

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Martin Jankovský



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ŘÍZENÍ SVÍTIDLA LED

LED LUMINAIRE CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Jankovský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Martin Jankovský

ID: 168344

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Řízení svítidla LED

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte vlastnosti luminiscenčních diod a způsoby jejich použití v osvětlovací technice. Prostudujte metody řízení osvětlovacích zařízení s luminiscenčními diodami. Navrhněte modul pro řízení osvětlovacího tělesa LED pro pouliční osvětlení. Svítidlo bude mít příkon 25 - 30 W. Obvodové zapojení volte tak, aby bylo dosaženo co největšího účinníku.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle doporučení vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 25.5.2021

Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc.

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

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Diplomová práce se věnuje světelným zdrojům využívající LED technologií. V teoretické části jsou rozebrány parametry LED, dělení a také výhody a nevýhody, které tato technologie přináší. Dále práce rozebírá způsoby řízení světelných LED modulu. Na základě těchto poznatků je navržený spínaný zdroj pro pouliční LED modul. Řešení respektuje nároky kladené na tyto zdroje, především velikost účinníku. Funkčnost řešení je dokázána měřením jednotlivých bloků spínaného zdroje.

Klíčová slova

LED, LED modul, spínaný zdroj, účinník, pouliční osvětlení

Abstract

The main topics of the thesis are luminaires based on LED technology and methods for driving them. The aim of the theoretical part is to offer basic knowledge about LEDs, their categories, advantages and disadvantages. The basic methods for driving LED modules are also presented. Based on these facts the design of LED switching power supply for street lighting is presented. The aim is to reach high power factor. The function of the devices is presented by examining parts of the power supply.

Keywords

LED, LED module, switching power supply, power factor, street lighting

Bibliografická citace

JANKOVSKÝ, Martin. *Řízení svítidla LED* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134629>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky. Vedoucí práce Jaroslav Boušek.

PROHLÁŠENÍ

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Martin Jankovský</i>
VUT ID studenta:	<i>168344</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Řízení svítidla LED</i>

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

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

V Brně dne: 23.5.2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc při vypracování práce. Dále děkuji kolegům z firmy TRON za pomoc s řešením technických a logistických problému, které při tvorbě práce vznikali.

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Obsah

ÚVOD.....	1
1. LED.....	2
2. VYUŽITIE LUMINISCENČNÝCH DIÓD.....	3
2.1 SIGNÁLOVÉ LED	3
2.2 LED STREDNÉHO VÝKONU	3
2.3 VÝKONOVÉ LED	4
2.4 LED BINNOVANIE	4
2.5 INDEX FAREBNÉHO PODANIA	6
2.6 VÝHODY LED	6
2.6.1 Účinnosť.....	6
2.6.2 Rovnomernosť osvetlenia	6
2.6.3 Možnosť riadenia jasu.....	7
2.6.4 Životnosť.....	7
2.7 NEVÝHODY LED	7
2.7.1 Komplexnosť návrhu svetelných systémov.....	7
2.7.2 Teplotný manažment.....	7
3. TOPOLOGIE SPÍNANÝCH ZDROJOV.....	8
3.1 MENIČ ZNIŽUJÚCI NAPÄTIE.....	8
3.2 MENIČ ZVYŠUJÚCI NAPÄTIE.....	9
3.3 MENIČ ZVYŠUJÚCI—ZNIŽUJÚCI NAPÄTIE.....	10
4. KOREKCIA ÚČINNÍKU	11
4.1 PASÍVNA KOREKCIA ÚČINNÍKU	11
4.2 AKTÍVNA KOREKCIA ÚČINNÍKU	12
4.2.1 <i>Continuous Conduction Mode</i>	12
4.2.2 <i>Critical Conduction Mode</i>	13
4.2.3 <i>Discontinuous Conduction Mode</i>	13
5. LED MODUL PRE POULIČNÉ OSVETLENIE.....	14
5.1 VÝBER VHODNEJ LED.....	14
5.2 LED MODUL.....	15
6. NÁVRH OBVODU SPÍNANÉHO ZDROJA	17
6.1 SPÍNANÉ ZDROJE PRE LED SVETELNÉ TELESÁ	17
6.2 KONCEPT NÁVRHU.....	17
6.3 POPIS OBVODU HV9931	18
6.4 POPIS FUNKCIE OBVODU HV991.....	18
6.5 REŽIMY ČINNOSTI MENIČA S IO HV9931	20
6.6 NÁVRH VSTUPNÉHO FILTRU, USMERŇOVACIEHO OBVODU A OCHRANY	23
6.7 NÁVRH MENIČA S HV9931	24
6.7.1 Výpočet odporu na nastavenie konštantného T_{OFF}	24
6.7.2 Hodnota induktora L_1	24
6.7.3 Hodnota induktora L_2	25
6.7.4 Hodnota odporu R_2 , R_5 a R_7	25
6.7.5 Hodnota odporu R_1 , R_4 a R_6	26

6.7.6	<i>Elektrolytický kondenzátor E1</i>	26
6.7.7	<i>Výber tranzistoru Q1</i>	27
6.8	VÝKONOVÉ STRATY	28
6.8.1	<i>Výkonové straty v tranzistore Q1</i>	29
6.8.2	<i>Výkonové straty na diódach</i>	30
6.8.3	<i>Straty na cievkach</i>	30
7.	NÁVRH ROZLOŽENIA SÚČIASTOK	31
8.	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	34
9.	ZÁVER	40
	LITERATURA	42
	ZOZNAM OBRÁZKOV	47
	ZOZNAM TABULIEK	48
	ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK	49
	ZOZNAM PRÍLOH	51

ÚVOD

Historické pouličné svetelné systémy využívali vysokotlakové sodíkové alebo halogénové výbojky. Tie poskytovali najväčšie množstvo svetla na Watt energie. Svetový trh s osvetlením prešiel v posledných rokoch radikálnymi zmenami súvisiacimi s využitím LED technológií v osvetľovacej technike. Revolúcie v polovodičovej technike pre osvetľovacie zariadenia radikálne zmenili nie len ekonomiku a dynamiku trhu, ale taktiež všeobecné vnímanie spoločnosti ku svetlu ako takému.

Primárnym účelom svetelnej techniky bolo vždy zabezpečenie dostatočného osvetlenia v domácnosti, v komerčných a kancelárskych priestoroch alebo na uliciach a vozovkách kvôli bezpečnosti. Využitie LED technológie so sebou prinieslo množstvo výhod ale aj prekážok pre výrobcov svietidiel. Na súčasné svietidlá využívajúce LED technológie sú kladené stále vyššie nároky týkajúce sa ich životnosti, podmienok prevozu alebo bezpečnosti.

Využitím LED v osvetľovacej technike sa zaoberá prvá teoretická časť spolu s metódami ich riadenia. Sú tu taktiež zhrnuté základné poznatky o zásadách pre návrh spínaných zdrojov s korekciami účinníku.

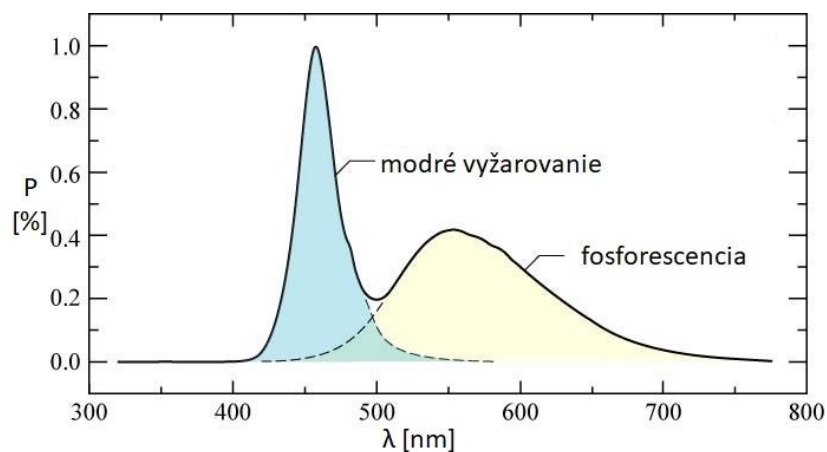
Praktická časť práce obsahuje výber vhodnej výkonovej LED pre aplikáciu pouličného osvetlenia zo súčasne dostupných súčiastok. Okrem návrhu LED modulu je úlohou práce výber vhodného integrovaného obvodu na návrh spínaného LED zdroja, ktorý by rešpektoval medze kladené normou ČSN EN 62717, konkrétne na veľkosť účinníku minimálne 0,9. Spínaný zdroj je navrhnutý a správna funkcia jeho jednotlivých častí je overená testami a meraniami.

1. LED

Väčšina polovodičov je vytvorená dopovaním čistého materiálu kremíku buď materiálom ktorý vytvorí voľne negatívny náboj (vznikne polovodič typu N) alebo voľne pozitívny náboj (vznikne polovodič typu P). V mieste dotyku týchto materiálov vzniká oblasť priestorového náboja, tzv. depletečná oblasť. LED je rovnako tvorená prechodom PN. Kremík je avšak nevhodný kvôli svojej nepriamej pásovej štruktúre. LED sú z polovodičov typu $A^{III}B^V$, ktorá má priamo pásovú štruktúru [1]. Po privedení napätia na LED získajú elektróny dostatok energie na preskok z valenčnej vrstvy do vodivej vrstvy, čo umožní prechod prúdu cez PN prechod. Keď elektrón stratí energiu a spadne späť to valenčnej vrstvy je vyžiarený fotón (svetlo) [1][2].

Prvé LED boli tvorené z GaAs (Galium Arsenid) a vyžarovali infračervené svetlo o vlnovej dĺžke 905 nm. Po objavení nových polovodičových materiálov, ako GaAsP (Galium Arsenid Phosphide) vznikli LED vyžarujúce červené svetlo, nasledované LED schopnými vyžiariť žlté a zelené svetlo. Modré LED boli tvorené z materiálu InGaN (Indium Galium Nitride) [1].

Dnešné biele LED sú tvorené modrými LED, ktoré majú cez vyžarovací povrch žltý luminofor. Žltý luminofor prevádza časť modrého exitovaného svetla na svetlo, ktoré vznikne fosforenciou. Na obrázku číslo 1.1 je šrafovanými čiarami vyznačená teoretická spektrálna intenzita v závislosti na vlnovej dĺžke. Plnou čiarou je potom výsledná spektrálna intenzita danej LED. Finálna hrúbka vrstvy luminoforu určuje výslednú teploty chromatickosti LED. Hrubsí luminofor nechá prejsť menšiu dávku nezmeneného svetelného toku, čoho výsledkom je teplejšia biela farba [1].



Obrázok 1.1 Závislosť spektrálnej intenzity na vlnovej dĺžke u bielej LED [1]

2. VYUŽITIE LUMINISCENČNÝCH DIÓD

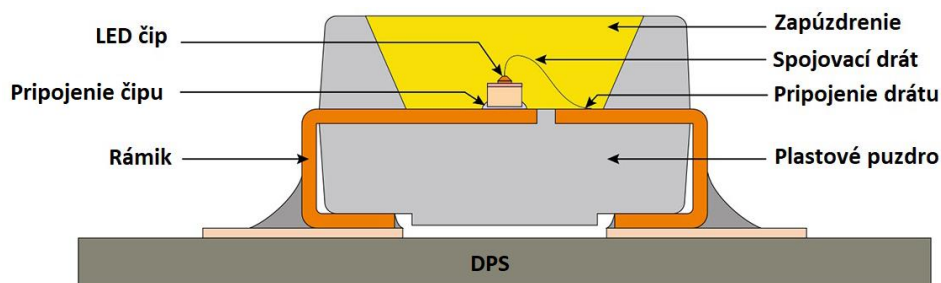
LED čip je umiestnený v puzdre ktoré poskytuje dva elektrické vodiče a transparentné optické okno pre únik svetla. U niektorých energeticky náročnejších puzdiel je taktiež nutné cesta pre odvod tepla. Materiál v ktorom je čip zapuzdrený poskytuje veľmi vysokú optickú priesvitnosť, vysoký index lomu, stabilitu pri vysokých teplotách a hermetickosť. Puzdro taktiež pomáha k zvýšeniu extrakcie svetla tým, že znižuje kontrast indexu lomu medzi polovodičovým čipom a vzduchom [1]

2.1 Signálové LED

V týchto LED diódach sa čip nachádza v puzdre, ktoré má tvar pologule, takže uhol dopadu svetla na rozhraní puzdra a vzduchu je vždy normálny. Výsledkom je, že na tomto rozhraní nedochádza k úplnému vnútornému odrazu. LED v týchto puzdrách sú väčšinou v rozmeroch 3 alebo 5 mm. Tieto diódy majú veľmi nízky výkon (0.01 – 0.1 W), s typickým prúdom 5 – 20 mA, a sú využívané ako signalizačné prvky u kontrolných zariadení [1]. Vyžarovaný výkon je u týchto súčiastok v radoch jednotiek lúmenov. Existujú s klasickými vývodmi, alebo v SMD (surface-mount device) puzdrách

2.2 LED stredného výkonu

Stredne výkonné LED (anglicky mid power LED) majú výkon menší ako 1 W ale väčší ako 0.01 W. Tieto puzdra sú prítiažlivé vďaka dobrej rovnováhe medzi ich účinnosťou a cenou. Najčastejšou konštrukciou týchto LED sú SMD PLCC (plastic leaded chip carrier) puzdra. Takéto puzdro pozostáva z jedného alebo viacerých polovodičových čipov (alebo matríc), ktoré sú buď nalepené alebo spájkované na olovenom ráme, ktorý poskytuje elektrické pripojenie, teplotný manažment a odraz svetla pre LED matricu. V súčasnosti sú elektródy LED čipu pripojené k vodičom drôtikmi z materiálu zlata. Do tejto rodiny mid-power patria LED vo veľkostiach 3528 (3,5 x 2,8 mm), 3030 (3,0 x 3,0 mm), 3014 (3,0 x 1,4 mm) alebo 5630 (5,6 x 3,0 mm) [1][3][4].



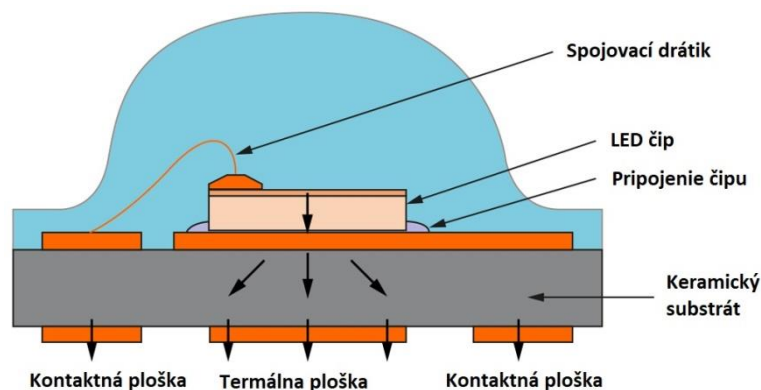
Obrázok 2.1 Puzdro LED stredného výkonu [4]

2.3 Výkonové LED

Výkonové LED (anglicky high power LED) sú puzdrá, ktoré dokážu opracovať s výkonom rovným alebo väčším ako 1 W. Tieto puzdrá môžu byť napájané prúdom od stoviek mA až po jednu A. Svetelný tok jednej diódy môže dosiahnuť stovky až tisíce lúmenov. Využívajú sa v aplikáciách, kde je nutné dosiahnuť vysokú svietivosť, ako napríklad v priemyselných halách, pouličnom osvetlení alebo športoviskách [5].

Konštrukcia pozostáva z veľkého čipu (matrica) pripevnenom na keramickom podklade pomocou kovovej prepojovacej vrstvy. Cez čip je nanosený fosforový povlak a čip je potom uzavretý v čírej pologuľovitej silikónovej šošovke. Elektrická prepojovacia vrstva spája LED čip s anódou na spodnej strane keramického substrátu. Katóda prechodu sa nachádza na povrchu čipu, ktorá je spojená s negatívnym terminálom pomocou drôtika. Na spodnej strane puzdra sú tri kovové plošky – pozitívna a negatívna ploška pre spájkovanie, a dedikovaná termálna ploška ktorá poskytuje kontakt čipu s substrátom na odvod tepla. Táto ploška je elektricky izolovaná od anódy a katódy. V porovnaní s rodinou mid power LED poskytujú výkonové LED puzdra oveľa robustnejšiu konštrukciu, ktorá zvyšuje jeho spoľahlivosť a životnosť [5]. V posledných rokoch sa u výkonových LED puzdiel prechádza na konštrukciu typu flip-čip, kedy je čip LED priamo spájkovaný na substrát bez nutnosti spojovacích drôtikov. Absencia drôtikov zvyšuje spoľahlivosť[4].

Pomer lm/W je u mid power LED lepší. Výkonové LED avšak poskytujú lepšiu životnosť. Životnosť LED je závislá hlavne od teploty. U mid power LED využitie PLCC puzdiel vedie skôr k sklonu k tepelnej degradácii a fotooxidácii, kým puzdro výkonových LED má podstatne lepší tepelný manažment[5].



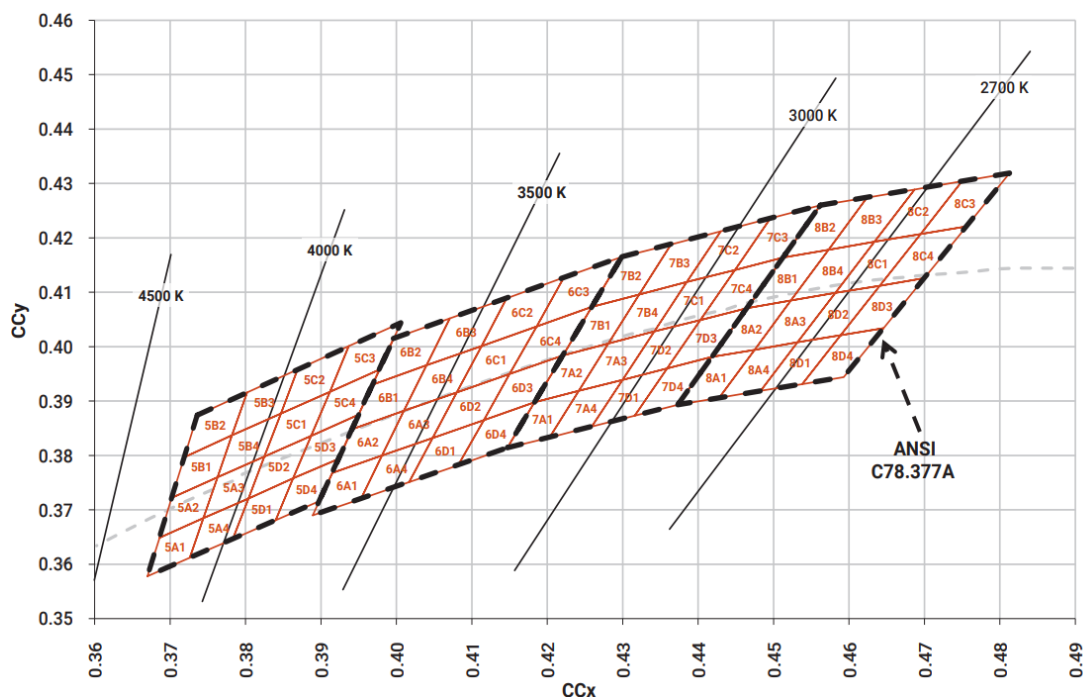
Obrázok 2.2 Puzdro LED vysokého výkonu [4]

2.4 LED Binnovanie

Napriek tomu, že výroba LED čipov je rafinovaný proces, nesúlad tepelných koeficientov medzi epitaxnými vrstvami a substrátom môže viesť k chybám vyvolanými deformáciou. Tieto chyby spôsobujú, že na PN prechode elektróny a diery kombinujú neradiačne, čo znižuje generovaný svetelný tok [6]. Vo výsledku môžu aj LED čipy vytvorené vedľa seba na rovnakom substráte vykazovať rozdielny jas.

S cieľom maximálneho výťažku pri riešení týchto problémov triedia výrobcovia luminiscenčné diódy podľa svetelného toku, napätia a buď chromatickosti (u monochromatických bielych LED) alebo farby (u farebných LED), a delia ich do takzvaných binov. Tento prístup umožňuje výrobcovi riadiť zásoby s cieľom zabezpečiť dostupnosť a zákazníkovi jasnú predstavu o výstupných charakteristikách, ktoré dané LED dosahujú. Proces triedenia LED podľa týchto charakteristík taktiež zaisťuje rovnomernosť medzi jednotlivými žiarovkami, svietidlami a nepozorovateľný rozdiel medzi chromatickosťou ľudským vnímaním [6].

Príkladom takejto štruktúry binovania je napríklad 1/16 ANSI C78.377A. Pre nastavenie hraníc sa využíva štandardný štvorstupňový štvoruholník, ktorý je potom rozdelený na 16 štvoruholníkov. Tieto štvoruholníky zodpovedajú korelovaným farebným teplotám (anglicky Correlated Colour Temperature – CCT), ktoré napodobňujú zdroje bieleho svetla v rozsahu od studenej bielej až po teplú bielu. Táto štruktúra ponúka 16 jedinečných farebných bodov v jednom štvoruholníku CCT, čo umožňuje maximalizáciu výťažnosti produkcie, keďže každá vyrobená LED spadá do jedného z týchto binov [6].



Obrázok 2.3 Chromatická oblasť podľa štruktúry 1/16 ANSI C78.377A [7]

Výrobcovia svietidiel väčšinou na triedenie využívajú štandard SDCM (Standard Deviation of Colour Matching), ktorý zoskupuje LED podľa ich polohy vo farebnom priestore, napríklad pomocou x, y súradnicového systému založenom na CIE1931. Oblasť SDCMn má tvar elipsy v CIE1931 a písmeno n značí vzdialenosť, o ktorú sú od seba 2 LED čipy od seba. Komerčný sektor využíva najviac oblasť SDCM3, inak tiež nazývanú ako MacAdamsovu elipsu 3. Ako bolo vyššie spomenuté, táto selekcia neznamená absolútnu

jednotnosť chromatickosti avšak predstavuje kompromis komerčnej prijateľnosti a dosiahnuteľnosti poskytovanej výrobcami LED.

2.5 Index farebného podania

CRI (anglicky colour rendering index) udáva do akej miery sú farby osvetleného objektu vykreslené presne. Svietidlá s rovnakým CRI môžu mať rôzne CCT a naopak. Farebné podanie je koncipované tak aby kvantifikovalo výkonnosť farebného podania svetelného zdroja. Teda numerické meranie farebného podania má kvalitatívnu vlastnosť. Čím je CRI číslo vyššie, tým má svetelný zdroj lepšie farebné podanie. U CCT číselná hodnota ponúka iba farebnú referenciu. Hodnota CRI je spravovaná medzinárodnou komisiou pre osvetľovanie (v skrate CIE, po francúzsky Commission internationale de l'éclairage) a je to jediná celosvetovo uznávaná norma na meranie kvality farebného podania. Pre výpočet hodnoty CRI je 14 farebných vzoriek z Munsellovho štandardného radu simulovaných pod referenčným a testovaným zdrojom svetla. Každá z týchto vzoriek je pridelená hodnota R_i , v rozsahu od 0 do 100. Mierou R_a je všeobecný index podania ktorý je priemerom prvých ôsmich vzoriek [4] [8]. Rôzne aplikácie LED svietidiel vyžadujú rôznu hodnotu CRI. Ako minimálne prijateľná hodnota pre osvetlenie interiérov je CRI 80, kým na priemyselné alebo pouličné aplikácie je CRI 70 dostatočné.

