

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2010**

**Bc. Adámek Martin**

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroniky**

**Driver pro výkonový LED modul  
Power LED driver**

**2010**

**Bc. Adámek Martin**

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Adámek**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 2612T015 Elektronika  
Téma: **Driver pro výkonový LED modul  
Power LED Driver**

Zásady pro vypracování:

1. Problematika řízení proudu výkonových LED
2. Navrhněte a realizujte zapojení driveru pro výkonový LED modul
3. Správnou činnost realizovaného zapojení ověřte měřeními

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího závěrečné práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Pavelek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010



A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Pálacký".

doc. Ing. Petr Pálacký, Ph.D.  
vedoucí katedry

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Vondrák".

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

„Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem zde všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

.....  
Datum odevzdání

.....  
Bc. Adámek Martin

## **Poděkování:**

Děkuji panu Ing. Tomáši Pavelkovi Ph.D. za odbornou pomoc při realizaci této diplomové práce ve formě konzultací a doporučení literatury.

## **Abstrakt:**

První část diplomové práce je zaměřena na popis fyzikálních, konstrukčních a užitkových vlastností LED diod. V následující kapitole teoretické části je hlouběji rozvedena problematika řízení proudu LED diod s ukázkou principiálních řešení. Nejdříve jsou zde definovány typy proudových zdrojů používaných k napájení LED, následuje uvedení způsobů řízení proudu při větším počtu LED a nakonec je zde rozvedena problematika analogového a digitálního PWM stmívání.

Druhá část diplomové práce se zabývá návrhem a realizací driveru pro výkonový LED modul. Jednotlivé části návrhu a realizace jsou popsány v logickém sledu. Také jsou zde zaznamenány a popsány průběhy získané při kontrolním měření. V závěru práce je shrnutí výsledků teoretické i měřicí části a také naznačení pokračování práce.

## **Klíčová slova:**

Elektroluminiscence, LED dioda, budič LED diod, proudový zdroj, PWM stmívání

## **Abstract:**

The first part of this thesis is focused on physical, constructional and commercial properties of LED diodes. In the next chapter of theoretic part there is further elaborated the problems of LED current control with an example principled solution. First, there are defined types of current sources used to power LED, after that followed introduction current control methods for applications with more LED and in the end of this part there is elaborated the analog and digital PWM dimming.

The second part of thesis discusses a concept and realization of power LED driver. Individual parts of concept and realization are described in a logical sequence. There are also recorded and described waveform obtained during control measurements. In conclusion of the thesis is summary of results of the theoretical and measurement part and also suggest of continuation the work.

## **Key words:**

Electroluminescence, LED diode, LED driver, current source, PWM dimming

## Seznam použitých symbolů a zkratk:

### Použité zkratky a pojmy

AWB	barevný profil využívající barev amber, white blue
CCT	teplotní korelace (Correlated Color Temperature)
CMOS	technologie polovodičů (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
DPS	deska plošných spojů
IO	integrovaný obvod
LED	elektroluminiscenční dioda (Light Emitting Diode)
NAND	negovaný logický součin
N-MOSFET	unipolární tranzistor s vodivostním kanálem typu N
PWM	pulsně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
P-MOSFET	unipolární tranzistor s vodivostním kanálem typu P
RGB	barevný profil využívající barev red, green, blue
WLED	bílá elektroluminiscenční dioda (White Light Emitting Diode)

### Použité symboly a veličiny

$c$	[ $\text{ms}^{-1}$ ]	rychlost světla	SNR	[dB]	odstup signálu od šumu
$C$	[F]	kapacita kondenzátoru	$T$	[s]	perioda
$CZ$	[-]	kontrastní poměr	$t_D$	[s]	doba zpoždění
$D$	[%]	střída	$t_{ON}$	[s]	doba sepnutí
$f$	[Hz]	frekvence	$t_{SU}$	[s]	doba náběhu
$h$	[Js]	Planckova konstanta	$t_{SD}$	[s]	doba poklesu
$I$	[A]	elektrický proud	$U$	[V]	elektrické napětí
$I_{LED}$	[A]	proud LED diodou	$\nu$	[Hz]	frekvence záření
$I_{SENS}$	[A]	proud na snímacím odporu	$V_O$	[V]	výstupní napětí
$L$	[H]	indukčnost	$V_{FB}$	[V]	zpětnovazební napětí
Lumen	[lm]	jedn. světelného toku ( $\Phi$ )	$V_{SENS}$	[V]	napětí na snímacím odporu
$R$	[ $\Omega$ ]	ohmický odpor	$W$	[J]	energie
			$\lambda$	[m]	vlnová délka

# Obsah:

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LED DIODY PRINCIPY, STRUKTURA, PARAMETRY</b> .....	<b>2</b>
2.1.	PRINCIP ELEKTROLUMINISCENCE .....	2
2.2.	STRUKTURA LED DIOD .....	4
2.3.	PRINCIP ŘÍZENÍ LED DIOD .....	6
2.4.	VÝHODY A NEVÝHODY LED DIOD .....	7
2.5.	POUŽITÍ LED DIOD .....	8
<b>3</b>	<b>ZPŮSOBY ŘÍZENÍ PROUDU VÝKONOVÝCH LED</b> .....	<b>9</b>
3.1.	PRINCIP PROUDOVÉHO ZDROJE .....	9
3.1.1.	<i>Důvody použití spínaných zdrojů u výkonových LED</i> .....	10
3.2.	FUNKČNÍ TOPOLOGIE BUDIČŮ VÝKONOVÝCH LED .....	11
3.2.1.	<i>Buck topologie (step-down)</i> .....	11
3.2.2.	<i>Boost topologie (step-up)</i> .....	12
3.2.3.	<i>Buck-Boost topologie (invert convertor)</i> .....	13
3.2.4.	<i>SEPIC topologie (single ended primary inductor converter)</i> .....	14
3.3.	TOPOLOGIE ZAPOJENÍ VĚTŠÍHO POČTU VÝKONOVÝCH LED .....	15
3.3.1.	<i>Se společným nastavením proudů ve větvích</i> .....	15
3.3.2.	<i>S rozdělením nastavení proudů ve větvích</i> .....	16
3.4.	DIMMING (STMÍVÁNÍ) .....	17
3.4.1.	<i>Obecné rozdělení metod stmívání</i> .....	17
3.4.2.	<i>Problematika PWM dimmingu</i> .....	18
3.4.2.1.	<i>Analogové stmívání vs. Digitální PWM stmívání</i> .....	18
3.4.2.2.	<i>Stmívací frekvence a kontrastní poměr</i> .....	19
3.4.2.3.	<i>Nízkofrekvenční PWM řešení</i> .....	20
3.4.2.4.	<i>Vysokofrekvenční PWM řešení</i> .....	21
<b>4</b>	<b>REALIZACE DRIVERU PRO VÝKONOVÝ LED MODUL</b> .....	<b>23</b>
4.1.	NÁVRH .....	23
4.1.1.	<i>Návrh zdroje konstantního proudu</i> .....	23
4.1.2.	<i>Návrh vysokofrekvenční PWM modulace</i> .....	28
4.2.	KONSTRUKCE .....	31
4.3.	MĚŘENÍ .....	36
4.3.1.	<i>Proudový zdroj</i> .....	36
4.3.2.	<i>PWM modulace (stmívání)</i> .....	38
4.3.3.	<i>PWM modulace (stmívání) v praxi</i> .....	43
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>44</b>

# 1 Úvod

Dnes byste v obydlených částech světa těžko hledali místa, kde by noc byla opravdovou nocí, kdy za novu nevidíte ani na krok. Světlo ve tmě se pro společnost zprvu stalo nedílnou součástí nočního života a pocitu bezpečí. S vývojem společnosti se k těmto základním „funkcím“ světla v noci přidávají další, dnes již neodmyslitelné funkce, jako osvětlení automobilů, podsvícení displayů, stroboskopy, reklamní poutače či jen stylové a atmosférické osvětlení v domovech.

Stejně jako všechna technická odvětví procházejí vývojem, tak i v oblasti osvětlení nalzáme postupný vývoj, který společnost očekává. Od ohniště uprostřed tábora přes olejové a plynové lampy jsme se vývojem dostali do roku 1805, kdy anglický experimentátor Humphry Davy začal pokusy se vznikem světla žhavením materiálu elektrickým proudem. Tyto pokusy o téměř půlstoletí později využil americký vynálezce T. A. Edison a svět objevil zázrak v podobě žárovky. Avšak vzrůstající počet osvětlovacích zařízení znamenal i narůstající náročnost na energii. Tento trend by se postupem času stával pro společnost neúnosným, a tak se hledala úspornější řešení ve formě výbojek, zářivek a dalších, až do aktuálních LED svítidel.

LED svítidla přinesla nejen úsporu až 80% energie, ale navíc díky své rozmanitosti a minimálním rozměrům dopomohla k novým využitím světelných zdrojů. Nicméně i tento typ svítidla má své zápory. Hlavními nevýhodami LED diod jsou, že mají nižší světelný komfort, který je nejvíce poznat např. při čtení, a také to, že ke své funkci potřebují vlastní budiče proudového charakteru. Nyní se tedy vývoj upírá nejen na nové materiály, konstrukce a technologie samotných LED, ale také na různé způsoby řízení tohoto typu osvětlení a jejich konstrukční řešení. I přes tyto dosavadní nevýhody se však zdá, že pokud by se povedlo je rozumně eliminovat, mohla by se tato technologie stát hlavním hybatelem osvětlení pro 21. století.



## 2 LED diody principy, struktura, parametry

Název LED je složen z počátečních písmen Light emitting diode, což znamená světlo emitující dioda. Svou povahou je řazena mezi aktivní polovodičové prvky, u kterých dochází k přímé přeměně elektrické energie na světelnou. Tento proces probíhá s minimálními elektrickými ztrátami, což je důležitým faktem k jejich rozšíření.

### 2.1. Princip elektroluminiscence

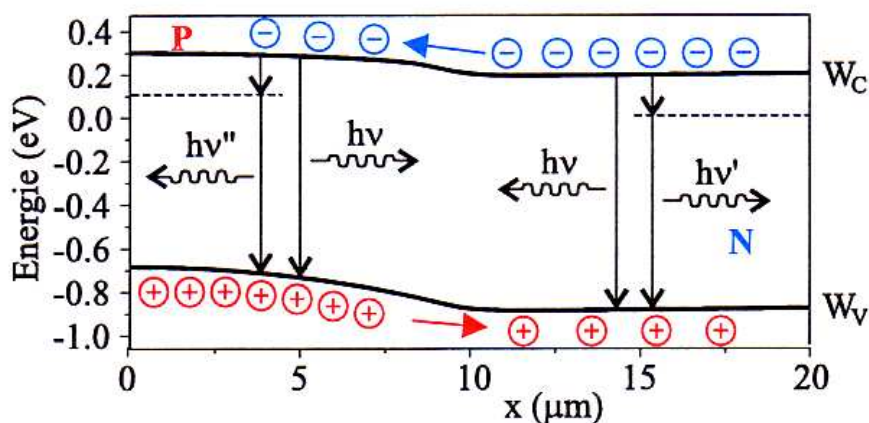
Klasické žárovky pracují na principu přeměny elektrické energie rozžhavením vlákna (většinou wolframové). A to tak, že atomy vázané v atomové struktuře vlákna jsou tepelně excitovány z nižších orbitálních hladin na vyšší orbitální hladiny. Při tomto procesu vznikají fotony, které zde zastupují světelnou část.

Jak už bylo zmíněno, LED diody fungují na principu elektroluminiscence polovodičových materiálů. Světlo zde vzniká taktéž přeskokem elektronů, ale tentokrát z vyšších energetických pásů do nižších. Rozdíl energie mezi dnem vodivostního a vrchem valenčního pásu udává energii vyzářenou ve formě fotonů. Tento jev probíhá u všech diod, ale pouze jen u některých dochází ke vzniku světelného záření. V ostatních případech dochází ke vzniku neviditelného ultrafialového záření, nebo k přeměně na tepelnou energii. Vlnová délka vzniklého záření je nepřímo úměrná vyzářené energii, která odpovídá šířce zakázaného pásu. Tato vlnová délka vzniklého záření  $\lambda$  je určena vztahem [2]:

$$\lambda = c / \nu \quad (1)$$

kde  $c$  je rychlost světla a  $\nu$  frekvence záření

Princip elektroluminiscence blíže vysvětlí následující obrázek:



Obr. 2.1.1 – Princip elektroluminiscence

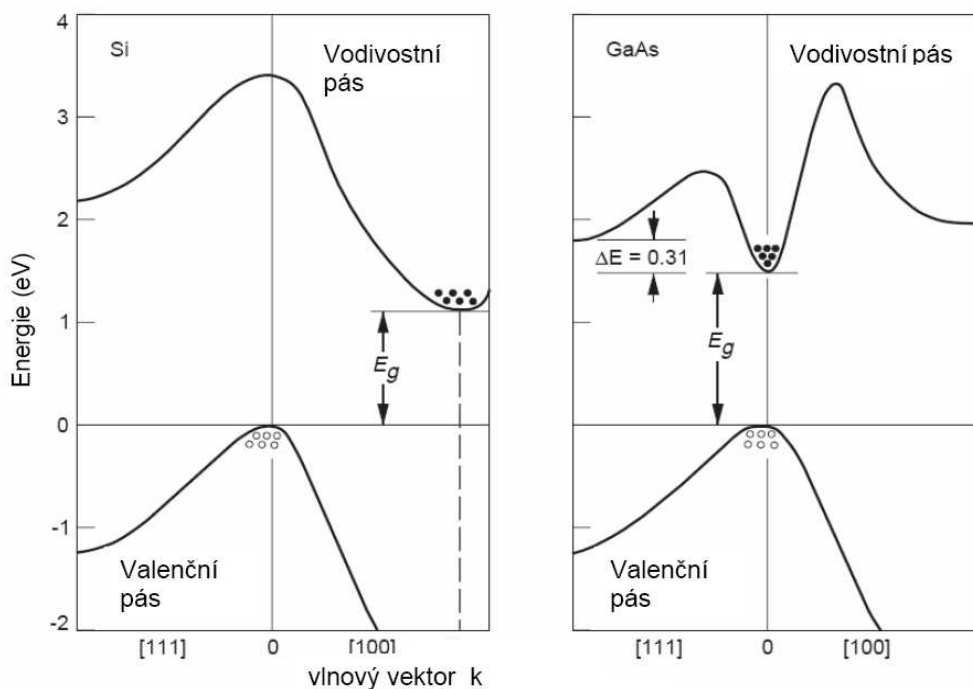
Průchodem elektrického proudu diodou v propustném směru se energie elektronu při mezispásově rekombinaci ( $W_c$  – vodivostní pás;  $W_v$  – valenční pás) uvolňuje ve formě fotonu o energii, pro kterou platí [2]:

$$W = h \cdot \nu \quad (2)$$

kde  $h$  je Planckova konstanta

K přechodu dochází také prostřednictvím příměsových hladin v zakázaném pásu. Emitované záření má pak o něco menší energii, tedy i větší vlnovou délku, na obrázku 2.1.1 je toto záření zastoupeno  $h\nu'$  [2].

Určující závislostí, zdali polovodič bude vyzařovat viditelné spektrum záření nebo ne, je závislost energie valenčního a vodivostního pásu na vektoru  $k$ , viz obrázek 2.1.2, podle níž dělíme polovodiče na přímé a nepřímé [2].



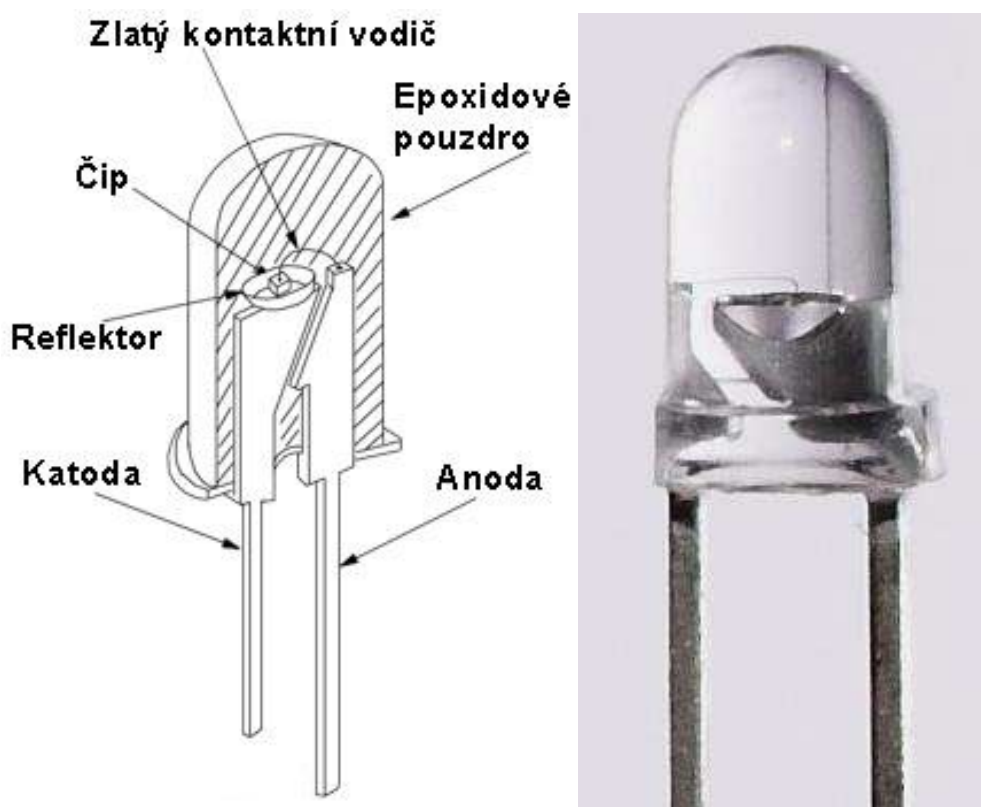
Obr. 2.1.2 – Energetický pásový diagram Si a GaAs při teplotě 300 K

Z energetického pásového diagramu na obrázku 2.1.2, lze definovat přímý polovodič, jenž má sedlo vodivostního pásu a vrchol valenčního pásu proti sobě, např. GaAs. U přímých polovodičů je řádově mnohonásobně větší šance, že při rekombinaci vznikne viditelné záření, na rozdíl od nepřímých vodičů, kde pro rekombinaci samotnou je nutnost využití fotonů [2].

Pro vyjádření účinnosti elektroluminiscence se užívá tzv. výtěžek, tj. spočteme si, kolik energie se vyzáří při průchodu určitého proudu přechodem P-N. Např. průchodem 100 elektronů vznikne v krystalku 60-70 fotonů. Fyzikálně formulováno: kvantový výtěžek této elektroluminiscence je 60-70%. Jinak řečeno – účinnost elektroluminiscenční diody je 60% (žárovka 3%, zářivka 10%) [1].

## 2.2. Struktura LED diod

Standardní jednoduchá struktura LED diod, kde katoda, anoda a čip s P-N přechodem jsou zalaty v epoxidovém pouzdru, jak je zobrazeno na obrázku 2.2.1, zůstávala dlouhou dobu téměř nezměněna. Jediné změny se týkaly zejména materiálů, ze kterých byly vyrobeny jednotlivé části, zvláště pak materiál přechodové destičky, jehož obměnami získala LED dioda různé vlastnosti. Doposud se jako taková používá v oblastech, kde LED diody pracují jako indikační prvky, případně v oblastech nevyžadujících vysoký světelný tok.

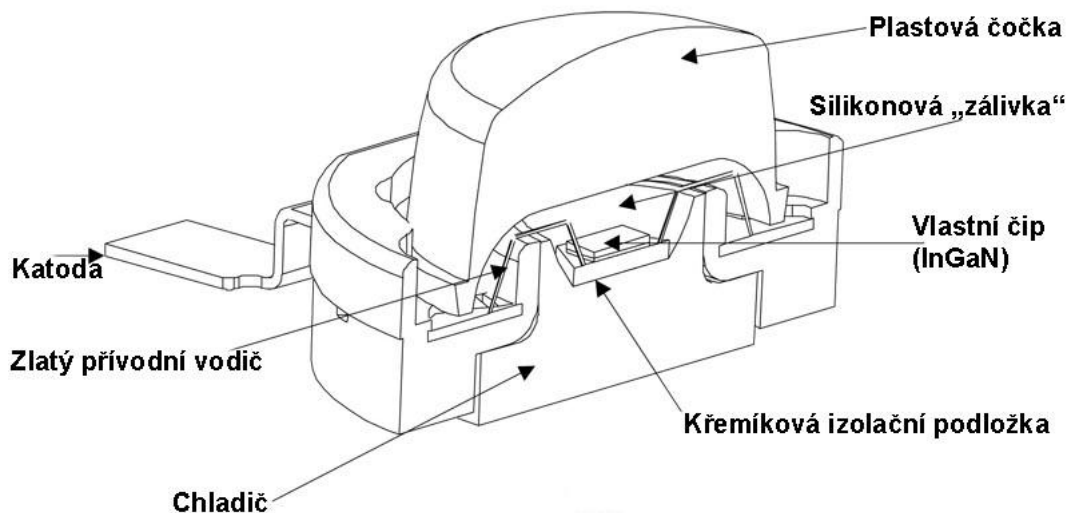


Obr. 2.2.1 – Průřez 5mm LED diodou a skutečná součástka [3]

Se zvyšujícím se nárůstem příkonu LED vyvstal před výrobcí problém spočívající v nutnosti odvést teplo, jež vzniká na polovodičovém přechodu. Původní standardní struktura byla navrhována pro nízké příkony, proto se při narůstání vznikajícího tepla na polovodičovém přechodu zvyšovala i teplota samotného čipu, která následně vedla ke zhoršení parametrů svítivých diod, např. snížení jejich účinnosti, s čímž souvisel i pokles svítivosti a v neposlední řadě rapidní zkrácení životnosti. Příčinou neúměrného narůstání teplot bylo nedostatečné odvádění tepla pouze katodovou nožičkou diody, což při daných průřezích nožičky bylo pro výkonnější LED zcela nemyslitelné.

