



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

## SPÍNANÉ BUDIČE LED

SWITCHING LED DRIVERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MIROSLAV DOLEŽAL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL ŠTEFFAN, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Mikroelektronika a technologie**

**Student:** Miroslav Doležal

**ID:** 146807

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2013/2014

**NÁZEV TÉMATU:**

## Spínané budiče LED

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte tři základní typologie budičů LED (snižující, zvyšující a snižující i zvyšující napětí), na základě získaných poznatků proveďte rešerši spínaných budičů LED. Navrhněte integrované obvody vhodné pro konstrukci všech tří alternativ budičů a přehledně zpracujte jejich hlavní parametry do tabulky. Zrealizujte vybraný budič pro napájení vysoce svítivých LED diod o konstantním výstupním proudu 900 mA.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 5.6.2014

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

**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**

V této bakalářské práci jsou popsány tři základní typologie budičů (snižující, zvyšující a snižující i zvyšující výstupní napětí). Následně je vybráno 5 konkrétních integrovaných obvodů, které splňují požadavky pro napájení LED diod konstantním proudem. Výstupem této práce je návrh a sestavení budiče s vybraným integrovaným obvodem pro napájení vysoce svítivých LED diod o konstantním výstupním proudu 900 mA.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Měnič, budič, spínaný zdroj, proudový zdroj

## **ABSTRACT**

In this bachelor's these are three basic typologies of drivers (step down, step up, step up and down output voltage) described. Five specific integrated circuits fulfilling the requirement for supplying LED diodes are selected. The output of this thesis is the design and construction of LED driver for supplying high brightness LEDs with 900 mA constant current.

## **KEYWORDS**

Convertor, driver, switching supply, Step-down, Step-up, Buck, Boost, Buck-boost

## **BIOGRAFICKÁ CITACE**

DOLEŽAL, M. *Spínané budiče LED*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2014. 58 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan PhD.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Spínané budiče LED 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících 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 vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, PhD. a Dip.-Ing. Josefu Vochoyánovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>viii</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>x</b>
<b>Úvod</b>	<b>xi</b>
<b>1 Teoretická část</b>	<b>12</b>
1.1 Měnič snižující napětí .....	12
1.2 Měnič zvyšující napětí .....	14
1.3 Měnič zvyšující i snižující napětí .....	15
1.4 Porovnání integrovaných obvodů .....	16
1.4.1 Integrovaný obvod LM3478 od výrobce Texas Instruments .....	17
1.4.2 Integrovaný obvod LM3429 od výrobce Texas Instruments .....	19
1.4.3 Integrovaný obvod MAX16833 od výrobce Maxim Integrated .....	21
1.4.4 Integrovaný obvod LT3755 od výrobce Linear Technology .....	23
1.4.5 Integrovaný obvod NCP3065 od výrobce Onsemiconductor .....	25
1.4.6 Zhodnocení a výběr vhodného IO .....	27
<b>2 Praktická část</b>	<b>29</b>
2.1 Cíle obvodu .....	29
2.2 Návrh a realizace obvodu .....	29
2.2.1 Navržení schématu .....	29
2.2.2 Vypočet hodnot obvodových prvků .....	31
2.2.3 Simulace obvodu .....	34
2.2.4 Dosažené výsledky simulace .....	35
2.2.5 Doplnění schématu s dimenzováním součástek .....	37
2.2.6 Návrh desky plošných spojů .....	41
2.2.7 Oživení obvodu .....	42
2.3 Měření obvodu .....	42

2.3.1	Dosažené parametry .....	42
2.3.2	Účinnost .....	45
2.3.3	PWM regulace jasu.....	46
2.3.4	Teplotní měření .....	48
2.3.5	Elektromagnetická kompatibilita (EMC) .....	49
2.4	Vzhled hotového obvodu .....	51
	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Literatura</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>55</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Blokové schéma snižovače napětí [8] .....	13
Obr. 2: Orientace napětí a proudu v obvodu snižující napětí .....	13
Obr. 3: Blokové schéma zvyšovače napětí [9] .....	14
Obr. 4: Orientace napětí a proudu v obvodu zvyšující napětí .....	15
Obr. 5: Blokové schéma snižovače/snižovače napětí [10] .....	15
Obr. 6: Orientace napětí a proudu v obvodu snižovači/zvyšovači napětí.....	16
Obr. 7: Schematická značka [11].....	17
Obr. 8: Pouzdro SOIC-8 [11].....	17
Obr. 9: Typické zapojení obvodu zvyšující napětí s úpravou pro nastavení výstupního proudu [12].....	18
Obr. 10: Schematická značka LM3429 [13] .....	19
Obr. 11: Pouzdro TSSOP – 14 LM3429 [13] .....	19
Obr. 12: Typické zapojení LM3429 jako zvyšovač napětí pro napájení LED diody [13] .....	20
Obr. 13: Schematická značka MAX16833 [15].....	21
Obr. 14: TSSOP-16 Pouzdro MAX16833 [15] .....	21
Obr. 15: Typické zapojení obvodu zvyšujícího napětí s MAX16833 dodávajícího konstantní proud do LED diody [15] .....	22
Obr. 16: Schematická značka LT3755 [17] .....	23
Obr. 17: MSOP-16 pouzdro LT3755 [17] .....	23
Obr. 18: Typické zapojení s obvodem LT3755 jako zvyšovače napětí s konstantním proudem na výstupu [17] .....	25
Obr. 19: Schematická značka NCP3065 [19] .....	26
Obr. 20: SOIC-8 Pouzdro NCP3065 [19].....	26
Obr. 21: Typické zapojení s NCP3065 jako snižovač napětí s konstantním výstupním proudem [19].....	27
Obr. 22: Schéma zapojení obvodu snižující výstupní napětí doporučené výrobcem [17] .....	30



Obr. 23: Vytvořené schéma zapojení pro simulaci obvodu.....	31
Obr. 24: Schéma zapojení v simulačním programu LTSpice.....	34
Obr. 25: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 13,5 V.....	35
Obr. 26: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 9 V.....	36
Obr. 27: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 16 V.....	36
Obr. 28: Schéma zapojení kompletního obvodu.....	37
Obr. 29: Schéma zapojení s umístění a popisem filtrů.....	40
Obr. 30: Deska plošných spojů v návrhovém systému OrCad PCB Editor (50 x 36 mm).....	41
Obr. 31: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 13,5 V.....	43
Obr. 32: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 9 V.....	44
Obr. 33: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 16 V.....	44
Obr. 34: Graf závislosti účinnosti obvodu na změně vstupního napětí.....	46
Obr. 35: Úroveň jasu při 1% střídavy řídicího signálu.....	47
Obr. 36: Úroveň jasu při 50 % střídavy řídicího signálu.....	47
Obr. 37: Úroveň jasu při 99% střídavy řídicího signálu.....	47
Obr. 38: Snímek teplotního spektra při ustáleném stavu obvodu bez použití filtru a tlumících obvodů.....	48
Obr. 39: Snímek teplotního spektra při ustáleném stavu s použitím filtrů a tlumících obvodů.....	48
Obr. 40: Vyzařovací charakteristika obvodu bez použití tlumícího filtru.....	49
Obr. 41: Vyzařovací charakteristika obvodu s použitím vstupního filtru.....	50
Obr. 42: Vyzařovací charakteristika obvodu s použitím všech filtrů.....	50
Obr. 43: Fotografie hotového obvodu (skutečné rozměry 50 x 36 mm).....	51

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přehled integrovaných obvodů různých výrobců .....	16
Tab. 2: Přehled IO s vyznačeným vybraným obvodem .....	28
Tab. 3: Přiřazení hodnotě spínací frekvence hodnotu odporu $R_2$ [17].....	32
Tab. 4: Výkonové přizpůsobení SMD rezistorům podle pouzdra [5].....	38
Tab. 5: Hodnoty pro výpočet účinnosti obvodu .....	45

# ÚVOD

V současné době je jedním z hlavních témat životní prostředí. S vývojem elektroniky spotřeba elektrické energie stále stoupá, a proto se hledají řešení, jak tuto energii ušetřit. Typickým příkladem je klasická žárovka, v níž světlo vzniká rozžhavením odporového vlákna. Účinnost výroby světla touto cestou je však pouze do 10 %. Proto se tradiční žárovky nahrazují například plynovými výbojkami, které mají účinnost o něco vyšší. V dnešní době je aktuální výroba světla generovaného na PN přechodu diody ve formě fotonů. Na tomto principu je založena LED dioda. Výroba tohoto typu světla je velmi účinná, ale vzniká nový problém s napájením, protože LED dioda svítí při konstantním stejnosměrném napájení. Proto se tato práce zabývá zdroji neboli budiči pro LED diody nahrazující žárovky ve světlometech automobilu.

Typy obvodů a jejich parametry jsou navrhovány tak, aby fungovaly při typickém napětí v automobilu, protože celá práce je vytvořena pro potřeby automobilového průmyslu.

Aby byla zaručena zvýšená účinnost, nelze použít lineárního integrovaného obvodu, v kterém je nevyužitá energie vyzářena ve formě tepla. Proto jde o budiče spínané, neboli fungující v pulzním režimu.

Jak už název této práce napovídá, jsou zde porovnávány budiče v první fázi po stránce teoretické. V této části je vysvětleno, co to vlastně budiče jsou a jaké existují typy. Jsou popsány tři základní struktury podle toho, jaké napětí mají na výstupu oproti vstupu. Jde tedy o snižovač, zvyšovač a snižovač i zvyšovač napětí. Všechny tyto typy jsou v této práci blokově znázorněny a stručně objasněny jejich principy.

Další kapitola je založena na porovnání zvolených pěti integrovaných obvodů, které jsou řídicí částí takového obvodu. Tyto obvody jsou vybrány tak, aby byly použitelné pro tři základní struktury, a jejich hlavní parametry jsou porovnány v tabulce. Vybrány jsou produkty různých firem pro širší srovnání. Každá součástka je popsána výtahem z katalogového listu od výrobce, struktura tohoto popisu je u všech součástí stejná.

Výstupem této práce je srovnání jednotlivých obvodů podle jejich parametrů. Na základě tohoto srovnání je vybrán integrovaný obvod s nejvhodnějšími parametry, a ten je použit pro návrh a sestavení měniče snižujícího výstupní napětí. Tento obvod je schopen napájet dvě vysoce svítivé LED diody. V praktické části je znázorněn postup při návrhu obvodu tohoto typu a následné měření jeho parametrů. [1][2][3][4][5][6][7]

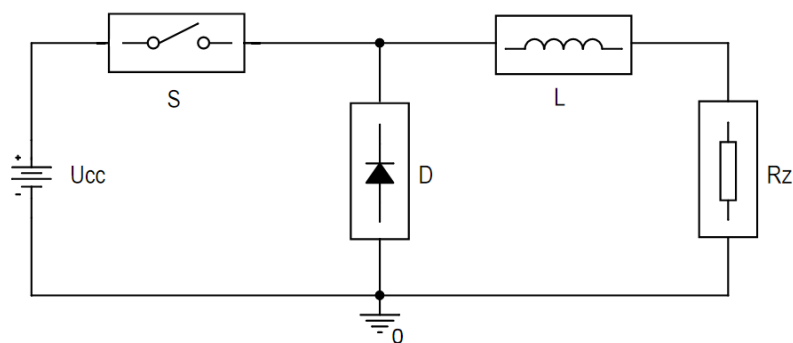
# 1 TEORETICKÁ ČÁST

Téma této práce je založeno na teorii spínaných budičů. Měníče slouží k regulaci elektrické energie, a to tak, že mění vstupní stejnosměrné napětí na jiné výstupní stejnosměrné napětí. Je vysvětlen princip budičů, které výstupní napětí snižují, zvyšují a snižují i zvyšují. Důraz je kladen na regulaci konstantního výstupního proudu, kterým se LED diody napájí. Celkový obvod se dělí na dvě části, řídicí a výkonovou. Řídicí část obvodu je realizovaná integrovaným obvodem, který určuje typ obvodu podle vnějšího uspořádání součástek. Výkonová část je v základu tvořena spínacím tranzistorem, pokud není obsažen v IO (integrovaný obvod), cívkou a diodou. Podle vzájemného zapojení těchto prvků výkonové části se mění charakter zapojení, a to podle toho, jaké má být výstupní napětí oproti vstupnímu. V tomto případě jde spíše o regulaci výstupního proudu, takže napětí je řízeno výstupním proudem. Celý tento obvod pracuje v pulzním režimu pro dosažení maximální účinnosti. Hlavní využití je v aplikacích, kde je požadováno konstantní výstupní napětí nebo proud. Zároveň jsou tyto obvody známé vysokou účinností (nad 80 %). Využívají se jak v elektronice, tak i v automobilovém průmyslu. V tomto případě jde o napájení LED diodových světel v automobilu.

## 1.1 Měníč snižující napětí

Tento měnič se nejčastěji nazývá v anglickém jazyce jako STEP DOWN nebo BUCK. Měníč tohoto typu mění výstupní napětí pouze na napětí, které je vždy menší než napětí vstupní.

Jádro obvodu se skládá z diody, cívky a spínače. Ten bývá v praxi realizován tranzistorem. Struktura, v které je obvod z těchto součástek zapojen, je znázorněna na obr. 1. Spínač S plní funkci připojení a odpojení napájecího zdroje do obvodu. Dioda D je umístěna tak, aby orientovala tok proudu v obvodu. Cívka L představuje prvek obvodu, který akumuluje elektrickou energii a následně plní funkci náhradního zdroje, z kterého je napájena zátěž  $R_z$  neboli spotřebič.



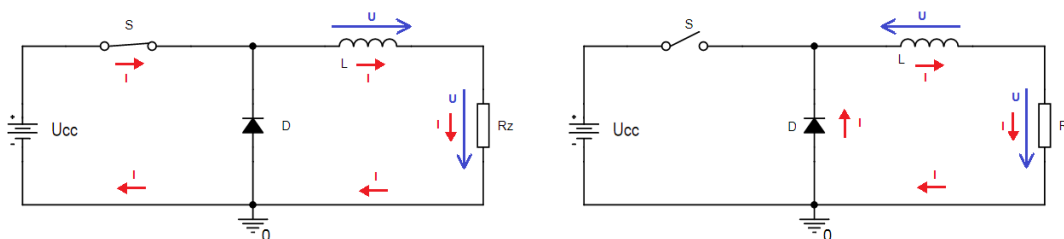
Obr. 1: Blokové schéma snižovače napětí [8]

Obvod pracuje ve dvou fázích, z toho ta první nastává při sepnutí spínače a druhá počátkem rozpojení spínače. Toky proudů a úbytky napětí v obvodu lze vidět na obr. 2, kde jsou znázorněny obě fáze obvodu.

V prvním kroku (viz obr. 2 vlevo) je spínač S v poloze zapnuto a obvodem protéká proud  $I$ , který vytváří úbytek napětí na cívce L a zátěži  $R_z$ . Cívka L se tímto proudem nabíjí až na hodnotu proudu určenou časem sepnutého spínače S.

V druhém kroku (viz obr. 2 vpravo) je obvod odpojen od zdroje  $U_{cc}$  a nabitá cívka reverzuje své napětí, stává se zdrojem a postupně se vybíjí proudem přes diodu D uzavřeným obvodem do zátěže. Toto probíhá tak dlouho, dokud se nesepe spínač S a celý cyklus se opakuje.

Velikost proudu do zátěže je dána poměrem doby prvního a druhého cyklu. Zvlnění výstupního proudu je závislé na frekvenci celého cyklu (první i druhý krok) a velikosti indukčnosti cívky. Velikost výstupního napětí na zátěži závisí na velikosti napětí, na kterou se dostane cívka v době sepnutí. Vždy však toto napětí bude maximálně napětí zdroje  $U_{cc}$ , protože je vztažené k zemi.