CRI meranie má isté hranice. Hodnota CRI R_a je počítaná iba z prvých ôsmich z štrnástich vzoriek. Tieto prvé vzorky majú nízku až strednú chromatickú saturáciu a obmedzené zakrivenie v červenej oblasti viditeľného spektra, čo teda nemusí poskytovať veľkú spektrálnu odrazivosť pre červenú farbu. LED svietidlá s CRI 80 sú často nasýtené v modrom a zelenom spektre, kým červený výkon je neprimeraný. Vzorka číslo R9, čo je nasýtená červená farba je teda často udávaná samostatne ku všeobecnému R_a . Aritmetický priemer hodnoty R_a avšak môže maskovať slabé vykreslenie jednej alebo viacerých farebných vzoriek. [4] [8].

2.6 Výhody LED

2.6.1 Účinnosť

Ako jeden z hlavných dôvodov prechodu na LED osvetlenie je energetická účinnosť. Postupným vývojom sa pomer lm/W zvýšil z 85 lm/W na hodnoty blížiacie sa 200 lm/W . To je hlavnou výhodou oproti svetelnej účinnosti ktorú ponúkajú žiarovky (do 20 lm/W), žiarivky (do 22 lm/W) alebo sodíkové svietidlá (70-140 lm/W) [9].

2.6.2 Rovnomernosť osvetlenia

Hlavnou prioritou osvetlenia vnútorných a vonkajších priestorov je zabezpečenia rovnomerného rozloženia lúmenov na dopadajúcu plochu. Vo veľkých vnútorných priestoroch táto rovnomernosť prispieva k vizuálnemu pohodliu. To je veľmi výhodné v priemyselných a komerčných zariadeniach [9].

2.6.3 Možnosť riadenia jasu

Zatiaľ čo stmievanie žiaroviek vyžaduje použitie drahých a zložitých obvodov, stmievanie halogénových a vysokotlakových sodíkových výbojok nie je možné pod 50% daného výkonu. LED zariadenia je možné stmievať dvoma spôsobmi. Prvý je pomocou redukcie konštantného prúdu, inak nazývaným analógové stmievanie. Tento spôsob reguluje prúd ktorý je budený cez LED [9].

Druhý spôsob je digitálne stmievanie – aplikáciou pulzovej šírkovej modulácie (PWM). Jas sa mení nastavením striedy PWM signálu, čím na sa výstup dostane priemerná hodnota jasu v celom rozsahu od 0 do 100 %. PWM stmievanie znižuje spotrebu energie, predlžuje životnosť LED zariadenia a umožňuje miešanie farieb alebo CCT [9].

2.6.4 Životnosť

Ďalšou veľkou výhodou LED osvetlenia je dlhá životnosť. Životnosť LED súčiastky, LED lampy alebo LED svetelného telesa je udávaný ako okamih, kedy výkon svetelného toku klesne na 70 % pôvodného toku. Pre to, aby LED produkt získal DLC Premium certifikát (anglicky Design Light Consortium, čo je organizácia ktorá certifikuje svetelné výrobky podľa istých kritérií), musí jeho životnosť L_{90} dosiahnuť aspoň 36 000 hodín [10]. Vo výraze $L_{xx}B_{yy}$ (napríklad $L_{90}B_{50}$) zodpovedá číslo 90 percentu vyžiarených lúmenov, na ktorý LED zdroj svetla poklesne po určitom čase. Hodnota 50 znamená, že u nie viac ako 50% LED súčiastok v testovacom vzorku sa očakáva zlyhanie [11].

K vyhodnoteniu životnosti LED sa využíva metóda LM-80, ktorú musia vykonávať všetci výrobcovia LED. Je to séria testov ktoré definujú metódy pomocou ktorých majú LED výrobcovia merať pokles lúmenov, zmeny chromatickosti a napätia v čase. K vyhodnoteniu životnosti sa využíva metóda TM-21, ktorá pracuje s týmito LM-80 dátami a pomocou definovaných matematických extrapoláčnych vzťahov predpovedá životnosť LED súčiastok [11].

2.7 Nevýhody LED

2.7.1 Komplexnosť návrhu svetelných systémov

V porovnaní s inými svietidlami je zložitnosť návrhu svetelných systémov využívajúcich LED technológie oveľa väčšia. Optimalizácia nákladov je teda dôležitá súčasť procesu návrhu svietidla [9].

2.7.2 Teplotný manažment

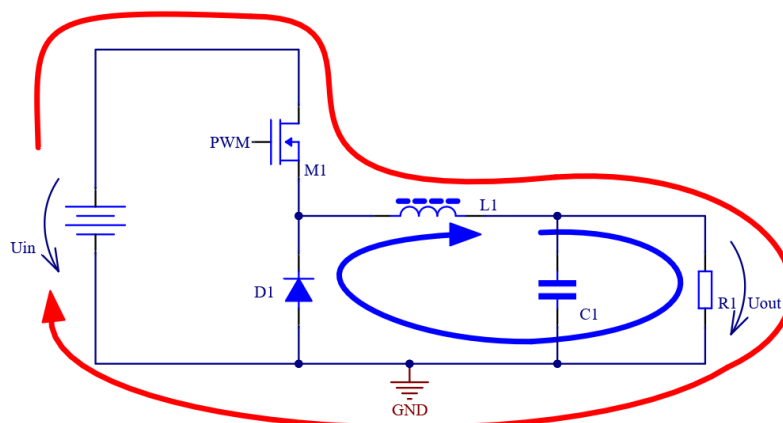
Hlavnou nevýhodou LED svetelných zariadení je teplotná závislosť. S rastúcou teplotou sa znižuje svetelný výkon. Časť energie dodávaná do LED je premenená na teplo, ktoré je nutné odviezť termálnou cestou. Ak sa nedodrží teplota pod stanovenou hranicou je pravdepodobné urýchlenie mechanizmov zlyhania v PN prechode luminiscenčnej diódy – tvorba atómových defektov, zažltnutie zapuzdrovanej látky alebo zmena farby krytu plastového obalu [9].

3. TOPOLOGIE SPÍNANÝCH ZDROJOV

Táto kapitola sa zaoberá teóriu spínaných zdrojov. Predstavuje základné obvody a rovnice, ktoré ich popisujú.

3.1 Menič znižujúci napätie

Menič znižujúci napätie je najjednoduchším druhom spínaného zdroja. Anglicky nazývaný buck (alebo step-down), je použitý v aplikáciách kde napätie záťaže U_{out} je nižšie ako vstupné napätie U_{in} . Obvod sa skladá zo spínača (obvykle MOSFET) pripojeného na vstupné napätie, ktorý reguluje tok prúdu cez induktor L_1 a záťaž R počas času t_{ON} . Induktor obmedzuje mieru nárastu prúdu a uchováva energiu počas tejto doby. Dióda D_1 je počas tejto doby t_{ON} v závernom režime. Riadiaci obvod vypne MOSFET v momente, keď prúd cez záťaž dosiahne nastavený limit. Akumulovaná energia v induktore avšak musí byť uvoľnená a prúd ďalej tečie po dobu t_{OFF} cez induktor L_1 , záťaž R_L a diódu D_1 , ktorá je teraz v priepustom smere [2]. Priebiehy slučiek prúdu v časoch zapnutia M_1 t_{ON} a vypnutia t_{OFF} sú graficky znázornené na obrázku 3.1 červenou a modrou farbou.



Obrázok 3.1 Spínacie cykly znižujúceho meniča

Termín strieda (duty cycle) označuje pomer doby kedy je M_1 otvorený voči perióde spínaného cyklu T . V meničoch znižujúcich napätie je strieda obvykle maximálne 85 % pre spoľahlivú funkciu. To znamená, že spínač M_1 je zapnutý 85 % času a 15 % času je vypnutý. To limituje výstupné napätie na 85 % vstupného napätia [2].

$$D = \frac{t_{ON}}{T}, \quad (3.1)$$

$$D = \frac{U_{out}}{U_{in}}, \quad (3.2)$$

Výstupný prúd meniča nie je konštantný ale pohybuje sa okolo strednej hodnoty v závislosti na stave tranzistoru. V stave ON narastá o takzvané zvlnenie prúdu ΔI_L . Toto zvlnenie je dané veľkosťou indukčnosti cievky L .

Veľkosť zvlnenia je daná ako

$$\Delta I_L = \frac{(U_{out} - U_{in}) * t_{ON}}{L} \quad (3.3)$$

Alebo môže byť vyjadrená pomocou striedy ako:

$$\Delta I_L = \frac{U_{out} * (1-D) * D * T}{L} = \frac{U_{out} * (1-D) * D}{f * L} \quad (3.4)$$

3.2 Menič zvyšujúci napätie

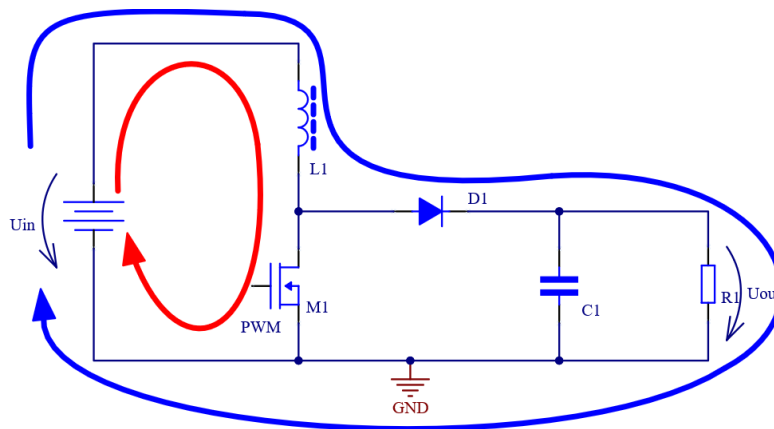
Tento obvod zvyšuje vstupné napätie U_{in} na výstupné napätie U_{out} . Induktor je zapojený do série a spínací prvok paralelne so záťažou. Počas doby času t_{ON} rastie cez cievku L_1 prúd lineárne a je v nej akumuluje energia. Napätie na induktore L_1 je rovné vstupnému napätiu zdroja U_{in} . V čase vypnutia spínača má induktor snahu udržať smer a veľkosť prúdu, a vzniká na ňom vzniká indukované napätie U_L . Po vypnutí tranzistoru M_1 je táto energia počas doby t_{OFF} dodávaná do záťaže cez diódu D_1 . Prúd cez induktor zachováva smer avšak mení sa polarita jeho napätia U_L , keďže výstupné napätie U_{out} je väčšie ako vstupné napätie U_{in} [2]. Napätie na induktore U_L je rovné:

$$U_L = U_{out} - U_{in} \quad (3.5)$$

Pre striedu a veľkosť zvlnenia výstupného prúdu platí:

$$D = \frac{1 - U_{out}}{U_{in}} \quad (3.6) [X]$$

$$\Delta I_L = \frac{U_{in} * D}{f * L} \quad (3.7) [X]$$



Obrázok 3.2 Spínacie cykly zvyšujúceho meniča

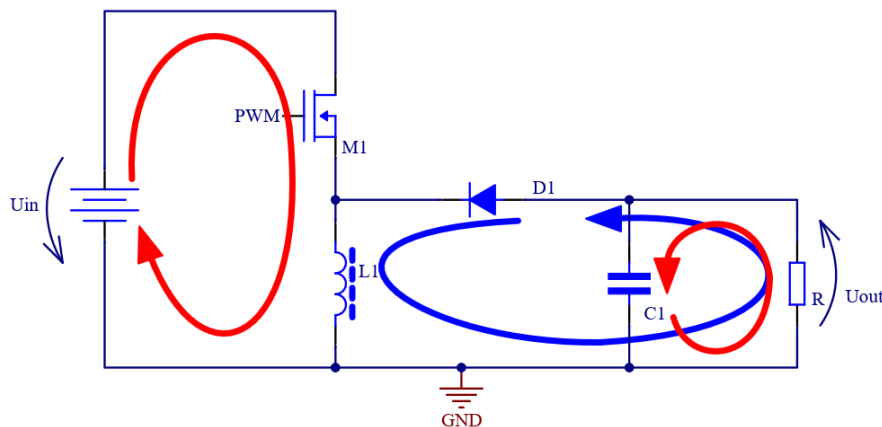
3.3 Menič zvyšujúci—znižujúci napätie

Tradičné fly-back meniče využívajú induktor s dvoma vinutiami (transformátor). Prvé (primárne) vinutie je pripojené na vstupné napätie a spínací element spojený so zemou. Druhé (sekundárne) vinutie je pripojené na záťaž. Počas doby t_{ON} rastie prúd na primárnej strane a akumuluje sa magnetická energia. Počas doby t_{OFF} je táto energia uvoľnená zo sekundárneho vinutia vďaka tečúcemu prúdu do záťaže. Fly back meniče sú využité často v aplikáciách, kedy musí byť záťaž galvanicky izolovaná od sieťového vstupného napätia [13].

Niektoré fly-back meniče ale využívajú induktor s jedným vinutím. Sú istou alternatívou voči SEPIC alebo Čuk meničom. V týchto meničoch nie je možná izolácia kvôli využitiu jedného induktora pre prúdy na primárnej a sekundárnej strane [13].

Prúd prechádza cez induktor L_1 počas času t_{ON} zapnutého tranzistora M_1 . Počas tejto doby rastie prúd skoro lineárne s časom. Po vypnutí tranzistora M_1 prechádza prúd cez diódu D_1 a nabíja kondenzátor C_1 [2]. Priebeh prúdov je znázornený na obrázku č. 3.3. Pre striedu tohto meniča platí, že

$$D = \frac{U_{out}}{U_{in} + U_{out}}. \quad (3.8)$$



Obrázok 3.3 Spínacie cykly zvyšujúceho-znižujúceho meniča

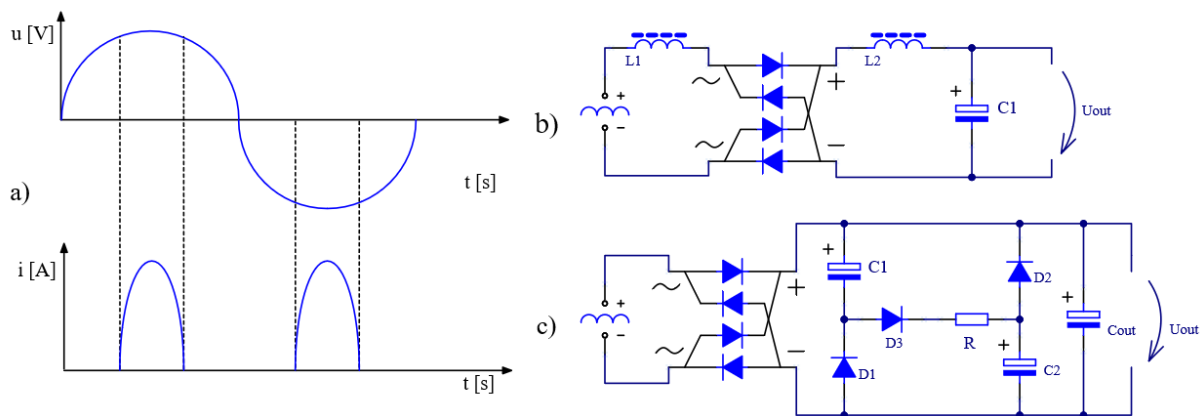
4. KOREKCIA ÚČINNÍKU

Účinník (anglicky power factor) je definovaný ako podiel činného výkonu (v jednotkách W) ku zdanlivému výkonu (jednotky VA). Vyjadruje, akú veľkú časť energie je možné premeniť na užitočnú energiu. Čisto resistívna záťaž má PF rovný jednej. Avšak v aktívnych záťažach, akou sú svetelné LED moduly, prúd napájania zo siete prechádza cez usmerňovač, po ktorom je DC napätie vyhladené za použitia elektrolytického kondenzátora. Zvyšok obvodu je napájaný z tohto kondenzátora a je nutné aby bol stále nabitý. Na obrázku 4.1a je vidieť priebeh veľkých prúdových špičiek, ktoré nabíjajú kondenzátor. Šrafované vyznačená oblasť naznačuje výkonové využitie, ktoré je voči obsahu priebehu malé. Keďže sa kondenzátor nabíja počas špičiek v cykle AC napájania, nachádzajú sa tu prúdové špičky, ktoré nemajú harmonický priebeh. Hodnota PFC je potom v oblasti od 0,5 až 0,7 [2].

Z tohto dôvodu sú zavedené určité techniky, ktoré zlepšujú PF, teda aby mal striedavý prúd sínusový priebeh a vo fáze so striedavým napätím. Takéto zlepšenie sa dá dosiahnuť za použitia buď pasívnych alebo aktívnych prvkov.

4.1 Pasívna korekcia účinníku

Pasívne prvky zväčša obsahujú kombináciu veľkých kondenzátorov, induktorov a usmerňovačov, ktoré pracujú na frekvencii rozvodnej siete. Podľa použitých súčiastok sa dajú rozdeliť do dvoch skupín – filtre s induktívnou alebo kapacitnou filtráciou [2].



Obrázok 4.1 a) Priebeh prúdových impulzov u obvodu bez PFC b) induktívny pasívny filter c) kapacitný pasívny filter

Induktívny pasívny filter využíva filtračný induktor v striedavej časti obvodu alebo za usmerňovačom. Induktor rozširuje prúdové impulzy ktoré nabíjajú filtračný kondenzátor. Príklad takého obvodu je na 4.1b.

Kapacitný filter (anglicky valley fill) funguje na princípe odfiltrovania vyšších harmonických zložiek za pomoci dvoch kondenzátorov. Kondenzátory C_1 a C_2 sú nabíjané cez diódu D_3 a odpor R na polovicu veľkosti špičkového striedavého napätia v každej polovici cyklu usmerného striedavého vstupu. Počas tejto doby sú oba kondenzátory zapojené do série. Odpor R tlmí prúdové špičky počas nabíjania kondenzátorov. Napätie U_{out} na

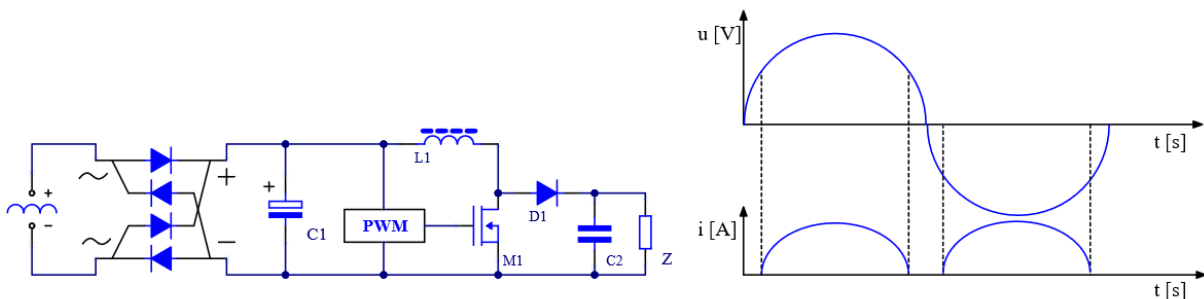
výstupnom kondenzátore C_{out} sleduje sínusový priebeh vlny až po polovicu hodnoty špičkového napätia. V tom momente sa dióda D_3 uzavrie a teraz paralelne zapojené kondenzátory C_1 a C_2 dodávajú energiu na výstup skrz D_1 a D_2 , až kým usmernené striedavé napätie znovu nedosiahne hodnotu polovici špičkového napätia [13]. Príklad zapojenia je na obrázku číslo 4.1c.

4.2 Aktívna korekcia účinníku

Aktívne prvky využívajú konvertory, ktoré spínajú sieťové napätie na vysokých frekvenciách. Ten je umiestnený medzi usmerňovač a filtračný kondenzátor. Medzi najpopulárnejšie zapojenia patrí menič zvyšujúci napätie. Riadiaci obvod sleduje veľkosti vstupného a výstupného napätia a podľa toho riadi menič tak, aby odoberaný prúd kopíroval čo najlepšie priebeh vstupného sieťového napätia [2]. Nevýhodou aktívnych prvkov je zvýšená zložitosť obvodu. Koncept zapojenia, priebeh odoberaného prúdu a výkonové využitie je zobrazené na obrázku 4.2

Aktívne prvky je ďalej možné rozdeliť do troch kategórií podľa priebehov prúdu:

- CCM (Continuous Conduction Mode) – režim s neprerušovaným prúdom
- CRM (Critical Conduction Mode) – kritický režim s premennou frekvenciou
- DCM (Discontinuous Conduction Mode) – nespojitý režim so stabilnou spínacou frekvenciou



Obrázok 4.2 Aktívny filter (vľavo) a výkonové využitie spínacieho prúdu (vpravo)

4.2.1 Continuous Conduction Mode

V režime CCM riadiaci tranzistor spína tak, že prúd prechádzajúci cez cievku nikdy neklesne na nulu. Nevýhodou je nutnosť veľkej hodnoty indukčnosti cievky, keďže je v nej vždy akumulovaná energia. Spínacie straty na tranzistore sú taktiež väčšie [14].

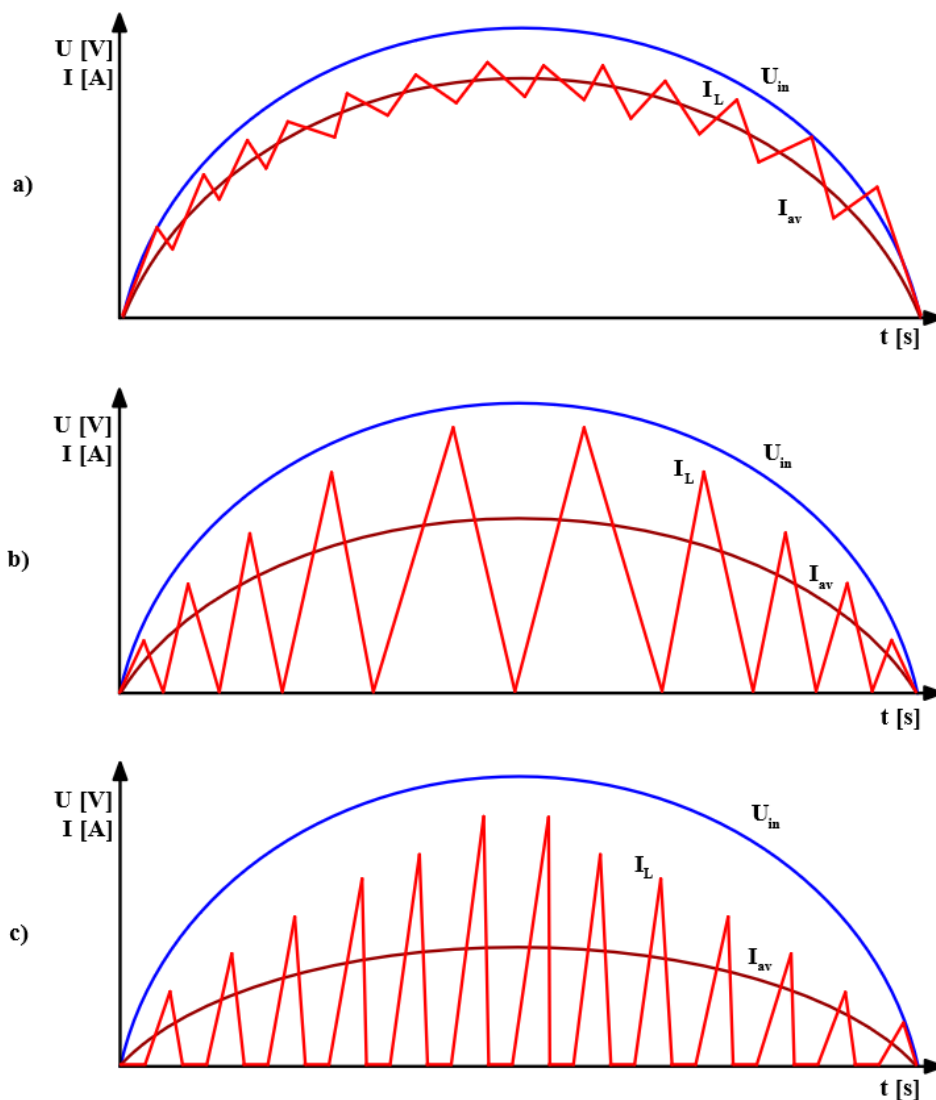
Frekvencia spínania riadiaceho prvku je konštantná a je nastavená tak, aby priebeh prúdu kopíroval sínusový tvar vstupného napätia. Prechádzajúci prúd cez induktor nikdy neklesne na nulu. Tým je dosiahnuté malé zvlnenie prúdu. Avšak vybraný induktor musí mať veľkú hodnotu indukčnosti z dôvodu vždy akumulovanej energie. Spínacie straty na tranzistore sú taktiež relatívne veľké [14].