Aby bylo možné vyrábět LED diody s vyšším příkonem a se srovnatelnou životností, jako měly standardní LED diody, bylo třeba udělat změny v jejich struktuře právě kvůli zmiňovanému problému s ohříváním čipu. Nová konstrukce diod byla tedy podřízena zmenšení tepelného odporu přívodů mezi čipem a pouzdrum diody. Výslednou, zcela pozměněnou koncepcí lze vidět na obrázku 2.2.2, kde je tou nejpodstatnější částí k eliminaci problému s odvodem tepla chladič doléhající skrz

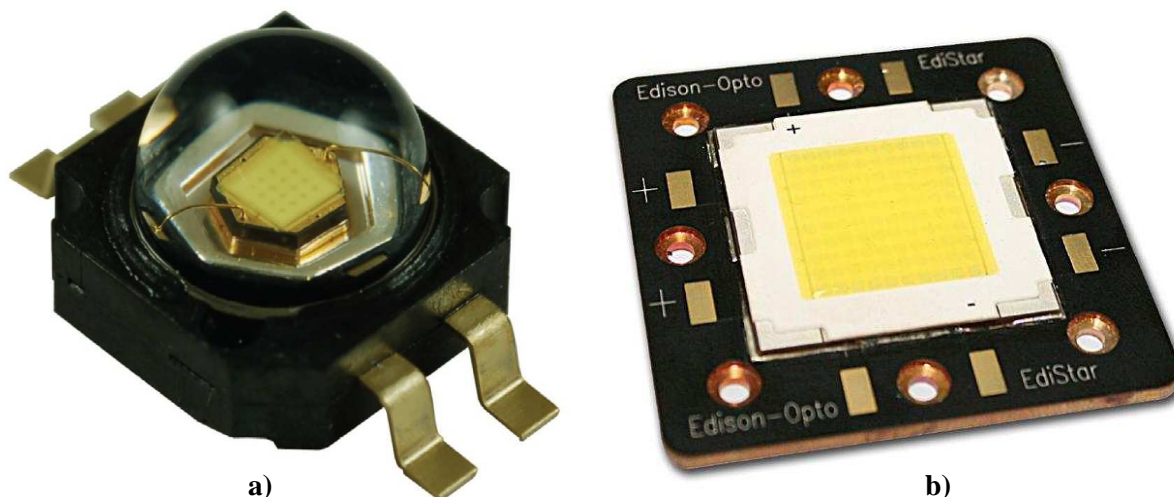
křemíkovou izolační destičku přímo na čip s přechodem. Skutečnou realizaci této nové konstrukce lze vidět na obrázku 2.2.3a [3].



Obr. 2.2.2 – Konstrukční řešení 1W výkonové LED

Nová konstrukce umožnila realizaci LED s příkonem do 5 W, kde však již narazí na své tepelné hranice. V současné době se příkony diod nadále zvyšují i přes tuto hodnotu. Jelikož však nárůst příkonu nemůže být kompenzován zvýšením účinnosti přeměny elektrické energie na světelnou, nastává nám stejný problém jako při přechodu ze standardní konstrukce na novou.

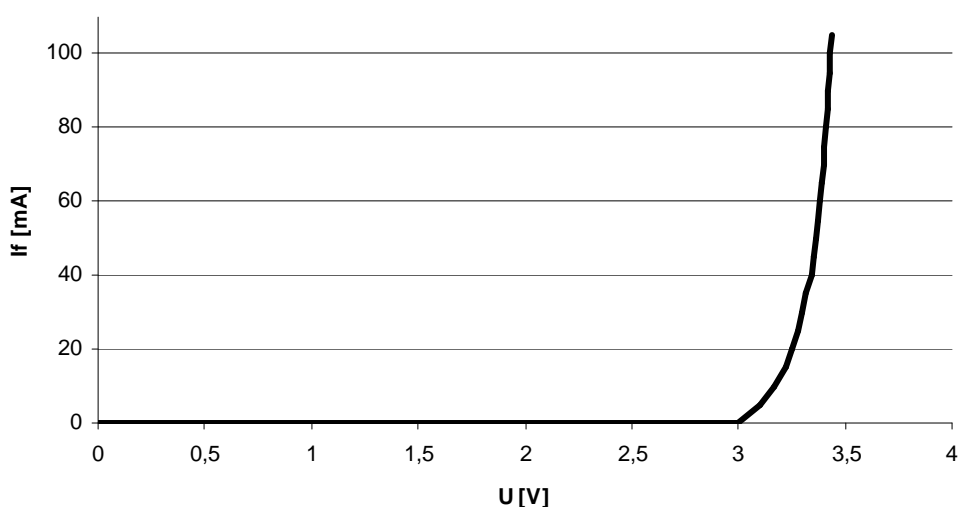
Vývojáři se opět zaměřili na změnu konstrukce tak, aby splnili teplotní limity čipů. Stávající LED diody s příkonem nad 5 W svým pouzdem připomínají spíše mikroprocesory pro stolní počítače, jak je ukázáno na obrázku 2.2.3b. Jedná se o velké ploché pouzdro čtvercového tvaru, kde jedna strana pouzdra slouží k odvodu tepla od čipu a druhá k emitování světla [3].



Obr. 2.2.3 – Průmyslové realizace výkonový led diod [4]  
a) 5 W LED dioda Luxeon K2 b) 100 W LED dioda Edistar

## 2.3. Princip řízení LED diod

V předchozích kapitolách byl objasněn princip elektroluminiscence, z něhož vyplývá, že svítivost LED diod lze řídit zejména procházejícím proudem, jehož rekombinací dochází k uvolňování fotonů. Nabízí se zde také možnost řízení svítivosti diody napětím, ale již z voltampérové charakteristiky na obrázku 2.3.1, která je stejná jako u běžné polovodičové diody, je jasné, že při malé změně napětí v propustném směru by došlo k veliké změně proudu. Naopak z pohledu změny proudu se jeví napětí téměř jako konstantní. Proto se pro řízení svítivosti led používají proudové zdroje. Vzhledem k vlastnostem P-N přechodu (propustný nebo závěrný směr) a předchozím závěrům lze říci, že řízení střídavý proudem je pro LED diody velice neefektivní, neboť proud prochází součástkou pouze po dobu jedné půlperiody.



Obr. 2.3.1 – Obecná voltampérová charakteristika LED diody v propustném směru

Dostáváme se tak k faktu, že nejideálnější způsobem řízení svítivosti LED diod je skrze stejnosměrné proudové pulsy, kde svítivost úměrně roste s dobou vedení pulsu při určité frekvenci. Jelikož po příchodu proudového impulsu se světelný tok na diodě objeví v pouhé miliardtině vteřiny a na plný výkon, lze diodu spínat s frekvencí v řádu GHz. Avšak k těmto hodnotám se prakticky ani nepřiblížíme, vzhledem k omezeným frekvenčním možnostem budičů, které se reálně pohybují v řádech MHz [1].

Na rozdíl od svítivosti, barvu LED diody nelze proudově řídit, proto zde záleží na materiálech, ze kterých se vyrobí daný barevný druh, případně se použije barevný filtr. Posledním řešením řízení barvy je skládání základních barev. Tato metoda se používá zejména u výkonových LED modulů, které jsou řešeny jako struktura tří základních LED diod, červené, zelené a modré (tzv. RGB – red, green, blue), tyto jednotlivé barvy jsou různě tlumeny (proudové řízení jednotlivých diod), a výsledkem tohoto způsobu řízení je celé spektrum duhy bez jakékoliv ztráty světla. Ve speciálních případech se pro imitaci denního světla využívá kombinace jantarové, bílé a modré (tzv. AWB – amber, white, blue).

## 2.4. Výhody a nevýhody LED diod

Spousta dobrých vlastností byla hnací silou pro široké rozšíření těchto struktur a i nyní se LED diody mohou těšit dobrým vyhlídkám právě díky těmto vlastnostem [5][6]:

- ✚ Vyšší účinnost, kdy produkují více světla na watt než žárovky (nejmodernější kolem 160 lm/W). Toho se využívá v zařízeních napájených bateriemi, např. světlo na kolo.
- ✚ Mohou realizovat požadovanou barvu bez použití barevných filtrů, což zvyšuje účinnost.
- ✚ Miniaturní velikosti (menší než 2 mm<sup>2</sup>) se snadno dají osadit na desky plošných spojů.
- ✚ On/Off časy jsou velice krátké, v řádech mikrosekund, v telekomunikacích i mnohonásobně kratší, taktéž spínací režim nemá takový dopad na jejich životnost.
- ✚ Dají se jednoduše stmívat pomocí PWM modulace bez vlivu na vyzařovanou barvu nebo snížením propustného proudu, kde se však již objevuje vliv teplotní korelace.
- ✚ Dlouhá životnost až 50-100 tisíc hodin oproti zářivkám s 10-15 tisíc nebo žárovkám 1-2 tisíci hodin.
- ✚ Většinou dochází k postupnému selhání úbytkem jasu na rozdíl od přerušení vlákna u žárovek.
- ✚ Odolnost proti nárazu, neboť jsou vyrobeny z pevných polovodičových destiček.
- ✚ Pouzdra mohou být navržena tak, aby soustředila světlo určitým směrem.

Avšak ani LED diody nejsou dokonalým svítidlem a mají i své nedostatky, které brání tomu, aby tato technologie nahradila všechny ostatní. Zde je výběr těch nejpodstatnějších [5][6]:

- ✚ V současné době jsou pořizovací náklady, počítáno za lumen, vyšší než u standardních typů osvětlení. Tyto náklady vycházejí z toho, že je třeba použít více diod na dosažení stejného světelného toku. Dále je třeba připočítat nutné náklady na zdroj a řízení.
- ✚ Výkonnostní závislost na teplotě je problémem zejména v automobilové vojenské či lékařské technice, kdy je požadována vysoká spolehlivost a stálost v širokém rozsahu.
- ✚ Musí být napájeny vhodným proudem a napětím, kdy napětí je žádané nadprahové a proud je omezen konstrukčními možnostmi.
- ✚ Barvy se pod bílým LED diodovým světlem zkreslují.
- ✚ Bez dodatečných úprav vyzařují světlo jen v úzkém paprsku.
- ✚ Až do nedávna byl značnou nevýhodou krátký dosvit, avšak s posledními výkonnými LED diodami se vyrovnají halogenovým žárovkám s dosvitem až 50 m.

## 2.5. Použití LED diod

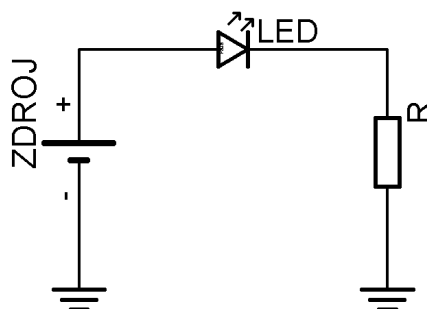
Vzhledem k variabilitě konstrukce a možnostem samotné technologie, je zcela logické, že tyto osvětlovací prvky nalezneme v mnoha oblastech, od miniaturních bodovek přes interiéry domovů, osvětlení zařízení až po obrovské světelné tabule na sportovních stadionech. Některé z možných použití zahrnuje i tento výčet [5][6]:

- ✚ Architektonické a estetické osvětlení.
- ✚ Indikační LEDky stavů na všech typech zařízení (automatizační technika apod.)
- ✚ Dopravní světla a značení s neustálým spínacím režimem.
- ✚ Označení nouzových východů, vodící body, případně podsvícení vypínačů.
- ✚ Světla na motocyklech, nebo cyklo-světla různých typů a barev.
- ✚ Hračky, modely železnic a různé zdravotní pomůcky.
- ✚ Moderní bateriové svítilny.
- ✚ Některé typy LED diod reagují i na světlo – světelná čidla, fotostřelnice, fototerče.
- ✚ Informační tabule na letištích a železničních stanicích.
- ✚ Využívány jako zdroj signálu u optických vláken, nebo bezdrátových optických systémů.
- ✚ Osvětlení přístrojů jako hodinky, mobily.
- ✚ Infračervené LED nalezneme ve veškerých dálkových ovladačích, můžeme je také nalézt v levnějších mobilních přístrojích k pomalému přenosu dat pomocí IrDa.
- ✚ Použití v automobilové technice jako brzdová světla, zejména kvůli rychlejšímu rozsvícení, zhruba o 0,5 s rychleji než běžná žárovková světla. Tím by se měl zvýšit prostor pro reakci řidiče a potažmo s tím i bezpečnost na silnicích.
- ✚ V moderních LCD televizích a displejích jako podsvícení. Případně použití barevného atmosférického podsvícení.
- ✚ Použití v IT technice k indikaci práce HDD, případně stavu PC, ve kterém se nachází.
- ✚ Ve velkoplošných obrazovkách v kulturních zařízeních.

## 3 Způsoby řízení proudu výkonových LED

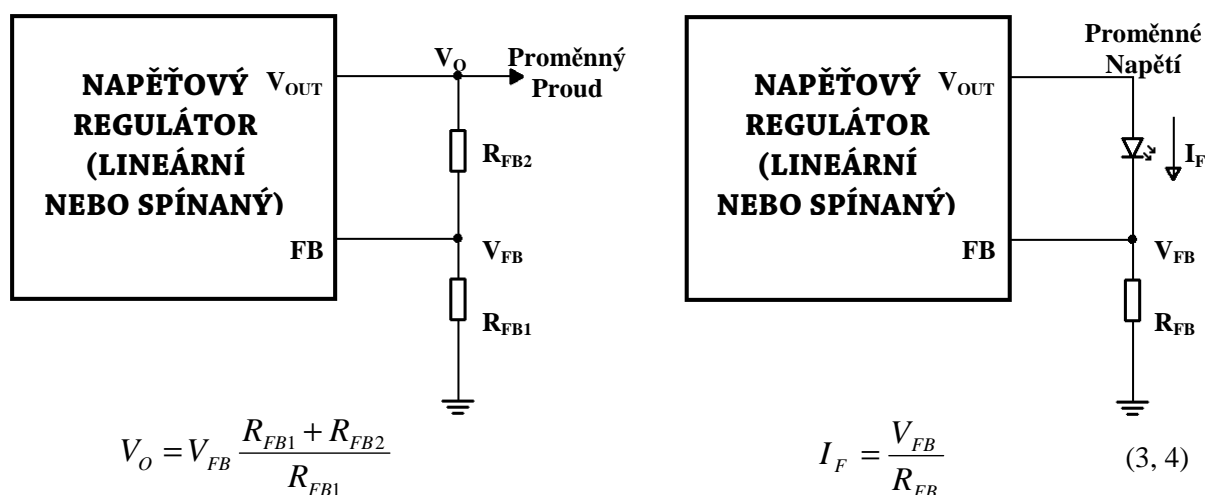
### 3.1. Princip proudového zdroje

Z předešlých kapitol vyplývá, že ideálním napájením výkonových LED jsou zdroje konstantního proudu. Lze snadno realizovat i jednodušší zdroje konstantního proudu, např. pomocí předřadného odporu, viz obrázek 3.1.1. Takovéto řešení je velice levné, prakticky jen cena odporu, a mnohdy také dostačuje, avšak není schopen zajistit stálý proud zátěží, pokud se změní napětí zdroje či zátěže, nehledě na energii, kterou sám zmaří. Proto je toto řešení v náročnějších aplikacích neakceptovatelné.



Obr. 3.1.1 – Zdroj konstantního proudu pomocí předřadného odporu [7]

Dnešní aplikace si, krom eliminace problémů předřadného odporu, také žádají proměnný proud, ve smyslu změny konstantní hodnoty proudu procházejícího LED diodou. Toto řízení lze nejlépe realizovat pomocí spínaných zdrojů napětí, jejichž výstup je zapojen tak, aby převáděl nastavené konstantní výstupní napětí na konstantní výstupní proud. Způsob, jakým je toto realizováno, je objasněn na obrázku 3.1.2.

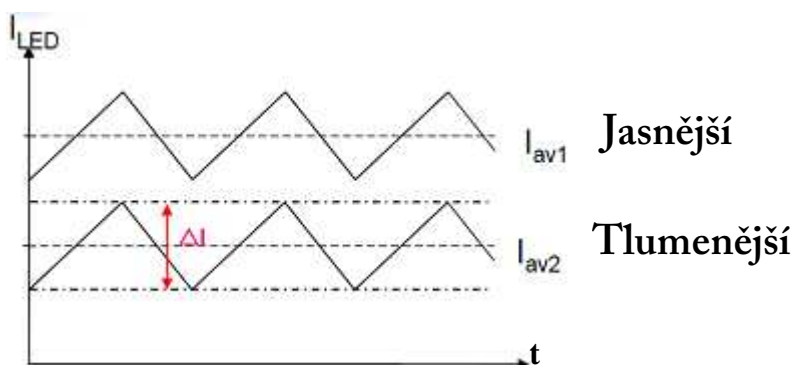


Obr. 3.1.2 – Převod výstupu napěťového regulátoru z konstantního napětí na konstantní proud [7]

Na výstupu a tedy na výkonové LED diodě získáme obecně proud, který je zobrazen na obrázku 3.1.3. Velikost střední hodnoty proudu procházejícího diodou určuje svítivost diody. Platí zde



přímá úměra čím vyšší střední proud, tím vyšší svítivost a naopak. Další rysem je kolísání proudu v určitém rozmezí způsobené metodou, jakou je tento „konstantní proud“ získán.



Obr. 3.1.3 – Průběh konstantního proudu výkonovou LED diodou [7]

Lidské oko není schopné zachytit kolísání svítivosti LED při frekvencích nad 25Hz a stejně tak není schopné poznat kolísání svítivosti (tedy i proudu) v menším než 20% rozptylu. Ve speciálních oblastech využití LED, jako je optický přenos dat, by toto kolísání mohlo vést k hazardům. Avšak při běžných aplikacích je tento průběh proudu zcela dostačující.

Je zřejmé, že podobný průběh proudu lze získat na výstupu zdrojů konstantního proudu, v dnešní době často využívajících struktur spínaných zdrojů

### 3.1.1. Důvody použití spínaných zdrojů u výkonových LED

Důležitou vlastností pro použití spínaných zdrojů místo lineárních (se spojitou regulací) v oblasti výkonových LED je zejména ve způsobu používání výkonového regulačního členu.

Ve spínaných zdrojích je výkonový člen zatěžován impulsně, což znamená, že je střídavě spínán a rozpínán podle přivedených pulsů. Využívají se zde výhody impulsního režimu daného spínacího prvku. Tedy například, že odebíraný impulsní výkon daného výkonového prvku je podstatně větší, než jaký je možné odebírat v lineárním režimu, tedy když je prvek zatěžován neustále. [8]

Dalším důvodem k nasazení spínaných zdrojů jako napájení LED modulů je možnost jejich snadného řízení (stmívání). Zde bylo třeba dosáhnout vyšších pracovních kmitočtů, za účelem získání větší rozlišovací schopnosti řízení. V tomto směru dopomohla k prosazení spínaných měničů zejména výroba rychlých, polovodičových, výkonových, spínacích součástek, feritových jader a malých kondenzátorů s velkou kapacitou. Což s sebou neslo i miniaturizaci a podstatné zlepšení a zpřesnění regulace výstupního napětí, potažmo proudu.

Výrobci se dnes snaží dodávat řídicí obvody již jako integrované obvody, což usnadňuje následný návrh napájecího řízeného impulsního zdroje. K takové součástce se připojí minimum externích součástek a impulsní zdroj je hotový. V oblasti výkonových LED tento řídicí obvod s připojenými okolními strukturami součástek vytváří tzv. budič výkonových LED. Na trh se dodávají budiče s různým výstupním napětím a proudem. Nicméně mezi určující parametry u budičů výkonových LED patří i možnost využití různých topologií spínaných zdrojů.

## 3.2. Funkční topologie budičů výkonových LED

Jak bylo řečeno již dříve, jsou LED z podstaty proudem řízené součástky. To znamená, že jejich svítivost se mění v závislosti na procházejícím proudu. Potom je tedy zásadní řízení LED konstantním proudem k získání požadovaného jasu a v případě RGB a AJW výkonových LED i barvy.

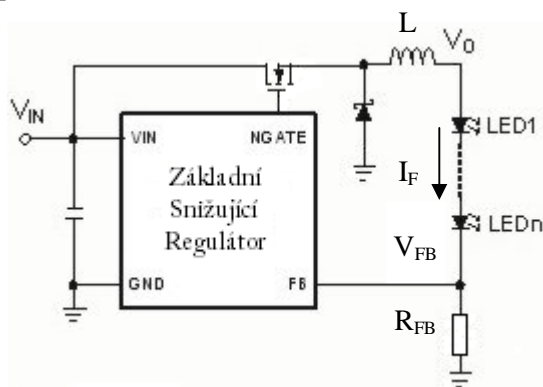
Pro jednoduché aplikace zde máme již zmiňovaný zdroj konstantního proudu s předřadným odporem. Pro mírně náročnější aplikace můžeme použít lineární regulátory, které poskytnou již přesnější řízení proudu protékajícího LED, případně i s malým snižujícím rozsahem nastavení proudu. Avšak mnohé aplikace si žádají široký vstupní rozsah, při vysokých proudech, kde lineární regulátory vykazovaly vysoké výkonové ztráty a špatnou účinnost zhruba 30% při  $U_{IN} = 12V$  a  $I_{OUT} = 1A$  u InGaN LED. Zde se našlo řešení právě v topologiích spínaných regulátorů založených na spínání výkonového prvku, které umožňují řídit výstupní proud pomocí střídavy impulsů. Takto se na výstupu získá pulzující napětí a proud, čímž odpadají předchozí neduhy lineárních regulátorů, např. účinnost u stejného příkladu je 97 %.

Budiče LED se skládají z řídicího obvodu, který realizuje řídicí pulsy pro výkonovou součástku podle vyhodnocení žádané a skutečné výstupní hodnoty, a z „výkonové topologie“ okolních prvků. V oblasti světelné techniky se využívají zejména neizolované topologie, mezi které lze zařadit konfigurace buck, boost, buck-boost a SEPIC.

Podle zapojení budicího obvodu a konfigurace jeho výkonové části lze definovat, v jaké pracovní topologii daný LED driver pracuje [9].

### 3.2.1. Buck topologie (step-down)

Stejně jako všechny další topologie vychází i tato snižující z napěťového regulátoru s převedeným výstupem na proud. Jeho základní schéma lze vidět na obrázku 3.2.1.1



Obr. 3.2.1.1 – Základní schéma LED budiče se snižující topologií [9]

Zmíněné schéma obsahuje indukčnost, která zde nastavuje zvlnění proudu špička-špička. Střední hodnota zvlněného proudu procházejícího indukčností je ve snižující topologii stejná jako proud zátěží  $I_F$ . Proto lze nastavit proud na LED řízením velikosti zvlněného proudu na cívce. To významně zjednodušuje převod konstantního-napěťového zdroje na konstantní-proudový zdroj.

Změnu proudu na cívce docílíme u tohoto typu budiče změnou pracovního cyklu nebo spínací frekvence. Velikost proudu zátěží je pak definována vzorcem (4).

