VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

DVOJITÝ DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ NAPÁJECÍ ZDROJ

DOUBLE DIGITALLY CONTROLLABLE DC POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE MARTIN KOTOL

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. ROMAN ŠOTNER, Ph.D

SUPERVISOR

BRNO, 2012

ORIGINÁLNÍ ZADÁNÍ

ABSTRAKT

V zadání bakalářské práce je uvedena analýza zapojení napájecích zdrojů v OrCAD. Na základě této analýzy, jsou vybrány nejvhodnější napájecí zdroje, které jsou modifikovány na parametry 2x 0-30V/ 0-3A. Uvedená zapojení napájecích zdrojů jsou testována simulacemi na počítači a navržena koncepce digitálního řízení.

Digitální řízení napájecího zdroje je navrženo prostřednictvím digitálních potenciometrů, které jsou ovládány mikroprocesorem. K mikroprocesoru, jsou dále připojeny měřící jednotky pro měření výstupního napětí a proudu. K napájecímu zdroji, je možno s výhodou připojit klávesnici a displej pro pohodlnou komunikaci.

Na základě výše uvedeného návrhu je vyroben prototyp a navržena metodika testování zdroje. Aplikací metodiky testování prototypu napájecího zdroje jsou získány výsledky měření, které jsou porovnány s parametry simulací na počítači a ověřeno digitální řízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí zdroj, operační zesilovač, proudová pojistka, stabilizátor, usměrňovač, LCD displej, mikroprocesor, klávesnice

ABSTRACT

The award of the thesis is an analysis of the involvement of power supplies in OrCAD.Based on this analysis, the best are selected, power supplies, which are modified on the performance of 2x 0-30V / 0-3A. The connection of power supplies are tested incomputer simulations and proposed the concept of digital control.

Digital control power supply is designed by digital potentiometers that are controlled by a microprocessor. The microprocessor is also connected to the measuring unit for measuring the output voltage and current. The power supply is advantageously possibleto connect a keyboard and display for convenient communication.

Based on the above proposal is to prototype and test a methodology for resources.Applying the methodology of testing a prototype power source are obtainedmeasurement results are compared with parameters on a computer simulation and verified by digital control.

KEYWORDS

Power supply source, operational amplifier, current fuse, stabilizer, rectifier, LCD display, microprocessor, keyboard

KOTOL, M, *DVOJITÝ DIGITÁLNĚ ŘÍZENÝ NAPÁJECÍ ZDROJ*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 66 s., 8 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Roman Šotner, Ph.D

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Dvojitý digitálně řízený napájecí zdroj“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně dne 24.5.2012 .....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce ing. Romanu Šotnerovy, Ph.D za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 24.5.2012 .....

(podpis autora)

Obsah

Seznam obrázků 7
Úvod 8
1 TEORIE LABORATORNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE 9
2 Transformátor 10
3 Usměrňovač 11
4 Stabilizátory 11
5 Navržené zdroje 12
5.1 Zdroj č.1 13
5.1.1 Napěťový zesilovač 14
5.1.2 Proudová pojistka 15
5.1.3 Počítačová analýza zdroje 18
5.2 Zdroj č.2 21
5.2.1 Napěťový zesilovač 21
5.2.2 Počítačová analýza zdroje 23
5.3 Zdroj č.3 25
5.3.1 Počítačová analýza zdroje 28
5.4 Zdroj č.4 31
5.4.1 Napěťový a proudový zesilovač 31
5.4.2 Počítačová analýza zdroje 34
6 Návrh usměrňovače s filtrem 36
7 Návrh zdroje č.2 37
7.1 Referenční napětí 37
7.2 Proudová pojistka 38
8 Řídící část zdroje 40
8.1 Parametry mikroprocesoru ATmega 644 40
8.2 SPI sběrnice 41
8.3 Digitální potenciometr 42
8.4 LCD displej 44
8.5 Popis řídící části 46
8.6 Řídící program mikroprocesoru 46
8.7 Metodika měření prototypu laboratorního zdroje 49
8.8 Výsledky měření 49

9 Závěr 53
10 LITERATURA 54
11 Seznam symbolů, veličin a zkratek.....56
12 Seznam příloh 58

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1: Základní uspořádání laboratorního zdroje 10
Obr.2: Celkové zapojení regulační části zdroje 14
Obr.3: Napěťový zesilovač 15
Obr.4: Nastavitelná proudová pojistka 17
Obr.5: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V 18
Obr.6: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V 18
Obr.7: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V 19
Obr.8: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A 19
Obr.9: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A 20
Obr.10: Celkové zapojení regulační části zdroje 22
Obr.11: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V 23
Obr.12: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V 24
Obr.13: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V 24
Obr.14: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A 25
Obr.15: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A 25
Obr.16: Celkové zapojení regulační části zdroje 27
Obr.17: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V 28
Obr.18: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V 28
Obr.19: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V 29
Obr.20: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A 29
Obr.21: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A 30
Obr.22: Celkové zapojení regulační části zdroje 33
Obr.23: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V 34
Obr.24: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V 34
Obr.25: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V 35
Obr.26: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A 35
Obr.27: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A 36
Obr.28: Schéma zapojení usměrňovače s filtrem 37
Obr.29: Celkové zapojení regulační části zdroje 39
Obr.30: Blokové schéma řídící části zdroje 40
Obr.31: Propojení master-slave na sběrnici SPI (převzato z [19]) 41
Obr.32: Blokové schéma digitálního potenciometru AD5290 (převzato z [20]) 42
Obr.33: Vývojový diagram ovládacího programu mikroprocesoru 47
Obr.34: Schéma řídící části zdroje 48
Obr.35: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 30 V 50
Obr.36: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 30 V 50
Obr.37: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 24 V 51
Obr.38: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 24 V 51
Obr.39: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 6 V 52
Obr.40: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 6V 52

Úvod

Tématem mojí bakalářské práce je dvojitý digitálně řízený napájecí zdroj s parametry 0 -30 V, 0 – 3 A. Z mnoha prostudovaných zapojení laboratorních zdrojů jsem vybral čtyři zapojení. Tato zapojení byla doplněna o regulaci výstupního napětí a regulovatelnou proudovou pojistku. Takto upravená zapojení jsem simuloval v programu OrCAD. U všech čtyř zapojení, byla provedena simulace zatěžovací charakteristiky pro výstupní napětí 30 V, 24 V a 6 V. Pro tato výstupní napětí, byla také testována nastavitelná proudová pojistka na hodnoty 3 A, 1,4 A, 0,75 A a 0,4 A. Z těchto čtyř simulovaných zapojení jsem vybral jedno zapojení, vhodné k realizaci.

K uvedené variantě laboratorního zdroje jsem navrhnul vhodně dimenzovaný usměrňovač se silovou větví a dvěma větvemi pomocného napájecího napětí. Pomocná napětí jsou využívána k napájení operačních zesilovačů a mikroprocesoru. Silová větev slouží pro napájení výkonových prvků zdroje

Z důvodu příznivé ceny a dostačujícího výkonu jsem vybral k digitální řízení zdroje mikroprocesor od firmy Atmel ATMEGA644. Řízení výstupního napětí je realizováno digitálním potenciometrem. Stejně tak bude realizována nastavitelná proudová pojistka. K mikroprocesoru je připojena klávesnice, pomocí které se nastavují požadované výstupní hodnoty zdroje a to hodnota výstupního napětí a hodnota výstupního proudu, při které reaguje proudová pojistka. K mikroprocesoru je připojen LCD displej, na kterém jsou zobrazeny výstupní parametry zdroje.

1 TEORIE LABORATORNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

Napájecí zdroje jsou elektrická zařízení, používaná v laboratorních i průmyslových podmínkách v širokém rozsahu aplikací. Napájecí zdroje jsou konstruovány pro různé velikosti proudů a napětí a to v provedení stejnosměrném i střídavém [1], [2], [3] a slouží k dodávání požadovaných hodnot napájecího napětí a proudu do zařízení. Požaduje-li zařízení symetrické napájení, lze toho docílit zapojením dvou zdrojů napětí do série. Symetrické napájení vyžadují některé integrované obvody a operační zesilovače.

Napájecí zdroje se dělí takto [2]:

a) Podle typu dodávaného výkonu na
   - zdroje střídavých napětí a proudů,
   - zdroje stejnosměrných napětí a proudů.

b) Podle fyzikálního typu činnosti na
   - elektromechanické (generátory, dynama, alternátory),
   - elektrochemické (primární a sekundární suché články),
   - zdroje využívající elektrickou rozvodnou síť (elektronické),
   - jiné.

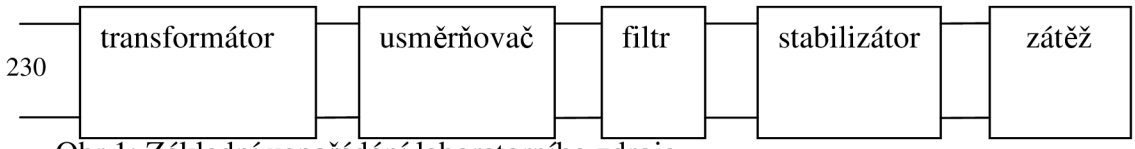
c) Podle možnosti regulace na
   - regulovatelné,
   - neregulovatelné.

d) Podle povahy vnitřních dějů na
   - zdroje spojité (s analogovou nebo digitální regulací),
   - zdroje nespojité (spínané).

e) Podle primárního zdroje el. energie na
   - autonomní napájecí zdroje (elektrochemické zdroje, solární, jaderné články),
   - využívající elektrické energie jiného primárního zdroje.

Základní uspořádání sítového zdroje je znázorněno na obr.1 skládá se z transformátoru, který mění síťové střídavé napětí 230 V na nižší hodnotu vhodnou pro další úpravu a zároveň galvanicky odděluje zdroj od napájecí sítě. Další částí je usměrňovač, který usměrní protékající střídavý proud a napětí na pulzní, které se musí dále upravit ve vyhlazovacím filtru, vyhlazujícím 50 Hz. Vyhlazovací filtr hromadí elektrický náboj a zásobuje zdroj energií při poklesu pulzního napětí v usměrňovači. Vyhlazovací filtr je ve většině případů tvořen kondenzátorem či jejich více-násobnou paralelní kombinací pro zmenšení rozkmitu výstupního napět. Nezbytnou součástí každého laboratorního zdroje je stabilizátor, který má za úkol udržovat výstupní napětí na stejné úrovni při kolísání proudového odběru spotřebiče a při kolísání vstupního napětí stabilizátoru. Nutnou součástí síťového zdroje jsou ovládací prvky, pomocí nichž jsou nastavovány požadované hodnoty výstupního napětí a hodnoty

proudového omezení. Ke zdroji jsou připojena měřidla pro kontrolu správného nastavení výstupního napětí, proudového omezení, aktuálního odběru proudu, dodávaného výkonu atd.



Obr.1: Základní uspořádání laboratorního zdroje

2 Transformátor

Transformátor je netočivý elektrický stroj [5], který mění velikost vstupního střídavého napětí a proudu bez změny kmitočtu. Skládá se ze dvou cívek, které tvoří primární a sekundární vynutí. Primární vinutí je vstupní a je napájeno ze zdroje střídavého proudu. Sekundární vynutí je výstupní a odebíráme z něj většinou napětí jiné hodnoty. Tyto dvě cívky jsou navinuty na jádru z plechů s příměsí křemíku a vytváří uzavřený magnetický obvod.

Má-li výstupní vinutí N_2 závitů indukuje se v něm napětí o velikosti U_2, kde *u* je napětí indukované v jednom závitu

$$U_2 = uN_2 . \tag{1}$$

Má-li vstupní vinutí N_1 závitů indukuje se v něm napětí o velikosti U_1

$$U_1 = uN_1 . \tag{2}$$

Poměr indukovaných napětí na sekundárním a primárním vynutí transformátoru je roven počtu závitů a nazýváme ho převodní poměr transformátoru

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} . \tag{3}$$

Protéká-li sekundárním vynutím proud I_2, tak spotřebič který je na toto vynutí připojen odebírá z tohoto vynutí činný výkon

$$P_2 = U_2 I_2 . \cos\varphi_2 . \tag{4}$$

Tento výkon musí transformátor přivést ze zdroje napětí U_1 na který je připojeno primární vynutí transformátoru

$$P_1 = U_1 I_1 . \cos\varphi_1 . \tag{5}$$

Pokud zanedbáme ztráty v transformátoru, můžeme napsat že:

$$P_1 = P_2 . \tag{6}$$

$$U_1 I_1 . \cos\varphi_1 = U_2 I_2 . \cos\varphi_2 . \tag{7}$$

Pokud se $\cos\varphi_1$ rovná $\cos\varphi_2$, dostaneme

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 , \tag{8}$$

z tohoto pak

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{p} \quad . \tag{9}$$

3 Usměrňovač

Většina elektrických zařízení, která pro svou činnost potřebují stejnosměrné napájení je napájena ze střídavé rozvodné sítě. Proto, aby mohly těmto zařízením dodat stejnosměrné napětí a proudy potřebujeme usměrňovače. Usměrňovače dělíme následujícím způsobem [6]:

Jednofázové

- jednocestné,
- dvoucestné,
- můstkové.

Trojfázové

- jednocestné (uzlové),
- můstkové.

Podle řiditelnosti

- řízené,
- neřízené.

V této práci se budu zabývat pouze usměrňovači jednofázovými.

4 Stabilizátory

Stabilizátor napětí je dvojbran, který splňuje vybrané funkční požadavky [7].

Mezi tyto požadavky se řadí co nejmenší (v ideálním případě nulový) přenos změn vstupního napětí na výstup stabilizátoru. Obvod by měl mít nepatrný přenos zvlnění. Mezi dobré stabilizátory se řadí stabilizátory s hodnotou zvlnění P= -80 dB kde ΔU_2 je výstupní zvlnění a ΔU_1 je vstupní zvlnění

$$P = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}, I_2 = konst \quad . \tag{10}$$

$$P' = 20 log P \quad . \tag{11}$$

Dalším důležitým požadavkem stabilizátoru je jeho výstupní odpor R_0 , který má být co nejmenší a v ideálním případě nulový. Čím je výstupní odpor menší tím je stabilizátor méně závislý na odběrovém proudu. Pokud je U_2 je výstupní napětí, U_1 je vstupní napětí pak lze výstupní odpor zjistit dle vztahu (12)

$$R_0 = \frac{U_2}{I_2}; U_1 = konst \quad . \tag{12}$$

Důležitým ekonomickým požadavkem stabilizátoru je vhodný přenos napětí B, který určuje úbytek napětí na stabilizátoru a ovlivňuje jeho účinnost. Kvalitní stabilizátory mají úbytek napětí 2 V ale mohou mít i kolem 0,2 V. Pokud je U_2 je výstupní napětí, U_1 je vstupní napětí pak platí

$$B = \frac{U_2}{U_1} \leq 1 \quad . \tag{13}$$

Nezbytným parametrem je teplotní a časová stálost. Vyjadřuje teplotním součinitelem výstupního napětí K. Když je U_1=konst. a I_2=konst pak platí

$$K = -(\Delta U_1 2)/\Delta\vartheta . 100[\%] \; . \tag{14}$$

Stabilizátory dělíme takto [7]:

a) podle způsobu zapojení
   - paralelní
   - sériové

b) podle linearity
   - lineární
   - nelineární

c) podle zpětné vazby
   - stabilizátory se zpětnou vazbou
   - stabilizátory bez zpětné vazby

d) podle počtu svorek
   - stabilizátory třísvorkové
   - stabilizátory vícesvorkové

e) podle možnosti jejich nastavení
   - stabilizátory nastavitelné
   - stabilizátory nestavitelné

f) podle druhu napětí
   - stabilizátory pro kladné napětí
   - stabilizátory pro záporné napětí

5 Navržené zdroje

5.1 Zdroj č.1

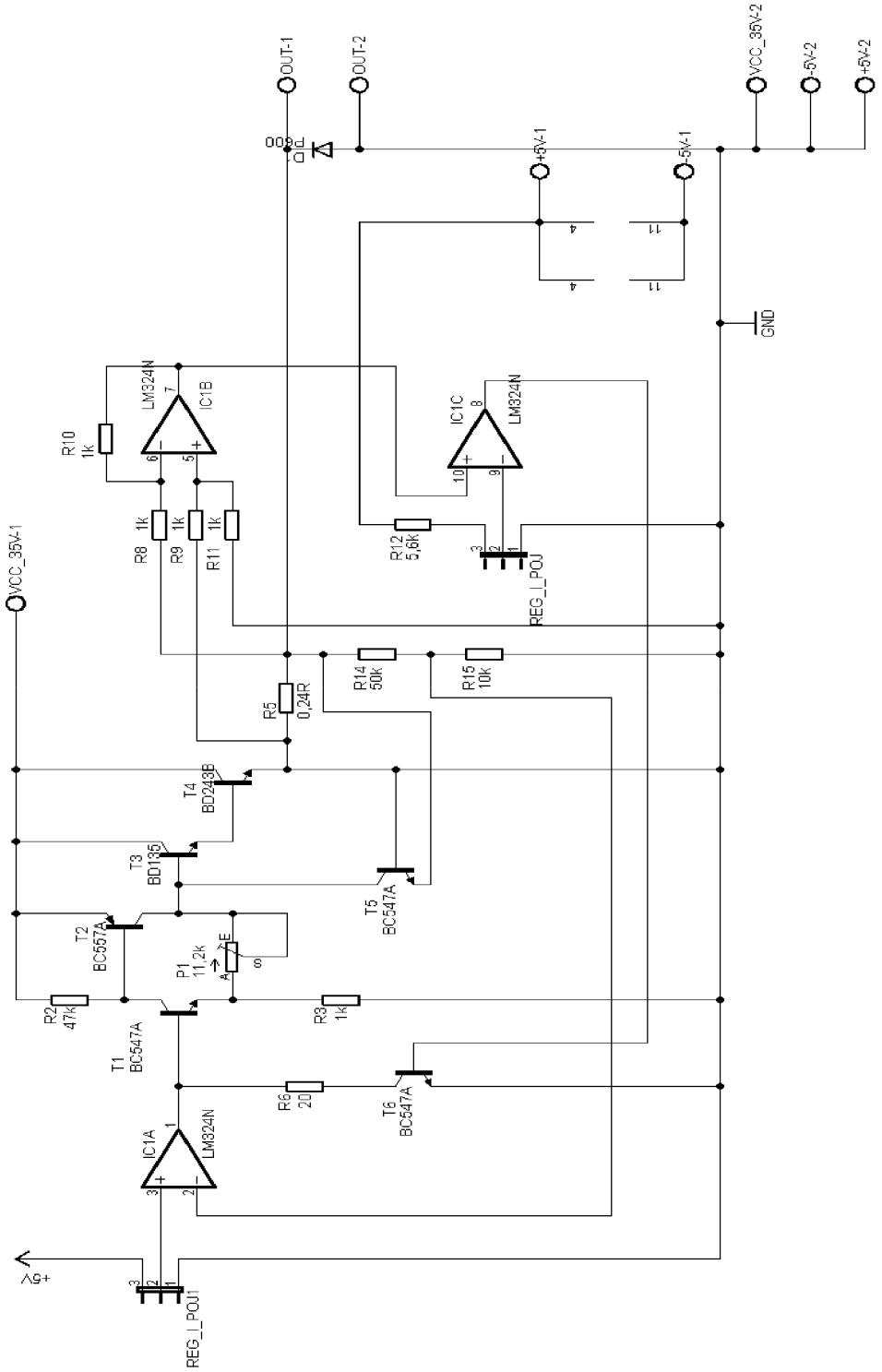
Operační zesilovač tvoří v kombinaci s tranzistory Q_1 a Q_2 výkonový zesilovač v Darlingtonově zapojení. To je patrné z obr.4. V optimálním případě $U_{R7} = U_{REF}$ a proud zpětnovazebním děličem je [4]

$$I_d = \frac{U_{REF}}{R_7} = \frac{5}{10.10^3} = 0{,}5mA \quad . \tag{15}$$

Výstupní napětí je rovno [4]

$$U_0 = I_d \cdot (R_7 + R_6) = U_{REF}.\left(1 + \frac{R_6}{R_7}\right) = 5.\left(1 + \frac{50.10^3}{10.10^3}\right) = 30V \quad . \tag{16}$$

Uvedené zapojení je v podstatě neinvertující výkonový zesilovač referenčního napětí Darlingtonovým zapojením tranzistorů. Takovéto zapojení umožňuje řídit až několikaampérové proudy výstupním proudem operačního zesilovače. Z důvodu velkého napěťového namáhání operačního zesilovače, ke kterému by docházelo při maximálním výstupním napětí, je jeho maximální výstupní napětí omezeno napájecím napětím 5 V na 3,8 V. To je saturační napětí operačního zesilovače při napájecím napětí 5 V. Další napěťové zesílení je řešeno napěťovým zesilovačem, který bude rozebrán následovně. Dioda D_1 na výstupu stabilizátoru zastává ochrannou funkci v případě připojení záporného napětí na výstup a nebo připojení induktivní zátěže. Její maximální proud je 6 A.



Obr.2: Celkové zapojení regulační části zdroje

5.1.1 Napěťový zesilovač

Je-li maximální výstupní napětí z operačního zesilovače 3,8 V a výstupní napětí zdroje má být 30 V musí napěťový zesilovač toto napětí zesílit přibližně 8x.

Napěťový zisk tohoto napěťového zesilovače lze určit dle [8]

$$R_{31} = R_3 . K_u - R_3 = 1.10^{3.8} - 1.10^3 = 7.10^3\ \Omega \quad . \qquad (17)$$

Hodnoty odporů R_3 a R_{31} na obr.2 byly voleny s cílem, nastavit úroveň zesilovacího činitele na hodnotu 8. Odpor R_3 jsem zvolil 1 kΩ a pro odpor R_{31} logicky vyplývá hodnota ze vzorce (17) 7 kΩ

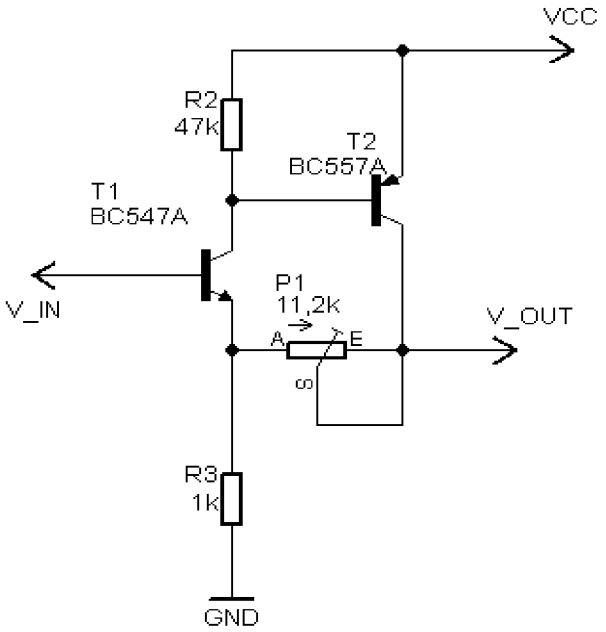
Vstupní odpor zesilovače spočítám proto, abych zjistil úroveň ovlivnění výstupu operačního zesilovače [8]

$$R_{in} = h_{feQ6} . S_1 . R_3 . R_2 = 100.0{,}05.1.10^{3.47} . 10^3 = 235\ M\Omega \quad . \qquad (19)$$

Proudový zesilovací činitel h_{fe6} tranzistoru BC 547 je 100-400 dle typu A, B, C, hodnota odporu R_2 byla zvolena z hodnot řady E12 z důvodu zvýšení vstupního odporu napěťového zesilovače nad 200 MΩ aby nedocházelo k zatěžování operačního zesilovače, S_1 a S_2 je sklon křivky zesílení tranzistoru 0,05 [jednotka = 1/Ohm] [8].

