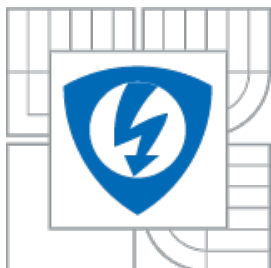




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF**

# **SPÍNANÝ LABORATORNÍ ZDROJ STŘEDNÍHO VÝKONU**

**MEDIUM POWER SWITCHING POWER SUPPLY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

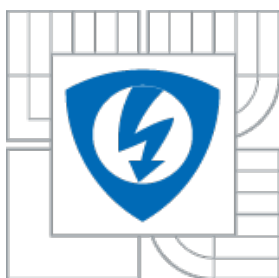
**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MAXIMILIÁN PERCE**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. PETR PROCHÁZKA, PH.D.**

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky**

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Student:** Maximilián Perce  
**Ročník:** 3

**ID:** 147402  
**Akademický rok:** 2014/2015

**NÁZEV TÉMATU:**

## SPÍNANÝ LABORATORNÍ ZDROJ STŘEDNÍHO VÝKONU

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Navrhnete schéma zapojení laboratorního zdroje
2. Navrhnete DPS spínaného laboratorního zdroje
3. Provedte realizaci a oživení navržených obvodů

**Doporučená Literatura:**

- [1] Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003-6.  
[2] Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skriptum FEKT VUT Brno, 2004

**Termín zadání:** 22.9.201

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Procházka, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Práca sa zaoberá návrhom dvojitého laboratórneho zdroja z vysokou účinnosťou, ktorá je dosiahnutá vďaka použitiu spínanej predregulácie pozostávajúcej zo znižujúceho meniču a lineárnej regulácie. Laboratórny zdroj bude disponovať plynulou reguláciou napätia v rozsahu 0-30 V a prúdovým obmedzením v rozsahu 20 mA-5 A.

## **Abstract**

Thesis deals with design double laboratory source of high efficiency, which is achieved due to the use switching regulation consisting of BUCK converter and linear regulation. Laboratory power supply will have a continuous regulation of voltage in the range 0-30 V and limiting the current in the range of 20 mA-5 A.

**Klíčová slova**

Stabilizovaný zdroj; BUCK menič; proudová poistka; doska plošných spojov; chladič; TL494.

**Keywords**

Stabilized power supply; BUCK converter; Printed circuit board; headsink; TL494.

## **Bibliografická citace**

PERCE, M. *Spínaný laboratorní zdroj středního výkonu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 52 s. Vedoucí semestrální práce Ing. Petr Procházka, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Spínaný laboratorný zdroj jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu semestrální práce Ing. Petr Procházka, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne ..... Podpis autora .....

# Obsah

1. Úvod.....	12
2. Rozdelenie zdrojov.....	13
2.1 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov.....	14
2.1.1 Zdroje lineárne.....	14
2.1.2 Spínané zdroje.....	15
3. Impulzné meniče bez odelenia výstupu.....	16
3.1 Zvyšujúce meniče.....	16
3.2 Invertujúce meniče.....	17
3.3 Znižujúce meniče.....	17
4. Koncepcia zdroja.....	19
4.2 Lineárna regulácia.....	20
4.2.1 Zdroj referenčného napätia.....	21
4.2.2 Prúdové obmedzenie.....	22
4.2.3 Diferenčný zosilňovač.....	23
4.2.4 Zdroje pomocných napätí.....	24
4.3 Úprava Lineárnej časti regulácie.....	25
4.4 Spínaný menič.....	26
4.5 PWM Generátor.....	27
5. Dimenzovanie.....	28
5.1 Dimenzovanie komponentov.....	28
5.1.1 Dimenzovanie tranzistoru spínanej regulácie.....	28
5.1.2 Dimenzovanie nulovej diódy.....	28
5.1.3 Dimenzovanie cievky.....	29
5.1.4 Výpočet výstupnej filtrácie.....	29
5.1.5 Dimenzovanie sieťového transformátoru.....	30
5.2 Dimenzovanie Chladenia.....	30
5.2.1 Straty na MOSFET.....	30
5.2.2 Straty na nulovej dióde.....	31
5.2.3 Výpočet strát lineárnej regulácie.....	31
5.2.4 Výpočet chladiču.....	31
6. Doplnky.....	34
7. Meranie.....	35
7.1 Meranie záťažovej charakteristiky pri konštantnom napätí.....	35
7.2 Meranie záťažovej charakteristiky pri konštantnom prúde.....	36
8. Návrh DPS.....	39
9. Záver.....	40
10. Zoznam použitej literatúry.....	41
11. Zoznam príloh.....	42

## Zoznam obrázkov

obr. 1.....	14
obr. 2.....	15
obr. 3.....	16
obr. 4.....	17
obr. 5.....	18
obr. 6.....	18
obr. 7.....	19
obr. 8.....	20
obr. 9.....	21
obr. 10.....	22
obr. 11.....	23
obr. 12.....	24
obr. 13.....	25
obr. 14.....	26
obr. 15.....	27
obr. 16.....	32
obr. 17.....	34
obr. 18.....	35
obr. 19.....	37
obr. 20.....	38
obr. 21.....	38



## Zoznam tabuliek

Tab. 1: Katalógové hodnoty tranzistoru IRF9540[7].....	28
Tab. 2: Katalógové hodnoty diódy MBR760[8].....	28
Tab. 3: Katalógové hodnoty tranzistoru IRF2807 a diódy MBR760 [7], [8], [9].....	32
Tab. 4: Namerné hodnoty zaťažovacej charakteristiky pri konšt. napätí.....	35
Tab. 5: Namerné hodnoty zaťažovacej charakteristiky pri konšt. prúde.....	36
Tab. 6: Zoznam prístrojov.....	39

## Zoznam Príloh

Príloha 1: DPS 1, spodná strana.....	43
Príloha 2: DPS 1, vrchná strana.....	44
Príloha 3: DPS 2, vrchná strana.....	45
Príloha 4: DPS 2, spodná strana.....	46
Príloha 5: Lineárna časť.....	47
Príloha 6: Spínaná časť.....	48
Príloha 7: Zapojenie medziobvodu.....	49
Príloha 8: Zdroj pomocných napätí.....	49
Príloha 9: Spínanie výstupu.....	49
Príloha 10: Zoznam súčiastok.....	50
Príloha 11: Hotový modul dvojitého zdroja.....	51
Príloha 12: Hotový modul zadná strana.....	51
Príloha 13: DPS lineárnej časti strana súčiastok.....	52
Príloha 14: DPS lineárnej časti strana spojov.....	52

## Zoznam symbolov a skratiek

<b>C</b>	kapacita
<b>D</b>	dióda
<b>ESR</b>	Equivalent series resistance, sériový odpor komponentu
<b>f</b>	frekvencia
<b>GND</b>	uzemnenie
<b>I</b>	elektrický prúd
<b>L</b>	Indukčnosť
<b>n</b>	počet
<b>OZ</b>	Operačný zosilňovač
<b>P</b>	výkon
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation, modulácia šírky pulzu
<b>R</b>	odpor
<b>s</b>	strieda
<b>T</b>	teplota/perióda
<b>t</b>	čas
<b>U</b>	elektrické napätie
<b>Vcc</b>	kladné napájanie
<b>Vee</b>	záporné napájanie
<b>X</b>	impedancia

# 1. Úvod

Každé elektronické zariadenie potrebuje pre svoju činnosť napájací zdroj, ktorý mu dodá elektrickú energiu podľa parametrov daného zariadenia.

V tejto práci sa budem venovať návrhu zdroja vhodného pre laboratórne účeli. Zdroj vhodný pre laboratórne účeli musí spĺňať požiadavky na vysokú stabilitu výstupného napätia aj pri maximálnom prúdovom zaťažení, požiadavku na veľmi nízke zvlnenie výstupného napätia pri maximálnom prúdovom zaťažení a čo najkratšiu dobu odozvy na jednotkový skok. Všetky tieto parametre splňuje zdroj s lineárnou reguláciou, avšak jeho hlavná nevýhoda je v jeho účinnosti. Lineárny zdroj mení rozdiel vstupného a výstupného výkonu na teplo, preto sú potrebné veľké chladiace plochy čo predstavuje nárasty celkových rozmerov, hmotnosti a ceny zdroja. Oproti tomu spínané zdroje poskytujú zmenšenie rozmerov, hmotnosti a od určitého výkonu aj ceny a hlavne zvýšenie účinnosti na úkor dlhšej doby odozvy na jednotkový skok a kvalitu výstupných veličín. Ja som sa v tejto práci rozhodol spojiť výhody oboch zdrojov do jedného zdroja.

## 2. Rozdelenie zdrojov

Zdroje elektrickej energie je možné deliť podľa nasledovných kryterií[1]

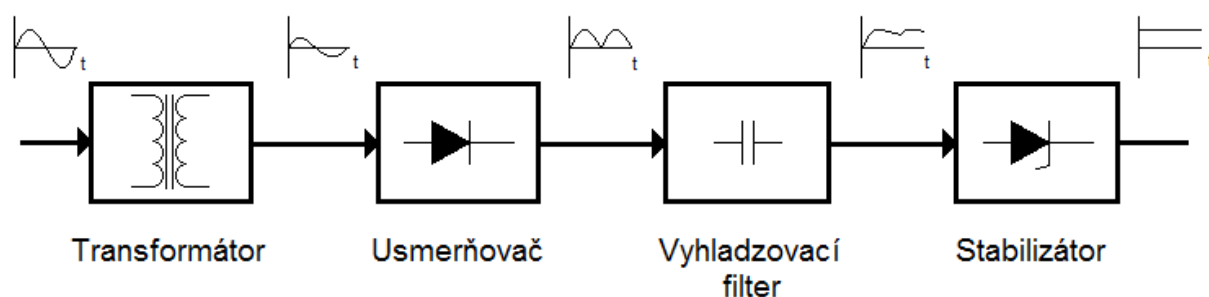
1. Podľa primárneho zdroja elektrickej energie:
  - a) autonómne napájacie zdroje
  - b) využívajúce elektrickú energiu iného primárneho zdroja
2. Podľa typu dodávaného výkonu
  - a) Zdroje jednosmerných napätí a prúdov
  - b) Zdroje striedavých napätí a prúdov
3. Podľa fyzikálneho princípu činnosti
  - a) elektrochemické
  - b) elektromechanické
  - c) využívajúce elektrizačnú sieť
  - d) ostatné
4. Podľa povahy vnútorných dejov:
  - a) Regulovateľné
  - b) Neregulovateľné

## 2.1 Porovnanie lineárnych a spínaných zdrojov

### 2.1.1 Zdroje lineárne

Lineárne zdroje alebo zdroje so spojitou reguláciou sú v dnešnej dobe stále častejšie nahradzované spínanými zdrojmi. Dôvodom je hlavne ich pomerne nízka účinnosť, veľké rozmery, hmotnosť a cena, ktorá od určitého výkonu preyšuje cenu spínaných zdrojov. Medzi ich výhody patrí nízke zvlnenie výstupných veličín, rýchla odozva na jednotkový skok [1], [2].

Lineárny zdroj je tvorený sieťovým transformátorom, ktorý zníži alebo zvýši napätie elektrickej rozvodnej siete na požadovanú hodnotu a zároveň galvanicky oddelí výstupné veličiny od vstupných. Stransformované sieťové napätie je potrebné usmerniť, na to slúži usmerňovač. Po usmernení má napätie už len jednu polaritu, ale je pulzujúce. Frekvencia pulzov závisí od použitého typu usmerňovača. Toto pulzujúce napätie musíme vyhladiť, na to sa používa filtrovací odvod, ktorý pozostáva buď z dolnopriepustného filtra, alebo len z dostatočne veľkej kapacity vyhladzovacieho kondenzátora. Takto upravené napätie môžeme použiť pre napájanie zariadení, ktoré nevyžadujú stabilizáciu, pretože výstupné napätie bude meniť svoju hodnotu so sieťovým napätím na vstupe transformátoru. Pre potrebu stabilizovania použijeme stabilizátor, ktorý pomocou stabilizačného prvku (naj častejšie zenerova dióda) stabilizuje výstup zdroja. Princíp lineárneho stabilizovaného zdroja je na obrázku 1 [1], [2].



obr. 1: Bloková schéma lineárneho zdroja

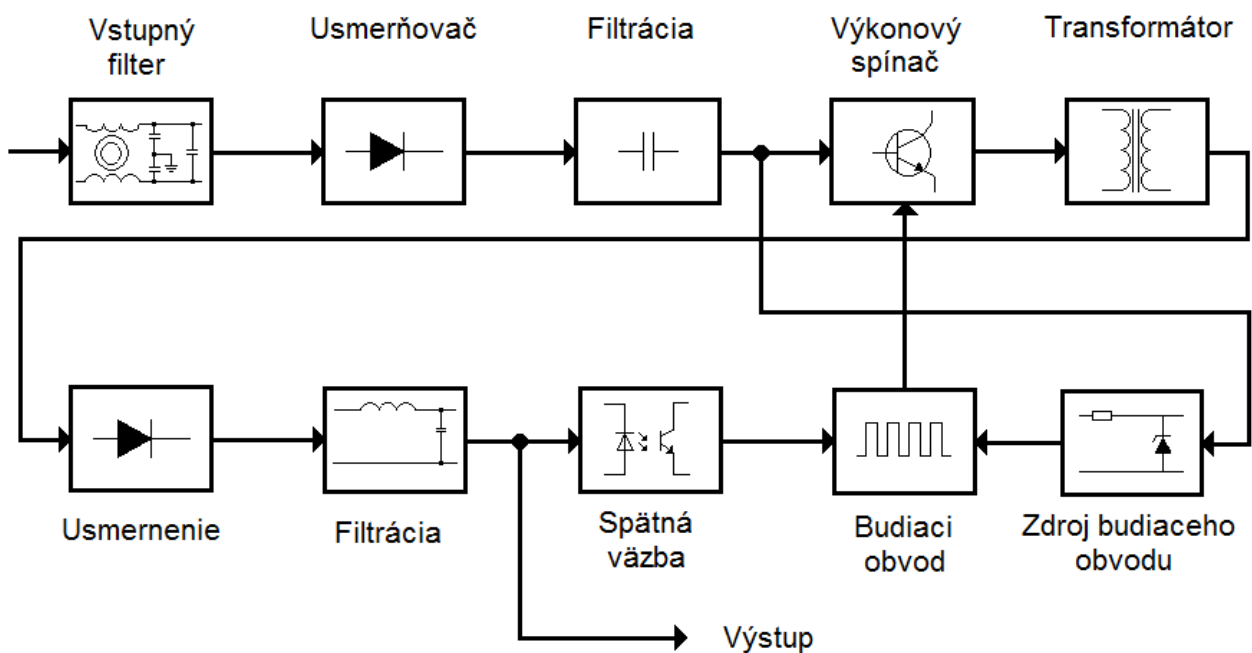
## 2.1.2 Spínané zdroje

Spínané zdroje sú v dnešnej dobe čoraz viac využívané kvôli ich vysokej účinnosti, cene, rozmerom a konečnej hmotnosti. Medzi ich hlavné nevýhody patrí nižšia spoľahlivosť oproti lineárnym zdrojom, ktorá plynie z oveľa vyššieho počtu použitých komponentov, kvalita výstupných veličín, ktorá je napríklad v HI-FI audiotechnike nepoužiteľná. Ďalšou nevýhodou sú neharmonické priebehy prúdov, ktoré spínaný zdroj odoberá z elektrickej rozvodnej siete a pomerne vysoká emisia rušivých signálov, ktoré vznikajú pri spínaní.

