



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

REGULOVATELNÝ ZDROJ PROUDU PRO VÝKONOVÉ LED DIODY S POUŽITÍM PLATFORMY ARDUINO

CONTROLLABLE CURRENT SOURCE FOR HIGH POWER LEDS WITH THE
USE OF ARDUINO PLATFORM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Martin Čáp

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika** Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Čáp

ID: 167660

Ročník: 3

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Regulovatelný zdroj proudu pro výkonové LED diody s použitím platformy Arduino

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s hardwarem a programovacím prostředím platformy Arduino.
2. Porovnejte výhody a nevýhody lineárního a spínaného zdroje proudu a pro jednotlivé koncepce provedte návrh regulovatelného zdroje proudu pro napájení výkonových LED diod. Pro zadávání požadovaného jasu využijte platformu Arduino.
3. Návrhy jednotlivých koncepcí realizujte a porovnejte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004
- [2] Patočka M., Výkonová elektronika BVEL, 1. část - usměrňovače, střídavé měniče napětí., skriptum FEKT VUT Brno, 2010

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 31.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, 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

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou regulace jasu výkonových LED diod a návrhem řídicích obvodů. Je zde popsáno jak v prostředí Delphi vytvořit aplikaci pro řízení PWM výstupů Arduina. Dále jsou probrány lineární a spínané zdroje proudu. Také jsou popsány specializované spínané zdroje pro napájení LED diod. Cílem této práce je návrh, realizace a porovnání zdroje proudu pracujícího v lineárním režimu, zdroje proudu pracujícího ve spínacím režimu sestaveného s TL494 a zdroje proudu založeném na použití LED driveru TPS92513.

Klíčová slova

Výkonová LED dioda, řízení jasu, zdroj proudu, Arduino, Delphi

Abstract

This bachelor thesis deals with regulation of brightness power LED diodes and design of the control circuits. Here is described how in environment Delphi to create an application to control PWM Arduino outputs. They are discussed linear and switching current source. Also are described specialized switching power supplies to power the LEDs. The aim of this work is the design, realization and comparison of linear power supply, switching source assembled with the TL494 and integrated switched current source TPS92513.

Keywords

High power LED diode, brightness control, current source, Arduino, Delphi

Bibliografická citace

ČÁP, M. *Regulovatelný zdroj proudu pro výkonové LED diody s použitím platformy Arduino*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Toman.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Regulovatelný zdroj proudu pro výkonové LED diody s použitím platformy Arduino 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 autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

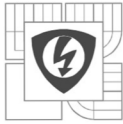
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Tomanovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

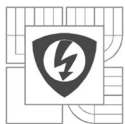
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	7
SEZNAM TABULEK	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD	10
1 ZAJIŠTĚNÍ KOMUNIKACE S PC	11
1.1 ARDUINO.....	11
1.1.1. POPIS ARDUINA	11
1.2 DELPHI.....	13
1.2.1. POPIS PROSTŘEDÍ	13
2 ZDROJE PROUDU.....	16
2.1 DEFINICE ZDROJE PROUDU.....	16
2.2 LINEÁRNÍ ZDROJE PROUDU	18
2.2.1. PROUDOVÁ ZRCADLA	19
2.2.2. ZDROJ PROUDU S OPERAČNÍM ZESILOVAČEM.....	20
2.3 SPÍNANÉ ZDROJE PROUDU	21
2.3.1. SPECIALIZOVANÉ SPÍNANÉ ZDROJE PRO NAPÁJENÍ LED	22
2.4 TEORETICKÉ POROVNÁNÍ ZDROJŮ PROUDU.....	22
3 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU PRACUJÍCÍHO V LINEÁRNÍM REŽIMU.....	23
3.1 NÁVRH VSTUPNÍHO ODPOROVÉHO DĚLIČE A RC FILTRU	23
3.2 NÁVRH CHLADIČE TRANZISTORU	24
3.3 REALIZACE	25
3.4 NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ NA BOČNÍKU	26
4 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU PRACUJÍCÍHO VE SPÍNACÍM REŽIMU	28
4.1 NÁVRH VSTUPNÍHO ODPOROVÉHO DĚLIČE A RC FILTRU	29
4.2 VÝPOČET TLUMIVKY	29
4.3 REALIZACE	29
4.4 NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ NA BOČNÍKU	30
5 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU ZALOŽENÉHO NA POUŽITÍ LED DRIVERU TPS92513.....	32
5.1 NÁVRH VSTUPNÍHO ODPOROVÉHO DĚLIČE A RC FILTRU	32
5.2 NÁVRH SOUČÁSTEK	33
5.3 REALIZACE	35
5.4 NAMĚŘENÉ PRŮBĚHY VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ NA BOČNÍKU	35



6 POROVNÁNÍ REALIZOVANÝCH ZDROJŮ	38
ZÁVĚR.....	39
LITERATURA	40
PŘÍLOHA A	41
PŘÍLOHA B.....	42



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.1: Arduino Mega2560 (převzato z [1]).</i>	12
<i>Obrázek 1.2: Prostředí Delphi 7.</i>	13
<i>Obrázek 1.3: Procedura pro první posuvník.</i>	14
<i>Obrázek 1.4: Object inspector.</i>	14
<i>Obrázek 1.5: Vlastní program pro zadávání požadovaných hodnot.</i>	15
<i>Obrázek 1.6: Formulář pro nastavení komunikace.</i>	15
<i>Obrázek 2.1: Závislost proudu na velikosti napětí.</i>	16
<i>Obrázek 2.2: Náhradní schéma zdroje proudu.</i>	16
<i>Obrázek 2.3: K definici statického a dynamického odporu.</i>	17
<i>Obrázek 2.4: Tranzistorový stabilizátor proudu se Zenerovou diodou.</i>	18
<i>Obrázek 2.5: Zdroj proudu se dvěma tranzistory.</i>	19
<i>Obrázek 2.6: Základní zapojení proudového zrcadla.</i>	20
<i>Obrázek 2.7: Zdroj proudu s OZ.</i>	20
<i>Obrázek 2.8: Snižující měnič.</i>	21
<i>Obrázek 3.1: Schéma zapojení.</i>	23
<i>Obrázek 3.2: Náhradní tepelné schéma.</i>	25
<i>Obrázek 3.3: Fotografie realizovaného dvoukanálového lineárního zdroje.</i>	26
<i>Obrázek 3.4: Rozsah 250 mA; požadovaná hodnota 100 mA.</i>	26
<i>Obrázek 3.5: Rozsah 150 mA, požadovaná hodnota 90 mA.</i>	27
<i>Obrázek 4.1: Schéma zapojení spínaného zdroje s TL494.</i>	28
<i>Obrázek 4.2: Fotografie realizovaného spínaného zdroje s TL494.</i>	30
<i>Obrázek 4.3: Rozsah 250 mA, požadovaná hodnota 100 mA.</i>	30
<i>Obrázek 4.4: Rozsah 150 mA, požadovaná hodnota 90 mA.</i>	31
<i>Obrázek 4.5: Rozsah 50 mA, požadovaná hodnota 20 mA.</i>	31
<i>Obrázek 5.1: Schéma zapojení zdroje proudu s TPS92513.</i>	32
<i>Obrázek 5.2: Dělič a RC filtr.</i>	33
<i>Obrázek 5.3: Fotografie realizovaného spínaného zdroje TPS92513.</i>	35
<i>Obrázek 5.4: Rozsah 250 mA; požadovaná hodnota 100 mA.</i>	36
<i>Obrázek 5.5: Rozsah 250 mA, požadovaná hodnota 200 mA.</i>	36
<i>Obrázek 5.6: Rozsah 50 mA, požadovaná hodnota 0 mA.</i>	37



<i>Obrázek B.1: Celkové schéma zapojení lineárního zdroje s dvěma kanály.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek B.2: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS - top.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek B.3: Osazovací výkres DPS – bottom</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek B.4: Celkové schéma zapojení spínaného zdroje s TL494.....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek B.5: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS – top c) Osazovací výkres DPS – bottom.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek B.6: Celkové schéma zapojení LED driveru TPS92513</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek B.7: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS – top</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek B.8: Osazovací výkres DPS – bottom</i>	<i>45</i>

SEZNAM TABULEK

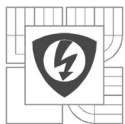
<i>Tabulka A: Seznam používaných LED diod</i>	<i>41</i>
---	-----------



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

G_D	[S]	dynamický vnitřní vodivost
G_i	[S]	vnitřní vodivost
G_S	[S]	statická vnitřní vodivost
I_G	[A]	proud vnitřní vodivosti
I_0	[A]	proud ideálního zdroje
I_S	[A]	výstupní proud zdroje
P_{tot}	[W]	celkový ztrátový výkon
P_{ztr}	[W]	ztrátový výkon
R_D	[Ω]	dynamický vnitřní odpor
R_S	[Ω]	statický vnitřní odpor
R_Z	[Ω]	zatěžovací odpor
R_θ	[K/W]	celkový tepelný odpor
$R_{\theta cs}$	[K/W]	tepelný odpor styku s chladičem
$R_{\theta jc}$	[K/W]	vnitřní tepelný odpor
$R_{\theta sa}$	[K/W]	tepelný odpor chladiče
T_{jmax}	[$^{\circ}$ C]	maximální provozní teplota přechodu
U_{BE}	[V]	napětí mezi bázi a emitorem bipolárního tranzistoru
U_{CC}	[V]	napájecí napětí
U_{CES}	[V]	saturační napětí bipolárního tranzistoru
U_O	[V]	výstupní napětí
U_{RE}	[V]	napětí na odporu R_E
U_S	[U]	svorkové napětí
U_{ZD}	[V]	napětí na Zenerově diodě
U_{IADJ}	[V]	řídící napětí obvodu TPS92513
U_{ISENSE}	[V]	napětí na bočníku obvodu TPS92513

A/D	analog/digitál
CPU	(=central processing unit) centrální procesorová jednotka
GND	uzemnění
DPS	deska plošného spoje
IO	integrovaný obvod
LCD	(=liquid crystal display) displej z tekutých krystalů
LED	světlo emitující dioda
NPN	označení bipolárního tranzistoru s bázi o vodivosti typu P
OZ	operační zesilovač
PNP	označení bipolárního tranzistoru s bázi o vodivosti typu N
PWM	pulzní šířková modulace
PC	počítač
VA	voltampérová



ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem regulovatelného zdroje proudu, který bude využíván pro řízení jasu výkonových LED diod. Je zamýšleno použít patnáct PWM výstupů z Arduina pro řízení patnácti zdrojů. Tato aplikace bude používána pro kalibraci fotoaparátu. Kvůli tomu je požadováno co nejmenší zvlnění proudu protékajícího LED diodami.

Na začátku této práce bude popsáno Arduino a grafické prostředí Delphi 7. Pomocí aplikace v něm vytvořené se budou nastavovat požadované hodnoty na PWM výstupech Arduina. Arduino je elektronická platforma, založená na jednoduchém hardwaru a softwaru a jeho komunikace s aplikací Delphi je zde popsána.

Dále budou popsány spínané a lineární zdroje proudu a jejich vlastnosti. Zdroje proudu jsou takové zdroje, které udržují konstantní proud. Pro řízení proudu LED diodami se převážně používají LED drivery, proto je jedna koncepce zkonstruována s integrovaným spínaným zdrojem neboli LED driverem TPS92513.

Cílem této práce je navrhnout a zrealizovat několika koncepcí regulovatelných zdrojů proudu s co nejmenším zvlněním proudu, dále jejich porovnání a výběr nejvíce vyhovujícího obvodu. Součástí práce budou podklady pro zhotovení těchto obvodů, tedy schémata zapojení a výkresy plošných spojů.

Navržený zdroj se bude používat pro regulaci jasu diod s různými VA charakteristikami, proto bude na řídicím vstupu každého obvodu umístěn přepínatelný dělič, který zajistí omezení procházejícího proudu na 250 mA, 150 mA a 50 mA. Nižší rozsahy jsou používány pro větší rozlišení. Analogové výstupy z Arduina mají osmibytové rozlišení, z toho důvodu používáme rozsah 0 – 50 mA, kde je možné nastavovat proud po krocích 0,2 mA. Na rozsahu 0 – 250 mA je krok 1 mA.

Pro porovnání bude navržen zdroj proudu pracující v lineárním režimu, zdroj proudu pracující ve spínacím režimu a spínaný zdroj založený na výše zmíněném LED driveru. Všechny tyto obvody budou proměřeny na všech rozsazích a zhodnoceny.



1 ZAJIŠTĚNÍ KOMUNIKACE S PC

1.1 Arduino

„Arduino je otevřená elektronická platforma, založená na jednoduchém hardware a software. Mikroprocesor na desce Arduina se programuje ve vlastním vývojem prostředí Arduino programovacím jazykem založeným na jazyku Wiring (podobný jazyku C). Projekty v Arduinu mohou jednoduše komunikovat se softwarem na pc.

Srdcem Arduina je mikrokontrolér od ATmegy s architekturou AVR, což jsou osmibitové procesory typu RISC s harvardskou architekturou (tj. má oddělený paměťový prostor pro program a pro data). Jednotlivé použité typy (ATmega8, ATmega168, ATmega328) se liší především velikostí vnitřní paměti RAM a vnitřní paměti FLASH.

Každý mikrokontrolér obsahuje kromě CPU i některé periferie – několik časovačů, sériové a paralelní porty, A/D převodníky pro zjišťování analogových hodnot atd. Na desce Arduino je kromě mikrokontroleru i několik dalších obvodů – především to jsou stabilizátory napájecího napětí a obvody, které zajišťují komunikaci s PC (port RS-232, USB).“[1]

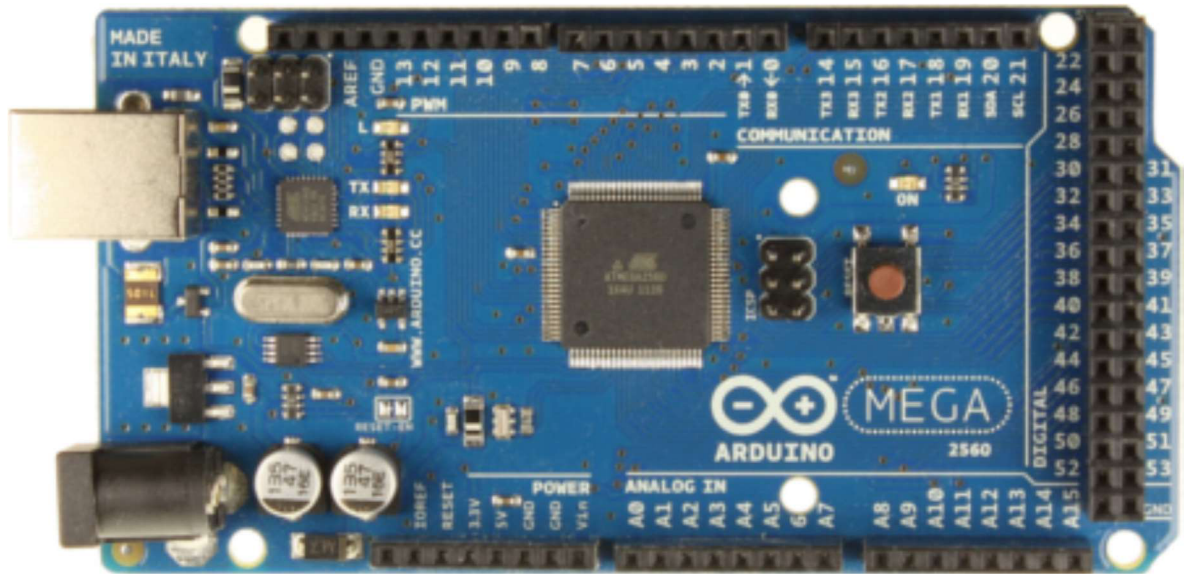
Periferie

Ve světě Arduina se periferie nazývají štíty (shields). Jsou to desky s podobnými rozměry jako Arduino a se stejným rozložením konektorů. Takové desky lze nasadit na desku s Arduinem. Pomocí nich je možné k Arduinu připojit téměř cokoli. Např. LCD Keypad shield pro připojení displeje s tlačítky, Ethernet shield pro připojení k internetu, GSM shield pro příjem dat z mobilní sítě aj.