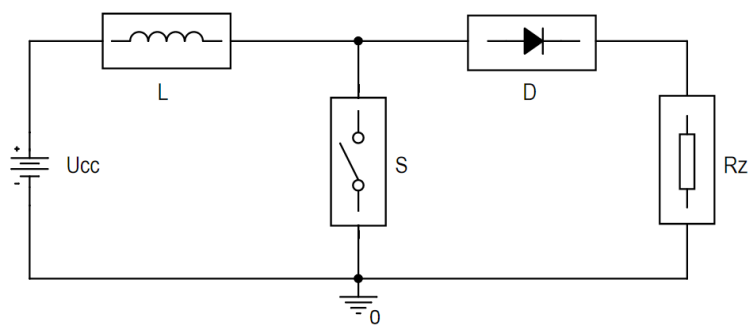


Obr. 2: Orientace napětí a proudu v obvodu snižující napětí

## 1.2 Měnič zvyšující napětí

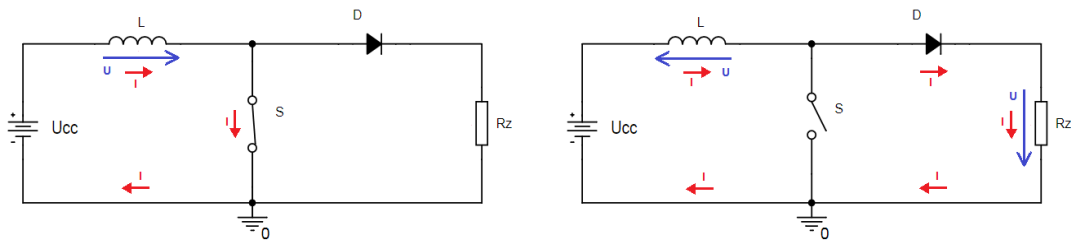
Další názvy tohoto měniče jsou STEP UP nebo BOOST konvertor. Tento typ měniče konvertuje vstupní napětí na výstupní tak, že výstupní napětí je vždy větší než napětí vstupní.

Blokové schéma na obr. 3 vystihuje sestavení součástek, kde je zřejmé, že cívka L (akumulační prvek) je přímo na hlavní větvi obvodu a buďto je pomocí spínače S uzemněna, nebo je sériově spojena přes diodu D do zátěže  $R_z$ . Protože je cívka umístěna přímo na napájecí větvi, je výstupní napětí dáno součtem napětí zdroje a napětím na cívce.



Obr. 3: Blokové schéma zvyšovače napětí [9]

Na obr. 4 je zobrazen první cyklus obvodu, kdy je spínač S sepnut (vlevo) a rozepnut (vpravo). Směry toku proudu a orientace napětí jsou znázorněny šipkami. Pokud je spínač S v poloze sepnuto, teče proud ze zdroje přímo přes cívku a ta je tímto proudem nabíjena, takže při každém sepnutí spínače je cívka dobíjena. V případě, že spínač přejde do polohy vypnuto, je obvod napájen z nabitě cívky, která do obvodu dodává proud. Velikost napětí na zátěži  $R_z$  je pak rovna součtu napětí zdroje a cívky. Úbytek napětí na diodě D lze minimalizovat diodou Schottkyho typu. Velikost proudu a napětí na zátěži  $R_z$  je dána poměrem času vypnutí a zapnutí spínače S. Je tedy řízen střídou spínacího signálu. Zvlnění proudu se snižuje při zvyšující se frekvenci spínání.

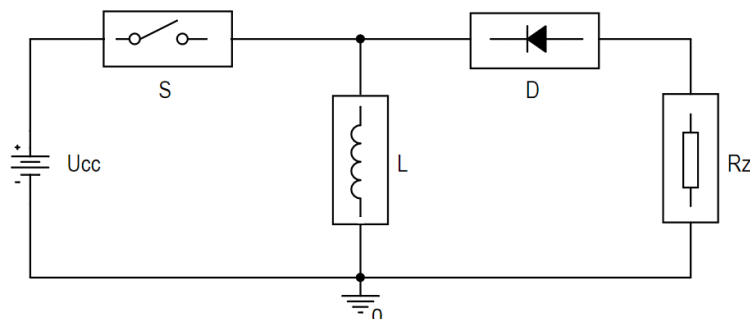


Obr. 4: Orientace napětí a proudu v obvodu zvyšující napětí

### 1.3 Měnič zvyšující i snižující napětí

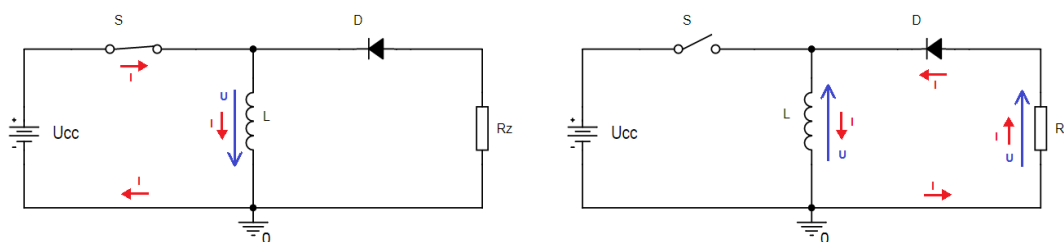
Tento měnič má největší výhodu v tom, že dokáže měnit výstupní napětí na napětí nižší než vstupní, ale i vyšší. V anglickém jazyce je nazýván jako měnič BUCK-BOOST.

Na obr. 5 je znázorněno blokové schéma tohoto budiče. Volnost změny je zapříčiněna paralelním zapojením cívky L se zátěží  $R_z$ . Spínač S je zapojen tak, aby zajišťoval dodávku proudu cívce L. Z této cívky je dodáván proud do zátěže při vypnutí spínače.



Obr. 5: Blokové schéma snižovače/snižovače napětí [10]

Toto zapojení je rozdílné v tom, že napětí na výstupu má opačnou polaritu. Oba stavy obvodu jsou vyobrazeny na obr. 6. Je zde vidět, že spínač S odděluje cívku od zdroje  $U_{cc}$ . Pokud je tedy zapnutý, cívka L se nabíjí proti zemi. Když je spínač vypnut, cívka reverzuje napětí a dodává proud do zátěže ve směru, který udává dioda D. Velikost napětí na zátěži  $R_z$  je pak dána napětím zdroje zvětšeného nebo zmenšeného o úbytek napětí na cívce. Vše záleží na střídě signálu, který spíná spínač S.



Obr. 6: Orientace napětí a proudu v obvodu snižovači/zvyšovači napětí

## 1.4 Porovnání integrovaných obvodů

Při výběru vhodného řídicího integrovaného obvodu je třeba zohlednit několik vlastností. Protože je jeden z cílů této práce porovnání různých budičů, je třeba vybrat takové integrované obvody, které budou splňovat všechna požadovaná kritéria, jako jsou např. velká spínací frekvence, minimální říditelný výstupní proud 1 A, podpora všech tří základních typologií, externí výkonový spínač kvůli lepšímu odvodu tepla a universalitě, minimální rozsah vstupního napětí 9 až 16 V a další přídavné vlastnosti. Porovnání IO je znázorněno v tab. 1.

Tab. 1: Přehled integrovaných obvodů různých výrobců

IO	LM3478	LM3429	MAX16833	LT3755	NCP3065
$U_{in_{min}}$ [V]	2,97	4,5	5	4,5	3
$U_{in_{max}}$ [V]	40	75	65	40	40
$I_{out}$ [A]	1	1	3	10	1,5
$U_{sense}$ [mV]	156	245	200	108	185
$f_{max}$ [MHz]	1	2	1	1	0,25
regulace $I_{out}$	-	lin./PWM	lin./PWM	lin./PWM	lin./PWM
teplotní ochrana	ano	ano	ano	ano	ano
automotive	ano	ano	ano	ano	ano
pouzdro	SOIC-8	TSSOP-14	TSSOP-16	MSOP-16	SOIC-8
cena	56 Kč	115 Kč	110 Kč	145 Kč	40 Kč



$U_{in_{min}}$  – Minimální vstupní napětí

$U_{in_{max}}$  – Maximální vstupní napětí

$I_{out}$  – Minimální výstupní proud, který je obvod schopen řídit

$U_{sense}$  – Úbytek napětí na snímacím rezistoru

$f_{max}$  – Maximální spínací frekvence

Tyto parametry jsou vybrány, protože nejlépe charakterizují budič pro LED diody.

- řízení konstantního výstupního proudu
- podpora všech tří základních struktur (buck, boost, buck-boost)
- výběr IO od různých výrobců.

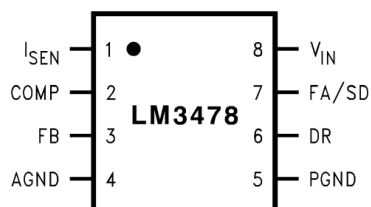
### 1.4.1 Integrovaný obvod LM3478 od výrobce Texas Instruments

Katalogový list dostupný online na adrese [11]

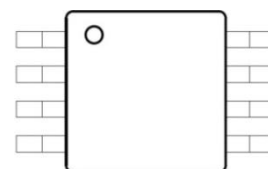
Obvod je universální spínač měničů. Je vhodný pro typologie buck, boost, buck-boost, flyback, sepic. Kromě toho může být obvod LM3478 použit v provozu při extrémně vysoké spínací frekvenci. Tato frekvence je laditelná od 100 kHz do 1 MHz pomocí jednoho vnějšího rezistoru. Obvod poskytuje velkou šířku pásma a přechodovou odezvu pro výstupní řízení. Výstupní proud je přímo nastaven jedním externím rezistorem.

Specifikace

- rozpětí napájecího napětí od 2,97 až do 40 V
- omezení proudu a tepelné vypnutí
- laditelná spínací frekvence od 100 kHz až do 1 MHz
- výstupní proud při přehřátí 10  $\mu$ A
- typologie Buck, Boost, Buck-boost, Flyback, Sepic



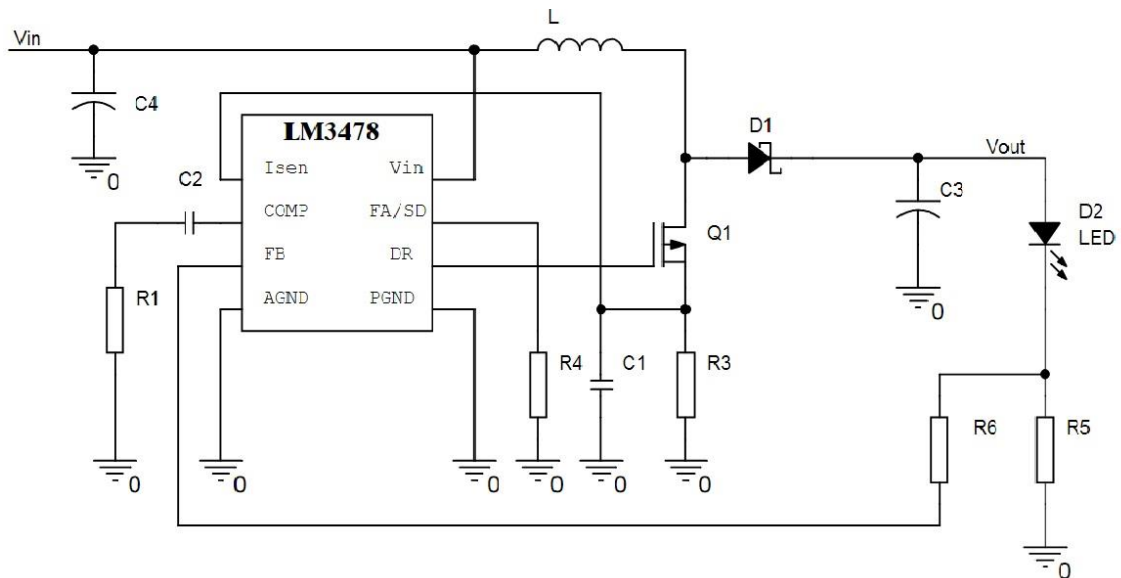
Obr. 7: Schematická značka [11]



Obr. 8: Pouzdro SOIC-8 [11]

Popis vývodů:

- 1  $I_{SEN}$  – pin snímací výstupní proud
- 2 COMP – pin kompenzační (náhrada regulační smyčky)
- 3 FB – zpětná vazba obvodu (odporovým děličem zde musí být nastaveno 1,26 V)
- 4 AGND – analogová zem
- 5 PGND – výkonová zem
- 6 DR – řídicí pin (ovládá řídicí pin MOSFET)
- 7 FA/SD – pin nastavující spínací frekvenci
- 8  $V_{IN}$  – napájecí pin



Obr. 9: Typické zapojení obvodu zvyšující napětí s úpravou pro nastavení výstupního proudu [12]

Materiály pro návrh obvodu s LM3478

(dostupné na stránkách výrobce [12])

- aplikační poznámky
- výpočetní aplikace pro hodnoty obvodových součástek + schéma
- CAD/CAE symbol (model součástky)

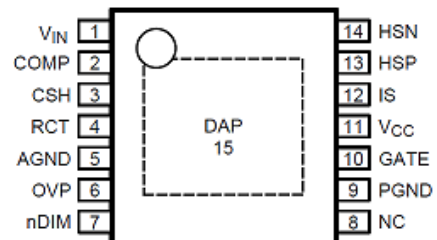
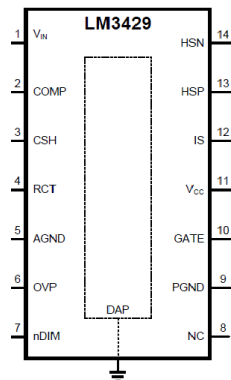
## 1.4.2 Integrovaný obvod LM3429 od výrobce Texas Instruments

Katalogový list dostupný online na adrese [13]

Tento integrovaný obvod je všestranný regulátor pro LED budiče s externím tranzistorem. Lze snadno konfigurovat typologii buck, boost, buck-boost a sepic. Díky velkému rozsahu vstupního napětí má tento obvod širokou škálu použití. Obsahuje přímo piny pro nastavení přesného proudu do LED diody. Součástí je vnitřní PWM regulátor, který zvládá regulaci až do 2 MHz spínací frekvence. Dále zahrnuje analogovou regulaci výstupního proudu pro řízení jasu LED diody, přepěťovou a podpěťovou ochranu a tepelné vypnutí.