Vysoká účinnosť je dosiahnutá vďaka spínaniu. Keďže pri spínaní tvoria celkové straty straty spôsobené spínaním a straty na vnútornom odpore plne otvoreného spínacieho prvku, ktoré sa v dnešnej dobe pohybujú rádovo v mΩ.

Spínaný zdroj funguje na základe transformátoru. Ktorý pracuje na oveľa vyššej frekvencii (rádovo kHz) ako bežný sieťový transformátor (50Hz). Tento fakt umožňuje preniesť cez menší prierez jadra transformátoru vyšší výkon. Transformátory do spínaných zdrojov preto musia spĺňať vyššie materiálové nároky, aby nedochádzalo k vysokým hysteréznym stratám, preto sa na výrobu týchto transformátorov používa ferit.

Sieťové napätie je privádzané na vstupný filter, ktorý filtruje neharmonické priebehy prúdov odoberaných z elektrickej rozvodnej siete, následne je sieťové napätie privedené na usmerňovač, usmernené a vyhladené dostatočnou kapacitou vyhladzovacích kondenzátorov. Usmernené a vyhladené napätie je privedené na hlavný polovodičový spínací prvok a rozkmitané na danú frekvenciu zdroja a privedené na transformátor. Transformátor plní rovnakú úlohu ako pri lineárnych zdrojoch, privedené napätie upraví na potrebnú hodnotu a galvanicky oddelí od rozvodnej siete. Stransformované napätie je opäť usmernené a vyhladené. V tomto bode je zmerané spätnou väzbou a cez galvanické oddelenie napríklad optočlenom privedené na riadiaci obvod. Vďaka spätnej väzbe je výstupné napätie alebo prúd stabilizované [1], [2].



obr. 2: Blokova schéma spínaného zdroja

### 3. Impulzné meniče bez odelenia výstupu

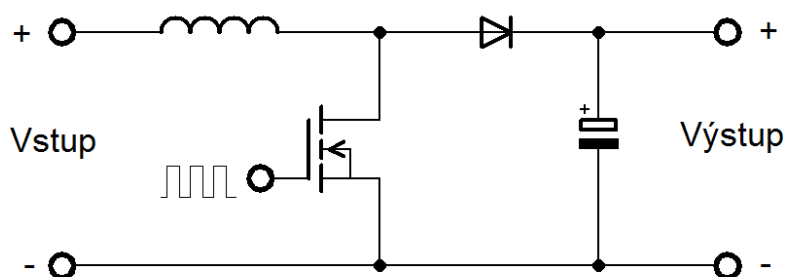
Podľa[3] Neoddelujúce meniče sa používajú v aplikáciach, kde nie potrebné galvanické oddelenie výstupnej časti od vstupnej. Tento fakt umožňuje obvod značne zjednodušiť keďže nie je potrebné galvanicky oddeľovať vetvu spätnej väzby v prípade stabilizácie výstupu. Na miesto impulzných transformátorov sa používajú tlmivky, ktoré podobne ako impulzné transformátory musia spĺňať vysoké materiálové požiadavky, aby nedochádzalo k hysteréznym stratám. Impulzné meniče majú podobne ako impulzné zdroje výhodu v účinnosti, ktorá sa pohybuje okolo 70%. Pomerne vysokú účinnosť dosahujú tieto meniče vďaka spínaniu, podobne ako pri spínaných zdrojoch.

Impulzné meniče môžeme rozdeliť do základných kategórií:

- Zvyšujúce (BOOST)
- Znižujúce (BUCK)
- Invertujúce

#### 3.1 Zvyšujúce meniče

Zvyšujúce meniče pracujú na základe obvodu tvoreného: spínacím prvkom, indukčnosťou, diódou a kapacitou. Princíp funkcie je založený na indukčnosti. Indukčnosť sa v elektrickom obvode „Bráni“ prúdovým zmenám produkciou napätia. Tento fakt je využitý v tomto meniči. Pri zopnutí spínacieho prvku sa indukčnosť spojí priamo z napájacím zdrojom. Prúd preteká zo zdroja cez spínací prvok do indukčnosti. Pri rozpojení spínacieho prvku sa indukčnosť odpojí od zdroja, nastane prudký prúdový pokles voči ktorému sa cievka bráni produkciou napätia. Vytvorené napätie je cez diódu privedené na výstupnú kapacitu zdroja, kde sa vyhladí. Veľkosť výstupného napätia závisí od striedy spínacieho signálu PWM. Princíp zvyšujúceho meniča je naznačený na obrázku 3 [3].



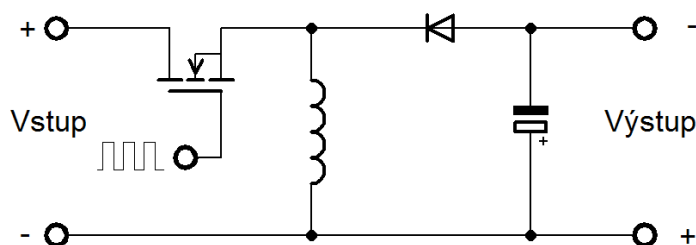
obr. 3: Zvyšujúci menič [3]



## 3.2 Invertujúce meniče

Invertujúce meniče otáčajú polaritu vstupného napätia. Sú vhodné pri aplikáciach, kde je potrebné použiť symetrické napájanie, ale k dispozícii je len nesymetrické, napríklad aplikácie napájané batériami.

Invertujúce meniče obracajú polaritu napájacieho napätia pomocou indukčnosti, ktorá pri odpojení napájacieho prúdu produkuje napätie opačnej polarity. Spínací prvok a indukčnosť sú oproti zvyšujúcemu meniču prehodené. Pri zopnutí spínacieho prvku začne indukčnosťou pretekať prúd, pri rozopnutí spínacieho prvku sa cievka odpojí od zdroja, prestane cez ňu pretekať prúd a vytvorí napäťový impulz opačnej polarity, ten je následne prepustený cez rýchlu diódu a vyhladený v kapacite výstupného kondenzátora. Veľkosť výstupného napätia závisí od stiedy spínacieho signálu PWM. Princíp zvyšujúceho meniča je naznačený na obrázku 4 [3].

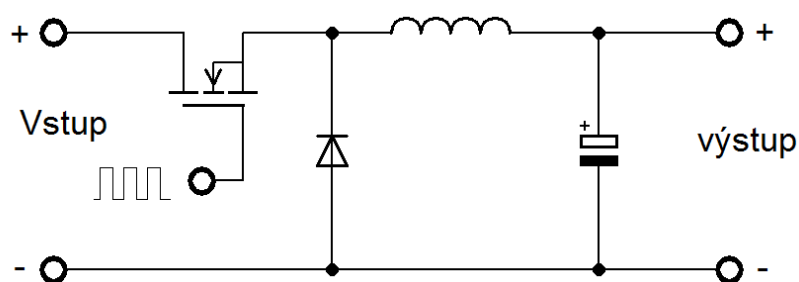


obr. 4: Invertujúci menič [3]

## 3.3 Znižujúce meniče

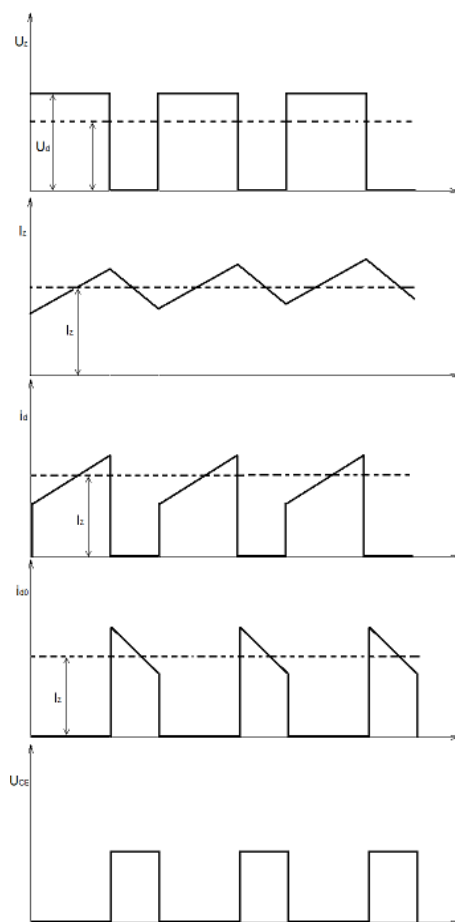
Úlohou znižujúcich meničov je znížiť výstupné napätie oproti vstupnému. Fungujú na princípe PWM regulácie, ktorá vstupné napätie rozseká a tým zníži jeho efektívnu hodnotu na požadovanú úroveň. Vysoká účinnosť takejto regulácie je dosiahnutá vďaka tomu, že spínací prvok (polovodičový tranzistor) pracuje iba v dvoch stavoch: plne otvorený a plne zatvorený. Cez časť charakteristiky v ktorej by dochádzalo k stratám prechádza veľmi rýchlo, tieto straty sa nazývajú spínacie a narastajú s rastúcou frekvenciou PWM.

Princíp funkcie meniču je pomerne jednoduchý. Keď je spínací prvok otvorený objaví sa na indukčnosti napätie zdroja a prúd cievkou začne narastať a cievka priama energiu z napájacieho zdroja. Keď dôjde k zatvoreniu spínacieho prvku začne prúd s indukčnosťou pretekať do kapacity na výstupe cez diódu. V tejto chvíli je napätie na cievke záporné a prúd pretekajúci cievkou začne klesať, energia uložená v cievke je prenášaná na výstup. Výstupný prúd je pílomite zvlnený, jeho zvlnenie závisí od splnenia nerovnosti  $L/R > T$ . Z tejto nerovnosti môžeme vyvodit' tvrdenie: Čím bude väčšia indukčnosť  $L$  a doba periódy  $T$  menšia tým bude zvlnenie výstupného prúdu menšie.



obr. 5: Znižujúci menič [3]

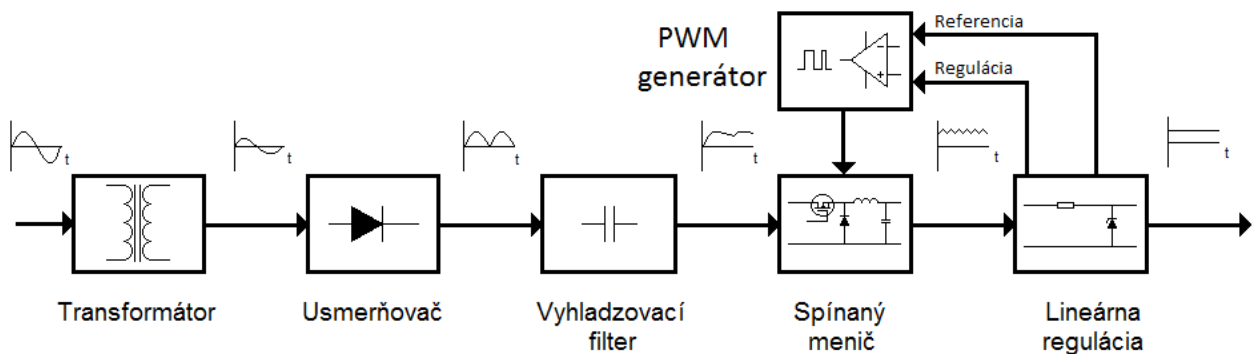
Oobecne platí čím väčšia indukčnosť a frekvencia meniča, tým menšie je zvlnenie výstupného prúdu. Pracovná frekvencia meničov sa v dnešnej dobe pohybuje od 2 kHz do 20 kHz. Pri takých to frekvenciách býva zvlnenie veľmi malé a nie je potrebné uvažovať exponenciálne priebehy. Pre prípad analýzy meniču môžeme exponenciálne priebehy nahradiť šikmými priamkami, ktoré predstavujú dotyčnicu v počiatku exponenciálu. Fyzikálne to znamená že budeme predpokladať podmienku  $R=0$ . V prípade, že je menič zaťažovaný LC filtrom je podmienka  $R=0$  splnená, pretože tlmičky používané v LC filtroch je možné konštruovať s veľmi malým vlastným odporom. Priebehy pre režim spojitých prúdov sú naznačené na obrázku 6 [1].



obr. 6: priebehy veličín  
znižujúceho meniču [1]

## 4. Koncepcia zdroja

Zdroj bude pozostávať z dvoch sériovo zapojených regulácií výstupných veličín. Prvá regulácia bude realizovaná spínaným neoddeleným znižujúcim meničom, ktorý bude regulovať výstupné napätie transformátoru v rozsahu 4-35 V. Výstup spínaného meniču bude privedený na vstup lineárneho regulovateľného zdroja, ktorý bude regulovať výstupné napätie v rozsahu: 0-30 V a prúdové obmedzenie v rozsahu: 20 mA-5A. Vďaka prvému stupňu regulácie tvoreného spínaným meničom by mala stúpnuť účinnosť zdroja ako celku, keďže na lineárnej časti zdroja sa nebude premieňať na teplo celkový výkon dodaný sieťovým transformátorom, ale iba jeho časť, ktorú prepustí spínaná regulácia. Princípiálne blokové zapojenie je naznačené na obrázku 7.

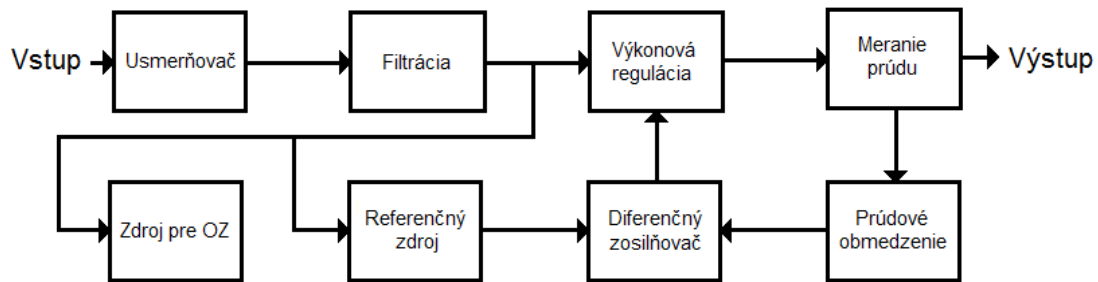


obr. 7: Bloková schéma zvolenej koncepcie zdroja

Ako vidno na obrázku 7: Sieťové napätie je najprv transformované, na požadovanú hodnotu, v našom prípade 30 V, usmernené, vyhladené a privedené na spínaný menič, ktorý znižuje hodnotu výstupného napätia. Spínaný menič dodáva vyššie napätie ako je nastavené na lineárnej regulácii. Je to z dôvodu potlačenia zvlnenia výstupu spínaného meniču.

