

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

PRAKTICKÁ REALIZACE SYMETRICKÉHO STABILIZOVANÉHO ZDROJE

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF SYMMETRICAL REGULATED SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

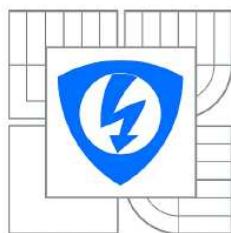
JÁN PEKAROVIČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ PETRŽELA, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Ján Pekarovič
Ročník: 3

ID: 115254
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Praktická realizace symetrického stabilizovaného zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principem, stavebními bloky a postupem návrhu symetrického stabilizovaného zdroje 0 V až 30 V. Ve vhodném programu proveďte návrh desky plošného spoje.

Na základě výsledků první etapy řešení projektu navržený zdroj prakticky realizujte. Detailním laboratorním měřením ověřte nejen jeho správnou činnost, ale rovněž zjistěte jeho základní parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

[2] DOSTÁL, T. Teorie elektronických obvodů. Skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2006.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá návrhom stabilizovaného zdroja s možnosťou regulácie napätia na výstupe v rozsahu od 0 V do 30 V. Ten je navrhutý ako dva nezávislé regulovateľné napájacie zdroje, ktoré je možné spriahnuť a vytvoriť tak symetrický stabilizovaný zdroj. Popisovaný zdroj je opatrený elektronickou prúdovou poistkou na ochranu pripojeného zariadenia i samotného zdroja pred zničením. Súčasťou práce je aj simulácia navrhutého zapojenia pre teoretické overenie funkčnosti, návrh dosky plošných spojov, chladenia a prístrojovej skrinky a výsledky základných meraní na realizovanom zdroji.

Kľúčové slová

Stabilizovaný zdroj, elektronická prúdová poistka, simulácia, doska plošných spojov, chladič.

Abstract

This thesis deals with a stabilized power supply capable of maintaining the output voltage from 0 V to 30 V. It is suggested as two independent adjustable power supply that can interlock to create a symmetric stabilized source. The described source is provided with electronic fuse to protect the connected device and the source itself from destruction. Part of this work is the simulation suggested time diagram for theoretical verification of functionality, design of circuit boards, cooling and case and basic measurement results on the realized power supply.

Keywords

Stabilized power supply, electronic fuse, simulation, circuit board, heatsink.

PEKAROVIČ, J. *Praktická realizace symetrického stabilizovaného zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 53 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Jiří Petržela, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému *Praktická realizace symetrického stabilizovaného zdroje* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálneho projektu a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s jej vytvorením som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 27. mája 2011 podpis autora

PodĎakovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jiřímu Petrželovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa 27. mája 2011 podpis autora

Obsah

1. Úvod	10
1.1 Základné rozdelenie napájacích zdrojov	10
1.2 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov	11
2. Lineárne napájacie zdroje	12
2.1 Princíp činnosti	12
2.2 Transformátor	13
2.2.1 Princíp činnosti	13
2.2.2 Rozdelenie transformátorov	14
2.2.3 Návrh transformátoru obecné	14
2.3 Usmerňovač	18
2.3.1 Rozdelenie usmerňovačov	18
2.3.2 Typy usmerňovačov	19
2.3.3 Jednocestný usmerňovač	19
2.3.3.1 Jednocestný usmerňovač s nezotrvačnou záťažou	19
2.3.3.2 Jednocestný usmerňovač so zotrvačnou záťažou	20
2.3.4 Dvojcestný usmerňovač	21
2.3.5 Mostíkový usmerňovač	23
2.4 Stabilizátor	23
2.4.1 Rozdelenie stabilizátorov	24
2.4.2 Parametrické stabilizátory	24
2.4.3 Spätnoväzobné stabilizátory	25
2.4.4 Referenčné zdroje	25
3. Návrh napájacieho zdroja	27
3.1 Zdroje A a B	27
3.1.1 Popis a schéma zapojenia	27
3.2 Modul C	31
3.2.1 Popis a schéma zapojenia	31
4. Simulácia	35
4.2 Simulácia zdrojov A a B	35
5. Dosky plošných spojov	38
5.1 DPS zdrojov A a B	38
5.2 DPS modulu C	41
5.3 Výroba a osadenie DPS	42
6. Realizácia napájacieho zdroja	43
6.1 Chladenie	43
6.2 Prístrojová skrinka	45
7. Meranie parametrov zdroja	48
7.1 Meranie statických parametrov	48
7.2 Meranie dynamických parametrov	50
8. Záver	51
Literatúra	52

Zoznam obrázkov

Obr. 1.1	Napájanie elektronického systému.....	10
Obr. 2.1	Bloková schéma elektronického lineárneho napájacieho zdroja.....	12
Obr. 2.2	Ideálny transformátor pri zaťažení.....	13
Obr. 2.3	Rozmery EI plechov.....	15
Obr. 2.4	Jednocestný usmerňovač s nezotrvačnou záťažou.....	19
Obr. 2.5	Napätie a prúd na jednocestnom usmerňovači s nezotrvačnou záťažou.....	20
Obr. 2.6	Jednocestný usmerňovač so zotrvačnou záťažou.....	20
Obr. 2.7	Napätie a prúd na jednocestnom usmerňovači so zotrvačnou záťažou.....	21
Obr. 2.8	Dvojcestný usmerňovač so zotrvačnou záťažou.....	22
Obr. 2.9	Napätie a prúd na dvojcestnom usmerňovači so zotrvačnou záťažou.....	22
Obr. 2.10	Mostíkový usmerňovač so zotrvačnou záťažou.....	23
Obr. 2.11	Principiálne zapojenie parametrického stabilizátoru.....	24
Obr. 2.12	Spätnoväzobný stabilizátor so sériovou reguláciou.....	25
Obr. 2.13	Spätnoväzobný stabilizátor s paralelnou reguláciou.....	25
Obr. 2.14	Referenčné zdroje.....	26
Obr. 3.1	Bloková schéma celého zdroja.....	27
Obr. 3.2	Bloková schéma zdroja A/B.....	27
Obr. 3.3	Zdroj referenčného napätia.....	28
Obr. 3.4	Obvod obmedzenia výstupného prúdu.....	28
Obr. 3.5	Diferenčný zosilňovač.....	29
Obr. 3.6	Schéma zapojenia zdrojov A a B.....	30
Obr. 3.7	Zapojenie stabilizátora 7805.....	31
Obr. 3.8	Funkcia logickej časti modulu C.....	33
Obr. 3.9	Schéma zapojenia modulu C.....	33
Obr. 4.1	Simulačné prostredie Pspice 9.1.....	35
Obr. 4.2	Simulácia záporného a referenčného napätia.....	36
Obr. 4.3	Zvlnenie vstupného napätia.....	36
Obr. 4.4	Zvlnenie výstupného napätia.....	37
Obr. 4.5	Testovanie na kontaktnom poli.....	37
Obr. 5.1	DPS zdroja A – vrchná strana.....	38
Obr. 5.2	DPS zdroja A – spodná strana.....	39
Obr. 5.3	DPS zdroja B – vrchná strana.....	39
Obr. 5.4	DPS zdroja B – spodná strana.....	40
Obr. 5.5	Osadenie DPS zdrojov A a B súčiastkami.....	40
Obr. 5.6	DPS modulu C – spodná strana.....	41
Obr. 5.7	Osadenie DPS modulu C súčiastkami.....	41
Obr. 5.8	DPS pripravená na leptanie.....	42
Obr. 5.9	DPS po vyleptaní.....	42
Obr. 6.1	Bloková schéma chladiaceho systému.....	44
Obr. 6.2	Korekčný graf pre nútené chladenie.....	44
Obr. 6.3	Predný, zadný a spodný diel skrinky.....	46
Obr. 6.4	Vrchný a bočné diely skrinky.....	47
Obr. 7.1	Statická zaťažovacia charakteritika.....	49
Obr. 7.2	Závislosť zvlnenia výstupu na odoberanom prúde.....	49
Obr. 7.3	Zobrazenie zvlnenia na vstupe a výstupe analógovým osciloskopom.....	50

Zoznam tabuliek

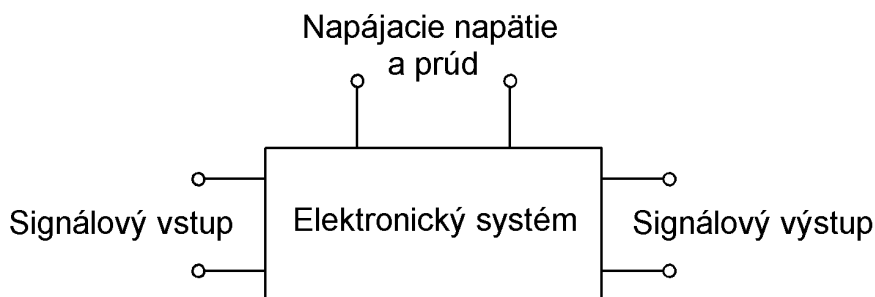
Tab. 1.1 Porovnanie parametrov lineárnych a spínaných zdrojov	11
Tab. 2.1 Účinnosť transformátoru	14
Tab. 2.2 Typy EI plechov	16
Tab. 2.3 Vodiče firmy PRAKAB	17
Tab. 3.1 Zoznam súčiastok zdrojov A a B	31
Tab. 3.2 Pravdivostná tabuľka klopného obvodu RS	32
Tab. 3.3 Pravdivostná tabuľka NAND	33
Tab. 3.4 Zoznam súčiastok modulu C	34
Tab. 7.1 Statická zaťažovacia charakteristika	48
Tab. 7.2 Závislosť zvlnenia výstupu na odoberanom prúde.....	49

Zoznam symbolov

B	magnetická indukcia
δ	hrúbka izolácie transformátorových plechov
C	kapacita kondenzátora
d	priemer Cu vodiča
D	priemer CuL vodiča
f	kmitočet
I	elektrický prúd
J	prúdová hustota
n	počet transformátorových plechov
N	počet závitov
η	účinnosť
p	činiteľ zvlnenia
P	výkon
π	Ludolfovo číslo
R	elektrický odpor
δ	merná hmotnosť
S	plocha
t	hrúbka transformátorových plechov
U	elektrické napätie

1 Úvod

Všetky elektronické zariadenia potrebujú pre svoju činnosť elektrickú energiu. Táto energia je dodávaná z napájacích zdrojov. Napájací zdroj je zariadenie, ktoré je schopné dodať elektronickému systému napätie a prúd potrebný k jeho správnej činnosti, teda k činnosti daného priebehu a v danej tolerancii.



Obr. 1.1 Napájanie elektronického systému

1.1 Základné rozdelenie napájacích zdrojov [3]

a) podľa **primárneho zdroja elektrickej energie** :

- autonómne napájacie zdroje (elektrochemické zdroje, solárne články)
- využívajúce elektrickú energiu iného primárneho zdroja

b) podľa **typu dodávaného výkonu** :

- zdroje jednosmerných napätí a prúdov
- zdroje striedavých napätí a prúdov

c) podľa **základného fyzikálneho princípu činnosti** :

- elektrochemické (primárne a sekundárne suché články)
- elektromechanické (generátory, agregáty, dynamá, alternátory)
- zdroje využívajúce elektrickú rozvodnú sieť (elektronické napájacie zdroje)
- ostatné (solárne články apod.)

d) podľa **povahy vnútorných dejov** :

- zdroje neregulované
- zdroje regulované (se spojitou či nespojitou reguláciou)

1.2 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov [1], [3]

Lineárne zdroje (nazývané aj spojité zdroje) sú v dnešnej dobe stále viac nahradzované spínanými zdrojmi. Hlavným dôvodom je najmä nižšia účinnosť lineárnych zdrojov. Tá sa pohybuje zvyčajne okolo 30 %. Lineárne zdroje majú v porovnaní so spínaným zdrojom porovnateľného výkonu spravidla väčšiu hmotnosť i mechanické rozmery. Koncepcia, návrh a obvodová zložitosť spínaného zdroja je však komplikovanejšia. Nevýhodou spínaných zdrojov z hľadiska ich vysokého pracovného kmitočtu je vyššia cena jednotlivých súčiastok, ktoré musia na týchto kmitočtoch spoľahlivo pracovať. Postupne ale klesá cena týchto súčiastok a klesá aj výkonová hranica efektívneho využívania spínaných zdrojov. Výstupné zvlnenie je vo väčšine prípadov u spínaných zdrojov niekoľkonásobne vyššie ako u zdrojov lineárnych, čo by mohlo prekážať napríklad v audiotechnike. Lineárne zdroje sa vyznačujú tiež niekoľkonásobne rýchlejšou reakciou na náhle zmeny zaťažovacieho prúdu. Nasledujúca tabuľka obsahuje zhrnutie niekoľkých dôležitých parametrov oboch typov napájacích zdrojov.

parameter	spínaný zdroj	lineárny zdroj
účinnosť	75 (%)	30 (%)
veľkosť	0,2 (W/cm ³)	0,05 (W/cm ³)
váha	100 (W/kg)	20 (W/kg)
výstupné zvlnenie	50 (mV)	5 (mV)
šumové napätie	200 (mV)	50 (mV)
odozva na skok	1 (ms)	20 (μs)
doba nábehu	20 (ms)	2 (ms)
cena	približne konštantná	rastie s výkonom

Tab. 1.1 Porovnanie parametrov lineárnych a spínaných zdrojov [1]

2. Lineárne napájacie zdroje

2.1 Princíp činnosti [3], [5]

Napájací zdroj môžeme rozdeliť na niekoľko blokov, z ktorých každý má svoje špecifické vlastnosti a zároveň výrazným spôsobom ovplyvňuje vlastnosti jednosmerného napájacieho zdroja ako celku. Prvým blokom v spomínanom reťazci je transformátor. Ten zabezpečuje zmenu veľkosti napätia energetickej rozvodnej siete 230V/50Hz na hodnotu potrebnú pre napájanie daného elektronického zariadenia. Druhým blokom v reťazci je usmerňovač. Ten je pripojený k sekundárnemu vinutiu sieťového transformátora. Pretože diódy použité v usmerňovači umožňujú prietok prúdu iba v jednom smere, má usmernené napätie len jednu polaritu. Činnosť diód a časový priebeh usmerneného napätia a prúdu závisí na konkrétnom zapojení usmerňovača a na odoberanom prúde. Za usmerňovačom získavame síce jednosmerné, ale pulzujúce napätie a prúd. Jeho kmitočet je pri jednocestnom usmernení rovný frekvencii energetickej rozvodnej siete, teda 50 Hz a pri dvojcestnom usmernení je rovný dvojnásobnej frekvencii energetickej rozvodnej siete, teda 100 Hz. Práve z tohto dôvodu sa za blok usmerňovač zaraďuje filtračný kondenzátor, alebo dolnopriepustný filter tvorený integračným článkom RC alebo LC. Na výstupe filtra však nedostávame úplne vyhladené jednosmerné napätie, ale na tomto napätí je nasuperponované malé striedavé napätie. Jeho veľkosť závisí od kvality filtra a od odoberaného prúdu. Aj napriek výraznému vyhladeniu výstupného jednosmerného napätia sa toto napätie nemôže použiť pre napájanie niektorých obvodov nF a vF techniky. Aby sme získali jednosmerné napätie vhodné na napájanie vyššie spomínaných obvodov, musíme sem zaradiť ešte blok stabilizátora napätia alebo prúdu. Ten má zaistiť konštantnosť výstupného napätia alebo prúdu pri rôznom odbere prúdu a pri kolísaní usmerneného zvlneného napätia na výstupe usmerňovača.



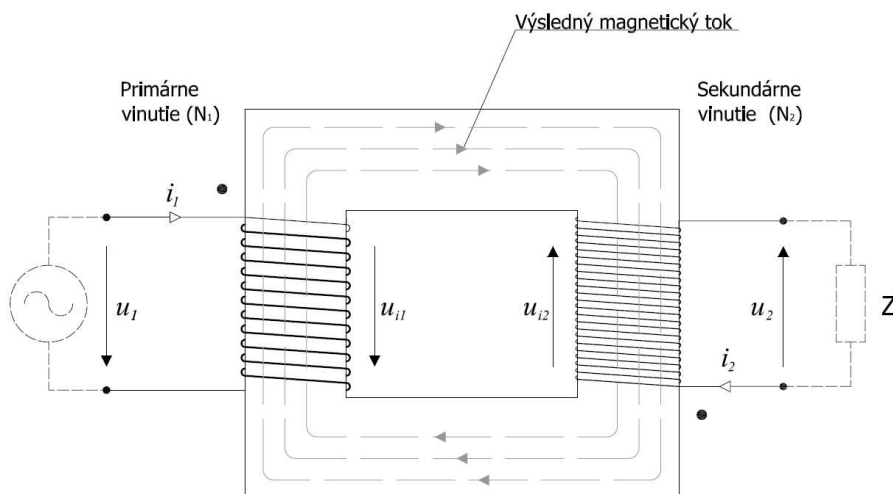
Obr. 2.1 Bloková schéma elektronického lineárneho napájacieho zdroja

2.2 Transformátor [1], [3], [7]

Transformátor je dvojbrán alebo viacbrán, ktorý umožňuje prenos elektrickej energie z jedného (primárneho) elektrického obvodu do druhého (sekundárneho) pomocou vzájomnej elektromagnetickej indukcie. Striedavý prúd v primárnom obvode vytvára premenlivé magnetické pole, ktoré následne indukuje striedavý prúd v sekundárnom obvode. Používa sa na zmenu veľkosti napätia nahor alebo nadol bez zmeny frekvencie. Transformátor zabezpečuje aj galvanické oddelenie dvoch elektrických obvodov, prípadne transformáciu impedancií.

