

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A  
TELEKOMUNIKACÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Rekonstrukce napájecího zdroje.**

**vedoucí práce: Ing. Zdeněk Kubík  
autor: Pavel Valenta**

**2011**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2010/2011

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Pavel VALENTA  
Osobní číslo: E08B0421P  
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Elektronika a telekomunikace  
Název tématu: Rekonstrukce napájecího zdroje  
Zadávací katedra: Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte možnosti obvodových zapojení regulovatelných napájecích zdrojů.
2. Navrhněte schéma zapojení regulovatelného symetrického zdroje 2x0-30V, 2x0-3A.
3. Navrhněte plošný spoj, zdroj zkonstruuje.
4. Proveďte měření zdroje.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Kubík**  
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací


Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev

vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřená na problematiku lineárních regulovatelných napájecích zdrojů. V práci se věnuji možnostem obvodových zapojení lineárních napájecích zdrojů s využitím diskrétních součástek, operačních zesilovačů a integrovaných stabilizátorů. V práci také popisuji návrh, simulaci, konstrukci a měření regulovatelného napájecího zdroje využívajícího obvod LM723.

## **Klíčová slova**

Napájecí zdroj, lineární zdroj, regulátor napětí, integrovaný stabilizátor, LM723.

## **Abstract**

The supposed bachelor work is focused on the issue of adjustable linear power supplies. The work is devoted to the possibilities of involvement of peripheral linear power supply with the using of discrete components, operationnal amplifiers and integrated stabilizers. The paper also describes the design, simulation, construction and measurement of the adjustable power supply that uses the circuit LM723.

## **Key words**

Power supply, linear power, voltage regulator, integrated stabilizer, LM723.

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 1. 6. 2011

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňku Kubíkovi za cenné rady, připomínky a celkovou pomoc při zpracování této bakalářské práce.

Také bych rád poděkoval své rodině, která mě podporovala během doby mého studia.

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REGULOVATELNÉ NAPÁJECÍ ZDROJE.....</b>	<b>2</b>
2.1	VŠEOBECNÝ POPIS REGULOVATELNÝCH ZDROJŮ .....	2
2.2	OBECNÉ BLOKOVÉ SCHÉMA REGULOVATELNÉHO ZDROJE.....	3
	SÍŤOVÝ TRANSFORMÁTOR .....	3
	USMĚRŇOVAČ .....	3
	FILTR .....	4
	REGULÁTOR .....	5
<b>3</b>	<b>REGULÁTORY NAPĚTÍ.....</b>	<b>6</b>
3.1	DISKRÉTNÍ REGULÁTORY NAPĚTÍ.....	6
	JEDNODUCHÝ SÉRIOVÝ REGULÁTOR NAPĚTÍ.....	6
	SÉRIOVÝ REGULÁTOR NAPĚTÍ SE ZPĚTNOU VAZBOU .....	6
	PARALELNÍ REGULÁTOR NAPĚTÍ SE ZENEROVOU DIODOU .....	7
	PARALELNÍ REGULÁTOR NAPĚTÍ S TRANZISTOREM.....	7
3.2	REGULÁTORY NAPĚTÍ S OPERAČNÍMI ZESILOVAČI .....	8
3.3	INTEGROVANÉ REGULÁTORY NAPĚTÍ.....	9
3.4	STABILIZÁTOR 78XX/79XX .....	9
3.5	REGULÁTOR LM317.....	10
3.6	REGULÁTOR NAPĚTÍ L200 .....	10
3.7	REGULÁTOR LM723.....	12
	ZAPOJENÍ PRO VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ OD 2 DO 7V .....	14
	ZAPOJENÍ PRO VÝSTUPNÍ NAPĚTÍ OD 7 DO 37V.....	15
<b>4</b>	<b>SCHÉMA ZAPOJENÍ A POPIS REGULOVATELNÉHO ZDROJE.....</b>	<b>16</b>
4.1	SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	16
4.2	POPIS FUNKCE POMOCNÝCH OBVODŮ .....	18
4.3	POPIS FUNKCE REGULÁTORU .....	18
4.4	POPIS FUNKCE PROUDOVÉ SMYČKY .....	20
<b>5</b>	<b>SIMULACE.....</b>	<b>21</b>
5.1	ČASOVÁ ANALÝZA.....	21
5.2	ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY .....	23
5.3	STEJNOSMĚRNÁ S PARAMETRICKOU ANALÝZOU .....	25
<b>6</b>	<b>NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ ZDROJE.....</b>	<b>27</b>
7.1	MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍCH CHARAKTERISTIK.....	27
7.2	MĚŘENÍ ZVLNĚNÍ A ČINITELE STABILIZACE .....	28
7.3	ÚČINNOST.....	29
7.4	MĚŘENÍ VNITŘNÍHO ODPORU .....	30

<b>8 ZÁVĚR .....</b>	<b>32</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>34</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>35</b>



# 1 Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na lineární regulovatelné napájecí zdroje. Cílem bylo vytvoření dvojitého regulovatelného zdroje napětí s nastavitelným proudovým omezením. Navrhnutí zapojení, simulace vlastností a měření navrženého zdroje.

Text je rozdělen do několika částí. V první části jsou popsány možnosti obvodových zapojení regulovatelných zdrojů. Ve druhé části jsou popsány základní vlastnosti a zapojení nejpoužívanějších integrovaných stabilizátorů. Ve třetí části je popsáno schéma zapojení a popis funkce navrženého regulovatelného zdroje. Čtvrtá část se zaměřuje na simulaci vzniklého zapojení. Dále je popsána stavba, oživení a měření napájecího zdroje.

## **2 Regulovatelné napájecí zdroje**

### **2.1 Všeobecný popis regulovatelných zdrojů**

Regulovatelné zdroje napětí patří k nejzákladnějšímu vybavení, které je potřeba při stavbách, oživování, měření a zkoušení nově vznikajících elektronických zařízení. Stejně tak jsou využívány pro napájení různých elektronických zařízení.

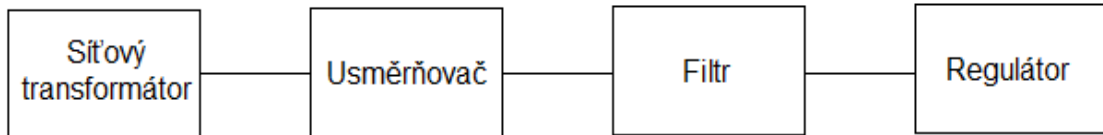
Vzhledem k různým požadavkům na napájecí napětí napájených zařízení, je nutné, aby zdroj měl plynule regulovatelné výstupní napětí. Výstupní napětí zdrojů musí být stabilní, to znamená, že velikost výstupního napětí se nemění v závislosti na odebíraném proudu.

Důležitá je také odezva na skokovou změnu odebíraného proudu. V ideálním případě by zdroj neměl nijak reagovat na náhlé změny odebíraného proudu a výstupní napětí by mělo být konstantní. Ideálního stavu lze jen těžko dosáhnout. Proto je důležité, aby případné změny nebo záškuby výstupního napětí, při skokových změnách odebíraného proudu, byly co nejmenší a rychle odezněly.

Zdroj napětí by měl být vybaven také proudovou ochranou, která by měla být plynule nastavitelná a rychle reagovat na případné překročení odebíraného proudu. V případě zareagování proudové ochrany, zdroj sníží velikost výstupního napětí na takovou hodnotu, aby proud tekoucí do zátěže nepřevyšoval nastavenou hodnotu proudu. Možnost proudového omezení je velice užitečná především při oživování konstrukcí, kde by případné chyby nebo zkratky v zapojení mohli způsobit zničení některých součástí apod. V případě vhodně nastavené proudové ochrany dodá zdroj do zařízení jen omezený proud, který nemá tak destruktivní účinky jaké by mohl mít zkratový proud při jmenovitém napětí.

## 2.2 Obecné blokové schéma regulovatelného zdroje.

Všechny lineární regulovatelné napájecí zdroje lze popsat zjednodušeným blokovým schématem, popisujícím základní stavební prvky.



Obr 2.2.1 Blokové schéma regulovatelného zdroje.

### *Síťový transformátor*

První blok, v blokovém schématu, představuje síťový transformátor. Slouží k transformaci síťového napětí na nižší požadovanou hodnotu. Vztah mezi primárními a sekundárními veličinami je dán převodem  $p$ , pro který platí:

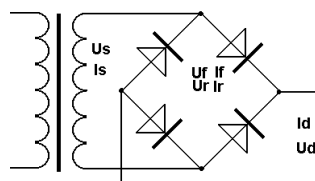
$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

kde  $N_1$  je počet závitů primárního vinutí a  $N_2$  počet závitů sekundárního vinutí.

Transformátor je v podstatě nejdůležitější část celého zdroje a od jeho parametrů se odvíjí výsledné napětí a také proud, který je celé zařízení schopno dodat do zátěže. Proto síťový transformátor musí být dostatečně dimenzován na požadovaný výkon. Vzhledem k úbytkům napětí na dalších částech obvodu je nutné, aby napětí transformátoru bylo voleno s určitou rezervou.

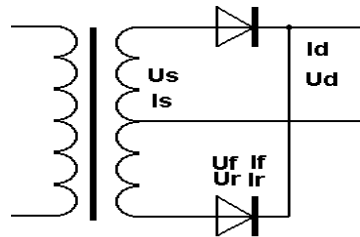
### *Usměřňovač*

Dalším blokem ve schématu je usměřňovač. Ten slouží k usměrnění střídavého napětí ze sekundárního vinutí transformátoru. Nejčastěji se používá tzv. Greatzův usměřňovací můstek, což je dvojcestný usměřňovač. Jeho zapojení je znázorněno na Obr 2.2.2.



Obr 2.2.2. Greatzův usměřňovací můstek [3]

V případě, že je použit síťový transformátor s dvojitým sekundárním vinutím, je výhodné využít dvoucestný usměrňovač, skládající se ze dvou usměrňovacích diod. Zapojení je patrné z Obr. 2.2.3.



Obr 2.2.3 Dvoucestný usměrňovač [3]

### **Filtr**

Dalším blokem ve schématu je filtr. Výstupní napětí z usměrňovače je sice stejnosměrné, ale je pulzující. Z tohoto důvodu je za usměrňovač zařazen filtr. Nejčastěji je tento filtr realizován filtračním kondenzátorem. Jako filtrační kondenzátory se využívají elektrolitické kondenzátory s velkou kapacitou. Kapacitu těchto kondenzátorů je třeba volit s ohledem na předpokládaný odebíraný proud a maximální možný pokles napětí. Výpočet kapacit filtračního kondenzátoru [1]:

$$C \geq \frac{I \arccos\left(-\frac{U_{\min}}{U_{\max}}\right)}{2\pi f (U_{\max} - U_{\min})} \quad (2)$$

kde  $U_{\max}$  je maximální hodnota napětí na kondenzátoru a  $U_{\min}$  minimální, pod kterou napětí nesmí klesnout.  $I$  je proud dodávaný do zátěže. U běžných zdrojů se kapacita těchto kondenzátorů pohybuje v jednotkách mF.

Dalším důležitým parametrem filtračních kondenzátorů je velikost napětí, na které je potřeba kondenzátor dimenzovat. Je potřeba si uvědomit, že hodnota napětí, které naměříme na sekundárním vinutí transformátoru, je hodnota efektivní. Výsledné napětí, na které se kondenzátor nabije, odpovídá ne efektivní, ale maximální hodnotě napětí. Z toho vyplývá, že napětí, na které je kondenzátor nutno dimenzovat musí být vyšší (30 až 50% z důvodu bezpečnosti) než je maximální hodnota usměrňovaného napětí.