Specifikace:

- rozsah vstupního napětí od 4,5 do 75V
- ochrana proti přepětí a podpětí
- tepelné vypnutí
- analogové i digitální řízení výstupního proudu
- nastavitelná spínací frekvence až do 2 MHz



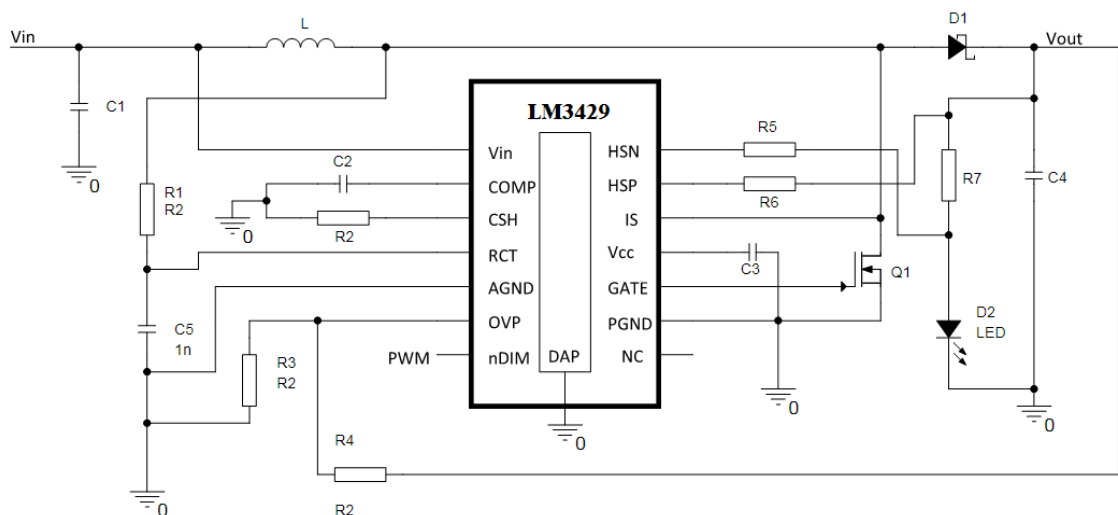
Obr. 10: Schematická značka LM3429 [13]

Obr. 11: Pouzdro TSSOP – 14 LM3429 [13]

Popis vývodů:

- 1  $V_{IN}$  – vstupní napětí
- 2 COMP – kompenzace pro regulaci proudu
- 3 CSH – analogová regulace proudu
- 4 RCT – rezistor, kapacitor časování
- 5 AGND – analogová zem

- 6 OVP – ochrana proti přepětí
- 7 nDIM – není DIM vstup (pro připojení PWM signálu)
- 8 NC – není připojen
- 9 PGND – výkonová zem (spojený s pinem 15)
- 10 GATE – výstup pro řídicí pin GATE tranzistoru
- 11 Vcc – vnitřní regulátor výstupu
- 12 IS – hlavní citlivý spínač proudu
- 13 HSP – kladný pin snímání proudu
- 14 HSN – záporný pin snímání proudu
- 15 DAP – teplotní ploška na spodu IO (spojený s AGND a PGND)



Obr. 12: Typické zapojení LM3429 jako zvyšovač napětí pro napájení LED diody [13]

Materiály pro návrh obvodu s LM3429

(dostupné na stránkách výrobce [14])

- aplikační poznámky
- software pro návrh
- CAD/CAE symbol (model součástky)

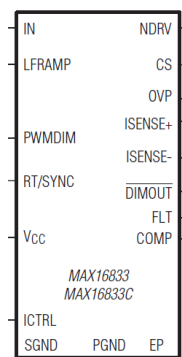
### 1.4.3 Integrovaný obvod MAX16833 od výrobce Maxim Integrated

Katalogový list dostupný online na adrese [15]

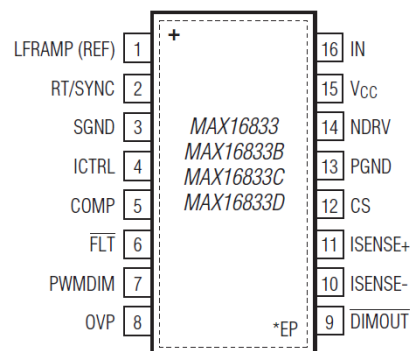
Tento integrovaný obvod umí napájet LED diody v typologiích buck, boost, buck-boost, sepic, flyback. Obsahuje funkci pro regulaci proudu LED, která ovládá externí p-kanál tranzistoru, který je v sérii s LED řetězcem, tím nabízí široký rozsah regulace jasu. Díky této funkci je tedy možné extrémně rychle spínat proud do LED diod bez přechodových jevů (přepětí, podpětí). Regulaci proudu však lze řídit i analogově. Proud je snímán před LED řetězcem. Dále je možné nastavovat spínací frekvenci od 100 kHz do 1 MHz, ale lze připojit i externí spínací signál. Tento IO pracuje v širokém rozsahu vstupního napětí od 5 až do 65 V.

#### Specifikace

- rozsah vstupního napětí od 5 až do 65 V
- maximální řízený výstupní proud 3 A
- analogová i digitální regulace výstupního proudu
- nastavitelná spínací frekvence od 100 kHz do 1 MHz
- ochrana proti zkratu, přepětí a přehřátí



Obr. 13: Schematická značka  
MAX16833 [15]

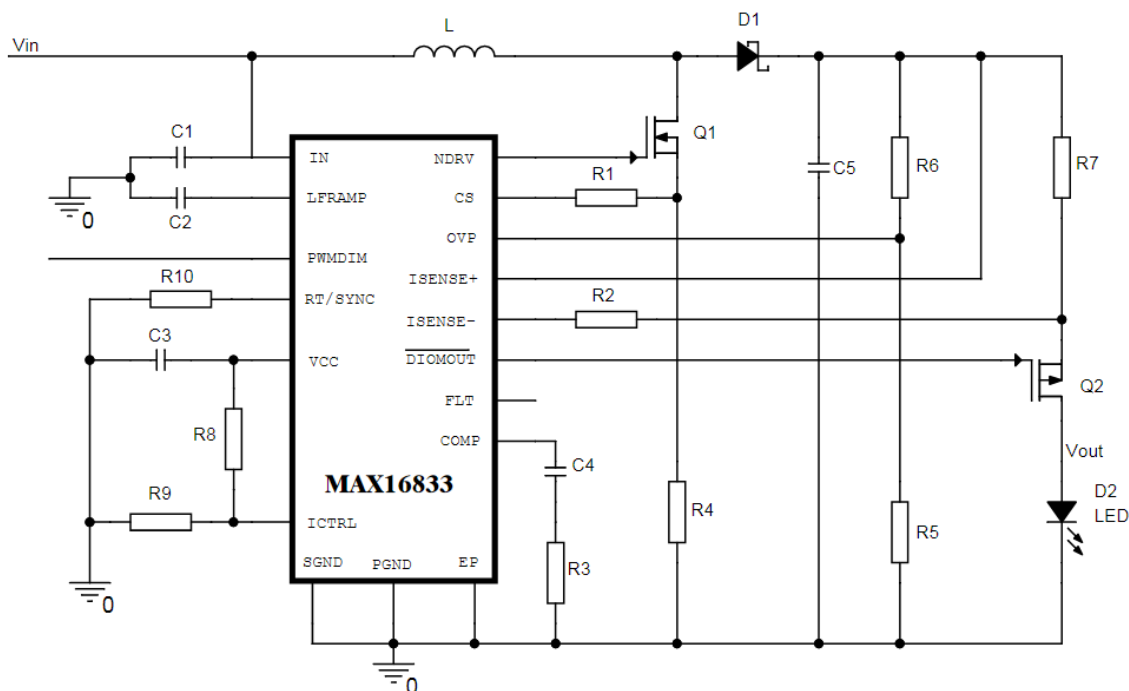


Obr. 14: TSSOP-16 Pouzdro  
MAX16833 [15]

Popis vývodů:

- 1 LFRAMP – nízkofrekvenční rampový výstup
- 2 RT/SYNC – programovatelný spínací PWM vstup
- 3 SGND – signálová zem
- 4 ICTRL – vstup pro analogové dimování (regulace proudu)

- 5 COMP – kompenzační síťové připojení
- 6  $\overline{\text{FLT}}$  – pin vypínající obvod v případě poškození cívky
- 7 PWMDIM – vstup pro PWM dimování
- 8 OVP – vstup pro ochranu LED řetězce proti přepětí
- 9  $\overline{\text{DIMOUT}}$  – vstup pro připojení externího dimování
- 10 ISENSE- - záporný vstup pro snímání proudu do LED diod
- 11 ISENSE+ - kladný vstup pro snímání proudu do LED diod
- 12 CS – vstup pro regulaci spínání proudu
- 13 PGND – výkonová zem
- 14 NDRV – výstup externího N-kanálového MOSFET gate-driver
- 15 VCC – 7 V výstupní napěťový regulátor
- 16 IN – napájení IO
- \*\*\* EP – vestavěná ploška na spodní straně IO



Obr. 15: Typické zapojení obvodu zvyšujícího napětí s MAX16833 dodávajícího konstantní proud do LED diody [15]

Materiály pro návrh obvodu s MAX16833

(dostupné na stránkách výrobce [16])

- aplikační poznámky
- PSpice model součástky

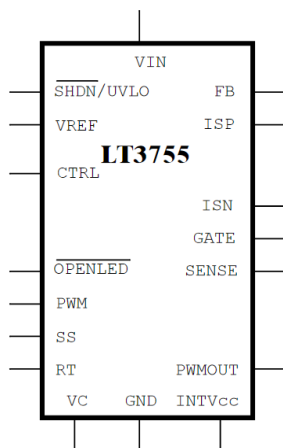
#### 1.4.4 Integrovaný obvod LT3755 od výrobce Linear Technology

Katalogový list dostupný na adrese [17]

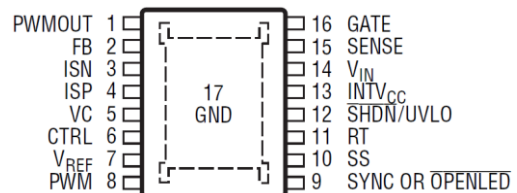
Tento budič je navržen tak, aby pracoval jako zdroj konstantního proudu pro napájení vysoce svítivé LED diody. Externí spínač (N-kanálový MOSFET) je řízen z interního regulovaného napětí 7,15 V. Udržuje stabilní výstup při velkém vstupním rozsahu napětí od 4,5 do 40 V. Lze nastavovat přesnou spínací frekvenci od 100 kHz do 1 MHz. Podporuje typologie buck, boost, buck-boost, sepic, flyback. Reguluje proud LED diody s rozlišením až 3000:1. Samozřejmosti jsou i ochranné prvky proti zkratu, přepětí a teplotě.

Specifikace:

- Rozsah vstupního napětí od 4,5 až do 40 V
- úbytek napětí na snímacím rezistoru 100 mV
- Rozsah spínací frekvence od 100 kHz až do 1 MHz
- Analogové i digitální řízení výstupního proudu
- Stmívání v rozlišení až 3000:1



Obr. 16: Schematická značka LT3755 [17]

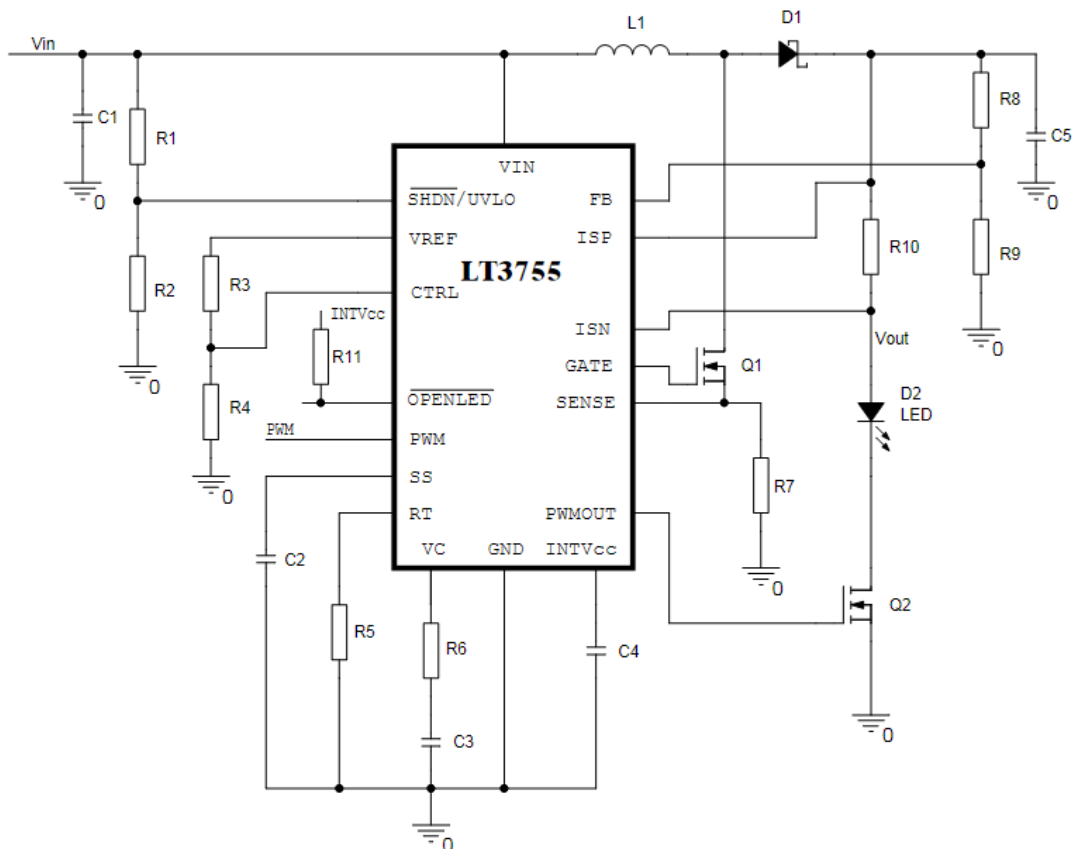


Obr. 17: MSOP-16 pouzdro LT3755 [17]

Popis vývodů:

- 1 PWMOUT – vyrovnávací paměť pro vnitřní PWM signál a zároveň ochrana zpětné vazby proti přepětí
- 2 FB – napěťová zpětná vazba pro nastavení výstupního napětí
- 3 ISN – připojení pro negativní pin rezistoru snímající proud
- 4 ISP – připojení pro pozitivní pin rezistoru snímající proud
- 5 VC – měření strmosti pro regulaci napětí z RC smyčky
- 6 CTRL – nastavení regulace proudu (analogové dimování)
- 7 VREF – výstup napěťové reference (typicky 2 V)
- 8 PWM – vstup pro připojení PWM signálu pro řízení jasu
- 9  $\overline{\text{OPENLED}}$  – pin pro detekci rozpojení obvodu
- 10 SS – spouštění oscilátoru a nastavení napětí na pinu VC
- 11 RT – nastavení spínací frekvence (musí být vždy připojen)
- 12  $\overline{\text{SHDN/UVLO}}$  – ochrana proti zkratu a detekce podpětí
- 13 INTV<sub>CC</sub> – regulace zdroje pro vnitřní zátěž, GATE, PWMOUT
- 14 V<sub>IN</sub> – napájení IO
- 15 SENSE – snímání vstupního proudu pro kontrolu smyčky
- 16 GATE – výstup pro ovládání N-kanálu řídicího tranzistoru
- 17 EP – pin na spodní straně IO, slouží pro odvod tepla a je spojen se zemí





Obr. 18: Typické zapojení s obvodem LT3755 jako zvyšovače napětí s konstantním proudem na výstupu [17]

Materiály pro návrh obvodu s LT3755

(dostupné na stránkách výrobce [18])

- LTSpice model součástky
- program LTSpice pro simulaci

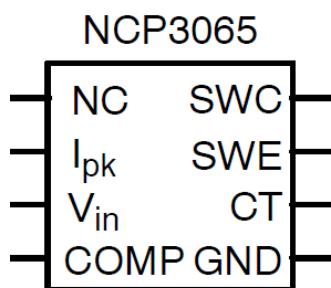
### 1.4.5 Integrovaný obvod NCP3065 od výrobce Onsemiconductor

Katalogový list je dostupný na adrese [19]

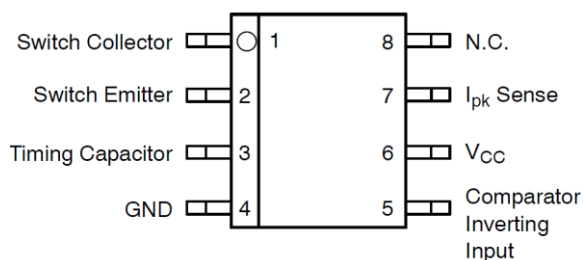
NCP3065 je monolitický spínaný regulátor navržený tak, aby dodával konstantní výstupní proud pro vysoce svítivé LED diody. Úbytek na snímacím rezistoru je 235 mV při měření okamžité hodnoty proudu do LED diod. Obsahuje interní spínač, který vydrží proud až 1,5 A. Díky tomu lze obvod jako buck a boost sestavit s minimem okolních součástek.

