



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIOENGINEERING

## OPTIMALIZOVANÉ SYSTÉMY NAPÁJENÍ LED

LED OPTIMISED CONTROL SYSTEMS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Petra-Kajňák

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

BRNO 2020



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Bc. Daniel Petra-Kajňák

**ID:** 174375

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2019/20

**NÁZEV TÉMATU:**

## Optimalizované systémy napájení LED

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s funkcí DC-DC spínaných zdrojů a řídicích obvodů maticového napájení LED. Provedte porovnání dostupných komponent. Navrhněte blokově řešení zvoleného DC-DC měniče. Pro řízení měniče a LED kontrolerů použijte mikroprocesor, případně mikroprocesorový modul. Navrhněte blokově architekturu obslužného SW. Navrhněte obvodové zapojení a případné desky plošných spojů zařízení.

Na základě návrhu vyrobte prototypový vzorek. Měřením ověřte jeho funkčnost a provedte detailní testování. Součástí výstupu diplomové práce bude vytvoření demonstračního softwaru.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] Introduction to Driving LED Matrices. Broadcom (AVAGO) [online]. [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: <https://docs.broadcom.com/docs/AV02-3697EN>

[2] VW 80000 Automotive Standards for Electrical Load testing. Hella Internal Norm Database.

**Termín zadání:** 3.2.2020

**Termín odevzdání:** 28.5.2020

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.

**Konzultant:** Ing. Milan Tannenberg, Ph.D.

**prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

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

# ABSTRAKT

Práca rozoberá návrh maticového LED displeja pre zadné svetlomety automobilu a jeho napájania. Vysvetľuje základné poznatky o meničoch, svetle a nárokoch na elektroniku v automobilovom priemysle. Navrhuje jednotlivé obvody, dosku plošných spojov a firmvér. Predefinované animácie demonštrujú bezpečnostné, praktické dizajnové funkcie.

Inovatívne riešenie prináša novú úroveň komunikácie vozidla s okolím. Účelom je zvýšenie bezpečnosti a plynulosti premávky.

# KLÍČOVÁ SLOVA

DC-DC meniče, automobilový priemysel, maticové LED, zdroj, displej

# ABSTRACT

The paper discusses a design of a matrix LED display for car rear combination lamps and its power supply. It provides basic information about converters, light, and electronics requirements in the automotive industry. The design of individual circuits, printed circuit board, and firmware are analyzed. Predefined animations have safety, practical, and design functions.

The innovative solution presents a new level of communication between the vehicle and its environment. The purpose is to increase safety and improve traffic flow.

# KEYWORDS

DC-DC converters, automotive industry, matrix LED, power supply, display

PETRA-KAJŇÁK, Daniel. Optimalizované systémy napájení LED. Brno, 2020. 111 s., 11 s. příloh. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/126127>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Lucie Hudcová. Vedúci práce za spoločnosť Hella: Dr. Milan Tannenberg

# PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som svoju diplomovú prácu na tému „Optimalizované systémy napájení LED“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil(a) autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol(-la) nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorskom, o právach súvisejúcich s právom autorským a o zmeně niektorých zákonov (autorský zákon), vo znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka č. 40/2009 Sb

V Brne dňa 28.05.2020

.....

(podpis autora)

# POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu práce pánovi Dr. Milanovi Tannenbergovi za odborné usmerňovanie, konzultácie, trpezlivosť a pomoc pri riešení problémov. Veľká vďaka patrí odbornému mentorovi Ing. Petrovi Koukalovi za jeho čas a odbornú pomoc. Ďalej by som rád poďakoval vedúcej práce doc. Ing. Lucii Hudcovej, Ph. D. za konzultácie formálnej stránky práce. Ďakujem veľmi pekne Ing. Richardovi Drutarovskému za odborné korigovanie tejto práce. V neposlednom rade sa chcem poďakovať spoločnosti Hella Autotechnik Nova, s.r.o. za technické zázemie a podporu.

# OBSAH

<b>Zoznam Obrázkov</b>	x
<b>Zoznam Tabuliek</b>	xiii
<b>Úvod</b>	14
<b>1 Napájacie zdroje pre jednosmerné aplikácie</b>	16
1.1.1 Lineárny zdroj	16
1.1.2 Spínaný zdroj	16
1.2 Základné delenie spínaných zdrojov	16
1.2.1 Izolovaná a neizolovaná štruktúra	16
1.2.2 Synchronná a nesynchronná štruktúra	17
1.2.3 Miera integrovanosti	17
1.3 Základné topológie meničov	17
1.3.1 Topológia Buck	18
1.3.2 Topológia Boost	19
1.3.3 Topológia Buck-Boost	19
1.4 Porovnanie DC-DC meničov	20
<b>2 Riadiace obvody pre LED</b>	23
2.1 Porovnanie riadiacich obvodov pre maticové ovládanie LED	24
2.2 Svetlá v automobiloch	26
2.2.1 Homogenita svetla	26
<b>3 Elektrické a EMC testy v automobilovom priemysle</b>	28
3.1 Základné elektrické testy	28
3.1.1 Testovanie neštandardného napájacieho napätia	28
3.1.2 Testy indukovaných pulzov do vedenia	30
3.1.3 Ostatné elektrické testy	31
3.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)	31
3.2.1 Elektromagnetická interferencia (rušenie) - EMI	32
3.2.2 Testy rušivého vyžarovania (radiated emissions)	32
3.2.3 Testy rušivých signálov na vedení (conducted emissions)	32
3.2.4 Elektromagnetická susceptibilita (Odolnosť, imunita) – EMS	33
3.2.5 Testy odolnosti voči elektromagnetickým poliam (radiated immunity)	33

3.2.6	Testy odolnosti voči rušivým signálom na vedení (conducted immunity)	33
3.2.7	Testy odolnosti voči ESD (ESD immunity)	34
3.3	Automobilová kvalifikácia AEC	34
<b>4</b>	<b>Návrh zariadenia</b>	<b>35</b>
4.1	Koncepcia zariadenia	35
4.2	LED matica – Displej	35
4.3	Riadenie LED matice	36
4.3.1	Mikroprocesor	37
4.4	Napájanie riadiacich obvodov	39
4.5	DC-DC menič pre napájanie LED	39
4.5.1	Vstup meniča	40
4.5.2	Filter	41
4.5.3	Výstup meniča	42
4.6	Vstupné ochrany	43
4.7	Výkonové straty	44
4.7.1	Chladenie matice LED	47
4.7.2	Chladič	47
4.8	Doska plošných spojov	50
<b>5</b>	<b>Realizácia zariadenia</b>	<b>51</b>
5.1	Oživovanie zariadenia	51
5.1.1	Zhodnotenie procesu oživovania DPS	55
5.2	Základné vlastnosti meniča	55
5.2.1	Zhodnotenie merania základných vlastností DC-DC meniča	60
5.3	Termálne vlastnosti zariadenia	60
5.3.1	Zhodnotenie merania tepelných emisií	63
5.4	Rozptyl svetla	63
<b>6</b>	<b>Firmvér</b>	<b>64</b>
6.1	Hlavný program	64
6.1.1	Nekonečná slučka	64
6.1.2	Voľba frekvencie pre Timmer 1	65
6.1.3	Časovač 1	66
6.1.4	Komunikácia	66



6.2	Moduly.....	67
6.2.1	TLC_init.....	67
6.2.2	matrix_init.....	68
6.2.3	TLC_mapping.....	69
6.2.4	ADC.....	71
<b>7</b>	<b>Testovanie zariadenia</b>	<b>73</b>
7.1	ELEKTRICKÉ TESTY .....	73
7.1.1	Zhodnotenie elektrických testov .....	77
7.2	EMC.....	77
7.2.1	Conducted emissions .....	78
7.2.2	Radiated Emmision.....	81
7.2.3	Zhodnotenie EMC testov .....	88
<b>8</b>	<b>Výsledné zariadenie a jeho funkcie</b>	<b>89</b>
8.1	Svetelné funkcie.....	89
8.1.1	Bezpečnostné funkcie .....	89
8.1.2	Praktické funkcie .....	90
8.1.3	Dizajnové funkcie .....	91
8.2	Výsledný prototyp.....	92
<b>9</b>	<b>Záver</b>	<b>94</b>
	<b>Literatúra</b>	<b>95</b>
	<b>Zoznam použitých skratiek</b>	<b>99</b>
A	Schéma zapojenia	101
A.1	Schéma zapojenia DC-DC spínaného zdroja.....	101
A.2	Schéma zapojenia lineárneho zdroja.....	102
A.3	Schéma zapojenia LED matice a radiacích obvodov .....	103
A.4	Schéma zapojenia mikroprocesora .....	104
A.5	Doska plošných spojov TOP.....	105
A.6	Obsadzovací výkres TOP.....	106
A.7	Doska plošných spojov druhá vrstva .....	107
A.8	Doska plošných spojov tretia vrstva .....	108
A.9	Doska plošných spojov BOTTOM .....	109
B	Zoznam súčiastok	110

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1.1 Buck menič - zatvorený spínač	18
Obrázok 1.2 Buck menič - otvorený spínač	18
Obrázok 1.3 Boost menič - zatvorený spínač	19
Obrázok 1.4 Boost menič - otvorený spínač	19
Obrázok 2.1 Princíp difúzora [15]	27
Obrázok 3.1 Priebeh pulzu E-01	29
Obrázok 3.2 Priebeh pulzu E-02	29
Obrázok 3.3 Priebeh pulzu E-03	29
Obrázok 3.4 Priebeh pulzu E-04	29
Obrázok 3.5 Priebeh pulzu E-05	30
Obrázok 3.6 Priebeh pulzu E-06	30
Obrázok 3.7 Priebeh pulzu E-08	30
Obrázok 3.8 Priebeh pulzu E-11	30
Obrázok 4.1 Bloková schéma zariadenia	35
Obrázok 4.2 Princíp ovládania matice LED	38
Obrázok 4.3 Vstupný filter spínaného zdroja	42
Obrázok 4.4 Ochrana pred zámenou polarity	44
Obrázok 4.5 Distribúcia stratového tepla na doske plošného spoja	45
Obrázok 5.1 Prototyp elektroniky maticového displeja	51
Obrázok 5.2 Chybný priebeh výstupného prúdu na cievke a spínaného napätia DC-DC meniča	52
Obrázok 5.3 Schéma zapojenia DC-DC meniča znázorňujúca zmeny v zapojení vykonané pri oživovaní zariadenia	53
Obrázok 5.4 Pomalá regulácia výstupného napätia DC-DC meniča	53
Obrázok 5.5 Periodický pokles vstupného napätia DC-DC meniča	54
Obrázok 5.6 Priebeh výstupného napätia a prúdu cievkou	55
Obrázok 5.7 Priebeh vstupného a výstupného napätia	56
Obrázok 5.8 Priebeh spínania DC-DC meniča	56
Obrázok 5.9 Prekmit výstupného napätia pri multiplexovaní	57
Obrázok 5.10 Zníženie prekmitu spôsobeného multiplexovaním	58

Obrázok 5.11 Pokles výstupného napätia pri multilexovaní	59
Obrázok 5.12 Teplotné emisie prototypu – predná strana	61
Obrázok 5.13 Teplotné emisie prototypu – zadná strana	61
Obrázok 5.14 Termogram vzorky pri vstupnom napätí 27 V	62
Obrázok 6.1 Vývojový diagram hlavného programu	64
Obrázok 6.2 Grafické znázornenie PWM regulácie v integrovanom obvode TLC5955	65
Obrázok 6.3 Vývojový diagram obsluhy prerušenia časovača 1	67
Obrázok 6.4 Matica s hodnotami pre ovládanie LED	68
Obrázok 6.5 Časť sekvencie maskovacej matice	69
Obrázok 6.6 Príprava poľa dát pre nastavenie jasu LED	69
Obrázok 6.7 Grafické znázornenie zapojenia subriadkov LED matice	70
Obrázok 6.8 Rozdiel medzi logaritmickou a lineárnou zmenou jasu	70
Obrázok 7.1 Priebeh testu E-06 Zvlnenie napätia	75
Obrázok 7.2 Priebeh testu E-07 Pomalý pokles a nárast vstupného napätia	75
Obrázok 7.3 Priebeh testu E-09 Správanie pri resete	76
Obrázok 7.4 Schéma zapojenia testovacieho zariadenia pre test E10	76
Obrázok 7.5 Priebeh testu E-10 scenár 1	77
Obrázok 7.6 Výsledky merania RE, pásmo 100 kHz - 108 MHz, subpásmo 9 kHz, detektor PK	79
Obrázok 7.7 Výsledky merania CE, 100 kHz - 108 MHz_9 kHz_AV	79
Obrázok 7.8 Výsledky merania CE, 30 MHz - 108 MHz_120 kHz_PK	80
Obrázok 7.9 Výsledky merania CE, 30 MHz - 108 MHz_120 kHz_AV	80
Obrázok 7.10 Výsledky merania RE, Rod ant., pásmo 9 kHz - 150 kHz, subpásmo 200 Hz, detek. PK_V	82
Obrázok 7.11 Výsledky merania RE, Rod ant, 0.1 MHz - 30 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor PK_V	83
Obrázok 7.12 Výsledky merania RE, , Rod ant., 0.1 MHz - 30 MHz, BW 9 kHz, K5, detector AV_V	83
Obrázok 7.13 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor PK, V	84
Obrázok 7.14 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor AV, V	84
Obrázok 7.15 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detector PK, H	85
Obrázok 7.16 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detector AV, H	85

Obrázok 7.17 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector PK, V	86
Obrázok 7.18 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector AV, V	86
Obrázok 7.19 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector PK, H	87
Obrázok 7.20 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector AV, H	87
Obrázok 8.1 Bezpečnostná funkcia chodec	89
Obrázok 8.2 Bezpečnostná funkcia kolóna	90
Obrázok 8.3 Bezpečnostná funkcia pre obiehajúce	90
Obrázok 8.4 Praktická funkcia zámok	90
Obrázok 8.5 Praktická funkcia dobíjanie batérie	91
Obrázok 8.6 Svetelný dizajn 1	91
Obrázok 8.7 Svetelný dizajn 2	92
Obrázok 8.8 Hodnoty PWN jednotlivých LED pre Svetelný dizajn 2	92
Obrázok 8.9 Prototyp umiestnený vo svetlomete	93

# ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1 Spínané zdroje s integrovanými tranzistormi	21
Tabuľka 2 Spínané zdroje s externými tranzistormi	22
Tabuľka 3 Riadiace obvody pre maticové ovládanie LED	24
Tabuľka 4 Riadiace obvody pre viackanálové ovládanie LED	25
Tabuľka 5 Prehľad metód a frekvenčných rozsahov pre testy vyžarovania [23]	32
Tabuľka 6 Zhrnutie hodnôt podľa ISO 11452 [21]	34
Tabuľka 7 Výsledky základných meraní	56
Tabuľka 8 Zoznam vykonaných elektrických testov	73
Tabuľka 9 Detail meraných frekvencií pre CE	78
Tabuľka 10 Detail meraných frekvencií pre CE	81

# ÚVOD

Na bezpečnosť v automobilovej doprave sú kladené vysoké požiadavky. Dôvodom je jej narastajúca intenzita, ale aj znížená pozornosť vodičov. Zníženú pozornosť môže spôsobovať neintuitívne ovládanie základných funkcií vozidla alebo používanie mobilného telefónu. Jednou z možností, ako výrazne zvýšiť bezpečnosť a plynulosť premávky, je zlepšenie komunikácie medzi účastníkmi premávky. Riešením je napríklad použiť časť vonkajších svetiel automobilov ako displej. To umožní podobne ako pri dopravných značkách informovať a varovať účastníkov premávky prostredníctvom nápisov a piktogramov. V snahe zlepšovať bezpečnosť sa dnes do moderných vozidiel integrujú pokročilé asistenčné systémy pre vodičov (ADAS). Tieto systémy vyhodnocujú veľké množstvo dát o okolí, aby vodičovi pomohli v ovládaní vozidla s rozličnou mierou autonómity. Displeje môžu rozšíriť ich funkciu zdieľaním niektorých informácií, a tým výrazne zvýšiť bezpečnosť všetkých účastníkov premávky. Zdieľané by mohli byť informácie o nebezpečnosti na ceste, daní prednosti chodcov, maximálnej rýchlosti alebo stave vozovky. Zvýšená bezpečnosť a plynulosť premávky prináša viaceré pozitívne aspekty. Hlavným prínosom je zníženie ujmy na zdraví a strát na životoch, tiež je to zníženie nákladov spojených s nehodami a úspora času vďaka plynulej premávke. Navyše, technológia je vhodná aj na komunikáciu medzi autonómnymi vozidlami a účastníkmi premávky.

Kľúčovou motiváciou technického vývoja je aj rozšírenie možností pre nový dizajn. Inovatívna technológia ponúka spoločnosti Hella konkurenčnú výhodu oproti ostatným výrobcam automobilových svetiel. LED svetlomety priniesli dizajnérom nevídané možnosti v dizajne svetiel. Ďalším krokom je možnosť individualizácie, napríklad vo voľbe vlastného dizajnu svetla prostredníctvom mobilnej aplikácie.

V súčasnosti je dostupná trojica technológií pre vývoj zadných svetiel podporujúcich požadované funkcie. Prvou možnosťou je využitie LED diód, ktoré budú v maticovom zapojení. To umožní vytvorenie jednoduchého displeja vďaka individuálnemu ovládaniu svietenia jednotlivých diód. Nevýhodou tejto technológie je nízka homogenita svetla spôsobená bodovým charakterom svetla LED diód. Alternatívou je OLED technológia. Umožňuje konštrukciu homogénne svietiacich plôch akéhokoľvek tvaru. Nevýhodou je, že tvar tejto plochy musí byť vopred definovaný. Poslednou technológiou je použitie LCD displeja. Napriek mnohým výhodám je použitie OLED a LCD technológie nevýhodné kvôli zložitosti výroby, vysokej cene a nízkej životnosti. Dnes je cenovo výhodnejšie využiť LED diódy.

Cieľom práce bolo navrhnuť prototyp elektroniky do zadnej kombinovanej lampy, ktorý naznačuje budúce smerovanie osvetlenia automobilov. Prototyp slúži ako technologická predloha pre vývoj sériového svetla v spoločnosti Hella. Preto musel byť prototyp vyvíjaný s ohľadom na požiadavky automobilového priemyslu. Významnou časťou je návrh spínaného zdroja, ktorý bude napájať maticu LED diód.

Práca bola rozdelená do čiastkových cieľov:

- Zoznámenie sa s funkciou DC-DC meničov a riadiacich obvodov pre maticové ovládanie LED
- Porovnanie a výber vhodných komponentov pre návrh zariadenia
- Oboznámenie sa s nárokmi na elektroniku v automobilovom priemysle

- Návrh blokovej schémy hardvéru
- Návrh obvodových zapojení a dosky plošných spojov
- Návrh architektúry firmvéru (FW)
- Vývoj FW blokov z nízkej úrovne na vývojových súpravách (komunikácia)
- Oživenie dosky plošných spojov (PCB) a testovanie DC-DC meniča
- Implementácia FW blokov na vyrobenú PCB a vývoj plnohodnotného firmvéru
- Testovanie elektroniky a overenie správnej funkčnosti

Na začiatku boli využité dostupné knižné a internetové zdroje na štúdium DC-DC meničov a riadiacich obvodov LED. Bolo potrebné pochopiť princíp ich fungovania a získať znalosti nevyhnutné pre návrh zariadenia. Stanovili sa základné požiadavky na zariadenie s ohľadom na automobilový priemysel. Prehľad vhodných komponentov bol vybraný z ponuky internetových obchodov a tiež priamym oslovením významných výrobcov. Tým sa overila dostupnosť produktov, ktoré ešte len môžu byť uvedené na trh. Na základe vybraných komponentov sa definovali technické parametre zariadenia. Vznikla bloková schéma a návrh obvodových zapojení. Navrhla sa doska plošných spojov. Následne bolo nutné navrhnuť architektúru HW. Aby bol skrátený čas celkového vývoja, už počas výroby PCB bola navrhnutá architektúra HW a boli vyvinuté základné bloky FW na vývojových moduloch. Po výrobe bola oživená PCB. Otestovali sa základné vlastnosti DC-DC meniča. V ďalšom kroku sa implementovali jednoduché bloky FW, aby bolo možné ovládať maticu LED. Nasledoval vývoj plnohodnotného FW, ktorý demonštruje požadované funkcie displeja. V poslednom kroku sa overili požadované funkcie a zariadenie prešlo elektrickými a EMC testami.

Jedným z výstupov diplomovej práce je rozbor funkcie a kategorizácia DC-DC meničov a riadiacich obvodov LED. Ďalším výstupom je prehľad a porovnanie dostupných komponentov (DC-DC meničov a riadiacich obvodov). Výstupom je aj návrh obvodových zapojení, ktorý zahŕňa výber, prípadný výpočet a zapojenie jednotlivých elektronických súčiastok. Ďalším výstupom je návrh dosky plošných spojov. Hlavným hmatateľným výstupom bola plne osadená a oživená DPS. Softvérovým výstupom je kód firmvéru. Ten umožňuje plnohodnotné ovládanie displeja a demonštruje jeho zobrazovacie možnosti. Tiež chráni zariadenie pred prehriatím a prepätím. Posledným výstupom je analýza výsledkov elektrických a EMC testov.

# 1 NAPÁJACIE ZDROJE PRE JEDNOSMERNÉ APLIKÁCIE

Takmer všetky elektrické zariadenia potrebujú elektrické napájanie. Napájacie zdroje poskytujú požadované napätie a prúd zo zdroja do záťaže. Za jednosmerné aplikácie sa považujú zariadenia napájané jednosmerným prúdom. V automobile sú zariadenia napájané jednosmerným prúdom z batérie. Dva základné typy jednosmerných zdrojov sú lineárny a spínaný zdroj.

## 1.1.1 Lineárny zdroj

Tento typ zdroja kontinuálne prenáša energiu zo zdroja do záťaže. Energia prechádza cez regulačný element, ktorý pracuje v lineárnej oblasti. Lineárne zdroje sú preferované v aplikáciách, kde je potrebné dosiahnuť minimálne rušenie a zvlnenie výstupného napätia. Tieto obvody sú veľmi neefektívne pri veľkom rozdiel medzi vstupným a výstupným napätím. Na reguláciu sa využíva lineárny prvok (napríklad odporová záťaž) zapojený v sérii medzi vstupom a výstupom, na tomto stratovom prvku sa mení prebytočná energia na teplo [1].

## 1.1.2 Spínaný zdroj

Takýto zdroj pozostáva zo spínacieho obvodu (kontrolér + spínací prvok) a akumulačného prvku, zvyčajne cievky, kondenzátora alebo ich kombinácie. Cievka slúži ako akumulačný prvok, ktorý uchováva a dodáva energiu do výstupnej záťaže. Energiu získava v opačnom cykle zo vstupného zdroja. Spínací prvok reguluje prenos energie na základe rôznej dĺžky zapnutého a vypnutého cyklu. Pohyb energie sa mierne líši pre jednotlivé topológie, princíp fungovania základných topológií bude popísaný v kapitole 1.2 Základné delenie spínaných zdrojov. Tieto zdroje sú preferované pre vysokú efektivitu, s ktorou sú spojené dobré termálne vlastnosti a schopnosť pracovať v širokom rozsahu vstupného napätia. Problematické je zvlnenie výstupného napätia, rušenie a menšia odozva na rýchle zmeny záťaže [1].

## 1.2 Základné delenie spínaných zdrojov

V nasledujúcej podkapitole budú spínané zdroje rozdelené do troch oblastí na základe ich štruktúry a princípu fungovania. DC-DC zdroje delíme podľa priameho alebo nepriameho spojenia zdroja so záťažou, použitia riadiacich prvkov a miery integrácie týchto prvkov.

### 1.2.1 Izolovaná a neizolovaná štruktúra

V izolovanom spínanom zdroji neprúdi jednosmerný prúd priamo od zdroja k záťaži. O oddelenie zdroja od záťaže sa stará transformátor, ktorý prenáša energiu z primárnej na sekundárnu stranu prostredníctvom magnetickej väzby. Rovnako spätná väzba z výstupu potrebná na riadenie spínacieho prvku na primárnej strane je galvanicky oddelená, najčastejšie optickou väzbou. Táto štruktúra je používaná pre aplikácie s požiadavkou na zvýšenú ochranu pred úrazom elektrickým prúdom, napríklad v medicíne.



Naopak v neizolovanej štruktúre je energia priamo prenášaná od zdroja k záťaži, taktiež spätná väzba je v priamom spojení. Vo väčšine aplikácií sa nachádzajú práve neizolované DC-DC meniče [2].

## 1.2.2 Synchronná a nesynchronná štruktúra

Každý spínaný obvod potrebuje dvojicu spínacích prvkov na kontrolu toku prúdu v jednotlivých cykloch. Pri nesynchronnom zapojení sa o vedenie prúdu správnym smerom po odpojení od zdroja stará dióda. Využíva sa jej prirodzená vlastnosť viesť prúd iba jedným smerom bez potreby ďalšej regulácie. Avšak na tejto dióde dochádza k výraznému úbytku napätia, čo znižuje efektivitu tohto zapojenia. Výhodou je jednoduchšie ovládanie a nižšia cena.

Efektivitu je možné zvýšiť náhradou diódy za MOSFET tranzistor. Vodivý kanál tranzistora medzi Drain a Source v zopnutom stave má veľmi malý odpor (desiatky  $m\Omega$ ), preto je úbytok napätia nižší. Synchronne riešenie si vyžaduje kontrolu dvoch spínacích prvkov. Je veľmi dôležité zabezpečiť, aby nedošlo k skratu súčasným zopnutím oboch tranzistorov. Zložitejšie ovládanie a drahšie komponenty zvyšujú cenu celého riešenia. Napriek tomu dopyt po efektívite umožnil masové rozšírenie synchronných meničov. Ich cena sa dnes približuje k cene nesynchronných meničov a s najvyššou pravdepodobnosťou bude toto zapojenie v budúcnosti prevládať [3].

## 1.2.3 Miera integrovanosti

Bez rozdielu nato, či ide o synchronne, alebo nesynchronne riešenie, spínacie prvky môžu byť úplne alebo čiastočne integrované v čipe spínacieho obvodu. Takéto integrované riešenie nazývame aj regulátor. Je jednoduchšie pre navrhovanie, nie je potrebné vyberať tranzistory, znižuje sa počet externých súčiastok a tiež využitá plocha na doske plošných spojov (PCB). Na druhej strane toto riešenie má menší rozsah použitia.

Spínací obvod, ktorý ovláda externé spínacie prvky, zvykneme nazývať kontrolér. Externé MOSFET tranzistory alebo diódy prinášajú väčšiu flexibilitu. Výhodou je aj lepšie rozloženie tepelného vyžarovania.

Súčasným trendom u výrobcov je ešte väčšia miera integrácie externých komponentov, akými sú napríklad cievka a vstupné alebo výstupné kondenzátory. Snahou je zvýšiť efektivitu a hlavne dosiahnuť lepšie EMC vlastnosti spínaných zdrojov. Práve elektromagnetické vyžarovanie, ktoré môže rušiť iné elektrické obvody patrí medzi hlavné nevýhody spínaných zdrojov.

## 1.3 Základné topológie meničov

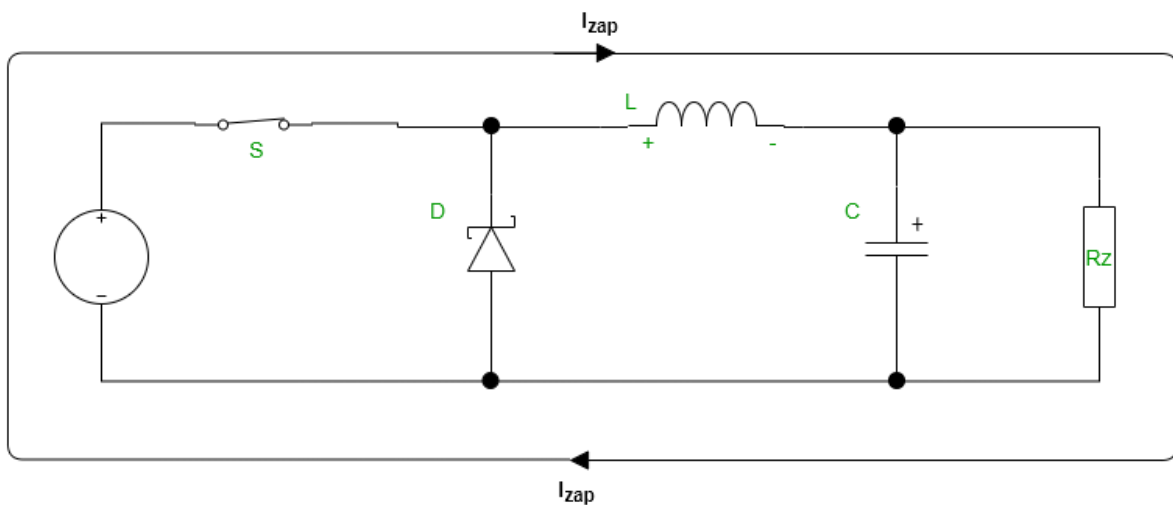
V nasledujúcom texte sú v krátkosti popísané základné topológie DC-DC meničov a ich elementárny princíp fungovania. Medzi základné topológie radíme Buck (znižujúci menič), Boost (zvyšujúci menič), Buck-Boost (kombinácia znižujúceho a zvyšujúceho meniča). Rozšírené sú aj zapojenia ako SEPIC alebo Cuk. Názov SEPIC je anglická skratka „Single-ended primary-inductor converter“. Ide o variant Buck-Boost meniča, ktorý neinvertuje výstupné napätie. Cuk je pomenovaný po jeho vynálezcovi Slobodanovi Čukovi. Predstavuje ďalší variant invertujúceho Buck-Boost meniča.

### 1.3.1 Topológia Buck

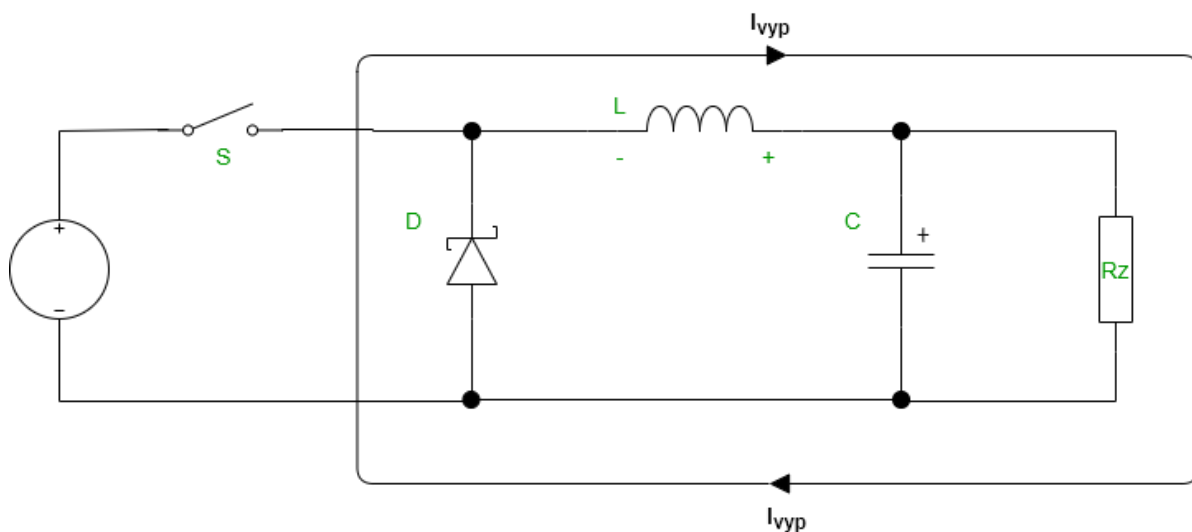
Buck menič pracuje v dvoch stavoch/cykloch: zapnutý a vypnutý stav spínača **S** (viď Obrázok 1.1). Pri zavretí spínača v zapnutom cykle dochádza k sériovému pripojeniu indukčnosti k zdroju. Prúd indukčnosťou **L** začne rásť, v dôsledku toho sa objaví na cievke napätie a zároveň dochádza k absorpcii energie vo forme magnetického poľa v cievke [4].

V druhom vypnutom cykle dôjde k otvoreniu spínača **S** (viď Obrázok 1.2). Obvodom bude aj naďalej tiecť prúd vďaka dióde **D**. Jeho úroveň však poklesne. Dôjde k zmene polarít napätia na cievke. Absorbovaná energia v cievke bude zdrojom pre záťaž **Rz**.

Z princípu fungovania vyplýva, že napätie na výstupe bude vždy menšie ako napätie zdroja. Preto nazývame tento menič aj znižujúci menič. Pomer medzi zapnutým cyklom a vypnutým cyklom určuje pomer napätí medzi vstupom a výstupom [5].



Obrázok 1.1 Buck menič - zatvorený spínač

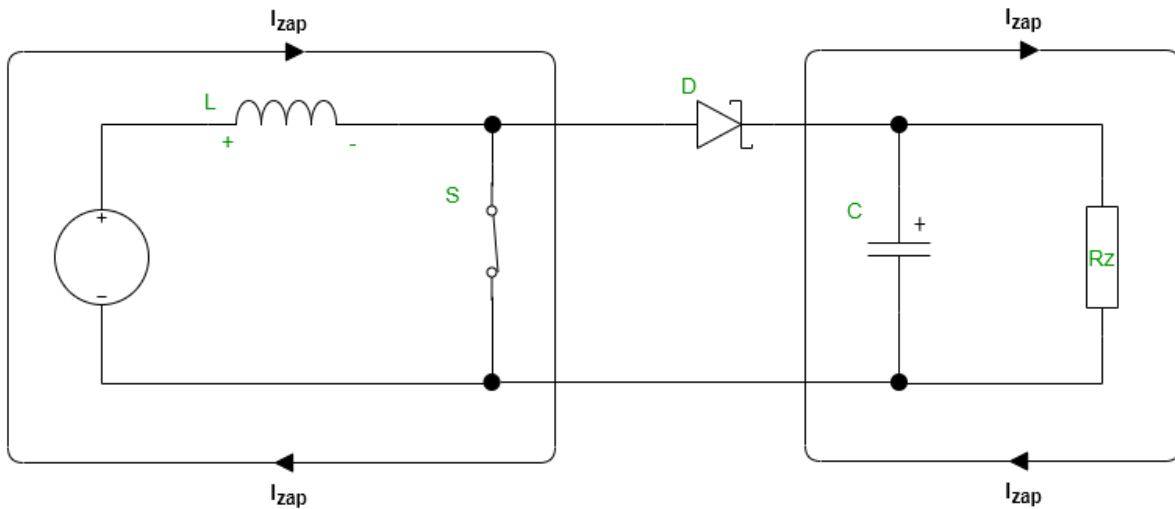


Obrázok 1.2 Buck menič - otvorený spínač

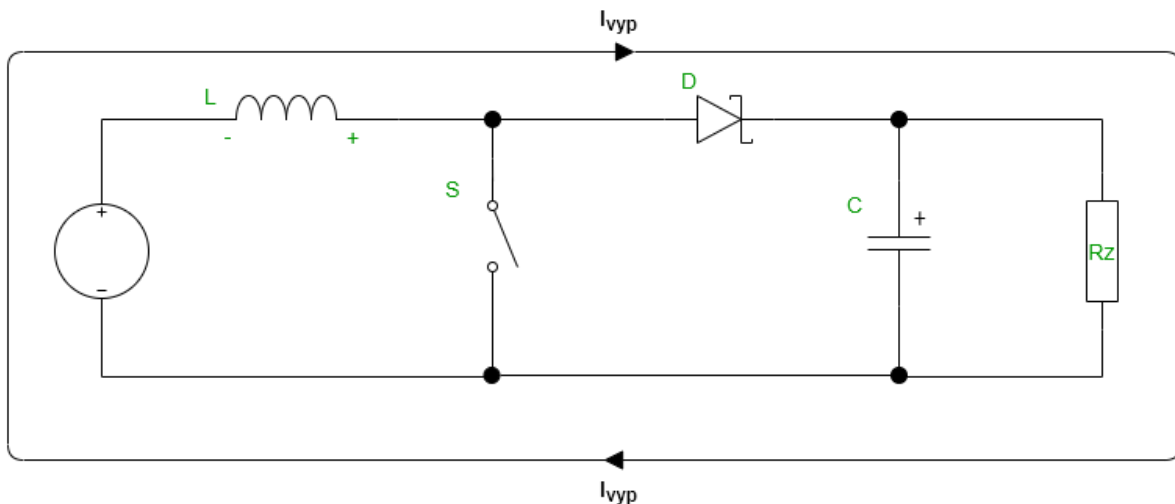
### 1.3.2 Topológia Boost

Rovnako ako v prípade Buck meniča, aj tento menič pracuje v dvoch cykloch, ale jeho úlohou je, naopak, zvyšovať vstupné napätie. Nazýva sa aj zvyšujúci menič. V zapnutom cykle (viď Obrázok 1.3), keď je zopnutý spínač **S**, tok prúdu sa uzavrie cez spínač, ktorý má menší odpor ako dióda **D**. Tento prúd nabíja energiou cievku **L**. S výnimkou počiatočného zapnutia je v tejto fáze výstup zásobovaný energiou z kondenzátora **C**.

V druhom vypnutom cykle (viď Obrázok 1.4) je spínač **S** rozopnutý. Dochádza k zmene polaroty napätia na cievke **L**, a tá sa začne správať ako druhý zdroj zapojený v sérii. To má za následok zvýšené napätie pre dobíjanie kondenzátora a napájanie zát'aže. [5]



Obrázok 1.3 Boost menič - zatvorený spínač



Obrázok 1.4 Boost menič - otvorený spínač

### 1.3.3 Topológia Buck-Boost

Tento typ meniča dokáže dodávať na výstup napätie nižšie, rovnaké alebo vyššie ako je napätie zdroja. Menič vznikne kombináciou Buck a Boost topológie. Menič je doplnený

o riadiacu jednotku, ktorá sníma veľkosť vstupného napätia, aby mohla podľa potreby zvoliť vhodnú topológiu [5]. V prípade, ak je napätie na vstupe väčšie alebo rovné ako požadované výstupné napätie, používa sa menič Buck. Ak je vstupné napätie nižšie, riadiaca jednotka prepne menič do topológie Boost.

## 1.4 Porovnanie DC-DC meničov

Na trhu je obrovské množstvo meničov, ktorých rôzne vlastnosti sa líšia. Z elektrických vlastností to je napríklad rozsah vstupných a výstupných napätí, maximálny prúd alebo topológia meniča. Ďalej miera integrovanosti, kedy to môžu byť kontroléry s potrebou externých spínacích prvkov, meniče s potrebou malého počtu externých komponentov alebo takmer plne integrované moduly. Meniče môžu mať viacero doplnkových funkcií ako napríklad ochrana pred skratom, prehriatím alebo externé zapínanie. Jednotlivé meniče sa tiež líšia maximálnou pracovnou teplotou, použitým puzdrom a samozrejme cenou. Existuje veľké množstvo variácií vyššie vymenovaných vlastností, ktoré nie je možné priamo porovnať, preto je nutné vyfiltrovať výber na základe vybraných požiadaviek:

- Zdroj konštantného napätia
- Synchronny Buck menič
- Výstupný prúd viac ako 5 A
- Vstupné napätie v rozsahu 5 – 36 V
- Nastaviteľné výstupné napätie
- Automobilová kvalifikácia

Zdroj konštantného napätia je nutné použiť kvôli zvolenej architektúre zapojenia. Ten bude dodávať konštantné napätie minimálne veľkosti napätia v priepustnom smere použitých LED. Prúd diódami bude riadený obvodom pre maticové riadenie LED. Menič typu Buck umožní znížiť napätie z batérie na úroveň napätia pre diódy. S cieľom dosiahnuť čo najvyššiu energetickú efektívnosť bude použitá synchronná štruktúra (popísaná v časti 1.2.2 Synchronná a nesynchronná štruktúra). Pretože menič pracuje s vysokými prúdmi (viac ako 5 A), vysoká efektívnosť minimalizuje straty a možné prehrievanie integrovaného obvodu meniča, avšak synchronne riešenie nezvyšuje radikálne energetickú efektívnosť v prípade, ak maximálny výstupný prúd dosahuje hodnotu menej ako 2 A. Preto s narastajúcim prúdovým zaťažením rastie aj prínos synchronného riešenia. Vysoký prúd si vyžaduje práve maticové zapojenie LED. Diódy sú zapojené akoby jednotlivo a je potrebná úroveň napätia rovná napätiu v priepustnom smere diódy, na rozdiel od zapojenia LED v sérii. Veľký rozsah vstupného napätia odoláva zmenám v napájaní a tiež pomáha odolávať testovacím pulzom bez potreby ďalších obvodov pri elektrických testoch špecifikovaných výrobcami automobilov. Výstupné napätie bude prispôbené napätiu v priepustnom smere použitých LED diód.

Porovnanie je rozdelené do dvoch kategórií. V prvej z nich sa nachádzajú synchronne Buck meniče s integrovanými MOSFET tranzistormi. DC-DC meniče s automobilovou kvalifikáciou a s integrovanými tranzistormi pre výkony nad 5 A sú na trhu pomerne krátko. Preto je dnes dostupných iba niekoľko zariadení. Je však zrejme, že v budúcnosti bude ich množstvo aj výkon určite rásť. LM73606 je menič od firmy Texas Instruments. MAX20006 je vyrobený firmou Maxim. Spoločnosť MPS má vo svojom portfóliu menič s označením MPQ4317. Porovnanie základných vlastností sa nachádza v Tabuľka 1 [3], [6], [7].

Tabuľka 1 Spínané zdroje s integrovanými tranzistormi

Typ	Jednotka	LM73606	MAX20004	MPQ4317
Vstupné napätie	Min [V]	3.5	3.5	3,3
	Max [V]	42	40	50
Výstupné napätie	Min [V]	1	3.2	3
	Max [V]	34.2	36	45
Prúd	Max [A]	6	6	7
Frekvencia spínania	Min [kHz]	350	400	350
	Max [kHz]	2200	2100	2500
Odpor vodivého kanálu MOSFET	[mΩ]	53	76	80
Maximálna strieda	[%]	97.5	98	99
Tepelný odpor prechod- okolie	[K/W]	34.3	38.8	44
Rozprestreté spektrum	[-]	Nie	Áno	Áno
Efektívnosť	[%]	92	93	93

Tieto tri zariadenia majú podobné vlastnosti. V prípade LM73606 je hlavnou výhodou malý odpor vodivého kanálu, čím sa znižujú jednosmerné straty. Avšak na energetickej efektívnosti sa výrazne podieľajú aj spínacie straty, ktoré pre chýbajúce informácie v katalógových listoch nemožno vypočítať. Nízka hodnota tepelného odporu tiež prispieva k lepšiemu rozptýleniu tepla. Práve teplotné vlastnosti sú pri veľkých výkonoch dôležité. Výhodou MAX20006 je podpora funkcie rozprestretého spektra. Podľa slov výrobcu to má značný vplyv na zníženie vyžarovaných emisií. Regulátor MPQ4317 má veľký rozsah vstupného napätia aj nastavenia spínacej frekvencie. Navyše disponuje najvyšším výkonom z porovnávaných meničov.

