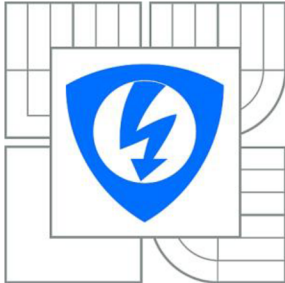




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

SVĚTELNÝ ZDROJ S LUMINISCENČNÍ DIODOU

A LIGHT SOURCE WITH LIGHT EMMITING DIODE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

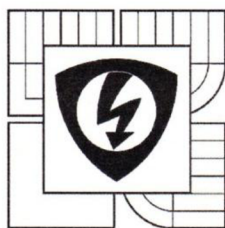
VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

MATYÁŠ NOVÁK

prof. Ing. JAROSLAV BOUŠEK, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Matyáš Novák
Ročník: 3

ID: 146917
Akademický rok: 2013/14

NÁZEV TÉMATU:

Světelný zdroj s luminiscenční diodou

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte jak provozní parametry ovlivňují životnost struktury LED a uveďte, jak jsou tyto problémy řešeny u obvodů pro napájení LED. Na základě získaných poznatků navrhnete přenosný světelný zdroj umožňující napájení ze sítě 50 Hz / 230 V a z palubní sítě 12V a 24V. Navržený zdroj realizujte a zhodnoťte jeho vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:


Podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 5.6.2014

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

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Práce začíná základním popisem funkce luminiscenční diody. Dále popisuje základní způsoby tvorby chladících pouzder výkonových LED a možnosti odvodu tepla. V teoretické části práce jsou také uvedeny možnosti regulace tepelných ztrát a možnosti napájení výkonových LED. Praktická část práce obsahuje popis návrhu a konstrukce světelného zdroje s LED, využívajícího poznatků o chlazení a napájení z teoretické části. Světelný zdroj je pro co nejvšestrannější využití možno napájet z různých napájecích napětí.

KLÍČOVÁ SLOVA

LED, luminiscenční dioda, životnost LED, chlazení LED, napájení LED, světelný zdroj

ABSTRACT

This work starts with the basic description of function of light-emitting diode. It also describes the basic techniques of design of cooling housings for power LEDs and possibility of heat removal. In the theoretical part of this work is also described the possibility of heat dissipation regulating and the possibility of the power sources for LEDs. The practical part includes description of LED light source design and construction, using knowledge about cooling and power from theoretical part. The light source is designed for different kinds of power supplies for maximum flexibility of usage.

KEY WORDS

LED, Light-emitting diode, lifetime of LED, cooling LED, LED power source, light source

NOVÁK, M. *Světelný zdroj s luminiscenční diodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 68 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jaroslav Boušek, CSc..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Světelný zdroj s luminiscenční diodou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplívajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29. května 2014

.....

podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Jaroslavu Bouškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 29. května 2014

.....

podpis autora

OBSAH

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
Úvod.....	10
1 LED dioda.....	11
1.1 Základní princip.....	11
1.2 Barva vyzařovaného světla.....	11
1.3 Základní parametry LED	13
1.4 Životnost.....	14
2 Teplotní management	16
2.1 Principy přenosu tepla	16
2.2 Velikost tepla vzniklého v LED	17
2.3 Odvod tepla z LED	17
2.3.1 Odvod tepla pouzdem	18
2.3.2 Odvod tepla přívody.....	18
2.3.3 Odvod tepla speciálním substrátem.....	18
2.4 Odvod tepla od LED.....	19
2.4.1 Horizontální vedení tepla	19
2.4.2 Vertikální vedení tepla	20
2.5 Odvod tepla od DPS	22
2.5.1 Pomocí chladiče umístěného na DPS.....	22
2.5.2 Pomocí Peltierova článku.....	22
2.5.3 Pomocí kovového obalu	22
2.6 Aktivní regulace tepelných ztrát.....	23
2.6.1 Měření teploty	24
3 Napájení a řízení led diody	25
3.1 Lineární zdroje proudu	25
3.1.1 Řízení lineárního zdroje proudu.....	25
3.2 Spínané zdroje proudu	26
3.2.1 Základní typy spínaných zdrojů	26
4 Návrh světelného zdroje	28
4.1 Počáteční návrh.....	28

4.2	Výběr vhodných komponentů	29
4.2.1	Výběr luminiscenčních diod.....	29
4.2.2	Výběr vhodného driveru LED.....	32
4.2.3	Výběr síťového napájecího zdroje	33
4.2.4	Výběr řídicího mikroprocesoru	35
4.3	Optimalizace driveru LED.....	36
4.3.1	Výpočty přidaných součástek k obvodu LT3755.....	37
4.3.2	Simulace měniče s obvodem LT3755	40
5	Realizace světelného zdroje.....	43
5.1	Návrh DPS pro LED driver	43
5.2	Návrh řídicí části	44
5.2.1	Popis použitých součástek.....	45
5.2.2	Návrh DPS.....	47
5.2.3	Návrh základního řídicího programu	47
5.3	Návrh DPS pro napájení	49
5.4	Návrh DPS pro LED.....	50
6	Ověření funkčnosti světelného zdroje.....	51
6.1	Měření napájecích měničů.....	51
6.2	Měření provozních teplot.....	53
6.3	Porovnání světelných zdrojů	54
	Závěr	55
	Seznam literatury	56
	Seznam zkratk, veličin a symbolů.....	58
	Seznam příloh	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Pásové modely přechodů v propustném směru [3].....	11
Obr. 2: Odstín bílého světla vyjádřený pomocí teploty [4].....	12
Obr. 3: Vyzařovací charakteristika LED [5].....	13
Obr. 4: Závislost četnosti poruch na čase [6].....	14
Obr. 5: Graf závislosti relativní svítivosti LED na jejím stáří [6].....	15
Obr. 6: Závislosti životností na teplotě LED s různými teplotními odpory R_{th} [6].....	15
Obr. 7: Způsoby odvodu tepla od PN přechodu LED diody [7].....	16
Obr. 8: Rozdělení dodaného výkonu na LED [7]	17
Obr. 9: Využití přívodů k chlazení PN přechodu různých typů LED [7]	18
Obr. 10: Způsoby chlazení přes různě podložky pod PN přechodem [7].....	19
Obr. 11: Rozdíl mezi LED bez a s chladicí ploškou.....	20
Obr. 12: Detailní pohled na tepelný průchod a DPS s průchody [7]	21
Obr. 13: Kovová DPS pro kvalitní odvod tepla [9]	21
Obr. 14: Chlazení LED pomocí kovového obalu zařízení [13]	23
Obr. 15: Blokový náčrt lineární regulace proudu řízené teplotou	23
Obr. 16: Blokový náčrt spínané regulace proudu řízené teplotou	24
Obr. 17: Příklady nejjednodušších stabilizátorů proudu.....	25
Obr. 18: Typy spínaných měničů využívaných pro napájení LED.....	27
Obr. 19: Blokové schéma světelného zdroje.....	29
Obr. 20: Volt-Ampérová charakteristika zvolené LED [18]	31
Obr. 21: Maximální dovolený proud LED v závislosti na teplotě [18]	31
Obr. 22: Maximální zátěž zdroje LPV-100-24 v závislosti na okolní teplotě [20].....	34
Obr. 23: Doporučené schéma zapojení LT3755 pro 50 W řetězec LED [19]	36
Obr. 24: Graf závislosti spínací frekvence na velikosti rezistoru R_T [19]	39
Obr. 25: Schéma zapojení měniče pro simulaci LTspice.....	40
Obr. 26: Výsledek simulace měniče	41
Obr. 27: Závislost I_{LED} na řídicím napětí U_{CTRL}	42
Obr. 28: Schéma zapojení měniče pro návrh DPS v programu Eagle	43
Obr. 29: Obrázec spojů navrhnuté DPS driveru s obrysy součástek	44
Obr. 30: Schéma zapojení ovládací části pro návrh DPS v programu Eagle.....	44
Obr. 31: Obrázec spojů navrhnuté řídicí DPS s obrysy součástek	47
Obr. 32: Závislost nastavení výkonu na vstupním ovládacím napětí	48
Obr. 33: Schéma zapojení napájecí části pro návrh DPS v programu Eagle.....	49
Obr. 34: Obrázec spojů navrhnuté napájecí DPS s obrysy součástek.....	50
Obr. 35: Schéma zapojení řetězce LED pro návrh DPS v programu Eagle.....	50
Obr. 38: Obrázec spojů navrhnuté DPS pro LED s obrysy součástek.....	50
Obr. 37: Průběh napájecího proudu	51
Obr. 38: Průběh proudu LED.....	52
Obr. 39: Rozpracovaná instalace elektroniky do pouzdra 500 W reflektoru.....	53

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Tabulka rozsahů vlnových délek rozdělených podle barvy světla [4].....	12
Tab. 2: Požadované parametry světelného zdroje.....	28
Tab. 3: Parametry zvolené LED [18].....	30
Tab. 4: Parametry obvodu LT3755 [19]	33
Tab. 5: Požadované parametry síťového napájecího zdroje	33
Tab. 6: Parametry zdroje MEAN WELL LPV-100-24 [20].....	34
Tab. 7: Parametry mikroprocesoru ATMEGA328P v platformě Arduino [21].....	35
Tab. 8: Popis vstupů a výstupů obvodu LT3755 [19].....	36
Tab. 9: Popis součástek v měniči	41
Tab. 10: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot.....	52
Tab. 11: Soupis hlavních parametrů obdobných světelných zdrojů [22] [23] [24]	54

ÚVOD

Světelné zdroje využívající luminiscenčních diod (LED) jsou dnes rozšířené ve velké míře. Na trhu proto není problém najít jak levnější, tak dražší svítidla. U levnějších se ale často setkáváme s nízkou životností a to díky potřebě výrobce „ušetřit“. Takové svítidlo se sice po začátku může zdát jako výhodné, neboť parametry mohou odpovídat kvalitním ale cenově dražším zařízením. Po čase provozu se však začnou projevovat známky materiálové únavy a různé poruchy, které by u kvalitnějších svítidel nastaly až po výrazně delší době.

V teoretické části práce budou vysvětleny základní úvahy pro minimalizaci poruch na LED svítidlech, a jak jim lze předejít nejen při používání, ale hlavně už při návrhu. Hlavním problémem bývá, jako u většiny zařízení, vznikající teplo. To ztěžuje podmínky provozu LED a ubírá na její životnosti. Dále budou v práci popsány jednotlivé principy chlazení a nejčastěji používané systémy napájení LED.

V praktické části práce bude popsán návrh konstrukce světelného zdroje s LED, ve kterém budou použity poznatky z teoretické části. Zdroj bude konstruován tak, aby rozměrem a výkonem odpovídal podobným světelným zdrojům nevyužívajících LED. Pro dosažení co největší flexibility použití bude návrh zdroje takový, aby jej bylo možné napájet jak z rozvodné sítě 50 Hz / 230 V, tak z palubní sítě 12 V a 24 V DC.

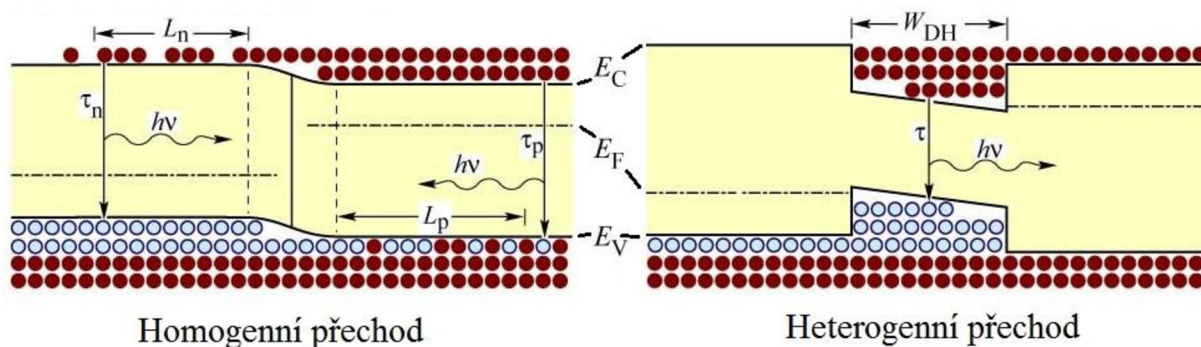
1 LED DIODA

1.1 Základní princip

Luminiscenční dioda (zkráceně LED) nachází čím dál častější uplatnění v osvětlovací technice. Důvodem je rozšiřování výroby LED a tím snižování pořizovacích nákladů. Dále jsou to zlepšující se technické schopnosti, umožňující vyrábět výkonnější LED struktury, které samozřejmě generují více světelné energie.

LED je název pro polovodičový PN přechod, polarizovaný v propustném směru, jenž při průchodu elektrického proudu vyzařuje světelné záření. Vlastní světelné záření vzniká při rekombinaci vybuzených elektronů zpět do svého původního stavu a od přechodu se dostává ven skrz průsvitné části. Elektrony jsou do vyšší energetické hladiny vybuzeny elektrickým napětím na přechodu PN. Všechny elektrony však při návratu nevytvářejí přímo světlo, ale jejich vyzářená energie se absorbuje v krystalové mřížce. Tato energie vytvoří teplo, které je odváděno materiálem LED na její povrch. Proudová hustota na přechodu ovlivní, kolik elektronů vytvoří světelnou energii a kolik tepelnou. Šířkou zakázaného pásu je možné ovlivnit vlnovou délku vyzařovaného světla [1].

První vyvinuté LED používaly homogenní typ přechodu (PN přechod bez žádné další přidané části) např. gallium arsenid (GaAs). Druhý typ je heterogenní přechod, v němž jsou využity dva typy polovodičů (např. GaAs a GaAlAs). Světlo v LED s druhým typem přechodu, tj. heterogenní přechod, vzniká v prostřední oblasti P (GaAs). Tato oblast má užší zakázané pásmo, proto zde nosiče rekombinují (Obr. 1) [2].



Obr. 1: Pásové modely přechodů v propustném směru [3]

1.2 Barva vyzařovaného světla

Barvu světla LED je možné upravit pomocí použitých materiálů na výrobu. Lze vytvořit LED vyzařující infračervené záření, viditelné barvy i ultrafialové záření. Pro viditelné záření od zelené až po červenou se využívají sloučeniny GaP, GaAs, GaAlAs, AlGaInP. Pro modré LED jsou to sloučeniny GaN, InGaN a SiC.

Vlnová délka vyzařovaného světla (barva světla, viz. Tab. 1) je určena velikostí energie zakázaného pásu, a jeho velikost je určena právě materiály použitými na výrobu PN přechodu. Přesnou hodnotu vlnové délky podle velikosti energie zakázaného pásu je možné zjistit pomocí rovnice (1) [1], [2].

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E \cdot e} \quad (1)$$

λ – vlnová délka [m], h – Planckova konstanta [$J \cdot s$], c – rychlost světla [m/s],

E – energie zakázaného pásu [eV], e – náboj elektronu [C]

Tab. 1: Tabulka rozsahů vlnových délek rozdělených podle barvy světla [4]

Barva	Rozsah vlnových délek[nm]
červená	625-800
oranžová	590-625
žlutá	565-590
zelená	520-565
tyrkysová (azurová)	500-520
modrá	430-500
fialová (purpurová, nachová)	400-430

V jednom pouzdře je samozřejmě možné implementovat více přechodů najednou. Díky tomu mohou vzniknout dvou a vícebarevné LED a také RGB diody, které při vhodném řízení zvládnou vytvořit jakoukoliv barvu. Vícebarevné LED nacházejí uplatnění jako různé dvoubarevné kontrolky a také jako dekorační osvětlení.

Bílé světlo nelze vytvořit přímo pomocí PN přechodu LED. Vytváří se proto pomocí vícebarevných LED, anebo pomocí jednobarevné LED s luminoforem, který barvu vyzařovaného světla změní. Bílé světlo, vytvořené pomocí kombinace více barev, se nejčastěji skládá z těch barev: modrá – žlutá, RGB, modrá – zelená – žlutá – červená.

Při použití jednobarevných LED a luminoforů bývají nejčastější kombinace takovéto: PN přechod vyzařující modré světlo v kombinaci se žlutým luminoforem (YAG luminofoř, yttrium – hliníkový granát) anebo PN přechod vyzařující UV záření s RGB luminofořem. Odstín bílého světla se určuje pomocí teploty světelného záření. Teplota záření odpovídá barvě absolutně černého tělesa zahřátého na tu danou teplotu (Obr. 2) [1].

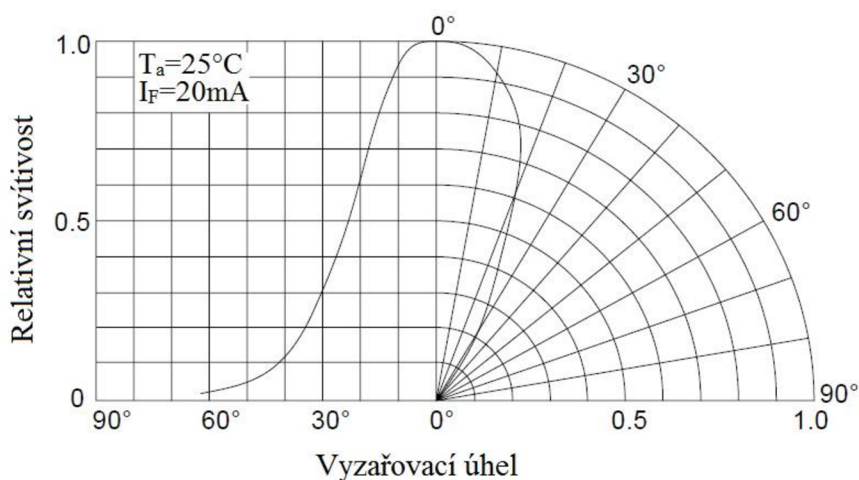


Obr. 2: Odstín bílého světla vyjádřený pomocí teploty [4]

1.3 Základní parametry LED

Jako každá elektrická součástka i LED má charakteristické parametry umožňující její zařazení do výsledné aplikace. Základními parametry tedy jsou:

- **Proud v propustném směru** – Trvalý I_F a špičkový I_{FM} ; určuje maximální hodnotu proudu, kterou je schopen PN přechod snést.
- **Proud a napětí v závěrném směru** – Maximální hodnota napětí pro závěrný směr U_R , kdy po jejím překročení dojde k průrazu přechodu PN v diodě a proud I_R , který protéká diodou v případě opačné polarizace.
- **Výkonová ztráta a maximální dovolená teplota přechodu** – Výkonová ztráta P_M je důležitým údajem hlavně u LED vyžadujících přídavné chlazení. Spolu s maximální dovolenou teplotou přechodu T_{JMAX} slouží k výpočtu optimálního chladiče pro LED.
- **Svítivost a vyzařovací úhel** – Údaje o vyzařovací charakteristice LED. Svítivost (intenzita světelného záření) Φ určuje maximální hodnotu intenzity vyzařovaného světla a vyzařovací úhel určuje rozptyl světla. LED se stejně světelně výkonným PN přechodem má menší svítivost při větším vyzařovacím úhlu, než LED s totožným PN přechodem, ale s menším vyzařovacím úhlem.
- **Vlnová délka/ teplota vyzařovaného světla** – Informace o barvě či odstínu vyzařovaného světelného záření LED. Vlnová délka λ se užívá hlavně u barevných LED. U bílých LED je odstín reprezentován teplotou vyzařovaného světla T .
- **Vyzařovací charakteristika** – Charakteristika informující o změně intenzity světelného záření v závislosti na odklonu pozorovacího úhlu od přímého směru vyzařování LED. Vyzařovací charakteristika je určena použitým typem optiky na LED. Může být jednak s velkým rozptylem (LED svítí s velkým vyzařovacím úhlem) nebo s malým rozptylem (světlo je směřováno do úzkého bodu) (Obr. 3) [1].

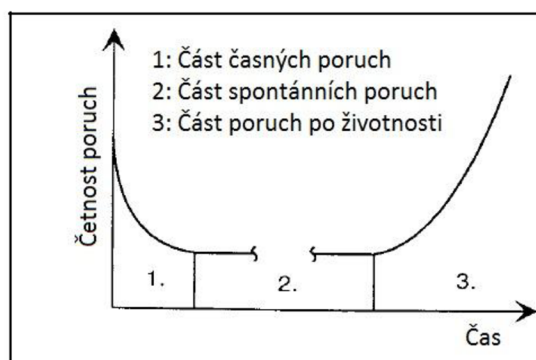


Obr. 3: Vyzařovací charakteristika LED [5]

1.4 Životnost

Jako každé zařízení, nebo jeho součásti, mají i LED svoji životnost. Její doba se určuje u výrobních prototypů experimentálně, neboť při konstrukci lze jen těžko poznat, co vytvořená struktura vydrží. Životnost LED výrazně ovlivňuje její pracovní teplota. Vyšší teplota znamená rychlejší stárnutí a tím snížení spolehlivosti a životnosti.

První ze tří částí charakterizujících poruchovost LED jsou poruchy při výrobě. Nastávají při nedodržení některého výrobního postupu a jinými chybami například při manipulaci ve skladech a při dopravě. Porucha je v tomto případě vytvořena pouze cizím zásahem, nesouvisí tedy s kvalitou samotné LED. Další ze tří částí jsou poruchy při provozu. Ty už nastávají selháním samotné LED, ale zpravidla to bývá vinou nesprávného návrhu použití. Jen výjimečně se může stát, že na selhání má vinu konstrukční nebo materiálová vada LED. Posledním ze tří částí jsou poruchy po uplynutí životnosti. Se stárnutím LED dochází i ke stárnutí struktury a tím k větší náchylnosti k poruše. Přibližná závislost poruch na čase je na Obr. 4.