4.2.2 Critical Conduction Mode

V CCM režime dochádza ku spínaniu tranzistoru v momente klesnutia prúdu cievky na hodnotu rovnej nule. V rovnaký čas rastie hodnota spínaného prúdu, čo vedie k premennej frekvencii spínania. Riadiaci obvod znižuje šírku pulzu spínania ak je výstupné napätie príliš veľké a zvyšuje šírku ak je napätie príliš malé [14].

4.2.3 Discontinuous Conduction Mode

V DCM režime tranzistor spína až po klesnutí prúdu cievky na nulu. Avšak na rozdiel od CCM v spínacej perióde T je doba t , kedy je prúd cez induktor nulový. Frekvencia spínania a čas kedy je tranzistor zapnutý sú konštantné. Výhodou je relatívna jednoduchosť. Spínacie straty na tranzistore v porovnaní s CCM a CRM sú relatívne malé. Avšak v porovnaní s predchádzajúcimi metodami je špičková hodnota vstupného prúdu väčšia čo vedie k nižšej účinnosti [14].



Obrázok 4.3 Režimy spínania a) CCM b) CRM c) DCM

5. LED MODUL PRE POULIČNÉ OSVETLENIE

Výber vhodnej LED pre pouličné osvetlenie je predstavený v prvej časti tejto kapitoly. Druhá časť sa týka návrhu LED modulu.

5.1 Výber vhodnej LED

Odvetvie pouličného osvetlenia bolo jedným z prvých využití LED technológií. Prichádzajúce svetové nariadenia nastavujú určité obmedzenia, ktoré budú kladené na svietidlá LED technológiou. Jedná sa o požiadavky na vyššiu kvalitu svetla a svetelnú účinnosť, redukcia svetelného znečistenia. Pouličné osvetlenie má za úlohu osvetľovať pozemnú komunikáciu alebo ulice s cieľom zvýšiť viditeľnosť a bezpečnosť.

Výkonové LED v 3535 puzdrách sú spoľahlivým zdrojom svetla vďaka svojej robustnej konštrukcii a materiálom odolným voči korózii. LED v týchto puzdrách majú k tomu veľmi často v sebe zabudovanú ESD ochranu. Tento typ puzdra je prítlačivý pre výrobcov pouličných osvetlení vzhľadom na použitie svietidiel v znečistených priemyselných oblastiach, kde sú svietidlá vystavené extrémom striedania teplôt. Nevýhodou je avšak vyššia jednotková cena (typicky 500 lm/\$) oproti puzdrám stredného výkonu (typicky 1000 lm/\$) [15]. Typickým predstaviteľom je model XP-G3 od výrobcu CREE. Maximálny povolený prúd je u týchto bielych LED do 2000 mA [7]. Za zmienku stojí taktiež Z5M4 od Seoul Semiconductors, ktorý momentálne patri k jedným z najlepších modelov na trhu pre pouličné aplikácie, dosahujúc 175 lm/W pri teplote prechodu T_j 85 °C [16]. Konštrukcia tohto puzdra je založená na takzvanom WICOP čipe [17]. Toto puzdro je v podstate varianta flip-čipu. Nevyužíva drôtky, čo robí jeho konštrukciu oveľa spoľahlivejšiu. LED 5050 od Lumileds je niečo medzi vysoko výkonovými púzdrami a púzdrami stredného výkonu. Je dostupná v 6, 24 a 30 V verziách. Účinnosť 171 lm/W je dosiahnutá pri 25 T_j . Maximálny prúd je v prípade 6V verzie do 800 mA (6 V verzia) [18].

Puzdrá stredného výkonu sú teda ekonomickejšou voľbou pre výrobcov svietidiel, ktoré so sebou ale prinášajú riziko nižšej spoľahlivosti. Kvôli menej robustnej konštrukcii, ktorá bola spomenutá v kapitole 2, sú tieto súčiastky menej odolné voči chemickej korózii a termálnemu šoku. Tieto faktory sa nevyskytujú v priaznivých podmienkach interiérových priestorov. Jedným z najväčších rizík použitia mid-power LED puzdiel v pouličných aplikáciách je kontaminácia postriebreného rámiku sírou. To môže viesť k zníženiu celkového vyžiareného svetelnému toku alebo farebnému posunu. Ďalšími rizikami sú poškodené drôtové spojenia alebo degradácia plastového krytu dôsledkom tepelného alebo mechanického namáhania [15]. Týmto spomenutým problémom nečelia vysoko výkonové LED, keďže moderné súčasné puzdrá sú založené na keramike s flip-čipom (bez spojenia dratom) [4].

Lumileds ponúka riešenie vo svojich radách 2835HE [19], 3030 2D round LES [20] a 3030HE Plus [21]. Tieto produkty využívajú drátky zo zlata a majú určitú formu ochrany pred sírou. Testy spoľahlivosti ukazujú lepšie výsledky v obrátenom poradí spomenutých LED. Púzdru 2835 HE a 3030HE Plus ponúka vyššiu svetelnú účinnosť, kým 3030 2D má

lepšie optické výsledky s sekundárnou optikou. Typické prúdy využité u LED stredného výkonu sú do 65 mA (0,2 W). Pre pouličné aplikácie je ale nutné ísť s radiacim prúdom vyššie a popritom znižovať počet LED na plochu, čo rovnako znižuje počet potrebných optík. LED spomenuté od Lumileds majú maximálny povolený prúd až do 240 ma alebo 480 mA, podľa 3V alebo 6V varianty čipu [20] [21]. Z pohľadu životnosti sú avšak vysoko výkonové LED alebo v puzdre 5050 LED vždy lepšie. Životnosť L90 väčšia ako 100 000 hodín je dosiahnuteľná iba za priaznivých podmienok. Pre Lumileds 3030 2D je L90B50 väčšia ako 100.000 hodín pri prevádzkovom prúde 120 mA, pri teplote 105 °C. Porovnanie jednotlivých predstaviteľov súčasne obľúbených model LED puzdirov je v tabuľke číslo 5-1. Svetelné data sú získané z technických listov [7], [16], [18], [20], dát životnosti LM-80 a z interne poskytnutého CREE LED kalkulátora a LED kalkulátorom [20] dostupným od distribútora Future Lighting Solutions,

Tabuľka 5-1 Porovnanie parametrov LED v rôznych puzdriach

	XP-G3 S-line [7]	SEOUL-SEMI Z5M4 [16]	Lumileds Luxeon 5050 [18]	Lumileds Luxeon 3030 2D [20]
CCT; CRI	4000K; 70CRI	4000K; 70CRI	4000K; 70CRI	4000K; 70CRI
svetelný tok @Tj 85 °C	290lm @700 mA	340lm @700 mA	740 lm @800 mA	113 lm @120 mA
účinnosť	147 lm/W	175 lm/W	171 lm/W	165 lm/W
životnosť L90	L90 > 145khod @700 mA / 85°C	L90 > 100khod @1050 mA /105 °C	L90 > 100khod @750 mA /85 °C	L90 > 100khod @120 mA / 105 °C

V závere, LED pouličné osvetlenia musia spĺňať:

- Dobrú spoľahlivosť – zaistená konštrukciou
- Dobré dáta životnosti LM-80 (preferovane $L_{90} > 10.000$ hodín)
- Dobrú optickú kompatibilitu s sekundárnou optikou
- Vysoký pomer lm/ \$
- Vysoká účinnosť

Pre účel práce je navrhnutý modul s využitím výkonových LED XP-G3 rady S.

5.2 LED modul

Celkový svetelný tok LED modulu sa vypočíta ako:

$$\phi_{(celkový)} = \phi_{(LED)} * n * \eta_0, \quad (5.1)$$

kde $\phi_{(LED)}$ je svetelný tok pri danom prúde, n je počet LED na module a η_0 je svetelná účinnosť modulu. Po osadení LED na modul sa predpokladá 4-6 % strata lúmenov. Zvolená LED je od výrobcu CREE v rade XP-G3. Farebná teplota je 4000K, CRI 80 a svetelná trieda toku je zvolená S3. Na presný výpočet parametrov LED modulu slúži interný CREE kalkulátor, ktorý poskytuje výber LED, triedu svetelného toku a veľkosť teploty prechodu Tj.

Pri doske osadenej dvanástimi LED v sérii môžeme uvažovať o svetelnom toku približne 3300 lm pri nastavení „worst-case“ parametru teploty T_j 85 °C pri prúde 700 mA.

Current (A)	Model	Cree XLamp XP-G3 Standard {DWT}			
	Flux	156 (S3)			
	Price	\$ -	T_j (°C)	85,0	
	ΔV_f	0,000	Multiple	x1	
	LED lm	LED lm/W	LED Vf	LED W	
0,100	47,8	184	2,6	0,26	
0,200	92,6	175	2,64	0,528	
0,300	135	168	2,68	0,804	
0,400	176	162	2,72	1,09	
0,500	215	156	2,75	1,38	
0,600	253	151	2,78	1,67	
0,700	289	147	2,81	1,97	
0,800	323	142	2,84	2,27	
0,900	356	138	2,86	2,57	
1,000	388	135	2,88	2,88	

Obrázok 5.1 Parametre diódy XP-G3 S3 triedy v CREE kalkulátore

Vzhľadom na požadovaný príkon 25 až 30 W celého svietidla je nutné LED modul navrhnuť na hliníkový substrát. Ten ponúka lepšiu tepelnú vodivosť ako FR-4. Teplo vzniknuté na LED sa tak efektívnejšie rozptýli na montážnu plochu, čo pozitívne prispieva k účinnosti a hlavne životnosti LED modulu. Rozloženie 12 LED na module ponúka využitie sekundárnych optík ktoré napomáhajú k smerovaniu svetelného toku. Veľmi často sú pre pouličné aplikácie využité optiky 50x50mm s 4 optikami. V tomto prípade bol modul navrhnutý na využitie optiky STRADA2x6, k čomu boli do návrhu prispôbené vhodné pozície montážnych otvorov.



Obrázok 5.2 3D model LED modulu a optiky STRADA 2x6

6. NÁVRH OBVODU SPÍNANÉHO ZDROJA

6.1 Spínané zdroje pre LED svetelné telesá

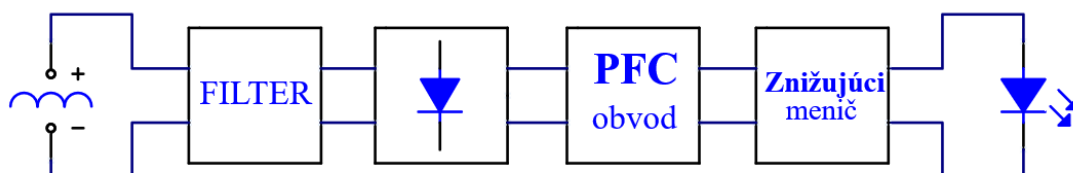
LED svetidlá sú veľmi často napájané pomocou AC/DC izolovaných spínaných meničov. Tento obvod sa skladá z transformátoru, ktorý striedavé napätie 230 V zmenší na požadovanú hodnotu vstupného napätia IO meniča. Za transformátorom potom nasleduje usmerňovač (napríklad Graetzov usmerňovací mostík), ktorý toto zmenšené striedavé napätie usmerní na jednosmerné. Kondenzátor potom udržuje konštantnú hodnotu vstupného napätia pre regulátor [2]. Využitie transformátoru taktiež zvyšuje ochranu proti kontaktu so sieťovým napätím.

Druhý spôsob návrhu meniča je využitie regulátoru, ktorý dokáže pracovať v rozsahu vysokých vstupných napätí. V takomto obvode odpadáva využitie vstupného transformátoru. Komplexnosť obvodu sa tým výrazne zjednoduší. Série obvodov od Microchip umožňujú presne takýto koncept návrhu LED driveru – ich vstupné pracovné napätie sa pohybuje v rozsahu od 12 do 450 V.

6.2 Koncept návrhu

Hlavným cieľom práce je návrh AC/DC meniča s konštantným výstupným prúdom pre LED svetidlo. Obvod bude pracovať s vstupným sieťovým napätím 220-240 V a umožní výstupný pracovný prúd 700 mA s maximálnym výstupným napätím 36 V.

Menič je využitý na riadenie pouličného osvetlenia. Týmito svetidlami a zariadeniami sa zaoberá norma ČSN EN 61000-3-2. Tá svetelné zariadenia zaraďuje do triedy C. Trieda C limituje 3. harmonickú prúdovú zložku na 30% [23]. Ako už bolo spomenuté v kapitole 4, tradičný vstupný obvod s filtračným kondenzátorom produkuje nízku hodnotu PF (0,5-0,7) a vysokú zložku harmonických zložiek. Využitie spínacieho prvku medzi usmerňovacím mostíkom a regulátorom vedie ku kvázi sínusovému priebehu vstupného prúdu vo fázy s vstupným napätím, nízkemu harmonickému skresleniu a PF hodnote blízkej jednej. Hodnota PF vyššia ako 0,9 je vyžadovaná u zariadení s príkonom nad 25 W podľa normy ČSN EN 62717.



Obrázok 6.1 Koncept návrhu spínaného zdroje pre LED

Využitie obvodu na zvýšenie PF avšak zvyšuje komplexnosť obvodu. Veľmi častý je koncept návrhu meniča s dvoma stupňami. Prvým stupňom je obvod, ktorý zabezpečuje vysoké PF a reguluje konštantné vstupné napätie pre nasledujúci druhý stupeň, ktorým je

znižujúci menič zabezpečujúci konštantný výstupný prúd. Pre účel tejto práce je vybraný obvod HV9931 [24] od firmy Microchip, ktorý v sebe združuje dva stupne s tým, že oba stupne majú spoločnú riadiacu a spínaciu časť obvodu.

6.3 Popis obvodu HV9931

Pin 1 - VIN

Tento pin je vstupný pin vysoko napätového regulátoru.

Pin 2 - CS1

Tento pin je vstupom do vnútorného invertujúceho vstupu vnútorného komparátoru. Neinvertujúci vstup komparátoru je uzemnený. Je využitý k obmedzeniu pracovného spínania. Ak napätie na tomto vstupe klesne na nulu, komparátor vypne spínací cyklus.

Pin 3 - GND

Uzemnenie obvodu.

Pin 4 - GATE

Tento pin je výstupom pre riadenie hradla spínacieho MOSFET tranzistoru.

Pin 5 - PWMD

Vstup externého PWM signálu. Ak je pin pripojený na zem alebo otvorený, je spínacia funkcia vypnutá.

Pin 6 - VDD

Tento pin slúži na napájanie vnútorného obvodu.

Pin 7 - CS2

Podobne ako pin CS1 slúži pin ako vstup vnútorného invertujúceho komparátoru.

Pin 8 - RT

Slúži na nastavenie frekvencie vnútorného oscilátoru. Pri pripojení odporu medzi týmto pinom a zemou sa nastaví konštantnú frekvencia spínania. Pripojením odporu medzi týmto pinom a pinom GATE sa nastaví konštantný vypínací čas oscilátoru.

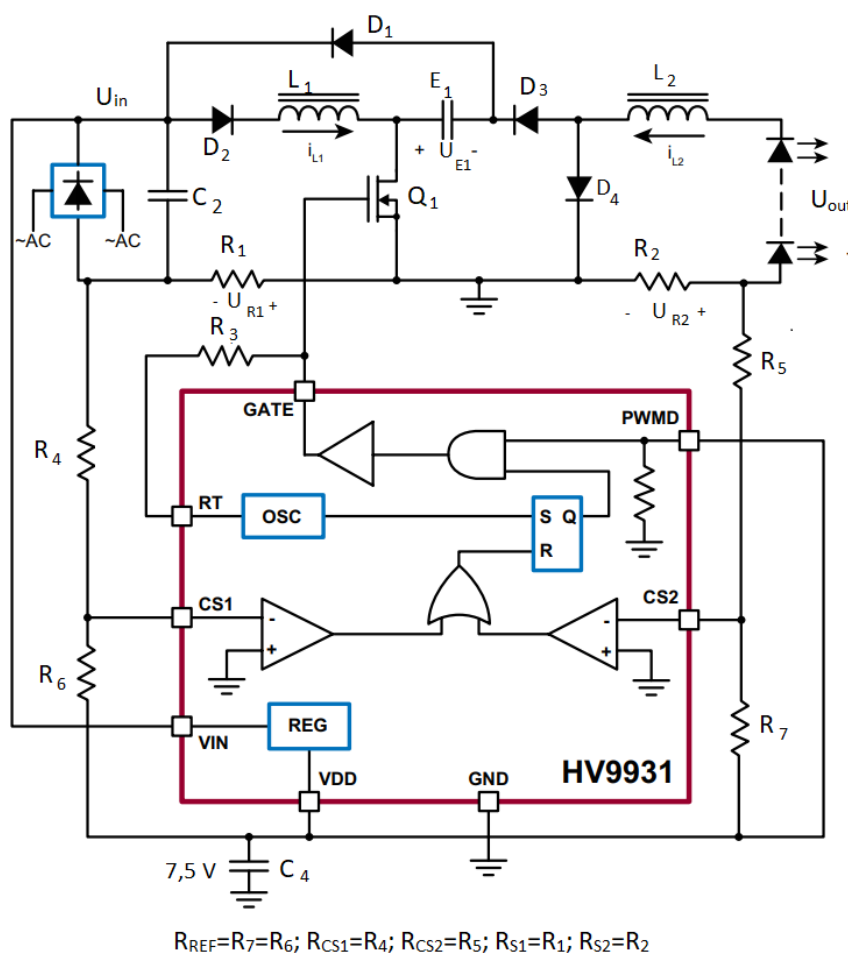
6.4 Popis funkcie obvodu HV991

Vnútorné zapojenie spolu s hlavnými súčiastkami meniča je znázornené na obrázku č. 6.2. Obvod HV9331 obsahuje vnútorný vysoko napätový regulátor, ktorý má na vstupe pin VIN. Po prinesení napätia v rozmedzí 12 až 450 V je na výstupe pinu VDD snaha obvodu regulovať napätie 7,5 V, ktoré je možné využiť ako referenčné napätie pre nastavenie úrovni pre spínanie vnútorných komparátorov [24] [25].

Po dosiahnutí prahového napätia na pine VDD je aktivovaný vnútorný oscilátor. Výstupný signál oscilátora privedie signál na vstup R klopného obvodu. Výstup pinu GATE sa následne prepne do logickej úrovne H a zopne tranzistor Q_1 .

Frekvencia oscilátora môže byť nastavená pripojením odporu R_3 k pinu RT. Obvod môže pracovať s konštantnou frekvenciou f_s alebo konštantným časom T_{OFF} . V prvom prípade je nutné odpor R_3 pripojiť medzi zem a pin RT. V druhom prípade sa pripája odpor R_3 medzi pin GATE a pin RT. V nastavení s konštantným časom T_{OFF} privádza oscilátor signál na klopný obvod po uplynutí nastavenej doby T_{OFF} , ktorá začína po privedení signálu úrovne L na pin

GATE. Na odporučenie aplikačných poznámok a technických listov je využité nastavenie spínania s konštantným časom T_{OFF} . Konštantný spínací čas T_{OFF} prispieva pozitívne k nižšiemu napäťovému stresu a zvlnenia na kondenzátore E_1 [24], [25].



Obrázok 6.2 Schéma zapojenia s HV9931 [24]

Výstupný obvod je menič znižujúci napätie. Energie je dodaná z elektrolytického kondenzátora E_1 s dostatočne veľkou kapacitou na stlmenie zvlnenia usmerneného striedavého napätia. Kondenzátor E_1 má potom relatívne konštantné napätie naprieč periódou cyklu striedavého napätia. Toto konštantné napätie znamená konštantnú striedu spínania pri riadení prúdu cez LED záťaž. Konštantná strieda prispieva ku sínusovému tvaru prúdu odoberanému zo striedavej siete. V takom prípade rovnako špičkový prúd $I_{L1(PK)}$ v L_1 a priemerný vstupný prúd I_{IN} sú priamo úmerné vstupnému napätiu U_{in} [24], [25].

Podľa [25] platia rovnice:

$$I_{L1(PK)} = \frac{D \cdot U_{IN}}{L_1 \cdot f_S} \quad (6.1)$$

a

$$I_{IN} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot I_{L1(PK)} \cdot \quad (6.2)$$

Potom veľkosť vstupného prúdu je

$$I_{IN} = \frac{D^2}{2 \cdot L_1 \cdot f_S} U_{IN} = \frac{U_{IN}}{R_{eff}}. \quad (6.3)$$

Efektívny vstupný odpor meniča je potom možné vyjadriť ako

$$R_{eff} = 2 \cdot L_1 \cdot f_S / D^2 \quad (6.4)$$

Nízka hodnota R_{eff} zaisťuje nízke harmonické rušenie vstupného striedavého prúdu a PF hodnotu blízku jednej [25].

Vnútorňý obvod ďalej obsahuje dva napäťové komparátory pre nastavenie špičkových hodnôt prúdov v induktoroch L_1 a L_2 . Vstupy CS1 a CS2 sú invertujúce vstupy komparátorov s referenciou zeme. Napätie z výstupného pinu VDD obvodu HV9931 je možné použiť ako referenčné napätie U_{REF} s veľkosťou 7,5 V. Prúdy i_{L1} a i_{L2} ktoré zapnú komparátory sa vypočítajú z [24] a [25] ako

$$i_{L1(PK)} = \frac{U_{REF} \cdot R_4}{R_6 \cdot R_1} \quad (6.5)$$

a

$$i_{L2(PK)} = \frac{U_{REF} \cdot R_5}{R_7 \cdot R_2}. \quad (6.6)$$

Keďže induktor L_2 pracuje v CCM režime jeho prúd je možné taktiež vyjadriť ako

$$i_{L2(PK)} = i_{L2} + \frac{1}{2} \cdot \Delta i_{L2}, \quad (6.7)$$

kde i_{L2} je požadovaná výstupná hodnota prúdu a Δi_{L2} je zvlnenie prúdu v induktore L_2 . Odpor R_6 a R_7 sú referenčné odpory R_{REF} , vid' obrázok číslo 6.2.

Účel komparátoru CS2 je regulácia výstupného prúdu. Výstupný prúd sa dá nastaviť podľa [25] rovnicou

$$R_5 = \frac{I_{OUT} + \frac{\Delta i_{L2}}{2}}{U_{REF}} \cdot R_7 \cdot R_2, \quad (6.8)$$

kde referenčné napätie U_{REF} je napätie interného regulátoru V_{DD} , R_5 je R_{CS2} , R_2 je R_{S2} a R_7 je referenčný odpor R_{REF} .