V druhej kategórii sú synchronne Buck meniče s externými MOSFET tranzistormi. Používanie kontrolérov, ktoré ovládajú externé spínacie prvky, klesá na popularite. Príčinou je niekoľko nasledujúcich dôvodov: vyššia náročnosť návrhu, väčší počet externých komponentov, väčšia plocha na plošnom spoji, možnosť väčšieho rušenia a tiež znižujúca sa cena synchronných meničov. Na strane druhej sú tu výhody v podobe flexibility návrhu a hlavne možnosti lepšieho rozptýlenia tepla. Nedochádza k vzniku miest s vysokou teplotou. Zo širšieho prehľadu boli vybrané nasledujúce zariadenia: LTC3835 od firmy Analog Devices a NCV89193 od spoločnosti On Semiconductor [3], [8].

Tabuľka 2 Spínané zdroje s externými tranzistormi

Typ	Jednotka	LTC3835	NCV891930
Vstupné Napätie	Min [V]	4	3.5
	Max [V]	36	45
Výstupné Napätie	Min [V]	0,8	-
	Max [V]	10	-
Limit snímania prúdu	Max [mV]	100	75
Frekvencia spínania	Min [kHz]	140	2000
	Max [kHz]	650	2000
Odpor prechodu MOSFET	[mΩ]	-	-
Maximálna strieda	[%]	99	60
Tepelný odpor prechod-okolie	[K/W]	37	50
Rozprestreté spektrum	[-]	Nie	Nie
Efektívita	[%]	90	88

Kontrolér od spoločnosti OnSemi je staršie zariadenie. Okrem väčšieho maximálneho vstupného napätia má v ostatných ohľadoch horšie vlastnosti. Hlavnou nevýhodou NCV891930 je maximálna strieda iba 60 %. Pri takejto striede musí byť vstupné napätie o 40% vyššie ako výstupné. Vyšší tepelný odpor NCV891930 má za následok aj horšie termálne vlastnosti. Navyše nemusí byť jednoduché nájsť tranzistory správne pracujúce na vysokej frekvencii 2000 kHz. LTC3835 má maximálnu striedu až 99 % , pracuje na najčastejšie využívanej frekvencii 430 kHz a dosahuje aj vysokú efektívitu. V kombinácii s výkonnými tranzistormi môže byť vhodný pre tento projekt.

## 2 RIADIACE OBVODY PRE LED

Riadiaci obvod pre LED je zdroj napájania, ktorý reguluje energiu potrebnú pre napájanie jednej alebo viacerých LED diód v sérii. Riadiaci obvod je nevyhnutný pre správnu funkciu LED, kombinuje v sebe ochrannú a regulačnú funkciu. V prvom rade limituje množstvo energie tak, aby nedošlo k poškodeniu LED, a zároveň, aby dióda svietila. Aby sa LED rozsvietila, je potrebné zabezpečiť, aby diódou prechádzal prúd, a to dosiahnutím napätia väčšieho ako je minimálne napätie LED v priepustnom smere (forward voltage). Riadiaci obvod tiež reguluje prúd diódou tak, aby nepresiahol maximálny prúdový výkon LED, inak by došlo k jej poškodeniu. Navyše chráni diódu pred poškodením v prípade zvýšenia teploty, kedy dochádza k zvýšeniu prúdu, a tak dôjde k ďalšiemu nárastu teploty až do možného poškodenia LED. Preto musí riadiaci obvod zabrániť tomuto javu reguláciou konštantného prúdu [9].

Najjednoduchším príkladom riadiaceho obvodu je rezistor zapojený v sérii s LED diódou. Rezistor obmedzuje maximálny prúd diódou. Takýto obvod môžeme nazvať aj pasívny zdroj konštantného prúdu. Tento obvod nie je veľmi energeticky efektívny, pretože dochádza k stratám na rezistore. Pre dosiahnutie vyššej energetickej efektivity a pre aktívnu reguláciu sa často využívajú MOSFET tranzistory v lineárnom móde, preto tento regulátor nazývame aj lineárny regulátor. Základný princíp spočíva v sledovaní výstupného napätia operačným zosilňovačom, ktorý porovná aktuálnu hodnotu s referenčnou hodnotou. Následné výstup operačného zosilňovača ovláda otváranie tranzistora pracujúceho v lineárnej (odporovej) oblasti. Vďaka tomu dôjde k úbytku napätia potrebnému k regulácii. Špeciálnym variantom je LDO (Low drop-out), kedy dochádza len k veľmi malému úbytku napätia na meniči. To znamená, že zdroj môže regulovať výstupné napätie aj keď je jeho hodnota veľmi blízka úrovni vstupného napätia. Pre reguláciu vysoko svietivých LED môžu byť využívané práve vyššie popísané spínané zdroje [10].

Pre komplexnejšie riešenia, kedy je potrebné ovládať väčší počet nezávislých LED diód, prípadne aj intenzitu ich jasu, sa používajú integrované napájacie obvody. Tie dokážu regulovať LED diódy bez potreby ďalších obvodov. Sofistikovanejšie obvody umožňujú napríklad ovládanie jasu alebo komunikáciu pomocou zbernice. Jas je regulovaný šírkovou moduláciou pulzu. V praxi je LED chvíľu zapnutá a chvíľu vypnutá. Pomer týchto stavov určuje intenzitu vyžiareného svetla. Spínanie je také rýchle, že ľudské oko ho nedokáže spozorovať.

Ešte vyššia miera komplexnosti je potrebná pri ovládaní veľkého počtu LED, napríklad v displejoch. Aby nemusela mať každá LED samostatné napájanie, využíva sa zapojenie LED do matice (viď Obrázok 4.2 Princíp ovládania matice LED ) a prístup nazývaný multiplexovanie. Jednotlivé LED sa kontrolujú pomocou rýchleho prepínania medzi riadkami a stĺpcami. Vďaka tomu je v jednom veľmi krátkom okamihu dióda napájaná z jedného riadku a pripojená k zdroju energie prostredníctvom jedného stĺpca. Znova sa využíva nedokonalosť ľudského oka, prepínaním medzi jednotlivými diódami s dostatočne veľkou frekvenciou.

Práve tento druh obvodu bude využitý v tejto práci, nasledujúca kapitola bude venovaná porovnaniu jednotlivých dostupných obvodov.

## 2.1 Porovnanie riadiacich obvodov pre maticové ovládanie LED

Na trhu je len pomerne malé množstvo maticových riadiacich obvodov s automobilovou kvalifikáciou. Dnes sa tieto obvody najčastejšie používajú na riadenie LED veľkoplošných obrazoviek alebo na dynamické ovládanie podsvietenia displejov. Ich nasadenie v automobilovom priemysle je zriedkavé, preto v dnešnej dobe nie je na trhu obvod s automobilovou kvalifikáciou pre ovládanie veľkého počtu LED (viac ako 100). Populárne sú iba obvody na ovládanie malých matíc pre vysoko svietivé LED v predných svetlometoch. Navyše dostupné zariadenia bez kvalifikácie dokážu ovládať iba LED diódy s pomerne nízkym výkonom zvyčajne v jednotkách miliampérov. Avšak z komunikácie s výrobcami integrovaných obvodov je známy zvyšujúci sa záujem pre takéto obvody v automobilovom priemysle, preto možno v najbližších rokoch očakávať nové, klasifikované a výkonné zariadenia podporujúce rozšírené komunikačné protokoly.

Za daných podmienok bolo jednou z možností ustúpiť nároku pre automobilovú kvalifikáciu. Pre porovnanie boli vybrané 4 najzaujímavejšie zariadenia od trojice výrobcov. Ide o riadiace obvody IS31FL3746B, IS31FL3801 od spoločnosti ISSI, LED171596A od spoločnosti Texas Instruments a STLED524 od spoločnosti STMicro. Vo všeobecnosti všetky tieto zariadenia podporujú kontrolu desiatok LED diód, nastavenie jasu pomocou PWM v rôznych bitových rozlíšeniach. Výnimkou nie je ani možnosť nastaviť prúd pre jednotlivé LED alebo register pre nastavenie prúdu všetkých LED v jednom kroku. Na komunikáciu s mikroprocesorom sa využíva SPI alebo I2C komunikácia. Niektoré obvody podporujú aj diagnostické funkcie pre skratovanú alebo rozpojenú LED [3], [11]. Porovnanie jednotlivých obvodov sa nachádza v Tabuľka 3.

Tabuľka 3 Riadiace obvody pre maticové ovládanie LED

Typ	IS31FL3746B	IS31FL3801	LED171596A	STLED524
Počet LED	72	128	96	120
Napájanie LED [V]	2,7-5,5	2,2-5,5	max 6,1	Max 6
Max. priemerný prúd diódou [mA]	8.3	4	15	20
Komunikačné rozhranie	I2C, SPI	UART, SPI, LIN	I2C, SPI	SPI
Nastavenie prúdu	8 bitov globálne + 8 bitov individuálne	7 bitov individuálne	8 bitov individuálne	8 bitov individuálne
PWM	8 bitov	7 bitov	9 bitov	8 bitov
Iné	Deghosting	Vlastný uC	Register pre globálne nastavenie jasu	Vnútná pamäť, BGA puzdro
Ochrana/diagnostika	áno	áno	áno	áno



IS31FL3746B je vo svojej kategórii priemerné zariadenie, ktoré neposkytuje žiadnu nadštandardnú funkciu. IS31FL3801 je špecifické zariadenie, pretože v sebe kombinuje mikroprocesor a LED riadiaci obvod. Tento obvod obsahuje výpočtovú logiku s pamäťou. Vďaka tomu je možné obvod individuálne programovať a používať. IS31FL3801 ukazuje možnú budúcnosť riadiacich obvodov, kde všetka funkcionalita bude na mieru integrovaná v jednom čipe. Integrované obvody vyrobené pre konkrétnu funkciu nazývame aj System on Chip (SoC) [12]. Značnou nevýhodou obvodu je maximálny prúd jednotlivou LED iba 4 mA.

LED171596A je výkonný obvod s dobrými možnosťami nastavenia a komunikácie. Výhodou je maximálny prúd diódou až 15 mA.

STLED524 umožňuje uloženie dvojice statických obrazov do vnútornej pamäte. Statickým obrazom sa myslí zobrazenie, ktoré sa v čase nemení. Inými slovami, trvale je nastavená rovnaká hodnota výstupov riadiacich obvodov. Takýto obraz môže byť uložený v pamäti ako matica hodnôt definujúcich hodnoty jednotlivých výstupov riadiaceho obvodu. Ďalšie vnútorné funkcie podporujú automatickú zmenu jasú prostredníctvom internej funkcie a pohyb uloženého obrazu do strán. Nevýhodou je BGA puzdro, ktoré nie je preferované v automobilovom priemysle. Príčinou je náročné kontrolovanie kvality spájkovania.

Ďalšou možnosťou, ako ovládať veľký počet LED, je využitie samotného mikroprocesora na multiplexovanie. S výnimkou IS31FL3801 potrebujú všetky riadiace obvody pre svoje ovládanie mikroprocesor, preto je možné zvoliť kombináciu viackanálového riadiaceho obvodu a procesorom ovládaných tranzistorov pre multiplexovanie. Pre dané porovnanie boli vybrané tri viackanálové riadiace obvody od dvoch výrobcov (viď Tabuľka 4). IS32FL3237 od výrobcu ISSI. TLC5955 a obdobné zariadenie s vyššou funkcionalitou TLC 5958 od spoločnosti Texas Instruments. Viackanálové obvody majú vo všeobecnosti rovnaké funkcie ako obvody pre riadenie matíc, ale nepodporujú interné multiplexovanie [3], [11].

Tabuľka 4 Riadiace obvody pre viackanálové ovládanie LED

Typ	IS31FL3746B	TLC5955	TLC5958
<b>Kanály</b>	36	48	48
<b>Napájanie LED [V]</b>	max 40	max 10	max 10
<b>Max. priemerný prúd kanálom [mA]</b>	60	32	30
<b>Komunikačné rozhranie</b>	I2C,	vlastné sériové	vlastné sériové
<b>Nastavenie prúdu</b>	5 bitov globálne + 8 bitov individuálne	7 bitov globálne + 7 bitov individuálne	3 bity globálne + 9 bitov individuálne
<b>PWM</b>	8 bitov	16 bitov	16 bitov
<b>Iné</b>	Automatické adresovanie + Automobilová kvalifikácia	Automobilová kvalifikácia	48 k interná pamäť + dvojitý buffer
<b>Ochrana/diagnostika</b>	Open/short	Open/short	Open

IS31FL3746B je najvýkonnejšie zo zariadení s maximálnym prúdom na jeden kanál až 60 mA. Nevýhodou môže byť I<sup>2</sup>C rozhranie, ktoré má pomerne malú dátovú priepustnosť. Naopak veľkou výhodou je automobilová kvalifikácia. TLC5955 a TLC5958 majú menší výkon, ale majú viac kanálov a možnosť šírkovvej modulácie s rozlíšením až 16 bitov. TLC5958 má ešte internú pamäť na statické obrazy a dvojicu zásobníkov pre súčasné zobrazovanie dát z jedného a plnenie druhého z nich. Obe funkcie zlepšujú dynamiku ovládania diód. Výhodou TLC5955 je plánovaná automobilová kvalifikácia.

## 2.2 Svetlá v automobiloch

Podobne ako všetky umelé zdroje svetla, aj tie v automobiloch si prešli historickým vývojom. Petrolejové lampy nahradili elektrické oblúkové lampy, tie vystriedali žiarovky. Dominantným zdrojom svetla v nasledujúcej dekáde bude určite LED dióda. Experimentuje sa aj s LED lasermi. Okrem pôvodnej funkcie osvetľovať vozovku, svetlá plnia aj bezpečnostné funkcie. Zadné kombinované svietidlá v sebe spájajú chvostovú, brzdovú, spiatočnú, smerovú a hmlovú funkciu.

### 2.2.1 Homogenita svetla

Napriek mnohým výhodám LED diód je ich negatívnou charakteristikou bodové vyžarovanie intenzívneho svetla. Takéto vyžarovanie nie je príjemné pre ľudský zrak a tiež negatívne ovplyvňuje dizajn svetla. Týmto negatívom trpia LED zdroje naprieč všetkými aplikáciami. Vysoká uniformita (rovnomernosť osvetlenia) sa požaduje pri osvetlení miestnosti, LCD displejov a výnimkou nie je ani automobilový priemysel, kde si ju vyžaduje dizajn svetlometov. Pre rozptyl svetla v svetlometoch sa využívajú napríklad kovové reflektory, svetlovody alebo difúzory.

Vo všeobecnosti je uniformita definovaná ako pomer minimálneho osvetlenia k priemernému osvetleniu na povrchu. Jednotkou uniformity je  $U_0$ , ktorá je daná ako

$$U_0 = \frac{E_{min}}{E_{avg}}, \quad (2.1)$$

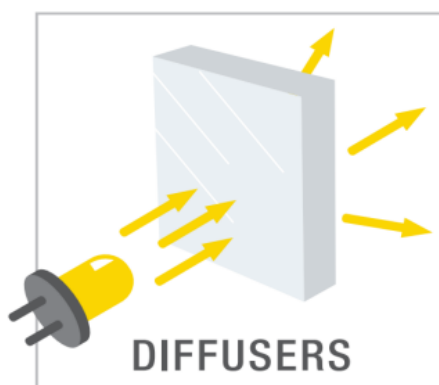
kde  $E_{min}$  je minimálna intenzita osvetlenia v jednotke lux a  $E_{avg}$  je priemerná intenzita osvetlenia v jednotke lux. Maximálna hodnota  $U_0$  je 1 [13].

Jednotlivé druhy difúzie svetla majú svoje špecifické určenie. V prípade reflektora ide o rozptýlenie svetla hlavne do okolia. Vhodné sú napríklad pri osvetľovaní miestností, kedy nejde o priamy pohľad na svetelný zdroj. Svetlovody vytvárajú pomerne úzke elementy homogénneho svetla špecifických tvarov, zvyčajne ide o trubice. V tejto práci je potrebné rozptýliť zdrojové svetlo z LED diód, na ktoré pozorovateľ priamo hľadá. Zároveň diódy budú pravdepodobne rozmiestnené na obdĺžnikovej ploche. Pre tento účel sa najviac hodia práve už spomínané difúzory.

Difúzory sú vyrobené z čiastočne priesvitných materiálov, ktoré menia priestorové rozloženie svetelného toku zdroja rozptylom prechádzajúceho svetla. Tieto difúzne kryty sa umiestňujú medzi svetelný zdroj a pozorovateľa. Neštruktúrovaný materiál spôsobuje rozptyl bodového zdroja svetla, zníženie vysokého jasú tohto zdroja, ale tiež znižujú množstvo vyžiareného svetelného toku. Difúzor považujeme za neštruktúrovanú rozptylovú plochu.

Dopadajúce svetelné lúče sa náhodne rozptyľujú odrazmi alebo prechodmi cez difúzor. Výsledné svetlo za difúzorom je zmesou priamej a disperznej zložky svetla. Práve podiel disperznej zložky svetelného toku má vplyv na uniformitu svetla. Zvýšenie uniformity svetla má tiež za následok zníženie efektivity svetelného toku, preto výber difúzora je vždy o hľadani kompromisu medzi efektivitou rozptýlenia svetelného toku a energetickou účinnosťou celého systému [14]. Princíp difúzora je graficky znázornený na Obrázok 2.1.

Na výrobu difúzorov sa využívajú čiastočne priesvitné termoplasty. Príkladom môže byť Makrolon od firmy Bayer. Vlastnosti jednotlivých difúzorov sa líšia od hustoty pigmentu a hrúbky difúzora [15].



Obrázok 2.1 Princíp difúzora [15]

Prakticky je stanovenie účinnosti difúzora jednoduchá úloha na rozdiel od matematickej analýzy. Účinnosť je daná ako pomer intenzity svetelného toku pred a za difúzorom. Hodnoty získame jednoduchým meraním.

Jednou z možností, ako čitateľovi obrazne vysvetliť mieru potrebnej homogenity svetelného zdroja pre svetlá v automobiloch, je popísať rozlišovaciu schopnosť objektu ľudským okom. V tomto popise sa obmedzíme na vnímanie detailov ľudským okom v závislosti na pozorovacej vzdialenosti. Uhlové rozlíšenie ľudského oka je približne jedna minúta (uhlová jednotka). S týmto výkonom je ľudské oko schopné rozlíšiť objekt približne s veľkosťou 1,75 mm vzdialený 6 metrov od pozorovateľa [16]. Napríklad chodec prechádzajúci okolo stojaceho auta dokáže rozoznať objekt s veľkosťou iba desiatín milimetra. Rozlišovacia schopnosť klesá s narastajúcou vzdialenosťou a tiež s pohybom vozidla [17]. Keďže veľkosť súčasných najmenších LED diód s automobilovou kvalifikáciou dosahuje približne 2mm, je vzdialenosť medzi jednotlivými diódami v matici niekoľko násobne väčšia ako rozlišovacia schopnosť oka, preto je zjavná nutnosť optickej sústavy na rozptýlenie svetla pre dosiahnutie efektu homogénneho svetla pre pozorovateľa.

# 3 ELEKTRICKÉ A EMC TESTY V AUTOMOBILOVOM PRIEMYSLE

V automobilovom priemysle sú kladené vysoké nároky na spoľahlivosť a rozsah podmienok, v ktorých musia zariadenia správne fungovať. Ešte vyššie nároky sú kladené na elektroniku, ktorá plní často aj funkciu bezpečnostného prvku. Do tejto kategórie patrí aj vonkajšie osvetlenie vozidla. Prvá podkapitola je venovaná základným elektrickým testom. Druhá časť rozoberá problematiku elektromagnetickej kompatibility. Posledná časť objasňuje už spomínaný pojem Automobilová kvalifikácia.

## 3.1 Základné elektrické testy

Pre lepšiu predstavu o nárokoch na elektrické komponenty bude v nasledujúcej podkapitole popísaných niekoľko elektronických testov požadovaných skupinou Volkswagen.

Za normálnych podmienok je napájacie napätie v automobile 13,5 V. Zariadenia musia vykazovať plnú funkčnosť pri teplote okolia v rozsahu  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Miera požadovanej funkčnosti pri testoch sa delí do dvoch najvýznamnejších kategórií:

A – plná funkčnosť

C – testované zariadenie nespĺňa jednu alebo viacero funkcií počas testu. Testované zariadenie sa musí okamžite po ukončení testu vrátiť do funkčného stavu. K návratu musí dôjsť automaticky alebo za predom definovaných podmienok. Zariadenie nesmie prejsť do nedefinovaného stavu. [18]

Existuje obrovské množstvo testov, ktorým musia elektronické zariadenia v automobiloch podliehať. Navyše každá automobilka má svoje vlastné testovacie kritéria, preto pre účely a rozsah tejto práce boli zvolené vybrané testy špecifikované pre skupinu VW [19]. Testy boli vybrané napríklad na preukázanie veľkého napätového rozsahu, v ktorom musia zariadenia pracovať. Ide o testy Dlhodobé prepätie, Prechodné napätie, Skokový štart a Výboj elektrickej záťaže. Krátkodobé zníženie napätia testuje správne fungovanie pri podpäť. Na ukážku testovania zariadenia na správanie vstupného napätia pri štarte bol vybraný test Štartovací pulz. Stabilitu a reakciu na striedavé napätie superponované na jednosmernú zložku overuje test Zvlnené napätie. Odolnosť voči krátkym vysokonapätovým indukovaným pulzom popisuje Odolnosť na pulz 1 a Odolnosť na pulz 2 [20]. Testuje sa aj odolnosť voči prepólovaniu alebo skratu.

### 3.1.1 Testovanie neštandardného napájacieho napätia

#### E-01 Dlhodobé prepätie

Zariadenie je počas minimálne jednej hodiny napájané napätím 17 V pri teplote okolia  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Požadovaný je status funkčnosti C.

#### E-02 Prechodné prepätie

Počas 400 ms bude napätie zvýšené na 18 V, následne počas 600 ms bude napätie dosahovať hodnotu 17 V. Vykoná sa 1000 opakovaní. Počas celého testu sa vyžaduje status A.

#### E-03 Krátkodobé zníženie napätia

Počas 800 ms klesne napájacie napätie na hodnotu 9 V. Očakávaný status je A.

### E-04 Skokový štart

V postupne sa predlžujúcich pulzoch sa napätie zvýši až na hodnotu 26 V počas jednej minúty. Požaduje sa status C.

### E-05 Výboj elektrickej zát'áže

V tomto teste sa simuluje vysoko energetický pulz, ktorý môže vzniknúť v alternátore. Nominálne napätie v priebehu 2 ms vzrastie na hodnotu 26 V počas 300 s. Očakávaný status je A počas celého priebehu testu.

### E-06 Zvlnené napätie

Testuje sa správanie a stabilita zariadenia, ak jednosmerné napätie obsahuje AC zložku. Striedavá zložka má frekvenciu v rozsahu 15 Hz až 200 kHz a napät'ovú úroveň 1 až 6 V. Očakávaný status je A počas celého priebehu testu.

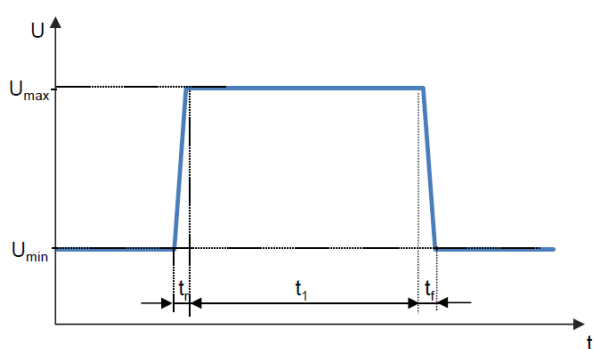
### E-08 Pomalý pokles, rýchly nárast výstupného napätia

Napätie postupne klesá s krokom 0,5 V/min až do 0 V. Krátko po dosiahnutí nulovej hodnoty, napätie skokovo (0,5 s) vzrastie na pôvodnú hodnotu. V oblasti definovaného operačného napätia sa požaduje status A. Mimo rozsahu sa vyžaduje C.

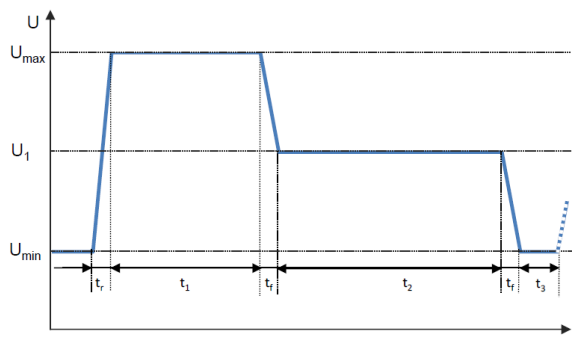
### E-11 Štartovací pulz

Test simuluje zmeny napätia v elektrickej sieti automobilu počas štartu. Pri štarte dôjde ku krátkemu zapnutiu väčšiny funkcií, ktoré sú následne zresetované prudkým poklesom napätia. Je nevyhnutné, aby všetky systémy po štarte fungovali správne v stave A.

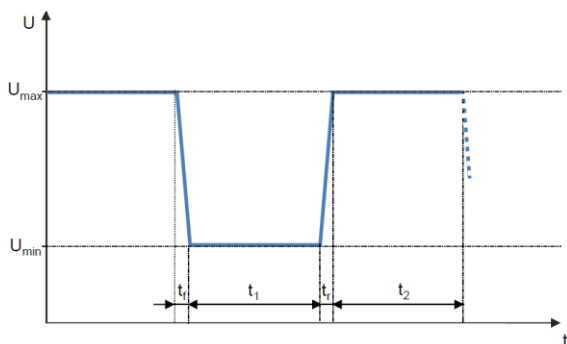
Obrázok 3.1 až Obrázok 3.8 znázorňujú priebehy všetkých uvedených pulzov.



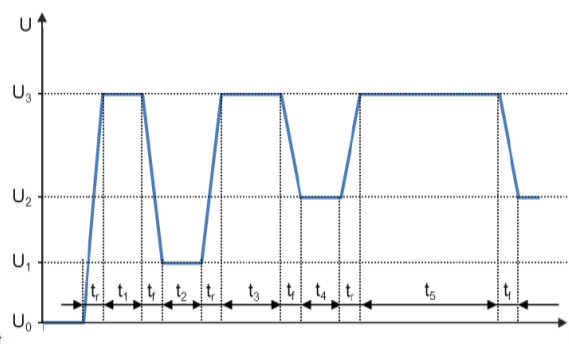
Obrázok 3.1 Priebeh pulzu E-01



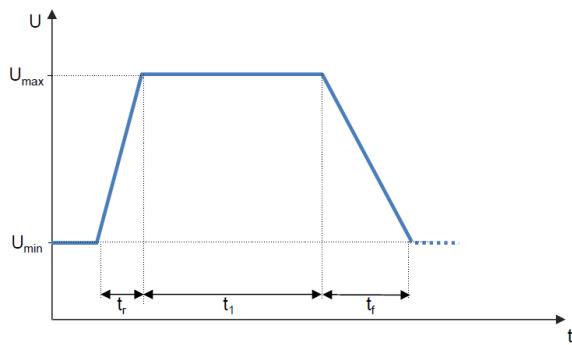
Obrázok 3.2 Priebeh pulzu E-02



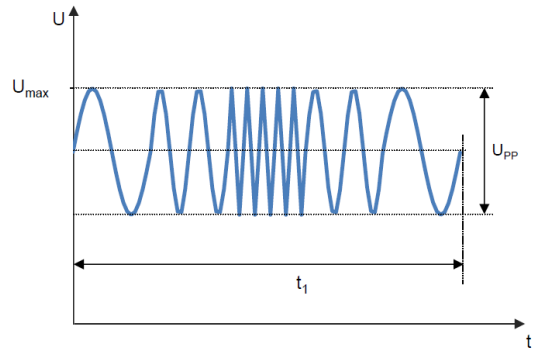
Obrázok 3.3 Priebeh pulzu E-03



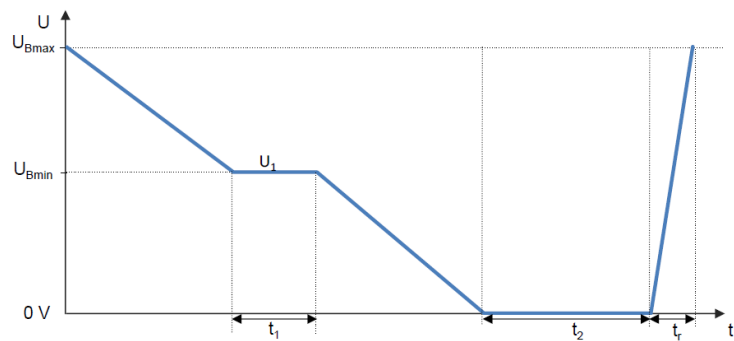
Obrázok 3.4 Priebeh pulzu E-04



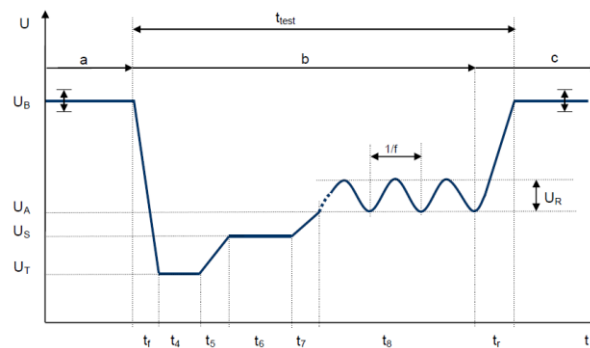
Obrázok 3.5 Priebek pulzu E-05



Obrázok 3.6 Priebek pulzu E-06



Obrázok 3.7 Priebek pulzu E-08



Obrázok 3.8 Priebek pulzu E-11

### 3.1.2 Testy indukovaných pulzov do vedenia

#### Odolnosť na pulz 1

Testuje sa imunita zariadenia na krátky záporný pulz v napájaní. Testovací pulz má šírku 2 ms a veľkosť - 100 V. Požaduje sa minimálne 5000 opakovaní pulzu s frekvenciou 0,2 Hz. V čase pred a po pôsobení pulzu je zariadenie odpojené od napájania minimálne počas 200 ms, preto sa vyžaduje iba status C.

## **Odolnosť na pulz 2**

Testuje sa imunita zariadenia na krátky kladný opakujúci sa pulz v napájaní. Testovací pulz má šírku 2 ms a veľkosť 75 V. Požaduje sa minimálne 5000 opakovaní pulzu s frekvenciou 5 Hz. Vyžaduje sa status A.

### **3.1.3 Ostatné elektrické testy**

#### **Napätie opačnej polarity**

Počas 60 sekúnd bude k zariadeniu pripojené napätie opačnej polarity s veľkosťou 14 V. Požaduje sa status C.

#### **Skrat signálov a napájania**

Na skrat sa testujú všetky vstupy a výstupy testovaného zariadenia. Zariadenie musí túto skúšku zvládnuť bez trvalej poruchy. To poukazuje na dôležitosť zohľadniť protiskratovú ochranu pri návrhu elektroniky.

Ďalšie elektrické testy sa vykonávajú pri meniacich sa vlastnostiach okolia, najmä teploty. Napríklad pri skúške na teplotný šok sa teplota okolia za 10 sekúnd zmení z - 40 °C na 85 °C.

#### **Environmentálne testy**

Okrem testov samotnej elektroniky je zariadenie už ako súčasť svetlometu podrobované environmentálnym testom. Aj v tomto prípade musia elektrické zariadenia vydržať mnohé náročné testy, ako napríklad vibračné testy, rôzne teplotné testy alebo odolnosť voči slanej vode. To kladie vysoké nároky na tepelne aj vodotesne odolný návrh elektronických zariadení.

## **3.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)**

Neoddeliteľnou súčasťou testovania elektronických výrobkov v automobilovom priemysle sú skúšky elektromagnetickej kompatibility (EMC) a odolnosti voči elektrickému výboju (ESD). Testami je potrebné preukázať, že zariadenie svojím elektromagnetickým žiarením neovplyvní iné elektrické zariadenia a tiež, že ani pôsobenie normou daného žiarenia neovplyvní funkčnosť a bezpečnosť testovaného zariadenia.

Zariadenie navrhované v tejto práci bude podrobené iba parciálnym EMC testom. Tento prístup bude zvolený kvôli prezentačnej a testovacej funkcii zariadenia, preto nejde o plnohodnotný vývoj zariadenia pre všetky potreby EMC odolnosti. Navyše na riadenie systému bude využitý vývojový modul, pri ktorom nie je možné zaručiť potrebné EMC vlastnosti.

V nasledujúcej kapitole budú popísané niektoré spôsoby a limity pre testovanie EMC. Testovanie v automobilovom priemysle podlieha štandardom popísaným v normách CISPR 25, CISPR 12, ISO 11452, ISO 10605, a ISO 7637. Testovanie môžeme rozdeliť nasledovne [21]:

#### **Elektromagnetická interferencia (rušenie) - EMI**

- testy rušivého vyžarovania (radiated emissions)
- testy rušivých signálov na vedení (conducted emissions)

#### **Elektromagnetická susceptibilita (Odolnosť, imunita) – EMS**

- testy odolnosti voči elektromagnetickým poliam (radiated immunity);
- testy odolnosti voči rušivým signálom na vedení (conducted immunity)

- testy odolnosti voči ESD (ESD immunity)

### 3.2.1 Elektromagnetická interferencia (rušenie) - EMI

Je proces, kedy zariadenie ako zdroj rušenia, elektromagnetickým vyžarovaním prenáša rušivé signály do iných systémov. EMI sa zameriava na identifikáciu príčin rušenia a minimalizáciu ich vplyvu. Odstraňujú sa príčiny rušenia [22].

Vyžarované emisie sa testujú niekoľkými metódami. Ich prehľad a merané frekvencie sa nachádzajú v tabuľke (viď Tabuľka 5). Sivé políčka označujú frekvencie, na ktorých sa zariadenie testuje danou metódou. Všetky všeobecné požiadavky, rovnako ako usporiadanie testovacieho pracoviska, zodpovedajú špecifikácii popísanej v norme CISPR 25 [23].

Tabuľka 5 Prehľad metód a frekvenčných rozsahov pre testy vyžarovania [23]

Metóda merania	1 Hz	20 Hz	9 kHz	100 kHz	150 kHz	400 kHz	30 MHz	108 MHz	1 GHz	6 GHz
Testy nevyhnutné pre schválenie zariadenia										
Meranie pomocou umelej siete (AN test)										
Meranie s anténami (RE test)										
Voliteľné metódy merania (po dohode s testovacím oddelením)										
Meranie prúdovou sondou										
Meranie paskovým vedením										
Magnetické pole, cievka 12 cm										
Magnetické pole, cievka 60 cm										
Izotropické magnetické pole, cievka 100 cm										

### 3.2.2 Testy rušivého vyžarovania (radiated emissions)

#### Meranie s anténami

Ide o meranie vysoko frekvenčných emisií vyžarovaných testovaným zariadením pomocou antén špecifikovaných v norme CISPR 25 [23]. Merania prebiehajú v bezodrazových komorách. Rozlišujú sa dva druhy meraní. Širokopásmové rušenie, to sa meria použitím QP detekcie a úzkopásmové rušenie s použitím AV detekcie [21]. Podľa CISPR 25 prebieha meranie v rozsahu 9 kHz až 6 Mhz. Každá automobilka má svoje požiadavky na meranie. Na meranie vyžarovania sa používajú rôzne antény, napríklad bikónická, rod (monopól) alebo logaritmicko-periodická anténa.

### 3.2.3 Testy rušivých signálov na vedení (conducted emissions)

#### Umelá sieť (Artificial network)

Pri tomto teste sa merajú vysoko frekvenčné emisie, ktoré vystupujú zo zariadenia napájacími vodičmi. Na meranie sa používa umelá sieť (AN), často nazývaná aj umelá záťaž vedenia LISN. Umelá sieť zaisťuje trojicu funkcií. Je to pripojenie meraného zariadenia k meraču rušenia. Ďalej zabezpečuje, že sa do meracieho zariadenia dostanú len signály od



testovaného zariadenia a nie signály z vonkajšej napájacej siete. Treťou funkciou je impedančné prispôsobenie [21].

### **Meranie prúdovou sondou**

Prúdovou sondou je možné merať rušivé prúdy, ktoré pretekajú vodičom bez jeho rozpojenia. Pracuje na princípe transformátora. Pri teste sa merajú vysoko frekvenčné prúdy na všetkých vodičoch okrem napájacích.

## **3.2.4 Elektromagnetická susceptibilita (Odolnosť, imunita) – EMS**

EMS posudzuje imunitu zariadenia, teda schopnosť zariadenia pracovať bezchybne alebo za presne definovaných podmienok pod vplyvom elektromagnetického rušenia. Cieľom je zvýšenie odolnosti proti rušeniu za použitia dostupných technických opatrení. Odstraňujú sa dôsledky rušenia.

Rozlišujeme tri základné druhy testov:

- BCI
- Anténna metóda
- Vplyv magnetického poľa

## **3.2.5 Testy odolnosti voči elektromagnetickým poliam (radiated immunity)**

### **Anténna metóda**

Princípom testu je ožarovanie objektu definovanou úrovňou vysokofrekvenčného vyžarovania pomocou vhodných antén. Podľa normy ISO 11452 sa zariadenia testujú vo frekvenčnom rozsahu 20 Mhz až 2 GHz. Automobilky však používajú ešte väčšie rozsahy, napríklad skupina VW má rozsah od 0,1 MHz do 3 000 MHz. Testovacia úroveň daná normou je 30 V/m [24].

Meranie prebieha v tienených komorách, TEM komorách alebo v páskovom vedení. Simuluje sa napríklad pôsobenie mobilných alebo televíznych signálov.

### **Vplyv magnetického poľa**

Testuje sa vplyv silných magnetických polí na samotné zariadenie. Takéto magnetické polia sa nachádzajú napríklad pri rozvodoch vysokého napätia, alebo môžu vznikáť aj v dôsledku prúdových impulzov.

## **3.2.6 Testy odolnosti voči rušivým signálom na vedení (conducted immunity)**

### **BCI (Bulk current injection)**

Pri tomto teste sa pomocou cievky indukujú do napájacieho vedenia prúdové rázy. Sleduje sa stálosť požadovaného výstupu.

Tabuľka 6 Zhrnutie hodnôt podľa ISO 11452 [21]

Metóda	Frekvenčný rozsah [MHz]	Veľkosť poľa/prúdu pre 90% rozsah	Minimálna veľkosť poľa/prúdu
Absorpčná hala (voľný priestor)	20 - 2000	30 V/m	25 V/m
Komora TEM	0,01 - 200	75 V/m	62,5 V/m
Páskové vedenie 800 mm	0,01 - 200	15 V/m	12,5 V/m
Páskové vedenie 150 mm	0,01 - 200	60 V/m	50 V/m
BCI	1 - 400	60 mA	50 mA

### 3.2.7 Testy odolnosti voči ESD (ESD immunity)

#### ESD (odolnosť voči elektrostatickým výbojom)

Odolnosť voči ESD zaručuje správnu funkčnosť zariadenia pri montáži, servise alebo obsluhu zariadenia vo vozidle po zásahu elektrostatickým výbojom. Takýto zásah nesmie nijako ovplyvniť správnu funkčnosť.

Napríklad v prípade skupiny VW je testovanie definované nasledovne. Samotné testovanie sa delí do dvoch základných kategórií:

- Testovanie zostavy (kryt a piny)
- Testovanie na systémovej úrovni

Testovanie na systémovej úrovni sa ďalej delí na výboj indukčnou väzbou (nepriamy výboj) a výboj na jednotlivé časti testovaného zariadenia (priamy výboj). Priamy výboj môže byť vedený vzduchom, v takom prípade dosahuje testovací výboj úroveň až  $\pm 15\text{kV}$ , alebo priamym kontaktom. Tento výboj sa testuje do hodnoty  $\pm 8\text{kV}$  [18].

### 3.3 Automobilová kvalifikácia AEC

Automobilová kvalifikácia s označením AEC (Automotive Electronics Council) je kvalifikácia založená na záťažovom teste pre elektronické súčiastky v automobilových aplikáciách. Táto špecifikácia bola vytvorená Radou pre automobilovú elektroniku (AEC), ktorá definovala kvalifikačné požiadavky a postupy pre elektronické súčiastky používané v automobilovom priemysle. Zariadenie kvalifikované podľa AEC deklaruje, že prešlo špecifikovanými záťažovými testami a zaručuje určitú úroveň kvality / spoľahlivosti. Komponenty spĺňajúce túto špecifikáciu môžu byť použité v náročnom automobilovom prostredí bez potreby ďalšieho testovania [25].

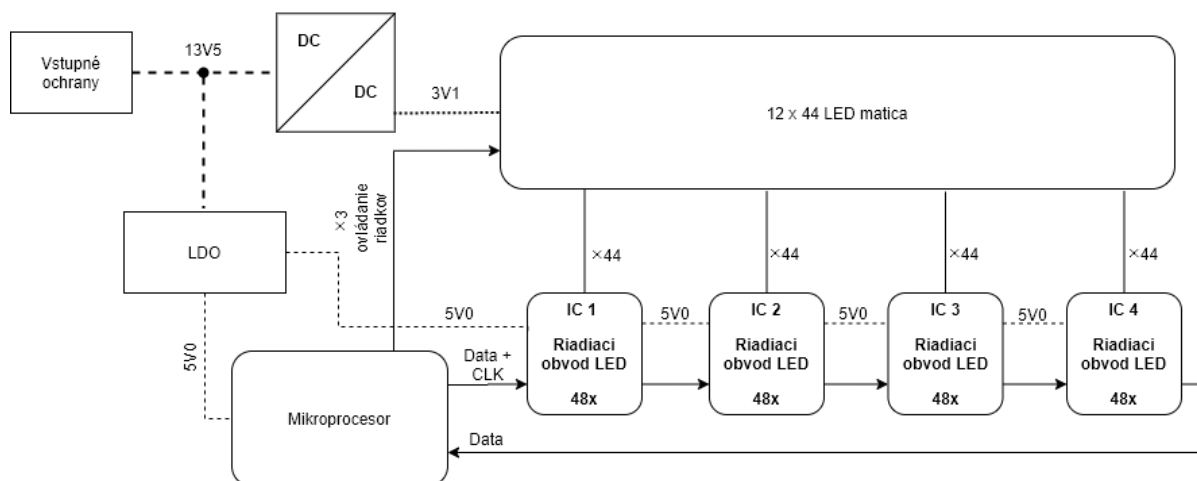
## 4 NÁVRH ZARIADENIA

Nasledujúca kapitola sa venuje definovaniu koncepcie zariadenia, výberu kľúčových komponentov, návrhu a výpočtu hardvéru.

### 4.1 Koncepcia zariadenia

Výsledné zariadenie má slúžiť ako prototyp, ktorý demonštruje funkciu displeja v zadnom svetlomete automobilu.