Specifikace:

- rozsah vstupního napětí od 3 až do 40 V
- úbytek napětí na snímacím rezistoru 235 mV
- integrovaný 1,5 A spínač
- spínací frekvence až 250 kHz
- analogové i digitální řízení výstupního proudu
- ochrana proti přehřátí



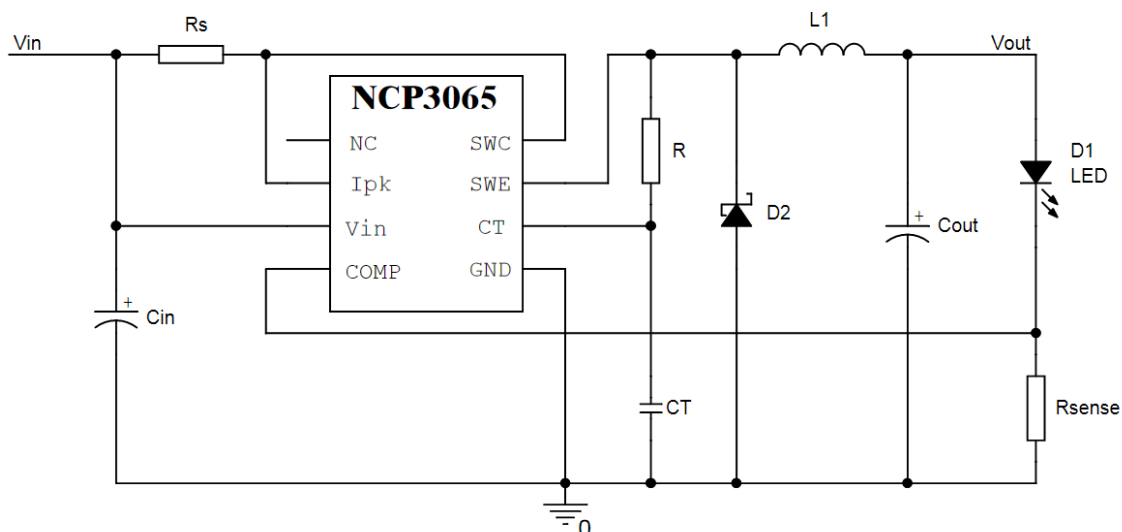
Obr. 19: Schematická značka NCP3065 [19]



Obr. 20: SOIC-8 Pouzdro NCP3065 [19]

Popis vývodů:

- 1 SWC – spínač kolektoru
- 2 SWE – spínač emitoru
- 3 CT – časovací kapacitor
- 4 GND – společná zem
- 5 COMP – porovnávací vstup
- 6 V<sub>in</sub> – napájení IO
- 7 I<sub>pk</sub> – vstup pro snímání proudu
- 8 NC – nezapojený vývod



Obr. 21: Typické zapojení s NCP3065 jako snižovač napětí s konstantním výstupním proudem [19]

Materiály pro návrh obvodu s NCP3065:

(dostupné na stránkách výrobce [20])

- aplikační poznámky

### 1.4.6 Zhodnocení a výběr vhodného IO

Nebylo jednoduché najít IO pro LED budič, který by splňoval požadavky na všechny tři základní typologie buck, boost, buck-boost. Výše uvedené IO požadavky splňují, avšak každý má své výhody a nevýhody. Při výběru je nutné zvážit několik požadavků.

- způsob měření výstupního proudu (před zátěží, nebo za ní)
- umístění spínacího tranzistor (uvnitř IO, nebo externě)
- velikost úbytku napětí na snímacím rezistoru.
- možnost regulace výstupního proudu.
- dostupnost a dobré materiály pro návrh.

Je dobré upřednostnit:

- měření proudu před LED diodou (hi-sense)
- spínací tranzistor externí (pro účinnější chlazení)
- úbytek napětí na snímacím rezistoru co nejmenší (účinnost)
- regulace proudu analogově i digitálně (řízení PWM) pro nastavení jasu
- dostupnost

Stanovené požadavky, podle tab. 2, nejlépe splňuje integrovaný obvod LT3755.

Tab. 2: Přehled IO s vyznačeným vybraným obvodem

IO	LM3478	LM3429	MAX16833	LT3755	NCP3065
$U_{in_{min}}$ [V]	2,97	4,5	5	4,5	3
$U_{in_{max}}$ [V]	40	75	65	40	40
$I_{out}$ [A]	1	1	3	10	1,5
$U_{sense}$ [mV]	156	245	200	108	185
$f_{max}$ [MHz]	1	2	1	1	0,25
regulace $I_{out}$	-	lin./PWM	lin./PWM	lin./PWM	lin./PWM
teplotní ochrana	ano	ano	ano	ano	ano
automotive	ano	ano	ano	ano	ano
pouzdro	SOIC-8	TSSOP-14	TSSOP-16	MSOP - 16	SOIC-8
cena	56 Kč	115 Kč	110 Kč	145 Kč	40 Kč

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

### 2.1 Cíle obvodu

Cílem je navrhnout obvod snižující napětí obsahující IO, který má nejlepší parametry z předchozího teoretického rozboru. Z tohoto porovnání nejlépe vyhovuje IO LT 3755 od společnosti Linear Technology.

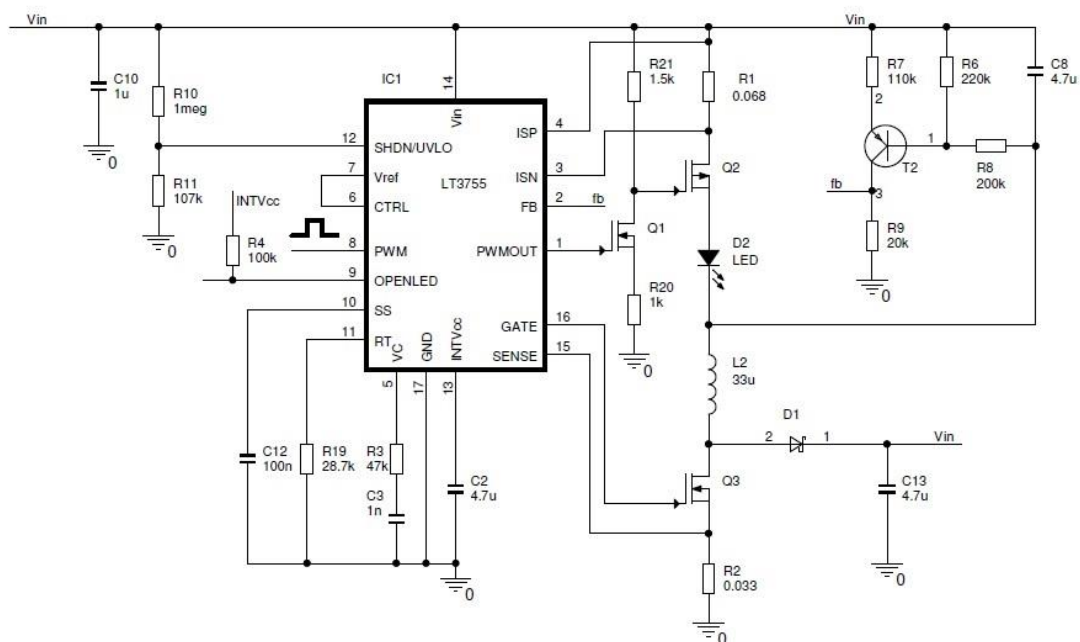
Úkol spočívá v návržení schématu s výpočty součástek. Charakter tohoto obvodu musí splňovat následující parametry:

- správná funkce při rozsahu vstupního napětí od 9 do 16 V
- napájení 2 vysoce svítivých diod konstantním proudem 900 mA s přesností 5 %
- při návrhu zohlednit elektromagnetickou kompatibilitu
- řídit jas LED diod pomocí externího PWM signálu

### 2.2 Návrh a realizace obvodu

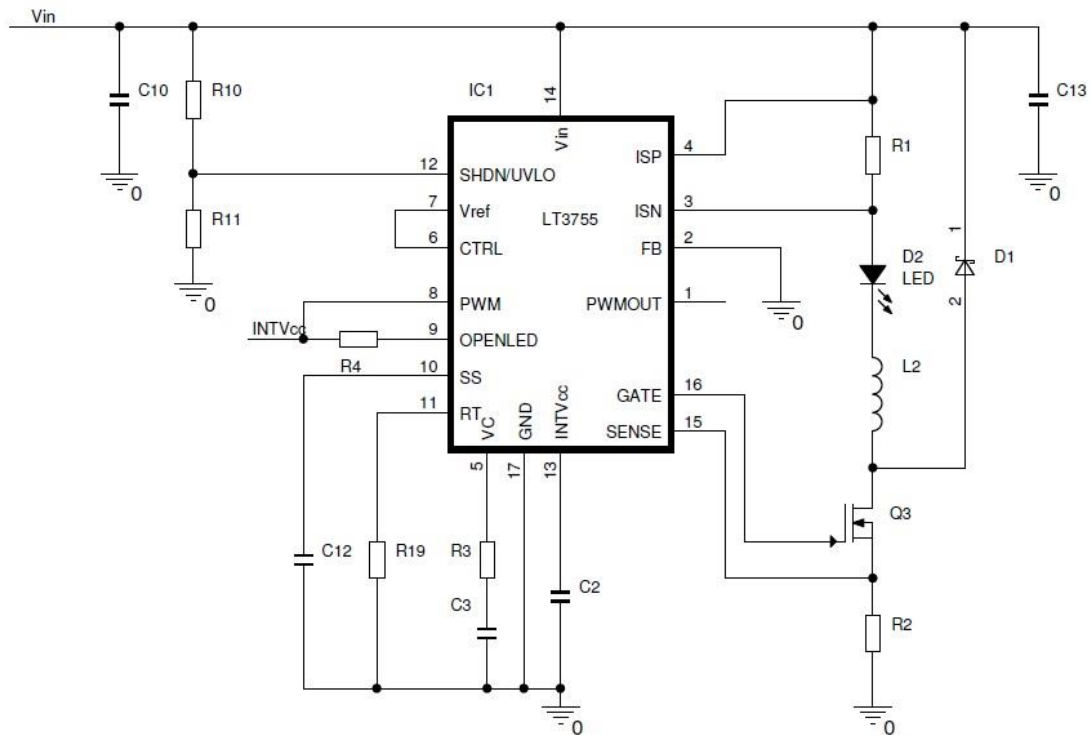
#### 2.2.1 Navržení schématu

Při navrhování schématu bylo využito nejprve katalogového listu [17]. Zde se nachází příkladné schéma (viz obr. 22) pro stejný typ obvodu, který je požadován, ale s jinými parametry. Toto zapojení bylo využito z toho důvodu, že obvod této struktury by měl být funkční.



Obr. 22: Schéma zapojení obvodu snižující výstupní napětí doporučené výrobcem [17]

Toto zapojení bylo upraveno tak, aby vzniklo pouze základní zapojení bez ostatních doplňkových prvků. V katalogovém listě bylo uvedeno, že při návrhu proudového zdroje není potřeba napěťová zpětná vazba připojená na pinu FB. Ta se využívá pouze tehdy, když je obvod navržen jako konstantní zdroj napětí. V tomto případě je pin připojen přímo na zem dle doporučení. V dalším kroku je vynecháno řízení jasu, kterému budu věnována pozornost později. Po těchto úpravách schéma pro následnou simulaci vypadá jako na obr. 23.



Obr. 23: Vytvořené schéma zapojení pro simulaci obvodu

## 2.2.2 Vypočet hodnot obvodových prvků

Pro výpočty bylo využito vztahů určených výrobcem IO uvedených v katalogovém listu [17]. Značení součástek je od toho bodu jednotné.

- odpor pro nastavení výstupního proudu byl vypočítán podle rovnice (2.1) (připojen mezi měřícími piny ISN ISP)

$$I_{LED} = \frac{U_{CTRL} - 100 \text{ mV}}{R_{LED} * 10} \Rightarrow R_1 = \frac{U_{CTRL} - 100 \text{ mV}}{I_{LED} * 10} \quad (2.1)$$

Proud LED diodami je 900 mA a napětí  $U_{CTRL}$  je rovno 2 V, protože pin CTRL je přímo spojen s pinem  $U_{REF}$ , což je vnitřní referenční napětí, které má právě potenciál 2 V. V tomto případě lze využít zjednodušeného vzorce (2.2), který platí, pokud  $U_{CTRL} > 1,2 \text{ V}$ .

$$I_{LED} = \frac{100 \text{ mV}}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{100 \text{ mV}}{I_{LED}} = \frac{0,1}{0,9} = 0,11 \Omega \quad (2.2)$$

- odpor pro nastavení spínací frekvence obvodu

V tomto bodě musí být zohledněna elektromagnetická kompatibilita, protože spínací frekvence má největší podíl na dominantní harmonické složce. Proto je vhodné zvolit takovou frekvenci, aby nám tato dominantní složka nezasahovala do pásma s nízkým povoleným limitem. Podle normy automobilového průmyslu je volná oblast pro zvolení spínacího kmitočtu v rozsahu frekvencí od 400 do 500 kHz. Samozřejmě je možné použít jakoukoliv jinou frekvenci, ale musel by být užit účinný filtr, který by tuto složku potlačil. Proto byl zvolen odpor  $R_2=24 \text{ k}\Omega$ , kterému odpovídá spínací frekvence 480 kHz.

Této hodnotě odpovídá podle tab. 3 odpor:

$$R_2 = 24 \text{ k}\Omega$$

Tab. 3: Přiřazení hodnotě spínací frekvence hodnotu odporu  $R_2$  [17]

$f_{sw}$ [kHz]	$R_2$ [k $\Omega$ ]
1000	10.0
900	11.8
800	13.0
700	15.4
600	17.8
500	21.0
400	26.7
300	35.7
200	53.6
100	100



- odpor zpřesňující nastavení proudu LED diodami vypočítaný podle rovnice ((2.3)

$$R_5 \leq \frac{0,07}{I_{LED}} \leq \frac{0,07}{0,9} \leq 0,0778 \Omega \quad (2.3)$$

- velikost indukčnosti spínací cívky (počítáno podle (2.4) pro  $U_{IN} = 13,5 \text{ V}$  a  $U_{LED} = 6,2 \text{ V}$ )

$$L_1 = \frac{R_5 * U_{LED} * (U_{IN} - U_{LED})}{U_{IN} * 0,02 * f_{OSC}} \quad (2.4)$$

$$L_1 = \frac{0,0778 * 6,2 * (13,5 - 6,2)}{13,5 * 0,02 * 450000} = 29 \mu H$$

- vstupní dělič detekující podpětí počítaný podle (2.5)

Napětí, od kterého obvod začne fungovat  $U_{INmin}$ , bylo zvoleno 8 V. Toho bylo docíleno pomocí odporového děliče, který byl spočítán podle (2.5)

$R_3 = 1 \text{ M}\Omega$  - zvoleno

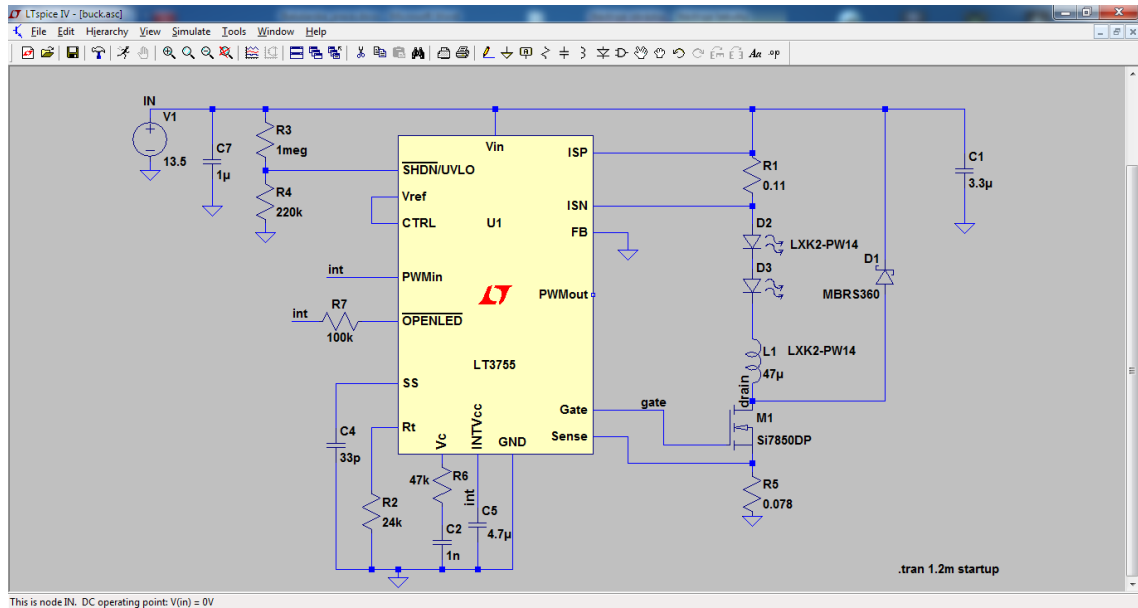
$$U_{INmin} = 1,22 * \frac{R_3 + R_4}{R_4} \Rightarrow R_4 = \frac{R_3}{5,56} = \frac{1 * 10^6}{5,56} = 180 \text{ k}\Omega \quad (2.5)$$

$R_4 = 220 \text{ k}\Omega$  zvětšeno kvůli rezervě

Ostatní hodnoty součástek byly zvoleny z doporučených hodnot uvedených v katalogovém listu výrobce [17].