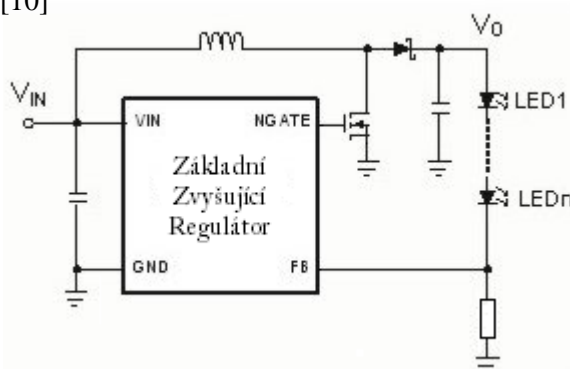
Po nastavení proudu na LED je třeba tento proud pečlivě snímat. Při snímání  $I_F$  pomocí odporu  $R_{FB}$  lze zajistit žádanou přesnost, ale tento způsob může vést ke zvýšení výkonových ztrát na snímacím rezistoru. Snižující napěťová zpětná vazba  $V_{FB}$  umožňuje použít nižší velikosti odporů pro stejný proud  $I_F$ , čímž se minimalizují ztráty. Novější specializované LED budiče poskytují referenční napětí (zpětnovazební napětí) v rozmezí od 50 do 200 milivoltů. [9]

Ze všech topologií je snižující topologie zvláštní tím, že může být jako jediná sestavena bez výstupní kapacity. To s sebou nese dvě hlavní výhody. Významně zvýšíme impedanci výstupu měniče a stejně tak zvětšíme schopnost měniče prudké změny jeho výstupního napětí tak, že udrží konstantní proud. Ve výsledku to znamená znatelné zvýšení rychlosti a šířky stmívání. To je také důvodem, proč jsou snižující regulátory vysoce žádané u podsvícení a u obrazovek strojů.

Na druhou stranu, nevýhodou tohoto řešení – nepoužití výstupní kapacity – je, že filtrování střídavě zvlněného proudu vyžaduje větší hodnoty indukčnosti, aby se dosáhlo požadovaného zvlnění  $\Delta I_F$  (od 5 do 20 procent stejnosměrného proudu LED diodou). Při stejném proudovém napájení je tedy třeba použít větší hodnoty indukčnosti, s čímž je spojen také vzrůst velikosti realizace LED budiče a jeho ceny. Proto je třeba volit správný kompromis podle dané aplikace. [9]

### 3.2.2. Boost topologie (step-up)

Předchozí typ LED budiče je hojně využíván u aplikací s menším počtem svítivých prvků, nebo u zařízení, kde se využívá nižší napětí 12 V a 24 V stejnosměrných nebo 12V střídavých. Avšak u realizací žádajících si výkon až tisíce lumenů a s tím spojené vyšší napětí soustavy, například osvětlení stadiónů nebo pouliční světla, tedy aplikace s vyšším počtem LED, je použití budiče se snižující topologií již z jeho samotné funkce (na výstupu je vždy nižší napětí než na vstupu) nevhodné, a proto zde nalézají uplatnění LED budiče se zvyšující topologií. Základní schéma takového řešení lze vidět na obrázku 3.2.2.1 [10]



Obr. 3.2.2.1 – Základní schéma LED budiče se zvyšující topologií

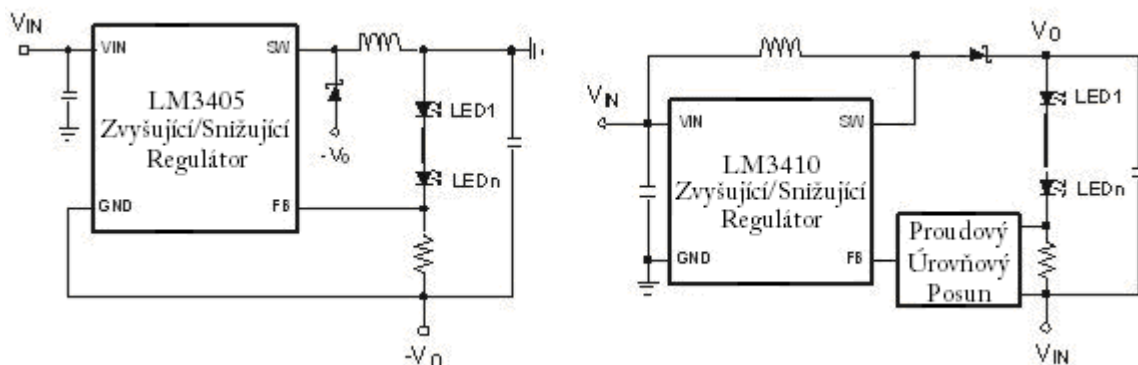
Zvyšující topologie se vyznačuje tím, že na výstupu má vyšší napětí než je napětí vstupní. Realizace zvyšujícího budiče je již ze schématu o něco složitější než u snižujícího budiče, nehledě na

to, jestli řídíme výstupní napětí nebo proud. Střední proud na cívce ve vodivém stavu je rovný proudu na LED vynásobenému  $1/(1-D)$ , kde  $D$  je střída. Samotný návrh zvyšujícího budiče je třeba překontrolovat v mezích vstupního napětí, aby se zajistila správná hodnota cívky, zvláště kvůli hodnotě špičkového proudu. Zvyšující LED budič snímá variabilní výstupní napětí, které následně ovlivňuje střídu, a tedy i indukanci a hodnotu proudu hlavní cívky. Aby nedošlo k saturaci cívky, musí být vypočten maximální střední a špičkový proud v obou případech, jak  $V_{IN-MIN}$ , tak v  $V_{O-MAX}$ . [10]

Na rozdíl od snižujícího regulátoru se svou výstupní cívkou, má zvyšující regulátor na výstupu nespojitý proud. Z toho důvodu se na výstup musí zařadit kapacita, která udrží výstupní napětí a potažmo s ním i spojitý proud. Naproti tomu, že výstupní kapacita je v napěťovém regulátoru navrhována tak, aby filtrovala a držela výstupní napětí během přechodných zatížení, v proudovém regulátoru je jeho funkčnost pouze jako filtr zvlněného proudu. Kapacita by měla být pokud možno co nejmenší v souladu s udržením požadovaného zvlnění proudu LED. Zmenšování výstupní kapacity zlepšuje reakci měniče na změny výstupního proudu, a tedy i reakce stmívání LED je lepší. [10]

### 3.2.3. Buck-Boost topologie (invert convertor)

Již jsme probrali typ snižující, který je vhodný pro aplikace s nízkým napětím, a typ zvyšující, který naopak vyhovuje aplikacím s potřebou vyššího napětí. Dalo by se tedy říci, že tyto dva způsoby pokrývají všechny možné typy aplikací. Avšak jsou zde i situace, kde není vhodné použít čistě jednu z těchto dvou topologií, neboť vstupní napětí se pohybuje v oblasti nízkých napětí, ale i vysokých. Například v automobilové technice a jejich osvětlení. Tři 3-watové bílé LED představují zátěž kolem 12 voltů při proudu 1 ampér. Automobilový napěťový systém obvykle potřebuje nepřetržitý provoz v rozsahu 9 až 16 voltů, s možností zvětšení rozsahu na 6 až 42 voltů, kde je výkon redukován, ale systém pracuje bez poškození. Zde je nutnost použít snižující-zvyšující regulátor, jehož základní schémata lze vidět na obrázku 3.2.3.1. [10]



3.2.3.1 – Základní zapojení LED budiče v high-side a low-side typu snižující-zvyšující topologie

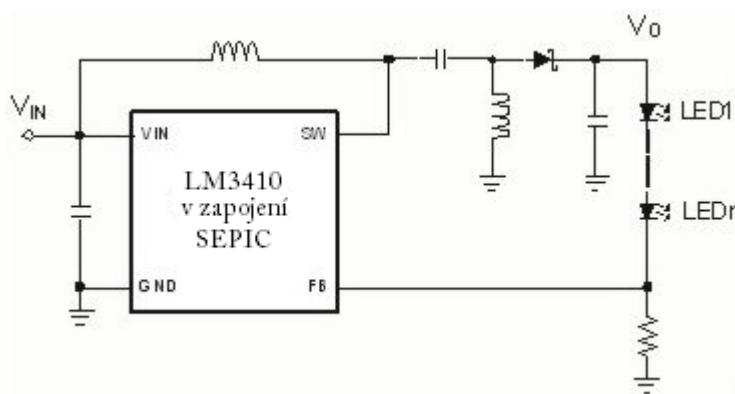
Jeden ze základních rozdílů mezi snižujícími-zvyšujícími regulátory high-side typu a snižujícím regulátorem či zvyšujícím regulátorem je, že snižující-zvyšující regulátory nemají nikdy spojený napájecí vstup přímo na výstup. Jak snižující, tak zvyšující připojují během částí svých spínacích cyklů  $V_{IN}$  na  $V_O$ , přes indukčnosti a spínač, či indukčnost a diodu. Toto přímé spojení jim

dává lepší účinnost. Všechny snižující-zvyšující regulátory střádají vstupní energii dodávanou do zátěže buď v magnetickém poli (indukčnost nebo transformátor) nebo v elektrickém poli (kondenzátor), z čehož vyplývají vyšší proudové špičky, nebo vyšší napětí na výkonovém spínači. Především je tedy nutný výpočet měniče v obou mezích vstupního a výstupního napětí, protože špičkový spínací proud se může vyskytnout při  $V_{IN-MIN}$  a  $V_{O-MAX}$ , ale špičkové spínací napětí se objeví ve  $V_{IN-MAX}$  a  $V_{O-MAX}$ . Ve výsledku to znamená, že snižující-zvyšující regulátor dodá vyšší výstupní výkon při nižší účinnosti než snižující nebo zvyšující regulátor stejného výstupního výkonu. [10]

Jeden indukční snižující-zvyšující regulátor může být sestaven ze stejného počtu součástek jako snižující regulátor nebo zvyšující regulátor, což jej dělá zajímavý z finančního hlediska. Jednou z nevýhod této topologie je, že typ high-side obrací polaritu. Proto se mu také říká invertující. Tato nevýhoda se však dá odstranit použitím low-side typu, kde regulace respektuje vstupní napětí. V těchto měničích je třeba počítat s otočením polarity, nebo s obvodem pro zesílení signálu. Stejně jako u měniče zvyšovacího typu, je i u tohoto řešení budiče nespojitý výstupní proud, a proto je potřebný výstupní kondenzátor k udržení nepřetržitého proudu LED. [10]

### 3.2.4. SEPIC topologie (single ended primary inductor converter)

Posledním z více používaných topologií v oblasti výkonových LED jsou regulátory typu SEPIC. Základní schéma tohoto typu lze vidět na obrázku 3.2.4.1.



Obr. 3.2.4.1. Základní schéma LED budiče v topologii SEPIC [10]

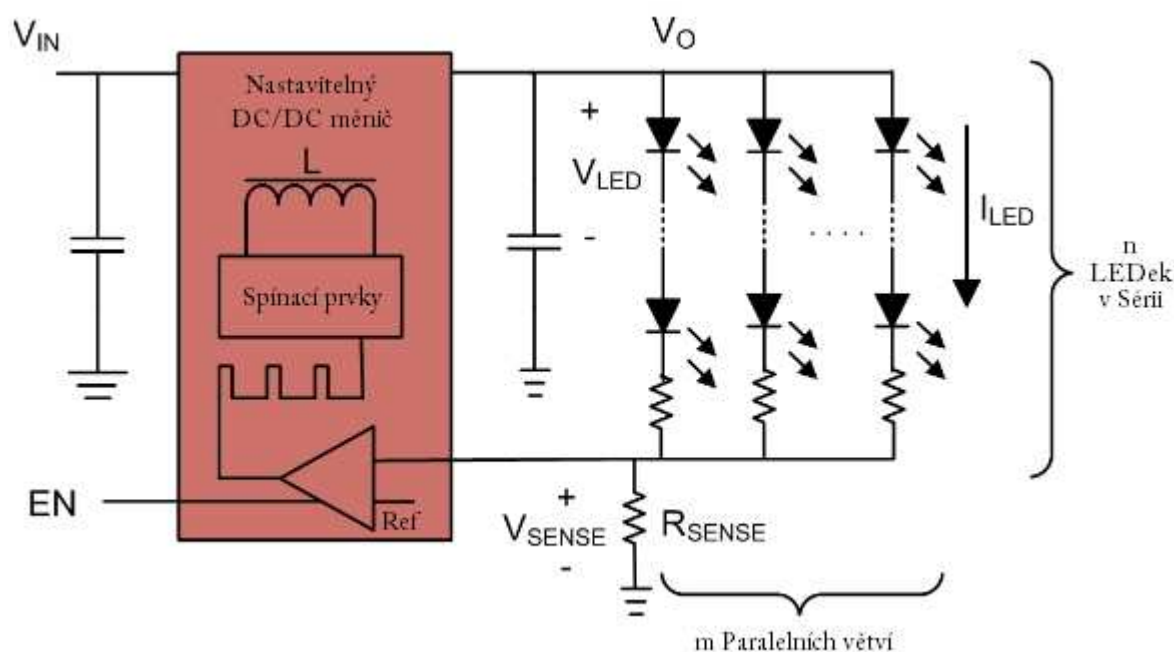
SEPIC měniče mají hlavní výhody ve spojitém vstupním proudu kvůli vstupní cívce a v tom, že výstupní polarita je shodná se vstupní polaritou. Stejně jako zvyšující regulátor a indukční snižující-zvyšující regulátor vyžaduje SEPIC výstupní kondenzátor k udržení hladkého proudu LED diodou. Dalšími výhodami takového uspořádání je, že téměř každý low-side regulátor, nebo driver může být sestaven jako SEPIC, bez nutnosti otočení polarity či obvodů pro zesílení signálů.

### 3.3. Topologie zapojení většího počtu výkonových LED

Pro řízení jasu většího počtu LED diod, například u podsvícení LCD monitorů, nebo billboardů, lze použít dva možné způsoby. Buďto zvolíme topologii LED diod v sérii, tento způsob je však při zvětšujícím se počtu LED diod nepoužitelný kvůli nutnosti napájet tuto sérii velkým napětím. Proto se v praxi využívá dvou typů sérioparalelního zapojení.

#### 3.3.1. Se společným nastavením proudů ve větvích

První možností sérioparalelního zapojení lze vidět na obrázku 3.3.1.1. Každý nastavitelný DC / DC měnič lze snadno použít ve funkci zdroje konstantního proudu pro řízení většího množství WLED zapojených v sérii, na kterých tak vzniknou příslušné napěťové úbytky.



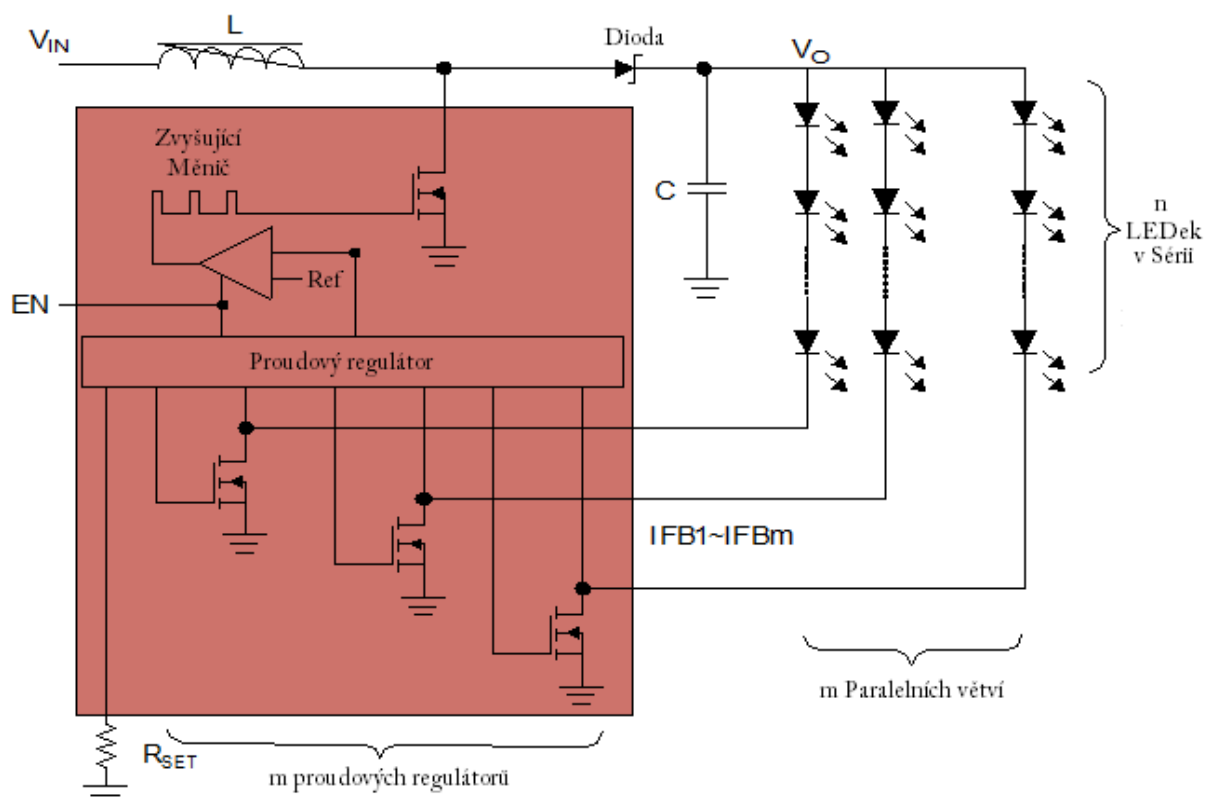
Obr. 3.3.1.1 - Měnič se společným nastavením proudu ve větvích LED diod [11]

Namísto ovládání velikosti výstupního napětí  $V_O$  se raději reguluje napětí  $V_{SENSE}$  na snímacím rezistoru  $R_{SENSE}$  a vytváří se tak zdroj konstantního proudu. Výstupní napětí  $V_O$  pak věrně kopíruje dílčí napěťové změny na jednotlivých úbytcích  $V_{LED}$  v závislosti na proudu a také teplotě. Výkonové LED diody vykazují úbytky napětí v rozsahu od 3,0 V až do 8,0 V, přičemž jejich velikost bude přímo úměrná proudu protékajícímu diodou a nepřímo úměrná teplotě. Výstupní napětí budiče výkonových LED tedy musí s přehledem pokrýt součet úbytků řady LED. Pochopitelně budeme uvažovat největší možný úbytek napětí  $V_{LED}$  při maximálním proudu diodami v dané řadě.

I tak se ale výrobci omezují u zvyšujících budičů s integrovanými FETy na velikost napětí 60V, což znamená maximálně 7 LED s napěťovým úbytkem 7,5 V v jedné řadě [11].

### 3.3.2. S rozdělením nastavení proudů ve větvích

Dalším možným řešením sérioparalelního řízení LED je rozdělení proudu ve větvích do samostatných regulačních obvodů. Funkční schéma tohoto způsobu řízení proudů lze vidět na obrázku 3.3.2.1. Toto řešení je dražší, nicméně eliminuje jeden problém, který nelze u předchozího zapojení nikdy vyloučit. Týká se nastavení stabilizačních odporů, které je třeba perfektně vyladit, aby nedocházelo k různým jasům jednotlivých LED řad [11].



Obr. 3.3.2.1 - Měnič se samostatným nastavením proudu ve větvích LED diod

Jak lze vidět z obrázku, takovýto budič má ve svém integrovaném obvodu vměstnán krom zvyšujícího měniče i vícenásobný proudový regulátor, dodávající stejný proud do jednotlivých řad. Tyto proudové regulátory snímají pokles napětí na každém vývodu  $V_{IFBx}$ , aby pak použily měnič pro vyrovnání a dosažení dostatečného výstupního výkonu pokrývajícího jednotlivé úbytky [11].



### 3.4. Dimming (Stmívání)

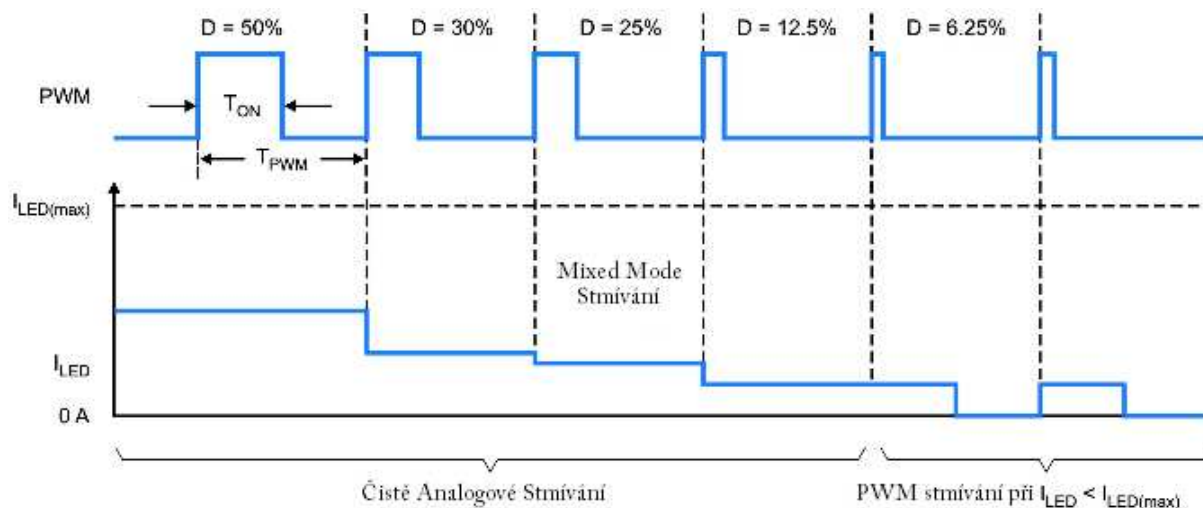
Kdykoliv řídíte LEDky se snižujícím, zvyšujícím, snižujícím-zvyšujícím nebo lineárním regulátorem, běžným základem je řídicí obvod k ovládání světelného výstupu. Některé aplikace jsou jednoduše typu ON a OFF, ale mnohem větší počet aplikací volá po stmívaném výstupu mezi nulou a 100%, navíc vyžadují jemné rozlišení. Projektanti mají dvě hlavní možnosti, buď měnit proud LED lineárně (analogové stmívání), nebo použít spínací obvody, které pracují při dostatečně vysokých frekvencích, tak aby oko vidělo normální světelný výstup (digitální modulace).[11]

#### 3.4.1. Obecné rozdělení metod stmívání

Stmívání lze realizovat dvěma metodami, buď metodou analogovou, nebo metodou digitální. Na obrázku 3.4.1.1. lze vidět principiální příklad digitální metody stmívání. Konkrétně se jedná o stmívání signálem s pevným kmitočtem a pulsně-šířkovou modulací (PWM). Tento signál je přiváděn na povolovací pin z obrázku 3.3.1.1. Výsledný průměrný proud LED je dán vynásobením střídy PWM signálu a maximálního proudu diodou, viz vzorec [11]:

$$I_{LED(avg)} = \frac{D}{I_{LED(max)}} \quad (4)$$

Protože maximální proud protékající diodami bude stejný, získáme stmíváním pomocí PWM velmi lineární změny jasu. Jelikož se vyzařené světelné spektrum dále mění v závislosti na úbytku napětí a napěťový úbytek se zase mění s proudem  $I_{LED}$ , bude barva a její tón (tzn. jak “bílé” světlo skutečně je bílé) při použití PWM vskutku vynikající [11].