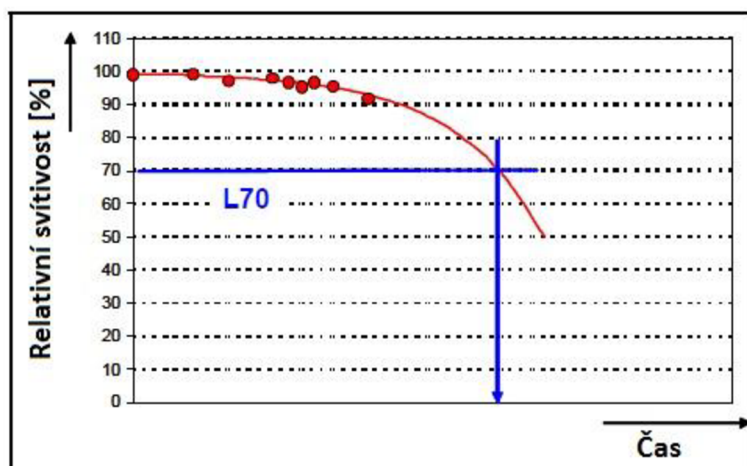


Obr. 4: Závislost četnosti poruch na čase [6]

Stárnutí LED je měřitelný faktor. V průběhu života totiž dochází k poklesu intenzity vyzařovaného světla. Tyto změny jsou po začátku jen minimální, ale s postupem času se stávají znatelnějšími. Údaj o zbývající životnosti lze tedy získat, pokud je známa hodnota původní intenzity světelného záření LED. V tom případě se provede měření aktuální hodnoty intenzity světelného záření a porovná se s původní. Výsledkem je číslo v procentech, podíl aktuální hodnoty intenzity světelného záření a původní hodnoty.

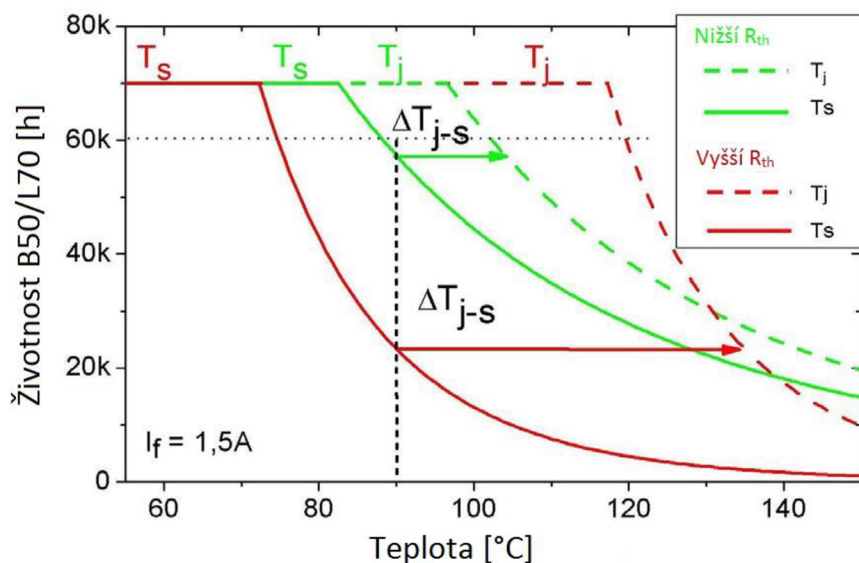
Výrobcem udávaná životnost je doba, za kterou intenzita světelného záření LED poklesne na určité procento původní intenzity. Například hodnota času pro L70 znamená dobu životnosti, dokud bude intenzita vyzařovaného světla větší než 70 % původní hodnoty. Graf závislosti svitu LED na jejím stáří je znázorněn na Obr. 5.

Podobným údajem jakým je poměrná svítivost (např. již zmiňovaných L70) je údaj „Úmrtnost“. Úmrtnost znamená procento LED, které za danou dobu už nemusí fungovat. Časový údaj pro B30 znamená dobu používání, po které už nemusí být funkčních 30 % LED. Poměrná svítivost a úmrtnost se dají kombinovat v případě popisování životnosti LED.



Obr. 5: Graf závislosti relativní svítivosti LED na jejím stáří [6]

LED se při své činnosti zahřívá a u výkonových diod je vznikající teplo hlavním faktorem pro správný návrh výsledného použití LED. Vhodně zvolená teplota přechodu LED totiž může výrazně ovlivnit její životnost. Zvýšení teploty o několik stupňů způsobí poměrně velký úbytek celkové doby života LED. Na následujícím grafu (Obr. 6) je vidět rozdíl v použití LED s různým tepelným odporem R_{th} mezi PN přechodem a povrchem. ΔT_{j-s} je rozdíl teplot mezi T_j a T_s . Ztrátový výkon je u obou LED stejný [6].



Obr. 6: Závislosti životností na teplotě LED s různými teplotními odpory R_{th} [6]

2 TEPLOTNÍ MANAGEMENT

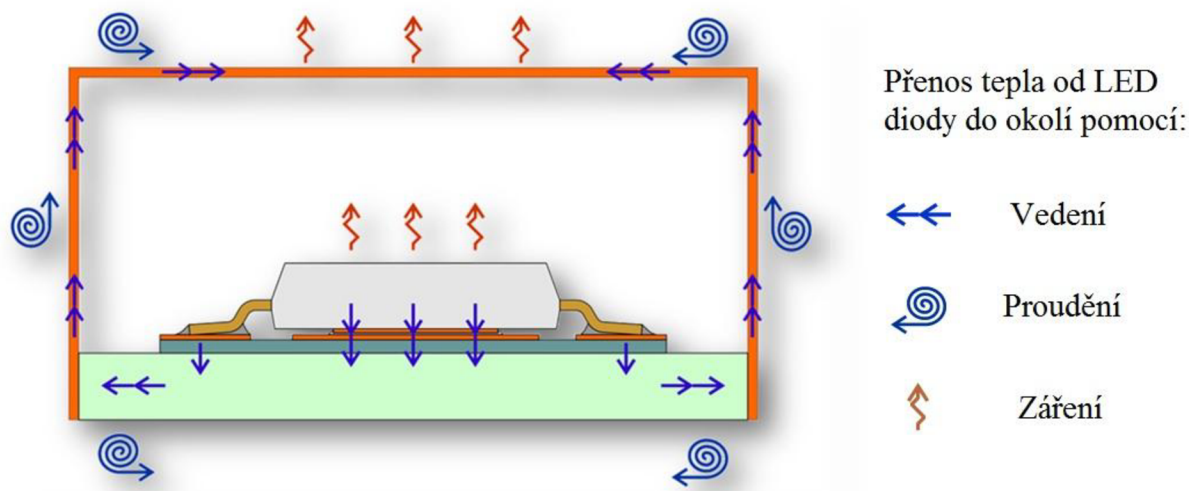
Světelné zdroje generují kromě energie ve formě světelného záření také energii tepelnou. Výjimku bohužel netvoří ani LED. Jak již bylo zmiňováno, teplota přechodu LED má výrazný vliv na většinu jejích provozních parametrů, včetně spolehlivost a životnosti. Proto je nutné u výkonových LED důkladně řešit odvod tepla od PN přechodu do okolí a nejbližšímu okolí zajistit dobré chlazení [7].

2.1 Principy přenosu tepla

Teplu, neboli tepelná energie, je velikost kmitů atomů v jejich krystalové mřížce. Teoreticky se kmitání zastaví, pokud je teplota tělesa rovna absolutní nule (0 K, -273,15 °C). S jakoukoliv vyšší teplotou je kmitání větší. Kmitavá energie atomů však nezůstává pouze na jediné molekule, ale ve formě vln se přenáší i na okolní molekuly. Tento jev se nazývá přenos tepla vedením a nastává v jakékoliv látce. Přenos tepla však nemusí probíhat pouze v jedné látce, ale může se vedením přenášet i z jedné látky na druhou, pokud jsou v těsné blízkosti.

Když látky nejsou přímo sousedící, tak je přenos tepla možný dalšími dvěma způsoby. První je přenos tepla prouděním (konvekce). Tento přenos probíhá tak, že se vedením ohřívá přenosová látka. Ta s dodaným množstvím tepla putuje k druhé látce, kde přijaté teplo odevzdá. Pohyb přenosové látky může být spontánní nebo nucený.

Druhý způsob je přenos tepla zářením. Tento přenos je způsoben infračerveným zářením, které vyzařují všechna tělesa s nenulovou teplotou. Stejným způsobem mohou také tělesa teplotu přijímat, proto jde o přenos tepla. O velikosti vyzařené tepelné energie infračerveným zářením rozhoduje emisivita povrchu látky. Emisivitu ovlivňují základní vlastnosti povrchu látky, jako je barva povrchu, povrchová úprava a tvar povrchu. Emisivita nabývá hodnot od 0 do 1 a tyto hodnoty značí kolik energie je schopné dané těleso vyzařit v poměru s absolutně černým tělesem. Obvyklý přenos tepla od LED je na Obr. 7.



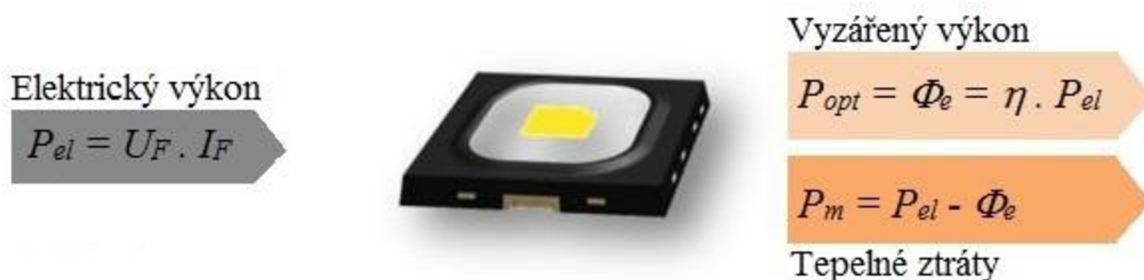
Obr. 7: Způsoby odvodu tepla od PN přechodu LED diody [7]

Tepelný odpor je parametr znázorňující jak velkou překážku přenosu tepla tvoří materiál, kterým teplo musí projít. Obdobně jako u elektrického odporu, který tvoří překážku procházejícímu proudu. Pokud nějaký materiál (například hliníková destička) převádí tepelnou energii působící na jedné straně na stranu druhou, dochází na tomto materiálu ke změně teploty. Ta závisí na přenášeném tepelném výkonu. Každý materiál má svoji hodnotu tepelného odporu, který se udává v jednotkách °C/W (nebo K/W) [8].

2.2 Velikost tepla vzniklého v LED

Tepelný výkon generovaný PN přechodem LED by se dal pro zjednodušení pojmout, jako energie, která byla dodána. To by platilo pro případ, kdy by se na světlo změnilo jen opravdové minimum energie. Světelné energie je skutečně generováno menší množství, než energie ve formě tepla, takže pokud chceme přesnou hodnotu tepelné energie, musíme velikost světelné energie odečíst.

Každá výkonová LED má z výroby definovanou hodnotu tzv. optické účinnosti. Optická účinnost je hodnota udávající množství energie, které bude LED vyzářeno jinak, než ve formě tepla. Tepelný výkon je proto možné určit pomocí celkového dodaného příkonu a hodnoty optické účinnosti. Výsledná hodnota tepelného výkonu LED je rozdíl celkového dodaného příkonu a hodnoty výkonu vyzářeného jinak, než ve formě tepla (Obr. 8) [7].



Obr. 8: Rozdělení dodaného výkonu na LED [7]

2.3 Odvod tepla z LED

Se zvětšujícím se výkonem LED bývá větší problém s uchlazením PN přechodu. Odvod tepla z LED je hlavním směrem vývoje, protože kvalitu jeho provedení lze vylepšit pouze při návrhu výroby. Jakmile je LED jednovyrobená, už není možné nijak upravit kvalitu chlazení. Jelikož PN přechod musí být zapouzdřen, je možné vzniklé teplo odvádět pouze vedením přes nějaký materiál. K odvodu tepla lze využít různých způsobů. O vhodném způsobu rozhoduje výkon LED.

2.3.1 Odvod tepla pouzdrem

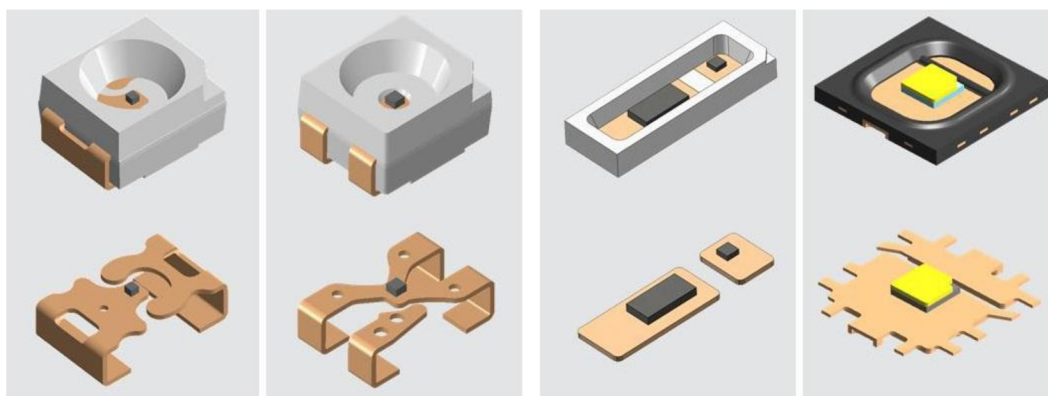
Asi nejjednodušším způsobem je odvod tepla keramickým obalem LED. Vlastní polovodičový čip je ukotven na keramickém substrátu a skrz něj je teplo odváděno dál směrem k DPS. Hlavní předností je elektrické izolování PN přechodu od chladiče. Další předností je rovnoměrné rozložení tepla po celé chladičí ploše LED, včetně kontaktních ploch. Teplo je tedy odváděno jak přes přívody, tak přes chladič (DPS). Jako vylepšení se na spodní část keramiky (co nepřesněji pod PN přechod) umisťuje kovová chladičí ploška. Ta je díky keramice elektricky odizolována od přívodů, takže může být přímo spojena s chladičem.

2.3.2 Odvod tepla přívody

Další možností chlazení je využití přívodních pinů (viz Obr. 9). Jelikož jsou kovy velmi dobrým vodičem tepla, nabízí se jako vhodné řešení chlazení PN přechodu. Ke chlazení se používá elektroda, na které je přichycen substrát (nejčastěji anoda). Ta se propojí co největší plochou s přívodním pinem. Zpravidla to bývá jeden vyrobený kus vodivého materiálu, aby se jeho tepelný odpor nezvyšoval zbytečnými přechody mezi jednotlivými kovy.

Tento styl chlazení se samozřejmě vyrábí i v provedení, kdy tento kus vodivého materiálu není spojený pouze s jedním vývodem, ale například se třemi (pokud má pouzdro 4 vývody a zbylý vývod je schopen přenést potřebné množství proudu).

Nevýhodou tohoto typu chlazení je, že případný chladič, na kterém je LED umístěna, je vodivě spojený s tímto vývodem (nebo vývody). To může vytvářet problémy, pokud je například potřeba na jeden chladič umístit více LED spojených do série. Každá následující by totiž vyzkratovala předchozí.

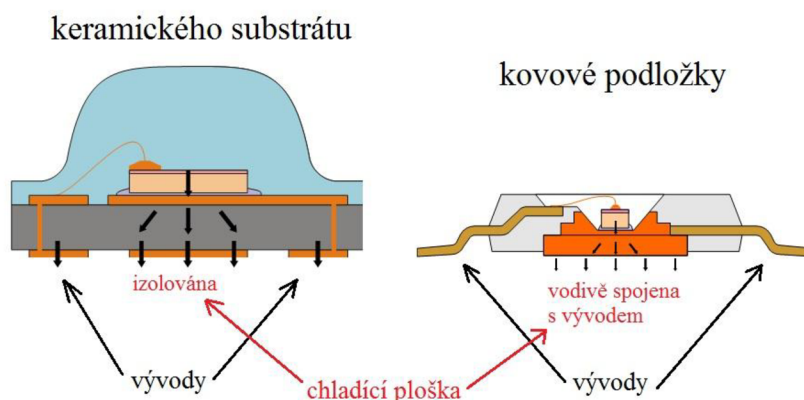


Obr. 9: Využití přívodů k chlazení PN přechodu různých typů LED [7]

2.3.3 Odvod tepla speciálním substrátem

Poslední možností je použití dobře tepelně vodivého substrátu (Obr. 10). Ten je sice také elektricky spojený s jedním vývodem, ale zajišťuje nejlepší odvod tepla od přechodu PN. Proto je nutné ve výsledné konstrukci zajistit elektrické odizolování LED od chladiče (pokud by bylo riziko vodivého spojení s jinou částí) anebo odizolování chladiče od okolí (zamezení úrazu elektrickým proudem) [7].

Chlazení pomocí:



Obr. 10: Způsoby chlazení přes různě podložky pod PN přechodem [7]

2.4 Odvod tepla od LED

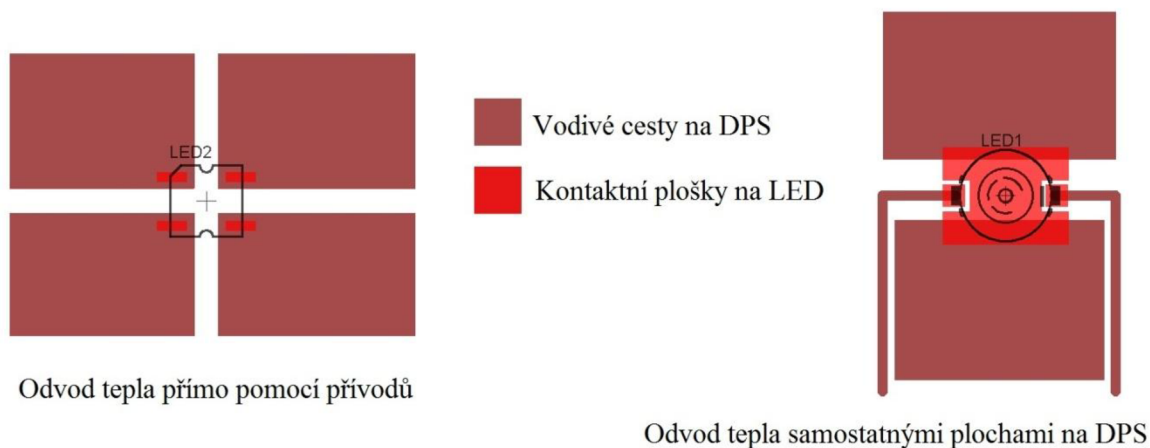
Odvádění tepelné energie od LED lze ovlivňovat už při fázi návrhu obvodu. Odvod tepla se řeší různými možnostmi podle velikosti výkonu a možností dané aplikace. Základní požadavek je vždy stejný, a to odvést co nejvíce tepla od LED. Dále je vhodné, aby mezi jednotlivými zdroji tepla (LED, výkonové prvky apod.) bylo dostatečné množství místa. Jeden prvek by totiž neměl ohřívat druhý atd. Důležitou částí je také výběr správného systému chlazení. Ten se v případě chlazení přes DPS dělí na dvě části: horizontální a vertikální [7].

2.4.1 Horizontální vedení tepla

Vyskytuje se na každé ploše, která je nějak ohřívána a není z tepelně izolačního materiálu. Nejčastěji se využívá u LED, které jsou chlazeny pomocí vývodů (tj. nemají speciální způsob na odvod tepla). K vedení tepla je zde využito přímo vodivých spojů na DPS. Pro zlepšení účinnosti chlazení jsou spoje zvětšovány (resp. je při návrhu zvětšena jejich plocha) na co největší možnou velikost. Nevýhodou je, že je potřeba vytvořit tyto plochy na obou stranách pouzdra LED stejně i když jedna elektroda nemusí mít na chlazení výrazný vliv. Pokud nejsou pájecí plochy stejné, může při pájecím procesu dojít k chybě, kdy se součástka posune vlivem větší síly roztavené pájky na větší ploše.

Posouvání součástek během pájení lze omezit, pokud se použije součástka, která má samostatný vývod na chlazení (ať už izolovanou od vývodu nebo ne) anebo jsou její vývody uzpůsobeny, aby se chybám při pájení předcházelo. Jednou z možností je, že se vývod, sloužící jako chladič, vytvoří kolem $\frac{3}{4}$ pouzdra do tvaru písmene U a druhý vývod je pouze na zbylé $\frac{1}{4}$ pouzdra.

Jako vylepšení nejsou takovéto vývody tvořeny rovnými plochami, ale mají výstupky, které jednak zamezí posunutí při pájení a také zvětší plochu připojení, čímž sníží tepelný odpor mezi LED a DPS. Pokud je jako chladicí ploška samostatný vývod, nemusí se řešit riziko posunutí během pájení LED. Tato ploška bývá zpravidla uprostřed pouzdra, takže síly roztavené pájky pouze pomáhají pouzdro udržet na DPS.



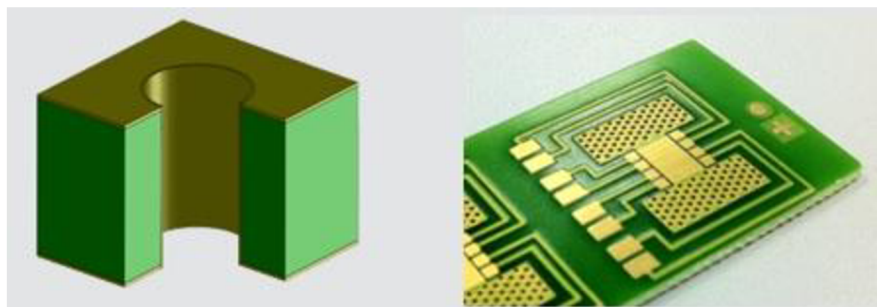
Obr. 11: Rozdíl mezi LED bez a s chladicí ploškou

U chladičů tohoto typu určuje jejich chladicí výkon jejich plocha a tvar. Pokud je vedení od součástky úzké od zdroje tepla a rozšiřuje se až ve větší vzdálenosti, tak je tepelný odpor mnohem větší, než když se vedení hned u součástky rozšíří do maximálních možných rozměrů. Chybou také může být zbytečně velká vzdálenost chladicí plochy na DPS od chladicí plošky LED. Názorně je to vidět na Obr. 11, kde by u LED s chladicí ploškou mohla být horní chladicí plocha posunuta blíže k LED, aby přijímala teplo co největší plochou. Jako další ovlivňuje chladicí výkon tloušťka materiálu (vodivá vrstva Cu na DPS), kde větší tloušťka výrazně zvýší chladicí vlastnosti, ale samozřejmě zvýší náklady na výrobu [7].