1.1.1. Popis Arduina

Pro tento projekt je používána deska Arduino Mega2560 R3, která má:

- procesor ATmega2560
- 54 digitálních vstupů/výstupů, ze kterých může být 15 použito jako PWM výstupy
- 16 analogových vstupů
- 4 piny UART (univerzální asynchronní přijímač/vysílač)
- 16 Mhz krystalový oscilátor
- USB připojení
- IKSP konektor
- napájecí konektor.



Obrázek 1.1: Arduino Mega2560 (převzato z [1])

Tento typ Arduina byl vybrán pro velký počet PWM výstupů, ty jsou používány pro řízení jasu LED diod. Dalším kritériem byl dostatečný počet digitálních vstupů/výstupů, které byly zamýšleny pro použití displeje a tlačítek pro nastavování požadovaných hodnot. V tomto projektu je místo displeje využito grafické prostředí Delphi viz kap. 2.2.

Při použití napájení Arduina z počítače přes USB může být výstupní napětí zašumněné a nemusí být přesně 5V. Proto by se mělo použít externí napájení. Může se použít 7 – 12V zásuvkový síťový adaptér nebo baterie. Napájení se připojuje souosým konektorem s průměrem středního kolíku 2,1 mm. Baterie se může připojit do pinů označených GND a Vin. Na desce je vnitřní 5V stabilizátor s přesností $\pm 1\%$.

Protože výstupy Arduina jsou PWM modulovány v rozsahu 0 – 5 V je vždy přiřazen dělič napětí, který snižuje řídicí napětí na hodnotu odpovídající potřebnému otevření aktivního členu (tranzistoru). Kvůli různým VA charakteristikám regulovaných LED diod je potřeba vytvořit děliče tří, každý odpovídá jiné hodnotě protékajícího proudu LED diodami. Dále je potřeba přiřadit RC filtr 3. řádu typu dolní propust pro vyhlazení zvlnění řídicího napětí, tak aby odpovídalo zadaným požadavkům.



1.2 Delphi

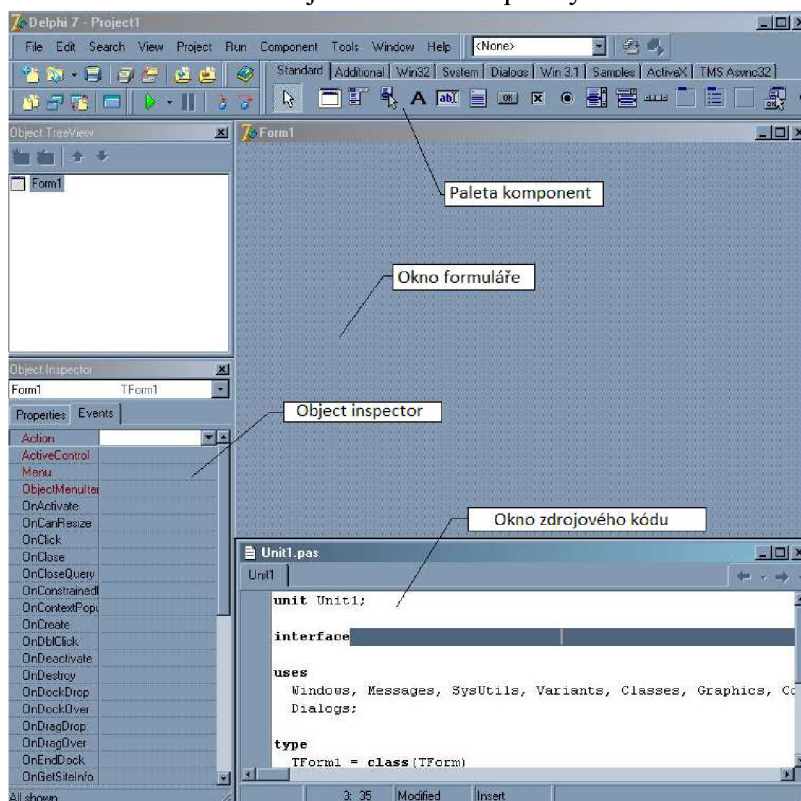
V této práci je pro vytvoření grafického prostředí s posuvníky, které budou ovládat PWM výstupy Arduina, použito „*integrované grafické vývojové prostředí Delphi 7 určené pro tvorbu aplikací na platformě MS Windows v jazyce Object Pascal. Delphi obsahuje systém RAD (Rapid Application Development), který umožňuje vizuální návrh grafického uživatelského rozhraní, na jehož základě je automaticky vytvářena kostra zdrojového kódu, což výrazně urychluje vývojový cyklus.*“ [12] Hotová aplikace je typ souboru exe, takže je spustitelná na všech operačních systémech. V této podkapitole je popsáno prostředí a komunikace Delphi 7 s Arduinem.

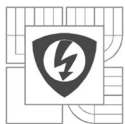
Prostředí Delphi 7 má tu nevýhodu, že je kompatibilní jen s verzí Windows XP a starší.

1.2.1. Popis prostředí

Hlavní okno se dělí na tři části:

- Panel nabídek – umožňuje přístup k funkcím, jako je nastavení projektu a celkového prostředí aj. a dále instalaci nových komponent, ty jsou ve velkém množství dostupné na stránkách <http://delphi.cz/category/Komponenty.aspx>
- Panel nástrojů – obsahuje základní příkazy (otevřít, uložit, kompilovat atd.). Tento panel je možné předělat podle potřeb uživatele
- Panel paleta komponent – obsahuje objekty používaných komponent. Pro komunikaci přes sériový port byla přidána komponenta TMS Async32. V této době jsou vytvořeny komponenty pro většinu hardware a software a tak je možné v Delphi vytvářet rozmanité aplikace.





Vytvoření projektu

Po spuštění se objeví:

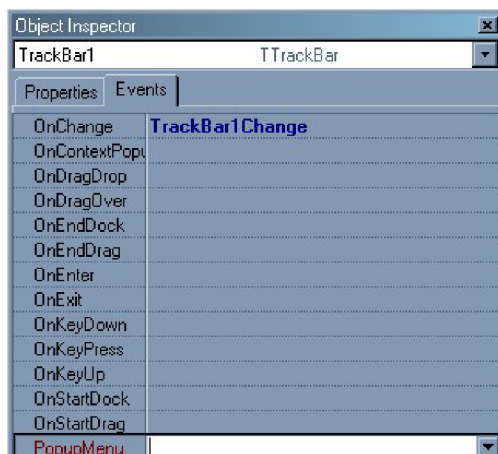
- základní prázdný formulář Form1
- zdrojový kód Unit1 – obsahuje předpřipravený protokol, kde jsou vypsány používané komponenty a deklarace formuláře
- okno Object Inspector (lze vyvolat klávesou F11) - v tomto okně jsou uvedeny vlastnosti vybraného objektu (properties) a přiřaditelné události (events)
- okno Object TreeView – zde je zobrazen strom objektů

Vložení objektu do formuláře se automaticky nadeklaruje ve zdrojovém kódu a zobrazí v Object TreeView. Pro přiřazení funkce akčním objektům (tlačítko, posuvník, atd) je potřeba ve zdrojovém kódu vytvořit proceduru (viz Obrázek 1.3).

```
procedure TForm1.TrackBar1Change(Sender: TObject);  
begin  
  GroupBox1.Caption := 'Out 0 (pin2) - ' + IntToStr(TrackBar1.Position);  
  Form2.Edit3.Text := 'a' + IntToStr(TrackBar1.Position) + 'i';  
end;
```

Obrázek 1.3: Procedura pro první posuvník

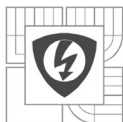
Dále je nutné v Object inspector v záložce Events příslušného objektu přiřadit název procedury k akci, která ji má vyvolávat (viz Obrázek 1.4). U posuvníku se používá akce OnChange, tedy při každé změně se vyvolá procedura, která zapisuje data na výstup.



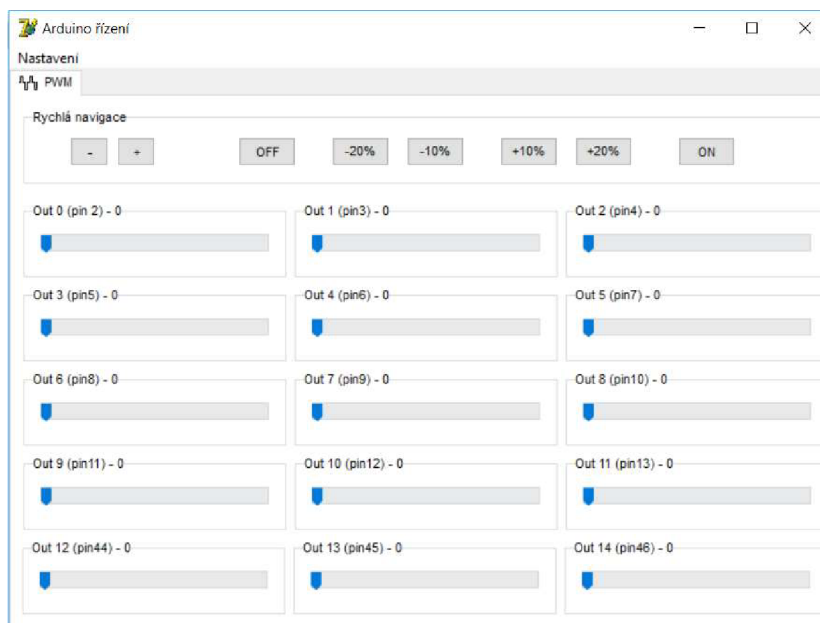
Obrázek 1.4: Object inspector

Komunikace přes sériový port

Výše zmíněná komponenta TMS Async32 obsahuje objekt VaComm, ten umožňuje zápis a čtení přes sériový port. Na obrázku 2.2 je vidět, že hodnota z posuvníku se zapisuje do textového okna Edit3. V proceduře VaComm je příkazem VaComm.WriteText(Edit3.text + #13) tato hodnota poslána na sériový port, kde ji přečte připojené Arduino a dále s ní pracuje. Při každém zápisu je potřeba připsat i koncový znak řetězce, v ASCII kódování mu odpovídá číslo 13.

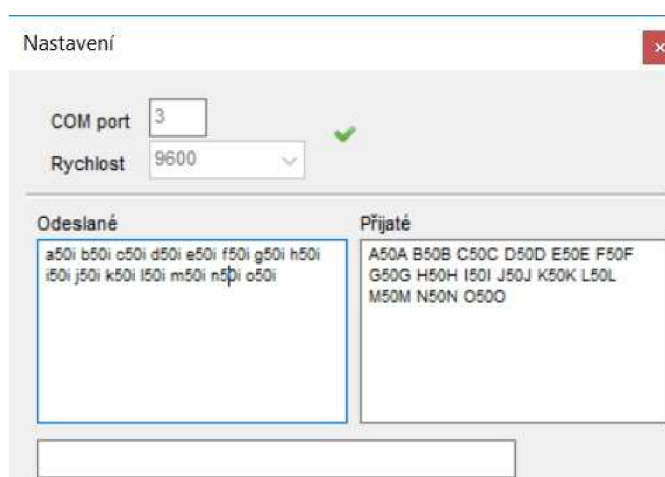


Ve vlastním programu je umístěno patnáct posuvníků, kdy každý ovládá jeden PWM výstup z Arduina. Dále je v horním boxu umístěno několik tlačítek pro rychlé nastavení všech výstupů najednou.



Obrázek 1.5: Vlastní program pro zadávání požadovaných hodnot

Ve druhém okně programu je realizována komunikace přes sériový port. Je nutné zvolit správný port, na který je arduino připojeno, což se dá zjistit ve správci zařízení. Pro zajištění bezproblémového použití aplikace je umožněno nainstalovat si ovladač (jen pro systém s 32bitovým kódováním) na Arduino pomocí tlačítka Driver X86.



Obrázek 1.6: Formulář pro nastavení komunikace

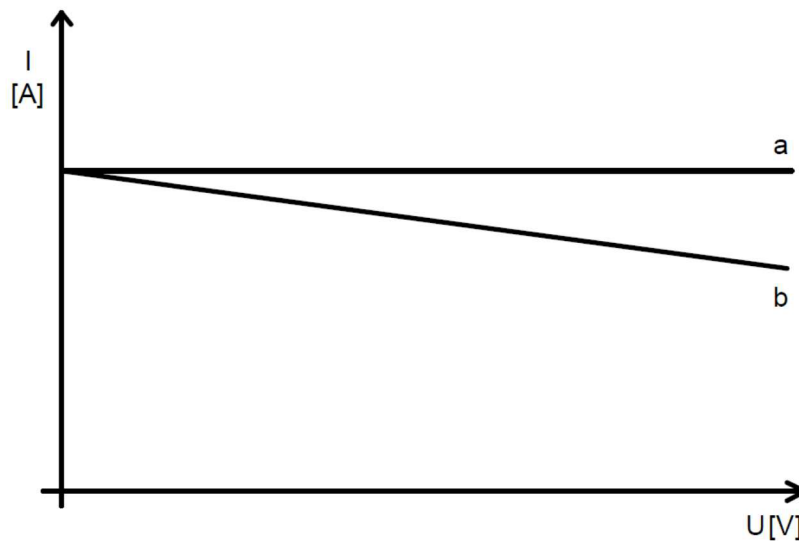
V tomto formuláři je vidět probíhající komunikace. Pro komunikaci je vytvořen jednoduchý protokol, kdy každý poslaný řetězec obsahuje jako první znak písmeno abecedy (první posuvník vypisuje a, druhý posuvník vypisuje b atd.) a jako poslední znak písmeno i viz obrázek 1.6.

Samotné Arduino se řídí podle jednoduchých podmínek závisících právě na prvním přijatém znaku řetězce. Tím je určeno, na který výstup hodnotu zapsat.

2 ZDROJE PROUDU

2.1 Definice zdroje proudu

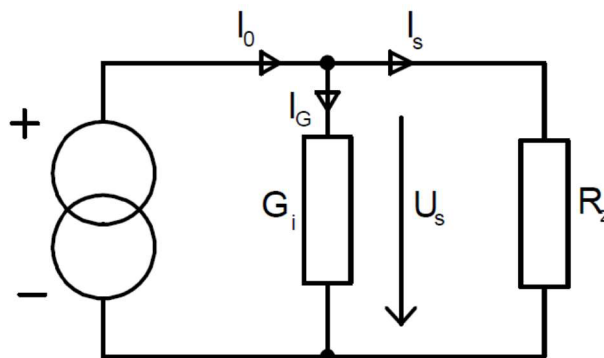
Ideální zdroj proudu má jednu podstatnou vlastnost, tou je závislost proudu na zatěžovacím odporu zdroje. Tedy při změně hodnoty odporu R_Z se mění hodnota napětí U_S na jeho výstupních svorkách, ale nemění se velikost vytékajícího proudu I_S . Zatěžovací charakteristika ideálního zdroje je na obr. 2.1a).