2.2.1 Princíp činnosti

Transformátor pracuje na princípe elektromagnetickej indukcie. Elektrická energia privádzaná do primárneho vinutia transformátora sa prenáša magnetickým obvodom do sekundárneho vinutia. Ak pripojíme na primárne vinutie striedavé sínusové napätie o okamžitej hodnote u_1 , začne týmto vinutím pretekať prúd i_1 . Ten vytvorí magnetický tok Φ_1 a na základe indukčného zákona vznikne v sekundárnom vinutí napätie u_{i2} . V prípade, že výstupnú cievku transformátora zaťažíme záťažou Z , začne sekundárnou stranou pretekať prúd o okamžitej hodnote i_2 . Hodnota a zmysel prúdu je daný charakterom záťaže. Na základe Lenzovho princípu je magnetický tok Φ_2 vytvorený prúdom i_2 reakčný, teda musí pôsobiť proti zmyslu magnetického toku Φ_1 . Popisovaný princíp je patrný z nasledujúceho obrázku.



Obr. 2.2 Ideálny transformátor pri zaťažení [5]

2.2.2 Rozdelenie transformátorov

a) podľa **aplikácie** :

- sieťové
- impulzné
- zdel'ovacie

b) podľa **počtu fáz** :

- jednofázové
- trojfázové
- viacfázové

c) podľa **dodávaného výkonu** :

- malé (do výkonu cca 5 kVA)
- výkonové (nad 5 kVA)

d) podľa **druhu chladenia** :

- vzduchové (chladenie vzduchom)
- olejové

2.2.3 Návrh transformátoru obecné

Pre návrh sieťového transformátoru potrebujeme tieto vstupné parametre: hodnotu sieťového kmitočtu (50 Hz) a maximálnu hodnotu magnetickej indukcie, povolenú pre daný typ magnetickeho obvodu. Potom môžeme pre užívateľské zadanie výstupných prúdov a napätí spočítať:

$$P_{\text{výst}} = U_{\text{výst1}} \cdot I_{\text{výst1}} + U_{\text{výst2}} \cdot I_{\text{výst2}} + \dots U_{\text{výstn}} \cdot I_{\text{výstn}} \text{ (W)} \quad (2.1)$$

Účinnosť transformátoru možno približne odhadnúť podľa nasledujúcej tabuľky:

výkon P (W)	< 10	10 - 100	100 - 1000
účinnosť η (%)	70	80	90

Tab. 2.1 Účinnosť transformátoru [1]

Primárny výkon je:

$$P_{vst} = P_{výst} \cdot 100/\eta \text{ (W)} \quad (2.2)$$

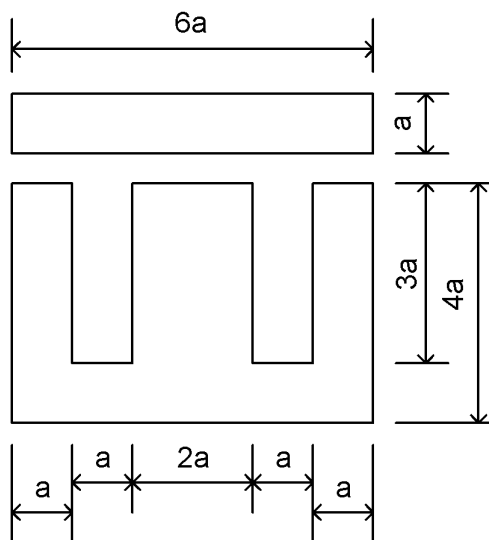
a primárny prúd má veľkosť:

$$I_{vst} = P_{vst} / U_{vst} \text{ (A)} \quad (2.3)$$

Pre danú hodnotu vstupného výkonu je nutné navrhnuť prierez magnetického obvodu (u EI plechov prierez stredného stĺpika), ktorý pri magnetickej indukcii $B=1 \text{ T}$ daný výkon prenesie magnetickým obvodom bez presýtenia:

$$S_{fe} = \sqrt{P_{vst}} \text{ (cm}^2, \text{ W)} \quad (2.4)$$

Pretože EI plechy sa vyrábajú iba určitých rozmerov, je nutné v tabuľke vybrať typ EI plechov a optimum existuje v prípade, kedy šírka stredného stĺpika $2a = \sqrt{S_{fe}}$. Potom sa tvar prierezu stredného stĺpika blíži štvorcovému $b = 2a$ a dĺžka závitov je minimálna (vinutie ako zdroj napätia má minimálnu hodnotu vnútorného odporu).



Obr. 2.3 Rozmery EI plechov

Normalizovaná hrúbka EI plechov je $t = 0,35 \text{ mm}$ alebo $t = 0,5 \text{ mm}$. Ich počet určíme:

$$n = S_{fe} / (2 \cdot a \cdot t) \text{ (-)} \quad (2.5)$$

Vzhľadom na izoláciu jednotlivých plechov nemá vzťah n plechov po zložení rozmery $2 \cdot a \cdot n \cdot t$, ale:

$$S_c = 2 \cdot a \cdot n \cdot (t + \delta) = 2 \cdot a \cdot b \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.6)$$

kde hrúbku izolácie plechov δ (mm) určíme obvykle meraním. Až plocha S_c je rozmerom vnútorného otvoru cievkového telieska. Najpoužívanéjšie typy EI plechov sú uvedené v nasledujúcej tabuľke.

Typ EI plechu	veľkosť 2a (mm)	prierez jadra S_{fe} = 4a² (cm ²)	prenášaný výkon P (W)	plocha okienka S_o = 3a² (mm ²)	plocha vinutia S_v (mm ²)
EI0	10	1,00	1,00	75	50
EI12	12	1,44	2,07	108	78
EI16	16	2,56	6,55	192	152
EI20	20	4,00	16,00	300	250
EI25	25	6,25	39,10	469	407
EI32	32	10,24	105	768	688
EI40	40	16,00	360	1200	1100
EI50	50	25,00	625	1875	1750
EI64	64	40,96	1678	3072	2912

Tab. 2.2 Typy EI plechov [1]

Počet závitov jednotlivých vinutí sa riadi koeficientom **N_j**, ktorý je daný vzťahom:

$$N_j = 45 / 2 \cdot a \cdot n \cdot t \quad (z/V, \text{ cm}^2) \quad (2.7)$$

Pre primárne vinutie (obvykle pre vstupné sieťové napätie 230 V) je počet závitov vinutia (uberáme 3% pre krytie strát v primárnom vinutí):

$$N_{\text{prim}} = N_j \cdot U_{\text{prim}} \cdot 0,97 \quad (-) \quad (2.8)$$

Pre všetky sekundárne vinutia počet závitov vypočítame (pridávame 3% pre krytie strát v sekundárnom vinutí):

$$N_{\text{sek}} = N_j \cdot U_{\text{sek}} \cdot 1,03 \quad (-) \quad (2.9)$$

Pre určenie počtu závitov jednotlivých vinutí určíme ešte ich potrebné prierezy na základe prúdovej hustoty. Pre trvalé zaťaženie spodných vinutí volíme obvykle **J = 2,5 A/mm²**, pre trvalé zaťaženie vrchných vinutí (vzhľadom k ich lepšiemu chladeniu) volíme **J = 3,5 A/mm²**. Na základe zvolenej prúdovej hustoty **j** vypočítame priemer vodiča:

$$d = \sqrt{(4 \cdot I / J \cdot \pi)} \quad (\text{mm}, A, A/\text{mm}^2) \quad (2.10)$$

Vodiče pre vinutia transformátorov sú opatrené lakovou izoláciou a označujú sa CuL. U každého výrovcu sa vyrábajú iba v rade číselných hodnôt priemeru, jednu z týchto rád pre výrobcu PRAKAB uvádza nasledujúca tabuľka.

priemer Cu vodiča d (mm)	priemer CuL vodiča D (mm)	prierez vodiča S_{cu} (mm ²)	maximálny prúd I_M (A) vodiča pri J = 2,55 (A/mm ²)	odpor vodiča na jeden meter dĺžky R₁ (Ω/m)	stratový výkon P_z = R₁·I_{N2} (W/m)
0,1	0,121	0,008	0,020	2,225	0,001
0,2	0,23	0,031	0,079	0,574	0,004
0,3	0,338	0,071	0,181	0,251	0,008
0,4	0,445	0,126	0,321	0,141	0,015
0,5	0,552	0,196	0,500	0,091	0,023
0,56	0,62	0,246	0,627	0,072	0,028
0,63	0,69	0,312	0,796	0,057	0,036
0,71	0,775	0,396	1,010	0,045	0,046
0,8	0,875	0,502	1,280	0,036	0,059
0,9	0,975	0,636	1,622	0,028	0,074
1,0	1,075	0,785	2,002	0,023	0,092
1,25	1,345	1,227	3,129	0,015	0,147
1,4	1,495	1,539	3,925	0,012	0,185
1,6	1,695	2,010	5,126	0,009	0,236
1,8	1,86	2,543	6,485	0,007	0,294

Tab. 2.3 Vodiče firmy PRAKAB [1]

Po voľbe typu jadra (veľkosti EI plechov a ich počtu) a po voľbe počtu závitov a príslušného priemeru vodiča je nutné skontrolovať, či sa uvedené vinutia zmestia na vybranú cievku. Pri vinutí je nutné uvažovať štvorcový prierez vodiča z tabuľky 4, ktorého plocha sa musí vypočítať pomocou vzťahu:

$$S_{CuL} = D^2 \cdot N \text{ (mm}^2\text{)} \quad (2.11)$$

Ďalej treba navrhnuť preklady medzi jednotlivými vinutiami a, ktorých hrúbka závisí na veľkosti jednotlivých napätí. Preklad medzi primárnym vinutím a sekundárnymi vinutiami je nevyhnutný. Pokiaľ označíme celkový prierez prekladov S_p , potom musí platiť nerovnosť:

$$\sum S_{CuL} + S_p < S_v \quad (2.12)$$

Uvedená nerovnosť by mala byť splnená s istou rezervou podľa kvality vinutia okolo **10% až 20 %** (koeficient plnenia).

Posledným krokom pri návrhu je výpočet strát v medi a železe a následné určenie účinnosti navrhnutého transformátora. Straty v medi vypočítame ako súčet strát všetkých vinutí, kde sa pri jednotlivých výpočtoch snažíme odhadnúť skutočnú hodnotu strednej dĺžky jedného závitú I_{str} , ktorá sa pohybuje v rozmedzí:

$$I_{strMIN} = 8 \cdot a + 8 \text{ (mm)} \quad (2.13)$$

Pre prvé vinutie na cievkovom teliesku až do hodnoty:

$$I_{\text{strMAX}} = 16.a \text{ (mm)} \quad (2.14)$$

Pre posledné (vrchné) vinutie transformátoru. Straty v medi teda vypočítame:

$$P_{\text{Cu}} = \sum P_z \cdot N \cdot I_{\text{str}} \cdot 10^{-3} \text{ (W, W/m, -, mm)} \quad (2.15)$$

Magnetizačné straty v železe určíme:

$$P_{\text{Fe}} = 24 \cdot 10^{-9} \cdot a^2 \cdot t \cdot n \cdot \delta \cdot P_j \text{ (W)} \quad (2.16)$$

kde **t (mm)** je hrúbka jedného plechu

n (-) je počet E plechov

δ (kg/m³) je merná hmotnosť železa ($7,8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$)

P_j (W/kg) sú kilogramové straty, obvykle sa pohybujú okolo 3 W/kg

Celkovú účinnosť transformátora potom môžeme oproti odhadu z tabuľky 1 upresniť:

$$\eta = P_{\text{výst}} / (P_{\text{výst}} + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}) \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (2.17)$$

2.3 Usmerňovač [1], [3]

2.3.1 Rozdelenie usmerňovačov

a) podľa **počtu fáz spracovávaného signálu** :

- jednofázové
- trojfázové

b) podľa **riaditeľnosti** :

- neriadené
- riadené

c) podľa **počtu pulzov výstupného signálu v rámci jednej periódy vstupného signálu** :

- jednocestné
- dvojcestné

d) podľa **charakteru záťaže** :

- usmerňovače s odporovou záťažou
- usmerňovače s kapacitnou záťažou
- usmerňovače s indukčnou záťažou
- usmerňovače so záťažou charakteru obecnej impedancie

e) podľa **kmitočtu vstupného signálu** :

- usmerňovače pracujúce s kmitočtom 50 Hz
- usmerňovače pracujúce s kmitočtom spínaného meniča (desiatky - stovky kHz)
- usmerňovače pracujúce s iným kmitočtom (100 Hz, 400 Hz)

f) podľa **d'alších typov obvodov radených medzi usmerňovače** :

- zdvojovače napätia
- násobiče napätia

2.3.2 Typy usmerňovačov

a) pre **sieťový kmitočet** :

- jednocestný (vysoké napätia, malé prúdy, veľké zvlnenie)
- dvojcestný (nízke napätia, veľké prúdy, malé zvlnenie)
- mostíkový (stredné napätia, veľké prúdy, malé zvlnenie)
- zdvojovač (vysoké napätia, malé prúdy, veľké zvlnenie)
- násobiče (veľmi vysoké napätia, veľmi malé prúdy, veľké zvlnenie)

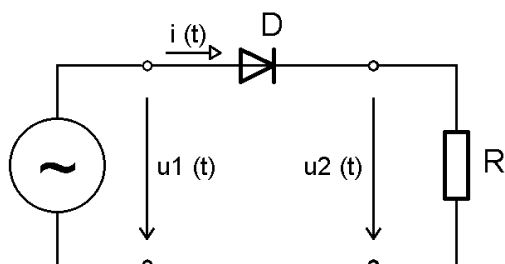
b) pre **vyššie kmitočty** :

- jednocestný (nízke napätia, vysoké prúdy, malé zvlnenie)
- dvojcestný (nízke napätia, veľké prúdy, malé zvlnenie)

2.3.3 Jednocestný usmerňovač

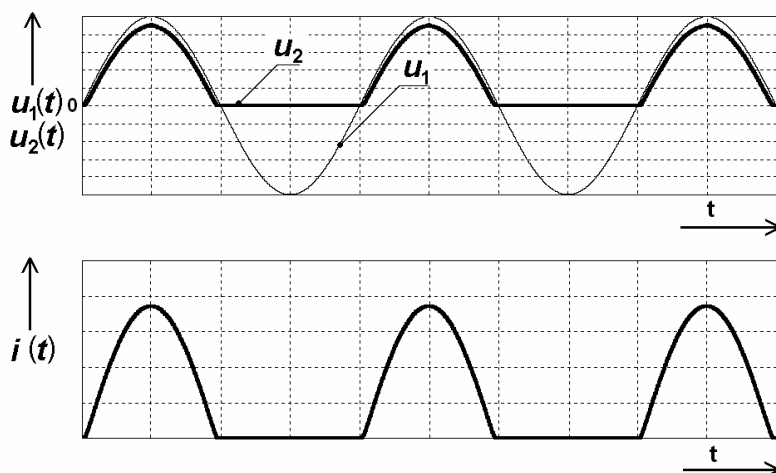
2.3.3.1 Jednocestný usmerňovač s nezotrvačnou záťažou

Ide o najjednoduchší typ usmerňovača. Obsahuje iba jednu usmerňovaciu diódu (viď. nasledujúci obrázok).