Maximální hodnotu napětí lze spočítat z efektivní hodnoty pomocí vztahu:

$$U_{\max} = \sqrt{2} \cdot U_{ef} \quad (3)$$

### **Regulátor**

Posledním blokem je regulátor. Tato část obvodu má za úkol stabilizovat výstupní napětí a udržovat jeho požadovanou velikost. Obvod také může plnit funkci proudové ochrany. Regulátory mohou být sestaveny z diskrétních součástek (diody, tranzistory apod.), nebo z operačních zesilovačů. Často se ke konstrukci zdrojů využívají integrované obvody, které jsou přímo určené k těmto účelům. Použití těchto obvodů zjednodušuje návrh a realizaci regulovatelných napájecích zdrojů.

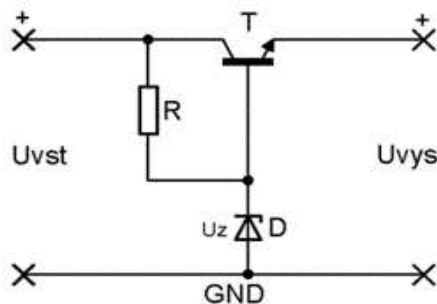
## 3 Regulátory napětí

### 3.1 Diskrétní regulátory napětí

Regulátory napětí lze sestavit i bez použití speciálních integrovaných obvodů, za použití diskrétních součástek. V těchto zapojeních je využívána zenerova dioda, která je proudově posílána tranzistorem. Tyto obvody mohou být doplněny zpětnou vazbou pro zlepšení stability výstupního napětí. Těchto zapojení existuje velká spousta, v dalším textu uvedu pouze některá zapojení z celé řady různých zapojení.

#### *Jednoduchý sériový regulátor napětí*

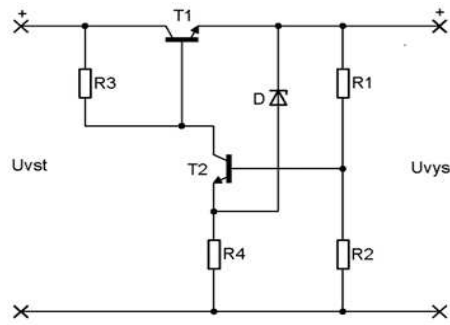
Na Obr. 3.1.1 je schéma zapojení nejjednoduššího regulátoru napětí. Jedná se o sériový stabilizátor se zenerovou diodou. Zenerova dioda udržuje na bázi tranzistoru konstantní napětí, které je dáno velikostí zenerova napětí použité diody. Tranzistor slouží k proudovému zesílení.



Obr. 3.1.1 Jednoduchý regulátor napětí [4]

#### *Sériový regulátor napětí se zpětnou vazbou*

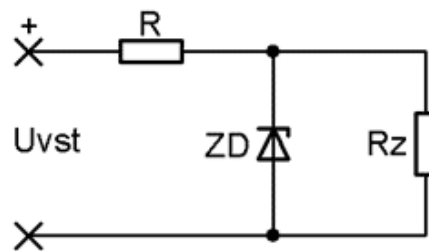
Na Obr. 3.1.2 je schéma zapojení regulátoru napětí, se zpětnou vazbu. Emitor tranzistoru, je za pomoci zenerovy diody a rezistoru R4, udržován na konstantním napětí. Výstupní napětí je snímáno odporovým děličem tvořeným rezistory R1, R2 a je přiváděno do báze tranzistoru T2. Je-li toto napětí nižší, než je napětí na emitoru, je tranzistor T2 uzavřen a zpětná vazba se neuplatní. Vzroste-li výstupní napětí natolik, že napětí na bázi tranzistoru T2 je vyšší než napětí na emitoru, T2 se začne otvírat. Otvíráním T2 se snižuje proud tekoucí do báze tranzistoru T1 přes rezistor R3. Vlivem toho se tranzistor T1 přivře a výstupní napětí klesne.



Obr. 3.1.2 Regulátor napětí se zpětnou vazbou [4]

### ***Paralelní regulátor napětí se zenerovou diodou***

Na Obr. 3.1.3 je zapojení jednoduchého paralelního stabilizátoru napětí. Zapojení se skládá ze zenerovy diody a rezistoru. Je-li vstupní napětí větší než je zenerovo napětí diody ZD, dioda se otevře a proud jí začne protékat v závěrném směru. Proud tekoucí diodou způsobí úbytek napětí na rezistoru R (velikost proudu tekoucího diodou je dána velikostí rezistoru R). Výstupní napětí je potom rovno zenerovu napětí diody.

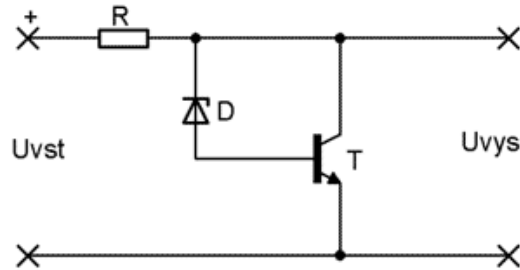


Obr. 3.1.3 Paralelní regulátor napětí se zenerovou diodou [4]

### ***Paralelní regulátor napětí s tranzistorem***

Paralelní regulátor napětí lze doplnit výkonovým tranzistorem, tak jak je naznačeno na Obr. 3.1.4. Princip funkce je prakticky stejný jako u předešlého zapojení. Zde je však zenerova dioda doplněna výkonovým tranzistorem, na kterém se spotřebovává ztrátový výkon. Překročí-li vstupní napětí velikost zenerova napětí diody D, zenerova dioda, která je polarizována v závěrném směru, se otevře. Proud tekoucí přes zenerovu diodu do báze tranzistoru T, začne otvírat tento tranzistor. Čím více je tranzistor otevřen, tím větší proud protéká jeho kolektorem a tím je také větší ztrátový výkon, který se musí na tranzistoru

vyzářit v podobě tepla. Výstupní napětí je dáno součtem zenerova napětí diody D a napětím  $U_{BE}$  výkonového tranzistoru.

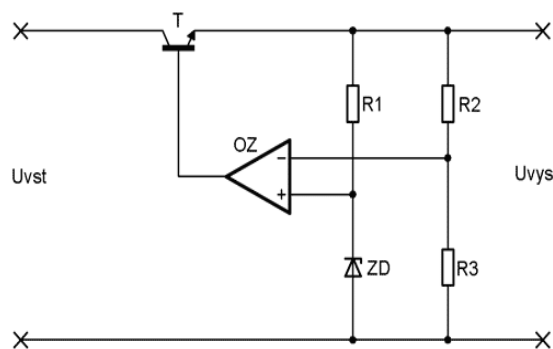


Obr. 3.1.4 Paralelní regulátor napětí s tranzistorem [4]

### 3.2 Regulátory napětí s operačními zesilovači

Regulátory napětí je možné také sestavit za pomoci operačních zesilovačů. V těchto aplikacích jsou většinou zapojeny jako zesilovače regulační odchylky, které porovnávají výstupní napětí s referenčním napětím. Výstupem tohoto zesilovače je pak ovládán tranzistor, který reguluje velikost výstupního napětí. Možností zapojení regulátorů napětí, s operačním zesilovačem, je velké množství, v různých variacích a obměnách. Na Obr. 3.2.1 je znázorněno jedno z možných zapojení sériového regulátoru.

Jako zdroj referenčního napětí zde slouží zenerova dioda spolu s rezistorem R1. Toto referenční napětí je přiváděno do neinvertujícího vstupu operačního zesilovače. Výstupní napětí je opět snímáno děličem R2, R3 a je přiváděno do invertujícího vstupu operačního zesilovače. Jsou-li napětí na invertující a neinvertující vstupem rozdílné, operační zesilovač na to reaguje a podle potřeby přivře nebo více otevře tranzistor T.



Obr. 3.2.1 Regulátor napětí s operačním zesilovačem [4]



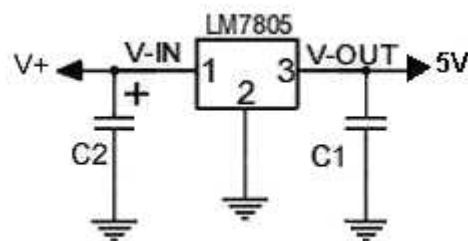
### 3.3 Integrované regulátory napětí

Výrobci součástek pro elektroniku, vyrábí integrované obvody, které jsou určeny přímo pro obvody regulovaných zdrojů napětí. Tyto obvody značně zjednodušují návrh a konstrukci regulovatelných zdrojů. Ke zhotovení regulovatelného zdroje, stačí pouze tyto obvody doplnit několika vnějšími součástkami. Některé z těchto integrovaných regulátorů také obsahují obvody pro limitaci výstupního proudu. Pomocí takových obvodů, lze jednoduše realizovat regulovatelný zdroj napětí s nastavitelnou proudovou ochranou.

Těchto obvodů existuje opět celá řada. Některé jsou založeny na stejném principu, ale liší se jen některými parametry (maximální proud, který jsou schopny dodat, nebo maximální vstupní napětí apod.). V následujícím textu jsou popsány tři z nejběžněji používaných regulovatelných stabilizátorů napětí LM317, L200 a LM723 a také stabilizátor řady 78xx.

### 3.4 Stabilizátor 78xx/79xx

Stabilizátor řady 78xx/79xx je integrovaný monolitický stabilizátor s pevným výstupním napětím. Je vyráběn pro různá výstupní napětí. Druhé dvojčíslí v názvu udává velikost výstupního napětí (např. 7805 – výstupní napětí 5V, 7812 – výstupní napětí 12V). Verze 79xx je určena pro stabilizaci záporného napětí. Obvod se vyrábí také pro různá proudová zatížení. V názvu se tyto verze rozlišují písmenkem za číslem 78(např. 78L12 - výstupní proud je 150mA, 78S12 – výstupní proud je 2A). Podle velikosti výstupního proudu se také liší pouzdro obvodu (TO92, TO220, T03). Regulátor má tři vývody a jeho zapojení je znázorněno na obrázku Obr. 3.4.1.

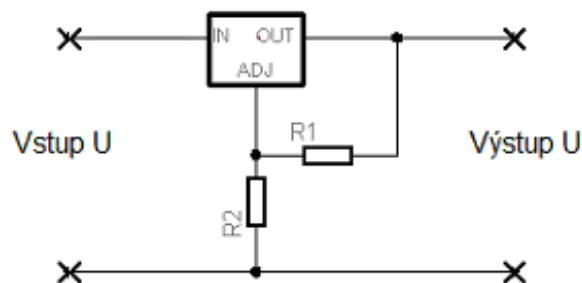


Obr. 3.4.1 Zapojení obvodu 78xx [5]

### 3.5 Regulátor LM317

Jedním z těchto regulovatelných integrovaných stabilizátorů je obvod LM317 (popř. LM337 pro záporná napětí). Tento obvod vyráběný firmou ST Microelectronics je monolitický integrovaný regulátor napětí, který má výstupní napětí nastavitelné v rozsahu od 1,2 do 37V a je schopen do zátěže dodávat proud 2A. Tyto a další parametry viz[8]. Obvod je také vybaven vnitřní pojistkou proti přehřátí. V případě přehřátí pojistka omezí výstupní proud a ochrání obvod před zničením.