Výstupní odpor R_{OUT} napěťového zesilovače můžeme spočítat takto [8]

$$R_{OUT} = \frac{R_{31} . R_3}{S_1 + S_2 . R_{3.} R_3} = \frac{7.10^{3.1} . 10^3}{0{,}05 + 0{,}05.47.10^{3.1} . 10^3} = 2{,}98\Omega \quad . \qquad (20)$$



Obr.3: Napěťový zesilovač

5.1.2 Proudová pojistka

Na snímacím rezistoru R_5 vzniká úbytek napětí a v případě že tento úbytek napětí dosáhne hodnoty 0,74 V otevře se tranzistor Q_3 a "odbudí " bázi tranzistoru Q_1. Chci-li aby

úbytek napětí byl 0,74 V na rezistoru R_5 právě při maximálním proudu 3 A musím dosadit hodnoty do Ohmova zákona

$$R_5 = \frac{U_{R5}}{I_{MAX}} = 0,\frac{74}{3} = 0,25\Omega \quad . \tag{21}$$

Tato proudová pojistka je pevně nastavena a nejde dále měnit to je pro laboratorní zdroj velmi nepraktická „proudová pojistka poslední záchrany“. U laboratorních zdrojů je většinou stanoven požadavek použití nastavitelné proudové pojistky, která je také součástí zadání mé bakalářské práce. Návrh řešení nastavitelné pojistky je následující.

Jak je patrno z obr.3 jsou použity dva operační zesilovače. Jeden slouží jako rozdílový zesilovač napětí ze snímacího odporu R_5 a druhý jako komparátor. Na neinvertující vstup operačního zesilovače přivádím napětí na snímacím rezistoru R_5 a na invertující vstup přivádím napětí za snímacím rezistorem. Nastavovací odpory rozdílového zesilovače jsou všechny voleny 1 kΩ . Tím je zajištěn rozdílovým zesilovačem přenos 1. Jeho výstupní napětí je rovno [4]

$$U_0 = (U_2 - U_1).\frac{R_{10}}{R_8} = 0,74.\frac{1.10^3}{1.10^3} = 0,74V \quad . \tag{22}$$

Rozdílové napětí je na odporu jen v případě, že jím prochází maximální proud 3 A.

Rozdílové napětí je přivedeno na druhý operační zesilovač, který má funkci komparátoru. Na neinvertujícím vstupu je přítomno rozdílové napětí z předchozího operačního zesilovače. Toto napětí je porovnáváno s referenčním napětím, které je přivedeno na invertující vstup operačního zesilovače. Napájení komparátoru je záměrně nesymetrické, protože pokud, je na neinvertujícím vstupu nižší napětí než na invertujícím vstupu objevilo by se na výstupu záporné napětí. Na kladnou napájecí svorku je přivedeno kladné napájecí napětí +5 V a na zápornou napájecí svorku je připojena zem. Referenční napětí, které je přivedeno na invertující vstup, je odvozeno od napájecího napětí +5 V přes odporový dělič následujícím způsobem. Vím-li, že maximální úbytek napětí na snímacím odporu R_5 je 0,74 V

$$U_{max} = R_5.I_{max} = 0,25.3 = 0,74V \quad , \tag{23}$$

tak na potenciometru P_1 musí být také napětí 0,74 V. Hodnotu potenciometru zvolím 1 kΩ. Z tohoto je jasné, že na odporu R_{12} musí být napětí 4,26 V. Z předchozího mohu určit proud protékající potenciometrem, pokud je vytočený na maximální hodnotu 1 kΩ

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{P_1} = \frac{0.74}{1.10^3} = 0,74mA \quad . \tag{24}$$

Za předpokladu, že vstupní odpor operačního zesilovače se blížící nekonečnu, pak to odporový dělič prakticky neovlivní a lze vypočítat hodnotu odporu R_{12}. Z předchozího lze určit proud procházející potenciometrem, pokud je nastaven na maximální hodnotu 1 kΩ.

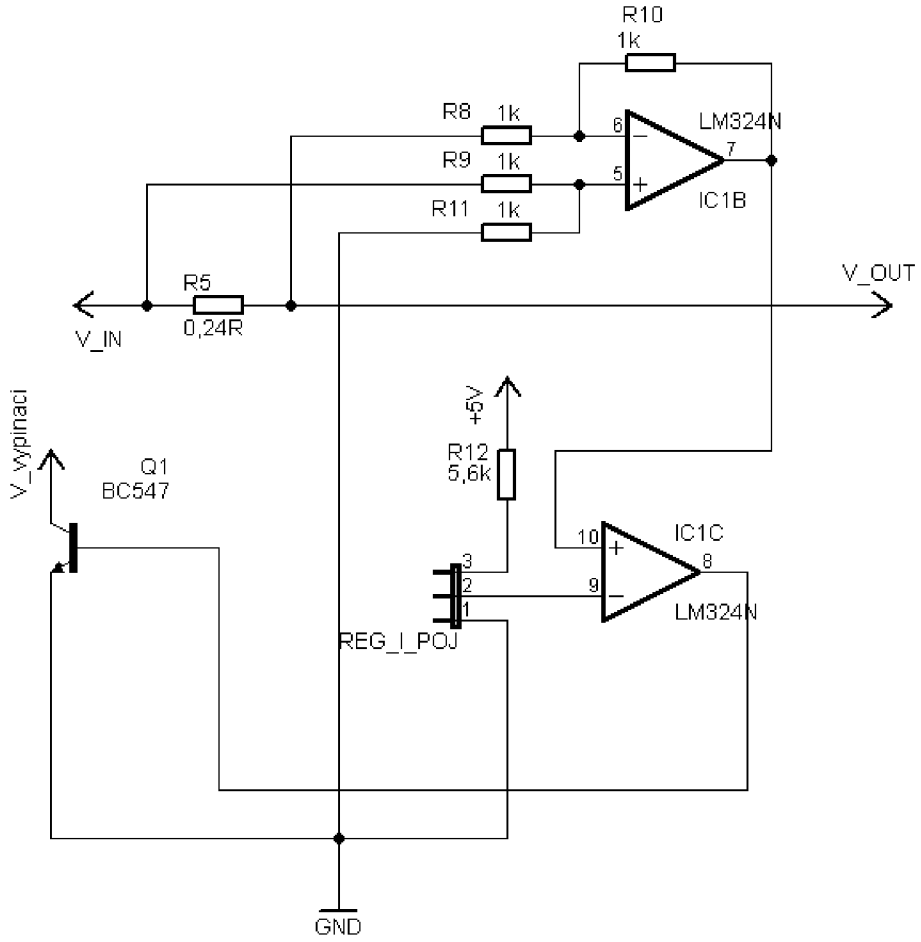
$$R_{12} = \frac{U_{R12}}{I_d} = \frac{4,26}{0,74.1.10^3} = 5756\Omega \quad . \tag{25}$$

Z řady E12 jsem zvolil odpor nejbližší hodnoty 5k6.

Komparátor porovnává napětí, které je přiváděno na invertující a neinvertující vstup. Pokud se hodnota na neinvertujícím vstupu rovná nebo je vetší než hodnota napětí na

invertujícím vstupu, tak se na výstupu operačního zesilovače objeví napětí, které sepne transistor Q_4 a ten následné zkratuje výstup operačního zesilovače, přes který je přivedeno vstupní napětí na napěťový zesilovač. Tranzistor Q_4 je činný jako spínač. Pokud je na bázi přivedeno napětí, tak je zkratován výstup operačního zesilovače. Když na bázi není žádné napětí, tak obvod není ovlivňován. Klesne-li výstupní napětí na hodnotu 1 V, tak se tranzistor Q_4 zavře a znovu započne růst výstupního proudu. Totožné řešení proudové pojistky jsem použil i u ostatních stabilizátorů, a proto již dále nebude zmiňováno.

.

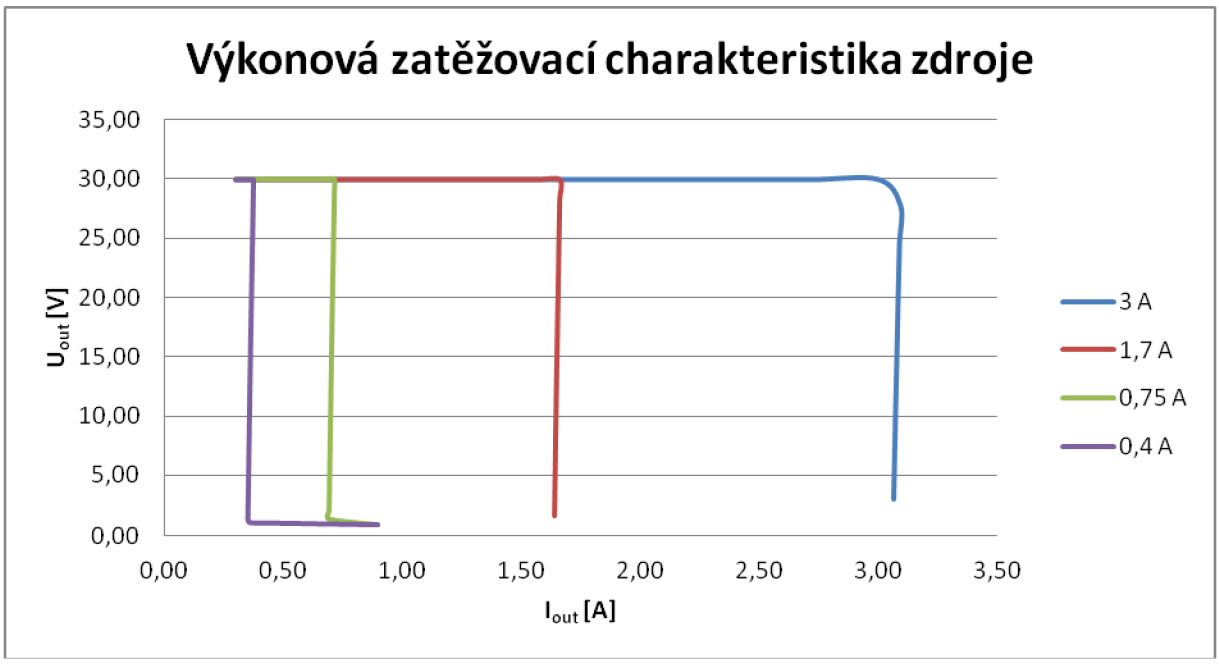


Obr.4: Nastavitelná proudová pojistka

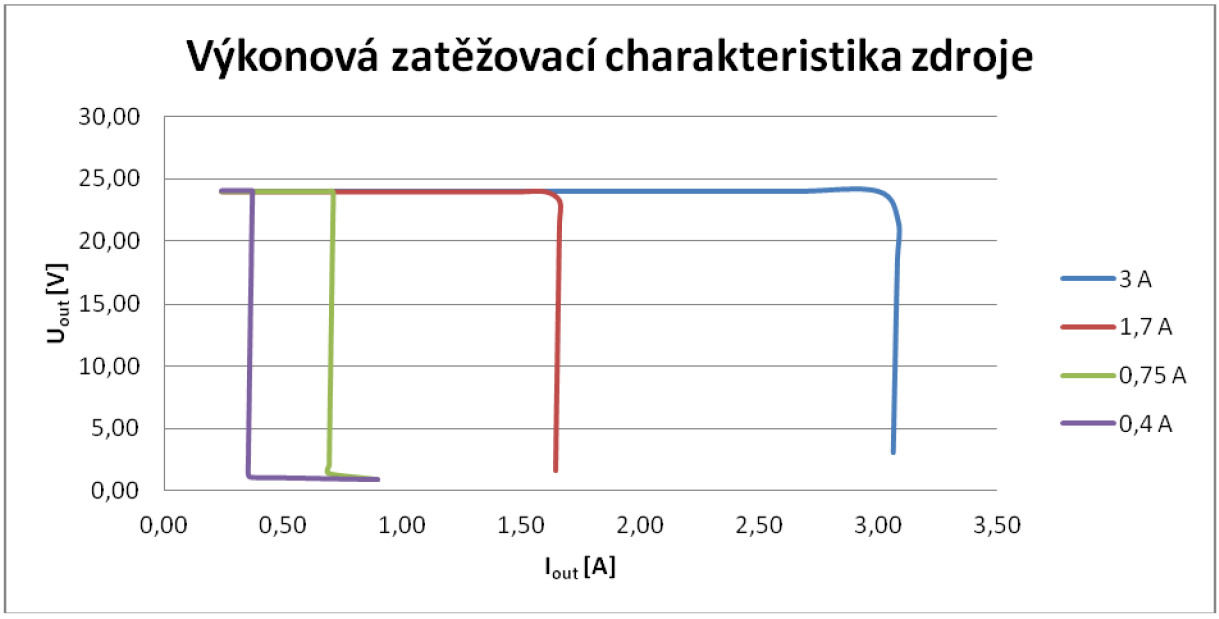
5.1.3 Počítačová analýza zdroje

K analýze zdroje byl využit program OrCAD PSpice

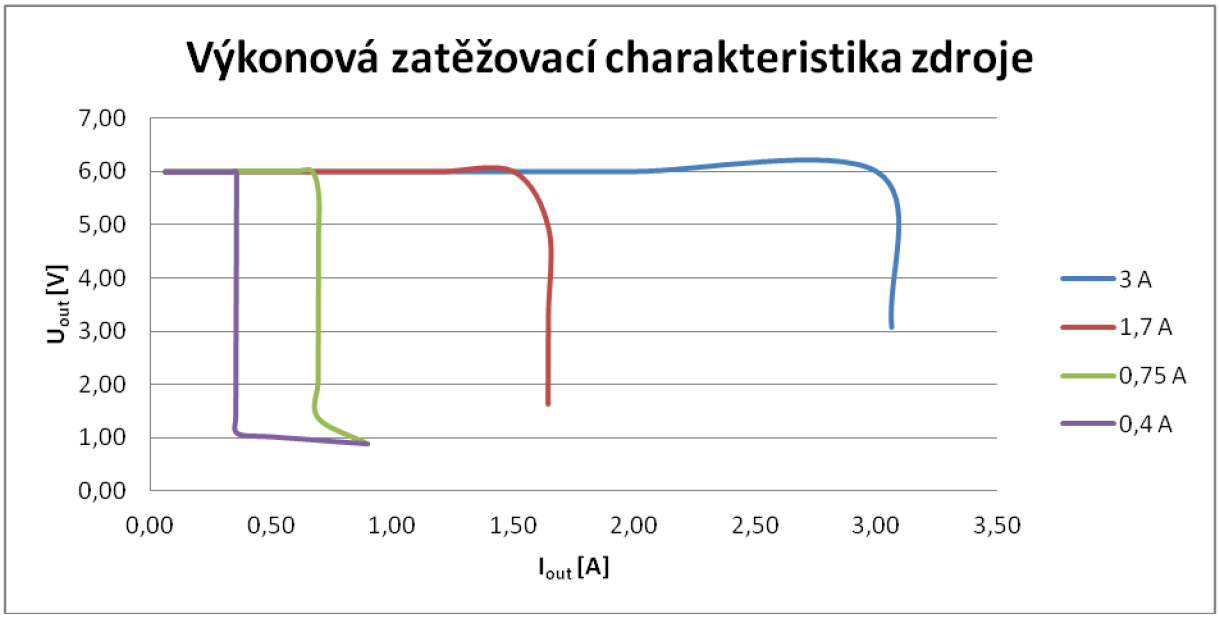
Z obr. 5, 6, 7 je patrná reakce proudové pojistky, která byla nastavena na hodnoty 0,4 0,75 A 1,7 A a 3 A z prvních tří křivek je patrné reakce proudové pojistky, která přepla zdroj do proudového režimu a u čtvrté křivky pro 3 A reaguje pevná proudová pojistka, která zdroj vypíná.



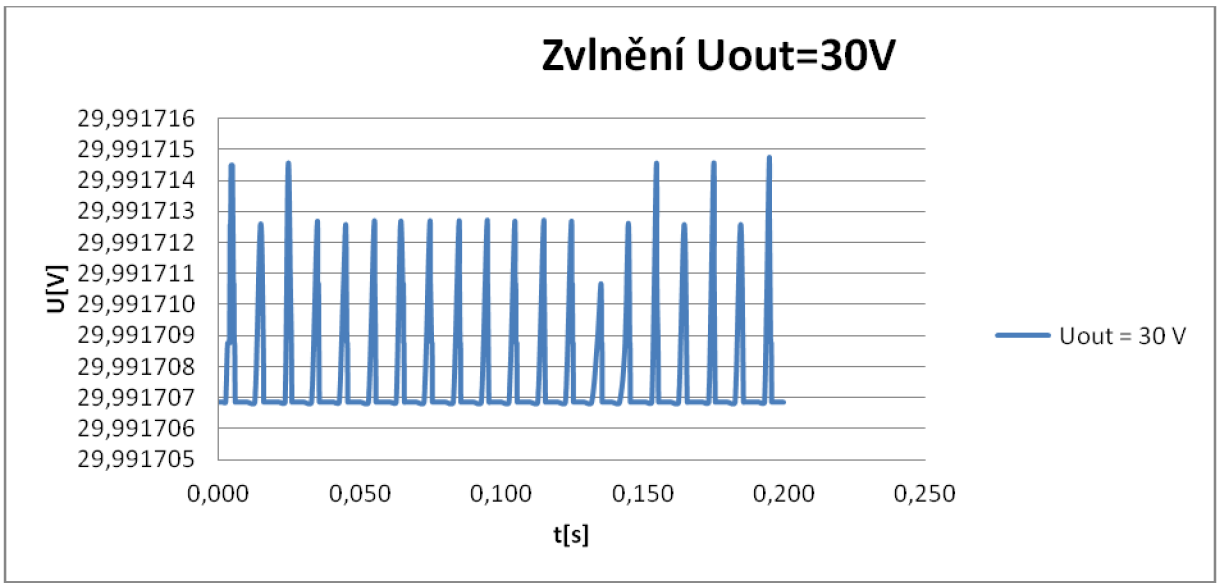
Obr.5: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V



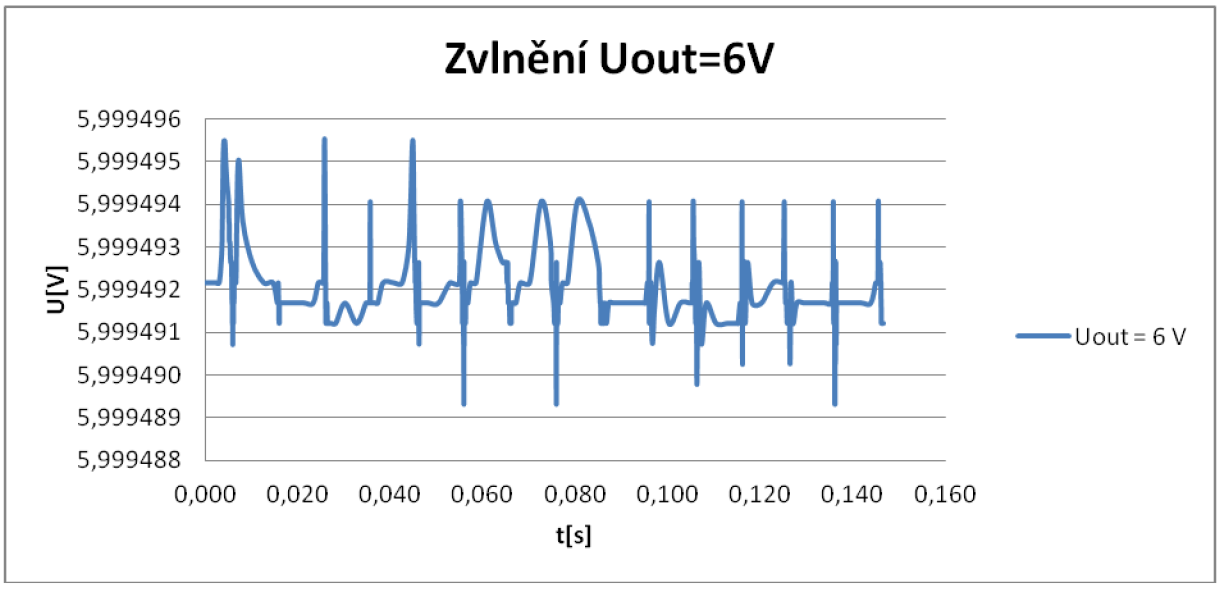
Obr.6: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.7: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V



Obr.8: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A



Obr.9: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A

5.2 Zdroj č.2

Jak je patrné z obr.10, operační zesilovač společně s tranzistory Q_1 a Q_2 tvoří neinvertující výkonový zesilovač. Snímací rezistor R_5 je potlačen smyčkou zpětné vazby R_{14}, R_{15} a tím pádem je jeho vliv potlačen. Maximální výstupní napětí U_0 lze pak určit [4]

$$U_0 = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_{14}}{R_{15}}\right) = 5.\left(1 + \frac{50.10^3}{10.10^3}\right) = 30V \quad . \tag{26}$$

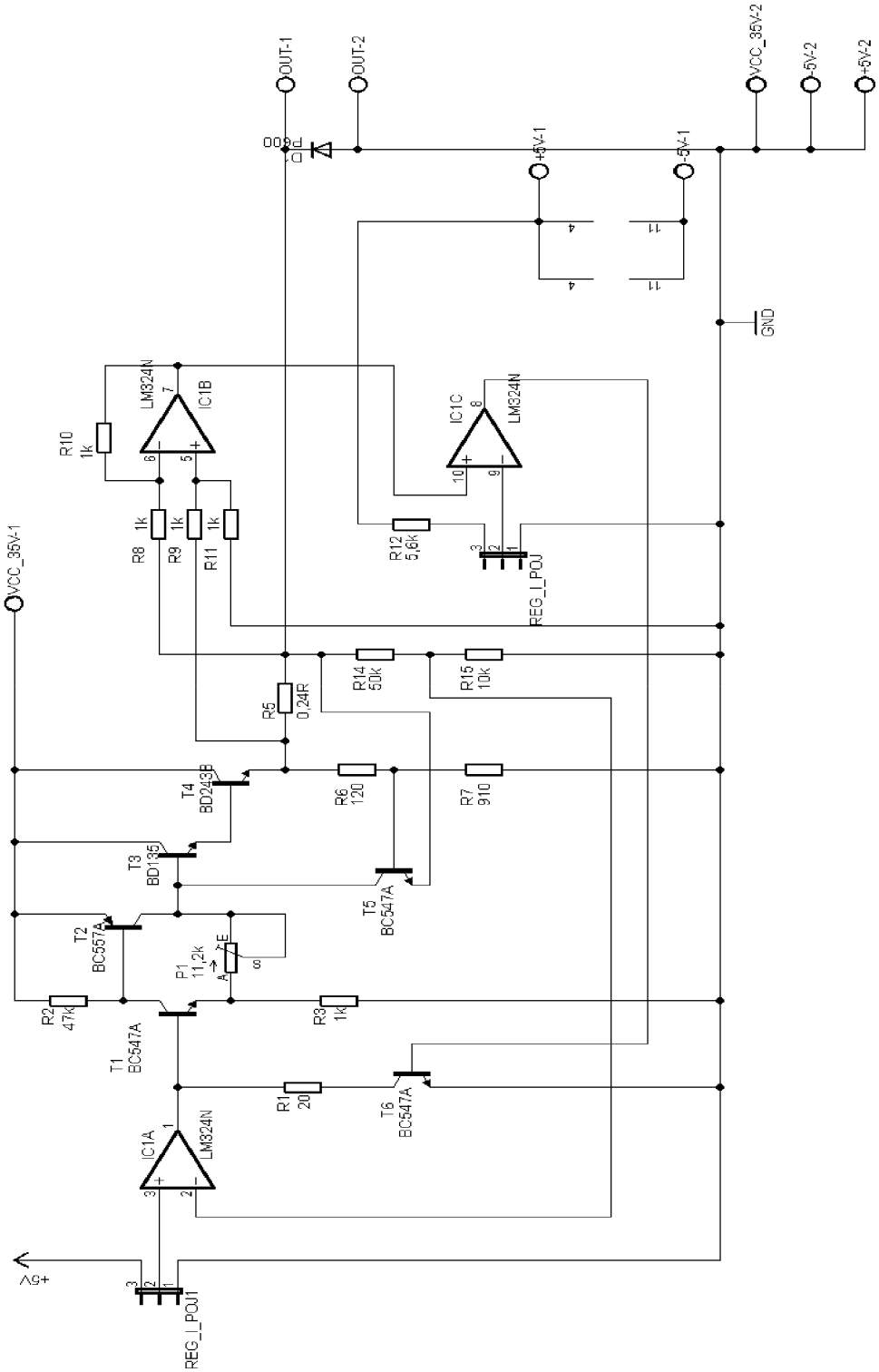
Zanedbá-li se proud, který teče zpětnovazebním děličem, tak lze dedukovat, že snímacím rezistorem teče výstupní proud do zátěže. A současně platí, že napětí na emitoru tranzistoru Q2 je [4]

$$U_E = U_0 + R_5.I_0 = 30 + 0{,}24.3 = 30{,}72V \quad , \tag{27}$$

kde R_5 je snímací rezistor a I_0 je maximální proud, který může zdroj dodávat do zátěže. Jelikož by byl operační zesilovač hodně napěťově namáhán, je jeho výstupní napětí omezeno na 3,8 V napájecím napětím a je za něj zařazen obdobný napěťový zesilovač jako ve zdroji č.1. Dioda D_1 na výstupu stabilizátoru má ochrannou funkci v případě připojení záporného napětí na výstup a nebo připojení induktivní zátěže její maximální proud je 6 A.