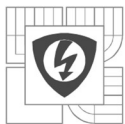
Obrázek 2.1: Závislost proudu na velikosti napětí

- a) *Ideální zdroj proudu*
- b) *Reálný zdroj proudu*

Ve skutečnosti takový obvod splňující požadované vlastnosti neexistuje. Těmto vlastnostem se však můžeme přiblížit. Výsledkem je reálný zdroj proudu, který se chová tak, že při měnění se hodnotě odporu R_Z se zanedbatelně mění hodnota proudu I a hodně hodnota napětí U viz obr. 2.1b).



Obrázek 2.2: Náhradní schéma zdroje proudu



V náhradním schématu musí platit Kirchhoffův zákon:

$$I_S = I_0 - I_G \quad (1.1)$$

kde proud I_0 je proudem ideálního zdroje, proud I_G vtéká do vnitřní vodivosti G_i a proud I_S je výstupní proud zdroje. I_S přes zatěžovací odpor R_Z souvisí i se svorkovým napětím U_S

$$U_S = R_Z \cdot I_S \quad (1.2)$$

A protože výstupní napětí zdroje proudu U_S je také napětím na vnitřní vodivosti G_i , musí platit:

$$I_G = U_S \cdot G_i \quad (1.3)$$

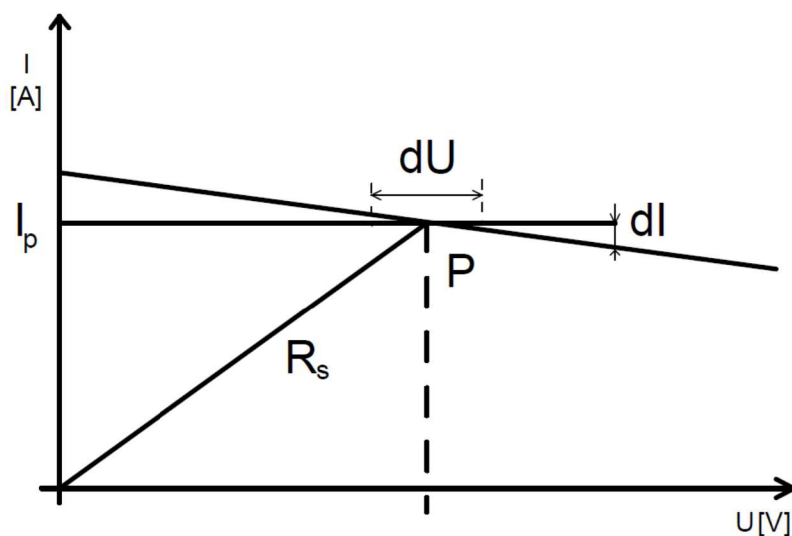
U reálného zdroje proudu musí být hodnota ztrátové vodivosti konstantní $G_i = \text{konst.}$. To znamená, že změnou R_Z se mění hodnota U_S a tím i hodnota I_G . Protože I_0 se také nemění, musí se měnit hodnota proudu I_S a to lineárně s rostoucím napětím U_S , tak jak je vidět na obr. 2.1b).

Z předešlých vztahů můžeme odvodit výslednou zatěžovací charakteristiku reálného zdroje proudu:

$$I_S = I_0 - I_G = I_0 - U_S \cdot G_i = I_0 - R_Z \cdot I_S \cdot G_i \quad (1.4)$$

$$I_S = \frac{I_0}{1 + R_Z \cdot G_i} \quad (1.5)$$

V rovnici 1.5 je vidět, že reálný zdroj se bude chovat jako ideální, když vnitřní vodivost $G_i = 0$.



Obrázek 2.3: K definici statického a dynamického odporu

Pro co nejoptimálnější využití proudového zdroje se volí pracovní bod, který je definován hodnotami výstupního proudu a napětí. Pro pracovní bod je možno odečíst hodnoty napětí a proudu z obou os charakteristiky a podle Ohmova zákona určit statický vnitřní odpor:

$$R_S = \frac{1}{G_S} = \frac{U_P}{I_P} \quad (1.6)$$

Krom statického vnitřního odporu zdroje existuje také dynamický, ten je definován jako tečna k zatěžovací charakteristice v místě pracovního bodu:

$$R_D = \frac{1}{G_D} = \frac{\Delta U_P}{\Delta I_P} \quad (1.7)$$

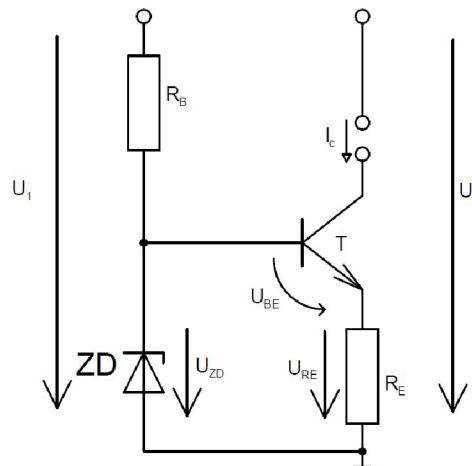
tento vztah potom odpovídá směrnici zatěžovací charakteristiky v pracovním bodě.

Je tedy zapotřebí, aby hodnota dynamického odporu R_D byla mnohem větší, než hodnota odporu statického R_S . Pro zdroj napětí by to bylo přesně naopak.[2]

2.2 Lineární zdroje proudu

Veškeré zdroje proudu jsou založeny na činnosti aktivních elektronických prvků (tranzistorů). Podle typu použitých aktivních prvků se ve svém zapojení a nastavování výrazně liší zdroje proudu s bipolárními a unipolárními tranzistory a zpětnovazební zdroje proudu s operačními zesilovači. Nejjednodušším principem proudového zdroje je použití výstupních charakteristik tranzistoru, tj. v proudové dráze, která má stabilizovat proud musí být zapojen tranzistor svým napětím U_{CE} , tedy kolektorem a emitorem.

Nejjednodušším takovým zapojením je schéma podle Obrázku 2.4, kde je stabilizováno napětí mezi bázi a zemí. Prvkem, který stabilizuje toto napětí je taková součástka, která se chová jako zdroj napětí, tedy má v pracovním bodě diferenciální odpor mnohem menší, než odpor stejnosměrný. Takovými prvky jsou kromě Zenerovy diody (v závěrném směru) i klasické usměrňovací diody.



Obrázek 2.4: Tranzistorový stabilizátor proudu se Zenerovou diodou

Zde napájíme parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou napětím U_I . Vstupní charakteristika musí být velmi plochá kvůli změně U_{BE} , potom můžeme říci, že v rovnici

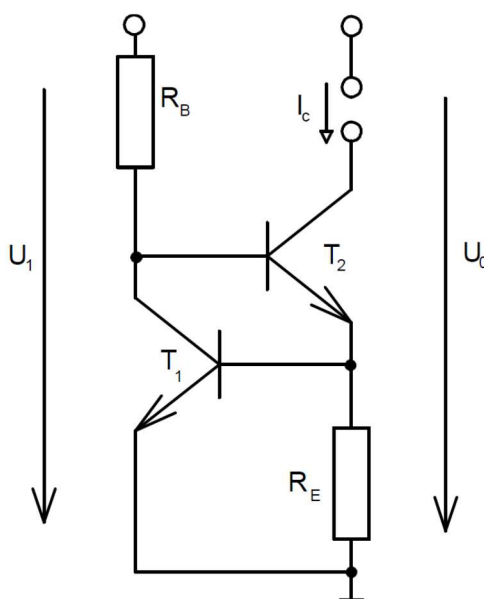
$$U_{ZD} = U_{BE} + U_{RE} \quad (1.8)$$

je U_{ZD} a U_{BE} konstantní a tedy i U_{RE} . Z toho lze odvodit výpočet pro výstupní proud I

$$I = \frac{U_{ZD} - U_{BE}}{R_E} \quad (1.9)$$

Toto zapojení má několik chyb způsobujících nekonstantnost proudu, a to kolísání napětí U_{ZD} a U_{BE} vlivem teplotní závislosti a změna proudu I_C vlivem pohybu pracovního bodu. Tyto chyby se dají vykompenzovat vhodným výběrem součástek a jejich zapojení.

Jestliže můžeme použít více tranzistorů, integrovaných na jednom čipu, o kterých lze předpokládat, že jsou shodné, pak lze využít i jednodušší zapojení, což je přechod k zapojení, nazývanému proudové zrcadlo.



Obrázek 2.5: Zdroj proudu se dvěma tranzistory

Napájecím napětím U_1 generujeme proud protékající odporem R_B , který otevírá tranzistor T_2 . Průchodem emitorového proudu I_{E2} vzniká na odporu R_E úbytek napětí, který jakmile dosáhne velikosti 0,65 V, tak otevře tranzistor T_1 . Tranzistor T_2 přijde o část bázového proudu a přestane se více otevírat a tím pádem se více neotevírá ani tranzistor T_1 . Dojde tedy k nastavení stabilního stavu.

Pokud budou odpory R_B a R_E shodné, stejně jako napětí U_1 a U_0 , pak oběma tranzistory potečou stejné proudy. Potom platí, že $I_{C2}=I$ a můžeme odvodit vztah[2]:

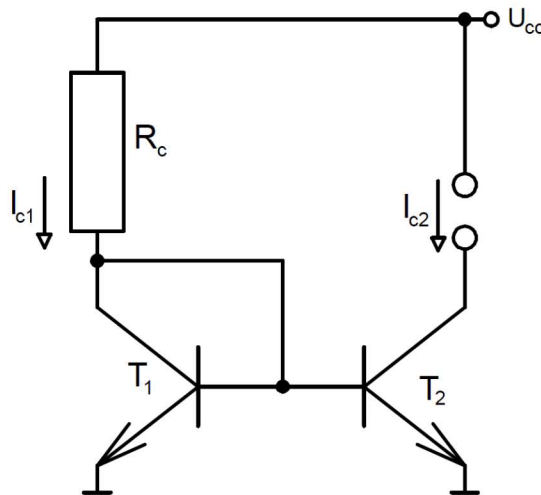
$$I = \frac{U_{BE1}}{R_E} \quad (1.10)$$

2.2.1. Proudová zrcadla

Proudová zrcadla mají největší význam při realizaci integrovaných obvodů. Principem je skutečnost, že kolektorový proud nezávisí na velikosti napětí U_{CE} , ale závisí na velikosti napětí U_{BE} . Podmínkou zrcadlení je naprostá shoda tranzistorů, jejich bázového napětí, teploty a kolektorových proudů. Potom vstupní proud tekoucí jedním přechodem vstupního tranzistoru se zrcadlí do totožného přechodu výstupního tranzistoru a tedy vstupem a výstupem teče proud o shodné velikosti a směru.

Základní zapojení proudového zrcadla je naznačeno na Obrázku 2.6, kde levý tranzistor je řídicí a pravý je řízený. Proud I_{C2} je zde nepřímo řízen odporem R_C podle rovnice [8]:

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{U_{CC} - 0,6V}{R_C} \quad (1.11)$$

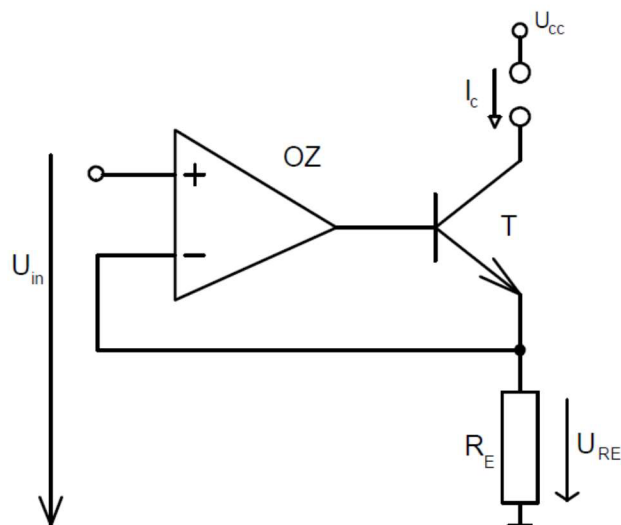


Obrázek 2.6: Základní zapojení proudového zrcadla

Proudové zrcadlo by mělo mít nekonečně malý vstupní odpor, proto se pro jeho snížení provádí modifikace základního zapojení.[10]

2.2.2. Zdroj proudu s operačním zesilovačem

Využitím zpětné vazby, udržující požadovanou hodnotu proudu na konstantní úrovni lze výrazně zlepšit vlastnosti OZ. Protože možnosti zatěžování výstupu OZ většími proudy jsou omezené, lze posílit výstup tranzistorem podle obrázku 2.7.



Obrázek 2.7: Zdroj proudu s OZ



Pokud předpokládáme, že operační zesilovač OZ je ideální, pak napětí U_{in} se musí rovnat napětí na odporu R_E . Rozdílové napětí mezi vstupy považujeme za přibližně nulové, stejně jako vstupní odpor obou vstupů OZ za nekonečný. Potom jediný proud, který může na odporu R_E vyvolat úbytek napětí $U_{RE} = U_{in}$ je proud protékající tranzistorem, který je otevřen výstupním napětím OZ. Skutečný operační zesilovač se chová tak, aby rozdíl na vstupech byl nulový. Tedy na výstupu OZ bude potřebné napětí pro otevření tranzistoru, aby procházel takový proud odporem R_E , který vytvoří požadovaný úbytek napětí U_{RE} . Proud I_C tedy nastavíme velikostí vstupního napětí U_{in} pomocí vztahu:

$$I_c = \frac{U_{in}}{R_E} \quad (1.12)$$

Vzhledem k možnosti měnit velikost proudu pomocí změny vstupního napětí lze tento obvod požadovat i za převodník napětí/proud. [2]

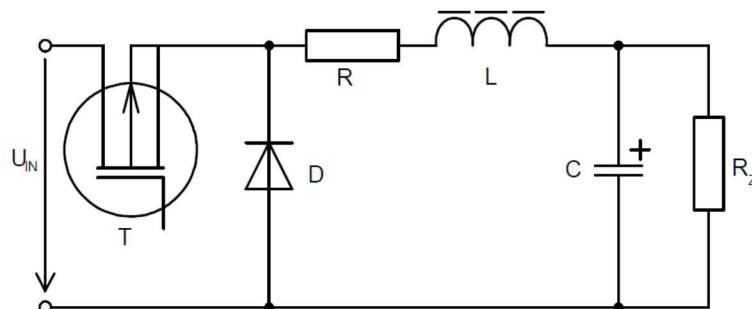
2.3 Spínané zdroje proudu

Základní princip funkce spínaného zdroje spočívá v předávání energie do zátěže po částech, které jsou časově omezeny. Výstupní proud je poté pomocí akumulčních prvků vyhlazován a upravován do požadované formy.

Jako zdroje stejnosměrného proudu se používají pulzní měniče doplněny o zpětnovazební řízení proudu, nejčastěji snižující pulzní měnič. Schéma uvedené na obrázku 2.8 je jedno ze základních zapojení. Proud do zátěže během sepnutí tranzistoru T je veden přes indukčnost L do zátěže, během rozeptnutí tranzistoru se zdrojem napětí stává indukčnost a proud se uzavírá do zátěže přes diodu. V první fázi (T sepnut) roste napětí na kondenzátoru C, v druhé fázi (T rozeptnut) se mění polarita proudu kondenzátorem a vybíjí se do zátěže, tím podporuje proud tekoucí do zátěže z indukčnosti. Zvlnění proudu závisí na nerovnosti, kde T je perioda spínání.

$$\frac{L}{R} > T \quad (1.13)$$

Při neměnných hodnotách L a C je střední hodnota napětí na zátěži dána zejména střídou spínacího napětí tranzistoru, což je vlastně hlavním principem spínaných zdrojů. Velikost výstupního napětí je vždy menší, než vstupního. Odtud označení zdroje snižující měnič.