2.4.2 Vertikální vedení tepla

Pokud není možné teplo odvést pouze povrchem DPS, je nutné vedení tepla rozšířit i skrz DPS. Nejjednodušším řešením je snížení tloušťky DPS, která pak nebude představovat menší tepelný odpor a tepelný výkon se bude snáze dostávat i na druhou stranu. Toto řešení však lze vylepšit přidáním otvorů skrz DPS. Otvory jsou vyvrtány skrz chladicí plochy vytvořené na DPS. Do vytvořených děr jsou vloženy trubičky z měkkého, dobře tepelně vodivého kovu a na obou koncích jsou rozlisovány aby důkladně převáděly teplo z jedné strany DPS na druhou (Obr. 12).

S výhodou je možné použít oboustrannou DPS. Pokud není druhá strana nijak využita na propojování obvodu, je možné celou její plochu využít jako chladič. Teplo je na tuto plochu převáděno právě pomocí průchodů vyvrtaných do DPS [7].

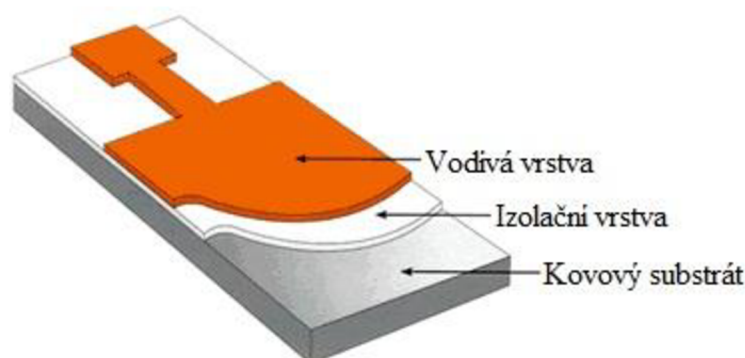


Obr. 12: Detailní pohled na tepelný průchod a DPS s průchody [7]

Další variantou je využití kovu, jako hlavního materiálu na výrobu DPS. Kovy mají daleko menší tepelný odpor než jiné izolační materiály (sklolaminát, epoxidové pryskyřice aj.), používané na výrobu DPS (Obr. 13).

Složení DPS s kovovým substrátem je následující:

- **Kovový substrát** – Cu nebo Al, dobře vede teplo, vyráběný v šířce dle potřeby
- **Izolační vrstva** – nejčastěji 100 μm široká vrstva izolačního materiálu (fólie, vrstva plastu)
- **Vodivá vrstva** – nejčastěji 35 μm široká vrstva mědi sloužící k vodivému propojení součástek na DPS
- **Krycí vrstva** – vrstva pro ochranu spojů před vlivy okolí (vlhkost, mechanická poškození), například permanentní nepájivá maska jako na klasické DPS



Obr. 13: Kovová DPS pro kvalitní odvod tepla [9]

Kovový substrát slouží k horizontálnímu i vertikálnímu vedení tepla od zdroje. Nízká šířka izolační vrstvy v tomto případě tvoří minimální odpor pro tepelnou energii, ale je dostatečná pro elektrické izolování i větších napětí (až 1000 V). Vodivá vrstva má u této DPS také částečný vliv na chlazení, proto je třeba vhodně navrhnout jak vodivé cesty, tak chladičí plošky [10].

2.5 Odvod tepla od DPS

Celý světelný systém (LED, chladič, napájecí obvod) bývá ve většině případů uzavřen v nějakém obalu. Díky tomuto obalu je celý systém chráněn před vnějšími vlivy, ale v případě velkého výkonu je nutné nějak dostat teplo z vnitřku ven. U plastových obalů se jako možnost chlazení nabízí proudění vzduchu skrz obal – konvekční chlazení. Možností je nenucené proudění, kdy jsou v obalu vytvořeny otvory pro přívod a odvod vzduchu. Anebo je zařízení vybaveno ventilátorem, který dovnitř vhání studený vzduch a ohřátý vzduch pak putuje správně vytvořenými otvory ze zařízení ven.

2.5.1 Pomocí chladiče umístěného na DPS

Jako další možností je umístit chladič na kovovou DPS a tím zvětšit vertikální odvod tepla. Potřebný chladič se umístí na kovovou část DPS a ukotví se buď mechanicky (šrouby, nýty) anebo tepelně vodivým lepidlem. Důležité však je, aby se chladič stýkal s DPS co největší plochou. Pro zlepšení styku (pokud není chladič nebo DPS ideálně hladká) je možné využít pasty na chladiče. Tato pasta velmi dobře vede teplo a při správném nanesení nahradí vzduchová místa v meziprostoru a tím sníží tepelný odpor přechodu DPS-chladič.

Chladicí výkon lze samozřejmě zesilovat i dále. Nejčastějším způsobem je aktivní chlazení konkrétního chladiče pomocí ventilátoru. Od chlazení celého obalu ventilátorem se tento liší tím, že veškerý průtok vzduchu prochází přímo přes požadovaný chladič. Tento chladič pak může být menší, než chladič na stejný výkon bez ventilátoru [11].

2.5.2 Pomocí Peltierova článku

Pokud by bylo potřeba chladit ještě více anebo pokud by pracovní teplota měla být menší, než je teplota okolí, lze využít ke chlazení Peltierova článku. Peltierův článek je destička, která se při průchodu elektrického proudu na jedné straně ohřívá a na druhé straně chladne. Pokud se tedy topící stranu podaří chladit na přibližnou teplotu okolí, tak chladicí strana bude mít teplotu nižší. Peltierův článek však pro svůj chod spotřebovává velké množství elektrické energie, takže výsledný světelný zdroj s tímto chlazením výrazně ztrácí na celkové účinnosti. Toto chlazení nachází uplatnění hlavně u laserových diod, které musejí mít výrazně nižší teplotu PN přechodu než LED [12].

2.5.3 Pomocí kovového obalu

Tyto obaly nejsou tak lehké tvárné, jak plasty, ale jsou daleko pevnější a umožňují přímý odvod tepla (například v LED reflektorech a LED žárovkách). Konstrukce těchto obalů jsou odlišné. Záleží vždy na požadované aplikaci. Je však možné vytvořit obal jako hliníkový odlitek, na kterém jsou vytvořena žebra pro zvětšení plochy odvodu tepla do okolí. Názorná ukázka použití kovových obalů ke chlazení je na Obr. 14.

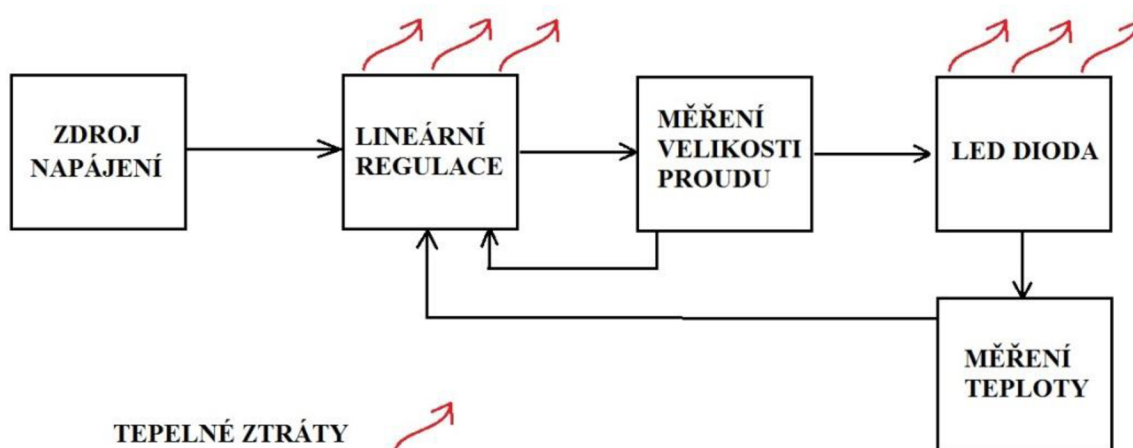


Obr. 14: Chlazení LED pomocí kovového obalu zařízení [13]

2.6 Aktivní regulace tepelných ztrát

Velikost intenzity vyzařovaného světla LED je možné regulovat. Je to možné díky změně velikosti proudu procházejícím LED. S klesajícím jasnem klesá i ztrátový výkon na LED a samozřejmě se zmenšuje i velikost tepla, které musí odvést chladič. Tímto způsobem je možné aktivně uchránit LED před tepelným zničením.

Důležité je správně změřit vyhodnocovací teplotu. Ta by měla být měřena co nejbližší u LED. Naměřená teplota je následně zpracována v řídicím obvodu (mikroprocesor, speciální obvody pro řízení LED anebo lineární regulátor). Řídicí obvod vhodně upraví výstupní signál, aby se snížil proud LED. Nejjednodušším řešením je právě lineární regulátor, kde je možné jednoduchým komparátorem porovnávat teplotu na LED s nastavenou referenční hodnotou a podle výsledku porovnání omezovat výstupní proud (Obr. 15).

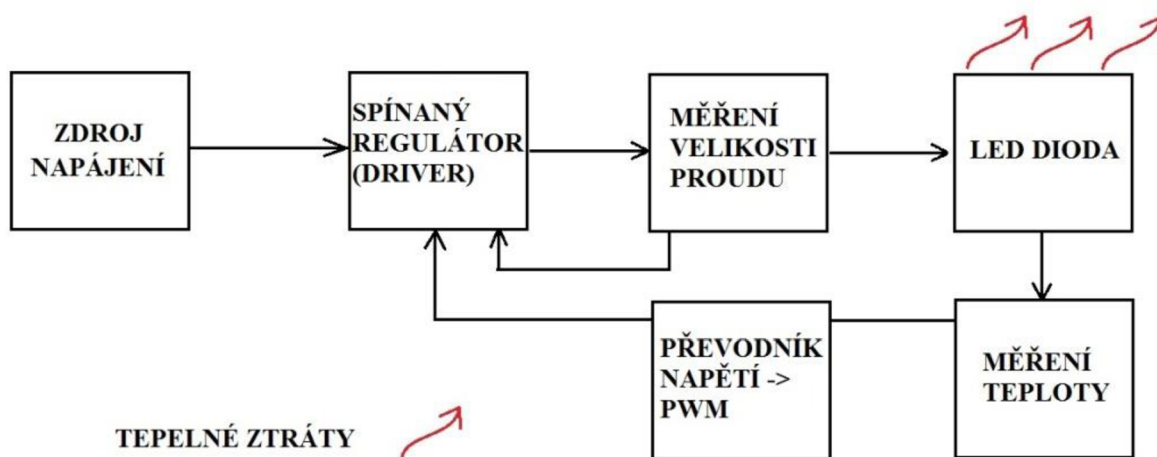


Obr. 15: Blokový náčrt lineární regulace proudu řízené teplotou

Druhou poměrně jednoduchou možností je použití speciálních integrovaných obvodů pro řízení LED (LED driver). Tyto obvody bývají vybaveny vstupy pro měření teploty, které dokáží omezovat výkon napájecího měniče, postaveného na základě těchto obvodů. Častěji používané řídicí obvody však nemají vstup pro měření teploty, ale mívají vstup pro řízení jasu pomocí pulzní šířkové modulace (PWM – pulse wide modulation). Na tento vstup nelze

přímo připojit teplotní senzor, proto je potřeba použít nějakého vhodného převodníku. Blokové schéma tohoto zapojení je na Obr. 16. Jako dobře dostupný převodník může být mikroprocesor s vhodným programem.

S výhodou lze pak skombinovat řízení jasu i hlídání teploty. Mikroprocesor vyhodnotí vstupní hodnoty a z výstupu vyšle PWM signál do driveru LED. Pokud je driver natolik jednoduchý, že není vybaven ani vstupem pro řízení, lze aktivní ochranu realizovat velkým omezením vstupního napětí nebo úplným odpojením LED a jejím automatickým připojením po poklesu teploty.



Obr. 16: Blokový náčrt spinané regulace proudu řízené teplotou

2.6.1 Měření teploty

Základní součástky pro měření teploty jsou termistory. Jejich vlastností je odpor, který se mění v závislosti na jejich teplotě. Typ termistoru PTC znamená, že s teplotou odpor termistoru roste. U typu NTC odpor s narůstající teplotou klesá. Oba typy termistorů se vyrábí v různých hodnotách odporů. Nemají však moc lineární charakteristiky, proto se většinou obvod pro měření teploty musí cejchovat [14].

Dále je možné měřit teplotu pomocí polovodiče, nebo dvojkovu. Měření pomocí dvojkovu (termočlátku) má poměrně malou citlivost, takže měření s ním není moc přesné. Měření teploty pomocí polovodiče (diody) je nejlépe využitelné, neboť diody jsou velmi levné a přesné. Úbytek napětí na diodě se mění téměř lineárně s teplotou při konstantním proudu.

Pro měření teploty pak slouží speciální integrované obvody, které obsahují jak měřicí diodu, tak zdroj proudu. Výstupem takového obvodu už pak nemusí být jenom napětí měnící se s teplotou, ale třeba číslicový signál přenášený po vhodné komunikační sběrnici.

Nevýhodou číslicového signálu je možnost propojení pouze s mikroprocesorem (speciální řídicí obvody LED obvykle nemají žádný takový komunikační vstup). Výhodou však je nulové zkreslení hodnoty teploty při přenosu od měřicího obvodu k mikroprocesoru, díky využití číslicového signálu namísto analogového [15].

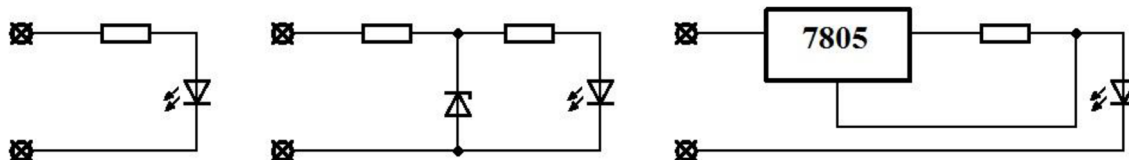
3 NAPÁJENÍ A ŘÍZENÍ LED DIODY

Základní napájecí veličinou LED je elektrický proud. Ten musí být stejnosměrný a správně polarizovaný. V případě pulzujícího proudu (např. výstup ze spínaného zdroje) nesmí špičky výrazně přesahovat maximální hodnotu propustného proudu LED a výsledná efektivní hodnota proudu také nesmí být větší. Napájení může být realizováno jak lineárním tak spínaným zdrojem.

3.1 Lineární zdroje proudu

Lineární zdroje proudu jsou jednoduché na konstrukci a dosahují velmi nízké hodnoty zvlnění výstupního napětí. Problémem je, že ve většině případů dosahují velice malé účinnosti, což je znát hlavně při práci s vyššími výkony. V případě levných a jednoduchých aplikací však nacházejí uplatnění. Jako příklad je možné uvést stabilizaci realizovanou pouze pomocí rezistoru. Napájecí napětí pak musí být větší, než napětí na LED. Účinnost takového stabilizátoru je dána velikostí úbytku napětí na rezistoru a případných lineárních prvcích (Obr. 17).

Samotný rezistor není úplně ideálním řešením, protože ten dokáže pouze omezit hodnotu proudu a v případě poklesu napájecího napětí už nedokáže zvednout výstupní proud na požadovanou úroveň. Je proto možné vytvořit stabilizátor proudu, který bude sledovat hodnotu výstupního proudu a podle referenční hodnoty jí bude upravovat. S výhodou je možné použít některý ze sériově vyráběných stabilizátorů (ať už napětí nebo proudu) [16].



Obr. 17: Příklady nejjednodušších stabilizátorů proudu

3.1.1 Řízení lineárního zdroje proudu

Lineární regulátor udržuje výstupní hodnotu na základě referenční hodnoty. Pokud se referenční hodnota zmenší a zbytek hodnot v obvodu se nijak nezmění, dojde ke zmenšení výstupní hodnoty. Lineární zdroj proudu se tedy navrhne na maximální pracovní proud a pro řízení se přidá prvek, který dokáže zmenšit referenční hodnotu zdroje. Toto však u jednodušších regulátorů proudu není možné zrealizovat. Je ovšem možné do obvodu přidat prvky, které už regulovat jdou (např. tranzistor) a pomocí vhodné elektroniky tyto prvky řídit.

3.2 Spínané zdroje proudu

Spínané zdroje mají jako hlavní přednosti velmi vysokou účinnost, menší rozměry a nižší hmotnost. Vysoké účinnosti je dosaženo použitím spínacího režimu aktivního prvku zdroje (tranzistoru). Ten je úplně rozeprt ($I = 0A$) nebo úplně sepnut ($U = 0V$), proto na něm vznikají ztráty pouze při přepínání z jednoho stavu do druhého.

V lineárním regulátoru je aktivní prvek v poloze mezi úplným otevřením a úplným uzavřením, proto je na něm mnohem větší výkonová ztráta ($P_Z = U \cdot I$; $U \neq 0V, I \neq 0A$). Na výrobu jsou spínané zdroje zpravidla mnohem složitější díky většímu množství součástek. Avšak pro svoji vysokou účinnost dnes nacházejí uplatnění téměř ve všech aplikacích. Další výhodou spínaných zdrojů je možnost napětí (proud) nejenom snižovat, ale i zvyšovat a invertovat (otočit polaritu). Záleží pouze na vhodném zapojení prvků ve spínaném zdroji [17].

3.2.1 Základní typy spínaných zdrojů

Základní měniče používané v obvodech pro napájení LED jsou následující:

Blokující měnič s transformátorem

Měnič k přenosu energie využívá magnetizaci jádra transformátoru. V prvním kroku je otevřen řídicí tranzistor a stejnosměrným proudem ze zdroje se magnetuje jádro transformátoru. Na sekundární straně transformátoru neprochází proud, protože je blokován diodou. Když proud primárním vinutím dosáhne potřebné úrovně, tranzistor rozeprne a magnetická energie uložená v transformátoru se vybijí přes sekundární vinutí do zátěže. Protože je výstup zásobován proudem vytvořeným demagnetizací transformátoru, není nutná žádná tlumivka na výstupu zdroje.

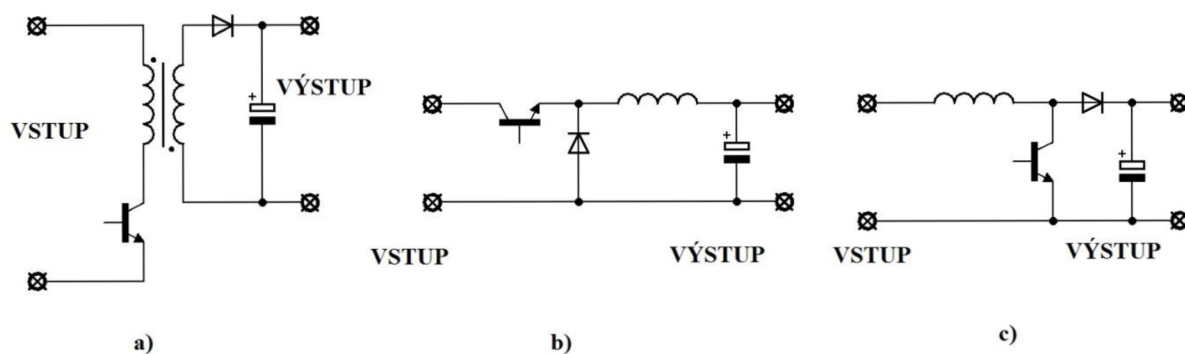
Celkový výkon měniče je limitován velikostí transformátoru, proto je tento typ měniče vhodný do výkonu cca 100 W. Tento výkon je však ve všech dosavadních aplikacích dostačující. Tento měnič je schopný snižovat i zvyšovat napětí, dle poměru počtu závitů vinutí transformátoru (Obr. 18a).

Snižující měnič bez transformátoru

Tento typ měniče je vhodný do aplikací, kde není nutné galvanicky oddělit vstup od výstupu. Tento měnič pracuje jako PWM regulátor s filtrací, takže jeho výstupem není obdélníkový průběh napětí, ale stejnosměrný, mírně pulzující průběh napětí. Pokud je tranzistor otevřen, je zátěž napájena ze zdroje a proud je omezen tlumivkou, ve které se hromadí energie. V momentě, kdy tranzistor vypne, je zátěž napájena z nahromaděné energie v tlumivce. Proud protéká přes tlumivku, zátěž a diodu, která je tu právě z tohoto důvodu (Obr. 18b).

Zvyšující měnič bez transformátoru

Někdy je napájecí napětí nižší, než jaké by bylo vhodné pro rozsvícení několika LED v sérii. Většinou to bývají bateriemi napájené aplikace, kde by větší množství článků zbytečně zvyšovalo hmotnost celého zařízení. Zvyšující měnič má v první fázi sepnutý tranzistor a v cívce se shromažďuje magnetická energie. Ve druhé fázi se tranzistor rozezne a napětí, naindukované na cívce, se přičte k napětí zdroje. Výsledné vyšší napětí pak přes diodu nabíjí výstupní kondenzátor, ze kterého je napájena zátěž (Obr. 18c) [17].