### 2.2.3 Simulace obvodu

Pro simulaci obvodu bylo využito nástrojů, které má výrobce k dispozici [18]. Na jeho stránkách lze získat simulační program LTSpice, ke kterému byl i model IO LT3755 pro možnost jeho simulace. Tento software je volně dostupný a je to pouze upravený program Orcad PSpice. Vzhled prostředí a simulovaný obvod je znázorněn na obr. 24.



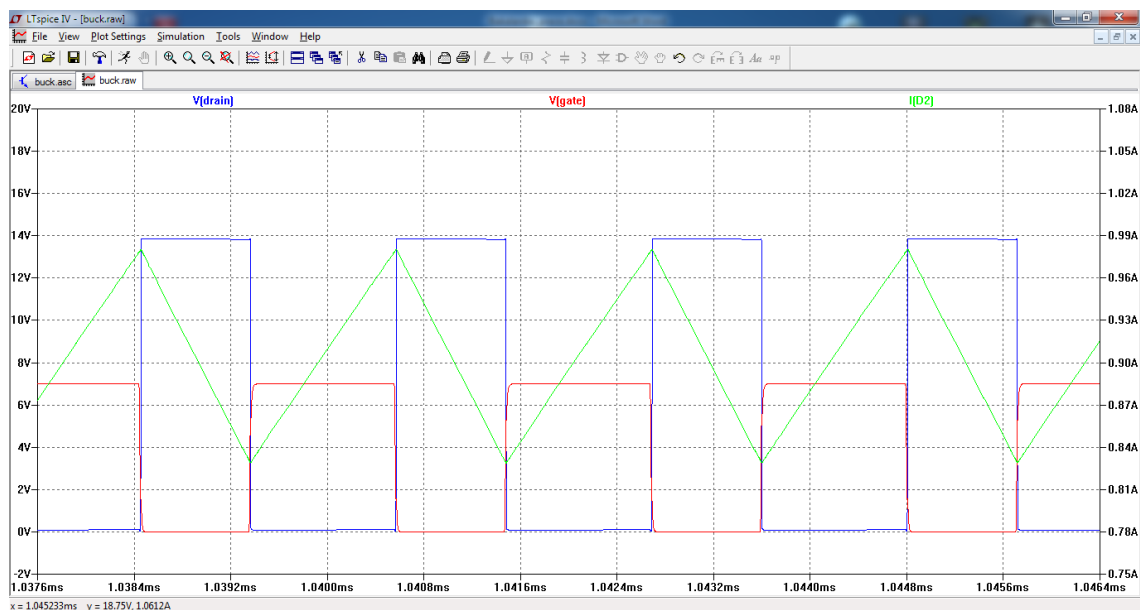
Obr. 24: Schéma zapojení v simulačním programu LTSpice

Pro zjištění tvaru výstupního proudu byla použita časová analýza, pomocí které bylo možné zobrazit průběh proudu cívkou a napětí na elektrodách gate a source tranzistoru. Dále pak byla zjišťována závislost výstupního proudu na změně vstupního napětí.

Všechny typy součástek potřebné pro simulaci byly vybrány z dostupné knihovny programu. Avšak na základě parametrů těchto součástek byly vybrány součástky do reálného obvodu.

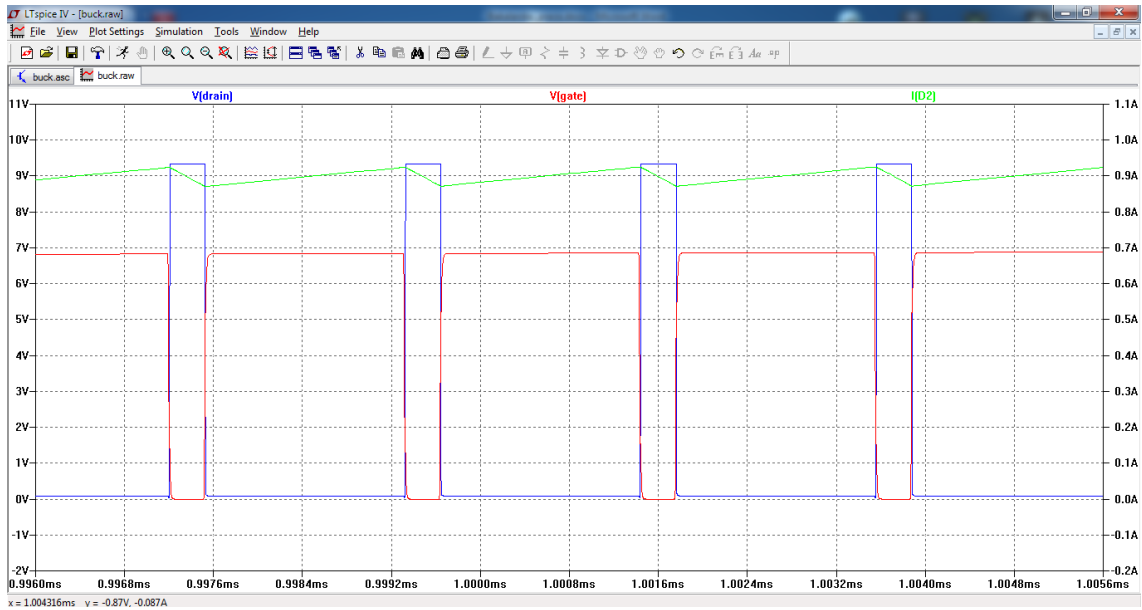
## 2.2.4 Dosažené výsledky simulace

Na obr. 25 jsou vidět průběhy napětí na řídicím tranzistoru  $U_{drain}$ ,  $U_{gate}$  a průběh proudu  $I_{D2}$  (zelená čára) LED diodami. Tyto výsledky jsou měřeny při vstupním napětí 13,5 V. Z těchto výsledků je patrné, že výstupní proud je daný střední hodnotou protékajícího proudu. Kolísání proudu je příčinou nabíjení a vybíjení cívky, které je řízené řídicím tranzistorem. Zvlnění proudu je  $\pm 10\%$ . Tohoto zvlnění bylo dosaženo po zvětšení hodnoty indukčnosti cívky, oproti výpočtu, na hodnotu  $47\ \mu\text{H}$ . Napětí na pinu gate spínacího tranzistoru je generováno integrovaným obvodem, který má jako zpětnou vazbu pro určení střídavosti, a tím řízení proudu, úbytek napětí na měřicím odporu.

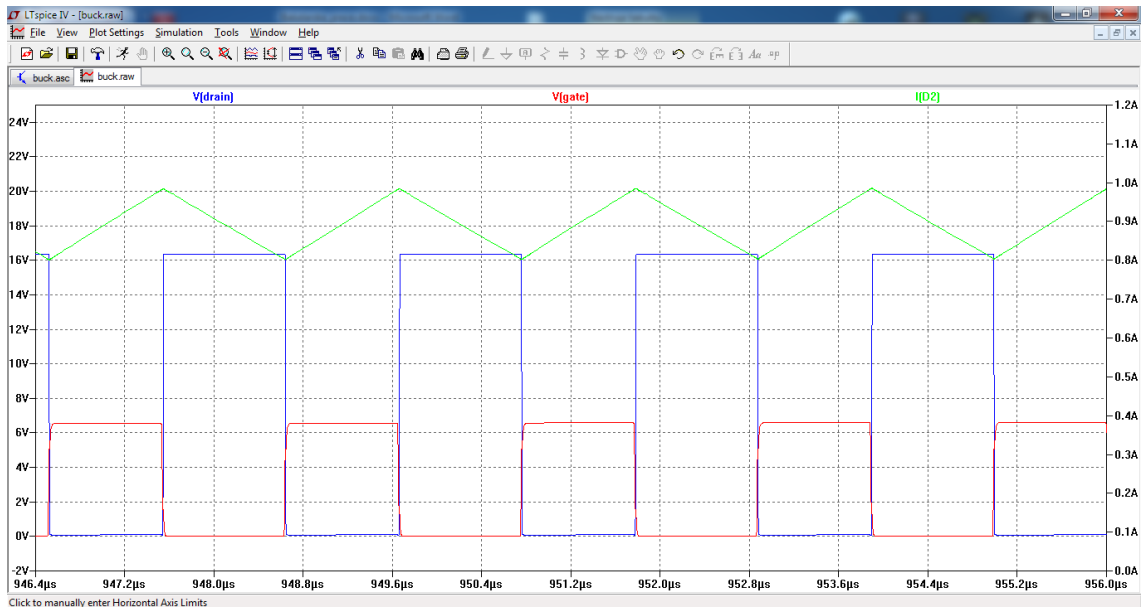


Obr. 25: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 13,5 V

Zapojení musí fungovat od 9 do 16 V, proto je potřeba prověřit simulací hlavně tyto krajní hodnoty. Pro první krajní hodnotu 9 V je průběh zobrazený na obr. 26 a je zde vidět, že oproti předchozímu průběhu se změnil poměr doby nabíjení a vybíjení cívky, tím se zmenšilo zvlnění proudu, ale střední hodnota výstupního proudu se nezměnila a obvod je stabilní. Oproti tomu na obr. 27 se tento stav změnil a zvlnění se zvětšilo, ale za korektních podmínek výstupu. Spínací frekvence je pro odpor  $R_2 = 24\ \text{k}\Omega$  rovna 480 kHz.



Obr. 26: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 9 V

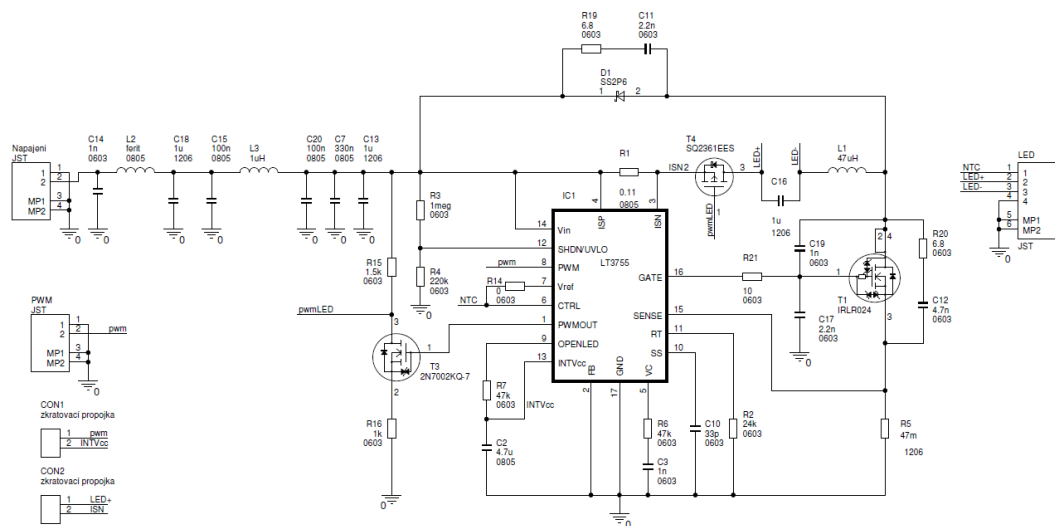


Obr. 27: Průběh napětí a proudu v simulačním programu LTSpice pro vstupní napětí 16 V

## 2.2.5 Doplnění schématu s dimenzováním součástek

Při výběru vhodného typu součástek je třeba brát v úvahu maximální možné hodnoty napětí a proudů, které v obvodu mohou vzniknout. S tímto jsou také spojeny výkonové ztráty způsobené zahříváním součástek. Největší důraz musí být kladen na spínací tranzistor T1, výkonovou cívku L1 a Schottkyho diodu D1. Tyto součástky tvoří jádro obvodu.

V simulačním programu byla ověřena funkce integrovaného obvodu s ověřením hodnot součástek pro požadované parametry obvodu. Proto lze schéma doplnit o další funkce jako je PWM regulace výstupního proudu pro řízení jasu (použito katalogové zapojení). Byl přidán odporový dělič pro analogové řízení proudu pro detekci teploty na LED diodách, aby zabránil případnému zničení teplem. V poslední řadě byl obvod doplněn o vstupní EMC filtr a obvody tlumící rušivé vlivy spínacích součástek. Po tomto doplnění bude obvod vypadat jako na obr. 28.



Obr. 28: Schéma zapojení kompletního obvodu

Protože schéma je multifunkční, bylo nutné přidat do obvodu zkratovací propojky, aby byl obvod funkční s PWM regulací proudu, ale i bez něj. Pokud není využita analogová regulace, je nutné, aby hodnota odporu R14 byla nulová.

Dimenzování součástek:

Cívka L1:

- protékající proud 900 mA, ovšem špičkově až 1,1 A, proto je třeba zvolit minimálně 2 A pro dostatečnou rezervu (ohřátí)
- vlastní rezonanční kmitočet s rezervou nad spínací frekvenci obvodu
- co nejmenší odpor navinutého drátu pro minimalizaci ztráty průchodem proudu

Tranzistor T1:

- schopnost změny stavu zapnuto/vypnuto s frekvencí min. 500 kHz bez zpoždění a přechodových jevů
- velikost dovoleného protékajícího proudu drain/source min. 2 A
- vhodné pouzdro pro dostatečné chlazení
- co nejmenší odpor kanálu v propustném stavu pro minimální ztráty

Dioda D1:

- závěrné napětí min 2x větší než maximální vstupní napětí
- zvládat průtok proudu min. 2 A
- měnit propustný a závěrný směr s frekvencí min. 500 kHz

Kondenzátory:

- keramické
- minimální napětí 25 V

Rezistory:

- pouzdro volit dle výkonového přizpůsobení (viz tab. 4), které závisí na protékajícím proudu

Tab. 4: Výkonové přizpůsobení SMD rezistorům podle pouzdra [5]

<b>Pouzdro</b>	<b>Výkon</b>	<b>Napětí</b>
<b>0603</b>	0,1 W	50V
<b>0805</b>	0,125 W	150 V
<b>1206</b>	0,25 W	200 V

## Výpočet filtrů a tlumících obvodu pro EMC

Filtry a tlumící obvody byly zvoleny tam, kde se nejvíce projevují rychlé změny signálu, to se týká především spínacího tranzistoru a Schottkyho diody. Byl zvolen RC člen paralelně připojený k těmto součástkám. Jako vstupní filtr, který zajišťuje útlum směrem ven z obvodu do napájecí sítě, byl zapojen LC filtr. Vstupní filtr a tlumící obvody byly situovány jako dolní propust pro útlum harmonických složek s frekvencí nad 100 kHz. Zapojení a umístění filtrů je znázorněno na obr. 29. Výpočet těchto filtrů bývá orientační z toho důvodu, že účinnost filtrů a tlumících obvodů lze zjistit až při výsledcích měření. Musí se však počítat s těmito součástkami už při návrhu, aby bylo možné jejich hodnoty na hotové desce upravit. [3]

Výpočet vstupního filtru (2.6):

Cívka L3 zvolena 1  $\mu\text{H}$ , zlomový kmitočet zvolen pro výpočet 150 kHz

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \Rightarrow C = \frac{1}{4 * \pi^2 * L} = \frac{1}{4 * \pi^2 * 1^{-6}} = 1,1 \mu\text{F} \quad (2.6)$$

Tato hodnota byla složena kondenzátory C15 a C18.

Výpočet tlumícího obvodu diody

Jde o odrušovací RC člen. Při návrhu však nelze předvídat, jaké přepínací (rušivé) frekvence mohou vznikat, proto je těžké parametry takového členu spočítat. Kvůli tomu lze hodnoty tohoto zpomalovací článku upravit až při samotném měření. Nyní lze pouze podle rovnice (2.7) vypočítat, na jakou frekvenci je výsledný článek navržen.