Obrázek 2.8: Snižující měnič



Výhodou tohoto zapojení je jednoduchost. Nevýhodami jsou omezený rozsah výkonů a galvanické spojení vstupu a výstupu, protože může dojít ke zničení spínacího tranzistoru T při zkratu na výstupu.[2]

2.3.1. Specializované spínané zdroje pro napájení LED

Pro napájení výkonových LED diod se převážně používají LED drivery. LED driver je elektrické zařízení, které reguluje výkon na LED diodě podle měnicích se potřeb. Rozdělují se na napětěvé a na proudové. Napětěvý driver je vhodný pro LED diody provozované na napětí 12 V, 14 V a 24 V. Proudový driver je především určen pro provoz, kde je potřeba udržovat konstantní proud.

2.4 Teoretické porovnání zdrojů proudu

Lineární a spínaný zdroj se hlavně liší způsobem používání výkonového regulačního členu. Výkonový člen ve spínaném zdroji je střídavě spínán a rozpínán, tedy využívají se výhody impulsního režimu daného prvku. Impulsní výkon totiž může být podstatně větší, než jaký je možné odebrat v lineárním režimu s použitím stejného prvku.

Spínaný zdroj oproti lineárnímu má:

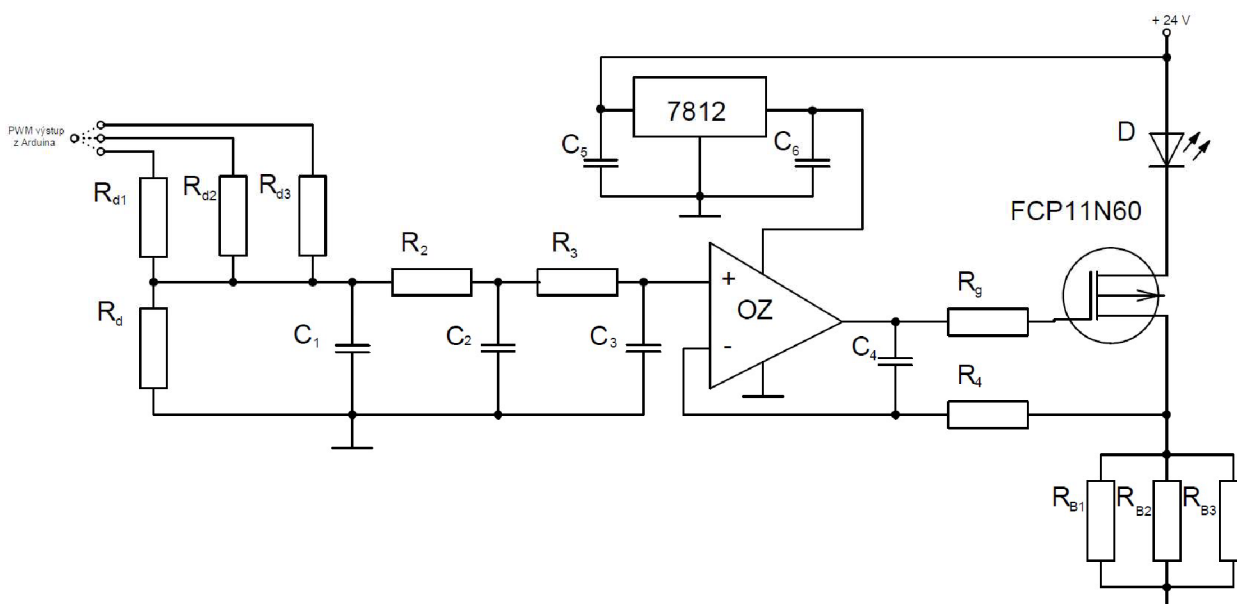
- + Vyšší účinnost
- + Menší rozměry
- + Ekonomickou výhodnost

- Pomalejší reakci výstupního napětí na změnu zatěžovacího proudu
- Impulsní charakter zdroje, tedy větší zvlnění
- Rušivé signály generované spínanými prvky

3 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU PRACUJÍCÍHO V LINEÁRNÍM REŽIMU

Jako lineární zdroj konstantního proudu bylo zvoleno zapojení operačního zesilovače s MOSFET tranzistorem na výstupu viz kapitola 2.2.2. OZ byl zapojen jako regulátor typu I a výstupem přes R_G přímo ovládá otevírání tranzistoru. Zpětná vazba OZ odečítá hodnotu procházejícího proudu z bočnicku a udržení nulového rozdílu mezi vstupy udržuje proud na požadované konstantní hodnotě. Jako bočník byla použita paralelní kombinace tří 12Ω rezistorů. Úbytek napětí na této kombinaci odporů musí být při správné funkci (funkční zpětnovazební regulaci) stejný jako napětí vystupující z napěťového děliče.

OZ je napájen ze stabilizátoru napětí L7812, na vstupu stabilizátoru byl použit větší filtrační kondenzátor $C_5=330\text{nF}$ podle potřeby. A na výstupu blokační kondenzátor $C_6=100\text{nF}$.



Obrázek 3.1: Schéma zapojení

3.1 Návrh vstupního odporového děliče a RC filtru

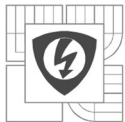
Jak již bylo zmíněno v úvodu, byl na výstupu z Arduina umístěn přepínatelný dělič pro tři úrovně maximálního proudu protékajícího LED diodami.

Při návrhu odporů děliče se vycházelo z požadovaného výstupního napětí vůči vstupnímu a byly zvoleny tyto hodnoty:

$$R_{d1} = 24 \text{ k}\Omega \quad R_{d2} = 56 \text{ k}\Omega \quad R_{d3} = 150 \text{ k}\Omega \quad R_d = 8,2 \text{ k}\Omega$$

Otevření tranzistoru pro průchod 250 mA odpovídá dělič $R_{d1} - R_d$, pro 150 mA dělič $R_{d2} - R_d$ a pro 50 mA dělič $R_{d3} - R_d$.

Pro návrh hodnot RC filtru bylo nejprve nutné určit mezní frekvenci RC článku f_z , ta byla zvolena jako dvacetina frekvence na výstupu Arduina, která byla softwarově nastavena na 3900 Hz. Tzn. že jeden RC článek má útlum 20 dB/dek.



$$f_z = \frac{f_{PWM}}{20} = \frac{3900}{20} = 195 \text{ Hz}$$

Hodnotu prvního odporu určuje dělič na vstupu, kde pro výpočet byl uvažován střední dělič, tedy

$$R'_1 = \frac{R_{d2} \cdot R_d}{R_{d2} + R_d} = \frac{56000 \cdot 8200}{56000 + 8200} \cong 7 \text{ k}\Omega$$

Dále se určí hodnota C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R f_z} = \frac{1}{2\pi \cdot 7000 \cdot 195} \cong 20 \text{ }\mu\text{F}$$

Aby následující článek RC filtru nezatěžoval předchozí, je třeba zvolit pro každý následující článek nejméně 3x větší R a 3x menší C (kondenzátor C_1 "vidí" $R_1 // R_2$). Je totiž potřeba zachovat shodu časových konstant $\tau = R \cdot C$ každého článku, proto nestačí jen zvýšit odpor.

Výpočet druhého článku:

$$R_2 = 3 \cdot R'_1 = 3 \cdot 7 \cdot 10^3 = 21 \text{ k}\Omega \rightarrow 22 \text{ k}\Omega$$

$$C_2 = \frac{C_1}{3} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{3} = 6,67 \text{ }\mu\text{F} \rightarrow 7 \text{ }\mu\text{F}$$

Výpočet třetího článku:

$$R_3 = 3 \cdot R_2 = 3 \cdot 22 \cdot 10^3 = 66 \text{ k}\Omega \rightarrow 68 \text{ k}\Omega$$

$$C_3 = \frac{C_2}{3} = \frac{7 \cdot 10^{-6}}{3} = 2,33 \text{ }\mu\text{F} \rightarrow 2,2 \text{ }\mu\text{F}$$

3.2 Návrh chladiče tranzistoru

Z katalogu tranzistoru FCPF11N60 :

$$P_{tot} = 36 \text{ W}$$

$$T_{jmax} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{\theta JC} = 3,5 \text{ K/W}$$

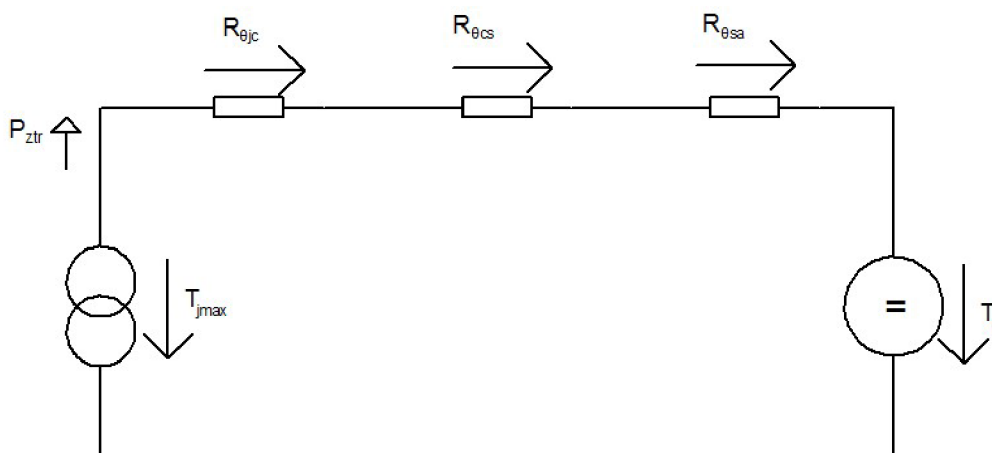
Výrobce neudává tepelný odpor styku s chladičem $R_{\theta cs}$. Pouzdro TO-220 má $R_{\theta cs} = 0,5 \text{ K/W}$, tranzistor FCPF11N60 má pouzdro TO-220F. To značí, že je celé zalité v plastu. Z toho lze usoudit, že tepelný odpor bude větší a jeho hodnota byla zvolena na 1 K/W .

Při návrhu chladiče se vychází z maximální dovolené výkonové ztráty, která na tranzistoru může vzniknout. Tento stav nastává právě tehdy, když tranzistorem prochází maximální proud a zároveň je na něm maximální úbytek napětí. Z principu funkce je zřejmé viz Obrázek 3.1, že maximální úbytek na tranzistoru vzniká při použití LED diody na nízké napětí.

Pro návrh chladiče jsou uvažovány tyto parametry LED diody $U_d = 3 \text{ V}$ a $I_{max} = 250 \text{ mA}$

$$U_{DS} = U_1 - U_{RB} - U_d = U_1 - R_B \cdot I_{max} - U'_d = 24 - 4 \cdot 0,25 - 3 = 20 \text{ V}$$

$$P_{ztr} = U_{DS} \cdot I_{max} = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ W}$$



Obrázek 3.2: Náhradní tepelné schéma

V devadesáti procentech případů se obvod při tak velké výkonové ztrátě nebude používat. Proto se pro výpočet použije $P_{ztr}=2 \text{ W}$. Uživatel musí zajistit to, aby ztráta na tranzistoru nebyla překročena. Toho docílí tak, že při zapojení jen jedné LED diody připojí do série odpor, aby úbytek napětí vznikl na odporu a ne na tranzistoru.

- Celkový tepelný odpor při $P_{ztr}=2 \text{ W}$

$$R_{\theta} = \frac{T_{jmax} - T_0}{P_{ztr}} = \frac{150 - 45}{2} = 52,5 \text{ K/W}$$

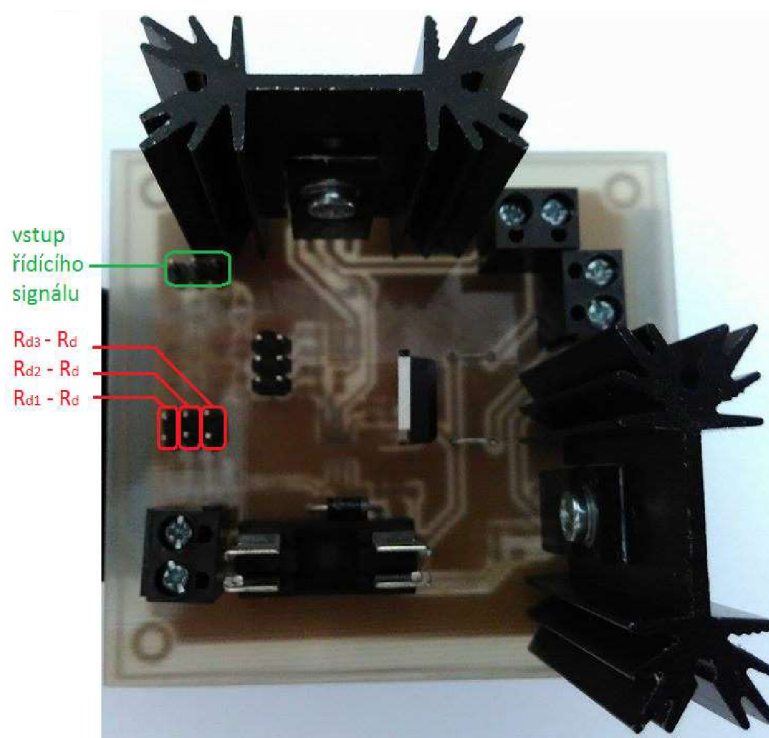
- Tepelný odpor chladiče při $P_{ztr}=2 \text{ W}$

$$R_{\theta_s} = R_{\theta} - R_{\theta_{jc}} - R_{\theta_c} = 52,5 - 3,5 - 1 = 48 \text{ K/W}$$

Pro chlazení tranzistoru FCPF11N60 s pouzdrém TO-220F byl použit hliníkový chladič V7477X s tepelným odporem 11 K/W.