Obvod má tři vývody (je vyráběn v pouzdře TO99, TO220, T03 a D2PAK) a jeho schématická značka a základní zapojení je na Obr. 3.5.1.



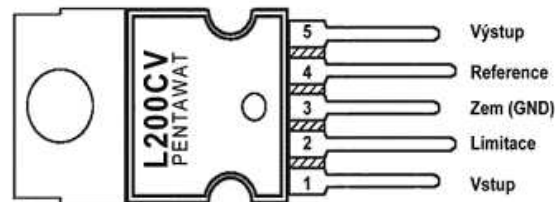
Obr. 3.5.1 Základní zapojení obvodu LM317

Vstupní napětí je přiváděno do vstupu IN. Obvod pracuje tak, že se snaží udržet napětí mezi piny OUT a ADJ na hodnotě 1,25V. Vhodnou volbou rezistorů R1 a R2 tak může dosáhnout požadovaného výstupního napětí. V případě, že spodní rezistor R2 nahradíme potenciometrem, získáme tak stabilizovaný zdroj s plynule nastavitelným výstupním napětím. Pro správnou funkci obvodu je nutné, aby vstupní napětí bylo minimálně o 2V vyšší než požadované výstupní napětí.

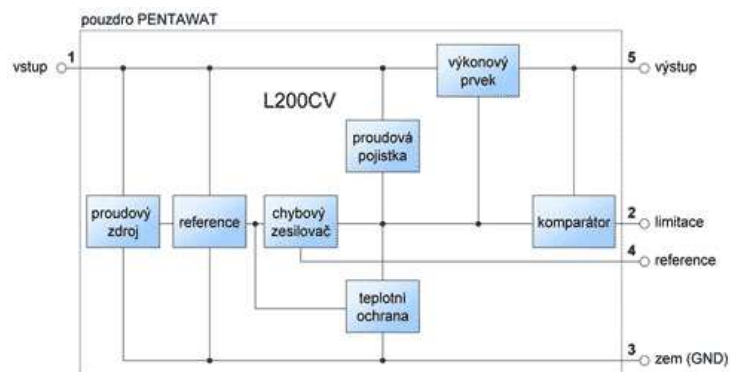
### 3.6 Regulátor napětí L200

Dalším z těchto obvodů je napěťový regulátor L200. Podobně jako předchozí obvod, je tento vyráběn firmou ST Microelectronics. Jedná se o monolitický stabilizátor napětí s plynule nastavitelným výstupním napětím a možností proudové regulace. Parametry obvodu jsou obsaženy v [9]. Maximální vstupní napětí je 40V. Výstupní napětí je plynule nastavitelné v rozsahu od 2,75 do 36V. Obvod je trvale zkratuvedorný a maximální zkratový proud

dosahuje hodnoty 3,6A. Trvale je schopen regulátor dodávat do zátěže proud 2A. Obvod je dále vybaven teplotní ochranou proti přetížení. Obvod je vyráběn v pětivývodovém pouzdře PENTAWAT. Zapojení vývodů je patrné o Obr. 3.6.1. Na Obr. 3.6.2 jsou znázorněny základní funkční bloky obvodu L200 a také blokové schéma obvodu.



Obr. 3.6.1 Zapojení vývodů obvodu L200 v pouzdře PENTAWAT [6]

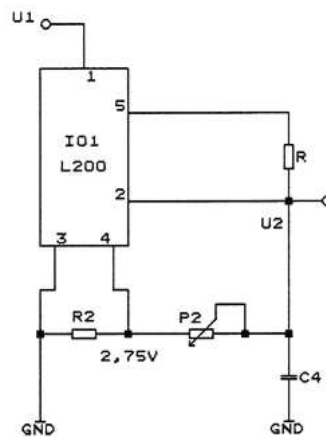


Obr. 3.6.2 Blokové schéma obvodu L200 [6]

Schéma základního zapojení je na Obr. 3.6.3. Vstupní napájecí napětí je přiváděno na VSTUP (pin 1.). Pro správnou funkci je potřeba, aby napětí na vstupu bylo minimálně o 2V větší než požadované napětí na výstupu. Napětí na výstupu regulátoru je přes dělič, tvořený rezistorem R2 a potenciometrem P2, přiváděné na vstup REFERENCE (pin 4.). Jak je patrné z blokévého schématu, je napětí na tomto vstupu porovnáváno s vnitřním referenčním napětím. Vnitřní referenční napětí má hodnotu 2,75V. Případné odchylky napětí od této požadované hodnoty jsou obvodem automaticky vyrovnány. Změnou natočení potenciometru tak můžeme regulovat velikost výstupního napětí. Jistou nevýhodou tohoto zapojení je skutečnost, že výstupní napětí nemůžeme regulovat od 0V (minimální napětí, kterého můžeme dosáhnout, je 2,75V). Tuto nepříjemnou vlastnost lze odstranit tím, že GND (pin 3.) nepřipojíme na zem, ale přivedeme na něj záporné předpětí o velikosti právě 2,75V.

S takovou úpravou lze výstupní napětí regulovat od 0V.

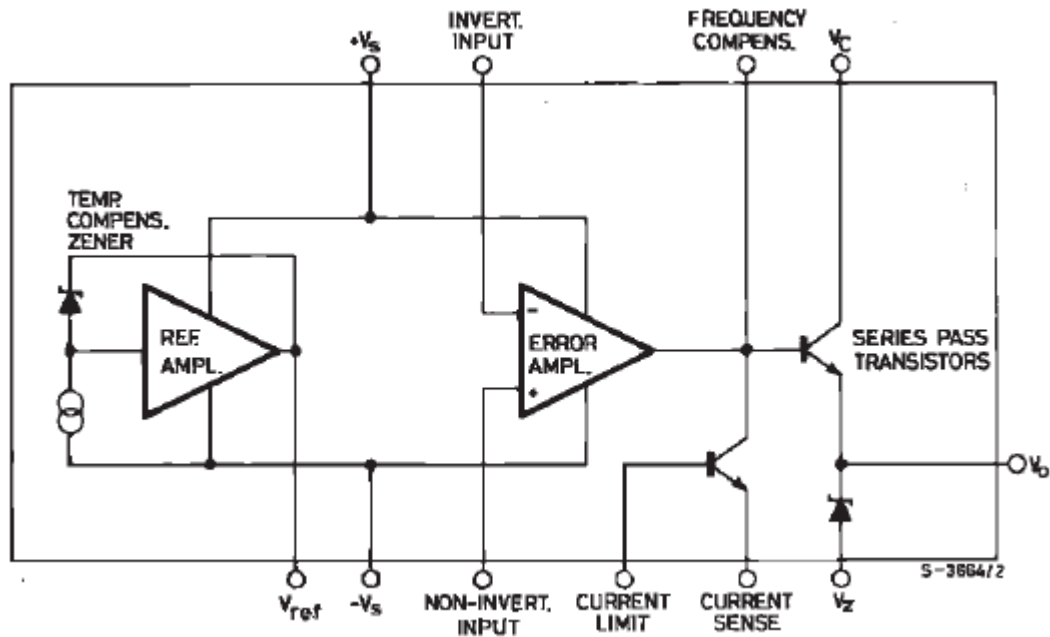
Proud tekoucí z výstupu do zátěže prochází přes snímací rezistor R. Dosáhne-li proud zátěže takové hodnoty, která na snímacím rezistoru R vytvoří úbytek napětí 0,45V, začne pracovat proudová ochrana. Vhodnou volbou snímacího rezistoru lze nastavit maximální velikost výstupního proudu.



Obr. 3.6.3 Schéma základního zapojení obvodu L200 [6]

### 3.7 Regulátor LM723

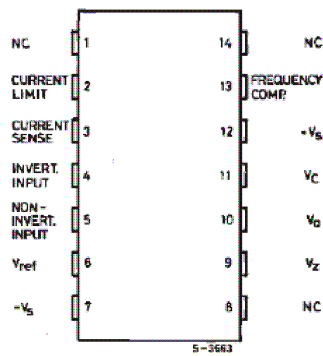
Dalším integrovaným regulátorem napětí s možností proudového omezení je obvod LM723. Obvod je vyráběn firmou ST Microelectronics. Parametry obvodu jsou obsaženy v [7]. Výstupní napětí obvodu je regulovatelné v rozsahu od 2 do 37V. Maximální vstupní napětí obvodu je 40V. Samotný regulátor, bez připojení vnějšího tranzistoru, je schopen dodat do zátěže proud 150mA. V případě potřeby většího proudu, je potřeba obvod doplnit vnějším tranzistorem. Obvod je vyráběn ve čtrnácti vývodovém pouzdře DIL14 nebo v pouzdře pro povrchovou montáž SO14. Na Obr. 3.7.1 je znázorněno schéma vnitřního zapojení obvodu LM723.



Obr. 3.7.1 Blokové schéma vnitřního zapojení bvodu LM723 [7]

Obvod LM723 obsahuje zdroj referenčního napětí, který je tvořen proudovým zdrojem, teplotně kompenzovanou zenerovou diodou a zesilovačem referenčního napětí. Toto napětí je přiváděno na výstup  $V_{ref}$  (pin 6.). Vstupy INVERTING (pin 4.) a NON-INVERTING (pin 5.) jsou připojeny na vnitřní zesilovač odchytky. Tímto zesilovačem je buzen výstupní tranzistor, který přivádí napětí ze vstupu  $V_c$  (pin 11.) na výstup obvodu  $V_o$  (pin 10.) Pro proudovou regulaci slouží vstupy CURENT LIMIT (pin 2.) a CURENT SENSE (PIN 3.) a pomocný tranzistor.

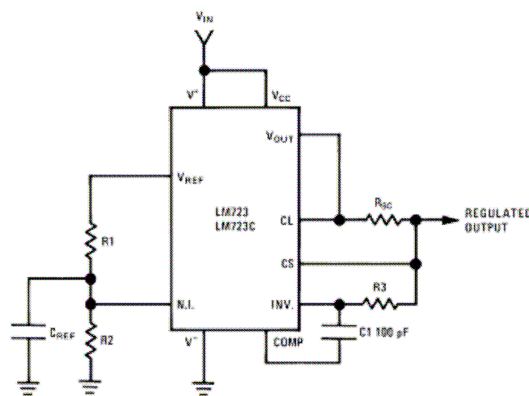
Vzroste-li napětí mezi vstupy CURENT LIMIT a CURENT SENSE, začne se otevírat pomocný tranzistor. Otvíráním pomocného tranzistoru se začne odbuzovat výstupní tranzistor a napětí na výstupu obvodu se sníží. Další vstupy obvodu jsou určeny k napájení vnitřních zesilovačů (zesilovače referenčního napětí a zesilovače odchytky) a také k frekvenční kompenzaci. Zapojení vývodů obvodu LM723 je zobrazeno na Obr. 3.7.1.



Obr. 3.7.1 Zapojení vývodů obvodu LM723 [7]

### Zapojení pro výstupní napětí od 2 do 7V

Pro výstupní napětí v rozsahu cca od 2 do 7V je základní zapojení regulátoru zobrazeno na Obr. 3.8.1.