## 4.2 Lineárna regulácia

Pre lineárnu časť regulácie som si vybral pomerne známu konštrukciu laboratórneho zdroja G400[5]. Jedná sa o zapojenie laboratórneho zdroja s možnosťou regulácie výstupného napätia a regulácie obmedzenia výstupného prúdu. Bloková schéma je na obrázku 9:

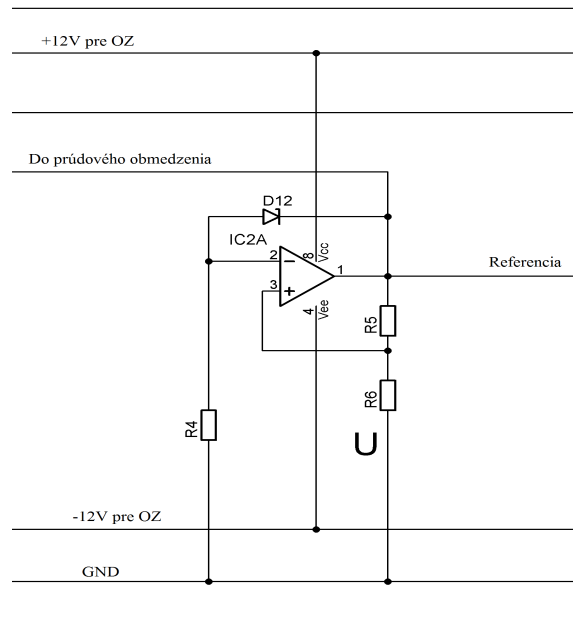


obr. 8: Blokovaná schéma zdroja G400

Napätie zo sieťového transformátora je privedené na vstup usmerňovaču a následne usmernené a vyhladené. Ako usmerňovač je použitý Graetzov mostík. Odtiaľto je napätie privedené na výkonový regulačný prvok unipolárny tranzistor vodivosti NPN, na zdroj pre operačné zosilňovače a na zdroj referenčného napätia pre diferenčný zosilňovač[5].

### 4.2.1 Zdroj referenčného napätia

Zdroj referenčného napätia vytvára konštantné napätie, na jeho stabilite závisí aj stabilita výstupného napätia. Referencia je tvorená komponentami R4, R6, D12 a IC2A. Obvod referenčného napätia je konštruovaný na základe zenerovej diódy D6, pripojenej k operačnému zosilňovaču IC2A. Napätie na výstupe operačného zosilňovaču sa ustáli na takej hodnote, aby napätie medzi invertujúcim a neinvertujúcim vstupom OZ bolo nulové. Na rezistore R4 sa vytvorí rovnaké napätie ako Zenerovo napätie na D12. Prúd, ktorý preteká rezistorom R4 preteká aj rezistorom R6 preto je výsledné referenčné napätie dané súčtom napätí na R4 a R6. Výsledná hodnota ref. napätia je 9,4 V. Schéma je na obrázku 10 [5].

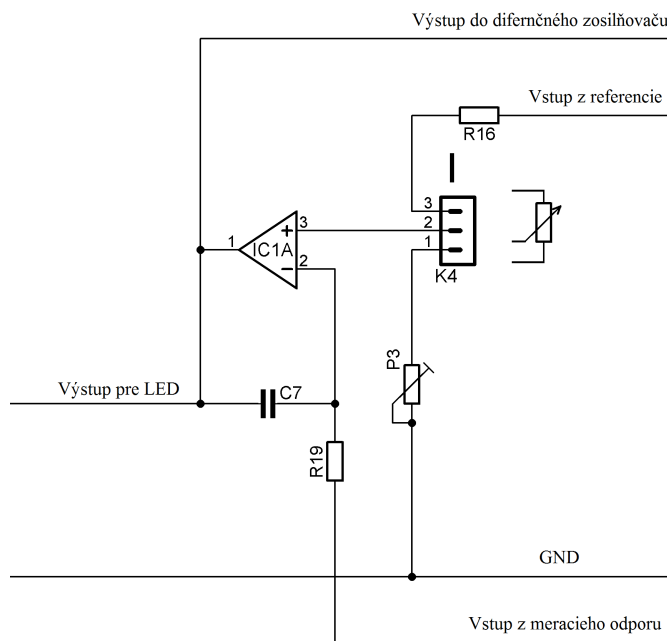


obr. 9: Zapojenie referenčného zdroja [5]

## 4.2.2 Prúdové obmedzenie

Aby bolo možné nastavenie maximálnej hodnoty prúdu na výstupe, obvod meria napäťový úbytok na odpore R (Na schéme diferenčného zosilňovaču), cez ktorý preteká prúd do záťaže. Invertujúci vstup OZ IC1A je cez rezistor

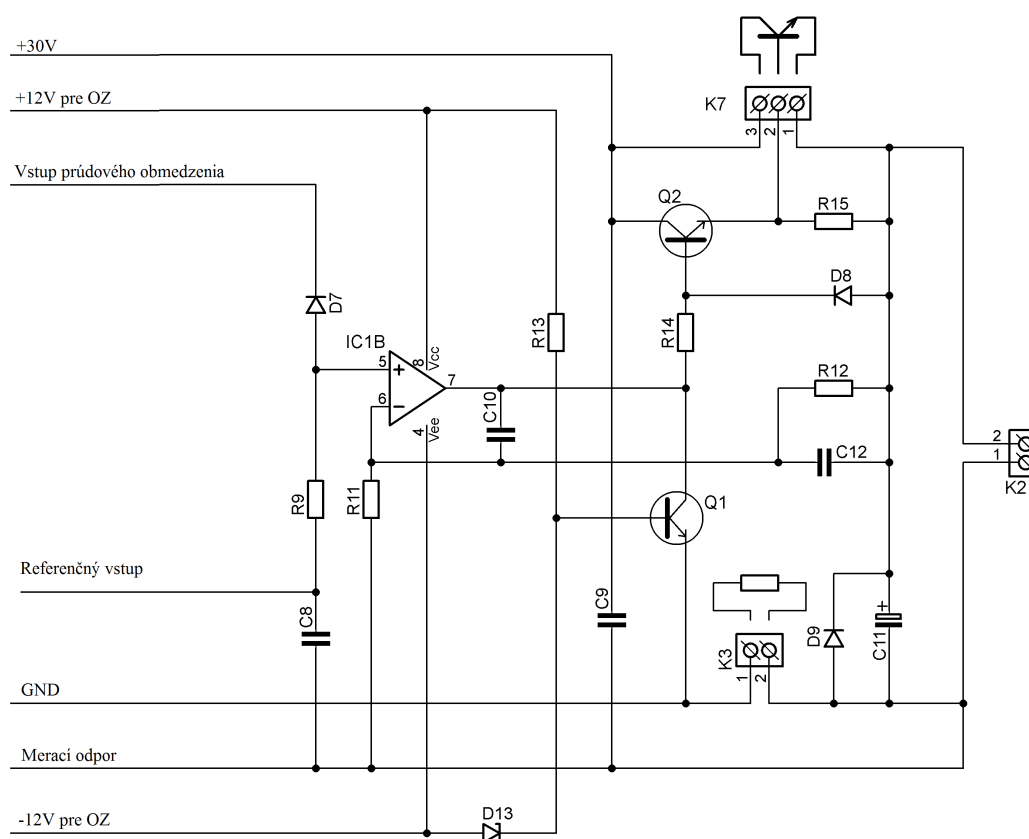
R19 pripojený na zem zdroja (GND). Hodnota napätia na invertujúcom vstupe OZ IC1A je nastaviteľná potenciometrom pripojeným ku konektoru K4, do série s potenciometrom je zapojený trimer P3, ktorý slúži na nastavenie minimálnej hodnoty výstupného prúdu. Ak je výstup zdroja zaťažený a cez merací rezistor R preteká prúd, vznikne na ňom napäťový úbytok podľa Ohmovho zákona, tento úbytok je privedený na invertujúci vstup OZ IC1A a porovnávaný s hodnotou napätia na neinvertujúcom vstupe. Ak je napätie na invertujúcom vstupe vyššie ako napätie na neinvertujúcom vstupe, na výstupe OZ sa objaví napätie, ktoré otvorí diódu D7 (Nenachádza sa na schéme) a tým je privedené napätie na OZ IC1B (Nenachádza sa na schéme) a výstupné napätie zdroja sa začne znižovať, tak aby pretekajúci prúd nezvyšoval svoju hodnotu. Zdroj pracuje v režime konštantného prúdu, CC režim. Napätie z výstupu IO3A je privedené na tranzistor T3 (Nenachádza sa na schéme), ktorý rozsvieti LED diódu indikujúcu režim konštantného prúdu. Kondenzátor C3 slúži pre kompenzáciu výstupu OZ IC1A, aby bola zaručená jeho stabilita. Schéma je na obrázku 11 [5].



obr. 10: Zapojenie prúdového obmedzenia [5]

### 4.2.3 Diferenčný zosilňovač

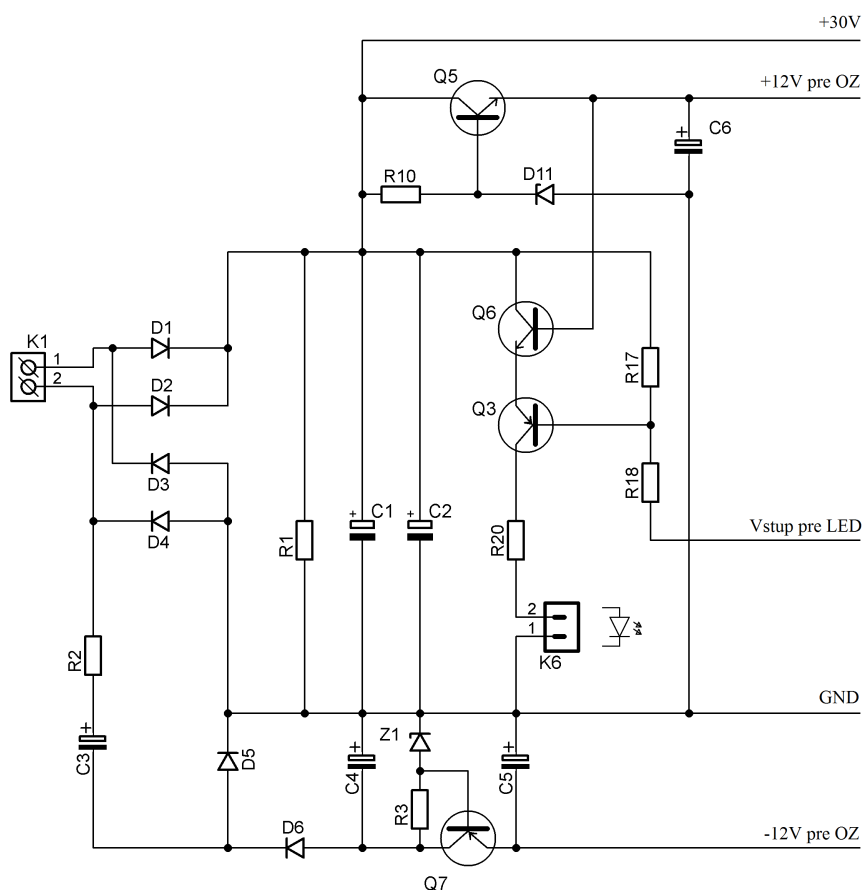
Operačný zosilňovač IC1B slúži na kontrolu výstupného napätia, na jeho neinvertujúci vstup je pripojený výstup z obvodu prúdového obmedzenia, vďaka tomu dochádza pri prepnutí zdroja z režimu konštantného napätia do režimu konštantného prúdu k obmedzeniu výstupného napätia. Výstup OZ IC1B je privedený cez rezistor R14 na bázu tranzistoru Q2, ktorý je v Darlingtonovom zapojení s tranzistorom pripojeným na konektor K7. Rezistor R15 obmedzuje vplyv kludového prúdu tranzistoru Q2. Tranzistor Q1 udržiava výstup zdroja na nulovom napätí, pokiaľ nie je privedené záporné napájacie napätie pre operačné zosilňovače. Vďaka tomu sa predíde prechodovým javom na výstupných svorkách zdroja pri jeho zapínaní a vypínaní. Zenerová dióda D13 uzatvorí tranzistor Q1, akonáhle sa na nej objaví záporné napájacie napätie. Kondenzátor C10 blokuje OZ IC1B proti rozkmitaniu [5].



obr. 11: Zapojenie diferenčného zosilňovaču [5]

#### 4.2.4 Zdroje pomocných napätí

Pre napájanie operačných zosilňovačov a napájanie zdroja referenčného napätia je použité napätie sieťového transformátoru. Zdroj záporného napätia (Vee) je tvorený komponentami R3, C2, Z1, D5, D6. Záporné napätie je následne stabilizované zenerovým stabilizátorom, ktorý je tvorený zenerovou diódou Z1 a rezistorom R3, výstup stabilizátoru je posilnený tranzistorom Q7. Zdroj kladného napätia (Vcc) pre OZ tvorí taktiež zenerov stabilizátor zložený zo zenerovej diódy D11 a rezistoru R10. Výstup stabilizátoru je posilnený tranzistorom Q5. Tranzistor Q6 slúži na zníženie napätia pre tranzistor Q3. Na bázu tranzistoru Q3 je privedené napätie z výstupu OZ IC1A, v prípade činnosti prúdového obmedzenia sa na báze Q3 objaví napätie a dôjde k rozsvieteniu diódy LED, pripojenej na konektor K6, ktorá signalizuje činnosť prúdového obmedzenia. Schéma pomocných zdrojov je na obrázku 13 [5].