Komparátor CS1 obmedzuje prúd vstupného induktora L_1 . Značenie odporov je podobné ako pre komparátor CS2, teda R_4 je R_{CS1} , R_1 je R_{S1} a R_6 je referenčný odpor R_{REF} . Po zapnutí obvodu nie je žiadny náboj na kondenzátore E_1 , takže v induktore L_2 nemôže narastať výstupný prúd [25]. Prúd vstupného induktora I_{L1} sa potom nastaví podobnou rovnicou:

$$R_4 = \frac{I_{L1(PK)}}{U_{REF}} \cdot R_6 \cdot R_1. \quad (6.9)$$

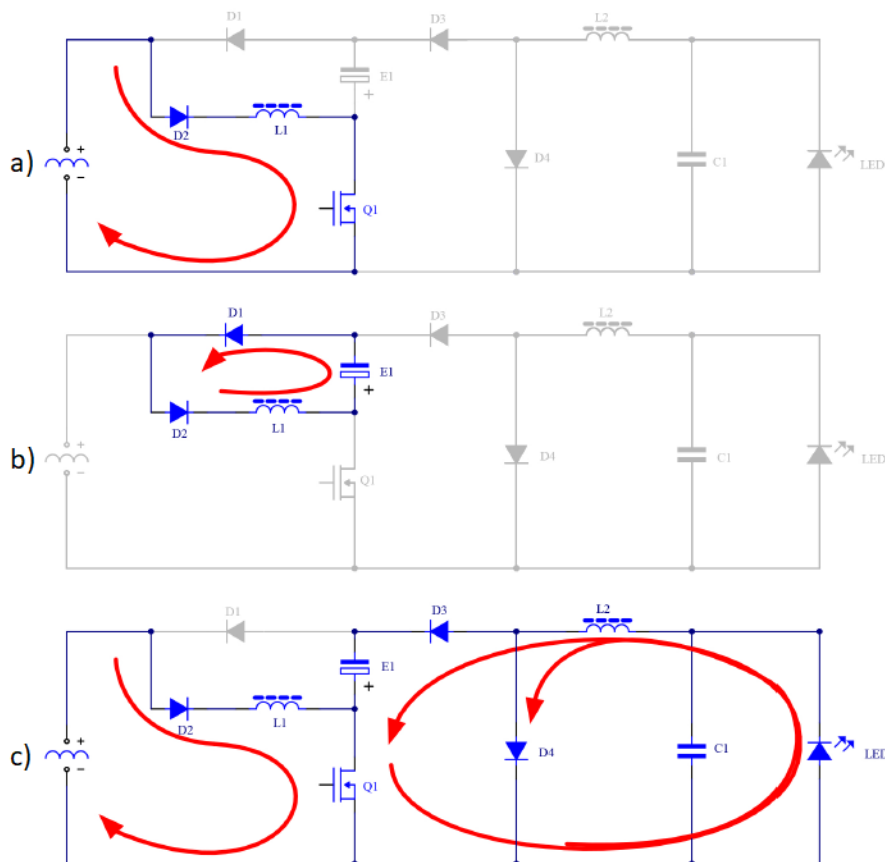
6.5 Režimy činnosti meniča s IO HV9931

Hlavné spínacie slučky obvodu v jednotlivých pracovných fázach sú graficky znázornené na obrázkoch číslo 6.3 a 6.4.

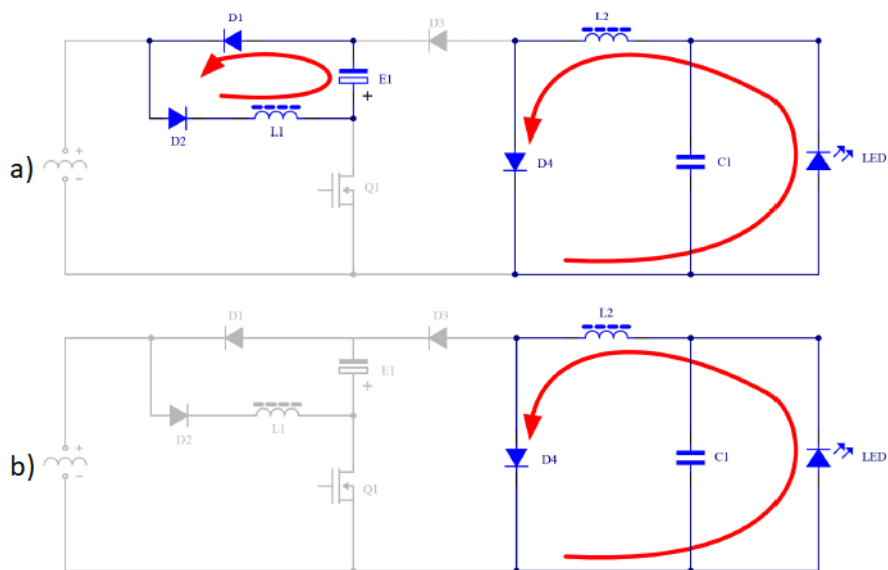
Pri prvom zapnutí meniča je tranzistor MOSFET Q_1 vypnutý a čaká na prvý interný signál k impulzu zopnutia hradla G. V tomto čase nie je kondenzátor E_1 nabitý. Po zopnutí hradla je usmernené striedavé napätie prenesené na induktor L_1 a prúd cez induktor L_1 rastie lineárne, až kým je napätie na snímacom odpore R_1 dostatočne veľké k vypnutiu interného komparátoru snímania vstupného prúdu CS1. Vnútorňý komparátor potom rozopne hradlo G a vypne MOSFET Q_1 [25]. Tento priebeh je znázornený na obrázku č. 6.3a. V tomto cykle je energia dodávaná do induktora L_1 .

Vstupný zvyšujúco-znižujúci obvod je teraz v zotrvačnom móde, pretože prúd cez induktor L_1 nemôže klesnúť okamžite. Tento prúd nabíja kondenzátor E_1 na mierne vysoké napätie, ktoré je medzi úrovňou výstupného a vstupného napätia. Vstupný obvod tu pracuje ako menič zvyšujúci napätie. V momente keď prúd cez induktor L_1 klesne na nulu sa dióda D_1 prepne to záverného režimu a bráni prúdu v L_1 k obráteniu [25] (viď obrázok 6.3b).

Energia kondenzátoru E_1 je využitá na riadenie prúdu cez LED záťaž, L_2 a D_2 pri ďalšom zopnutí tranzistoru Q_1 . Tento stav je vidieť na obrázku číslo 6.3c. Energia je zo siete dodávaná znovu do induktora L_1 a kondenzátor E_1 dodáva energiu induktoru L_2 Prúd cez induktor L_2 a LED záťaž rastie lineárne až kým je úbytok napätia na odpore R_2 dostatočný k vypnutiu vnútorňého komparátoru obvodu CS2, ktorý následne znovu vypne tranzistor Q_1 [25], ako je znázornené na obrázku č. 6.4a. Na obrázku č. 6.4b je potom naznačený DCM režim vstupného obvodu s induktorom L_1 .



Obrázok 6.3 Stavy spínania meniča: a) energia dodávaná do L_1 po zapnutí b) uvoľnenie energie z L_1 do E_1 c) energia dodávaná do L_1 a L_2 [25]



Obrázok 6.4 Stavy spínania meniča: a) energia uvoľnená z L_1 a L_2 b) DCM režim L_1 a CCM režim L_2 [25]

6.6 Návrh vstupného filtra, usmerňovacieho obvodu a ochrany

Spínaný zdroj bude napájaný z siete 230 V AC. Toto napätie je nutné najprv usmerniť z striedavého na jednosmerné pomocou diódového mostíka. Hneď za vstupom svorkovnice J₁ sa nachádza rýchlo tavná poistka F₁. Hodnota minimálnej hodnoty prúdu, ktorý bude odoberaný meničom je vypočítaná v rovnici 6.10 podľa [25], teda

$$i_{AC,in} = \frac{U_{OUT} \cdot I_{OUT}}{U_{AC,max} \cdot \eta} = \frac{36 \cdot 0,70}{240 \cdot 0,76} = 0,138 \text{ A}, \quad (6.10)$$

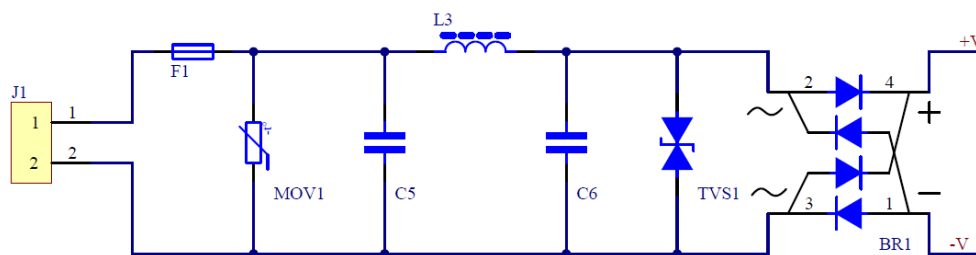
kde η je predpokladaná efektívnosť meniča. Vzhľadom na to, že vstupný menič pracuje v DCM režime zatiaľ čo výstupný v CCM, je účinnosť η_1 vstupného meniča 85 %, zatiaľ čo účinnosť η_2 výstupného je 90 %. Celková uvažovaná účinnosť η je ich súčinom a rovná sa 76 %. Poistka je zvolená s rezervou 500 mA pre prípad vyššieho špičkového skokového prúdu. Za poistkou nasleduje varistor paralelne pripojený na vstup, ktorý chráni obvod pred napätovými rázmi.

K zníženiu rušenia, ktorého zdrojom sú často spínané zdroje sú využité odrušovacie prostriedky ako odrušovacie indukty a odrušovacie kondenzátory. Veľmi často sú u zariadení napájaných zo striedavej siete 230 V AC/50 Hz využité LC filtre typu dolná priepust, zostavené z dvojbránov typu Π alebo Γ . Výpočet tohto filtra je skôr orientačný a pre jeho správnu funkciu je nutný test zariadenia v EMC komorách. Bezpečnostné a filtračné kondenzátory C₅ a C₆ pomáhajú s vyhladením vysokých frekvencií a keďže sú použité naprieč striedavým napätím musia mať označenie triedy X2. Táto trieda kondenzátorov sa pripája medzi neutrálny a fázový vodič. V prípade prepätia na kondenzátore môže vzniknúť skrat vedúci k veľkému špičkovému prúdu, ktorý aktivuje poistku, a v konečnom dôsledku tak ochráni elektrické zariadenie, a nespôsobí úraz elektrickým prúdom [26]. Hodnota týchto kondenzátorov je väčšinou volená do 100 nF. Na odrušenie je taktiež možné využiť štandardne odrušovacie členy s kompenzovaným induktorom. Za Π filtrom je pripojený tranzistor TVS₁ ktorý chráni obvod pred napätovými špičkami.

Hodnota menovitého napätia diódového usmerňovacieho mostíka závisí na maximálnej hodnote vstupného napätia. S faktorom 1,5 dosiahneme bezpečnostnú rezervu 50 % .

$$U_{bridge} = 1,5 \cdot (\sqrt{2} \cdot U_{AC,max}) = 1,5 \cdot (\sqrt{2} \cdot 240) = 509 \text{ V}. \quad (6.11)$$

Pre vstupné sieťové napätie 220 až 240 V je zvolený diódový mostík o hodnote 600 V a s prechodným prúdom 1 A ako rezervu.



Obrázok 6.5 Vstupný filter a usmerňovací diódový mostík

6.7 Návrh meniča s HV9931

Nasledujúce stránky sa venujú výpočtom parametrov a hodnôt hlavných súčiastok potrebných pre návrh zdroja s integrovaným obvodom HV9931. Hlavné požiadavky na zdroj sú uvedené v tabuľke číslo 6-1. K týmto výpočtom boli najmä využité aplikačné poznámky AN-H52 [25] pre obvod HV9931, poznámky k návrhom DN-H04 [28], DN-H06[29] a literatúra zaoberajúca sa návrhu spínaných zdrojov pre LED aplikácie [2]. Zjednodušené schéma s dôležitými súčiastkami je na obrázku číslo 6.2 na začiatku kapitoly 6. Schéma použité v práci je na obrázku číslo 6.6.

Tabuľka 6-1 Požadované parametre LED meniča

Vstupné napätie U_{AC}	220 – 240 V _{RMS} , 50Hz
Výstupné napätie U_{OUT}	36 V(max)
Výstupný prúd I_{OUT}	700 mA
Zvlnenie výstupného prúdu ΔI_{OUT}	± 15 %
PF	<0,9

6.7.1 Výpočet odporu na nastavenie konštantného T_{OFF}

Pre nastavenie konštantného vypínacieho času meniča T_{OFF} 10 μ s je vypočítaná hodnota odporu pripojená medzi pin GATE a pin RT ako

$$R_3 = \frac{T_{OFF} - T_O}{\alpha} = \frac{10 \cdot 10^{-6} - 880 \cdot 10^{-9}}{40 \cdot 10^{-12}} = 228 \text{ k}\Omega. \quad (6.12)$$

Najbližšia hodnota k tomuto odporu je z rady E24 232 k Ω .

6.7.2 Hodnota induktora L_1

Hodnota induktora L_1 je zvolená tak, aby vstupný znižujúci–zvyšujúci menič pracoval vždy v DCM režime pre každú veľkosť vstupného napätia U_{AC} a veľkosti LED záťaže U_{OUT} . DCM režim zaručuje dobrú hodnotu PF. Hodnota induktora L_1 sa podľa [25] vypočíta ako

$$L_1 = \frac{U_{AC(\min)} \cdot \sqrt{2} \cdot T_{OFF}}{4 \cdot I_O} = \frac{220 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 0,70} = 1,11 \text{ mH}. \quad (6.13)$$

Pre správny výber cievky L_1 , elektrolytického kondenzátora E_1 a výber vhodného spínacieho tranzistoru Q_1 je nutné definovať parameter δ a striedu spínania D . Tie sú dané rovnicami 6.13 a 6.14 podľa aplikačného návodu v [25].

$$\delta = \frac{2 \cdot U_{AC}^2 \cdot T_{OFF} \cdot \eta}{L_1 \cdot U_{out} \cdot I_{out}} \quad (6.14)$$

$$D = \frac{2 \cdot (\sqrt{1 + \delta} - 1)}{\delta} \quad (6.15)$$

Pri uvažovaní rozptylu veľkosti vstupného napätia od 220 po 240 V dosiahneme pre δ tri rôzne hodnoty δ_{\min} , δ_{\max} a δ . Rovnaká situácia platí pre striedu D_{\min} , D_{\max} a D .

- $\delta_{\min} = 29,68$ a $D_{\max} = 0,31$ pre napätie 220 V AC
- $\delta_{\max} = 35,32$ a $D_{\min} = 0,28$ pre napätie 240 V AC
- $\delta = 32,4$ a $D = 0,295$ pre napätie 230 V AC

Špičková hodnota prúdu cez L_1 je vyjadrená ako

$$i_{L1pk} = \frac{V_{AC(min)} * \sqrt{2} * T_{OFF}}{L_1} * \frac{D}{1-D} = \frac{220 * \sqrt{2} * 10 * 10^{-6}}{1,1 * 10^{-3}} * \frac{0,31}{1-0,31} = 1,275 \text{ A.} \quad (6.16)$$

Vybraná cievka musí mať hodnotu saturačného napätia vyššiu ako špičková hodnota prúdu i_{L1pk} . Hodnota induktoru 1,1 mH je maximálna hodnota kedy vstupný menič pracuje ešte v DCM režime [25]. Ak by bola použitá hodnota vyššia, hrozí prechod vstupného meniča z DCM režimu do CCM režimu. Vzhľadom na veľké spínané prúdy, čo vedie na veľkú hodnotu indukčnosti cievky a jej potrebnú veľkosť saturačného prúdu sa ponúka výber cievky s radiálnym a vývodovým prevedením. To znamená určité nevýhody. Veľké množstvo týchto cievok sú veľkej konštrukcie a netienené, čo môže výrazne ovplyvniť elektromagnetickú kompatibilitu. Mechanická časť zariadenia musí vo finále brať do úvahy túto skutočnosť. Je zvolená cievka 1410517C s indukčnosťou 1,0 mH od firmy Murata.

6.7.3 Hodnota induktoru L_2

Hodnota zvlnenia výstupného prúdu je zvolená $\pm 15\%$. S použitím rovníc (3.3), kde namiesto doby T_{ON} je využitá nastavená doba spínania T_{OFF} , a (6.7) je veľkosť indukčnosti L_2 vypočítaná ako

$$i_{L2(pk)} = i_{L2} + \frac{1}{2} * \Delta i_{L2} = 0,70 + \frac{1}{2} * 0,3 * 0,70 = 0,805 \text{ A} \quad (6.17)$$

a

$$L_2 = \frac{V_O * T_{OFF}}{\Delta i_{L2} * \eta_2} = \frac{36 * 10 * 10^{-6}}{0,21 * 0,9} = 1,9 \text{ mH.} \quad (6.18)$$

Hodnota saturačného prúdu cievky musí byť väčšia ako špičková hodnota prúdu cez cievku. Rovnako ako v prípade s induktorom L_1 , je výber cievky podmienený komerčnou dostupnosťou. Je zvolená cievka 1422514C s indukčnosťou 2,2 mH od firmy Murata vo vývodovom a netienenom prevedení.

6.7.4 Hodnota odporu R_2 , R_5 a R_7

Berúc do úvahy výkonovú stratu 250 mW na snímacom odpore, je možné vypočítať jeho odpor Z [25] ako:

$$R_2 = \frac{P_{R2}}{I_{out}^2} = \frac{0,25}{0,70^2} = 0,51 \Omega. \quad (6.19)$$

Je zvolený odpor s maximálnym zaťažením 500 mW v puzdre 1206. Hodnota referenčného odporu R_7 je zvolená 100 k Ω . Odpor R_5 pre napäťový delič pre komparátor CS2 (viď obrázok číslo 6.2) je vypočítaný z [25] ako

$$R_5 = \frac{i_{L2pk} * R_7 * R_2}{U_{ref}} = \frac{0,805 * 100 * 10^3 * 510 * 10^{-3}}{7,5} = 5,4 \text{ k}\Omega. \quad (6.20)$$

Na výstup meniča je pridaný taktiež obvod na ochranu proti prepätiu na výstupe. Odpor R_2 môže byť v rovnici nahradený sériovým zapojením odporov R_2 a R_9 (viď obrázok číslo 6.6). Potom R_5 bude $5,3 \text{ k}\Omega$ a R_9 bude $100 \text{ }\Omega$. Hodnota napätia Zenerovej diódy Z_1 sa volí väčšia ako je výstupné napätie meniča. V tomto prípade je zvolená minimálne 42 V .

6.7.5 Hodnota odporu R_1 , R_4 a R_6

Hodnota odporu na snímanie prúdu sa podľa [25] vypočíta ako:

$$R_1 = \frac{6 \cdot P_{R1}}{D_{MAX} \cdot I_{L1(PK)}^2} = \frac{6 \cdot 0,1}{0,31 \cdot 1,27^2} = 1,2 \text{ }\Omega. \quad (6.21)$$

Je zvolený odpor s hodnotou $1,1 \text{ }\Omega$ v puzdre 1206 s väčšou výkonovou rezervou (250 mW). Referenčný odpor R_6 (R_{REF} – viď obrázok číslo 6.2) je možné znovu použiť ako $100 \text{ k}\Omega$. Odpor R_4 pre napäťový delič (viď obrázok číslo 6.2) sa vypočíta podobne ako u rovnice 6.20, teda

$$R_4 = \frac{i_{L1pk} \cdot R_6 \cdot R_1}{U_{ref}} = \frac{1,27 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 1,1}{7,5} = 18,6 \text{ k}\Omega. \quad (6.22)$$

6.7.6 Elektrolytický kondenzátor E_1

Kondenzátor E_1 je hlavným prvkom na uchovanie energie pre LED záťaž a veľkosť jeho kapacity dokáže výrazne ovplyvniť zvlnenie vstupného sieťového prúdu. Vo väčšine prípadov sa jedná o elektrolytický typ, vďaka ich veľkým hodnotám kapacity a vysokého napätia. Minimálna hodnota závisí na limite harmonických zložkách vstupného prúdu, ktoré sú dané aplikáciami. Ako bolo spomenuté na začiatku kapitoly č. 6, svetelné zdroje s LED stanovený limit 3. harmonickej zložky na približne 30 %. Minimálna hodnota kapacity E_1 je daná rovnicou 6.23. Podľa aplikačného listu AN-H52 [25] a návrhových poznámok DN-H04 [28] to vychádza na:

$$E_1 = \frac{1}{\delta \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1+\delta}}\right]} \frac{\eta_2 \cdot I_O}{\pi \cdot f_{AC} \cdot K_3 \cdot U_{out}} = \frac{1}{32,4 \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{1+32,4}}\right]} \cdot \frac{0,9 \cdot 0,70}{3,14 \cdot 50 \cdot 0,15 \cdot 36} \approx 22 \text{ }\mu\text{F}. \quad (6.23)$$

V rovnici 6.23 je parameter δ použitý pre vstupné napätie 230 V . Frekvencia f_{AC} je frekvencia vstupnej siete 50 Hz a K_3 je koeficient zvlnenia 3. harmonickej zložky pre 230 V podľa návodu v [25]. Potrebné maximálne napätie kondenzátoru je dané ako

$$U_C = \frac{U_{out}}{2 \cdot \eta_2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \delta(\max)}\right) = \frac{36}{2 \cdot 0,9} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 32,4}\right) \approx 137 \text{ V}, \quad (6.24)$$

kde δ platí pre maximálne vstupné sieťové napätie 240 V . Hodnota zvlnenia prúdu pri spínaní je daná rovnicou 6.25 podľa [25].

$$i_{CSW} = I_{OUT} \cdot \sqrt{\frac{64}{9 \cdot \pi \cdot \eta \cdot \eta_1} \cdot \frac{U_{out}}{U_{out} \cdot \sqrt{2}} + D} \quad (6.25)$$

$$i_{CSW} = 0,75 \cdot \sqrt{\frac{64}{9 \cdot 3,14 \cdot 0,76 \cdot 0,85} \cdot \frac{36}{36 \cdot \sqrt{2}} + 0,295} = 0,585 \text{ A}. \quad (6.26)$$

A veľkosť zvlnenia prúdu pri frekvencii 100 Hz je daná ako

$$i_{cline} = \frac{\sqrt{2} * I_{OUT}}{1 + \sqrt{1 + \delta}} = \frac{\sqrt{2} * 0,70}{1 + \sqrt{1 + 32,4}} = 0,146 \text{ A.} \quad (6.27)$$

Vzhľadom na vyššie vypočítane parametre je zvolený elektrolytický kondenzátor s maximálnym napätím 400 V ako rezervu, s veľkosťou kapacity 22 μF a maximálnym zvlnením prúdu 600 mA.