Displej bude tvoriť 528 LED zapojených do matice s rozložením 12 riadkov krát 44 stĺpcov. Displej bude napájaný spínaným zdrojom s konštantným napätím. Zdroj bude potrebné kompletne navrhnuť pre danú aplikáciu s cieľom regulovať napájacie napätie batérie na napätie LED diód. Ovládanie LED matice bude rozdelené do dvoch úrovní. Na prvej úrovni bude štvorica viackanálových riadiacich obvodov ovládať stĺpce matice. Riadky matice budú ovládané tranzistormi. Na druhej úrovni bude mikroprocesor, ktorý bude priamo ovládať tranzistory a zároveň bude ovládať riadiace viackanálové obvody prostredníctvom sériovej komunikácie. Mikroprocesor a riadiace obvody budú napájané z lineárneho regulátora LDO pripojeného na batériu. Pred napájaciu vetvu oboch napájacích zdrojov budú zapojené vstupné ochrany. Ochranný obvod bude chrániť zariadenie pred neželanými napät'ovými špičkami alebo prípadnou zámenou polaritu. Na Obrázok 4.1 sa nachádza bloková schéma navrhovaného zariadenia.



Obrázok 4.1 Bloková schéma zariadenia

### 4.2 LED matica – Displej

Hlavnou požiadavkou pri návrhu displeja je dosiahnuť čo najväčšiu homogenitu osvetlenia, preto bude potrebné rozmiestniť diódy malých rozmerov s minimálnym rozstupom. Rozstup diód by mal byť približne 4 mm medzi osami jednotlivých diód. Hodnota bola zvolená na

základe predošlých skúsenosti pracovníkov Hella, a aby medzi diódami bol dostatočný priestor pre vedenie napájacích ciest. LED diódy červenej farby budú v maticovom zapojení.

Medzi najmenšie diódy s automobilovou kvalifikáciou patria diódy s názvom Mini TOPLED od spoločnosti Osram a LED s obchodným názvom Mini DomiLED od spoločnosti Dominant. Diódy majú takmer identické rozmery aj niektoré vlastnosti. Rozmery diódy sú  $2,0 \times 1,4 \times 1,3$  mm, farba LED je super červená s vlnovou dĺžkou 632 nm, vyžarovací uhol je  $120^\circ$  a maximálna prevádzková teplota je  $100^\circ\text{C}$ . Dióda Mini DomiLED dosahuje svetelnú intenzitu v rozmedzí 450 až 900 mcd, napätie v priepustnom smere sa podľa zvoleného binu pohybuje v rozmedzí 1,8 až 2,4 V. Slovom bin (Bin Code) sa definuje vytriedená skupina LED diód, ktoré majú len zanedbateľné rozdiely vo vlastnostiach. LED diódy v jednotlivých skupinách (bin-och) sa od seba líšia v svietivosti, farebnej teplote a napätí v priepustnom smere. Tepelný odpor prechod-okolie má hodnotu 440 K/W. Mini TOPLED má svetelnú intenzitu v rozsahu od 355 do 900 mcd, napätie v priepustnom smere je v rozsahu 1,9 až 2,5 V. Tepelný odpor prechod-okolie má hodnotu 580 K/W. Degradácia svetelnej intenzity v závislosti na zvyšujúcej sa teplote má v prípade oboch diód totožnú charakteristiku. Vybraná bola DomiLED dióda, oproti dióde od spoločnosti Osram má lepšie tepelné vlastnosti, tie budú pri dizajne s veľkou hustotou osadenia diód dôležité pre chladenie. Ďalším faktorom je aj nižšia cena tohto produktu [26], [27].

Celá matica pozostáva z 528 LED rozostavených do dvanástich riadkov a 44-och stĺpcov. Zapojenie celej matice LED sa nachádza v prílohe A.3 Schéma zapojenia LED matice a riadiacich obvodov. Priemerný prúd jednou diódou bol zvolený na 10 mA. Tento prúd predstavuje kompromis medzi intenzitou osvetlenia približne 280 mcd a obmedzeným stratovým výkonom 0,024 W, aby nedochádzalo k nadmernému prehrievaniu matice LED. Diódy majú obdĺžnikový tvar, pre zlepšenie homogenity bude zvolený rozostup 4 mm medzi stredmi dlhších strán a 3,5 mm medzi stredmi kratších strán.

### 4.3 Riadenie LED matice

Pre navrhované zariadenie je požadovaná automobilová kvalifikácia obvodu. Rozlíšenie PWM pre plynulé stmievanie je minimálne 10 bitov v lineárnej miere. Aby bol minimalizovaný efekt blikania, požaduje sa obnovovacia frekvencia 200 Hz [28]. V prípade multiplexovania táto požiadavka ešte násobne rastie v závislosti od počtu zapojených riadkov v matici, preto je vhodné zvoliť minimálny počet spínaných riadkov. Primárne riadenie matice bude rozdelené medzi riadiace obvody (stĺpce matice) a tranzistory (riadky matice). Je potrebné vybrať vhodný riadiaci obvod pre ovládanie stĺpcov.

Pre výber spínacích tranzistorov je potrebné najprv vypočítať ich priemerné prúdové zaťaženie<sup>1</sup>. To určíme ako celkový prúd pre diódy rozdelený do troch riadiacich vetiev

$$I_T = \frac{n \cdot I_{LED}}{3} = \frac{528 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{3} = 1,76 \text{ A}, \quad (4.1)$$

kde  $n$  je počet všetkých diód v matici a  $I_{LED}$  je prúd jednotlivou LED v Ampéroch.

---

<sup>1</sup> Chybná úvaha pri návrhu, kedy sa počíta s priemernou a nie maximálnou hodnotou prúdu (chyba je diskutovaná v časti 5.2 Základné vlastnosti meniča na strane 57)

Bol zvolený PMOS tranzistor SQA401EJ s maximálnym trvalým prúdom 3,5 A. Maximálna hodnota krátkodobého prúdu je až 12 A. tranzistor má napriek malým rozmerom (2 mm x 2 mm) špeciálne výkonové puzdro, ktoré má pri teplote okolia 25 °C stratový výkon až 13,5 W. Zapojenie tranzistora je doplnené o nulový rezistor sériovo ku Gate tranzistoru a o paralelnú kapacitu (neosadenú) medzi Gate-Source tranzistoru. V prípade potreby budú slúžiť na spomalenie hrán ovládacích signálov pre zlepšenie EMC vlastností.

Pri výbere riadiaceho obvodu pre ovládanie stĺpcov matice je hlavné zohľadniť minimálny priemerný prúd 10 mA pre každú LED, rozlíšenie PWM a komunikačnú rýchlosť. Výhodou je, ak zariadenie ovláda čo najväčší počet LED, aby bolo možné použiť minimálny počet čipov a znížiť cenu celkového riešenia v prípade sériovej výroby. Požaduje sa obnovovacia frekvencia LED približne 200 Hz, v prípade multiplexovania trojice skupín, ktoré tvorí štvorica riadkov, sa tento nárok trojnásobne zvýši na 600 Hz. Ďalšie riadky matice sa vytvoria správnym rozložením skupiny riadkov pod seba. Veľká obnovovacia frekvencia v kombinácii s veľkosťou rozlíšenia PWM vytvára značné nároky na rýchlosť prenášaných dát. V tomto prípade ide o jednotky megabajtov za sekundu. Zo všetkých zariadení uvedených v kapitole 2.1 Porovnanie riadiacich obvodov pre maticové ovládanie LED, zariadenie TLC 5955 ako jediné spĺňa všetky požiadavky. Zariadenie má až 48 kanálov, tie tvorí 48 prúdových zdrojov riadiacich veľkosť prúdu v jednotlivých stĺpcoch matice. Maximálny prúd jedným zdrojom je 32 mA. Na zobrazovanie sa používa multiplexovanie v čase. V skutočnosti bude jedna dióda svietiť jednu tretinu času. Preto priemerný prúd dosiahne tretinu maximálneho prúdu, čo je približne požadovaných 10 mA. Výrobca už pracuje na automobilovej kvalifikácii tohto integrovaného obvodu. Vďaka sériovej komunikácii s hodinovým signálom až 22 Mhz splní s rezervou aj nároky na rýchlosť prenosu. PWM rozlíšenie je až 16 bitov.

### 4.3.1 Mikroprocesor

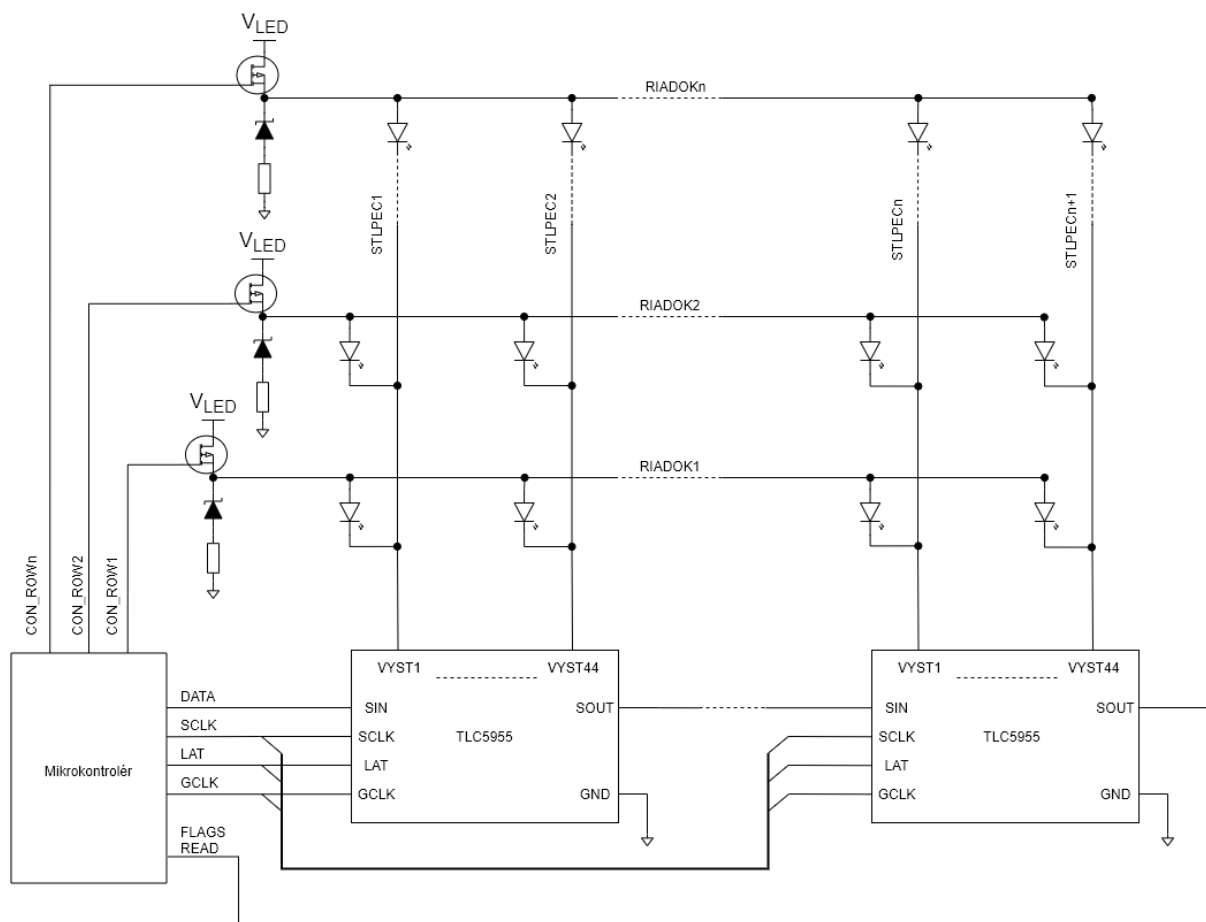
Výber procesora podlieha hlavne nárokom na vysokú komunikačnú rýchlosť a veľkú vnútornú pamäť. Požiadavka na veľkú pamäť vychádza z princípu riadenia pomocou vybraného riadiaceho obvodu TLC 5955, kedy svietivosť každej LED je daná 16 bitovou hodnotou PWM. Matica statického obrazu s uloženými hodnotami pre 528 LED bude dosahovať veľkosť približne 9 kilobitov. Aby mohli byť uložené sekvencie matíc pre viaceré animácie, pamäť mikroprocesora musí mať veľkosť minimálne v jednotkách megabitov. V snahe úspory vnútornej pamäte môžu byť napríklad niektoré animácie dynamicky generované. Nevyhnutnosťou bude aj dostatočný výkon, aby generovanie splnilo náročné časové limity dané multiplexovaním, bude potrebný aj dostatočný výkon. Práve multiplexovanie vytvára nárok aj na rýchlu komunikáciu. Pri požadovanej obnovovacej frekvencii je potrebné za menej ako 2 milisekundy preposlať dáta s veľkosťou približne 3 kilobitov. Obvod TLC tiež vyžaduje hodinový signál s rýchlosťou až 28 Mhz pre riadenie PWM. Vybraný procesor musí pracovať s dostatočne vysokou frekvenciou, aby splnil tieto nároky.

V prvom kroku sa zvažovala možnosť použiť mikroprocesor (AVR alebo ARM) alebo výkonný modul ako je napríklad Raspberry Pi. Ovládanie výstupov Raspberry Pi, ktoré má operačný systém Linux, je v reálnom čase veľmi komplexná programátorská úloha, preto sa výber vymedzil na samostatné mikroprocesory ARM s veľkou pamäťou. V druhom kroku sa výber zúžil na dvojicu zariadení ARDUINO NANO 33 BLE a S32K148 od spoločnosti NXP. Obe tieto zariadenia sú moduly s procesorom z rodiny ARM Cortex-M4. Arduino je open-source riešenie bez profesionálnej podpory [29]. Naopak riešenie od spoločnosti NXP je profesionálny vývojový modul s podporou pre ladenie programu (debugging) [30]. Dostupnosť

ladiacich nástrojov a hlavne možnosť profesionálnej podpory zo strany pracovníkov firmy Hella boli kľúčovými faktormi pre výber zariadenia S32K148.

Mikroprocesor okrem riadenia matice LED vyhodnocuje stlačenie tlačidiel, sleduje výstupné napätie spínaného zdroja, aby v prípade nesprávneho napätia mohol odpojiť maticu LED a ochrániť diódy pred zničením. Tiež sleduje teplotu matice LED prostredníctvom NTC senzoru. Tlačidla sú k vstupu procesora pripojené prostredníctvom pull down rezistorov. Schéma zapojenia mikroprocesora s nachádza v prílohe A.4 Schéma zapojenia mikroprocesora.

Riadky matice sú rozdelené do trojíc, ktoré sú sériovo zapojené za sebou. Vďaka tomu je možné ovládať 12 riadkov použitím troch tranzistorov. Stĺpce matice sú rozdelené do skupín po 11-tich, kedy každú z týchto skupín riadi samotný riadiaci obvod TLC5955. Princíp zapojenia riadiacich obvodov je znázornený na Obrázok 4.2. Mikroprocesor komunikuje s riadiacimi obvodmi pomocou štyroch výstupných signálov DATA, SCLK, LAT, GCLK a jedného vstupného FLAGS READ. Signálom DATA sa odosielajú dáta pre každý výstup. SCLK je hodinový signál pre zápis jednotlivých bitov signálu DATA. Signálom LAT a GCLK prichádzajú do procesora dáta o chybných LED v matici [3].



Obrázok 4.2 Princíp ovládania matice LED

## 4.4 Napájanie riadiacich obvodov

Mikroprocesor aj riadiace obvody LED pracujú s napätím 5 V. O napájanie sa bude starať lineárny regulátor LDO pripojený za ochrannými obvodmi. Požiadavka na maximálny prúd do záťaže je 200 mA. Je požadované maximálne 5 % zvlnenie výstupného napätia. Požadované je maximálne vstupné napätie väčšie ako 40 V.

Na základe interných cenových doporučení spoločnosti Hella boli vybrané zariadenia od spoločnosti Infineon. Požiadavka maximálneho zvlnenia je daná riadiacimi obvodmi, pretože procesor má ešte vlastný lineárny regulátor. Samozrejmosťou je nutnosť automobilovej kvalifikácie týchto zdrojov. Z dvojice vybraných zariadení TLE4271-2 a TLE 4275 má menič TLE4275 výkon 450 mA. Oba zdroje dodávajú napätie so zvlnením menším ako 2 %. Vstupné napätie je v rozsahu od 6-42 V. Výhodou zariadenia TLE4271-2 je funkcia watchdog a vyšší výstupný prúd 550 mA. Pretože funkcia watchdog nie je vyžadovaná a prúdové dimenzovanie jednoduchšieho zdroja je dostatočné, bolo vybrané lacnejšie zariadenie TLE4275 [31].

Výsledné zapojenie sa nachádza v prílohe A.2 Schéma zapojenia lineárneho zdroja. Lineárny zdroj je doplnený vstupným a výstupným blokovacím kondenzátorom na základe odporúčenia v katalógovom liste.

## 4.5 DC-DC menič pre napájanie LED

Podkapitola definuje základné vlastnosti spínaného zdroja. Obsahuje výpočty externých komponentov a objasňuje princíp fungovania niektorých zapojení.

Základné požiadavky pre návrh spínaného zdroja:

- Vstupné napätie: 8,7 – 17 V
- Nominálne vstupné napätie: 13,5 V
- Výstupné napätie: 3,1 V
- Spínacia frekvencia: 430 kHz
- Maximálny prúd záťaže: 6 A
- Maximálne zvlnenie napätia na vstupe: 200 mV
- Maximálne zvlnenie napätia na výstupe 50 mV

Rozsah vstupného aj nominálneho napätia je daný normou skupiny VW [18]. Výstupné napätie je dané ako

$$V_{OUT} = V_{f\_LED} + V_{Drop} + 0,2 = 2,4 + 0,5 + 0,2 = 3,1 V, \quad (4.2)$$

kde  $V_{f\_LED}$  je napätie vo V pre najhorší bin zvolenej LED,  $V_{Drop}$  odpovedá maximálnej strate napätia vo V na riadiacich obvodoch a rezerva 0,2 V pre straty na spínacích prvkoch. Prúd záťažou je daný ako

$$I = n \cdot I_{LED} = 528 \cdot 10 \cdot 10^{-3} + 0,7 = 6 A, \quad (4.3)$$

kde  $n$  je násobok počtu LED diód v matici a  $I_{LED}$  odpovedá nominálnemu prúdu každou LED v A, plus 10 % rezerva (0,7 A) aby menič pracoval v oblasti s vyššou energetickou efektivitou ako pri použití maximálneho prúdu.

S ohľadom na súčasné trendy vo vývoji elektroniky pre svetlomety bola zvolená verzia s integrovanými MOSFET tranzistormi. Výhodou by malo byť menšie rušenie a rýchlejší návrh meniča. Úskalím tohto riešenia bude zrejme tepelná odolnosť v teplotách okolia požadovaných automobilovým priemyslom (85 °C). Pri výbere konkrétneho obvodu zavážilo hlavne výkonové dimenzovanie. Predpokladaný prúdový odber pri zopnutí všetkých LED bude predstavovať približne 5,3 A. Je vhodné ponechať si výkonovú rezervu a taktiež neprevádzkovať menič v oblasti maximálneho výkonu, kde klesá jeho energetická účinnosť. Na základe toho bol zvolený menič MPQ4317 s maximálnym prúdovým zaťažením 7 A. Oproti ostatným meničom v zozname má nižší tepelný odpor prechodu. Práve to by malo byť čiastočne kompenzované vyššou efektivitou. Menič ešte nie je dostupný na trhu, ale výrobca ochotne poskytol vzorku pre tento projekt.

#### 4.5.1 Vstup meniča

Na strane vstupu do spínaného zdroja je potrebné vypočítať hodnoty vstupných kondenzátorov tak, aby boli splnené podmienky pre maximálne povolené zvlnenie napätia.

Úlohou vstupného kondenzátora je najmä vyhladiť zvlnenie vstupného napätia a zabezpečiť dostatočnú kapacitu na kompenzovanie prechodovej odozvy tak, aby zákmit napätia neprekročil požadovanú hodnotu. Na potlačenie zvlnenia vstupného napätia a odfiltrovanie špičiek z napájania sú vhodné keramické kondenzátory, pretože majú nízku hodnotu sériového odporu (ESR), avšak ich efektívna kapacita je pomerne malá a nemusí postačovať na kompenzovanie prechodových odoziev. Pojem efektívna kapacita vyjadruje reálnu kapacitu kondenzátora za daných podmienok. Značný vplyv na efektívnu hodnotu kondenzátora má úroveň napätia na kondenzátore. Hodnota kondenzátora v katalógovom liste je nameraná pre istú nominálnu hodnotu napätia, avšak reálna kapacita klesá s klesajúcim napätím [32]. V tom prípade je cenovo efektívnejšie zvoliť hliníkový elektrolytický kondenzátor s dostatočnou kapacitou, zároveň je potrebné voliť aj túto kapacitu s nízkou hodnotou ESR, aby sériový odpor neobmedzil tok prúdu pri prechodovej zmene.

Minimálna hodnota kapacity keramického kondenzátora je daná rovnicou [32]

$$C_{IN} \geq \frac{D \cdot (1-D) \cdot I}{V_{INPP} \cdot f_{SW}} = \frac{0,23 \cdot (1-0,23) \cdot 6}{200 \cdot 10^{-3} \cdot 430 \cdot 10^3} = 12 \mu F, \quad (4.4)$$

kde  $D$  je pracovný cyklus meniča daný pomerom výstupného a vstupného napätia,  $I$  je maximálny prúd záťaže v A,  $V_{INPP}$  je prípustné zvlnenie vstupného napätia vo V a  $f_{SW}$  je frekvencia meniča v Hz.

Zvolené prípustné napätie špička-špička je približne 1,5 % z nominálneho napätia 13,5 V. Keďže efektívna kapacita kondenzátora klesá so zvyšujúcim sa jednosmerným napätím, je potrebné počítať so značnou rezervou aspoň 30 %. Vybrané boli dva kondenzátory s kapacitou 10  $\mu F$  v paralelnom zapojení.

Počas skokovej zmeny prúdu na výstupe dochádza k dvom napäťovým poklesom na vstupnom napätí. Prvý pokles je spôsobený parazitným sériovým odporom (ESR) a druhý



pokles je daný rozdielnym prúdom na vstupe a výstupe meniča. Maximálna hodnota ESR sa určí zo vzťahu [32]

$$ESR_B = \frac{V_{IN\_Tran}}{I_{Step} \cdot D} = \frac{0,2}{2 \cdot 0,23} = 0,43 \, \Omega, \quad (4.5)$$

kde  $V_{IN\_Tran}$  je maximálna požadovaná hodnota zákmitu na vstupnom napätí vo V,  $I_{Step}$  je maximálna skoková zmena prúdu na záťaži v A, daná ako maximálny prúd na zapnutie všetkých LED v jednom riadku (3 riadky, tretina maximálneho prúdu) a  $D$  je dĺžka pracovného cyklu [32].

Druhý zákmit je daný odozvou meniča na skokovú zmenu. Doba nárastu výstupného prúdu meniča môže byť odhadnutá z nasledujúcej rovnice:

$$T_{R\_PS} \cong \frac{1}{f_{BW_{PS}} \cdot 4} = \frac{1}{4,3 \cdot 10^3 \cdot 4} = 58 \, \mu s, \quad (4.6)$$

kde  $f_{BW_{PS}}$  je šírka riadiaceho pásma v Hz [32]. Šírkou riadiaceho pásma je daná frekvenčná šírka v ktorej menič dokáže zareagovať na rýchlu zmenu na výstupnej záťaži.

Kapacita hliníkového elektrolytického kondenzátora musí byť väčšia ako hodnota vypočítaná v rovnici .

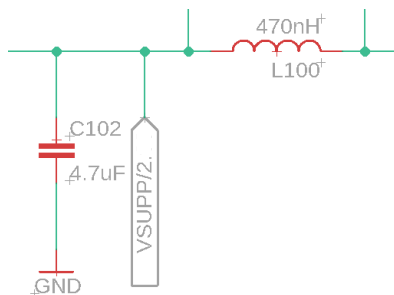
$$C_{INB} \geq \frac{\frac{1}{2} I_{Step} \cdot D \cdot T_{R\_PS}}{V_{IN\_Tran}} - C_{CE\_Total} \geq \frac{\frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 0,23 \cdot 58 \cdot 10^{-6}}{0,2} - 20 \cdot 10^{-6} \geq 46,7 \, \mu F, \quad (4.7)$$

kde  $I_{Step}$  je skoková zmena prúdu záťažou v A,  $D$  je dĺžka pracovného cyklu,  $T_{R\_PS}$  je približná doba nárastu prúdu záťažou v sekundách,  $V_{IN\_Tran}$  je maximálna prípustná hodnota zákmitu napätia vo V a  $C_{CE\_Total}$  je celková hodnota použitých keramických kondenzátorov vo Faradoch [32].

S ohľadom na toleranciu a dimenzovanie bola vybraná kapacita s hodnotou  $68 \, \mu F$ . Paralelne bude zapojený ešte jeden kondenzátor s hodnotou  $1 \, \mu F$  na základe odporúčenia výrobcu. Všetky kondenzátory na vstupe meniča sú pripojené k napätiu batérie, je dobrou praxou voliť tieto kondenzátory s vlastnosťou soft-elektrode [28]. Soft-elektrode kondenzátor je navrhnutý tak, aby v prípade jeho poruchy nedošlo k skratu, ale k rozpojeniu. Zvyšuje sa tým bezpečnosť obvodu. Všetky kondenzátory na vstupe sú dimenzované na napätie 50 V.

## 4.5.2 Filter

Na vstupe sa nachádza LC filter. Jeho úlohou je potlačiť rušenie do vedenia na spínacej frekvencii meniča smerom do vedenia. Pre dostatočné potlačenie spínacej frekvencie bola medzná frekvencia zvolená na 100 kHz. Zapojenie a hodnoty súčiastok znázorňuje Obrázok 4.3 Vstupný filter spínaného zdroja.



Obrázok 4.3 Vstupný filter spínaného zdroja

So snahou minimalizovať vplyv elektromagnetického rušenia vyžarovaním budú navyše všetky spínané elektrické súčiastky tienené kovovou krabičkou.

Samotné rozvrhnutie spojov a súčiastok na PCB (layout) bude tiež navrhované so snahou minimalizovať rušenie. Napriek predvídávemu prístupu nie je možné predpokladať a eliminovať všetky rušenia v obvode.

V praxi existujú dva základné prístupy. Jednou z možností je podpora simulačného programu pre EMC. Príkladom programu je CST určený pre automobilový priemysel. Ďalším praktickým prístupom je navrhnuť prvý prototyp a ten následne experimentálne merať a ladiť EMC vlastnosti. Simulačný program má drahú licenciu a vyžaduje značné užívateľské skúsenosti, preto bola zvolená metóda ladením. Do schémy boli pridané redundantné komponenty, ktoré nebudú na prvom prototypu osadené. Osadzovacie plochy týchto komponentov môžu byť použité pre dodatočné osadenie súčiastok za účelom ladenia, napríklad pre pridanie blokovacích kondenzátorov, zmenu cievky vo vstupnom filtre, zmenu celkovej kapacity na vstupe alebo výstupe meniča.

### 4.5.3 Výstup meniča

Na strane výstupu meniča bude vypočítaná indukčnosť s ohľadom na požadované zvlnenie prúdu cievkou a potrebný výkon. Ďalej bude vypočítaná kapacita potrebná na kompenzáciu skokových zmien na záťaži a tiež odporový delič pre nastavenie výstupného napätia.

Hodnota indukčnosti sa určí prostredníctvom nasledujúcej rovnice z technickej dokumentácie výrobcu [7]

$$L = \frac{V_{OUT}}{f_{SW} \cdot \Delta I_L} \cdot \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}\right) = \frac{3,1}{430 \cdot 10^3 \cdot 0,96} \cdot \left(1 - \frac{3,1}{17}\right) = 6,14 \mu H, \quad (4.8)$$

kde  $V_{OUT}$  je výstupné napätie vo V,  $f_{SW}$  je spínacia frekvencia meniča v Hz,  $\Delta I_L$  je predpokladané zvlnenie prúdu cievkou (16 % percent z maximálneho prúdu záťažou 6 A) v ampéroch a  $V_{IN}$  je v tomto prípade maximálne vstupné napätie vo voltoch.

S ohľadom na doporučené dimenzovanie cievky s rezervou 30 % bola zvolená cievka s hodnotou indukčnosti  $8,2 \mu H$ . Zvolené bolo veľké puzdro s rozmermi 12 x 12 mm pre lepší odvod stratového tepla. Vybraná cievka je tienená kompozitná cievka. Cievka je skonštruovaná tak, aby magnetický tok neopustil jadro a neovplyvňoval komponenty v blízkosti. Kompozitná cievka je obklopená práškovým kovom, ktorý vytvára husté magnetické jadro okolo cievky.

Cievka má dobré vlastnosti pre nízke frekvencie a pre jej vysoký saturačný prúd je vhodná na aplikácie s nízkym napätím a veľkými prúdmi [33].

Zapojenie kondenzátorov na výstupe bude rovnako ako na vstupe pozostávať z kombinácie keramického a elektrolytického kondenzátora. Ich úloha je minimalizovať zvlnenie napätia v ustálenom stave a kompenzovať prípad skokovej zmeny prúdu záťažou, ktorá je rýchlejšia ako reakcia kontrolnej slučky meniča. Výhodou kombinácie je aj zníženie celkového ESR.

Hodnota elektrolytického kondenzátora sa určí na základe rovnice:

$$C_{OUT} = \frac{2 \cdot \Delta I_{Step}}{f_{SW} \cdot \Delta V_{OUT\_PP}} = \frac{2 \cdot 2}{430 \cdot 10^3 \cdot 50 \cdot 10^{-3}} = 186 \mu F, \quad (4.9)$$

kde  $\Delta I_{Step}$  je skoková zmena prúdu záťažou v A,  $f_{SW}$  je spínacia frekvencia v Hz a  $\Delta V_{OUT\_PP}$  je prípustné zvlnenie napätia na výstupe vo V .

S ohľadom na toleranciu a rezervu bol zvolený elektrolytický kondenzátor s kapacitou 220  $\mu F$ . Snahou bolo zvoliť kondenzátor s minimálnou hodnotou ESR, ktorá je v tomto prípade 0,08  $\Omega$ . Kvôli celkovému zníženiu ESR a pohlcovaniu rýchlych zmien bol zvolený druhý keramický kondenzátor s hodnotou 10  $\mu F$  [34].

Výstupné napätie spínaného zdroja bolo určené na hodnotu 3,1 V. Z dokumentácie výrobcu bola pre výpočet deliča spätnej väzby pre nastavenie prúdu využitá rovnica [7]

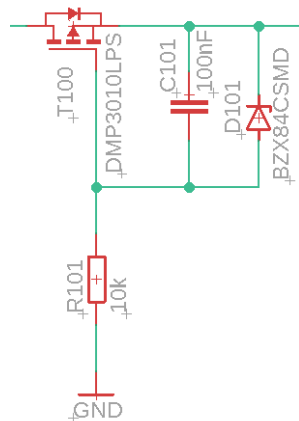
$$R_{FB2} \cong \frac{R_{FB1}}{\frac{V_{OUT}}{0,8V} - 1} \cong \frac{30100}{\frac{3,1}{0,8} - 1} \cong 10\,470 \Omega, \quad (4.10)$$

kde  $R_{FB1}$  je hodnota prvého odporu v deliči v  $\Omega$  a  $V_{OUT}$  je výstupné napätie vo V. Zvolený bol odpor s hodnotou 10 200  $\Omega$ .

Schéma zapojenia celého meniča sa nachádza v prílohe A.1 Schéma zapojenia DC-DC spínaného zdroja.

## 4.6 Vstupné ochrany

Vstupná ochrana pozostáva z kaskády troch ochranných prvkov v rade. Prvým z nich je transil na vstupe. Jeho úlohou je orezať prepätia alebo podpätia väčšie ako je 28 V. Táto hodnota bola zvolená s ohľadom na elektrický test s názvom **Výboj elektrickej záťaže** popísaný v kapitole 3.1 Základné elektrické testy, kedy musí zariadenie pracovať so vstupným napätím 26 V. Druhá v poradí je ochrana pred zámenou polarity (viď Obrázok 4.4) .

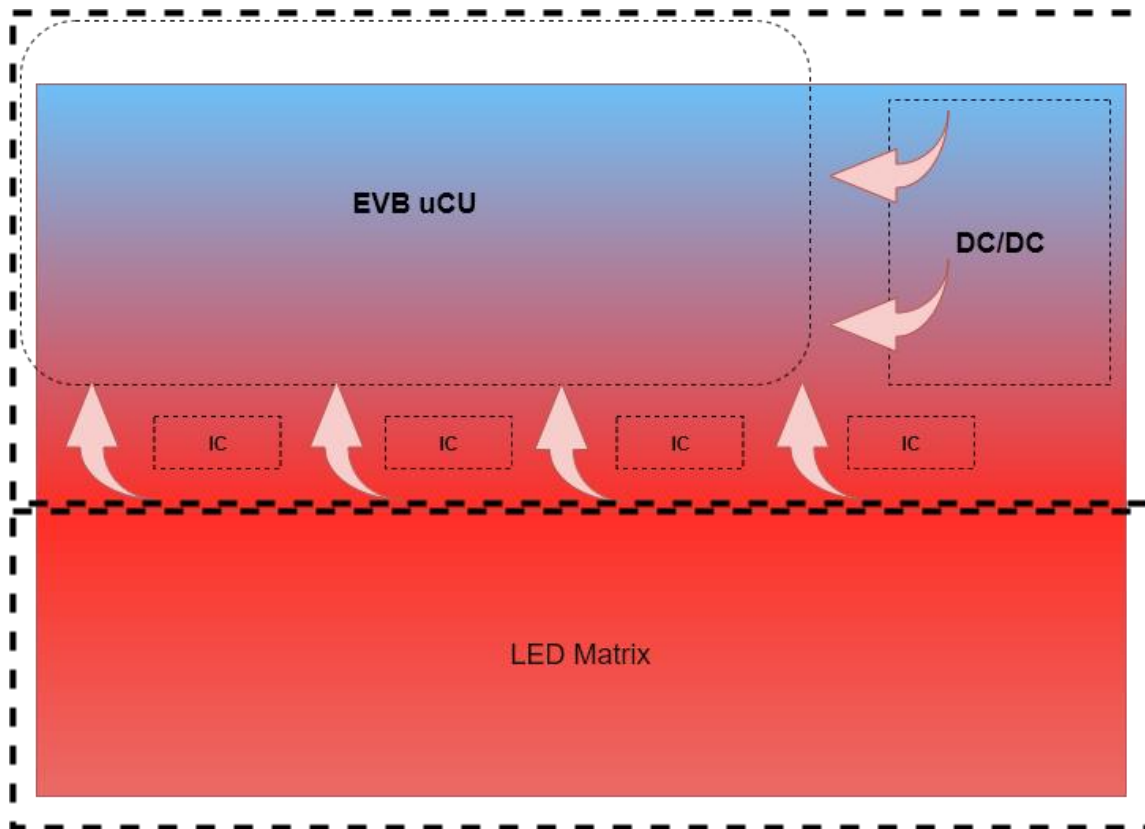


Obrázok 4.4 Ochrana pred zámenou polarity

Hlavným prvkom ochrany je PMOS tranzistor T100. Pri zápornom napätí na vstupe vznikne medzi Gate a Source kladné napätie, ktoré tranzistor uzavrie. Maximálne napätie medzi Gate a Source tranzistorom je 20 V. Aby nedošlo k prekročeniu tejto hodnoty, medzi G-S je zapojená Zenerová dióda D101 so záverným napätím 12 V. Tá zabezpečí, že napätie medzi G-S nebude väčšie ako 12 V. Navyše pre špeciálny prípad testu krátkeho impulzu s veľkosťou - 100 V s názvom **Odolnosť na pulz 1** popísanom v kapitole 3.1 Základné elektrické testy by mohlo dôjsť k súčasnému uzavretiu tranzistora a prekročeniu maximálneho napätia medzi Drain a Source tranzistora, preto je tento obvod doplnený o kondenzátor C101, ktorý podrží tranzistor otvorený, pokiaľ bude uzavretie bezpečné. Záporné napätie bude zvedené treťou ochranou diódou v poradí [28].

## 4.7 Výkonové straty

Výpočet odvodu stratového výkonu celého systému bude rozdelený do dvoch oblastí znázornených na Obrázok 4.5. Prvú oblasť tvoria riadiace obvody, spínaný menič a vývojová doska s procesorom. Druhú oblasť tvorí matica LED diód. Dôvodom na rozdelenie je práve maticové zapojenie LED. Veľký počet diód produkujúcich stratové teplo sa nachádza na malej chladiacej ploche. Ich maticové usporiadanie neumožňuje súvislú vrstvu medi, ktorá by efektívne odvádzala teplo. Navyše na maticové prepojenie všetkých diód je použité veľké množstvo prekovených otvorov (prekov), ktoré zabránia prúdeniu tepla do horných oblastí plošného spoja. Veľký počet prekov rozdelí súvislú plochu medi na veľmi malé časti. Malé medené plochy majú veľký tepelný odpor a neumožnia dobrý odvod tepla.



Obrázok 4.5 Distribúcia stratového tepla na doske plošného spoja

V prvej oblasti sú hlavnými zdrojmi stratového výkonu (stratového tepla) riadiace obvody, spínaný menič a LDO. V tomto prípade bude na chladenie použitá doska plošných spojov, ktorá má dostatočne veľké rozmery. Veľkosť plošného spoja je daná rozmernou vývojovou doskou s procesorom, ktorá je priamo spojená s DPS konektormi. Táto plocha neobsahuje zdroje tepla a bude s výhodou využitá na odvod tepla z ostatných častí DPS, preto layout tejto časti musí byť navrhnutý tak, aby sa teplo od výkonových komponentov odvádzalo do týchto častí. Najlepším spôsobom je súvislá vrstva zemnej plochy.

Na výkonových stratách sa najviac podieľajú straty na spínacích tranzistoroch meniča. Ide o straty spôsobené nedokonalou vodivosťou otvoreného prechodu (odpor vodivého kanálu v otvorenom stave) a spínacie straty zapríčinené nabíjaním parazitnej kapacity medzi prechodmi elektród GS. Výrobca čipu v katalógových listoch poskytuje informáciu iba o odpore vodivého kanálu oboch tranzistorov. Informáciu o veľkosti parazitnej kapacity výrobca neposkytol ani na požiadanie, preto budú výkonové straty odhadnuté z účinnosti spínaného zdroja uvedenej v katalógovom liste. Zdroj bol navrhnutý s prúdovou rezervou 0,5 A, v skutočnosti však prúdový odber určite nepresiahne hodnotu 5,5 A. Podľa grafu účinnosti dosahuje menič účinnosť 92%. Celkový výkon dodávaný do záťaže je

$$P_{OUT} = I \cdot V_{OUT} = 5,5 \cdot 3,1 = 17,05 \text{ W}, \quad (4.11)$$

kde  $I$  je maximálny prúd záťažou v A,  $V_{OUT}$  je výstupné napätie vo V.

Celkový stratový výkon zdroja určíme ako [35]

$$P_{D\_SW} = P_{OUT} \cdot \frac{(1-\eta)}{\eta} = 17,05 \cdot \frac{(1-0,95)}{0,95} = 1,48 \text{ W}, \quad (4.12)$$

kde  $\eta$  je účinnosť meniča [36].

V tomto bode je tiež potrebné overiť, že čip dokáže pracovať pri teplote okolia až 85 °C požadovanej v automobilovom priemysle. Výpočet bude zložený na hodnote tepelného odporu prechod-okolie udávanom v katalógovom liste výrobcu. Teplota prechodu sa vypočíta ako

$$T_j = T_a + \theta_{JA} \cdot P_D = 85 + 44 \cdot 1,48 = 150 \text{ °C}, \quad (4.13)$$

kde  $T_a$  je teplota okolia v °C,  $\theta_{JA}$  je tepelný odpor prechod-okolie v K/W a  $P_D$  je stratový výkon meniča. Táto hodnota dosahuje maximálnu hodnotu prechodu povolenú výrobcom. Hodnota  $\theta_{JA}$  je orientačná a určená za podmienok daných normou JESD51-7. V skutočnosti je táto hodnota ovplyvnená mnohými faktormi ako je layout, použité materiály PCB alebo hrúbka plátovania medi. V prípade skúšobného zapojenia od firmy MPS táto hodnota klesla až na 23 °C/W, preto bude potrebné realizovať layout s dôrazom na dobrý odvod tepla od čipu.

Ďalším zdrojom stratového výkonu je lineárny regulátor TLE4275. Ten napája štvoricu riadiacich čipov s maximálnym odberom 35 mA a vývojovú dosku s procesorom maximálnym odberom 70 mA. Celková výkonová strata na LDO sa vypočíta ako

$$P_{D\_LDO} = (V_{IN} - V_{OUT}) \cdot I_{LOAD} + V_{IN} \cdot I_q = (13,5 - 5) \cdot (4 \cdot 35 \cdot 10^{-3} + 70 \cdot 10^{-3}) + 13,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 1,85 \text{ W}, \quad (4.14)$$

kde  $V_{IN}$  je vstupné napätie vo V,  $V_{OUT}$  je výstupné napätie,  $I_{LOAD}$  je prúd do záťaži a  $I_q$  je vlastná spotreba obvodu [36].

Výkonové straty na riadiacich obvodoch sú dané maximálnym poklesom napätia  $V_{\Delta BIN}$  0,5 V na dosiahnutie maximálneho výstupného prúdu. Ďalej to je výstupný prúd kanálov  $I_{CH}$  v A a výrobný bin LED. V prípade zvolenej LED je napätie v rozmedzí 1,8 až 2,4 V. Rozdiel týchto hodnôt je ďalším faktorom stratového napätia  $V_{\Delta BIN}$ .

$$P_{D\_IC} = (V_{\Delta BIN} + V_{DROP MAX}) \cdot I_{CH} \cdot n = (0,6 + 0,5) \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 44 = 1,45 \quad (4.15)$$

Celkové straty prvej oblasti sú dané ako súčet jednotlivých zdrojov stratového výkonu

$$P_{D1} = P_{D\_SW} + P_{D\_LDO} + P_{D\_IC} = 1,48 + 1,85 + 1,45 \approx 5 \text{ W}, \quad (4.16)$$

Požiadavky na chladenie sú maximálna prevádzková teplota zariadenia (súčiastok)  $T_{IC}$  110 °C a teplota okolia  $T_{OUT}$  85 °C. Pre tieto hodnoty sa určí celkový tepelný odpor prvej oblasti PC potrebný na chladenie nasledovne:

$$\theta_{th\_01} = \frac{T_{IC} - T_{OUT}}{P_{D1}} = \frac{110 - 85}{5} = 5 \text{ K/W} [37]. \quad (4.17)$$

Celkový tepelný odpor prvej oblasti PCB sa vypočíta zo vzorca [38]

$$\theta_{thPCB\_O1} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{cool} \cdot F} = \frac{1}{12 \cdot 0,017 \cdot 1,8} = 2,7 \text{ K/W}, \quad (4.18)$$

kde  $\alpha$  je koeficient tepelnej vodivosti vo  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pre plošný spoj,  $S_{cool}$  sú rozmery chladiacej plochy v  $\text{m}^2$  a  $F$  je návrhový koeficient zohľadňujúci kvalitu termálneho návrhu plošného spoja.