Obr. 3.4.1.1. – Metody stmívání PWM horní průběh, Mixed Mode spodní průběh

Druhou metodou vyobrazenou na obrázku 3.4.1.1. je částečně analogové stmívání. Tato metoda nezpůsobuje téměř žádné zvlnění, neboť hodnota výstupního napětí, potažmo proudu, je přímo nastavována měničem. Analogové stmívání má ale problémy s přesností při hlubokém stmívání, kdy

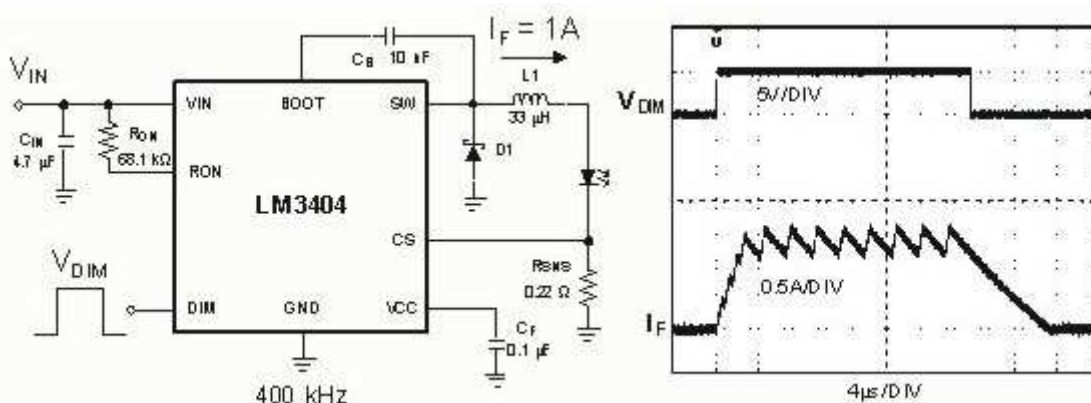


příslušná napětí dosahují velmi malých hodnot na to, aby byla možná přesná regulace z titulu offsetu zesilovače odchyly. Rovněž linearita jasu a chromatičnost nejsou tak dobré, jako při stmívání pomocí PWM, obzvláště pak při hlubokém stmívání. Optimálním řešením se tak jeví vzájemná spolupráce PWM a analogového stmívání, nazývaná stmívání ve smíšeném režimu (mixed-mode dimming) [11].

V dnešních zařízeních se používá ve většině případů pro svou jednoduchost realizace a dobré vlastnosti digitální metoda stmívání pomocí PWM. Proto se další část této diplomové práce zaměřuje na problematiku PWM dimmingu.

### 3.4.2. Problematika PWM dimmingu

Nejjednodušší realizace byla pro digitální stmívání nejspíš hlavní příčinou velkého rozšíření. Používání pulsně šířkové modulace k nastavení periody a šířky spínání, viz obrázek 3.4.2.1., se stalo standardem v LED driverech. Další důvod můžeme hledat také v tom, že ve spojení se snižující regulační topologií poskytuje nejslibnější výsledky.



Obrázek 3.4.2.1. – LED driver využívající PWM stmívání i s průběhy [12]

#### 3.4.2.1. Analogové stmívání vs. Digitální PWM stmívání

Analogové stmívání je obvykle jednodušší implementovat. Měníme výstup LED budiče v poměru k řídicímu napětí. Analogové stmívání nevyzařuje žádné další nové frekvence a má téměř nulové EMC/EMI rušení. Nicméně, PWM stmívání se prosadilo ve většině návrhů, díky základním vlastnostem LEDek: charakter světelné emitace se pohybuje v souvislosti se středním řídicím proudem. U jednobarevných LEDek, se mění dominantní vlnová délka. U bílých LEDek se vyskytuje změna barvy teplotní korelací (CCT). Pro lidské oko je složité zachytit změny v pár nanometrech červené, zelené nebo modré LED, zvláště když se světelná intenzita také mění. Naopak při změně teploty barvy je ta změna snadno zřetelná [12].

Většina bílých LED se skládá z hrotu, jenž emituje fotony v modrém spektru, které naráží do fosforového nátěru, a ten naopak emituje fotony skrz celou šířku viditelného světla. Při nízkých proudech fosfor dominuje a světlo má spíš žlutou povahu. Při vysokých proudech dominuje modré

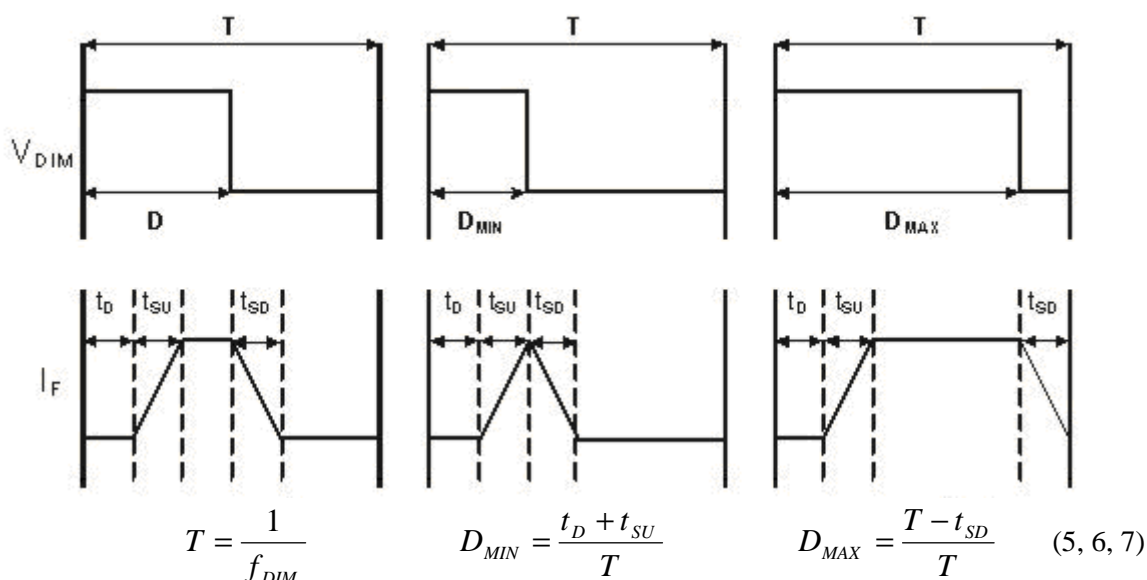
vyzařování LEDky, to dává světlu modrou povahu, s větší náchylností na CCT. V aplikacích s více než jednou bílou LED může být rozdíl v CCT mezi dvěma použitými LED očividný. PWM stmívání je proto rozšířené mezi světelnými zdroji využívajícími mísení světla z velkého počtu jednobarevných LED, neboť při jejím použití zamezuje vzniku CCT [12].

Výrobci LED specifikují daný řídicí proud v tabulkách elektrických charakteristik svých produktů. Jen při tomto specifikovaném proudu garantují dominantní vlnovou délku, nebo CCT. Stmívání pomocí PWM zajišťuje, že LEDky emitují barvu, kterou projektant osvětlení vyžaduje, navzdory intenzitě. Takovéto přesné řízení je důležité zejména v RGB aplikacích, kde mísíme světlo různých barev k získání bílé [12].

Z pohledu IO budičů představuje analogové stmívání vážný problém v přesnosti výstupního proudu. Téměř všechny LED budiče využívají odpor nějakého typu v sérii s výstupem ke snímání proudu. Proud snímající napětí  $V_{SENS}$  je voleno jako kompromis mezi nízkými ztrátami a vysokým odstupem šumu od signálu SNR. Tolerance, ofsety a zpoždění budiče představují chybu, která zůstává relativně fixní. Ke snížení výstupního proudu v systému uzavřené smyčky musí být  $V_{SENS}$  redukováno. To z druhé strany snižuje přesnost výstupního proudu a konečkonců proud nemůže být správně určen, řízen, nebo garantován. Ve výsledku stmívání pomocí PWM poskytuje větší přesnost, linearitu řízení přes celý rozsah snižování světelného výstupu a na mnohem nižší úrovni než analogové stmívání [12].

### 3.4.2.2. Stmívací frekvence a kontrastní poměr

Konečná časová odezva LED budiče na PWM stmívavý signál vytváří problémy při navrhování. Jsou zde tři hlavní typy zpoždění, jak lze vidět na obrázku 3.4.2.2.1. Prodlužování těchto zpoždění snižuje dosažitelný kontrastní poměr (měření ovládaní světelné intenzity) [12].



Obrázek 3.4.2.2.1 – Typy zpoždění důležité při stmívání a výpočet min a max hodnoty střídy

Jak je vidět na obrázku 3.4.2.2.1.,  $t_D$  představuje přenosové zpoždění od chvíle nástupu logického signálu  $V_{DIM}$  na HIGH do chvíle, kdy LED budič začne zvyšovat výstupní proud. Další zpoždění je zde  $t_{SU}$ , což je čas potřebný k nárůstu výstupního proudu z nuly na požadovanou úroveň, a posledním zpožděním je  $t_{SD}$ , což je naopak čas potřebný k poklesu výstupního proudu z požadované úrovně na nulu. Ve výsledku nižší stmívavá frekvence  $f_{DIM}$  vede k vyššímu stmívavému poměr, protože tahle fixní zpoždění zaberou menší část stmívací periody  $T_{DIM}$ . Spodní limit pro  $f_{DIM}$  je cca 120Hz, pod kterými již oko nevnímá pulsy jako nepřerušovaný svit. Horní limit je určen minimálním kontrastním poměrem, který je potřebný [12].

Kontrastní poměr je typicky vyjádřen jako obrácená hodnota minimálního náběžného času.[12]:

$$CZ = \frac{1}{t_{ON\ min}} : 1 \quad (8)$$

$$\text{Kde } t_{ON\ min} = t_D + t_{SU}$$

Aplikace v obrazovkách strojů a průmyslové inspekce často vyžadují mnohem vyšší PWM stmívací frekvence, protože vysokorychlostní kamery a senzory vyžadují mnohem rychlejší odpověď než lidské oko. V takových aplikacích je cíl zrychlení náběžné doby a vypínací doby LED světelného zdroje ne proto, abychom snížili střední světelný výstup, ale abychom synchronizovali světelný výstup se sensorovým, nebo kamerovým snímacím časem [12].

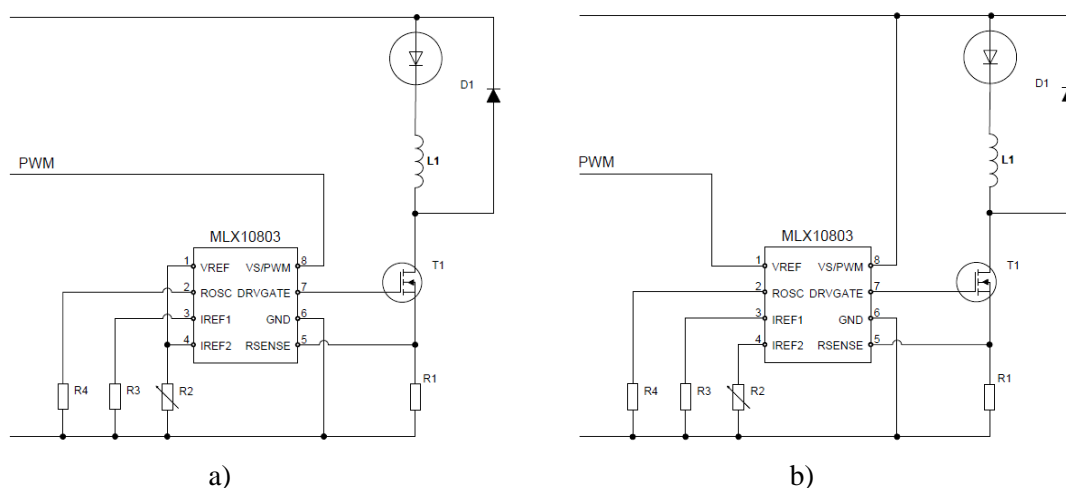
### 3.4.2.3. Nízkofrekvenční PWM řešení

Při nízkých frekvencích je realizace PWM stmívání relativně snadná, neboť moderní LED budiče obsahují jak analogové stmívání, tak digitální PWM modulaci ve své struktuře. Při tomto způsobu řízení je přímo ovládán výstup samotného budiče. Tím je modulováno samotné spínání jeho výkonového spínače. Tohoto spínání lze dosáhnout především přivedením PWM přímo na vhodný povolovací, nebo vypínací pin budiče, popřípadě zavedením signálu z PWM přímo do napájení LED budiče. Obojí způsoby těchto řešení lze vidět na obrázku 3.4.2.3.1 [13].

Použitím těchto metod PWM stmívání se však nedostaneme na vysoké modulační frekvence. To je způsobeno tím, že samotný LED budič má díky své vnitřní struktuře příliš velké časové zpoždění  $t_D$ , které má původ v samotném IO LED budiče. Přestože se zde výrobci snaží o co nejmenší přenosové zpoždění  $t_D$  i na úkor vnitřních řídicích obvodů, které musí odolávat velkým proudům, nedostanou se dnešní „integrované“ PWM stmívání nad hranici 500 kHz [12].

Nicméně nízkofrekvenční řešení PWM jsou v mnoha případech dostačující a vzhledem k integrování této funkce i levnější než neintegrování řešení. Pokud se tedy zaměříme na oblast, kde je dostačující nízkofrekvenční PWM, můžeme volit také mezi různými topologiemi budičů, ze kterých se pro PWM stmívání nejlépe hodí buck topologie. Je to ze dvou důvodů. Zaprvé, snižující regulátor je jediný spínaný měnič, který dodává výkon na výstup, zatímco řídicí spínač je sepnut. Tohle dělá řídicí smyčku snižujícího regulátoru s napětíovou, nebo proudovou PWM (nezaměňovat se stmíváním

PWM) rychlejší než zesilovací regulátor, nebo různé buck-boost topologie. Výkon dodávaný během sepnutí řídicího spínače se také snadno adaptuje na řízení hysterezí, která je dokonce rychlejší než nejlepší napěťové nebo proudové smyčky. Zadruhé, cívka snižujícího regulátoru je připojena k výstupu během celého spínacího cyklu. Tohle zajišťuje spojitý výstupní proud a znamená to, že výstupní kapacita může být eliminována. Bez výstupní kapacity se buck regulátor ve skutečnosti stává proudovým zdrojem s vysokou impedancí, schopným náběhu výstupního napětí velmi rychle. [12]



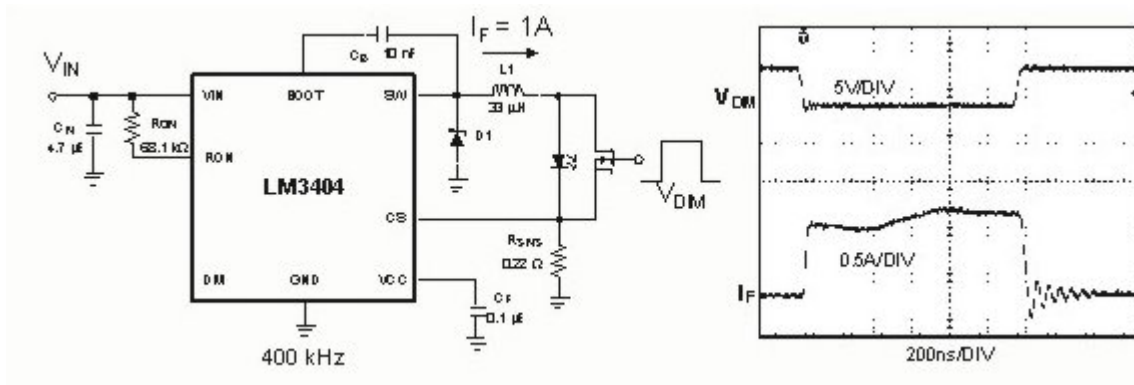
Obr. 3.4.2.3.1. – Řízení PWM modulačním signálem na a) napájecí vstup b) povolovací vstup

### 3.4.2.4. Vysokofrekvenční PWM řešení

V aplikacích vyžadujících tak vysokou modulační frekvenci, že ani snižující budič bez výstupního kondenzátoru by těmto parametrům nevyhověl, je třeba nahlížet na realizaci trochu jinak. Proto, aby byl zachován i vysoký kontrastní poměr, je nutné mít co nejkratší náběžné a sestupné hrany a pokud možno minimální přenosové zpoždění. Takovými aplikacemi jsou již zmíněné obrazovky strojů, videoprojekce nebo případně snímací čidla. V některých případech, při úplném redukování stmívací periody do oblasti mikrosekund, musí být celkový vzestupný a sestupný čas pro proud LED i se zahrnutím přenosového zpoždění redukován do rozsahu nanosekund. Dnes známe dva základní způsoby realizace vysokofrekvenčního PWM modulování LED budičů: paralelní nebo sériovou [12].

#### Paralelní PWM

Uvažuje-li se rychlý snižovací regulátor bez výstupní kapacity, jeho zpoždění při spínání výstupního proudu na sepnuto a vypnuto vychází z přenosového zpoždění IO a fyzikálních vlastností výstupní indukce. Pro skutečně vysokou rychlost PWM stmívání musí být obojí přemostěno. Nejlepší způsob, jak toho docílit, je použití spínače paralelně spojeného k LED, jehož funkční zapojení lze vidět na obrázku 3.4.2.4.1. Při vypnutí LED prochází řídicí proud skrz stmívací spínač, který je obvykle typu N-MOSFET. Budič pokračuje v činnosti a proud indukce je spojitý. Hlavní nevýhodou této metody je, že se energie maří, když jsou LEDky vypnuté. Dokonce i přesto, že během této doby výstupní napětí klesne na rovnou úroveň proudu snímacího napětí [12].

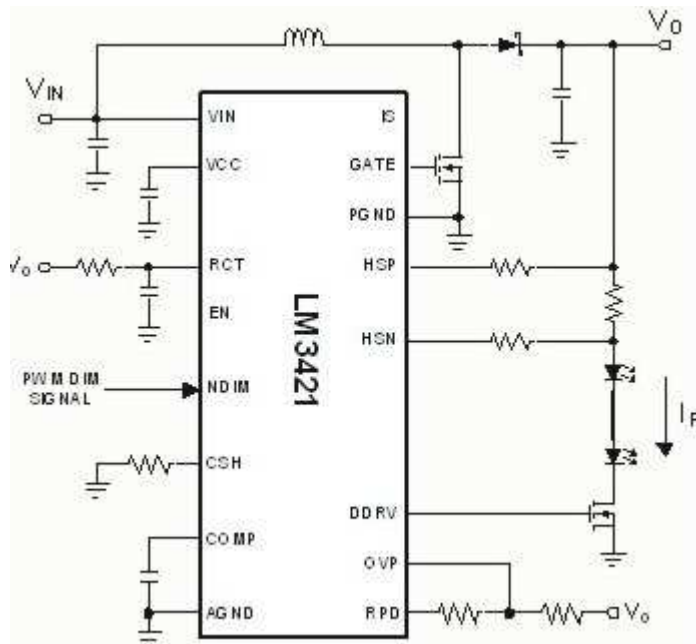


Obr. 3.4.2.4.1 – Paralelní PWM modulace pro budič LM 3404 s průběhem napětí a proudu

Stmívání s paralelním FET způsobí rychlý skok výstupního napětí, na který musí řídicí budící obvod zareagovat tak, aby udržel konstantní výstupní proud, viz překmitý v průběhu proudu na obrázku 3.4.2.4.1 [12].

### Sériová PWM

Tento způsob je používán zejména u LED budičů se zvyšující a zvyšující-snižující topologií, protože paralelní stmívání je zde nemožné, nebo v lepším případě nepraktické, kvůli požadavkům na výstupní kapacitu, nebo kvůli nekontrolovatelnému proudu vstupní indukce během zkratu na výstupu. Když je vyžadována skutečně rychlá PWM modulace, je nejlepším řešením dvouúrovňový systém, který využívá snižujícího regulátoru jako druhotného PWM modulačního řízení LED. Kde místo a cena tento přístup nedovolují, je nejlepší volbou sériové spínání, jehož funkční schéma lze vidět na obrázku 3.4.2.4.2 [12].



Obr. 3.4.2.4.2. – Sériová PWM modulace pro budič LM3421

## 4 Realizace driveru pro výkonový LED modul

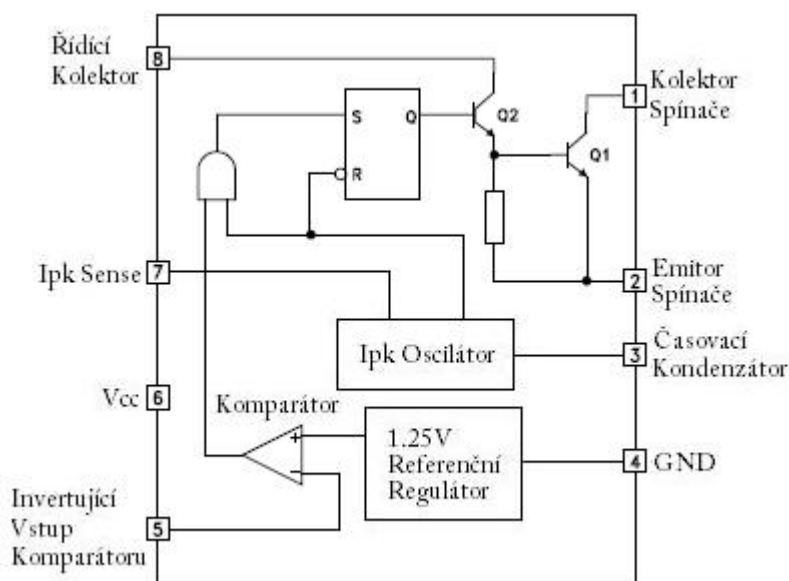
Jedním z cílů této diplomové práce je realizace driveru pro výkonový LED modul. Vzhledem ke směřování této realizace k ověření možného způsobu vysokofrekvenčního PWM stmívání, byl kladen důraz na funkčnost a jednoduchost driveru. S tím souvisí realizace obvodového řešení za použití co nejmenším počtu běžně dostupných součástek. Taktéž se vycházelo z předpokladu, že daný výrobek bude ke své funkci využíván zejména v laboratořích, a proto nepatřila otázka dizajnu driveru mezi prioritní.

### 4.1. Návrh

Již na začátku je třeba si návrh driveru pro výkonové LED moduly rozdělit do dvou funkčních bloků, ze kterých se skládá, a to do návrhu zdroje konstantního proudu a návrhu PWM modulace. PWM modulace sice již bývá zahrnuta v driverech pro výkonové LED, ale v našich končinách je prozatím nemožné sehnat běžně dostupný integrovaný obvod s možností vysokofrekvenčního PWM. U realizovaného návrhu jsme se zaměřili na vysokofrekvenční PWM modulaci paralelním spínačem k výkonové LED.

#### 4.1.1. Návrh zdroje konstantního proudu

Ze všech možných dostupných integrovaných obvodů byl nakonec zvolen obvod MC34063, který je primárně používán jako DC-DC napěťový měnič, avšak po drobné úpravě jej lze využít jako zdroj konstantního proudu. Obvod, jehož vnitřní zapojení lze vidět na obrázku 4.1.1.1., může pracovat s napájecím napětím 3 V - 40 V a se spínací frekvencí až do 100 kHz.