Obr. 2.4 Jednocestný usmerňovač s nezotrvačnou záťažou

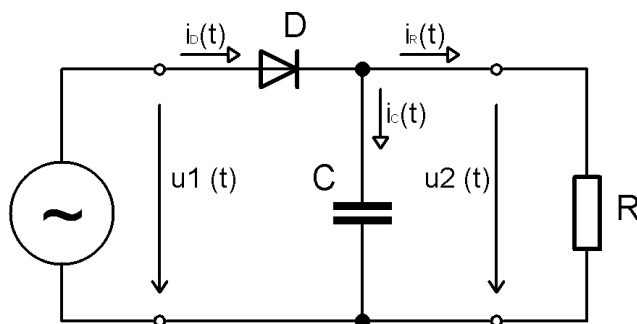
Keďže je záťažou jednocestného usmerňovača iba rezistor, má usmernené napätie tvar sínusových pulzov v jednej polovici periódy, ako ilustruje nasledujúci obrázok.



Obr. 2.5 Napätie a prúd na jednocestnom usmerňovači s nezotrvačnou záťažou

2.3.3.2 Jednocestný usmerňovač so zotrvačnou záťažou

Pokiaľ zotrvačnosť záťaže nieje daná samotnou záťažou, potom sa realizuje filtračným kondenzátorom, prípadne nárazovou tlumivkou.



Obr. 2.6 Jednocestný usmerňovač so zotrvačnou záťažou

Maximálna hodnota prúdu diódou závisí od maximálnej hodnoty výstupného prúdu:

$$I_{Dmax} = I_{Cmax} + I_{Rmax} \text{ (A)} \quad (2.18)$$

Pri výpočte maximálneho napätia na výstupe je treba zohľadniť úbytok napätia na dióde:

$$U_{2\max} = U_{1\max} - U_D \text{ (V)} \quad (2.19)$$

V závernom smere sa na dióde objaví napätie rovné dvojnásobku maximálneho vstupného napätia:

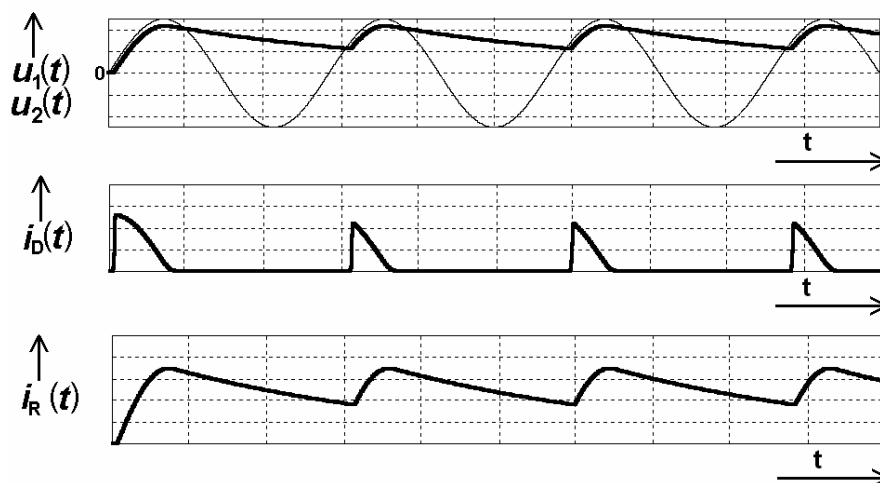
$$U_{BR} = 2 \cdot U_{1\max} \text{ (V)} \quad (2.20)$$

Činiteľ zvlnenia vyjadruje vzťah medzi zvlnením napätia na výstupe U_{p-p} a jeho strednou hodnotou U_2 :

$$p = U_{p-p} / U_2 \cdot 100 \text{ (\%)} \quad (2.21)$$

Minimálna hodnota vyhladzovacej kapacity na výstupe usmerňovača je:

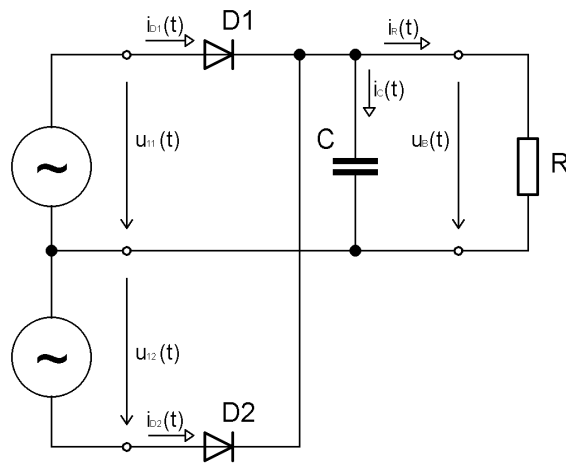
$$C_{\min} = (60 \cdot I_R) / (f \cdot p \cdot U_2) \text{ (F, A, Hz, \%, V)} \quad (2.22)$$



Obr. 2.7 Napätie a prúd na jednocestnom usmerňovači so zotrvačnou záťažou

2.3.4 Dvojcestný usmerňovač

Dvojcestný usmerňovač je tvorený dvoma diódami. Ku svojej činnosti potrebuje transformátor s dvoma zhodnými vinutiami a vyvedeným stredom, ako je to patrné aj z nasledujúceho obrázku.



Obr. 2.8 Dvojecstný usmerňovač so zotrvačnou záťažou

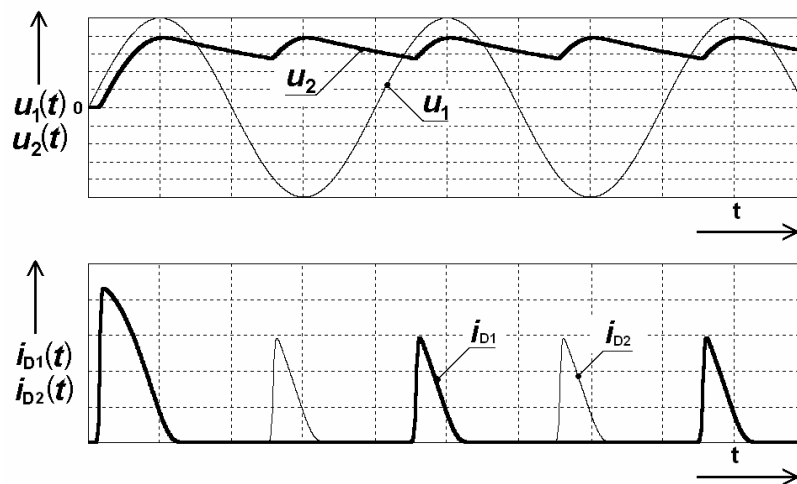
Diódy sú namáhané polovičnou hodnotou výstupného prúdu:

$$I_{Dmax} = (I_{Cmax} + I_{Rmax}) / 2 \text{ (A)} \quad (2.23)$$

Filtračný kondenzátor má polovičnú hodnotu v porovnaní s jednocestným usmerňovačom:

$$C_{min} = (30 \cdot I_R) / (f \cdot p \cdot U_2) \text{ (F, A, Hz, %, V)} \quad (2.24)$$

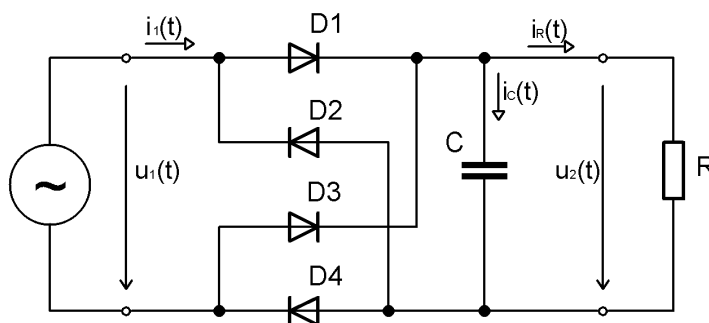
Hodnota záverného napätia aj úbytok napätia na diódach sú zhodné s jednocestným usmerňovačom.



Obr. 2.9 Napätie a prúd na dvojecstnom usmerňovači so zotrvačnou záťažou

2.3.5 Mostíkový usmerňovač

Mostíkový (Graetzov) usmerňovač nepotrebuje ku svojej funkcii transformátor s vyvedeným stredom, čo je obvykle konštrukčnou výhodou. Pozostáva zo štyroch diód zapojených do mostíku, ako je to naznačené v nasledujúcom obrázku. Má zhodné priebehy napätia ako dvojcestný usmerňovač.



Obr. 2.10 Mostíkový usmerňovač so zotrvačnou záťažou

Návrh (resp. dimenzovanie súčiastok) mostíkového usmerňovača sa zhoduje s dvojcestným usmerňovačom. Jediný rozdiel je v úbytku napätia na diódach, pretože prúd prechádza vždy dvoma diódami zapojenými do série:

$$U_{2\max} = U_{1\max} - 2 \cdot U_D \text{ (V)} \quad (2.25)$$

2.4 Stabilizátor [3], [8]

Stabilizátor je obvod alebo prvok určený ku stabilizácii napätia alebo prúdu na pripojenej záťaži, tzn. k definícii ich jednosmernej hodnoty s danou toleranciou. Stabilizované napätie a prúd je minimálne závislé na vonkajších veličinách ako je veľkosť vstupného napätia a prúdu, veľkosť a charakter záťaže, teplota, prípadne ďalšie veličiny (starnutie súčiastok, rušenie).

Reálny stabilizátor má istú hodnotu vnútorného odporu. Tento vnútorný odpor spôsobuje pokles výstupného napätia pri zaťažení. Reálne stabilizátory nedokážu dokonale stabilizovať výstupné napätie. Tým vzniká na výstupe striedavá zložka nazývaná zvlnenie. Zvlnenie je spôsobené regulačnými vlastnosťami stabilizátoru, alebo zvlnením vstupného napätia.

2.4.1 Rozdelenie stabilizátorov

a) podľa **stabilizovanej veličiny** :

- stabilizátory napätia
- stabilizátory prúdu

b) podľa **zapojenia regulačného prvku** :

- paralelné
- sériové

c) podľa **linearity** :

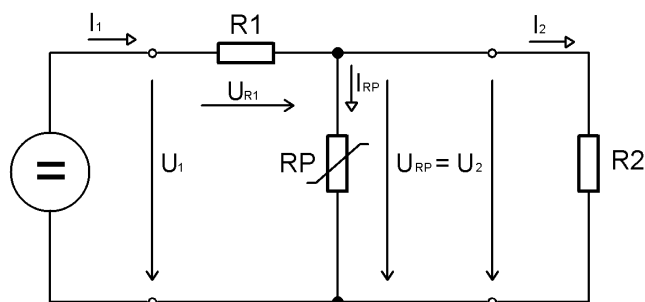
- nelineárne stabilizátory (parametrické)
- lineárne stabilizátory (spätnoväzobné)

d) podľa **prevedenia** :

- diskrétné
- integrované

2.4.2 Parametrické stabilizátory

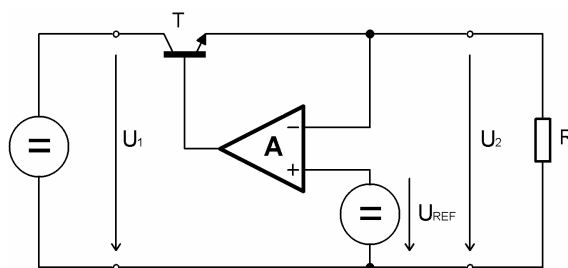
Parametrické stabilizátory sú súčiastky tzv. triódového typu. U nich platí, že dynamický vnútorný odpor je podstatne nižší ako statický. Tieto prvky stabilizujú vďaka tvarom svojich V-A charakteristík. Najčastejšie sa pre tento účel používajú Zenerove diódy. Samotný princíp parametrického stabilizátoru je nasledovný: obvod predstavuje delič s odporom R_1 lineárnym a odporom R_P , ktorý je nelineárny. Ten je tvorený spomínaným nelineárnym prvkom triódového typu a z neho je odoberané výstupné napätie U_2 . Popísané zapojenie je patrné z nasledujúceho obrázku.



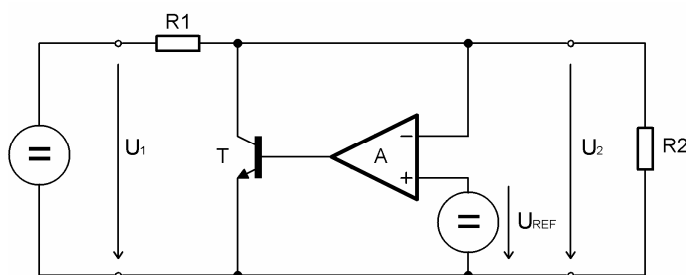
Obr. 2.11 Principiálne zapojenie parametrického stabilizátoru

2.4.3 Spätnoväzobné stabilizátory

Spätnoväzobné stabilizátory zvyčajne využívajú princíp neinvertujúceho zesilňovača s veľmi malým prenosom. Stabilizátor sníma výstupné napätie a rozdielom medzi požadovanou hodnotou a aktuálnou výstupnou hodnotou riadi akčný člen. Tento rozdiel sa nazýva regulačná odchýlka. Hodnota jej zosilnenia je veľmi dôležitá, pretože určuje parametre stabilizátoru. Samotný aktívny regulačný prvok môže byť v sérii s výstupom (teda záťažou) alebo paralelne k výstupu. Akčný člen je zvyčajne tvorený jedným alebo viacerými tranzistormi, obvykle v Darlingtonovom zapojení.



Obr. 2.12 Spätnoväzobný stabilizátor so sériovou reguláciou

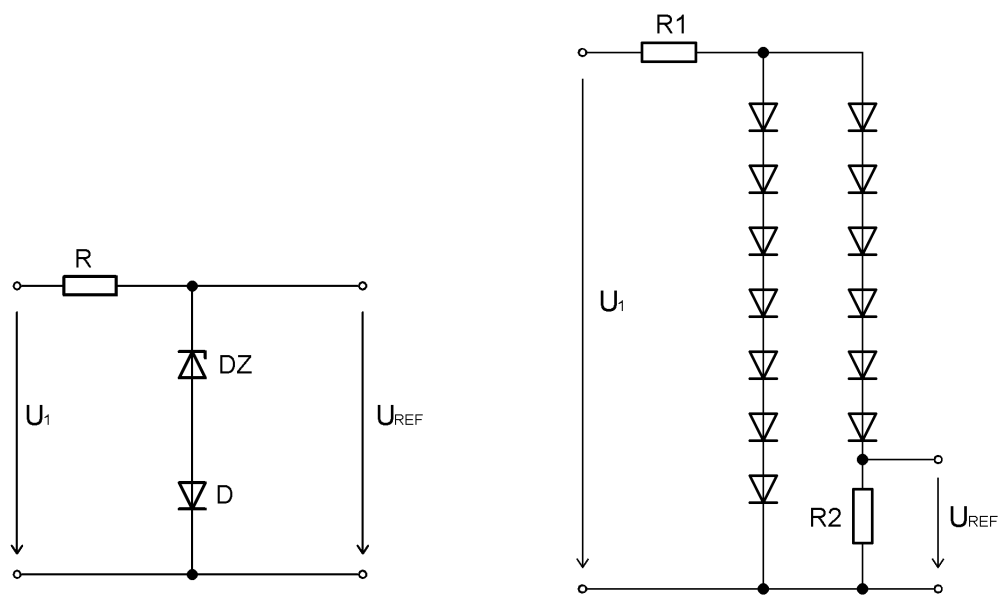


Obr. 2.13 Spätnoväzobný stabilizátor s paralelnou reguláciou

2.4.4 Referenčné zdroje

Referenčný zdroj je obvod slúžiaci ako zdroj referenčného porovnávacieho napätia alebo prúdopotrebný pre činnosť stabilizátoru. Často využívajú v meracej technike, u A/D a D/A prevodníkov a pod. Od referenčného zdroja požadujeme malú toleranciu referenčného napätia, resp. prúdu, veľkú teplotnú stabilitu, dlhodobú stabilitu referenčnej hodnoty napätia, resp. prúdu a nízku úroveň šumu.

Ako referenčné zdroje slúžia obvody na báze Zenerových diód alebo zdroje typu BAND GAP. Oba typy referenčných zdrojov sú znázornené na nasledujúcich obrázkoch.



a) Ref. zdroj na báze Zenerovej diódy

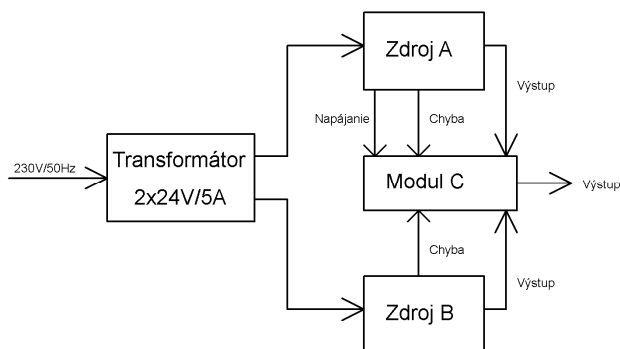
b) Ref. zdroj typu BAND GAP

Obr. 2.14 Referenčné zdroje

3. Návrh napájacieho zdroja

Celá konštrukcia popisovaného symetrického stabilizovaného zdroja je riešená ako dva samostatné napájacie zdroje A a B s možnosťou regulácie napätia na výstupe v rozsahu od 0V do 30V. U oboch zdrojov je možné nastaviť hodnotu výstupného prúdu od 0A do 5A.

