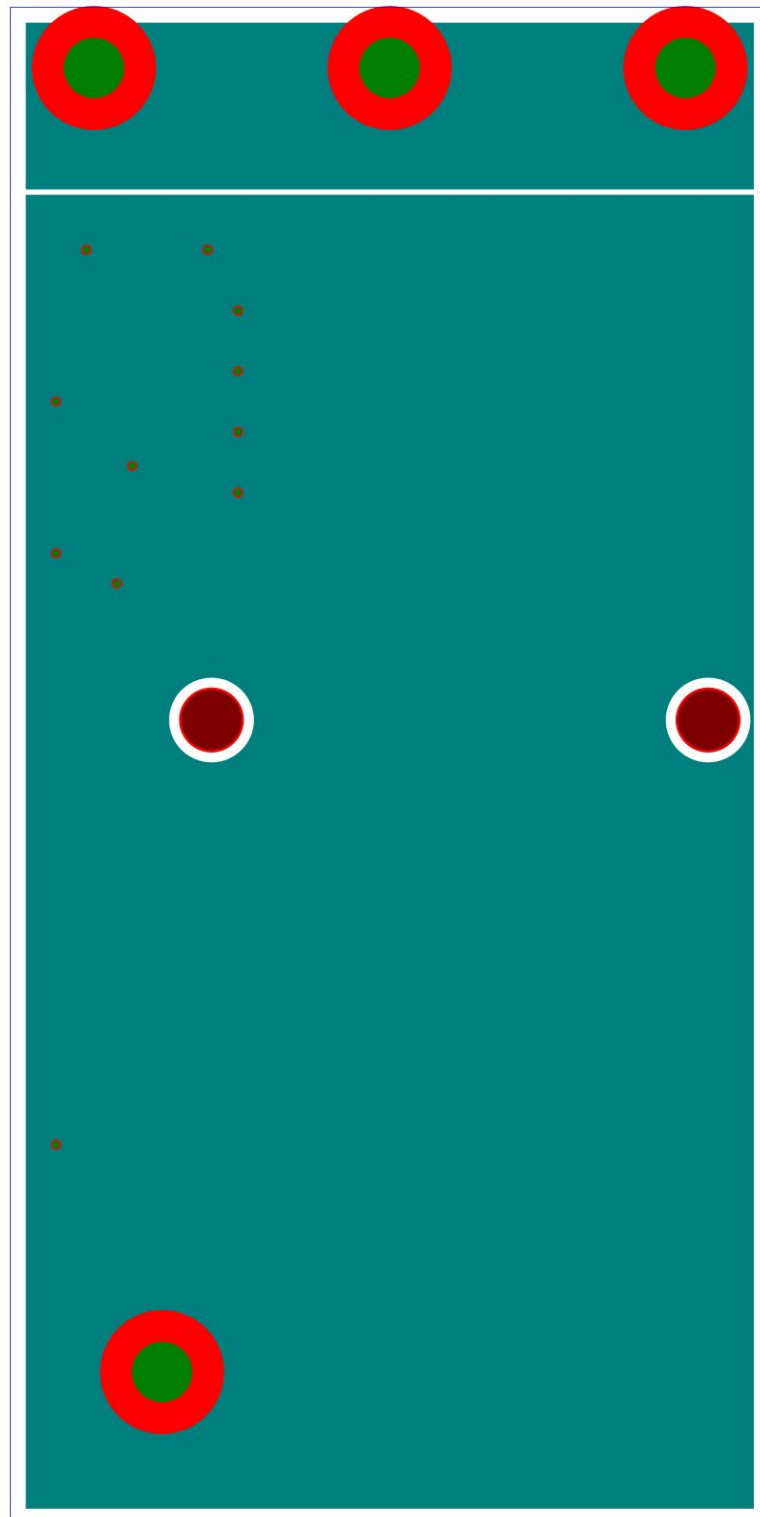
Vrchní vrstva desky napájecí části

TOP_soldermask (Visible layers) Scale=2.80 Thu Mar 21 13:06:08 2024

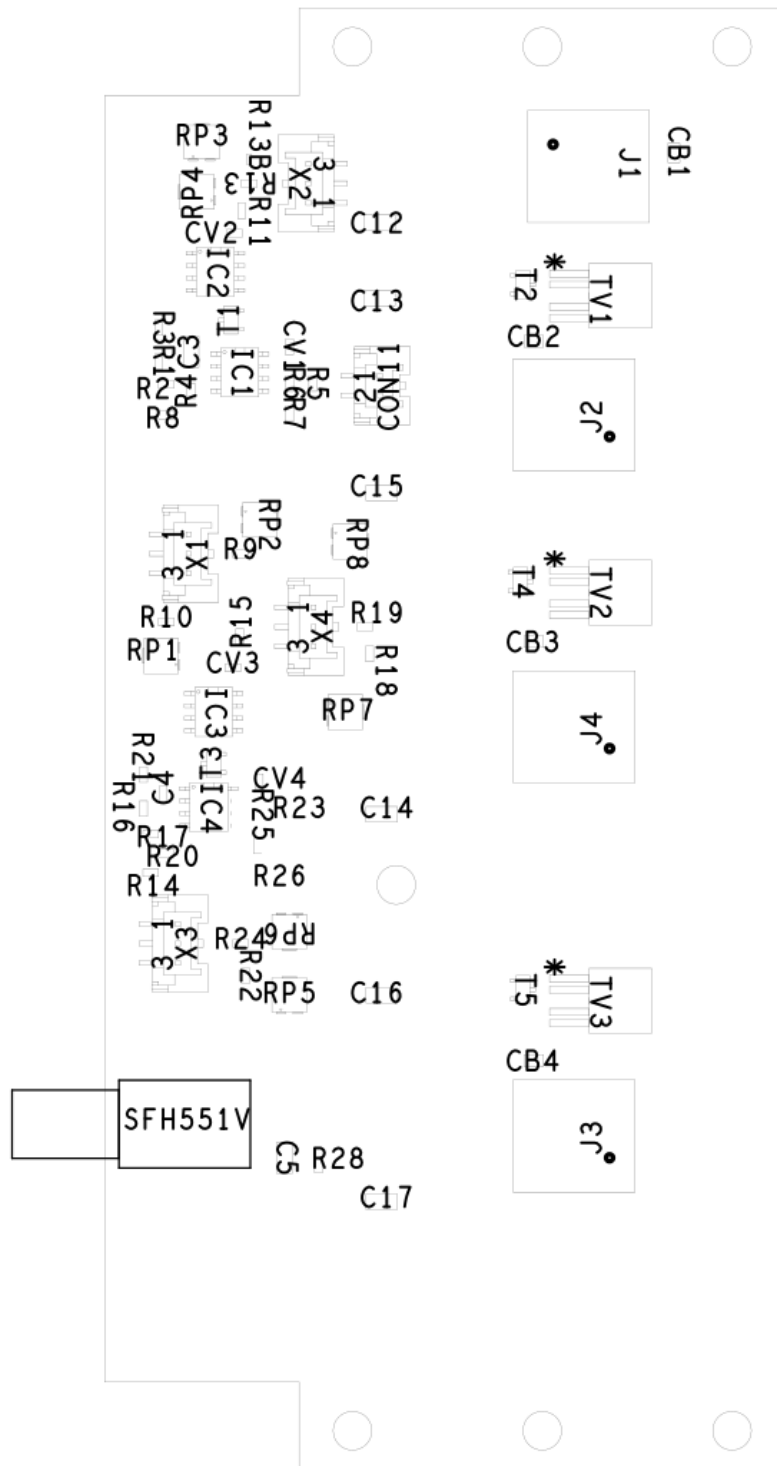