5.2.1 Napěťový zesilovač

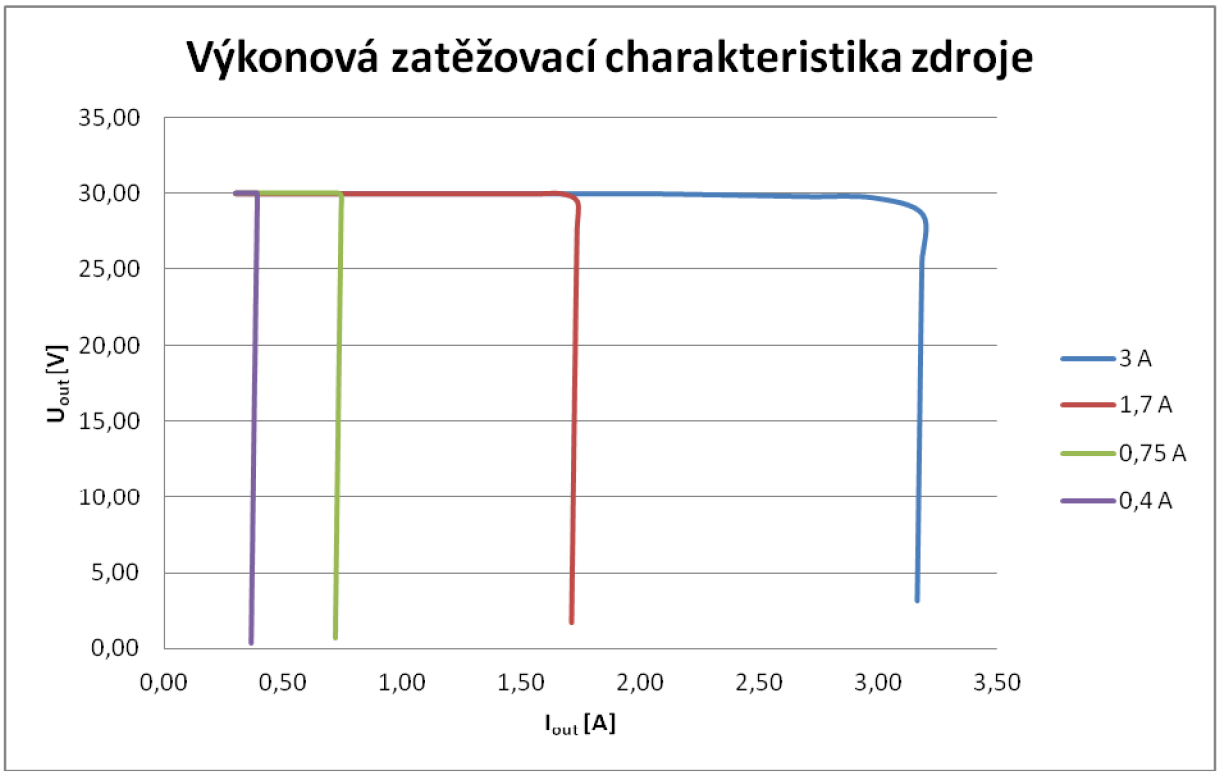
Napěťový zesilovač je řešen obdobným způsobem jako u zdroje č.1



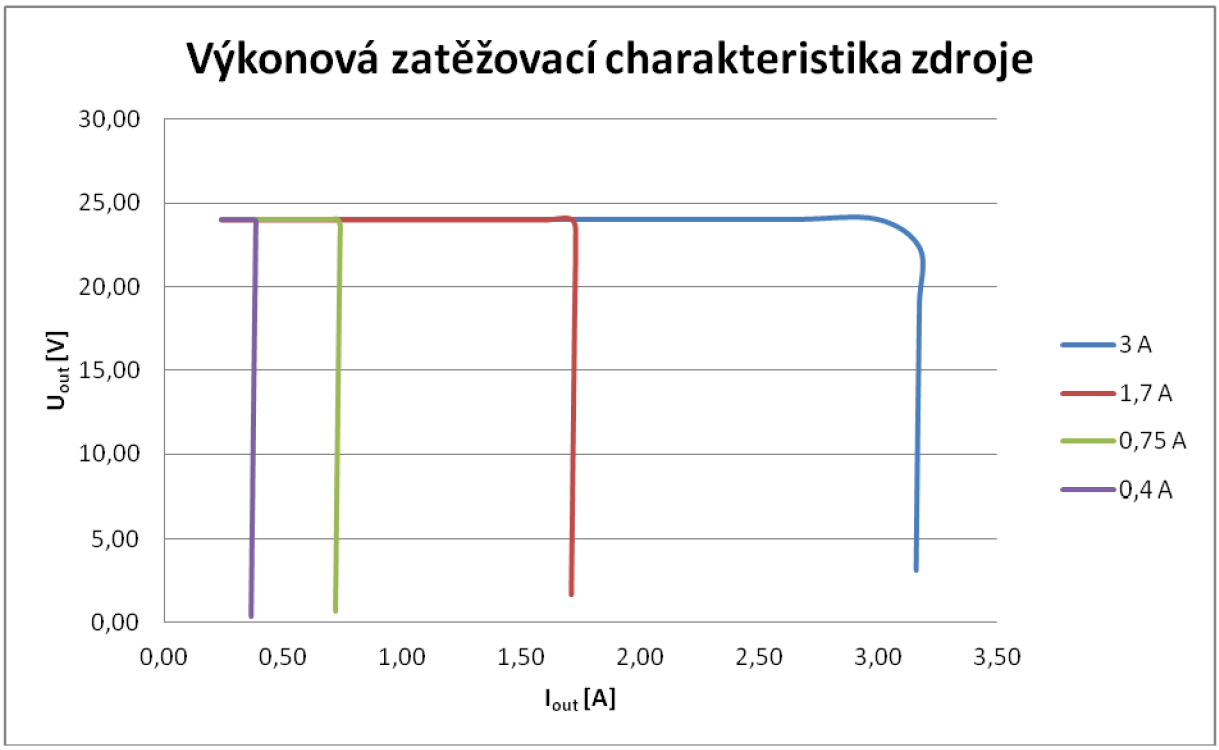
Obr.10: Celkové zapojení regulační části zdroje

5.2.2 Počítačová analýza zdroje

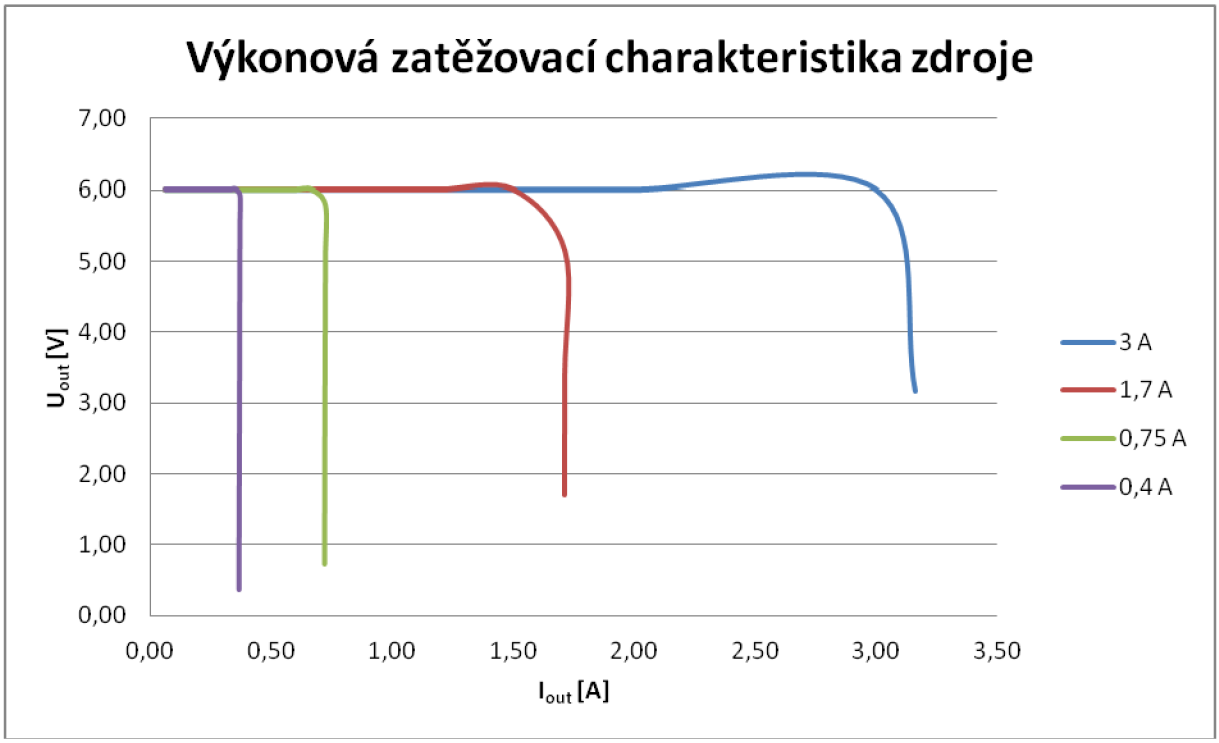
Z obr. 11, 12, 13 je patrná reakce proudové pojistky, která byla nastavena na hodnoty 0,4 A 0,75 A 1,7 A a 3 A. Průběhy grafů jsou velice podobné ale u zdroje č.2 je mnohem výhodnější průběh při výstupním napětí 6 V kde se nevyskytuje při proudovém omezení na 0,4 A a 0,75 A žádný zákmit proudové křivky.



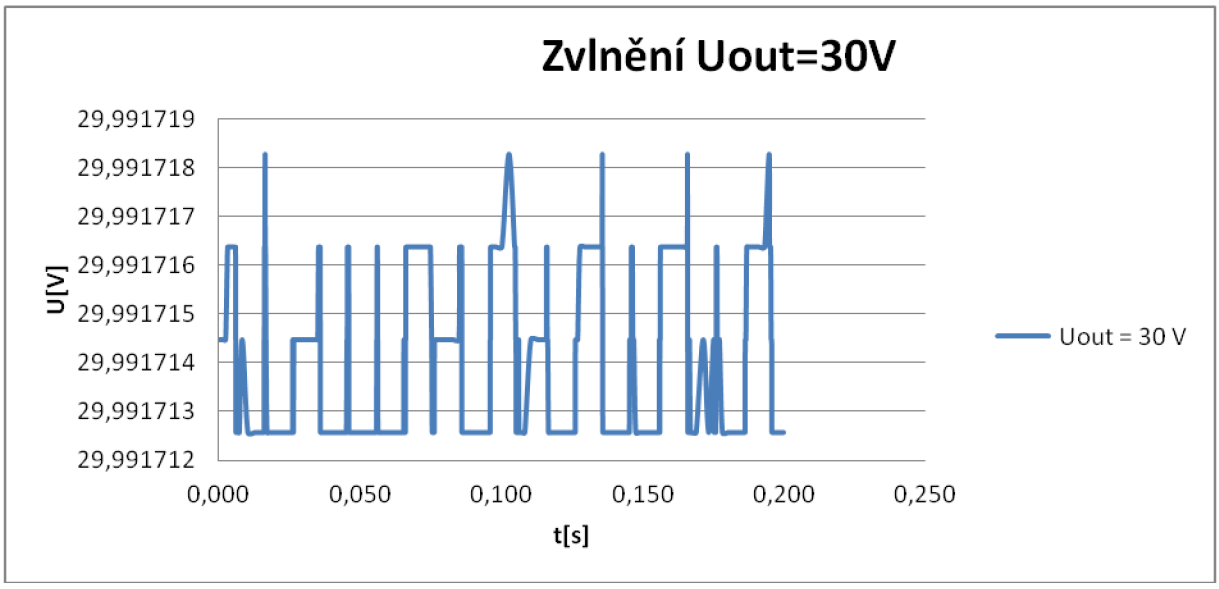
Obr.11: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V



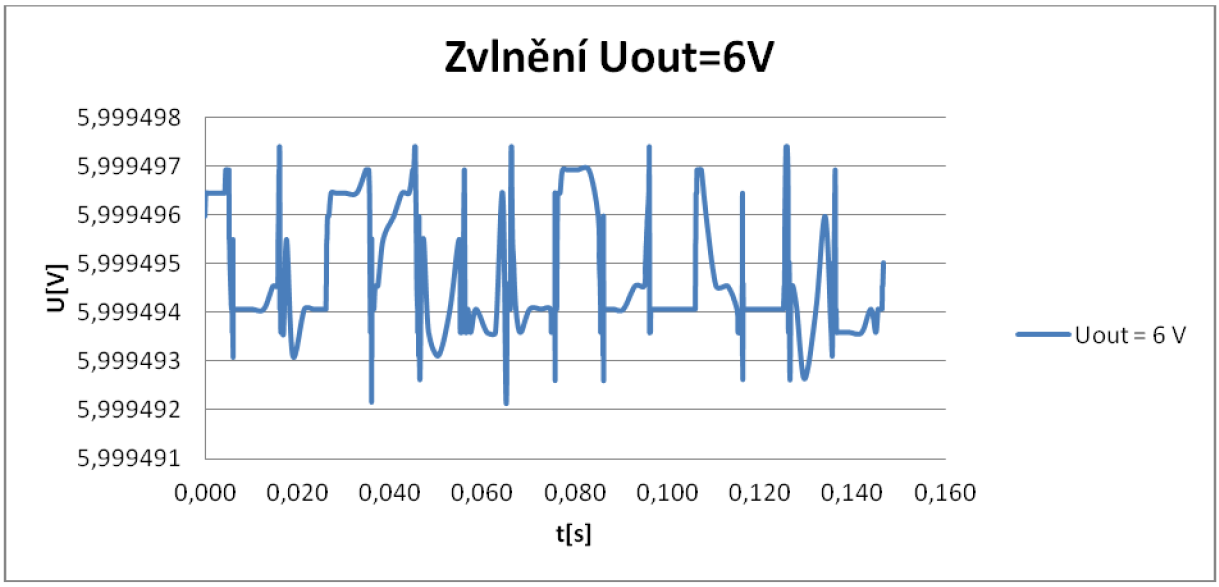
Obr.12: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.13: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V



Obr.14: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A



Obr.15: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A

5.3 Zdroj č.3

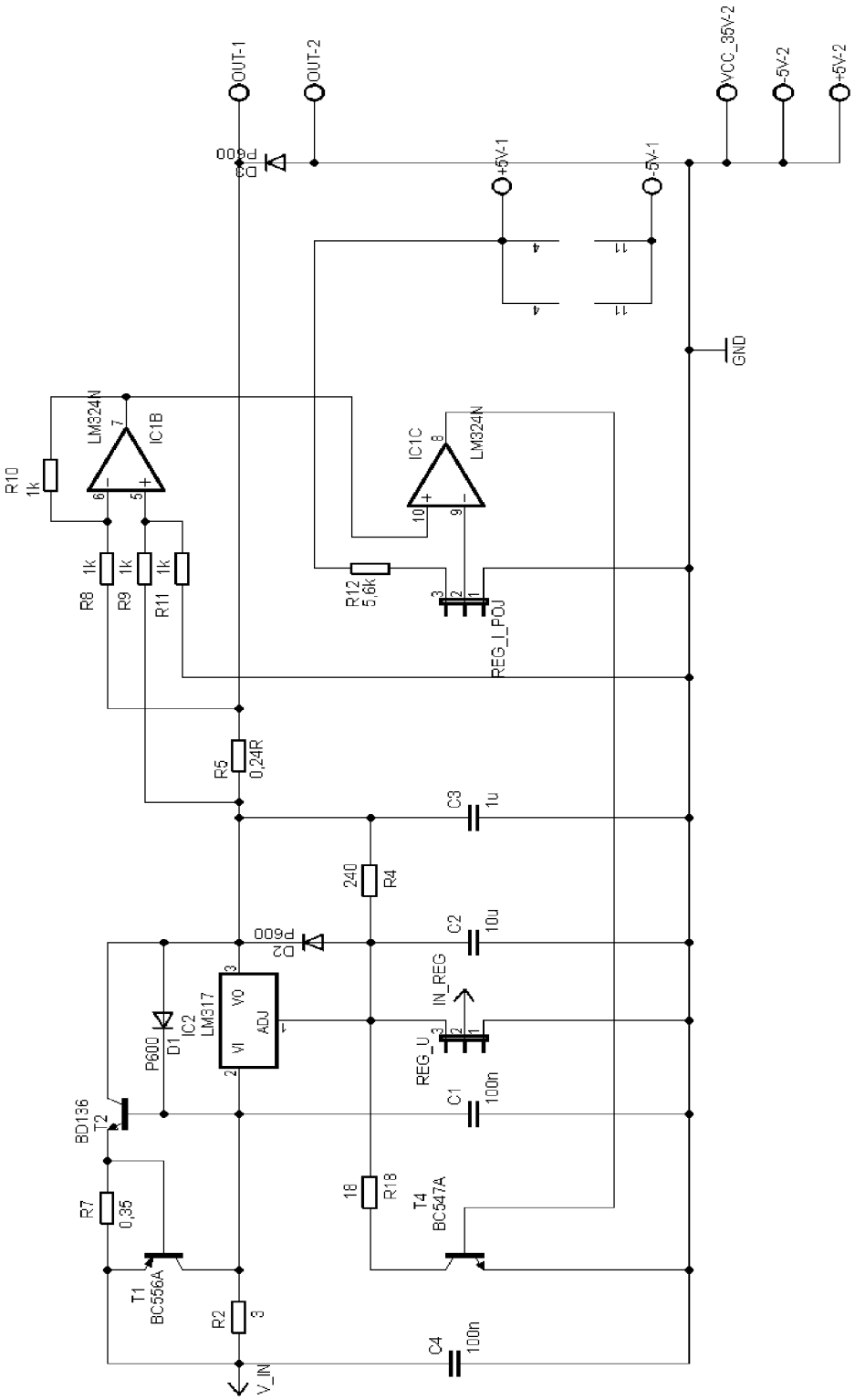
Zdroj na obr.16 je navržen a sestaven dle katalogového zapojení integrovaného stabilizátoru LM317. Výstupní napětí se nastavuje poměrem odporů R_4 a R_6 [9]

$$U_{out} = 1{,}25.\left(1 + \frac{R_6}{R_4}\right) = 1{,}25.\left(1 + \frac{5500}{240}\right) = 29{,}9V \quad . \tag{28}$$

Diody D_1 a D_2 jsou ochranné diody, kde dioda $D1$ slouží jako ochrana proti zkratu na výstupných svorkách stabilizátoru a dioda D_2 chrání stabilizátor proti připojení záporného napětí na vstupní svorku stabilizátoru. Obvod LM317 je schopen regulovat výstupní napětí v rozmezí 1,2 V až 37 V s maximálním proudem 1A (LM317A až 1,5 A). Dále obsahuje tepelnou a proudovou pojistku. Kondenzátory C_1 a C_2 zlepšují převodní charakteristiku. Dále je stabilizátor doplněn proudovým posílením, aby vyhověl zadaným požadavkům. Protože stabilizátor dokáže dodat trvale proud 1 A, musím tento stabilizátor proudově posílit tak, aby zbývající proud převzal výkonový transistor. Křemíkový tranzistor Q_2 se otevírá při napětí 0,7V. Zvolím-li hodnotu odporu $R_2 = 3\ \Omega$, tak mám zaručeno, že se tento výkonový tranzistor otevře dříve, než dojde k proudové limitaci stabilizátoru. Tranzistor Q_1 slouží k nadproudové ochraně výkonového tranzistoru Q_2 a tím jej chrání před proudovým a výkonovým přetížením a následným zničením. Odporem R_2 protéká rozdíl celkového proudu a proudu, který teče stabilizátorem LM317. Vzniká na něm úbytek napětí a tento úbytek otevírá tranzistor Q_1, který v případě svého otevření zkratuje U_{be} tranzistoru Q_2 a tím ho uzavře [3]

$$R_1 = \frac{U_{BE}}{(I_{VTST} - I_{STAB})} = \frac{0,7}{(3-1)} = 0,35\Omega \quad . \tag{29}$$

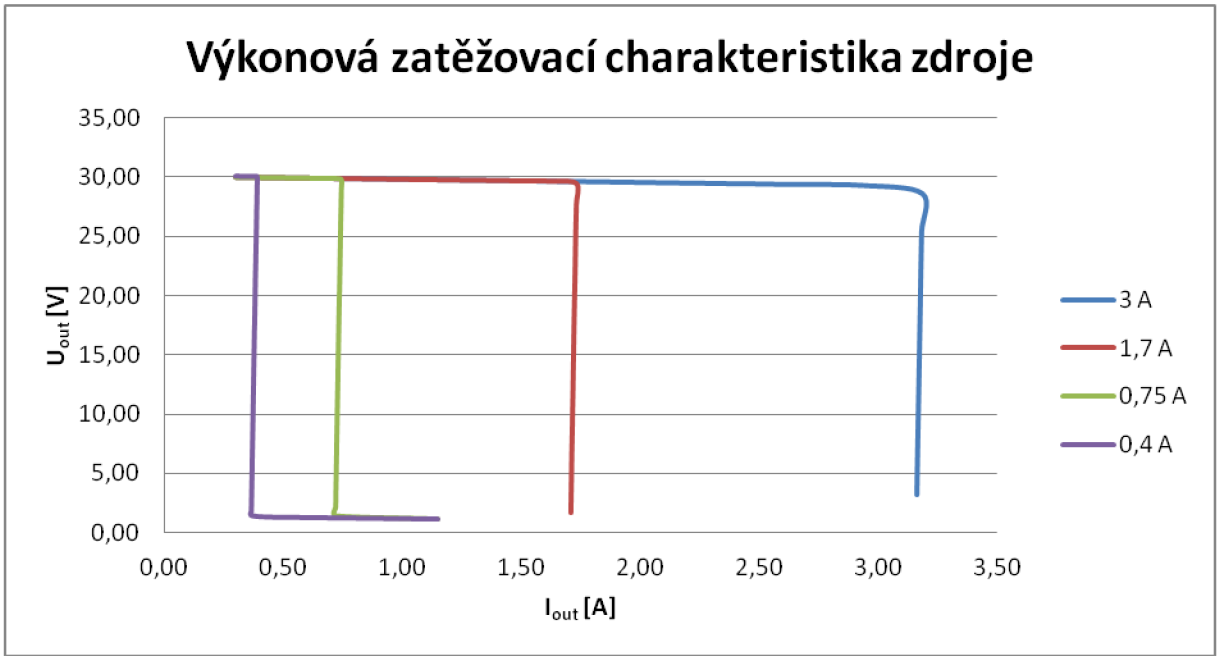
Zařazením tohoto odporu se změní hodnota odporu R_2, kdy úbytek napětí na něm kryje napětí na U_{BE} tranzistoru Q_2 a úbytek na odporu R_1. Přesný výpočet je velmi složitý. V praxi se tento odpor nahradí proměnným a individuálně se nastaví, aby omezoval při požadované hodnotě proudu. Dioda D_3 na výstupu stabilizátoru má ochrannou funkci v případě připojení záporného napětí na výstup a nebo připojení induktivní zátěže její maximální proud je 6 A.