Zdroje je možné používať samostatne alebo ich spriahnuť a vytvoriť tak symetrický stabilizovaný zdroj. Túto funkciu zabezpečuje modul C. Ten zároveň umožňuje v prípade skratu alebo preťaženia jednej vetvy symetrického zdroja odpojiť obe vetvy od pripojenej záťaže.

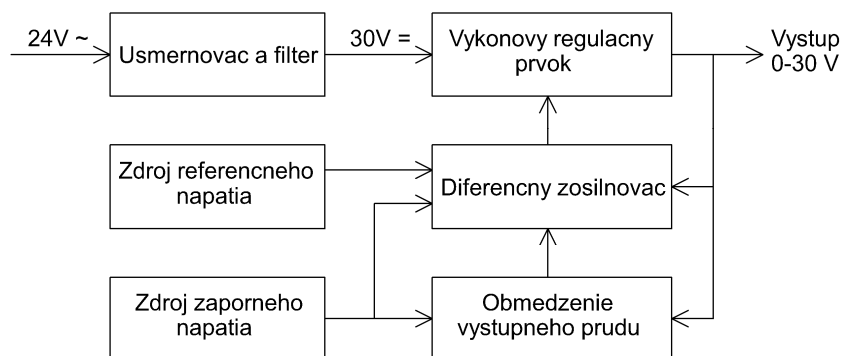


Obr. 3.1 Bloková schéma celého zdroja

3.1 Zdroje A a B

3.1.1 Popis a schéma zapojenia

Oba zdroje sú identické, v nasledujúcej kapitole teda budú popísané ako jeden. Podobných zapojení existuje veľké množstvo, pri návrhu som sa inšpiroval princípom funkcie v zapojení [10]. Princíp zapojenia a funkcie je znázornený nasledujúcou blokovou schémou.

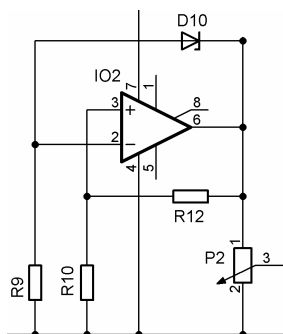


Obr. 3.2 Bloková schéma zdroja A/B

Zapojenie teda pozostáva zo šiestich základných blokov. Prvým je usmerňovač a filter. Na vstupe usmerňovača je pripojené sekundárne vinutie transformátora s výstupným napätím o hodnote 24V AC. Použil som jednoduchý mostíkový usmerňovač zostavený zo štyroch kusov usmerňovacích diód BY500 – 800. Tieto diódy sú dimenzované na maximálny trvalý prúd v priepustnom smere 5A. Za nimi je zaradený filtračný kondenzátor s kapacitou 6800 uF.

Zdroj záporného napätia vytvára záporné napätie oproti zemi, ktoré odoberáme pre správnu funkciu použitých operačných zosilňovačov. Tento zdroj je tvorený rezistorom R1, usmerňovacími diódami D5 a D6, kondenzátormi C1 a C2 a stabilizátorom napätia zostaveným z rezistoru R3 a zenerovej diódy D8 a hodnotou zenerovho napätia 6,8V. To je hodnota napätia, ktorú na výstupe zdroja záporného napätia odoberáme.

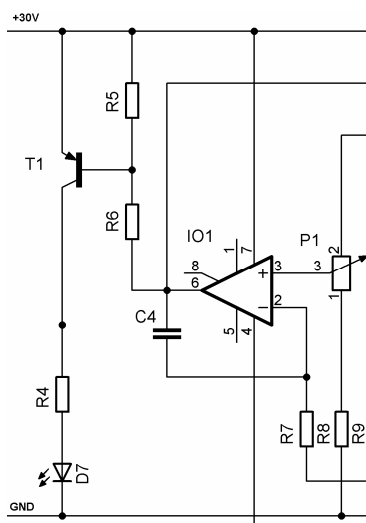
Ako zdroj referenčného napätia slúži operačný zosilňovač IO2 zapojený podľa nasledujúcej schémy zapojenia.



Obr. 3.3 Zdroj referenčného napätia

Referenčné napätie je generované na výstupnom pino IO2. Zenerova dióda D10 zaisťuje teplotnú stabilizáciu. Napätie na výstupe IO2 narastá, pokiaľ sa dióda D10 nezapne. Potom sa obvod stabilizuje a referenčné napätie 6,8V zenerovej diódy sa objaví na rezistore R12. Prúd prechádzajúci neinvertujúcim vstupom operačného zosilňovača je zanedbateľný. Rovnaký prúd prechádza rezistormi R10 a R12, ktoré majú zhodne 10 kΩ. Z toho vyplýva, že napätie na výstupe operačného zosilňovača je dvojnásobné, teda 13,6 V.

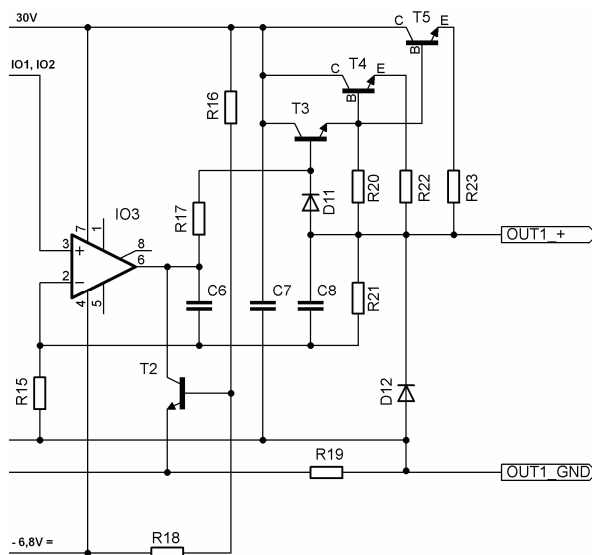
Obvod zabezpečujúci funkciu elektronickej prúdovej poistky je vytvorený pomocou operačného zosilňovača IO1.



Obr. 3.4 Obvod obmedzenia výstupného prúdu

Aby bolo možné nastavenie maximálnej hodnoty prúdu na výstupe, obvod detekuje úbytok napätia na odpore R19, ktorý je sériovo spojený so záťažou. Invertujúci vstup IO1 je nastavený pomocou odporu R7 na hodnotu 0 V. Hodnotu napätia na neinvertujúcom vstupe IO1 je možné nastaviť pomocou potenciometra P1. Predpokladajme, že pre výstupné napätie niekoľko voltov je P1 je nastavený tak, aby malo napätie na vstupe integrovaného obvodu hodnotu 0,2 V. Ak je záťaž zvýšená, napätie na výstupe zostane konštantné vďaka sekcii zosilňovača napätia a prítomnosť odporu R19 v sérii s výstupom bude mať zanedbateľný vplyv kvôli jeho malej hodnote a umiestnenie mimo spätnú väzbu regulačného obvodu. Ak je záťaž konštantná a výstupné napätie se nemení, obvod je stabilný. Pokiaľ sa záťaž zvyšuje a to tak, že úbytok napätia na odpore R19 je väčší ako našich 0,2 V, integrovaný obvod IO1 je spustený a obvod poskytuje konštantný prúd. Otvorí sa tranzistor T1, takže sa rozsvieti LED dióda D7 signalizujúca aktiváciu prúdovej poistky. Paralelne k tejto dióde je pripojený aj výstup s označením OPT1, resp. OPT2 pre hlásenie chyby do modulu C. Výstup IO1 je spojený s neinvertujúcim vstupom IO3 pomocou diódy D9.

Integrovaný obvod IO3 má konštantné zosilnenie približne hodnoty 2,5; teda zvyšuje referenčné napätie z 13,6 V na približne 34 V. Je zapojený podľa nasledujúcej schémy.

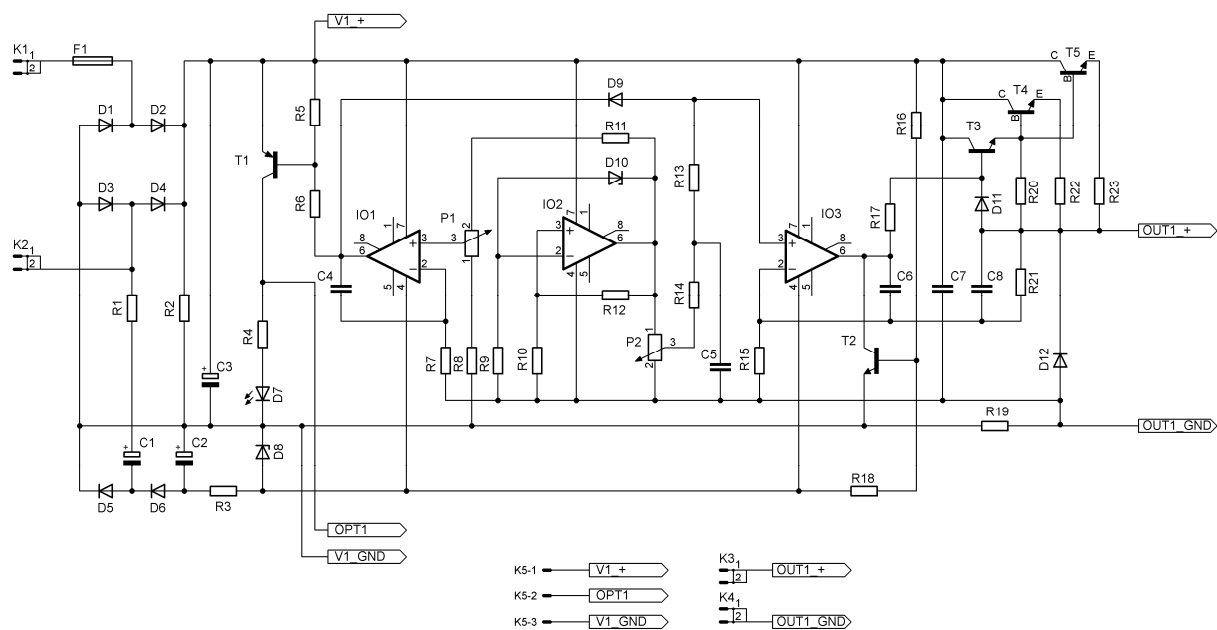


Obr. 3.5 Diferenčný zosilňovač

IO3 slúži na kontrolu napätia a IO1 je spojený s jeho vstupom, čím môže potlačiť jeho funkciu. Napätie na odpore R19 je snímané a jeho veľkosť sa nemôže dostať nad stanovenú hodnotu. Kondenzátor C4 zvyšuje stabilitu obvodu. Aby sa udržiavalo výstupné napätie na IO3 na hodnote 0 V, je nutné vytvoriť pomocou C1 a C2 záporný potenciál. Rovnako veľký záporný potenciál je na IO1. Okolo T2 je zapojený ochranný obvod, pokiaľ sa stratí záporné napätie, T2 odpojí napájanie od výstupu obvodu. Tým ochráni napájané zariadenie. Pri normálnom chode je T2 neaktívny vďaka R18, pretože delič R16/R18 je nastavený tak, aby za normálnej funkcie bolo napätie na báze T2 záporné, takže T2 je zahradený. Po výpadku záporného potenciálu sa T2 zopne a zníži napätie na výstupe IO3 na nulu. Integrovaný obvod má vnútornú ochranu proti skratu na výstupe, čo eliminuje špičku na výstupe pri vypnutí zdroja.

Ako výkonový regulačný prvok sú použité dva tranzistory 2N3055 označené T4 a T5 v darlingtonovom zapojení s tranzistorom 2N2219 označeným v schéme ako T3. Rezistory R22 a R23 slúžia k rovnomernému rozloženiu prúdov medzi tranzistory T4 a T5. Vďaka použitiu dvoch výkonových tranzistorov sme dosiahli rovnomerné rozloženie výstupného prúdu, takže pri plnom zaťažení preteká každým tranzistorom kolektorový prúd 2,5A. Použitie dvoch tranzistorov je výhodné aj z pohľadu lepšieho chladenia.

Schémy zapojenia zdrojov A a B sú identické, uvádzam teda iba jednu z nich:



Obr. 3.6 Schéma zapojenia zdrojov A a B

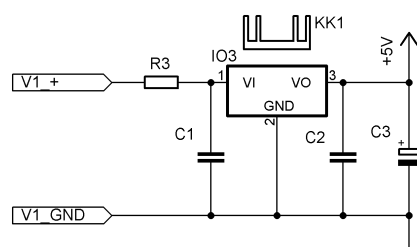
R1	82R	R21	56k	D8	6V8
R2	2k2	R22	0,47R/3W	D9	1N4148
R3	220R	R23	0,47R/3W	D10	6V8
R4	2k2	P1	10k/lin	D11	1N4148
R5	2k2	P2	10k/lin	D12	1N4004
R6	10k	C1	47uF/50V	T1	BC 558B
R7	10k	C2	47uF/50V	T2	BC 548
R8	33R	C3	6800uF/50V	T3	2N2219
R9	4k7	C4	330pF	T4	2N3055
R10	10k	C5	100nF	T5	2N3055
R11	56k	C6	100pF	IO1	TL-082
R12	10k	C7	200nF	IO2	TL-082
R13	2k2	C8	100pF	IO3	OP07
R14	27k	D1	BY500 - 800	F1	6,3 A
R15	27k	D2	BY500 - 800	K1	faston 6,3
R16	10k	D3	BY500 - 800	K2	faston 6,3
R17	1k	D4	BY500 - 800	K3	faston 6,3
R18	1k5	D5	1N4148	K4	faston 6,3
R19	0,47R/12W	D6	1N4148	K5	molex 2031
R20	1k	D7	LED, 5mm		

Tab. 3.1 Zoznam súčiastok zdrojov A a B

3.2 Modul C

3.2.1 Popis a schéma zapojenia

Obvod je napájaný jednosmerným napätím o hodnote +5 V. Toto napätie získavame na výstupe integrovaného stabilizátora IO3. Stabilizátor IO3 je napájaný zo zdroja A jednosmerným napätím o hodnote približne +33 V. Zapojenie stabilizátora a pomocných súčiastok popisuje nasledujúci obrázok.



Obr. 3.7 Zapojenie stabilizátora 7805

Pri simulácii modulu C sme meraním zistili, že celé zapojenie spotrebúva zo zdroja napätia +5 V maximálne 350 mA. Napájacie napätie +33 V by bolo na vstup stabilizátora príliš vysoké, preto ho znížime rezistorom R3. Stratový výkon na stabilizátore vypočítame podľa vzorca:

$$P_{\text{str}} = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\text{out}} \text{ (W)} \quad (3.1)$$

teda po dosadení našich hodnôt:

$$P_{\text{stab}} = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\text{out}} = (33 - 5) \cdot 0,35 = \underline{9,8 \text{ W}}$$

V prípade, že pred je pred stabilizátor sériovo zaradený rezistor sa napätie a teda aj výkon rozloží medzi tento rezistor a stabilizátor. Použil som rezistor s maximálnou výkonovou zaťažiteľnosťou 5W, čomu zodpovedá hodnota odporu:

$$R = P / I^2 = 5 / 0,35^2 = \underline{40,8 \Omega}$$

Použijeme teda rezistor s hodnotou 47 Ω a spätne prepočítame stratový výkon:

$$P_r = R \cdot I^2 = 47 \cdot 0,35 = \underline{5,76 \text{ W}}$$

Ide o mierne prekročenie výkonu, takže použijeme rezistor s maximálnym zaťažením 6W. Stratový výkon na stabilizátore sa nám podarilo znížiť na hodnotu:

$$P_{\text{stab}} = P_{\text{stab}} - P_r = 9,8 - 5,76 = \underline{4,04 \text{ W}}$$

Spriahnutie pripojených zdrojov A a B je možné zopnutím spínača S1. Tým sa aktivujú optočleny OK1 a OK2, na ktoré sú pripojené výstupy pre hlásenie chyby OPT1 a OPT2, resp. sa uzemia anódy LED diód v oboch optočlenoch. Tým začnú optočleny reagovať na chybové hlásenie zo zdrojov A a B. Zároveň sa zopne kotva relé RE2. Tá spojí výstupy zdrojov OUT1_GND a OUT2_+ a získame symetrický stabilizovaný zdroj.