Tepelný odpor plošného spoja je menší ako potrebný odpor. Na chladenie prvej oblasti bude postačovať plocha DPS.

#### 4.7.1 Chladienie matice LED

Správne chladenie LED diód je nevyhnutné pre ich dlhú životnosť. Vysoká prevádzková teplota výrazne znižuje životnosť diód. Ďalšie negatívne dôsledky spôsobené narastajúcou teplotou sú klesajúca svetelná intenzita a zmena farby.

Stratový výkon jednej LED diódy sa určí podobne ako v predchádzajúcich prípadoch

$$P_{D\_LED} = V_{LED} \cdot I_{LED} = 2,4 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0,024 \text{ W}, \quad (4.19)$$

Požiadavky na chladenie sú maximálna prevádzková teplota LED  $T_{LEDmax}$   $100 \text{ }^\circ\text{C}$  a teplota okolia  $T_{OUT}$   $85 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pre tieto hodnoty sa určí celkový tepelný odpor potrebný na chladenie matice LED nasledovne:

$$\theta_{th\_LED} = \frac{T_{LEDmax} - T_{OUT}}{P_{LED}} = \frac{100 - 85}{0,024} = 625 \text{ K/W}, \quad (4.20)$$

Celkový tepelný odpor plošného spoja pre jednu LED s rozmermi  $4 \times 3,5 \text{ mm}$  sa odhadne podľa vzorca

$$\theta_{thPCB\_LED} = \frac{1}{\alpha \cdot S_{cool} \cdot F} = \frac{1}{12 \cdot 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 1,8} = 3306,9 \text{ K/W} \quad (4.21)$$

kde  $\alpha$  je koeficient tepelnej vodivosti vo  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  pre plošný spoj,  $S_{cool}$  sú rozmery chladiacej plochy v  $\text{m}^2$  a  $F$  je návrhový koeficient zohľadňujúci kvalitu termálneho návrhu plošného spoja.

Je zjavné, že plocha plošného spoja pod LED má niekoľkonásobne väčší tepelný odpor ako je potrebný na odvod tepla, preto bude v tomto prípade nevyhnutné navrhnuť dodatočný spôsob chladenia.

#### 4.7.2 Chladič

Dodatočné chladenie bude realizované pomocou hliníkového chladiča na spodnej strane plošného spoja pod maticou LED. Teplo zo strany diód je na opačnej strane PCB vedené termálnymi prekovmi. Chladič bude prilepený k DPS pomocou elektricky nevodivého lepidla s nízkym tepelným odporom. Musí byť použité elektricky nevodivé lepidlo, pretože na PCB pod chladičom sa nachádza viacero signálov s prekovmi. Je nevyhnutné zabezpečiť, aby nedošlo k elektrickému prepojeniu týchto signálov. Nasledujúca časť bude venovaná teoretickému výpočtu odvodu tepla a chladiča.

V tejto časti sa overí, či dvojica termálnych prekovov bude mať dostatočne nízky tepelný odpor na odvod tepla z hornej časti plošného spoja.

Tepelný odpor prekovu vypočítame z objemu galvanicky nakovenej medi v prekovke a známej tepelnej vodivosti medi  $\alpha_{Cu} = 380 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Plochu medi vypočítame ako kruhový výsek zo vzorca [39]

$$S = n \cdot \pi \cdot (r^2 - (r - t_{Cu})^2) = 2 \cdot \pi \cdot (0,2^2 - (0,2 - 2 \cdot 10^{-5})^2) = 4,77 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2, \quad (4.22)$$

kde  $n$  je počet prekovov pre odvod tepla z jednej LED,  $r$  je polomer otvoru v PCB v metroch,  $t_{Cu}$  značí hrúbku galvanicky vylúčenej medi v metroch.

Tepelný odpor dopočítame zo vzorca

$$\theta_{Prok} = \frac{L}{\alpha_{Cu} \cdot S} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{380 \cdot 4,77 \cdot 10^{-8}} = 82,8 \text{ K/W}, \quad (4.23)$$

kde  $L$  je dĺžka materiálu v smere šírenia tepla v m,  $\alpha_{Cu}$  je tepelná vodivosť medi v  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $S$  je plocha, ktorou prestupuje teplo [39].

Výpočet potvrdil, že dvojica prekovov má tepelný odpor približne 7-krát menší ako požadovaný odpor na odvod tepla z jednej LED a odvedie teplo so značnou rezervou.

Celková chladiaca plocha bude vypočítaná na základe zjednodušeného vzorca používaného v praxi v spoločnosti Hella. Koeficienty vo výpočte sú odvodené na základe dlhoročných skúseností, simulácií a reálnych meraní LED modulov. Pre výpočet plochy chladiča v  $\text{cm}^2$  bude využitý nasledovný vzorec [40]

$$A = \frac{P_{th}}{(T_{hsmax} - T_A) \cdot k} \cdot 100 \cdot 100, \quad (4.24)$$

kde  $P_{th}$  je celkový výkon všetkých LED v matici vo W,  $T_{hsmax}$  je maximálna prevádzková teplota po odpočítaní koeficientov v °C,  $T_A$  vyjadruje teplotu okolia v °C s ohľadom na schopnosť odvádzať teplo v danom prostredí,  $k$  je súčiniteľ prestupu tepla v  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ , ktorý vyjadruje schopnosť prestupu tepla cez všetky materiály na PCB. Jeho hodnota je závislá na mnohých parametroch, a preto sa pre špecifické materiály a aplikácie v spoločnosti Hella nahrádza konštantnou hodnotou, ktorá sa pre tento prípad pohybuje v rozmedzí  $5\text{-}12 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  [41]. Je potrebné dopočítať hodnoty jednotlivých premenných. Hodnota  $P_{th}$  sa určí ako výkon jednej LED  $P_{D_{LED}}$  vo W vynásobený počtom všetkých LED v matici  $n$ .

$$P_{th} = n \cdot P_{D_{LED}} = 528 \cdot 0,024 = 12,67 \text{ W}, \quad (4.25)$$

$T_{hsmax}$  sa vypočíta z maximálnej prevádzkovej teploty LED v °C poníženej o rozdiel teploty spôsobený tepelným prechodom dosky plošného spoja  $\Delta T_{PCB}$  a teplotný rozdiel  $\Delta T_{TCA}$  zapríčinený tepelným prechodom lepiacej pasty medzi PCB a chladičom [40]

$$T_{hsmax} = T_{LEDmax} - \Delta T_{PCB} - \Delta T_{TCA} = 100 - 0,2 - 0,1 = 99,7 \text{ °C}, \quad (4.26)$$



$T_A$  sa vypočíta z teploty okolia  $T_{OUT} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , celkového výkonu LED  $P_{th}$  a koeficientu  $\theta_{thcase}$ . Ten vyjadruje schopnosť tepelnej výmeny v danom prostredí (v tomto prípade zadného svetlometu) [40]

$$T_A = P_{th} \cdot \theta_{thcase} + T_{OUT} = 12,67 \cdot 0,9 + 85 = 96,4 \text{ }^\circ\text{C} , \quad (4.27)$$

$\Delta T_{PCB}$  sa vypočíta ako násobok výkonu jednej LED diódy  $P_{D\_LED}$  vo W, ďalej koeficientu  $hmp$  s názvom „hot spot multiplier“, ktorý vyjadruje vzájomný termálny vplyv diód v matici a koeficientu tepelného odporu pre viacvrstvovú DPS z izolačného materiálu RF4  $\theta_{thPCBRF4}$  v K/W získaného meraniami na obdobnej LED [40]

$$\Delta T_{PCB} = P_{D\_LED} \cdot hmp \cdot \theta_{thPCBRF4} = 0,024 \cdot 1,4 \cdot 7,25 = 0,2, \quad (4.28)$$

Nakoniec je potrebné dopočítať  $\Delta T_{TCA}$  obdobne ako v predchádzajúcom výpočte, ale s použitím tepelného odporu nevodivého lepidla  $\theta_{thTCA}$

$$\Delta T_{TCA} = P_{D\_LED} \cdot hmp \cdot \theta_{thTCA} = 0,024 \cdot 1,4 \cdot 2,4 = 0,1, \quad (4.29)$$

Dosadením vypočítaných hodnôt do rovnice (4.24) pri teplote okolia  $T_{OUT} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  a zvolením hodnoty koeficientu  $k=7$  dostaneme rozmery chladiča:

$$A = \frac{12,67}{(99,7-36,4) \cdot 7} \cdot 100 \cdot 100 = 286 \text{ cm}^2, \quad (4.30)$$

Výsledok vyjadruje analýzu typickej požiadavky pri  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  modulu ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$  okolie). Po ustálení je stále dodržaný požadovaný svetelný tok z LED (žiadne regulované znižovanie výkonu (derating)) . Zároveň je to analýza najhoršieho prípadu. Najhorším prípadom sa rozumie situácia, kedy svietia všetky diódy displeja na plný výkon. V praxi táto situácia nastane iba výnimočne.

V prípade požiadavky maximálnej teploty okolia  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  je požadovaná plocha chladiča získaná týmto výpočtom až  $5534 \text{ cm}^2$ . Išlo by o nadrozmerne veľký chladič, ktorý by sa nedal použiť v praxi. Existuje niekoľko prístupov k riešeniu tohto problému. Jednou z možností je, že ide o prototyp, ktorý môže byť prevádzkovaný iba pri teplote okolia  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Ďalším prístupom je úvaha, že prototyp sa nachádza vo voľnom prostredí. Preto môžeme upraviť výpočet a znížiť alebo zanedbať koeficientu  $\theta_{thcase}$ , ktorý vyjadruje schopnosť tepelnej výmeny v danom prostredí a dosadiť do vzorca priamo teplotu okolia  $T_A = T_{OUT}$ . V prípade svetlometu by šlo o umiestnenie chladiča na zadnú stenu svetlometu. Súčasne je možné znižovať výkon diódy znížením prúdu za cenu nižšej svetelnej intenzity. Ešte lepšia účinnosť sa dosiahne použitím diód s najnižším napätím v priepustnom smere, pre túto diódu  $1,9 \text{ V}$ . Kombináciou týchto faktorov, kedy  $I_{LED} = 8 \text{ mA}$ , napätie v priepustnom smere je  $1,9 \text{ V}$  a  $T_A = T_{OUT} = 85 \text{ }^\circ\text{C}$  je odhadovaný rozmer chladiča  $762 \text{ cm}^2$ . Chladič s takouto plochou môže byť použitý v prípade prototypu a pravdepodobne aj v sériovo vyrábanom svetlomete.

## 4.8 Doska plošných spojov

Táto kapitola popisuje voľbu DPS a niektoré použité návrhové pravidlá pre zlepšenie vlastností zariadenia.

DPS je sa skladá z troch základných častí. Doska je popisovaná pri pohľade na vrchnú stranu DPS. Fyzická matica LED je najbližšie k pozorovateľovi, teda nachádza sa v dolnej časti DPS. V pravom hornom rohu sa nachádza DC-DC menič. Približne v strede sa nachádzajú riadiace obvody LED a v hornom ľavom rohu sú to konektory pre pripojenie vývojovej dosky s mikroprocesorom.

Bola zvolená štvor-vrstvová DPS s jadrom z materiálu FR4. Hlavnými dôvodmi pre jej voľbu je zapojenie matice LED a tiež potlačenie rušenia vysokofrekvenčných signálov. Prvá vrstva je signálová a bude na nej vedená väčšina signálov, a umiestnené všetky elektrické súčiastky. Druhá vrstva bude súvislá vrstva zemnej (GND) medi. Tretia vrstva bude znova slúžiť na rozvod signálov. Štvrtá, spodná vrstva bude znovu súvislá vrstva medi GND. Hrúbka medených vrstiev bude 35  $\mu\text{m}$ . Rozmery DPS sú približne 16  $\times$  18 cm. Pre zníženie nákladov budú použité iba prekovy prechádzajúce cez všetky vrstvy DPS. Pre povrchovú úpravu dosky bude použitá metóda cínovania za tepla (HAL).

V prípade zapojenia LED dochádza k značnému kríženiu spojov, preto musia byť vedené vo viacerých vrstvách. Súčasne je potrebné odvádzať teplo z prvej vrstvy na spodnú stranu DPS, nato budú slúžiť termálne prekovy. V spodnej vrstve pod maticou LED diód sa budú nachádzať čo najväčšie súvislé plochy medi s rovnakým signálom pre čo najlepší odvod tepla do chladiča.

V DPS budú rozvedené vysokofrekvenčné signály s frekvenciou až 28 MHz, aby nedochádzalo k rušeniu týchto signálov, budú niektoré signály vedené v tretej signálovej vrstve medzi dvomi vrstvami zemnej medi. Vysokofrekvenčné signály vedené na prvej vrstve budú vedené v usporiadaní signál-zem-signál kvôli minimalizácii vzájomného rušenia. Z rovnakých dôvodov bolo zvolené aj priame pripojenie vývojovej dosky PCB prostredníctvom konektorov. Ďalej je to snaha o čo najkratšie spoje [42].

Spínaný menič je najväčším zdrojom rušenia na DPS. Pre zníženie rušenia bola využitá možnosť zapojenia symetrického napájania vstupu a výstupu čipu meniča, kedy napájanie a kondenzátory sú z oboch strán čipu. Vďaka tomu dôjde k vzájomnému vyrušeniu prúdových slučiek a zníženiu rušenia. Zároveň pre zmenšenie plochy, na ktorej vznikne prúdová slučka, musia byť vstupné aj výstupné kondenzátory umiestnené čo najbližšie k čipu. Ďalšie zlepšenie EMC vlastností sa dosiahne tienením kovovou krabičkou [42].

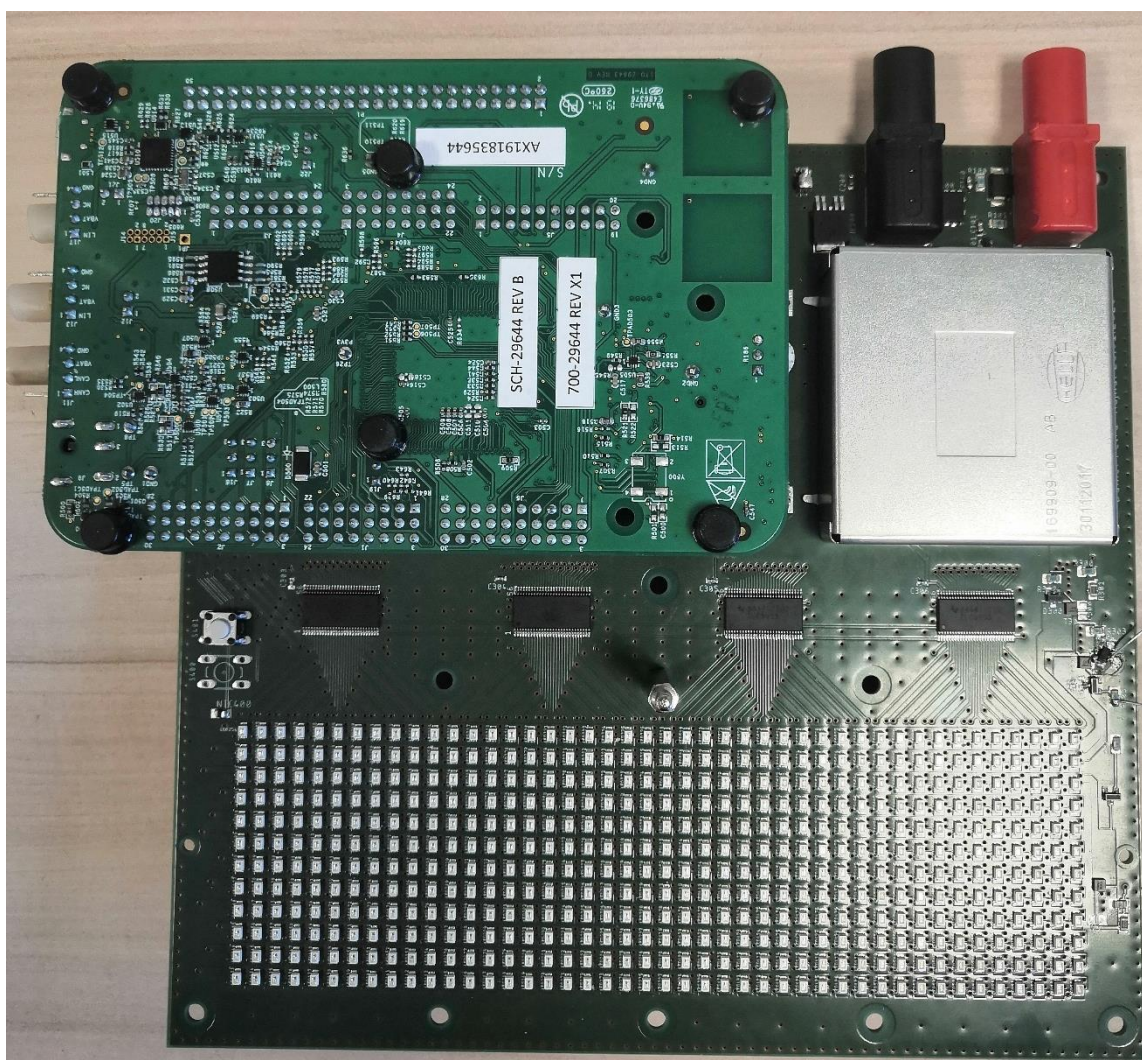
Layout prvej vrstvy sa nachádza v prílohe A.5 Doska plošných spojov TOP . Obsadzovací výkres súčiastok sa nachádza v prílohe A.6 Obsadzovací výkres TOP. V prílohe A.7 Doska plošných spojov druhá vrstva je detail druhej vrstvy a layout tretej je v prílohe A.8 Doska plošných spojov tretia vrstva. Spodná strana DPS je vyobrazená v prílohe A.9 Doska plošných spojov BOTTOM.

## 5 REALIZÁCIA ZARIADENIA

Prvá časť kapitoly sa venuje oživovaniu zariadenia a s tým spojeným odstraňovaním nedokonalostí v návrhu. Nasledujúca časť prezentuje základné merania vlastností DC-DC meniča. V ďalšej časti sú rozobrané termálne vlastnosti realizovaného zariadenia. Posledná časť pojednáva o voľbe optického difúzora.

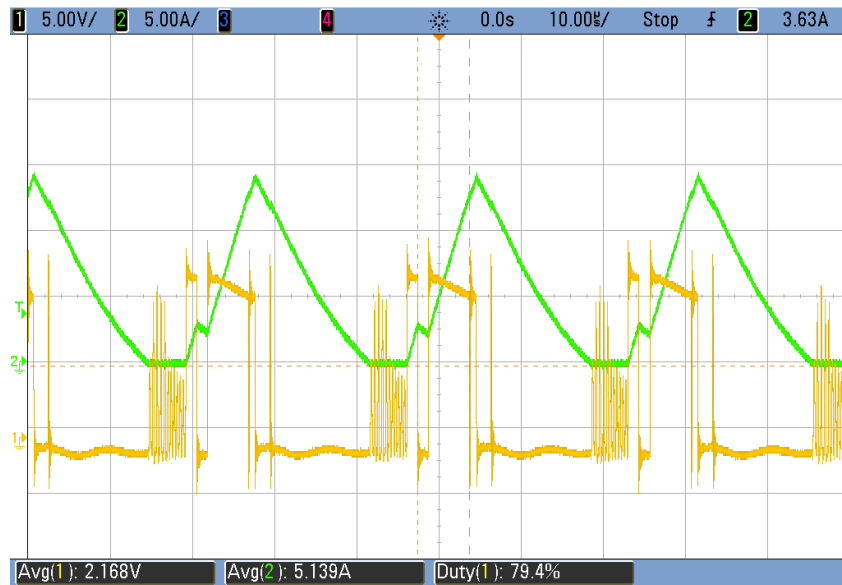
### 5.1 Oživovanie zariadenia

Doska plošných spojov bola vyrobená a osadená väčšinou komponentov v externej spoločnosti. Na Obrázok 5.1 sa nachádza PCB po osadení všetkých komponentov. Z dôvodu vysokých nákladov bola vyrobená iba jediná vzorka, preto bolo nevyhnutné prispôbiť používanie a testovanie prototypu tak, aby sa minimalizovala možnosť jeho poškodenia.



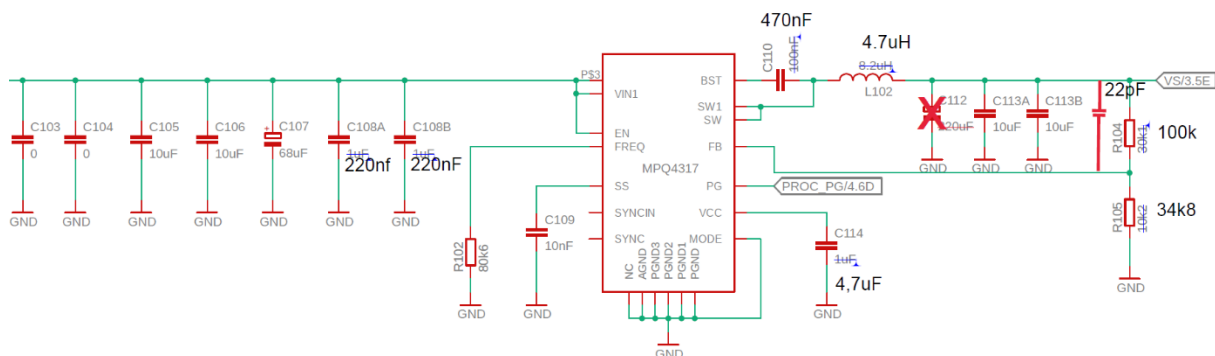
Obrázok 5.1 Prototyp elektroniky maticového displeja

Počas počiatocného testovania sa prejavila jedna závažná chyba a niekoľko menších problémov. Ako prvý sa testoval samotný DC-DC napájací zdroj bez LED záťaže. Naprázdno zdroj pracoval správne a dodával na výstupe požadované napätie 3,1 V. Avšak po zaťažení rezistívnou záťažou menič vykazoval nestabilitu a na výstupe bolo napätie s veľkosťou iba 2,5V. Priebeh spínania výstupu integrovaného obvodu snímaný prostredníctvom napätia na výstupe bol nesprávny (viď Obrázok 5.2, kanál 1). Výstup namiesto pravidelného spínania s konštantou striedou rôzne osciloval a spínal v rôznych okamihoch, rovnako prúd cievkou (viď Obrázok 5.2, kanál 2). L102 meniča mal nesprávny priebeh. Prúd cievkou osciloval medzi 15 A a 0 A pri požadovanom priemernom prúde 5,1 A.



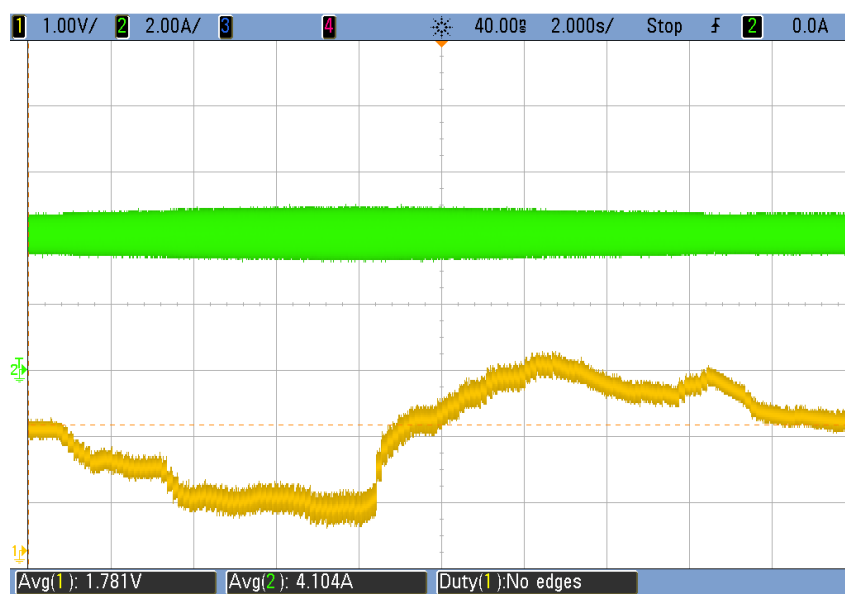
Obrázok 5.2 Chybný priebeh výstupného prúdu na cievke a spínaného napätia DC-DC meniča

Takéto správanie viedlo k myšlienke, že v zariadení je skrat. Preto prúd meničom prudko rastie až do okamihu, keď nadprúdová ochrana vyvolá reštart meniča. Túto myšlienku popierala dvojica faktov. Nepodarilo sa nájsť žiadny skrat a v prípade reštartu by sa zariadenie podľa katalógového listu spúšťalo oveľa dlhší čas. Keďže použitý menič ešte nie je v produkcii, bol navrhovaný podľa predbežného katalógového listu. Po kontrole obvodu s novšou verziou katalógového listu boli podľa aktualizovaných informácií v katalógovom liste vymenené kondenzátory C110 a C114 (viď Obrázok 5.3) na pinoch MPQ4317. Po tejto zmene bol obvod stabilný pri niektorých vstupných napätiach, ale na výstupe bolo nesprávne napätie 2,5 V. Naopak v stave nestability bolo výstupné napätie správne. Zariadenie bolo testované pri prúde záťažou 3 A.



Obrázok 5.3 Schéma zapojenia DC-DC meniča znázorňujúca zmeny v zapojení vykonané pri oživovaní zariadenia

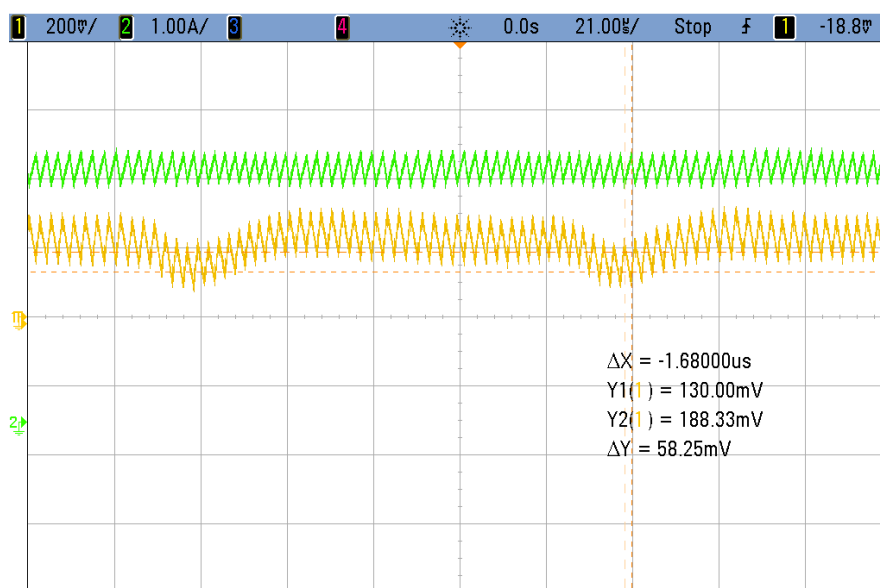
Ďalšia myšlienka bola upraviť obvod tak, aby sa čo najviac podobal obvodu na ukážkovej DPS (demoboard) od výrobcu čipu, ktorá fungovala správne. Tým by sa mohol čiastočne vylúčiť nesprávny návrh meniča. V takom prípade by chyba mohla byť v samotnom integrovanom obvode. Bola vymenená cievka L102, odpory v spätnej väzbe R104, R105 a odstránený elektrolytický kondenzátor C112. Napriek zlepšenej stabilite menič stále kmital pri vstupnom napätí v rozsahu 8 – 9 V. Po zapojení paralelného kondenzátora s hodnotou 22 pF do napäťového deliča v spätnej väzbe bolo zariadenie stabilné v celom rozsahu požadovaného vstupného napätia, ale výstupné napätie bolo iba 2,5 V. Taktiež napätie na vstupe (FB) spätnej väzby integrovaného obvodu bolo 0,625 V, namiesto predpokladaných 0,8 V. Pritom demoboard od výrobcu pracovala s rovnakým odporovým deličom správne. Navyše, pri takomto zapojení bola stabilizácia výstupného napätia veľmi pomalá (viď Obrázok 5.4). Žltý priebeh prvého kanálu zobrazuje stabilizáciu napätia na výstupe s pripojenou odporovou záťažou, zelený priebeh zobrazuje spínanie prúdu na výstupe cievky L102. Ako je možné vidieť z grafu, stabilizácia výstupného napätia trvá neuveriteľných 8 sekúnd.



Obrázok 5.4 Pomalá regulácia výstupného napätia DC-DC meniča

V ďalšom kroku bol oslovený výrobca čipu. Pri ďalšom skúmaní a konzultácii s výrobcom čipu sa podarilo objaviť chybu. Problém bol v tom, že nevyužitý pin s názvom NC bol v tomto obvode pripojený k GND. Avšak v skutočnosti bol tento pin vnútorne pripojený a využitý. Po jeho odpojení, menič pracoval správne. Predbežný katalógový list o tejto skutočnosti neinformoval. Na základe tejto skúsenosti výrobca pridal upozornenie, aby pin NC ostal nepripojený do ďalšej verzie katalógového listu. Bola znovu osadená pôvodná cievka L102 s hodnotou  $8,2 \mu\text{H}$  a kondenzátor C112 s hodnotou  $220 \mu\text{F}$ . Odhalenie a vyriešenie problému trvalo viac ako jeden týždeň. S každým neúspešným riešením bolo náročnejšie hľadať nové príčiny problému. Nejaký čas zabralo aj zdieľanie všetkých informácií s výrobcom a komunikácia.

Pri ďalších kontrolných meraniach bol pozorovaný periodický pokles vstupného napätia (viď Obrázok 5.5). Frekvencia poklesu navyše konsolidovala s nepríjemným pískaním v obvode. Ďalšími meraniami sa zistilo, že zdrojom poklesov je kmitajúci lineárny regulátor (IC200) a zdrojom pískania práve kondenzátor na jeho výstupe. Zo štúdia dokumentov o stabilite lineárneho regulátora TLE27QKVURQ1 vyplynulo, že použitý keramický kondenzátor (C201) má príliš nízku hodnotu sériového odporu (ESR), čo spôsobilo nestabilitu. Riešením bolo v sérii s kondenzátorom pripojiť odpor o hodnote  $0,43 \Omega$ . K chybe došlo, pretože výrobca DPS nahradil nedostupný regulátor TLE4275V50 za alternatívny regulátor s označením TLE27QKVURQ1.



Obrázok 5.5 Periodický pokles vstupného napätia DC-DC meniča

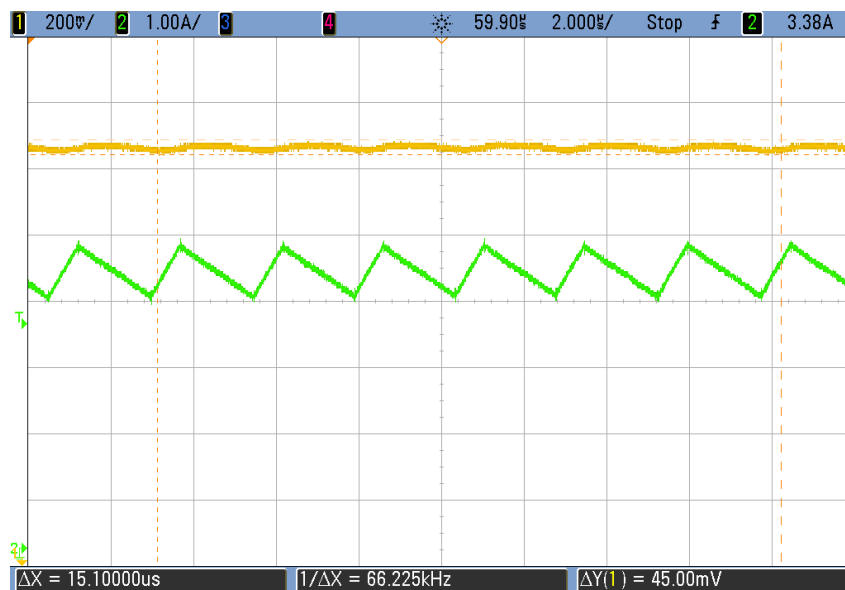
Posledná nedokonalosť návrhu súvisela s tranzistormi spínajúcimi napájanie jednotlivých riadkov LED matice. Počas testovania LED záťaže nespínal tranzistor T302 správne. Meraním sa zistilo, že aj keď je výstup mikroprocesora v logickej nule, na vstupe tranzistora bolo napätie s hodnotou  $1,2 \text{ V}$ . Dané napätie bolo na výstupe mikroprocesora aj v prípade, ak vývojová doska s MCU bola odpojená od zvyšku obvodov. Poukazovalo to na problém práve vo vývojovej doske. Preskúmaním schémy vývojovej dosky sa zistilo, že na daný výstup je pripojený aj interný odporový delič ADC prevodníka. Problém sa dal jednoducho vyriešiť odstránením nulového odporu, čím došlo k odpojeniu ADC prevodníka.

### 5.1.1 Zhodnotenie procesu oživovania DPS

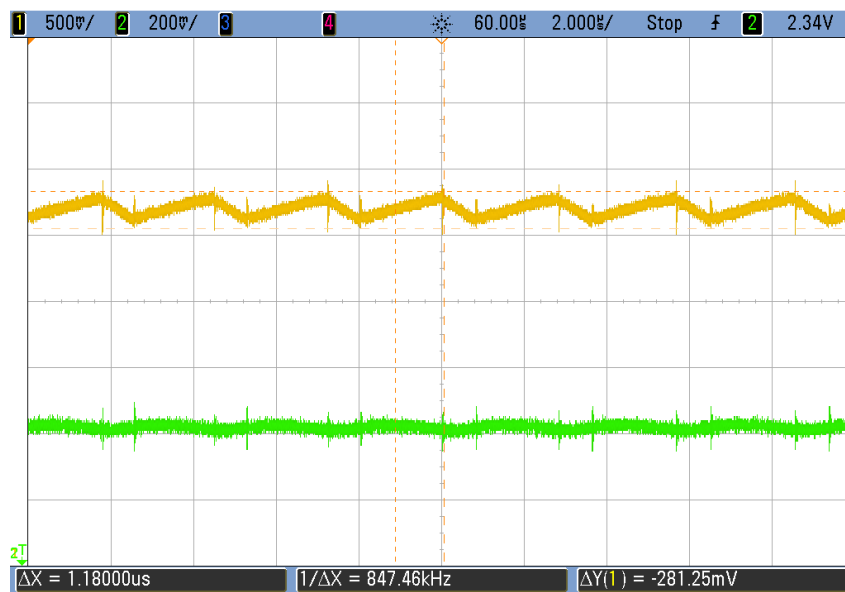
Po oživení DPS bolo nájdených niekoľko nedokonalostí návrhu. DC-DC menič vykazoval nesprávne hodnoty, dochádzalo k rozkmitaniu lineárneho regulátora a jeden zo spínacích tranzistorov sa nedokonale otváral. Chybu meniča spôsobenú neúplnou technickou dokumentáciou sa podarilo identifikovať a odstrániť po viac ako týždni práce. Vyriešené boli aj ostatné problémy.

## 5.2 Základné vlastnosti meniča

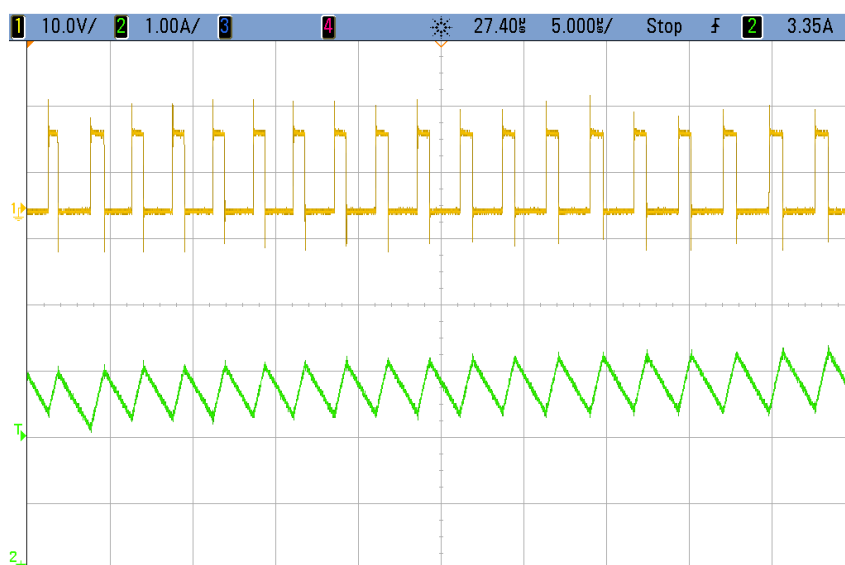
Po úspešnom vyriešení nedokonalostí v návrhu sa uskutočnili základne merania na overenie vlastností DC-DC meniča. Pri meraní bola použitá konštantná LED záťaž (bez multiplexovania) s prúdom 4,5 A. Merané veličiny: výstupné napätie, zvlnenie výstupného napätia, zvlnenie vstupného napätia, zvlnenie prúdu cievkou, priebeh spínania a spínacia frekvencia. Výstupné napätie je približne 3,15 V. Zvlnenie tohto napätia má hodnotu 45 mV (viď Obrázok 5.6, žltý priebeh). Zvlnenie výstupného napätia dosiahlo hodnotu 280 mV (viď Obrázok 5.7, žltý priebeh). Zvlnenie prúdu cievkou bolo pod úrovňou 1A (viď Obrázok 5.6, zelený priebeh) . Priebeh spínania je zobrazený na Obrázok 5.8. Spínacia frekvencia je približne 430 kHz, ale jej hodnota sa mení s rozsahom  $\pm 10\%$  [7], pretože menič má funkciu „spread spectrum“, ktorá rozmetá spínaciu frekvenciu za účelom zlepšenia EMC.



Obrázok 5.6 Priebeh výstupného napätia a prúdu cievkou



Obrázok 5.7 Priebeh vstupného a výstupného napätia



Obrázok 5.8 Priebeh spínania DC-DC meniča

Veličina	Požadovaná hodnota	Nameraná hodnota
Max prúd	$\leq 6 \text{ A}$	4,5A
Výstupné napätie	3,1 V	3,15 V
Zvlnenie vstupného napätia	$\leq 50 \text{ mV}$	45 mV
Zvlnenie výstupného napätia	$\leq 250 \text{ mV}$	280 mV
Frekvencia	430 kHz	$\approx 430 \text{ kHz}$

Tabuľka 7 Výsledky základných meraní



Meranie prebehlo pri nižšom prúde ako bol prúd zvolený s rezervou pri návrhu zariadenia. Výsledky do požadovanej miery odpovedajú požiadavkám. Základným meraním vlastností DC-DC meniča sa overilo, že môže byť bezpečne použitý pre napájanie LED displeja.

Následne bol LED displej pripojený k DC-DC meniču. Firmvér multiplexoval displej tak, aby všetky LED svietili na maximálny výkon (očakávaný priemerný prúd jednou LED 10 mA). V tomto zapojení bolo možné pozorovať výrazné zvýšenie zvlnenia výstupného napätia. Zdrojom zvlnenia boli prekmity s hodnotou až 230 mV. Prekmit výstupného napätia znázorňuje žltý priebeh na Obrázok 5.9, zelený priebeh znázorňuje prúd cievkou. V tomto prípade by nemalo dochádzať k výraznej zmene zvlnenia, pretože prúd jednotlivými riadkami sa nemení. Príčinou je samotné multiplexovanie, kedy je nutné, aby na veľmi krátky okamih došlo k vypnutiu všetkých tranzistorov. Napriek snahe DC-DC meniča regulovať túto rýchlu zmenu dochádza ku krátkemu prekmitu napätia. To má negatívny vplyv na zvlnenie napätí a prúdu cievkou.



Obrázok 5.9 Prekmit výstupného napätia pri multiplexovaní

Práve na kompenzáciu týchto dynamických zmien by mal slúžiť vstupný kondenzátor. Bol zmeraný čas vypnutia celej matice, teda čas medzi vypnutím jedného riadku a zapnutím nasledujúceho. Displej bol vypnutý 2  $\mu$ s. Úpravou vzorca ( 4.9) sa overilo predpokladané maximálne zvlnenie, ku ktorému by malo dochádzať pri použitom výstupnom kondenzátore:

$$\Delta V_{OUT\_PP} = \frac{2 \cdot t \cdot \Delta I_{Step}}{C_{OUT}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} \cdot 5,3}{220 \cdot 10^{-6}} = 96 \text{ mV} \quad (5.1)$$

Výpočet preukázal, že pri použitom výstupnom kondenzátore by prekmity mali dosahovať polovičnú hodnotu. Preto bolo nutné hľadať príčinu inde. Zdrojom prekmitu mohol byť samotný parazitný sériový odpor kondenzátora s hodnotou 0,08  $\Omega$ . Pomerne vysoký sériový odpor je charakteristická vlastnosť elektrolytických kondenzátorov. Pri nabíjaní prúdom 5,3 A môže vzniknúť úbytok napätia až 400 mV. Elektrolytický kondenzátor bol experimentálne nahradený dostupnými keramickými kondenzátormi s nominálnou hodnotou

130  $\mu F$ . Vďaka tomu došlo k výraznému zníženiu prekmitu pod 100 mV (viď Obrázok 5.10, žltý priebeh). Veľké prekmity (viac ako 5% výstupného napätia) môžu spôsobiť skokový nárast prúdu LED, čo znižuje jej životnosť.

Z experimentu vyplýva odporúčenie nepoužívať elektrolytické kondenzátory na stabilizáciu výstupného napätia meniča pri použití dynamicky multiplexovanej záťaže. Pre tento typ záťaže je vhodné použiť keramické kondenzátory. Negatívom je ich výrazne vyššia cena.



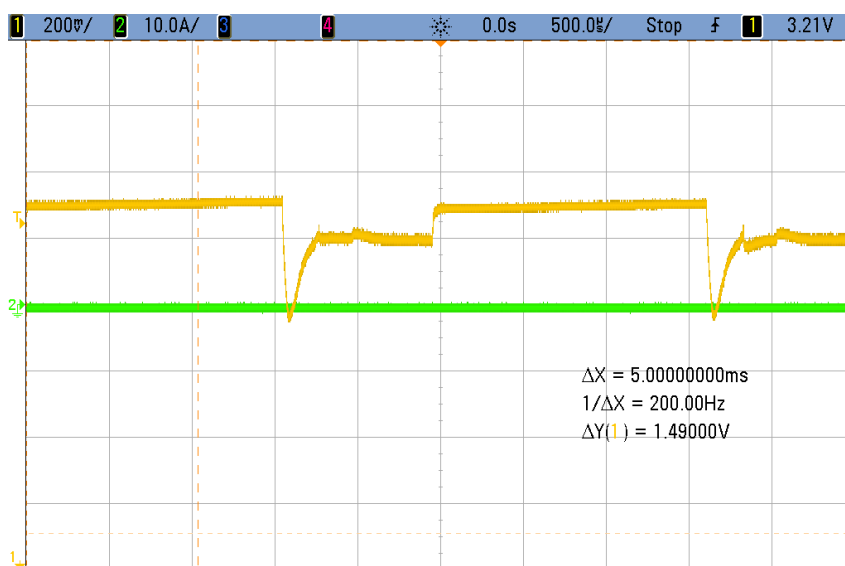
Obrázok 5.10 Zníženie prekmitu spôsobeného multiplexovaním

Meranie tiež ukázalo, že maximálny prúd LED displejom má hodnotu 4,3 A namiesto predpokladaných 5,3 A. Prúd bol meraný prúdovou sondou ako priemerný prúd na výstupe cievky.