Obr. 18: Typy spínaných měničů využívaných pro napájení LED

4 NÁVRH SVĚTELNÉHO ZDROJE

4.1 Počáteční návrh

Jako zadání byla požadována realizace světelného zdroje s luminiscenční diodou. Pro praktické využití tohoto světelného zdroje a možností porovnat jej s dostupnými světelnými zdroji byly vytvořeny parametry v Tab. 2:

Tab. 2: Požadované parametry světelného zdroje

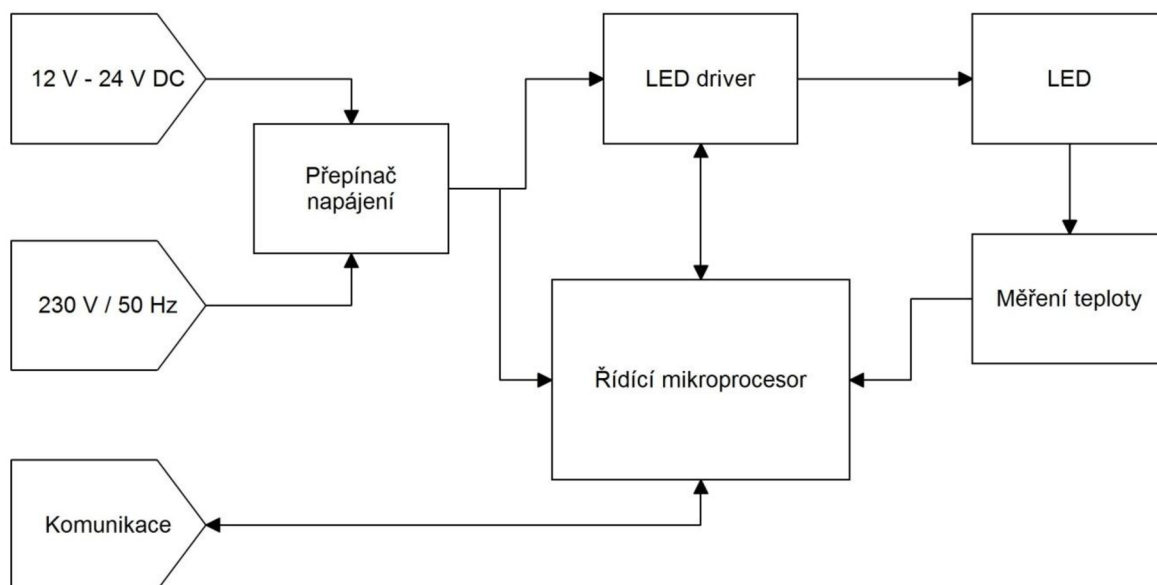
Napájecí napětí	12 – 24 V SS (palubní síť osobních a užitkových automobilů) a 230 V 50 Hz (rozvodná síť v ČR)
Maximální spotřeba	≈ 100 W
Rozptyl světla	> 120°
Krytí zařízení	pro venkovní použití (minimálně IP44)
Velikost zařízení	shodná se zařízením s obdobným světelným výkonem nebo menší
Další výbava	Soft-Start, možnost regulace intenzity osvětlení, tepelná ochrana

Zařízení by mělo být na ovládání co nejjednodušší a nejušetrnější. Napájení jak z palubní sítě, tak z rozvodné sítě bylo právě zvoleno pro možnost využití v domácích podmínkách i v terénu. Maximální spotřeba je přibližný údaj volený tak, aby v případě napájení z 12 V palubní sítě nebyl příliš velký nárok na průřez napájecích vodičů.

Rozptyl světla je takto velký z důvodu, že předpokládané využití zařízení je osvětlení co největší plochy (využití jako pracovní světlo). Krytí zařízení je voleno tak, aby zařízení mohlo být použito i ve venkovních prostorech. Velikost zařízení je volena pro možnost porovnat zařízení s jinými dostupnými. V tomto případě byl volen obal od halogenového svítidla o výkonu 500 W.

Jako doplňková výbava neboli výbava, jakou běžné světelné zdroje nemají, je použito následujících třech prvků:

- **Soft-Start** (pomalé naběhnutí zařízení) je požadován pro omezení zapínací proudové špičky a pro snížení rizika silného oslnění náhodného pozorovatele.
- **Nastavené intenzity světla.** Po zapnutí je nastavena na maximum. Její regulace může být možná po připojení ovládacího kabelu. Tento typ ovládání byl zvolen, aby se snížil počet ovládacích prvků na zařízení, neboť se předpokládá, že většina uživatelů bude požadovat plný výkon zařízení.
- Poslední doplňkový prvek je **tepelná ochrana.** Tento prvek byl zvolen z bezpečnostního a spolehlivostního důvodu. V případě nechtěného zakrytí zařízení by nárůstem teploty došlo k poškození LED a možnému vzniku požáru.



Obr. 19: Blokové schéma světelného zdroje

4.2 Výběr vhodných komponentů

Začátkem každého návrhu je předběžný soupis potřebných komponent. Blokový návrh jednotlivých komponentů je na Obr. 19. V případě světelného zdroje jsou to dvě části (část s generátory světla a napájecí část). Jako generátorů světla bude použito luminiscenčních diod. Napájecí část bude nejvhodnější rozdělit na dvě části z důvodu požadované variability napájecích napětí.

Jedním zdrojem tedy bude vhodný měnič, zajišťující konstantní proud pro LED z malého napájecího napětí (12 V a 24 V DC). Pro zajištění, že všemi LED poteče stejný proud, budou zapojeny v sérii. Měnič tedy bude typu Boost (tj. měnič zvyšující napětí). Měnič dále musí podporovat všechny další požadavky ze zadání (Soft-Start, atd.)

Druhý zdroj bude sloužit pro napájení zařízení z rozvodné sítě (230 V / 50 Hz) a bude napájet první měnič. Tento zdroj musí splňovat požadavky bezpečnosti (vhodné krytí a galvanické oddělení zařízení od sítě. Musí zvládnout dodat dostatečný výkon pro napájení měniče a také musí mít co největší účinnost, aby zbytečně neohříval zařízení a nesnižoval celkovou účinnost.

4.2.1 Výběr luminiscenčních diod

Luminiscenční dioda je hlavní prvek ve světelném zdroji. Pro světelné zdroje se používají dvě varianty konstrukce.

První je, že je použita jedna (nebo více) vysoce výkonových LED (10, 20 a více W/LED). Tato varianta je jednoduchá na konstrukci a na rozměr (minimum osazovaných

součástek). Její nevýhoda však spočívá v nutnosti použít co nejkvalitnější chladič, umožňující odvést z jednoho místa co nejvíce tepla.

Varianta druhá znamená použití více LED s menším výkonem (např. 3 W/LED). Hlavními nevýhodami jsou větší velikost konstrukce a nutnost osadovat více součástek, takže narůstá pravděpodobnost vzniku nějaké poruchy. Hlavní výhodou je pak rovnoměrné rozložení tepla na chladiči. Ten je totiž ohříván z více míst a menším výkonem, takže nemusí mít tak malý tepelný odpor. Tato varianta se používá v případě chlazení LED pomocí kovových desek plošných spojů (veřejné osvětlení apod.).

Vlastní luminiscenční diodu je pak možné vybrat podle stylu chlazení. V případě této konstrukce bylo zvoleno použití více LED o menším výkonu. Nejčastěji vyráběné LED v této kategorii (kolem 3 W/LED) jsou chlazené pouze vývody a pouzdem, nebo jejich pouzdra využívají přidaný vývod na chlazení (thermal pad). Pouzdro se speciální chladičí ploškou se jeví jako nejvhodnější pouzdro, neboť je schopno nejučinněji odvádět teplo od součástky. Pro toto zařízení byla vybrána LED od firmy OSRAM chlazená právě pomocí speciálního pinu. Její parametry jsou uvedeny v Tab. 3.

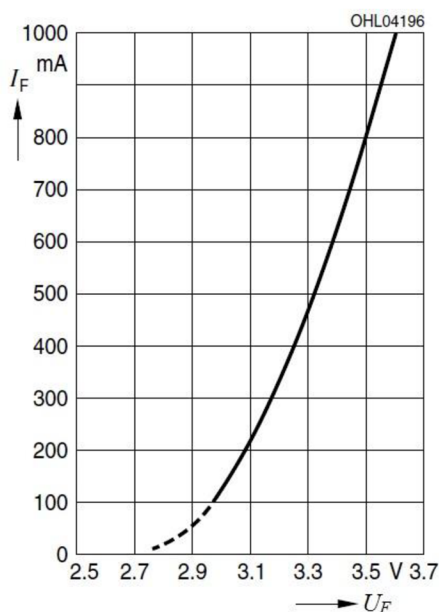
Tab. 3: Parametry zvolené LED [18]

Název	LCW W5AM-JZKY-4R9T-Z
Maximální proud v propustném směru	1 A
Teplota světla	3000 K
Vyzařovací úhel	170 °
Optická účinnost	102 lm/W ($I_F = 100 \text{ mA}$, 3500K)
Odolnost vůči elektrostatickému náboji	až 8 kV
Světelný tok	61 – 97 lm ($I_F = 350 \text{ mA}$)
Pracovní teplota	- 40 °C až + 125 °C
Minimální proud v propustném směru	100 mA
Teplota přechodu	135 °C
Napětí v propustném směru	3,2 V \pm 0,5 V
Tepelný odpor (přechod – chladičí pad)	6,5 K/W (max. 11 K/W)

Hodnoty napětí a proudů v závěrném směru nejsou uváděny, neboť to jsou nepotřebné parametry v případě LED. Napájecí proud by neměl klesnout pod hodnotu udávanou jako *Minimální proud v propustném směru*, protože při menším proudu již LED generuje více tepla než světla. Teplota světla byla volena takto nízká, neboť se blíží teplotě světla klasických světelných zdrojů (žárovka, halogenové světlo, plamen svíčky, atd.) a je tedy člověku přirozenější.

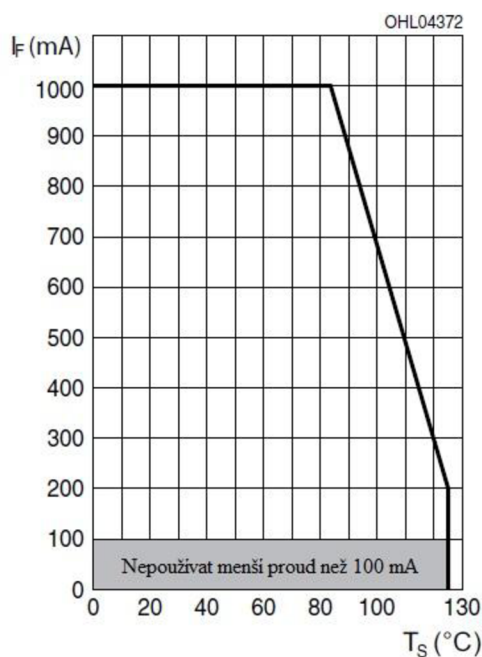
Charakteristiky zvolené LED

Pro návrh zařízení je nutné znát základní charakteristiky dané součástky. V tomto případě je potřeba znát jaké napětí je na LED při daném proudu. K tomu slouží Volt-Ampérová charakteristika na Obr. 20.



Obr. 20: Volt-Ampérová charakteristika zvolené LED [18]

Další důležitá charakteristika je zatěžovací (Obr. 21). Ta znázorňuje hranici, za kterou by se neměla LED používat, jinak hrozí její zničení. V tomto případě by měla být LED používána na proud $I_F < 1000$ mA do maximální teploty pouzdra $T_S = 85$ °C. Při vyšší teplotě musí být proud I_F výrazně omezen.



Obr. 21: Maximální dovolený proud LED v závislosti na teplotě [18]

Celkový počet LED ve světelném zdroji byl zvolen na $n = 24$. Při proudu 1 A vyzařuje každá LED světelný tok cca $\Phi = 200 \text{ lm}$ [18]. Celkový světelný tok vyzařující ze světelného zdroje je vypočítán v rovnici (2).

$$\Phi_{CLK} = \Phi \cdot n = 200 \cdot 24 = 4800 \text{ lm} \quad (2)$$

Pro srovnání 100 W halogenová žárovka má světelný tok přibližně 1400 lm, takže realizovaný světelný zdroj bude mít světelný výkon odpovídající přibližně 350 W halogenovému svítidlu. Příkon LED je možné spočítat pomocí Volt-Ampérové charakteristiky (pro zjištění potřebného výkonu na každou LED) a počtu LED n (3).

$$U_{AK} = 3,6 \text{ V při } I_F = 1 \text{ A}; n = 24$$
$$P_{CLK} = U_{AK} \cdot I_F \cdot n = 3,6 \cdot 1 \cdot 24 = 86,4 \text{ W} \quad (3)$$

Z výpočtu celkového příkonu LED ($P_{CLK} = 86,4 \text{ W}$) je poznat, že LED světelný zdroj má čtyřikrát menší spotřebu než světelný zdroj o stejném světelném toku, ale realizovaný halogenovou žárovkou.

4.2.2 Výběr vhodného driveru LED

Jelikož se jedná o světelný zdroj o velkém výkonu a vysoké variabilitě napájení, bude vhodné jako napájení použít nějaký typ spínaného regulátoru.

V dnešní době je velký výběr vyráběných součástek a integrovaných obvodů, proto je vhodnější na konstrukci použít již vyráběný integrovaný obvod. K vybranému obvodu zpravidla stačí připojit několik externích součástek a zařízení je plně funkční. Výhodou jsou odzkoušená zapojení udávaná přímo výrobcem, popřípadě zapojení odzkoušená někým jiným.

Výrobců těchto obvodů je mnoho, viz pár uvedených: Maxim Integrated Products, Linear Technology, National Semiconductor, Texas Instruments, Analog Devices atd. Někteří nabízejí na svých webových stránkách i vyhledávací filtry, kde stačí zadat požadované parametry výsledného měniče, popřípadě rozptýl parametrů, a z kompletního seznamu produktů zbudou pouze obvody s maximální shodou parametrů.

Požadavky na obvod jsou následující: minimální hodnoty napájecího napětí (minimální napětí 12 V palubní sítě, tj. 10,8 V) a maximální hodnoty napájecího napětí (28 V v 24 V palubní síti). LED budou zapojeny v sérii, takže výstupní napětí z měniče bude vyšší, než napájecí napětí. Pro 24 LED v sérii by bylo potřeba výstupní napětí spočítané v rovnici (4).

$$U_{OUT} = U_{AK} \cdot n = 3,6 \cdot 24 = 86,4 \text{ V} \quad (4)$$

Měničů schopných z 10 V vytvářet 86,4 V není mnoho a ani nedosahují v zapojení Boost velké účinnosti. Další možností je rozdělit sériové zapojení LED na dvě větve po 12. V tom případě je již požadované výstupní napětí poloviční (5).

$$U_{OUT} = U_{AK} \cdot n = 3,6 \cdot 12 = 43,2 \text{ V} \quad (5)$$

Těchto měničů je více, takže je snadnější najít vhodnější typ. S požadavkem na vstupní a výstupní napětí byl zvolen obvod LT3755 od firmy Linear Technology. Jeho základní parametry jsou v Tab. 4. Dále splňoval hodnoty požadovaného výstupního proudu (1 A) a maximální dosažitelné hodnoty výstupního napětí pro 12 LED zapojených v sérii (43,2 V). Obvod byl zajímavý také údajnou účinností dosahující hodnoty až 95% a možností nastavit pracovní frekvenci.

Tab. 4: Parametry obvodu LT3755 [19]

Napájecí napětí	4,5 V – 40 V
Regulace výstupního proudu	Analogovým vstupem (0 V – 1,2 V) a velikostí měřicího rezistoru R_{SENSE}
Použitelné topologie měniče	Buck, Boost, Sepic
Pracovní frekvence	Nastavitelná (100 kHz – 1 MHz)
Další vlastnosti	Indikace přerušení řetězce LED, PWM stmívání, vypnutí v případě podpětí napájení, Soft-Start

Měniče tedy budou použity dva. Každý bude napájet 12 LED v sérii. Předpokládaná účinnost každého měniče je $\eta_{DRIVER} = 80\%$. Příkon měničů při odběru každé větve LED ($P_{CLK} = 43,2\text{ W}$) je spočítán v rovnici (6).

$$P_{DRIVER} = 2 \cdot \frac{P_{CLK}}{\eta_{DRIVER}} = 2 \cdot \frac{43,2}{0,8} = 108\text{ W} \quad (6)$$

Příkon obou měničů při maximálním výstupním výkonu bude cca 108 W.

4.2.3 Výběr síťového napájecího zdroje

Síťový napájecí zdroj zajišťuje napájení světelného zdroje z rozvodné sítě (230 V / 50 Hz). Požadované parametry zdroje jsou v Tab. 5.

Tab. 5: Požadované parametry síťového napájecího zdroje

Výstupní napětí	12V - 28 V DC
Ideální výstupní výkon	108 W
Krytí	minimálně IP44
Galvanické oddělení vstup/výstup	Ano

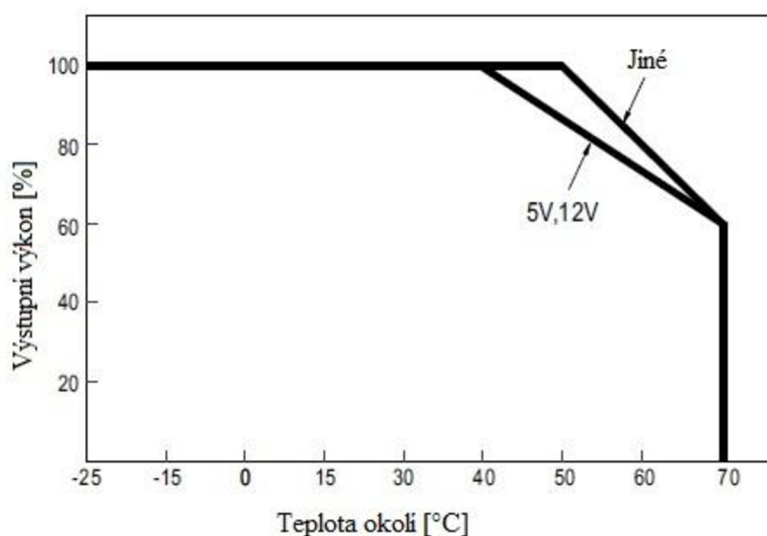
Výstupní napětí zdroje nemusí být nastavitelné, ale musí být v požadovaném rozsahu. Účinnost Boost měničů je tím větší, čím menší je rozdíl mezi výstupním a vstupním napětím na měniči. Maximální výstupní výkon bude požadován pouze v případě, že budou LED napájeny proudem 1 A. Tento proud je však jejich maximální dovolený. V praxi se bude používat proud menší, takže potřebný výkon pro napájení měničů bude stačit nižší.

Krytí zařízení musí splňovat požadavky pro provoz ve venkovním prostředí (tj. minimálně IP44) v případě, že se napájecí zdroj nevejde do obalu světelného zdroje a bude tedy muset být upevněn na jeho vnější straně. Galvanické oddělení od sítě je nutné pro zajištění bezpečného provozu zařízení bez rizika úrazu elektrickým proudem.

Dostupným a spolehlivým výrobcem napájecích zdrojů je firma MEAN WELL. Pro tento světelný zdroj je nejvhodnější napájecí zdroj LPV-100-24. Jeho parametry jsou v Tab. 6.

Tab. 6: Parametry zdroje MEAN WELL LPV-100-24 [20]

Výstupní napětí	24 V
Maximální výstupní výkon	100,8 W
Maximální výstupní proud	4,2 A
Vstupní napětí	90 V – 264 V / 47 Hz – 63 Hz 127 V – 370 V DC
Účinnost	86 %
Maximální proudový ráz při studeném startu	60 A (při 230 VAC)
Pracovní teplota okolí	-25 °C – +70 °C
Pracovní vlhkost okolí	20 % - 90 %
Krytí	IP67
Střední doba do poruchy	min. 703 000 h
Rozměry (d x š x v)	190 x 52 x 37 mm
Hmotnost	0,63 kg
Ochrany	Přetížení, zkrat, přepětí, přehřátí



Obr. 22: Maximální zátěž zdroje LPV-100-24 v závislosti na okolní teplotě [20]

Ze zatěžovací charakteristiky (Obr. 22) je patrné, že teplota v okolí zdroje nesmí přesáhnout 50 °C, jinak tepelná ochrana zdroje omezí jeho výkon. Jelikož rozměry zdroje neumožňují jeho instalaci uvnitř světelného zdroje, nemělo by k výraznému omezení výkonu během používání dojít. Uváděná teplota okolí je pro střední Evropu 40 °C, takže k omezení výkonu by mělo dojít pouze v extrémních situacích.

4.2.4 Výběr řídicího mikroprocesoru

Celé zařízení je potřeba vhodně řídit. Požadavek zadání je plynulý náběh do plného výkonu (Soft-Start), možnost regulace výkonu a také kontrola teploty zařízení. Řízení takového systému je výhodné realizovat pomocí mikroprocesoru. Jednoduché programování a dobrou manipulaci při odladování zapojení obvodů nabízí programovací modul Arduino. Jeho základem (ve verzi UNO) je mikroprocesor ATMEGA328P. Parametry jsou uvedeny v Tab. 7.

Tab. 7: Parametry mikroprocesoru ATMEGA328P v platformě Arduino [21]

Napájecí napětí	5 V
Velikost programové paměti FLASH	32 KB
Velikost paměti EEPROM	1 KB
Počet digitálních vstupů/výstupů	14 (z toho 6 výstupů umožňujících PWM)
Počet analogových vstupů	6 (použitelné i jako digitální výstupy)
Komunikační porty	UART, I ² C, ISP

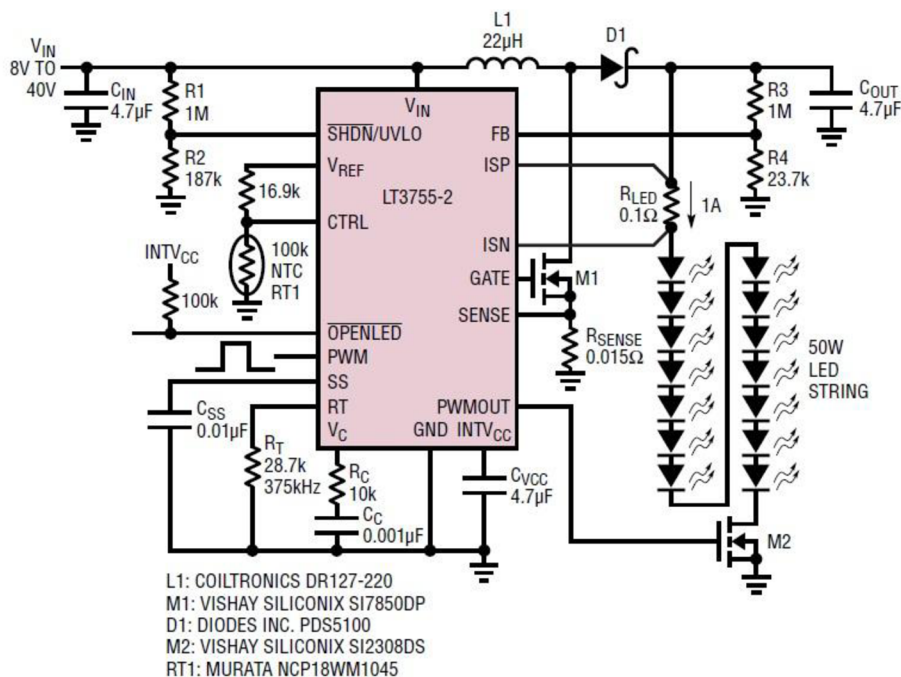
Analogové vstupy je možné využít na měření teploty. Jejich základem je 10 bitový AD převodník, umožňující změřit vstupní hodnotu napětí (0 V – 5 V) s rozlišením přibližně 5 mV. Jako senzor teploty se tedy nabízí integrovaný obvod LM335Z v pouzdře TO-92. Je to převodník teplota/napětí schopný změřit teplotu od -40 °C do +100 °C.