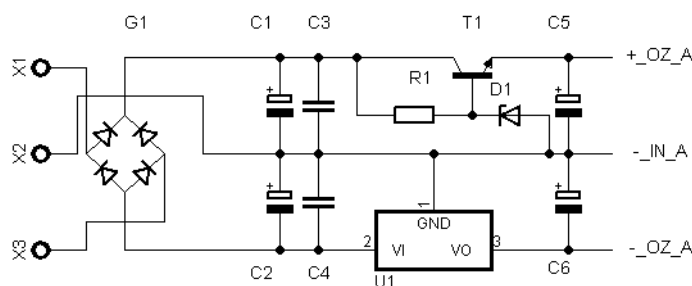
obr. 12: Zdroje pomocných napätí [5]

Kompletná schéma zdroja G400 je súčasťou príloh na konci dokumentu pod označením Príloha.5



## 4.3 Úprava Lineárnej časti regulácie

Zdroj G400 je konštruovaný s ohľadom na čo najvyššiu jednoduchosť, preto je napájanie riešené z jedného nesymetrického zdroja (transformátor). Vzhľadom k spínanej predregulácii je potrebné oddelenie pomocného napájania. Vzhľadom k použitiu vlasnoručne namotávaného toroidu (cena) som sa rozhodol použiť úplné oddelenie čo zjednodušilo aj návrh DPS. Schéma pomocných zdrojov je na nasledujúcom obrázku:



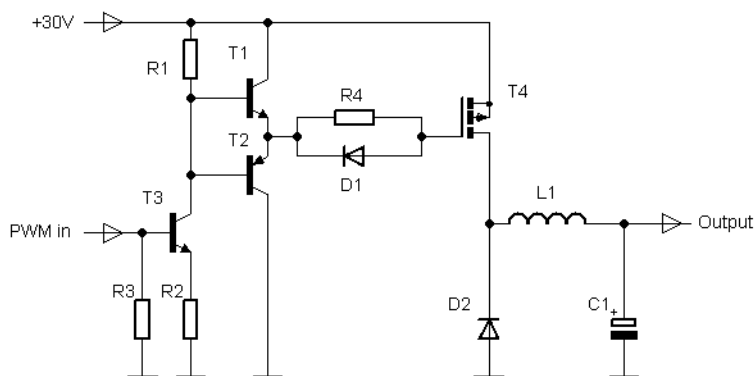
obr. 13: Zdroj pomocných napätí

Napätie z transformátoru je privedené na usmerňavací mostík G1, vyhladené kapacitou C1-C4. Pre stabilizáciu kladnej časti je použitý zenerov stabilizátor tvorený diódou D1 a rezistorom R1 a jeho výstup je posilnený tranzistorom T1. Pre stabilizáciu zápornej časti bol použitý monolitický stabilizátor 7905.

## 4.4 Spínaný menič

Spínaný menič bude tvorený ako koncepcia znižujúceho meniču z horným spínačom. Pre budenie spínacieho prvku je použitý jednoduchý tranzistorový obvod. Ako zdroj PWM signálu je použitý obvod TL494.

Znižujúci menič je tvorený tranzistorom T4, diódou D2. Tranzistory T1 a T2 tvoria budenie gejt PMOS tranzistoru T4. V prípade nulovej hodnoty napätia na vstupe PWM in je otvorený tranzistor T1 a na gejt T4 je privedené kladné napätie, T4 je zatvorený. Pri privedení +5 V na vstup PWM sa otvorí tranzistor T3 a T2. Tranzistor T1 sa zatvorí. Tranzistor T2 uzemní gejt T4, ktorého kapacita sa vybije cez diódu D1 a T2, čím dôjde k jeho otvoreniu, ako vidíme na obrázku.



obr. 14: Spínaný menič

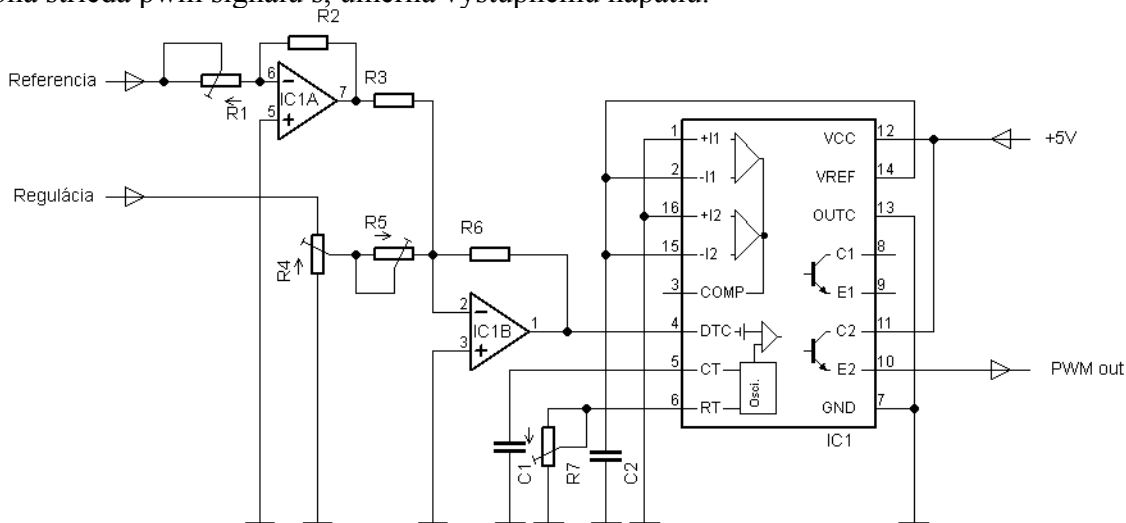
Tranzistor PMOS má oproti NMOS tranzistoru horšie vodivostné aj spínacie parametre, bol použitý z dôvodu jednoduchosti spínania. NMOS tranzistor by v tejto aplikácii vyžadoval plávajúci zdroj, čo by zbytočne skoplikovalo návrh budiču.

## 4.5 PWM Generátor

PWM generátor slúži na generovanie budiaceho signálu pre spínanú reguláciu. Ako zdroj PWM signálu je použitý integrovaný obvod TL494, ktorý dokáže pracovať v dvoch režimoch:

- Push-pull: určené pre budenie horného a dolného spínaču napríklad pre riadenie spínacieho polomostu.
- Paralelne: Interné spínače pre hornú aj dolnú stranu spínajú naraz.

V našom prípade som zvolil možnosť paralelného spínania: Pre spínanie tranzistoru hornej strany je potrebná strieda pwm signálu s úmerná výstupnému napätiu.



obr. 15: Súčtový člen, PWM generátor

PWM signál pre spínanie horného spínaču je vytvorený pomocou výstupov C2 a E2. Na kolektor (C2) je pripojené 5V napájanie, ktoré je pri zopnutí privedené na emitor (E2).

Pre reguláciu striedy PWM obvodu TL494 je použitý vstup DTC (Death Time Control) na ktorý je privedené riadiace napätie od 0 do 3,3 V, vďaka čomu je odskok regulovateľný od 3% do 100%.

Jedná sa o reguláciu odskoku, nie striedy, čo znamená že maximálna výstupná strieda je 97% pri nulovom napätí na vstupe DTC. Tento problém rieši súčtový člen tvorený rezistormi R3, R5, R6 a IC1B. Ako referencia pre odčítavanie je použitý zdroj referenčného napätia lineárnej regulácie (vstup Referencia). Referenčné napätie je invertované pomocou operačného zosilňovaču IC1A. Od tohto vstupu je odčítavaný vstup Regulácia, ktorý je vyvedený priamo z vstupu bázy budiču lineárnej regulácie, čím sa z regulačného napätia 0-30 V vytvorí napätie 3,3-0 V.

Výstupná frekvencia je daná hodnotou kondenzátoru C1 a trimru R7[6]:

$$R = \frac{1}{f \cdot C1} = \frac{1}{2,2E-9 \cdot 1E5} = 4545,45 \Omega \quad (1)$$

## 5. Dimenzovanie

### 5.1 Dimenzovanie komponentov

#### 5.1.1 Dimenzovanie tranzistoru spínanej regulácie

Typ spínacieho tranzistoru bol zvolený podľa predpokladaných parametrov zdroja a spínacej frekvencie PWM generátoru. Ohľad bol tiež braný na dostupnosť v bežných predajniach a cenu. Z ponuky firmy GME bol zvolený typ IRF9540, ktorého parametre sú uvedené v nasledujúcej tabulke.

Tab. 1: Katalógové hodnoty tranzistoru IRF9540[7]

Názov	Označenie	Hodnota	Jednotka
Prúd D-S	$I_{DSS}$	13	A
Napätie D-S	$U_{DSS}$	100	V
Napätie G-S	$U_{GS}$	20	V
Stratový výkon	$P_d$	150	W
Odpor D-S	$R_{DS(on)}$	200	m $\Omega$
Púzdro	TO220		

#### 5.1.2 Dimenzovanie nulovej diódy

Cez diódu D4 preteká prúd  $I_{D0}$  pri vypnutí tranzistoru T1, keďže tento prúd je rovný prúdu  $I_Z$ , ktorý preteká záťažou musíme nulovú diódu D5 dimenzovať na maximálny prúd zdroja 5 A. Pri zvolení správneho typu diódy treba dbať aj na frekvenciu spínania, ktorá je v tomto prípade 150 kHz. Z Bežne dostupných diód tieto kritériá najlepšie spĺňajú Schottkyho diódy. Z katalógu predajcu GME som zvolil typ SR860, parametre sú vypísané v tabulke 4

Tab. 2: Katalógové hodnoty diódy SR860[8]

Názov	Označenie	Hodnota	Jednotka
Záverne napätie	$U_{RRM}$	60	V
Prúd v priepustnom smere	$I_F$	8	A

### 5.1.3 Dimenzovanie cievky

Pre dimenzovanie cievky je potrebné zvoliť si maximálne zvlnenie prúdu  $\Delta I_{\max}=4$  mA. Hodnota cievky sa vypočíta podľa nasledujúceho vzťahu, kde je strieda zvolená  $s=0,5$ , pretože v prípade znižujúceho meniču dochádza k najvyššiemu zvlneniu.

$$L = \frac{U_1 \cdot s \cdot (s-1)}{\Delta I_{\max} \cdot f} = \frac{35 \cdot 0,5 \cdot (1-0,5)}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^4} = 14,583 \text{ mH} \quad (2)$$

Kde  $U_1$  je vstupné napätie zdroja,  $s$  je strieda budiaceho signálu PWM,  $\Delta I_{\max}$  je maximálna hodnota zvlnenia výstupného prúdu a  $f$  je pracovná frekvencia meniča.

Výpočtom sme stanovili hodnotu cievky na 14,6 mH z dostupných cievok zvolíme cievku s patričnou hodnotou a prúdovým dimenzovaním minimálne na 5 A [3].

### 5.1.4 Výpočet výstupnej filtrácie

Kondenzátor C4 filtruje výstupné napätie zo spínaného meniča, aby sa v ďalších častiach obvodu minimalizoval prejav zvlnenia spôsobený spínaním. Pre tento účel sa používajú kondenzátory z čo najnižšou hodnotou sériového odporu (LOW ESR). [3]:

$$C = \frac{\Delta I_{\max}}{8 \cdot \Delta U_{2\max} \cdot f} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 15 \cdot 10^4} = 3,3 \text{ uF} \quad (3)$$

Kde  $\Delta I_{\max}$  je maximálna hodnota zvlnenia výstupného prúdu,  $f$  je frekvencia PWM signálu a  $\Delta U_{2\max}$  je maximálna hodnota zvlnenia, ktoré požadujeme.

Výpočtom sme stanovili minimálnu kapacitu filtrácie pre napäťové zvlnenie 1mV na 3,3 uF, ešte je potrebné overiť či vypočítaná hodnota filtračnej kapacity nevytvorí s použitou indukčnosťou rezonančný obvod. Pre výpočet vychádzame z Thopsonovho vzorca:

$$C \gg \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L} = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (15 \cdot 10^4)^2 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 75,05 \text{ pF} \quad (4)$$

keďže  $3,3 \text{ uF} \gg 75,05 \text{ pF}$  môžeme predpokladať že kapacita je dostatočne veľká, aby nevytvorila rezonančný obvod.

Pri testovaní výstupnej filtrácie 3,3 uF dosahovalo napäťové zvlnenie oveľa vyššie hodnoty ako predpokladá výpočet 3. vysoké napäťové zvlnenie odstránilo navýšenie filtračnej kapacity na 470uF.

Pri testovaní prúdového obmedzenia (skokové pripojenie záťaže) sa objavil ďalší problém krátkodobý pokles napätia pri pripojení záťaže. Opäť pomohlo navýšenie filtračnej kapacity na 4x470 uF

Nie je vylúčené, že problém s výstupným napäťovým zvlnením bol spôsobený nekvalitnými low ESR kondenzátormi.

### 5.1.5 Dimenzovanie sieťového transformátoru

Sieťový transformátor bude napájať celé zariadenie, preto je potrebné aby mal dostatočný výkon. Jeho minimálny výkon zistíme súčtom výkonov jednotlivých odberov.

Meraním sme stanovili maximálny odoberaný prúd pomocných zdrojov na 10 mA pri 33 V pre kladnú vetvu a 4 mA pri 5 V pre zápornú. Najvyšší odoberaný výkon dosahuje hlavná regulovaná vetva 5 A pri 30 V. Súčty jednotlivých výkonov určíme zo vzorca:

$$P = U \cdot I \quad (5)$$

$$P_{kladný} = 10\text{E-}3 \cdot 33 = 0,33 \text{ W} \quad (6)$$

$$P_{záporný} = 4\text{E-}3 \cdot 5 = 0,02 \text{ W} \quad (7)$$

$$P_{hlavný} = 5 \cdot 30 = 150 \text{ W} \quad (8)$$

$$P = P_{kladný} + P_{záporný} + P_{hlavný} = 0,33 + 0,02 + 150 = 150,35 \text{ W} \quad (9)$$

Keďže sa jedná o dvojité laboratórny zdroj je potrebné vypočítaný výkon ponásobiť dvomi, čím získame hodnotu cez 300 W. Ešte je potrebné počítať s výkonom rezervou pre ovládanie výstupných relé a na napájanie meracích modulov. Do zdroju bude použitý toroidný transformátor 350 VA, ktorý má dostatočnú výkonovú rezervu.