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * R_{19} * C_{11}} = \frac{1}{2 * \pi * 6,8 * 2,2 * 10^{-9}} = 10,64 \text{ MHz} \quad (2.7)$$

Výpočet tlumícího obvodu tranzistoru

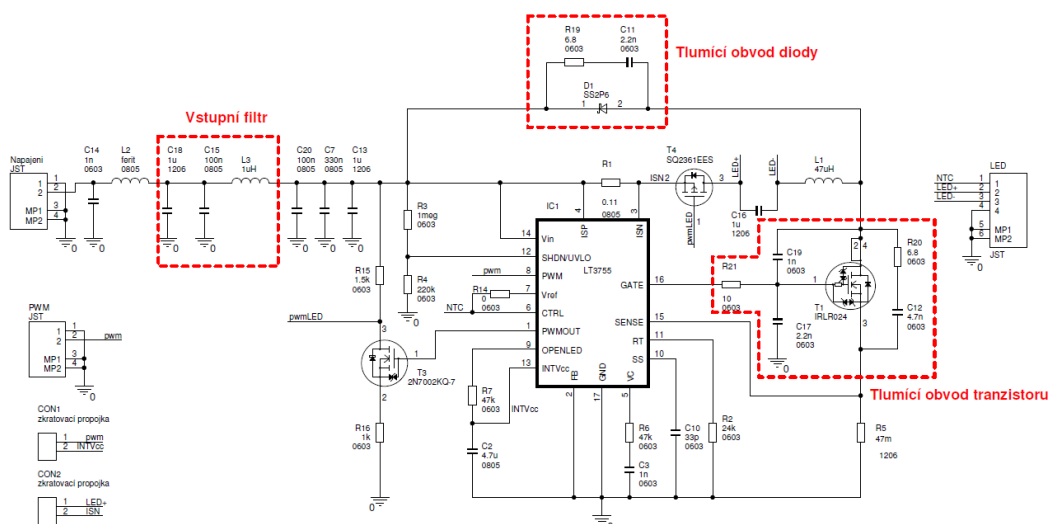
Zde nastává stejná situace jako v předchozím případě. Je použit odrušovací RC člen. Je však umístěno více typů odrušovacích prvků. Jeden je složen z R20 a C12, druhý z R21 a C17 a kondenzátor C19 plní funkci Millerovy kapacity. Všechny hodnoty součástek byly opět navrženy při měření, lze tedy spočítat pouze výsledný kmitočet (2.8) a časovou konstantu zpoždění (2.9).

$$f_0 = \frac{1}{2 * \pi * R_{20} * C_{12}} = \frac{1}{2 * \pi * 6,8 * 4,7 * 10^{-9}} = 4,98 \text{ MHz} \quad (2.8)$$

R21 a C17 jsou použity jako derivační článek pro zpomalení průběhu na pinu gate spínacího tranzistoru.

$$\tau = R_{21} * C_{17} = 10 * 2,2 * 10^{-9} = 22 \text{ ns} \quad (2.9)$$

Vstupní filtr a tlumicí obvody je však pro oživení a ověření funkce obvodu nutné vynechat a v sériovém spojení nahradit propojkou. Docházelo by ke zkreslení signálů, pomocí kterých lze ověřit správnou funkčnost obvodu. Také je nezbytné vynechat kondenzátor C16, který je zde pro zmenšení zvlnění výstupního proudu. Pokud je tedy požadováno minimální procentuální zvlnění, tak tento úkol splní právě již zmíněný kondenzátor C16.



Obr. 29: Schéma zapojení s umístění a popisem filtrů

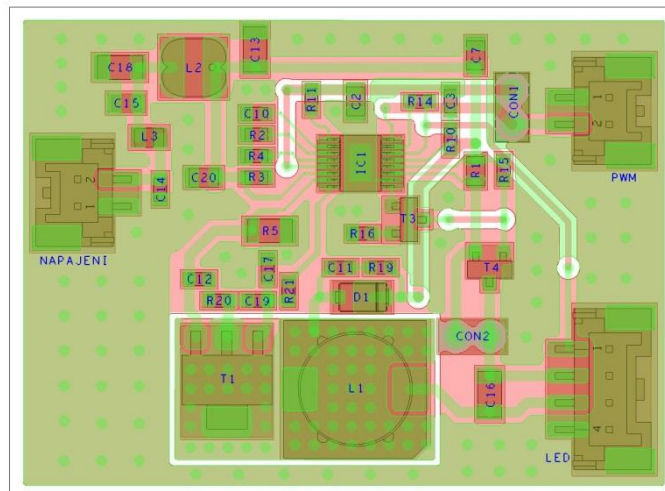
Takto doplněné schéma obvodu navrhnuté v programu OrCad Capture bylo připraveno na odeslání do programu OrCad PCB Editor, kde proběhl návrh desky plošných spojů.



## 2.2.6 Návrh desky plošných spojů

Jelikož jde o spínaný obvod o vysoké frekvenci, má návrh plošného spoje velký vliv na funkčnost výsledného obvodu. Proto je třeba cesty, na kterých budou velké změny signálů, co nejvíce zkrátit. Cesty k integrovanému obvodu, který z nich bude snímat napětí, je nutné připojit pomocí Kelvinova zapojení pro maximální přesnost měření. Kondenzátory je nutné umístit co nejbližee oblastem, na kterých je třeba zamezit kolísání napětí, což je například napájení IO. Pro minimalizaci chyby v návrhu, z ohledu na EMC, musí být proudové smyčky co nejkratší. Šířky spojů byly voleny podle výkonového zatížení odpovídající protékajícímu proudu a ploškám součástek.

Jak je zobrazeno na obr. 30, jde o oboustrannou desku s využitím prokovů. Ty zde slouží ke zkrácení cest a k nejkratšímu spojení s potenciálem země. Zároveň však v místě tranzistoru a cívky je oblast oddělená a prokovená na spodní vrstvu z důvodu odvodu tepla z těchto součástek do plochy. Tato oblast je pouze u těchto dvou součástek, protože právě na nich vznikají největší tepelné ztráty.



Obr. 30: Deska plošných spojů v návrhovém systému OrCad PCB Editor (50 x 36 mm)

Výroba toho vzorku byla provedena frézováním. Jako základní materiál byl použit FR4 s oboustranně plátovanou mědí o tloušťce 35  $\mu\text{m}$ . Výsledná deska byla pokryta pájecí maskou, aby se zabránilo případným zkratům při pájení. Součástky byly osazeny na nanesenou pájecí pastu a zapájeny v přetavovací peci. Při osazení byly vynechány součástky filtru a tlumících obvodů pro ověření správné funkce, která by jimi byla zkreslena.

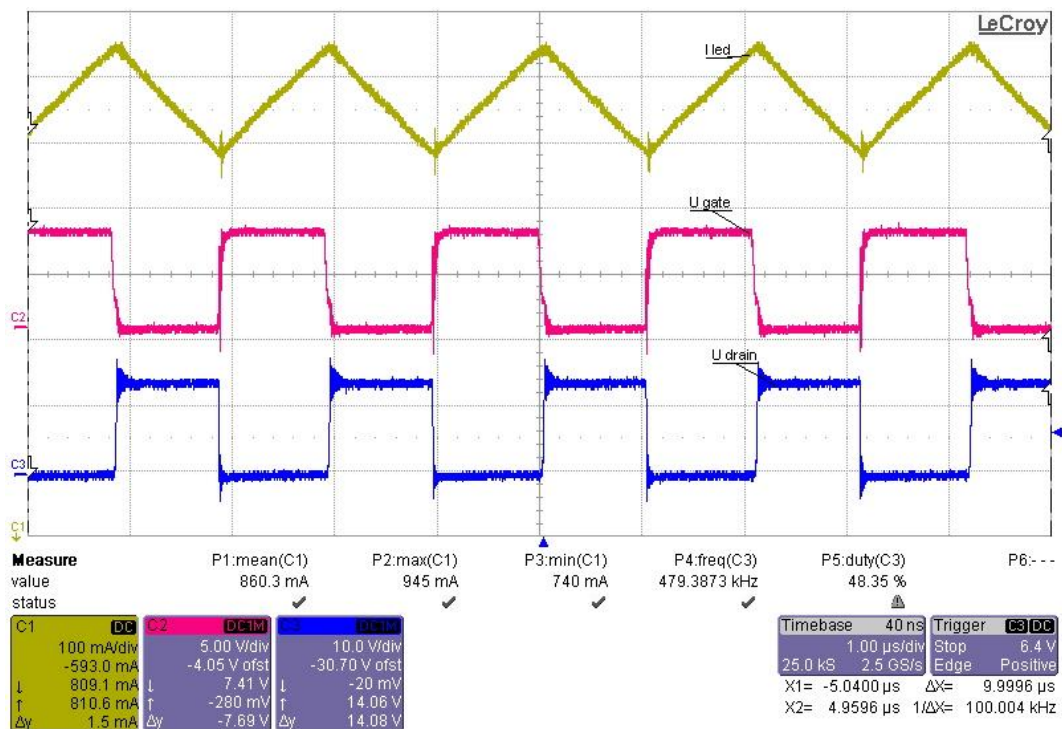
## 2.2.7 Oživení obvodu

Při oživování obvodu bylo nastaveno na zdroji proudové omezení na 100 mA a po zapnutí výstupu byla ověřena spotřeba obvodu a dotykem zjištěna teplota součástek, čímž byla vyloučena chyba v zapojení obvodu. Po této kontrole bylo vypnuto proudové omezení a napětí nastaveno na 12 V. V tuto chvíli už LED diody svítily a obvod si reguloval odebíraný proud. Dalším testem bylo pozorování jasu při proměnném napětí zdroje od 9 do 16 V. Když všechny tyto funkce byly splněny, bylo možno přejít k měření parametrů obvodu na osciloskopu, kde je názorněji vidět, zda obvod funguje správně.

## 2.3 Měření obvodu

### 2.3.1 Dosažené parametry

Pro ověření správné funkce jsou nejdůležitější signály z IO na gate spínacího tranzistoru, průběh napětí na pinu tranzistoru drain a signál proudu napájející LED diody. Proto všechny tyto veličiny byly zobrazeny na osciloskopu LeCroy. Proud  $I_{LED}$  byl snímán pomocí proudové sondy. Na obr. 31 jsou znázorněny tyto průběhy při vstupním napájecím napětí 13,5 V. Je zde dobře vidět doby sepnutí a rozepnutí hlavní smyčky a tomu odpovídající proud do LED diod, který dodává cívka.



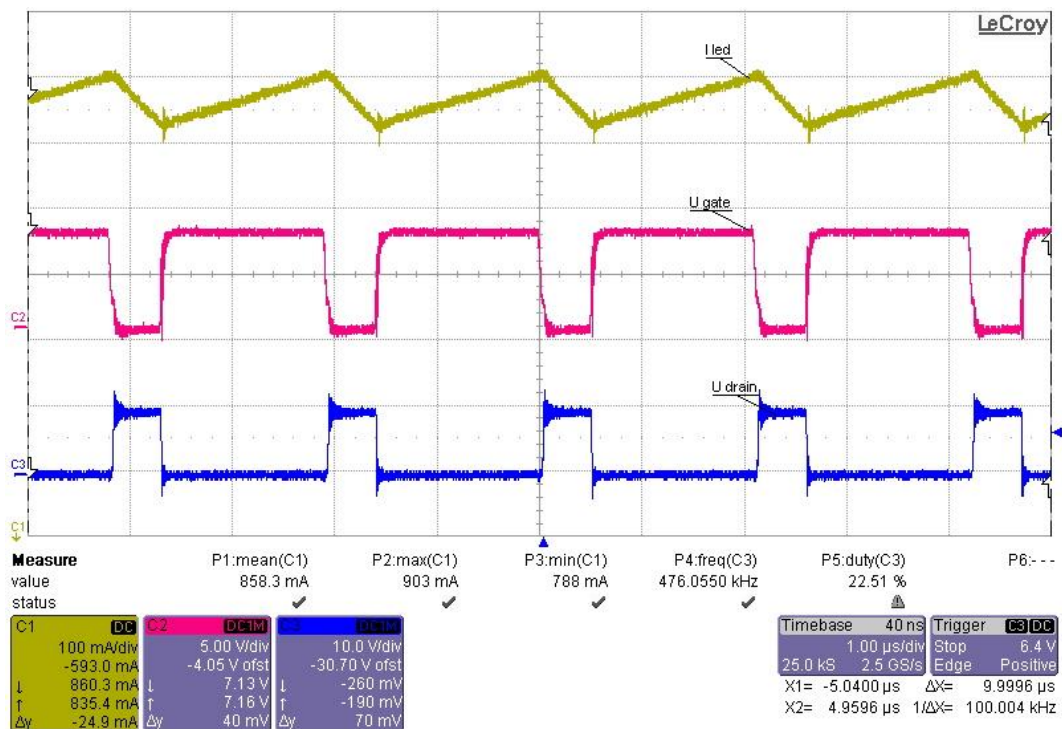
Obr. 31: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 13,5 V

Z těchto průběhů lze dobře vyčíst důležité parametry obvodu.

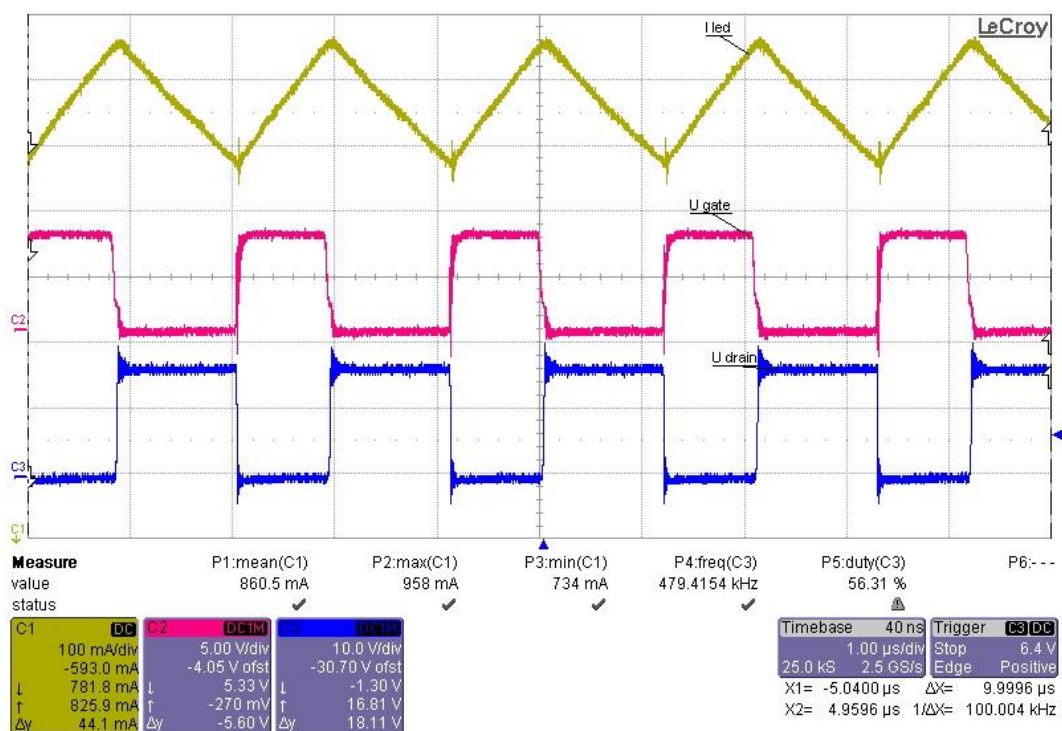
Střední hodnota výstupního proudu:	$I_{OUT} = 860,3 \text{ mA}$
Maximální hodnota proudu:	$I_{MAX} = 957 \text{ mA}$
Minimální hodnota proudu:	$I_{MIN} = 740 \text{ mA}$
Spínací frekvence:	$f_{SW} = 480 \text{ kHz}$ (s přesností 1 %)

Zadaný proud byl 900 mA, tato odchylka je způsobena odchylkou výrobce, který uvádí přesnost výstupního proudu  $\pm 5 \%$ . V tomto případě je to odchylka 4,4 %. Velikost zvlnění proudu  $I_{LED}$  je dáno velikostí indukčnosti cívky, která byla už při simulaci změněna, aby toto zvlnění bylo co nejvíce zmenšeno. Střída spínacího signálu je měřena ze signálu na pinu draine tranzistoru z důvodu větší přesnosti, je však nutné si uvědomit, že pravá střída je doplňkem do 100 % od měřené hodnoty. Spínací frekvence odpovídá výpočtu při návrhu. Zákmity řídicího signálu mohou být způsobeny parazitními kapacitami tranzistorů a době ustálení mezi jednotlivými úrovněmi. Tyto kmity budou mít velký vliv na EMC ve vyšších kmitočtech, proto budou použity doplňkové RC obvody.