6.7.7 Výber tranzistoru Q_1

Prúd ktorý prechádza cez tranzistor Q_1 je tvorený prúdmi prechádzajúcimi cez cievky L_1 a L_2 . Hodnota RMS prúdu I_D je podľa rovníc z aplikačného AN-H52 [25] a návodov v DN-H04 [28] vyjadrená ako

$$I_{D(Q1)} = \sqrt{\frac{D_{MAX} * I_{L1(PK)}^2}{6} + D_{MAX} * I_{OUT}^2} \quad (6.28)$$

$$I_{D(Q1)} = \sqrt{\frac{0,28 * (1,27)^2}{6} + 0,28 * (0,70)^2} = 0,46 \text{ A} \quad (6.29)$$

Maximálna hodnota napätia $U_{DS(Q1)}$ je potom vypočítaná ako

$$U_{DS(Q1)} = U_{AC(MAX)} * \sqrt{2} + U_{C(MAX)} * (1 + K_C), \quad (6.30)$$

kde U_{cmax} maximálna hodnota vypočítaná v rovnici 6.24 a K_C je hodnota zvlnenia na kondenzátore E_1 vypočítaná podľa návodu AN-H52 [4] ako 0,05.

$$U_{DS(Q1)} = 240 * \sqrt{2} + 137 * (1 + 0,05) = 483 \text{ V.} \quad (6.31)$$

Špičkový prúd cez tranzistor $I_{DQ(PK)}$ je súčet špičkových prúdov cez oba induktory L_1 a L_2 , [25] vypočítaný v rovniciach 6.16 a 6.17:

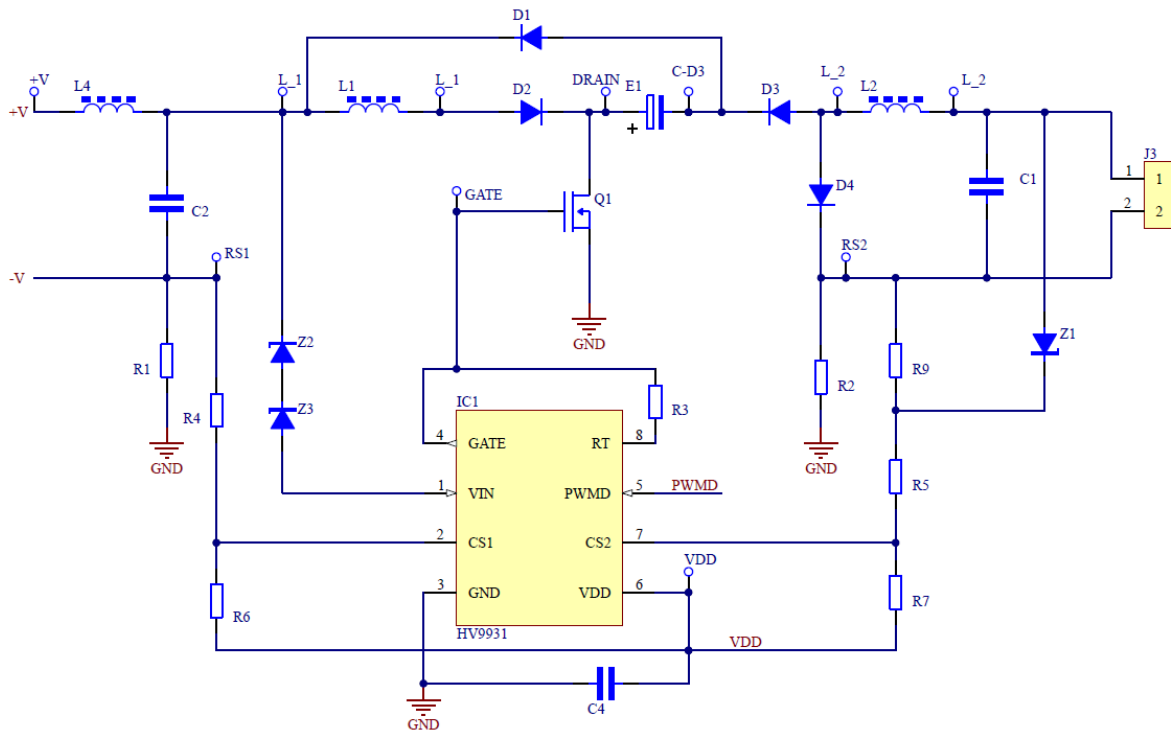
$$I_{DQ1(PK)} = i_{L1(PK)} + i_{L2(PK)} = 1,275 + 0,805 = 2,08 \text{ A.} \quad (6.32)$$

Zvolený tranzistor Q_1 musí mať dobrý kompromis medzi nízkou hodnotou náboja na hradle gate Q_g a nízkym prechodným odporom $R_{DS(ON)}$. Pri návrhu meniča je snaha využívať väčšinou SMD súčiastky oproti vývodovým. To nie je vždy možné ako v prípade cievok vzhľadom na spracovaný výkon. V prípade využitia SMD tranzistoru sa ponúkajú puzdra v SOT23 alebo DPAKoch (D2PAK). Tieto puzdra potom využívajú ako chladiacu plochu samotný plošný spoj FR-4. Je nutné zaistiť aby bolo teplo z dosky vhodne rozptýlené do okolia a neovplyvňovalo pritom chod ostatných súčiastok v okolí tranzistoru. Odhad strát na tejto výkonovej súčiastke je diskutovaný v nasledujúcej kapitole a zaistenie spôsobu chladenia v kapitole 7. Ako MOSFET je zvolený tranzistor IPB60R360CFD7. Jeho hlavné parametre sú v tabuľke číslo 6-2.

Tabuľka 6-2 Parametre MOSFET IPB60R360CFD7 [30]

Parameter	Hodnota
$U_{DS(max)}$	650 V
$R_{DS(on)}$	360 m Ω
$Q_{g,typ}$	14 nC
I_D	7 A
t_{RISE}	12 ns
t_{FALL}	8,5 ns

Hodnota Q_g taktiež ovplyvňuje výkonové straty samotného IC HV9931. Pre zníženie týchto strát je vhodné zapojiť zenerovú diódu pred pinom Vin. Je zvolené sériové zapojenie dvoch Zenerových diód s U_z rovným 47 V. Ostatné súčiastky boli dopočítané pomocou aplikačných poznámok AN-H52 [25] a poznámkam k návrhom DN-H04 [28] a DN-H06 [29].



Obrázok 6.6 Schéma hlavnej časti LED meniča s HV9931

6.8 Výkonové straty

Táto časť kapitoly sa zaoberá výpočtom a odhadom strát na polovodičových súčiastkach a výkonových prvkoch. Sú využité aplikačné poznámky k výpočtom strát na tranzistoroch [30], [31], usmerňovacích diódach [32] a induktoroch [33]. Výpočet má orientačný charakter pre nasledujúcu kapitolu zaoberajúcu sa návrhom rozloženia. Neberie avšak do úvahy ovplyvnenie súčiastok teplotou prostredia, teplotami susedných súčiastok a medených ciest.

6.8.1 Výkonové straty v tranzistore Q1

V ideálom spínači je pri otvorenom stave prechádzajúci prúd nulový, a teda aj výkonové straty sú na ňom nulové. Pri zapnutom stave ideálneho spínača je na ňom potom veľkosť napätia nulová a výkonové straty tu sú rovnako nulové. Takýto spínač by ponúkal 100 % účinnosť. Reálne súčiastky avšak pracujú s určitými stratami. Snahou je dosiahnuť čo najvyššiu účinnosť, ktorá by viedla k menšiemu rozptýlenému teplu, redukcii veľkosti systému a eliminácii alebo minimalizácii použitých chladičov.

Straty na tranzistore je možné rozdeliť na straty dôsledkom vedenia a straty dôsledkom spínania. Vždy keď je tranzistor v zapnutom stave, je hodnota strát na vedení v tranzistoroch MOSFET vypočítaná podobne ako sú straty v odporoch. V predchádzajúcich výpočtoch (rovnica 6.28) vyšla RMS hodnota prúdu $I_{D(Q1)}$ ako 0,48 A. Straty na tranzistore Q1 dôsledkom vedenia sú vypočítané podľa nasledujúceho vzťahu z [30]:

$$P_{CM} = R_{DSon} * I_{Drms}^2 = 0,36 * 0,46^2 = 0,08 \text{ W}. \quad (6.33)$$

Pri spínaní tranzistoru MOSFET je určité množstvo energie vždy stratené v procese. To platí taktiež pre jeho vypínaní. Hodnota energie týchto strát je daná ako:

$$E_{on} = U_{DS} * I_D * \frac{t_{RISE}}{2}. \quad (6.34)$$

Rovnaký prípad nastáva pri vypínaní tranzistoru a v rovnici 6.34 je doba t_{RISE} nahradená dobou t_{FALL} . Dobu t_{RISE} a t_{FALL} je možné vyčítať z technických listov súčiastky. Hodnota stratového výkonu je súčin hodnoty tejto energie E_{on} alebo E_{off} a frekvencie spínania tranzistoru f_s .

Obvod HV9931 spína napätie medzi 0 V a V_{IN} . Po internom zopnutí obvodu napätie na hradle GATE rastie po hodnotu prahového napätia $U_{GS(th)}$ po určitú dobu, definovanú primárne vstupnou kapacitou tranzistoru ($C_{iss}=C_{gd}+C_{gs}$) [30]. Pokiaľ nie je dosiahnutá prahová hodnota napätia $U_{GS(th)}$, nie je zmenený stav výstupu na Q1.

Po dosiahnutí hodnoty napätia $U_{GS(th)}$ narastie skokovo prúd cez DRAIN. Technický list tranzistorov uvádza čas t_{RISE} ako najhoršie možný čas zmeny medzi hodnotou nula a I_{DQ1} [30]. Obvod v tomto meniči je nastavený na konštantnú T_{OFF} dobu, teda hodnota spínacej frekvencie f_s je premenná. Vo výpočte je uvažovaná najvyššia frekvencia spínania 120 kHz. Stratený výkon dôsledkom zapnutia a vypnutia tranzistoru Q1 je daný podľa [30] ako

$$P_{on} = U_{DS} * I_{DQ1} * \frac{t_{RISE}}{2} * f_s = 483 * 0,805 * \frac{12 * 10^{-9}}{2} * 120 * 10^3 \approx 0,3 \text{ W}, \quad (6.35)$$

kde I_{DQ1} je špičková hodnota cez cievku L_2 a

$$P_{off} = U_{DS} * I_{DQ1(PK)} * \frac{t_{FALL}}{2} * f_s \quad (6.36)$$

$$P_{off} = 483 * 2,21 * \frac{8,5 * 10^{-9}}{2} * 120 * 10^3 \approx 0,6 \text{ W}. \quad (6.37)$$

$I_{DQ1(PK)}$ je špičkový prúd vypočítaný v rovnici 6.32. Straty na hradle G pri spínaní sú väčšinou do jednotiek až desiatok mW a v tomto prípade zanedbateľné. Celkové straty na Q1 sú súčtom strát na vedení a spínaní a odhadom vychádzajú okolo 1 W.

6.8.2 Výkonové straty na diódach

Prúdy prechádzajúce cez D_1 až D_4 sú pomocou výpočtov v [4] vypočítané ako $I_{D1}=227$ mA, $I_{D2}=200$ mA, $I_{D3}=485$ mA a $I_{D4}=498$ mA. Špičkový prúd cez D_1 a D_2 je rovný špičkovému prúdu cez L_1 . Podľa odporúčenia v [25] sú zvolené rýchle usmerňovacie diódy. Zo známych hodnôt priemerných prúdov a priepustného napätia na diódach v technických listoch [34], [35] a [36] sú odhadnuté predpokladané straty počas chodu zariadenia. Tento odhad je iba približný, keďže tu nie je rešpektovaný tvar prúdu.

$$P_{D1} = I_{D1} \cdot V_{DF1} = 0,227 \cdot 1,20 = 285 \text{ mW} \quad (6.38)$$

$$P_{D2} = I_{D2} \cdot V_{DF2} = 0,200 \cdot 1,00 = 200 \text{ mW} \quad (6.39)$$

$$P_{D3} = I_{D3} \cdot V_{DF3} = 0,485 \cdot 1,00 = 485 \text{ mW} \quad (6.40)$$

$$P_{D4} = I_{D4} \cdot V_{DF4} = 0,498 \cdot 1,05 = 523 \text{ mW} \quad (6.41)$$

6.8.3 Straty na cievkach

Straty na induktoroch sa skladajú z troch zložiek, a to strát na jadre a strát na vedení v dôsledku DC a AC zložky prúdu. Pre zjednodušenie výpočtu a z dôvodu nedostupnosti informácií ohľadom parametrov jadra od výrobcu boli straty na vedení pre DC zložky prúdu cez L_1 a L_2 odhadnuté ako:

$$P_{L1(DC)} = I_{L1}^2 \cdot R_{L1(DCR)} = 1,25^2 \cdot 0,460 = 720 \text{ mW} \quad (6.42)$$

a

$$P_{L2(DC)} = I_{L2}^2 \cdot R_{L2(DCR)} = 0,700^2 \cdot 0,622 = 304 \text{ mW}. \quad (6.43)$$

Zanedbávajúc ostatné súčiastky, celkové predpokladané straty na výkonových prvkoch sú okolo 4 W. Ako bolo na začiatku sekcie spomenuté, odhad výpočtov týchto strát neuvažuje teplotné ovplyvňovanie susednými súčiastkami.

7. NÁVRH ROZLOŽENIA SÚČIASTOK

Návrh prototypovej dosky bol uskutočnený v programe Altium. Návrh dosky bol koncipovaný s predpokladom ďalších zásahov do hodnôt súčiastok pri experimentovaní a prípadných mechanických zásahov do dosky a ciest. Konečná veľkosť dosky nebola zadaná. Prototypová doska slúži predovšetkým na overenie predchádzajúcich výpočtov a úvah, poskytujúc tolerancie pre prípadné chyby. Z dôvodu overenia funkcií jednotlivých častí spínaného zdroja sa na dôležitých miestach nachádzajú taktiež testovacie body pre sondu osciloskopu. Pre správny návrh boli využité aplikačné poznámky a návody [37], [38], [39], [40], [41] a literatúra [2] zaoberajúca sa návrhom spínaných zdrojov pre LED aplikácie.

Správne vzdialenosti medzi spojmi na DPS sú zásadné aby sa zabránilo preskočeniu náboja medzi elektrickými cestami a pre zvýšenie ochrany. Šírka spojov a izolačné vzdialenosti boli volené s ohľadom na normu IPC-2221B [42]. Odhad potrebnej izolačnej vzdialenosti sa vypočíta pomocou rovnice:

$$\text{Izolačná vzdialenosť [mm]} = 0,6 + V_{peak} * 0,005. \quad (7.1)$$

Na doske sa nachádzajú dve oblasti nízkeho napätia (LV). V prvej časti filtra a za usmerňovacím mostíkom má napätie hodnotu 230 VAC/325 VDC. Minimálna izolačná vzdialenosť bola zvolená 2,25 mm. Veľkosť napätia na elektróde drain tranzistoru Q_1 môže dosahovať hodnoty okolo 485 V. Minimálne izolačné vzdialenosti boli teda volené 3,1 mm. Kde to návrh dovolil, boli tieto vzdialenosti maximalizované aby sa znížila možnosť elektrického prierazu, znížila parazitná kapacita a zjednodušila montáž.

Veľkosť vstupného prúdu je v rámci stoviek mA. IPC-2221B odporúča šírku minimálne 0,25 mm pre cestu s pretekajúcim prúdom 1 A. V rámci určitej rezervy je šírka ciest na strane pred usmerňovacím mostíkom volená 2 mm. Špičková hodnota prúdu cez výstupný stupeň meniča sa predpokladá podľa rovnice 6.17 ako 805 mA. Pre dostatočnú rezervu je aj tu šírka spoja zvolená vo veľkosti 2 mm. V uzle prvého stupňa znižujúceho-zvyšujúceho meniča, v ktorom obvod pracuje v prerušovanom vodivom režime, dosahuje prúd špičkovú hodnotu 1,275 A, ako bolo dokázané v rovnici 6.16. Z tohto dôvodu bola šírka ciest navrhnutá v polygónoch.

Tranzistor Q_1 spína špičkovú prúd o hodnote 2,08 A s predpokladanými stratami do 1 W. Prevedenie tohto tranzistoru je v puzdre TO-263 (D2PAK), ktorý poskytuje chladiacu plochu v pade Drain. Teplo, ktoré na súčiastke dôsledkom spínania vznikne, je nutné odviezť cez substrát. Ekonomický spôsob ako zlepšiť teplotný transfer pre FR-4 dosky je pridanie termálnych vias – plátovaných dier ktoré vodivo spájajú dve alebo viac vrstiev. Termálne vias sú vytvorené vŕtaním otvorov do základného materiálu, ktoré sú potom plátované meďou. Pre čo najefektívnejší prenos tepla pomocou termálnych otvorov od súčiastky je nutná ich poloha priamo pod zdrojom tepla. Teplotný odpor sa zvyšuje s vzdialenosťou otvoru od zdroja tepla dôsledkom účinku tepelného šírenia. Príliš veľký priemer termálnych otvorov môže avšak viesť k tvorbe voidov pod súčiastkou. Tieto voidy zvyšujú termálny odpor kontaktu súčiastky s meďou. Spôsob, ktorým sa dokáže zabrániť k nežiaducej tvorbe voidov je zníženie priemeru termálnych otvorov, čo zabráni vtekaniu pasty do otvoru [44]. Termálne otvory priamo pod

padom drainu boli volené s priemerom 0,3 mm a dodatočné termálne otvory v okolí padu boli navrhnuté s priemerom 0.8 mm.

LED menič má ochranu pred poklesom vstupného napätia obmedzením vstupného prúdu. Zvýšený vstupný prúd môže viesť k nadmernému výkonu na súčiastkach v prvom spínacom prvku. Ako ďalší stupeň ochrany sú do cesty vstupného terminálu V_{in} zapojené do série dve Zenerové diódy s menovitým napätím 47 V, ktoré znižujú nežiaduce výkonové straty na meniči.

Návrh rozmiestnenia súčiastok je u spínaných zdrojov rovnako dôležitý ako obvody návrh. Nevhodné rozloženie môže viesť k rôznym problémom, medzi ktoré patrí zvýšený šum vo výstupnom alebo spínanom signáli, zlá regulácia výstupnej hodnoty prúdu, problémy s EMC kompatibilitou alebo nestabilita IC.

Vstupný pin pre vnútorný komparátor integrovaného obvodu je navrhnutý s vysokou impedanciou. Výstup tohto pinu musí byť spojený s odporovou sieťou s čo najkratšou cestou. Odpory R_4 , R_6 , R_5 a R_7 , ktoré nastavujú úroveň napätia obmedzujúce spínanie vnútorného oscilátoru sú umiestnené v čo najväčšej blízkosti a čo najkratšou cestou k IO.

Pri návrhu spínaných zdrojov je nutné určiť silové vysokofrekvenčné uzly a podľa nich voliť rozloženie súčiastok. Prvá takáto slučka je cez prvý induktor L_1 , diódu D_2 a skrz spínací tranzistor Q_1 . Po vypnutí tranzistoru je v dôsledku zotrvačnosti energia z L_1 uvoľnená do kondenzátoru E_1 . Druhá slučka je teda cez L_1 , D_2 , E_1 a D_1 . Tretia silová slučka je cez výstupný znižujúci stupeň L_2 , D_2 a C_1 . Všetky tieto slučky boli naznačené na obrázkoch 6.3 a 6.4 v 6. kapitole.

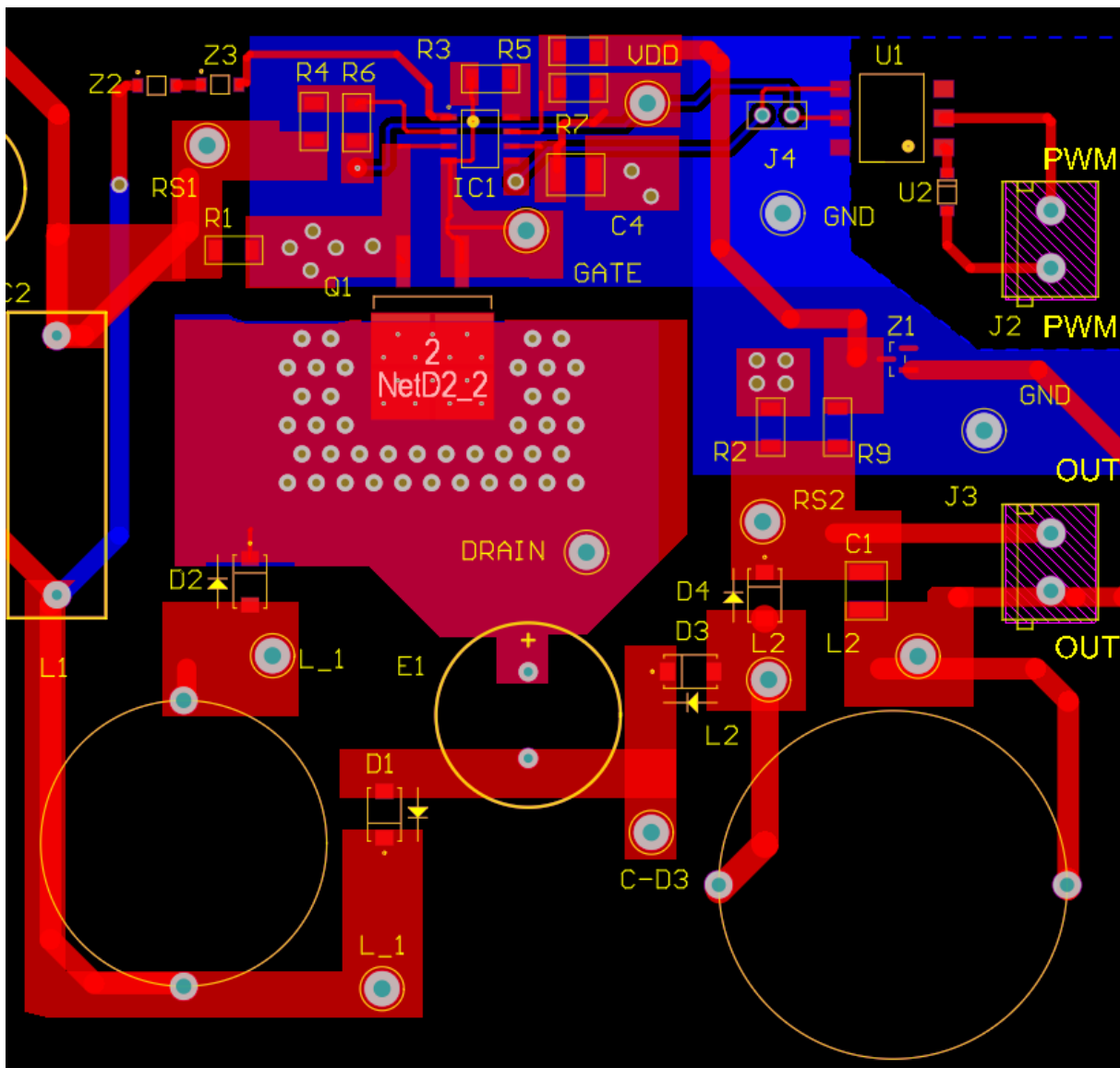
Rozmiestnenie týchto súčiastok je nutné minimalizovať pre zabránenie vzniku veľkých prúdových slučiek. Avšak vzhľadom na veľkosť cievok, kondenzátoru a spínacieho tranzistoru sa v návrhu snažilo doceliť určitého kompromisu. Výstupný kondenzátor C_1 je umiestnený v blízkosti výstupnej cievky L_2 pre čo najlepší efekt zníženia zvlnenia výstupného prúdu a zlepšenia EM parametrov.

Na spodnú vrstvu DPS bola vyliata meď s potenciálom zeme. Prúdy ktoré sa vracajú cez GND sú s vrchnou vrstvou spojené s elektrickými otvormi (vias) s priemerom 1 mm a v dostatočnom množstve pre zníženie impedancie cesty

Pri zapnutí tranzistoru Q_1 napätie na hradle Drain spadne na veľmi nízku hodnotu napätia, vzhľadom na prechod prúdu cez kanál drain-source. Pri vypnutí tranzistoru sa dióda D_1 prepne do priepustného režimu a napätie U_{DS} narastie veľmi rýchlo na hodnotu vyššiu ako napájacie napätie. Priebeh tohto spínania má približne obdĺžnikový tvar. Tieto rýchlo stúpajúce a klesajúce hrany sú zdrojom EM rušenia.

Pri zapnutí tranzistoru prúd hradla Gate I_G tečie skrz napájací kondenzátor C_4 , vnútorný obvod IC₁ a hradlo Gate Q_1 späť do zeme. Napájací kondenzátor C_4 je zvolený keramický s nízkou hodnotou ESR a menovitým napätím približne 16 V. Jeho umiestnenie je v čo najväčšej blízkosti terminálu VDD. Cesta spájajúca terminál GATE integrovaného obvodu s hradlom Gate tranzistoru je taktiež čo najkratšia.

Ako bolo spomenuté v kapitole 6.3 na funkciu je nutné priviezt' na pin PWM napätie z interného regulátoru 7,5 V. Tieto piny sú teda prepojené kolíkovou lištou. Jej prepojenie jumperom umožní funkciu obvodu.



Obrázok 7.1 Detail rozloženia súčiastok na DPS spínaného zdroja

Doska bola vyrobená vo firme Gatema. Základný materiál je FR-4 (teplota prechodu T_g 135 °C) s 1,5 mm silou, obojstrannou finálnou vrstvou medi 35 μ m, finálnou povrchovou úpravou bezolovnatého HALu, zelenou farbou masky a bielou potlačou popisov. Následne bola doska napastovaná, SMT súčiastky boli osadené ručne a proces zapájania prebehol v pretavovacej peci. THT súčiastky boli následne osadené ručne.

8. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

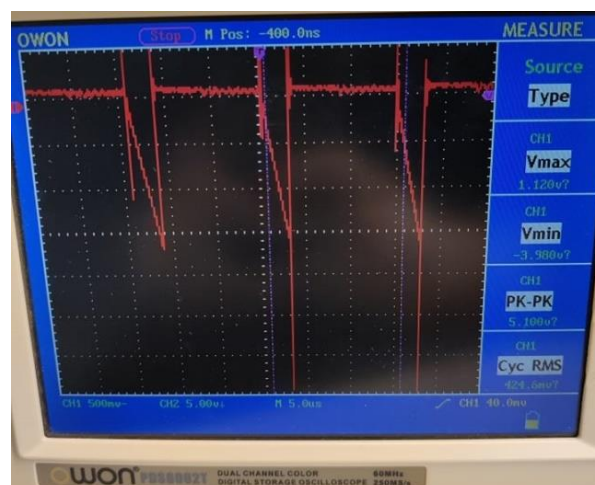
Prototypové zariadenie je hlavne určené pre laboratórne testy a je napájané sieťovým napätím 230 V. Vzhľadom na absenciu transformátora na celej doske sa nachádza nebezpečné napätie. To platí taktiež pre LED modul pripojený na menič. K zvýšeniu bezpečnosti práci v laboratórnych priestoroch a k využitiu uzemnených laboratórnych prístrojov na neizolovaných zariadeniach sa využíva často bezpečnostný transformátor. Vzhľadom na jeho nedostupnosť počas zostavovania modulu bol počas práce využitý osciloskop PDS6062T, ktorý je napájaný z batérie. Z tohto dôvodu a taktiež pre jeho obmedzené možnosti sú prvotné snímky oscilografu snímané fotoaparátom mobilu.

V poslednom mesiaci práce sa na vytvorenie izolácie využili dva toroidné transformátory 230V/12V zapojené v usporiadaní primár-sekundár- sekundár-primár. Tým sa umožnila izolácia obvodu a využitie osciloskopu Rigol DS1074.

Po osadení zariadenia nasledovalo overenie jeho funkcií. Na výstup meniča bol pripojený LED modul a pin VDD bol prepojený s pinom PWM pomocou prepojovacieho jumperu. Funkčnosť modulu bola potvrdená svietiacim pouličným modulom LED. Nasledovalo overenie jednotlivých funkcií LED meniča.

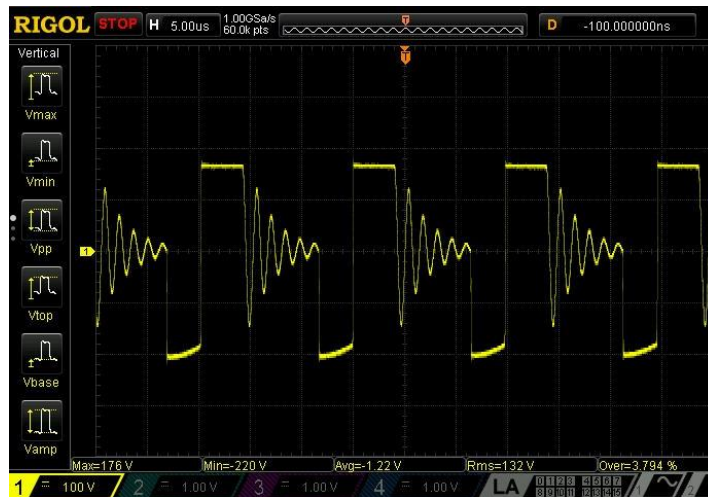
Osciloskopom sa prvotne kontroloval priebeh napätia za usmerňovacím obvodom a napätie na internom regulátore VDD, ktoré odpovedalo predpokladanému priebehu, a v prípade regulátoru veľkosťou napätia približne 7,2 V.

V ďalšom kroku bola overená funkcia prvej slučky obvodu znižujúceho-zvyšujúceho meniča, ktorý má pracovať v prerušovanom vodivom režime. Cesta medzi induktorom L_1 a diódou D_2 bola prerušená a bol pridaný odpor na snímanie prúdu o veľkosti 0,110 Ω . Priebeh napätia na tomto odpore mal avšak nezmyselný charakter, s výrazným rušením spôsobeným zákmitmi na signáli. Z tohto dôvodu bol potom sledovaný priebeh napätia na odpore R_1 (viď obrázok č. 8.1). Ten má pilovitý priebeh ako sa predpokladalo. Z grafu je taktiež možné vyčítať čas spínania T_{OFF} , ktorý sa líši od predpokladanej hodnoty 10 μs o približne 2 μs , čo môže byť spôsobené toleranciami na odpore R_3 .



Obrázok 8.1 Priebeh napätia na snímacom odpore R_1

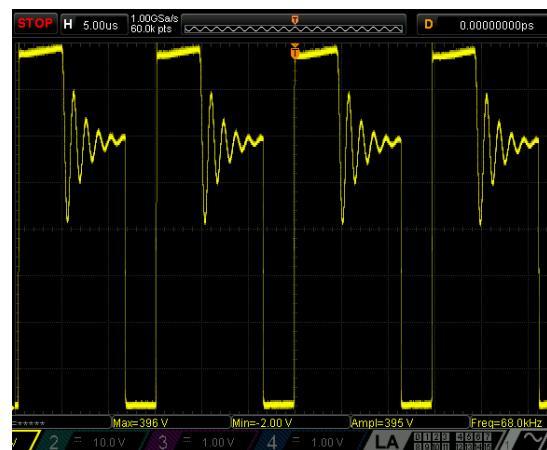
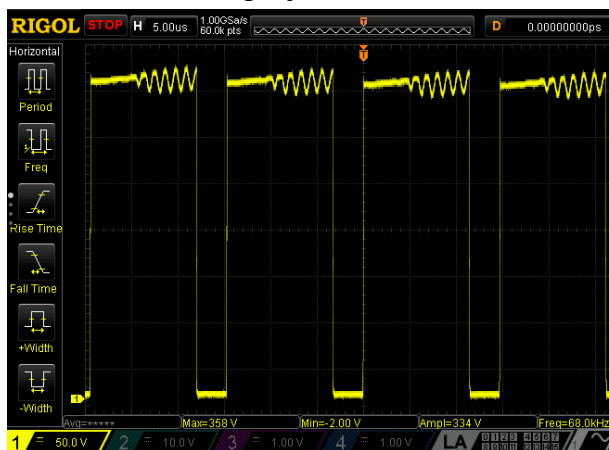
Z dôvodu nedostupnosti prúdovej sondy bol potom kontrolovaný priebeh napätia na induktore L_1 . Ako je z priebehu na obrázku číslo 8.2 vidieť, v čase zapnutia tranzistoru sa na cievke nachádza celé vstupné napätie U_{in} . V dobe T_{OFF} , kedy sa cievka odpojí od U_{in} sa nej objaví napätie približné tomu na kondenzátore E_1 . Po odbudení cievky sú na nej viditeľné tlmené rezonančné kmity. Tento priebeh je očakávaný a je z neho možné usúdiť, že cievka pracuje v prerušovanom vodivom režime (DCM). Ak by totiž induktor pracoval v CCM, priebeh signálu by bol približne obdĺžnikový. Takýto priebeh je očakávaný u induktoru L_2 vo výstupnej časti.



Obrázok 8.2 Priebeh napätia U_{L1} na induktore L_1

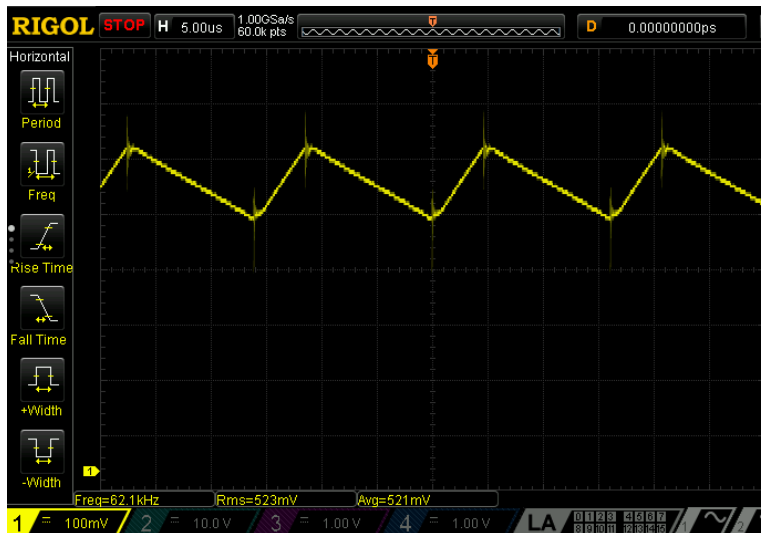
Následne bol kontrolovaný priebeh napätia elektróde drain tranzistoru Q_1 voči zemi. V dobe T_{ON} má veľmi nízku hodnotu, ktorá po zapnutí narastie na hodnotu približne 600 V. Obvod bol počas testovania doplnený o RC článok paralelne zapojený k dióde D_2 . Na obrázku číslo 8.3 vľavo je priebeh napätia bez RC článku a v pravo s RC článkom.

Po nabití kondenzátora E_1 sú všetky diódy v jeho okolí v závernom režime. Na kondenzátore E_1 nie je definovaný potenciál a napätie merané osciloskopom je pravdepodobne napätie parazitných kapacít. RC článok dodatočne znižuje veľký napäťový stres na dióde D_1 a zlepšuje EM vlastnosti obvodu.



Obrázok 8.3 Napätie U_{DS} bez RC článku na D_1 (vľavo) a s RC článkom (vpravo)

Pre zhodnotenie správnej funkcie výstupného meniča a vzhľadom na spomenutú nedostupnosť prúdovej sondy bol na výstup do série s LED modulom zapojený snímací vývodový odpor o hodnote 750 mΩ. Z merania je vidieť, že efektívna hodnota napätia na odpore je 523 mV čo z Ohmovho zákona vychádza na výstupnú hodnotu prúdu približne 697 mA. Hodnota V_{pp} je približne 140 mV (I_{pp} je potom 186 mA) čo odpovedá zvlneniu približne 27%.



Obrázok 8.4 Napätie na snímacom odpore na výstupe meniča

Následne bola meraná hodnota tohto prúdu pre viacero LED záťaží. K tomu boli využité dva hliníkové LED moduly, každý osadený ôsmimi výkonovým LED XP-G3 v sérii. Návrh dosky umožňuje zmenu sériového zapojenia LED diód a napájacieho napätia LED modulu, takže je možné ísť s pracovným napätím v rozsahu od 3 V do 48 V. Hodnota prúdu približne 700 mA je konštantná do 28 V. Od tejto hodnoty záťaže nižšie obvod prestáva regulovať správne a prúd klesne o približne 100 mA (viď obrázok číslo 8.5).

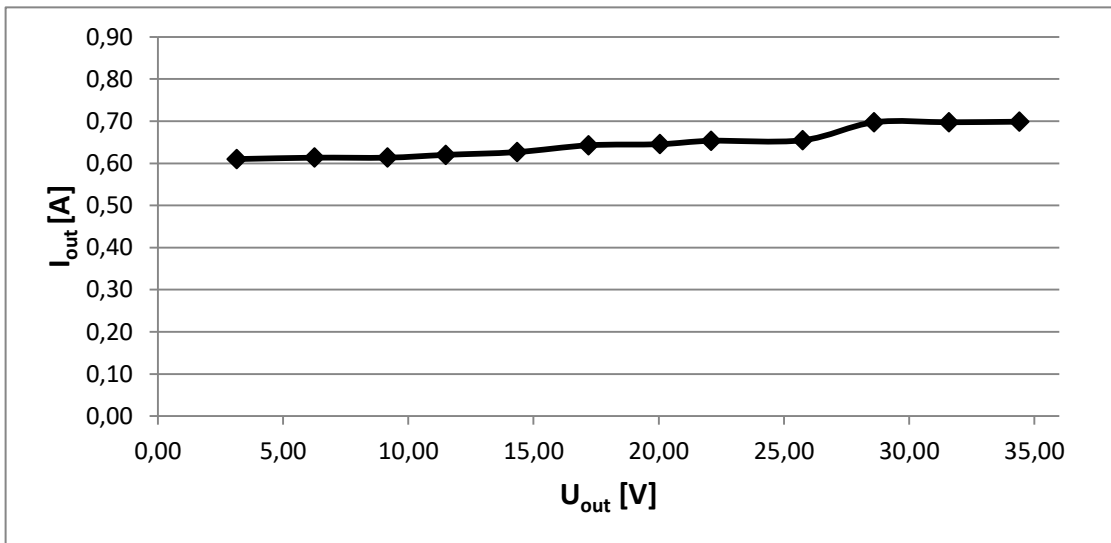
Meranie veličín prenosovej siete bolo uskutočnené analyzátorom PF9811 a zdrojom DPS1005. Napätie na výstupe bolo postupne znižované zmenou sériového zapojenia. Pritom boli zaznamenané vstupné prúdy, vstupné napätie a PF. Na výstupe bolo napätie a prúd merané pomocou A-metra a V-metra. Z týchto hodnôt je zostavená účinnosť meniča v závislosti na výstupnom napätí. Ta sa pohybuje okolo 80 % pre maximálnu záťaž a klesá rapídne po znížení napätia LED modulu na hodnotu okolo 25 V (viď obrázok 8.6).

LED menič pre maximálnu záťaž dosahuje PF 0,966 a THD skreslenie 16,9 % So vstupným prúdom siete $I_{in(AC)}$ 0,130 mA a $U_{IN(AC)}$ sieťovým napätím 230,1 V je dosiahnutý celkový zdanlivý výkon S :

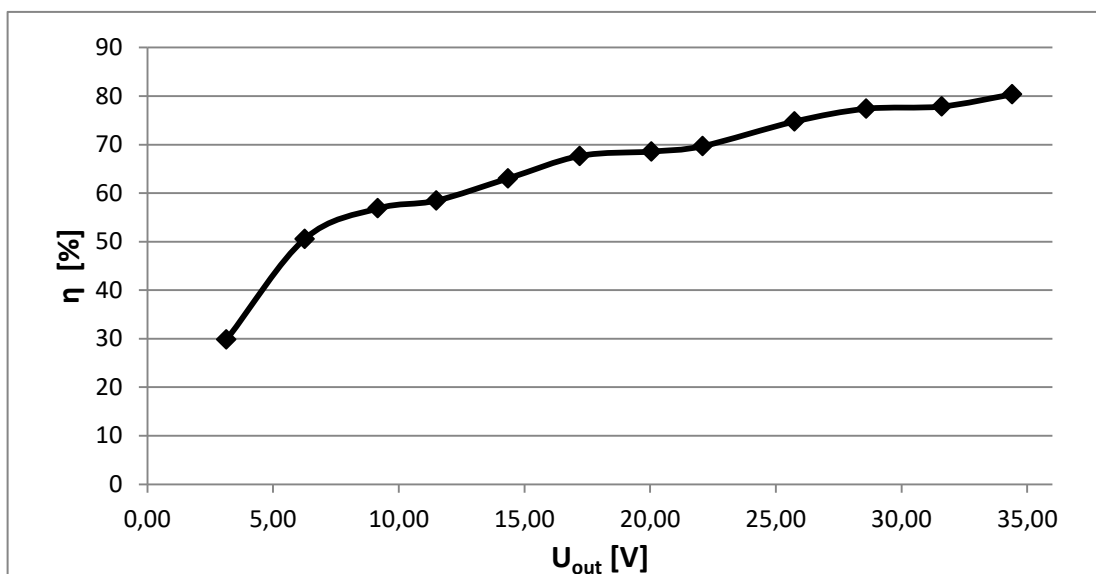
$$S = U_{in(AC)} * I_{in(AC)} = 230,1 * 0,130 = 29,92 VA, \quad (8.1)$$

čo spĺňa podmienku zadania príkonu 30 W pre celé svietidlo. Činný výkon zariadenia je 28,9 W, zatiaľ čo jalový je 7,73 VAR . Tabuľka s nameranými a dopočítanými veličinami sa nachádza v prílohách. Z grafov je vidieť hodnotu PF nad 0,95 skoro v celom rozsahu

meraného výstupného napätia LED záťaže, ktorá klesne na 0,86 % z pri záťaži približne 6 V. Celkové harmonické skreslenie je 16,9 % pre maximálnu záťaž.



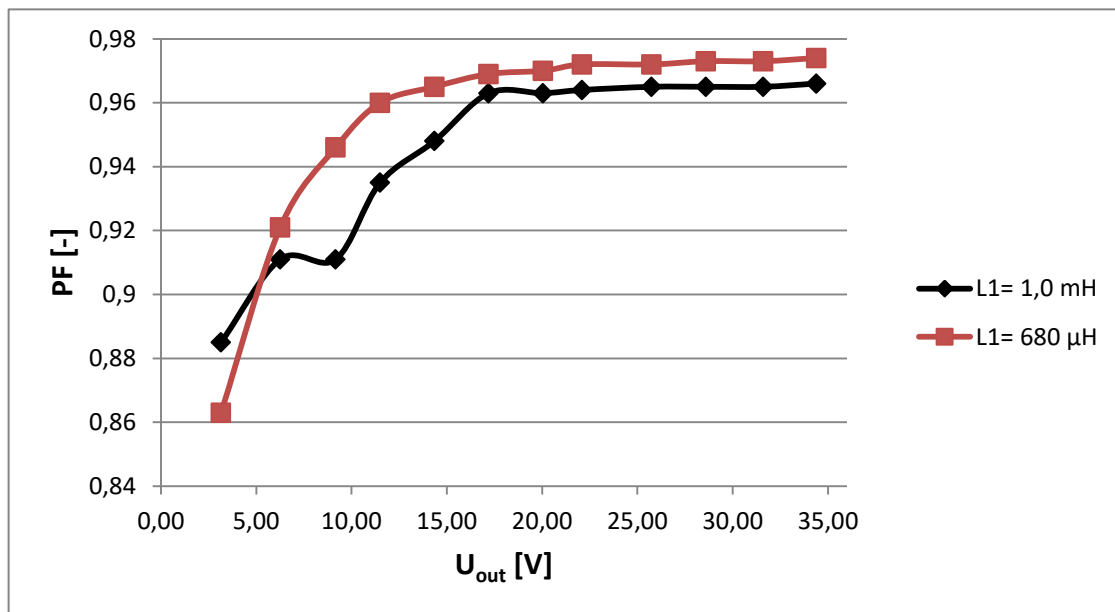
Obrázok 8.5 Závislosť výstupného prúdu na výstupnom napätí



Obrázok 8.6 Závislosť účinnosti na výstupnom napätí meniča

V rámci ďalšieho experimentovania o zlepšenie parametrov meniča bola vstupná cievka L_1 o hodnote 1,0 mH nahradená cievkou s nižšou indukčnosťou 680 μ H. Hodnota 1,0 mH je maximálna hodnota, kedy cievka bude pracovať v DCM režime. Táto zmena vedie k nárastu špičkového prúdu I_{L1PK} z 1,27 A na 1,52 A v dôsledku zníženia striedy spínania z 0,31 na 0,25. Táto zmena pozitívne prispieva k zvýšeniu hodnoty PF z 96,6 na 97,8 pre skoro celý rozsah výstupného napätia. THD skreslenie kleslo na 11,8 %. To je dosiahnuté celkovým znížením efektívneho vstupného odporu R_{eff} (viď. rovnica 6.4). Táto zmena ale ovplyvní celkový vstupný príkon, ktorý sa vyzdvihne na 35,67 VA, čo už je mimo požadované zadanie.

Účinnosť meniča je rovnako zhoršená, vzhľadom na vyššie výkonové namáhanie cievky L_1 a polovodičových súčiastok..



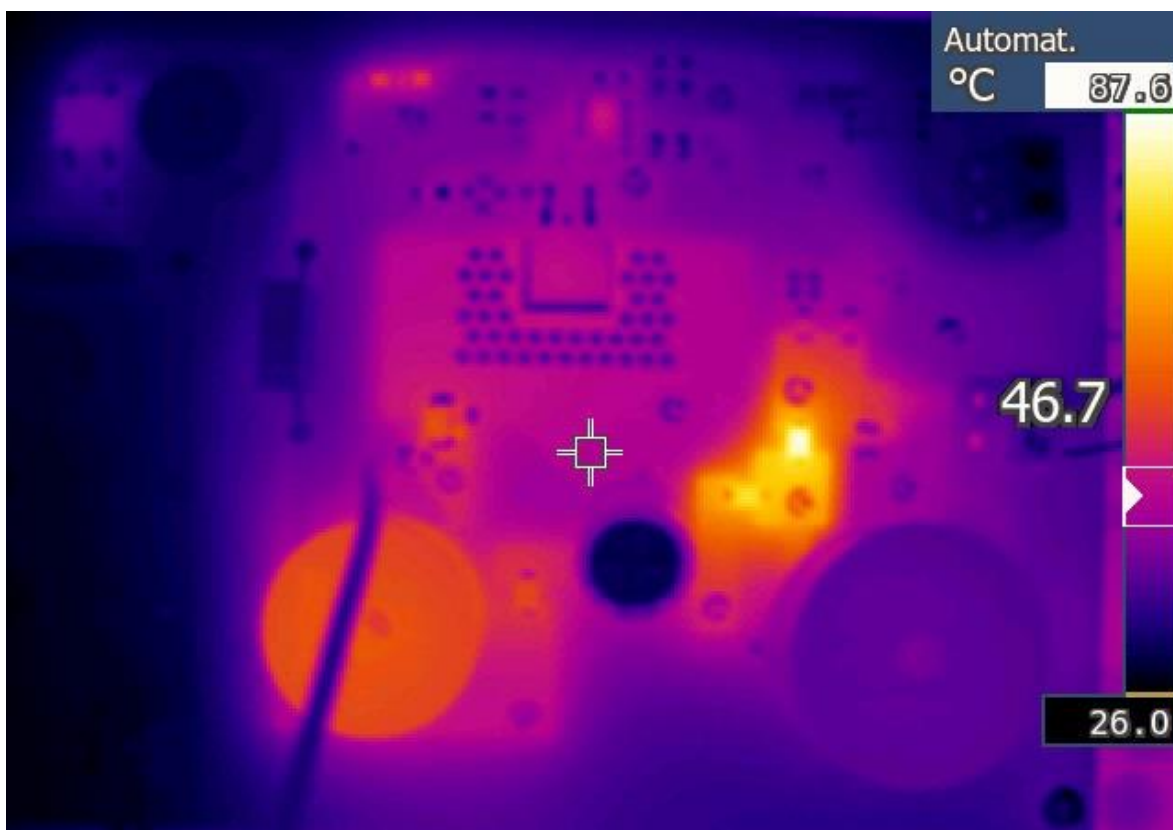
Obrázok 8.7 Závislosť PF na výstupnom napätí meniča pre 2 hodnoty induktoru L_1

Na nasledujúcom snímku je záznam z termokamery pri maximálnom zaťažení meniča, pri izbovej teplote 25 °C po prevádzke približne 30 minút. Najvyššia teplota, ktorá dosahuje skoro 90 °C sa nachádza na diódach D_3 a D_4 . Toto miesto nebolo na doske navrhnuté najlepšie a množstvo medi, ktoré bolo na ploche rozliate tu nestačí na optimálne rozloženie tepla, ktoré vznikne prechádzajúcim prúdom.

Druhé najteplejšie miesto sa nachádza na cievke L_1 . Keďže táto cievka pracuje v DCR režime, dochádza k skokovému nárastu prechádzajúceho prúdu z nulovej hodnoty na špičkovú hodnotu i_{L1PK} každý spínací cyklus, počas veľmi krátkej doby približne 3 µs. To vedie k nadmernému rozptýleniu energie v magnetickom jadre v dôsledku exkurzie veľkých magnetických tokov. Blízkosť cievky L_1 u veľkej medenej plochy môže tiež viesť k zvýšeným stratám.