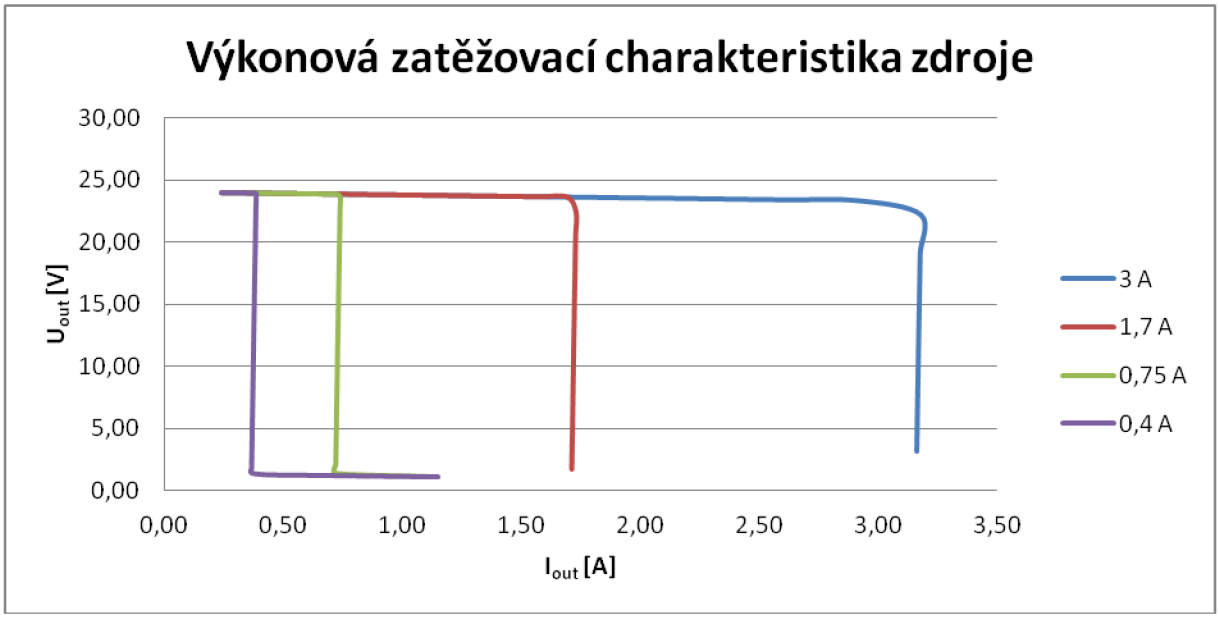
Obr.16: Celkové zapojení regulační části zdroje

5.3.1 Počítačová analýza zdroje

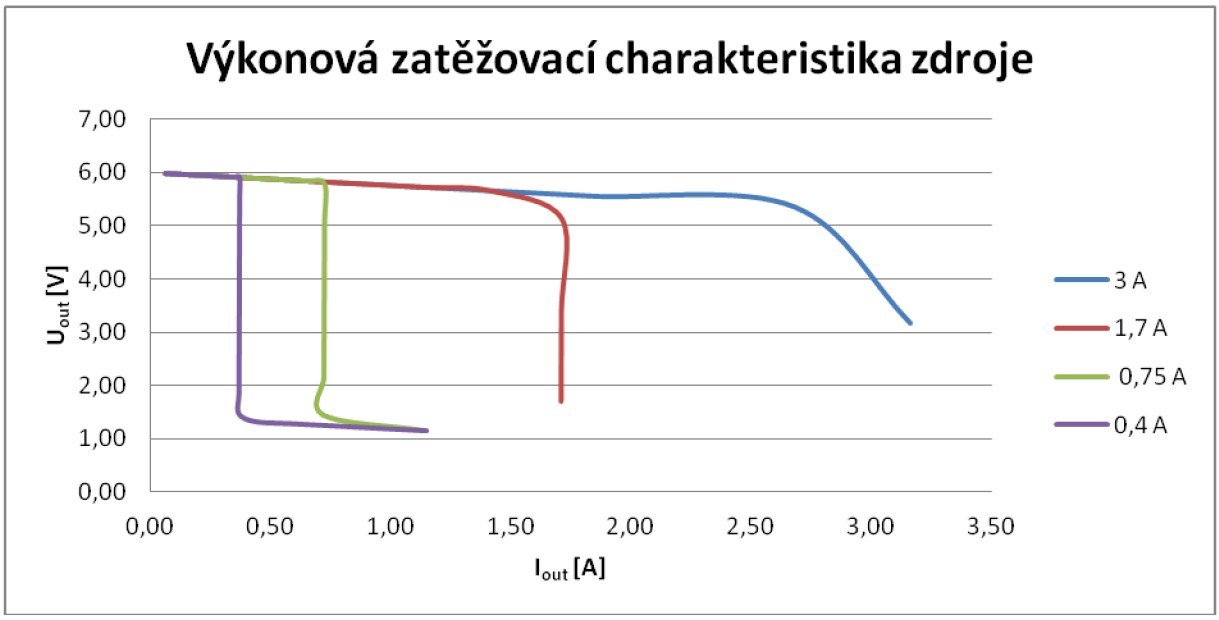
Z obr.17, 18, 19 je patrná reakce proudové pojistky, která byla nastavena na hodnoty 0,4 A 0,75 A 1,7 A a 3 A. Průběhy grafů jsou velice podobné, jako u předcházejících zdrojů. Při výstupním napětí 6 V a nastavené proudové pojistce 0,75 A a 0,4 A je velký zákmit proudu.



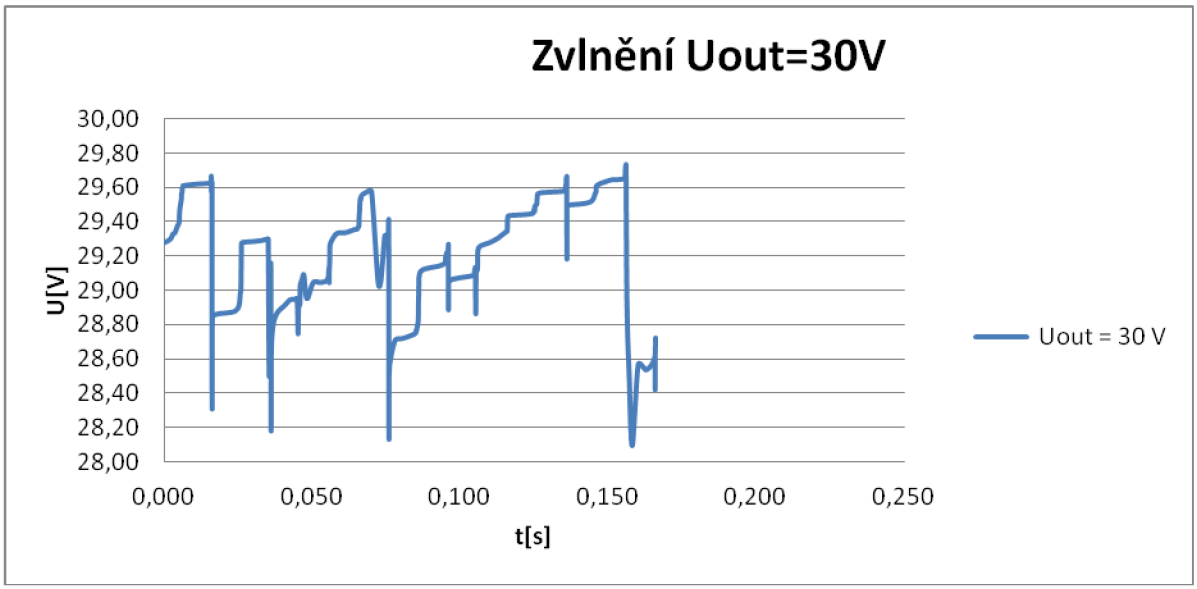
Obr.17: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V



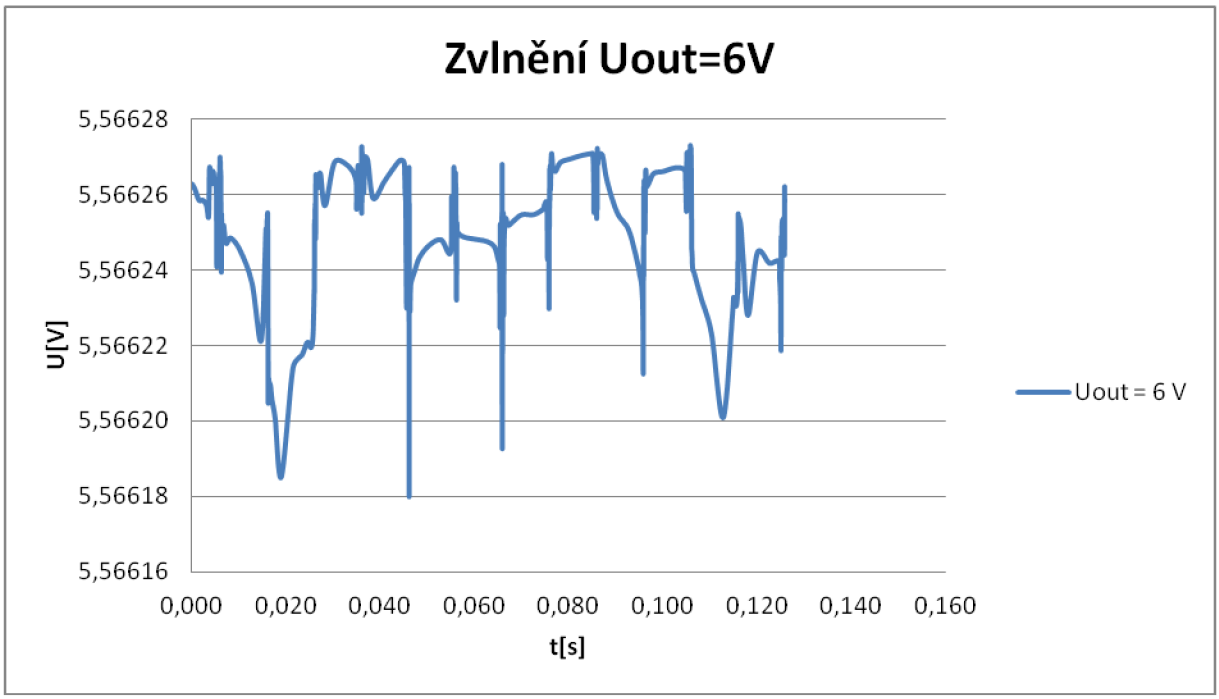
Obr.18: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.19: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V



Obr.20: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A



Obr.21: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A

5.4 Zdroj č.4

Uvedený zdroj který je na obr.22 má na vstupu neinvertující operační zesilovač, který má přenos A blížící se 1 nastavený odpory R_1 a R_{12} vstupní napětí je přivedeno na kladný vstup. Na záporný vstup je přivedena záporná zpětná vazba, která je nastavena již zmíněnými odpory R_1 a R_{12} . Pro přenos operačního zesilovače lze psát [4]

$$A_N = 1 + \frac{R_1}{R_{12}} = 1 + \frac{1}{10.10^3} \approx 1 \quad . \tag{30}$$

Na výstup operačního zesilovače je připojen napěťoví zesilovač a proudový zesilovač a ty budou popsána následně. Dioda D_3 na výstupu stabilizátoru má ochrannou funkci v případě připojení záporného napětí na výstup a nebo připojení induktivní zátěže. Její maximální proud je 6 A.

5.4.1 Napěťový a proudový zesilovač

Je-li maximální výstupní napětí z operačního zesilovače 3,8 V a výstupní napětí zdroje má být 30 V musí napěťový zesilovač toto napětí zesílit přibližně 8x.

Napěťový zesilovací činitel tohoto napěťového zesilovače se rovná [8]

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{R_3 + P_1}{R_3} = \frac{1.10^3 + 7.10^3}{1.10^3} = 8 \quad . \tag{31}$$

Hodnoty odporů R_3 a P_1 na obr.22 byly voleny takto, z důvodu nastavení napěťového zesilovacího činitele na hodnotu 8. Odpor R_3 jsem zvolil 1 kΩ a pro odpor P_1 logicky vyplývá hodnota ze vzorce (17) 7kΩ

Vstupní odpor zesilovače spočítám proto, abych zjistil úroveň ovlivnění výstupu operačního zesilovače [8]

$$R_{in} = h_{feQ6}.S_1.R_3.R_2 = 100.0{,}05.1.10^{3.47}.10^3 = 235\ M\Omega \quad . \tag{32}$$

Proudový zesilovací činitel h_{fe6} tranzistoru BC 547 je 100-400, hodnota odporu R_2 byla zvolena z hodnot řady E12 z důvodu zvýšení vstupního odporu napěťového zesilovače nad 200 MΩ. Aby nedocházelo k zatěžování operačního zesilovače, S_1 a S_2 je sklon křivky zesílení tranzistoru 0,05 [jednotka = 1/Ohm] [8].

Výstupní odpor R_{OUT} napěťového zesilovače můžeme spočítat takto [8]

$$R_{OUT} = \frac{R_{31}.R_3}{S_1 + S_2.R_{3.}R_3} = \frac{7.10^{3.1}.10^3}{0{,}05 + 0{,}05.47.10^{3.1}.10^3} = 2{,}98\Omega \quad . \tag{33}$$

Tento výstupní odpor je natolik malý že může řídit tranzistor BD 135. Odpor R_2 propojuje kolektor BC 547 s bází BC 557 to zajišťuje bezpečné uzavření zesilovače dokud nepřijde napětí z operačního zesilovače. Aby se neotvíral tranzistor BD 135 a sním celý

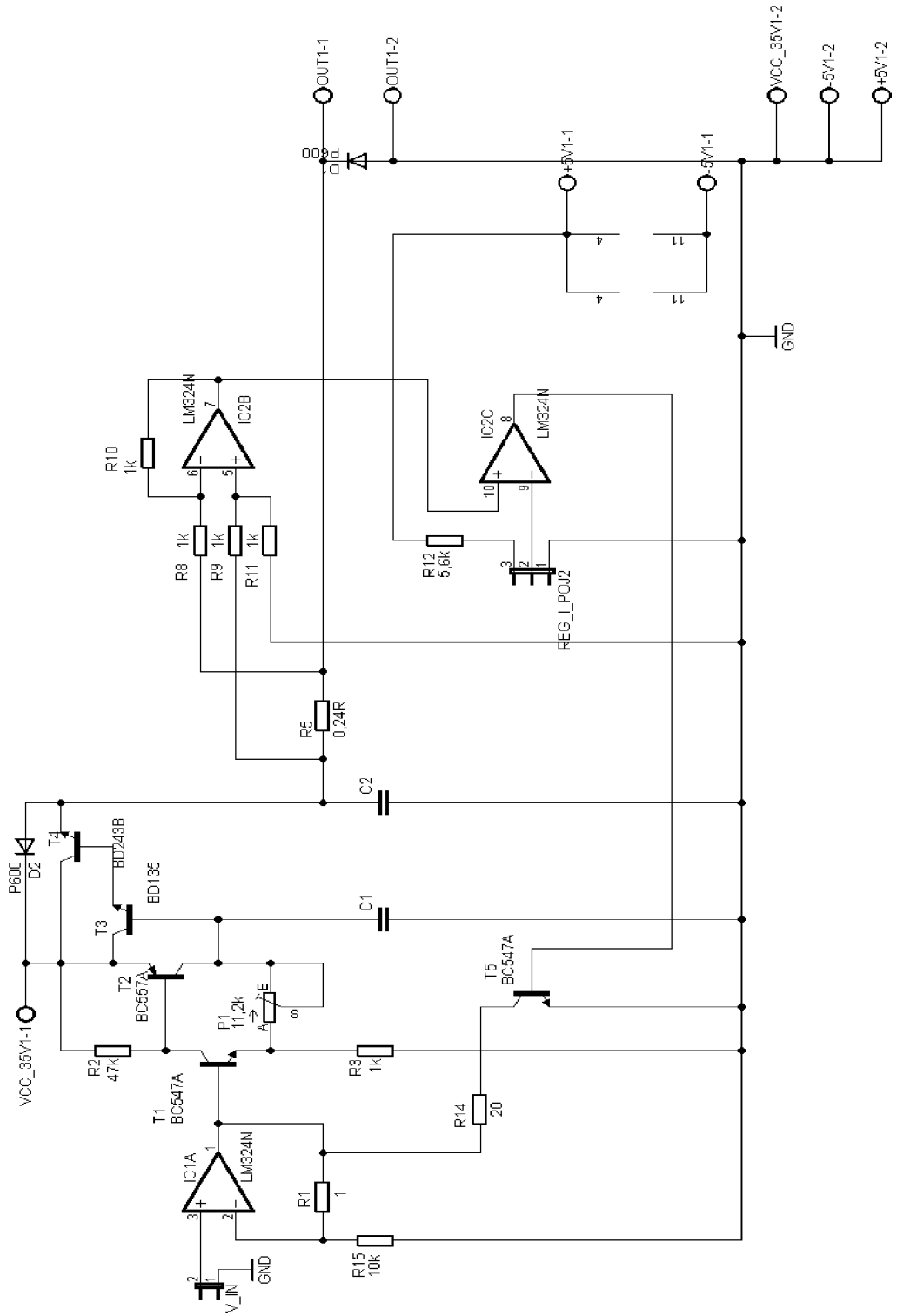
proudový zesilovač je báze tohoto tranzistoru uzemněna přes odpory R_3 a R_{31}. Proudový zesilovací činitel tranzistoru BD 243 je při proudu 3 A h_{fe}=18 Z tohoto můžu spočítat budící proud báze následovně [8]

$$I_{BQ1} = \frac{3}{h_{feQ1}} = \frac{3}{18} = 166mA \quad . \tag{34}$$

Pro vybuzení tranzistoru BD 243 byl použit tranzistor BD 135, který má zesilovací činitel mezi 63-160. Nyní vypočítám proud, kterým musím budit transistor BD 135 [8]

$$I_{BQ2} = \frac{0,166}{h_{feQ2}} = \frac{0,166}{63} = 2,4mA \quad . \tag{35}$$

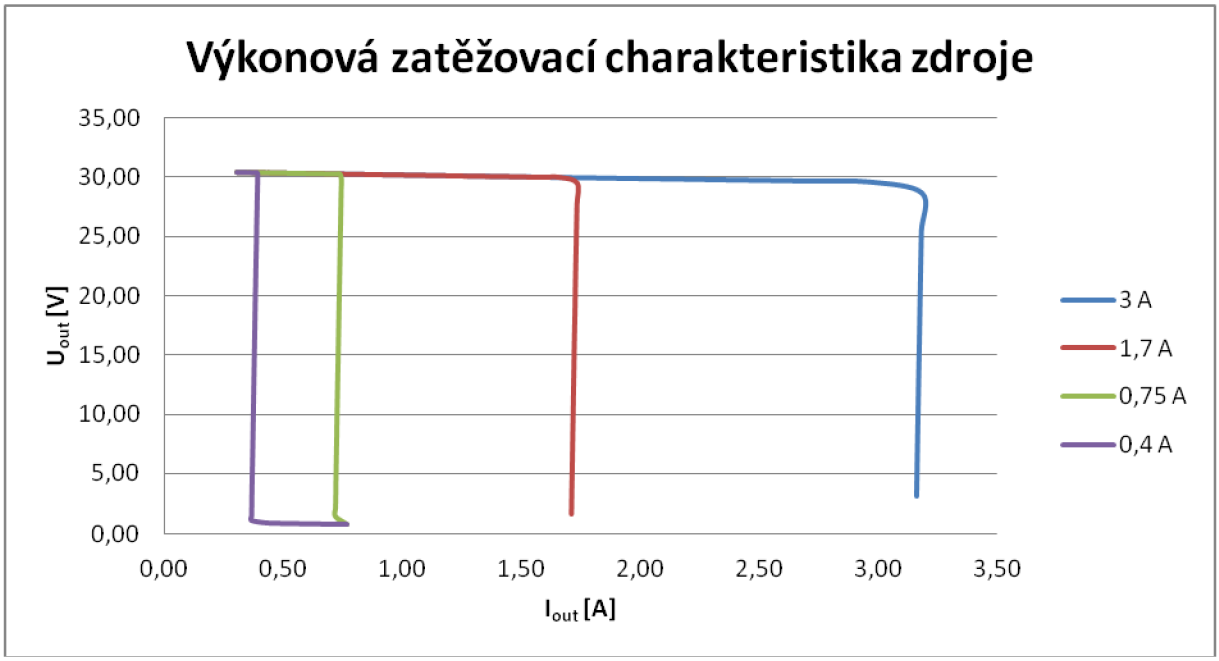
Tento proud zabezpečí tranzistory BC547 a BC 557.