3.3 Realizace

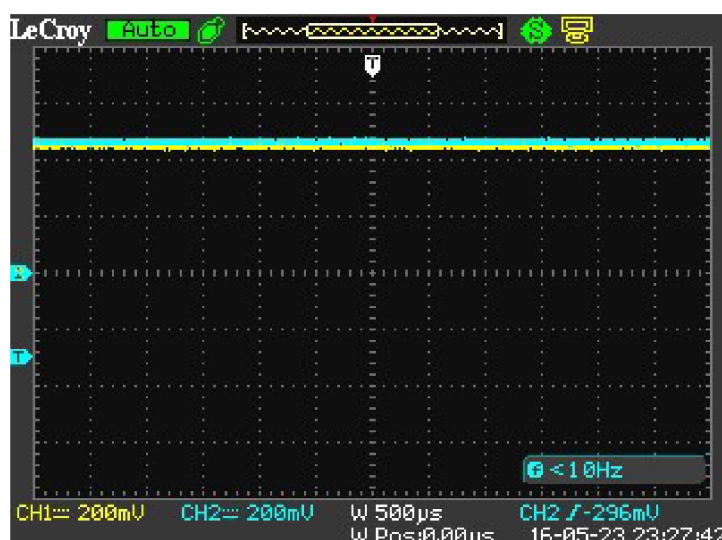
Operační zesilovač TLC272 se vyrábí v SMD pouzdrě SO8 jako dvoukanálový. Proto byl i zdroj realizován jako dvoukanálový. Přepínatelný dělič je realizován oboustrannými kolíky 2x3 a jako přepínač se používá jumper s roztečí 2,54 mm. Na obrázku 4.3 jsou popsány dvojice kolíků, tak aby bylo vidět, kterému děliči odpovídají. Pro řídicí signál jsou také použity oboustranné kolíky, kdy krajní kolík je uzemnění (spojení GND z Arduina s obvodem). Propojení s Arduinem je provedeno pomocí vodičů samec-samice, které lze zakoupit společně s deskou Arduina. Po výrobě byly provedeny úpravy v zapojení a byl navržen nový výkres DPS viz obrázek B.2. V novém schématu jsou kolíky 2x3 umístěny v řadě a děliče pro oba kanály odpovídají stejné pozici, jako je vyznačeno na obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: Fotografie realizovaného dvoukanalového zdroje proudu pracujícího v lineárním režimu

3.4 Naměřené průběhy výstupního napětí na bočnicku

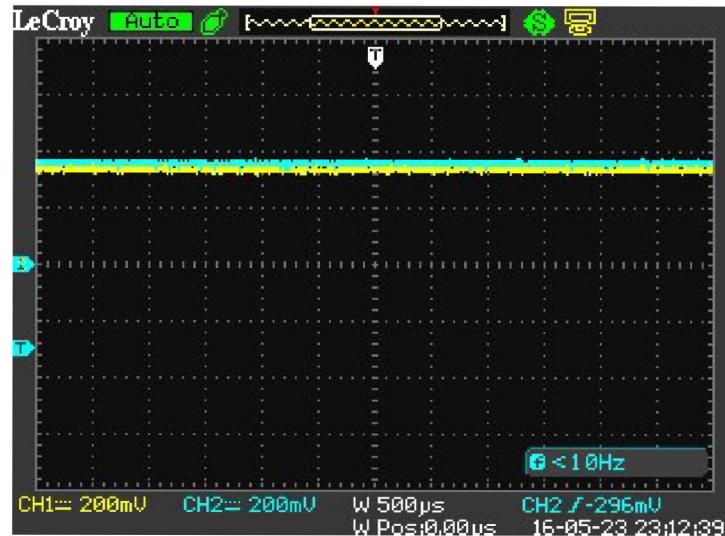
Na záznamech z osciloskopu je zobrazen požadovaný průběh modře a výstupní průběh žlutě.



Obrázek 3.4: Rozsah 250 mA; požadovaná hodnota 100 mA

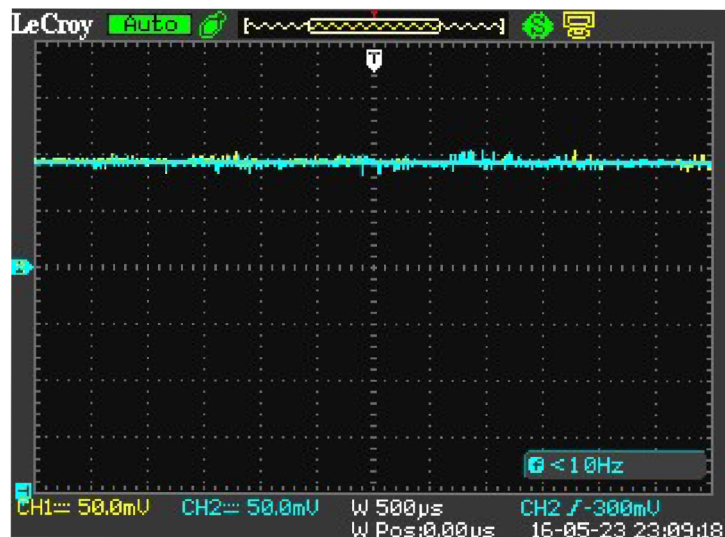
Výpočet protékajícího proudu:

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{420 \text{ mV}}{4} = 105 \text{ mA}$$



Obrázek 3.5: Rozsah 150 mA, požadovaná hodnota 90 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{360 \text{ mV}}{4} = 90 \text{ mA}$$



Obrázek 3.6: Rozsah 50 mA; požadovaná hodnota 20 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{90 \text{ mV}}{4} = 22,5 \text{ mA}$$

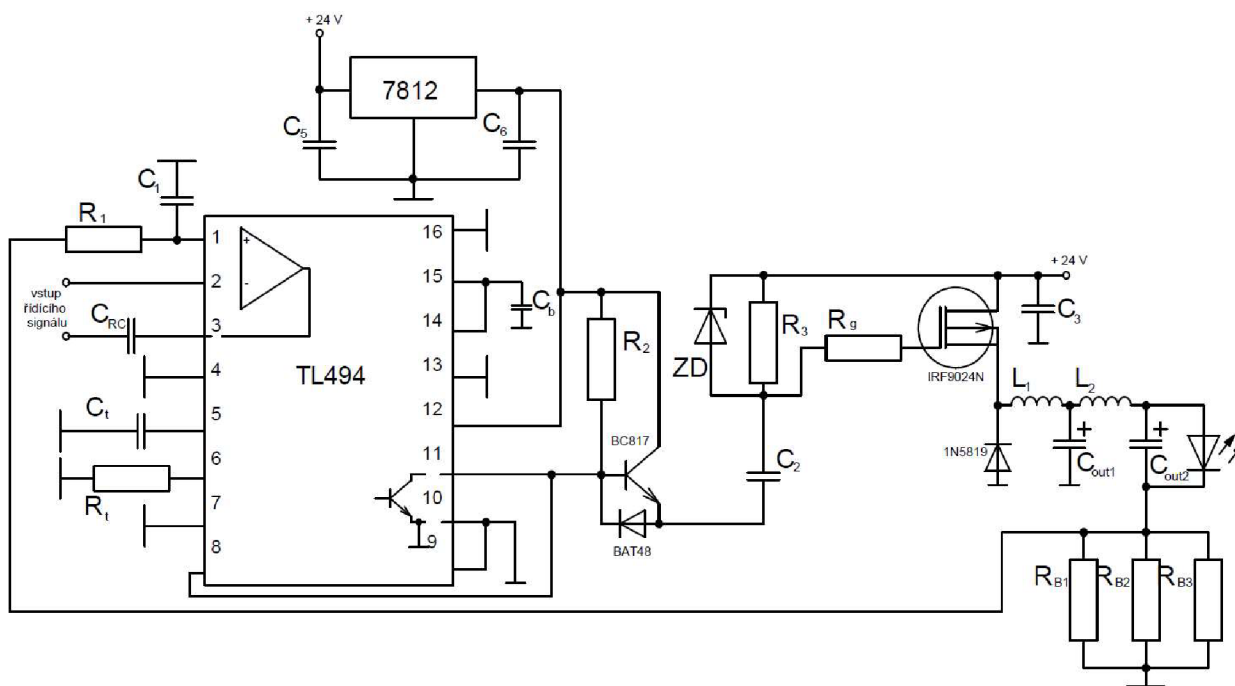
4 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU PRACUJÍCÍHO VE SPÍNACÍM REŽIMU

„Základem zapojení je integrovaný obvod TL494 využívaný ve většině počítačových zdrojů do výkonu 300 W. Obsahuje generátor pilovitého signálu, komparátor, obvod pro nastavení maximální šířky impulsů, zesilovač odchylky, teplotně stabilizovaný zdroj referenčního napětí a jiné vymoženosti, které se uplatní především v dvojčinném zapojení spínaného zdroje.“ [11] Zde je však zapojen jako jednočinný spínaný zdroj. Obvod je napájen stabilizátorem napětí L7812, stejným jako lineární zdroj.

V této aplikaci je integrovaný OZ zapojen jako regulátor typu I. Obvod je nastaven na spínací frekvenci $f=100$ kHz pomocí R_t a C_t , jejichž hodnota je odečtena ze závislosti $f=f(R_t, C_t)$ uváděnou výrobcem.

Protože je využívána jen jedna větev, tak u druhé je potřeba na výstupu z IO zapojit blokovací kondenzátor vůči zemi (pin 14, 15). Na výstupní části TL494 je pro posílení proudu použit tranzistor BC817 jako emitorový sledovač, ten zesiluje budící proud až na 1 A. Řídící napětí má obdélníkový průběh $U = 0 - 12$ V.

Ve výkonové části obvodu je použit MOSFET typu P IRF9024N. Tento tranzistor se otevírá záporným napětím. Proto je nutné mezi IRF9024N a BC817 umístit kondenzátor C_2 , který se nabije na 12 V. Kvůli okamžitému nabití je vůči napájecímu napětí 24 V umístěna zenerova dioda ZD se zenerovým napětím 12 V. Kdyby zde nebyla, mohlo by napětí na tranzistoru U_{GS} dosáhnout až 24V, což by tento tranzistor mohlo zničit. Výsledkem je spínací napětí $U_G = 12 - 24$ V, které vytváří napětí $U_{GD} = 0 - -12$ V.



Obrázek 4.1: Schéma zapojení spínaného zdroje s TL494



4.1 Návrh vstupního odporového děliče a RC filtru

Díky použití stejného bočnicku jako u lineárního obvodu, byl RC filtr a odporový dělič použit stejný jako u lineárního zdroje. Ve schématu na Obrázku 4.1 je vidět kondenzátor C_{RC} přivedený na vstupní pin 3. Je to kondenzátor ze třetího článku RC filtru.

4.2 Výpočet tlumivky

Na výstupu byl použit LC filtr, který snižuje zvlnění výstupního napětí měniče na pár desítek mV. Pro výpočet tlumivky se použije rovnice pro výpočet napětí z indukčnosti

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (1.14)$$

kde napětí u je rovno rozdílu napětí zdroje U_d a napětí na výstupním kondenzátoru U_C . Napětí U_C závisí pouze na parametru střidy s . Tedy $U_C = U_d \cdot s$, kdy pro výpočet uvažujeme střidu $s = 0,5$. Při této střídě dochází k největšímu zvlnění proudu. Můžeme dosadit do rovnice 1.14 a získat:

$$U_d - U_d \cdot s = L \cdot \frac{\Delta I}{T \cdot 0,5} \quad (1.15)$$

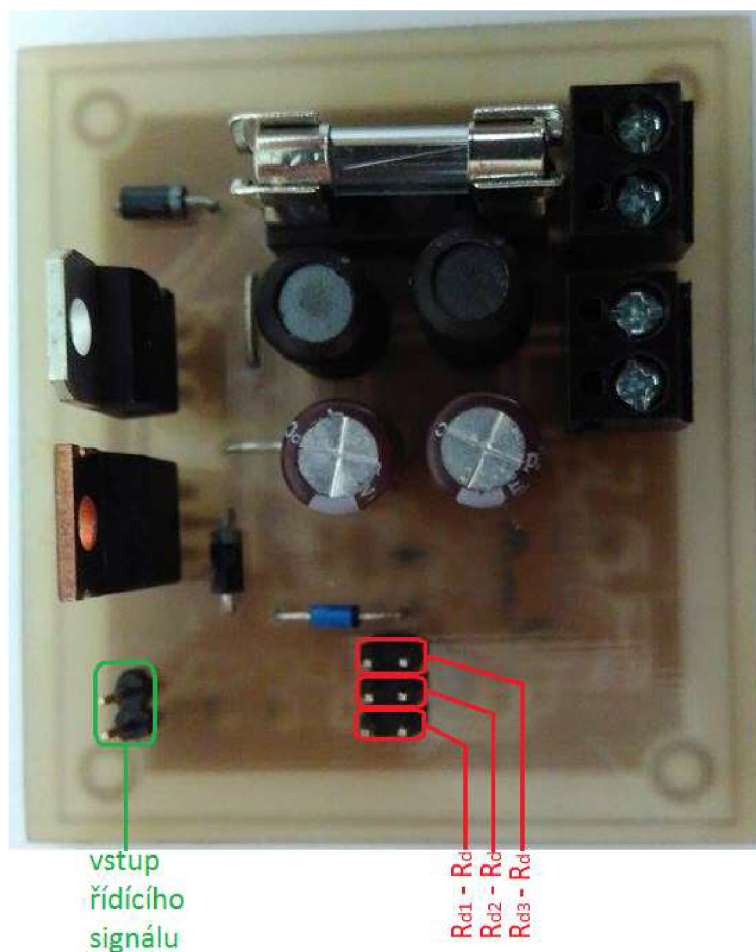
Z tohoto vztahu úpravou dostaneme výslednou rovnici, kde pro výpočet zvolíme zvlnění proudu 10 % z maximálního procházejícího proudu 250 mA.

$$L = \frac{U_d}{\Delta I \cdot 4 \cdot f} = \frac{24}{0,025 \cdot 4 \cdot 100 \cdot 10^3} = 2,4 \text{ mH}$$

Pro dobré vyhlazení zvlnění výstupního proudu by stačil jeden LC filtr. Protože je požadováno co nejmenší zvlnění proudu, byly použity dvě kaskády LC filtru s indukčnostmi $L_1 = 2,2 \text{ mH}$, $L_2 = 1,1 \text{ mH}$, $C_{out1} = C_{out2} = 100 \text{ }\mu\text{F}$.

4.3 Realizace

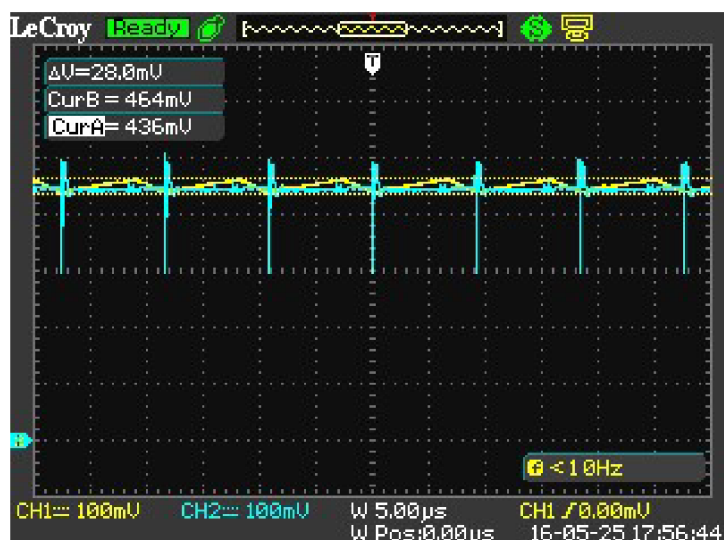
Provedení děliče je stejné jako u lineárního zdroje, tedy oboustrannými kolíky a jumperem. Podobně jsou umístěny i kolíky pro vstup řídicího signálu, tedy krajní kolík je uzemnění. Tento obvod byl také upravován a byla navržena nová deska plošného spoje. Od realizované se liší jen přesunutím součástek na spodní straně (bottom) plošného spoje.