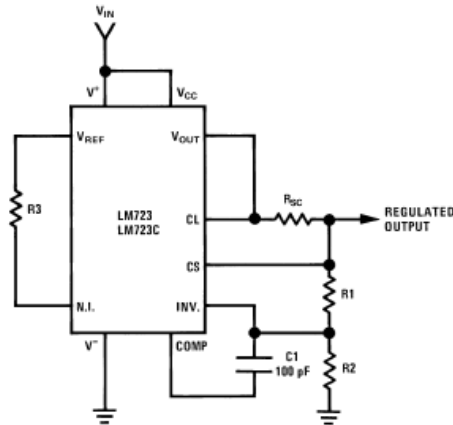


Obr. 3.8.1 Zapojení regulátoru pro výstupní napětí od 2 do 7V [7]

Jak je patrné ze schématu, je výstupní referenční napětí přiváděno na dělič tvořený rezistory R1 a R2. Napětí z tohoto děliče je přiváděno na neinvertující vstup vnitřního zesilovače odchyly. Na invertující vstup je přivedeno výstupní napětí přes rezistor R3. Velikost výstupního napětí lze regulovat velikostí rezistorů R1 a R2. Je zřejmé, že u tohoto zapojení lze výstupní napětí regulovat od minimální hodnoty do velikosti referenčního napětí. Snímací rezistor  $R_{SC}$  slouží k omezení výstupního proudu. Výstupní proud, tekoucí z výstupu  $V_{OUT}$ , prochází přes tento rezistor a vyvolává na něm úbytek napětí. Velikost napětí na rezistoru je snímána vstupy CS a CL. Překročil-li proud stanovenou velikost, vzroste napětí na snímacím rezistoru a obvod sníží výstupní napětí.

### Zapojení pro výstupní napětí od 7 do 37V.

V případě potřeby výstupního napětí v rozsahu od 7 do 37V lze použít schéma znázorněné na Obr. 3.8.2.



Obr. 3.8.2 Zapojení regulátoru pro výstupní napětí od 7 do 37V [7]

Na neinvertující vstup vnitřního zesilovače odchylky, je přes rezistor  $R_3$  přivedeno referenční napětí. Výstupní napětí je přes dělič, tvořený rezistory  $R_1$  a  $R_2$ , přiváděno na invertující vstup. Velikost výstupního napětí lze regulovat rezistory  $R_1$ ,  $R_2$ . Rezistor  $R_{SC}$  zde opět slouží jako snímací rezistor pro omezení výstupního proudu. Překročí-li proud tekoucí do zátěže stanovenou hodnotu, vzroste úbytek napětí na snímacím rezistoru a dojde k omezení výstupního proudu.

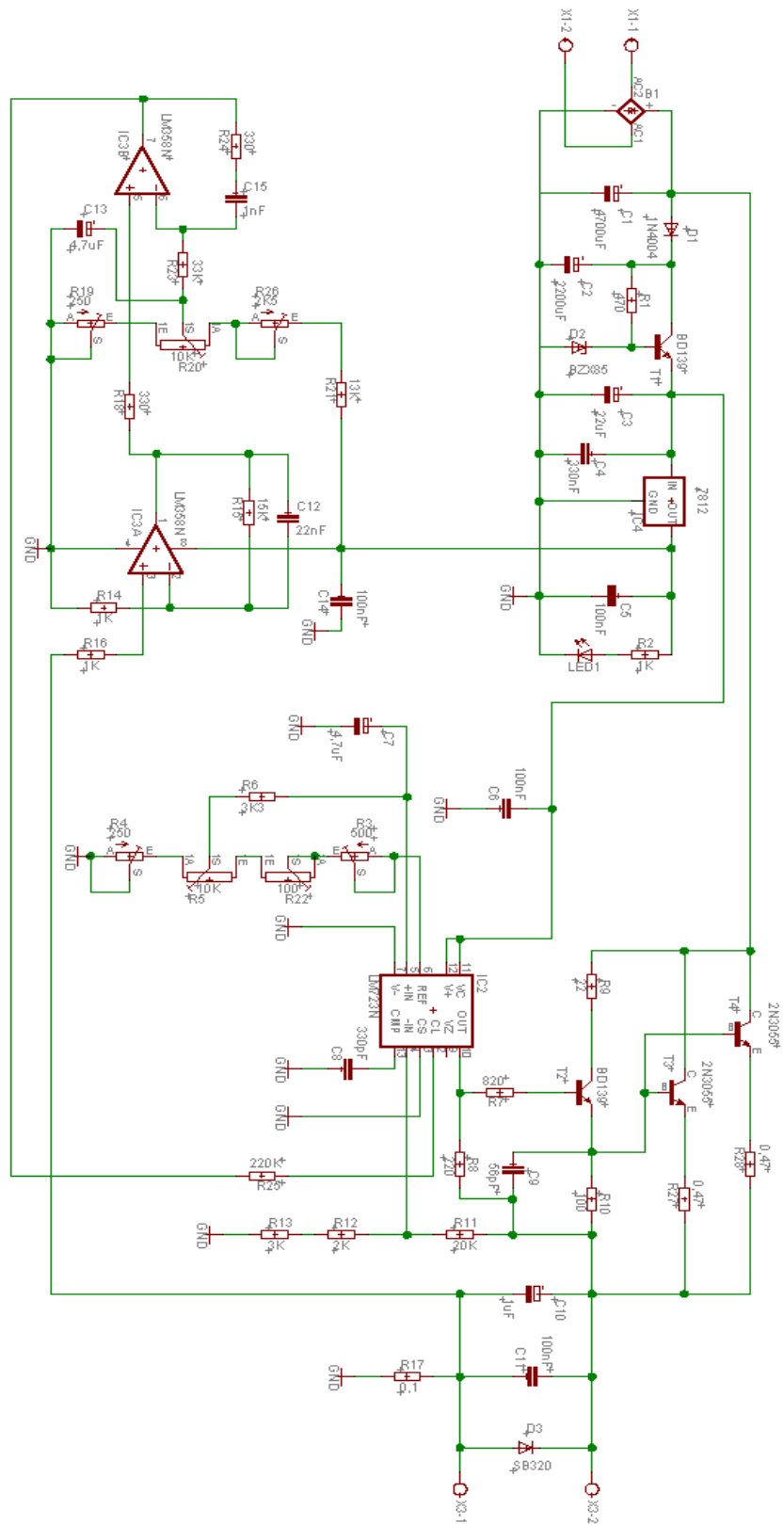
## 4 Schéma zapojení a popis regulovatelného zdroje

### 4.1 Schéma zapojení

Jako základ pro návrh regulovatelného zdroje jsem zvolil již dříve zmíněný integrovaný obvod LM723. Jak vyplývá z výše uvedeného popisu tohoto obvodu, v základním zapojení lze tento regulátor používat k regulaci napětí od 2 do 7V nebo od 7 do 37V. Cílem této konstrukce je ale regulátor napětí s plynule nastavitelným výstupním napětím. Z tohoto důvodu není možné použít některé ze základních zapojení. V této konstrukci je tedy obvod LM723 zapojen poněkud nestandardně.

Také velikost výstupního proudu má být plynule nastavitelná. Také z tohoto důvodu by použití některého ze základních zapojení nebylo vhodné. Při použití některého z nich, by byla potřeba plynule regulovat velikost snímacího rezistoru  $R_{SC}$ . Vzhledem k maximálnímu výstupnímu proudu 3A, by bylo zapotřebí použít výkonový potenciometr s poměrně malou hodnotou odporu. Takové potenciometry se běžně nevyrábí. Proto i pro obvod proudového omezení jsem zvolil jiné zapojení. Celkové schéma zapojení je na Obr. 4.1.1.





Obr. 4.1.1 Schéma zapojení regulovatelného zdroje

## 4.2 Popis funkce pomocných obvodů

Střídavé napětí, přiváděné ze sekundárního vynutí transformátoru, je usměrněno integrovaným usměrňovačem pracujícím v gratzově zapojení. Usměrněné pulzní napětí je filtrováno filtračním kondenzátorem C1 (4700uF/50V). Vzhledem k maximálnímu napájecímu napětí integrovaného stabilizátoru LM723, které je 40V, není možné stabilizátor napájet přímo z filtračního kondenzátoru. Pro snížení napětí, pro stabilizátor, slouží jednoduchý stabilizátor s pomocným filtračním kondenzátorem C2 a se zenerovou diodou D2, který je posílen tranzistorem T1. Napětí přiváděné na tento stabilizátor z filtračního kondenzátoru je oddělené pomocí diody D1. Toto oddělení je nutné k tomu, aby při větší zátěži na výstupu zdroje, nebyla odváděna energie pro pomocný stabilizátor na výstup zdroje.

Operační zesilovače jsou napájeny napětím 12V, které je získáno použitím monolitického stabilizátoru 7812. Tento stabilizátor má, podobně jako obvod LM 723, maximální vstupní napětí pouze 35V. Proto ani tento obvod nemůže být napájen přímo z filtračního kondenzátoru. Kvůli ochraně před rozkmitáním, je stabilizátor doplněn keramickými kondenzátory, jejichž hodnota je 330nF a 100nF. Tyto hodnoty byly zvoleny podle katalogového listu výrobce.

## 4.3 Popis funkce regulátoru

Srdcem celého zapojení je integrovaný stabilizátor LM723 (vyráběný firmou National Semiconductor). Jedná se o regulovatelný, lineární stabilizátor v pouzdře se čtrnácti vývody DIL 14 (tento obvod se vyrábí i v několika jiných pouzdrech). Jak již bylo zmíněno, maximální vstupní napětí je 40V a výstupní napětí je plynule nastavitelné v rozsahu cca od 2 do 37V. Samotný regulátor je schopen dodat proud do zátěže 150mA.

Z výstupu REF (pin 6) je odebíráno referenční napětí 7,15V. Toto napětí je přiváděno na napěťový dělič, který je tvořený trimry R3, R4 a potenciometry R5 a R22. Potenciometr R5 slouží k nastavení výstupního napětí a trimry R3, R4 jsou zde použity jako „dorazy“, kterými je nastavena minimální a maximální hodnota výstupního napětí. Potenciometr R22 slouží k jemné doregulaci výstupního napětí. Napětí z děliče je přes rezistor R6 přiváděno na vstup +IN (pin 5). Kvůli možným odskokům potenciometru je napětí přiváděné do vstupu +IN filtrováno elektrolitickým kondenzátorem C7. Napětí z výstupu zdroje je přes dělič,

trošený rezistory R11, R12 a R13, přiváděno na vstup – IN (pin 4). Obvod se snaží regulovat výstupní napětí tak, aby mezi vstupy +IN a – IN bylo nulové napětí. Je-li například výstupní napětí nižší než požadované, obvod vyhodnotí tento rozdíl a výstupní napětí zvýší.

Jak již bylo řečeno samotný obvod LM723 je schopen dodat do zátěže proud maximálně 150mA. To však pro účely tohoto zapojení není dostačující a výstup obvodu je proudově posílen dvojicí paralelně zapojených výkonových tranzistorů T3, T4, které jsou typu 2N3055. Vzhledem k poměrně malému proudovému zesilovacímu činiteli těchto tranzistorů (dle katalogového listu výrobce je  $h_{21e}$  cca 10 až 70), jsou tyto tranzistory buzeny tranzistorem T2 (BD139). Při zatížení zdroje prochází těmito tranzistory velký proud a na tranzistorech vznikají velké tepelné ztráty (tyto ztráty jsou největší, pokud je výstupní napětí zdroje malé a zároveň je odebírán velký proud) a tranzistory se zahřívají. Vlivem teplotních změn se mění napětí  $U_{BE}$ . Rozdílné  $U_{BE}$  obou tranzistorů by vedlo k nerovnoměrnému rozložení proudu mezi oba tranzistory. Tranzistor s větším napětím  $U_{BE}$  by přenášel větší část proudu, což by opět vedlo k dalšímu oteplování a dalšímu nárůstu přenášeného proudu, až by mohlo dojít k destrukci tranzistoru. Z tohoto důvodu jsou do kolektorů tranzistorů zařazeny rezistory R27 a R28. Pokud by některým z tranzistorů protékal větší proud, vyvolalo by to větší úbytek napětí na emitorovém rezistoru. Vlivem toho by se snížilo napětí  $U_{BE}$  a tranzistor by se přivřel. Tím je docíleno rovnoměrného rozložení proudu mezi oba tranzistory.