## 5.2 Dimenzovanie Chladienia

### 5.2.1 Straty na MOSFET

Straty na spínacom tranzistore MOSFET tvoria dva typy strát: Straty vedením, ktoré závisia na  $R_{\text{DS(on)}}$  a pretekajúcom prúde. A straty vedením, ktoré závisia na zvolenej frekvencii.

$$P_{\text{SPI}} = f \cdot U_1 \cdot \sqrt{s} \cdot I_{\text{MAX}} \cdot (t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}}) = 15\text{E}4 \cdot 35 \cdot \sqrt{0,5} \cdot 5 \cdot (16\text{E-}9 + 34\text{E-}9) = 0,93 \text{ W} \quad (10)$$

Pri výpočte uvažujeme maximálne možné straty, preto volíme maximálny prúd 5 A. Dosadenie:

$$P_{\text{VED}} = I_{\text{MAX}} \cdot (R_{\text{DS}} \cdot I_{\text{MAX}}) = I_{\text{MAX}}^2 \cdot R_{\text{DS}} = 5^2 \cdot 0,2 = 5 \text{ W} \quad (11)$$

Výsledné straty tvoria súčet strát vedením a strát spínaním:

$$P_{\text{MOS}} = P_{\text{SPI}} + P_{\text{VED}} = 2,25 + 0,93 = 3,17 \text{ W} \quad (12)$$

### 5.2.2 Straty na nulovej dióde

Pri výpočte strát nulovej diódy uvažujeme podobne ako pri výpočte strát na MOSFET-e, teda tie najhoršie podmienky. V prípade diódy tento prípad nastane pri maximálnej striede, keď diódou preteká maximálny prúd. Straty vypočítame nasledovne podľa [1]:

$$P_D = U_P \cdot I_S + R_D \cdot I_{EF}^2 = 0,65 \cdot 5 + 0,006 \cdot 5^2 = 4,75 \text{ W} \quad (13)$$

Celkové straty spínanej regulácie tvorí súčet strát na spínacom prvku a na nulovej dióde:

$$P_{CEL} = P_D + P_{MOS} = 4,75 + 3,17 = 7,93 \text{ W} \quad (14)$$

### 5.2.3 Výpočet strát lineárnej regulácie

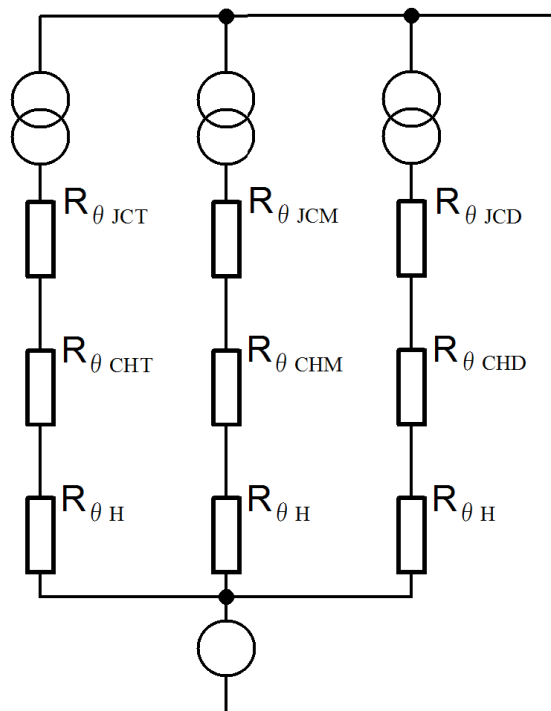
Straty na výkonovom regulačnom prvku tvorí rozdiel dodaného a výstupného výkonu. Na lineárnej regulácii preto vzniká najvyššia strata pri minimálnom výstupnom napätí a maximálnom prúdovom zaťažení. Výkonový prvok musí rozdiel vstupného a výstupného výkonu premeniť na teplo. Celkovú tepelnú stratu určíme pre najvyšší rozdiel vstupného a výstupného napätia. Minimálne nastavené napätie je nula, preto musíme uvažovať že na výkonovom prvku sa premení na teplo maximálny výkon, ktorý dodá spínaná regulácia. Pri minimálnom nastavenom napätí na výstupe lineárnej regulácie je na jej vstupe 3 V z maximálnym prúdom 5 A. Podľa nasledujúceho vzorca vypočítame výkon, ktorý sa premení na teplo podľa [1]:

$$P_{LIN} = U \cdot I = 3 \cdot 5 = 15 \text{ W} \quad (15)$$

Výkonovú stratu sme stanovili na 15W.

### 5.2.4 Výpočet chladiču

Nulová dióda, tranzistor MOSFET a výkonový tranzistor lineárnej regulácie budú na spoločnom chladiči. Z dôvodu izolácie vodivých plôch určených pre odvod tepla od chladiču budú tieto prvky primontované na chladič cez nevodivé silikónové podložky. Tím sa zväčší teplotný odpor prechodu púzdro-chladič  $R_{\theta CH}$ . Pre lepšie pochopenie návrhu chladenia je vhodné nakresliť si tepelnú schému:



obr. 16: Tepelná schéma

Kde  $R_{\theta JC}$  predstavuje tepelný odpor prechodu polovodič-púzdro,  $R_{\theta CH}$  prechod púzdro-chladič a  $R_{\theta H}$ . Prechod chladič-okolie. Tretie písmeno v značení v dolnom indexe značí súčiastku: D-nulová dióda, M-MOSFET T-Tranzistor lin. regulácie. Pre výpočet správneho chladiču je potrebné vedieť maximálnu teplotu chladenej súčiastky, odpory tepelných prechodov a teplotu okolia. Výpis potrebných hodnôt je v tabuľke 3:

Tab. 3: Katalógové hodnoty tranzistoru IRF2807 a diódy SR860 [7], [8], [9]

Názov	Označenie	Hodnota			Jednotka
		Dióda	Mosfet	Tranz	
Maximálna teplota	$T_{JMAX}$	150	175	200	°C
Polovodič-púzdro	$R_{\theta JC}$	3	0,65	1	K/W
Púzdro-chladič	$R_{\theta CH}$	0,45	0,45	0,5	K/W

Ako vidno v tabuľke, maximálna hodnota oteplenia nulovej diódy je najnižšia zo všetkých. Keďže všetky súčiastky budú na jednom chladiči, je potrebné zvoliť túto teplotu. Pred dosadením do vzorca je potrebné určiť celkové straty  $P_{STR}$  ktoré určíme ako dvojnásobný súčet celkových strát[1]:

$$P_{STR} = 2 \cdot (P_{CEL} + P_{LIN}) = 2 \cdot (7,93 + 15) = 45,86 \text{ W} \quad (16)$$



$$R_{\theta JC} + R_{\theta Ch} + R_{\theta H} = \frac{T_{JMAX} - T_0}{P_{STR}} \Rightarrow R_{\theta H} = \frac{T_{JMAX} - T_0}{P_{STR}} - R_{\theta JC} + R_{\theta Ch}$$

$$\frac{150 - 40}{45,86} - \frac{(0,65 + 0,45) \cdot (3 + 0,45) \cdot (1 + 0,5)}{(0,65 + 0,45) + (3 + 0,45) + (1 + 0,5)} = 1,45 \text{ K/W} \quad (17)$$

Zvolený chladič má tepelný odpor 1,3 K/W a bude tvoriť zadnú stenu prístrojovej skrinky.

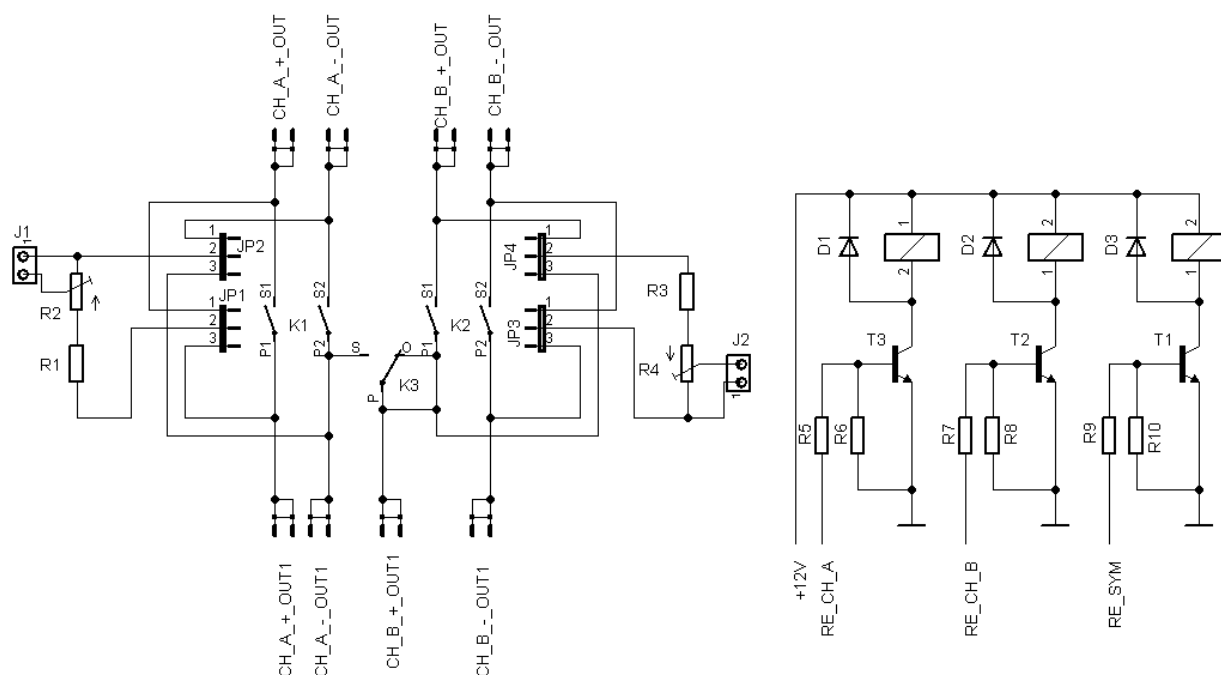
Keďže poznáme celkový stratový výkon zdroja, môžeme určiť jeho celkovú účinnosť:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{STR}}{P_{OUT}}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{45,86}{300}\right) \cdot 100 = 84,71 \% \quad (18)$$

## 6. Doplnky

Súčasťou návrhu je spínanie výstupov pomocou relé a predradníky pre meranie výstupného napätia. Výstupy je možné odpojiť od výstupných svoriek alebo spojiť výstupy oboch zdrojov, čím vznikne jeden symetrický zdroj.

Predradníky pre meranie napätia je možné pomocou prepajok (jumprov) na DPS pripojiť buď na stranu svoriek, alebo na stranu výstupu zdroja. V prvom prípade je možné merať napätie priamo na výstupných svorkách, po odpojení výstupu zdroja nie je možné zistiť jeho výstupné napätie. V druhom prípade je predradník pripojený k výstupu zdroja aj po odpojení výstupných svoriek.



obr. 17: Spínanie výstupu

Relé K1 a K2 slúžia na spínanie výstupov zdroja, relé K3 slúži na ich prepajenie do symetrického zdroja. Predradníky pozostávajú z prepajok označených JP a rezistorov R1 až R4.

Výstupné napätie predradníkov je určené hodnotou odporového deliču R1 a R2 (obr17. v ľavo). Pre meranie bude použitý AD prevodník procesoru Atmel s maximálnym vstupným napätím 5V.

Vzhľadom k nerovnomernosti odporových dráh trimrov je vhodné voliť výstupné napätie vyššie ako maximálne požadované. Pred zapojením samotného procesoru je vhodné skontrolovať max. výstupné napätie predradníku.

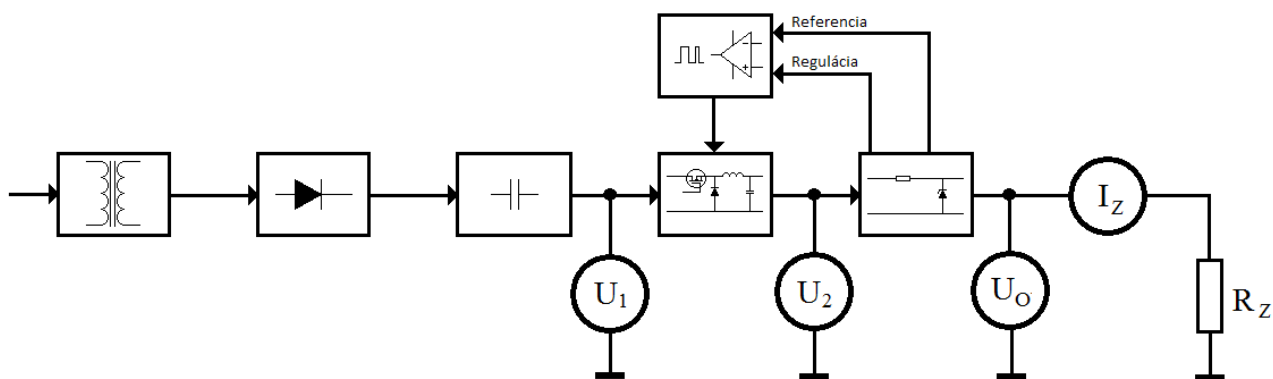
$$U \cdot \frac{R1}{R1 + R2} = 30 \cdot \frac{2,5E3}{2,5E3 + 1E4} = 6V \quad (19)$$

## 7. Meranie

### 7.1 Meranie záťažovej charakteristiky pri konštantnom napätí

Meranie záťažovej charakteristiky prebiehalo pri nastavenom konštantnom napätí  $U_{SET}=30,25\text{ V}$ ; 20V a 10V. Výstup zdroja bol zaťažovaný plynulo regulovateľným reostatom  $R_Z$

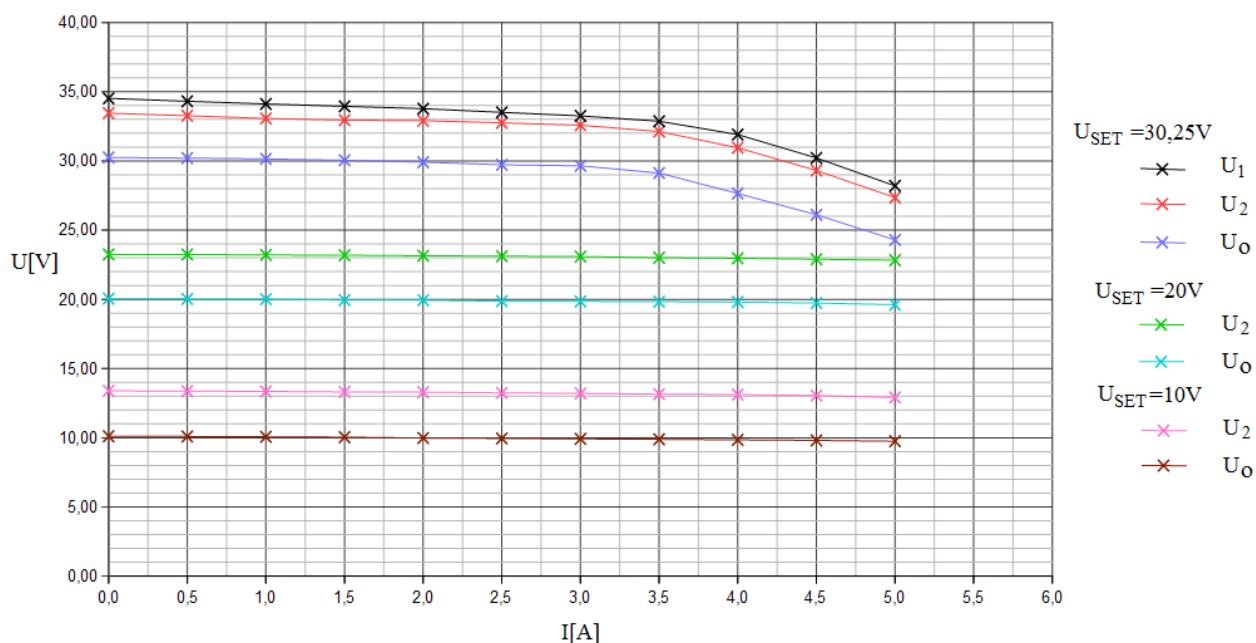
Napätie  $U_1$  je napätie v medziobvode merané priamo na filtračných kondenzátoroch, napätie  $U_2$  je napätie merané na výstupe spínanej regulácie a napätie  $U_O$  je napätie na výstupných svorkách zdroja. Ampérmeter  $I_Z$  meria prúd tečúci záťažou.