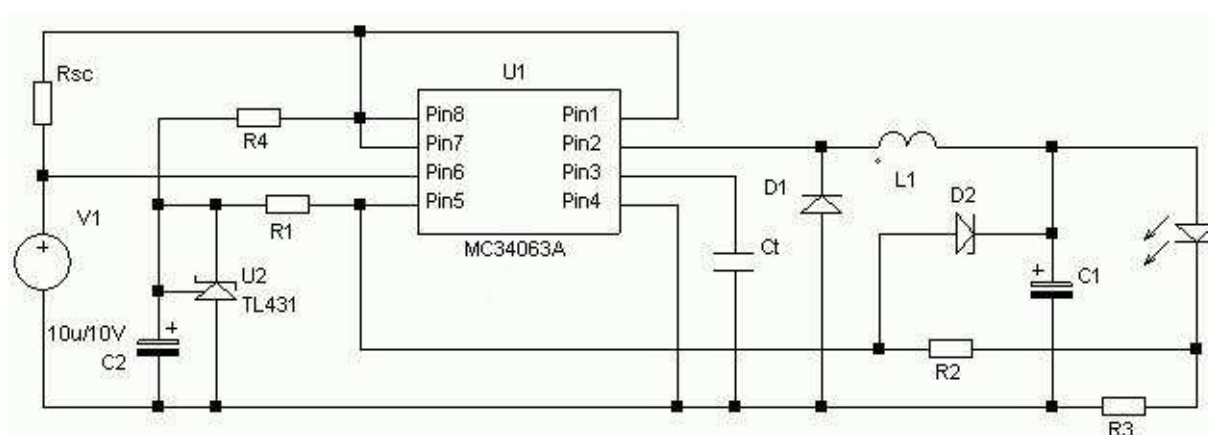


Obr. 4.1.1.1. Vnitřní zapojení MC34063

Jak lze z vnitřního zapojení vidět, je vybaven interní tepelně kompenzovanou napěťovou referencí, komparátorem pro realizování zpětné vazby, oscilátorem s říditelnou střídou a aktivním proudovým omezením, řídicí logikou a výstupním spínačem. Toto uspořádání umožňuje realizovat DC-DC měnič s minimálním množstvím externích součástek a v topologiích Step-up, Step-down a napěťově invertující.

Obvod MC34063 pracuje tak, že snímá výstupní napětí na zátěži, a to následně porovnává v komparátoru s referenčním napětím 1,25 V, pokud tedy snímané napětí překročí tuto hodnotu, výkonový spínač rozezne. Časovací kondenzátor udává minimální spínací frekvenci. Velikost špičkového proudu zavedena do vstupu  $I_{pk}$  sens funguje jako aktivní omezení proudu, které v závislosti na špičkovém proudu mění frekvenci spínání. Ve výsledku sjednocení všech funkcí má za následek snížení střídy a frekvence k dosažení stabilizovaného napětí na výstupu.

V této diplomové práci bylo pro návrh zdroje konstantního proudu zvoleno použití obvodu MC34063 v topologii step-down měniče, který je pro danou aplikaci nejrealizovatelnější. Základní schéma, ze kterého návrh proudového zdroje pro LED vychází, je uvedeno na obrázku 4.1.1.2.



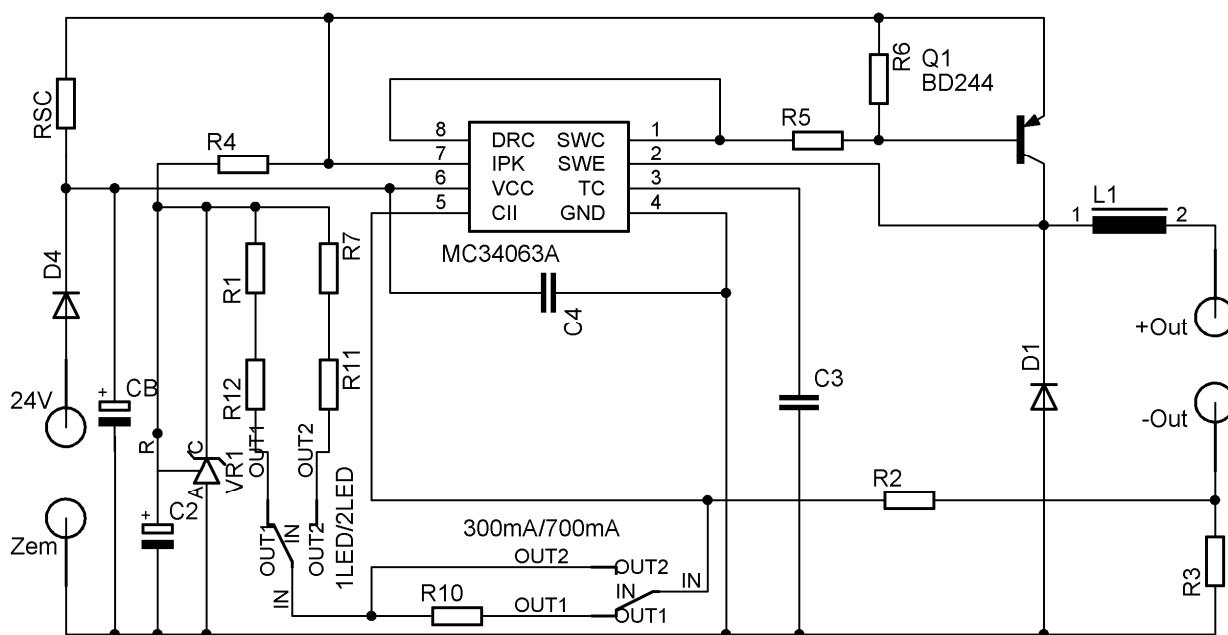
Obr. 4.1.1.2 – Výchozí schéma proudového zdroje pro LED s obvodem MC34063 [14]

Lze si zde povšimnout zásadní úpravy vůči základnímu schématu napěťového step-down měniče uvedeného v datasheetu, a tím je doplnění snímacího odporu R3, kde úbytek na něm vzniklý odpovídá procházejícímu proudu zátěži. A tedy pouze touto změnou se realizoval zdroj konstantního proudu.

Další změnou proti schématu uvedenému v prospektu MC34063 je doplnění obvodu o Zenerovu diodu D2, která je pro ochranu elektrolytického kondenzátoru C1 a IO napěťové reference TL431 s příslušnou RC sítí, která zde zajišťuje, že úbytek na odporu R3 nemusí být 1,25 V, ale může být jen 50 – 300 mV podle nastavení, což zapříčiní i nižší výkonovou ztrátu v poměru k zátěži. [14]

Při realizování této diplomové práce se počítalo se zkoušením paralelního PWM stmívání na různých typech výkonových LED (1 – 5 W), to znamená zdroj s nastavitelným konstantním proudem na výstupu 300 mA a 700 mA. Proto bylo třeba upravit výchozí schéma, aby zaprvé umožňovalo požadované nastavování proudu, a za druhé, aby hodnota 700 mA byla skutečně stabilně dosažitelná, neboť tato hodnota se blíží skutečnému maximu IO. Výsledné schéma s požadovanými úpravami je

uvedeno na obrázku 4.1.1.3. Schéma je doplněno odporovou sítí s přepínači ve zpětné vazbě, která umožní nastavování výstupního proudu a dále je doplněno o výkonový spínací prvek, který umožní větší proudové zatížení. Dále si lze povšimnout odstranění kondenzátoru C1 a Zenerovy diody D2 z původního schématu z důvodů používání PWM, kde by tento kondenzátor zamezil prudké změně výstupního napětí a tedy i možnosti paralelního PWM stmívání. Poslední změnou je přidání blokujícího kondenzátoru  $C_b = 470 \mu\text{F}$  pro vyhlazení vstupního proudu a napětí.



Obr. 4.1.1.3 – Upravené schéma zdroje s nastavitelným konstantním proudem 300/700 mA

Jako výkonový spínací prvek mohl byt použit i MOSFET, avšak při vyladování obvodu se s bipolárním tranzistorem povedlo dosáhnout vyšší účinnosti, při jednodušším obvodovém zapojení.

Část základních parametrů součástek byla vypočtena pomocí programu MC34063.exe, který je dostupný na internetových stránkách [14].

#### Určení základních součástek pomocí programu:

Vstupní hodnoty		Výstupní hodnoty		
Parametry	Velikost	Parametry	pro 300 mA	pro 700 mA
Min. vstupní napětí [V]	24	C3 [nF]	1	1
Výstupní napětí [V]	16	Rsc [mΩ]	0,5	0,2
Úbytek na diodě [mV]	400	Ipk [mA]	600	1400
Úbytek na tranzistoru [mV]	100	Lmin [μH]	329,1	131
Minimální frekvence [kHz]	27	C1 [μF]	185	463
Zvlnění výstupu při max. proudu [mV]	15			

Tab. 4.1.1.1 – Vypočtené parametry měniče ze vstupních hodnot



Z vypočtených výstupních hodnot lze určit čtyři základní součástky, a to:

$$C3 = 3 \text{ nF}$$

- Pro spínací frekvence zdroje konstantního proudu byl požadavek v řádu několika desítek kilohertz, proto se nastavila tak, aby vypočtená hodnota byla běžně dostupná a odpovídala požadavku.

$$R_{sc} = 0,18 \Omega$$

- Na velikosti tohoto odporu závisí výstupní výkon, tedy i výstupní proud při daném napětí, proto se velikost tohoto odporu volí menší, než je hodnota vypočtená pro výstupní proud 700mA, aby byla případná rezerva při větším napěťovém úbytku. Vypočtená hodnota byla 0,2 mΩ, volíme tedy nejbližší nižší odpor v řadě.

$$L_{min} = 330 \mu\text{H}$$

- Vypočtená hodnota určuje minimální velikost indukčnosti pro spojitý chod. Proto volíme větší indukčnost cívky, než je nejvyšší vypočtená minimální indukčnosti a tou je hodnota 329,1 μH pro výstupní proud 300 mA.

$$C1 = 470 \mu\text{F}$$

- Velikost kondenzátoru je zde důležitá pro vyhlazení výstupního průběhu napětí a s tím související výstupní proud, a proto volíme vyšší kapacitu, než je nejvyšší vypočtená kapacita, což odpovídá 463 μF pro 700 mA. Je třeba také volit kondenzátor na vyšší napětí, než jaké se může objevit na výstupu, proto volíme kondenzátor na 35V. Nicméně jelikož byla v zapojení použita vysokofrekvenční PWM, musel být tento kondenzátor odstraněn a tato hodnota se v této práci stala bezpředmětnou. Nepoužitím kondenzátoru C1 odpadla také nutnost použití ochranné Zenerovy diody.

**Určení ostatních součástek v obvodu:**

$$R2 = 910 \Omega ; R3 = 0,33 \Omega ; R7+R11 = 1210 \Omega ; R1+R12 = 1390 \Omega ; R10 = 47 \Omega$$

- Kombinace odporů určující velikost zpětnovazebného napětí do invertujícího vstupu komparátoru. Hodnota R2 byla zvolena podle doporučení z již realizovaných step-down měničů pro výkonové LED. Odpor R3, který v zapojení slouží jako snímací odpor, se volí záměrně velice malý, aby výkonová ztráta na něm byla co nejmenší. Odporové součty R7+R11 a R1+R12 byly určeny měřeními, kdy se nastavil výstupní proud 300 mA při dané zátěži. Empirické zjišťování bylo nutné, neboť odstraněním kondenzátoru C1 se proud se změnou zátěže (použití jedné nebo dvou LED diod v sérii) změnil o 100 mA. Poslední navrženým odporem je odpor R10, který byl nalezen empiricky, a to tak, že se

výstupní proud při daných zátěžích nastavil na 700 mA a podle předpokladů byl odporový součet stejný jak pro zatížení jednou LED nebo dvěma LED.

**R4 = 15 kΩ ; C2 = 10 μF/10V**

- Odpor R4 zde slouží pro napájení napěťové reference a je určený podle [14]:

$$R4 < 800 \cdot (V1 - 2,5) \quad \text{kde } V1 = 24V \quad (9)$$

Výsledek nerovnice je  $R4 < 17,2k$  volí se tedy nejbližší nižší odpor v řadě.

- Kondenzátor C2 je použit pro stabilizaci napěťové reference 2,5 V, jež je využita v zpětnovazebním obvodu pro již zmiňované snížení ztrát vzniklých na odporu R3.

**Q1 = BD244 ; R5 = 100 Ω ; R6 = 320 Ω**

- Na typ výkonového spínače nebyly požadovány nijak velké nároky, musel splňovat pouze proudovou a napěťovou zatížitelnost, PNP kanál a spínací kmitočty. Jeden z těch, který tyto požadavky, splňuje je právě BD244.
- S rezistory R5 a R6 bylo třeba laborovat, neboť jejich kombinace může zvýšit, ale naopak i snížit výslednou účinnost měniče. Při návrhu se mohlo alespoň vycházet z maximální hodnoty R5, která ještě zajišťuje minimální otevření tranzistoru. Tuto maximální hodnotu lze vypočítat dle [14]:

$$R5 < Q1_{hfe} \cdot \frac{V1}{I_{pk}} \quad (10)$$

kde  $Q1_{hfe}$  – proudový zesilovací činitel výkonového spínacího prvku (z datasheetu 30)  
 $I_{pk}$  – špičkový spínací proud (při 700mA na výstupu je  $I_{pk} = 1400mA$ )  
 $V1$  – vstupní napětí měniče

Po dosazení vyjde hodnota maximálního rezistoru  $R5 = 515 \Omega$ , takže lze teoreticky zvolit velikost tohoto odporu od 0 do 515 Ω. Při volbě odporu R4 se po mnoha zkouškách docílilo jeho 100 Ω hodnoty. Dále je možné určit minimální velikost odporu R6, který můžeme vypočítat pomocí nerovnice [14]:

$$R6 > \frac{R5}{V1 - 3,5} \quad (11)$$

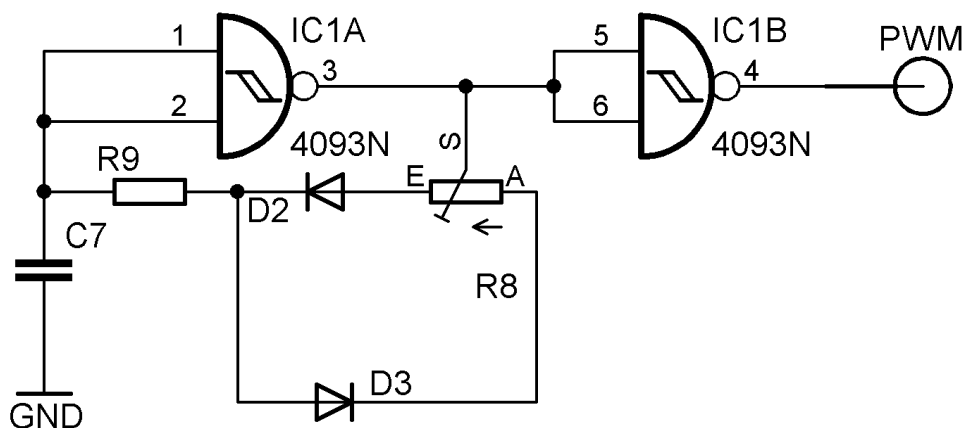
Zvolením maximální velikosti R5 bylo možné definovat minimální velikost R6, která činila 25 Ω. Volily se tedy odpory nad touto hodnotou a sledovala se účinnost měniče s jednotlivými z nich. Nejvyšší účinnosti, poměr příkonu měniče k výkonu měniče vynásobený stem, bylo dosaženo s odporem  $R6 = 320 \Omega$ , a to 76%. Tato kombinace rezistorů byla tedy zvolena za výslednou.

## 4.1.2. Návrh vysokofrekvenční PWM modulační

Vzhledem k zaměření aplikace, tedy ověření možnosti vysokofrekvenční PWM, se při návrhu hledělo na různé stavy a možnosti modulace. Proto jsou zde tři možnosti zapojení. Zapojení bez PWM modulační, zapojení s Interní PWM modulační a zapojení s Externím modulačním signálem. Jelikož možnost bez modulační a možnost s externím modulačním signálem jsou vyřešeny jednoduše přepínačem ON-OFF-ON, bude nyní rozepsána zejména realizace interní PWM modulační. Je zde nutné podotknout, že pro daný integrovaný obvod připadalo v úvahu pouze paralelní PWM stmívání. Jako spínací prvek byl použit N-MOSFET IRF510 pro jeho velice nízkou kapacitu v gatu a splňující požadavky na spínací frekvenci.

### Interní PWM modulační

Pro vysoké frekvence, v případě této práce 1 MHz, se nedala použít realizace PWM využívající operačních zesilovačů. Lépe řečeno, by bylo třeba použít speciálních operačních zesilovačů určených pro audiotechniku, avšak tyto jsou velice drahé. Proto se hledalo levnější řešení bez použití nízkofrekvenčních zesilovačů. Schůdným řešením se nakonec staly logické obvody doplněné o RC síť, trimr a rychlé diody. Výchozí schéma je zobrazeno na obrázku 4.1.2.1., jehož základem jsou hradla typu NAND uvnitř integrovaného obvodu CD4093. Na první pohled je dané schéma velice jednoduché, je však vykoupeno nižší dosažitelnou střídou, která se podle kvality návrhu může pohybovat až do mezních hodnot 20 – 80%.



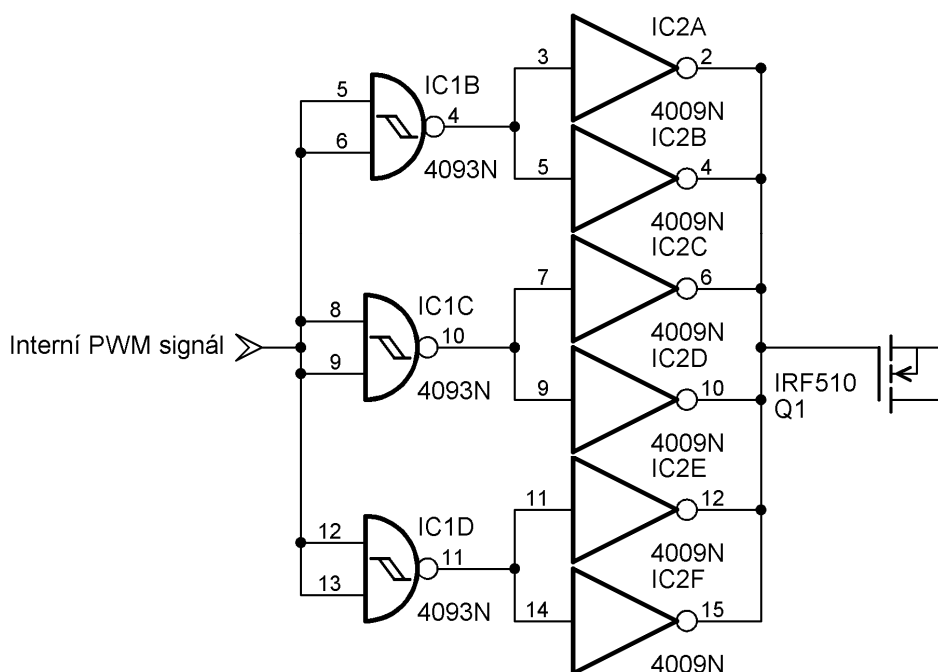
Obr. 4.1.2.1. – Základní schéma realizace PWM pomocí logických obvodů

Princip obvodu spočívá v nabíjení a vybíjení kondenzátoru C7 podle úrovně na výstupu hradla IC1A. Nabíjecí a vybíjecí dobu kondenzátoru lze řídit nastavením trimru, jehož poměrové rozdělení odporových částí odpovídá střídě PWM. Frekvenci PWM lze nejlépe nastavit změnou velikosti kondenzátoru. Diody zde určují směr nabíjecího a vybíjecího proudu. Jelikož jejich reakce snižuje dosažitelnou střídu z obou stran, bylo nutné použít rychlé diody MUR120 s reakcí 25 ns. Z uvedeného principu je dále jasné, že PWM signál se objevuje již na výstupu hradla IC1A, nicméně jeho hrany jsou rušené a nestálé, proto je zde přidáno hradlo IC1B, které zajišťuje dobrou strmost hran bez rušení.

### Budící obvod pro IRF510

Předchozí částí bylo realizováno pouze vytvoření PWM signálu, nyní však nastal problém se samotným spínáním výkonového spínače, vykonávajícího funkci paralelního PWM stmívání LED.

Výstupní signál z obvodu CD4093 nedodává dostatečný proud ani napětí pro bezpečné spínání při frekvencích do 1 MHz. Proto bylo nutné posílit tento signál proudově i napěťově použitím paralelního zapojení invertorů, které zde zastupuje běžné budící obvody. Daný způsob posílení je zobrazen na obrázku 4.1.2.2.



Obr. 4.1.2.2. - Budící obvod pro rychlé spínání IRF510 s logickými členy

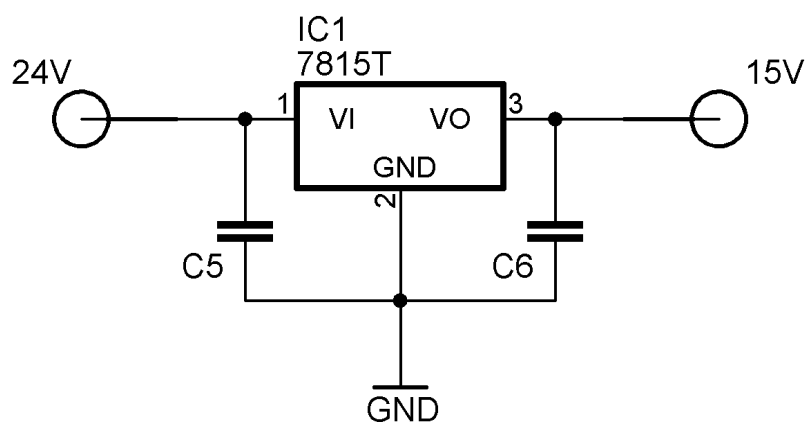
Aby bylo možné určit i napěťovou úroveň signálu, byl zvolen obvod 4009N, tedy opět z řady CMOS s napájecím napětím až 15 V. Takto posílený signál byl přiveden na gate tranzistoru, který tak bezpečně spíná i při frekvencích kolem 1 MHz.

Při realizaci musely být všechny použité logické obvody doplněny o blokující kondenzátory, neboť samotné spínání vytvářelo v napájecích obvodech proudové špičky, které vedly k rušení těchto obvodů a potažmo jejich nestabilitě už při frekvencích 100 kHz.