V prípade, že je jeden zo zdrojov preťažený, aktivuje sa príslušný optočlen a privedie na vstup hradla NAND obvodu IO1 hodnotu log. 1. Daný vstup je inak pripojený na zem cez rezistor R4, resp. R5, teda na hodnotu log. 0. Tým sa zmení hodnota na výstupe hradla IO1C z log. 0 na log. 1. Táto hodnota je negovaná hradlom IO1D a privedená na vstup Reset klopného obvodu RS. Ten funguje podľa nasledujúcej pravdivostnej tabuľky.

/s (pin č. 1)	/r (pin č. 6)	q (pin č.3)	q* (pin č.4)
1	1	stav pamätania	stav pamätania
1	0	0	1
0	1	1	0
0	0	1	1

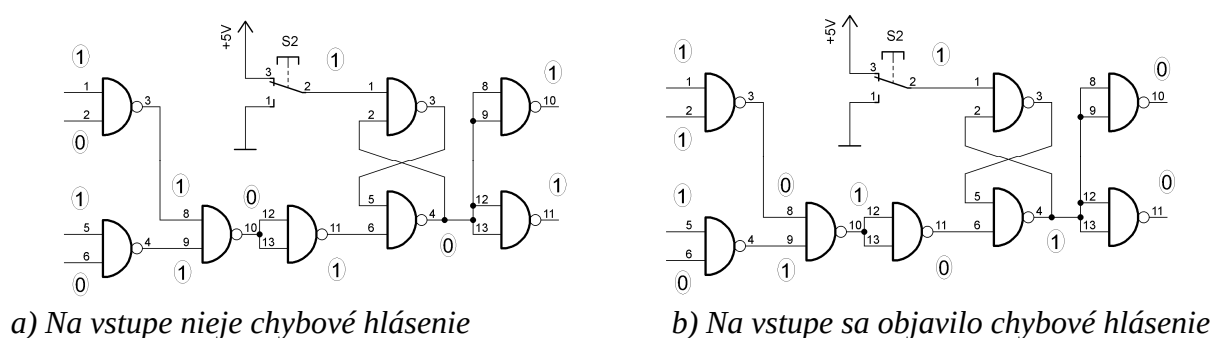
Tab. 3.2 Pravdivostná tabuľka klopného obvodu RS

V popisovanom zapojení sú použité výlučne hradlá NAND, ktoré pracujú podľa nasledujúcej pravdivostnej tabuľky:

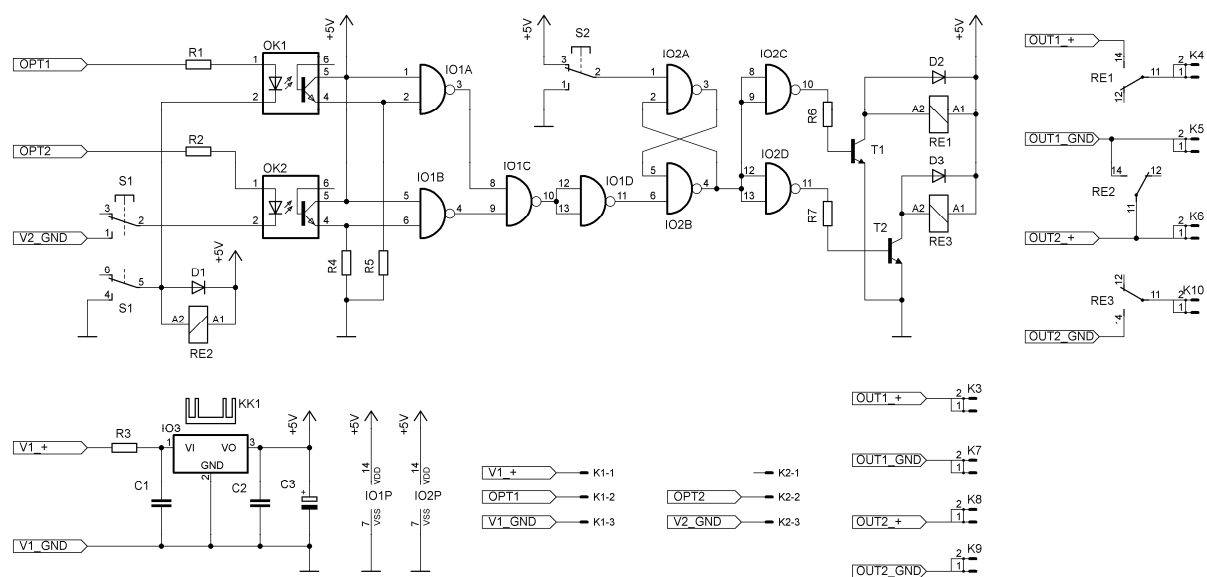
vstup X	vstup Y	výstup
1	1	0
1	0	1
0	1	1
0	0	1

Tab. 3.3 Pravdivostná tabuľka NAND

Popisovaný RS klopný obvod je tvorený hradlami IO2A a IO2B. Po pripojení napájania je na výstupe klopného obvodu RS hodnota log. 0, teda výstupy zdrojov (pripojené cez relé RE1 a RE3) sú odpojené. Pripoja sa stlačením tlačidla S2. Ak sa po pripojení výstupu objaví na vstupe Reset hodnota log. 1, výstupy sa odpoja a treba ich pripojiť opätovným stlačením tlačidla S2. Funkciu popisovaného zapojenia názorne popisuje nasledujúci obrázok.



Obr. 3.8 Funkcia logickej časti modulu C



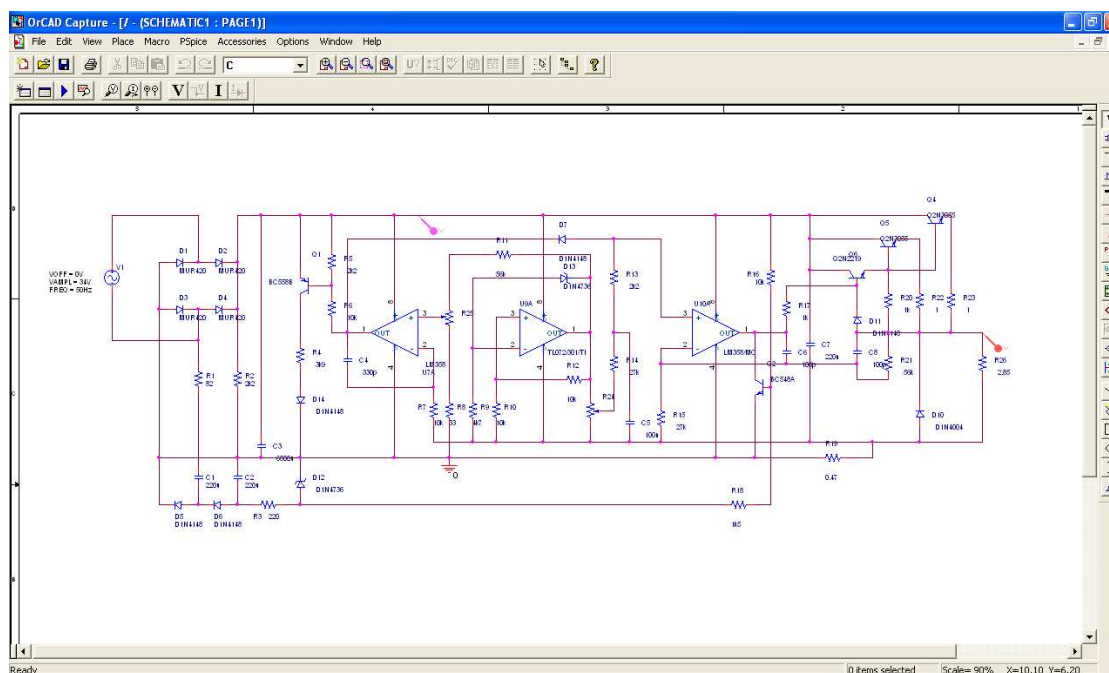
Obr. 3.9 Schéma zapojenia modulu C

R1	1k	T2	BC 548B
R2	1k	IO1	4093
R3	22R/10W	IO2	4093
R4	1k	IO3	7805
R5	1k	OK1	CNY17
R6	10k	OK2	CNY17
R7	10k	RE1	BTL-055
C1	330 nF	RE2	BTL-055
C2	100 nF	RE3	BTL-055
C3	100uF/16V	S1	9077-2
D1	1N4148	S2	9450-1
D2	1N4148	K1	molex 2031
D3	1N4148	K2	molex 2031
T1	BC 548B	K3 - K10	faston 6,3

Tab. 3.4 Zoznam súčiastok modulu C

4. Simulácia [9]

Na simuláciu navrhovaného zapojenia zdroja som použil študentskú verziu softvéru Pspice 9.1 od firmy OrCad určený pre simuláciu analógových elektronických obvodov na osobných počítačoch. Prostredie Psice-u je znázornené na nasledujúcom obrázku.



Obr. 4.1 Simulačné prostredie Pspice 9.1

4.2 Simulácia zdrojov A a B

Najskôr pomocou simulácie overíme správnu funkciu zdroja záporného napätia a zdroja referenčného napätia. Na napájacom vstupe je zdroj striedavého napätia V_{sin} , ako záťaž slúži rezistor pripojený na výstupe.

Teoretické hodnoty:

Napätie na výstupe zdroja záporného napätia $U_{zap} = -6,8 \text{ V}$

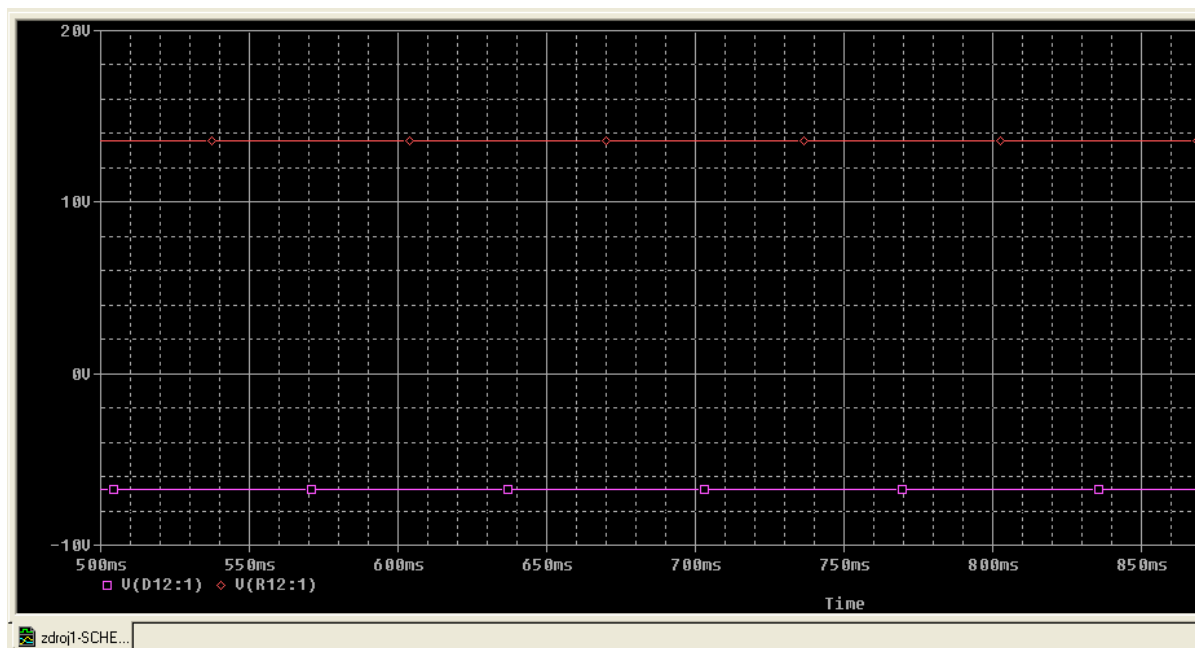
Napätie na výstupe zdroja referenčného napätia: $U_{ref} = 13,6 \text{ V}$

Hodnoty zistené simuláciou:

Napätie na výstupe zdroja záporného napätia $U_{zap} = -6,771 \text{ V}$

Napätie na výstupe zdroja referenčného napätia: $U_{ref} = 13,760 \text{ V}$

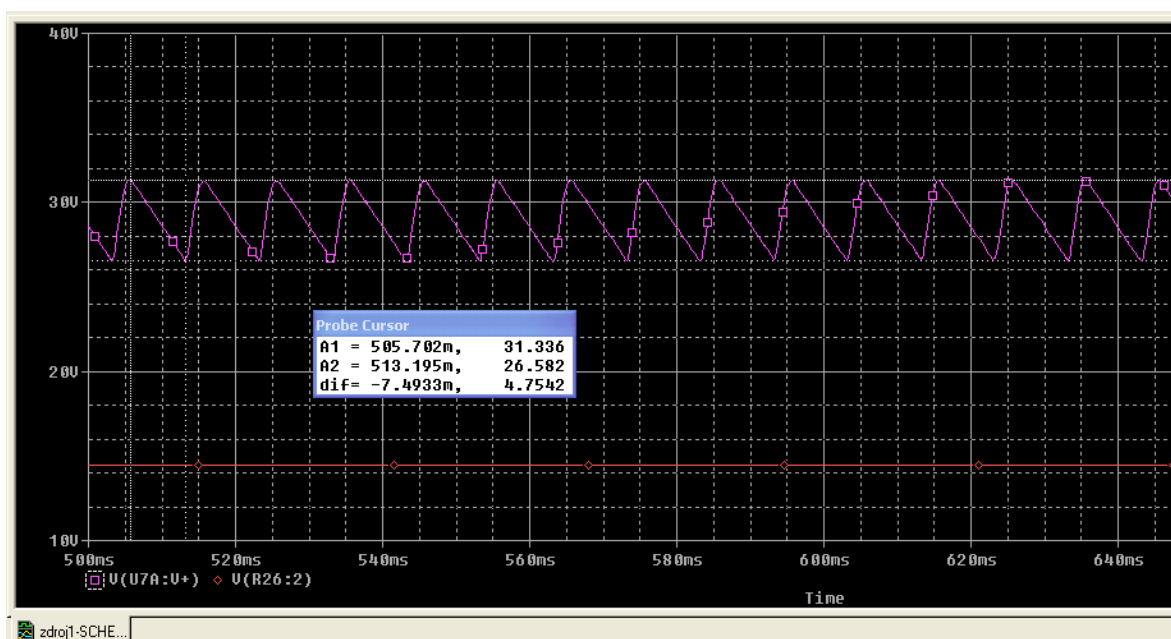
Z výsledkov vidíme, že oba bloky zdroja pracujú správne. Veľkosť výstupu je v čase konštantná. Záporné napätia je nepatrne zvlnené, pretože ide v podstate o výstup usmerňovača s okrajovacou zenerovou diódou. Oba priebehy sú znázornené na nasledujúcom grafe:



Obr. 4.2 Simulácia záporného a referenčného napätia

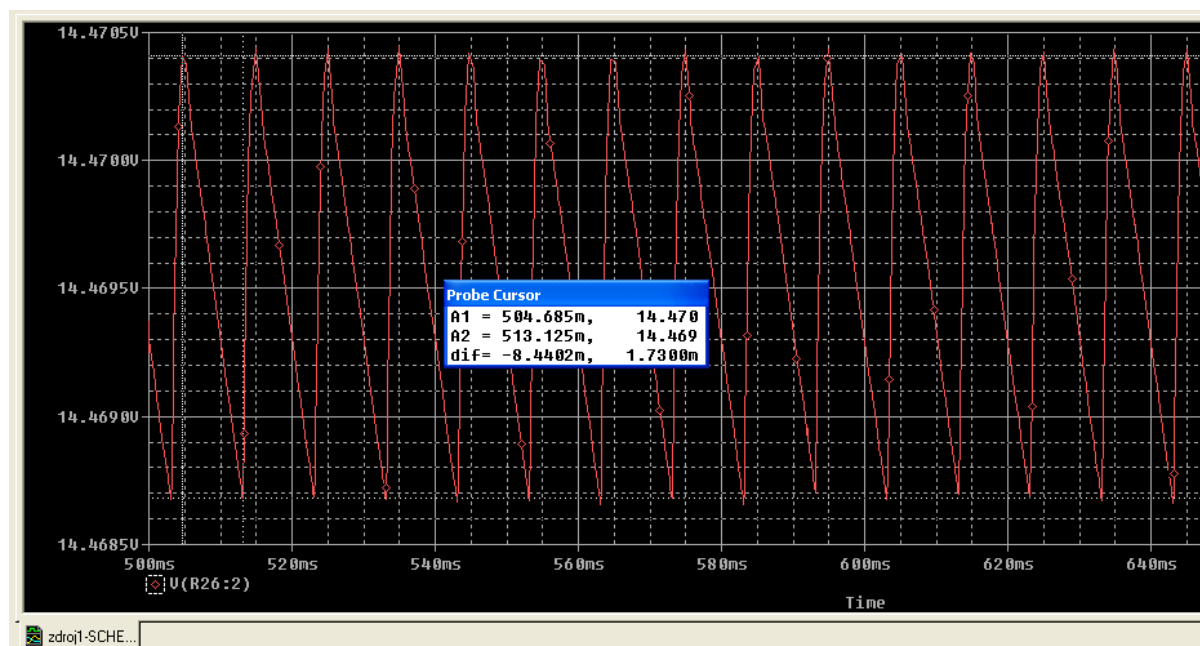
V simulácii celé zapojenie očividne funguje, takže overíme zvlnenie napätia na vstupe a výstupe pre maximálne zaťaženie 5A a potlačenie zvlnenia.