Další využití analogových vstupů může být regulace jasu, kterou je možno realizovat potenciometrem zapojeným mezi 5 V a 0 V a velikostí napětí nastavovat hodnotu proudu LED. Tyto vstupy je možné také použít jako zpětnou kontrolu nastaveného řídicího napětí.

Výstupy PWM je možné využít pro řízení driverů. Jednak přímo PWM modulací nebo pomocí RC článku převádět PWM na napětí a tímto napětím řídit hodnotu proudu LED.

4.3 Optimalizace driveru LED

Zapojení driveru bude realizováno přímo dle doporučení výrobce v katalogovém listu. Hodnoty součástek je však potřeba upravit pro hodnoty použité v tomto zapojení (Obr. 23). Dále následuje popis jednotlivých vstupů a výstupů driveru (Tab. 8).



Obr. 23: Doporučené schéma zapojení LT3755 pro 50 W řetězec LED [19]

Tab. 8: Popis vstupů a výstupů obvodu LT3755 [19]

Vstup	Popis funkce
V_{IN}	Napájení
/SHDN/UVLO	Vstup s nastavitelnou hysterezí napájecího napětí, sloužící k indikaci podpětí v napájení
V_{REF}	Zdroj referenčního napětí 2 V (odběr maximálně 100 μ A)
CTRL	Vstup, kterým je možné regulovat výstupní proud z měniče. (0,1 V – 1,1 V odpovídá přibližně nastavení 0 % - 100 % výstupního proudu)
/OPENLED	Výstup (otevřený kolektor tranzistoru) jež je sepnutý proti zemi při překročení napětí 1,2 V na vstupu FB (maximální proud je 1 mA)
PWM	Vstup PWM řízení, v nule vypíná oscilátor a výstup PWMOUT
SS	Nastavení Soft-Startu, výstup je zdroj proudu (10 μ A) a při dosažení napětí 2,5 V je dosaženo plného výstupního výkonu měniče
RT	Vstup pro nastavení pracovní frekvence měniče (100 k Ω = 100 kHz, 10 k Ω = 1 MHz)
V_C	Výstup pro nastavení stabilizace zpětnovazební smyčky (vhodným RC členem proti zemi)

GND	Výstup sloužící pro připojení obvodu na nulový potenciál a také sloužící pro odvod přebytečného tepla z obvodu (umístěn na spodní části pouzdra)
INTV_{CC}	Vývod pro stabilizační kondenzátor vnitřní napěťové reference (doporučen minimálně 4,7 μF)
PWMOUT	Výstup pro odepnutí řetězce LED od země, řízený pomocí vstupu PWM (úroveň HIGH = 8 V, úroveň LOW = 0 V)
SENSE	Vstup pro měření velikosti proudu pracovním tranzistorem (42 mV vypne výstup GATE)
GATE	Výstup ovládání pracovního tranzistoru (úroveň HIGH = 8 V, úroveň LOW = 0 V)
ISN	Vstup pro měření výstupního proudu (nižší napěťová úroveň)
ISP	Vstup pro měření výstupního proudu (vyšší napěťová úroveň), když je ISP – ISN > 100 mV, tak dojde ke snížení výkonu měniče
FB	Vstup pro kontrolu výstupního napětí, při napětí větším jak 1,25 V dojde k vypnutí výstupu GATE až do poklesu tohoto napětí

K řízení driveru bude použito vstupu CTRL, neboť tímto vstupem je možné plynule regulovat výstupní proud. Vstup PWM bude použit pro úplné vypnutí LED řetězce. Výstup /OPENLED bude využit pro signalizaci rozpojení řetězce LED. Tyto tři vývody budou sloužit pro komunikaci driveru s mikroprocesorem.

Vstup /SHDN/UVLO nebude využit pro kontrolu napájecího napětí (tuto funkci zastane mikroprocesor). Bude pouze připojen na napájecí napětí, aby byl obvod v sepnutém stavu. Výstup V_{REF} zůstane volný, protože napěťová reference 2 V není v realizovaném zapojení driveru nikde potřeba.

4.3.1 Výpočty přidaných součástek k obvodu LT3755

V katalogovém listu k obvodu LT3755 je podrobný popis výpočtů jednotlivých součástek přidaných k obvodu. Jako první je uveden výpočet rezistorů pro vstup /SHDN/UVLO. Tento vstup však není v zapojení použit, proto jsou hodnoty napěťového děliče voleny tak, aby při minimálním vstupním napětí (10,8 V) bylo na vstupu dostatečné napětí pro sepnutí obvodu (minimálně 1,4 V). Byl zvolen dělič napětí složený ze dvou rezistorů, jejichž hodnoty jsou 15 kΩ a 4,7 kΩ. Výpočet napětí na výstupu děliče je v rovnici (7).

$$U_{/SHDN} > 1,4 V; U_{MIN} = 10,8 V; R_1 = 4,7 k\Omega; R_2 = 15 k\Omega$$

$$U_{/SHDN} = U_{MIN} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 10,8 \cdot \frac{4700 \Omega}{4700 \Omega + 15000 \Omega} = 2,58 V \quad (7)$$

Rezistor R_{LED} je dán maximálním proudem LED a prahovým napětím $ISP - ISN$. Toto napětí je při maximálním napětí na CTRL rovno 100 mV. Hodnotu rezistoru je tedy možné spočítat z rovnice (8).

$$I_{LED_{MAX}} = 1 A; ISP - ISN = 100 mV$$

$$R_{LED} = \frac{ISP - ISN}{I_{LED_{MAX}}} = \frac{0,1}{1} = 100 m\Omega \quad (8)$$

Dělič napětí pro vstup FB je potřeba nastavit tak, aby při běžném provozu bylo na FB o něco málo menší napětí než je prahová hodnota 1,2 V. Na každé LED je při proudu $I_F = 1 A$ úbytek napětí $U_{AK} = 3,6 V$. V řetězci je 12 LED v sérii, takže napětí, při kterém má vstup FB signalizovat, že došlo k přerušení řetězce, musí být o několik voltů větší než maximální napětí na řetězci 12 LED. Počítáno v rovnici (5).

Prahové napětí, které bude na vstupu děliče pro vstup FB, je tedy voleno kolem 50 V. Proudový odběr vstupu FB je maximálně 100 nA, proto dělič napětí nemusí být spočítán na velký proudový odběr. R_{FB1} bude ponechán původní (tj. $1 M\Omega$) a R_{FB2} bude dopočítán na požadované napětí pomocí rovnice (9).

$$U_{OUT_{MAX}} = 50 V; U_{FB_{TH}} = 1,2 V; R_{FB1} = 1 M\Omega$$

$$U_{FB_{TH}} = U_{OUT_{MAX}} \cdot \frac{R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} \gg 1,2 = 50 \cdot \frac{R_{FB2}}{1 \cdot 10^6 + R_{FB2}}$$

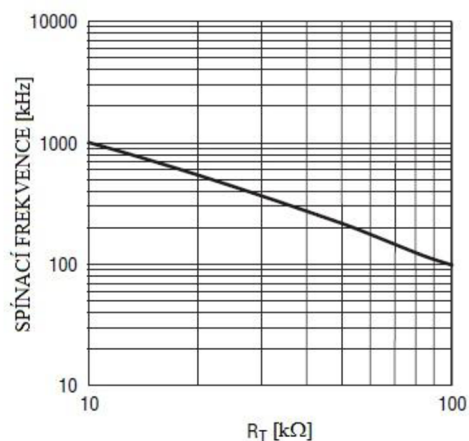
$$\frac{1,2}{50} = \frac{R_{FB2}}{1 \cdot 10^6 + R_{FB2}} \gg R_{FB2} \cong 1 \cdot 10^6 \cdot \frac{1,2}{50} = 24 k\Omega \quad (9)$$

Nejbližší dostupnou hodnotou rezistoru R_{FB2} (z důvodu skladových zásob součástek) je hodnota 25 k Ω . Pro tuto hodnotu se provede kontrolní výpočet (10), jaké napětí U_{OUT} překročí prahové napětí vstupu FB.

$$U_{FB_{TH}} = U_{OUT_{MAX}} \cdot \frac{R_{FB2}}{R_{FB1} + R_{FB2}} \gg 1,2 = U_{OUT_{MAX}} \cdot \frac{25 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^6 + 25 \cdot 10^3}$$

$$U_{OUT_{MAX}} = 1,2 \cdot \frac{1 \cdot 10^6 + 25 \cdot 10^3}{25 \cdot 10^3} = 49,2 V \quad (10)$$

Dalším potřebným údajem je pracovní frekvence měniče. Velikostí této frekvence lze ovlivnit fyzickou velikost měniče (s vyšší frekvencí se zmenší pracovní indukčnost, ale zvětší se přepínací ztráty na spínacích prvcích). V konstruovaném světelném zdroji není nedostatek prostoru, zvolila se frekvence co nejnižší (tj. $f_{SW} = 100 kHz$). Rezistor R_T , který tuto frekvenci nastavuje, tedy bude mít hodnotu 100 k Ω . Graf závislosti frekvence na velikosti odporu R_T je na Obr. 24.



Obr. 24: Graf závislosti spínací frekvence na velikosti rezistoru R_T [19]

Pomocí rovnice (11) je možné spočítat hodnotu vstupního kondenzátoru C_{IN} . Ten slouží jako zásobník energie impulzně využívané měničem. Filtruje tedy proudové špičky, které by jinak zatěžovaly napájecí zdroj. V katalogovém listu je uveden výpočet jeho minimální hodnoty. Hodnota vstupního napětí U_{IN} je volena nejnižší možná, protože v tomto případě budou proudové špičky největší [19].

$$C_{IN} \geq I_{LED} \cdot \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \cdot \frac{1}{f_{SW}} = 1 \cdot \frac{43,2}{10,8} \cdot \frac{1}{100 \cdot 10^3} = 40 \mu F \quad (11)$$

Výstupní kondenzátor C_{OUT} se volí experimentálně dle zvlnění napětí na výstupu. V zapojení od výrobce má tento kondenzátor hodnotu $4,7 \mu F$. Měnič je však nastaven na 375 kHz. Tento měnič má pracovní frekvenci 100 kHz (téměř 4x menší), proto bude výstupní kondenzátor volen několikanásobně větší (například $30 \mu F$) a jeho hodnota se případně upraví, pokud by zvlnění napětí na výstupu bylo příliš vysoké.

Další použitý kondenzátor C_{SS} je pro zajištění plynulého startu. Tato funkce však bude zajišťována pomocí řídicího mikroprocesoru, proto bude hodnota kondenzátoru ponechána stejná ($C_{SS} = 10 nF$), jako v doporučeném zapojení. Pro kontrolu, že doba plynulého náběhu nebude příliš dlouhá (řádově desetiny sekundy), se provede výpočet doby náběhu pomocí rovnice (12) [19].

$$t_{SS} = C_{SS} \cdot \frac{2 V}{10 \mu A} = 10 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2}{10 \cdot 10^{-6}} = 2 ms \quad (12)$$

Rezistor R_{LED} slouží k měření výstupního proudu. Pokud je na něm úbytek napětí roven 100 mV, znamená to, že je na výstupu dosaženo potřebného proudu (v případě, že je dostatečně vysoké napětí na vstupu CTRL). Maximální hodnota I_{LED} je v konstruovaném zdroji 1 A. Z těchto hodnot je možné pomocí rovnice (13) vypočítat hodnotu rezistoru R_{LED} .

$$R_{LED} = \frac{100 mV}{I_{LED}} = \frac{0,1}{1} = 100 m\Omega \quad (13)$$

Rezistor R_{SENSE} slouží k měření proudu pracovní indukčnosti při sepnutém spínacím tranzistoru. Jeho velikost pro měnič typu Boost se spočítá z následující rovnice (14) [19]:

$$R_{SENSE} \leq \frac{U_{IN} \cdot 0,07 V}{U_{OUT} \cdot I_{LED}} = \frac{10,8 \cdot 0,07}{43,2 \cdot 1} = 17,5 m\Omega \quad (14)$$

Hodnota rezistoru R_{SENSE} může být menší nebo rovna vypočítané hodnotě. Jelikož pro měření proudu I_{LED} je použito rezistoru o hodnotě $100 m\Omega$, složí se pomocí paralelní kombinace osmi rezistorů této hodnoty rezistor o hodnotě $12,5 m\Omega$ (15).

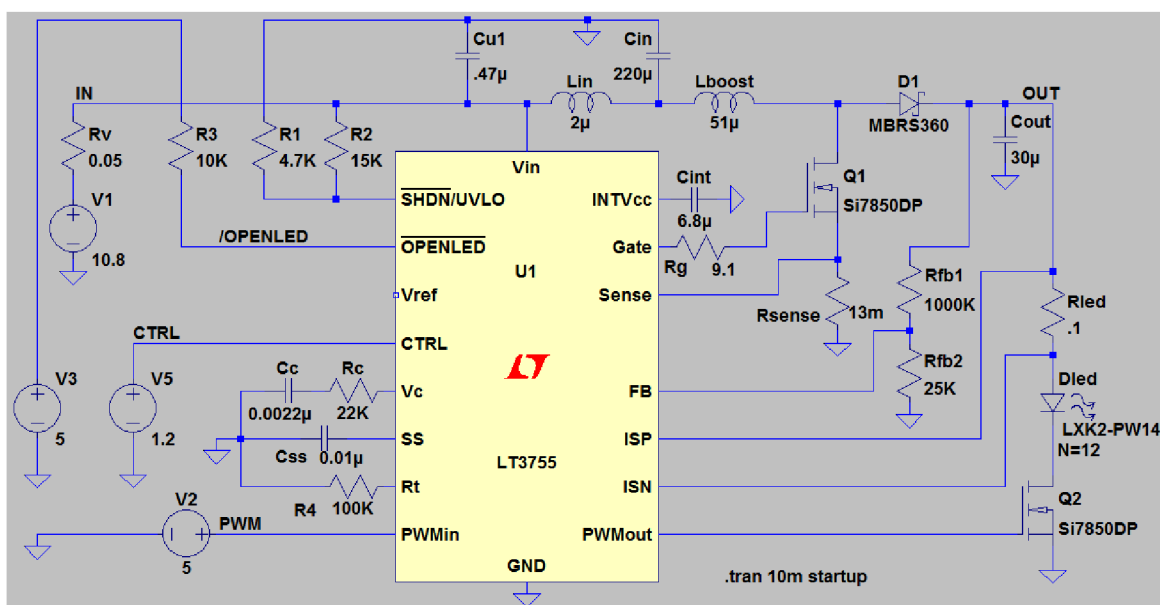
$$R_{SENSE} = \left(\sum_1^8 (0,1^{-1}) \right)^{-1} = 12,5 m\Omega \quad (15)$$

Jako poslední potřebný výpočet, uváděný v katalogovém listu LT3755, je výpočet velikosti pracovní indukčnosti L_{BOOST} pro měnič typu Boost (16) [19].

$$L_{BOOST} = \frac{R_{SENSE} \cdot U_{IN} \cdot (U_{OUT} - U_{IN})}{U_{OUT} \cdot 0,02 V \cdot f_{SW}} = \frac{12,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10,8 \cdot (43,2 - 10,8)}{43,2 \cdot 0,02 \cdot 100 \cdot 10^3} = 50,6 \mu H \quad (16)$$

4.3.2 Simulace měniče s obvodem LT3755

K simulacím obvodů Linear Technology je přímo vytvořen program LTSpice. Program umožňuje základní simulace (DC, AC, časová analýza), jako většina programů Spice.



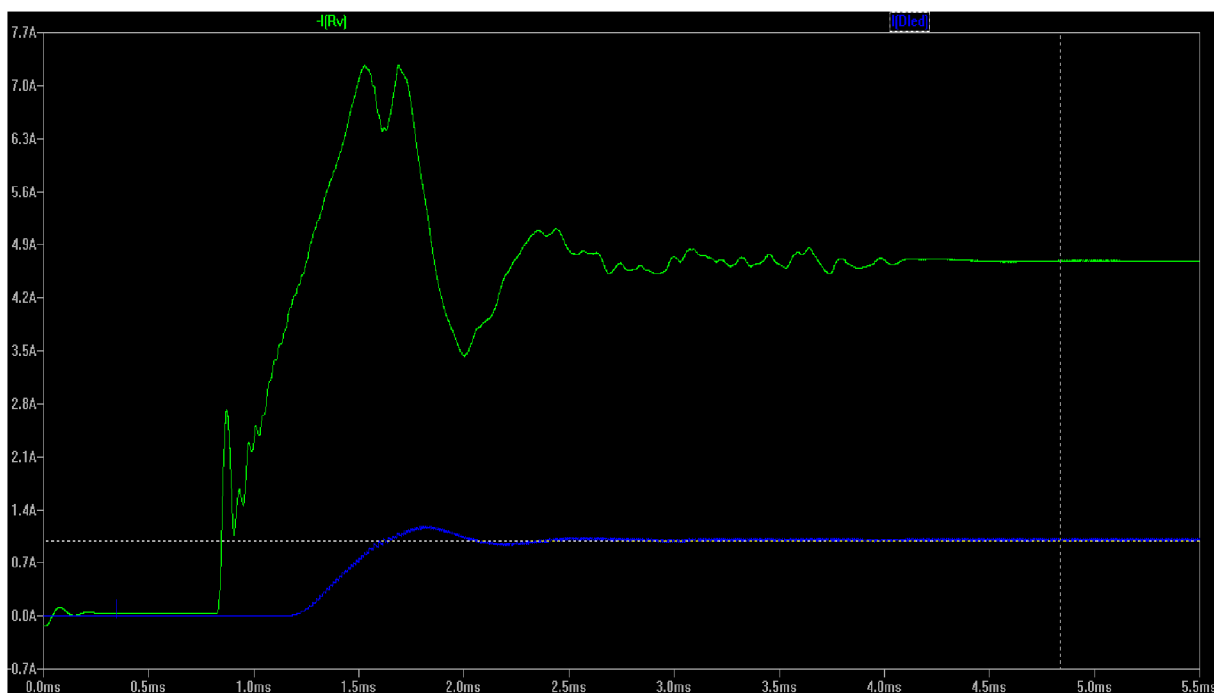
Obr. 25: Schéma zapojení měniče pro simulaci LTSpice

V simulaci je přidán zbytek součástek, které se nepočítaly v předchozí kapitole. Schéma použité k simulaci je na Obr. 25. V Tab. 9 jsou součástky vypsány a vysvětleny.

Tab. 9: Popis součástek v měniči

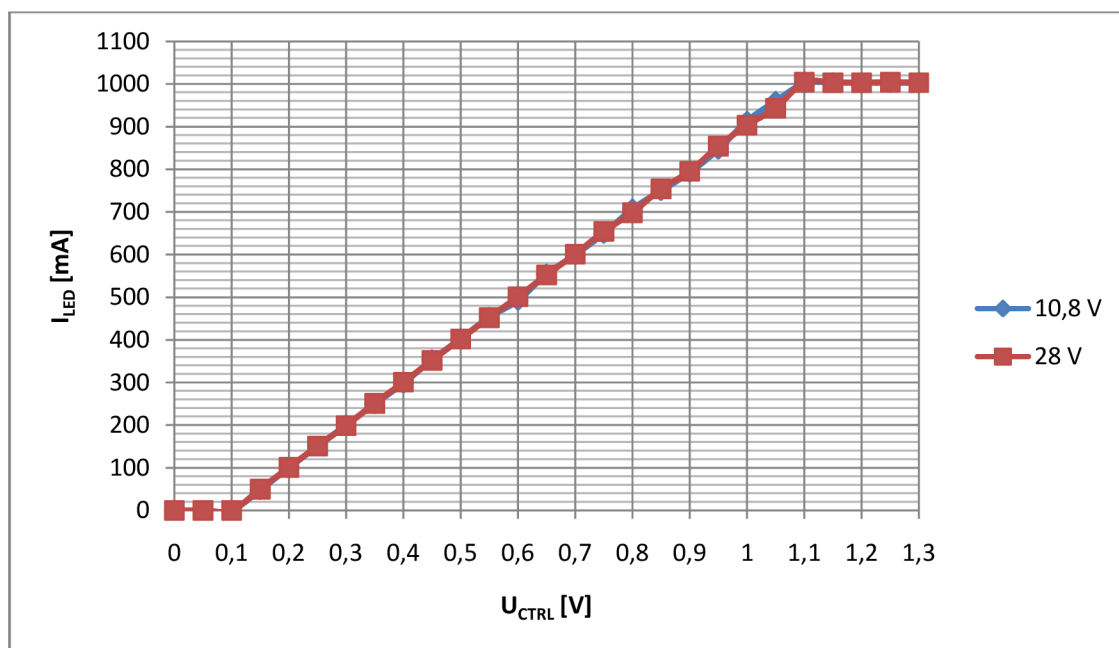
Součástka	Popis
C_{U1}	Fitrační kondenzátor zajišťující stabilní napájecí napětí pro LT3755. Velikost kapacity je určena na základě doporučení výrobce
$R3$	Pomocný rezistor zajišťující přepětí na výstupu /OPENLED pro simulaci
L_{IN}	Vstupní filtrační indukčnost tvořící společně s kondenzátorem C_{IN} filtr proti rušení do napájení. Její hodnota má být několik jednotek μH .
C_{INT}	Kondenzátor stabilizující vnitřní napájecí napětí v LT3755. Doporučená hodnota 4,7 μF nebo vyšší.
R_G	Rezistor omezující proudové rázy do GATE svorky pracovního tranzistoru. Jeho hodnota se doporučuje kolem 10 Ω .
R_C a C_C	RC článek pro stabilizaci vnitřní stabilizační smyčky. Hodnota 2,2 nF je doporučena pro LED aplikace a hodnota rezistoru 22 k Ω byla určena experimentálně v simulacích.
R_V	Přidaný rezistor pro simulaci, nahrazuje odpor přívodů od zdroje k měniči.

Obr. 26 je výsledek časové analýzy vstupního (zelený průběh) a výstupního (modrý průběh) proudu měničem. Na analýze je vidět náběh měniče. Napájecí napětí je 10,8 V a zátěž tvoří 12 LED v sérii. Napětí na CTRL je 1,2 V, pro nastavení maximálního výstupního proudu. Vstupní proud má hodnotu 4,7 A. Výstupní proud má hodnotu 1 A. Zvlnění vstupního proudu se ustálilo na hodnotě 6,3 mA_{p-p} a zvlnění výstupního proudu na hodnotě 27,3 mA_{p-p}. Zvlnění bylo měřeno v ustáleném stavu a s použitím kurzorů a zvětšení.