Teplota v blízkosti tranzistoru Q_1 je okolo 50 °C. Obojstranná medená plocha s termálnymi otvormi poskytuje dostatočnú chladiacu plochu. Hoci väčšia plocha nijak výrazne nezhoršuje funkčnosť meniča, je dokázané, že bola navrhnutá s príliš veľkou rezervou a obsah plochy sa mohol zmenšiť čo by viedlo k zmenšeniu celého zariadenia.

Je nutné zdôrazniť, že termálny test prebiehal v laboratórnych podmienkach v izbovej teplote 26 °C. Teplota prostredia v mechanickej konštrukcii, v ktorom by malo byť finálne zariadenie uložené, by sa pohybovala oveľa vyššie. Pri súčasných nameraných teplotách by to už znamenalo prevádzku niektorých súčiastok na ich maximálne povolených teplotách. Mechanická konštrukcia by okrem ochrannej funkcie mala poskytovať tieniacu funkciu



Obrázok 8.8 Snímok termokamery LED spínaného zdroja

9. ZÁVER

Cieľom práce je štúdia o súčasných aplikáciách pre použitie LED technológií. Teoretická časť prináša poznatky o tvorbe bieleho svetla u luminiscenčných diód. Na prvých stránkach sú taktiež spomenuté základné delenia rôznych puzdier, parametre podľa ktorých výrobcovia triedia LED čipy, a úskalia spolu s výhodami, ktoré so sebou prináša LED technológia pre svetelných výrobcov. Teoretická časť sa ďalej zaoberá metódami riadenia LED pomocou spínaných zdrojov. Sú načrtnuté základné zapojenia. Časť práce vysvetľuje metódy korekcie účinníku, ktorý je u spínaných LED zdrojov regulovaný normou IPC ČSN EN 62717.

Práca ponúka prehľad súčasných trendov pre výber vhodných LED pre pouličné osvetlenia. S tým sú spomenutý momentálne obľúbení predstavitelia od predných výrobcov. Na základe delenia je potom zvolený výber vysoko výkonového LED puzdra XP-G3. Na danú pouličnú aplikáciu je navrhnutý hliníkový LED modul využívajúci sekundárnu optiku STRADA. V prílohe práce je taktiež protokol o nameraných svetelných parametroch LED modulu pomocou spektrometra HAAS 2000 v integračnej guli.

Hlavný cieľ práce je návrh spínaného zdroja, ktorý by zohľadňoval teóriu a obmedzenia spomenuté v prvých piatich kapitolách. Príkion celého svietidla nesmie presiahnuť 30 W a je limitovaný požiadavkami na vysokú hodnotu účinníku. Prihliadnuc na tieto podmienky bol zvolený integrovaný obvod HV9931, ktorý v sebe združuje aktívnu korekciu PF a výstupnú prúdovú reguláciu. Vzhľadom na komplikovanejší návrh je výpočtom venovaná časť kapitoly 6, ktorá sleduje postupy, a rady z aplikačných a návrhových poznámok výrobcu. Na základe výpočtov sú zvolené vhodné súčiastky. Kvôli veľkej výkonovej záťaži je výber cievok akýmsi kompromisom. Záver 6. kapitoly sa týka odhadu výkonových strát podľa ktorých je potom navrhnutý plošný spoj v 7. kapitole.

Správny návrh je zásadný pre funkčnosť spínaného zdroja. V rámci praktickej časti naštudované postupy vo vhodnej literatúre a aplikačných poznámkach od rôznych výrobcov. Tieto zásady boli potom aplikované na návrh dosky a rozloženia súčiastok v programe Altium. Keďže ide o prvotný návrh spínaného zdroja, bola prototypová doska navrhovaná s zámerom ďalších potenciálnych fyzických zásahov do súčiastok a ciest. To je prejavené najmä vo veľkosti zariadenia, ktorá ako bolo potom dokázané v 8. kapitole, bola navrhnutá s príliš veľkou rezervou. Veľkosť chladiacej plochy pre tranzistor Q_1 je zbytočne veľká. Prihliadnuc na predpoklad strát by bola menšia plocha efektívnejšia. Naopak medená plocha pre usmerňovacie diódy v druhej časti meniča nie je adekvátne na prítomné prúdové slučky. S určitými komplikáciami nedostupnosti laboratórnych prístrojov boli jednotlivé časti meniča otestované a merané.

Celková účinnosť meniča bola predpokladaná okolo 75 % v teoretických výpočtoch. Z meraní je 80% účinnosť lepšia, no vhodnejšie umiestnenie induktora L_1 , menšia chladiaca plocha pre tranzistor Q_1 a umožnenie lepšieho chladenia skrz dosku pre diódy D_3 a D_4 by mohlo pomôcť k lepším podmienkam.

Ako bolo spomenuté, pre veľké výkonové zaťaženie induktorov boli v práci využité netienené indukory. Tie sú veľkým zdrojom elektromagnetického rušenia. Vhodné tienenie výkonových súčiastok je pre splnenie EMC limitov žiaduce. Zariadenie spĺňa podmienky

zadané pracou. Hodnota účinníku dosahuje 0,96, čo je pre zdroje LED modulov podmienené normou na minimálne 0,90. Účinník je možné zvýšiť na 0,97 za cenu vyšších výkonových strát na súčiastkach.

Výhodou obvodu združujúcom v sebe PFC a prúdovú reguláciu je menšia komplexnosť. Nevýhodou je ale väčšia výkonová zaťažiteľnosť spínaných súčiastok. Práca je aplikáciou teoretických poznatkov na praktický návrh spínaného zdroja. Nasledujúca verzia LED spínaného zariadenia by mala čerpať hlavne z omylov návrhu tohto prototypu.

LITERATURA

- [1] SCHUBERT, E. Fred. *Light-emitting diodes* [online]. Second Edition. Cambridge, United States: Cambridge University Press, 2006 [cit. 2021-5-23]. ISBN 978-0-511-34476-3. Dostupné z: <http://www.ifsc.usp.br/~lavfis2/BancoApostilasImagens/ApConstantePlanck/ApCtePlanck2013/LIGHT-EMITTING%20DIODES.e-0521865387-2e.pdf>
- [2] WINDER, Steve. *Power Supplies for LED driving* . Second Edition. Oxford: Newnes, 2017 [cit. 2021-5-23]. ISBN 978-0-08-100925-3.
- [3] Best Mid-power LEDs (SMD Packages). *Manufacturer.lighting* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/194/>
- [4] How Do LED Lights Work? A Tricky Technology, A Messy Marketplace. <https://www.manufacturer.lighting/> [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/223/>
- [5] Best High Power LEDs. *Manufacturer.lighting* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/196/>
- [6] A Look at the Past and Future of LED Binning. *Lumenpulse* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.lumenpulse.com/knowledge/led-binning>
- [7] Cree® XLamp® XP-G3 LEDs [online]. *Cree*, 2021 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://cree-led.com/media/documents/dsXPG3.pdf>
- [8] Color Rendition of Light Sources: Color Rendering Index (CRI) & Beyond (TM-30, CQS, GAI...). *Manufacturer.lighting* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/187>
- [9] Advantages and Disadvantages of LED Lighting. *Manufacturer.lighting* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.manufacturer.lighting/info/69/>
- [10] DLC V5.0 Premium Requirements. *Designlights.org* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.designlights.org/solid-state-lighting/qualification-requirements/dlc-premium-requirements/>

- [11] BAKER, ALEX. LED lifetime claims need a reality check (MAGAZINE). *Ledsmagazine* [online]. 2020 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.ledsmagazine.com/manufacturing-services-testing/article/14075078/led-lifetime-claims-need-a-reality-check-magazine>
- [12] FRAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky*. Praha: BEN- Technická literatura, 2002. ISBN 80-86056-91-0
- [13] Application Note AN-1157 [online]. *Infineon* [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.infineon.com/dgdl/an-1157.pdf?fileId=5546d462533600a40153559a71721108>
- [14] Power Factor Correction (PFC) Circuits [online]. *Toshiba*, 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com>
- [15] GARDETTE, Emmanuel. Future Electronics – Mid-power LEDs: now a valid low-cost light source for street lights? *Future Electronics* [online]. May 2018 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.futureelectronics.cn/en/resources/cnl/201805/01>
- [16] Z Power LED – Z5-M4. *Seoul Semiconductor* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.seoulsemicon.com/en/product/spec/SZ5-M4-WN-C7/22>
- [17] WICOP. *Seoul Semiconductor* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.seoul-semicon.co.kr/en/technology/WICOP/>
- [18] LUXEON 5050. *Lumileds* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/DS174-LUXEON-5050-datasheet.pdf>
- [19] LUXEON 2835 Line. *Lumileds* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/files/DS216-luxeon-2835-line-datasheet.pdf>
- [20] LUXEON 3030 2D Line. *Lumileds* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/files/DS207-luxeon-3030-2d-line-datasheet-1.pdf>
- [21] LUXEON 3030 HE LUXEON 3030 HE Plus. *Lumileds* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/DS267-LUXEON-3030-HE-datasheet.pdf>
- [22] Usable Light Tool 2.4. *Future Lighting Solutions* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www1.futurelightingsolutions.com/ult/default.asp>

- [23] IEC 61000-3-2. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61000-3-2
- [24] HV 9931 Unity Power Factor LED Lamp Driver. *Microchip Technology Inc.* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/HV9931-Unity-Power-Factor-LED-Lamp-Driver-Data-Sheet-20005733A.pdf>
- [25] AN-H52 HV9931 Unity Power Factor LED Lamp Driver. *Microchip Technology Inc.* [online]. 2013 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/AN-H52.pdf>
- [26] DAVIS, Nick. Safety Capacitors First: Class-X and Class-Y Capacitors. *Allaboutcircuits* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/safety-capacitor-class-x-and-class-y-capacitors/>
- [27] DN-H04 Charting a HV9931 Driver Design. *Microchip Technology Inc.* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/DN-H04%20A040513.pdf>
- [28] DN-H06 14W Off-line LED Driver, 120VAC, PFC, 14V, 1.0A Load. *Microchip Technology Inc.* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/DN-H06%20A040513.pdf>
- [29] IPB60R360CFD7. *Infineon* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPB60R360CFD7-DataSheet-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4626b2d8e69016bb2b30b941aca
- [30] MOSFET Power Losses Calculation Using the DataSheet Parameters. *Infineon* [online]. 2006 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.pdfFiller.com/244051-fillable-mosfet-power-losses-calculation-using-the-data-sheet-parameters-form>
- [31] Calculation of Power Loss. *Rohm Co. Ltd* [online]. 2016 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/power_loss_appli-e.pdf
- [32] AN604 Calculation of conduction losses in a power rectifier. *ST* [online]. 2011 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00003894-calculation-of-conduction-losses-in-a-power-rectifier-stmicroelectronics.pdf

- [33] Determining Inductor Power Losses. *Coilcraft* [online]. 2018 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.mouser.com/pdfDocs/Coilcraft_inductorlosses.pdf
- [34] STTH108 High voltage ultrafast rectifier. *ST* [online]. 2009 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stth108.pdf>
- [35] STTH1R06. *ST* [online]. 2009 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: Turbo 2 ultrafast high voltage rectifier
- [36] STTH1L06 Turbo 2 ultrafast high voltage rectifier. *ST* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stth1l06.pdf>
- [37] AN-1149 Layout Guidelines for Switching Power Supplies. *Texas Instruments* [online]. 2013 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/snva021c/snva021c.pdf?ts=1607331693895&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FLM25575%253Futm_source%253Dgoogle%2526utm_medium%253Dcpc%2526utm_campaign%253Dapp-null-null-GPN_EN-cpc-pf-google-ww%2526utm_content%253DLM25575%2526ds_k%253DLM25575%2526DCM%253Dyes%2526gclid%253DCj0KCQiA2af-BRDzARIsAIVQUOd4eKETNvqBFhx2SnNxfXRojReI9LSOoTTJ3q-BVQGVgAR1OhHTFeoaAjZOEALw_wcB%2526gclid%253Daw.ds
- [38] BOGATIN, Eric. Seven Habits of Successful 2-Layer Board Designers. *Signal Integrity Journal* [online]. 2019 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.signalintegrityjournal.com/blogs/12-fundamentals/post/1207-seven-habits-of-successful-2-layer-board-designers>
- [39] PCB Layout Techniques of Buck Converter. *Rohm Co. Ltd* [online]. 2014 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://d1d2qsbl8m0m72.cloudfront.net/en/products/databook/applinote/ic/power/switching_regulator/converter_pcb_layout_appli-e.pdf
- [40] Guidelines to design PCB trace the right way. *Gadgetronicx* [online]. 2020 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.gadgetronicx.com/pcb-trace-design-guidelines/>
- [41] TAYLOR, Robert. Power Tips: How to find switching loops in a power supply. *Texas Instruments* [online]. 2016 [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/b/powerhouse/posts/power-tips-how-to-find-switching-loops-in-a-power-supply
- [42] CALCULATING SPACING BETWEEN PCB TRACES FOR VARIOUS VOLTAGE LEVELS. *Smps* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://www.smps.us/pcbtracespacing.html>

- [43] Thermal Vias for Circuit Board Heat Management: Techniques and Tips. *Cadence* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2019-thermal-vias-for-circuit-board-heat-management-techniques-and-tips>

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Závislosť spektrálnej intenzity na vlnovej dĺžke u bielej LED [1]	2
2.1	Puzdro LED stredného výkonu [4]	3
2.2	Puzdro LED vysokého výkonu [4]	4
2.3	Chromatická oblasť podľa štruktúry 1/16 ANSI C78.377A [7]	5
3.1	Spínacie cykly znižujúceho meniča	8
3.2	Spínacie cykly zvyšujúceho meniča	9
3.3	Spínacie cykly zvyšujúceho-znižujúceho meniča.....	10
4.1	a) Priebeh prúdových impulzov u obvodu bez PFC b) indukčný pasívny filter c) kapacitný pasívny filter	11
4.2	Aktívny filter (vľavo) a výkonové využitie spínacieho prúdu (vpravo)	12
4.3	Režimy spínania a) CCM b) CRM c) DCM	13
5.1	Parametre diódy XP-G3 S3 triedy v CREE kalkulátore	16
5.2	3D model LED modulu a optiky STRADA 2x6.....	16
6.1	Koncept návrhu spínaného zdroja pre LED.....	17
6.2	Schéma zapojenia s HV9931 [24]	19
6.3	Stavy spínania meniča: a) energia dodávaná do L1 po zapnutí b) uvoľnenie energie z L1 do E1 c) energia dodávaná do L1 a L2 [25].....	21
6.4	Stavy spínania meniča: a) energia uvoľnená z L ₁ a L ₂ b) DCM režim L ₁ a CCM režim L ₂ [25].....	22
6.5	Vstupný filter a usmerňovací diódový mostík	23
6.6	Schéma hlavnej časti LED meniča s HV9931	28
7.1	Detail rozloženia súčiastok na DPS spínaného zdroja.....	33
8.1	Priebeh napätia na snímacom odpore R ₁	34
8.2	Priebeh napätia U _{L1} na induktore L ₁	35
8.3	Napätie U _{DS} bez RC článku na D ₁ (vľavo) a s RC článkom (vpravo)	35
8.4	Napätie na snímacom odpore na výstupe meniča	36
8.5	Závislosť výstupného prúdu na výstupnom napätí	37
8.6	Závislosť účinnosti na výstupnom napätí meniča.....	37
8.7	Závislosť PF na výstupnom napätí meniča pre 2 hodnoty induktora L ₁	38
8.8	Snímok termokamery LED spínaného zdroja.....	39

ZOZNAM TABULIEK

5-1 Porovnanie parametrov LED v rôznych puzdrách	15
6-1 Požadované parametre LED meniča	24
6-2 Parametre MOSFET IPB60R360CFD7 [30]	28

ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

Skratky:

LED	Light emitting diode (dióda vyžarujúca svetlo)
GaAs	Galium Arsenid
GaAsP	Galium Arsenid Phosphide
InGaN	Indium Galium Nitride
SMD	Surface mount devices (súčiastky na povrchovú montáž)
PLCC	Plastic leaded chip carrier
CCT	Correlated Colour Temperature (Korelovaná farebná teplota)
ANSI	American National Standards Institute
SDCM	Standard deviation of colour matching
CRI	Colour rendering index (index farebného podania)
CIE	Commission internationale de l'éclairage
PWM	Pulse width modulation (pulzne šírková modulácia)
DLC	Design Light Consortium
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PF	Power factor (účinník)
DC	Direct Current (jednosmerný prúd)
AC	Alternating Current (striedavý prúd)
CCM	Continuous Conduction Mode (režim s neprerušovaným prúdom)
CRM	Critical Conduction Mode (kritický režim prúdu)
DCM	Discontinuous Conduction Mode (nespojité režim prúdu)
ESD	Electrostatic Discharge (elektrostatický výboj)
IO	Integrovaný obvod
EMC	Electromagnetic compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
SOT	Small outline transistor
FR	Flame Retardant
HAL	Hot Air Leveling
THT	Through-hole technology

Symboly:

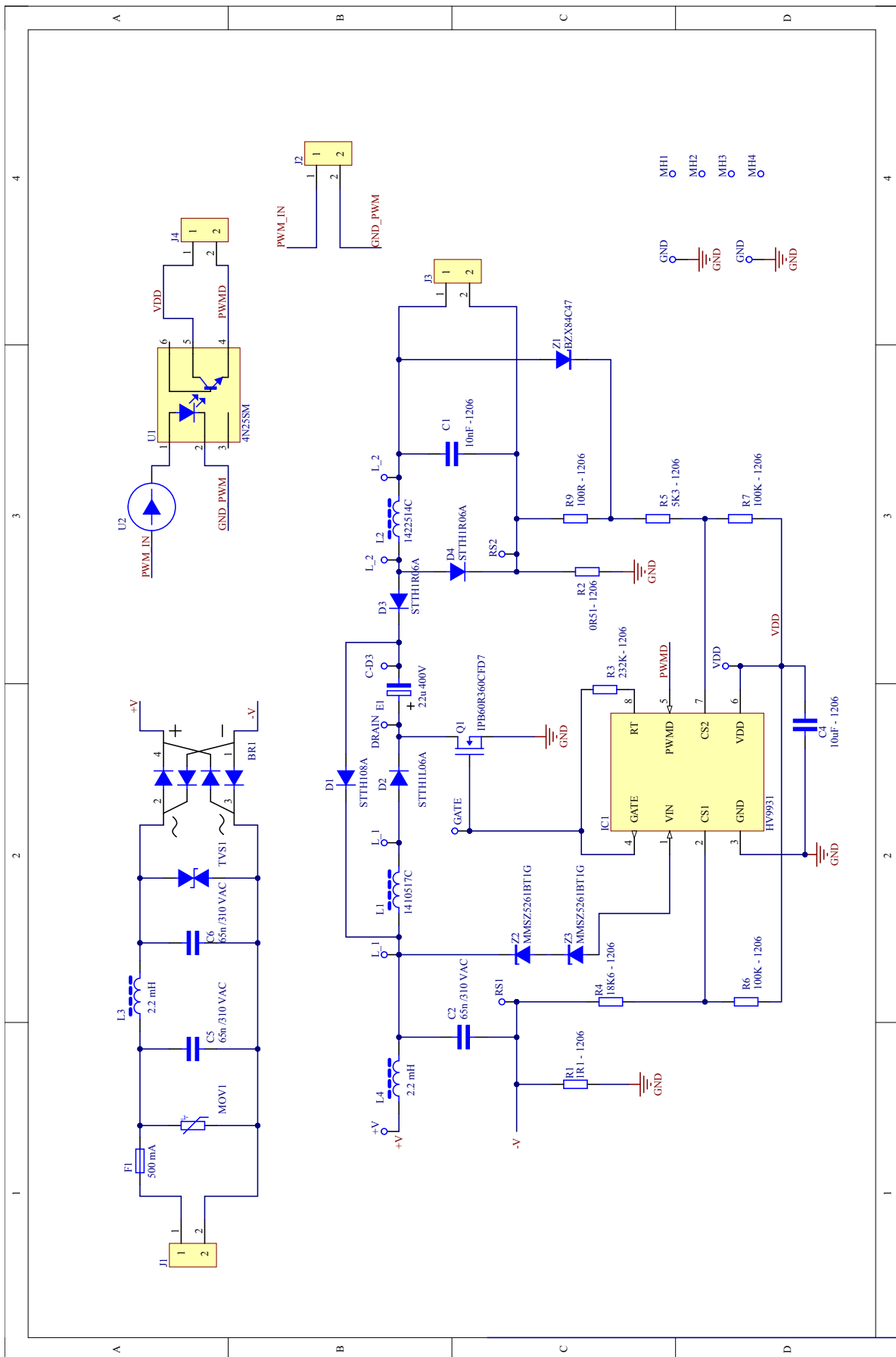
λ	vlnová dĺžka	(nm)
D	strieda	(-)
U	napätie	(V)
I	prúd	(A)
f	frekvencia	(Hz)
T	perióda	(s)
t	čas/doba	(s)
L	indukčnosť	(H)
Φ	svetelný tok	(lm)

R	odpor	(Ω)
C	kapacita	(F)
Q	náboj	(C)
P	činný výkon	(W)
S	zdanlivý výkon	(VA)
$\cos \varphi$	účinník	(-)

ZOZNAM PRÍLOH

PŘÍLOHA A - SCHEMATICKÝ VÝKRES LED ZDROJA	52
PŘÍLOHA B - VÝROBNÉ DATA PRE LED ZDROJ	53
PŘÍLOHA C - 3D MODEL LED ZDROJA	56
PŘÍLOHA D - SÚPISKA SÚČIASTOK LED ZDROJA.....	57
PŘÍLOHA E - SCHEMATICKÝ VÝKRES LED MODULU.....	59
PŘÍLOHA F - VÝROBNÉ DATA PRE LED MODUL.....	60
PŘÍLOHA G - 3D MODEL LED MODULU	62
PŘÍLOHA H - SÚPISKA SÚČIASTOK LED MODULU.....	63
PŘÍLOHA I - TABUĽKY NAMERANÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNÔT.....	64
PŘÍLOHA J - PROTOKOL O SPEKTRÁLNO M ZLOŽENÍ LED MODULU ..	CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.