Spätnou analýzou návrhu sa zistila chybná úvaha pri dimenzovaní maximálneho prúdu pre jeden riadok. Pri prvotnom návrhu zariadenia sa počítalo s priemerným prúdom, ktorý predstavuje tretinu maximálneho prúdu 5,3 A. Síce priemerný prúd je naozaj iba 1,8 A, pretože sa multiplexuje v čase a LED v skutočnosti svieti iba tretinu času. No v okamihu kedy je pri multiplexovaní napájaný jeden riadok, v ktorom sú rozsvietené všetky LED, je maximálny prúd až 5,3 A. Chybná úvaha s použitím priemerného a nie aktuálneho prúdu spôsobila nesprávne dimenzovanie spínacích tranzistorov a skokovej zmeny prúdu v záťaži. Meraním a skúmaním sa overilo, že LED displej neodoberá maximálny prúd kvôli poddimenzovaným tranzistorom. Tranzistor sa používa mimo doporučenej oblasti maximálneho konštantného prúdu 3,6 A. Pre otváranie tranzistoru bolo použité nízke napätie  $V_{G-S}$ , pri ktorom dochádzalo pri prúdoch nad 3,6 A k veľkému úbytku napätia  $V_{D-S}$ . Dôsledkom čoho sa znížilo napätie v priepustnom smere na dióde a preto klesol maximálny prúd LED. Zvýšenie  $V_{G-S}$  je limitované výstupným napätím meniča, pretože gate tranzistoru sa pripojuje k GND. Riešením je vybrať iný tranzistor, ktorý ma nízky odpor v otvorenom stave pre  $V_{G-S} = 3,1 V$ , alebo použiť prídavný obvod, ktorý zaistí dostatočné veľké napätie  $V_{G-S}$ . Maximálny prúd 5,3 A sa podarilo dosiahnuť experimentálnym zvýšením výstupného napätia na 3,8 V. Zvýšenie výstupného napätia meniča zaistí vyššie  $V_{G-S}$ , ale zároveň zvýši výkonové straty na riadiacich obvodoch LED.

Maximálny prúd 4,3 A postačí na rozsvietenie 80 % percent LED na požadovaný maximálny priemerný prúd 10 mA. Maximálny prúd 5,3 A bol definovaný iba pre testovanie najhoršieho prípadu. K rozsvieteniu viac ako 80 % diód na maximálny výkon nedochádza v žiadnej z predefinovaných animácií (viď 8.1 Svetelné funkcie). Navyše, ak by aj došlo k prekročeniu hranice 80 %, prejaví sa to iba zníženou intenzitou svetelného toku. To nemá na demonštračnú funkciu zariadenia žiadny vplyv. Z tohto dôvodu je postačujúci maximálny prúd 4,3 A a nemá zmysel (okrem testovania) zvyšovať výstupné napätie na úkor vyšších výkonových strát. Tranzistory využívajú špecifické puzdro PowerPAK SC-70. V ďalšej verzii DPS budú preto nahradené výkonnejšími tranzistormi s väčším puzdrom.

Chybná úvaha o priemernom prúde mala aj negatívny vplyv na dimenzovanie výstupných kondenzátorov. Ich úlohou je kompenzovať skokové zmeny prúdu do záťaže, ktoré zväčšujú zvlnenie výstupného napätia. Pri pôvodnom výpočte sa počítalo s maximálnou zmenou prúdu 2 A pri multiplexovaní. Táto zmena mala odrážať stav, keby všetky LED v jednom z troch riadkov boli rozsvietené na maximálny výkon (30 mA na LED), ale v ďalšom multiplexovanom riadku by boli naopak všetky LED vypnuté. Pri správnej úvahe s maximálnym prúdom, táto zmena môže predstavovať až 5,3 A. V skutočnosti k takým veľkým zmenám nedochádza. Jedným z dôvodov je, že jeden elektrický napájaný riadok predstavuje vo fyzickom rozložení každý štvrtý riadok matice. Prakticky by teda k takej zmene došlo iba, ak všetky LED v riadkoch 1, 4, 7, 10 boli zapnuté a naopak všetky LED v radkoch 2, 5, 8, 11 vypnuté. Samozrejme, k takej situácii v žiadnej predefinovanej animácii nedochádza. Pri multiplexovaní predefinovaných animácií najväčšia zmena prúdu nepresiahne 2 A. Napriek tomu dochádzalo k značnému podkmitu výstupného napätia až 400 mV. Po vyššie uvedenej zámene výstupného elektrolytického kondenzátora došlo k poklesu podkmitu na 300 mV (viď Obrázok 5.11). Ešte menšie zvlnenie 250 mV nastalo pri experimentálnom zapojení pôvodného 220  $\mu$ F elektrolytického kondenzátora a keramických kondenzátorov. Veľká hodnota kapacity však spomalila odozvu DC-DC meniča. Navyše, všetky kondenzátory sa nezmestia pod kovovú krabičku pre zlepšenie EMC. Preto bude použité zapojenie iba s keramickými kondenzátormi a bude sa tolerovať väčší podkmit, ktorý nemá na rozdiel od prekmitu na LED negatívny vplyv.



Obrázok 5.11 Pokles výstupného napätia pri multilexovaní

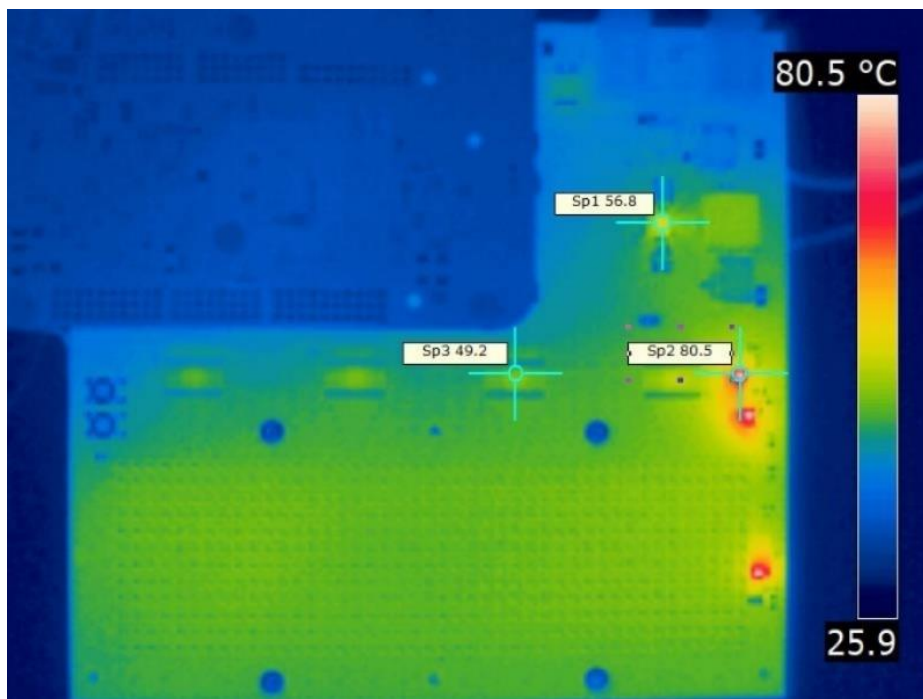
### 5.2.1 Zhodnotenie merania základných vlastností DC-DC meniča

Základným meraním vlastností DC-DC meniča so statickou LED záťažou sa overilo, že namerané hodnoty spĺňajú požiadavky návrhu, preto mohol byť menič bezpečne použitý pre napájanie LED displeja.

Pri meraní s LED displejom sa zistil prekmit napätia spôsobený multiplexovaním a tiež nízky maximálny prúd maticou LED. Prekmit sa podarilo znížiť použitím keramických kondenzátorov s dostupnou hodnotou  $130 \mu F$ , ktoré majú lepšie kompenzačné vlastnosti ako pôvodný elektrolytický kondenzátor. Experimentálne sa overilo, že zvýšením výstupného napätia je možné dosiahnuť maximálny požadovaný prúd. Príčinou nižšieho prúdu sú poddimenzované tranzistory. Tie budú nahradené v ďalšej verzii DPS. Z vyššie uvedených dôvodov bude displej využívaný s maximálnym prúdom 4,3 A.

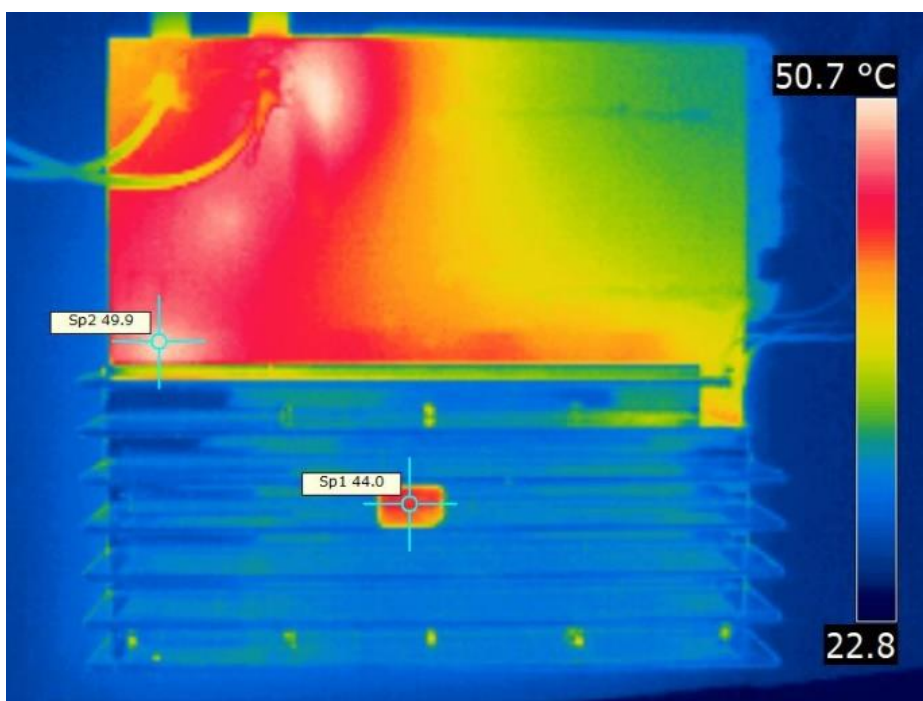
## 5.3 Termálne vlastnosti zariadenia

Meranie teplotných vlastností navrhovaného prototypu prebehlo v izbovej teplote ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) použitím termovíznej kamery FLIR T200. Meranie simulovalo analýzu najhoršieho prípadu, teda meranie pri maximálnej záťaži. V takom prípade sú rozsvietené všetky LED a maximálny prúd dosahuje 4,3 A. Vstupné napätie s úrovňou 8,7 V bolo zvolené ako spodná hranica trvalého napätia, pri ktorom musí zariadenie pracovať. Nižšie vstupné napätie zároveň znižuje aj účinnosť meniča. Pri nižšom napätí sa predlžuje dĺžka striedy, s ktorou menič spína, čo má za následok zvýšenie jednosmerných strát. Zariadenie bolo pred meraním zapnuté počas minimálne jednej hodiny. Výstupom merania sú termogramy zobrazujúce rozloženie tepla na prototypu (viď Obrázok 5.12 a Obrázok 5.13). Súčasne s týmto meraním prebehlo aj referenčné meranie multimetrom Fluke 179 s teplotným senzorom. Cieľom bolo overiť namerané hodnoty a tiež vylúčiť chyby merania tejto metódy. Nepresnosť merania termovíznou kamerou vzniká, pretože termovízna kamera meria emisivitu (schopnosť telesa vyžarovať teplo) a nie priamo samotnú teplotu telesa. Maximálnu emisivitu má ideálne čierne teleso, nepresnosť merania nastáva najmä hlavne pri lesklých povrchoch, ktoré majú nízku emisivitu, preto presnosť merania je najvyššia pri meraní čiernych povrchov [43]. Jedným z možných riešení, ako zlepšiť presnosť merania lesklých povrchov, je začerniť plochu.



Obrázok 5.12 Teplotné emisie prototypu – predná strana

Popis tepelných bodov na Obrázok 5.12. Bod Sp1 označuje teplotu integrovaného obvodu spínaného zdroja. Hodnota v druhom bode Sp2 odpovedá teplote spínacích tranzistorov. Tretí bod Sp3 vyjadruje teplotu radiacích obvodov LED.

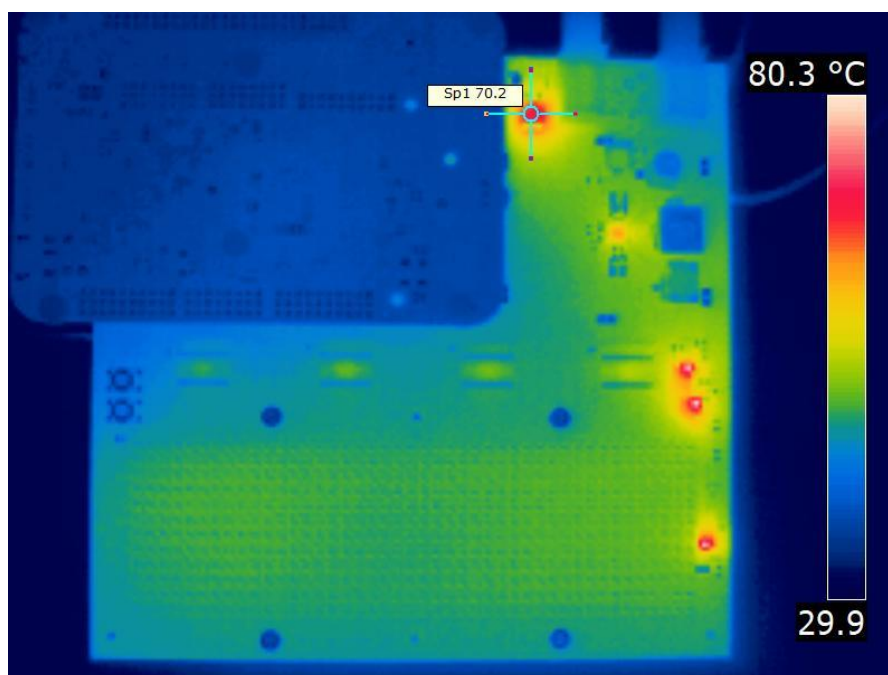


Obrázok 5.13 Teplotné emisie prototypu – zadná strana

Popis tepelných bodov na Obrázok 5.13. Bod Sp1 vyjadruje tepotu hliníkového chladiča nameranú na tmavom bode. Hodnota v bode Sp2 označuje miesto s najvyššou teplotou na zadnej strane DPS.

Rozloženie teploty zodpovedá do veľkej miery predpokladom a výpočtom. Teplota na PCB sa pohybuje v rozmedzí 28 až 80,5°C (Obrázok 5.12, bod Sp2). Najvyššiu teplotu majú tranzistory ovládajúce jednotlivé riadky matice. Tranzistory sú určené do prostredia s vysokou teplotou. Vďaka maximálnej prevádzkovej teplote až 175°C by dokázali pracovať pri maximálnej teplote okolia 85°C. Napriek tomu tranzistory vytvárajú horúce body, ktoré by mohli negatívne ovplyvniť napríklad LED v ich okolí, preto je vhodnejšie použiť iný typ tranzistora. Pri návrhu zariadenia boli zle dimenzované tranzistory, chyba je diskutovaná v časti 5.2. Pri ďalšej verzii zariadenia je nevyhnutné využiť väčšie puzdro tranzistora (s vyšším maximálnym stratovým teplom) a tiež zväčšiť plochu súvislej medi, ktorá by mohla odvádzať teplo.

Druhú najvyššiu teplotu vykazuje integrovaný obvod spínaného zdroja. Jeho maximálna teplota bola 56,8 °C (Obrázok 5.12, bod Sp1). Potvrdil sa teoretický výpočet, pretože zariadenie by teoreticky malo pracovať správne aj pri zvýšení teploty okolia o 60 °C. Teplota riadiacich obvodov LED je ešte o takmer 10 °C nižšia (Obrázok 5.12, bod Sp3). Súčasťou výpočtu termálnych strát bol aj lineárny regulátor. Na ňom pri vstupnom napätí iba 9 V nedochádza k veľkým úbytkom, preto bolo zariadenie testované aj pri vstupnom napätí 27 V (viď Obrázok 5.14). Vtedy maximálna teplota dosiahla až 71,8 °C. Toto meranie demonštruje závislosť medzi úrovňou vstupného napätia a tepelných strát na lineárnom regulátore.



Obrázok 5.14 Termogram vzorky pri vstupnom napätí 27 V

Na zadnej strane zariadenia bola maximálna teplota 49,9 °C (viď Obrázok 5.13, bod Sp2) v okolí spínacích tranzistorov. Na zadnej strane sa nachádza aj chladič, v meranom okamihu

jeho teplota dosahovala 44 °C (viď Obrázok 5.13, bod Sp1). Teplota blízka teplote LED potvrdzuje, že navrhovaný spôsob chladenia odvádza spoľahlivo teplo z LED diód.

Meranie teploty LED diód pomocou infračervenej kamery je z vyššie uvedených dôvodov nepresné. Teplota LED nameraná teplotným senzorom bola približne 41 °C. Táto teplota je o 9 stupňov nižšia ako teplota v teoretickom výpočte. Dôvodom je, že bol použitý chladič s väčšou plochou 790 cm<sup>2</sup> (pôvodne 286 cm<sup>2</sup>) a nižší priemerný maximálny prúd diódou (8 mA). Vďaka týmto zmenám sa podarilo overiť variantu výpočtu chladiča pre možnú sériovú výrobu. V takej podobe by zariadenie už takmer mohlo pracovať pri maximálnej teplote okolia 85 °C. Maximálna prevádzková teplota diód je 100 °C, pri teplote okolia 25 °C je ich teplota 41 °C. Pri teoretickej úvahe po zvýšení teploty o 60 °C by mala byť teplota diód 101 °C, čím by bola maximálna teplota prekročená iba o jeden stupeň Celzia.

### 5.3.1 Zhodnotenie merania tepelných emisií

Z rozboru teplôt nameraných pri izbovej teplote vyplýva, že teplotný návrh s výnimkou spínacích tranzistorov bol vypočítaný správne. Teoreticky by zariadenie malo pracovať správne aj pri teplote okolia 85 °C. Avšak s ohľadom na niektoré spomenuté hraničné hodnoty a riziká zničenia jedinej vzorky neboli vykonané testy pri teplote okolia 85 °C.

## 5.4 Rozptyl svetla

Homogenita LED matice je zvýšená použitím optiky v podobe difúzora. Princíp jeho funkcie je vysvetlený v kapitole 2.2.1 Homogenita svetla. V prvej fáze vývoja bolo využité transparentné plexisklo s matným povrchom. Jeho výhodou oproti mliečnemu sklu je efektívnejšie prepúšťanie svetla. Naopak, nevýhodou je, že difúzor musí byť vo väčšej vzdialenosti od zdroja svetla. Použitý difúzor musel byť vo vzdialenosti približne 5 cm, aby bola dosiahnutá požadovaná homogenita svetleného toku. Avšak z praktickej stránky možnej integrácie tohto riešenia do svetlometu bolo nutné nájsť lepšie riešenie. V rámci hľadania najlepšieho pomeru medzi homogenitou svetla a ostrosťou obrazca boli otestované rôzne druhy optických difúzorov. Išlo o transparentné plexisklá rôznych hrúbok a zrnitosti a tiež biele plexisklá rôznych hrúbok. Nakoniec bolo zvolené biele plexisklo s označením PLEXIGLAS® LED white 0V200 od spoločnosti Evonik. Zvolený difúzor má hrúbku iba 1mm a požadovanú homogenitu sa podarilo dosiahnuť vo vzdialenosti 5 mm od LED diód. Zároveň plexisklo má vďaka malej hrúbke vysokú priepustnosť svetla, podľa katalógového listu výrobcu je to až 73 % svetelného toku [44].

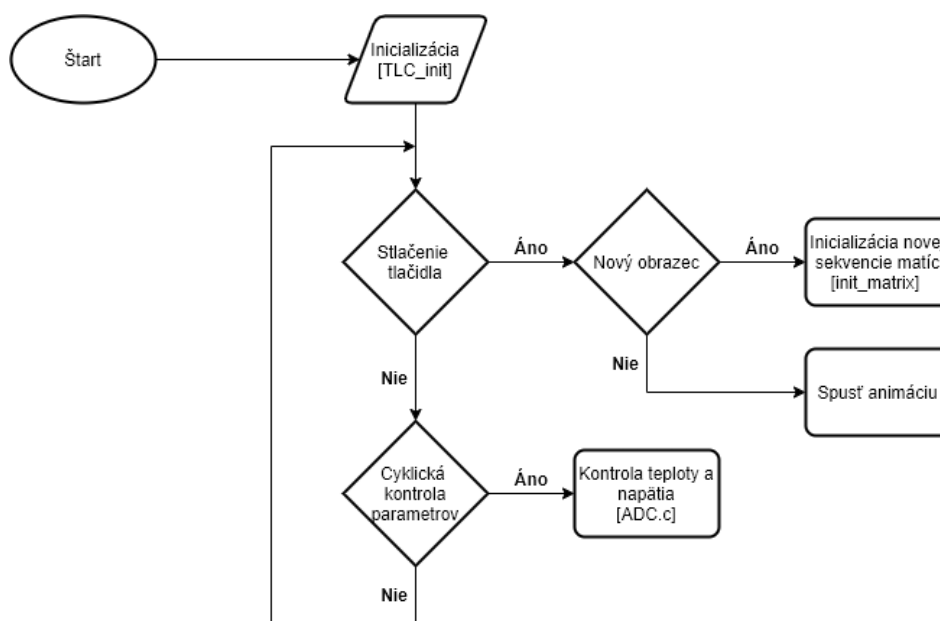
## 6 FIRMVÉR

Úlohou firmvéru je zabezpečiť ovládanie zariadenia a správne zobrazovanie dát na displeji. Zariadenie sa ovláda tlačidlami, preto je nutné vyhodnocovať vonkajšie vstupy. Zobrazovanie dát na displeji pozostáva z trojice funkcií: prípravy dát, ich odoslania do riadiacich obvodov prostredníctvom SPI a následného multiplexovania. Firmvér je doplnený o ochranné funkcie, ktoré chránia zariadenie pred prehriatím, chránia diódy pred prepätím a tiež reštartujú zariadenie v prípade straty komunikácie s riadiacimi obvodmi. Táto kapitola popisuje funkciu firmvéru pozostávajúceho z hlavného programu a podporných modulov.

### 6.1 Hlavný program

Základný program pozostáva z nekonečnej slučky a dvojice časovačov. V nekonečnej slučke sa vyhodnocujú tlačidlá a zabezpečuje sa cyklická kontrola teploty a výstupného napätia. Prvý z časovačov udáva obnovovaciu frekvenciu displeja. Tiež sa stará o spúšťanie komunikácie SPI a prípravu dát. Druhý časovač riadi dĺžku animácií.

Vývojový diagram hlavnej časti programu sa nachádza na Obrázok 6.1. Po štarte programu dôjde k inicializácii potrebných periférií ako sú výstupy, časovače, prerušenia, SPI komunikácia a riadiace obvody TLC5955. Nevyhnutnú inicializáciu vykoná modul s názvom TLC\_init.c. Detaily tejto inicializácie sú vysvetlené v časti 6.2.1 TLC\_init. Program potom plynulo prejde do nekonečnej slučky.



Obrázok 6.1 Vývojový diagram hlavného programu

#### 6.1.1 Nekonečná slučka

V prípade, ak došlo k stlačeniu jedného z tlačidiel, program odfiltruje zákmity tlačidla a vyhodnotí, ktoré z dvojice tlačidiel bolo použité. Funkcie tlačidiel sú požiadavka na zmenu

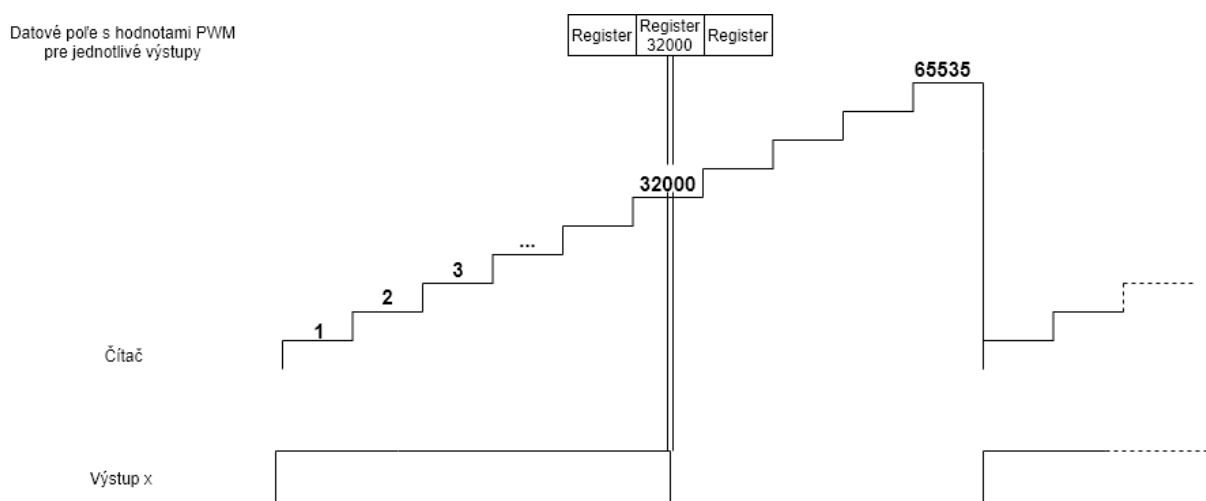


obrazca alebo prehratie animácie. Pri požiadavke na zmenu obrazca sa načítajú východiskové hodnoty pre nový obrazec (intenzita, prvá matica zo sekvencie) a pomocou modulu `init_matrix` sa prekopíruje sekvencia všetkých animačných matíc daného obrazca do pomocných dátových polí v pamäti SRAM. Tento prístup bol zvolený, aby dáta mohli byť z pamäte RAM rýchlejšie vyčítané ako z flash pamäte programu. Ak bolo stlačené tlačidlo pre spustenie animácie, prehrá sa nadefinovaná animácia. Tá môže pozostávať z postupnej zmeny intenzity LED svetla (dimming) alebo spustenia sekvencie snímok (matic) za užívateľom definovaný čas. Mnohé animácie môžu prebiehať v dvoch smeroch, napríklad animácia rozsvietenia a zhasnutia svetelnej funkcie. V oboch prípadoch sa animácia spustí rovnakým tlačidlom a program sám vyhodnotí, ktorý zo scenárov je potrebné prehrať.

Ďalšia podmienka v hlavnej slučke programu zabezpečuje spustenie ADC prevodu pre meranie teploty LED diód alebo napätia na nich.

## 6.1.2 Voľba frekvencie pre Timmer 1

Prvý časovač vyvolá prerušenie každé 2,5 ms, čím dochádza k obnovovaniu displeja s frekvenciou 400 Hz. V tomto prípade multiplexovania v pomere 1:3 je výsledná obnovovacia frekvencia celého displeja približne 133 Hz. Pôvodne plánovaná obnovovacia frekvencia 200 Hz pre celý displej, teda 600 Hz pre jednotlivé riadky musela byť znížená na 400 Hz. Dôvodom je samotný princíp funkcie riadiaceho obvodu TLC5955. Jednotlivé výstupy čipu využívajú šírkovú moduláciu pulzu (PWM) na nastavenie jasu (priemerného prúdu) LED diódy. PWM signál sa generuje tak, že pomocou externého hodinového signálu s frekvenciou 28 MHz sa zvyšuje hodnota vnútorného čítača. Aktuálna hodnota čítača je porovnávaná s hodnotami jednotlivých výstupov uloženými v registri. Ak sa hodnota čítača a registra rovná, dôjde k vypnutiu daného výstupu. Funkcia PWM regulácie v obvode TLC5955 je graficky znázornená na PWM. Má maximálne rozlíšenie 16 bitov, preto po dosiahnutí hodnoty 65 535 dôjde k reštartovaniu čítača a všetky výstupy sú uvedené do zapnutého stavu. Obrázok 6.2 graficky znázorňuje tento dej.



Obrázok 6.2 Grafické znázornenie PWM regulácie v integrovanom obvode TLC5955

Krátkym výpočtom sa určí čas potrebný pre 100 % PWM, teda maximálny prúd diódou:

$$\frac{n_{100\%PWM}}{Clk_{max}} = \frac{65535}{28 \cdot 10^6} = 2,34 \text{ ms}, \quad (6.1)$$

kde  $n_{100\%PWM}$  je maximálny počet krokov PWM a  $Clk_{max}$  je hodinový signál v Hz.

Keďže pri obnovovacej frekvencii 600 Hz svieti jeden riadok matice iba približne 1,7 ms a pri zmene riadku je čítač vynulovaný, nebolo by fyzikálne možné dosiahnuť maximálnu PWM. Zapríčinilo by to aj zníženie maximálneho prúdu jedným kanálom TLC5955, preto bola frekvencia zmenená na hodnotu 400 Hz. Tým sa predĺžilo časové okno pre jeden riadok na 2,5 ms. Vzniknutá časová rezerva posluži na postupné spínanie jednotlivých výstupov, aby nedošlo k prudkému nárastu prúdu v jednom okamihu. Ide o vstavanú funkciu čipu. Celková obnovovacia frekvencia displeja je 133 Hz. Nedodržanie požiadavky 200 Hz nepredstavuje reálny problém. Na to, aby ľudské oko nespозorovalo multiplexovanie stačí obnovovacia frekvencia 50 Hz. Tá sa bežne používa pri počítačových obrazovkách. Hodnota 200 Hz bola zvolená ako maximálna hodnota požadovaná automobilkami.

### 6.1.3 Časovač 1

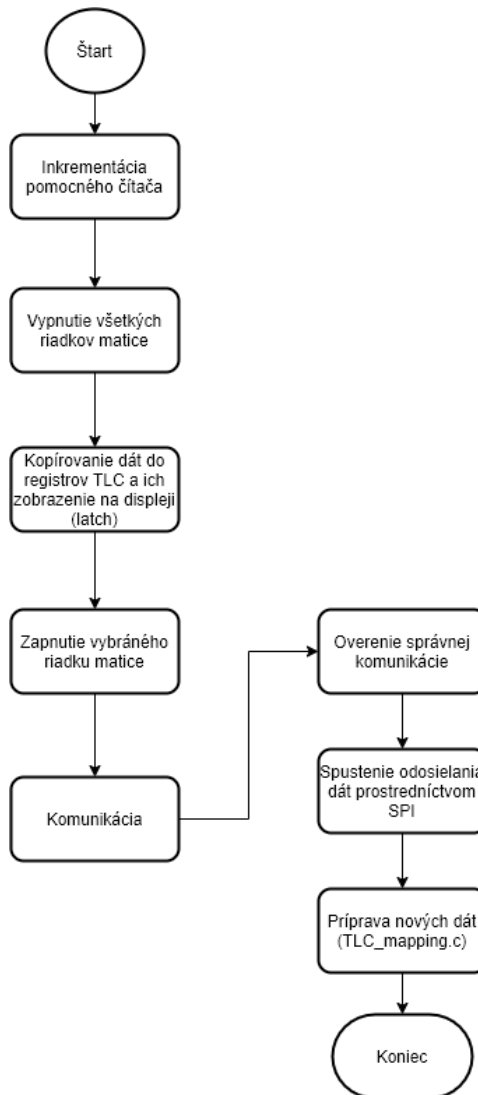
Pri obsluhu rutiny prerušenia sa ako prvé vypnú všetky tranzistory. Bezprostredne potom sa prekopírujú a zobrazia nové LED dáta, ktoré boli odoslané do čipov v predchádzajúcom prerušení. Tento proces spúšťa riadiaca hrana signálu latch. Následne dôjde k prepnutiu tranzistorov tak, aby boli napájané nasledujúce multiplexované riadky. V poslednom kroku sa spracúva komunikácia pozostávajúca z prípravy a odoslania dát pre nasledujúce riadky. Vývojový diagram celého prerušenia sa nachádza na Obrázok 6.3

### 6.1.4 Komunikácia

V prvom kroku komunikácie sa overí, či mikroprocesor komunikuje s čipmi TLC a či sú dáta správne. Pri kontrole sa využíva, že registre TLC fungujú ako posuvný register a dáta s údajmi pre nový riadok vysúvajú pôvodné dáta na SPI vstup mikroprocesora. Pre kontrolu sa dáta jednoducho porovnajú s pôvodne odoslanými dátami.

V druhom kroku komunikácie sa spustí odoslanie dát prostredníctvom SPI komunikácie s rýchlosťou 8000000 Baud. Celá komunikácia je ovládaná pomocou prerušenia v režime eDMA (Enhanced Direct Memory Access), ktorá umožňuje odosielať údaje na pozadí procesov a vytvára tak výkonovú rezervu pre potrebné výpočty.

V poslednom kroku komunikácie sa zaháji príprava dát pre nasledujúci riadok displeja zavolaním funkcie z modulu TLC\_mapping, ktorý je bližšie popísaný v časti 6.2.3 TLC\_mapping. Aby bolo možné v rovnakom čase odosielať dáta a zároveň pripravovať nové, je použitá dvojica dátových polí medzi ktorými sa prepína. To umožňuje efektívnejšie využitie mikroprocesora.



Obrázok 6.3 Vývojový diagram obsluhy prerušenia časovača 1

## 6.2 Moduly

Významnú úlohu v činnosti programu majú moduly s názvom `TLC_init`, `TLC_mapping`, `init_matrix` a `ADC`. `TLC_init` sa stará o počiatočnú inicializáciu a nastavenie integrovaných obvodov TLC5955. Modul s názvom `TLC_mapping` transformuje virtuálne matice v pamäti na dátové polia hodnôt, ktoré sa neskôr odošlú pomocou SPI. O ukladanie dát pre aktuálnu animáciu do pamäte SRAM sa stará `init_matrix`. Prevod analógových veličín do digitálnej podoby a ich transformáciu na napätie alebo teplotu zabezpečuje modul s názvom `ADC`.

### 6.2.1 `TLC_init`

Tento modul zabezpečuje počiatočnú inicializáciu obvodov TLC5955. Po pripojení napájania sú všetky výstupy čipu vypnuté, preto je potrebné vykonať opakované načítanie inicializačných dát do spoločného posuvného 769 bitového registra čipu. Posuvný register je spoločný pre dáta, ktoré nastavujú PWM časovanie výstupov a pre inicializačné dáta.



```

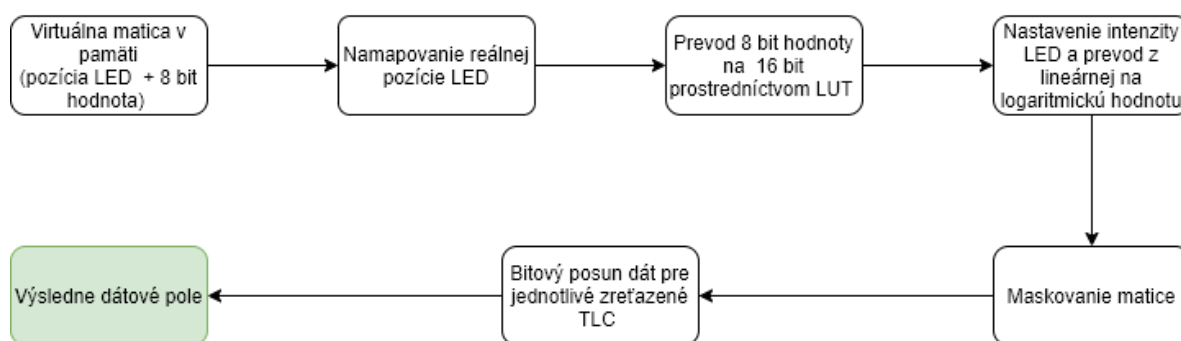
//7
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//2
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//3
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000},//2
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//3
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//1
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//2
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//3
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//1
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//2
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//3
},
//8
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//2
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//3
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000},//2
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//3
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//1
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//2
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//3
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//1
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//2
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//3
},
//9
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//2
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//3
{0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000,0b11111111,0b11110000},//1
{0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000,0b00000001,0b11110000},//2
{0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000,0b00000011,0b11110000},//3
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//1
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//2
{0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000,0b00000000},//3
},
):

```

Obrázok 6.5 Časť sekvencie maskovacej matice

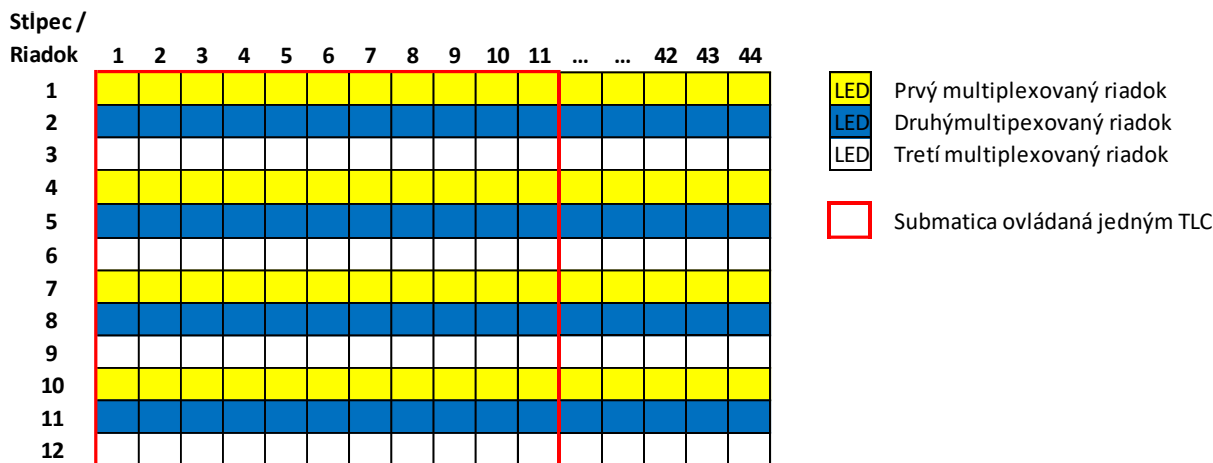
### 6.2.3 TLC\_mapping

Úlohou modulu je pripraviť pole dát s 16 bitovými hodnotami pre nastavenie jasu LED (veľkosti prúdu) jednotlivých kanálov. Príprava dát je pomerne komplexný proces, ktorý zahŕňa sériu krokov: mapovanie výstupov, prevod komprimovanej hodnoty, prevod jasu na logaritmickú funkciu, maskovanie matice a bitový posun. Celý proces je graficky znázornený na Obrázok 6.6.



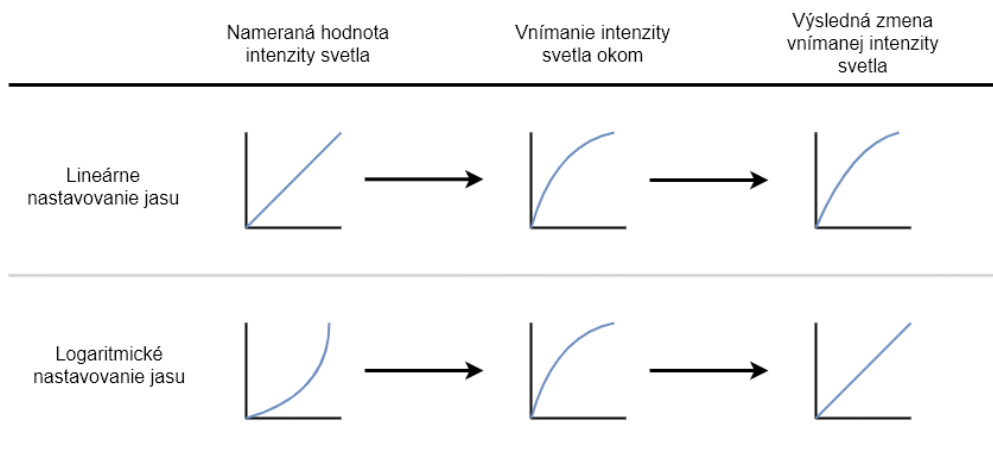
Obrázok 6.6 Príprava poľa dát pre nastavenie jasu LED

Každý z integrovaných obvodov TLC ovláda submaticu  $11 \times 12$  LED. Spojením štyroch TLC sa ovláda celá matica LED s rozmiestnením  $12 \times 44$ . V procese generovania dát sa pripraví pole s hodnotami pre 176 LED diód. V elektrickom zapojení to odpovedá jednému z troch multiplexovaných riadkov. V reálnom usporiadaní LED je jeden riadok rozdelený do štyroch subriadkov. Pri zobrazení jedného z multiplexovaných riadkov sa v skutočnosti rozsvieti každý tretí riadok na matici. Rozloženie je graficky znázornené na Obrázok 6.7.



Obrázok 6.7 Grafické znázornenie zapojenia subriadkov LED matice

Preto aj pri generovaní sa postupne prechádza hodnotami každého tretieho riadku virtuálnej matice uloženej v pamäti (viď Obrázok 6.4). V skutočnosti je usporiadanie výstupov integrovaného obvodu TLC výrazne odlišné. Hlavnou príčinou bola snaha o efektívne usporiadanie spojov na doske plošných spojov. Z tohto dôvodu je nevyhnutné virtuálne usporiadať poradie výstupov. Preto sa k hodnote priradí z vyhľadávacej tabuľky (LUT) index s reálnym poradím výstupu. Následne je 8 bitová hodnota prevedená podľa ďalšej LUT na 16 bitovú hodnotu. Pre pozorovateľa má vysoké rozlíšenie jasu význam hlavne v prípade stmievania LED diód. Pri 8 bitovom rozlíšení môže nastať viditeľný skok v intenzite svetla pri prechode medzi susednými hodnotami intenzity. Riešením je napríklad stmievanie s logaritmickým krokom. V programe je výpočet logaritmu nahradený LUT tabuľkou, ktorá obsahuje 255 hodnôt logaritmickkej funkcie s úrovňami od 0,1% po 100%. Tvar logaritmickkej krivky je daný normou IEC 62385-102 [46]. Použitím logaritmických hodnôt sa kompenzuje nelineárne vnímanie zmeny intenzity jasu ľudským okom. Vo výsledku sa potom zmena intenzity svetla javí ako lineárna (viď Obrázok 6.8).



Obrázok 6.8 Rozdiel medzi logaritmickou a lineárnou zmenou jasu

Ďalším blokom v poradí je blok, ktorý sa využíva iba v prípade vytvárania animácie pomocou maskovania. Na základe aktuálnej maskovacej matice rozhodne, či má byť načítaná úroveň intenzity matice na pozadí (logická 1), alebo daná LED ma byť vypnutá (logická 0).