Obr. 26: Výsledek simulace měniče

Dále byly provedeny simulace pro zjištění změny výstupního proudu při změně napětí na CTRL. Výsledky byly zhodnoceny v grafu na Obr. 27.



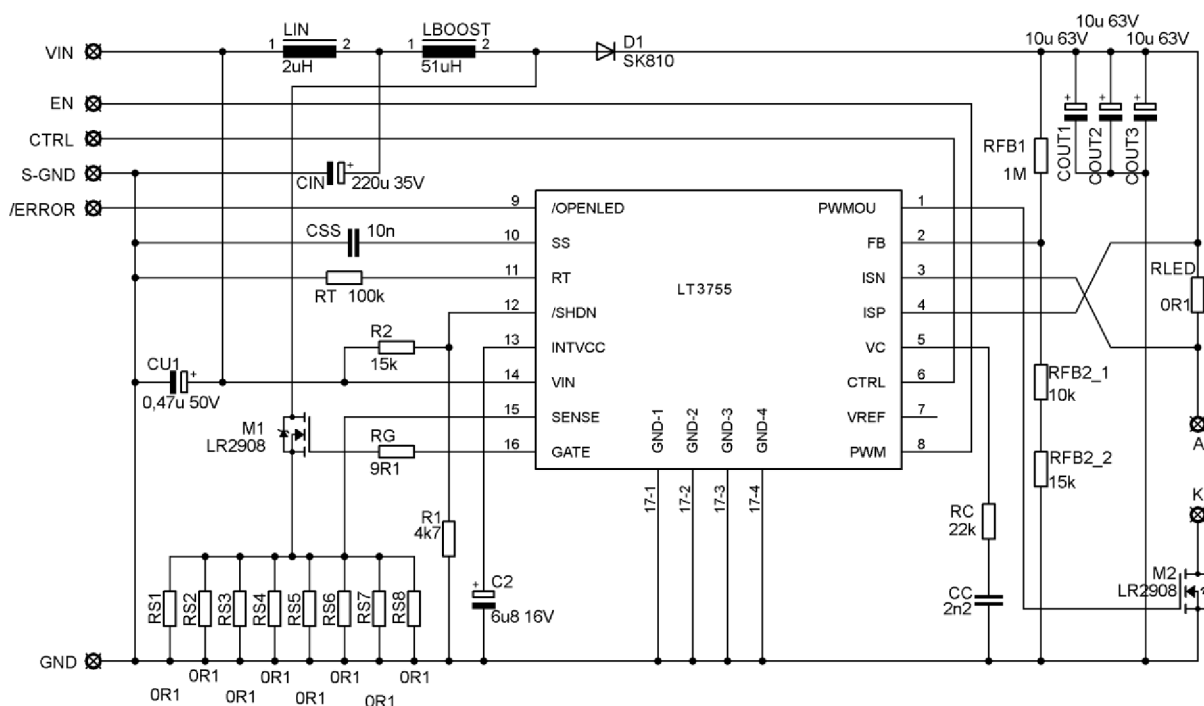
Obr. 27: Závislost I_{LED} na řídicím napětí U_{CTRL}

5 REALIZACE SVĚTELNÉHO ZDROJE

Po výběru vhodných komponent je možné zrealizovat výsledný světelný zdroj. Realizace se dá shrnout do pár základních kroků. První je návrh jednotlivých DPS, potřebných pro konstrukci. Druhý je vytvoření vhodného ovládacího programu pro řídicí mikroprocesor. A třetí je instalace jednotlivých komponentů do obalu zařízení.

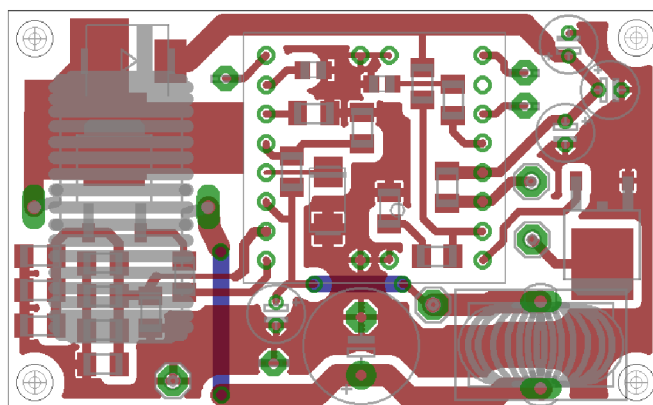
5.1 Návrh DPS pro LED driver

Integrovaný obvod LT3755, použitý v driveru, byl v pouzdře MSOP-16. S tímto miniaturním pouzdrům (rozměr 5 x 5 mm) by však byla v prototypové výrobě problematická manipulace, proto byla k pouzdrům vytvořena redukce. Integrovaný obvod v redukci již nebyl tak malý, ale bylo nutné vytvořit v návrhovém programu Eagle vlastní knihovnu s pouzdrům o rozměrech použité redukce. Obr. 28 je schéma zapojení měniče s obvodem LT3755.



Obr. 28: Schéma zapojení měniče pro návrh DPS v programu Eagle

První změnou součástek oproti simulaci jsou použité tranzistory. Dobře dostupnou náhradou a s odpovídajícími parametry jsou použité tranzistory LR2908 firmy International Rectifier. Stejným způsobem byla zvolena i usměrňovací dioda SK810. Výstupní kondenzátor C_{OUT} je rozdělen na tři paralelně spojené z důvodu snížení hodnoty ESR. Rezistor R_{FB2} je rozdělen na dvě části (10 k Ω a 15 k Ω) z důvodu využití skladových zásob součástek.

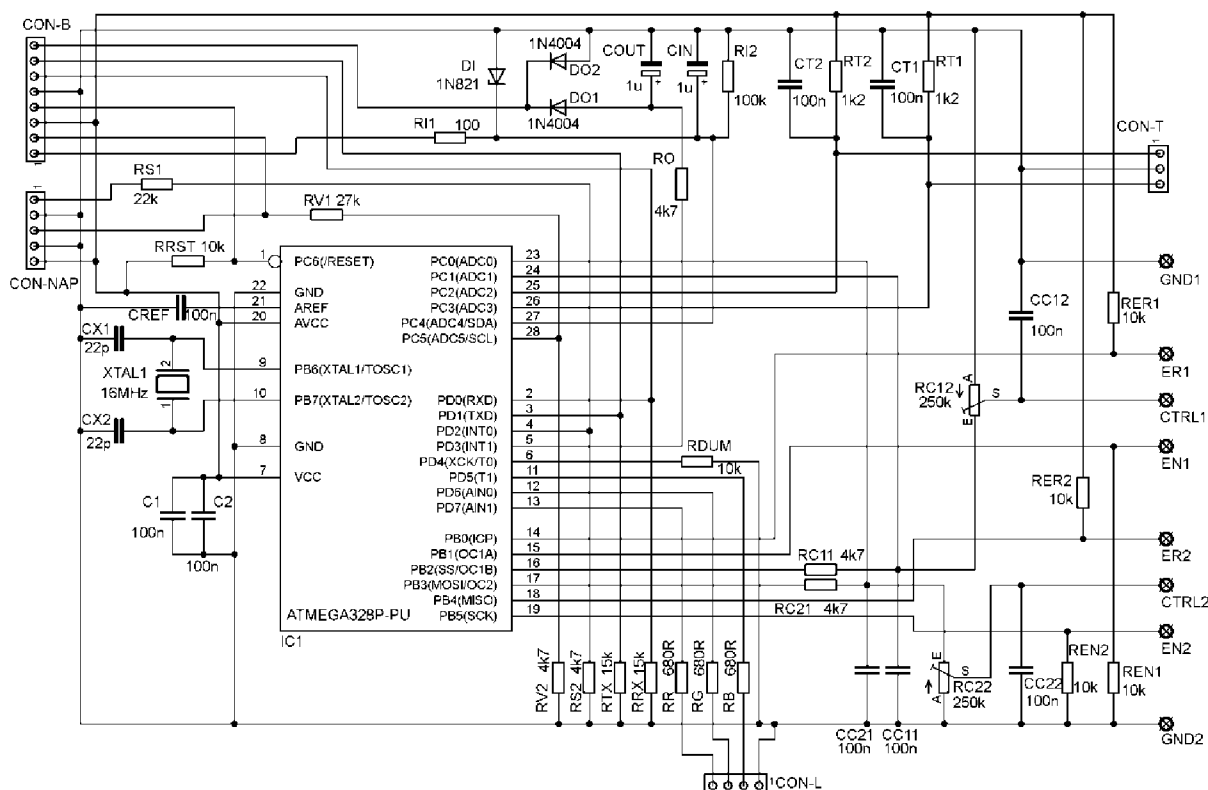


Obr. 29: Obrazec spojů navrhnuté DPS driveru s obrysy součástek

DPS (na Obr. 29) byla navržena jako jednovrstvá pro kombinovanou montáž (SMD a THT součástky) z důvodu ušetření prostoru. Modré spoje jsou drátové propoje. Výrobní dokumentace, osazovací předpis a seznam součástek se nachází v příloze tohoto dokumentu.

5.2 Návrh řídicí části

V řídicí části se nachází řídicí mikroprocesor a všechny pasivní prvky potřebné pro chod zařízení. Jedná se hlavně o odporové napěťové děliče a RC články pro filtraci signálů. Schéma zapojení je na Obr. 30.



Obr. 30: Schéma zapojení ovládací části pro návrh DPS v programu Eagle

5.2.1 Popis použitých součástek

Mikroprocesor umožňuje světelnému zdroji mnoho funkcí. Pro tu základní (tj. měření teploty) jsou použity dva analogové vstupy C.2 a C.3. Jako teplotní senzor je použit převodník teplota/napětí LM335Z. Pro správnou činnost jím musí protékat proud ($I_{RT} \cong 1 \text{ mA}$). Tento proud je zajištěn rezistory R_{T1} a R_{T2} . Kondenzátory C_{T1} a C_{T2} zajišťují stabilizaci napětí ze senzoru. Minimální proud nastane v případě největší teploty na senzoru (volena nejvýše 100 °C). Výpočet rezistorů R_T je v rovnici (17).

$$U_{SENZOR}(25 \text{ }^\circ\text{C}) = 2,98 \text{ V}; \text{tepl. koef} = +10 \text{ mV}/^\circ\text{C}; U_{NAP} = 5 \text{ V}; I_{RT} \cong 1 \text{ mA}$$

$$\begin{aligned} U_{SENZOR}(100 \text{ }^\circ\text{C}) &= 2,98 + ((100 - 25) \cdot 0,01) = 3,73 \text{ V} \\ U_{RT}(100 \text{ }^\circ\text{C}) &= U_{NAP} - U_{SENZOR}(100 \text{ }^\circ\text{C}) = 5 - 3,73 = 1,27 \text{ V} \\ R_T &= \frac{U_{RT}}{I_{RT}} = \frac{1,27}{1 \cdot 10^{-3}} = 1270 \text{ } \Omega \gg 1,2 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (17)$$

Hodnota rezistoru vyšla 1,2 kΩ. Ještě je potřeba ověřit, jestli proud nebude příliš vysoký ($I_{RT} \geq 10 \text{ mA}$) při extrémně nízké teplotě (volena -40 °C). Ověření je provedeno v rovnici (18).

$$\begin{aligned} U_{SENZOR}(-40 \text{ }^\circ\text{C}) &= 2,98 + ((-40 - 25) \cdot 0,01) = 2,33 \text{ V} \\ U_{RT}(100 \text{ }^\circ\text{C}) &= U_{NAP} - U_{SENZOR}(100 \text{ }^\circ\text{C}) = 5 - 2,33 = 2,67 \text{ V} \\ I_{RT} &= \frac{U_{RT}}{R_T} = \frac{2,67}{1,2 \cdot 10^3} = 2,23 \text{ mA} \end{aligned} \quad (18)$$

Proud nepřesahuje maximální hodnotu při nejnižší předpokládané teplotě, takže rezistory R_{T1} a R_{T2} můžou zůstat o hodnotě 1,2 kΩ.

Další částí obvodu je vstupní RC článek s přepětovou ochranou pomocí Zenerovy diody D_I a rezistoru R_{I1} . Kondenzátor C_{IN} , v RC článku, slouží k filtraci vstupního řídicího napětí a rezistor R_{I2} vytváří zátěž případnému řídicímu zdroji. Dioda chrání analogový vstup procesoru C.4 proti záporně polarizovanému vstupnímu napětí na vstupu IN. Vstup IN slouží pro regulaci intenzity světla v případě potřeby. Regulace se provádí přivedením napětí (0,5 V až 4,5 V) na vstup IN.

Pro možnost řízení dalšího světelného zdroje je vytvořen výstup OUT, na němž je vytvářeno napětí (od 0,5 V po 4,5 V). Napětí je generováno pomocí PWM modulace z digitálního výstupu D.3. Výstupní obdélníkový signál prochází RC článkem (R_O a C_{OUT}), kde jsou vyfiltrovány střídavé harmonické složky a na výstupu je pouze stejnosměrná hodnota napětí. Jako ochrana tohoto výstupu je dvojice diod (D_{O1} a D_{O2}) zajišťujících ochranu proti náhodnému kladnému přepětí nebo zápornému napětí na výstupu OUT.

Analogový vstup C.5 slouží pro měření napájecího napětí. Využití tohoto vstupu je možné při použití světelného zdroje v bateriově poháněném zařízení. Při upravení řídicího programu je možné nastavit, aby se světlo vypnulo v případě nízkého napětí na baterii. Dělicí poměr napětěového děliče je spočítán pomocí maximálního napájecího napětí (bráno s rezervou $5 \text{ V} \gg U_{NAP_MAX} = 34 \text{ V}$) a maximálního napětí na vstupu mikroprocesoru ($U_{ADC_MAX} = 5 \text{ V}$). Rezistor R_{V2} je volen ($R_{V2} = 4,7 \text{ k}\Omega$), R_{V1} je dopočítán v rovnici (19).

$$\frac{U_{ADC_MAX}}{U_{NAP_MAX}} = \frac{5}{34}$$

$$\frac{R_{V2}}{R_{V1} + R_{V2}} = \frac{5}{34} \gg R_{V1} = \frac{34}{5} \cdot R_{V2} - 4,7 \cdot 10^3 = \frac{34}{5} \cdot 4,7 \cdot 10^3 - 4,7 \cdot 10^3 \quad (19)$$

$$R_{V1} = 27,3 \text{ k}\Omega \cong 27 \text{ k}\Omega$$

Vstup SIT je kontrolní vstup, kterým mikroprocesor zjišťuje, zda je světelný zdroj poháněn z rozvodné sítě (230 V / 50 Hz). Napětí z výstupu zdroje (24 V) je přivedeno na vstup SIT a dále přes napětěový dělič (R_{S1} a R_{S2}) na digitální vstup D.2. Dělič snižuje napětí z 24 V na 4,2 V. Není to maximální možné vstupní napětí, ale je dostatečné jako vstupní hodnota vysoké logické úrovně (HIGH). Dále je hodnota volena nízká z důvodu ochrany digitálního vstupu při náhodném přepětí na vstupu děliče. Rezistor R_{S2} je volen ($R_{S2} = 4,7 \text{ k}\Omega$). Rezistor R_{S1} je dopočítán v rovnici (20).

$$\frac{U_{D.2}}{U_{SIT}} = \frac{4,2}{24}$$

$$\frac{R_{S2}}{R_{S1} + R_{S2}} = \frac{4,2}{24} \gg R_{S1} = \frac{24}{4,2} \cdot R_{S2} - 4,7 \cdot 10^3 = \frac{24}{4,2} \cdot 4,7 \cdot 10^3 - 4,7 \cdot 10^3 \quad (20)$$

$$R_{S1} = 22,2 \text{ k}\Omega \cong 22 \text{ k}\Omega$$

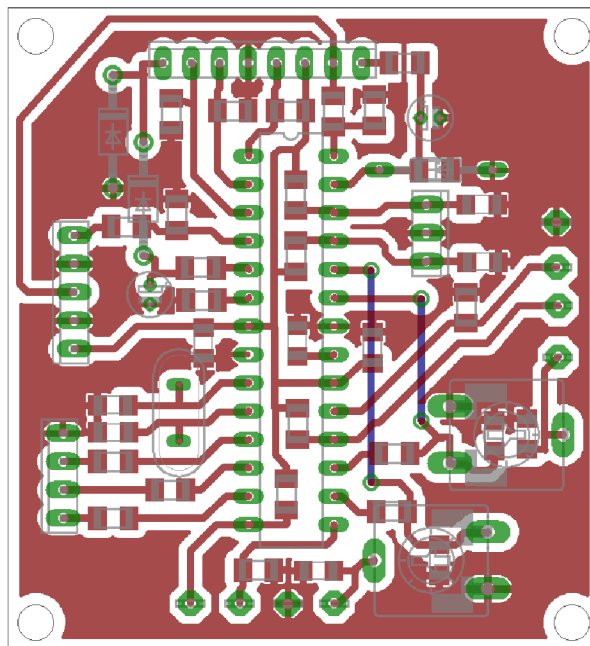
Dále jsou v obvodu rezistory zajišťující stabilitu stavu na jednotlivých vstupech. Rezistor R_{RST} zajišťuje vysokou logickou úroveň na resetovacím vstupu mikroprocesoru. Jeho hodnota byla volena dle doporučení výrobce $R_{RST} = 10 \text{ k}\Omega$. Rezistory R_{TX} a R_{RX} zajišťují nízkou logickou úroveň na komunikačních vstupech. Hodnota byla volena dle rezistorů na modulu Arduino, přes který je jediné možná komunikace zařízení s počítačem. Rezistor R_{DUM} slouží k stabilitě nízké logické úrovně na nevyužitém výstupu mikroprocesoru.

Světelný zdroj je vybaven vícebarevnou indikační LED, která informuje o stavu zařízení. Zeleně svítící indikace signalizuje normální provoz. Červené světlo značí poruchu nebo zásah ochrany proti přehřátí. Modré světlo signalizuje případnou komunikaci s připojenou periferií. Rezistory (R_R , R_G a R_B) slouží jako předřadné rezistory pro omezení proudu touto LED.

Poslední částí jsou výstupní prvky pro ovládání měničů (0 V až 1,2 V). Skládají se z RC článků (R_{C11} - C_{C11} a R_{C21} - C_{C21}) a trimrů (R_{C12} a R_{C22}). První RC články vytváří z PWM signálu z digitálních výstupů (B.2 a B.3) stejnosměrný signál. Odporové trimry nastavují maximální výstupní hodnotu napětí pro pevné nastavení maximálního výkonu měničů. Výstupní kondenzátory (C_{C12} a C_{C22}) slouží k výstupní filtraci řídicího signálu.

Rezistory (R_{EN1} , R_{EN2} , R_{ER1} a R_{ER2}) stabilizují logický stav na digitálních vstupech. Výstup EN je propojen s měničem a slouží k jeho úplnému vypnutí (nízkou logickou úrovní). Vstup /ERROR slouží jako informace mikroprocesoru od měniče, že došlo k rozpojení řetězce LED. Za normálního stavu je na tomto vstupu vysoká logická úroveň a v případě signalizace je tento vstup v měniči spojen tranzistorem se zemí.

5.2.2 Návrh DPS



Obr. 31: Obrazec spojů navrhnuté řídicí DPS s obrysy součástek

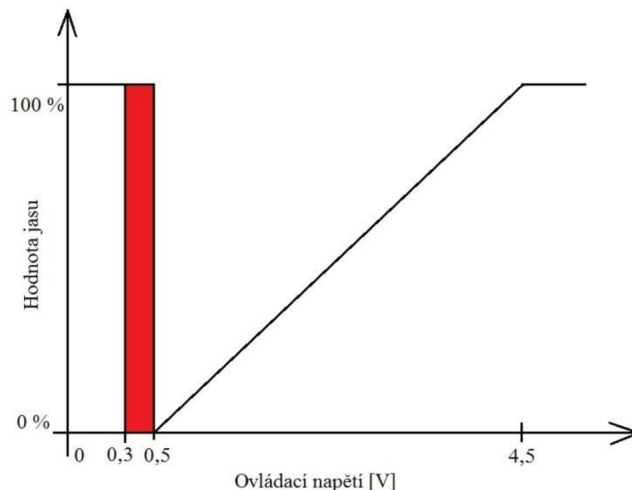
Na Obr. 31 jsou modře zbarvené propojky po druhé straně DPS. Vývodový osazovací předpis obsahuje řadové konektory pro připojení komunikačního konektoru, propojení řídicí desky s napájením, připojení indikační LED a připojení teplotních senzorů. Funkce jednotlivých pinů konektorů jsou u každého vypsány jako jméno konektoru. Výrobní dokumentace je v příloze dokumentu.

5.2.3 Návrh základního řídicího programu

Řídicí program zajišťuje správnou funkci celého zařízení. Zajišťuje kontrolu proti přehřátí a kontrolu dostatečného napájecího napětí. Nastavuje také hodnotu jasu dle vstupní nastavovací hodnoty. Zajišťuje také plynulý náběh celého zařízení.

Po připojení napájení dojde ke změření napájecího napětí. V případě, že je nízké, rozsvítí se pouze chybová LED a mikroprocesor čeká, dokud se napájecí napětí nezvedne přes minimální hodnotu (10,8 V). Dalším krokem před zapnutím je změření teploty na LED. Pokud je příliš vysoká (70 °C na chladicí ploše LED) mikroprocesor opět čeká, než zařízení vychladne. Pokud jsou tyto dvě podmínky splněny, dojde ke změření vstupního řídicího napětí a podle něj se nastaví požadovaná hodnota na výstupu.

Řídící vstup slouží k ovládání jasu světla. Pokud je na tomto vstupu napětí 0 V až 0,3 V, zařízení je nastavené na plný výkon. Při napětí od 0,5 V do 4,5 V je zařízení v regulovatelném režimu a s rostoucím řídicím napětím vzrůstá jas. Od 4,5 V výše je zařízení nastaveno na maximální výkon. V mezistavu (zvýrazněno červenou barvou) je zařízení nastaveno na předchozí hodnotu. Grafické znázornění nastavení výkonu na ovládacím napětí je na Obr. 32.