Príloha E - Schematický výkres LED zdroja

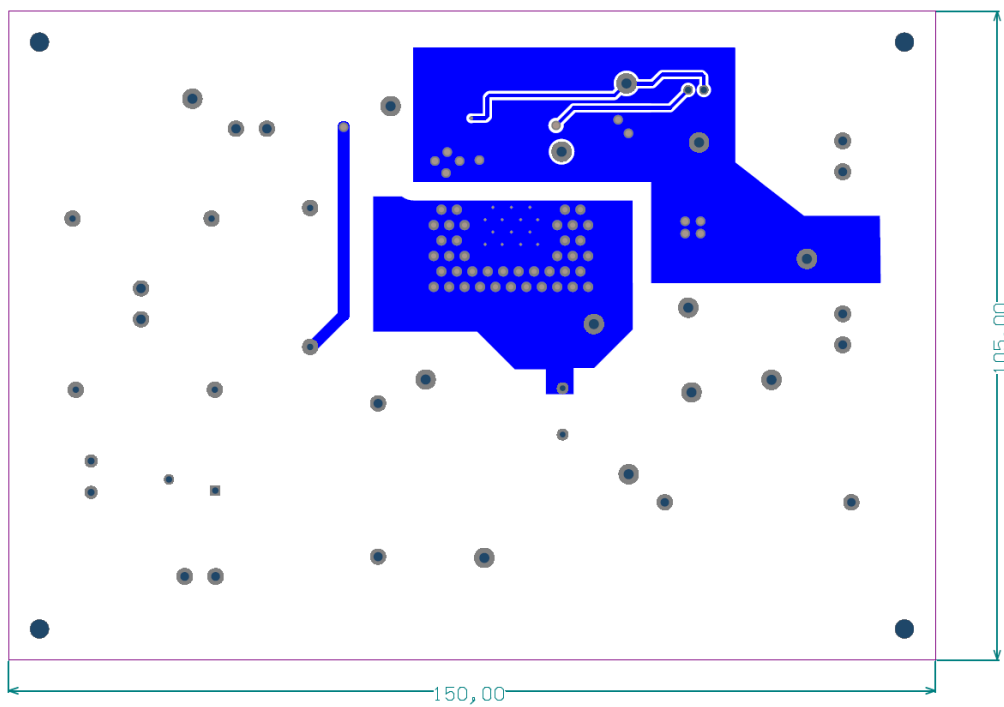


Príloha B - Výrobné data pre LED zdroj

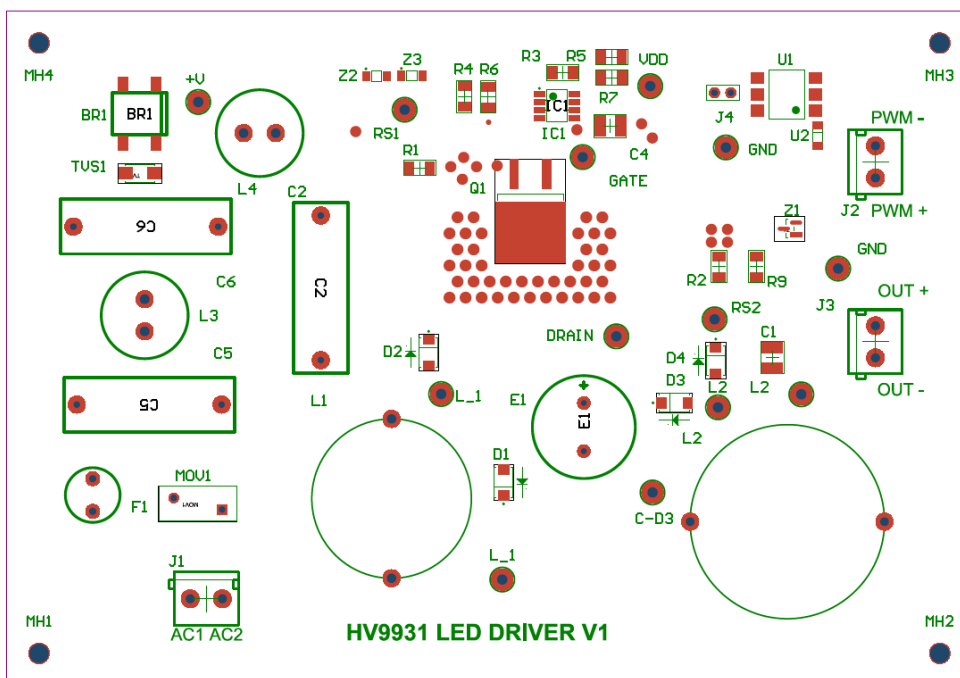
Vrstva TOP



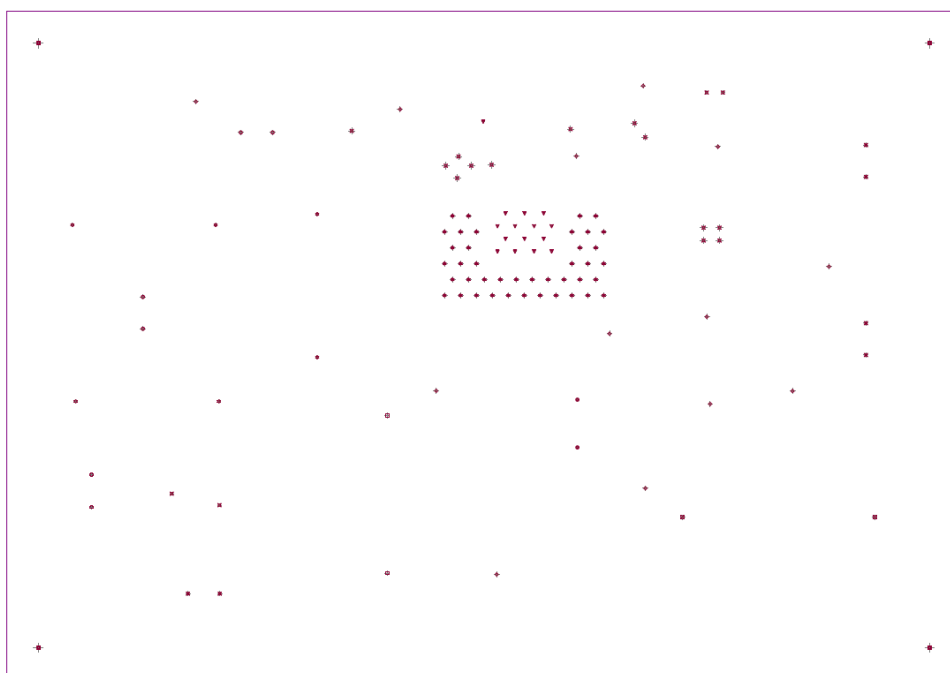
Vrstva BOTTOM



Vrstva Popis súčiastok



Vŕtanie



Info pre výrobcu

HU9931 LED DRIVER U1			
MATERIAL	<input checked="" type="checkbox"/> FR4	SINGLELAYER <input type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/> AL	DOUBLELAYER <input checked="" type="checkbox"/>	
	<input type="checkbox"/> CEM3		
	<input type="checkbox"/> OTHER		
DIMENSION	150,00	×	105,00 mm
TOLERANCE	+/- 0,3 mm		
THICKNESS	COPPER	FINISH	
2,0 mm <input type="checkbox"/>	105 um <input type="checkbox"/>	HAL	<input checked="" type="checkbox"/>
1,5 mm <input checked="" type="checkbox"/>	70 um <input type="checkbox"/>	OSP	<input type="checkbox"/>
1,2 mm <input type="checkbox"/>	35 um <input checked="" type="checkbox"/>	AU	<input type="checkbox"/>
1,0 mm <input type="checkbox"/>	18 um <input type="checkbox"/>	SN	<input type="checkbox"/>
0,8 mm <input type="checkbox"/>			
0,6 mm <input type="checkbox"/>			
MANUFACTURER	<input checked="" type="checkbox"/> STANDARD		<input type="checkbox"/> SEKISUI TAIYO
SOLDER MASK		TOP	BOT
	WHITE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	BLACK	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	GREEN	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
	OTHER	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	COLOR	COLOR	
LEGEND	WHITE	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	BLACK	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	GRAY	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	OTHER	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		COLOR	COLOR
ELEKTRICAL TEST	<input checked="" type="checkbox"/> YES	<input type="checkbox"/> NO	
COMMENT			

Príloha C - 3D model LED zdroja

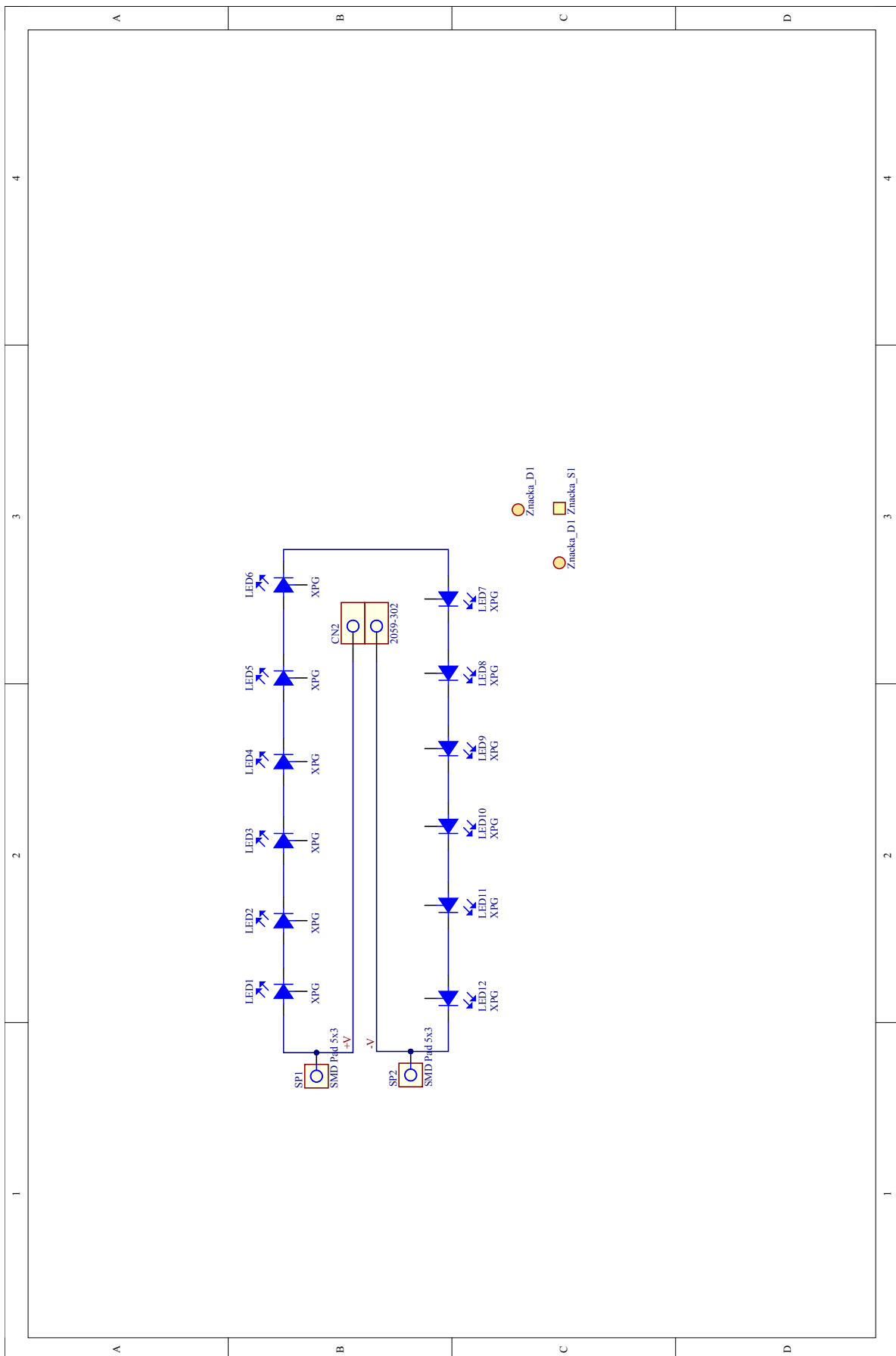


Príloha D - Súpiska súčiastok LED zdroja

Súčiastka	Hodnota	Popis	Puzdro	Počet
BR1	DFL1506S-E3/77	usmerňovač	DFL1506S-E3/77	1
C1	10nF -1206	kondenzátor, keramický	C1210	1
C2, C5, C6	65n /310 VAC	kondenzátor, bezpečnostný	890334023017CS	3
C4	10uF - 1206	kondenzátor, keramický	C1210	1
D1	STTH108A	dióda, usmerňovacia	STTH108A	1
D2	STTH1L06A	dióda, usmerňovacia	STTH3L06S	1
D3, D4	STTH1R06A	dióda, usmerňovacia	STTH1R06	2
E1	22u 400V	kondenzátor, elektrolytický	EEU-ED2G220SB	1
F1	500 mA	poistka	0034.6011	1
IC1	HV9931	LED driver	SOIC127P600X175-8N	1
J1, J2, J3	DG126-5-2P	konektor, 2- polový	DG126-5-2P	3
J4	0901200122	konektor, prepojovací pin	0901200122	1
L1	1410517C	induktor, vývodový	1468420C	1
L2	1422514C	induktor, vývodový	1422514C	1
L3, L4	2.2 mH	induktor, vývodový,	RCP1317NP-222L	2
MOV1	B72210S2271K101	varistor	B72210S2271K101	1
Q1	IPB60R360CFD7	600V CMOSN tranzistor	IPB60R120P7	1
R1	1R1 - 1206	rezistor; 250 mW	R1206	1
R2	0R51- 1206	rezistor; 500 mW	R1206	1
R3	232K- 1206	rezistor, 250 mW	R1206	1
R4	18K6 - 1206	rezistor, 250 mW	R1206	1
R5	5K3 - 1206	rezistor, 250 mW	R1206	1
R6, R7	100K - 1206	rezistor, 250 mW	R1206	2
R9	100R - 1206	rezistor, 250 mW	R1206	1
TVS1	SMAJ440CA	transil	SMAJ440CA	1
U1	4N25SM	optočlen	4N25M	1
U2	NSI45020AT1G	driver	NSI45020AT1G	1
Z1	BZX84C47	dióda, zenerová	BZX84C47	1

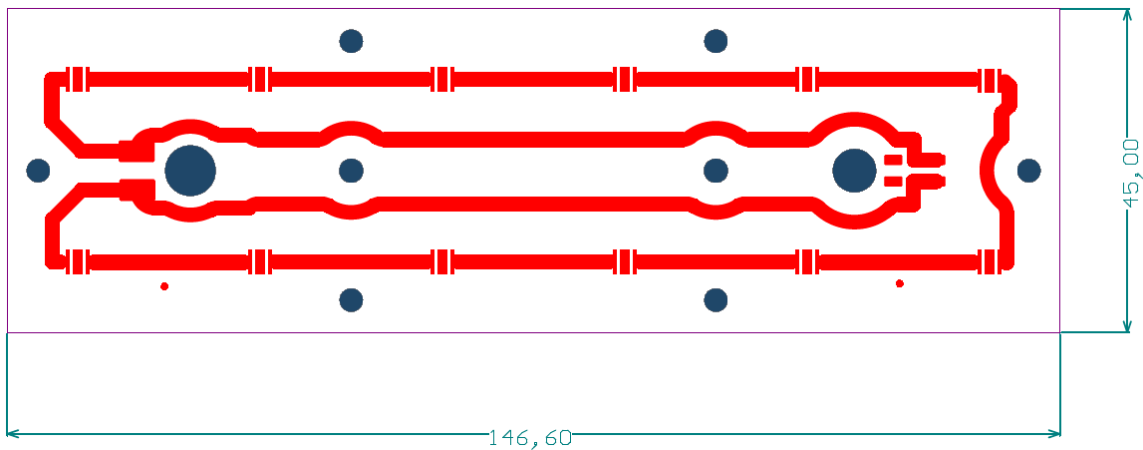
Z2, Z3	MMSZ5261BT1G	dióda, zenerová	MMSZ5261BT1G	2
+V, C-D3, DRAIN, GATE, GND, L_1, L_2, RS1, RS2, VDD	Test_Point	testovací bod	TEST_POINT	13
MH1, MH2, MH3, MH4	Mounting Holes	montážne otvory	3.0MM	4

Príloha E - Schematický výkres LED modulu

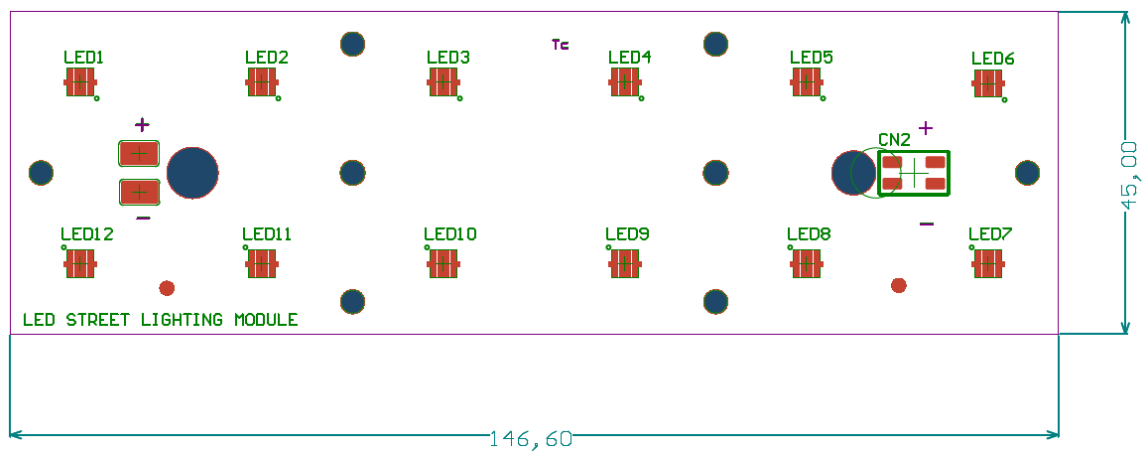


Príloha F - Výrobné data pre LED modul

Vrstva TOP



Popis súčiastok



Info pre výrobcu

LED STREET LIGHTING MODULE			
MATERIAL	<input type="checkbox"/> FR4	SINGLELAYER	<input checked="" type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> AL	DOUBLELAYER	<input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/> CEM3		
	<input type="checkbox"/> OTHER	HR	
DIMENSION	146,60	X	45,00 mm
TOLERANCE	+/- 0,3 mm		
THICKNESS	COPPER	FINISH	
2,0 mm <input type="checkbox"/>	105 um <input type="checkbox"/>	HAL	<input checked="" type="checkbox"/>
1,5 mm <input checked="" type="checkbox"/>	70 um <input type="checkbox"/>	OSP	<input type="checkbox"/>
1,2 mm <input type="checkbox"/>	35 um <input checked="" type="checkbox"/>	AU	<input type="checkbox"/>
1,0 mm <input type="checkbox"/>	18 um <input type="checkbox"/>	SN	<input type="checkbox"/>
0,8 mm <input type="checkbox"/>			
0,6 mm <input type="checkbox"/>			
MANUFACTURER	<input checked="" type="checkbox"/> STANDARD		<input type="checkbox"/> SEKISUI TAIYO
SOLDER MASK		TOP	BOT
	WHITE	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	BLACK	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	GREEN	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OTHER	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	COLOR	COLOR	
LEGEND			
	WHITE	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	BLACK	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	GRAY	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OTHER	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	COLOR	COLOR	
ELEKTRICAL TEST	<input type="checkbox"/> YES	<input checked="" type="checkbox"/> NO	
COMMENT			

Príloha G - 3D model LED modulu



Príloha H - Súpiska súčiastok LED modulu

Súčiastka	Hodnota	Popis	Puzdro	Počet
LED1, LED2, LED3, LED4, LED5, LED6, LED7, LED8, LED9, LED10, LED11, LED12	XP-G3	výkonová LED dióda	3535	12
CN2	Wago 2059-2	konektor, 2-polový	2059-302	1

Príloha I - Tabuľky nameraných a vypočítaných hodnôt

L1= 1,0 mH					
U _{in} [V]	I _{in} [A]	S [VA]	PF [-]	P [W]	Q [VAR]
230,1	0,130	29,91	0,966	28,90	7,73
230,1	0,123	28,30	0,965	27,31	7,42
230,1	0,112	25,77	0,965	24,87	6,76
230,1	0,098	22,55	0,965	21,76	5,91
230,1	0,090	20,71	0,964	19,96	5,51
230,1	0,082	18,87	0,963	18,17	5,09
230,1	0,071	16,34	0,963	15,73	4,40
230,1	0,062	14,27	0,948	13,52	4,54
230,1	0,053	12,20	0,935	11,40	4,33
230,1	0,043	9,89	0,911	9,01	4,08
230,1	0,033	7,59	0,911	6,92	3,13
230,1	0,028	6,44	0,885	5,70	3,00

L1= 680 µH					
U _{in} [V]	I _{in} [A]	S [VA]	PF [-]	P [W]	Q [VAR]
230,1	0,155	35,67	0,974	34,74	8,08
230,1	0,139	31,98	0,973	31,12	7,38
230,1	0,126	28,99	0,973	28,21	6,69
230,1	0,115	26,46	0,972	25,72	6,22
230,1	0,104	23,93	0,972	23,26	5,62
230,1	0,093	21,40	0,97	20,76	5,20
230,1	0,083	19,10	0,969	18,51	4,72
230,1	0,072	16,57	0,965	15,99	4,34
230,1	0,061	14,04	0,96	13,47	3,93
230,1	0,050	11,51	0,946	10,88	3,73
230,1	0,038	8,74	0,921	8,05	3,41
230,1	0,027	6,21	0,863	5,36	3,14

LED modul			
Uin [V]	Iout [A]	eff1 [%]	eff2 [%]
34,40	0,699	80,35	67,39
31,60	0,697	77,86	68,90
28,60	0,697	77,39	68,79
25,75	0,655	74,76	63,71
22,09	0,653	69,69	60,31
20,05	0,645	68,58	60,46
17,20	0,643	67,66	57,88
14,35	0,627	63,03	54,28
11,50	0,620	58,47	50,80
9,17	0,613	56,84	48,89
6,26	0,613	50,56	43,91
3,15	0,610	29,82	30,93

Príloha J - Protokol o spektrálnom zložení LED modulu



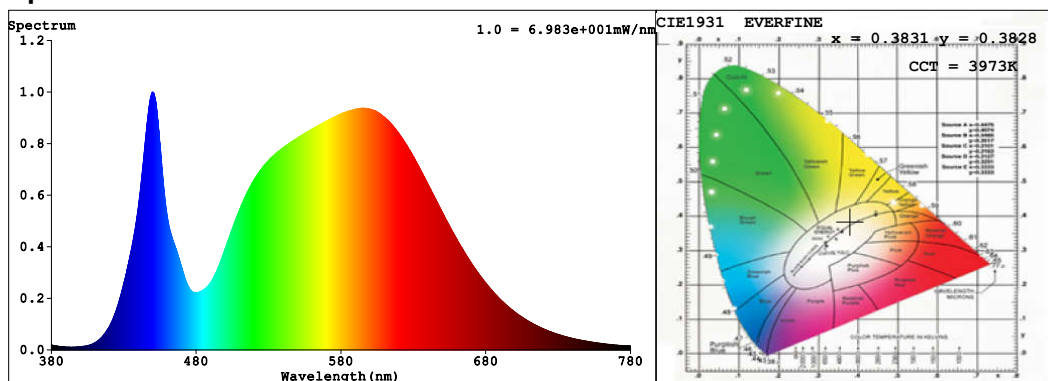
Spectrum Test Report by TRON

Sample	:	Date	: 2021-05-22 16:58:25
Specification	: LED street lighting module V1	Sam. Status	:
Sample No.	: 1	Standard	:
Manufacturer	: TRON elektronické součástky	Instrument	: HaasSuite(EVERFINE)
Assessor	: damin		
Remark	:	Test by	: MJ
Device SN	: LED street lighting module V1		

Test Condition

Temperature	: 24Deg	RH	: 59%
WL Range	: 380nm-780nm	IP	: 50346 (77%)
Test Mode	: Fast Test	T	: 246 ms
Sensitivity	: Low		

Spectrum



Colorimetric Parameters

Chromaticity Coordinate: $x = 0.3831$ $y = 0.3828$ / $u' = 0.2244$ $v' = 0.5046$ ($duv=2.05e-03$)
CCT= 3973K Prcp WL: $L_d=578.1nm$ Purity=29.9%
Peak WL: $L_p=450nm$ FWHM: =21.9nm Ratio:R=18.2% G=78.8% B=3.0%
Render Index: $R_a = 81.4$

EEL: 0.08075 A++ Highest

R1 =80 R2 =86 R3 =90 R4 =82 R5 =79 R6 =80 R7 =87
R8 =67 R9 =12 R10=65 R11=80 R12=57 R13=81 R14=94 R15=75

Photometric & Radiometric Parameters

Flux = 3930.0 lm Eff. : 168.70 lm/W $F_e = 11.980$ W

Electrical parameters

V = 34.55 V I = 0.6951 A P = 23.30 W PF = 0.9700 F=50.00 Hz

TRON Elektronické Součástky, s.r.o.
www.tron.cz