Posledným krokom pred vznikom výsledného poľa je bitový posun dát. Tento proces je nevyhnutný kvôli fyzickým vlastnostiam integrovaných obvodov TLC a ich zapojeniu. Obvod TLC obsahuje už spomínaný posuvný register s veľkosťou 769 bitov. Ten sa dá rozložiť na  $96 \times 8$  bitov + 1 bit, kde dva 8 bitové prvky poľa uchovávajú hodnotu jedného z výstupov a najvýznamnejší 1 bit má riadiacu funkciu. Práve tento 1 bit vytvára neúplný prvý prvok poľa. Keďže pri zretiazenom zapojení čipov registre nadväzujú priamo na seba, musia byť dáta pre druhý integrovaný obvod posunuté o 7 bitov doľava, aby priamo nasledovali za prvým riadiacim bitom predchádzajúceho obvodu. Dáta v treťom obvode musia byť posunuté o 6 bitov atď. V spojení s neusporiadaným poradím výstupov tak vzniká zaujímavý algoritmus indexovania prvkov poľa. Logaritmus pre bitový posun druhého TLC, 16 bitová hodnota PWM musí byť rozložená do dvoch 8 bit hodnôt, kvôli posuvu je nutné rozloženie do troch buniek. Premenná `index` udáva poradie v reťazci. Hodnota sa neinkrementuje po poradí, ale ako bolo vysvetlené, odráža reálne usporiadanie výstupov. Nasleduje kód bitového posuvu.

```
//prvá bunka, bunka ktorá obsahuje 1 bit z hodnoty susedného výstupu
temp=value;
old=0;
//vezmi posledný bit z bunky (bunka s najvyšším poradovým číslom) a ulož ho
do premennej old
old=buf[len-1-(index+(k-1)*97)+1] & 0x1;
//[len je dĺžka celého poľa,-1 pretože v C je indexovanie od 0, (k-1)*97
Adresovanie posunuté pre ďalšie TLC, +1: posun na susednú bunku, posun je
kladný kvôli reverznému usporiadaniu]
//ulož 7 bitov z novej hodnoty a jeden zo starej
buf[len-1-(index+(k-1)*97)+1]=((temp<<1)|old);

//druhá bunka (prvá bunka, ak by nedošlo k posuvu)
temp=value;
//ulož bity od 8 po 15 do správnej bunky
buf[len-1-(index+(k-1)*97)] = (temp>>7) & 0xFF;

//tretia bunka
//ulož prvých sedem bitov v bunke, ktoré môžu patriť susednému výstupu do
premennej old
old=buf[len-1-(index+(k-1)*97)-1] & 0xFE;
//vezmi prvý bit z novej hodnoty
temp=value >> 15;
// ulož starých sedem a jeden nový do tretej bunky - bez posunu druhá bunka
(bunka s najnižšou hodnotou)
buf[len-1-(index+(k-1)*97)-1] = temp | old;
```

## 6.2.4 ADC

Tento modul sa stará o inicializáciu a spracovanie dát ADC prevodníka za účelom ochrany zariadenia pred vysokou teplotou a dlhodobým prepätím.

ADC prevod oboch veličín je vyvolaný softvérovým spúšťačom (trigger) z hlavnej slučky programu v ľubovoľne definovateľných cykloch. Na prevod sa využíva samostatný časovač, to umožňuje prevod na pozadí hlavného programu. Úspešný prevod vyvolá prerušenie. Prevodník

pracuje s rozlíšením 8 bitov. Podľa toho, či ide o meranie napätia alebo teploty, sa v rámci prerušenia zavolá potrebná prevodná funkcia.

V prípade merania napätia sa výsledná hodnota ADC prevodu porovná s referenčným napätím, a tým sa vypočíta napäťová úroveň na výstupe meniča. V prípade, ak by napätie na výstupe presiahlo maximálnu stanovenú hranicu, dôjde k softvérovému vypnutiu napájania riadkov a tiež vypnutiu výstupov riadiacich obvodov LED v snahe ochrániť diódy pred zničením.

Na meranie teploty LED matice sa používa termistor s negatívnym teplotným koeficientom. Ide o špeciálny typ rezistoru, ktorého elektrický odpor sa nelineárne mení v závislosti od teploty, preto sa ADC prevodníkom meria úbytok napätia na odpore, z ktorého sa odvodí aktuálny odpor termistora. Na prepočet odporu a linearizáciu krivky sa využíva Steinhart-Hartova rovnica [47], ktorá aproximuje teplotnú charakteristiku:

$$\frac{1}{T} = a + b \cdot \ln(R) + c \cdot \ln^3(R), \quad (6.2)$$

kde  $T$  je teplota v Kelvinoch,  $R$  je odpor v Ohmoch,  $a, b, c$  sú Steinhart-Hartove parametre (konštanty špecifické pre konkrétny termistor)

Keďže katalógový list termistora obsahoval iba parameter  $b$ , preto bol použitý zjednodušený vzorec [48] :

$$R_T = R_0 \cdot e^{b \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (6.3)$$

kde  $R_0$  je odpor rezistora v  $\Omega$  pri teplote  $T_0$ ,  $b$  je koeficient charakteristický pre daný termistor,  $T_0$  je izbová teplota (298,1 K) v Kelvinoch, pri ktorej výrobca udáva charakteristický odpor  $R_0$ .

Ochrana LED proti prehriatiu prebieha v dvoch stupňoch. Pri prekročení prvého maximálneho limitu (60 °C) dochádza k znižovaniu jasu (maximálneho prúdu diódou) a to o 5 krokov na 1 °C z rozsahu 255 v logaritmickej LUT do teploty 70 °C. Minimálna úroveň je 30 % pôvodnej hodnoty. Práve 70°C je ďalší teplotný limit, pri teplotách vyšších ako táto hodnota prejde zariadenie do núdzového stavu, kedy pri minimálnom jase upozorňuje užívateľa o prehriati nápisom „hightem“. Po opätovnom poklese teploty pod 60 °C sa zariadenie vráti do pôvodného režimu. Tepelná ochrana slúži len na ochranu prototypu proti poškodeniu. Nebola navrhnutá podľa požiadaviek v automobilovom priemysle na minimálnu intenzitu svetla.



# 7 TESTOVANIE ZARIADENIA

Kapitola popisuje testovanie zariadenia, ktoré je neoddeliteľnou súčasťou vývoja v automobilovom priemysle. Zariadenie podstúpilo elektrické testy a testy EMC.

## 7.1 ELEKTRICKÉ TESTY

Táto podkapitola sa venuje elektrickým testom zariadenia. Obsahuje súbor testovaných scenárov, ich výsledky a detailné ukážky vybraných testov. Úlohou elektrických testov je deklarovat' správnu funkciu (daná normou) zariadenia pri zmenách v napájaní. Jednotlivé testy reflektujú zmeny v elektrickej sieti, ktoré sú spôsobené prevádzkou vozidla. Bližšie je testovanie popísané v kapitole 3.1 Základné elektrické testy.

Testovanie podliehalo norme VW80000 z roku 2017 [18]. Testovanie prebehlo na profesionálnych zariadeniach. Testovacie pracovisko pozostávalo z počítača, napäťového zdroja Toellner TCE 7621, automotive generátor Autowave, generátora napäťových prerušení PFM200N100 a osciloskopu LecRoy WaveRunner 64MXi-A. Sledované boli tri veličiny: vstupné napätie (kanál C2 na grafoch z osciloskopu, vstupný prúd (kanál C1) a výstupné napätie (kanál C3). Testy boli obmedzené iba na meranie pri izbovej teplote 25 °C. Súbor všetkých vykonaných testov sa nachádza v Tabuľka 8. Za účelom skrátenia celkového času testovania, ktorý pri vykonaní všetkých testov predstavuje približne tri týždne, bol v prvom rade obmedzený súbor všetkých testovacích scenárov. Taktiež bol výrazne znížený počet opakovacích cyklov pri testoch s vysokým počtom opakovaní. V prípade, ak jeden test obsahoval niekoľko podobných variantov, testoval sa iba variant najhoršieho prípadu. Takto redukovaný test nemožno prehlásiť za plnohodnotný test pre automobilku, avšak pre potreby tejto práce dostatočne overí správnosť návrhu zariadenia.

Norma VW80000 obsahuje niekoľko tried funkčností, tie vyjadrujú určenie zariadenia pre rôzne funkcie, napríklad funkcie, ktoré sú potrebné len počas naštartovaného motoru alebo funkcie pre účely diagnostiky. Jednotlivým funkčným triedam odpovedajú rozličné funkčné statusy pre jednotlivé testy. Automobilka zvyčajne radí svetlá do funkčnej skupiny 2, ktorá odpovedá zariadeniam s vysokou spoľahlivosťou.

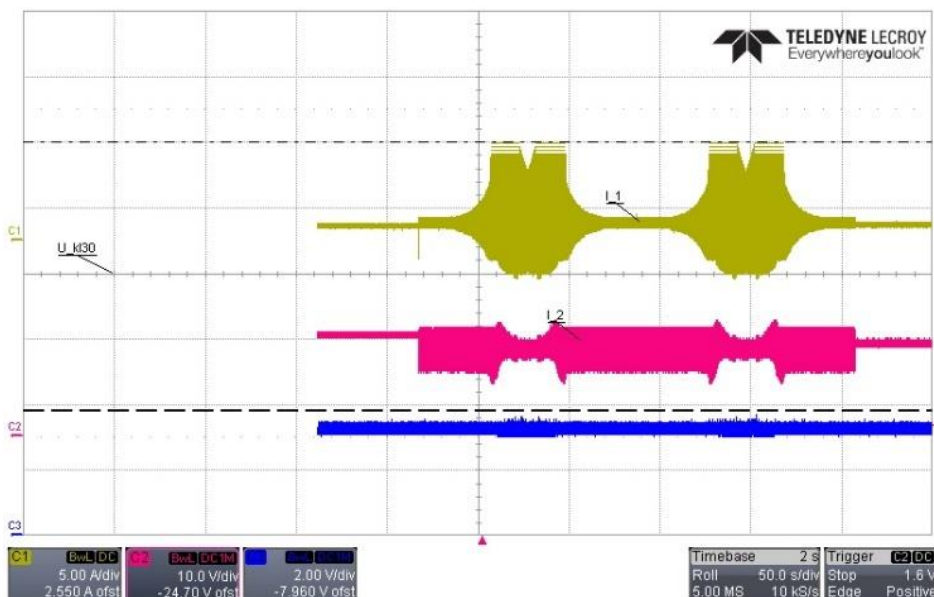
Tabuľka 8 Zoznam vykonaných elektrických testov

Originálny názov	Slovenský preklad	Rozsah napätia [V]	Trvanie	Požadovaný funkčný status	Výsledok testu
<b>E-01 Long-term overvoltage</b>	Dlhodobé prepätie	16-17	≤ 1 h	A	OK
<b>E-02 Transient overvoltage</b>	Prechodné prepätie	17 – 18 16 – 17	≤ 400 ms ≤ 600 ms	A	OK
<b>E-03a Transient undervoltage</b>	Prechodné podpätie a	≥ 9		A	OK
<b>E-03b Transient undervoltage</b>	Prechodné podpätie b	≥ 6	500 ms	A	OK
<b>E-04 Jump start</b>	Skokový štart	17 – 26	≤ 60 s	C	OK

<b>E-05 Load dump</b>	Výboj elektrickej záťaže	18 – 27	$\leq 300$ ms	A	OK
<b>E-06 Ripple voltage</b>	Zvlnenie napätia			A	OK
<b>E-07 Slow decrease and increase of the supply voltage</b>	Pomalý pokles a nárast vstupného napätia	$\geq 6$ $< 6$		A C	OK
<b>E-08 Slow decrease, quick increase of the supply voltage</b>	Pomalý pokles a rýchly nárast vstupného napätia	$\geq 6$ $< 6$		A C	OK
<b>E-09 Reset behavior</b>	Správanie pri resete	$\geq 6$ $< 6$		A C	OK
<b>E-10 Brief interruptions</b>	Krátke prerušenia	$\geq 0$	$\leq 100$ $\mu$ s	A	OK
<b>E-11 Start pulses</b>	Štartovací pulz	$\geq 7$ $\geq 4.5$ $\geq 3.2$		A C C	OK
<b>E-12 Voltage curve with electric system control</b>	Krivka napätia s elektrickým ovládaním systému	-	-	A	OK

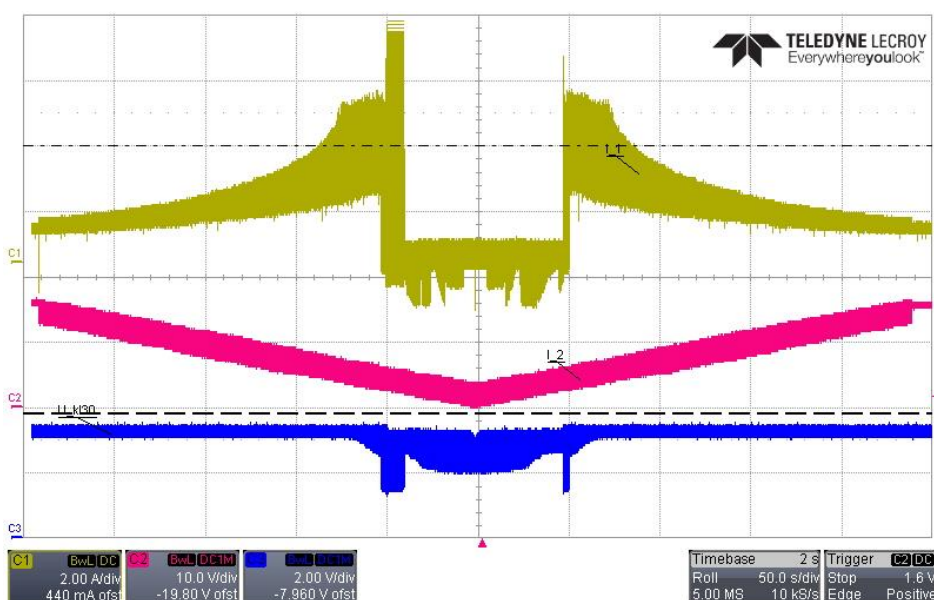
Testy s označením E1 až E3 by sa mali vykonávať na okraji prípustných teplôt, teda pri -40 °C a 85°C teploty okolia. Kvôli rizikám uvedeným v časti 5.3 Termálne vlastnosti zariadenia prebehli iba pri izbovej teplote. Zariadenie splnilo v tejto sérii testov funkčný status A. Zariadenie vyhovelo prepätiam, pretože lineárny regulátor aj spínaný zdroj pracujú do vstupného napätia až 45 V. V prípade podpätia, kde je minimálne napätie 6 V, je výhodou maticového zapojenia, kedy je v jednom okamihu zapojená iba jedna LED v sérii, preto je potrebné napätie približne 3 V. Iná situácia nastáva pri použití dvoch LED v sérii, kedy je nutné zvoliť spínaný zdroj s nízkym úbytkom napätia.

Test E4 simuluje napájanie z externého zdroja. Zariadenie dosiahlo požadovaný status. Test E5 simuluje vysoko energetický prepäťový pulz. Maximálne napätie pulzu je 27 V. Práve tento faktor zohral hlavnú úlohu pri voľbe transilu, ktorý orezáva prepäťové špičky nad úroveň 28 V. Pri teste E6, kedy sa zariadenie testuje voči superponovanému striedavému napätiu, boli testované 2 scenáre. Prípad druhého predstavoval najhorší prípad testu, kedy superponovaná striedavá zložka kmitá s rozsahom špička-špička až 6 V. Striedavé napätie je rozmetané v rozsahu 15 Hz až 30 kHz (viď Obrázok 7.1).



Obrázok 7.1 Priebeh testu E-06 Zvlnenie napätia

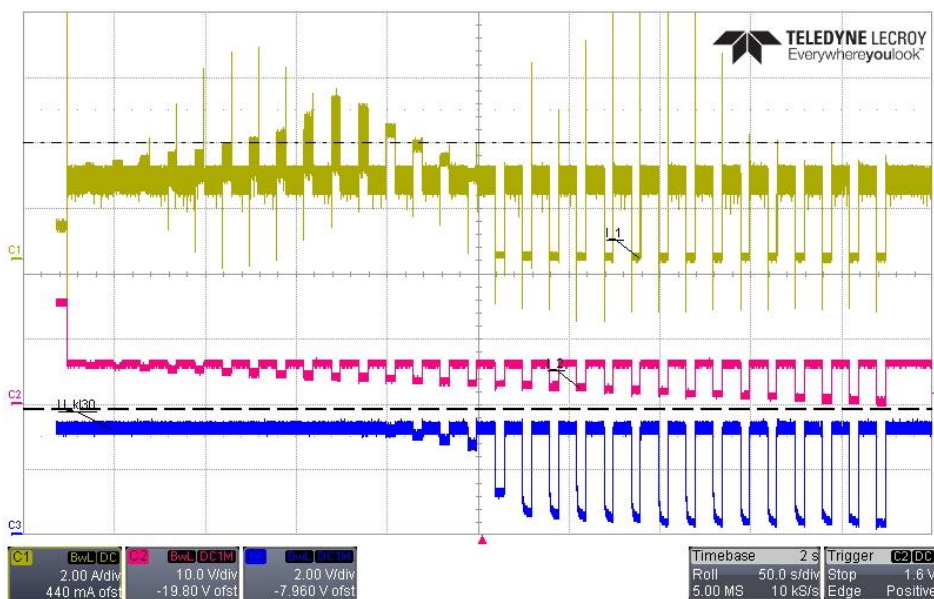
V teste s označením E07 je zaujímavý variant b, ktorý kombinuje pokles a rast napätia so superponovanou sínusoidou s frekvenciou 50 Hz s rozkmitom 3 V. Zariadenie pracovalo správne v požadovanom rozsahu vstupných napätí, ale ako je možné vidieť z priebehu na osciloskope (viď Obrázok 7.2), mimo funkčného rozsahu ( $> 6$  V) došlo ku krátkym rozkmitaniam spínaného zdroja. Nemá to však vplyv na výsledok testu. Požaduje sa funkcia zariadenia iba v oblasti funkčného rozsahu.



Obrázok 7.2 Priebeh testu E-07 Pomalý pokles a nárast vstupného napätia

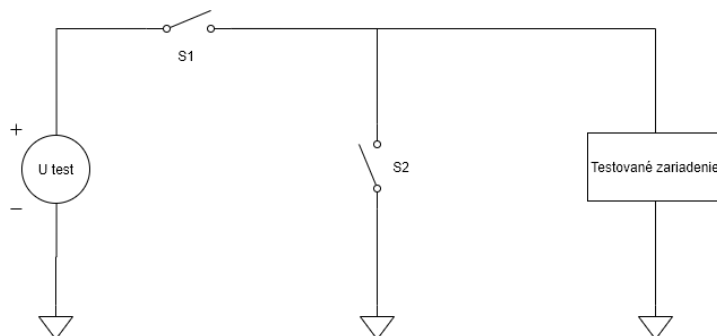
Test E08 je obdobou základného testu E07, zariadenie v požadovanom rozsahu pracovalo správne. Test E09 primárne slúži na určenie kritickej hodnoty napätia, pri ktorej dôjde k reštartu daného zariadenia. V prípade testovaného zariadenia došlo k prvým významnejším zákmitom

výstupného napätia pri kritickej hodnote 3,5 V. Definitívny reštart nastal, ak vstupné napätie krátkodobo dosiahlo hodnotu 2V. Obrázok 7.3 dokumentuje priebeh testu.

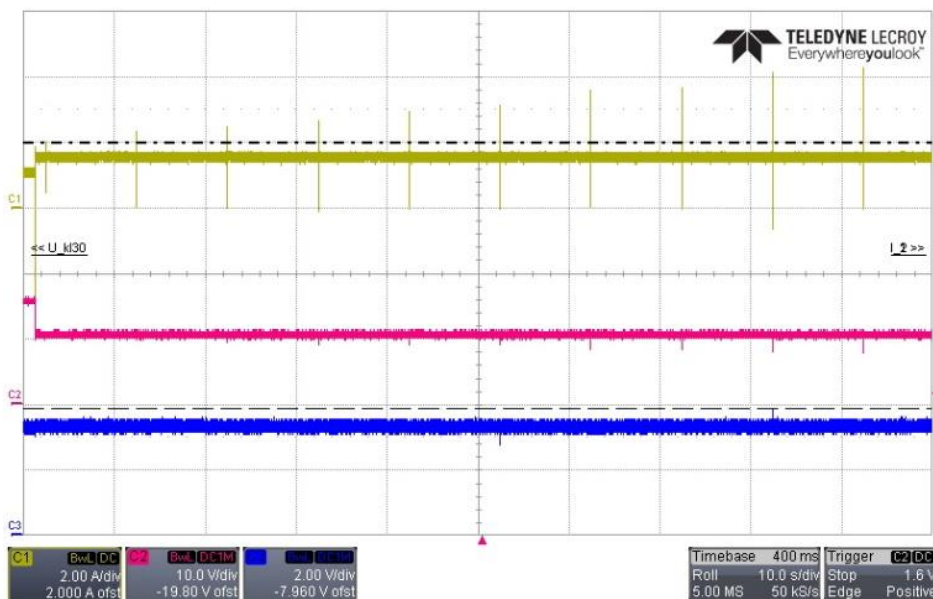


Obrázok 7.3 Priebeh testu E-09 Správanie pri resete

Test E 10 simuluje prerušenie napájania do zariadenia alebo celého elektrického systému. Tento test vyžaduje špecifické zapojenie, kedy je napájanie fyzicky pomocou relé odpájané. Ide o kritickej test, pretože zariadenie musí správne fungovať v prípade straty napájania na počas doby až 100  $\mu$ s. Z toho dôvodu je nevyhnutné dostatočné dimenzovanie vstupných a výstupných kapacít. Aj v tomto prípade je výhodou zapojenie iba jednej diódy v sérii, kedy sa môže kondenzátor vybíjať až po nižšiu hodnotu napätia a odovzdať viac energie. Simuluje sa strata napájania na testovanom zariadení, odpojením spínača S1 (viď Obrázok 7.4), spínač S2 je stále odpojený. Splnenie tohto testu deklaruje Obrázok 7.5, kde sa nachádzajú prerušenia v rozsahu 10  $\mu$ s až 100  $\mu$ s.



Obrázok 7.4 Schéma zapojenia testovacieho zariadenia pre test E10



Obrázok 7.5 Priebek testu E-10 scenár 1

Test E11 s názvom štartovacie pulzy testuje správanie zariadenia počas štartu motora, kedy dochádza k rôznym osciláciám v napájacej sieti. Rozlišuje sa dvojica scenárov, a to štart za studena a za tepla. Pri štarte za studena sa simuluje štart motora bo dlhom vypnutí. V prípade teplého štartu sa simuluje funkcia systému štart-stop. Zariadenie dosiahlo vo všetkých variantoch testu požadovaný status A.

V teste s Označením E12 sa simuluje správanie elektrického systému s kontrolou napätia, napríklad v prípade DC-DC meniča. Zariadenie dosiahlo funkčný status A.

### 7.1.1 Zhodnotenie elektrických testov

Zariadenie splnilo požiadavky všetkých testov s obmedzeniami uvedenými v úvode tejto kapitoly. Tento test nemôže byť považovaný za oficiálny test podľa normy VW80000. Napriek tomu, boli použité testy tejto normy a deklarujú správny návrh zariadenia podľa väčšiny požiadaviek skupiny VW. Grafy so záznamom priebehu všetkých testov sú súčasťou prílohy digitálnej verzie tejto práce.

## 7.2 EMC

V tejto časti testovania sa overovala elektromagnetická kompatibilita navrhnutého prototypu. Testovanie je neodmysliteľnou súčasťou vývoja elektroniky v automobilovom priemysle, pretože všetky elektronické komponenty v aute musia byť navrhnuté v súlade s prísnyimi EMC normami. Ďalšie všeobecné informácie sa nachádzajú v časti 3.2 Elektromagnetická kompatibilita (EMC).

Zariadenie bolo podrobené testu rušivých signálov na vedení (conducted emissions - CE) a testu rušivého vyžarovania (radiated emissions - RE). Meranie sa uskutočnilo v poloodrazovej EMC komore v spoločnosti Hella. V poloodrazovej komore sú všetky steny a strop s výnimkou podlahy pokryté bezodrazovým materiálom (v tomto prípade štvorbokými ihlanmi). Meranie prebehlo podľa normy skupiny Volkswagen s označením TL81000 [24]. Usporiadanie

meracieho pracoviska sa líšilo pre jednotlivé testy a je dané priamo normou CISPR 25 [23]. V prípade merania CE bolo zariadenie napájané pomocou umelej meracej siete (AN) pripojenej k EMC meraču rušenia Rohde Schwarz ESR7. V prípade merania RE sa používa EMC prijímač Rohde Schwarz ESR7 v kombinácii s anténou.

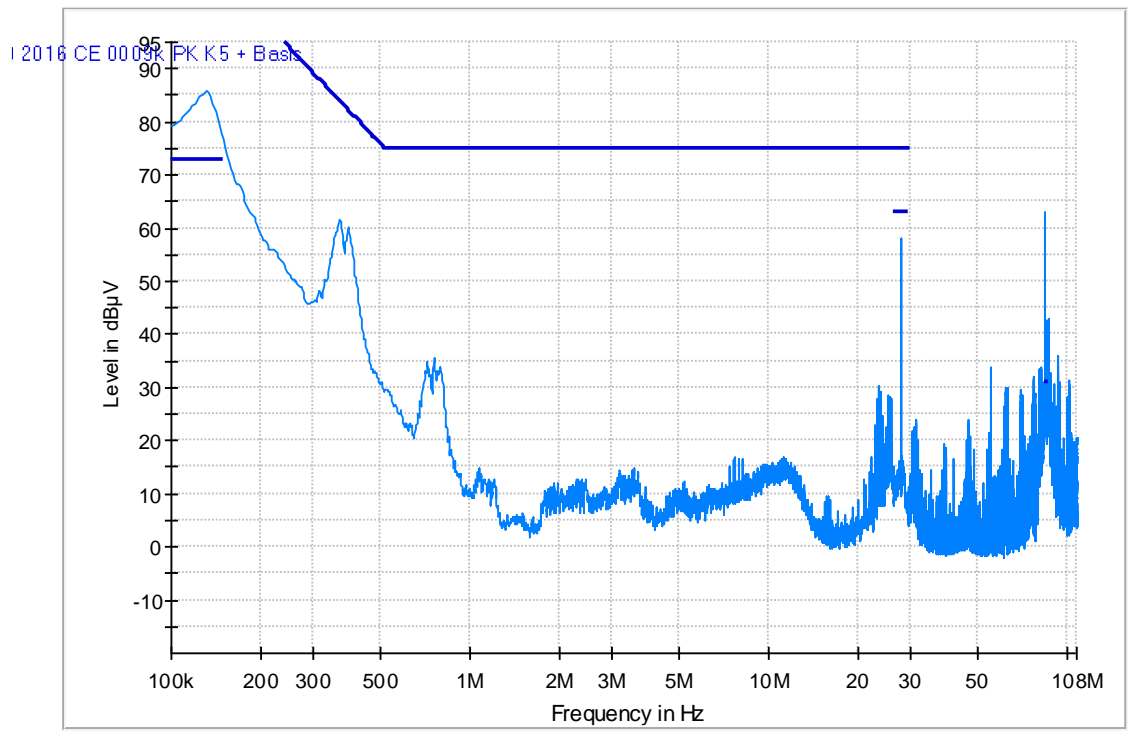
### 7.2.1 Conducted emissions

Týmto testom sa merajú rušivé signály, ktoré prenikajú z testovaného zariadenia (DUT) do napájacej siete. Samotné meranie je v rozsahu frekvencií 100 kHz až 108 MHz pre kladný aj záporný pól napájania. Detailné informácie o meraných šírkach pásma, subpásma, kroku a použitých detektoroch sú v Tabuľka 9. Požíva sa špičkový detektor alebo nazývaný aj detektor vrcholovej hodnoty (PK). Tento detektor zaznamenáva maximálnu veľkosť obálky a slúži na získanie rýchleho prehľadového merania. Kvázi-špičkový detektor (QPK) simuluje vnímanie akustických signálov ľudským uchom. Detektor strednej hodnoty (AVG) alebo priemerujúci detektor zaznamenáva strednú hodnotu obálky rušivého signálu [49].

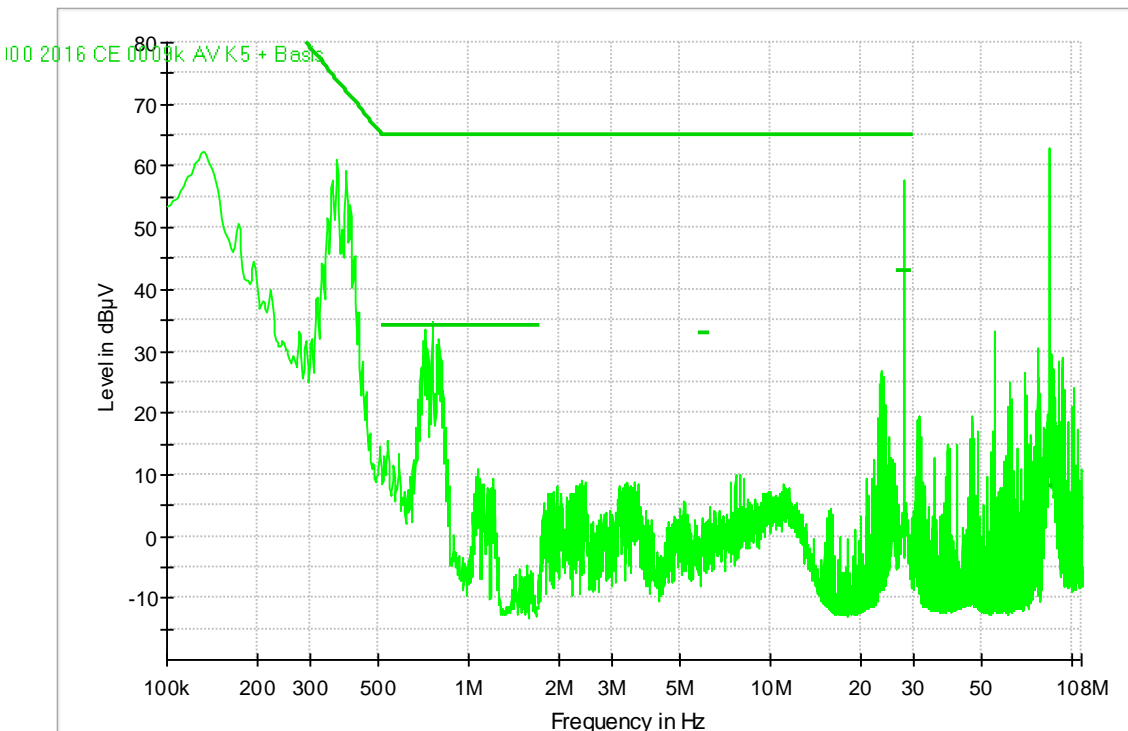
Tabuľka 9 Detail meraných frekvencií pre CE

Pásmo	Subpásmo	Krok	Detektor	Doba merania subpásma
<b>0,1 – 30 MHz</b>	9 kHz	2,25 kHz	PK,AVG,QPK	1 s
<b>30 - 108 MHz</b>	120 kHz	30 kHz	PK,AVG,QPK	1 s
<b>30 - 108 MHz</b>	1 MHz	250 kHz	PK,AVG	1 s

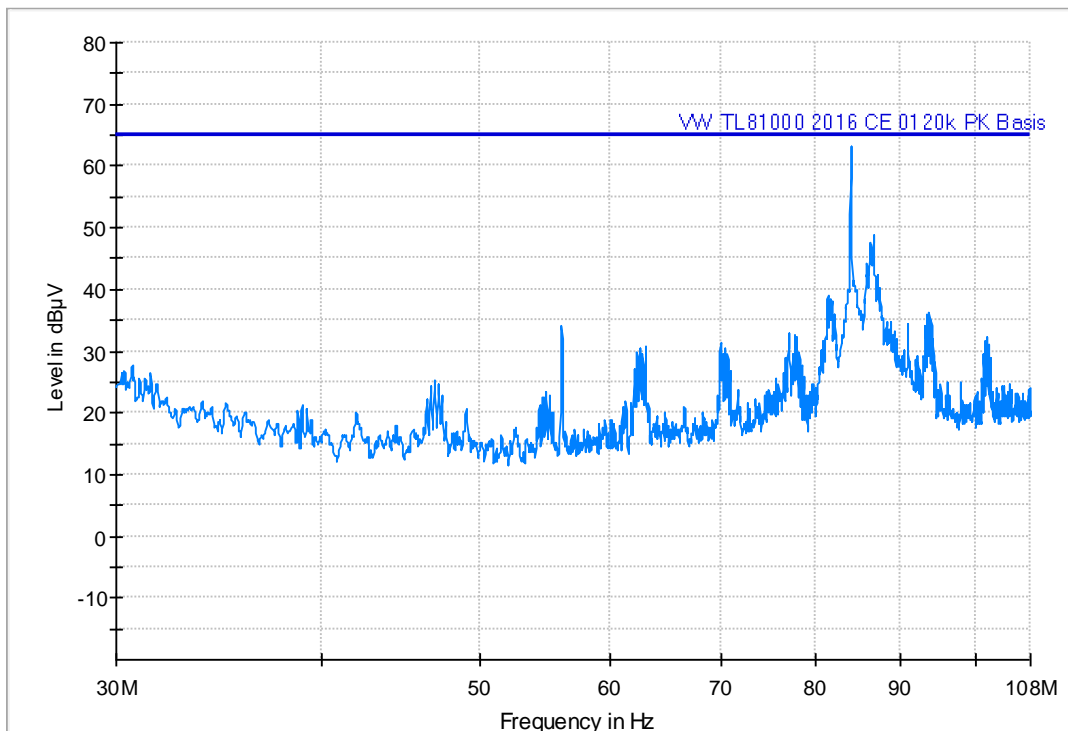
Pre účely tejto práce budú zobrazené merania PK a AVG detektorom. Zvyšné protokoly z merania sú súčasťou elektronickej prílohy. Všetky namerané priebehy sú zobrazené ako grafy, kde na zvislej osi je uvedená frekvencia v Hertzoch a na osi horizontálnej je nameraná úroveň rušivého napätia v jednotkách dB $\mu$ B. Hrubá horizontálna súvislá čiara v grafe označuje limity požadované normou. Krátke hrubé čiary označujú prísnejšie limity na niektorých špecifických frekvenciách.



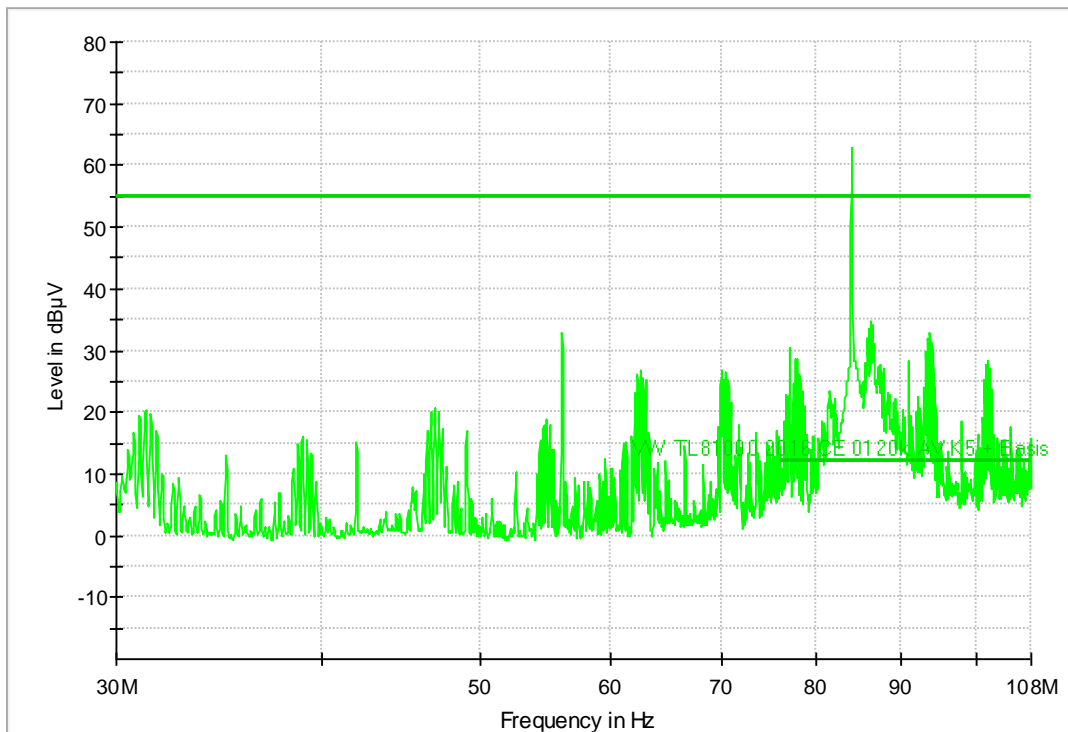
Obrázok 7.6 Výsledky merania RE, pásmo 100 kHz - 108 MHz, subpásmo 9 kHz, detektor PK



Obrázok 7.7 Výsledky merania CE, 100 kHz - 108 MHz\_9 kHz\_AV



Obrázok 7.8 Výsledky merania CE, 30 MHz - 108 MHz\_120 kHz\_PK



Obrázok 7.9 Výsledky merania CE, 30 MHz - 108 MHz\_120 kHz\_AV



Z grafov môžeme vidieť, že v okolí frekvencie 430 kHz, na ktorej spína DC-DC menič, nedošlo k žiadnemu prekročeniu limitu. Ako je vidieť na Obrázok 7.7 samotné spínanie meniča neprebíha na jednej frekvencii, ale zásluhou funkcie Spread spectrum je rozťahnuté na širšom frekvenčnom pásme. Má to významný vplyv na splnenie limitu. Z hľadiska spínacej frekvencie DC-DC meniča bolo odrušenie zariadenia navrhnuté správne. Na rovnakom obrázku môžeme pozorovať mierne prekročenie limitu v okolí frekvencie 800 kHz. Rušenie spôsobuje druhá harmonická frekvencie spínacej frekvencie meniča. Prekročenie limitu je minimálne a odstrániť sa dá malou úpravou obvodu, napríklad úpravou filtra na vstupe. K výraznému prenikaniu rušenia do vedenia dochádza na frekvencii 28 MHz. Dané rušenie výrazne prekračuje limit, jeho zdrojom je hodinový signál pre obvody TLC. Na jeho elimináciu bude napríklad vhodné spomaliť spínacie hrany hodín použitím RC filtra.

Ďalšie významné prekročenie základného limitu sa nachádza približne na frekvencii 84 MHz (viď Obrázok 7.9). Keďže táto frekvencia je trojnásobkom už spomínaných hodín, s najvyššou pravdepodobnosťou ide o tretiu harmonickú frekvenciu hodinového signálu. Zároveň v okolí tejto frekvencie došlo aj k výraznému prekročeniu sprísneného limitu. Zdroj týchto rušení pravdepodobne pochádza z hodinového signálu pre SPI komunikáciu, pretože na obrázku môžeme pozorovať zvýšené úrovne rušenia opakujúce sa s periódou 8 MHz. Navyše úroveň rušivého signálu môže byť zvýšená konštruktívnou interferenciou jednotlivých rušivých signálov. Konštruktívnou interferenciou sa rozumie skladanie dvoch navzájom vhodne fázovo posunutých elektromagnetických vln, ktorých výsledná amplitúda narastie [50].

## 7.2.2 Radiated Emission

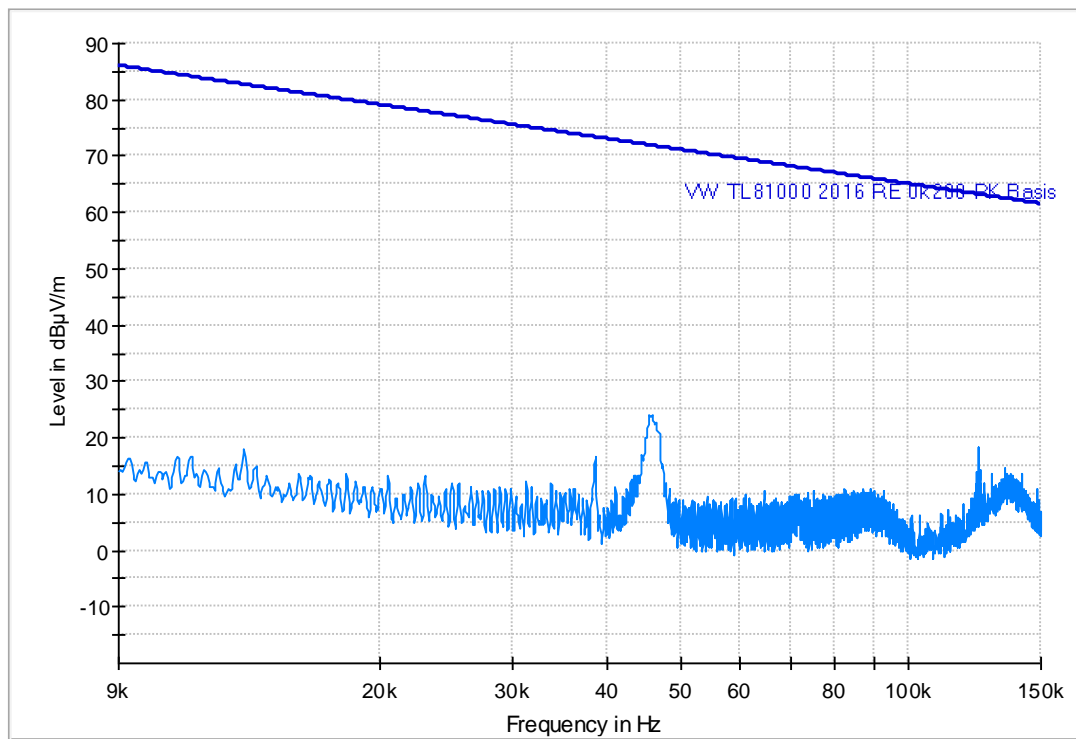
Týmto testom sa merajú rušivé signály, ktoré testované zariadenie (DUT) vyžaruje do okolia v podobe elektromagnetických vln. Aby bolo možné premerať široké pásmo rušivých signálov v rozmedzí frekvencií od 0,009 MHz do 1 GHz, používa sa trojica antén Rod (monopólová), bikonická a logaritmicko-periodická. Detailné informácie o meraných šírkach pásma, subpásma, kroku a použitých detektoroch sú v Tabuľka 10. Meranie bikonickou a logaritmicko-periodickou anténou prebehlo v horizontálnej (H) aj vertikálnej rovine (V).