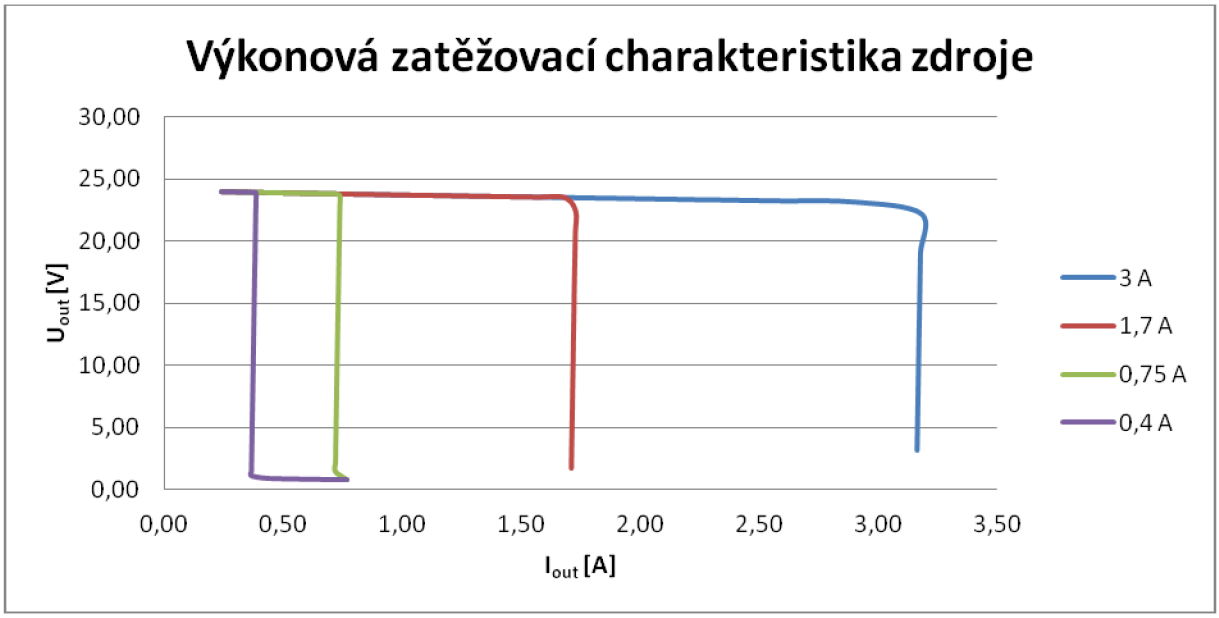
Obr.22: Celkové zapojení regulační části zdroje

5.4.2 Počítačová analýza zdroje

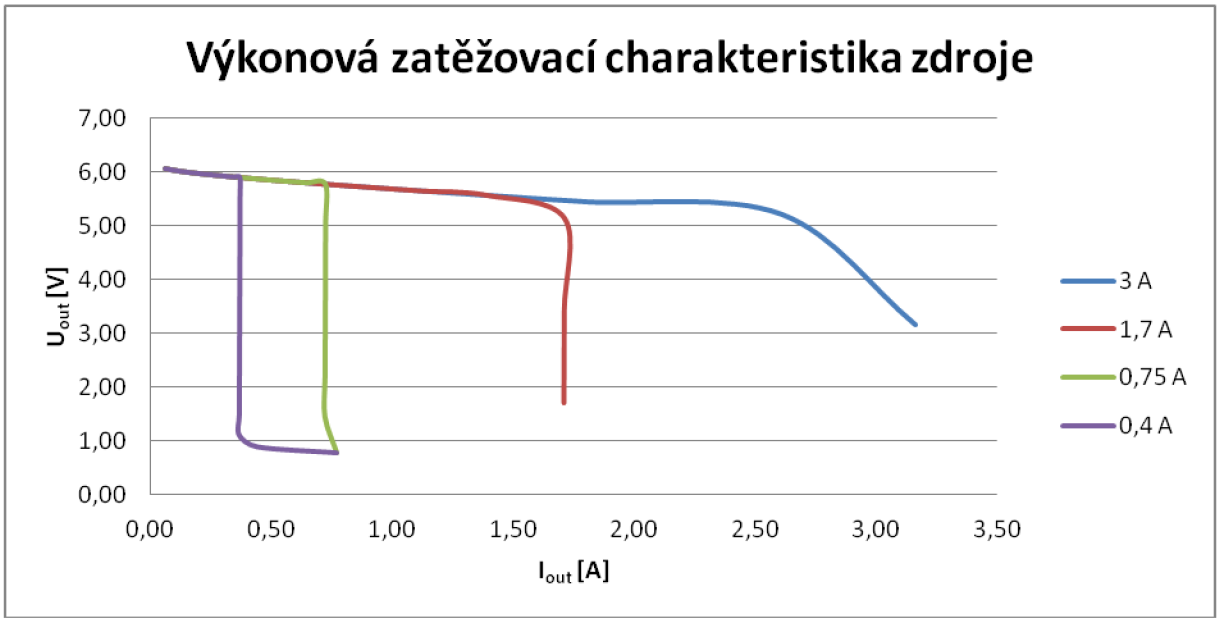
Z obr. 23, 24, 25 je patrná reakce proudové pojistky, která byla nastavena na hodnoty 0,4 A 0,75 A 1,7 A a 3 A. Průběhy grafů jsou velice podobné jako u předcházejících zdrojů. Při výstupním napětí 6V a nastavené proudové pojistce 0,4 A je velký zákmit proudu. Tento zákmit je patrný I při nastavení pojistky na 0,75 A ale není již tak dramatický. Je-li pojistka nastavena na 3 A je patrný drobný pokles výstupního napětí s rostoucím proudem. Tento pokles je přibližně o 0,5 V.



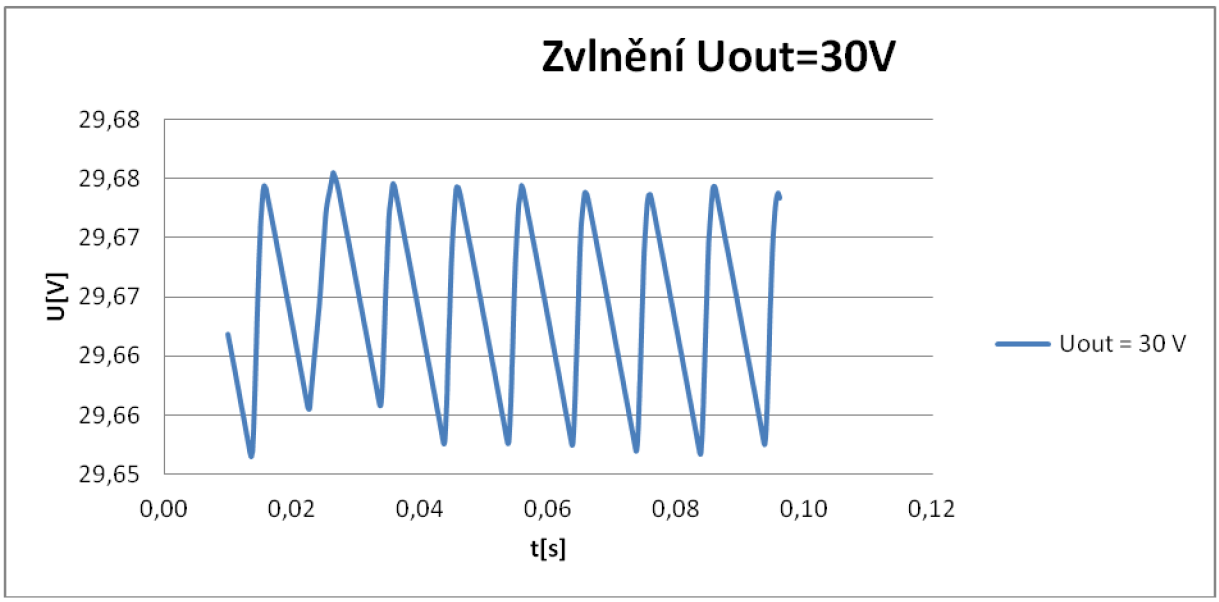
Obr.23: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 30 V



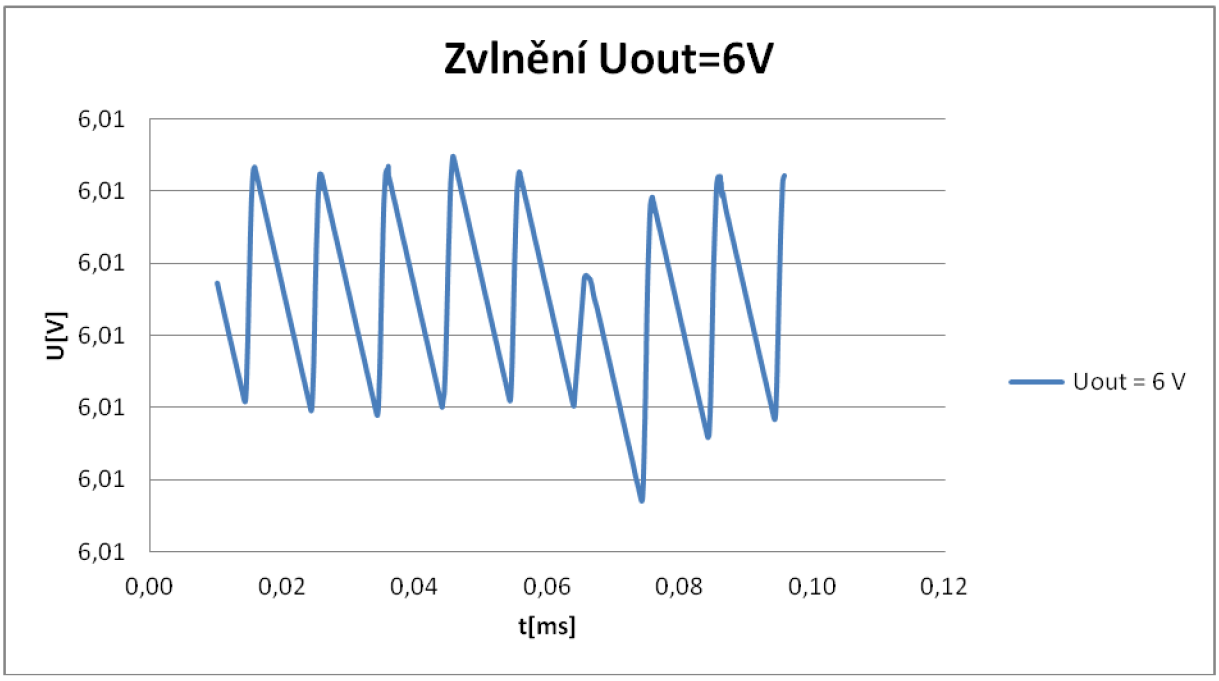
Obr.24: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.25: Výkonová zatěžovací charakteristika zdroje pro výstupní napětí 6 V



Obr.26: Zvlnění výstupního napětí 30 V při výstupním proudu 3 A



Obr.27: Zvlnění výstupního napětí 6 V při výstupním proudu 3 A

6 Návrh usměrňovače s filtrem

Pro tuto variantu zdroje jsem zvolil můstkový usměrňovač, který je také nazýván Graetzův usměrňovač. Na vstup usměrňovače jak je vidět z obr. 28 je přivedeno napětí ze sekundárního vynutí transformátoru s parametry U= 2 x24 V, I= 2 x3 A. Místo 4 usměrňovacích diod jsem vybral usměrňovací můstek B250C10000 s dostatečnou proudovou dimenzací I_{max}= 10 A a proudovou špičkou 200 A po 8,3ms. Na výstupu usměrňovače je napětí přibližně [3]

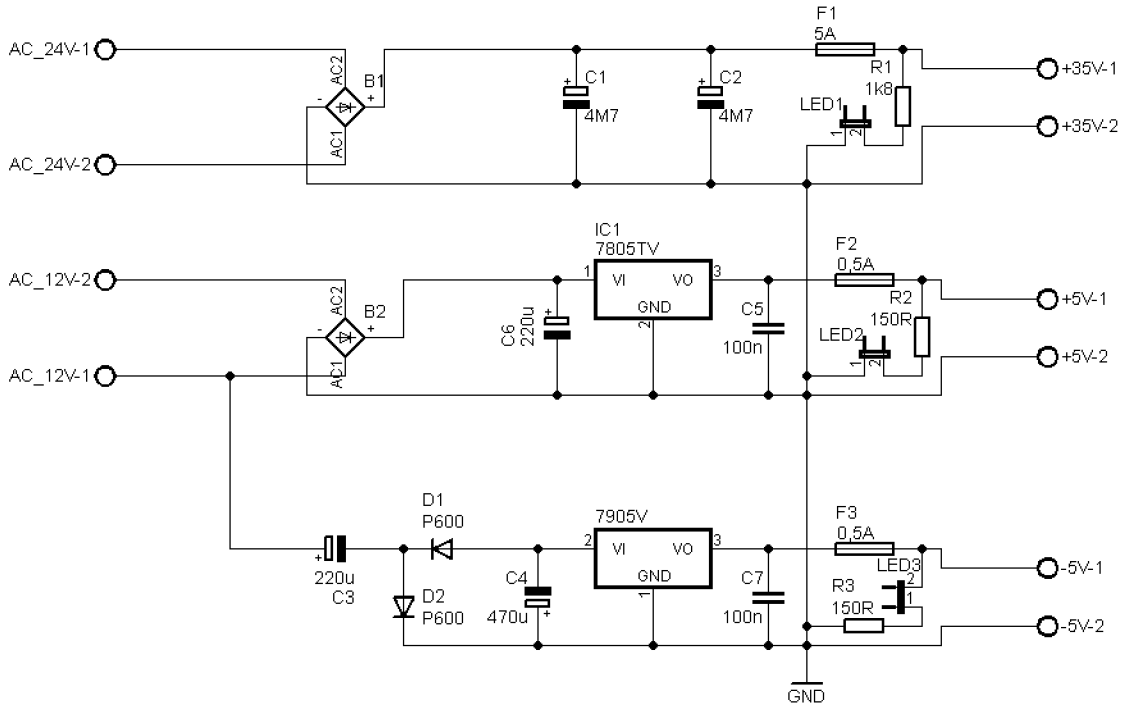
$$U_{OUT} = (U_{ef} . \sqrt{2}) - U_F = (24. \sqrt{2}) - 1{,}1 = 32{,}8V \quad , \tag{36}$$

kde U_F je úbytek napětí na usměrňovacím můstku.

Následně určíme velikost filtračního kondenzátoru [3]

$$C = \frac{300. I_{OUTmax}}{p. U_{OUT}} = \frac{300.3000}{3.32.8} = 9146uF \quad . \tag{37}$$

Z katalogu byly vybrány dva kondenzátory 4m7/40V.



Obr.28: Schéma zapojení usměrňovače s filtrem

Ze zapojení je vidět, že je usměrňovač rozdělen na tři části a to hlavní napájecí část, která napájí výkonové prvky zdroje. Další dvě části, které vytváří pomocná napětí +5 V a -5 V pro napájení operačních zesilovačů a mikroprocesoru.

7 Návrh zdroje č.2

Jak je patrno z předchozích simulací zatěžovací charakteristika zdroje č.2 vychází nejlépe. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl tento zdroj realizovat. Pro realizaci tohoto zdroje bylo potřeba udělat několik drobných úprav zapojení. Tyto úpravy popíši v následujícím textu.

7.1 Referenční napětí

Referenční napětí generuje obvod TL431. Jeho zapojení je realizováno podle katalogového zapojení [18]. Referenční napětí bylo voleno 5 V, proud referenčního zdroje jsem zvolil 5 mA z důvodu malého proudového namáhání potenciometru, který reguluje vstupní napětí operačního zesilovače. Dále byl volen odporový dělič R_1 a R_{17} 39kΩ, taktéž z důvodu malého proudového odběru. Hodnota rezistoru R_{18} byla vypočtena podle následujícího vztahu [18]

$$R_{18} = \left(V_{REF}\cdot\left(1+\frac{R_1}{R_{17}}\right)-V_{KA}\right)\cdot\left(\frac{1}{-I_{REF}}\right)=\left(5.\left(1+\frac{39.10^3}{39.10^3}\right)-32\right)\cdot\left(\frac{1}{-5.10^3}\right)=4400\Omega \quad (38)$$

7.2 Proudová pojistka

Pro výrobu laboratorního zdroje je nutné upravit hodnoty součástek proudové pojistky. Důvod je ten, že přivádí-li se napětí k operačnímu zesilovači přímo ze snímacího rezistoru R_5, tak hodnota tohoto napětí může dosahovat až 30 V, což je napětí působící výrazné přesycení operačního zesilovače. Úpravu nevhodného stavu zajistí dělič vložený mezi snímací rezistor a vstup operačního zesilovače. Odporový dělič je navržen tak, aby bylo na jeho výstupu maximální napětí 5 V při výstupním napětí zdroje 30 V. Odpor R_{22} je zvolen 1 kΩ a je na něm výstupní napětí 5 V. Z toho lze vypočítat proud protékající děličem

$$I_{R22} = \frac{U_{R22}}{R_{22}} = \frac{5}{1000} = 5mA. \tag{39}$$

Dále mohu vypočítat hodnotu odporu R_{21}, $U_{R21} = 5V$

$$R_{21} = \frac{U_{R21}}{I_{R22}} = \frac{25}{0{,}005} = 5k\Omega. \tag{40}$$

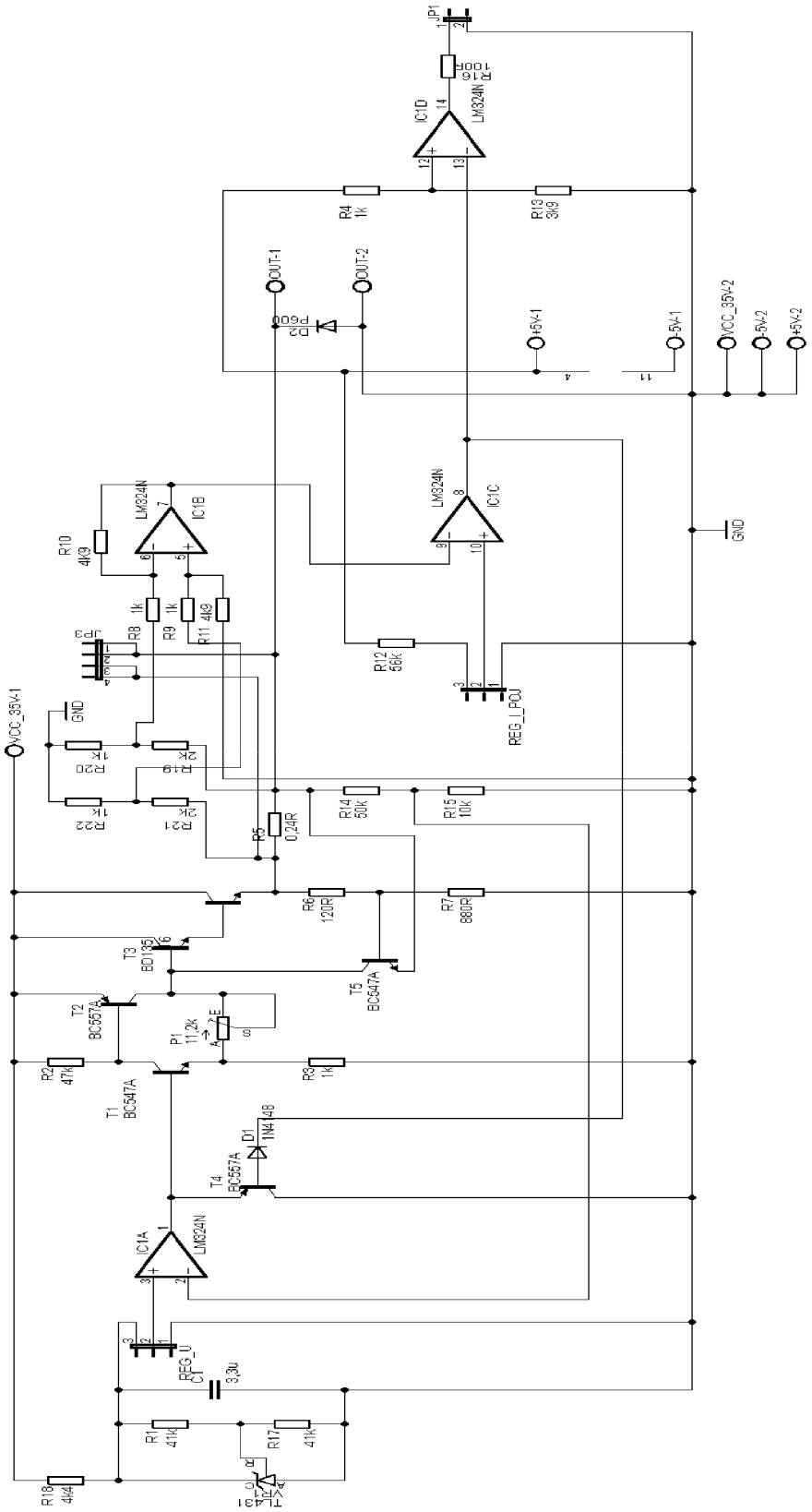
Odporový dělič R_{19} a R_{20} je vypočítán stejným způsobem. V programu OrCAD jsem zjistil, že prochází-li odporem R_5 proud 3 A, tak na odporových děličích je rozdílové napětí 74 mV. Tento údaj mohu využít pro výpočet výstupního napětí rozdílového zesilovače, tak aby bylo při průchodu proudu odporem R_5, 3 A toto napětí 0,74 V. Výpočet provedu podle vzorce [4]

$$U_0 = (U_2 - U_1).\frac{R_{10}}{R_8}, \tag{41}$$

po úpravě

$$R_{10} = \frac{R_8.U_0}{(U_2 - U_1)} = \frac{1000.0{,}74}{0{,}074} = 10k\Omega \quad . \tag{42}$$

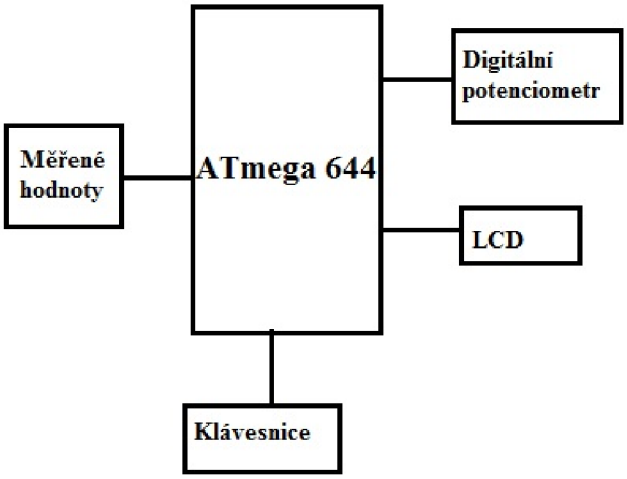
Poslední úpravou proudové pojistky je změna spínacího prvku z NPN tranzistoru na PNP a připojení na jeho bázi diodu. Tato dioda se otevře pokud se na ni přivede záporné napětí z komparátoru. Následné se otevře tranzistor, který zkratuje výstup operačního zesilovače.



Obr.29: Celkové zapojení regulační části zdroje

8 Řídící část zdroje

Zdroj bude řízen mikroprocesorem ATmega 644. Tento mikroprocesor bude zajišťovat funkci měřící, řídící a částečně aji funkci regulační. Výstupní hodnoty napětí a proudu budou zadávány na klávesnici. Mikroprocesorem převedeny do vhodné podoby a pomocí SPI sběrnice poslány na digitální potenciometry. Tyto potenciometry nahrazují funkci klasických analogových potenciometrů. Měření bude probíhat na snímacím rezistoru a pomocí A/D převodníku, který je integrován v mikroprocesoru a následné změřené napětí bude zobrazeno na LCD displeji.



Obr.30: Blokové schéma řídící části zdroje

8.1 Parametry mikroprocesoru ATmega 644

Tento mikrokontrolér byl zvolen z důvodu nízké ceny a dostačujícího výkonu pro řízení zdroje. Základní parametry mikrokontroléru ATmega644 jsou:

- pracovní frekvence 20 MHz (tím je dán i maximální výpočetní výkon až 20 MIPS),
- 32 registrů pro všeobecné použití,
- obsahuje rozšířenou sadu 131 AVR instrukcí,
- 64 KB integrované programové paměti Flash,
- 2 KB integrované datové EEPROM,
- 4 KB integrované datové SRAM,
- dva osmibitové čítače/časovače a jeden šestnáctibitový čítač/časovač,
- Master/Slave SPI seriovou sběrnici,
- USART sběrnici,

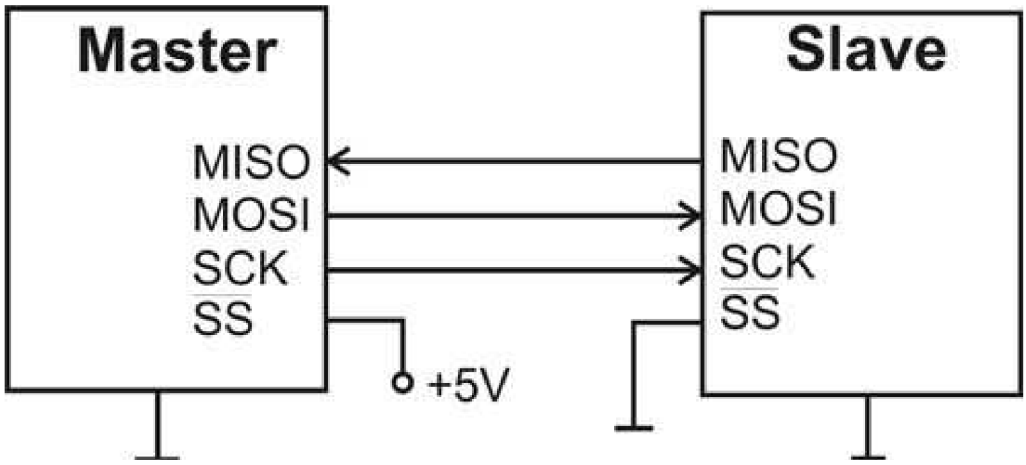
- I2C sběrnici,
- analogový komparátor,
- osmikanálový desetibitový A/D převodník,
- 32 programovatelná vstupně/výstupních portů,
- dostupná pouzdra PDIP40, TQFP44 a QFN/MLF44.