obr. 18: Zapojenie merania

$U_{SET}$	Maximum: 30,25V			20V		10V	
$I[A]$	$U_1[V]$	$U_2[V]$	$U_O[V]$	$U_2[V]$	$U_O[V]$	$U_2[V]$	$U_O[V]$
0,0	34,52	33,45	30,25	23,25	20,05	13,39	10,11
0,5	34,31	33,27	30,21	23,24	20,03	13,37	10,09
1,0	34,12	33,07	30,15	23,21	20,01	13,35	10,07
1,5	33,95	32,95	30,05	23,19	19,95	13,31	10,04
2,0	33,78	32,91	29,91	23,15	19,94	13,29	9,98
2,5	33,51	32,75	29,72	23,12	19,87	13,24	9,95
3,0	33,26	32,58	29,65	23,09	19,85	13,21	9,92
3,5	32,87	32,13	29,13	23,01	19,83	13,15	9,89
4,0	31,91	30,95	27,65	22,97	19,81	13,12	9,85
4,5	30,22	29,31	26,11	22,90	19,73	13,05	9,81
5,0	28,20	27,35	24,29	22,83	19,61	12,91	9,75

Tab. 4: Namerné hodnoty záťažovej charakteristiky pri konšt. napätí



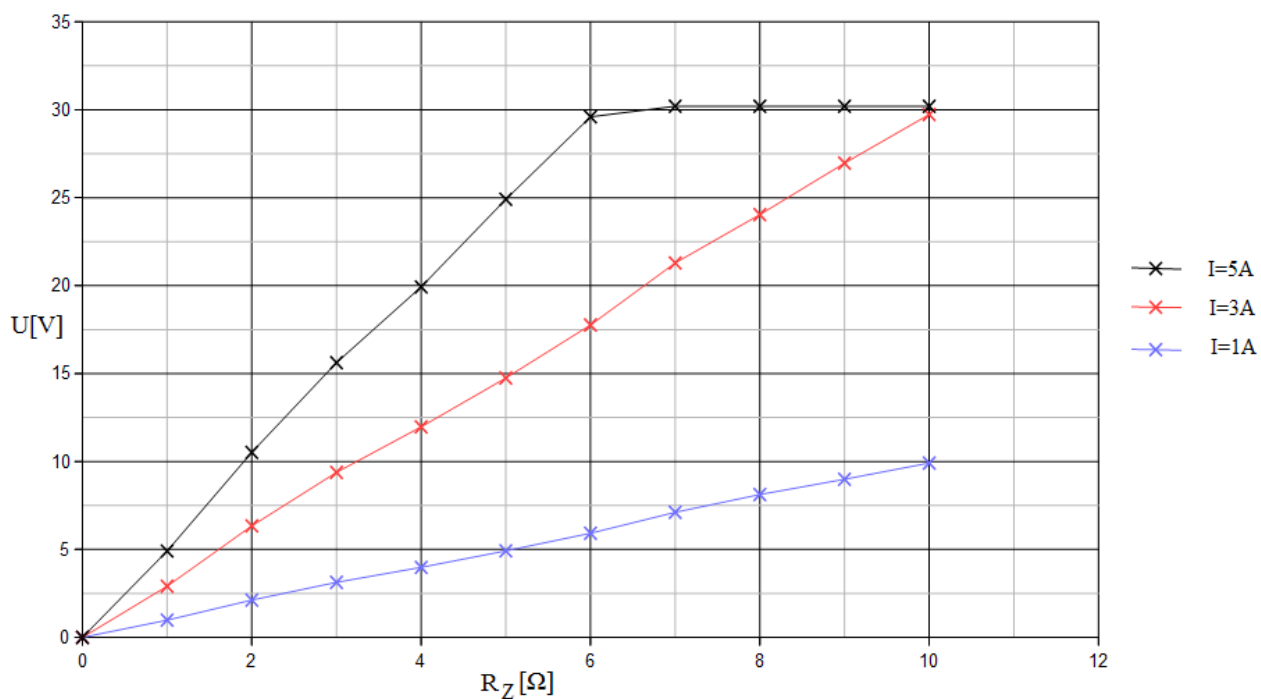
Graf. 1: Grafické zobrazenie zaťažovacej charakteristiky pri konštantnom napätí

## 6.2 Meranie záťažovej charakteristiky pri konštantnom prúde

Meranie prebiehalo pri nastavenom konštantnom prúde  $I_{SET}=5A$ ;  $3A$  a  $1A$ . Napätie na zdroji bolo nastavené na maximálnu hodnotu a reostatom RZ boli postupne nastavované hodnoty odporu podľa nasledovnej tabulky. Napätia  $U_1$  a  $U_2$  nebolo potrebné merať, ich priebehy sú totožné s meraním pri konštantnom napätí.

I <sub>SET</sub>	5A	3A	1A
R <sub>Z</sub> [Ω]	U <sub>0</sub> [V]	U <sub>0</sub> [V]	U <sub>0</sub> [V]
0	0	0	0
1	4,91	2,91	0,98
2	10,52	6,34	2,12
3	15,62	9,38	3,13
4	19,93	11,97	3,98
5	24,91	14,75	4,92
6	29,6	17,76	5,92
7	30,2	21,29	7,11
8	30,2	24,04	8,12
9	30,2	26,97	8,99
10	30,2	29,73	9,91

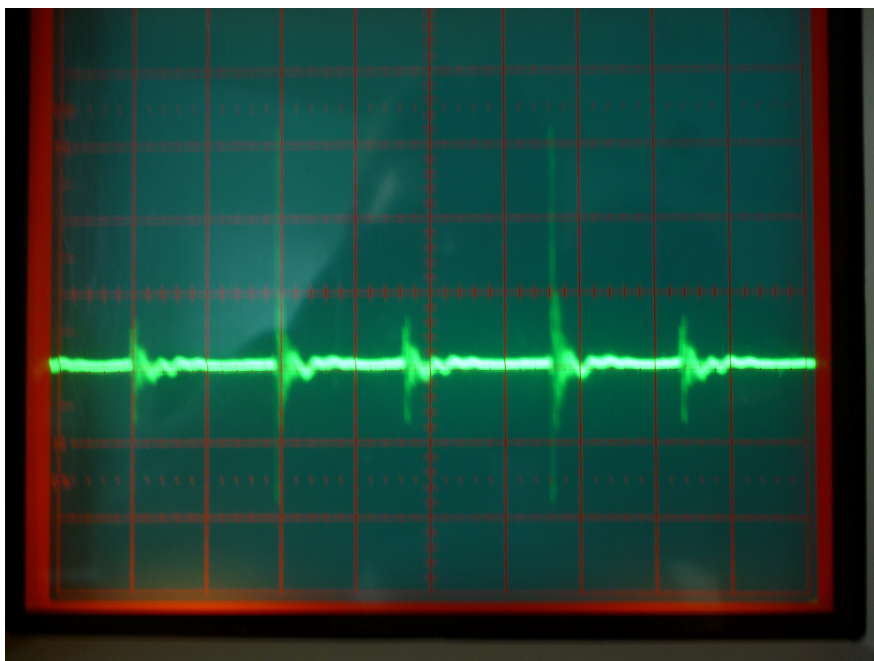
Tab. 5: Namerané hodnoty zaťažovacej charakteristiky pri konšt. prúde



Graf. 2: Grafické zobrazenie zaťažovacej charakteristiky pri konštantnom prúde



obr. 19: Výstupné napätové zvlnenie, 10 mV/div; 2 us/div



obr. 20: Výstupné prúdové zvlneie, 25 mA/div; 2  $\mu$ s/div



obr. 21: Napätie  $U_{gs}$ , 5 V/div; 2  $\mu$ s/div

Tab. 6: Zoznam prístrojov

Označenie	Určenie	výrobca	typ
U1, U2, UZ	Voltmeter	Fluke	187
IZ	Ampérmeter	Philips	PM2525
-	Osciloskop	Tektronix	465

## 8. Návrh DPS

Návrh Dosiek plošných spojov som robil v programe EAGLE. Pri návrhu som dbal na dodatočné prúdové dimenzovanie, všeobecné návrhové pravidlá. DPS sú vyhotovené v dvojvrstvovom prevedení, ako dve DPS umiestnené nad sebou. Na hornej DPS je umiestnený jeden usmerňovač so vstupov filtráciou a spínané regulácie pre oba kanáli zdroja. Na dolnej je umiestnený druhý usmerňovač s filtráciou, lineárne regulácie a relé pre spínanie výstupných svoriek zdroja. Z dôvodu ideálnejšieho rozmiestnenia komponentov sú výkonové prepoje riešené vodičmi pripojenými k DPS cez konektory FASTON. DPS sú spojené pomocou 35mm distančných stĺpikov. Z priestorových dôvodov je potrebné na prúdovo namáhané cesty na DPS tenšie ako 1,2mm naniesť vrstvu cínu.

Návrhy dosiek sú v uvedené v prílohách na konci dokumentu:

Návrh DPS lineárnej časti, vrchná strana	Rozmer: 88,27 x 213,36 mm	Príloha 1
Návrh DPS lineárnej časti, spodná strana	Rozmer: 88,27 x 213,36 mm	Príloha 2
Návrh DPS spínanej časti, vrchná strana	Rozmer: 74,93 x 213,36 mm	Príloha 3
Návrh DPS spínanej časti, spodná strana	Rozmer: 74,93 x 213,36 mm	Príloha 4

## 9. Záver

Práca sa zaoberá praktickým návrhom laboratórneho zdroja s vysokou účinnosťou, ktorá je dosiahnutá vďaka použitiu spínanej predregulácie. Pri realizácii práce som si osvojil znalosti v oblasti neoddelujúcich meničov, princípi spínania unipolárnych tranzistorov, ako aj pravidlá čo najideálnejšieho návrhu DPS spínaných meničov.

Obvod spínanej predregulácie bol navrhnutý s ohľadom na čo najvyššiu jednoduchosť, kvôli zmenšeniu návrhu DPS na minimum. Kôli spomínaným dôvodom sú PWM generátor a gejtový budič umiestnené na osobitných DPS. Riešenie sa ukázalo ako vhodné hlavne pri oživovaní a meraní.

V nameraných priebehoch grafu 1 vidíme veľký pokles výstupného napätia z rastúcim zaťažovacím prúdom  $I_Z$  od hodnoty 3 A. Ako môžeme vidieť na priebehu  $U_1$ , pokles napätia nastáva už v medziobvode. Tento problém je spôsobený poklesom napätia na transformátore a je odstrániteľný len použitím silnejšieho transformátoru z menším poklesom napätia v dôsledku menšieho vnútorného odporu a menších rozptilových indukčností.

V nameraných priebehoch grafu 2 vidíme priebehy merané pri konštantnom prúde (CC mód). Teoreticky by priebehy mali byť rovné priamky, avšak z dôvodu ohriatia reostatu prechodom prúdu sa menila jeho nastavená hodnota čo spôsobilo miernu nelineárnosť nameraných priebehov.

Na obrázku 19 vidíme záznam napäťového zvlnenia ktoré dosahuje hodnoty 2 mV<sub>pp</sub>, zákmity sú spôsobené chybou maracieho vybavenia. Reostat nebol bezindukčný.

Svoju prácu hodnotím ako dostatočnú pre moje ciele využitie ako laboratórneho zdroja. Modul bude v budúcnosti osadený do prístrojovej skrinky a vybavený meracími panelmi.

Lineárna časť regulácie (zdroj G400) plne vyhovuje mojim požiadavkám.

Účinnosť zdroja dosahuje: 84,71%.