Tabuľka 10 Detail meraných frekvencií pre CE

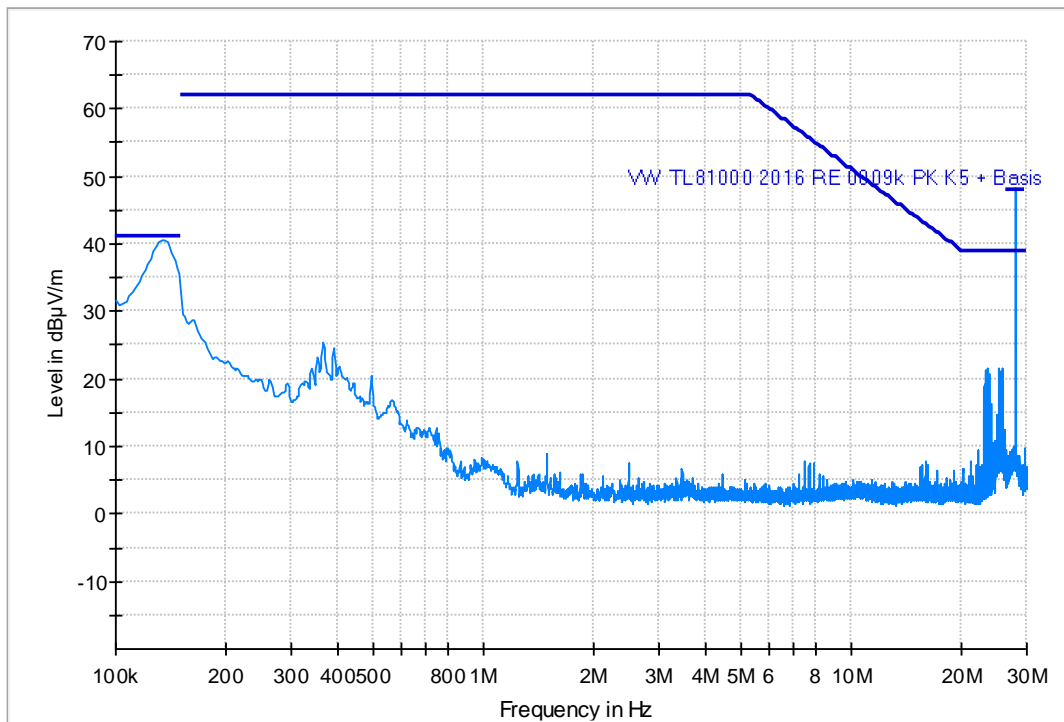
Druh antény	Pásmo	Subpásmo	Krok	Detektor	Orientácia antény	Doba merania subpásma
<b>Rod</b>	9-150 kHz	200 Hz	50 Hz	PK	V	1 s
	0,1 – 30 MHz	9 kHz	2,25 kHz	PK, AVG, QP	V	
<b>Bikonická (Bicon)</b>	30 - 200 MHz	9 kHz	2,25 kHz	PK, AVG	H+V	1 s
	30 - 200 MHz	120 kHz	30 kHz	PK, AVG	H+V	
	30 - 200 MHz	1 MHz	250 kHz	PK, AVG	H+V	
	74 – 110 MHz	120 kHz	30 kHz	QP	H+V	
<b>Logaritmicko-periodická (LPA)</b>	0,2 – 1 GHz	9 kHz	2,25 kHz	PK, AVG	H+V	1 s
	0,2 – 1 GHz	120 kHz	30 kHz	PK, AVG	H+V	
	0,2 – 1 GHz	1 MHz	250 kHz	PK, AVG	H+V	

Pre účely tejto práce budú zobrazené len vybrané merania PK a AVG detektorom. Zvyšné výsledky merania sú súčasťou elektronickej prílohy. Všetky namerané priebehy sú zobrazené ako grafy, kde na zvislej osi je uvedená frekvencia v Hertzoch a na osi horizontálnej je

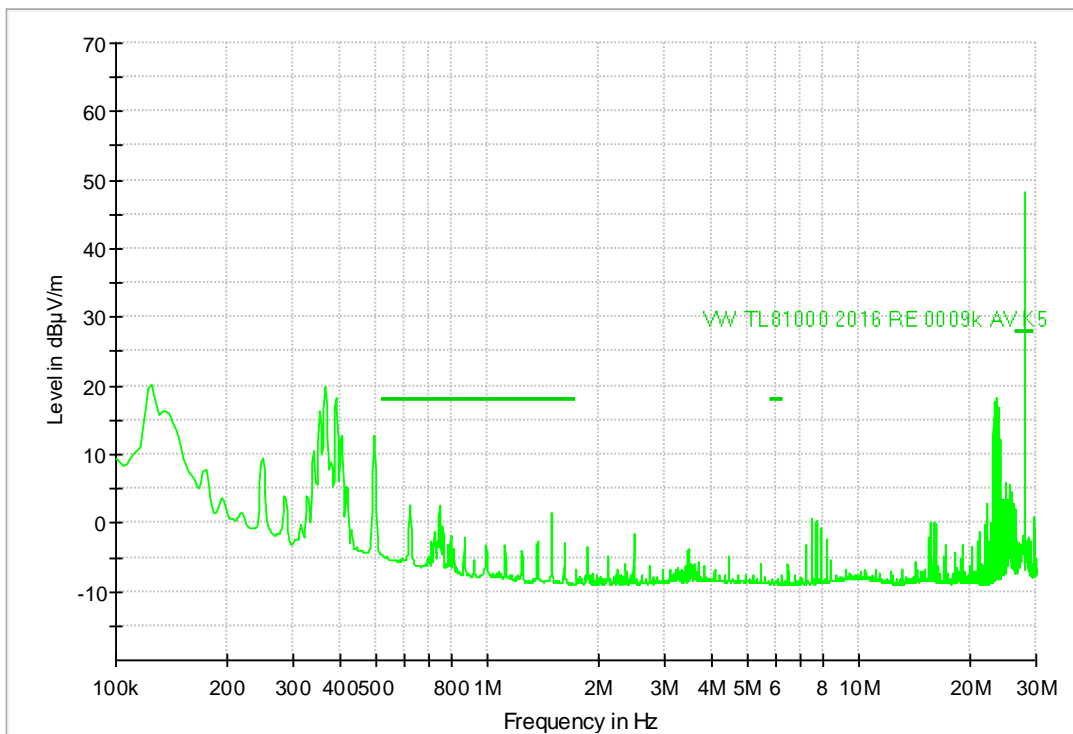
nameraná úroveň rušivého napätia v jednotkách dB $\mu$ V/m. Hrubá horizontálna súvislá čiara v grafe označuje limity požadované normou. Krátke hrubé čiary označujú prísnejšie limity na niektorých špecifických frekvenciách.



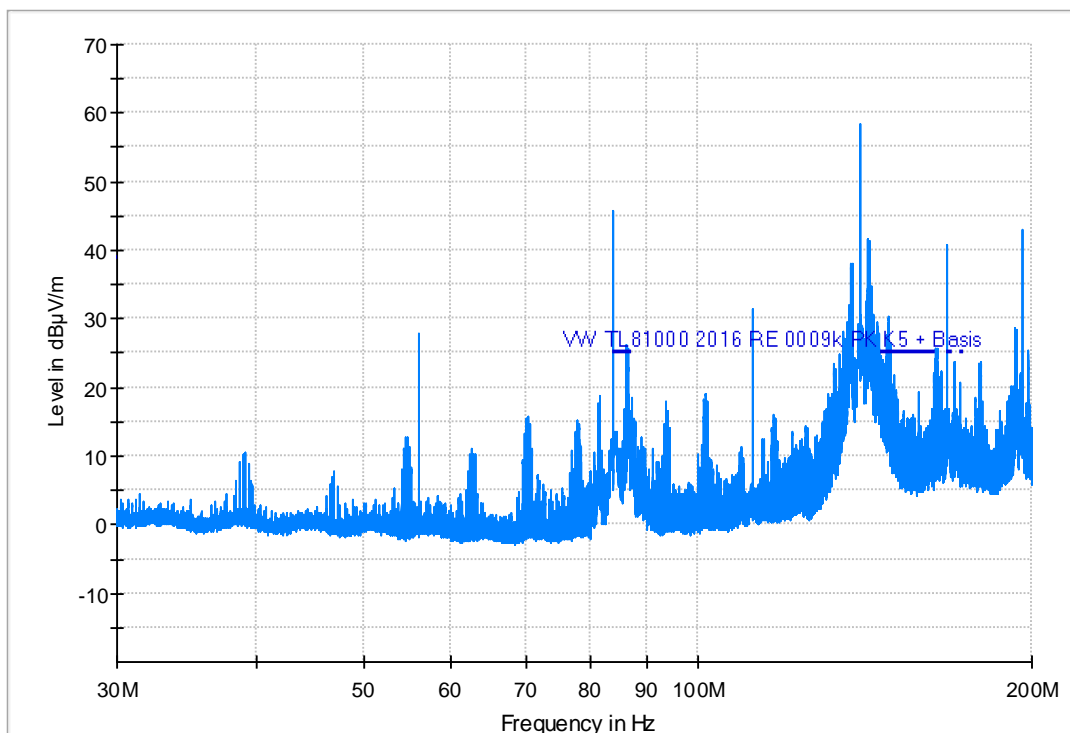
Obrázok 7.10 Výsledky merania RE, Rod ant., pásmo 9 kHz - 150 kHz, subpásmo 200 Hz, detek. PK\_V



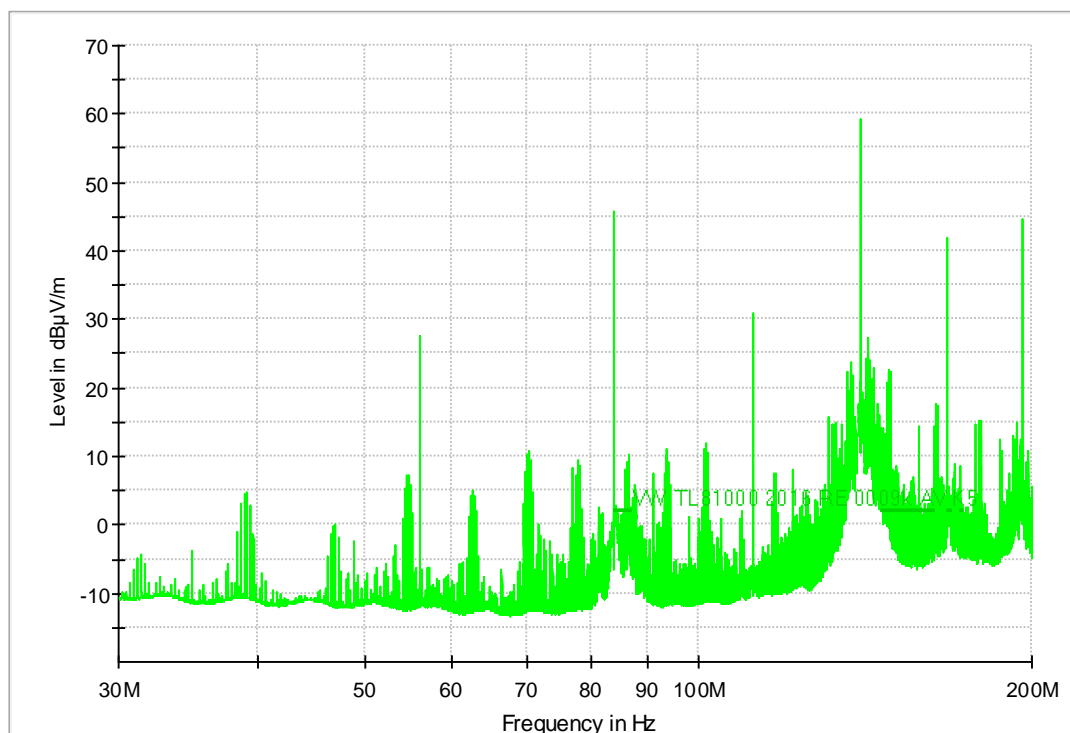
Obrázok 7.11 Výsledky merania RE, Rod ant, 0.1 MHz - 30 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor PK\_V



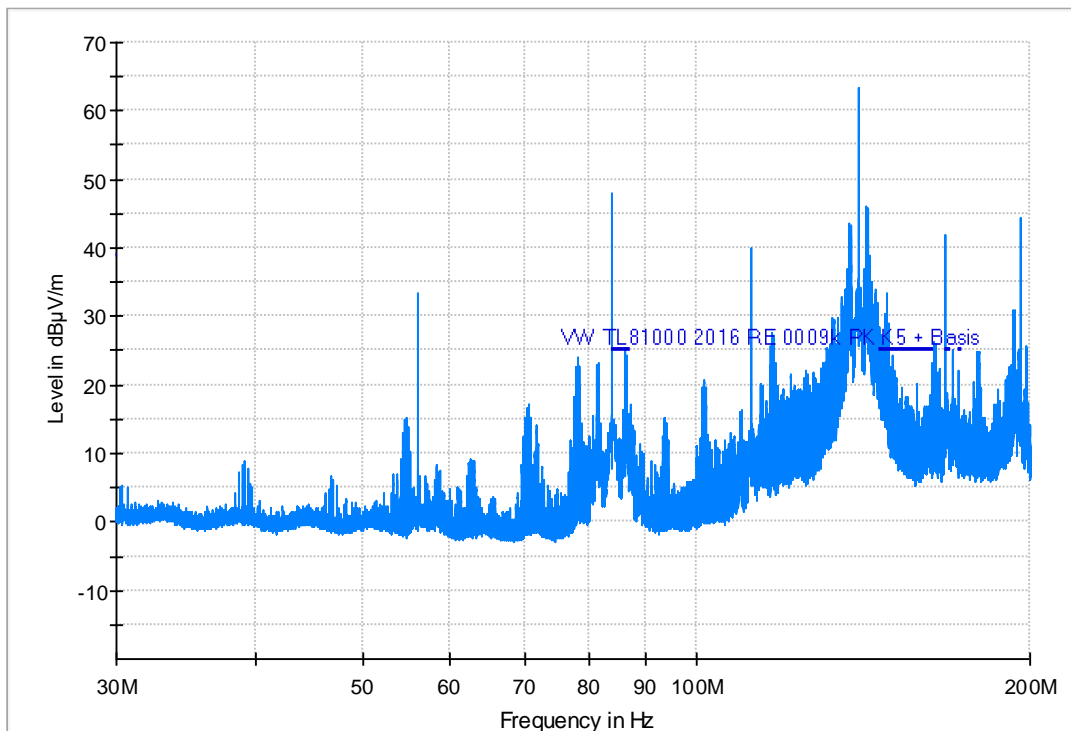
Obrázok 7.12 Výsledky merania RE, , Rod ant., 0.1 MHz - 30 MHz, BW 9 kHz, K5, detector AV\_V



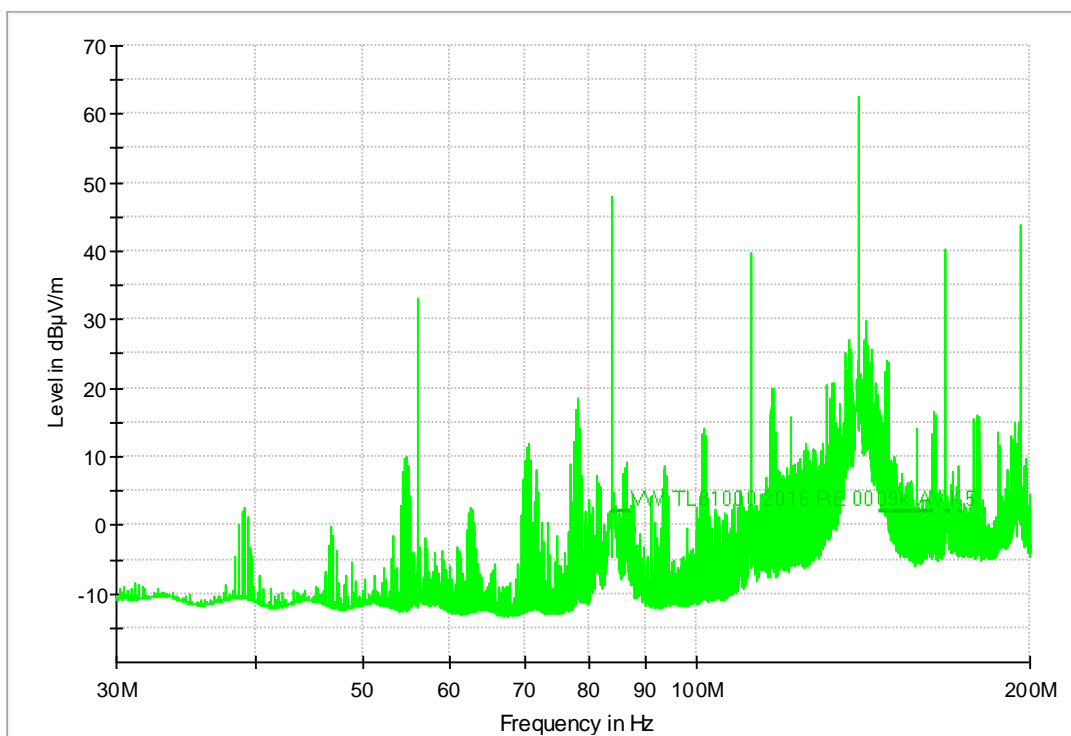
Obrázok 7.13 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor PK, V



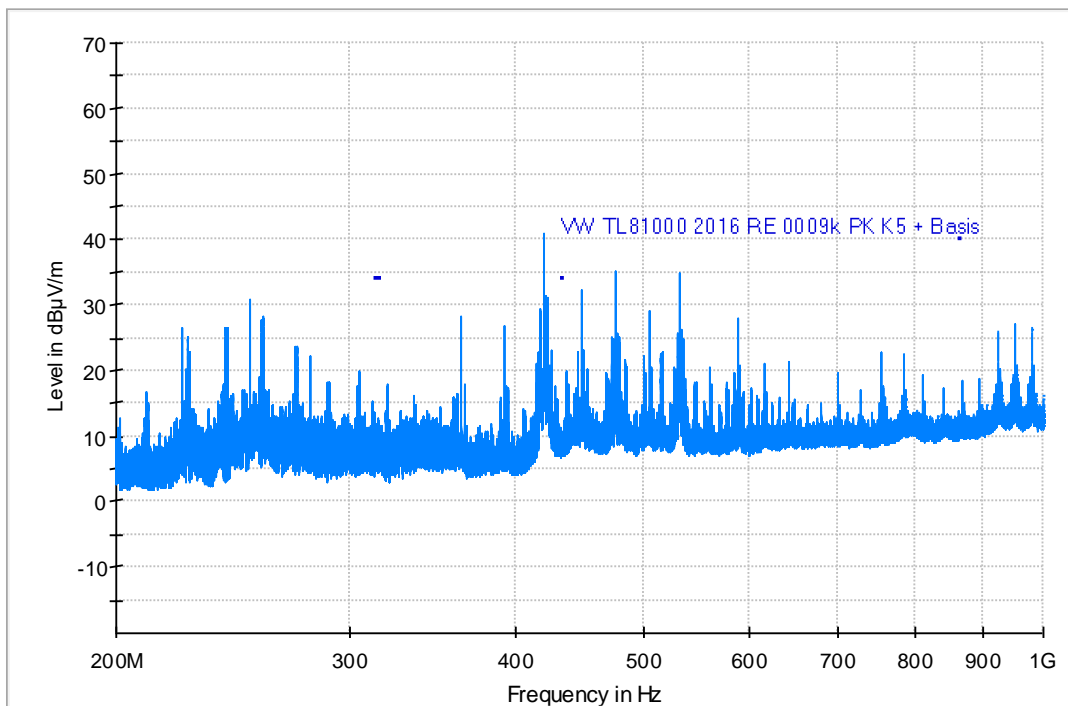
Obrázok 7.14 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detektor AV, V



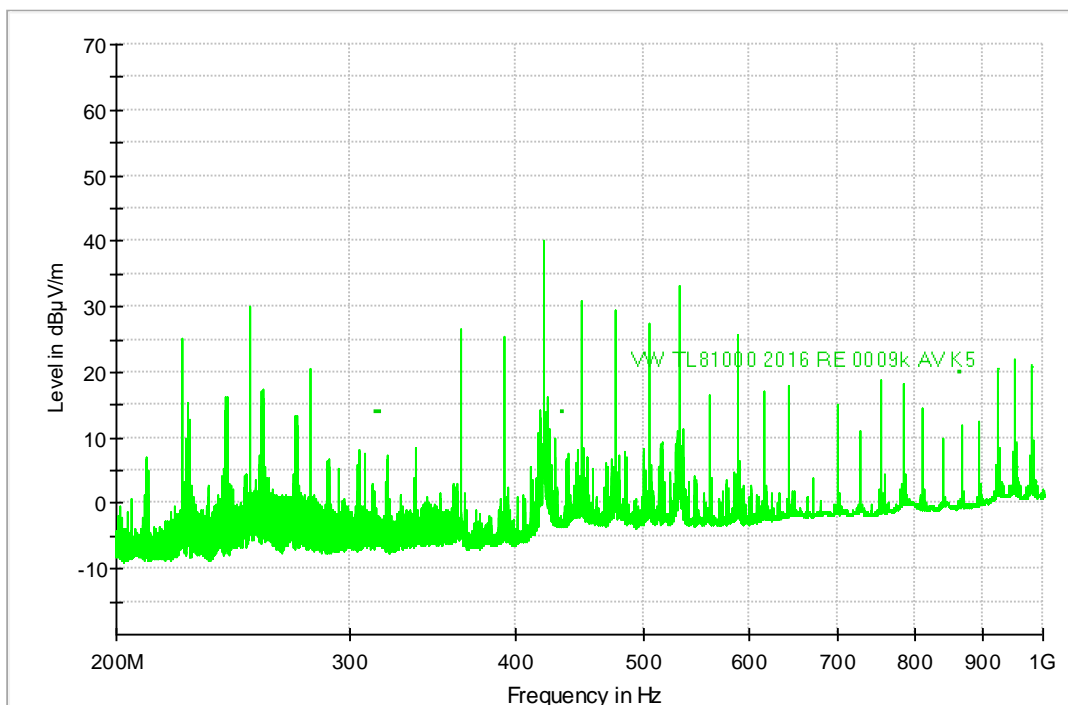
Obrázok 7.15 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detector PK, H



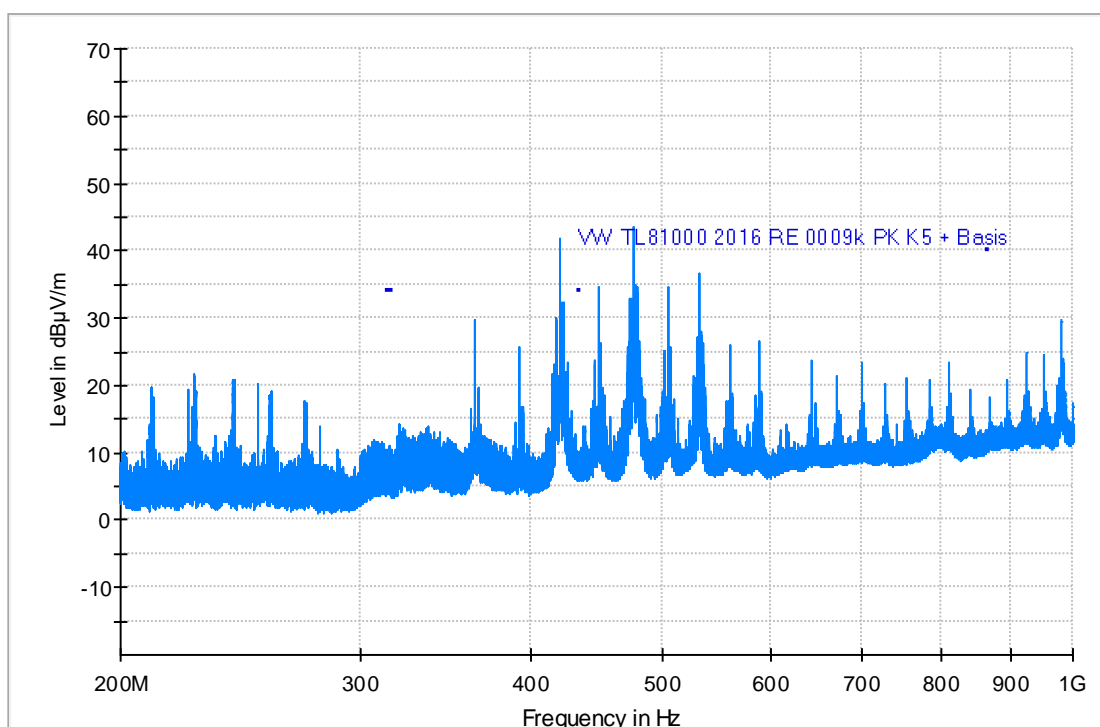
Obrázok 7.16 Výsledky merania RE, Bicon ant., 30 MHz - 200 MHz, BW 9 kHz, K5, detector AV, H



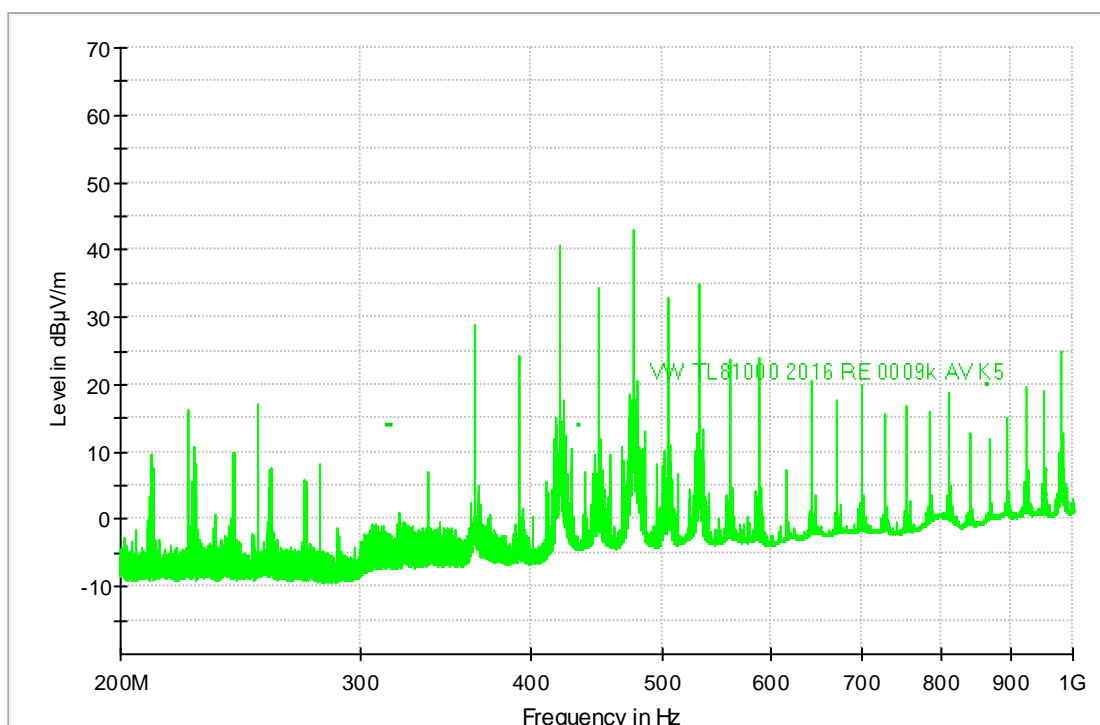
Obrázok 7.17 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector PK, V



Obrázok 7.18 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector AV, V



Obrázok 7.19 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector PK, H



Obrázok 7.20 Výsledky merania RE, LPA ant., 200MHz-1GHz, BW 9kHz, K5, detector AV, H

Z grafov merania pomocou Rod antény (viď Obrázok 7.10 až Obrázok 7.12) je vidieť, že v oblasti frekvencie spínania meniča sa nenachádza žiadny limit. Práve z dôvodu vyhnúť sa prísnym limitom sa volí frekvencia v okolí 400 Hz. V prípade RE nie je prekročený limit ani na vyšších frekvenciách spínaného meniča. Preto možno odrušenie meniča považovať za správne navrhnuté. Iná situácia nastáva vo frekvenčnom pásme meranom bikonickou anténou (viď Obrázok 7.13 až Obrázok 7.16). Rovnako, ako v prípade merania CE emisií, aj tu sú zdrojom rušivého signálu hodiny generované mikroprocesorom (8 a 28 MHz) a ich vyššie harmonické frekvencie, prípadne ich kombinácie. Hlavným zdrojom vyžiarených emisií sú pravdepodobne veľké prúdové slučky. Tie môžu vznikáť z dôvodu umiestnenia mikroprocesoru na samostatnej PCB modulu. Práve umiestnenie mikroprocesora priamo na DPS zariadenia môže výrazne znížiť vyžiarené emisie. Ďalej pomôže aj lepšie rozloženie zeme alebo vedenie rušivých signálov vo vnútorných vrstvách PCB. Prínosné by bolo, ak by TLC čipy mali integrované hodiny a nebolo by nutné tento signál rozvádzať po DPS. V neposlednom rade treba brať do úvahy, že síce mikroprocesor je navrhnutý pre automobilový priemysel a musí spĺňať EMC normy, vývojový modul naopak už nemusel byť vyvíjaný v súlade s týmito normami. Žiadny z limitov nebol prekročený pri meraní logaritmickeo-periodickou anténou (viď Obrázok 7.17 až Obrázok 7.20).

### **7.2.3 Zhodnotenie EMC testov**

Rozbor CE a RE emisií ukázal, že zariadenie nespĺňa limity požadované normou VW81000. Avšak podarilo sa veľmi dobre odrušiť samotný DC-DC menič, čo bolo hlavným cieľom v pri návrhu zariadenia. Malé prekročenie limitu v testoch CE druhou harmonickou sa dá vyriešiť malou úpravou obvodu. Napriek veľkej snahe pri návrhu sa, bohužiaľ, nepodarilo odrušiť CE a ani RE rušenie hodinových signálov pre TLC obvody. Na zlepšenie musí byť výrazne upravený layout a tiež musí byť mikroprocesor umiestnený priamo na PCB. Kvôli veľkému vyt'aženiu bezodrazovej komory v spoločnosti Hella, bolo možné uskutočniť iba jedno meranie. Preto nebolo možné ladiť EMC vlastnosti zariadenia.



## 8 VÝSLEDNÉ ZARIADENIE A JEHO FUNKCIE

Táto kapitola prezentuje výsledné zariadenie. Tiež demonštruje prínosy tohto konceptu prostredníctvom príkladov svetelných funkcií.

### 8.1 Svetelné funkcie

Najväčším prínosom a motiváciou na vývoj tohto zariadenia je práve variabilita zobrazovania, ktorú tento LED displej s nízkym rozlíšením prináša, a to pri veľmi nízkych výrobných nákladoch oproti LCD displeju s vyšším rozlíšením. Hlavnou úlohou je využiť tento displej na zlepšenie komunikácie vozidla s prostredím za účelom zvýšenia bezpečnosti. Ďalej sú to praktické funkcie a možnosti prispôsobenia dizajnu.

#### 8.1.1 Bezpečnostné funkcie

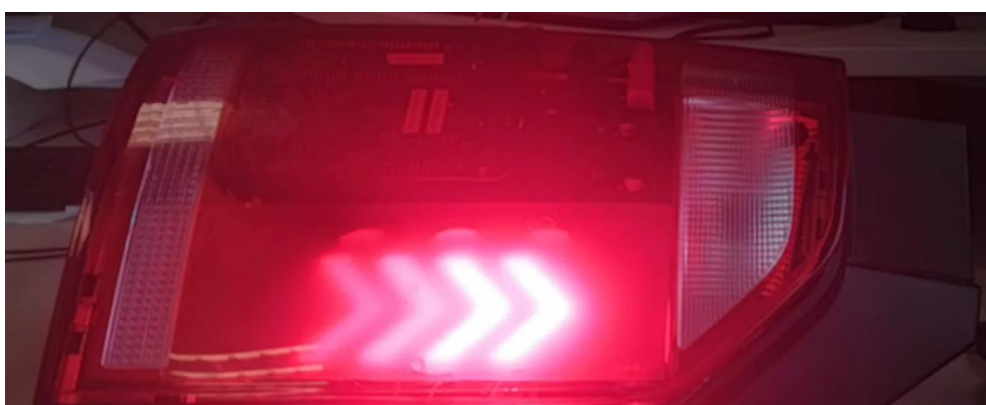
Príkladom bezpečnostných funkcií je animácia upozorňujúca na prechod pre chodcov (viď Obrázok 8.1). Napríklad auto rozpoznávajúce dopravné značenie by mohlo v prípade detekcie dopravnej značky alebo v prípade, ak vozidlo dá prednosť chodcovi, prehrať túto animáciu. Upozornilo by ostatné vozidlá a ozrejmiло by dôvod spomalenia. Animácia pozostáva z pohybujúceho sa chodca (obdoba postavy na semafore) a blikajúceho prechodu. Práve pohyb a blikanie by mali upriamiť pozornosť ostatných účastníkov premávky. Ďalšie funkcie upozorňujúce na zmenu rýchlosti vozidla sú piktogramy zobrazujúce zúženie cesty alebo dopravnú kolónu (viď Obrázok 8.2). Zvýšenú pozornosť zabezpečí zmena intenzity jasu. Príkladom bezpečnostnej funkcie môže byť aj animácia pohybujúcich sa šípok (obdoba vyznačenie smeru v počítačových hrách) (viď Obrázok 8.3). Táto animácia by v prípade autonómneho vozidla mohla vodičovi v tesnej blízkosti oznámiť, že vozidlo je možné bezpečne predbehnúť. Toto je len niekoľko príkladov bezpečnostných funkcií, variabilita displeja umožňuje mnohé ďalšie funkcie, ktoré závisia iba od kreativity automobiliek.



Obrázok 8.1 Bezpečnostná funkcia chodec



Obrázok 8.2 Bezpečnostná funkcia kolóna



Obrázok 8.3 Bezpečnostná funkcia pre obiehanie

### 8.1.2 Praktické funkcie

Jednu z praktických funkcií demonštruje animácia zámku (viď Obrázok 8.4), ktorá informuje o zamknutí alebo odomknutí vozidla. V elektromobile môže zase displej animovať nabíjanie batérie a informovať o aktuálnom stave nabitia (viď Obrázok 8.5). Na rozhraní bezpečnostnej a praktickej funkcie je zobrazenie znaku P, informujúceho ostatných účastníkov premávky o úmysle zaparkovať vozidlo, hlavne pri použití autonómneho parkovania.



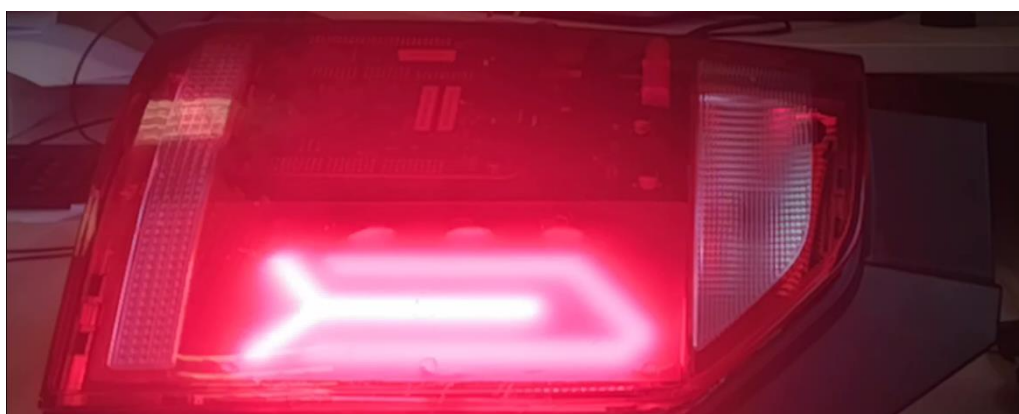
Obrázok 8.4 Praktická funkcia zámok



Obrázok 8.5 Praktická funkcia dobíjanie batérie

### 8.1.3 Dizajnové funkcie

Dvojica animovaných obrazcov prezentuje variabilitu v dizajne obrazca pre zadné kombinované svetlá v automobile. Vďaka tejto variabilite si užívateľ môže sám vybrať zo série výrobcami predefinovaných dizajnov. V budúcnosti by si napríklad užívateľ dokonca mohol kúpiť nový dizajn pomocou mobilnej aplikácie. Dizajny spájajú možnosti animácie, stmievania, variability tvaru a možnosti nastavenia jasnosti pre jednotlivé LED. Variabilita umožňuje využitie iného dizajnu pre parkovaciu funkciu alebo pozičnú funkciu svetiel. Animované zapínanie alebo vypínanie svetiel (dimming + animácia) je populárne medzi prémiovými značkami. Možnosť nastavovania jasnosti jednotlivých LED umožňuje programovať dizajny s rôznymi úrovňami jasnosti (viď Obrázok 8.6). Navyše, individuálne nastavenie jasnosti v kombinácii s difúzorom umožňuje vytvárať svetelné línie, ktoré ďaleko prevyšujú rozlíšenie displeja. Vytváranie plynulých línií popisuje Obrázok 8.8. Na obrázku je možné vidieť úroveň rozsvietených LED a výsledný dizajn sa nachádza na Obrázok 8.7.



Obrázok 8.6 Svetelný dizajn 1



Obrázok 8.7 Svetelný dizajn 2

```
//1
1  2  3  4  5  6  7  8  9  10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
{
{15 ,128,128,128,128,128,128,128,128,128,64 ,0 ,0 ,0 ,0 ,15 ,128,128,128,128,128,128,128,128,64 ,0 ,0
{128,255,255,255,255,255,255,255,255,255,128,64 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,255,255,255,255,255,128,64 ,0
{128,255,255,255,255,255,255,255,255,255,128,0 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,255,255,255,255,255,128,0
{15 ,128,128,128,128,128,128,128,64 ,255,255,128,0 ,0 ,0 ,15 ,128,128,128,128,128,128,128,64 ,255,255,128,0
{0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,128,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,128,0
{0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,32 ,192,255,255,64 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,32 ,192,255,255,64 ,0
{64 ,255,255,255,64 ,0 ,0 ,64 ,200,255,200,32 ,0 ,0 ,0 ,64 ,255,255,255,64 ,0 ,0 ,64 ,200,255,200,32 ,0
{255,255,255,255,255,0 ,0 ,128,255,255,128,0 ,0 ,0 ,0 ,255,255,255,255,255,0 ,0 ,128,255,255,128,0 ,0
{255,255,255,255,255,0 ,32 ,192,255,255,64 ,0 ,0 ,0 ,0 ,255,255,255,255,255,0 ,32 ,192,255,255,64 ,0 ,0
{64 ,255,255,255,64 ,0 ,64 ,200,255,200,32 ,0 ,0 ,0 ,0 ,64 ,255,255,255,64 ,0 ,64 ,200,255,200,32 ,0 ,0
{0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,128,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,128,255,255,128,0 ,0 ,0
{0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,16 ,128,128,16 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,0 ,16 ,128,128,16 ,0 ,0 ,0
},
```

Obrázok 8.8 Hodnoty PWN jednotlivých LED pre Svetelný dizajn 2

## 8.2 Výsledný prototyp

Počas vývoja prototypu vznikol nápad na umiestnenie DPS do tela reálneho svetlometu. Keďže tento nápad vznikol až po návrhu DPS, jej tvar a veľkosť neboli konštruované za týmto účelom. Preto bolo nutné nájsť svetlo s čo najväčšími rozmermi, kde by sa DPS zmestila. Voľba padla na zadný kombinovaný svetlomet Volkswagenu T6. Svetlomet bol svojpomocne upravený pre inštaláciu DPS vrátane chladiča. Na svetlomet boli nainštalované tlačidlá na externé ovládanie funkcií displeja. Nakoniec bol svetlomet upevnený na hliníkový stojan.



Obrázok 8.9 Prototyp umiestený vo svetlomete

Napriek tomu, že nejde o profesionálnu integráciu, riešenie prezentuje prototyp displeja výrazne lepšie ako samotná DPS umiestnená na nejakej podložke. Pridanou hodnotou je reálna vizualizácia nasadenia pre zákazníka

## 9 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo vyvinúť hardvér a demonštračný softvér maticového LED displeja pre použitie v zadných svetlometoch automobilu. Zariadenie je súčasťou predvývojových aktivít v spoločnosti Hella. Malo by slúžiť ako prototyp pre ďalší vývoj displeja integrovaného do zadných kombinovaných svetidiel v automobile.

Prvá časť tejto práce sa venuje problematike DC-DC meničov. Tá je doplnená o prehľad dostupných integrovaných obvodov pre meniče a riadiace obvody LED. Nasleduje prehľad elektrických a EMC testov, z ktorých vyplývajú požiadavky pre vývoj elektroniky v automobilovom priemysle. Návrh zariadenia zahŕňa výpočet, voľbu a zapojenie elektrických komponentov. Podrobne je spracovaný návrh spínaného zdroja a návrh termálneho manažmentu. Návrh pokračuje dizajnom dosky plošných spojov. Ďalšia časť popisuje pomerne náročné oživovanie zariadenia, kedy bolo nutné odstrániť niektoré nedokonalosti návrhu. Meraním základných vlastností sa overila správna funkčnosť hardvéru. Meranie termálnych emisií potvrdilo správnosť návrhu tepelného manažmentu. Zvýšenie homogenity svetelného toku umožnil experimentálne vybraný optický prvok (difúzor), ktorý využíva princíp difrakcie svetla. Na ovládanie hardvéru bol vyvinutý demonštračný firmvér. Ten umožňuje ovládanie a prehrávanie predefinovaných animácií. Tiež čiastočne chráni zariadenie pred prehriatím alebo prepätím. Firmvér na najnižšej úrovni riadi SPI komunikáciu s riadiacimi obvodmi, multiplexovanie pomocou tranzistorov. Číta vstupy a výstupy z tlačidiel a senzorov. Na vyššej úrovni firmvér pripravuje animačné dáta pre riadiace obvody sériou dekompresných a mapovacích procesov. Súčasťou firmvéru sú predefinované animácie demonštrujúce bezpečnostné, praktické a dizajnové možnosti displeja. Firmvér správne komunikuje a ovláda všetky elektronické prvky. Tým sa potvrdila správnosť návrhu hardvéru. Variabilná grafika displeja demonštruje možnosti zariadenia. Tým boli splnené požiadavky zadania. Nad rámec zadania bolo zariadenie podrobené vybraným elektrickým testom. Testy boli zvolené tak, aby nedošlo k poškodeniu jediného prototypu. Zariadenie splnilo požiadavky dane normou VW 80000 pri vybraných testov. EMC meranie rušivého vyžarovania a rušivých signálov na napájacom vedení preukázalo dobré odrušenie spínaného zdroja. Napriek snahe pri návrhu sa nepodarilo odstrániť rušenie na vyšších frekvenciách. Tie sú spôsobené hodinovými signálmi v obvode. V závere sa realizoval nápad integrovať prototyp do reálneho svetlometu.

Diplomová práca mala viacero prínosov. Pri prieskume dostupných komponentov bol vytvorený prehľad dostupných a vyvíjaných DC-DC meničov. Databáza uľahčí voľbu meniča v iných projektoch spoločnosti Hella. Prínosom je aj použitie nového integrovaného obvodu MPQ4317. Vďaka tejto práci bolo možné overiť jeho vlastnosti na ďalšie využitie v tejto spoločnosti. Hlavným prínosom je preukázanie realizovateľnosti inovatívnej koncepcie LED maticového displeja s optikou pre integráciu do zadného kombinovaného svetlometu. Tá umožní zlepšiť bezpečnosť a priniesť moderné rozšírené funkcie pri nízkych výrobných nákladoch.