Na obr. 32 a obr. 33 jsou průběhy při krajních hodnotách napájecího napětí. Tyto průběhy se liší pouze velikostí zvlnění proudu a střídou.



Obr. 32: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 9 V



Obr. 33: Průběh napětí a proudů na osciloskopu pro vstupní napětí 16 V

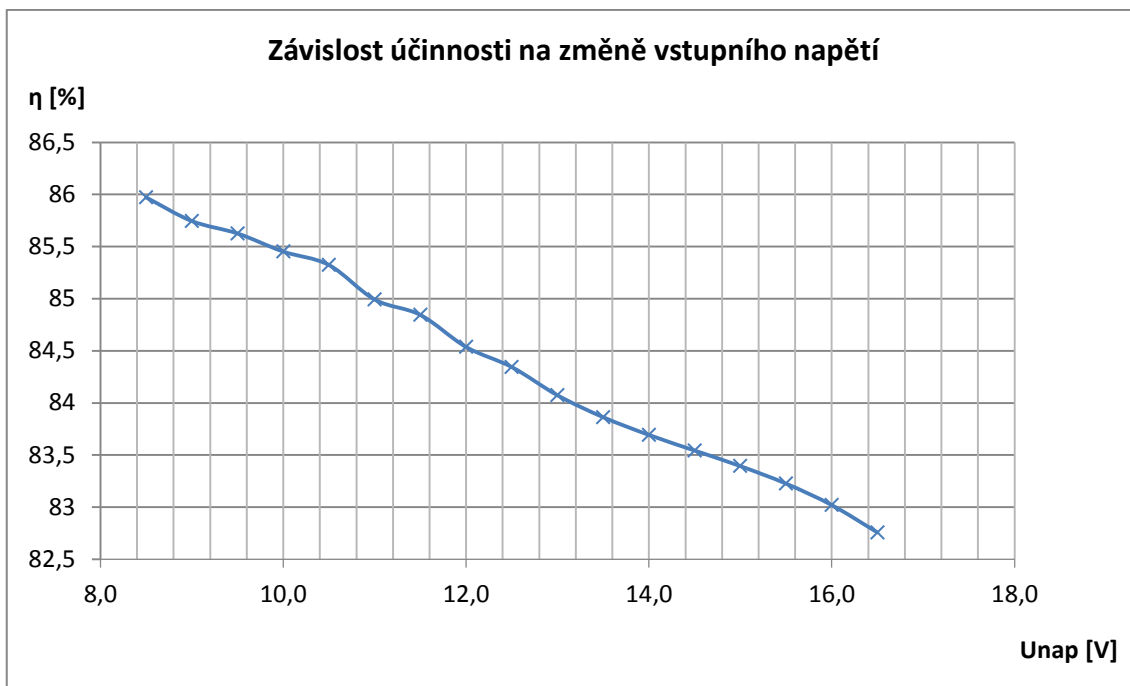
## 2.3.2 Účinnost

Jelikož mají tyto spínané budiče podstatně lepší účinnost než lineární (obvykle do 50 %), tak je nutné vědět, jaký průběh účinnosti tento obvod vykazuje. Účinnost je snížena o přepínací ztráty v obvodu a vlivem nenulového odporu vodičů, kterými protéká proud. V tab. 5 jsou vstupní a výstupní naměřené hodnoty pro následné vypočtení příkonu, výkonu a účinnosti.

Tab. 5: Hodnoty pro výpočet účinnosti obvodu

U zdroje [V]	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
I zdroje [mA]	735	696	660	628	599	574	550	529	509
U led [V]	6,26	6,26	6,25	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24
I led av [mA]	858	858	859	860	860	860	860	860	860
P zdroj [W]	6,25	6,26	6,27	6,28	6,29	6,31	6,33	6,35	6,36
P LED [W]	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37
$\eta$ [%]	86,0	85,8	85,6	85,5	85,3	85,0	84,8	84,5	84,3
U zdroje [V]	13,0	13,5	14,0	14,5	15,0	15,5	16,0	16,5	
I zdroje [mA]	491	474	458	443	429	416	404	393	
U led [V]	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	6,24	
I led av [mA]	860	860	860	860	860	860	860	860	
P zdroj [W]	6,38	6,40	6,41	6,42	6,44	6,45	6,46	6,48	
P LED [W]	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	5,37	
$\eta$ [%]	84,1	83,9	83,7	83,5	83,4	83,2	83,0	82,8	

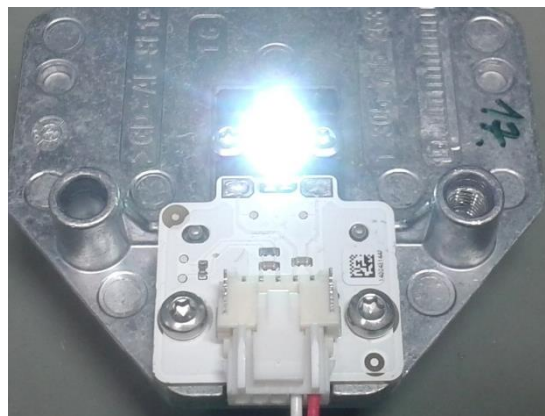
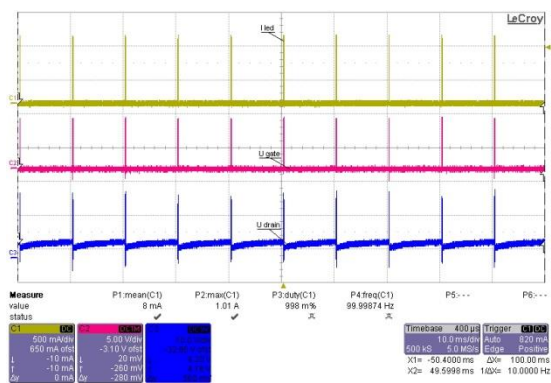
V této tabulce je zřejmá závislost výstupního proudu na proměnném vstupním napětí. Tento proud se takřka nemění, což ukazuje správnou funkci IO, který tento proud řídí. Nejlepší účinnost obvod vykazuje při minimální hodnotě napájecího napětí, protože rozdíl mezi vstupním a výstupním napětím je nejmenší. Tím pádem cívka není tolik zatěžovaná energií jako v případě velkého rozdílu těchto napětí. Výsledná účinnost obvodu je nad 80 %, což je přijatelné. Průběh účinnosti v závislosti na změně vstupního napětí je zobrazen na obr. 34.



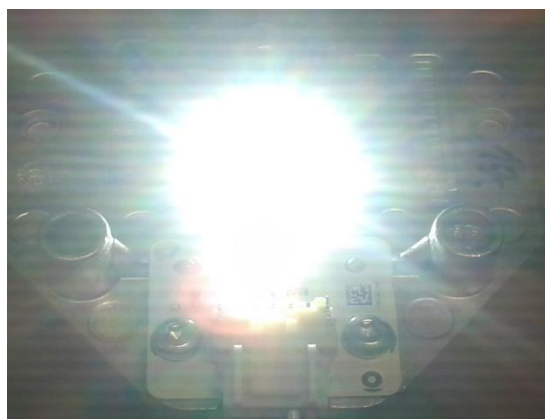
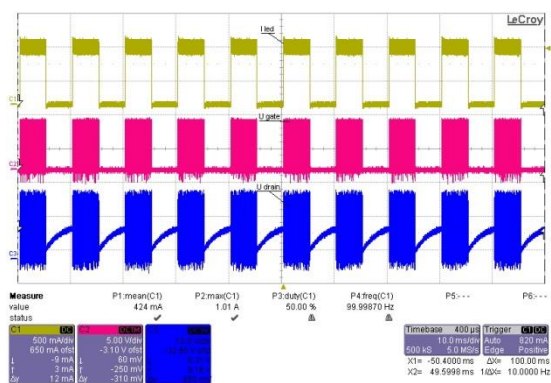
Obr. 34: Graf závislosti účinnosti obvodu na změně vstupního napětí

### 2.3.3 PWM regulace jasu

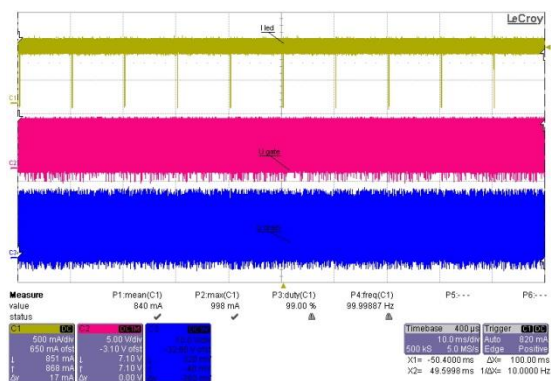
Pulzní šířková modulace spočívá ve změně střední hodnoty proudu  $I_{LED}$  docílené vypínáním výstupu na přesně definovanou dobu. Podle délky této doby se mění i výsledná střední hodnota proudu. Je tedy jas regulován střídou tohoto řídicího obdélníkového signálu. V tomto případě byl pomocí generátoru nastaven obdélníkový signál o frekvenci 100 Hz a amplitudě 5 V. Aby tato regulaci fungovala, je třeba vyrušit zkratovací propojky pro uvedení této funkce do provozu. Signál je pak přiváděn přes konektor přímo do IO. Na následujících třech obrázcích (obr. 35, obr. 36, obr. 37) je možné vidět průběhy na osciloskopu a jas LED diod při střídě řídicího signálu 1, 50, 99 %.



Obr. 35: Úroveň jasu při 1% střidy řídicího signálu



Obr. 36: Úroveň jasu při 50% střidy řídicího signálu

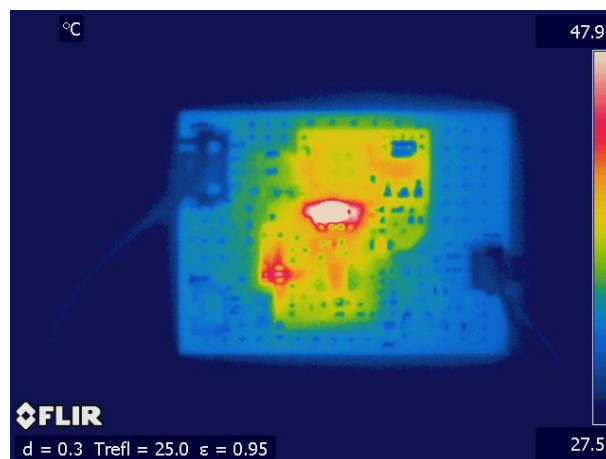


Obr. 37: Úroveň jasu při 99% střidy řídicího signálu

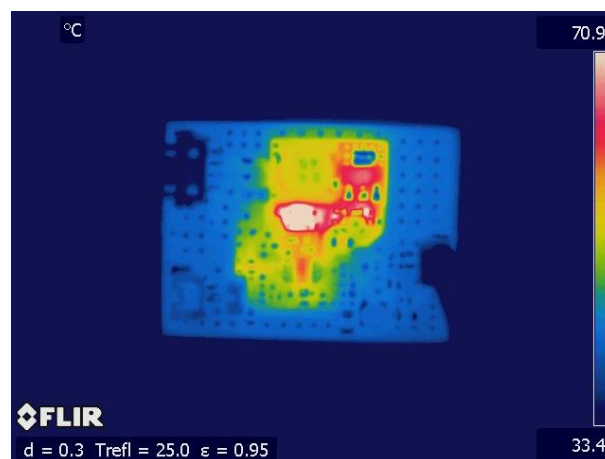
### 2.3.4 Teplotní měření

Toto měření je důležité pro zjištění pracovní teploty obvodových prvků. Pokud by se totiž obvod příliš zahříval, mohl by být zničen. Mohlo by to způsobit například překročení maximálního dovoleného parametru součástky.

Toto měření je prováděno termokamerou, která ilustruje teplotu pomocí barevné škály. Rozdíl ztrát obvodu bez a s použitím filtru a tlumících obvodů je zobrazen na obr. 38 a obr. 39. Nejvíce je zahřívána dioda D1 a následkem RC členu i tranzistor T1. Rozdíl je skoro dvojnásobný (50 °C, 90 °C), s tím souvisí klesající účinnost.



Obr. 38: Snímek teplotního spektra při ustáleném stavu obvodu bez použití filtru a tlumících obvodů



Obr. 39: Snímek teplotního spektra při ustáleném stavu s použitím filtrů a tlumících obvodů

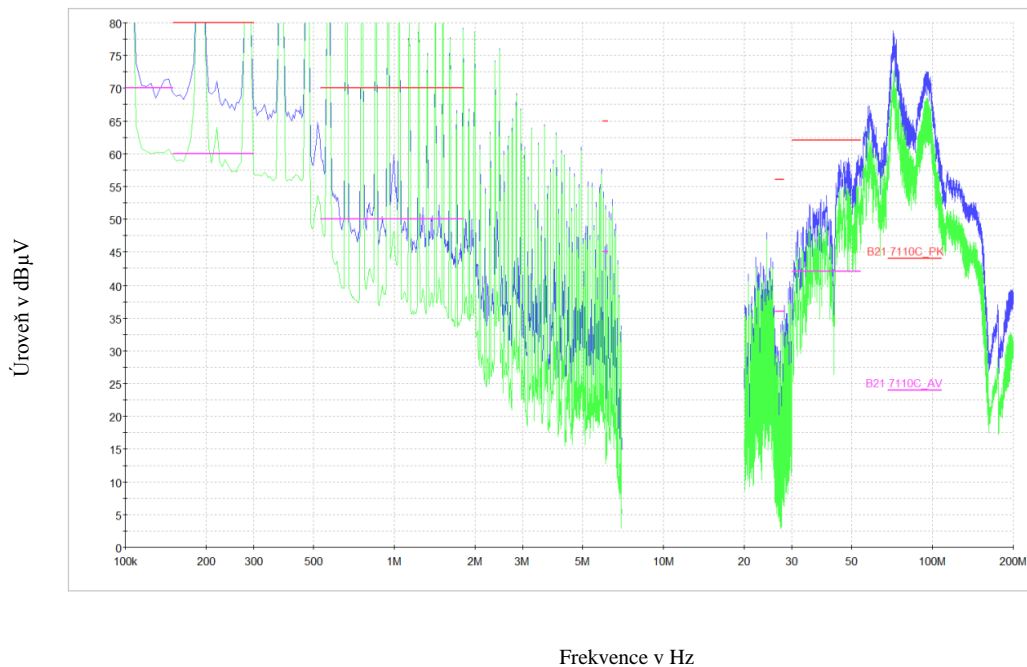
S filtrem a tlumícími obvody jsou signály mírně zpomaleny na hranách pro redukci šumu – rostou spínací ztráty a tím i oteplení.