Rezistor R9 omezuje maximální proud tranzistorem T2. Rezistor R10 omezuje proud dodávaný tranzistorem do zátěže, než se otevrou výkonové tranzistory. Rezistor R8 omezuje maximální proud dodávaný samotným regulátorem do zátěže, pokud ještě není otevřen budící tranzistor T2. Kondenzátor C9 zabraňuje vzniku vysokých frekvencí v případě rozkmitání obvodu. Pro zlepšení impulsní odezvy jsou výstupní svorky osazeny kondenzátory C10 a C11. K výstupním svorkám je paralelně zapojena schottkyho dioda D3, která slouží jako ochrana proti přepólování výstupu zdroje.

#### 4.4 Popis funkce proudové smyčky

Do cesty proudu, procházejícího zátěží, je vložen snímací rezistor R17. Na tomto snímacím rezistoru vzniká úbytek napětí, který je přímo úměrný velikosti proudu tekoucího do zátěže. Toto napětí se v závislosti na proudu pohybuje v rozmezí od 0 do 0,3V. To jsou dosti malé hodnoty, proto je před dalším zpracováním toto napětí zesíleno. Pro zesílení je použita jedna polovina obvodu LM358 (v pouzdře DIL 8). Zesilovač je zapojen jako neinvertující. Jeho zesílení je nastaveno rezistory R14 a R15. Tyto rezistory jsou voleny tak, aby napětí ze snímacího rezistoru bylo zesíleno 16x. Před vstupem do zesilovače je zařazen rezistor R16. Tento rezistor potlačuje vlivy vstupní nesymetrie, která je způsobena vstupními klidovými proudy. Z důvodu stability je zesílení frekvenčně omezeno. K tomu slouží kondenzátor C12.

Změřené a posléze zesílené napětí, je porovnáváno s nastaveným referenčním napětím. Toto referenční napětí je získáváno z napěťového děliče. Dělič je tvořen odporovými trimry R19, R26 a potenciometrem R20. Podobně jako u regulace proudu, slouží trimry k nastavení spodní a horní meze. Nastavováním potenciometru se mění velikost referenčního napětí, se kterým je porovnáváno zesílené napětí ze snímacího rezistoru. Tím lze měnit velikost proudu zátěže, při které začne reagovat proudová ochrana.

Druhá polovina obvodu LM358 souží jako zesilovač regulační odchylky. Výstup tohoto obvodu je přes rezistor R25 připojen na vstup CL (pin 2). Regulátor přes tento vstup reguluje výstupní napětí tak, aby proud zátěží nepřekročil požadovanou mez. V tomto režimu se vlastně zapojení chová jako zdroj proudu.

## 5 Simulace

Před samotnou stavbou, jsem pro ověření funkce navrženého zapojení a pro získání představy o základních vlastnostech, navrženého zapojení, provedl několik simulací.

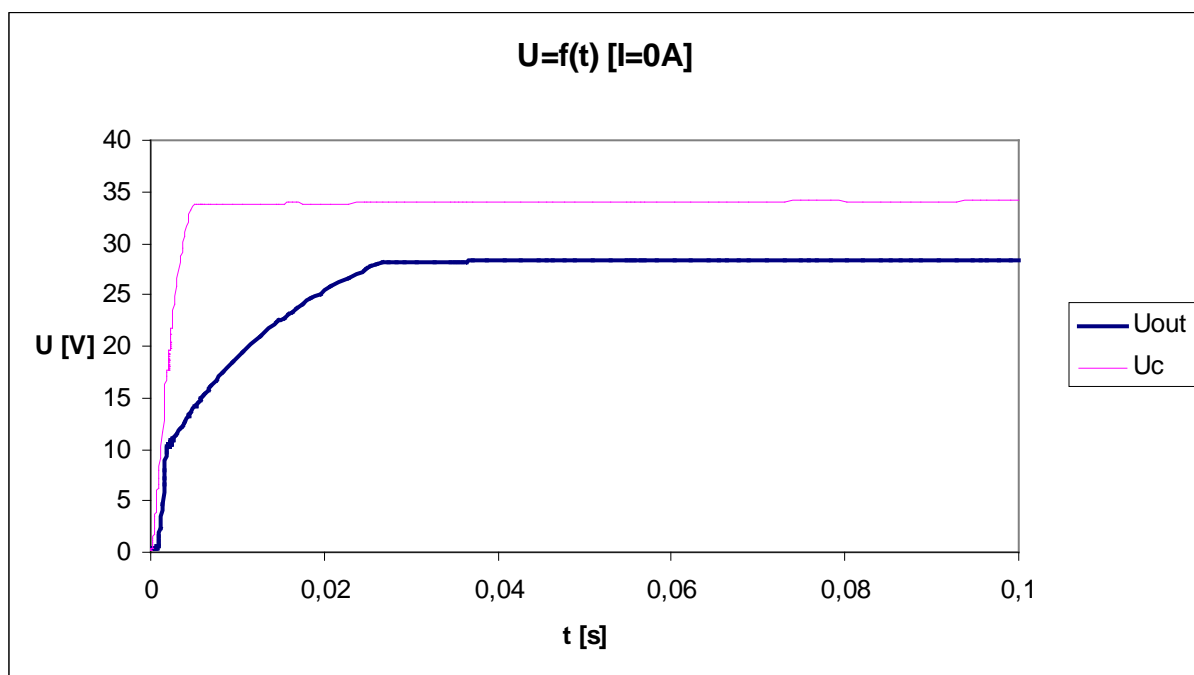
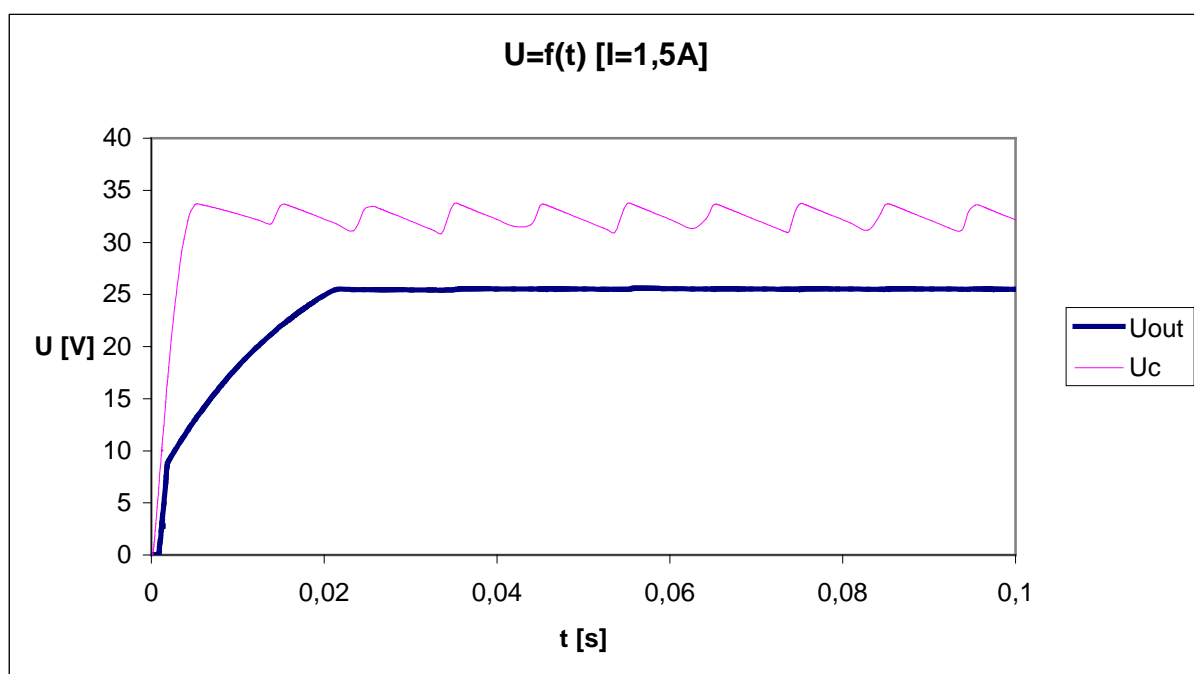
Simulace byly provedeny za pomoci programu PSpice.

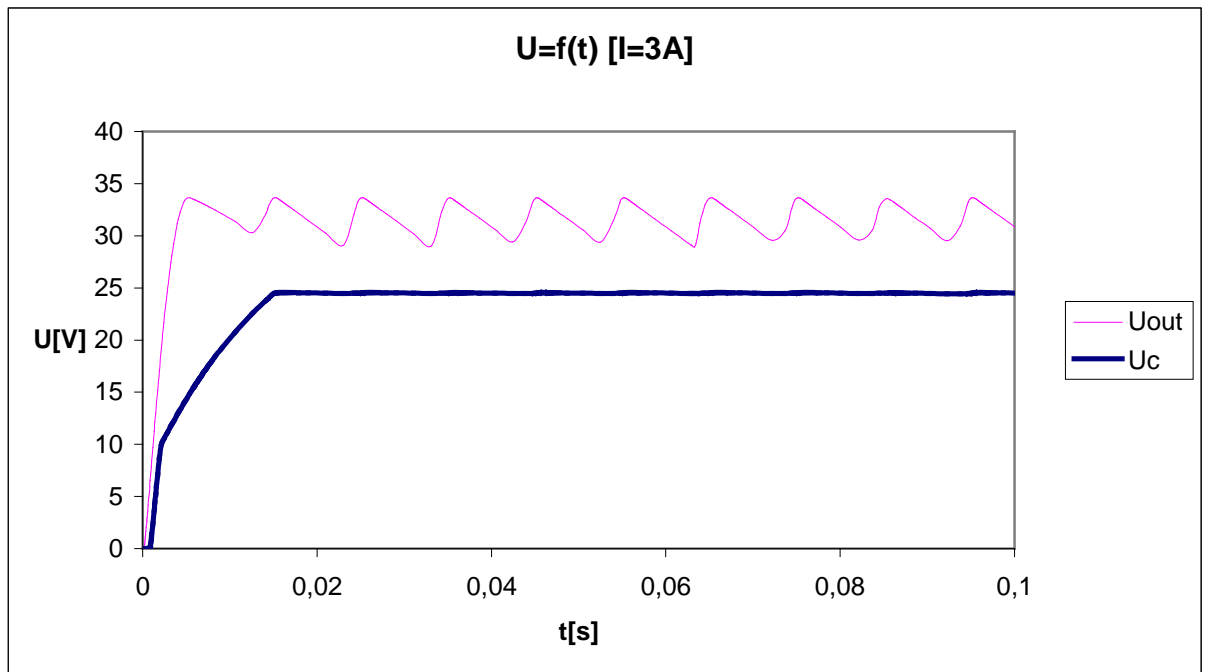
Tento software umožňuje provádění simulací elektronických zapojení. S pomocí tohoto softwaru je možno provádět simulace chování obvodů v závislosti na čase (tranzientní analýza). Dále umožňuje provádět stejnosměrné simulace (DC sweep) a také stejnosměrnou parametrickou simulaci, při které je sledována požadovaná veličina v závislosti na nastavení některého z parametrů (tímto parametrem může být např. nastavení potenciometru apod.). Program samozřejmě umožňuje i jiné další simulace.