V simulácii je výstupné napätie na hodnote 14,469 V pri záťaži 2,85 Ω , čomu zodpovedá výstupný prúd 5,08 A. Zvlnenie vstupného napätia má hodnotu 4,754 V, ako je vidieť z nasledujúceho grafu.



Obr. 4.3 Zvlnenie vstupného napätia

Napätie na výstupe je oproti tomu zvlnené iba o 1,73 mV, ako je vidieť na nasledujúcom obrázku.

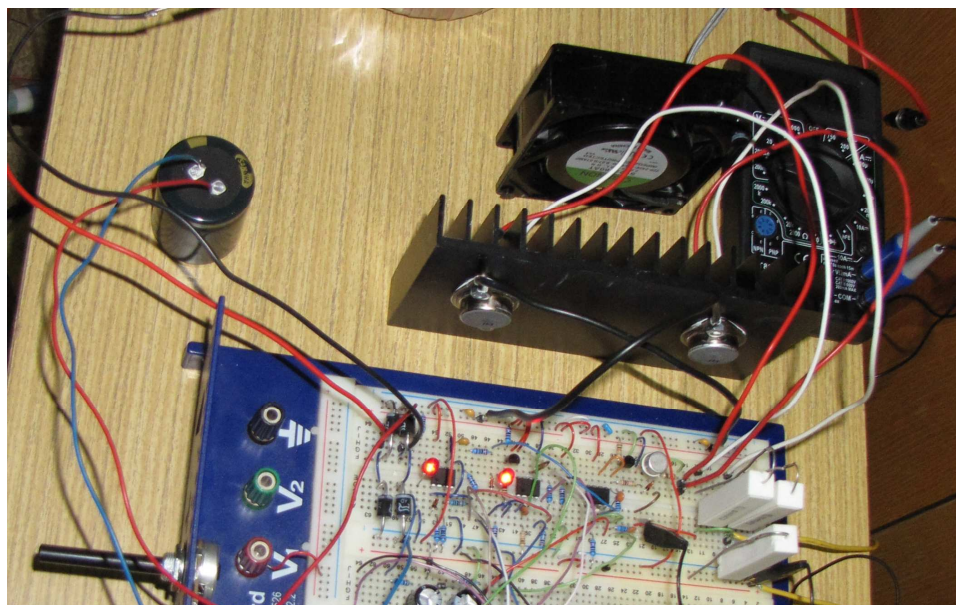


Obr. 4.4 Zvlnenie výstupného napätia

Z oboch hodnôt zvlnenia jednoducho vypočítame potlačenie zvlnenia:

Potlačenie zvlnenia = $20 \cdot \log(U_{out}/U_{in}) = \underline{-68,780 \text{ dB}}$

Celé zapojenie bolo okrem simulácie testované aj v kontaktnom poli, čo ilustruje nasledujúci obrázok.



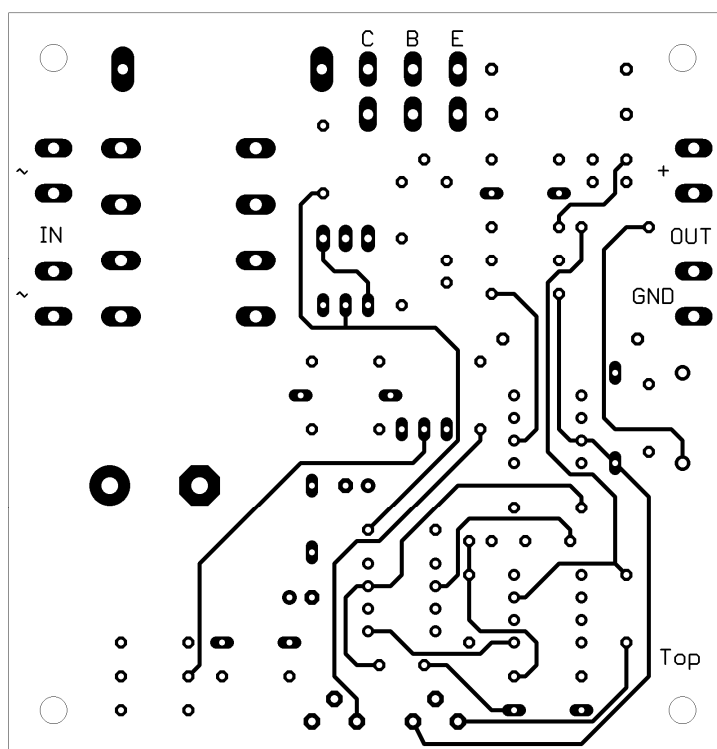
Obr. 4.5 Testovanie na kontaktnom poli

5. Dosky plošných spojov

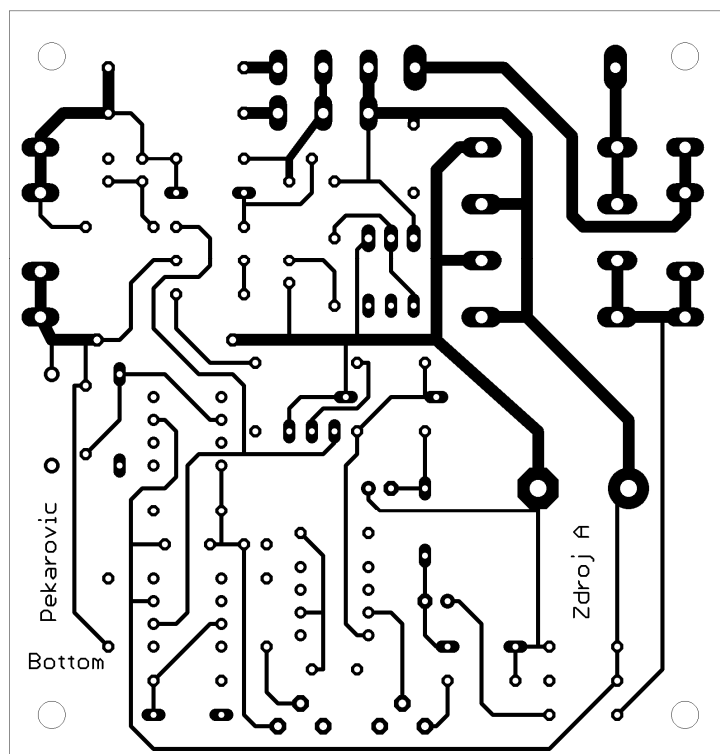
K návrhu dosiek plošných spojov (ďalej iba DPS) bola použitá freeware verzia programu CadSoft Eagle 5.7.0. Schémy zapojenia boli kreslené v rovnakom programe.

5.1 DPS zdrojov A a B

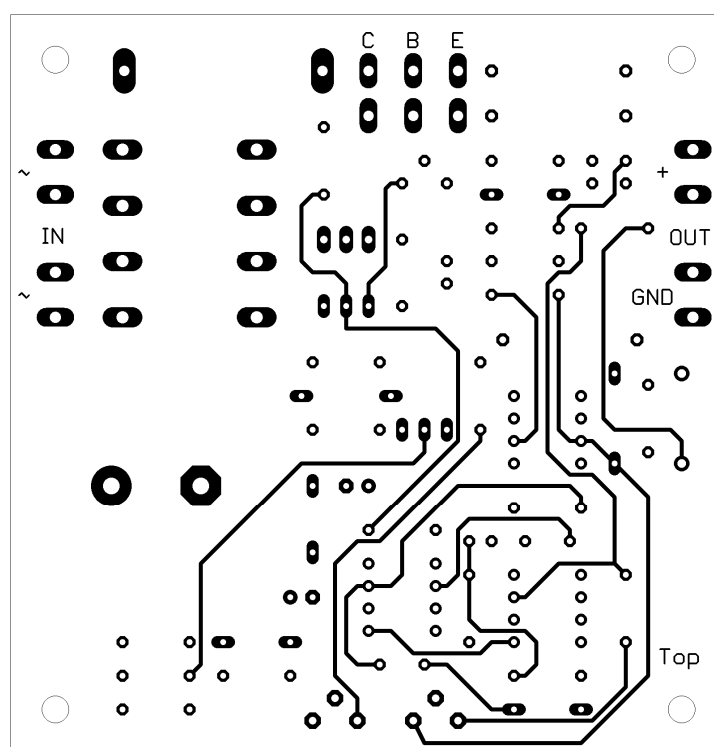
DPS je navrhnutá ako obojstranná, aby bolo možné dosiahnuť čo najmenších rozmerov. Rozmery dosky sú **80 x 84 mm**. DPS zdrojov A a B je zhodná s jediným rozdielom – pin č. 1 na konektore K5 je v prípade zdroja B nezapojený. Výkonové tranzistory T4 a T5 niesú pripojené priamo na doske, ale budú umiestnené na chladiči.



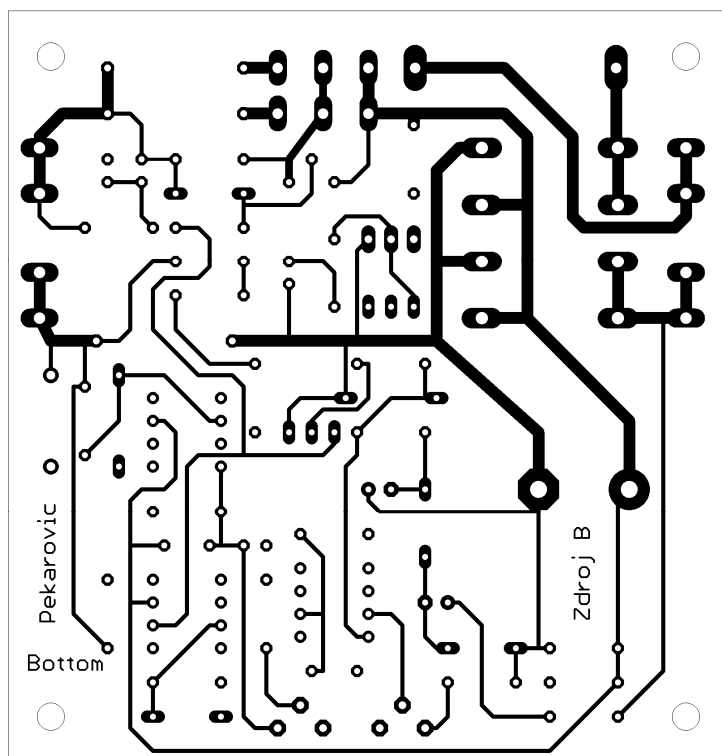
Obr. 5.1 DPS zdroja A – vrchná strana



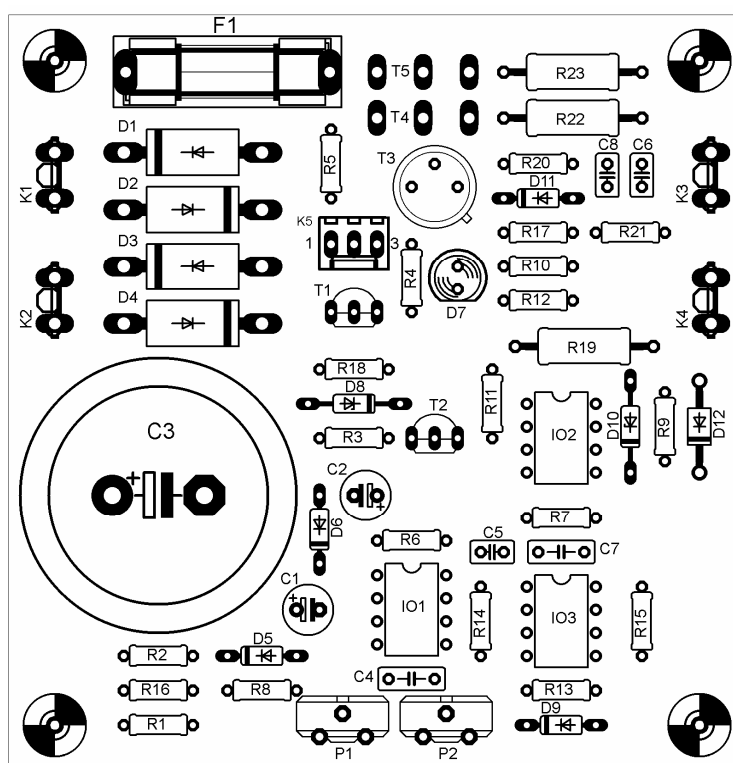
Obr. 5.2 DPS zdroja A – spodná strana



Obr. 5.3 DPS zdroja B – vrchná strana



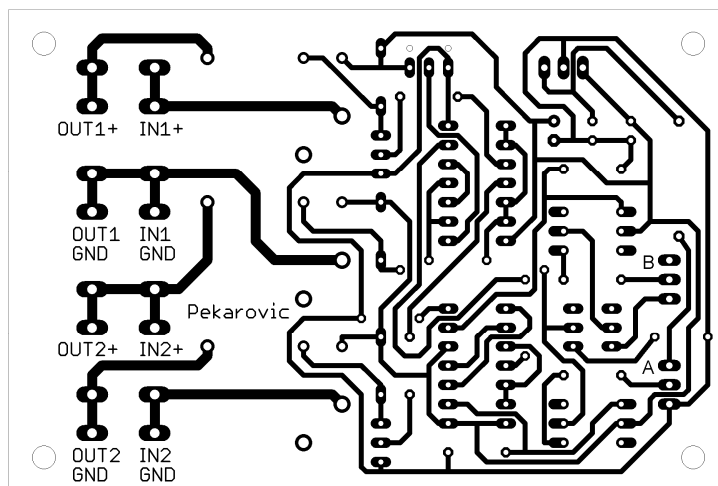
Obr. 5.4 DPS zdroja B – spodná strana



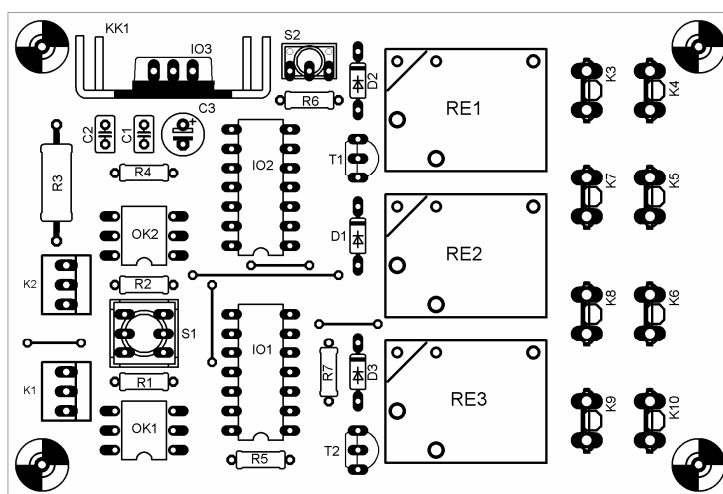
Obr. 5.5 Osadenie DPS zdrojov A a B súčiastkami

5.2 DPS modulu C

DPS je navrhnutá ako jednostranná o rozmeroch: **95 x 65 mm**. Je na nej použitých päť kusov drôtenných prepojok.