8.2 SPI sběrnice

Sériová sběrnice SPI je užívána pro vysokofrekvenční přenos dat mezi periferním zařízením a řídicím mikroprocesorem vybaveným sběrnicí SPI. Periferní zařízení je v našem konkrétním případě digitální potenciometr. Vlastnosti řídicí jednotky mikroprocesoru jsou:

- současný příjem i vysílání
- třívodičový synchronní přenos dat
- možnost práce v režimu slave i master
- volba pořadí bitů
- využití příznaků kolize a přenosu

Příklad použití sběrnice SPI v konfiguraci Master a Slave je uveden v následujícím obrázku. Převzato z [19]



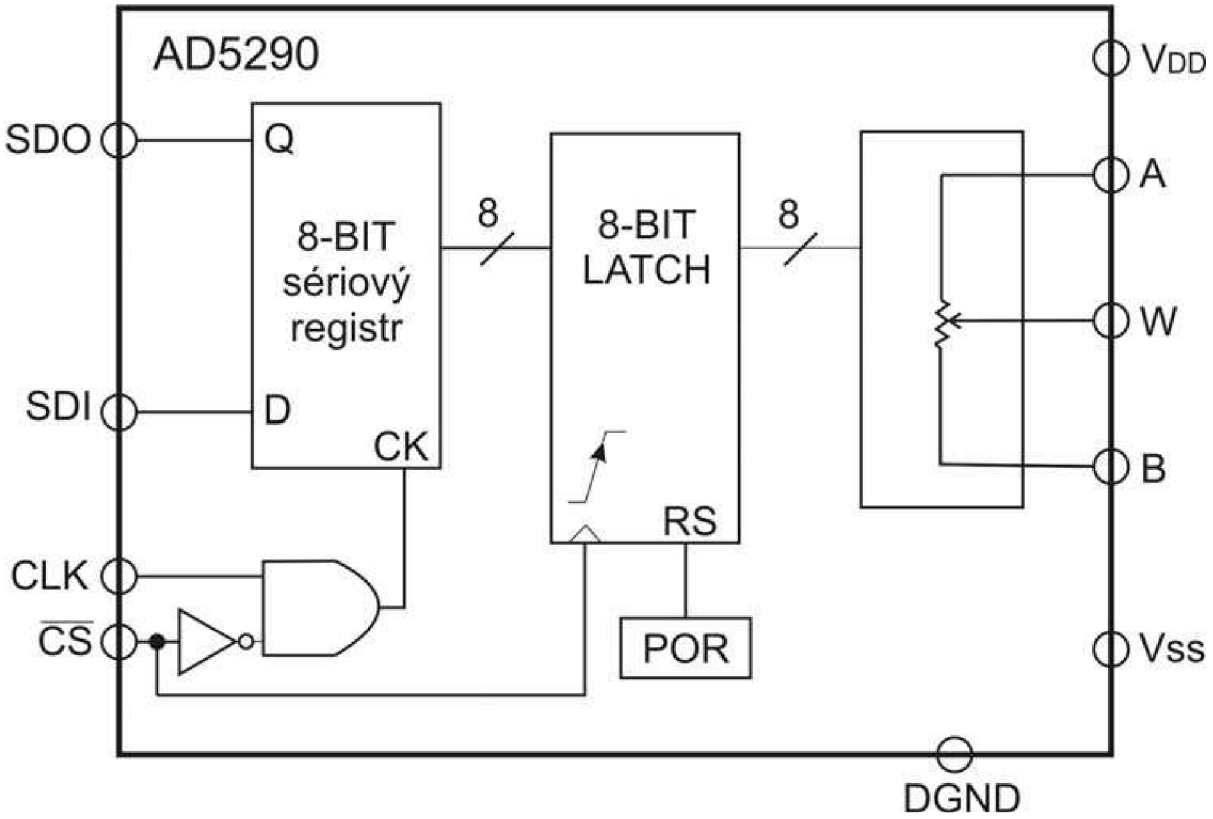
Obr.31: Propojení master-slave na sběrnici SPI (převzato z [19])

SCK je v tomto případě časový signál, který je generován jednotkou Master a přijímán jednotkou Slave. Iniciováním časového registru SPI začíná přenos po sběrnici. Data

z generátoru času v jednotce Master pomocí vývodu MOSI přenáší do stejného vývodu v jednotce Slave. Po přenosu informace časového bitu z Master modulu v MOSI kanálu je generován příznak konce bitu a generováno přerušení. Vývod SS v modulu Slave je nastaven na 0. Když je vývod SS v modulu Slave nastaven na 1, je SPI sběrnice deaktivována. SPI sběrnice je ovládána registrem rychlosti a formátu přenosu SPCR, stavovým registrem příznaku dokončení přenosu a kolize přenosu a registrem vstupních a výstupních dat SPDR.

8.3 Digitální potenciometr

Řízení parametrů lze provádět potenciometry, které dokáží měnit výstupní napětí v závislosti na poloze řídicího členu. Z hlediska mechanické spolehlivosti a přesnosti nastavení je výhodné nahradit mechanické potenciometry jeho digitální variantou, u které je jezdec nahrazen elektronickým obvodem. Typická ukázka elektronického řešení digitálního potenciometru je znázorněna na následujícím obrázku [20].



Obr.32: Blokové schéma digitálního potenciometru AD5290 (převzato z [20])

Digitální potenciometr zde sestává z 8-mi bitového registru, jako náhrada mechanického jezdce u klasického analogového potenciometru je zde odporová kaskáda jako náhrady mechanické dráhy. Podobně jako mechanické potenciometry jsou digitální potenciometry vybaveny třemi vývody A, B a W. Vývod D, v mechanické verzi představující jezdec, je

v digitální variantě potenciometru elektronicky pomocí přepínačů připojován do rezistorové sítě prostřednictvím kódu řízení. Kód řízení je do sériového registru posílán prostřednictvím sběrnic :

- Paralelní
- Dvouvodičové I ^{2}C
- Sériové SPI

V současné době se k přenosu kódu řízení často využívají poslední dvě jmenované sběrnice. S výhodou lze použít digitální potenciometr pro přenos dat do mikroprocesoru.. Potenciometry se vyrábí ve škále od 1 kΩ do 1 MΩ. Fyzická přesnost odporu se pohybuje dle různých výrobců od 15 do 30%. Lineární převod z nastaveného čísla na odpor je však prováděn přesně a lze jej odvodit dle příslušných vzorců.

Výhody digitálních potenciometrů:

- Pokud je při některé aplikaci požadován přesné nastavení výstupního odporu po malých krocích „nahoru i dolu“, lze použít dvoutlačítkový potenciometr s jedním tlačítkem nastavujícím zvýšení odporu a druhým tlačítkem nastavujícím jeho snižování
- Při požadavku větší přesnosti odporů je možno použít více digitálních potenciometrů v jednom pouzdře, což umožňuje souběh hodnot odporů s dosahovanou přesností řádově až desetin procenta.
- U digitálního potenciometru odpadá z potenciometru jezdec, který bývá zdrojem chyb při nepřesném kontaktu s dráhou mechanického potenciometru a zdrojem možných přechodových jevů při pohybu jezdce po dráze.
- Digitální potenciometry jsou dodávány v pouzdrech MSOP a proti mechanickým potenciometrům u nich dochází k značnému zmenšení rozměrů.
- Je možno volit digitální potenciometr s pamětí pro uložení posledního nastavení odporové kaskády

Nevýhody digitálních potenciometrů

- 8-mi bitový volič jako náhrada mechanického jezdce má vlastní odpor se zanedbatelnou závislostí na pozici v odporové kaskádě v rozmezí desítek až stovek ohmů. Z toho plyne omezení při nastavování přesných malých napětí.
- Digitální potenciomertry jsou charakteristické vlastní kapacitou rezistorové kaskády, což může způsobit nepřiznivé vlivy v dynamických charakteristikách obvodu (závislost na kmitočtu, případné oscilace)

Navržený digitální potenciometr

Na základě výše uvedeného rozboru výhod a nevýhod digitálních potenciometrů byl pro aplikaci zvolen typ AD5290YRMZ10 firmy Analog Devices. Jedná se o digitální potenciometr jehož hlavní parametry jsou :

- Velikost odporu 10kΩ
- Počet poloh 8-mi bitového voliče je 256
- Napájecí napětí +4.5V až +30V
- 10-pinové MSOP pouzdro
- programování prostřednictvím SPI sběrnice

Hodnotu odporu digitálního potenciometru lze zjistit výpočtem dle vzorce uvedeném v katalogu výrobce AD5290 (ANALOG DEVICES : AD5290: Compact +30V/±15V 256-Position Digital [21]

Vzorec má následující tvar [21]

$$R_{WA}(D)=((256-D)/256)*R_{AB} + 3*R_w , \quad (43)$$

kde jednotlivé symboly mají následující význam, D je poloha jezdce 0 až 255, R_{AB} je celkový odpor digitálního potenciometru 10kΩ, R_W je odpor jezdce 8-mi bitového voliče 50Ω. Např. pro polohu 8-mi bitového voliče D = 10 je odpor [21]

$$R_{WA}(10)=((256-10)/256)*10 + 3*50 = 159{,}6\ k\Omega. \quad (43)$$

8.4 LCD displej

V navrhované aplikaci je použit dvouřádkový LCD displej s 8 znaky na řádek typ : PC1602F-B. LCD displej je řízen obvodem HD44780 firmy Hitachi. V navrhované aplikaci je použita z důvodu optimalizace zapojení mikroprocesoru. Komunikace je realizována po čtyřech datových linkách z důvodu úspory vývodů mikroprocesoru.

Výběr zasílání dat nebo posílání příkazů organizuje RS. Signál R (read) a signál W (write) řídí čtení případně zápis dat. Signál E řídí povolení vstupu. Uspořádání jednotlivých vývodů je uvedeno v následující tabulce [2] .

Číslo vývodu	Signál	Funkce signálu
1.	GND	ZEM (0V)
2.	U_{CC}	Napájecí napětí (4.75V až 5.25V)
3.	U_0	Nastavení kontrastu displeje
4.	RS	Příkaz (log,0), data (log,1)
5.	R/W	Čtení (log,0), zápis (log,1) data nebo příkaz
6.	E	Vstup povolení
7.	PC0	Data/příkaz (dolní bit)
8.	PC1	Data/příkaz
9.	PC2	Data/příkaz
10.	PC3	Data/příkaz
11.	PC4	Data/příkaz
12.	PC5	Data/příkaz
13.	PC6	Data/příkaz
14.	PC7	Data/příkaz (horní bit)
15.	A	Anoda podsvětlení LED diody
16.	K	Katoda podsvětlení LED diody

Tab.1: Uspořádání vývodů na LCD displeji

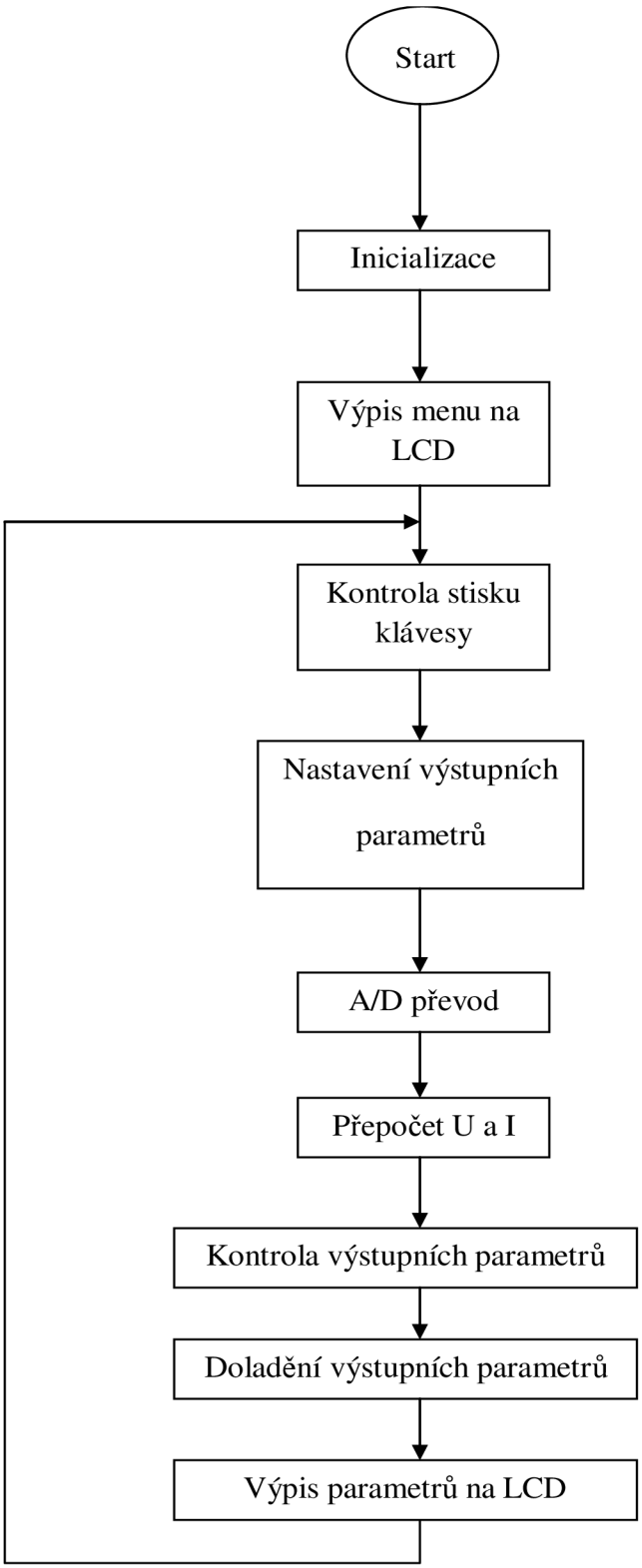
8.5 Popis řídící části

Jádrem celého obvodu je mikroprocesor ATmega 644 v pouzdře PDIP. Na tento mikroprocesor je připojen konektor pro LCD displej, který bude zobrazovat výstupní parametry zdroje. Dále je k mikroprocesoru připojen konektor pro klávesnici, pomocí které se budou zadávat výstupní parametry zdroje, jako je výstupní napětí a nastavení proudové pojistky. Samozřejmě je k mikroprocesoru připojen konektor pro jeho naprogramování. Dále jsou také připojeny digitální potenciometry AD5290 pomocí SPI sběrnice jejichž parametry jsou uvedeny výše. Výstupní hodnoty zdroje jsou na mikroprocesor přivedeny přes odporový dělič. Tento dělič je navrhnut tak, když je na výstupu zdroje 30 V, aby na vstupu A/D převodníku bylo 5 V. Právě tato hodnota je maximální pro vstup A/D převodníku.

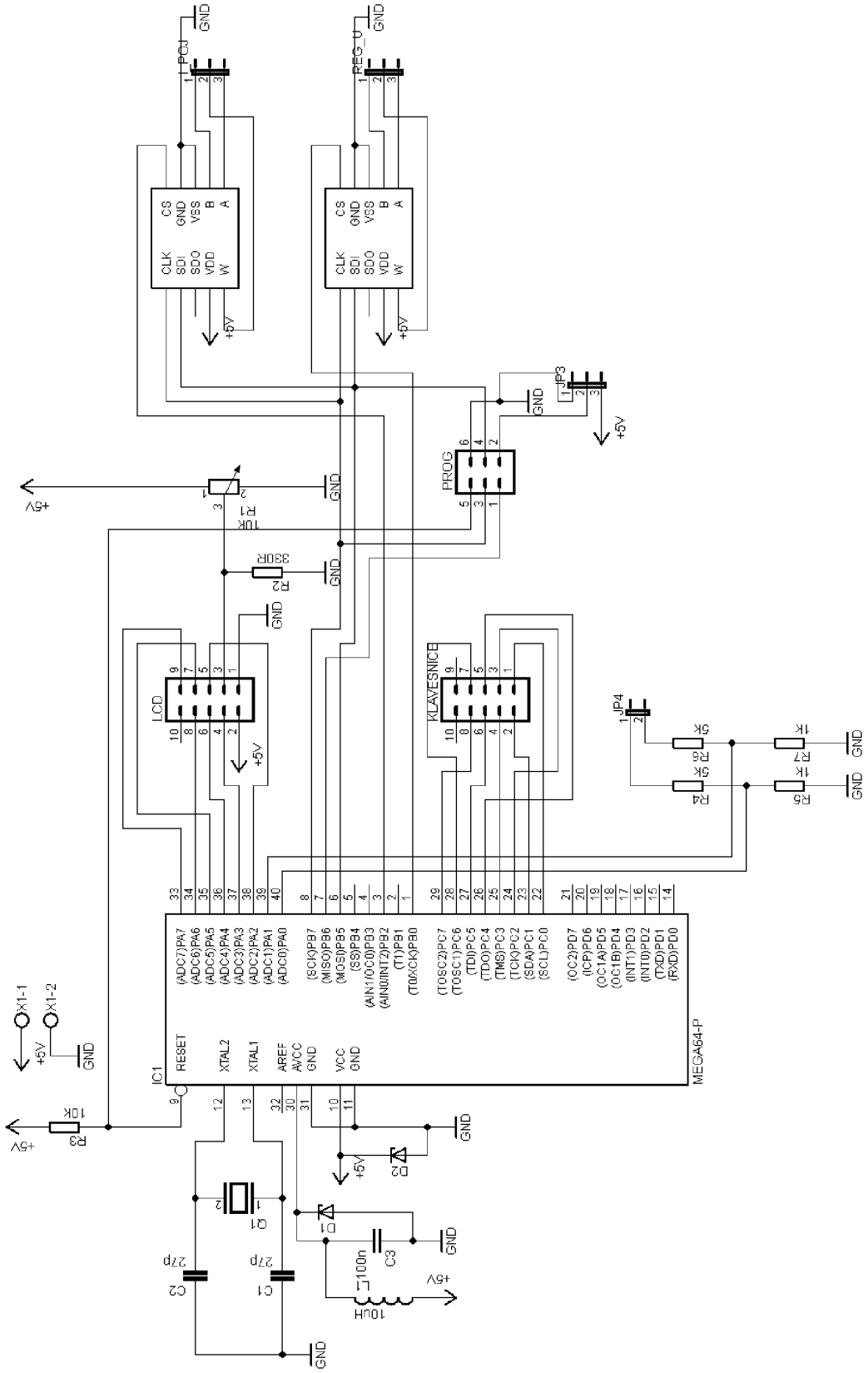
8.6 Řídící program mikroprocesoru

Program začíná inicializací vstupních/výstupních portů jako je A/D převodník, LCD displej, digitální potenciometry a SPI sběrnice. Dalším krokem je výpis menu programu na LCD displej.

Poté se program dostane do nekonečné smyčky ve, které kontroluje stisknuté klávesy na klávesnici. Dále nastaví výstupní hodnoty zdroje podle zadaných parametrů. Následuje A/D převod, přepočet napětí a proudů na skutečné hodnoty. Kontrola výstupních hodnot zdroje. Dalším krokem je doladění výstupních parametrů zdroje (pokud je třeba) na odpovídající zadanou hodnotu. Posledním krokem je výpis výstupních parametrů zdroje na LCD displej. Poté se program vrátí zpět ke kroku kontrola stisku klávesy a celá smyčka běží znovu.



Obr.33: Vývojový diagram ovládacího programu mikroprocesoru



Obr.34: Schéma řídící části zdroje

8.7 Metodika měření prototypu laboratorního zdroje

Vyrobený prototyp zdroje je podroben testům z důvodu ověření dosažitelnosti parametrů předpokládaných při návrhu zařízení. Metodiku navrhuji tak, aby bylo možno porovnat v grafické oblasti skutečně měřené parametry laboratorního zdroje s parametry simulovanými u varianty zdroje č.2 (kap.5.2).

Současně je použito vyhodnocení měření metodou statistické analýzy. Statistická analýza byla použita pro případ vyloučení měřených hodnot, zapříčiněných případným zakmitáváním a nelinearitami při poklesu výkonové charakteristiky a funkci proudové pojistky. Princip měření je totožný s postupem při simulaci. Na výstup zdroje je připojen nastavitelný zátěžový odpor a při nastavení konkrétní zátěže jsou měřeny výstupní parametry zdroje pro výstupní napětí: 30 V, 24 V a 6 V. Pro tato výstupní napětí jsou zvolena hodnoty nastavitelné proudové pojistky shodné se simulacemi a to: 0,4 A 0,75 A 1,7 A a 3 A. Na každé provozní hodnotě zdroje je odečítáno 5 hodnot a určena střední hodnota (44) a směrodatná odchylka (45) dle vztahů [22]:

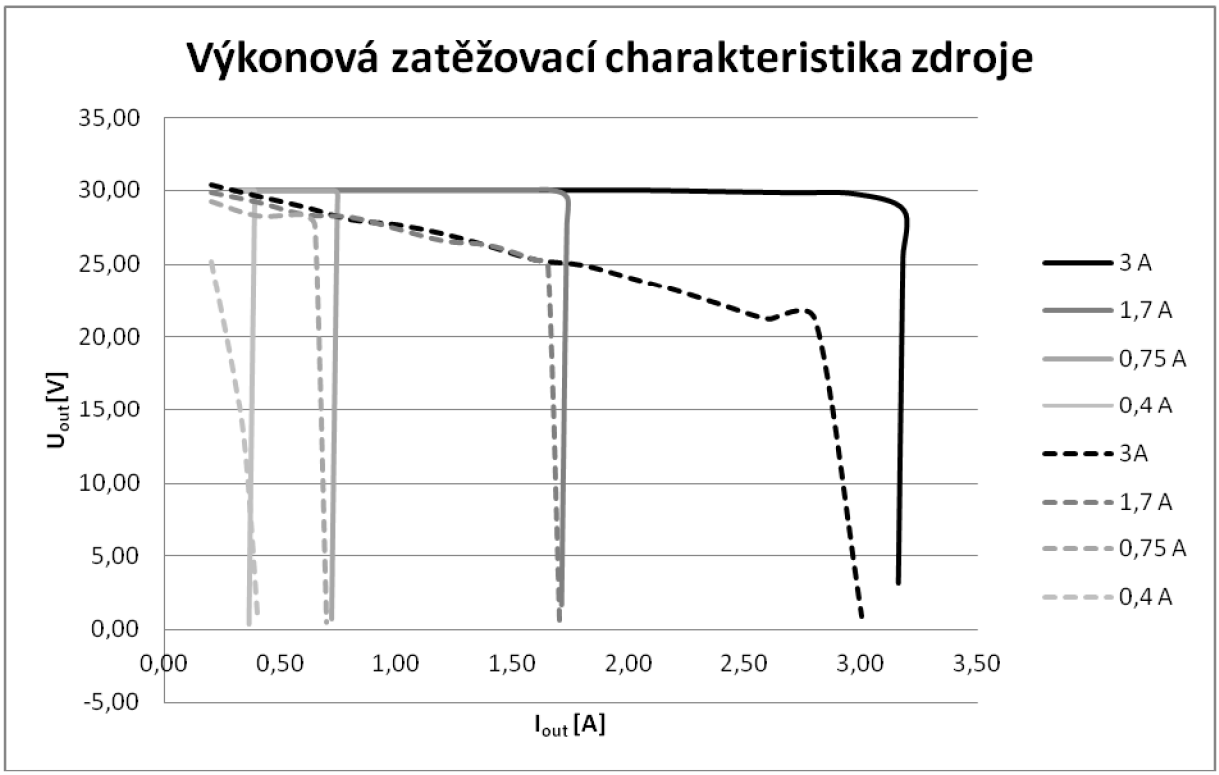
$$\overline{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i \tag{44}$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2\right) - \overline{x}^2} \tag{45}$$

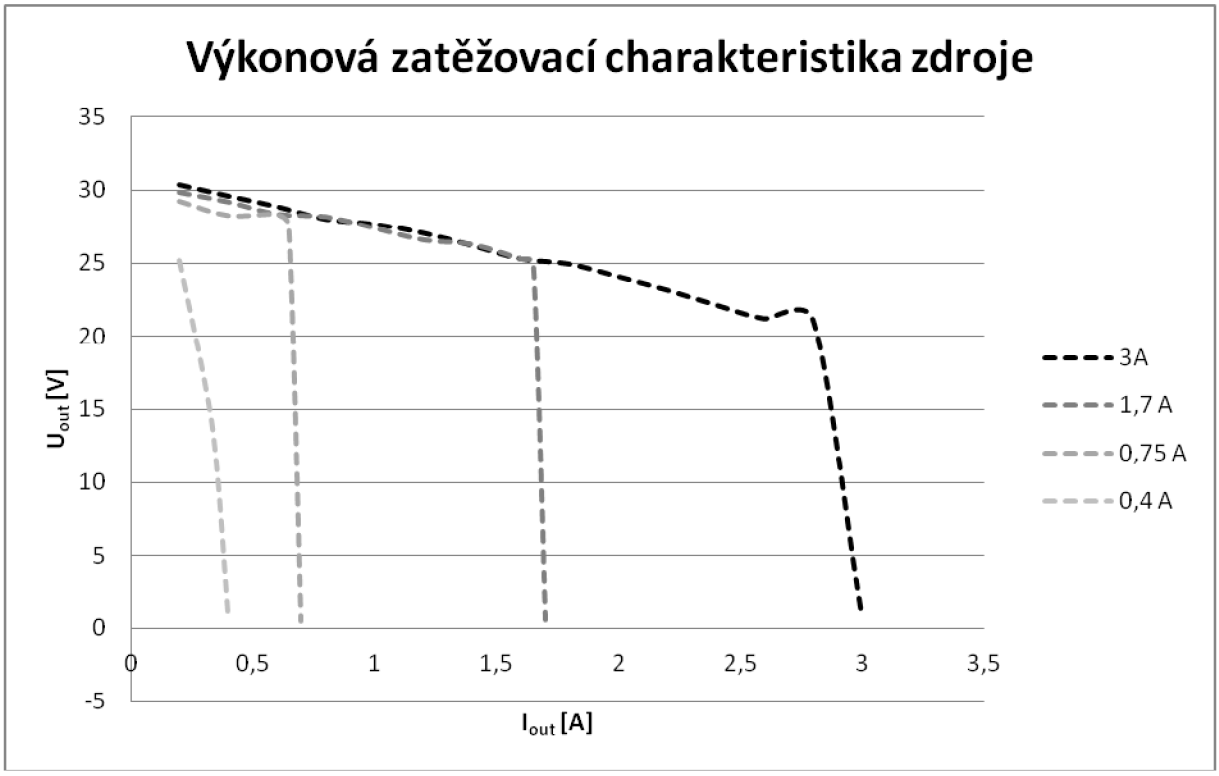
Při použití koeficientu rozšíření K = 2 je rozšířená směrodatná odchylka měření 0,3 A a 0,8 V, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti výskytu měřených hodnot v tomto pásmu 95 %.