Obr. 32: Závislost nastavení výkonu na vstupním ovládacím napětí

Dalším krokem před samotným chodem je plynulý náběh. Požadovaná hodnota je nastavena smyčkou, ve které je výstupní hodnota postupně navyšována na požadovanou hodnotu.

V hlavní smyčce řídicího programu je prvním krokem hlídání napájecího napětí. Pokud toto napětí poklesne pod minimální hodnotu, dojde ke snižování výkonu do té doby, dokud se napětí nezvedne nad minimální mez. V krajním případě může dojít k úplnému vypnutí a na zařízení zůstane svítit červená indikační LED.

Dalším krokem je hlídání teploty. V případě překročení maximální hodnoty dojde ke snížení výkonu světla a k aktivaci časovače. Tento časovač řídí další měření teploty, protože chladiče LED mají tepelnou kapacitu a rychlým snižováním výkonu, jako v případě měření napětí, by došlo k úplnému vypnutí zařízení, dokud by teplota neklesla pod maximální hodnotu.

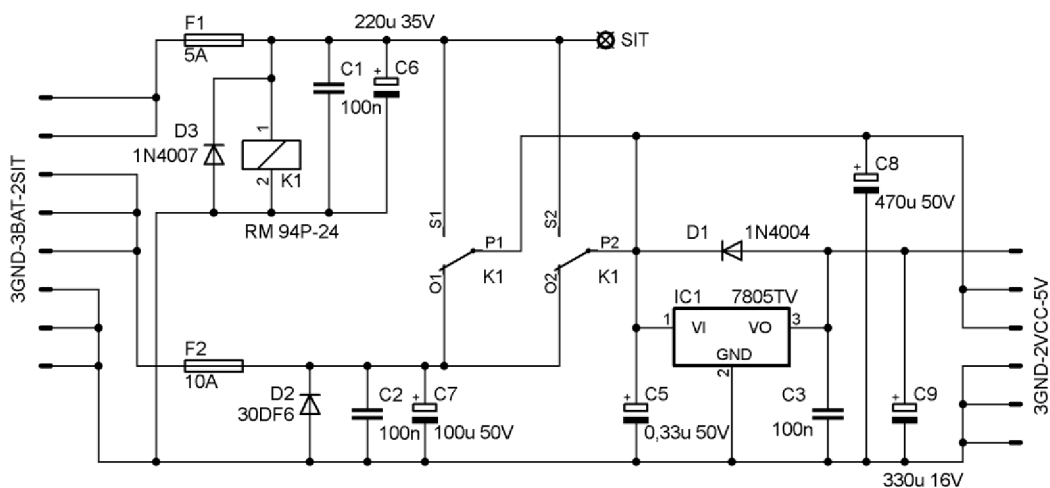
Posledním důležitým krokem je kontrola nastavené hodnoty na řídicím vstupu. Pokud dojde ke změně této hodnoty, dojde i ke změně nastavené hodnoty v programu a vypnutí časovače regulace teploty. Tento časovač je vypnut, aby při zvýšení nastavené hodnoty došlo okamžitě k případnému zásahu regulace.

V mikroprocesoru je využito téměř všech vstupů a výstupů pro další rozšíření zařízení. K rozšíření stačí pouze upravit řídicí program a nahrát jej do zařízení. Vývojový diagram, přidaný jako příloha tohoto dokumentu, obsahuje pouze nejnütnější a požadované funkce.

5.3 Návrh DPS pro napájení

Napájení světelného zdroje může být zajišťováno ze dvou různých zdrojů. Pro přepínání mezi napájením z rozvodné sítě (230 V / 50 Hz, přes adaptér) a napájením z palubní sítě (10,8 V až 28 V DC) bylo zvoleno elektromagnetické relé. Jeho ovládání je zajišťováno přímo z napájecího adaptéru. Pokud je zařízení napájeno z palubní sítě, je relé v klidové poloze a napájení je připojeno na palubní síť. Pokud je napájení z rozvodné sítě, relé se zapne a přepne napájení na rozvodnou síť. Schéma zapojení je na Obr. 33.

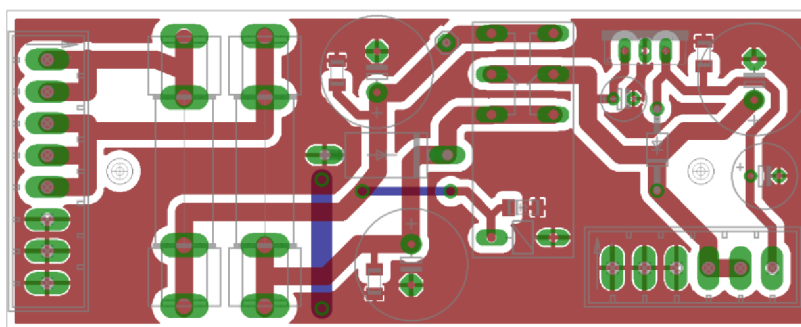
Napájecí část má ještě za úkol napájet řídicí část (5 V stabilizovaných). Nejjednodušší variantou je použití integrovaného stabilizátoru napětí 7805, ke kterému stačí pouze připojit filtrační kondenzátory. Další filtrační kondenzátory jsou připojeny na každém vstupu a výstupu z napájecí DPS. Keramické kondenzátory (100 nF) slouží k odfiltrování vysokofrekvenční složky a elektrolytické (s kapacitou řádově stovek μF) zajišťují částečnou stabilizaci napájecího napětí.



Obr. 33: Schéma zapojení napájecí části pro návrh DPS v programu Eagle

Použité relé má maximální povolený proud kontaktem 8 A. Aby nebyl zatížen trvale tímto proudem, jsou zapojeny dva kontakty (každý po max. 8 A) paralelně. Diody *D1* chrání stabilizátor před zpětným proudem, který může nastat v případě odpojení napájení a současně ponechaných nabitých kondenzátorech na výstupu. Diody *D2* slouží jako ochrana v případě přepólování napájecího zdroje. Pokud k tomuto stavu dojde, vzniklý špičkový proud přepálí pojistku *F2* a ochrání zařízení před přepólováním. Diody *D3* vybijí naindukovanou energii z relé v případě jeho vypnutí.

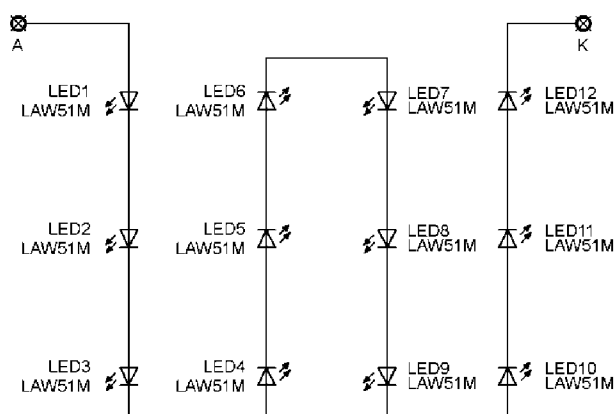
Podobné zdvojení kontaktů bylo zvoleno i v případě připojovacích konektorů. A to ze stejného důvodu, aby piny konektorů nebyly namáhány tak velkým proudem. Na Obr. 34 je pohled na navrhnutou napájecí DPS. Výrobní dokumentace je v příloze.



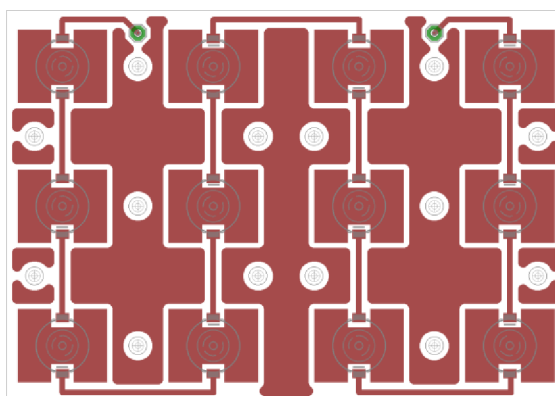
Obr. 34: Obrazec spojů navrhnuté napájecí DPS s obrysy součástek

5.4 Návrh DPS pro LED

Pro LED byla vybrána kovová DPS (IMS). Díky kovovému jádru výborně odvádí teplo. Z důvodu zjednodušení montáže celého zařízení se tato DPS dělí na dvě. Každá po 12 LED. Rozmístění LED bylo voleno co možná největší, aby byl dostatečný prostor pro odvod tepla. Schéma zapojení je na Obr. 35. Návrh DPS je na Obr. 36. Ve výsledné konstrukci budou tyto DPS umístěny na hliníkový profil, který bude rozvádět teplo k chladiči a do okolí. Výrobní dokumentace je v příloze.



Obr. 35: Schéma zapojení řetězce LED pro návrh DPS v programu Eagle

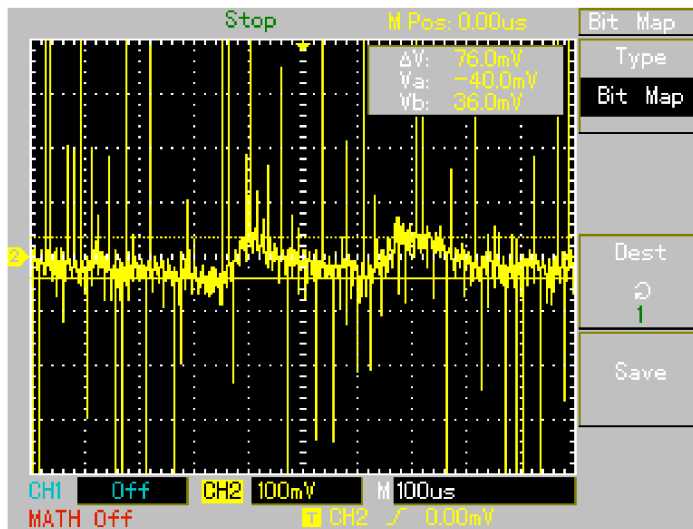


Obr. 36: Obrazec spojů navrhnuté DPS pro LED s obrysy součástek

6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SVĚTELNÉHO ZDROJE

6.1 Měření napájecích měničů

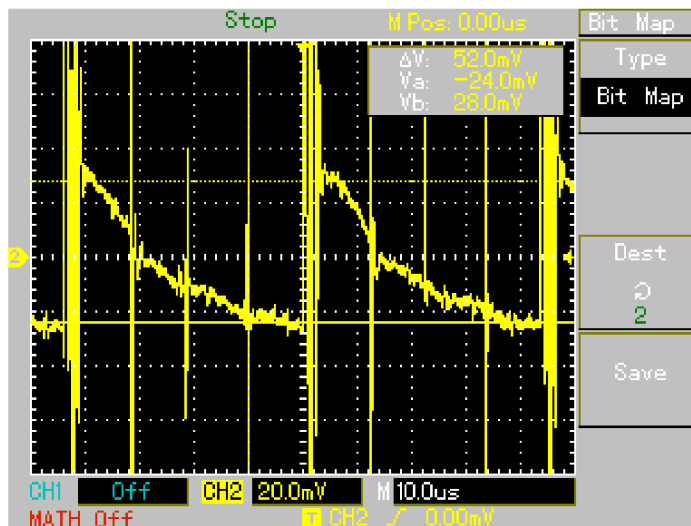
Ze simulace je známý výsledek zvlnění vstupního a výstupního proudu z měniče. Pomocí osciloskopu (UTD2025C) byly změřeny průběhy proudů. Měření bylo prováděno pouze na jednom měniči, neboť oba měniče jsou totožné. Měření bylo prováděno při plném zatížení.



Obr. 37: Průběh napájecího proudu

Pro měření napájecího proudu (Obr. 37) byl použit bočník pro měření proudu z multimetru ($R_B = 250 \text{ m}\Omega$). Rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou naměřeného napětí je $\Delta V = 76 \text{ mV}$. Rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou proudu se spočítá z rovnice (21):

$$\Delta I = \frac{\Delta V}{R_B} = \frac{76 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-3}} = 304 \text{ mA} \quad (21)$$



Obr. 38: Průběh proudu LED

Výstupní proud z měniče (proud LED, Obr. 38) byl měřen shodnou proudovou sondou. U výstupního proudu je rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou naměřeného napětí $\Delta V = 52 \text{ mV}$. Rozdíl výstupního proudu se spočítá pomocí rovnice (22).

$$\Delta I = \frac{\Delta V}{R_B} = \frac{52 \cdot 10^{-3}}{250 \cdot 10^{-3}} = 208 \text{ mA} \quad (22)$$

Dále je možné spočítat účinnost měničů. Výpočet bude proveden z naměřených hodnot napětí a proudů. Výstupní napětí lze určit z V-A charakteristiky diody (viz. Obr. 20). Pro simulaci byl proud LED $I_{LED} = 1 \text{ A}$ a pro tento proud je na každé LED úbytek napětí $U_{LED} = 3,6 \text{ V}$. Počet LED v sérii je $n = 12$. Napájecí napětí pro simulaci bylo $U_{LED} = 10,8 \text{ V}$ a vstupní proud $I_{IN} = 4,7 \text{ A}$. Účinnost je tedy možné spočítat pomocí rovnice (23).

$$\eta_{SIM} = \frac{n \cdot U_{LED} \cdot I_{LED}}{U_{NAP} \cdot I_{IN}} = \frac{12 \cdot 3,6 \cdot 1}{10,8 \cdot 4,7} = 0,85 \gg 85\% \quad (23)$$

Pro měření jsou hodnoty účinnosti spočítány rovnicí (24).

$$n = 12; U_{LED} = 3,55 \text{ V}; I_{LED} = 920 \text{ mA}; U_{NAP} = 11 \text{ V}; I_{IN} = 4,7 \text{ A}$$

$$\eta_{MĚŘ} = \frac{n \cdot U_{LED} \cdot I_{LED}}{U_{NAP} \cdot I_{IN}} = \frac{12 \cdot 3,55 \cdot 0,92}{11 \cdot 4,7} = 0,76 \gg 76\% \quad (24)$$

Tab. 10: Porovnání naměřených a simulovaných hodnot

	Simulace	Měření
Vstupní proud	4,7 A	4,7 A
Zvlnění vstupní proudu	6,3 mA	304 mA
Výstupní proud	1000 mA	920 mA
Zvlnění výstupního proudu	27,3 mA	208 mA
Účinnost	85 %	76 %

Z naměřených hodnot je patrné velké zvlnění naměřených proudů oproti simulaci (viz Tab. 10). Toto může být způsobeno použitím odlišných součástek oproti simulaci. Zvlnění by bylo možné snížit vylepšením použitých filtrů v obvodu i úpravou návrhu (použití jiných indukčností a kondenzátorů).

6.2 Měření provozních teplot

Normální provoz tohoto světelného zdroje je plánován tak, že maximální proud LED bude $I_F = 700 \text{ mA}$. Tento proud je doporučený pro zvýšenou životnost LED. Podmínkou pro tuto vyšší životnost je také co nejnižší teplota na PN přechodu LED.

Vlastní měření teplot probíhalo v místnosti s teplotou $24 \text{ }^\circ\text{C}$ a s vypnutou aktivní regulací tepelných ztrát. Po hodinovém provozu se teplota na vnějším chladiči ustálila na $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Na DPS s LED se teplota ustálila na hodnotě $72 \text{ }^\circ\text{C}$. Vnitřní teplota byla odečtena z naměřené hodnoty řídicím mikroprocesorem. Tato teplota je zároveň i teplotou chladičí plošky LED. Z grafu na Obr. 21 vyplývá, že tato teplota povrchu při daném proudu je možná a že nehrozí poškození LED. Ovšem pro zvýšení životnosti by bylo dobré na zkvalitnění odvodu tepla od DPS do okolí ještě zapracovat.

Aktivní regulace tepelných ztrát bude tedy nastavena na $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Při této teplotě dojde k omezení výkonu. Po vylepšení chladičů bude možné její hodnotu snížit bez rizika častého zásahu aktivní regulace.



Obr. 39: Rozpracovaná instalace elektroniky do pouzdra 500 W reflektoru

Na Obr. 39 je částečně vidět vnitřní uspořádání výsledné konstrukce světelného zdroje. DPS s LED je chlazená pomocí hliníkových profilů. Měniče a řídicí DPS jsou umístěny na děrovaném nosném profilu. Napájecí DPS je umístěna ve spodní části reflektoru. Napájecí zdroj je součástí přednášecího rámu (na této fotce je reflektor z rámu vyjmut).

6.3 Porovnání světelných zdrojů

Tab. 11: Soupis hlavních parametrů obdobných světelných zdrojů [22] [23] [24]

Zařízení	100 W světelný zdroj s LED	230 W halogenová žárovka	100 W klasická žárovka	65 W lineární zářivka	150 W kompaktní zářivka
Měrný výkon	102 lm/W	21,7 lm/W	13,6 lm/W	67,7 lm/W	90 lm/W
Teplota při provozu	< 90 °C	> 150 °C	> 150 °C	< 90 °C	< 90 °C
Index podání barev	80	až 100	až 100	63	> 80
Životnost	> 10 000 h (při 70 % výkonu)	cca 2000 h	cca 1000 h	21 000 h	60 000 h
Stmívatelné	ano	ano	ano	ne	ne
Cena (orientační)	3000 Kč (samotné LED 720 Kč)	150 Kč	15 Kč	700 Kč	5 000 Kč

Z hlediska účinnosti je nejlepším světelným zdrojem LED. Pořizovací cena je však na druhém nejhorším místě. Halogenová a klasická žárovka mají hlavní přednosti v pořizovací ceně a kvalitě světla (udávané indexem podání barev). Díky své ceně se tyto světelné zdroje hodí do míst, kde často dochází k poškození svítidla (dílny, stavební světla atd.). Nevýhodou žárovek je velká teplota na jejich povrchu, takže u nich hrozí zvýšení riziko požáru v případě nějaké závady na konstrukci svítidla.

Lineární zářivka je jakýsi kompromis mezi světelnými zdroji. Nemá ani vysokou pořizovací cenu, ani není při provozu výrazně ohřátá. Mezi přednosti patří vysoká životnost. Zářivky však nelze stmívat a časté zapínání a vypínání těmto svítidlům výrazně zkracuje životnost.

Vybraná kompaktní zářivka je OSRAM ENDURA. Řadí se do vyšší třídy kompaktních zářivek, vyznačujících se vysokou životností, vysokou účinností a také vyšší cenou.

ZÁVĚR

Na začátku této bakalářské práce jsem shromažďoval důležité informace o principech chlazení LED a to na všech úrovních (LED, DPS, zařízení). Dále jsem uvedl základní informace o používaných typech napájecích zdrojů a rozčlenil jsem je dle cílové aplikace LED světla. Nejčastěji používané typy jsou spínané zdroje (měniče) s jednoduchou topologií, neboť napájené LED mají maximální příkon řádově v desítkách wattů.

Ve druhé části práce jsem na základě těchto informací navrhnul světelný zdroj. Navrhnutý světelný zdroj je velice univerzální na použití (jak na napájení, tak na pracovní podmínky). Tento světelný zdroj je možné regulovat, má ochranu proti přehřátí a splňuje podmínku krytí IP44 (použití ve venkovních prostorech). Systém chlazení (resp. Část odvádějící teplo od DPS s LED na chladič) však bude muset být vylepšen. Teploty naměřené na pouzdru LED (72 °C) jsou vyšší, než kolik by bylo vhodné pro dosažení co největší životnosti.

V závěru této bakalářské práce jsem porovnal navrhnutý světelný zdroj s podobnými vyráběnými světelnými zdroji. Výběr typu světelného zdroje záleží hlavně na použití. Světelné zdroje s LED mají téměř všechny vlastnosti lepší než jiné světelné zdroje. Jediný parametr, který není srovnatelný s ostatními, je index podání barev. Dosahovaná hodnota 80 je však ve většině aplikací dostačující.