Obr. 5.6 DPS modulu C – spodná strana

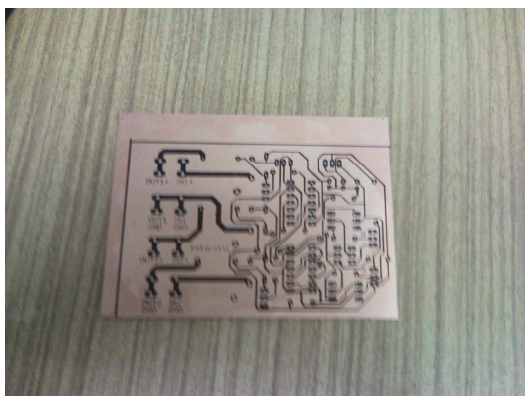


Obr. 5.7 Osadenie DPS modulu C súčiastkami

5.3 Výroba a osadenie DPS

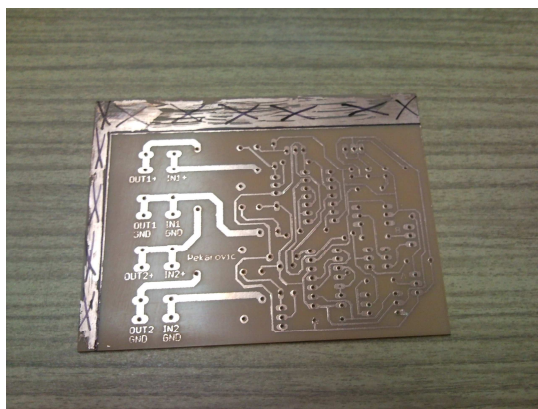
Dosky plošných spojov som sa rozhodol vyrobiť svojpomocne. Použil som metódu nažehlenia predlohy pomocou fólie B-foil. tento postup nieje vo výsledku tak dokonalý ako výroba dps fotocestou, ale pre jednoduchšie aplikácie (ako je môj zdroj) plne postačuje.

Predlohu je na fóliu nutné vytlačiť zrkadlovo obrátenú pomocou laserovej tlačiarne. Následne sa fólia priloží na dosku plošného spoja a ohreje sa žehličkou na takú teplotu, aby sa toner z tlačiarne prilepil na DPS. Celý proces trvá približne desať minút. Následne sa dps nechá vychladnúť a fóliu jednoducho odlepíme. Takto nažehlená predloha je pripravená na leptanie, viď. nasledujúci obrázok.



Obr. 5.8 DPS pripravená na leptanie

Pripravenú dosku plošného spoja som leptal v roztoku chloridu železnatého. Tento proces trvá približne hodinu, v závislosti od koncentrácie roztoku a teploty v miestnosti. platí, že čím je teplota roztoku vyššia, tým je proces rýchlejší. Vyleptaná doska sa následne umyje prostriedkom na riad, aby sa odstránila natlačená predloha. Do dps potom vyvítame otvory pre osadenie súčiastok. Použil som vrtáky priemeru Ø 0,6 mm a Ø 1 mm. Vyvítaná dps vyzerá ako na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.9 DPS po vyleptaní

Vyleptanú dps je ešte potreba naimpregnovat', aby nedochádzalo ku korózií vodivých cestičiek. Na to som použil zmes kolofónie a liehu. Touto zmesou som dosky plošných spojov potrel a po zaschnutí je dps pripravená na spájkovanie. Zmes kolofónie a liehu zároveň zabezpečí dobré prilnutie i rozliatie spájky na spájkovanej ploche.

Dosky plošných spojov som osádzal súčiastkami v poradí od najnižších po najvyššie. Pri dodržaní tohto postupu sa nemôže stať, že by jedna súčiastka zabráňovala prístupu k miestu potrebnému na osadenie inej. Najskôr som teda osadil integrované obvody, rezistory a diódy a až potom konektory, kondenzátory a ostatné súčiastky.

6. Realizácia napájacieho zdroja

6.1 Chladenie [2], [11]

Výkonové tranzistory T4 a T5 oboch zdrojov nebudú umiestnené na doske plošných spojov, ale budú vyvedené na chladiče.

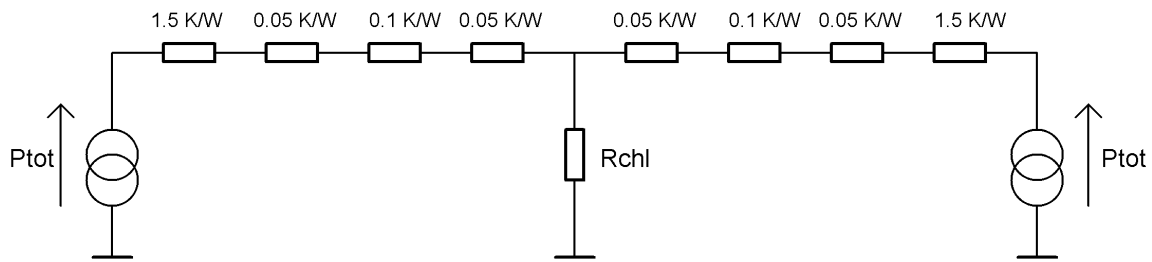
Najhorší prípad z pohľadu zahrievania sa výkonových tranzistorov nastáva vtedy, ak zo zdroja odoberáme maximálny výstupný prúd pri čo najmenšom výstupnom napätí. Stratový výkon na tranzistore môžeme vypočítať podľa vzorca:

$$P_{\text{tot}} = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\text{out}} \text{ (W)} \quad (6.1)$$

V našom prípade potečie každým z týchto tranzistorov prúd maximálne 2,5 A. V prípade, že na výstupe bude napätie 2 V (nižšie už predpokladať nemusíme, je to velice nepravdepodobné), dostávame:

$$P_{\text{tot}} = (U_{\text{in}} - U_{\text{out}}) \cdot I_{\text{out}} = (30 - 2) \cdot 2,5 = \underline{\underline{70 \text{ W}}}$$

Musíme teda navrhnúť dva totožné chladiče z ktorých každý bude chladiť dva výkonové tranzistory s maximálnym stratovým výkonom približne 70 W, teda spolu až **140 W**. Použil som tranzistory s puzdrom TO-3. Nevýhoda tohto puzdra je, že kovový obal tranzistoru slúži zároveň ako kolektor. Z toho dôvodu použijeme sľudovú podložku na izoláciu tranzistoru od chladiča. Z katalógového listu tranzistoru 2N3055 najskôr odčítame maximálnu teplotu prvku T_j , ktorej hodnota je až **200 °C**. Z rovnakého katalógového listu odčítame tepelný odpor z polovodiča na povrch puzdra $R_{\text{thj-case}}$, ten má hodnotu **1,5 K/W**. Do výpočtu musíme zahrnúť aj tepelný odpor sľudovej podložky $R_{\text{thi}} = \mathbf{0,1 \text{ K/W}}$ a prechodov s teplovodivou pastou $R_{\text{tht}} = \mathbf{0,05 \text{ K/W}}$. Celý chladiaci systém je popísaný nasledujúcou blokovou schémou:



Obr. 6.1 Bloková schéma chladiaceho systému

Teplotu chladiča, na ktorý budú pripevnené puzdrá jednotlivých tranzistorov vypočítame podľa nasledujúceho vzorca:

$$T_{chl} = T_j - (R_{thj-case} + R_{tht1} + R_{thi} + R_{tht2}) \cdot P_{tot} \text{ (}^{\circ}\text{C)} \quad (6.2)$$

po dosadení našich hodnôt:

$$T_{chl} = 200 - (1,5 + 0,05 + 0,1 + 0,05) \cdot 70 = 200 - 119 = \underline{81^{\circ}\text{C}}$$

Z predchádzajúceho výpočtu vyplýva, že ak teplota chladiča dosiahne viac ako 69,5 °C, dôjde k prehriatiu výkonových tranzistorov. Teplota vzduchu v uzavretej prístrojovej skrinke je zvyčajne okolo 40°C, my budeme ale počítať s hodnotou $T_a = 25^{\circ}\text{C}$, pretože skrinkou bude prúdiť vzduch nasávaný zvonka ventilátorom. Vypočítame ešte tepelný odpor chladiča pre prípad, že sú na jednom chladiči umiestnené dva totožné výkonové tranzistory:

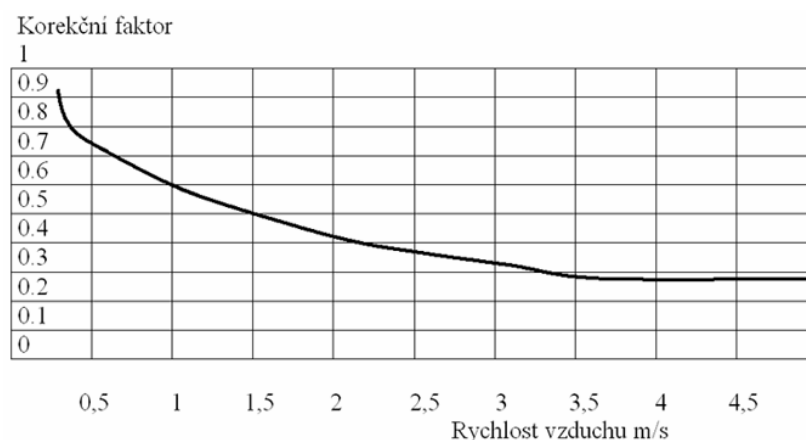
$$R_{chl} = (T_{chl} - T_a) / 2 \cdot P_{tot} \text{ (K/W)} \quad (6.3)$$

po dosadení našich hodnôt:

$$R_{chl} = (T_{chl} - T_a) / 2 \cdot P_{tot} = (81 - 25) / 2 \cdot 70 = \underline{0,4 \text{ K/W}}$$

Táto hodnota je veľmi nízka. Z toho vyplýva, že použitý chladič by musel mať veľmi veľké rozmery. Preto je ako súčasť chladiaceho systému **nutné použiť ventilátor**.

Novú hodnotu tepelného odporu chladiča vypočítame s využitím korekčnej krivky pre nútené chladenie:



Obr. 6.2 Korekčný graf pre nútené chladenie

Použijeme ventilátor s rýchlosťou vyfukovaného vzduchu 3,5 m/s, aby bol chladiaci účinok čo najvyšší a zároveň neboli požiadavky na výkon ventilátoru prehnané. Z grafu odčítame hodnotu korekčného faktoru **k** = **0,28**. Novú hodnotu tepelného odporu chladiča $R_{chl'}$ určíme zo vzorca:

$$R_{chl'} = R_{chl} / k \text{ (K/W)} \quad (6.4)$$

Po dosadení našich hodnôt:

$$R_{chl} = 0,29 / 0,28 = \underline{1,43 \text{ K/W}}$$

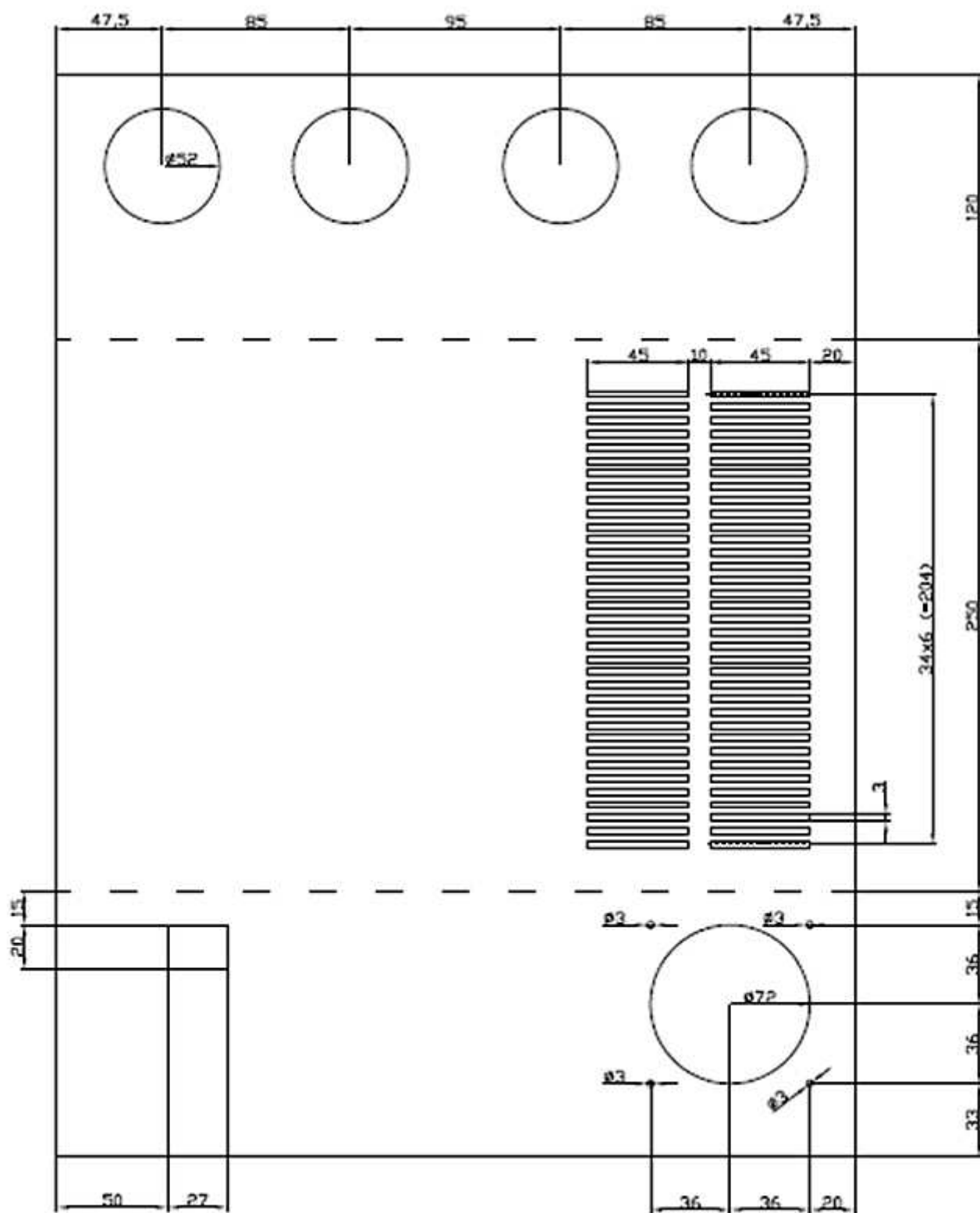
Táto hodnota vyhovuje oveľa lepšie, chladič bude mať menšie rozmery, hmotnosť a bude cenovo prijateľnejší. Vyberieme teda vhodný typ chladiča i ventilátoru.

6.2 Prístrojová skrinka [6]

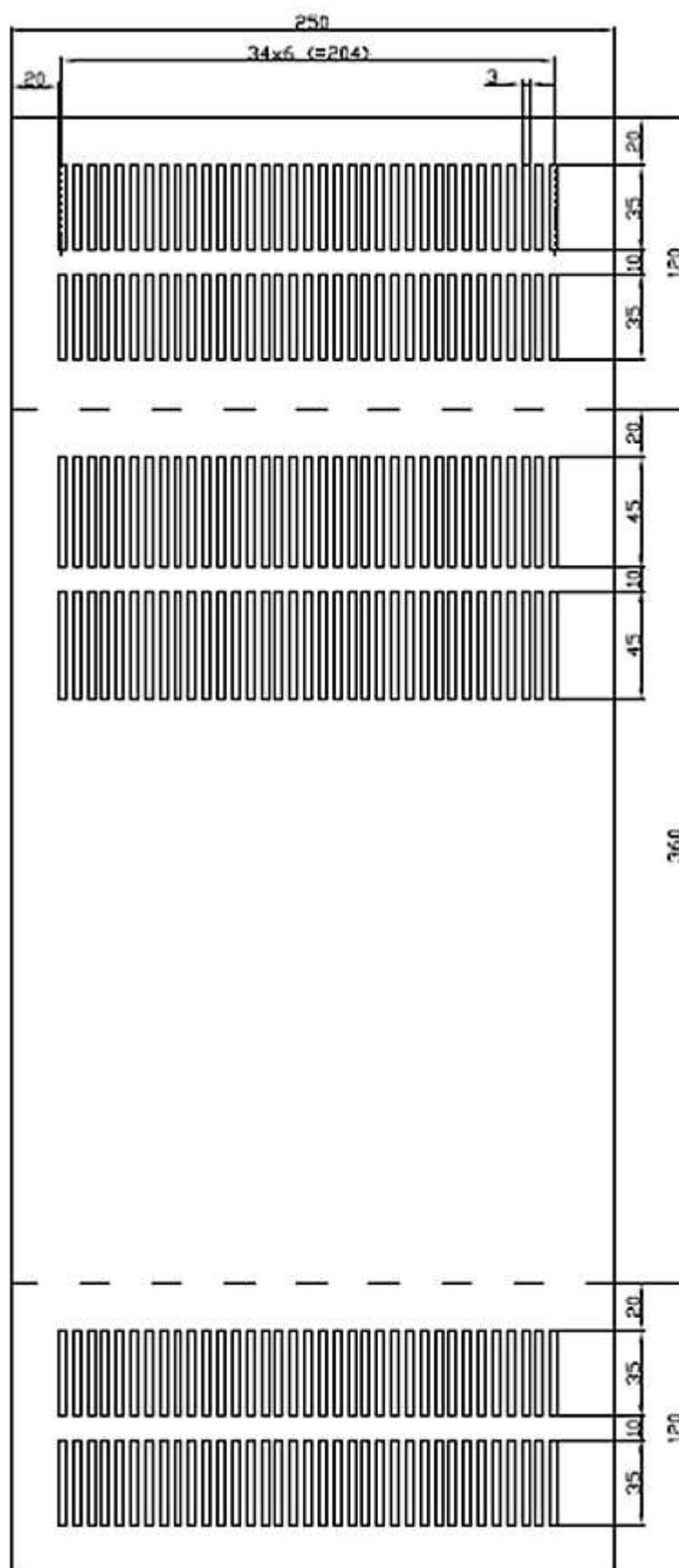
Prístrojová skrinka je navrhnutá s ohľadom na minimálne rozmery, prehľadnosť ovládacích prvkov a najmä dostatočné chladenie všetkých komponentov zdroja.