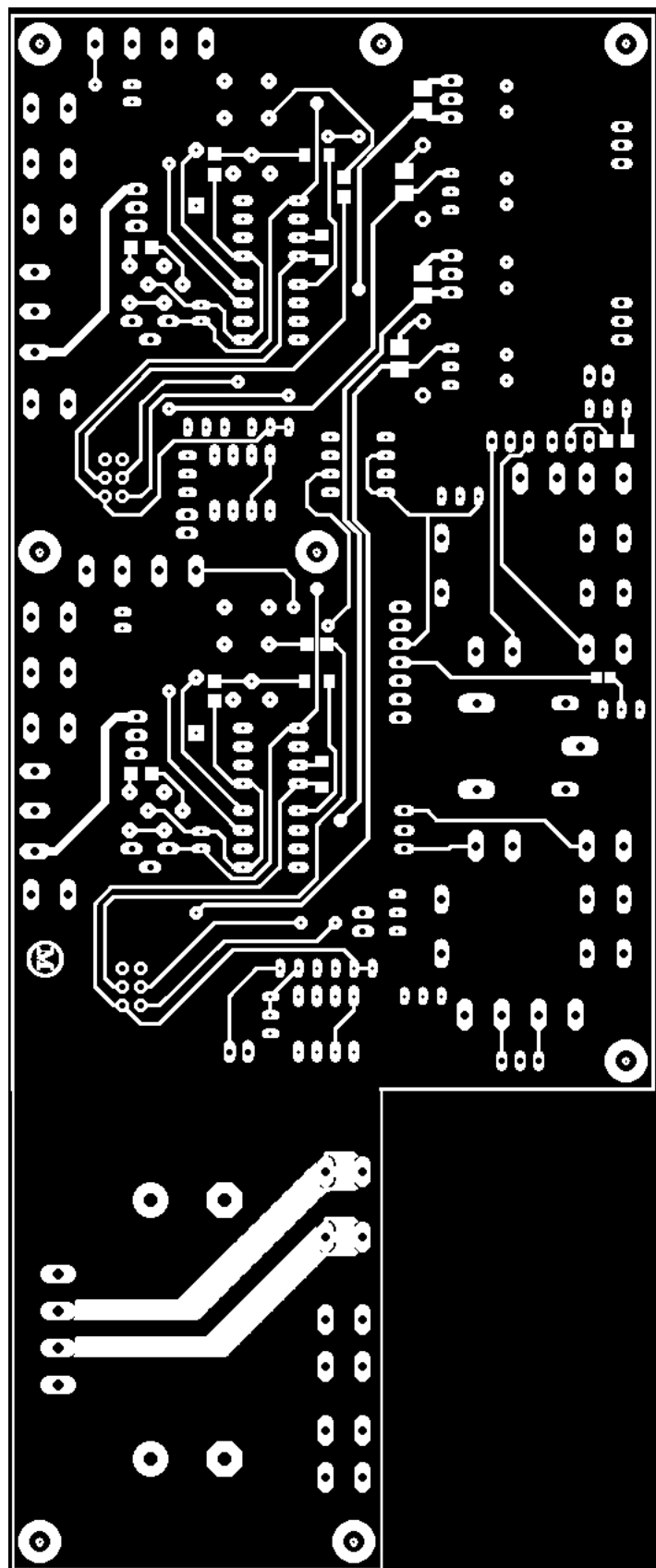


## 10. Zoznam použitej literatúry

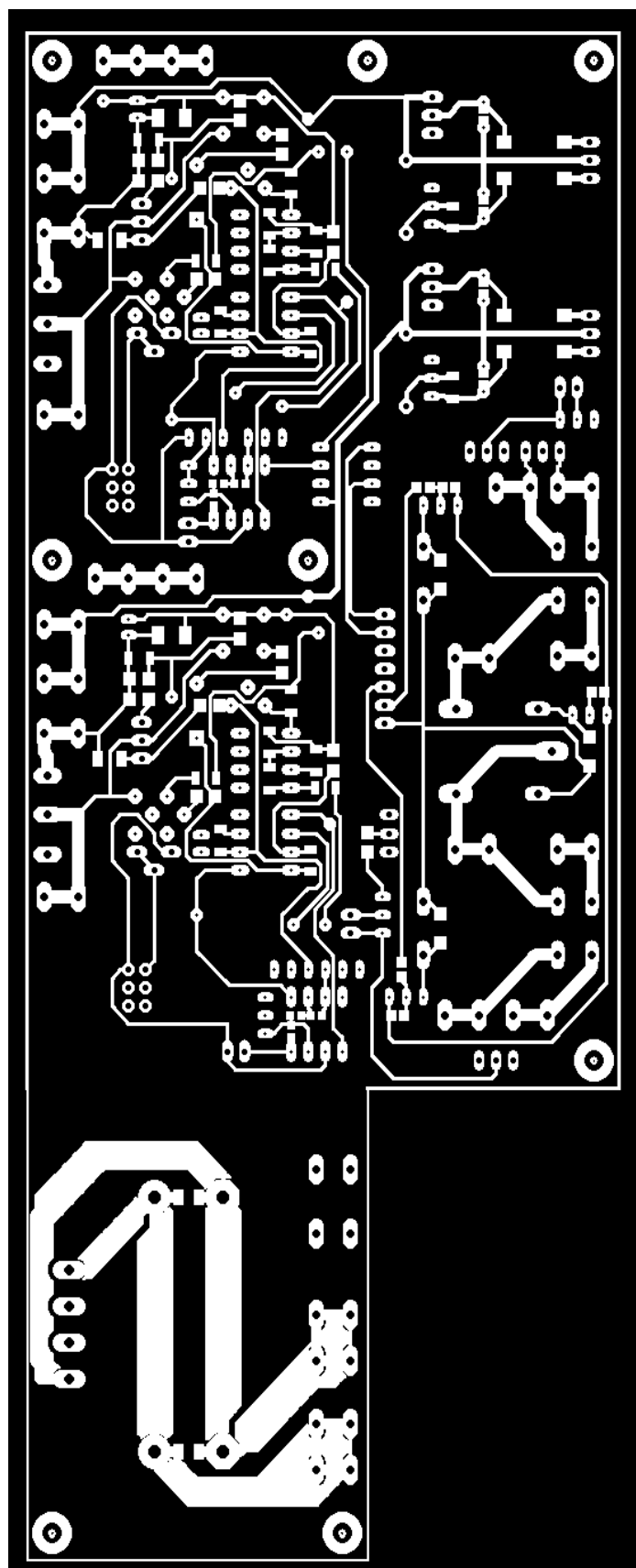
- [1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [2] KREJČÍŘÍK, A. *Napájecí zdroje I*. Praha : Technická literatura BEN, 1996, ISBN 80-86056-02-3.
- [3] KREJČÍŘÍK, A. *DC/DC měniče*. Praha : Technická literatura BEN, 2001, ISBN 80-7300-045-8.
- [4] *Katalógový list LM2596* [online]. [cit: 30-05-2015].  
Dostupný z WWW:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf> >
- [5] *ELEKTROinzerť*. PRAHA, 1996, roč. 6, č. 7. Dostupné z:  
<[http://paja-trb.cz/konstrukce/zdroj/zdroj\\_G400.pdf](http://paja-trb.cz/konstrukce/zdroj/zdroj_G400.pdf) >
- [6] *Katalógový list TL494* [online]. [cit: 30-05-2015].  
Dostupný z WWW:  
<<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf> >
- [7] *Katalógový list IRF9540* [online]. [cit: 30-05-2015].  
Dostupný z WWW:  
<<http://www.vishay.com/docs/91078/91078.pdf> >
- [8] *Katalógový list SR860* [online]. [cit: 30-05-2015].  
Dostupný z WWW:  
<<http://www.fairchildsemi.com/ds/MB/MBR745.pdf> >
- [9] *Katalógový list 2N3055* [online]. [cit: 30-05-2015].  
Dostupný z WWW:  
<[http://www.bmo.physik.uni-muenchen.de/~riedle/Elektronik\\_I/KW048/2N3055-D.pdf](http://www.bmo.physik.uni-muenchen.de/~riedle/Elektronik_I/KW048/2N3055-D.pdf) >

## 11. Zoznam príloh

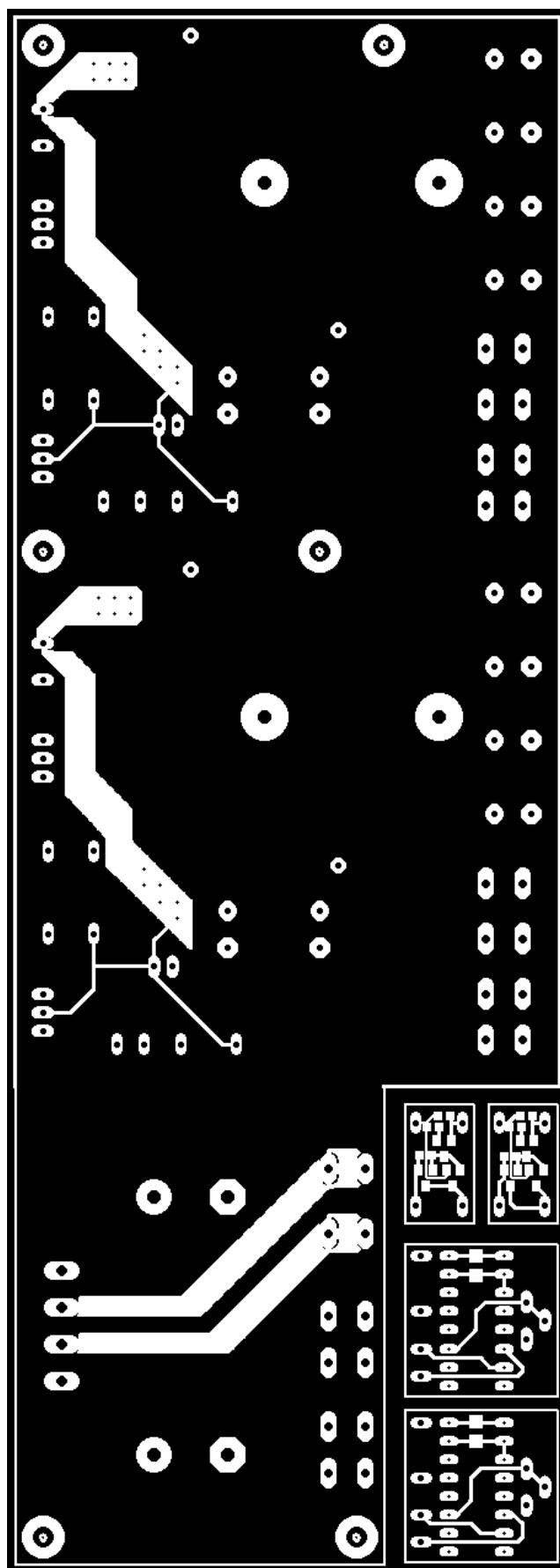
Príloha 1	Návrh DPS lineárnej časti, vrchná strana	Rozmer: 88,27 x 213,36 mm
Príloha 2	Návrh DPS lineárnej časti, spodná strana	Rozmer: 88,27 x 213,36 mm
Príloha 3	Návrh DPS spínanej časti, vrchná strana	Rozmer: 74,93 x 213,36 mm
Príloha 4	Návrh DPS spínanej časti, spodná strana	Rozmer: 74,93 x 213,36 mm
Príloha 5	Schéma lineárnej časti	
Príloha 6	Schéma spínanej časti	
Príloha 7	Zapojenie medziobvodu	
Príloha 8	Zapojenie zdroja pomocných napätí	
Príloha 9	Zapojenie spínania výstupu	
Príloha 10	Zoznam súčiastok	
Príloha 11	Fotografia modulu predná strana	
Príloha 12	Fotografia modulu zadná strana	
Príloha 13	Fotografia DPS lineárnej časti strana spojov	
Príloha 14	Fotografia DPS lineárnej časti strana súčiastok	