Obrázek 4.2: Fotografie realizovaného zdroje proudu pracujícího ve spínacím režimu sestaveného s obvodem TL494

4.4 Naměřené průběhy výstupního napětí na bočnicku

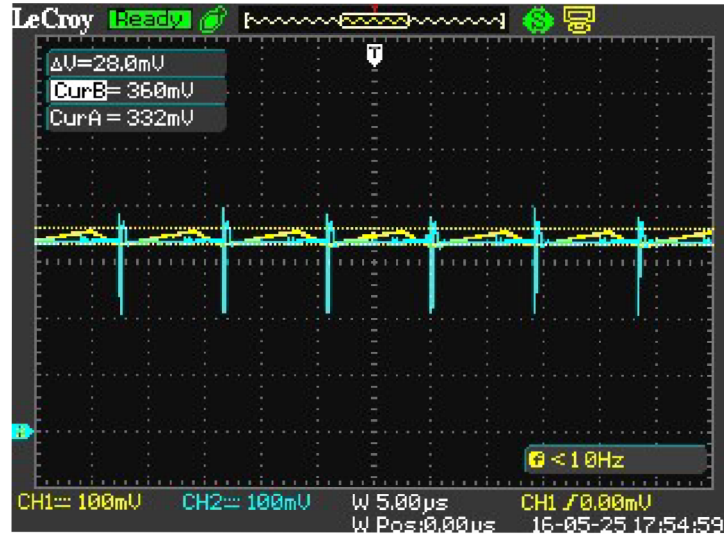
Na záznamech z osciloskopu je zobrazen požadovaný průběh modře a výstupní průběh žlutě.



Obrázek 4.3: Rozsah 250 mA, požadovaná hodnota 100 mA

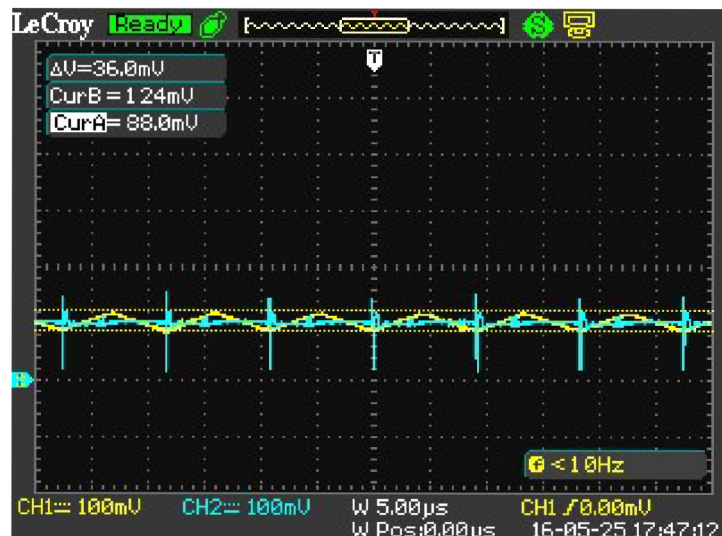


$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{450 \text{ mV}}{4} = 112,5 \text{ mA}$$



Obrázek 4.4: Rozsah 150 mA, požadovaná hodnota 90 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{346 \text{ mV}}{4} = 86,5 \text{ mA}$$



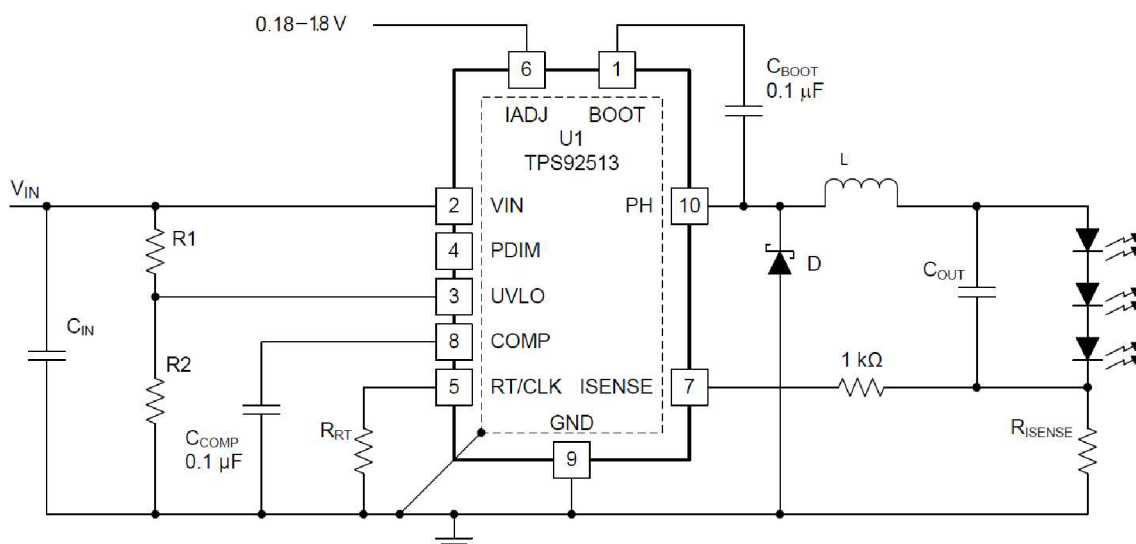
Obrázek 4.5: Rozsah 50 mA, požadovaná hodnota 20 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{106 \text{ mV}}{4} = 26,5 \text{ mA}$$

5 NÁVRH A REALIZACE REGULOVATELNÉHO ZDROJE PROUDU ZALOŽENÉHO NA POUŽITÍ LED DRIVERU TPS92513

Jako další spínaný zdroj proudu byl zvolen LED driver TPS92513. Tento IO je snižující měnič se všemi potřebnými komponenty a integrovaným tranzistorem MOSFET pro řízení vysokého proudu LED diodami. Vstupní napětí může být v rozsahu 4,5 V – 42 V. Tento LED driver pracuje s uživatelsky zvolenou pevnou frekvencí v rozsahu 100 kHz až 2 Mhz, dále má nadproudovou ochranu a nastavitelnou podpět'ovou ochranu.[7]

Výrobce v katalogu uvádí návrh a schéma zapojení, které odpovídá naší aplikaci a bylo tedy snadné nastavit žádané vlastnosti obvodu.



Obrázek 5.1: Schéma zapojení zdroje proudu s TPS92513

5.1 Návrh vstupního odporového děliče a RC filtru

Vychází se z rozsahu řídicího signálu 0,18 – 1,8 V a z rovnice udávané v datasheetu, která ukazuje vztah mezi napětím na pinu IADJ a požadovanou hodnotou na pinu ISENSE,

$$U_{ISENSE} = \frac{U_{IADJ}}{6} \quad (1.16)$$

kde U_{IADJ} je řídicí napětí přivedené z Arduina a U_{ISENSE} je napětí na bočníku. Pro dosažení proudu 250 mA tedy odpovídá dělič $R_{d1} - R_d$, který při maximálním napětí z Arduina má na výstupních svorkách 1,68 V. Tomu odpovídá napětí $U_{ISENSE} = 0,281$ V a podle této hodnoty se volí odpor bočníku.

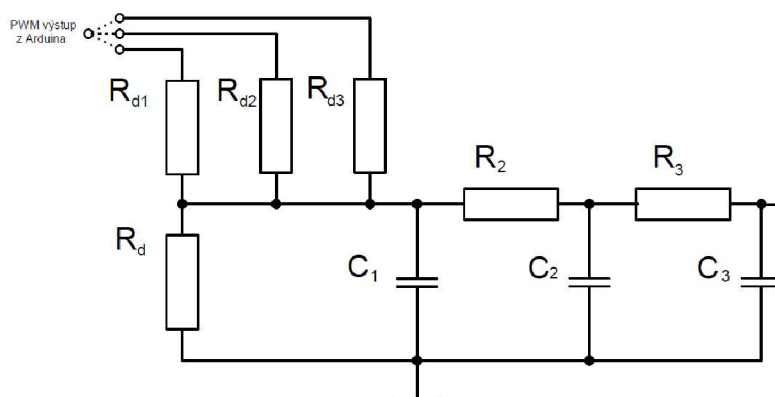
V závislosti na výše zmíněném byl navržen odporový dělič s hodnotami:

$$R_{d1} = 11 \text{ k}\Omega$$

$$R_{d2} = 27 \text{ k}\Omega$$

$$R_{d3} = 75 \text{ k}\Omega$$

$$R_d = 5,6 \text{ k}\Omega$$



Obrázek 5.2: Vstupní odporový dělič a RC filtr

Otevření integrovaného tranzistoru pro průchod 250 mA odpovídá dělič $R_{d1} - R_d$, pro 150 mA dělič $R_{d2} - R_d$ a pro 50 mA dělič $R_{d3} - R_d$.

Hodnotu prvního odporu určuje dělič na vstupu, kde pro výpočet byl uvažován střední dělič, tedy

$$R'_1 = \frac{R_{d2} \cdot R_d}{R_{d2} + R_d} = \frac{27000 \cdot 5600}{27000 + 5600} \cong 4,7 \text{ k}\Omega$$

Dále se určí hodnota C_1 :

$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R'_1 \cdot f_z} = \frac{1}{2\pi \cdot 4700 \cdot 195} \cong 33 \text{ }\mu\text{F}$$

Výpočet druhého článku:

$$R_2 = 3 \cdot R'_1 = 3 \cdot 4,7 \cdot 10^3 = 14,1 \text{ k}\Omega \rightarrow 15 \text{ k}\Omega$$

$$C_2 = \frac{C_1}{3} = \frac{33 \cdot 10^{-6}}{3} = 11 \text{ }\mu\text{F} \rightarrow 10 \text{ }\mu\text{F}$$

Výpočet třetího článku:

$$R_3 = 3 \cdot R_2 = 3 \cdot 15 \cdot 10^3 = 45 \text{ k}\Omega \rightarrow 47 \text{ k}\Omega$$

$$C_3 = \frac{C_2}{3} = \frac{10 \cdot 10^{-6}}{3} = 3,3 \text{ }\mu\text{F}$$

5.2 Návrh součástek

Hodnoty vnitřního obvodu uváděné v katalogu:

$$I_I = 0,1 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_{HYS} = 0,29 \text{ }\mu\text{A}$$

$$R_{ESD} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$U_{EN} = 1,22 \text{ V}$$

Zvolené parametry obvodu:

$$U_{IN} = 24 \text{ V}$$

$$U_{OUT} = 2,1 \text{ V}$$

$$U_{START} = 22 \text{ V}$$

$$U_{STOP} = 20 \text{ V}$$

$$I_R = 0,75 \text{ mA}$$



- Nastavení podpěťové ochrany vstupním odporovým děličem $R_1 R_2$

$$R_1 = \frac{U_{HYS} \cdot (U_{EN} - (I_1 \cdot R_{ESD})) - I_{HYS} \cdot R_{ESD} \cdot U_{START}}{I_{HYS} \cdot U_{EN}} =$$
$$= \frac{2 \cdot (1,22 - (0,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^3)) - 0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^6 \cdot 22}{0,29 \cdot 10^{-6} \cdot 1,22} = 503 \text{ k}\Omega \rightarrow 510 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{R_1 \cdot (U_{EN} - (R_{ESD} \cdot (I_1 + I_{HYS})))}{(U_{STOP} - U_{EN}) + (I_1 + I_{HYS}) \cdot (R_1 + R_{ESD})} =$$
$$= \frac{510 \cdot 10^3 \cdot (1,22 - (10 \cdot 10^3 (0,1 \cdot 10^{-6} + 0,29 \cdot 10^{-6})))}{(20 - 1,22) + (0,1 \cdot 10^{-6} + 0,29 \cdot 10^{-6}) \cdot (510 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3)} = 28 \text{ k}\Omega \rightarrow 30 \text{ k}\Omega$$

- Nastavení spínací frekvence $f_{sw} = 140 \text{ kHz}$

$$R_{RT} = \frac{206033}{f_{sw}^{1,092}} = \frac{206033}{140^{1,092}} \cong 910 \text{ k}\Omega$$

- Výpočet indukčnosti L

$$L = \frac{U_{OUT} \cdot (U_{IN} - U_{OUT})}{I_R \cdot U_{IN} \cdot f_{sw}} = \frac{2,1 \cdot (2,4 - 2,1)}{0,075 \cdot 24 \cdot 140} = 178 \text{ nH} \rightarrow 150 \text{ nH}$$

- Výpočet zvlnění proudu

$$I_{RIPPLE} = \frac{U_{OUT} \cdot (U_{IN} - U_{OUT})}{L \cdot U_{IN} \cdot f_{sw}} = \frac{2,1 \cdot (2,4 - 2,1)}{150 \cdot 10^{-9} \cdot 24 \cdot 140} = 89 \text{ mA}$$

- Výpočet výstupního kondenzátoru C_{out}

Pro výpočet hodnoty C_{out} je potřeba znát odpor diody R_{LED} a zvlnění proudu diodou ΔI_{LED} , které bylo zvoleno na 10 mA. Odpor diody je vypočten z diody na napětí 2,1 V a procházejícím proudem 100 mA.

$$R_{LED} = \frac{U_f}{I_f} = \frac{2,1}{0,1} = 21 \Omega$$

Dále se vypočte impedance výstupního kondenzátoru Z_{Cout}

$$Z_{Cout} = \frac{R_{LED} \cdot \Delta I_{LED}}{I_{RIPPLE} - \Delta I_{LED}} = \frac{21 \cdot 0,1}{0,89 - 0,1} = 9,26 \Omega$$

A z této impedance se vypočte C_{out}

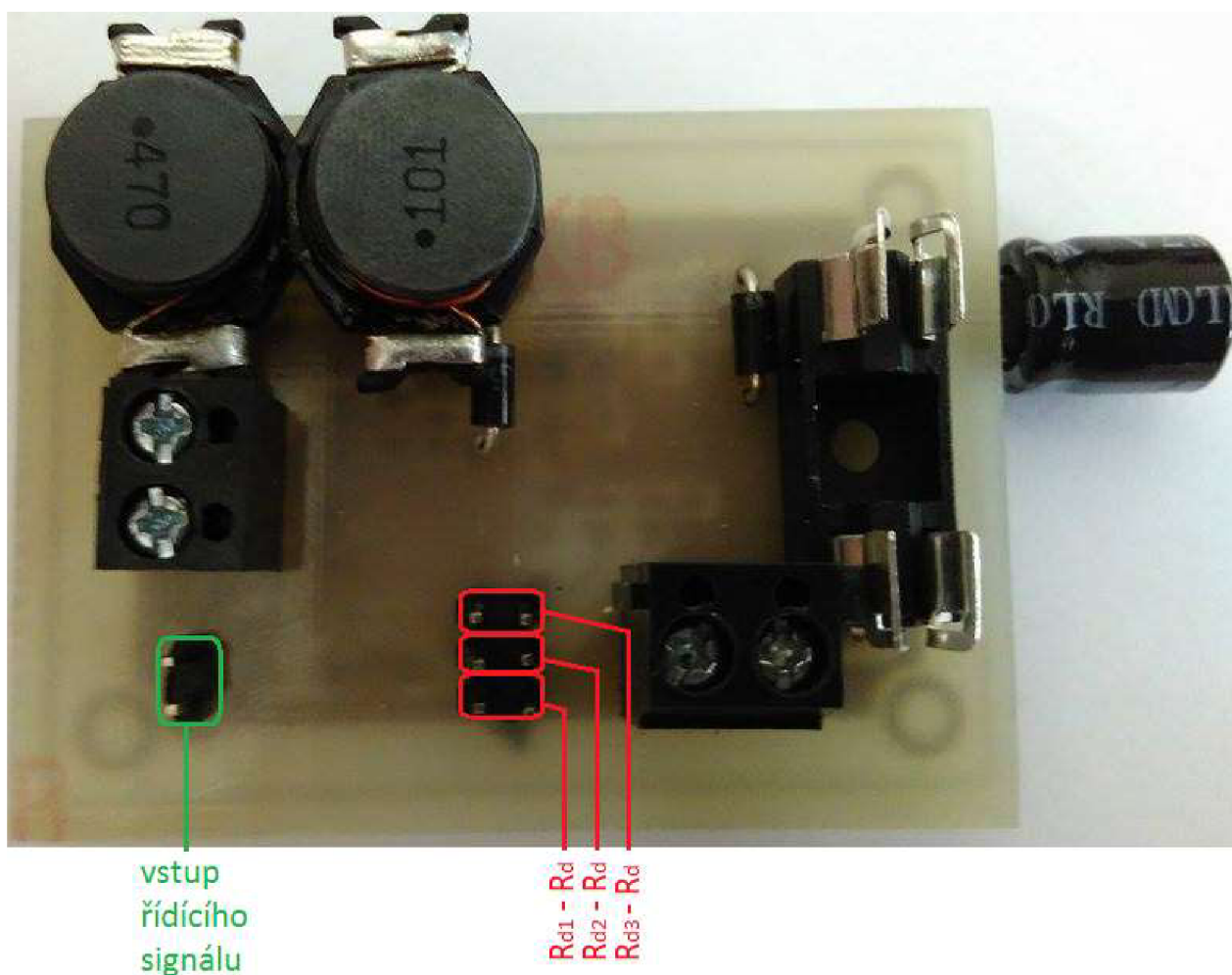
$$C_{out} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{sw} \cdot Z_{Cout}} = \frac{1}{2\pi \cdot 140 \cdot 9,26} = 120 \text{ nF} \rightarrow 220 \text{ nF}$$

- Bočník

Jako bočník R_{Isense} byly zapojeny dva odpory paralelně o hodnotě 2,2 Ω . Výsledná hodnota bočníku 1,1 Ω odpovídá požadovanému průtoku proudu.