### 5.1 Časová analýza

Časová (tranzientní) analýza popisuje veličiny v závislosti na čase. Pro zapojení regulovatelného zdroje byla provedena časová analýza napětí na filtračním kondenzátoru C1 a výstupního napětí  $U_{out}$ . Tyto analýzy byly provedeny v závislosti na velikosti výstupního proudu zdroje.

Na Obr. 5.1.1 je časová závislost obou napětí při nezatíženém zdroji (výstupní proud je roven nule). Obr. 5.1.2 ukazuje časovou závislost obou napětí při výstupním proudu 1,5A (polovina maximálního zatížení). Obr. 5.1.3 ukazuje závislost obou napětí při výstupním proudu 3A (což je maximální výstupní proud).

Obr. 5.1.1 Časová závislost  $U_c$  a  $U_{out}$  při nezatíženém zdroji.Obr. 5.1.2 Časová závislost  $U_c$  a  $U_{out}$  při zdroji zatíženém proudem 1,5A

Obr. 5.1.3 Časová závislost  $U_c$  a  $U_{out}$  při zdroji zatíženém proudem 3A

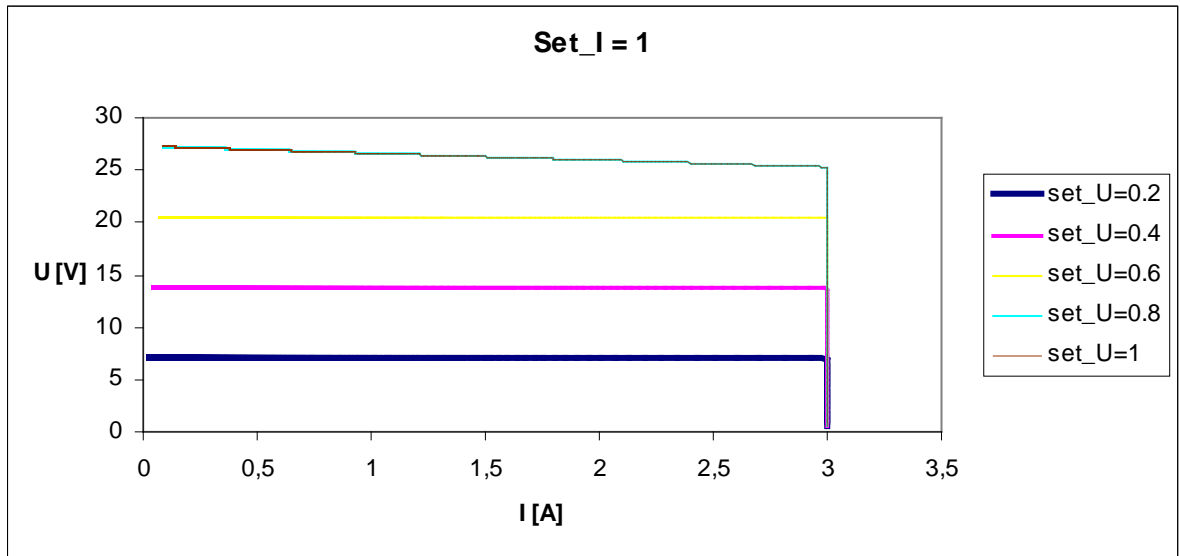
## 5.2 Zatěžovací charakteristiky

Zatěžovací charakteristika zobrazuje závislost výstupního napětí zdroje v závislosti na velikosti výstupního proudu. Ze zatěžovací charakteristiky lze určit, zda je zdroj dostatečně tvrdý a také jak se zdroj bude chovat při překročení maximálního nastaveného proudu.

Parametrem  $set\_U$  je označena poloha jezdce potenciometru, určujícího velikost nastaveného výstupního napětí. ( $set\_U = 1$  nastaveno maximální výstupní napětí).

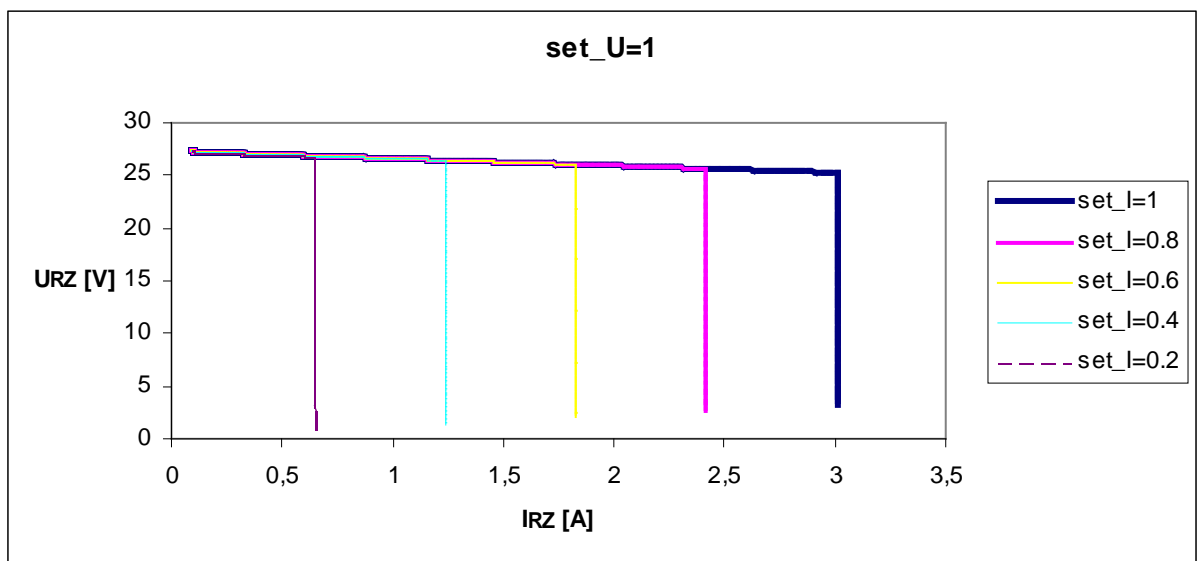
Taktéž parametr  $set\_I$  označuje polohu jezdce potenciometru, který slouží k nastavení velikosti maximálního výstupního proudu ( $set\_I = 1$  nastaven maximální výstupní proud).

Obr. 5.2.1 znázorňuje velikost výstupního napětí v závislosti na velikosti proudu dodávaného do zátěže. Proudové omezení je nastaveno na maximální výstupní proud ( $\text{set\_I} = 1$ ), tedy 3A. Na obrázku je tato závislost zobrazena pro různá nastavení výstupního napětí.



Obr. 5.2.1 Zatěžovací charakteristika zdroje pro různé velikosti výstupního napětí. Proudové omezení je nastaveno na maximální hodnotu 3A ( $\text{set\_I} = 1$ ).

Na Obr. 5.2.2 je zatěžovací charakteristika zdroje při nastaveném maximálním výstupním napětí ( $\text{set\_U} = 1$ ), pro různá nastavení proudového omezení ( $\text{set\_I} = 0,2$  až 1).



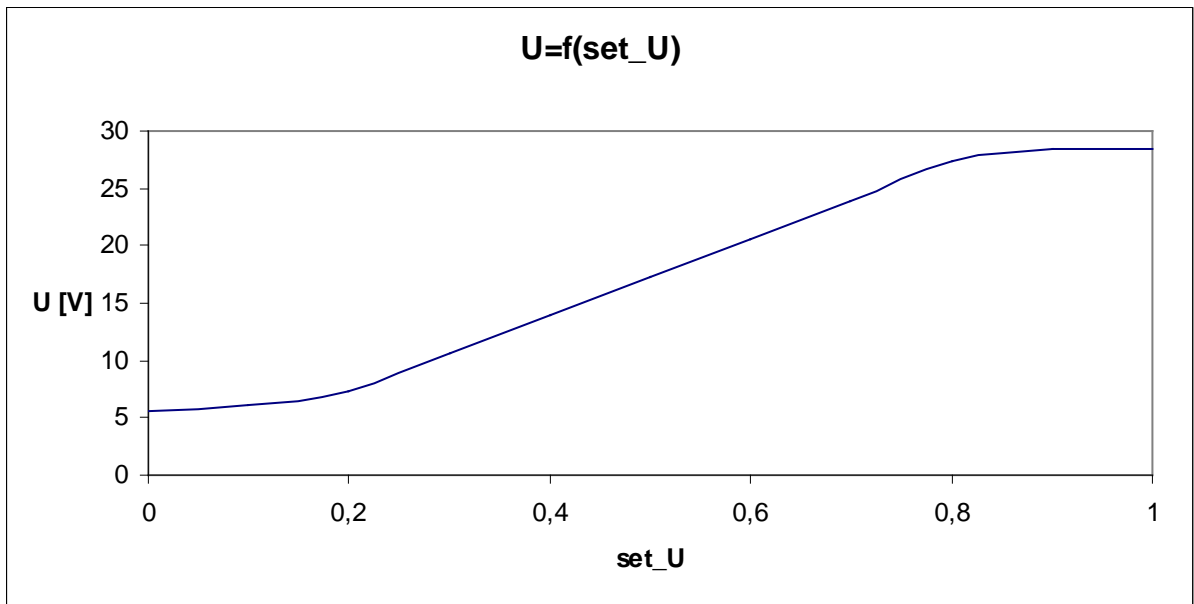
Obr. 5.2.2 Zatěžovací charakteristika pro různá nastavení proudového omezení, pro maximální výstupní napětí.



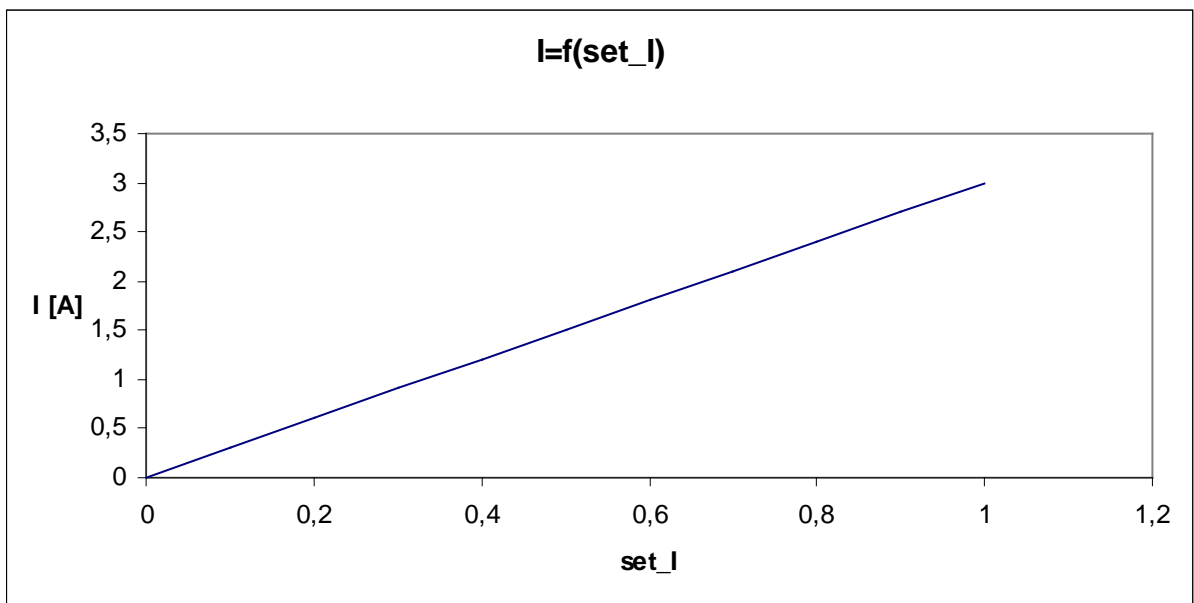
### 5.3 Stejnosečná s parametrickou analýzou

Při této analýze je požadovaná veličina zobrazována v závislosti na některém parametru. Parametrem může být např. nastavení polohy potenciometru apod.