Na prednej stene sa nachádzajú otvory na uchytenie ručičkových meracích prístrojov, sieťový vypínač, výstupné svorky, vypínač pre nastavenie funkcie zdroja a tlačidlo pre pripojenie výstupu. Spodná, vrchná a obe bočné steny obsahujú chladiace otvory. Na zadnej stene sa bude nachádzať ventilátor a konektor pre napájanie z rozvodnej siete 230V.

Prístrojová skrinka sa kladá z dvoch dielov v tvare písmena U vyrobených z plechu hrúbky 1,5 mm. Sú zobrazené v rozvinutej podobe na nasledujúcich obrázkoch.



Obr. 6.3 Predný, zadný a spodný diel skrinky



Obr. 6.4 Vrchný a bočné diely skrinky

7. Meranie parametrov zdroja

Merania uvedené v tejto kapitole sú všetky realizované na jednom zdroji (A). Môžeme totiž predpokladať, že parametre oboch zdrojov budú totožné vzhľadom k tomu, že ide o totožné zapojenie aj dosky plošných spojov.

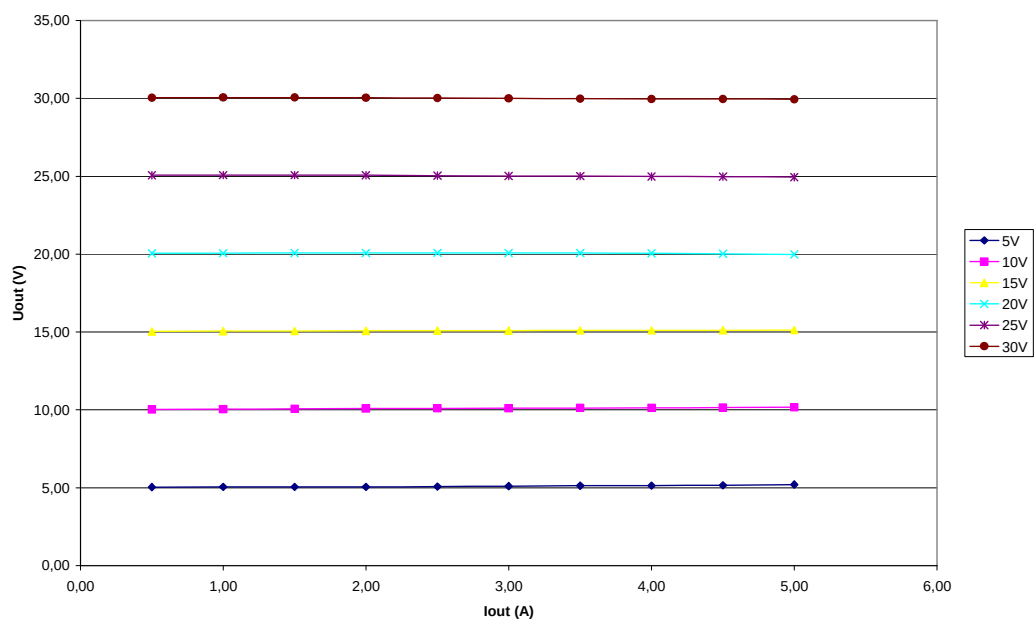
7.1 Meranie statických parametrov

Laboratórnym meraním popisovanej konštrukcie lineárneho napájacieho zdroja som určil nasledujúce statické parametre: závislosť zvlnenia výstupného napätia na veľkosti výstupného prúdu a statická zaťažovacia charakteristika.

Najskôr bolo vždy nastavené výstupné napätie naprázdno a až potom bola pripojená záťaž. Išlo o výkonovú regulovateľnosť Merania sú realizované do hodnoty výstupného prúdu 5A. Namerané hodnoty pre statickú zaťažovaciu charakteristiku sú uvedené v nasledujúcej tabuľke:

$U_0 = 5V$										
$U_{out} (V)$	5,05	5,06	5,06	5,06	5,08	5,11	5,13	5,15	5,17	5,21
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$U_0 = 10V$										
$U_{out} (V)$	10,03	10,05	10,07	10,09	10,10	10,11	10,13	10,14	10,15	10,17
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$U_0 = 15V$										
$U_{out} (V)$	15,04	15,06	15,07	15,08	15,09	15,09	15,10	15,10	15,12	15,13
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$U_0 = 20V$										
$U_{out} (V)$	20,05	20,06	20,07	20,07	20,08	20,07	20,07	20,05	20,03	19,98
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$U_0 = 25V$										
$U_{out} (V)$	25,06	25,07	25,07	25,06	25,04	25,02	25,01	24,99	24,98	24,94
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$U_0 = 30V$										
$U_{out} (V)$	30,04	30,05	30,05	30,04	30,02	30,00	29,98	29,97	29,96	29,94
$I_{out} (A)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00

Tab. 7.1 Statická zaťažovacia charakteristika

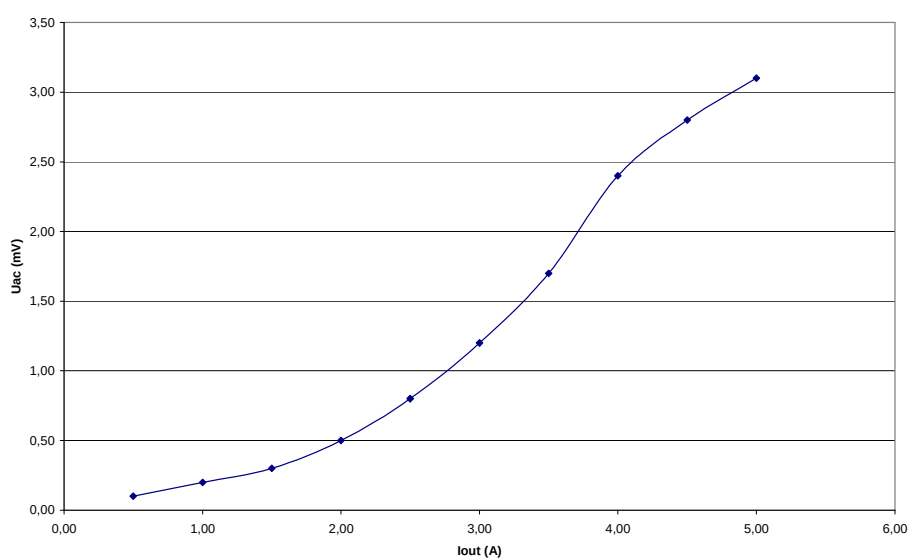


Obr. 7.1 Statická zaťažovacia charakteritika

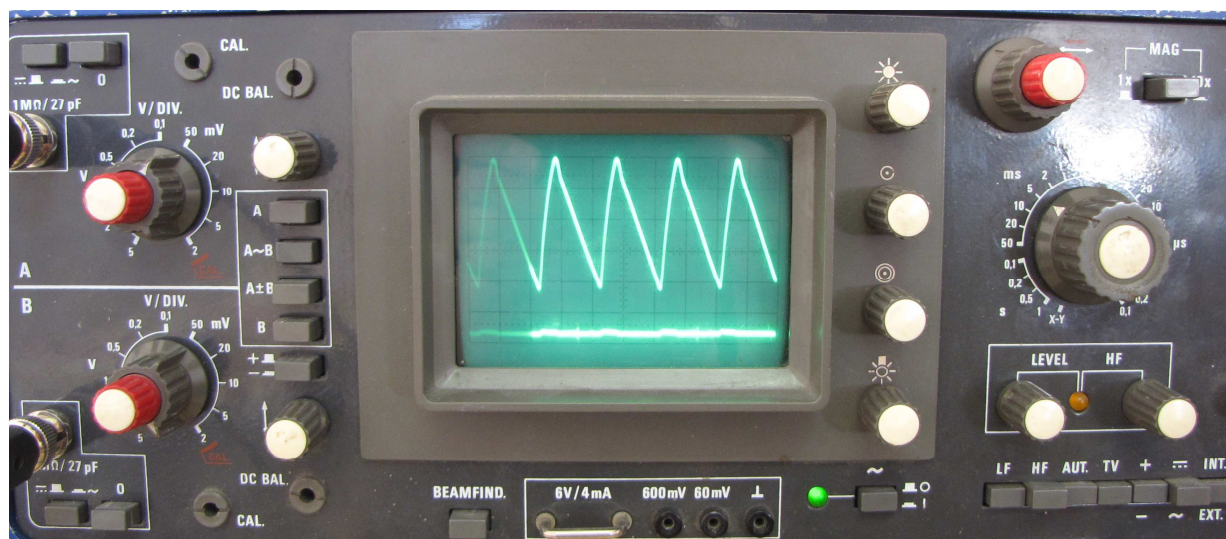
Závislosť výstupného zvlnenia napätia na odoberanom prúde som meral pre hodnotu napätia $U_0 = 20V$.

U_{ac} (mV)	0,10	0,20	0,30	0,50	0,80	1,20	1,70	2,40	2,80	3,10
I_{out} (A)	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00

Tab. 7.2 Závislosť zvlnenia výstupu na odoberanom prúde



Obr. 7.2 Závislosť zvlnenia výstupu na odoberanom prúde



Obr. 7.3 Zobrazenie zvlňenia na vstupe a výstupe analógovým osciloskopom

7.2 Meranie dynamických parametrov

Pre meranie dynamických parametrov zdroja som využil pripojenie výkonového rezistora a výkonového unipolárneho tranzistora ako záťaž na výstupné svorky zdroja. Tento tranzistor bol spínaný pomocou funkčného generátora.

Meraním som zistil výšku prekmity ktorý na výstupe nastane po pripojení záťaže, dobu trvania prechodového deja, ktorý pri zmene záťaže nastáva a čas reakcie prúdového obmedzenia. Išlo o tieto hodnoty:

Výška prekmity pri zmene záťaže = 2,5 V

Doba trvania prechodového deja pri zmene záťaže = 73 us

Doba reakcie prúdového obmedzenia = 180 us

8. Záver

V predkladanej bakalárskej práci sa mi podarilo zhrnúť základné poznatky o lineárnych napájacích zdrojoch, obecné porovnať ich základné výhody a nevýhody voči spínaným zdrojom, ktoré sa dnes stále viac dostávajú do popredia. Navrhol som konštrukčné riešenie symetrického stabilizovaného zdroja, ktorý dokáže pracovať aj ako dva samostatné napájacie zdroje. Ako súčasť zdroja som navrhol modul C, ktorý umožňuje spriahnuť oba zdroje, obsahuje tlačítko na pripojenie výstupu k výstupným svorkám a v prípade preťaženia jedného alebo oboch zdrojov okamžite odpojí oba výstupy.

Napájací zdroj som testoval v simulačnom prostredí Psice 9.1 a následne v kontaktnom poli, až potom som pristúpil k jeho skutočnej realizácii. Vzhľadom k jednoduchosti zapojenia modulu C som počítačovú simuláciu vynechal a zapojenie otestoval iba v kontaktnom poli.

Ako súčasť projektu som navrhol dosky plošných spojov so snahou minimalizovať ich rozmery. Dosky zdrojov A a b sú z toho dôvodu obojstranné. Realizoval som aj návrh aktívneho chladenia. Aktívneho z toho dôvodu, že nevýhodou tohto typu zapojenia veľká výkonová strata na výkonovom regulačnom prvku, teda na tranzistoroch T4 a T5. Pri použití pasívneho chladiča bez ventilátora by chladič musel mať veľké rozmery. To je nevýhodné s ohľadom na finančné náklady aj na rozmery a hmotnosť celého výrobku. Dizajn prístrojovej skrinky som navrhoval s ohľadom na dostatočné chladenie všetkých komponentov, prehľadnosť ovládacích prvkov a čo najlepší tvar i rozmery.

Celý zdroj som vlastnoručne vyrobil, až na sieťový transformátor, ktorý som kúpil už navinutý a prístrojovú skrinku. Tú som sa dal vyrobiť na základe svojho návrhu. Sám som leptal dosky plošných spojov, ako je uvedené v príslušnej kapitole 5.3 Výroba a osadenie DPS.

Poprednou výhodou lineárnych stabilizovaných zdrojov je malé zvlnenie výstupného napätia. To som overoval simuláciou aj meraním pri hodnote výstupného prúdu $I_{out} = 5A$. V simulácii som dospel k zvlnieniu výstupu $U_{ac} = 1,73 \text{ mV}$ čomu zodpovedá potlačenie zvlnenia o hodnote 68,78 dB. V reálnych podmienkach, teda pri meraní bolo zvlnenie výstupu vyššie $U_{ac} = 3,10 \text{ mV}$. Stále ide o veľmi dobrú hodnotu, najmä s ohľadom na pretekajúci prúd veľkosti $I_{out} = 5A$.

Pri meraní statickej zaťažovacej charakteristiky sa zdroj choval veľmi dobre, výstupné napätie najviac pokleslo oproti hodnote nastavenej naprázdno o 60 mV. Pri nižších hodnotách výstupného napätia malo napätie naopak tendenciu narastať.

Pri meraní dynamických charakteristík zdroja som odhalil prekmit pri pripojení záťaže o výške 2,5V trvajúci 73 us. V ideálnom prípade by takýto prekmit nastať nemal, je spôsobený reakčným časom regulačnej časti zdroja.

Literatúra

- [1] KREJČÍŘÍK, A. *Napájecí zdroje I*. Praha : Technická literatura BEN, 1996, ISBN 80-86056-02-3.
- [2] FUKÁTKO, T.; FUKÁTKO, V. *Teplo a chlazení v elektrotechnice II*. Praha : Technická literatura BEN, 2006, ISBN 80-7300-199-3.
- [3] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [4] BRANČÍK, L.; DOSTÁL, T. *Analogové elektronické obvody. Přednášky*. Brno: MJ Servis, s.r.o., 2007, ISBN: 978-80-214-3525-4.
- [5] KARÁSEK, J. *Počítačová podpora návrhu napájecích zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav teoretické a experimentální elektroniky, 2010. 54 s., 1 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.
- [6] SVOBODA, P.; BRANDEJS, J.; DVOŘÁČEK, J.; PROKEŠ, F. *Základy konstruování*. Základy konstruování. CERM. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2008. s. 1-234. ISBN: 978-80-7204-584-6.
- [7] KIJOVSKÝ, F. *Transformátor – podklady pre výuku v elektronickej forme* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 51s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek. Ph.D.
- [8] MATĚJŮ J. *Laboratorní Zdroj*. Brno, 2010. 47 s, 1 příloha. Bakalářská práce na FEKT VUT v Brně. Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [9] *Online manuál k programu Pspice* [online]. Technická univerzita Košice, Fakulta elektrotechniky a informatiky.
Dostupný z WWW: < <http://www.kemt.fei.tuke.sk/Predmety/spice/Pracovny/final/manual/> >.
- [10] *0-30 V DC stabilized power supply with current control 0.002-3 A* [online]. Electronics-lab.com, 2002 – 2011.
Dostupný z WWW: < <http://www.electronics-lab.com/projects/power/001/index.html> >.
- [11] *Výpočet chladiče* [online]. ELPROZ.cz, 1993 – 2011.
Dostupný z WWW: < <http://www.elproz.cz/Chladic.htm> >.
- [12] *Katalógový list 2N3055* [online].
Dostupný z WWW: < <http://www.hobbykit.eu/datasheet/2n3055.pdf> >.
- [13] *Katalógový list TL-082* [online].
Dostupný z WWW:
< <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2300.pdf> >.
- [14] *Katalógový list OP07* [online].
Dostupný z WWW: < http://web.mit.edu/6.301/www/OP07_a.pdf >.

[15] *Katalógový list obvodu 4093* [online].

Dostupný z WWW:

< http://www.ece.ucsb.edu/courses/ECE002/2B_W11Shynk/CD4093.pdf>.

[16] *Katalógový list optočlenu CNY-17* [online].

Dostupný z WWW: < <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/siemens/CNY17.pdf>>.