## Napájení pro logické obvody

Poslední „překážkou“ při realizaci interní PWM modulace LED diody bylo samotné napájení logických obvodů. Proudový zdroj byl navržen pro vstupní napětí 24 V kvůli možnosti zatěžovat jej i dvěma LED diodami, jejichž součet napěťových úbytků je cca 12 V. A protože v topologii Step-Down, která odpovídá zvolenému schématu zdroje konstantního proudu, je nutné, aby vstupní napětí bylo minimálně o 3 V vyšší než výstupní napětí, bylo třeba zrealizovat 15 V napájecí úroveň.

Z dostupných možností – buď přivést napětí externě, nebo jej vytvořit z dostupného napětí na desce – byl zvolen způsob, který zjednodušuje práci s LED driverem. Tedy žádné přivádění dalších napájecích kabelů, ale pomocí stabilizátoru LM7815 bylo upraveno vstupní napětí 24 V na požadovanou úroveň. Zapojení tohoto obvodu je velice jednoduché, jak lze vidět na obrázku 4.1.2.3.



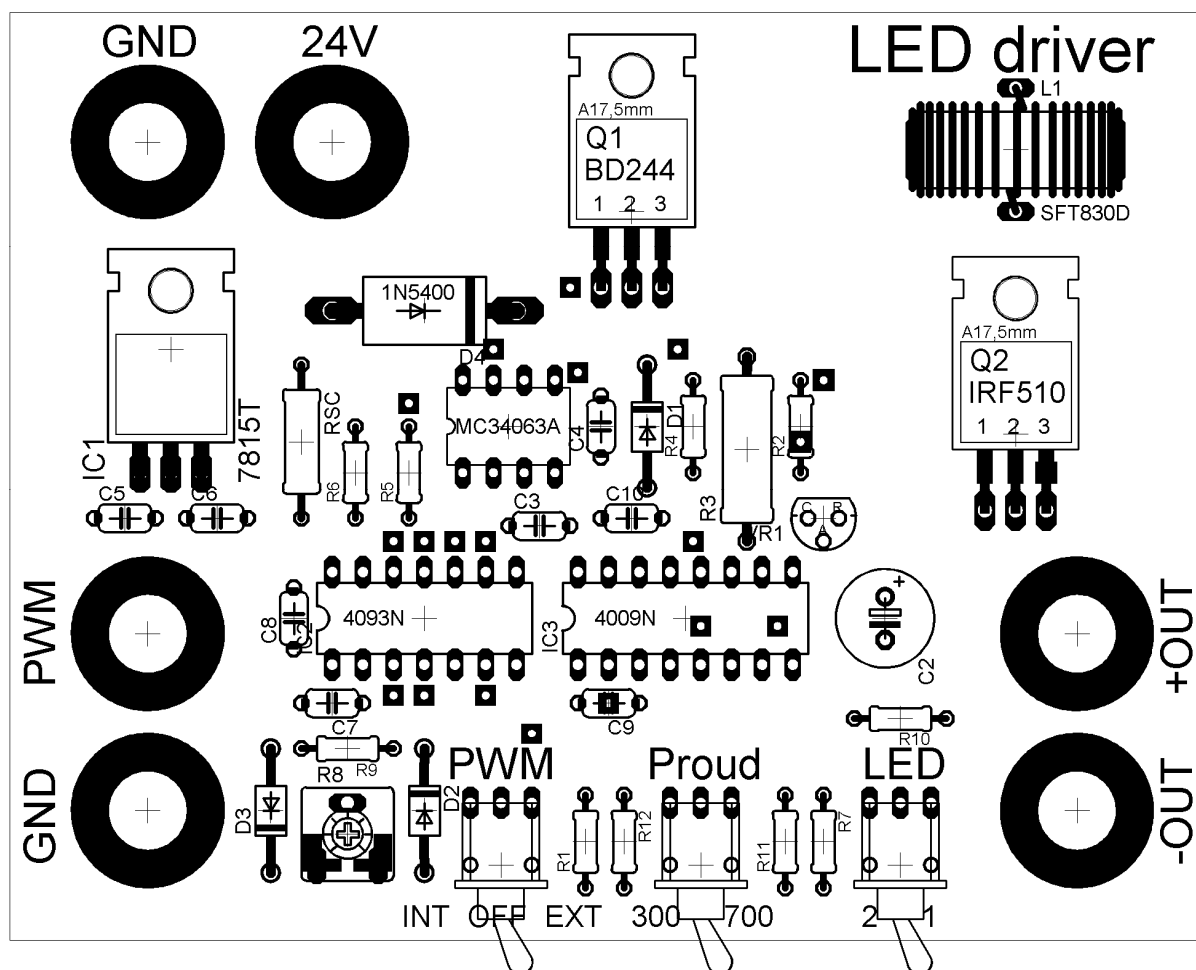
Obr. 4.1.2.3. – Stabilizace napájecího napětí pro logické obvody

Obvod byl doplněn o doporučené velikosti filtračních a blokujících kondenzátorů C5 a C6, které také dopomohly k vylepšení stability realizované PWM modulace.

## 4.2. Konstrukce

V předchozích podkapitolkách bylo objasněno, proč se použily zvolené součástky a jejich velikosti. Jak jistě nelze přehlédnout, některé musely být navrženy na nepájivém poli prostým zkoušením. Tímto se při reálném zapojení dospělo nejen k hodnotám potřebných součástek, ale také k důležitým závěrům při navrhování desky plošných spojů (dále jen DPS), které ve výsledku ovlivnily rozmístění součástek na DPS, jako jsou nutnost chladičů či použití blokujících kondenzátorů.

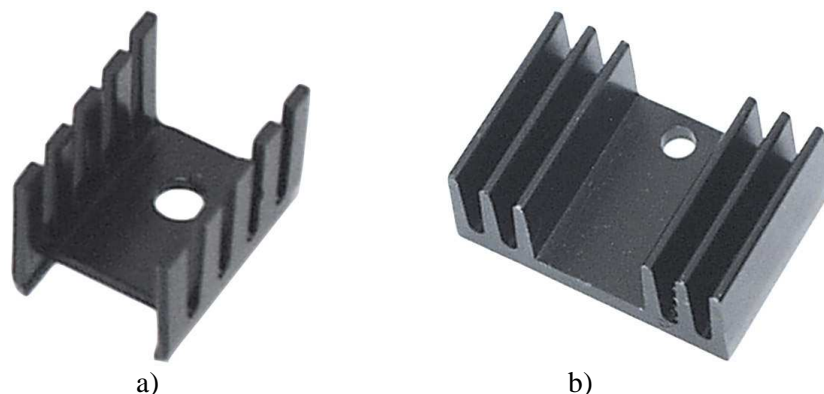
Realizační návrh byl uskutečněn pomocí programu Eagle 4.16, kde se podle navrženého schématu s definovanými typy součástek vytvořila „stínová kopie“ součástek s jejich vhodným propojením. Tyto součástky byly rozmístěny do stanoveného prostoru 10 x 8 cm, jak je ukázáno na obrázku 4.2.1.



Obr. 4.2.1 – Rozmístění součástek na desce plošných spojů

Při rozmístění se kladl důraz nejen na logické rozložení stěžejních součástek, jako je umístění banánkových zdírek na vhodných krajích DPS podle předpokládaného umístění připojovaných přístrojů, nebo umístění přepínačů a nastavovacího trimru PWM směrem k obsluze, ale také na již

zmiňované důležité závěry z testování na nepájivém poli. Proto si lze povšimnout prázdných prostorů kolem tranzistorů Q1, Q2, kde se následně připevnilly chladiče typu V4330N, a menšího prázdného prostoru kolem stabilizátoru IC1, kde byl použit chladič typu D01A. Všechny vybrané chladiče jsou voleny tak, aby součástka nedosahovala teplot, kdy by mohlo dojít k případnému popálení obsluhy. Oba typy chladičů lze vidět na obrázku 4.2.2.



Obr. 4.2.2 – Chladiče typu a) D01A b) V4330N [15]

Dalším důležitým poznatkem pro rozmístění bylo použití blokových kondenzátorů, které se zpravidla umísťují co nejbližší napájecím svorkám jednotlivých integrovaných obvodů. Toto pravidlo bylo tedy použito i při této realizaci, jak lze vidět z umístění blokových kondenzátorů C4 až C6 a C8 až C10.

Umístění toroidní cívky v pravém horním rohu je kvůli omezení jejího rušení, které je sice již z její konstrukce uzavřené, nicméně i minimální elektromagnetické rušení IO při jejich vysokých spínacích kmitočtech může způsobit nestabilitu logických obvodů.

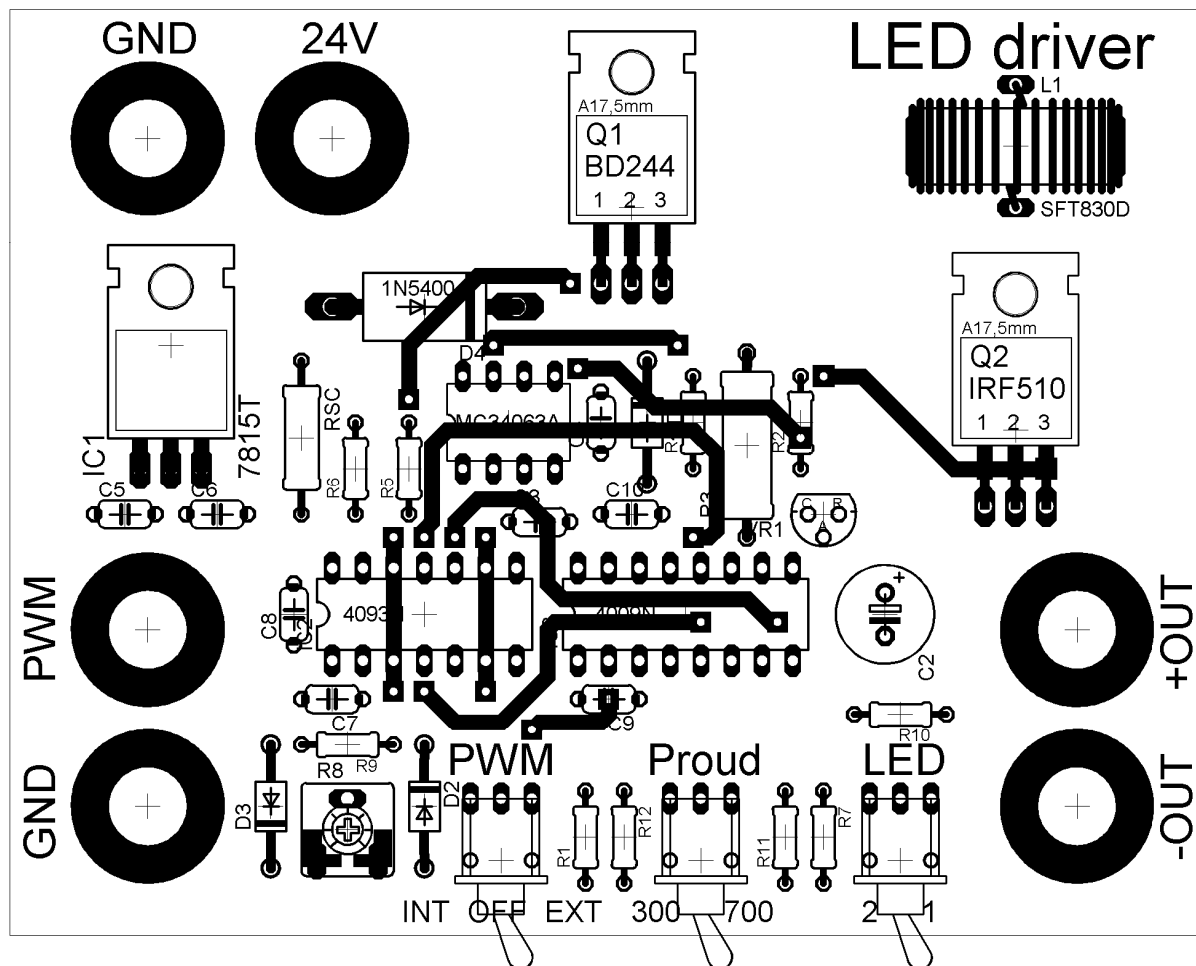
Na obrázku 4.2.1 si můžeme povšimnout také diody D4, která zde nemá vliv na funkci obvodu jako takového, ale pracuje zde jako ochranný prvek proti přepólování napájecích vstupů, na které je zvláště náchylný obvod MC34063A. Proto je umístěná přímo u napájecí svorky, aby tuto „poruchu“ odstranila ihned na počátku. Velikost této ochranné diody je dána tím, že musí snášet proudy přesahující 1 A.

Předposlední volbou při návrhu desky plošných spojů bylo v typu použitých konektorů. Volilo se mezi banánkovými zdířkami a BNC konektory, které by našly využití zejména u vstupu externího PWM signálu kvůli vysokým frekvencím ve vedení, nicméně vzhledem k laboratornímu použití a lepší dostupnosti banánkových konektorů se zvolila možnost s banánkovými zdířkami i pro externí PWM vstup.

Posledním rozhodováním při návrhu DPS bylo v typu použitých přepínačů. Jelikož z funkce obvodu byly pevně dány parametry spínačů, tedy pro přepínání PWM signálů spínač typu ON-OFF-ON jednopólový a pro přepínání velikosti proudu a počtu LED v sérii spínače typu ON-ON jednopólové, bylo třeba rozhodnout, zdali stojatý páčkový přepínač, nebo 90°. Zde byly zvoleny 90°, kvůli jejich lepšímu upevnění do desky a tedy i nižší možnosti poškození.

Po prostorovém rozvržení součástek se provedlo pospojování vodivých cest. Vzhledem k vysokému počtu drátových propojek při použití jednostranné desky plošných spojů byla použita

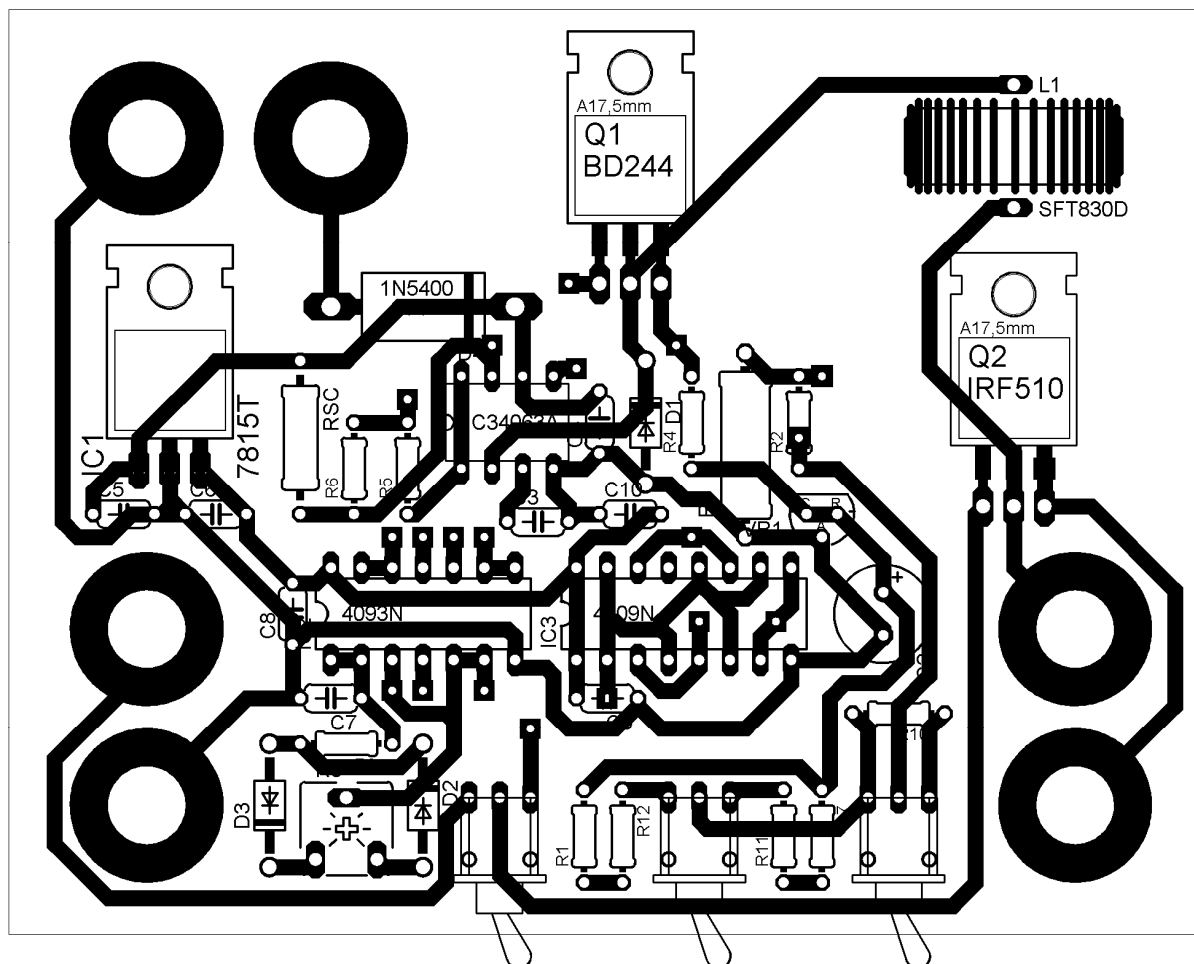
oboustranná DPS, která sebou nesla i výhodu realizace popisek na straně součástek. Návrh výsledného pospojování vodičů cest je ukázán na obrázcích 4.2.3 a 4.2.4.



Obr. 4.2.3. – Návrh pospojování vodičů cest ze strany součástek (TOP)

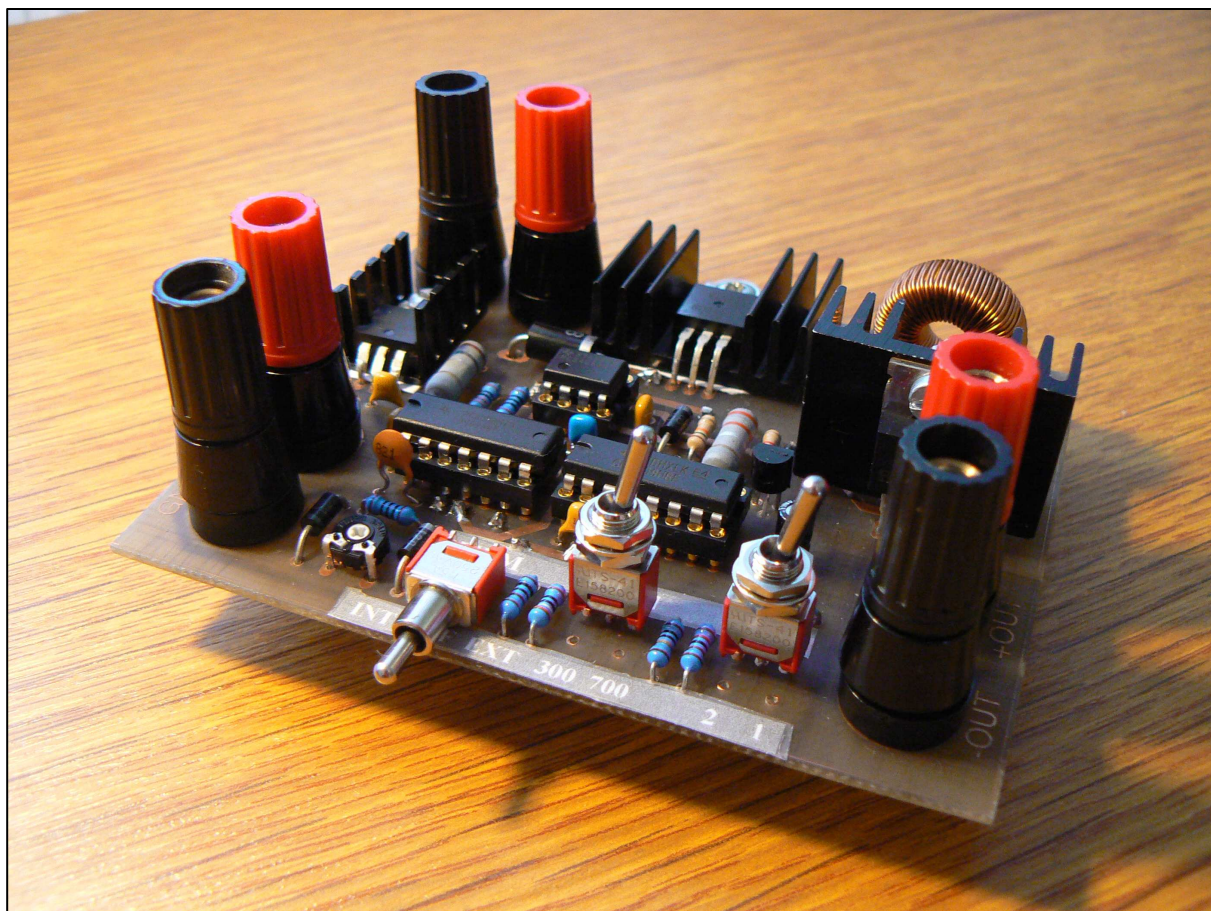
Na první pohled lze vidět 10 vodičů cest, které by za použití jednostranné DPS, musely být realizovány drátovým propojením. Taktéž již zmiňované popisky realizované neodleptanou mědí.





Obr. 4.2.4. – Návrh pospojování vodivých cest ze strany pájení (BOTTOM)

Takto navržená deska se následně vytiskne na papír, nebo umělohmotnou folii. U vrstvy TOP nesmíme při tisku zapomenout na zrcadlení, neboť folie se přikládají na kuprexidovou desku vytištěnou stranou. Taktěž je třeba při tisku zachovat rozměry, a tedy tisk bez definovaných okrajů. Skrz tyto vytištěné „šablony“ se deska osvětí. Následně je deska vyvolaná a vyleptána. Nakonec se deska ošetří a napájí se součástky. Výsledná realizace desky LED driveru je potom zobrazena na obrázku 4.2.4.