### 2.3.5 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

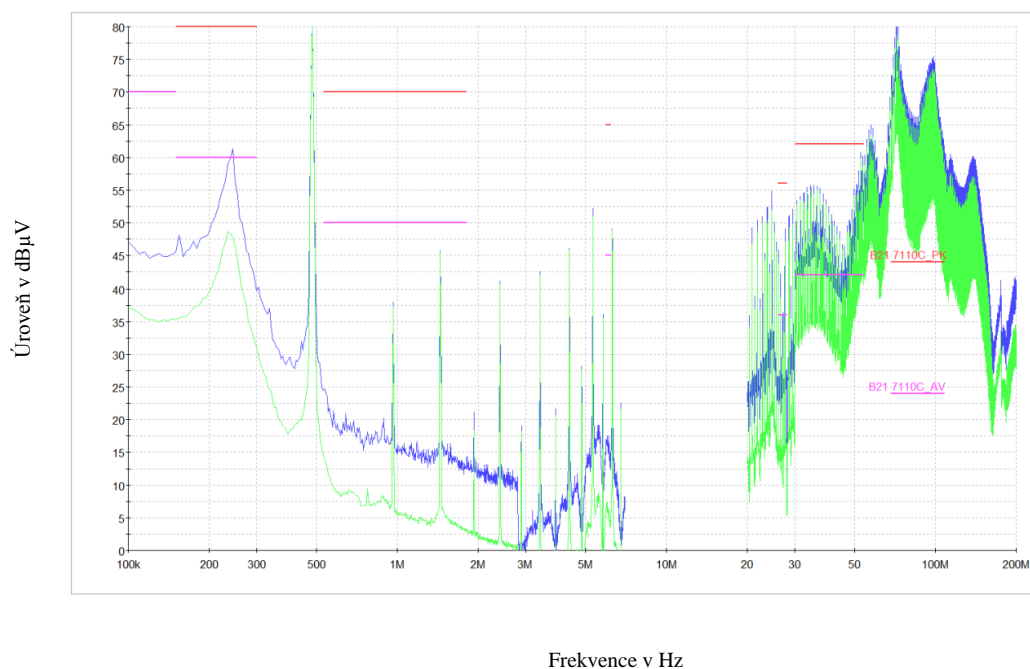
Jak už bylo dříve napsáno, tímto měřením lze zobrazit emisní charakteristiku tohoto obvodu. Nejprve byl změřen v EMC komoře obvod bez filtru a tlumících obvodů, pak byl přidán vstupní filtr a následně obvody tlumící. Hodnoty součástek těchto tlumících obvodů a vstupního filtru byly měněny podle toho, jestli měly pozitivní, nebo negativní vliv na výslednou emisní charakteristiku.

Na obr. 40 je vidět, že obvod prokazuje silné rušení, které bylo změřeno za normálních podmínek bez užití filtru a tlumících obvodů. Hranice, umístěné na určitých úrovních jsou dány normou automobilového průmyslu. Špičková hodnota (eventuálně střední) rušení, se nad tyto hranice nesmí dostat, aby se v kabelových rozvodech automobilu toto rušení nešířilo.



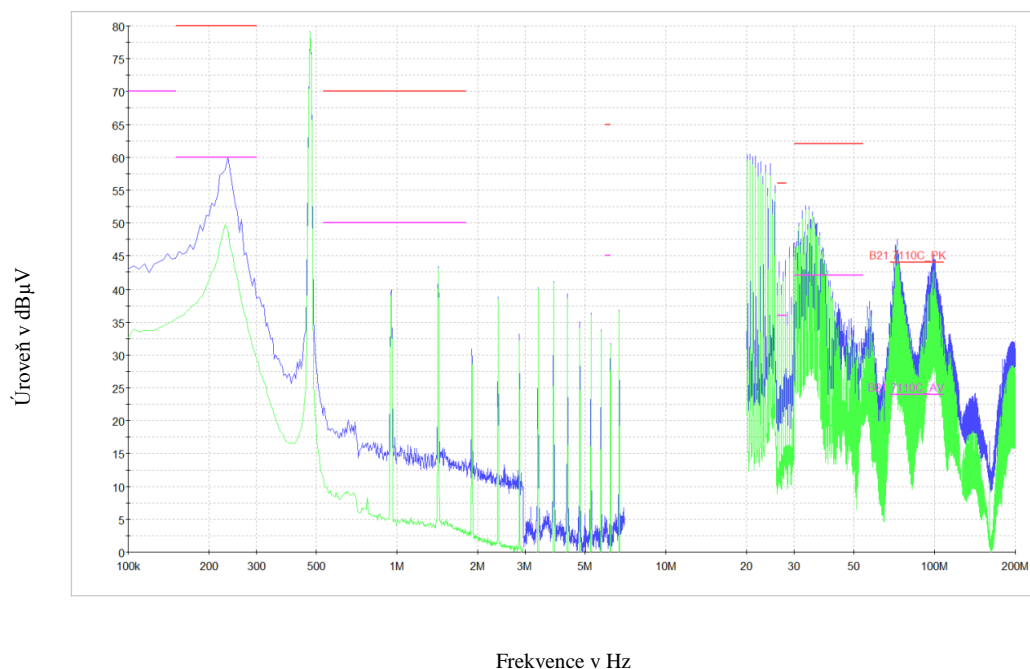
Obr. 40: Vyzařovací charakteristika obvodu bez použití tlumícího filtru

V tomto případě byla pozornost věnována oblasti kmitočtů v rozsahu kHz. Pro odrušení těchto kmitočtů byl aplikován vstupní LC filtr. Po zařazení tohoto filtru vyzařovací charakteristika měla průběh jako na obr. 41. Je zde vidět dominantní složka, která patří spínací frekvenci obvodu a nachází se ve volném pásmu, kam byla směřována.



Obr. 41: Vyzařovací charakteristika obvodu s použitím vstupního filtru

Po užití vstupního filtru a tlumících obvodů vychází charakteristika jako na obr. 42. Obvod stále vykazuje rušení ve vyšších kmitočtech způsobené spínáním a možnou chybou návrhu plošného spoje, který má na EMC velký vliv.

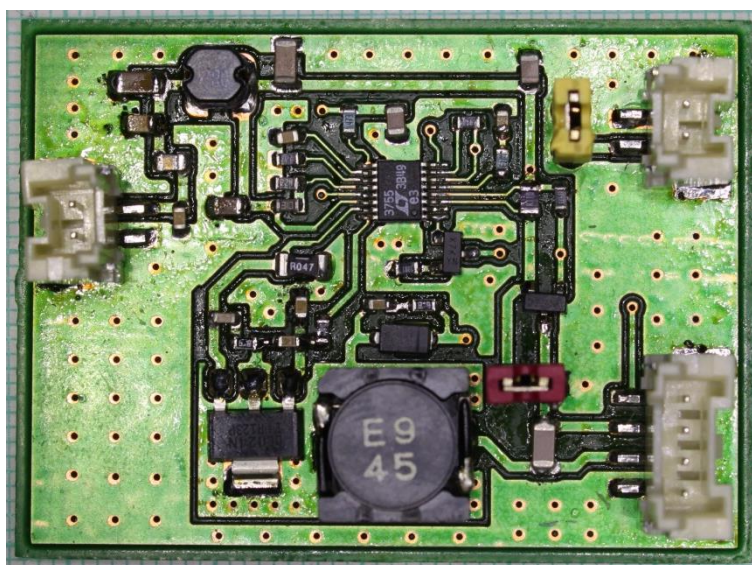


Obr. 42: Vyzařovací charakteristika obvodu s použitím všech filtrů

Tento průběh je primární, protože není cílem navrhnout kompletní odrušení. Obecně mají na generovaný šum zásadní vliv parametry desky plošných spojů. Tato práce se zabývá hlavně universálním návrhem ověřujícím funkci obvodu a postupu při jeho realizaci. Každý návrh má originální vyzařovací charakteristiku.

## 2.4 Vzhled hotového obvodu

Na obr. 43 je snímek desky plošných spojů hotového obvodu.



Obr. 43: Fotografie hotového obvodu (skutečné rozměry 50 x 36 mm)

## ZÁVĚR

V této práci jsem vysvětlil tři základní principy spínaných budičů, které se používají pro řízení LED diod. Jedním cílem bylo porovnat pět IO od různých výrobců, které tvoří hlavní řídicí část měničů, podle jejich parametrů. Výběr byl zúžen požadavkem, aby šlo pomocí IO realizovat tři základní typologie (buck, boost, buck-boost). Hlavními porovnávanými parametry byly spínací frekvence, maximální řízený výstupní proud a způsob jeho regulace, rozsah pracovního napětí. Každý IO jsem stručně popsal a vytknul jeho výhody a nevýhody. Parametry těchto obvodů jsem zapsal do tabulky pro názornější porovnání. Po celkovém vyhodnocení nejlépe vyhovoval IO LT3755 od výrobce Linear Technology. Ten disponuje parametry, vysoké spínací frekvence až 1 MHz, řízení proudu až 10 A, velkým rozsahem vstupního napětí (od 4,5 až 40 V) a výborné dostupnosti kvalitních materiálů pro návrh.

Na základě materiálů, které má výrobce tohoto IO k dispozici, jsem navrhl, odsimuloval a sestavil snižující měnič (buck), který napájí jednu dvoučipovou LED diodu. Výstupní proud řídicího obvodu je 860 mA. Výsledný obvod obsahuje další přídavné funkce jako je PWM regulace jasu a analogové řízení proudu ovládané oteplením čipu LED diody. Účinnost sestaveného měniče je nad 80 %. Obvod obsahuje filtr a tlumící obvody pro zmírnění vyzařovaného rušení (zlepšující EMC parametry). Na základě měření šumu generovaného do napájecí větve (conducted emissions) jsem navrhl vstupní filtr a další tlumící obvody. Redukce rušení je však za cenu zmenšení účinnosti a růstu tepelných ztrát, protože dojde ke zpomalení přechodových dějů. Rozdíl je dokumentován snímky z termokamery.

Návaznost této práce bude spočívat v sestavení zbývajících dvou měničů (boost, buck-boost) se stejným IO LT3755, pro závěrečné porovnání parametrů těchto měničů pro možnou implementaci při návrhu řídicí elektroniky ve světlometech automobilu, kde se tyto budiče používají stále častěji.

# LITERATURA

- [1] DOSTÁL, Tomáš. *Elektrické filtry: přednášky a numerická cvičení*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2004, 135 s. ISBN 80-214-2561-x.
- [2] HÁJEK, Karel a Jiří SEDLÁČEK. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-7300-023-7.
- [3] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 216 s. ISBN 80-7300-202-7.
- [4] MANIKTALA, Sanjaya. *Switching power supplies A to Z*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, 2006, viii, 503 s. ISBN 978-0-7506-7970-1.
- [5] NOVOTNÝ, V. *Napájení elektronických zařízení: přednášky*. 1. vyd. Brno: VUT FEKT, 2003, ISBN 80-214-2300-5.
- [6] WHITTINGTON, H. *Switched mode power supplies: design and construction*. Taunton, England: Research Studies Press, c1992, viii, 216 p. ISBN 0863801234.
- [7] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010, 123 s. ISBN 978-80-7300-266-4.
- [8] Buck converter. In: Wikipedia [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Buck\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter)
- [9] Boost converter. In: Wikipedia [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Boost\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter)
- [10] Buck-boost converter. In: Wikipedia [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Buck-boost\\_converter](http://en.wikipedia.org/wiki/Buck-boost_converter)
- [11] Katalogový list LM3478. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/snvs085v/snvs085v.pdf>
- [12] Stránky výrobce s informacemi o LM3478. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/product/lm3478>
- [13] Katalogový list LM3429. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/snvs616g/snvs616g.pdf>
- [14] Stránky výrobce s informacemi o LM3429. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.ti.com/product/lm3429>
- [15] Katalogový list MAX16833. [online]. [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX16833-MAX16833D.pdf>
- [16] Stránky výrobce s informacemi o MAX16833. [online]. [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/datasheet/index.mvp/id/6605/t/do>

- [17] Katalogový list LT3755. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/37551fd.pdf>
- [18] Stránky výrobce s informacemi o LT3755. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.linear.com/product/LT3755>
- [19] Katalogový list NCP3065. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/NCP3065.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP3065.PDF)
- [20] Stránky výrobce s informacemi o NCP3065. [online]. [cit. 2013-12-09].  
Dostupné z: <http://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=NCP3>

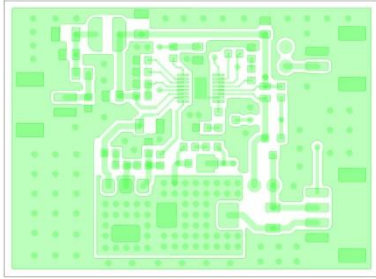
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Návrh zařízení</b>	<b>56</b>
A.1	Obvodové zapojení .....	56
A.2	Deska plošného spoje TOP – (strana součástek i spojů) .....	57
A.3	Deska plošného spoje BOTTOM – (strana spojů).....	57
A.4	Osazovací výkres .....	57
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>58</b>



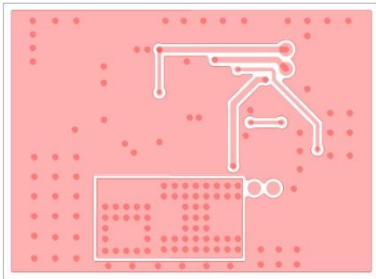


## A.2 Deska plošného spoje TOP – (strana součástek i spojů)



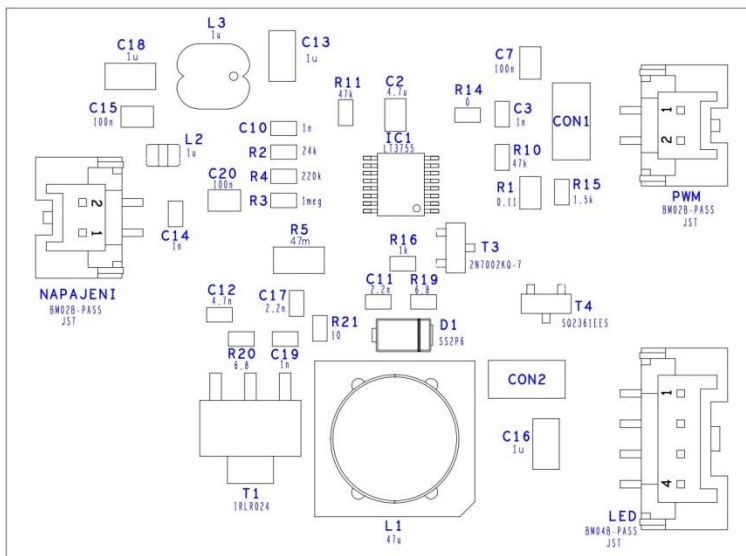
Rozměr desky 50 x 36 [mm], měřítko M1:1

## A.3 Deska plošného spoje BOTTOM – (strana spojů)



Rozměr desky 50 x 36 [mm], měřítko M1:1

## A.4 Osazovací výkres



## B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
CON1		HEADER_0_1_2	Propojka
CON2		HEADER_0_1_2	Propojka
C2	4.7u	805	Keramický kondenzátor
C3	1n	603	Keramický kondenzátor
C14	1n	603	Keramický kondenzátor
C19	1n	603	Keramický kondenzátor
C7	330n	805	Keramický kondenzátor
C10	33p	603	Keramický kondenzátor
C11	2.2n	603	Keramický kondenzátor
C17	2.2n	603	Keramický kondenzátor
C12	4.7n	603	Keramický kondenzátor
C13	1u	1206	Keramický kondenzátor
C16	1u	1206	Keramický kondenzátor
C18	1u	1206	Keramický kondenzátor
C15	100n	805	Keramický kondenzátor
C20	100n	805	Keramický kondenzátor
D1	SS2P6	DO220AA_SMP	Schottkyho dioda
IC1	LT3755	MSOP16	Integrovaný obvod
LED JST	BM04B-PASS	JST_4pin	Konektor
L1	47u	10 x 10,2 x 6	Cívka
L2	1u	0805	Ferit
L3	1u	4 x 4,5 x 3,2	Cívka
PWM JST	BM02B-PASS	JST_2pin	Konektor
Napajeni JST	BM02B-PASS	JST_2pin	Konektor
R1	0.11	805	Rezistor
R2	24k	603	Rezistor
R3	1meg	603	Rezistor
R4	220k	603	Rezistor
R5	47m	1206	Rezistor
R6	47k	603	Rezistor
R7	47k	603	Rezistor
R14	0	603	Rezistor
R15	1.5k	603	Rezistor
R16	1k	603	Rezistor
R19	6.8	603	Rezistor
R20	6.8	603	Rezistor
R21	10	603	Rezistor
T1	IRLR024	SOT223	Tranzistor
T3	2N7002KQ-7	SOT23	Tranzistor
T4	SQ2361EES	SOT23	Tranzistor