Spodní vrstva desky napájecí části

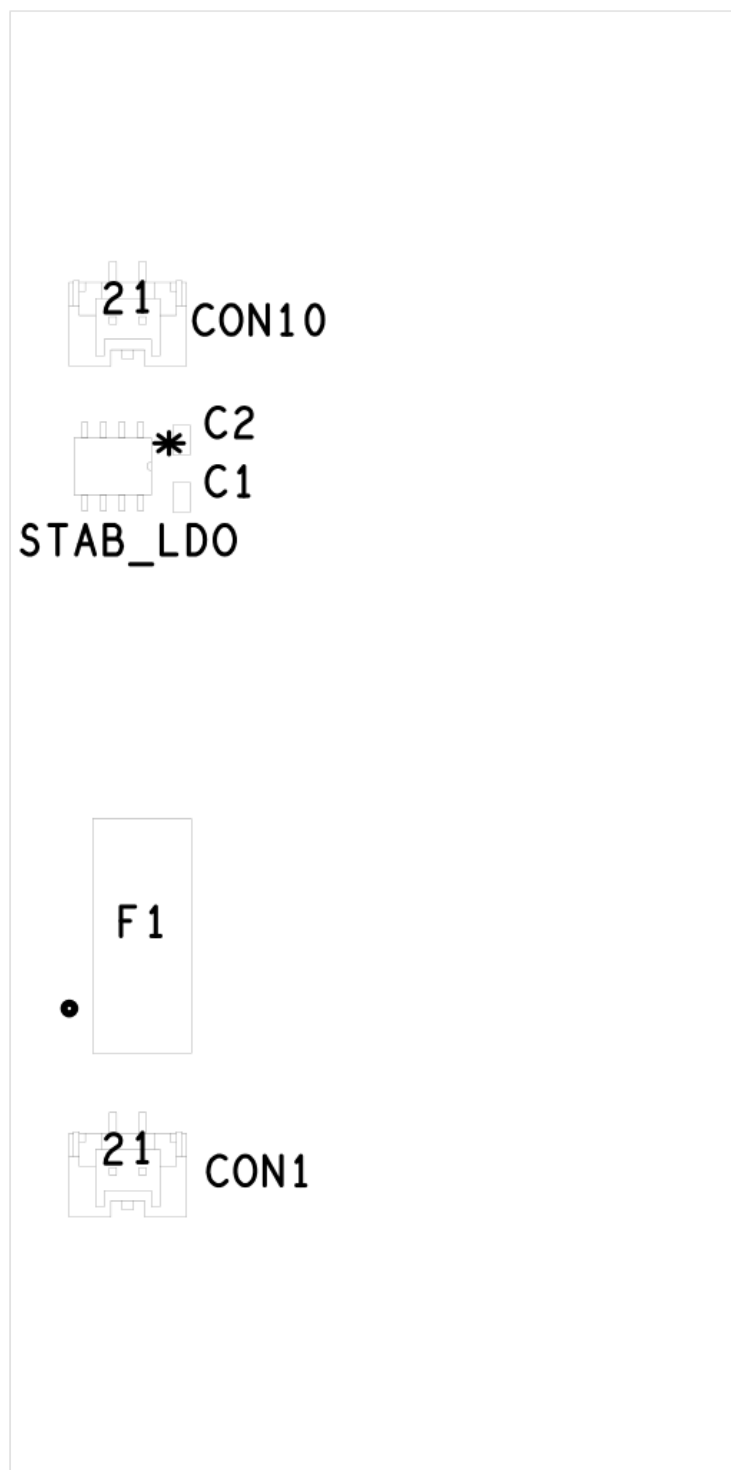
TOP_soldermask (Visible layers) Scale=2.80 Thu Mar 21 13:06:57 2024