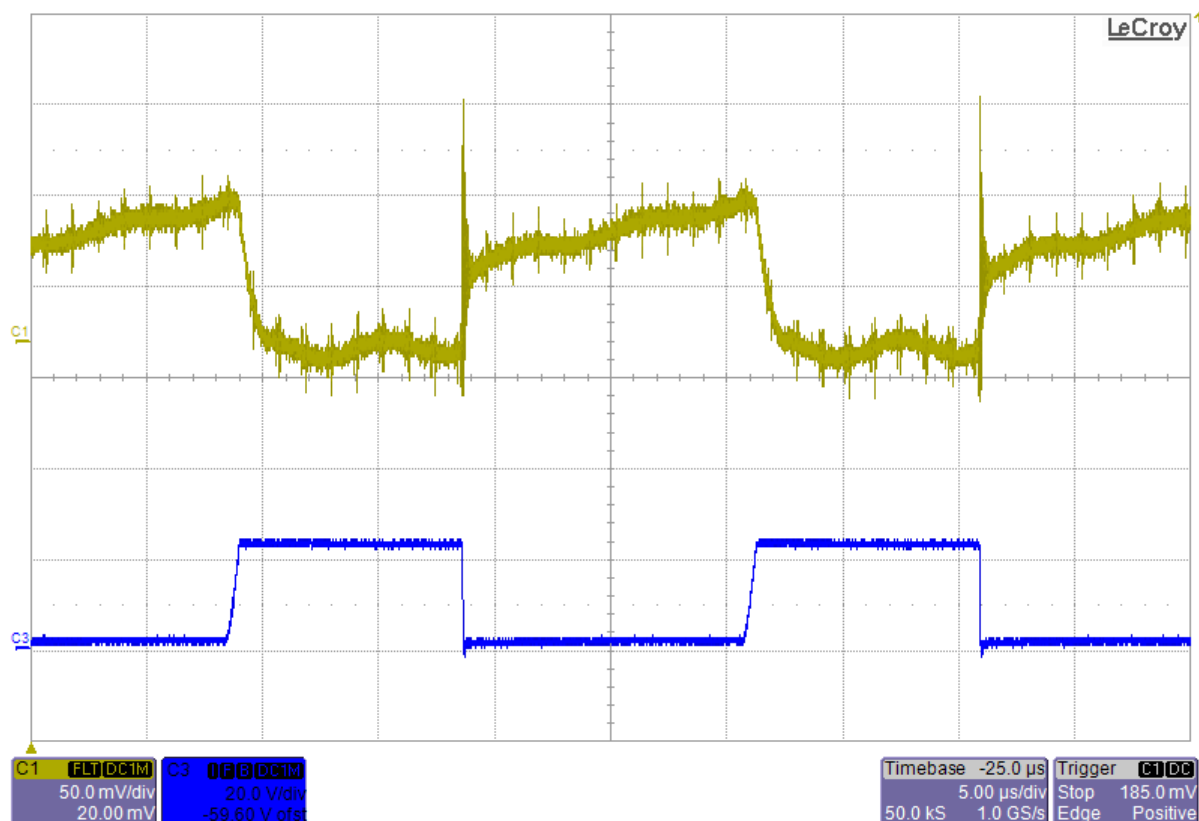
Obr. 4.2.5 – Realizace desky LED driveru

### 4.3. Měření

Při měření bylo prioritní ověřit funkčnost celého LED driveru, tedy správnou funkci proudového zdroje, a poté schopnost driveru samotné PWM modulace výstupního proudu. Nakonec se provedlo dodatečné, více názorné měření svitu LED diod při různém nastavení střídy modulačního signálu. Všechna měření byla provedena na osciloskopu LeCroy, kde pro měření proudu byla použita proudová sonda.

#### 4.3.1. Proudový zdroj

Při tomto měření se zachytily průběhy proudu a napětí na spínacím tranzistoru proudového zdroje, které lze vidět na obrázku 4.3.1.1.

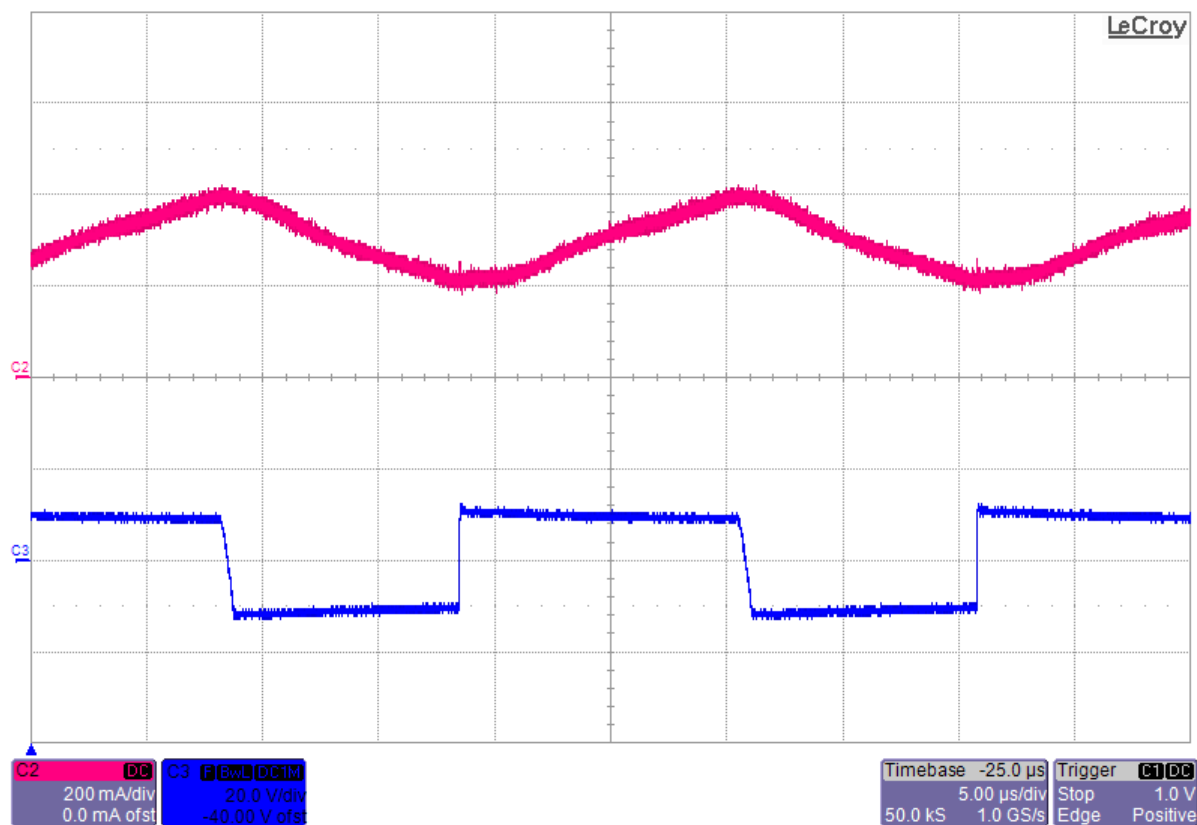


4.3.1.1. – Průběh proudu a napětí na spínacím tranzistoru proudového zdroje

Ze zachycených průběhů lze určit dobu, kdy je tranzistor rozepnutý, a kdy naopak sepnutý. Při rozepnutém stavu je na tranzistoru 24 V, což je napájecí napětí LED driveru, a potažmo proud na něm je nulový. Pokud je však tranzistor sepnutý, napětí na tranzistoru klesá téměř k nule a na spínači začne narůstat proud od hodnoty, na kterou se vybil proud naakumulovaný v indukčnosti. Tento proud je deformován rušením z okolních běžících přístrojů. Také si lze povšimnout proudových špiček, které vzniknou vlivem rychlého sepnutí spínače v obvodu s procházejícím proudem. Jedním z posledních

poznatků poskytnutých z uvedených průběhů je spínací frekvence proudového zdroje, která se podle zachycených průběhů blíží k hodnotě 23 kHz.

Následující obrázek 4.3.1.2. zachycuje průběh proudu a napětí na indukčnosti. Zapojení dostatečně veliké cívky zapříčiní vznik „konstantního proudu“ z impulzního proudu vytvořeného tranzistorem.



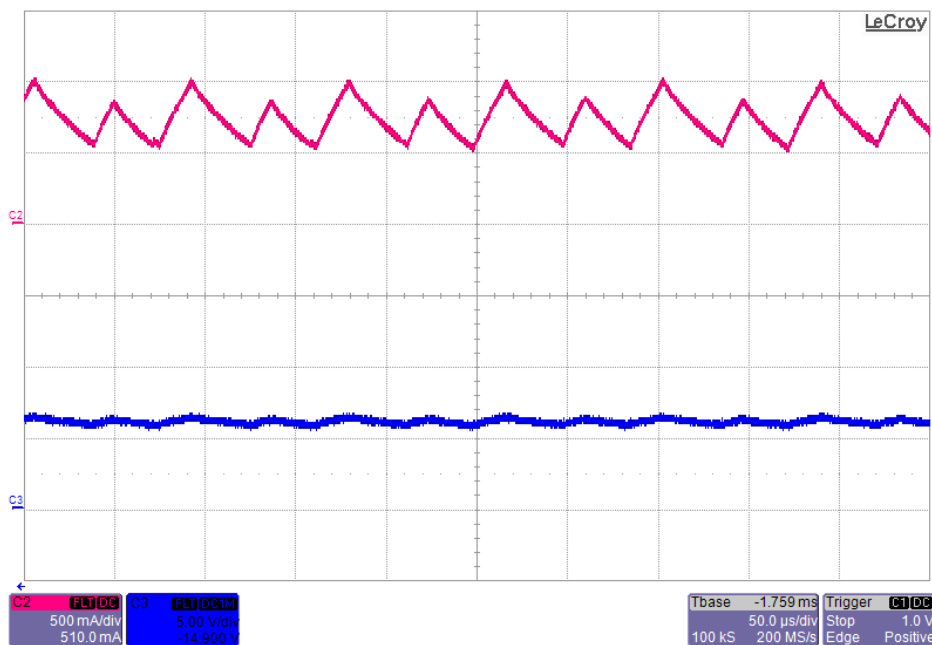
Obr 4.3.1.2. – Průběh proudu a napětí na indukčnosti proudového zdroje

Průběh proudu indukčností se na rozdíl od předchozího průběhu proudu na spínači proudového zdroje liší zejména poklesovou částí, kdy nahromaděná energie v indukčnosti se vybíjí přes zátěž a zpětnou diodu. V tomto případě je energie akumulovaná v cívce dostatečně velká, aby se proud udržel v kontinuálním režimu s určitým rozkmitem, a jeho střední hodnota „konstantního proudu“ je podle nastavení 300 mA. Napěťový průběh odpovídá teoretickým předpokladům, tedy velikost napětí odpovídá napětí na zátěži, s tím že polarita na indukčnosti se obrací v závislosti na sepnutí spínače. Při tomto měření byly na zátěži připojeny dvě 5 W LED, což odpovídá úbytku na zátěži 12 V.

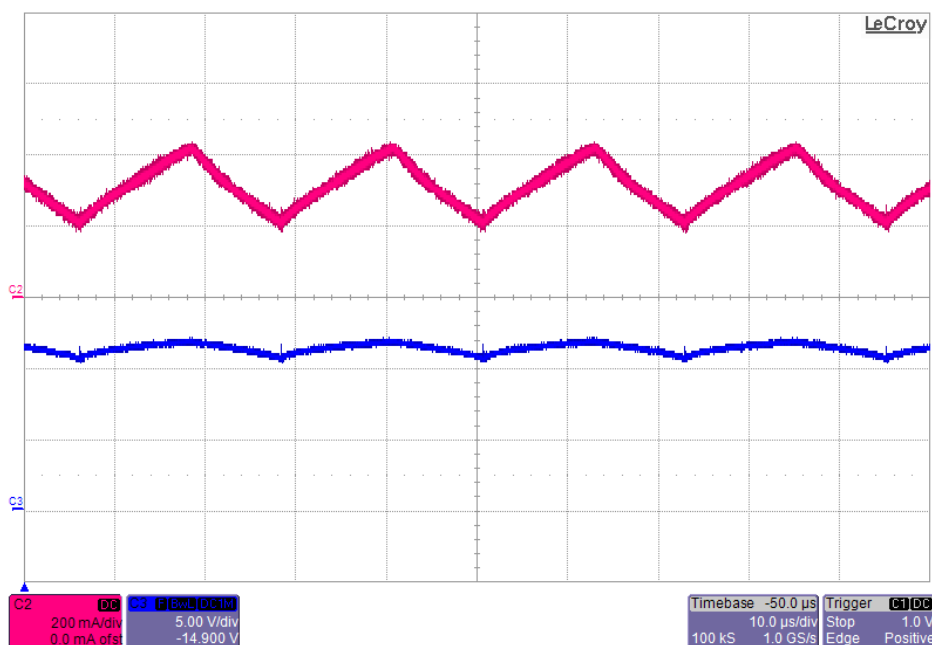
### 4.3.2. PWM modulate (stmívání)

Pro měření průběhů s PWM modulací byl použit interní PWM signál s frekvencí 1 MHz. Průběhy byly měřeny při různých nastaveních proudů a počtu LED v sérii, nicméně střídy byly voleny 20%, 50% a 80%, což v sobě zahrnuje i maximální možné meze interního PWM signálu.

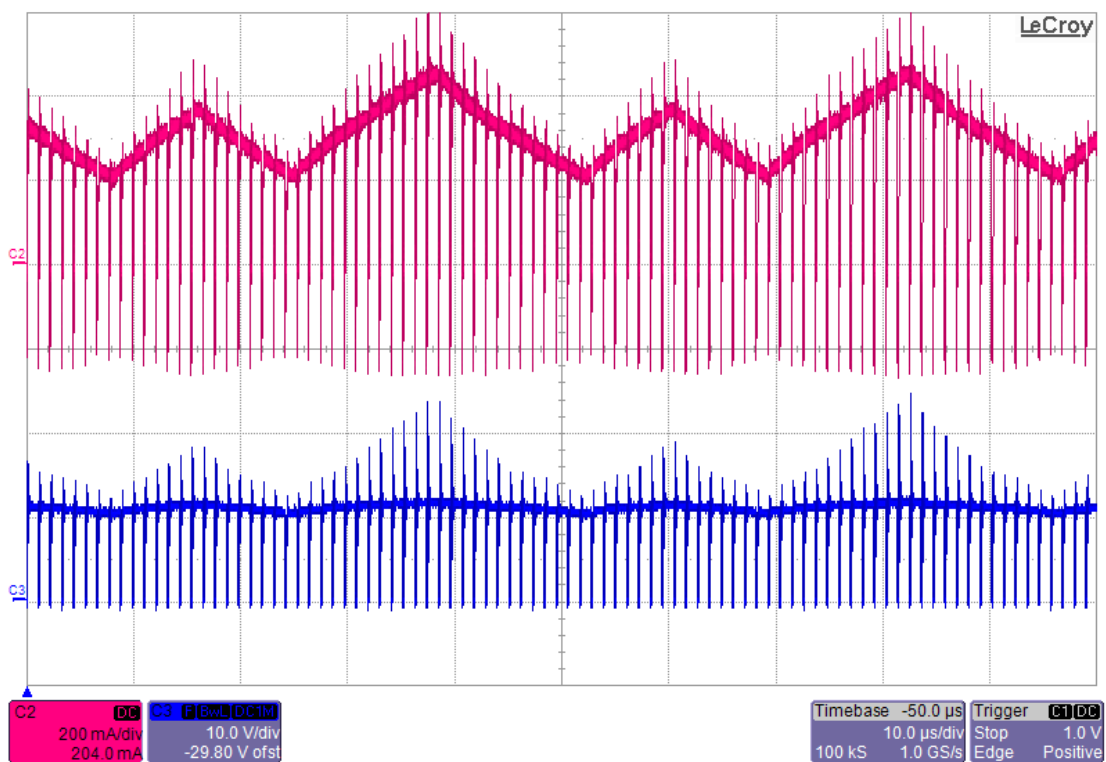
Na obrázku 4.3.2.1 a 4.3.2.2 lze nejdříve vidět napětí a proud na LED diodách při běhu bez PWM modulate



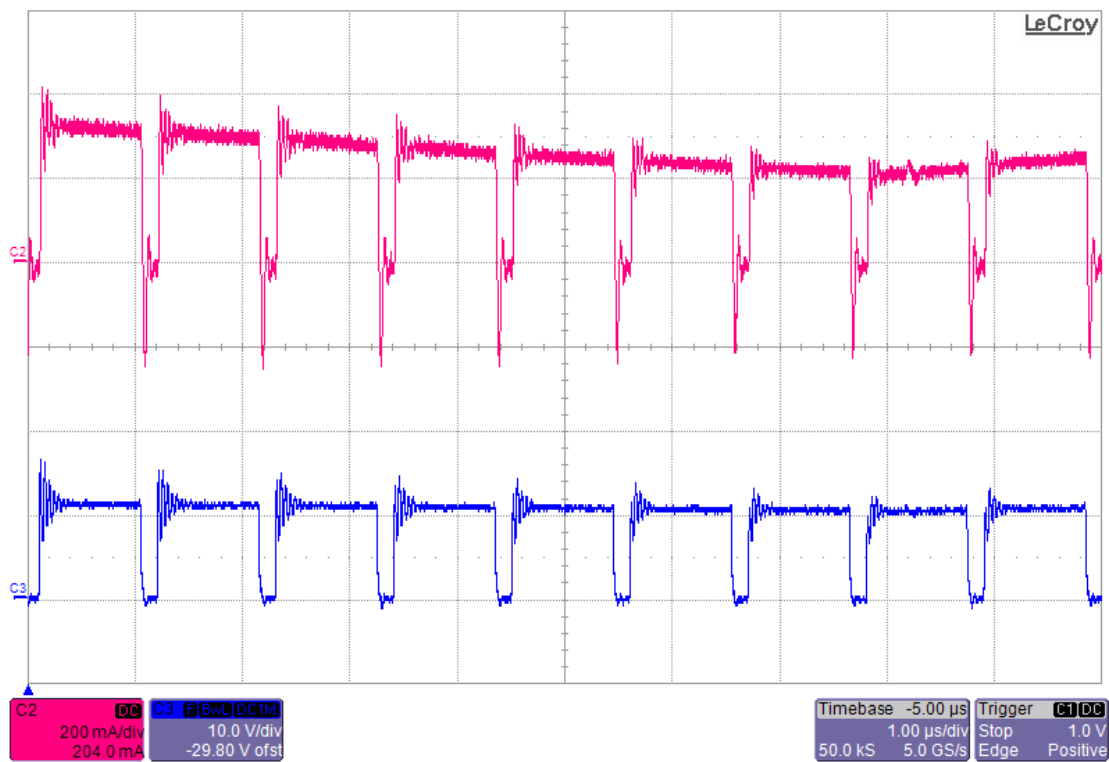
4.3.2.1a – Proud a napětí při nastavení 700 mA pro 1 LED



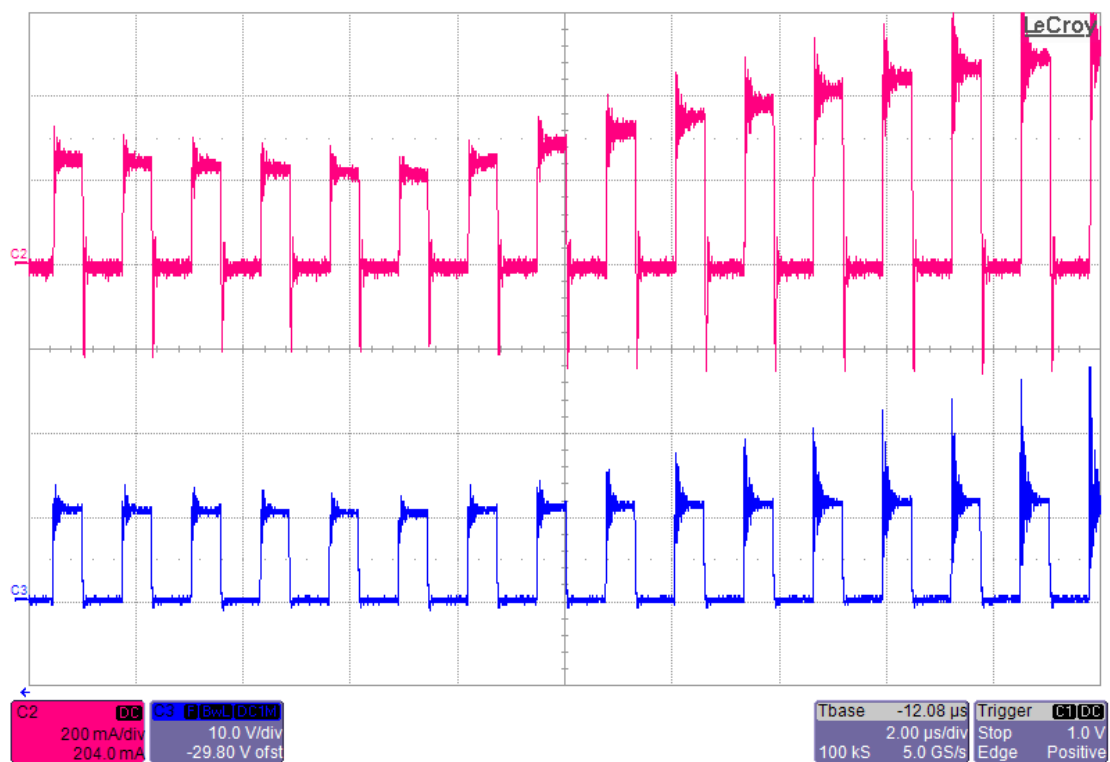
4.3.2.1b – Proud a napětí při nastavení 300 mA pro 2 LED



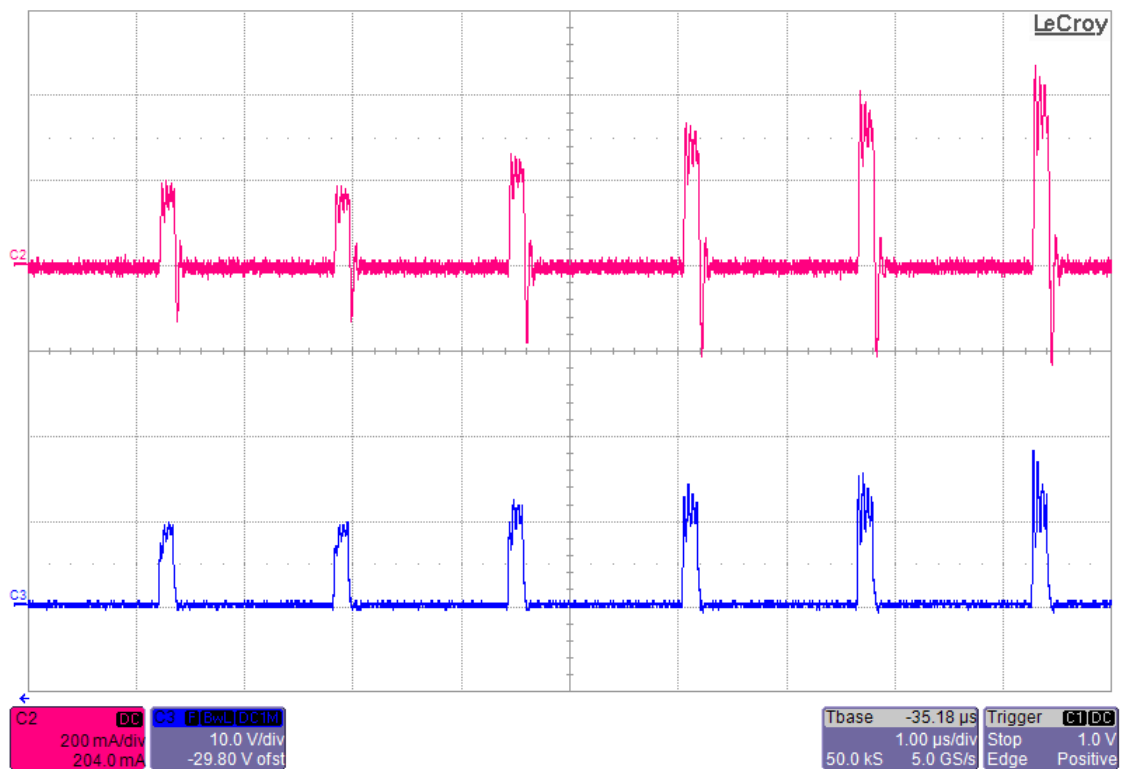
Obr. 4.3.2.2a – PWM modulace při nastavení 300 mA pro 2 LED