5.3 Realizace

Provedení děliče je opět stejné jako u lineárního zdroje, tedy oboustrannými kolíky a jumperem. Kolíky pro vstup řídicího signálu jsou také umístěny podobně, tedy krajní kolík je uzemnění. Tento obvod byl také upravován a byla navržena nová deska plošného spoje. Od realizované se liší přidáním elektrolytickým kondenzátorem na vstupu a přesunutím součástek na spodní straně (bottom) plošného spoje.

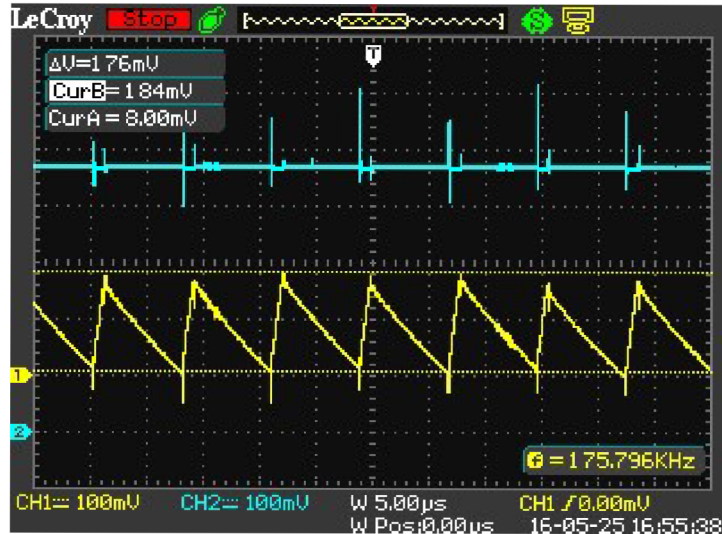


Obrázek 5.3: Fotografie realizovaného zdroje proudu založeného na použití LED driveru TPS92513

5.4 Naměřené průběhy výstupního napětí na bočnicku

Na záznamech z osciloskopu je zobrazen požadovaný průběh modře a výstupní průběh žlutě. Měřený průběh je ovlivněn připojenou sondou z osciloskopu, proto přesně neodpovídá nastavené hodnotě z Arduina.

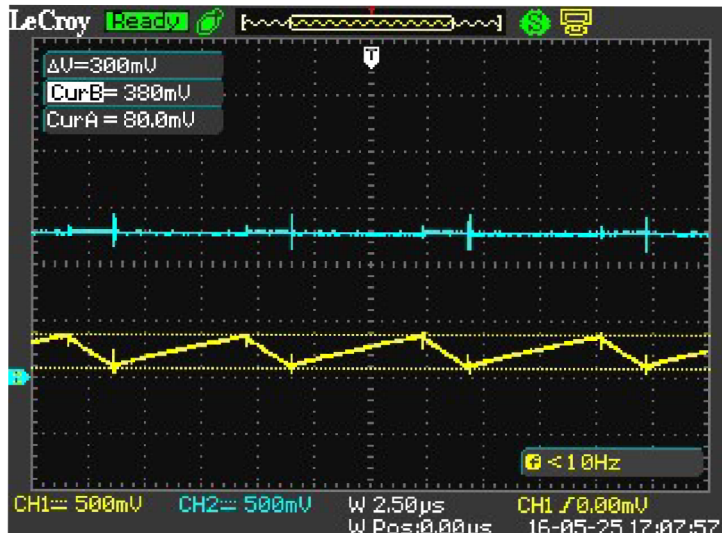
Podle rovnice 1.16 se hodnota proudu požadovaného průběhu pro srovnání s proudem na výstupu musí dělit šesti.



Obrázek 5.4: Rozsah 250 mA; požadovaná hodnota 100 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{88 \text{ mV}}{1,1} = 80 \text{ mA}$$

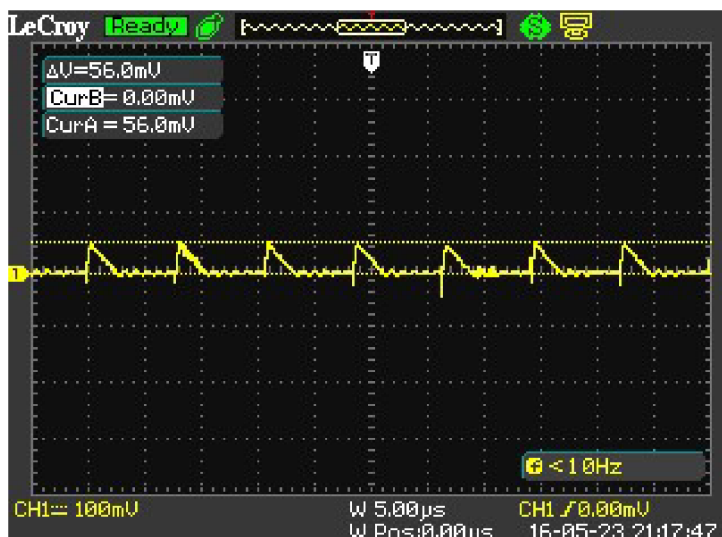
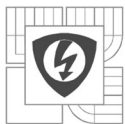
$$I_{žádané} = \frac{U_{vstupní}/6}{RR_B} = \frac{470 \text{ mV}/6}{1,1} = 71 \text{ mA}$$



Obrázek 5.5: Rozsah 250 mA, požadovaná hodnota 200 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{230 \text{ mV}}{1,1} = 209 \text{ mA}$$

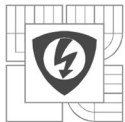
$$I_{žádané} = \frac{U_{vstupní}/6}{RR_B} = \frac{1250 \text{ mV}/6}{1,1} = 189 \text{ mA}$$



Obrázek 5.6: Rozsah 50 mA, požadovaná hodnota 0 mA

$$I_{LED} = \frac{U_{změřené}}{R_B} = \frac{28 \text{ mV}}{1,1} = 25 \text{ mA}$$

Zde je vidět, že při nastavení nulového proudu protéká LED diodou 25 mA. To z toho důvodu, že tento obvod pracuje s minimálním zvlněním výstupního proudu 75 mA a na spínacím tranzistoru neumí snížit střidu na 0. Nedokáže tedy regulovat proud na rozsahu 0 – 50 mA.



6 POROVNÁNÍ REALIZOVANÝCH ZDROJŮ

- Zdroj proudu pracující v lineárním režimu

Tento zdroj se chová velmi kvalitně. Z naměřených průběhů je vidět, že zvlnění proudu je minimální. Výstupní průběh se téměř shoduje s požadovaným na všech rozsazích.

Nevýhodou je nutné chlazení spínacího tranzistoru a tedy velké rozměry obvodu.

Na druhou stranu, výsledný regulovatelný zdroj pro všech patnáct PWM výstupů z Arduina bude sestaven modulárně. Jelikož tento obvod je dvoukanálový, tak ušetří místo.

- Zdroj proudu pracující ve spínacím režimu

Tento zdroj se také chová velmi dobře. Z průběhů je vidět, že výsledný průběh s požadovaným se také téměř shoduje. Zvlnění proudu se na všech rozsazích pohybuje kolem 10 mA.

Nevýhodou je, že nedokáže úplně zavřít spínací tranzistor. Tedy LED diodami vždy protéká alespoň minimální proud.

- Zdroj proudu založený na použití LED driveru TPS92513

Tento obvod je určen pro LED diody s proudem až 1,5 A a je vhodný pro regulaci proudu většího než 100 mA. Na rozsahu 0 – 50 mA vůbec nereguluje, a to z důvodu že minimální zvlnění proudu pro správnou funkci je 75 mA a na spínacím tranzistoru neumí snížit střihu na 0. Stejně jako obvod s TL494 nedokáže zavřít spínací tranzistor a diodami protéká proud viz Obrázek 5.6.

Nevýhodou tohoto obvodu je, že při protékání nízkého proudu se obvod dostane do režimu přerušovaných proudů. Zvlnění proudu je na výstupu značné a při rostoucím proudu se zvyšuje. Výstupní napětí bylo měřeno na bočníku, ale na LED diodách vlivem výstupního kondenzátoru je zvlnění proudu o něco menší.

Výhodou jsou malé rozměry a možnost regulace proudu do 1,5 A.



ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo nejdříve provedeno seznámení s elektronickou platformou Arduino a grafickým prostředím Delphi. Také byla popsána vytvořená aplikace pro regulaci proudu.

V kapitole zdroje proudu jsou rozebrány různé koncepce zdrojů proudu a zmíněny specializované LED drivery. Dále je uvedeno několik výhod a nevýhod spínaných zdrojů oproti lineárním.

V práci byly navrženy tři regulovatelné zdroje proudu pro výkonové LED diody, které se budou používat pro kalibraci fotoaparátu. Proto bylo nutné zajistit co nejmenší zvlnění proudu protékajícího diodami.

Další kapitoly se věnují jednotlivým koncepcím od návrhu po realizaci. Byly realizovány tyto obvody: zdroj proudu pracující v lineárním režimu s OZ a MOSFET tranzistorem na výstupu; zdroj proudu pracující ve spínacím režimu s TL494 a zdroj proudu založený na použití LED driveru TPS92513. Jsou zde zobrazeny průběhy výstupního a požadovaného signálu. Na základě změřených průběhů je provedeno porovnání.

Na základě porovnání realizovaných zdrojů viz kap. 6 je nejvhodnějším obvodem zdroj proudu pracující v lineárním režimu s OZ a MOSFET tranzistorem na výstupu. Tento obvod splňuje požadavky na malé zvlnění proudu. A jak bylo zmíněno, je realizován dvoukanálově na jedné desce plošného spoje. To při realizaci celkového zdroje pro všech patnáct PWM výstupů z Arduina ušetří místo.



LITERATURA

- [1] VODA, Zbyšek a Tým HW KITCHEN. *Průvodce světem Arduina* [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://arduino.cz/>
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Zdroje proudu*. Vyd. 1. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 111 s. ISBN 80-860-5684-8
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. 1. vyd. Praha: BEN, 2001, 111 s. ISBN 80-730-0045-8
- [4] Spínaný LED driver pro výkonové LED. www.amarokcz.wz.cz [online]. [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://amarokcz.wz.cz/LEDDRVS.M.htm>
- [5] *MC34063A-D* [online]. Literature Distribution Center for ON Semiconductor. [cit. 2015-12-23]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/MC34063A-D.PDF
- [6] *LM3404.pdf* [online]. Texas Instruments Incorporated. [cit. 2015-12-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3404.pdf>
- [7] *Tps92513hv* [online]. Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps92513hv.pdf>
- [8] *TL494* [online]. Texas Instruments, 2015 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
- [9] *Výpočty chlazení elektronických součástí* [online]. [cit. 2015-12-21]. Dostupné z: <http://www.souch.cz/dok/e/chlazení.pdf>
- [10] P. Vorel, M. Patočka: *Průmyslová elektronika* (skriptum VUT Brno)
- [11] *Nový výkonný zvyšující měnič s obvodem TL494* [online]. 2008 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: http://www.kutil.borec.cz/zvys_menic/zv_menic.html
- [12] *Delphi* [online]. [cit. 2016-05-29]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Delphi>