SEZNAM LITERATURY

- [1] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 154 s. ISBN 80-730-0184-5.
- [2] Module 6 : LIGHT EMITTING DIODE (LED): Lecture : LED - I. *Centre For Distance Engineering Education Programme* [online]. 2013 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: [http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Electrical%20&%20Comm%20Engg/Optical%20Communication/mod\(LED\)/slides/Sec-1/1.html](http://www.cdeep.iitb.ac.in/nptel/Electrical%20&%20Comm%20Engg/Optical%20Communication/mod(LED)/slides/Sec-1/1.html)
- [3] SCHUBERT, E. LED basics: Electrical properties. *Rensselaer Polytechnic Institute* [online]. 2013 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap04/chap04.htm>
- [4] Barevná teplota světla (též teplota chromatičnosti). *LVD úsporné indukční osvětlení* [online]. 2010 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.lvdosvetleni.cz/O-svetle/>
- [5] HB ELECTRONIC COMPONENTS. *LED specification: 540PR2C* [online]. 2013, 6 s. [cit. 9.12.2013]. Dostupné z: <http://www.hebeiltd.com.cn/led.datasheet/540PR2C.pdf>
- [6] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. *Reliability and Lifetime of LEDs: Application Note* [online]. 2008, 13 s. [cit. 9.12.2013]. Dostupné z: http://catalog.osram-os.com/jsp/download.jsp?rootPath=/media/&name=Reliability_and_Lifetime_of_LED_s.pdf&docPath=Graphics/00046672_0.pdf&url=/media/_en/Graphics/00046672_0.pdf
- [7] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. *Thermal Management of Light Sources Based on SMD LEDs: Application Note* [online]. 2013, 13 s. [cit. 9.12.2013]. Dostupné z: <http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do;jsessionid=39BCC33C23EBA905257245603386DD49?act=downloadFile&favOid=0200000700027e00000200b6>
- [8] FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplo a chlazení v elektronice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1997, 30 s. ISBN 80-860-5624-4.
- [9] IMS Insulated Metal Substrate LAYOUT PCB. EFFEI S.R.L. *EffeI* [online]. 2013 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: http://www.effei.it/english/insulated_metal_substrate_pcb.htm
- [10] What is SinkPAD. SINKPAD LLC. *SinkPAD: PCB Thermal Management Technology* [online]. 2012 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: <http://www.sinkpad.com/what-is-sinkpad.php>
- [11] 3.5 Extraction of a Heat from LED. OMS SPOL. S R.O. *OMS lightning* [online]. 2012 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: <http://www.omsighting.sk/ledacademy/307/>
- [12] ALTMAN STAGE LIGHTING CO., Ltd. *Peltier-cooled LED lighting assembly*

- [patent]. patent, US6964501 B2. Uděleno 24.12.2002. Dostupné z:
<http://www.google.com/patents/US6964501>
- [13] CB LIGHTNING S.R.O. *CB lightning: ledkovezarovky.eu* [online]. 2010 [cit. 2013-12-9]. Dostupné z: <http://www.ledkovezarovky.eu>
- [14] LÁNÍČEK, Robert. *Elektronika: Obvody. Součástky. Děje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 479 s. ISBN 80-860-5625-2.
- [15] SMARTEC B.V. *SMT16030 DIGITAL TEMPERATURE SENSOR: datasheet* [online]. 2005 [cit. 9.12.2013]. Dostupné z: <http://www.smartec.nl/pdf/DSSMT16030.PDF>
- [16] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů*. 2. vyd. Praha: BEN, 1997, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [17] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. 2. vyd. Plzeň: Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998, 181 s.
- [18] OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS. *Golden DRAGON Plus: LCW W5AM datasheet* [online]. 2010, 24 s., 26.8.2010 [cit. 25.5.2014]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/311/lcww5am-197038.pdf>
- [19] LINEAR TECHNOLOGY. *LT3755/LT3755-1/LT3755-2: datasheet* [online]. 2010, 26 s. [cit. 25.5.2014]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/37551fd.pdf>
- [20] MEAN WELL. *LPV-100 series: datasheet* [online]. 2014, 2 s., 27.3.2014 [cit. 25.5.2014]. Dostupné z: <http://www.meanwell.com/search/lpv-100/LPV-100-spec.pdf>
- [21] Arduino UNO. *Arduino* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [22] DVOŘÁČEK, Vladimír. Světelné zdroje: halogenové žárovky. *SVĚTLO: časopis pro světlo a osvětlování* [online]. 2008, roč. 2008, č. 05 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetelne-zdroje---halogenove-zarovky-37973.html>
- [23] PHILIPS. *TL-X XL: TL-X XL 65W/33-640 ISL datasheet* [online]. 2014, 2 s. [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: http://download.p4c.philips.com/l4b/9/928038203332_eu/928038203332_eu_pss_cesc_z.pdf
- [24] OSRAM. *OSRAM ENDURA: datasheet* [online]. 2014 [cit. 2014-05-25]. Dostupné z: <http://www.osram.cz/media/resource/hires/333886/endura-quicktronic-system--qt-endura.pdf>

SEZNAM ZKRATEK, VELIČIN A SYMBOLŮ

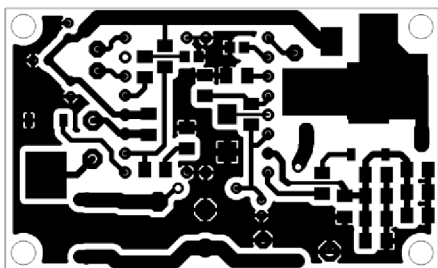
AD		analogově-digitální
B _{xx}	[h]	úmrtnost, místo xx je hodnota v %
c	[m/s]	rychlost světla
C	[F]	kapacita
Δ		symbol pro rozdíl (teploty, napětí, apod.)
DPS		Deska Plošných Spojů
e	[C]	náboj elektronu
E	[eV]	energie zakázaného pásu
f	[Hz]	frekvence
Φ_e	[W]	optický výkon
η	[-]	účinnost
h	[J.s]	Planckova konstanta
I	[A]	elektrický proud
Φ	[lm]	světelný tok
L	[H]	indukčnost
λ	[m]	vlnová délka
LED		Light Emitting Diode, dioda vytvářející světlo
L _{xx}	[h]	svítivost, místo xx je hodnota v %
NTC		Negative Thermal Coefficient, záporná teplotní závislost
P	[W]	elektrický výkon
P _{opt}	[W]	optický výkon
PTC		Positive Thermal Coefficient, kladná teplotní závislost
PWM		Pulse Wide Modulation, pulzně šířková modulace
R	[Ω]	elektrický odpor
RGB		Red Green Blue, kombinace červené, zelené a modré barvy
R _{th}	[°C/W] [K/W]	tepelný odpor
SMD		Surface Mounted Device, povrchově montovaná součástka
T	[K]	teplota bílého světla
T _j	[°C]	teplota PN přechodu

THT	Thru Hole Technology, technologie montáže vývodových součástek
T_s	[°C] teplota povrchu LED
U	[V] elektrické napětí
UV	Ultra Violet, ultrafialové záření
YAG	Yttrium-Aluminium Garnet, yttrito-hlinitý granát

SEZNAM PŘÍLOH

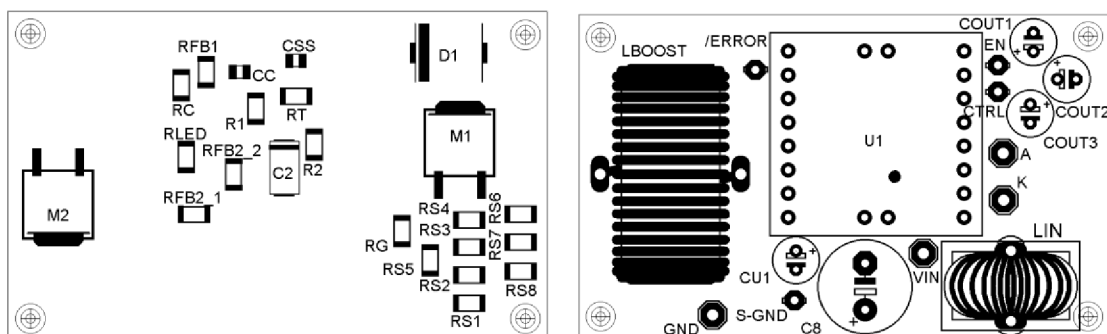
A 1: DPS LED driveru ze strany spojů (bottom)	61
A 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS LED driveru	61
A 3: Seznam součástek použitých na LED driver	61
B 1: DPS řídicí části ze strany spojů (bottom)	63
B 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS řídicí části	63
B 3: Seznam součástek použitých na řídicí část	63
B 4: Vývojový diagram základního ovládacího programu mikroprocesoru.....	65
C 1: DPS napájecí části ze strany spojů (bottom).....	66
C 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS řídicí části.....	66
C 3: Seznam součástek použitých na napájecí část.....	66
D 1: DPS pro LED ze strany součástek (top)	68
D 2: Osazovací předpis SMD součástek DPS pro LED	68
D 3: Seznam součástek použitých na DPS pro LED	68

A 1: DPS LED driveru ze strany spojů (bottom)



Rozměry DPS: 57,5 x 35 mm. Měřítko: 1:1

A 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS LED driveru

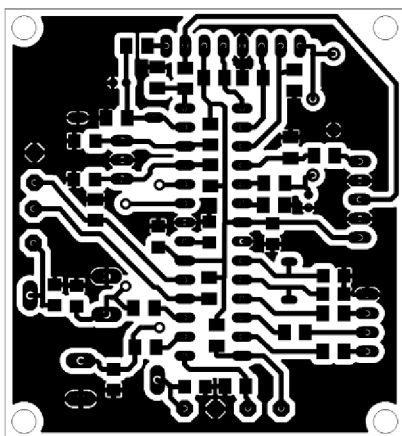


A 3: Seznam součástek použitých na LED driver

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C2	6,8 μ F 16 V	SMD 6032	Tantalový kondenzátor
CC	2,2 nF	SMD 0805	Keramický kondenzátor
CIN	220 μ F 35 V	E5-10,5	Elektrolytický kondenzátor
COUT1	10 μ F 63 V	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
COUT2	10 μ F 63 V	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
COUT3	10 μ F 63 V	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
CSS	10 nF	SMD 0805	Keramický kondenzátor
CU1	0,47 μ F 50 V	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
D1	SK810	SMC	Schottkyho dioda
LBOOST	51 μ H 5 A	SFT1240	Toroidní indukčnost
LIN	2 μ H 5 A	A26GFC	Toroidní indukčnost
M1	LR2908	TO-252	Tranzistor MOSFET
M2	LR2908	TO-252	Tranzistor MOSFET
R1	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
R2	15 k Ω	SMD 1206	Rezistor

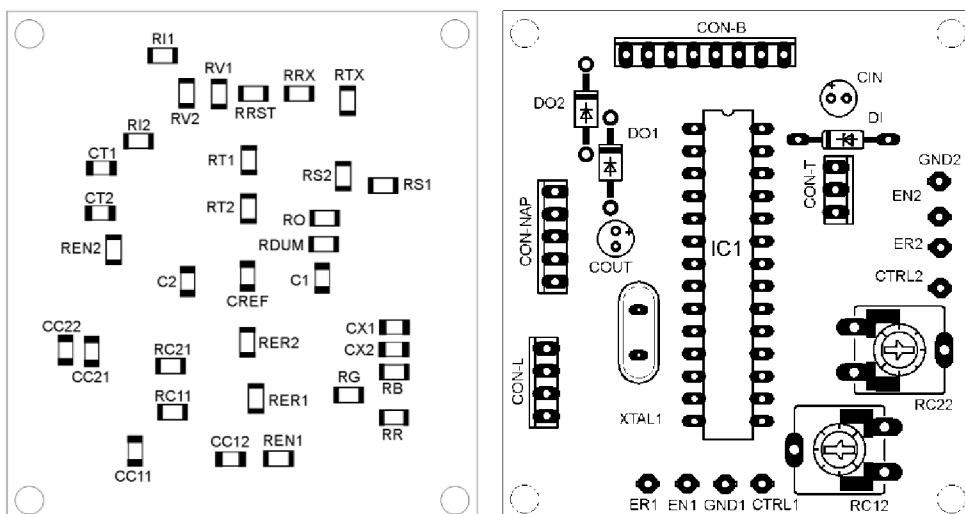
RC	22 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RFB1	1 M Ω	SMD 1206	Rezistor
RFB2_1	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RFB2_2	15 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RG	9,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RLED	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS1	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS2	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS3	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS4	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS5	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS6	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS7	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RS8	0,1 Ω	SMD 1206	Rezistor
RT	100 k Ω	SMD 1206	Rezistor
U1	LT3755	MSOP-16 (v redukci)	LED driver

B 1: DPS řídicí části ze strany spojů (bottom)



Rozměry DPS: 53 x 57,5 mm. Měřítko: 1:1

B 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS řídicí části

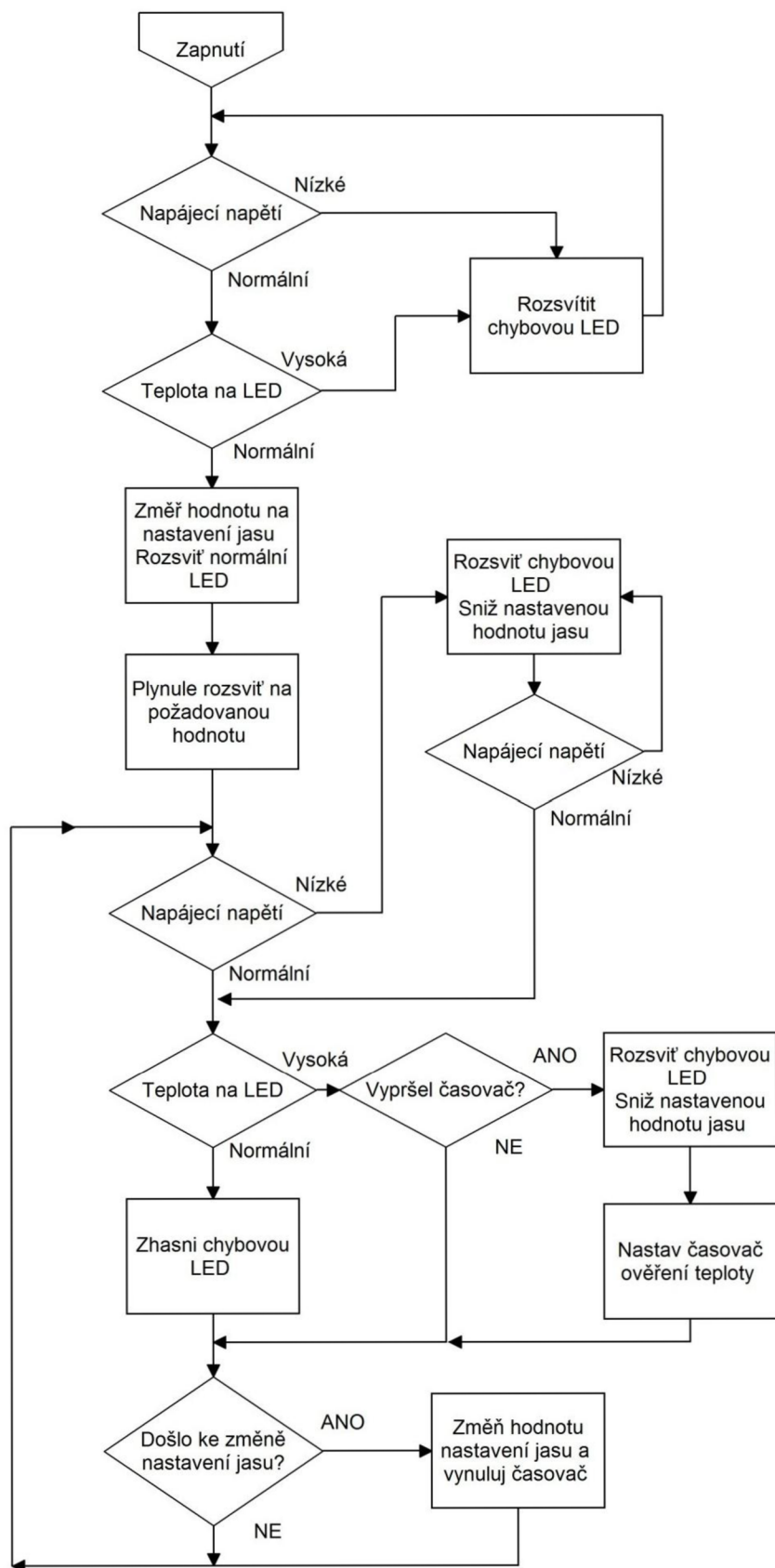


B 3: Seznam součástek použitých na řídicí část

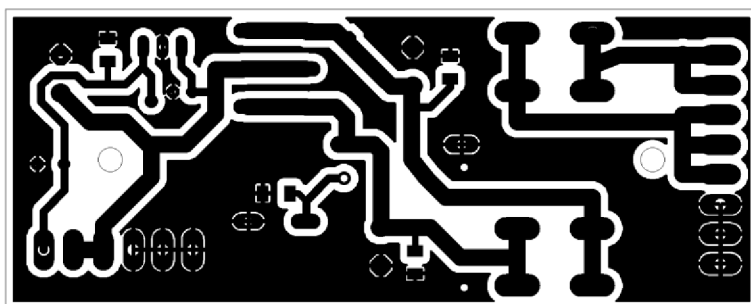
Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
C2	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CC11	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CC12	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CC21	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CC22	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CIN	1 μ F 16 V	E1,8-4	Elektrolytický kondenzátor
COUT	1 μ F 16 V	E1,8-4	Elektrolytický kondenzátor
CON-B	-	10x08MTA	Konektor
CON-L	-	10x04MTA	Konektor

CON-NAP	-	10x05MTA	Konektor
CON-T	-	10x03MTA	Konektor
CREF	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CT1	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CT2	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CX1	22 pF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
CX2	22 pF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
DI	1N821	DO35Z10	Zenerova dioda
DO1	1N4004	DO41-10	Dioda
DO2	1N4004	DO41-10	Dioda
IC1	ATMEGA328P-PU	DIL28-3	Mikroprocesor
RB	680 Ω	SMD 1206	Rezistor
RC11	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RC12	250 k Ω	CA9V	Odporový trimr
RC21	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RC22	250 k Ω	CA9V	Odporový trimr
RDUM	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
REN1	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
REN2	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RER1	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RER2	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RG	680 Ω	SMD 1206	Rezistor
RI1	100 Ω	SMD 1206	Rezistor
RI2	100 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RO	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RR	680 Ω	SMD 1206	Rezistor
RRST	10 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RRX	15 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RS1	22 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RS2	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RT1	1,2 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RT2	1,2 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RTX	15 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RV1	27 k Ω	SMD 1206	Rezistor
RV2	4,7 k Ω	SMD 1206	Rezistor
XTAL1	16 MHz	Q5	Krystal

B 4: Vývojový diagram základního ovládacího programu mikroprocesoru

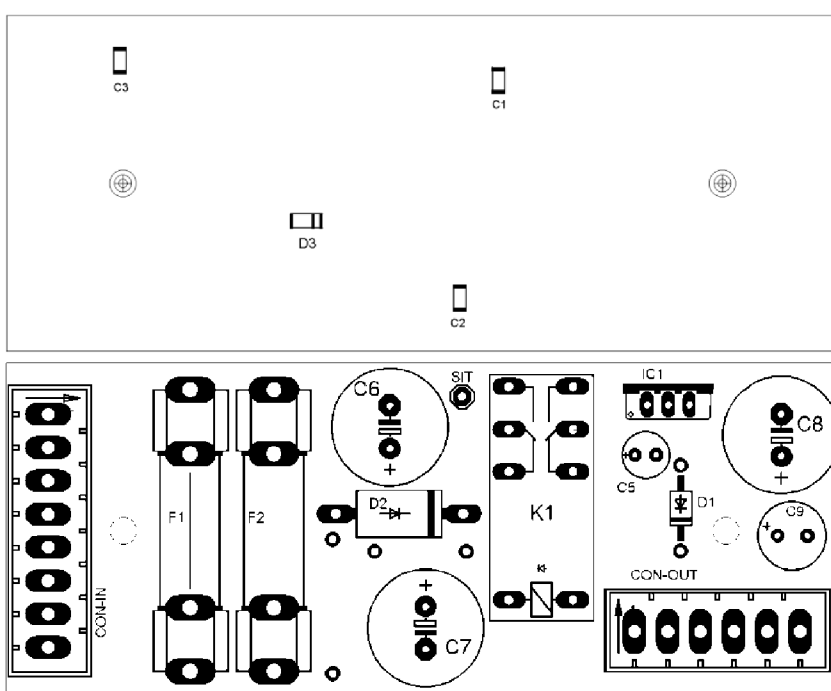


C 1: DPS napájecí části ze strany spojů (bottom)



Rozměry: 100 x 40 mm. Měřítko 1:1

C 2: Osazovací předpis SMD a THT součástek na DPS řídicí části

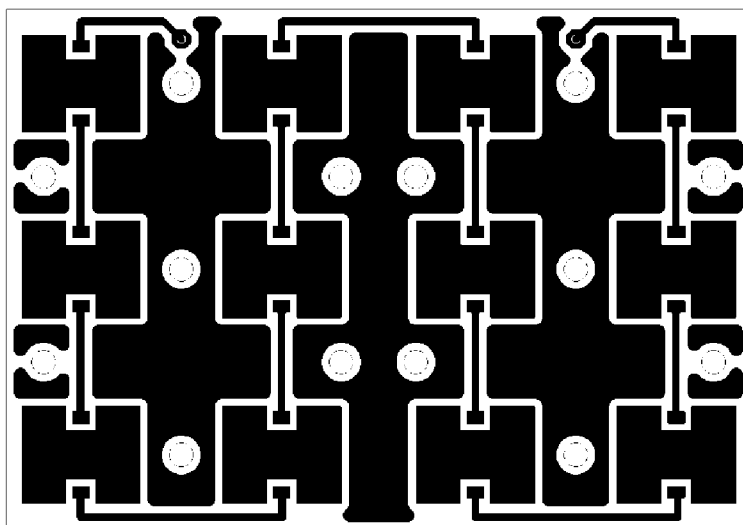


C 3: Seznam součástek použitých na napájecí část

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
C1	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
C2	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
C3	100 nF	SMD 1206	Keramický kondenzátor
C5	0,33 μ F 50 V	E2,5-6E	Elektrolytický kondenzátor
C6	220 μ F 35 V	E5-13	Elektrolytický kondenzátor
C7	100 μ F 50 V	E5-13	Elektrolytický kondenzátor
C8	470 μ F 50 V	E5-13	Elektrolytický kondenzátor
C9	330 μ F 16 V	E3,5-8	Elektrolytický kondenzátor
CON-IN	-	MT6-8	Konektor

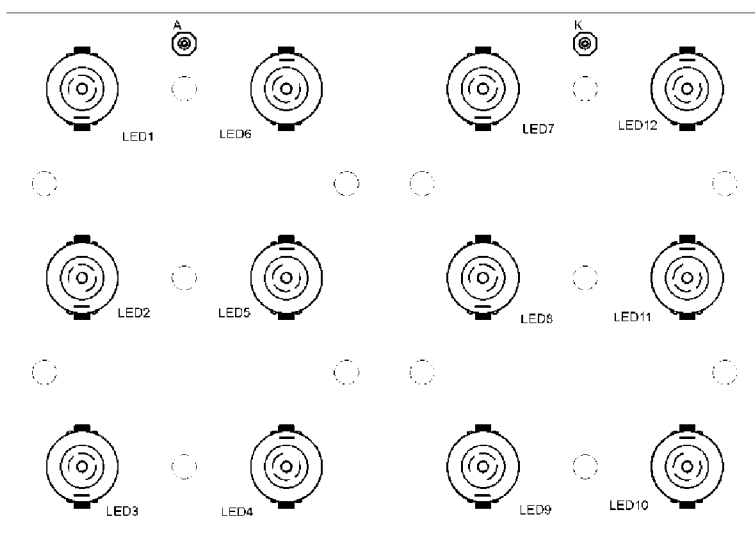
CON-OUT	-	MT6-6	Konektor
D1	1N4004	DO41-10	Dioda
D2	30DF6	DO201-15	Schottkyho dioda
D3	1N4007	SOD-123_MINI-SMA	Dioda
F1	5A	SH32	Pojistkové pouzdro
F2	10A	SH32	Pojistkové pouzdro
IC1	7805TV	TO-220	Stabilizátor napětí
K1	RM 94P-24	F4052	Elektromagnetické relé

D 1: DPS pro LED ze strany součástek (top)



Rozměry: 100 x 70 mm. Měřítko: 1:1

D 2: Osazovací předpis SMD součástek DPS pro LED



D 3: Seznam součástek použitých na DPS pro LED

Součástka	Hodnota	Pouzdro	Poznámka
LED1 až LED12	LAW51M	W51	LED