Obr. 4.3.2.2b – Detail PWM modulace se stíždou 80%

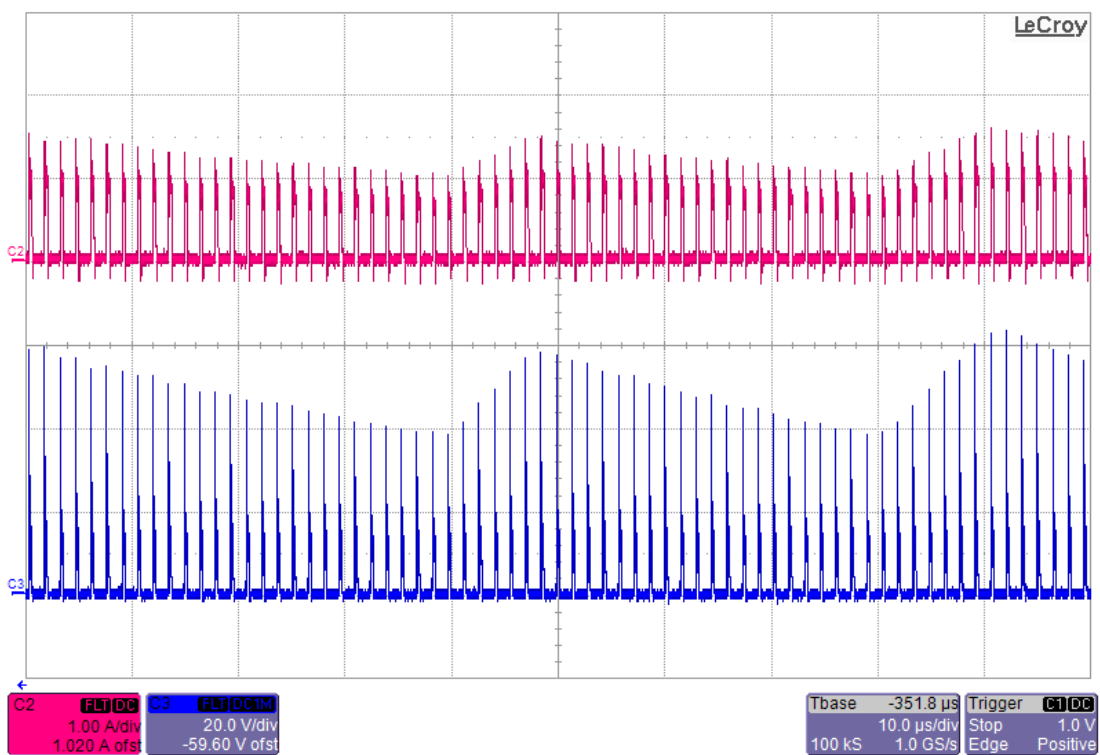


Obr. 4.3.2.2c – Detail PWM modulace se střídou 50%

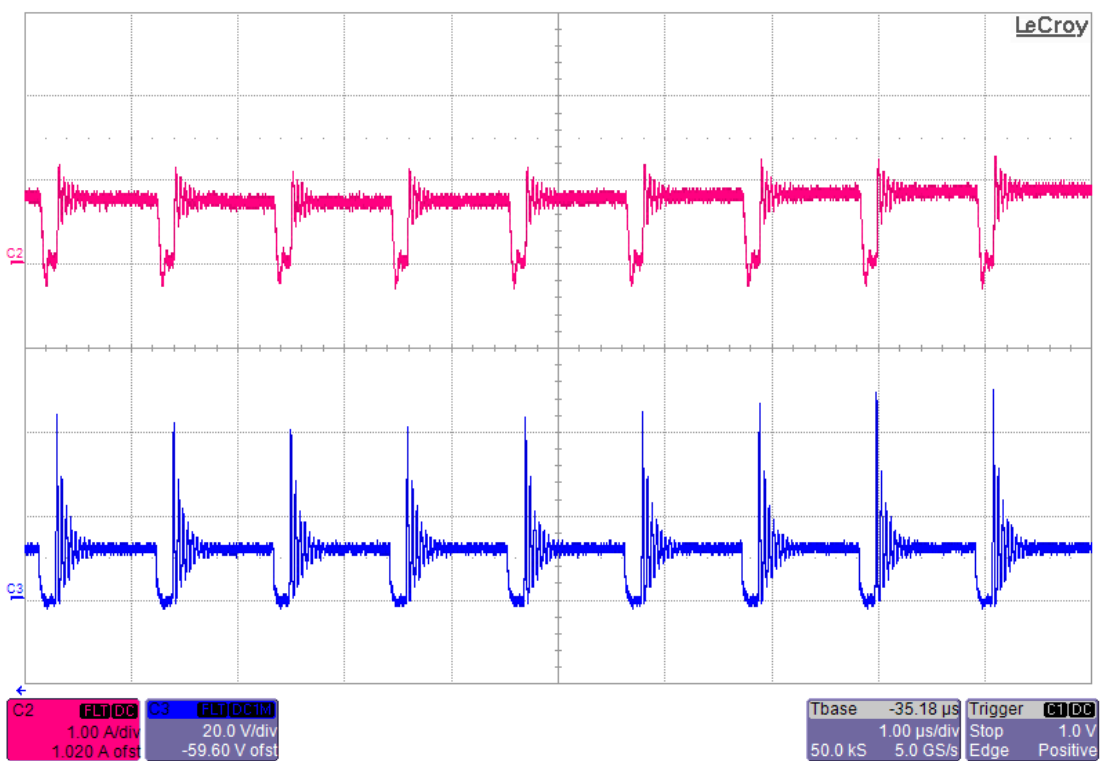


Obr. 4.3.2.2d – Detail PWM modulace se střídou 20%



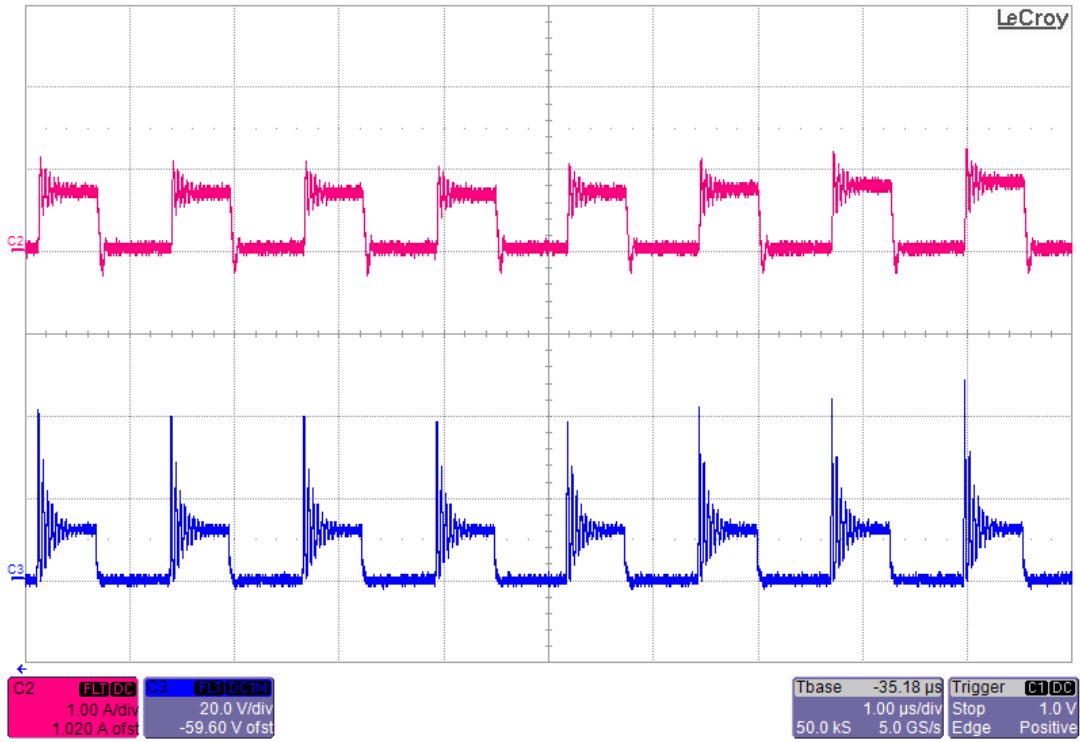


Obr. 4.3.2.3a – PWM modulace při nastavení 700 mA pro 2 LED

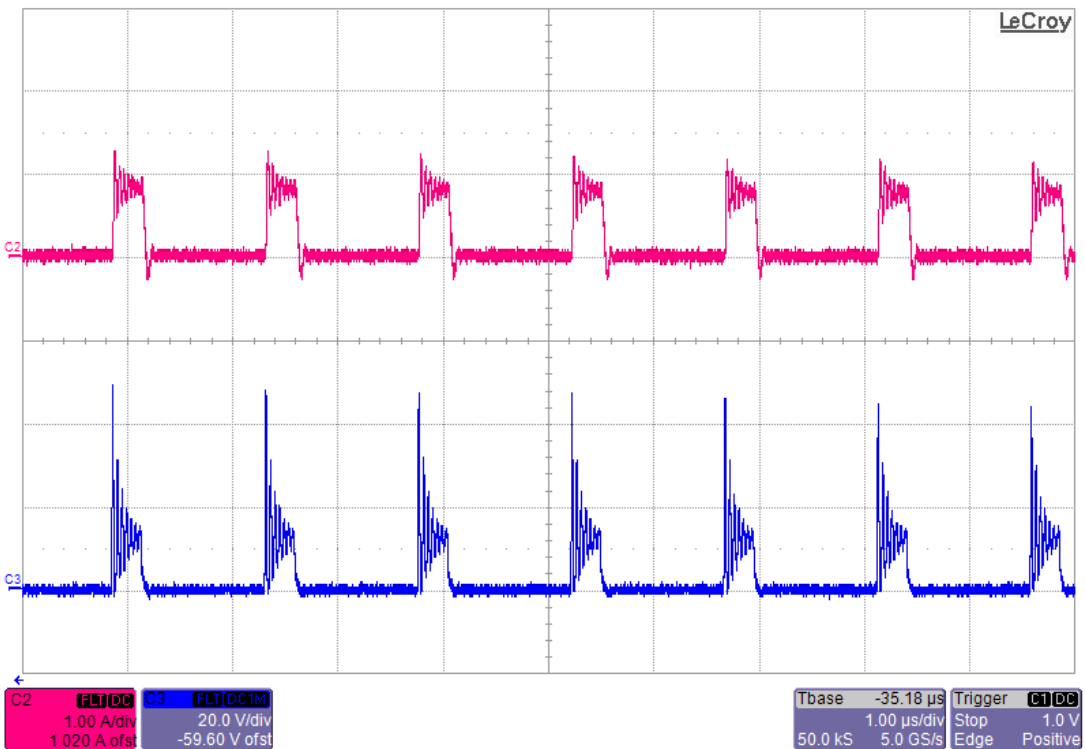


Obr. 4.3.2.3b – Detail PWM modulace se střídou 80%





Obr. 4.3.2.3c – Detail PWM modulace se střídou 50%



Obr. 4.3.2.3d – Detail PWM modulace se střídou 20%

Průběhy proudů a napětí na LED diodách bez PWM modulace, zobrazených na obrázcích 4.3.2.1a,b odpovídají nastaveným hodnotám proudů podle popisků. Stejně tak napětí odpovídá zátěži, tedy pro 1 LED se blíží k 6 V a pro 2 LED k 12 V.

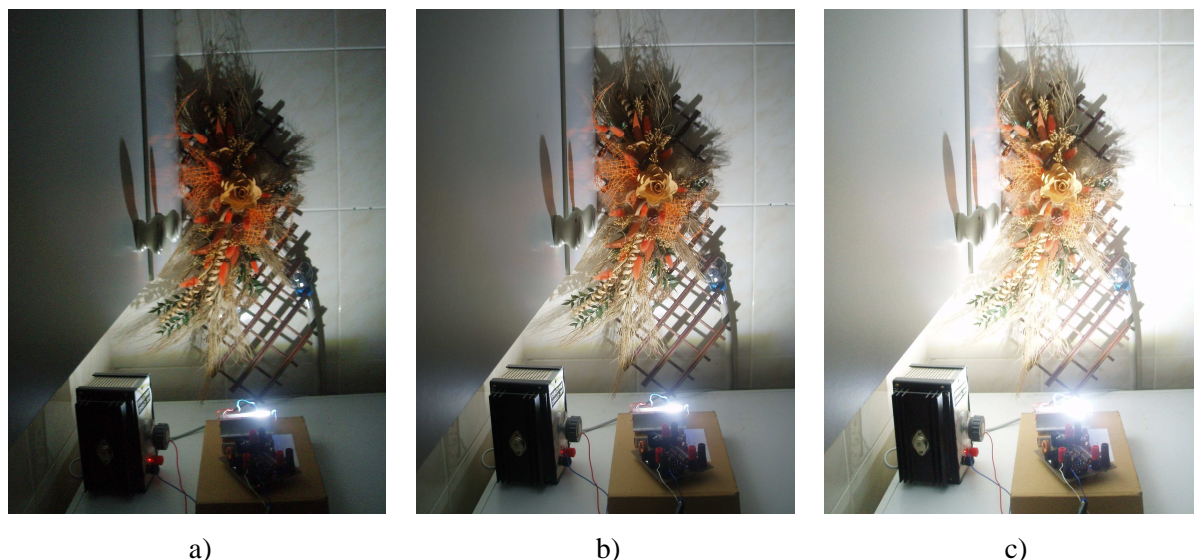
Obrázek 4.3.2.2a zobrazuje průběh proudu a napětí v delším časovém úseku, kde je jasně vidět, že frekvence spínání proudového zdroje je mnohonásobně nižší než frekvence modulačního signálu. Konkrétně spínací frekvence proudového zdroje je v tomto případě 47 kHz, kdežto modulovaný PWM signál se pohybuje kolem 1 MHz. Zde je možné také pozorovat proudové a napěťové špičky způsobené rychlými přechody z nulového proudu a napětí na požadované hodnoty a naopak.

Další obrázky 4.3.2.2b, c, d, zobrazují detail PWM modulace při různě nastavených střídacích. Jsou zde lépe viditelné překmity a jednotlivá nastavení stříd. Nutno podotknout, že hodnoty nastavených stříd jsou brány ve smyslu procházejícího proudu zátěží, přestože u PWM signálu, vzhledem k paralelnímu řazení PWM spínače, je tomu právě naopak. Z průběhů na detailních záznamech je také viditelné klouzání frekvence modulace při krajních hodnotách v rozmezí  $\pm 200$  kHz. Nicméně pro funkci daného zapojení je i nejnižší hodnota spínací modulační frekvence 800 kHz zcela dostačující.

Poslední zachycené průběhy, obrázky 4.3.2.2a, b, c, d, vložené do diplomové práce, víceméně kopírují předchozí obrázky, avšak s vyšší hodnotou středního proudu. Výraznější změnou od předešlých průběhů jsou mnohem vyšší napěťové špičky a doznívání překmitu při spínání, než u nastavení nižší hodnoty středního proudu, ale také minimální překmity při rozepínání. To je způsobeno rychlejším nástupem proudu při sepnutí a pomalejším poklesem proudu při rozepnutí.

### 4.3.3. PWM modulace (stmívání) v praxi

Pro názornější ukázkou, jak se PWM stmívání projeví na svitu LED, byly pořízeny fotografie jasu LED v zatemněné místnosti při nastavení střídy 20%, 50% a 80%



Obr. 4.3.3 – Zachycení jasu 1 LED při PWM modulaci se střídou a) 20%, b) 50% c) 80%

## 5 Závěr

Prvořadým úkolem této diplomové práce byla realizace funkčního vzorku LED driveru s digitální PWM modulací, v tomto případě použité ke stmívání připojených LED. Pro tuto realizaci bylo třeba nejdříve si vytvořit teoretický základ o principiální funkci LED, jejich konstrukci a řízení. Hlavními výsledky této teoretické části pro samotnou realizaci bylo zjištění, že pro napájení LED je třeba použít proudový zdroj, a také, že jedním z pilířů pro použití výkonových LED je jejich dostatečné chlazení. Pokud se zaměříme na informační výsledek tohoto bloku diplomové práce, nalezneme zde otázku výhod, zejména rychlé spínací a vypínací časy LED diod a mnohonásobně delší výdrž oproti běžným žárovkám, či nevýhod LED, jako právě zmiňovaná nutnost proudového zdroje, či problémy s uchlazením těchto součástek.

Druhou částí teoretického bloku bylo shromáždění informací o možných způsobech řízení proudu LED diodami. Tedy výsledkem pro samotnou realizaci zde bylo stanovení buck topologie k vytvoření proudového zdroje, neboť napájecím napětím LED driveru je 24 V, a na výstupní straně využíváme maximálně dvou 5W výkonových LED v sérii, a volba paralelního digitálního PWM stmívání. I tato část diplomové práce skrývá v sobě informativní hodnotu, kterou je například, rozdělení a popis využívaných topologií pro napájení LED, způsoby nastavování proudu při větším počtu LED, a v neposlední řadě rozdělení a porovnání vlastností analogového a digitálního PWM stmívání.

V poslední části se práce zabývá návrhem LED driveru. Při realizaci proudového zdroje se vychází z DC-DC měniče MC34063 posíleného o výkonový spínač a doplněného o snímací odpor pro vyhodnocování proudu v zátěži a dále o obvod pro snížení ztrát na snímacím odporu. Druhou částí byla realizace PWM signálu z logických obvodů, neboť kvůli požadované modulační frekvenci 1 MHz, nebylo možné použít operační zesilovače. Výsledné řešení se vyznačuje jednoduchou realizací, nicméně je vykoupeno nižšími možnostmi při nastavení střídy 20% až 80% a mírným klouzáním modulační frekvence v blízkosti mezi  $\pm 200$  kHz. Modulační signál musel být poté ještě proudově zesílen pro dostatečně rychlé spínání paralelního PWM MOSFETu.

Závěrečné měření potvrdilo správnou funkci takto realizovaného driveru pro výkonové LED, avšak se špičkovou proudovou nesymetrií při nastaveném výstupním proudu 700 mA způsobenou pravděpodobně vnitřními vlastnostmi obvodu MC34063. Dále by se samozřejmě mohlo docílit stmívání od 0 do 100%, ale za cenu náročnějšího zapojení. Stejně tak by se mohly zredukovat napěťové a proudové špičky při spínání, ale to by vyžadovalo rychlejší regulační obvod než MC34063, případně rovnou specializované obvody pro řízení LED.

Tato práce potvrdila možnost vysokofrekvenční paralelní modulace výkonových LED diod se strmými hranami i při spínacích frekvencích kolem 1 MHz. Potvrzená skutečnost by se dala využít při optickém přenosu dat skrze „poblikávání LED“ podle modulovaného signálu. Bylo by však třeba dále upravit překmitávání a stálost modulační frekvence. Také by bylo nutné vyhladit kolísání konstantního proudu použitím větší výstupní indukčnosti, než v případě této práce. Avšak tohle už je otázka dalšího vývoje.

# Literatura

- [1] PÁTEK, K. NEUMANOVÁ, M.: Elektroluminiscence – světlo budoucnosti, Vydání I. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1965
- [2] Ing. Robert Krejčí, Doc. Ing. Eduard Hulicius, CSc. – Polovodičové lasery a LED-ky:  
URL: <<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>  
[cit. 2010-26-1]
- [3] Autor FK Technics – LED s příkonem 50W? Skutečnost či fikce?:  
URL: <[http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/soucastky/art\\_90/led-s-prikonem-50w-skutecnost-ci-fikce.aspx](http://www.fktechnics.cz/cz/clanky/soucastky/art_90/led-s-prikonem-50w-skutecnost-ci-fikce.aspx)> [cit. 2010-26-1]
- [4] Obrázky výkonových LED:  
URL: <<http://www.fotonmag.cz/category/vyrobci-led/>> [cit. 2010-26-1]
- [5] Vlastnosti LED:  
URL: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/LED>> [cit. 2010-27-1]
- [6] Vlastnosti LED:  
URL: <<http://en.wikipedia.org/wiki/LED>> [cit. 2010-27-1]
- [7] Chris Richardson – LED applications and driving techniques:  
URL: <[http://www.national.com/onlineseminar/2007/led/national\\_LEDseminar.pdf](http://www.national.com/onlineseminar/2007/led/national_LEDseminar.pdf)>  
[cit. 2010-2-2]
- [8] Ing. Jan Babčaník – Spínané zdroje:  
URL: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/ART1876-Spinane-zdroje.html>> [cit. 2010-2-2]
- [9] Sameh Sarhan, Chris Richardson - A matter of light, Part 2--- Buck whenever possible:  
URL: <<http://www.powermanagementdesignline.com/howto/208400193>>  
[cit. 2010-4-2]
- [10] Sameh Sarhan, Chris Richardson - A matter of light, Part 3---When to boost and buck-boost:  
URL: <[http://www.embedded.com/columns/technicalinsights/208401316?cid=RSSfeed\\_embedded\\_news](http://www.embedded.com/columns/technicalinsights/208401316?cid=RSSfeed_embedded_news)>  
[cit. 2010-4-2]
- [11] Jeff Falin – Vybíráme vhodný budič WLED pro poosvětlení LCD panelů  
URL: <<http://hw.cz/teorie-a-praxe/art3038-vybirame-vhodny-budic-wled-pro-podsvetleni-lcd-panelu.html>>  
[cit. 2010-4-2]
- [12] Sameh Sarhan, Chris Richardson -A matter of light, Part 4 --- PWM dimming:  
URL: <<http://www.powermanagementdesignline.com/howto/showArticle.jhtml;jsessionId=N3UDLKEXH11EQSNDLPSKH0CJUNN2JVN?articleID=208402471>>  
[cit. 2010-4-2]

- [13] MELEXIS – PWM řízení LED  
URL:<[http://www.melexis.com/Asset/PWM\\_dimming\\_using\\_MLX10803\\_DownloadLink\\_5268.aspx](http://www.melexis.com/Asset/PWM_dimming_using_MLX10803_DownloadLink_5268.aspx)>  
[cit. 2010-26-1]
- [14] Luboš Střítecký - Spínaný LED driver (nejen) pro výkonové LED  
URL: <<http://amarokcz.wz.cz/LEDDRVSM.htm>>  
[cit. 2010-4-3]
- [15] Obrázky chladičů:  
URL:< <http://www.gme.cz/cz/elektronicke-soucastky/chladice/14067.html>>  
[cit. 2010-5-4]