Práca splnila všetky požiadavky zadania. Bolo vytvorené plne funkčné zariadenie, demonštrujúce funkciu displeja v zadnom svetlomete. Ide o funkčný prototyp. Pre sériovú produkciu je nevyhnutný ďalší vývoj. Treba odstrániť nedokonalosti návrhu, zlepšiť integráciu a ostatne požiadavky kladené automobilovým priemyslom. Veľkým prínosom by bola aj počítačová aplikácia pre dizajnérov, ktorá by umožnila jednoduché vytváranie animácií.

# LITERATÚRA

- [1] Linear Regulator and Switching Regulator <What is the Difference Between Linear and Switching Regulators?>. *ROHM* [online]. 2019 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.rohm.com/electronics-basics/dc-dc-converters/linear-vs-switching-regulators>
- [2] ISOLATED VS NON-ISOLATED POWER SUPPLIES. *Advanced Conversion Technology* [online]. 2019 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.actpower.com/educational/isolated-vs-non-isolated-power-supplies/>
- [3] *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments Incorporated, 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/>
- [4] Learn more about Buck Converter. *ScienceDirect* [online]. Elsevier B.V., 2019 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/buck-converter>
- [5] BASSO, Christophe P. *Switch-mode power supply SPICE cookbook*. 1. New York: McGraw-Hill, 2001. ISBN 00-713-7509-0.
- [6] *Maxim Integrated* [online]. Maxim Integrated, 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en.html>
- [7] *MPQ4317*. interný dokument firmy Hella Autotechnik Nova s.r.o., 2018. Dostupné také z: internej siete firmy Hella
- [8] *Semiconductor Components Industries* [online]. © 1999-2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/>
- [9] LED Driver. *Sunpower* [online]. b.r. [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <https://www.sunpower-uk.com/glossary/what-is-an-led-driver/>
- [10] WINDER, Steve. *Power supplies for LED driving*. Second edition. Cambridge, MA: Newnes, 2017. ISBN 978-0-08-100925-3.
- [11] *Integrated Silicon Solution Inc.* [online]. 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.issi.com/US/index.shtml>
- [12] What is a System on Chip (SoC)?. *AnySilicon* [online]. ©2011-2019 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://anysilicon.com/what-is-a-system-on-chip-soc/>
- [13] 17-552 illuminance uniformity. *The International Commission on Illumination* [online]. 2014 [cit. 2019-11-21]. Dostupné z: <http://eiv.cie.co.at/term/552>
- [14] Calculating model of light transmission efficiency of diffusers attached to a lighting cavity. *OPTICS EXPRESS* [online]. 2010, **2010**(6), 12 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: [https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/CAB9C3C1-B3DA-E5E3-869AD87ECCB6C8E5\\_196561/oe-18-6-6137.pdf?da=1&id=196561&seq=0&mobile=no](https://www.osapublishing.org/DirectPDFAccess/CAB9C3C1-B3DA-E5E3-869AD87ECCB6C8E5_196561/oe-18-6-6137.pdf?da=1&id=196561&seq=0&mobile=no)

- [15] *Fotometrické zkoušky rozptylových termoplastů vhodných pro LED zdroje* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66849/F3-DP-2017-Skuta-Lukas-Fotometricke%20zkousky%20rozptylovych%20termoplastu%20vhodnych%20pro%20LED%20zdroje.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [16] *The New Encyclopaedia Britannica* [online]. 15th ed. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 2007 [cit. 2019-11-24]. ISBN 978-1-59339-292-5. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/human-eye/Temporal-summation>
- [17] LIGHT GUIDE HOMOGENEITY IN AUTOMOTIVE LIGHTING. *Automotive-iq* [online]. Detroit: BEDU F., 2017 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: [https://plsadaptive.s3.amazonaws.com/gfiles/\\_rfhMLlight\\_guide\\_homogeneity\\_in\\_automotive\\_lighting.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIFDCUHI33FU3JW5A%2F20191124%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4\\_request&X-Amz-Date=20191124T214150Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=600&X-Amz-Signature=631eb7629cf2b3e3d68844b70d9ffe7d2ebf1f5ec4c3b77952c1fb737b80defa](https://plsadaptive.s3.amazonaws.com/gfiles/_rfhMLlight_guide_homogeneity_in_automotive_lighting.pdf?X-Amz-Content-Sha256=UNSIGNED-PAYLOAD&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIFDCUHI33FU3JW5A%2F20191124%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20191124T214150Z&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Expires=600&X-Amz-Signature=631eb7629cf2b3e3d68844b70d9ffe7d2ebf1f5ec4c3b77952c1fb737b80defa)
- [18] VW 80000. *Electric and Electronic Components in Motor Vehicles up to 3.5 t*. 2017-10. Germany: Volkswagen AG, 2017.
- [19] *Standarts\_comparison\_V1\_2\_Pavel\_Huk\_20120228*. interný dokument firmy Hella Autotechnik Nova s.r.o., 2012. Dostupné také z: internej sieti firmy Hella
- [20] TL82066. *Electromagnetic Compatibility of Automotive Electronic Components*. b.r.
- [21] *ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA* [online]. Technická 12, 616 00 Brno, 2017 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: [http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=Skripta\\_EM.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=Skripta_EM.pdf). Skripta. VUT v Brně.
- [22] Základy elektromagnetické kompatibility Část 1 - Základní pojmy a členění oboru EMC. *Elektrorevue* [online]. Ústav radioelektroniky FEI VUT v Brně: Elektrorevue, 2000 [cit. 2019-11-24]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00025/index.html>
- [23] CISPR 25. *Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers*. 4.0. France: International Electrotechnical Commission, 2016.
- [24] TL 81000. *Electromagnetic Compatibility of Automotive Electronic Components*. 2013-02. Germany: Volkswagen AG, 2013.
- [25] What is AEC-Q100 Qualification. In: *EverythingRF* [online]. 2019 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-aec-q100-qualification>
- [26] *DOMINANT Opto Technologies* [online]. 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.dominant-semi.com/>



- [27] *OSRAM SYLVANIA Inc.* [online]. 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <https://www.osram.us/cb/>
- [28] *Podle ústního sdělení Ing. Petra Koukala (zaměstnanec firmy Hella) dne 11.11.2019.* b.r.
- [29] ARDUINO NANO 33 BLE. *Arduino* [online]. -: -, 2019 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/arduino-nano-33-ble>
- [30] S32K148EVB: S32K148 Evaluation Board for General Purpose. *NXP* [online]. -: NXP Semiconductors, 2006-2019 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/design/development-boards/automotive-development-platforms/s32k-mcu-platforms/s32k148-evaluation-board-for-general-purpose:S32K148EVB>
- [31] *Infineon* [online]. 2019 [cit. 2019-12-14]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/>
- [32] How to select input capacitors for a buck converter. In: *Texas Instruments* [online]. Dallas: TI, 2016 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slyt670/slyt670.pdf>
- [33] Ako porozumieť parametrom výkonových cievok pre DC/DC meniče. *SOS electronic* [online]. -: SOS, 2017 [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.sos.sk/articles/sos-supplier-of-solution/ako-porozumiet-parametrom-vykonovych-cievok-pre-dc-dc-menice-2005>
- [34] The Buck Regulator – Power Supply Design Tutorial Part 2-1. *Power Electronics News* [online]. -: -, - [cit. 2019-11-25]. Dostupné z: <https://www.powerelectronicsnews.com/technology/the-buck-regulator-power-supply-design-tutorial-part-2-1>
- [35] Buck Converter Design. In: *Mouser* [online]. Durham: Infineon Technologies North America, 2013 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: </pdfdocs/BuckConverterDesignNote.pdf>
- [36] *NAPÁJENÍ ELEKTRONICKÝCH ZAŘÍZENÍ* [online]. Brno, - [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [https://moodle-archiv.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/253334/mod\\_resource/content/1/Skripta\\_BNEZ.pdf](https://moodle-archiv.ro.vutbr.cz/pluginfile.php/253334/mod_resource/content/1/Skripta_BNEZ.pdf). Skripta. VUT v Brně.
- [37] Thermal Management Of Power LED. In: *DOMINANT Opto Technologies* [online]. Malaysia: -, 2019 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [http://www.dominant-semi.com/cdn/application-notes/Thermal\\_Management\\_Of\\_Power\\_LED-VerB.pdf](http://www.dominant-semi.com/cdn/application-notes/Thermal_Management_Of_Power_LED-VerB.pdf)
- [38] *Thermal\_degradation\_DWA-PKG.* interný dokument firmy Hella Autotechnik Nova s.r.o., b.r. Dostupné také z: internej sieti firmy Hella
- [39] *OPTIMALIZACE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE PRO VÝKONOVOU LED* [online]. Brno, 2013 [cit. 2019-12-10]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=68151](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68151). Diplomová práce. VUT v Brně.

- [40] *Hella thermal standard*. interný dokument firmy Hella Autotechnik Nova s.r.o., b.r. Dostupné také z: internej sieti firmy Hella
- [41] *Podle ústního sdělení Ing. Otakara Šamánka (zaměstnanec firmy Hella) dne 8.12.2019*. b.r.
- [42] Designing High-Performance, Low-EMI Automotive Power Supplies. In: *Texas Instruments* [online]. Texas Instruments Incorporated, 2019 [cit. 2019-12-12]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snva780/snva780.pdf>
- [43] *IR Scanning Handbook* [online]. 1. Michigan: InterNational Electrical Testing Association, 2009 [cit. 2020-04-30]. ISBN 269.488.6382. Dostupné z: <https://nhathaservice.files.wordpress.com/2016/07/neta-ir-scanning-handbook-2.pdf>
- [44] PLEXIGLAS® LED white 0V200. In: *Picoplast* [online]. Darmstad: Evonik Performance Materials GmbH, 2015 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://www.picoplast.nl/uploads/e5d8d23b5fe281b886897e757c1813bdPlexiglas%20LED%20white%20OV200%20-%20MDS%20-%20EN.pdf>
- [45] NIELSEN, Kristian. Code for the LED-Torus. In: *Github* [online]. 2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://github.com/knielsen/pov3d>
- [46] XIM DALI User Guide. In: *Alphabet Lighting* [online]. 2020 [cit. 2020-04-30]. Dostupné z: <https://alphabetlighting.com/download/a/+beta/DALI%20User%20Guide%20Rev1.3.pdf>
- [47] Calibrate Steinhart-Hart Coefficients for Thermistors. In: *Stanford Research Systems* [online]. Sunnyvale, b.r. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/applicationnotes/LDC%20Note%204%20NTC%20Calculator.pdf>
- [48] How Easy Is It to Use a Thermistor?!. In: *Arduino PROJECT HUB* [online]. b.r. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: [https://create.arduino.cc/projecthub/Marcazzan\\_M/how-easy-is-it-to-use-a-thermistor-e39321](https://create.arduino.cc/projecthub/Marcazzan_M/how-easy-is-it-to-use-a-thermistor-e39321)
- [49] SVAČINA, Jiří. Základy elektromagnetické kompatibility (EMC) - Část 4: Způsoby a metody měření rušivých signálů. *Elektrorevue* [online]. Brno: VUT, 2001 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01021/index.html>
- [50] Skládání vln. In: *Kmity a vlny* [online]. Vojtěch Hanák, b.r. [cit. 2020-05-20]. Dostupné z: <http://vojtahanak.cz/files/kmity/interference.html>
- [51] RC Charging Circuit. *Electronics-Tutorials* [online]. 2020 [cit. 2020-04-29]. Dostupné z: [https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc\\_1.html](https://www.electronics-tutorials.ws/rc/rc_1.html)

# ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK

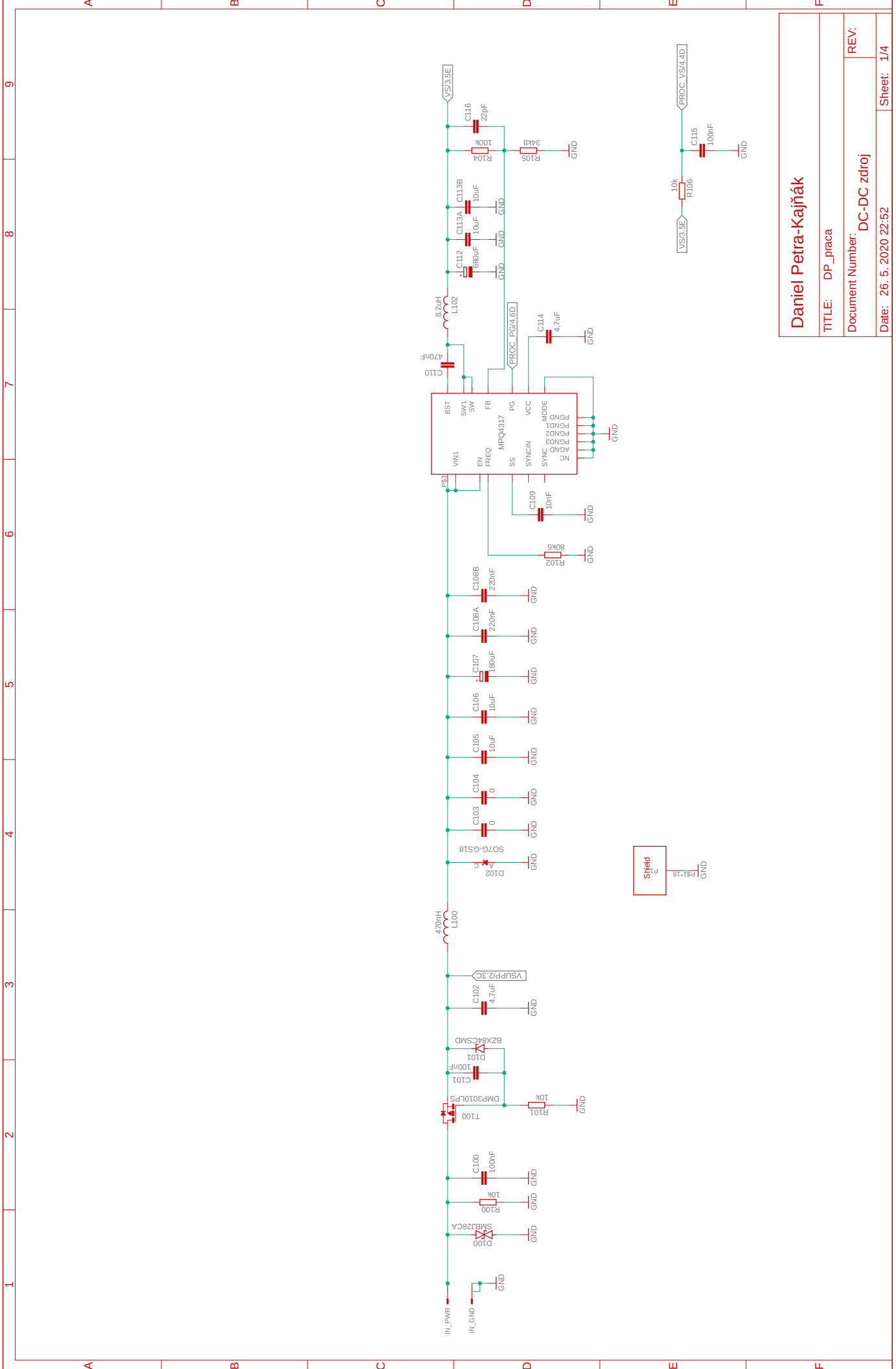
LED	Light-Emitting Diode
DC-DC	Direct current
EMC	Electromagnetic compatibility
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PCB	printed circuit board
MPS	Monolithic Power Systems
LDO	Low-dropout regulator
ISSI	Integrated Silicon Solution Inc
PWM	Pulse Width Modulation
LCD	Liquid crystal display
VW	Volkswagen AG
ESD	Electrostatic discharge
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
ISO	International Organization for Standardization
EMI	Electromagnetic interference
QP	Quasi-peak detector
AV	Average detector
EMS	Electromagnetic Susceptibility
TEM	Transverse electromagnetic mode
BCI	Bulk Current Injection
I2C	Inter-Integrated Circuit
AVR	Alf and Vegard's RISC processor
ARM	Advanced RISC Machine
SCLK	Serial Clock
ESR	Equivalent Series Resistance
GS	Gate-Source
LC	Filter combines inductors (L) and capacitors (C)
HAL	Hot Air Solder Leveling
ADC	Analog-to-digital converter
GND	Ground

# ZOZNAM PRÍLOH

Schéma zapojenia	101
Zoznam súčiastok	110
Oscilogramy z elektrických testov	elektronická príloha
Protokoly merania EMC	elektronická príloha
Zdrojové kódy	elektronická príloha

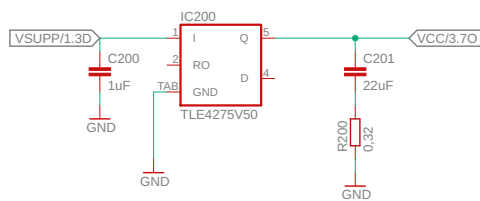
# **A SCHÉMA ZAPOJENIA**

## **A.1 Schéma zapojenia DC-DC spínaného zdroja**



<b>Daniel Petra-Kajňák</b>	
TITLE: DP_praca	REV:
Document Number: DC-DC zdroj	
Date: 26. 5. 2020 22:52	Sheet: 1/4

## A.2 Schéma zapojenia lineárneho zdroja



Daniel Petra-Kajňák

TITLE: DP\_praca

Document Number:  
LDO

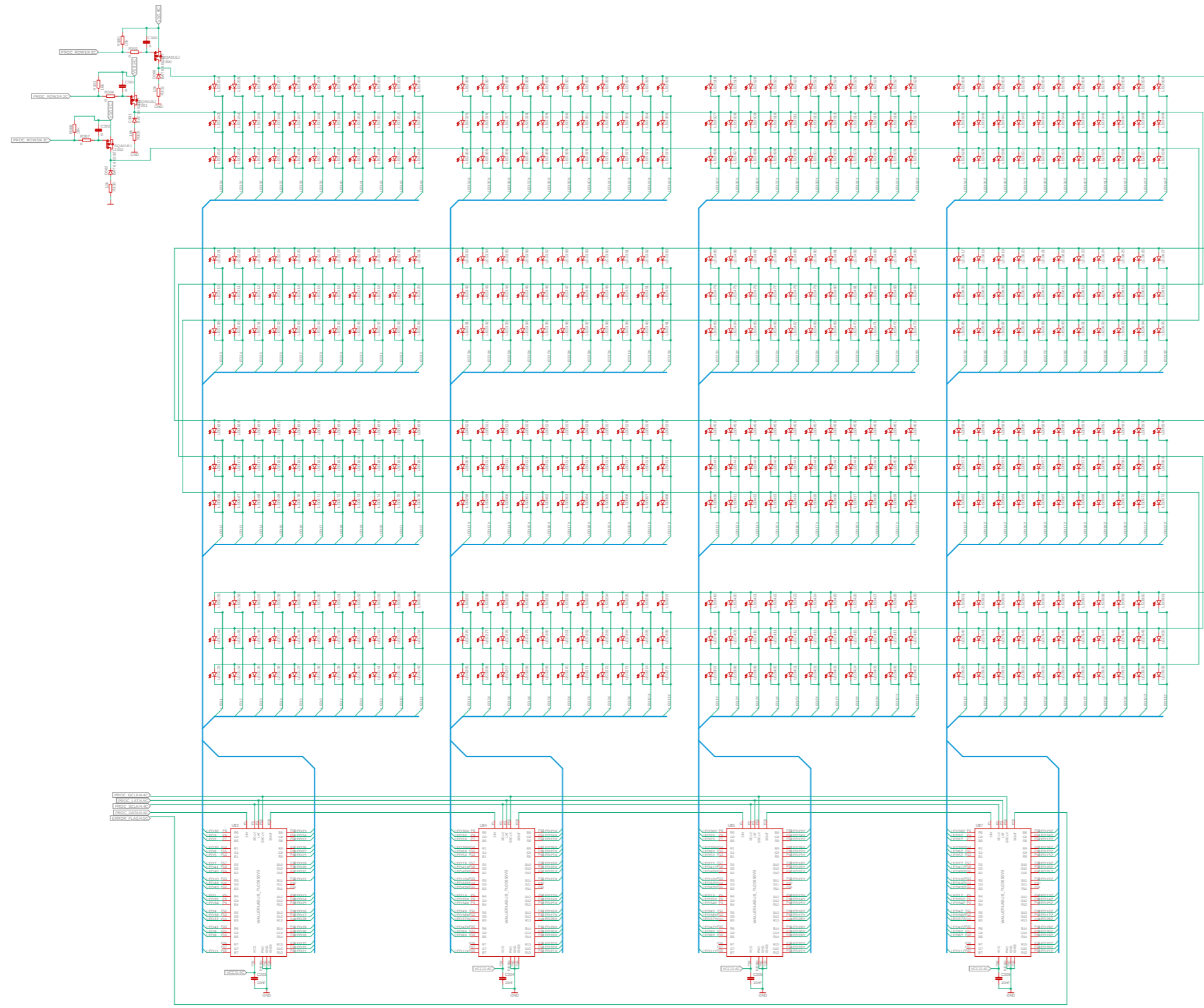
REV:

Date: 26. 5. 2020 22:52

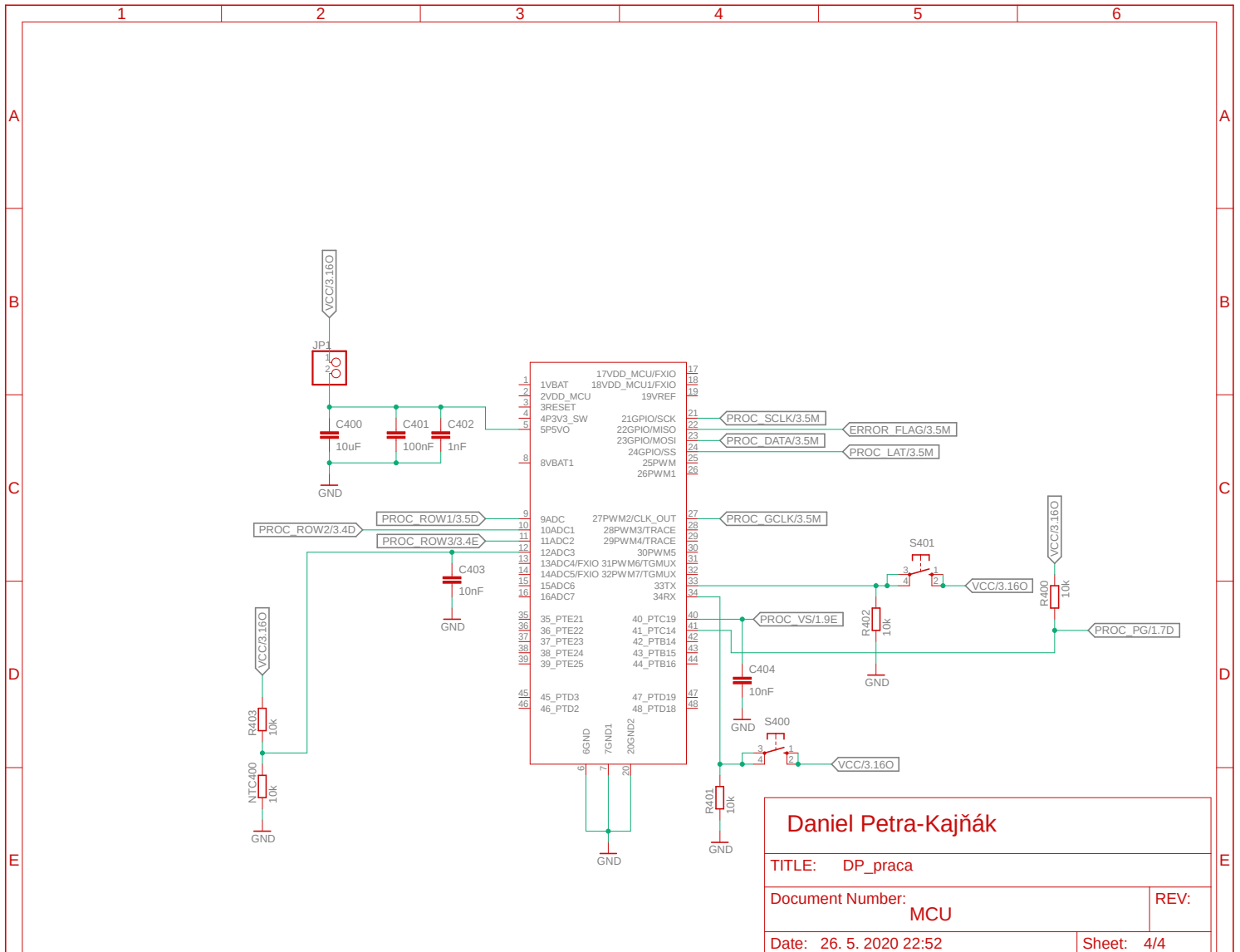
Sheet: 2/4

### **A.3 Schéma zapojenia LED matice a riadiacich obvodov**



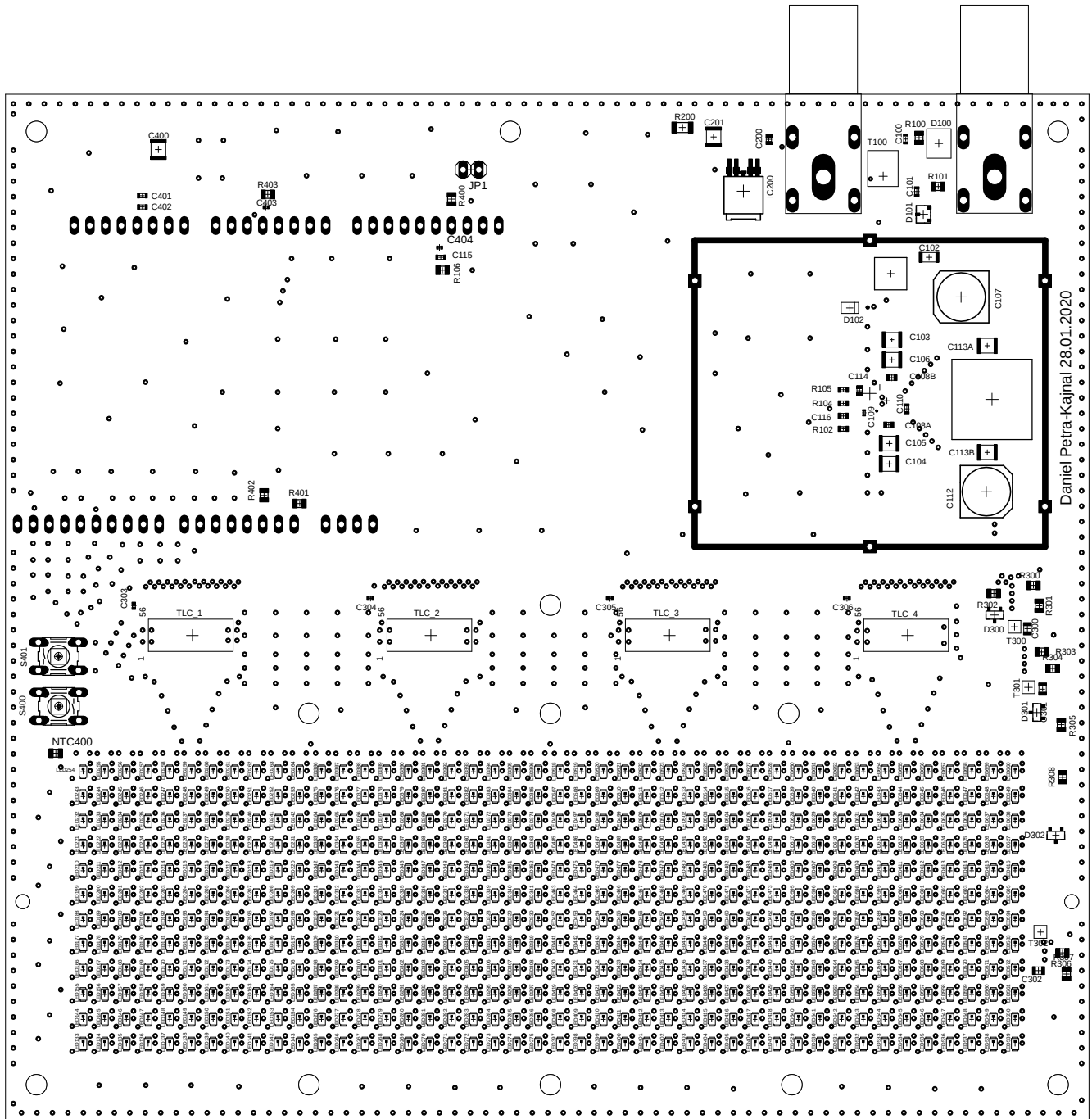


## A.4 Schéma zapojenia mikroprocesora

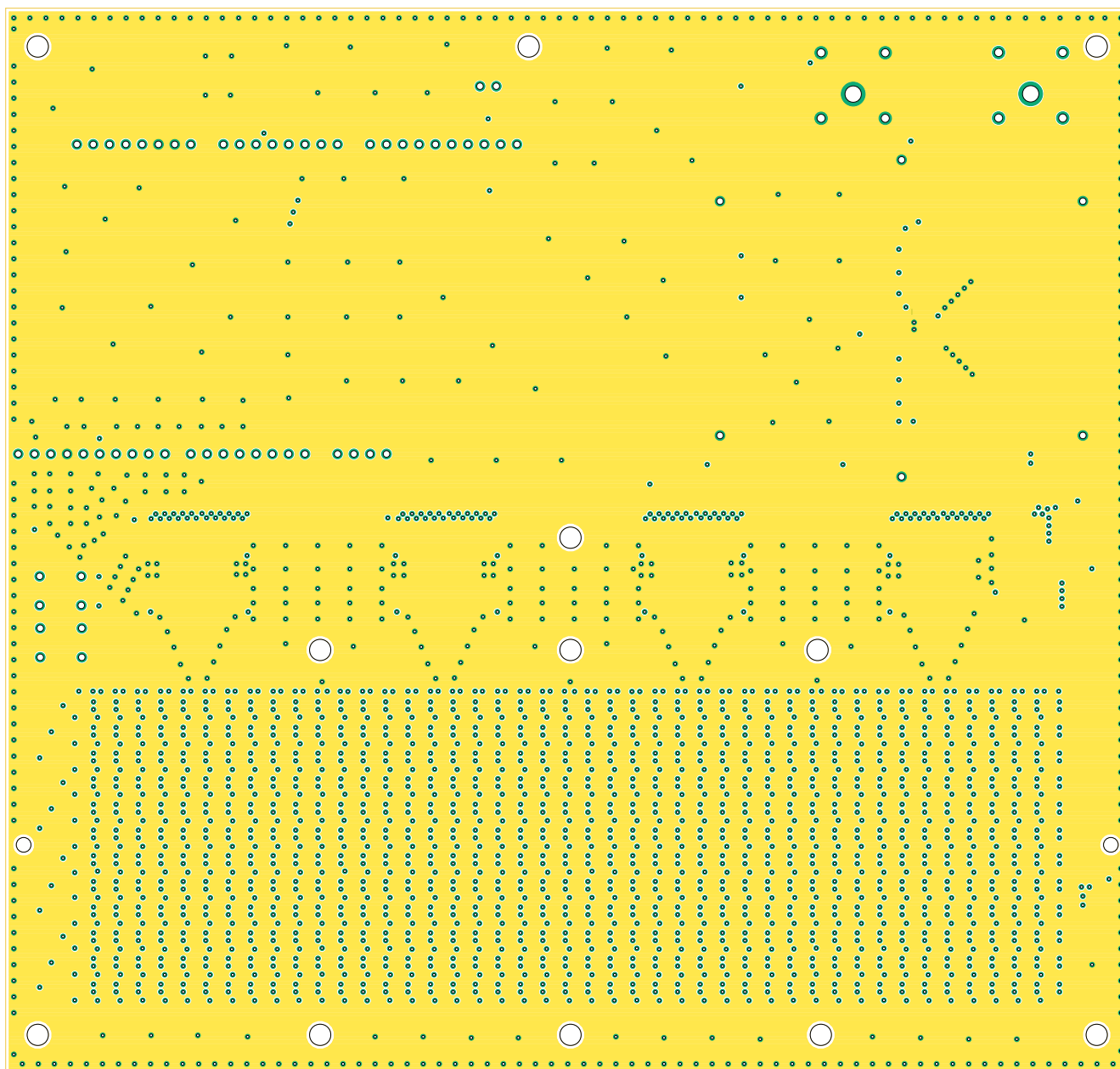




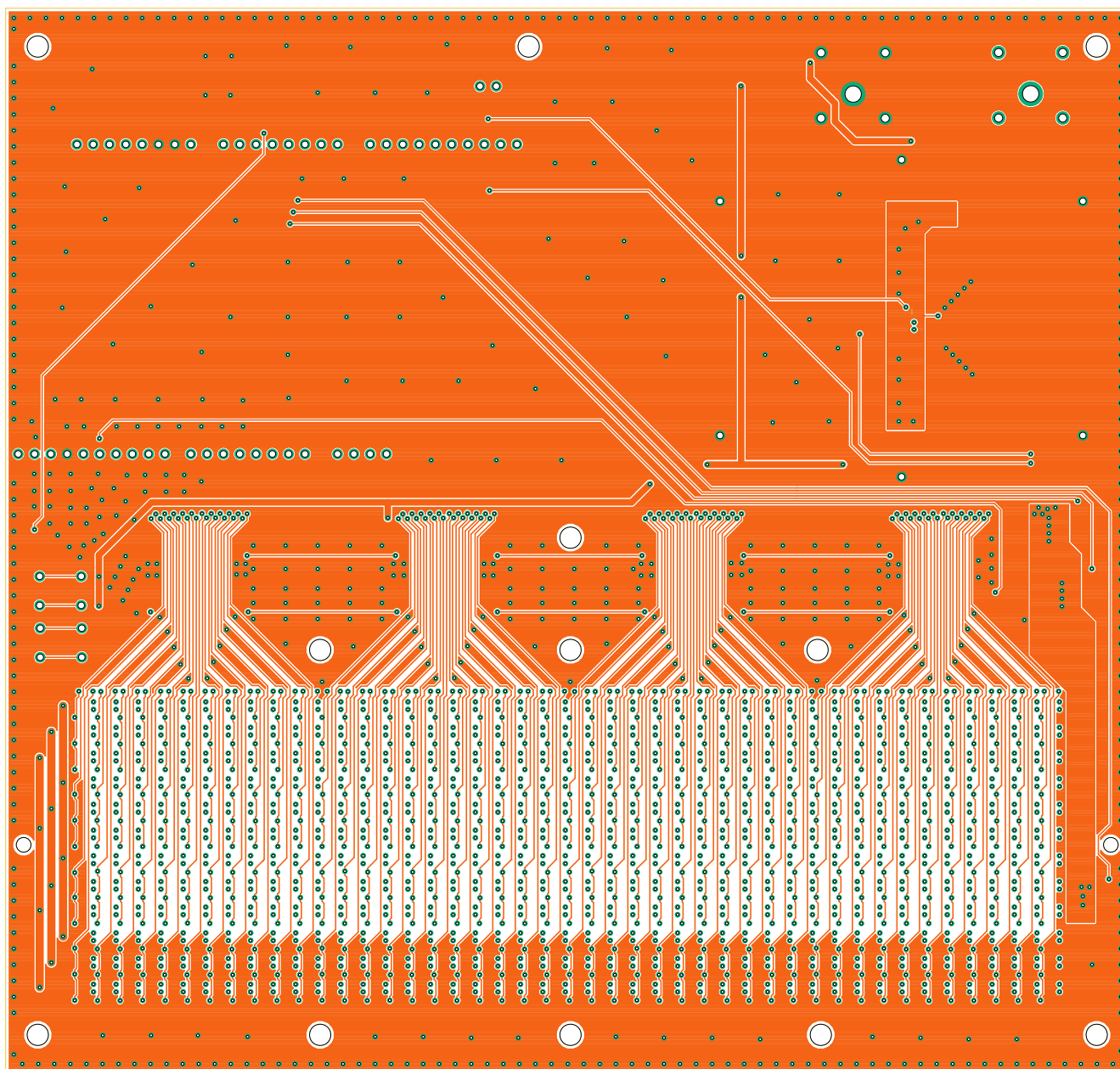
# A.6 Obsadzovací výkres TOP



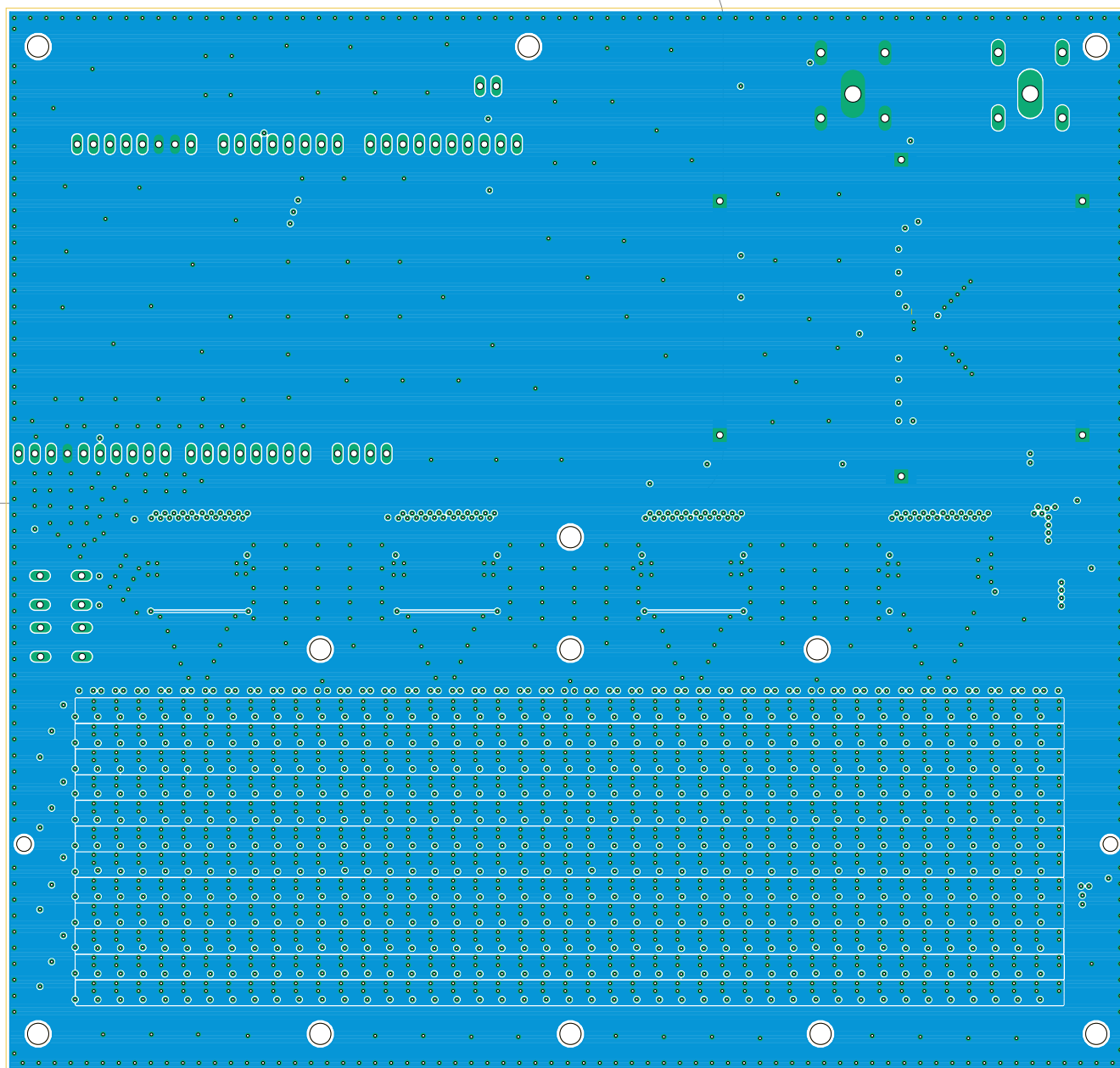
## A.7 Doska plošných spojov druhá vrstva



## A.8 Doska plošných spojov tretia vrstva



## A.9 Doska plošných spojov BOTTOM



## B ZOZNAM SÚČIASTOK

Exported from DP\_praca.sch at 27. 5. 2020 3:57

EAGLE Version 9.5.1 Copyright (c) 1988-2019 Autodesk, Inc.

Assembly variant:

<b>Part</b>	<b>Value</b>	<b>Package</b>
C100	100nF	C0603K
C101	100nF	C0603K
C102	4.7uF	C1206K
C103*		C1210K
C104*		C1210K
C105	220nF	C1210K
C106	220nF	C1210K
C107	68uF	150CRZ-0810
C108A	1uF	C1206K
C108B	1uF	C1206K
C109	10nF	C0402K
C110	470nF	C0603K
C112	132uF	C1210K
C113A	10uF	C1210K
C113B	10uF	C1210K
C114	4.7uF	C0603
C115	100nF	C0603K
C116	22nF	C0603K
C200	1uF	C1206K
C201	22uF	C0805K
C300*		C0805K
C301*		C0805K
C302*		C0805K
C303	100nF	C0805K
C304	100nF	C0805K
C305	100nF	C0805K
C306	100nF	C0805K
C400	10uF	C1210K
C401	100nF	C0603K
C402	1nF	C0603K
D100	SMBJ28CA	SMBG
D101	BZX84CSMD	TO236
D102	SO7G-GS18	SODFL3718X108N
D300	BAT 64 E6327	SOT23
D301	BAT 64 E6327	SOT23
D302	BAT 64 E6327	SOT23



IC1	TLE4275V50	TO252-5-11
IN_GND	BANANA	BANANA
IN_PWR	BANANA	BANANA
L100	470nH	1212AE
L102	8.2uH	5050FD
LED133...LED660		MINI-DOMILED
R100	10k	R0603
R101	10k	R0603
R102	33k2	R0603
R103	47k5	R0805
R104	100k	R0603
R105	34k8	R0603
R106	10k	R0603
R200	0,43	R1206
R300	10k	R0805
R301*		R0805
R302	10k	R0805
R303	10k	R0805
R304*		R0805
R305	10k	R0805
R306	10k	R0805
R307*		R0805
R308	10k	R0805
R400	10k	R0805
R401	10k	R0805
R402	10k	R0805
S400		B3F-10XX
S401		B3F-10XX
T100	DMP3010LPS	POWERDI5060-8
T300	SQA401EJ	PowerPAK SC-70
T301	SQA401EJ	PowerPAK SC-70
T302	SQA401EJ	PowerPAK SC-70
U\$1	MPQ4317	MPQ4317
U\$2	S32K148EVB	UNO WALLERLABLIB_56-
U\$3	WALLERLABLIB_TLC5955V0	HTSSOP WALLERLABLIB_56-
U\$4	WALLERLABLIB_TLC5955V0	HTSSOP WALLERLABLIB_56-
U\$5	WALLERLABLIB_TLC5955V0	HTSSOP WALLERLABLIB_56-
U\$7	WALLERLABLIB_TLC5955V0	HTSSOP

\*neoadené