8.8 Výsledky měření

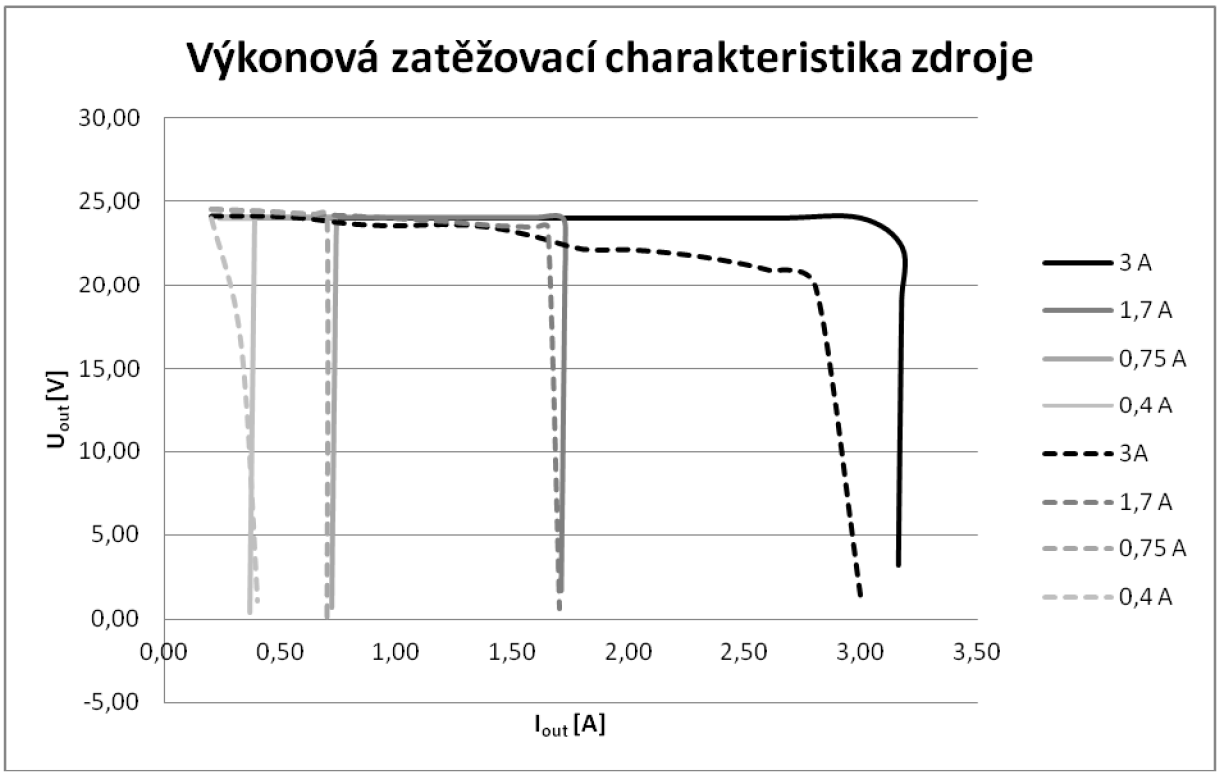
Na obrázcích 35, 37, 39 jsou graficky srovnány výkonové zatěžovací charakteristiky simulovaného zdroje č.2 s realizovaným zdrojem. U realizovaného zdroje je patrný značný pokles výstupního napětí zdroje se vzrůstajícím proudovým zatížením. To je způsobeno nedostatečným dimenzováním filtračních kondenzátorů. Dále je zde zachycena funkce proudové pojistky, která reaguje oproti simulaci dříve. Pro přehlednost výsledků jsou výkonové zatěžovací charakteristiky zobrazený samostatně na obrázcích 36, 38, 40.



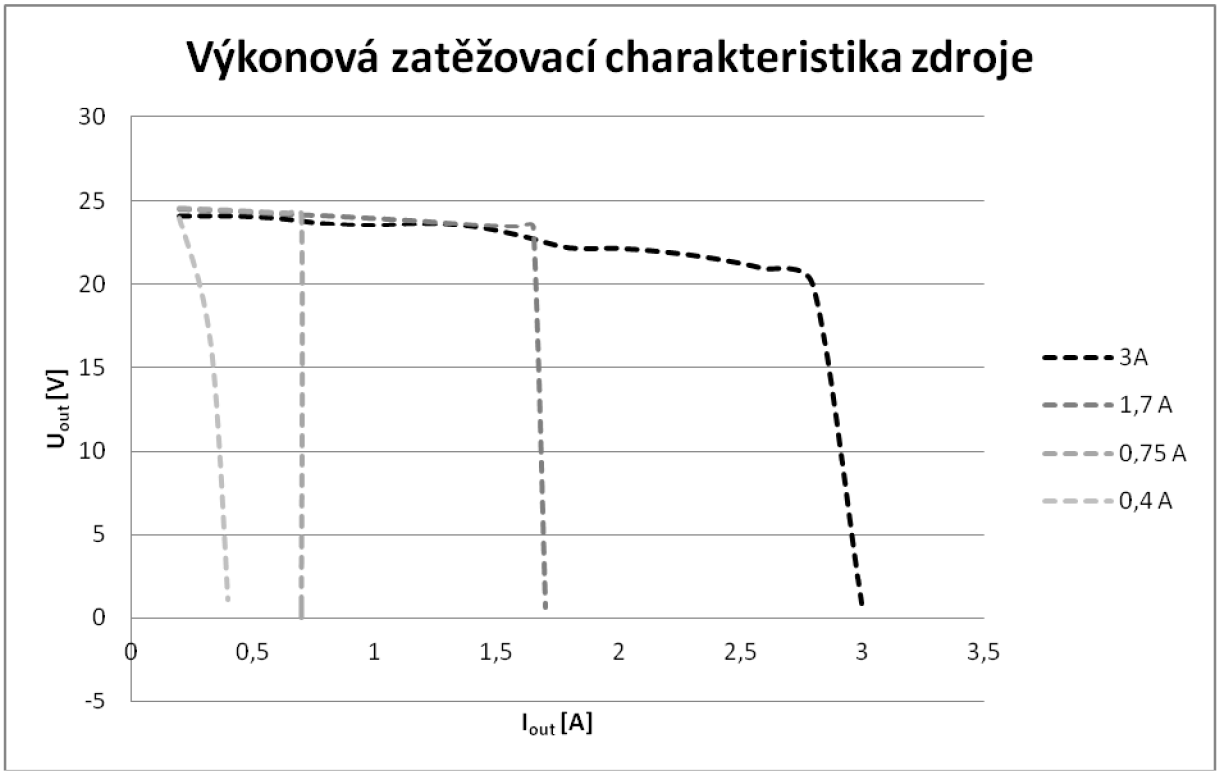
Obr.35: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 30 V



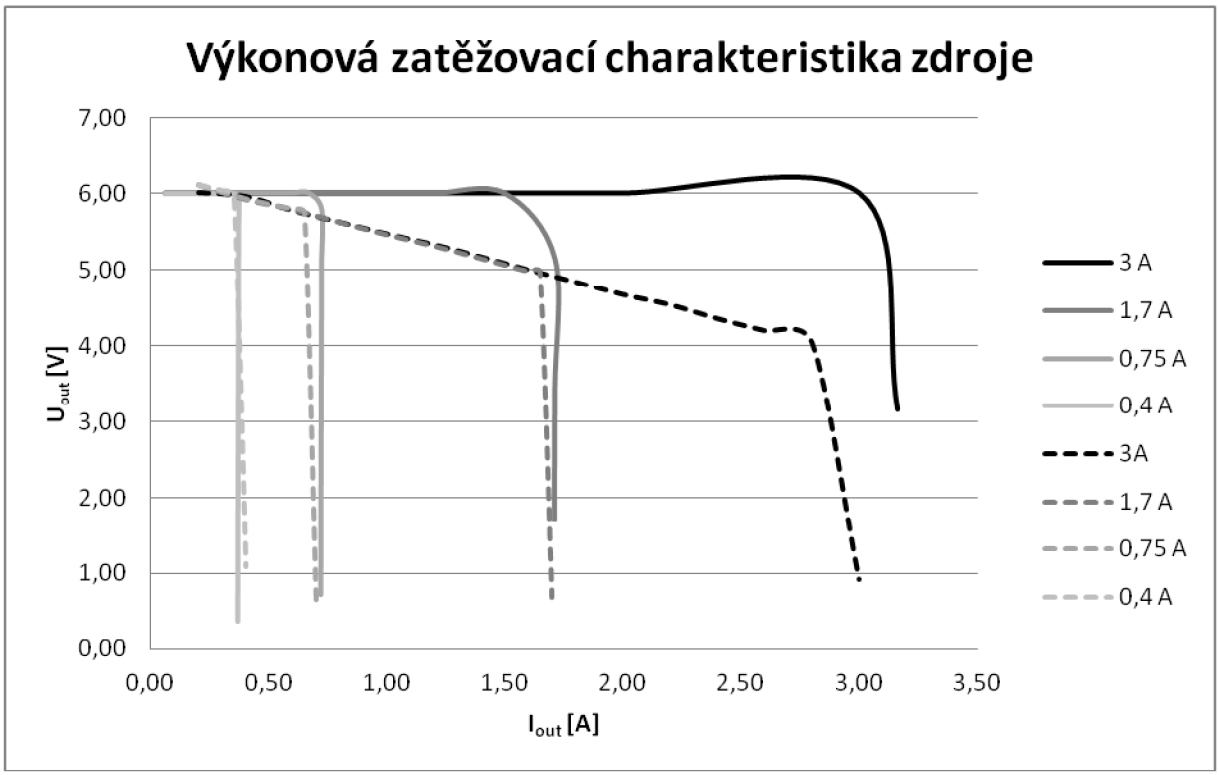
Obr.36: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 30 V



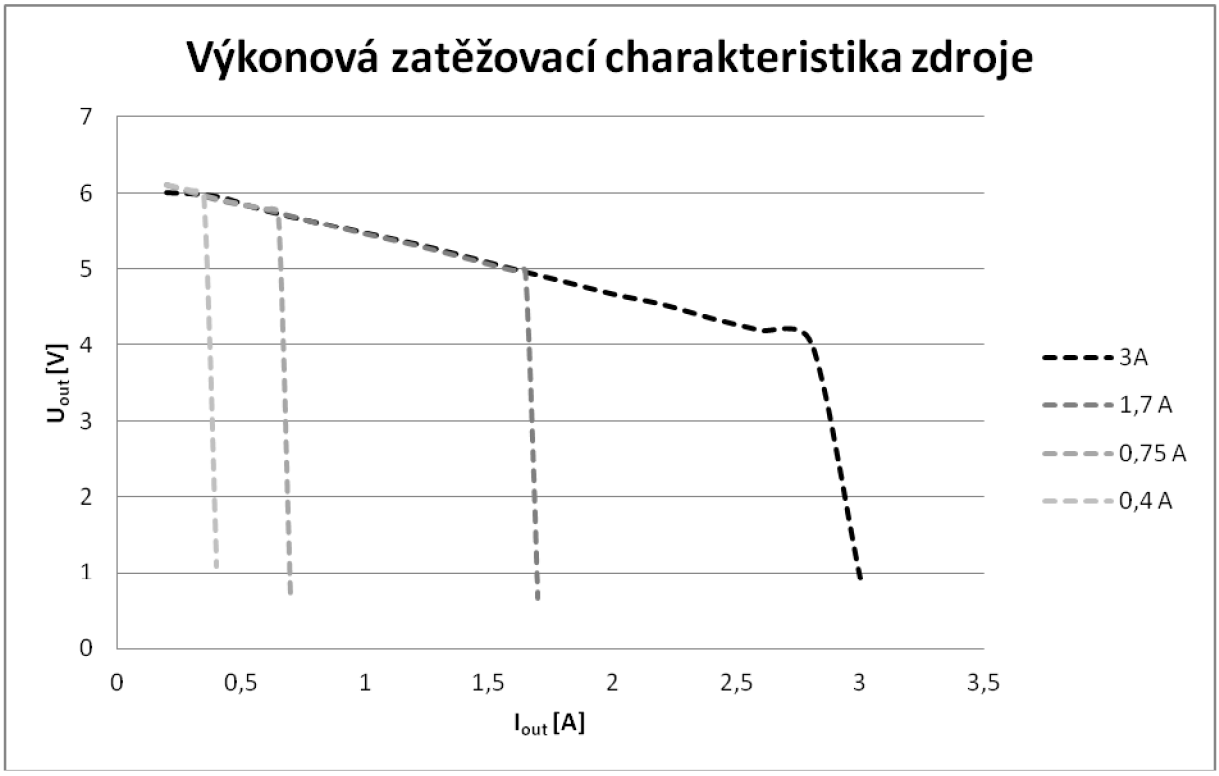
Obr.37: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.38: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 24 V



Obr.39: Srovnání výkonových zatěžovacích charakteristik simulovaného a realizovaného zdroje pro výstupní napětí 6 V



Obr.40: Výkonová zatěžovací charakteristika realizovaného zdroje pro výstupní napětí 6V

9 Závěr

Zadání bakalářské práce bylo prostudovat různá zapojení napájecích zdrojů. Vybrané napájecí zdroje analyzovat v programu OrCAD a na základě provedených simulací vybrat nejvhodnější zapojení. Vybrané zapojení přizpůsobit parametrům 2x 0 - 30V/ 0 – 3 A, s možností nastavitelné proudové pojistky. Dále pro vybrané zapojení navrhnout digitálního řízení pomocí digitálních potenciometrů. Následné celé zařízení realizovat.

Z prostudovaných zapojení napájecích zdrojů byla vybrána čtyři zapojení, která byla simulována programem OrCAD. Podle výsledků simulace byl zvolen zdroj č.2 (kap 5.2) z důvodu nejvýhodnějších parametrů simulací modelů napájecích zdrojů.

Vybrané zapojené bylo upraveno pro požadované parametry zadání. Byla navržena koncepce digitálního řízení pomocí digitálních potenciometrů AD5290 firmy ANALOG DEVICES. Které jsou řízeny mikroprocesorem ATmega 644. Zmíněný mikroprocesor také zajišťuje měření výstupních hodnot zdroje, zobrazování výstupní parametrů na LCD displeji a nastavování výstupních parametrů zdroje pomocí 4x4 maticové klávesnice.

Celý zdroj je realizován na třech deskách plošných spojů. První deska obsahuje usměrňovač s filtrem a pomocná napájecí napětí pro operační zesilovače, mikroprocesor, LCD displej a digitální potenciometry. Druhá deska plošných spojů je osazena stabilizátorem a nastavitelnou proudovou pojistkou. Třetí deska obsahuje kompletní digitální řízení. Je zde umístěn mikroprocesor, patice pro maticovou klávesnici, LCD displej a digitální potenciometry.

Zkompletované zařízení je důkladné proměřeno, pro každou provozní hodnotu bylo odečítáno 5 hodnot, které se vyhodnocovaly metodou statistické analýzy tak, že byla určena stření hodnota a směrodatná odchylka. Výsledky měření jsou znázorněny v grafické formě a přehledně porovnány simulované a naměřené hodnoty. Měřením bylo zjištěno, že se liší simulované a skutečně měřené hodnoty výkonových charakteristik.

Jak je patrno z grafů dochází k poklesu výstupního napětí se vzrůstajícím proudovým zatížením. Tento pokles je pravděpodobně způsoben nedostatečným dimenzováním filtračních kondenzátorů v silové napájecí větvi usměrňovače.

Při měření docházelo také k zahřívání výkonových tranzistorů zejména při výstupním napětí 6 V a výstupním proudu větším než 1,4 A. Tento jev lze řešit zvýšeným odvodem tepla z povrchu tranzistoru např. zvětšením plochy chladiče, přidáním aktivního chlazení nebo použitím výkonového tranzistoru vyššího výkonu.

10 LITERATURA

[1] MACH, L. Simulace a realizace laboratorního zdroje, Diplomová práce, Brno FEKT VUT v Brně, 2010

[2] KOCIÁN, D. Digitálně řízený napájecí zdroj, Diplomová práce, Brno FEKT VUT v Brně, 2010

[3] KREJČIŘÍK, A. Napájecí zdroje I. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 350 s. ISBN 80-7300-002-4

[4] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice Praha: BEN – technická literatura 1997, 3.vydání, ISBN 80-901984-3-0

[5] Transformátory, 8.6.2001, dostupné na WWW: http://elektrika.cz/data/clanky/cotav010608

[6] Usměrňovače, 14.6.2008, dostupné na WWW: http://www.zirafoviny.cz/modules/news/article.php?storyid=17

[7] KRÚŽELA, M. Stabilizátory napětí a jejich řešení, Diplomová práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2008, dostupné na WWW: http://dspace.knihovna.utb.cz/bitstream/handle/10563/6756/kr%C5%AF%C5%BEela_2008_dp.pdf?sequence=1

[8] COUFAL, T. Laboratorní zdroj řízený mikroprocesorem [online]. Dostupné na www: < http://hw.cz/teorie-praxe/konstrukce/art2086-laboratorni-zdroj-rizenymikroprocesorem.html>.

[9] Datasheed obvodu LM317, 25.2.2011, SN SNVS774, dostupné na WWW: http://www.national.com/ds/LM/LM117.pdf

[10] Datasheed tranzistoru BD135, dostupné na WWW: http://www.datasheetarchive.com/

[11] Datasheed tranzistoru BD243, dostupné na WWW: http://www.datasheetarchive.com/

[12] Laboratorní zdroj 0-30V, 0-3A dostupné na WWW: http://www.sob.xf.cz/zdroj.php

[13] Datasheed usměrňovacího můstku B250C10000, dostupné na WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/227/227-002/dsh.227-002.1.pdf

[14] Datasheed LED diody, dostupné na WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/511/511-815/dsh.511-815.1.pdf

[15] Radek Vancl, Základy LED 20.1.2009, dotupné na WWW: http://pandatron.cz/?605&led

[16] Pavel Tišnovský, Externí sériová sběrnice SPI a I^2C, 30.12.2008, dostupné na WWW: http://www.root.cz/clanky/externi-seriove-sbernice-spi-a-i2c/#k02

[17] Martin Malý, USB 2.0, 22.2.2005, dostupné na WWW: http://www.hw.cz/Rozhrani/ART1232-USB-2.0---dil-1.html

[18] Datasheed TL431, listopad 1998, dostupné na WWW: http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/T/L/4/3/TL431.shtml

[19] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 320 s. ISBN 80-7300-174-8.)

[20] KAINKA, BURKHARD. USB. Měření, řízení a regulace pomocí sběrnice USB. Praha:BEN - technická literatura, 2003, 247 s. ISBN 80-7300-073-3.