Osazovací výkres řídicí a výkonové části



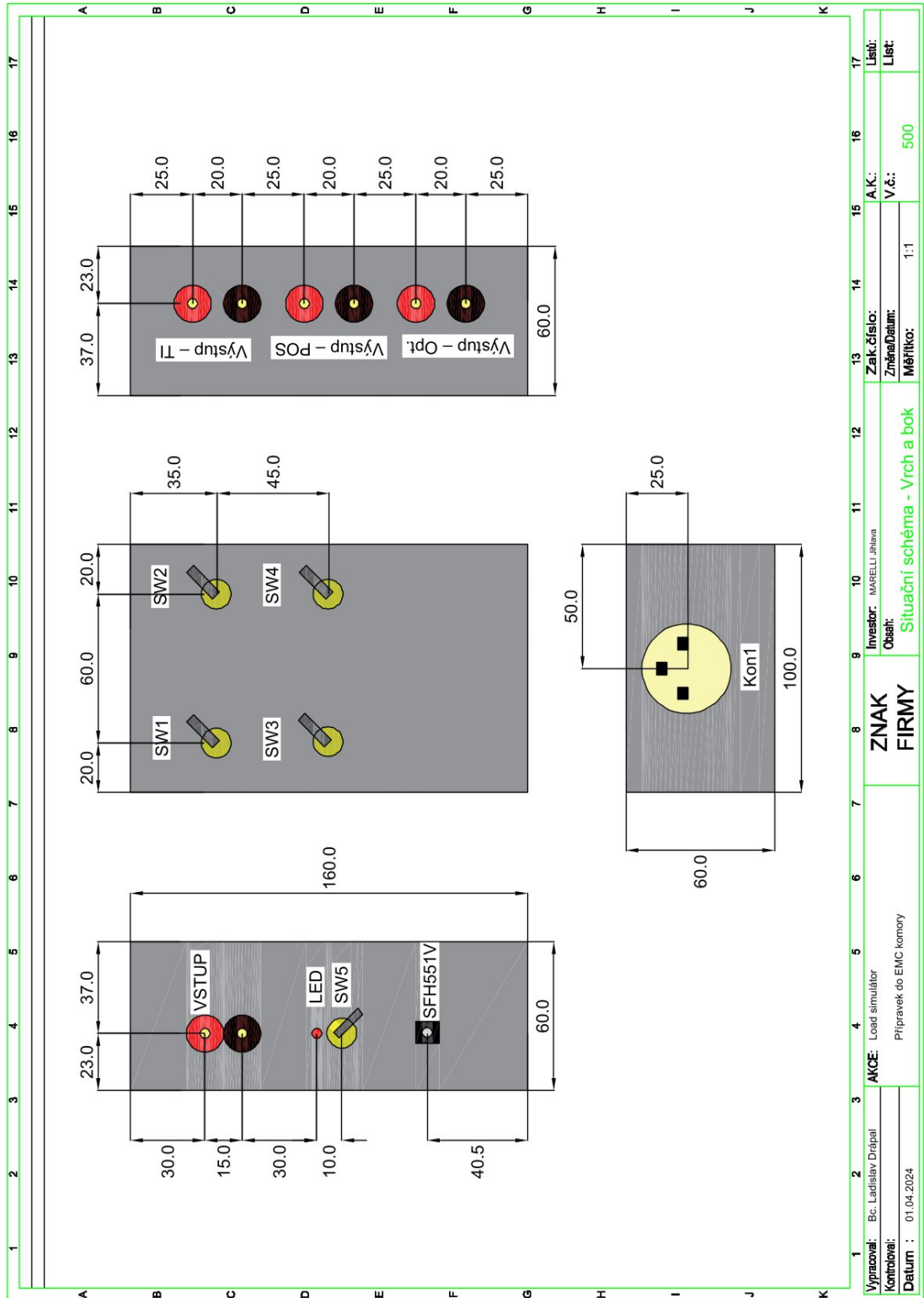
Osazovací výkres napájecí části



Seznam součástek Load simulátoru

Komponenta	Hodnota	Počet	Pouzdro
C1; C2	2.2uF	2	805
C3; C5	100nF / C0G, NP0	2	1206
C4	470pF / C0G, NP0	1	603
C12;C13;C14;C15;C16;C17	100nF	6	1206
CB1;CB2;CB3;CB4	22nF	4	805
CON1;CON10;CON11	2-pinový	3	CON_002P-2
CV1;CV2;CV3;CV4	100nF	4	603
F1	pouzdro	1	pouzdro
IC1;IC2;IC3;IC4	OP262GSZ	4	SOIC-8
J1;J2;J3;J4	WAGO	4	CONN_235- 402331-000
R1;R16	200kOhm	2	603
R2;R17	150kOhm	2	603
R3;R21	86.6kOhm	2	603
R4;R6;R7;R20;R25;R26	100kOhm	6	603
R5;R23	1MOhm	2	603
R8;R11;R14;R15	10kOhm	4	603
R9	5k9Ohm	1	603
R10	7k5Ohm	1	603
R13B	3k9Ohm	1	402
R13	2.4kOhm	1	603
R18	910R	1	603
R19	1.96kOhm	1	603
R22	9k76Ohm	1	603
R24	4k32hm	1	603
R28	330Ohm	1	603
RP1;RP2;RP3;RP4;RP5;RP6;RP7;RP8	300R	8	TC33X-2- 301E
SFH551V	SP000063855	1	THT
STAB_LDO	BD60GA3MEFJ- LBH2	1	HTSOP-J8
T1;T2;T3;T4;T5	2N7002KQ	5	SOT23
TV1;TV2;TV3	BTS6163D	3	TO-252-5
X1;X2;X3;X4	3-pinový	4	CON_003P-2
SW2;SW3;SW4;SW5	3-pólový	4	Přepínač-3p
SW	2-pólový	1	Přepínač-2p
LED	Červená	1	THT

Výkres kovové krabičky



Vypracoval: Bc. Ladislav Dřípal	AKCE: Lozd simulátor	Investor: MARELLI Jihlava	Zak.číslo:	A.K.:	17
Kontroloval:	Přípravek do EMC komory	Obal:	Změna/Datum:	V.č.:	16
Datum : 01.04.2024			Měřítko: 1:1		500
					Lišt:
					Lišt:

A.4 Testování Load simulátoru vůči ESD

ALCZ		MARELLI		SD – Technické záznamy: ESD testy		Verze dokumentu: 1.1		
Název projektu: Load simulátor		Testované módy: Nenapájené						Schválil: Havel
Název pracoviště: EEG EMC pulsy lab		Měřený test: ISO 10605 (2008-07) Component packaging and handling (unpowered test)		Měřící pracovník: Drápal	Datum: 13.5.2024	Teplota: 25.0°C	Vlhkost: 31.8%	Tlak: 1050 hPa
Testovaný mód	Číslo vzorku	Místo výboje	Vazební síť	Typ výboje	Velikost výboje [kV]	Počet výbojů	Funkční status	Poznámky
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 2kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 4kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 6kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 8kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 2kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 4kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 6kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 8kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, bez podložky
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 2kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 4kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 6kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Výstupní svorky	330pF, 330Ω	Contact	± 8kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 2kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 4kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 6kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou
Nenapájené	#1	Obal	330pF, 330Ω	Contact	± 8kV	5	Status I	Měřeno dle Category 1, s podložkou