Na Obr. 5.3.1 je zobrazena velikost výstupního napětí v závislosti na nastavení polohy potenciometru pro regulaci napětí (set\_U). Obr. 5.3.2 znázorňuje velikost výstupního proudu v závislosti na nastavení potenciometru pro regulaci proudu. (set\_I).



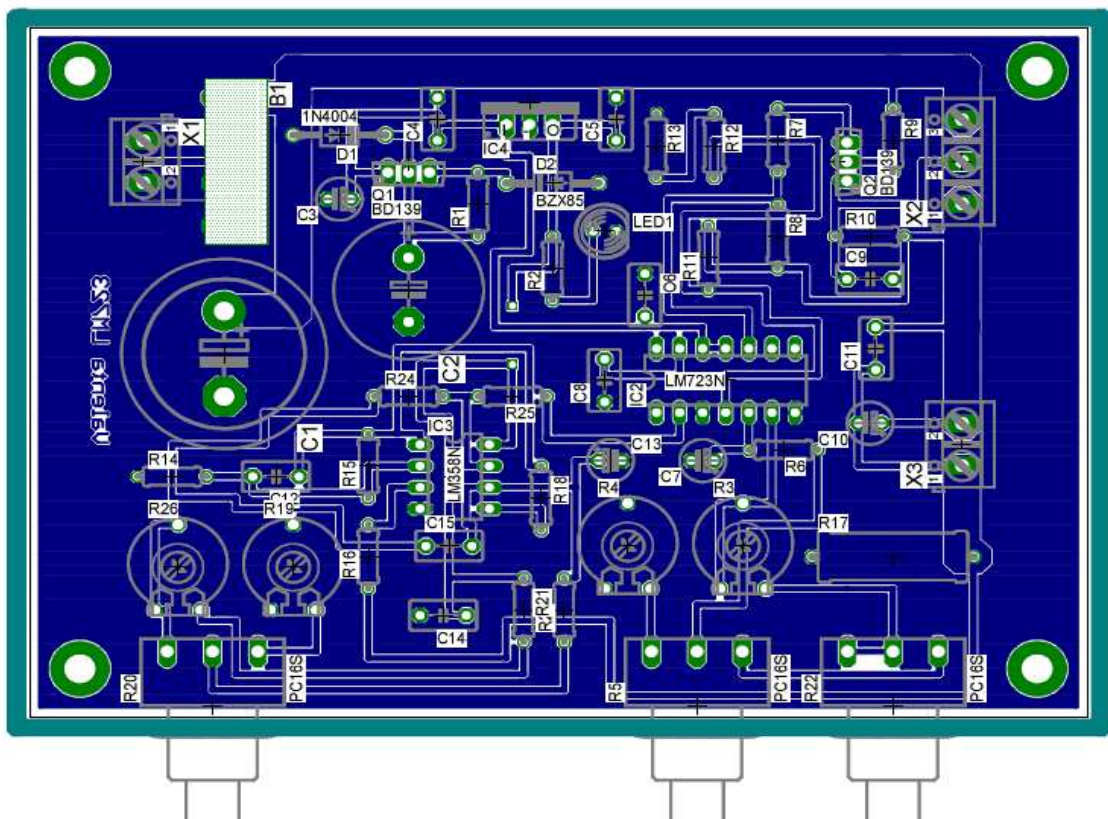
Obr 5.3.1 Závislost výstupního napětí v závislosti na nastavení potenciometru



Obr 5.3.2 Závislost výstupního proudu v závislosti na nastavení potenciometru.

## 6 Návrh plošného spoje

Pro návrh plošného spoje jsem použil program Eagle 4.16. Tento byl použit pro kompletní návrh plošného spoje a byly z něj vygenerovány soubory potřebné pro výrobu desky. Celé zapojení bylo zhotoveno na jednostranném plošném spoji s rozlitou mědí. Vzhledem k velkým teplotním ztrátám výkonových tranzistorů, je potřeba tyto tranzistory účinně chladit. Nejsou proto umístěny na desce plošného spoje, ale jsou spolu s emitorovými rezistory přišroubovány k hliníkovým chladičům. Na desce také není umístěna schottkyho dioda D3, která má sloužit jako ochrana zdroje při přepólování výstupních svorek zdroje. Tato dioda je umístěna přímo k výstupním svorkám zdroje. Pro připojení vstupního střídavého napětí, výstupního napětí a výkonových tranzistorů jsou na desce umístěny šroubovací svorkovnice. Ostatní součástky včetně usměrňovacího můstku a filtračního kondenzátoru jsou umístěny na desce plošného spoje. Deska je zobrazena na Obr 6.1.1.



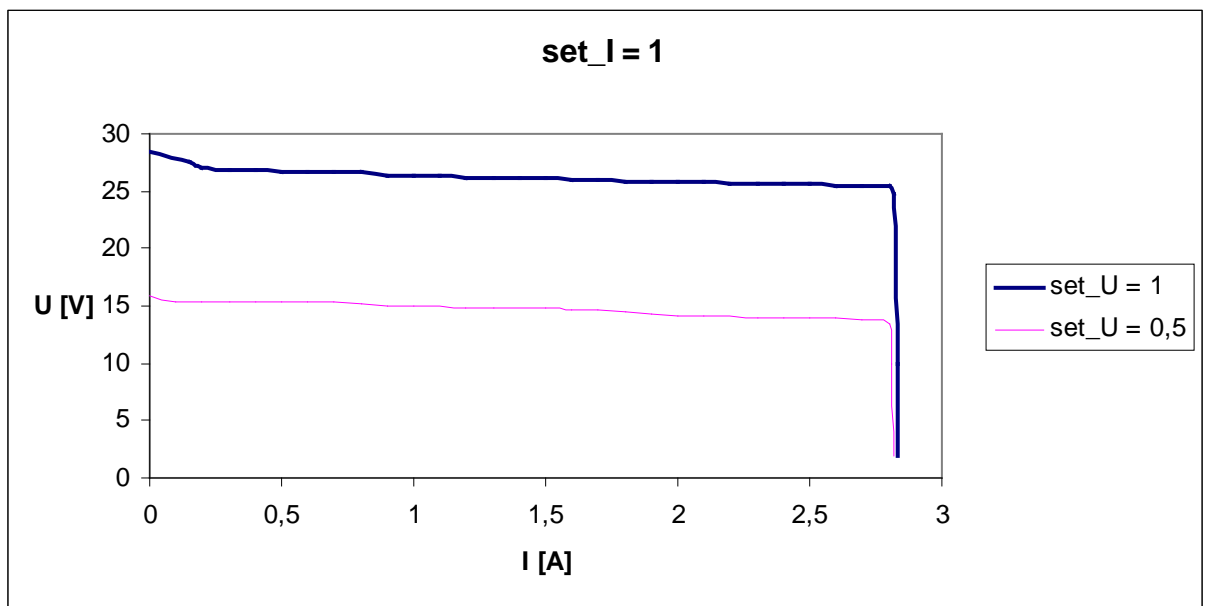
Obr. 6.1 Deska plošného spoje

## 7 Měření zdroje

Podle návrhu (viz Obr. 6.1) byla zhotovena deska plošných spojů a na této desce jsem provedl měření zdroje. Bylo změřeno několik zatěžovacích charakteristik (pro různá nastavení výstupního napětí a různá nastavení proudového omezení). Dále bylo změřeno zvlnění výstupního napětí a zvlnění napětí na filtračním kondenzátoru. Při měření byl pro napájení desky použit síťový transformátor 230/24V. Jako zátěž, byly použity dva posuvné rezistory 165 $\Omega$ /2,5A a 106 $\Omega$ /4A. Výkonové tranzistory byly kvůli velkým tepelným ztrátám připevněny na hliníkových chladičích.

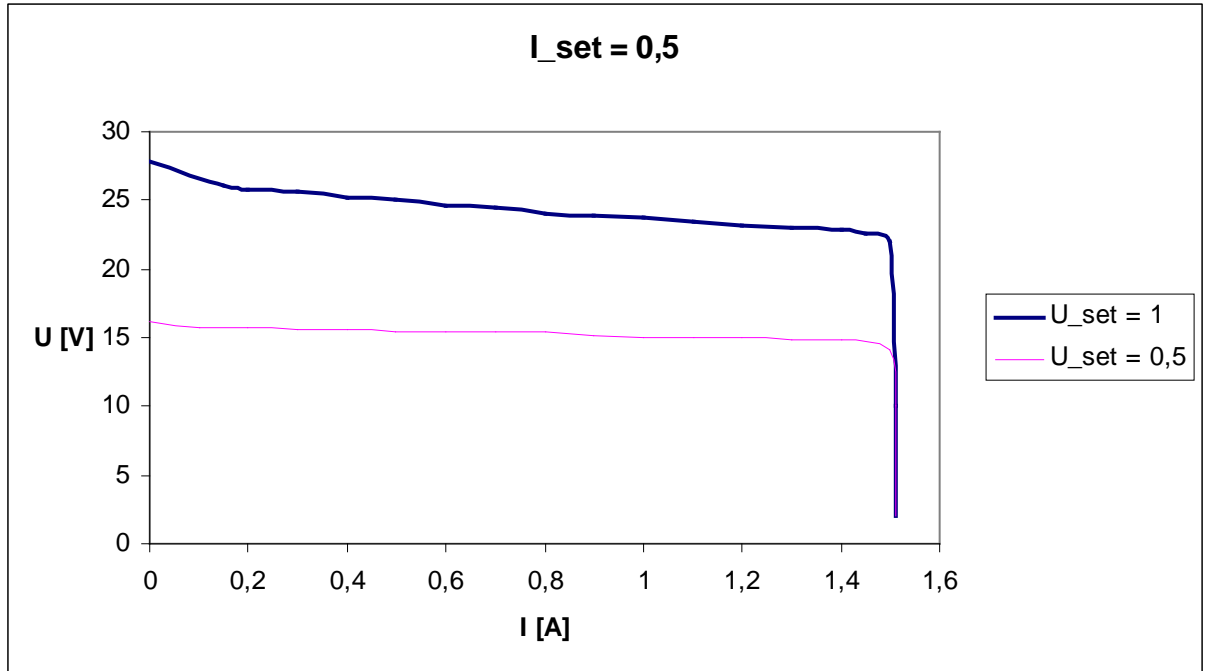
### 7.1 Měření zatěžovacích charakteristik

Jak již bylo zmíněno výše, zatěžovací charakteristika udává závislost výstupního napětí na velikosti proudu tekoucího zátěží. Zatěžovací charakteristika byla změřena při nastavení proudového omezení (set\_I) na maximum a na polovinu. Pro každé z těchto nastavení byla charakteristika změřena pro plné a poloviční výstupní napětí (set\_U). Zatěžovací charakteristika pro proudové nastavení na maximální hodnotu (set\_I = 1) je znázorněna na Obr. 7.1.1.