[21] Datasheed Gigitálního potenciometru AD5290 dostupné na WWW: http://www.analog.com/static/importedfiles/data_sheets/AD5290.pdf

[22] Wikipedia směrodatná odchylka dostupné na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodatn%C3%A1_odchylka

11 Seznam symbolů, veličin a zkratek

LCD displej z tekutých krystalů

A/D analogo digitální převodník

MIPS milion instrukcí za sekundu

EEPROM elektricky mazatelná paměť

SRAM statická polovodičová paměť

USART synchronní / asynchronní sériové rozhraní

SPI sériová sběrnice

I2C sériová sběrnice

SCK hodinový signál

MOSI vodič sériové sběrnice

MISO vodič sériové sběrnice

SS vodič sériové sběrnice

SPCR formátu přenosu dat

SPDR registrem vstupních a výstupních dat

U napětí

U_{max} maximální napětí

U_{out} výstupní napětí

U_{REF} referenční napětí

U_{be} napětí báze emitor

U_0 řídící napětí

P výkon

I proud

I_{out} výstupní proud

R rezistor

B přenos

K teplotní součinitel výstupního napětí

K_u napětový přenos

H_{fe} proudový zesilovací činitel

t čas

D dioda

LED dioda LED

A_N zesílení operačního zesilovače

C kondenzátor

$\bar{x}$ střdení hodnota

σ směrodatná odchylka

12 Seznam příloh

A. Usměrnovač a filtr

A.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)

A.2 Osazovací plán

A.3 Obvodové zapojení

A.4 Seznam součástek

B. Regulační část zdroje

B.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)

B.2 Osazovací plán

B.3 Obvodové zapojení

B.4 Seznam součástek

C. Řídící část

C.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)

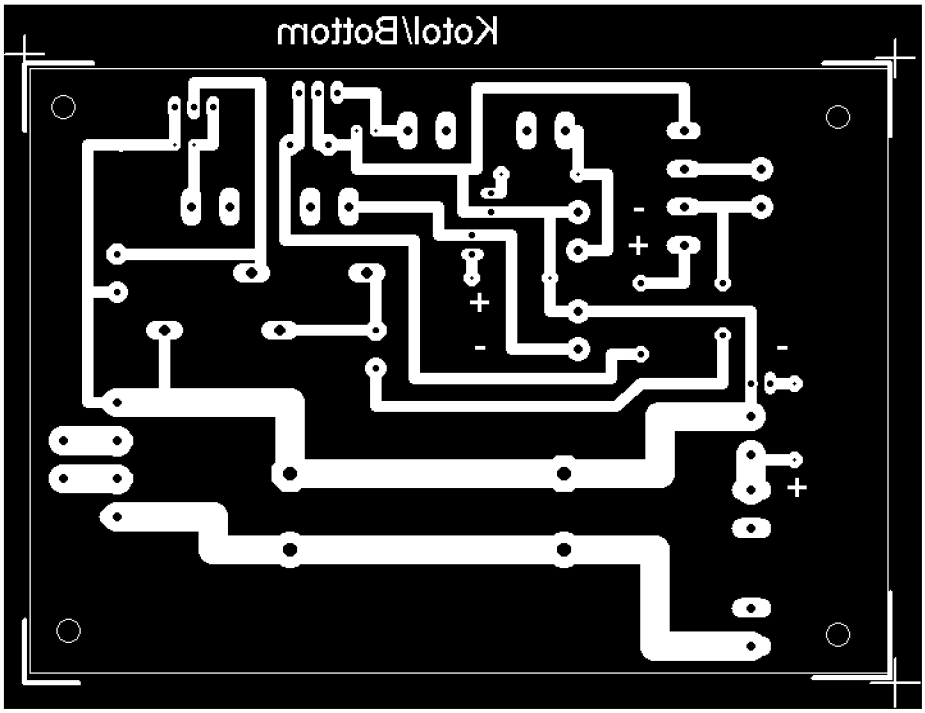
C.2 Osazovací plán

C.3 Obvodové zapojení

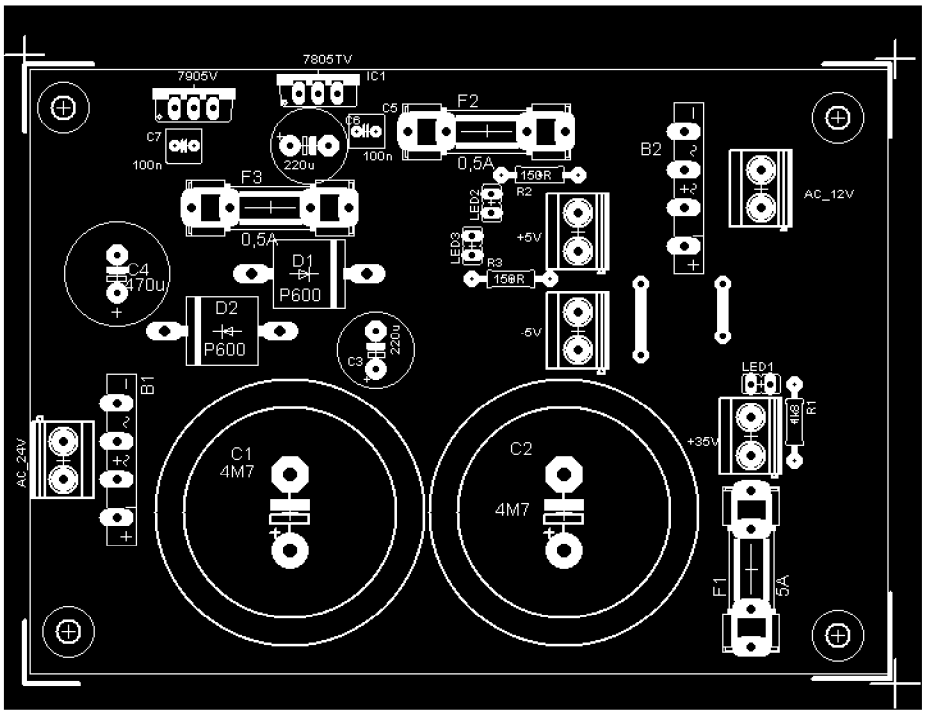
C.4 Seznam součástek

A. Usměrnovač a filtr

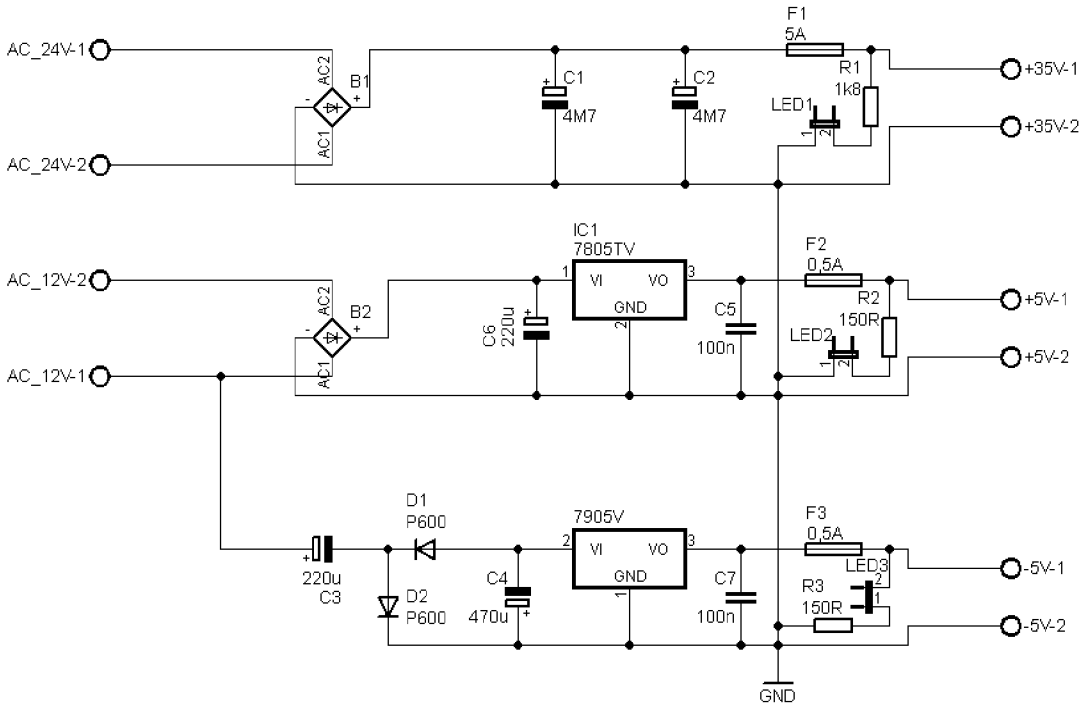
A.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)



A.2 Osazovací plán



A.3 Obvodové zapojení

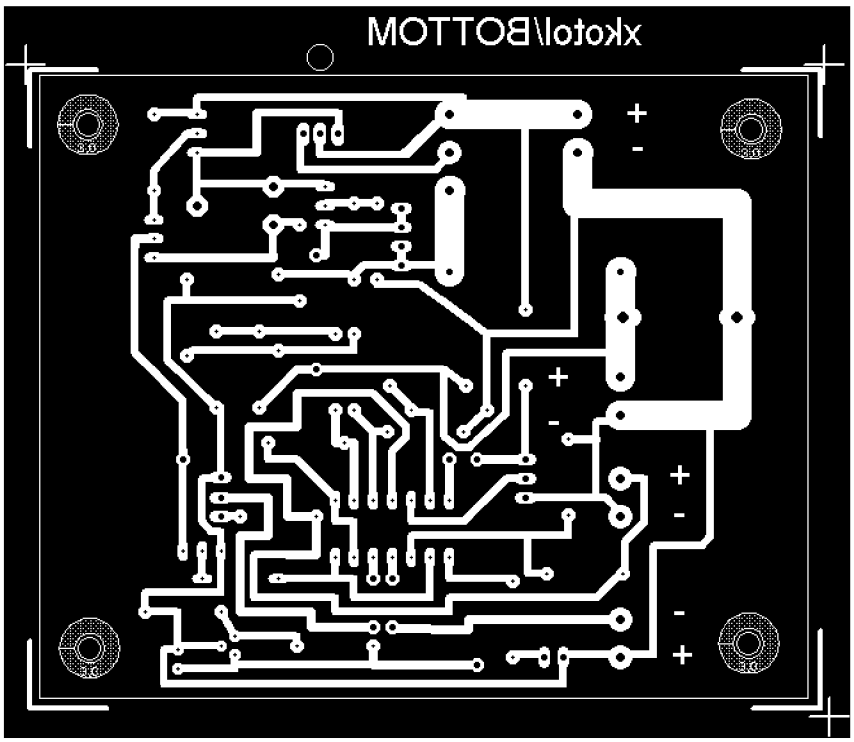


A.4 Seznam součástek

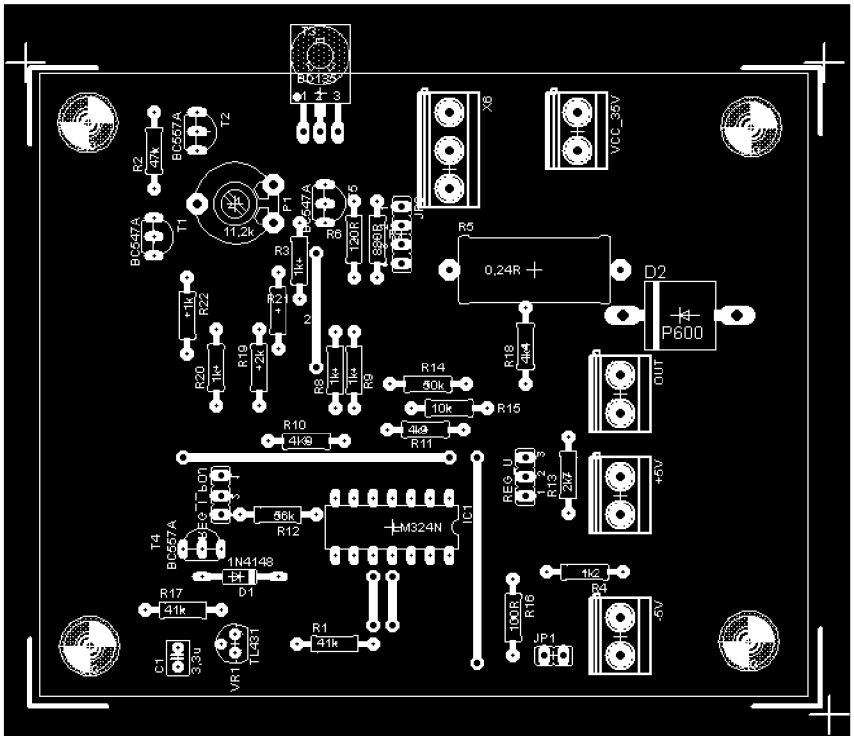
usměrnovač		
označení	hodnota	popis
B1	B2508000	usměrnovač
B2	B2508000	usměrnovač
C1	4m7/50V	kondenzátor
C2	4m7/50V	kondenzátor
C3	220u/100V	kondenzátor
C4	470u/50V	kondenzátor
C5	100n	kondenzátor
C6	220u/50V	kondenzátor
C7	100n	kondenzátor
D1	P600K	dioda
D2	P600K	dioda
R1	1k8	rezistor
R2	150R	rezistor
R3	150R	rezistor
F1	5A	pojistka
F2	0,5A	pojistka
F3	0,5A	pojistka
svorkovnice	ARK210/2EX	svorkovnice
kolík	ASS110306	oboustranný kolík
pouzdro	SI-HA11200	pouzdro na pojistku

B. Regulační část zdroje

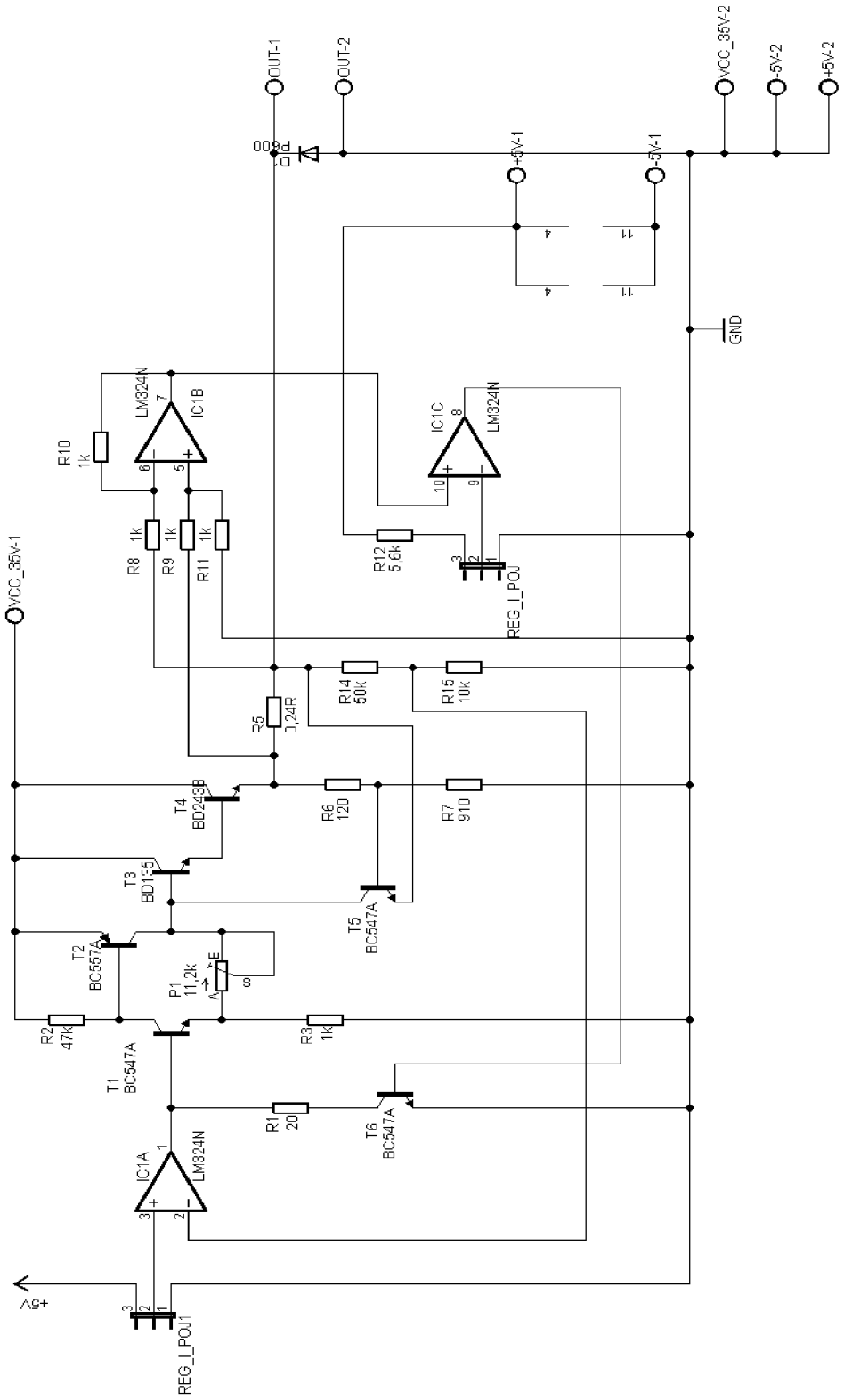
B.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)



B.2 Osazovací plán



B.3 Obvodové zapojení

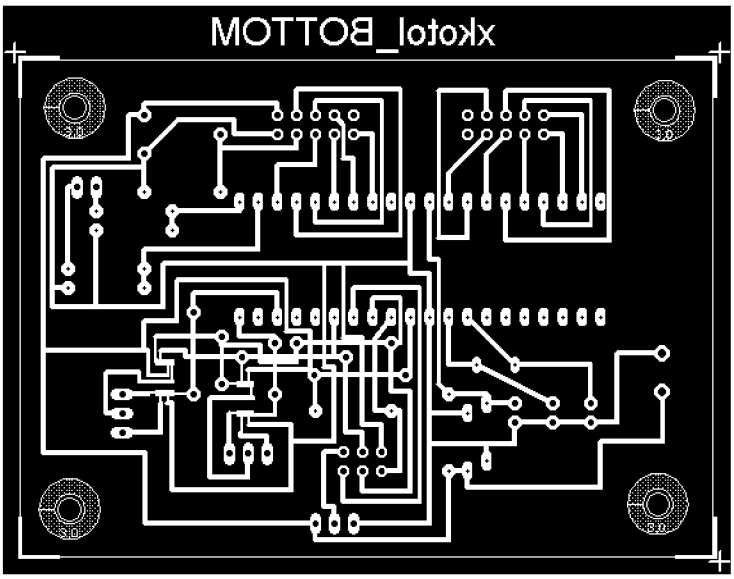


B.4 Seznam součástek

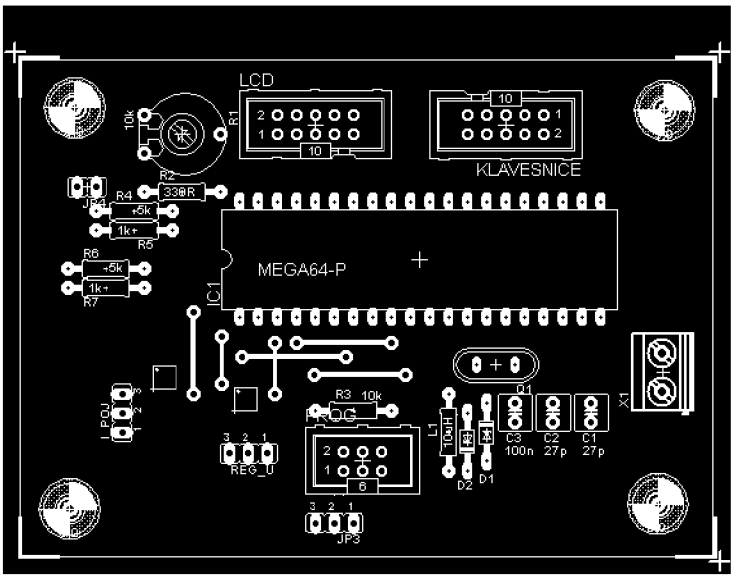
regulační část		
označení	hodnota	popis
R1	41k	rezistor
R2	47k	rezistor
R3	1k	rezistor
R4	1k2	rezistor
R5	0,22R/5W	rezistor
R6	120R	rezistor
R7	910R	rezistor
R8	1k	rezistor
R9	1k	rezistor
R10	11k	rezistor
R11	11k	rezistor
R12	56k	rezistor
R13	2k7	rezistor
R14	50k	rezistor
R15	10k	rezistor
R16	100R	rezistor
R17	41k	rezistor
R18	4k4	rezistor
R19	5k	rezistor
R20	1k	rezistor
R21	5k	rezistor
R22	1k	rezistor
VR1	TL421	referenční zdroj
IC1	LM324	operační zesilovač
T1	BC547	tranzistor
T2	BC557	tranzistor
T3	BD135	tranzistor
T4	BD243	tranzistor
T5	BC547	tranzistor
T6	BC557	tranzistor
C1	3u3	kondenzátor
D1	1N4148	dioda
D2	P600k	dioda
kolík	ASS110306	oboustranný kolík
svorkovnice	ARK210/2EX	svorkovnice
svorkovnice	ARK310/2EX	svorkovnice

C. Řídící část

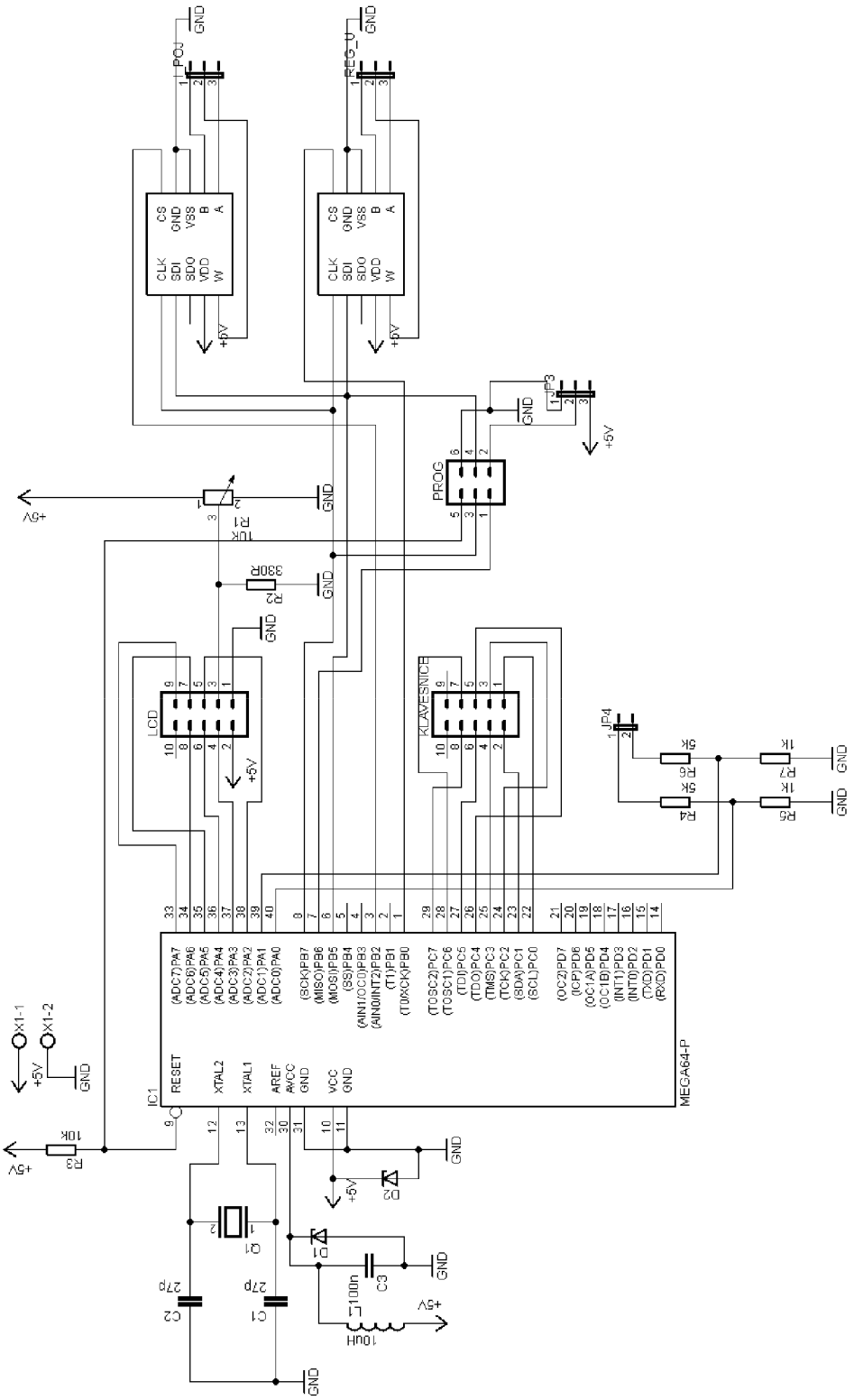
C.1 Deska plošného spoje – botoom(strana spojů)



C.2 Osazovací plán



C.3 Obvodové zapojení



C.4 Seznam součástek

řídící část		
označení	hodnota	popis
R1	10k	potenciometr
R2	330R	rezistor
R3	10k	rezistor
R4	5k	rezistor
R5	1k	rezistor
R6	5k	rezistor
R7	1k	rezistor
C1	27p	kondenzátor
C2	27p	kondenzátor
C3	100n	kondenzátor
L1	10uH	tlumivka
D1	5,6V	zenerova dioda
D2	5,6V	zenerova dioda
LCD	ML-10	patice
klávesnice	ML-10	patice
prog	ML-06	patice
AD5290	10k	digitální potenciometr
AD5290	10k	digitální potenciometr
Atmega 644-P		mikroprocesor
svorkovnice	ARK210/2EX	svorkovnice
kolík	ASS110306	oboustranný kolík