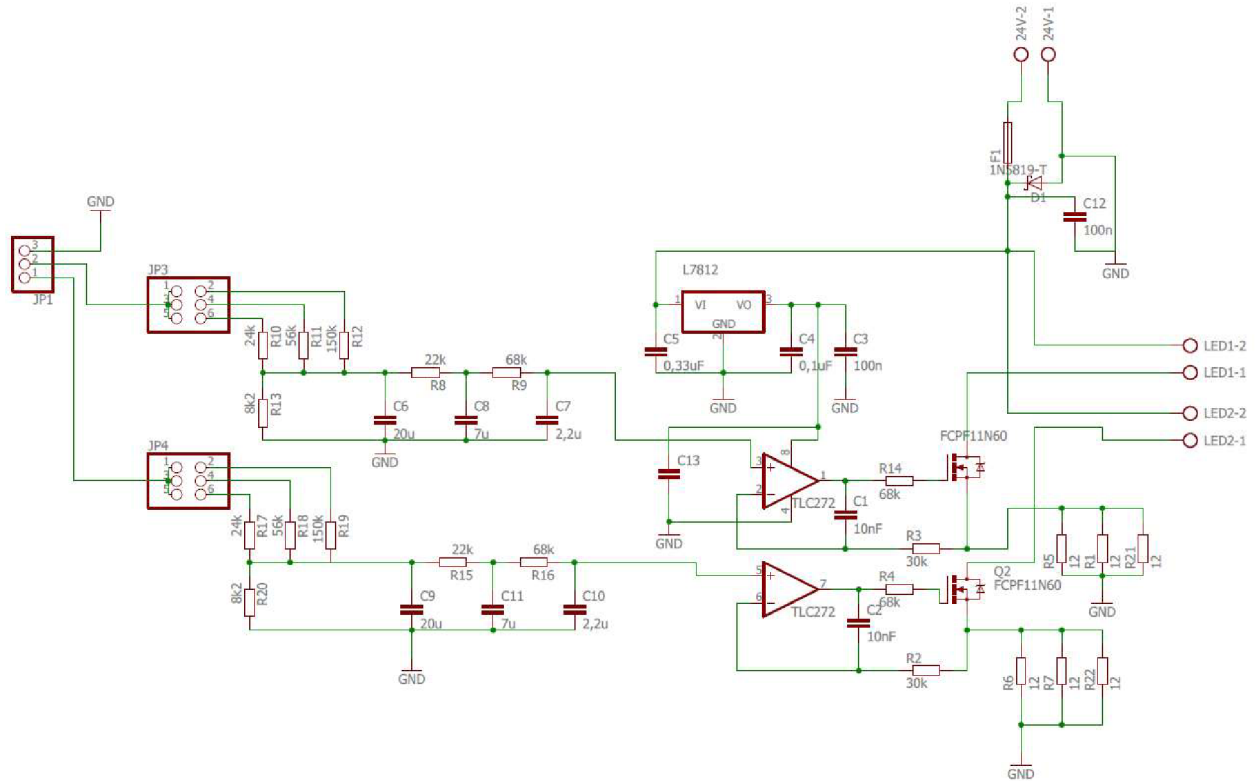
PŘÍLOHA A

Tabulka A: Seznam používaných LED diod

	barva	λ [nm]	U _{min} [V]	U[V]	U _{max} [V]	I _f [mA]	I _{fmax} [mA]
LB T673 at 2mA	blue	465	2,5	2,75	3,1	2	20
LB G6SP	blue	470	2,9	3,3	4,1	140	250
LV T6SG	verde(green)	505	2,8	3,2	3,7	20	50
LT E6SG	true green	525	2,9	3,4	3,8	30	50
LT G6SP	true green	528	2,6	3,3	4,1	140	250
LP E675	pure green	560	1,9	2,1	2,5	50	70
LP T67F	pure green	560	1,9	2,1	2,5	20	50
LG T67F	green	570	1,9	2,1	2,5	20	50
LY G5AP	yellow	590	2,05	2,17	2,65	100	200
LY G6SP	yellow	590	2,05	2,25	2,65	140	200
LO E67F	orange	606	1,9	2,15	2,5	50	70
LA G5AP	amber	617	1,9	2,07	2,5	100	200
LA G6SP	amber	617	1,9	2,15	2,5	140	200
LR G5AP	red	623	1,8	2,03	2,5	100	200
LR G6SP	red	623	1,9	2,1	2,5	140	200
LR E6SF	red	625	1,9	2,15	2,5	50	70
LR E67F	red	625	1,9	2,15	2,5	50	70
LS G6SP	super red	630	1,9	2,15	2,5	140	200
LS E67F	super red	633	1,9	2,15	2,5	20	70
LH T674	hyper red	645	1,6	1,75	2,5	10	30
LCP E6SC	pure green		2,9	3,4	4,35	30	50
LCY G6SP	demand yellow		2,9	3,3	4,1	140	250
LMW G5AP	multiphosphor white		2,8	3,2	3,8	30-200	200
LCW G5GP	white		2,8	3,2	3,8	30-200	200
LUW G5AP	ultra white		2,8	3,2	3,8	30-200	200
LUW G5GP	ultra white		2,8	3,2	3,8	30-200	200
LCW G6CP	warm white		2,9	3,3	4,1	140	250
LW G6CP	white		2,9	3,3	4,1	140	250
LW G6SP	white		2,9	3,3	4,1	140	250
LUW E6SG	ultra white		2,9	3,3	3,8	50	50

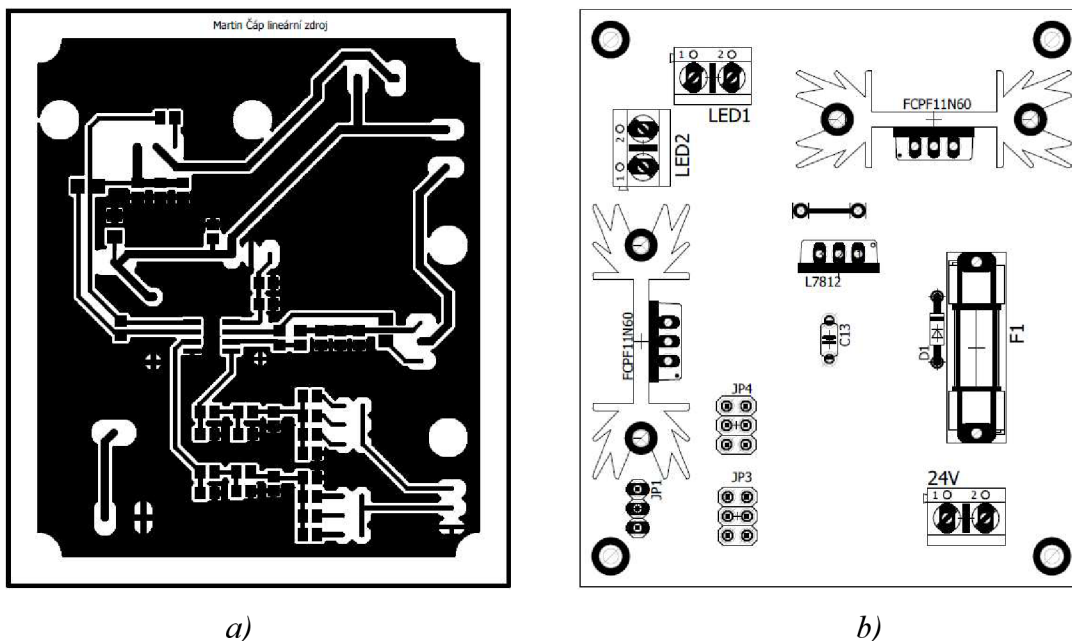
PŘÍLOHA B

Návrhy desek plošných spojů:

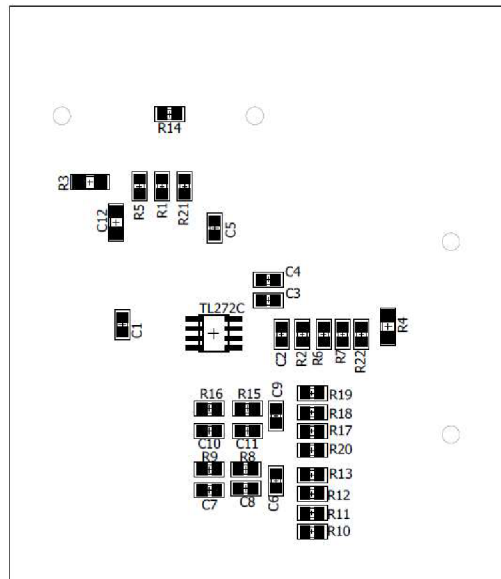


Obrázek B.1: Celkové schéma zapojení lineárního zdroje s dvěma kanály

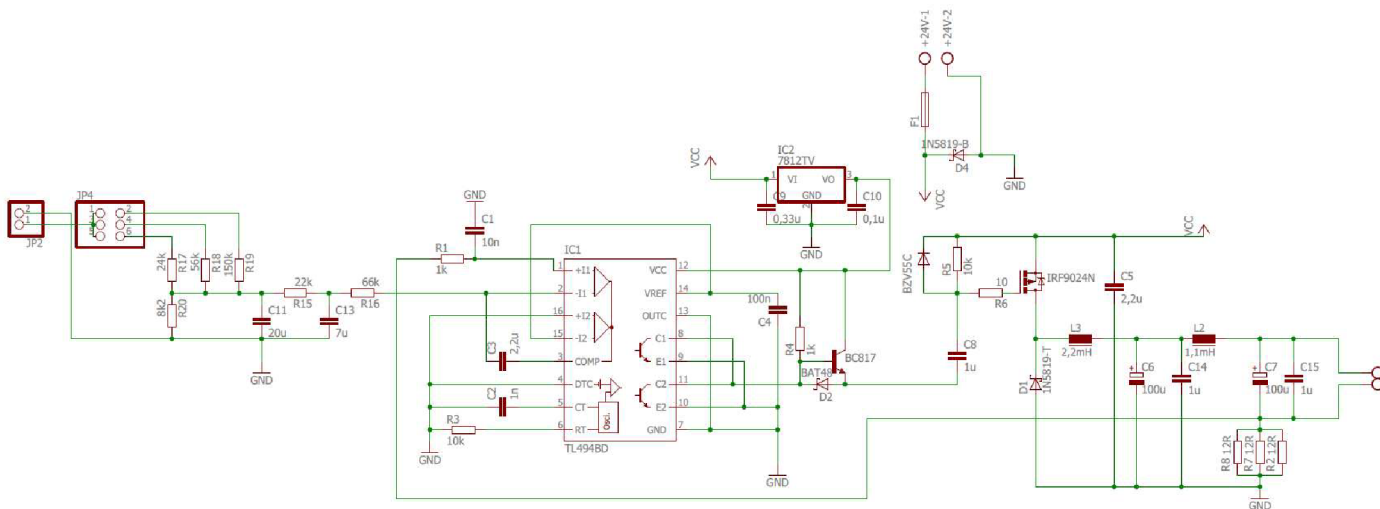
Rozměr desky 77 x 66 mm, měřítko M1:1



Obrázek B.2: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS - top

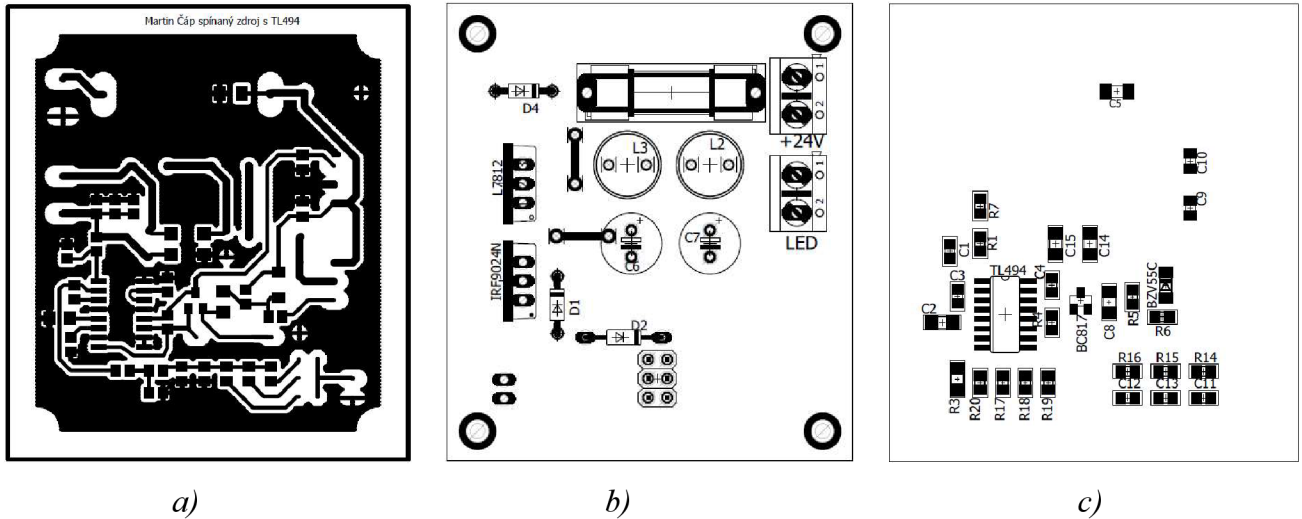


Obrázek B.3: Osazovací výkres DPS – bottom

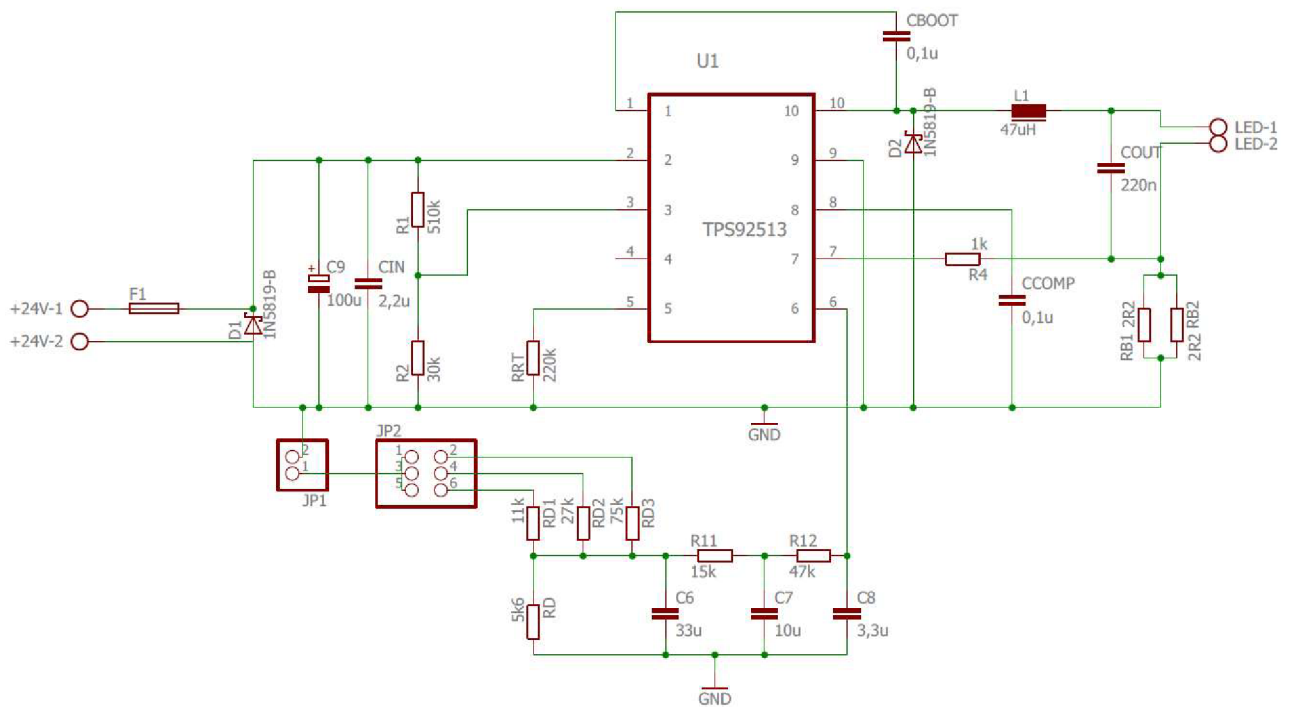


Obrázek B.4: Celkové schéma zapojení spínaného zdroje s TL494

Rozměr desky 61 x 54 mm, měřítko M1:1



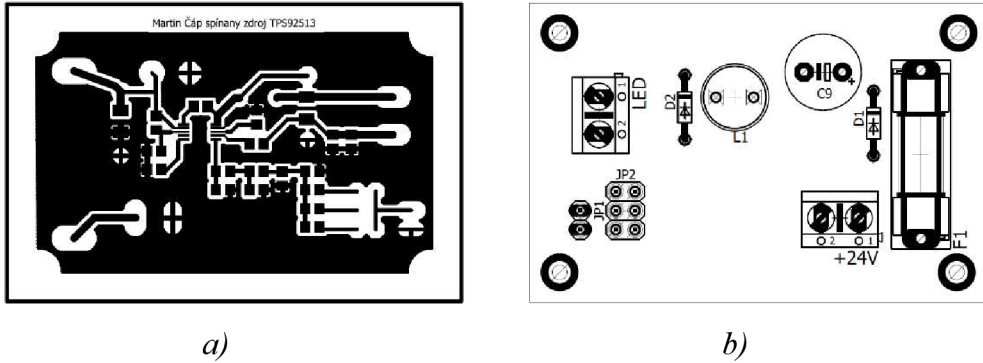
Obrázek B.5: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS – top c) Osazovací výkres DPS – bottom



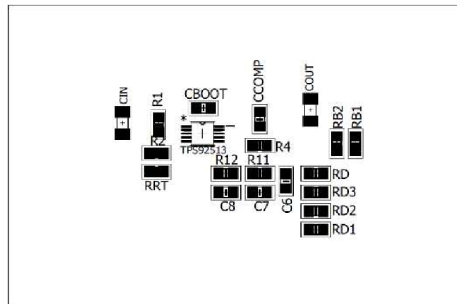
Obrázek B.6: Celkové schéma zapojení LED driveru TPS92513



Rozměr desky 61 x 40 mm, měřítko M1:1



Obrázek B.7: a) Deska plošného spoje -bottom b) Osazovací výkres DPS – top



Obrázek B.8: Osazovací výkres DPS – bottom