Obr. 7.1.1 Naměřená zatěžovací charakteristika pro set\_I = 1

Pro poloviční nastavení proudového omezení ( $\text{set}_I = 0,5$ ) zobrazuje zatěžovací charakteristiku Obr. 7.1.2.



Obr. 7.1.2 Naměřená zatěžovací charakteristika pro  $\text{set}_I = 0,5$

## 7.2 Měření zvlnění a činitele stabilizace

Činitel stabilizace vyjadřuje schopnost zdroje udržet stabilní výstupní napětí při změně napětí na vstupu. Činitel stabilizace je pak dán vztahem:

$$S = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{U_{11} - U_{12}}{U_{21} - U_{22}} \quad (4)$$

Kde  $\Delta U_1$  je změna vstupního napětí a  $\Delta U_2$  je změna výstupního napětí.

Měření bylo provedeno pomocí regulovatelného zdroje. Na vstup stabilizátoru bylo přivedeno maximální napětí a výstupní napětí bylo nastaveno značně menší. Výstup regulátoru byl zatížen. Poté byla snížena velikost vstupního napětí a opět byla změřena velikost výstupního napětí. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 7.2.1. V Tab. 7.2.2. jsou naměřené hodnoty zvlnění výstupního napětí a napětí na filtračním kondenzátoru.

Tab. 7.2.1 Naměřené hodnoty pro výpočet čítele stabilizace

$U_{11}$ [V]	30
$U_{12}$ [V]	20
$U_{21}$ [V]	10,3
$U_{22}$ [V]	10,27

Tab. 7.2.2 Hodnoty zvlnění výstupního napětí a napětí na filtračním kondenzátoru.

Zatížení [A]	1,5	2,83
$\Delta U_1$ [V]	2,5	4
$\Delta U_2$ [V]	0,2	1

Dosazením naměřených hodnot do vztahu (4) jsem spočítal čítele stabilizace  $S = 333$

$$S = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} = \frac{U_{11} - U_{12}}{U_{21} - U_{22}} = \frac{30 - 20}{10,30 - 10,27} = \frac{10}{0,03} = 333$$

### 7.3 Účinnost

Účinnost je všeobecně definována jako poměr výkonu  $P_2$  (na výstupu zařízení) a příkonu  $P_1$  (celkový výkon, který zařízení odebírá ze sítě). Pro vyjádření účinnosti v procentech je potřeba tento poměr vynásobit stem. Vztah pro výpočet účinnosti:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Výstupní výkon  $P_2$  v tomto případě odpovídá součinu napětí na zatěžovacím rezistoru a proudu, který zatěžovacím rezistorem prochází. Výkon  $P_1$  je roven součinu proudu vstupního napětí na filtračním kondenzátoru.

V tabulce Tab. 7.3.1 jsou naměřené hodnoty pro výpočet účinnosti při nastaveném maximálním výstupním napětí ( $set\_U = 1$ ) a polovičním výstupním napětí ( $set\_U = 0,5$ ).

Tab. 7.3.1 Hodnoty napětí při plném a polovičním výstupním napětí

set_U	1		0,5	
$I_z$ [A]	1,5	2,8	1,5	2,8
$U_c$ [V]	26,8	24,5	26,7	24,2
$U_z$ [V]	22,6	20	14,8	14

Dosažením hodnot z tabulky Tab. 7.3.1 do vztahu (5) jsem spočítal účinnost zdroje při plném výstupním napětí, pro dvě hodnoty zatěžovacího proudu a při polovičním výstupním napětí také pro dvě hodnoty proudu. Výsledné účinnosti jsou v tabulce Tab. 7.3.2.

Tab. 7.3.2 Účinnosť zdroje při různých zatíženích a při různém výstupním napětí

set_U	1		0,5	
I <sub>Z</sub> [A]	1,5	2,8	1,5	2,8
η [%]	84,32	81,6	55,5	57,8

## 7.4 Měření vnitřního odporu

Každý reálný zdroj má vlastní vnitřní odpor  $R_i$ . Dodává-li zdroj proud do obvodu, vzniká na jeho vnitřním odporu úbytek napětí. Výstupní napětí zdroje je o tento úbytek sníženo. Vnitřní odpor zdroje by proto měl být co nejmenší. Vnitřní odpor lze určit ze změny výstupního napětí v závislosti na změně proudu. Vnitřní odpor se pak určí ze vztahu:

$$R_i = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} \quad (6)$$

Při měření vnitřního odporu bylo nejprve změřeno výstupní napětí  $U_{20}$  zdroje bez připojené zátěže (tedy  $I_{20} = 0$ ). Poté byl zdroj zatížen a byl změřen proud  $I_{2Z}$  a výstupní napětí  $U_{2Z}$ . Toto měření jsem provedl pro plné výstupní napětí ( $\text{set\_U} = 1$ ) a poloviční výstupní napětí ( $\text{set\_U} = 0,5$ ). Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 7.4.1.

Tab. 7.4.1 Naměřené hodnoty pro výpočet vnitřního odporu zdroje

set_U	0,5	1
$U_{20}$	15,8	28,4
$U_{2Z}$	14,2	25,8
$I_{20}$	0	0
$I_{2Z}$	2	2

Dosažením do vstahu (6) jsem spočítal vnitřní odpor zdroje pro dvě hodnoty výstupního napětí.

$$R_i = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} = \frac{U_{20} - U_{2Z}}{I_{2Z} - I_{20}} = \frac{28,4 - 25,8}{2 - 0} = 1,3\Omega$$

$$R_i = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} = \frac{U_{20} - U_{2Z}}{I_{2Z} - I_{20}} = \frac{15,8 - 14,2}{2 - 0} = 0,8\Omega$$

## 8 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření regulovatelného zdroje napětí s nastavitelným proudovým omezením. Různé možnosti obvodových zapojení regulátoru jsem popsal v kapitole 3. Je zde i popsán integrovaný stabilizátor LM723, který jsem zvolil jako základ celého zapojení. Celé zapojení a podrobný popis jeho funkce je popsán v kapitole 4. Před samotnou stavbou jsem nejprve simuloval funkci zapojení pomocí programu PSpice. Provedl jsem časovou (tranzientní), stejnosměrnou a stejnosměrnou s parametrickou analýzou. Popis simulací a výsledky z těchto simulací jsou obsaženy v kapitole 5.

Po ověření funkčnosti zapojení jsem navrhl, pomocí programu Eagle, jednostrannou desku plošných spojů (motiv desky a jejího osazení je v kapitole 6) a na této desce jsem postavil jeden funkční vzorek regulovatelného zdroje napětí. Na tomto funkčním vzorku jsem provedl měření vlastností navrženého zapojení. Měření a jeho výsledky jsou popsány v kapitole 7.

Jak vyplývá z výsledků měření, má navržené zapojení následující vlastnosti. Výstupní napětí je možno regulovat v rozsahu od 2V do cca 28V. Velikost maximálního výstupního napětí byla do značné míry ovlivněna síťovým transformátorem, použitým při měření. Proudové omezení je nastavitelné v rozsahu od 20mA do 2,88A. Velikost maximální hodnoty proudu lze jednoduše změnit změnou rezistoru R15 (popřípadě R14). Činitel stabilizace regulátoru je  $S = 333$ .

Zvlnění výstupního napětí a napětí na filtračním kondenzátoru je relativně velké. Do značné míry bylo ale toto zvlnění ovlivněno vlastnostmi transformátoru, který byl pro měření použit. Zvlnění bylo měřeno při nastaveném maximálním výstupním napětí. Sekundární napětí transformátoru s rostoucím zatížením ale značně klesalo. Zvlnění by mohlo být sníženo použitím většího filtračního kondenzátoru.

Dále jsem také změřil zatěžovací charakteristiky pro různá nastavení proudového omezení a pro různá nastavení výstupního napětí. V porovnání se zatěžovacími charakteristikami ze simulací, vychází reálné naměřené charakteristiky poněkud hůře.

Z naměřených hodnot jsem také spočítal účinnost zdroje v různých režimech. Nejvyšší účinnosti dosahuje zdroj při maximálním výstupním napětí. Při maximálním napětí a odebíraném proudu 1,5A je účinnost zdroje 84,32%. Při polovičním výstupním napětí je účinnost zdroje už jen 55,4%. Se snižujícím se výstupním napětím, klesá účinnost zdroje a



zvyšují se tepelné ztráty na výkonových tranzistorech. Nejnižší účinnost zdroj vykazuje při nejnižším výstupním napětí a maximálním odebíraném proudu. V tomto režimu jsou také největší tepelné ztráty na výkonových rezistorech. Tyto skutečnosti odpovídají teoretickým předpokladům.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Hammerbauer, J.: *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*, Plzeň 1996
- [2] Vlček, J.: *Konstrukční návody*, Praha 1998
- [3] [http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/ens2t/t8/t2\\_8\\_1\\_0.php](http://www.edunet.souepl.cz/~weisz/dilna/ens2t/t8/t2_8_1_0.php)
- [4] <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1858-Stejnoserne-zdroje-napeti.html>
- [5] <http://www2.eletronica.org/hack-s-dicas/regulador-lm7805/view>
- [6] <http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1815-Napajeci-stabilizovany-regulovatelny-zdroj-s-obvodem-L200.html>
- [7] Datasheet obvodu LM723 <http://www.ges.cz/sheets/1/lm723.pdf>
- [8] Datasheet obvodu LM317 [http://www.ges.cz/sheets/1/lm317t\\_st.pdf](http://www.ges.cz/sheets/1/lm317t_st.pdf)
- [9] Datasheet obvodu L200 <http://www.ges.cz/sheets/1/l200.pdf>

## Přílohy

### Příloha A – Naměřené hodnoty při měření zatěžovacích charakteristik.

Naměřené hodnoty při proudovém omezení nastaveném na maximální proud (set\_I = 1).

set\_U = 1

U [V]	28,4	27,5	27	26,9	26,8	26,7	26,6	26,6	26,6	26,4	26,3	26,3	26,2	26,1	26,1	26,1
I [A]	0	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
U [V]	26	26	25,9	25,8	25,8	25,8	25,7	25,7	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	24,8	10	2
I [A]	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,82	2,83	2,83

set\_U = 0,5

U [V]	15,8	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3	15,1	15	15	14,9	14,9	14,8	14,6	14,6
I [A]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7
U [V]	14,4	14,3	14,2	14,1	14	14	14	13,9	13,8	13,5	10	2				
I [A]	1,8	1,9	2	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,81	2,82				

Naměřené hodnoty při proudovém omezení nastaveném na polovinu (set\_I = 0,5).

set\_U = 1

U [V]	28,4	27,5	27	26,9	26,8	26,7	26,6	26,6	26,6	26,4	26,3	26,3	26,2	26,1	26,1	26,1
I [A]	0	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
U [V]	26	26	25,9	25,8	25,8	25,8	25,7	25,7	25,7	25,6	25,5	25,5	25,4	24,8	10	2
I [A]	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,82	2,83	2,83

set\_U = 0,5

U [V]	15,8	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4	15,3	15,1	15	15	14,9	14,9	14,8	14,6	14,6
I [A]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,7
U [V]	14,4	14,3	14,2	14,1	14	14	14	13,9	13,8	13,5	10	2				
I [A]	1,8	1,9	2	2,1	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,81	2,82				