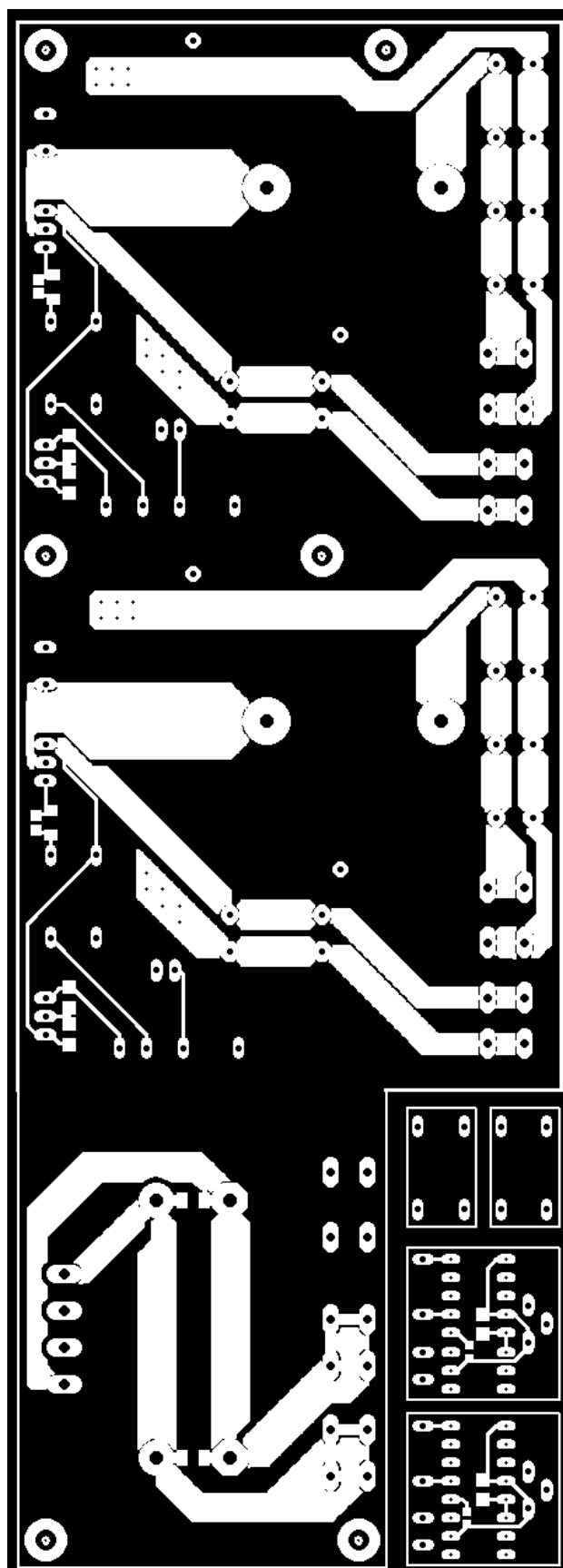
Príloha 1: DPS 1, spodná strana



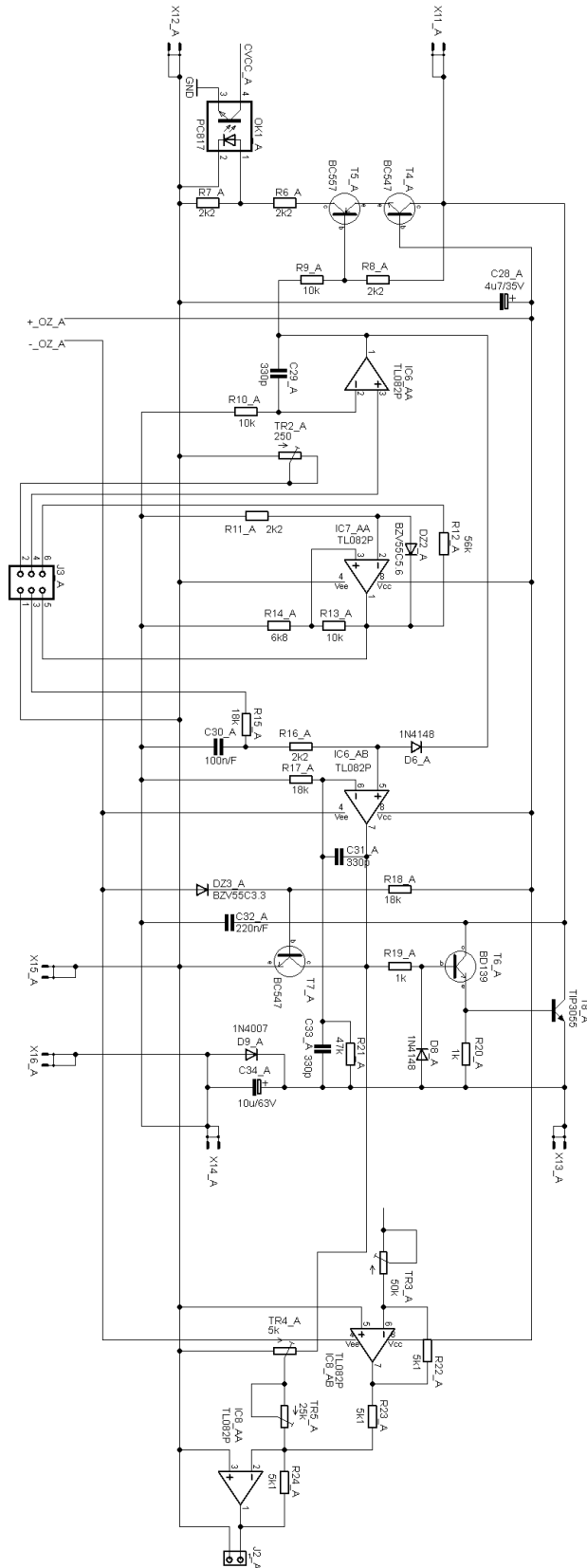
Príloha 2: DPS 1, vrchná strana



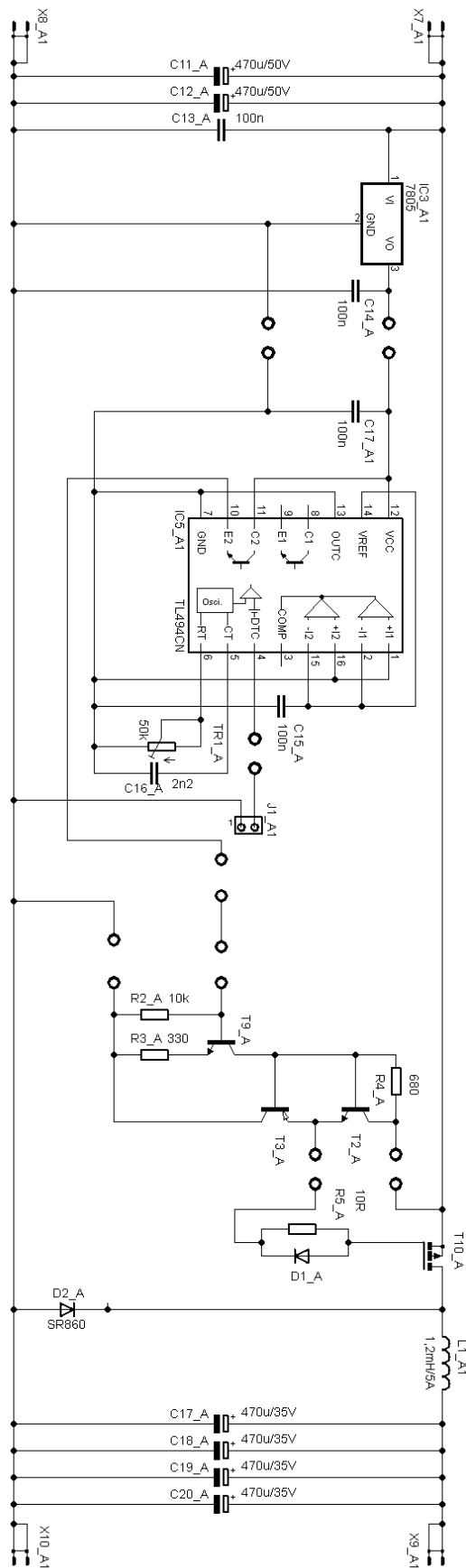
Príloha 3: DPS 2, vrchná strana



Príloha 4: DPS 2, spodná strana

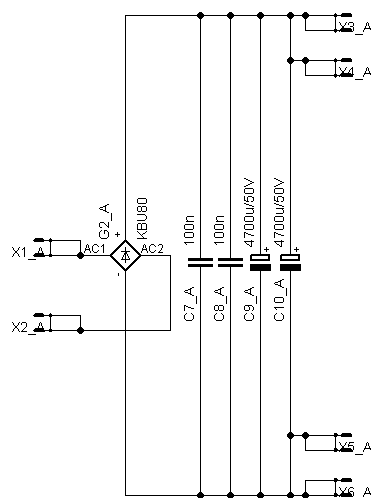


Príloha 5: Lineárna časť

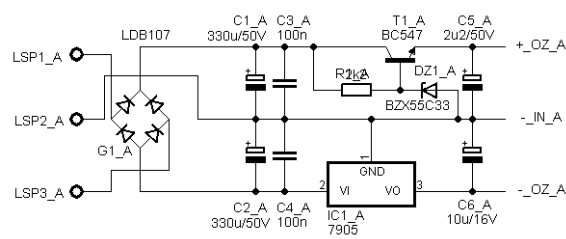


Príloha 6: Spínaná časť

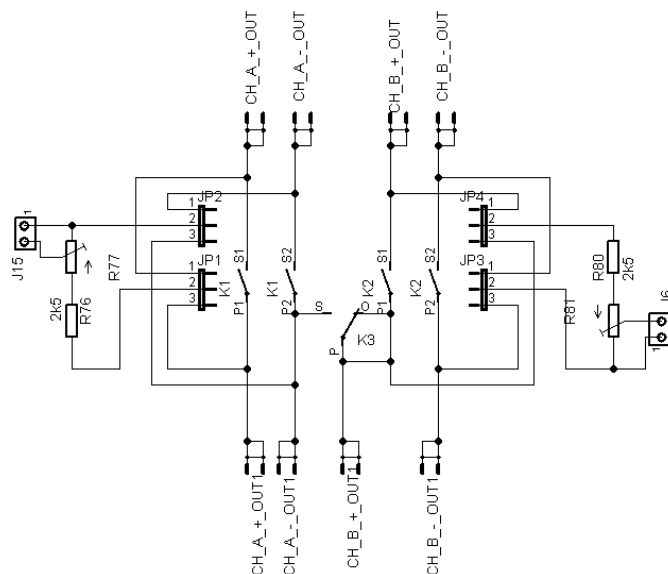




## Príloha 7: Zapojenie medziobvodu



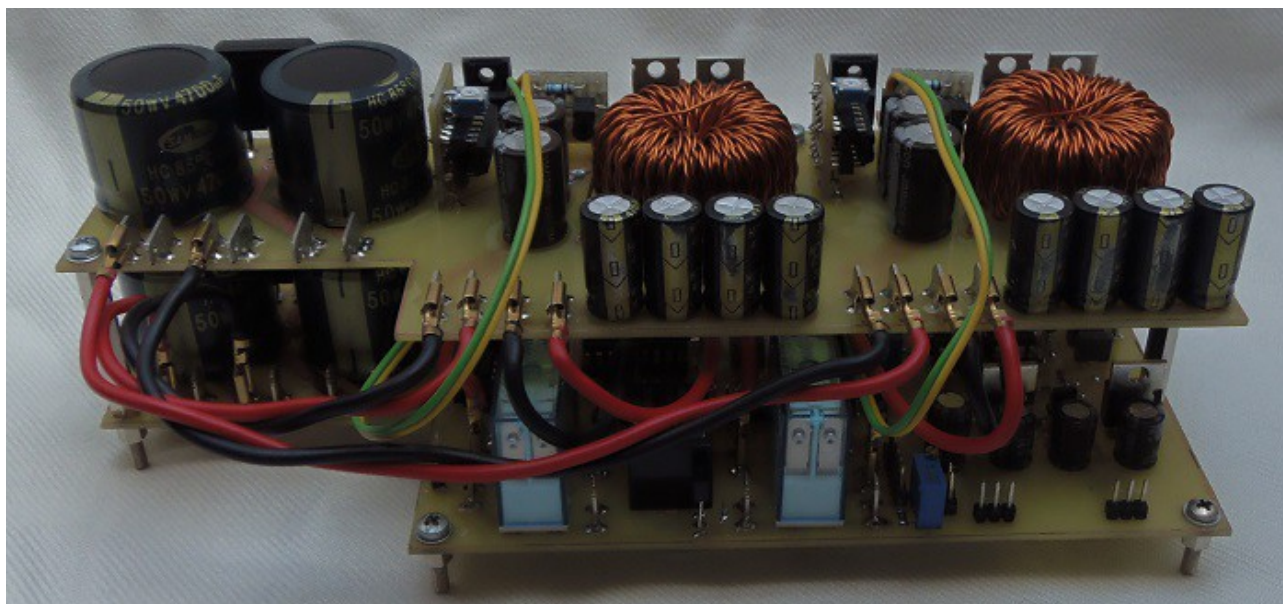
## Príloha 8: Zdroj pomocných napätí



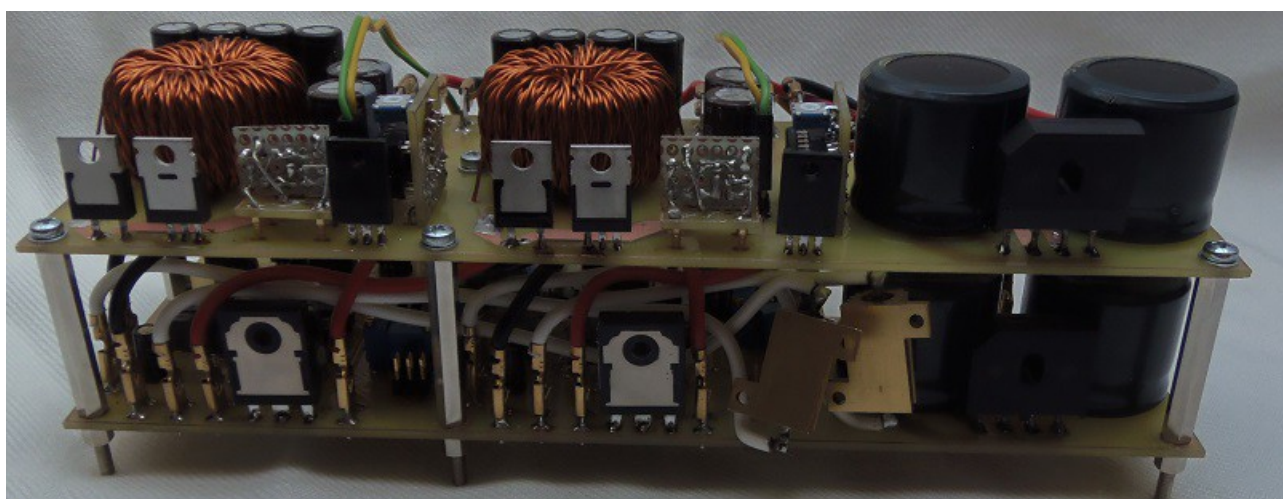
## Príloha 9: Spínanie výstupu

Počet	Hodnota	Súčiastka	Púzdro	V schéme
2	100R	R-EU_0207/10	0207/10	R5_A, R5_B
3	100k	R-EU_R0805	R0805	R4, R5, R6
4	10R	R-EU_R0805	R0805	R3_A, R3_B, R4_A, R4_B
2	10k	R-EU_R0603	R0603	R2_A, R2_B
23	10k	R-EU_R0805	R0805	R1, R2, R3, R42, R45, R46, R47, R48, R49, R52, R55, R56, R57, R58, R59, R60, R61, R62, R63, R66, R67, R68, R69
4	10k	R-EU_R1206	R1206	R9_A, R9_B, R10_A, R10_B
2	10k	R_SMD_1206	1206	R13_A, R13_B
6	18k	R-EU_R1206	R1206	R15_A, R15_B, R17_A, R17_B, R18_A, R18_B
4	1k	R-EU_R1206	R1206	R19_A, R19_B, R20_A, R20_B
2	250	TRIM_EU-CA6H	CA6H	TR2_A, TR2_B
2	25k	TRIM_EU-B64Y	B64Y	TR5_A, TR5_B
4	2k2	R-EU_R1206	R1206	R8_A, R8_B, R16_A, R16_B
8	2k2	R_SMD_1206	1206	R1_A, R1_B, R6_A, R6_B, R7_A, R7_B, R11_A, R11_B
2	2k5	R-EU_R1206	R1206	R76, R80
2	47k	R-EU_R1206	R1206	R21_A, R21_B
2	50k	TRIM_EU-B64Y	B64Y	TR3_A, TR3_B
2	50k	TRIM_EU-CA6H	CA6H	TR1_A, TR1_B
2	56k	R_SMD_1206	1206	R12_A, R12_B
8	5k	R-EU_R0805	R0805	R43, R44, R50, R51, R53, R54, R64, R65
2	5k	TRIM_EU-B64Y	B64Y	TR4_A, TR4_B
6	5k1	R-EU_R0603	R0603	R22_A, R22_B, R23_A, R23_B, R24_A, R24_B
2	6k8	R_SMD_1206	1206	R14_A, R14_B
6	100n	C-EUC0805	C0805	C2_B, C3_A, C4_A, C4_B, C20_A, C20_B
10	100n	C-EUC1206	C1206	C14_A, C14_B, C15_A, C15_B, C16_A, C16_B, C17_A, C17_B, C18_A, C18_B
4	100n	C-EUC1206K	C1206K	C7_A, C7_B, C8_A, C8_B
1	100n	C-EUC1206	C1206	C21_B
2	100n/F	100N-K/100	RM5_3,2	C30_A, C30_B
1	10M/63V	10M/63V	C_EL_2	C34_B
2	10u/16V	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	C6_A, C6_B
2	10u/50V	CPOL-EUE2.5-5	E2,5-5	C13_A, C13_B
1	10u/63V	10M/63V	C_EL_2	C34_A
2	220n/F	220N-K/63V	RM5_3,2	C32_A, C32_B
2	2n2	C-EUC0603	C0603	C22_A, C22_B
2	2u2/50V	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R	C5_A, C5_B
6	330p	C-KERAMIK_SMD_1206	1206	C29_A, C29_B, C31_A, C31_B, C33_A, C33_B
4	330u/50V	CPOL-EUE3.5-8	E3,5-8	C1_A, C1_B, C2_A, C3_B
2	4700u/50V	CPOL-EUE10-25	EB25D	C9_A, C10_A
2	4700uF	CPOL-EUE10-25	EB25D	C9_B, C10_B
4	470u/35V	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	C23_A, C24_A, C25_A, C26_A
8	470u/50V	CPOL-EUE5-10.5	E5-10,5	C11_A, C11_B, C12_A, C12_B, C23_B, C24_B, C25_B, C26_B
1	4M7/35V	4M7/50V	C_EL_2	C28_B
1	4u7/35V	4M7/50V	C_EL_2	C28_A
2	1N4007	DIODE-DO-214AC	DO-214AC	D9_A, D9_B
3	1N4007	GF1	SMA-DO214AC	D1, D2, D3
2	1N4007	PMLL4150	SOD80C	D1_A, D1_B
4	1N4148	1N4148DO35-7	DO35-7	D2_A, D2_B, D3_A, D3_B
2	1N4148	1N4148_7,5	DO35	D6_A, D6_B
2	1N4148	CGRM4001-G	SOD-123_MINI-SMA	D8_A, D8_B
1	BZV55C3.3	DIODE-SOD80C	SOD80C	DZ3_A
1	BZV55C3.3SMD	DIODE-SOD80C	SOD80C	DZ3_B
1	BZV55C5.6	DIODE-SOD80C	SOD80C	DZ2_A
1	BZV55C5.6SMD	DIODE-SOD80C	SOD80C	DZ2_B
2	BZX55C33	1N4728	DO41Z10	DZ1_A, DZ1_B
2	G2R2A	G2R2A	G2R2A	K1, K2
1	G5L	G5L	G5LE	K3
2	KBU80	KBU	KBU	G2_A, G2_B
1	LD8107	DBLS206G	DBS	B1
2	LDB107	DBLS206G	DBS	G1_A, G1_B
2	SR860	BYT08P	TO220ACS	D4_A, D4_B
2	TIP3055	TIP3055	TOP3AV	T8_A, T8_B
8	TL072P	TL072P	DIL08	IC6, IC7, IC8, IC9, IC10, IC11, IC12, IC13
6	TL082P	TL072	DIL8	IC6_A, IC6_B, IC7_A, IC7_B, IC8_A, IC8_B
2	TL494CN	TL494CN	DIL16	IC5_A, IC5_B
2	7805	788TV	TO220V	IC3_A, IC3_B
2	7812	7812TV	TO220V	IC2_A, IC2_B
2	7812	788TV	TO220V	IC14, IC16
2	78L12Z	78L12Z	TO92	IC23, IC24
3	7905	7905T	TO220H	IC1_A, IC1_B, IC15
2	BC547	-NPN-TO92-EBC	TO92-EBC	T1_A, T1_B
4	BC547	BC546	TO-92	T4_A, T4_B, T7_A, T7_B
2	BC557	BC556	TO-92	T5_A, T5_B
2	BD139	BD139_STOJ	TO-126S	T6_A, T6_B
2	IRF530	IRF512	TO220BV	T2_A, T2_B
2	1,2mH/5A	L-USTJ3-U1	TJ3-U1	L1_A, L1_B
2	PC817	PC817	DIL04	OK1_A, OK2

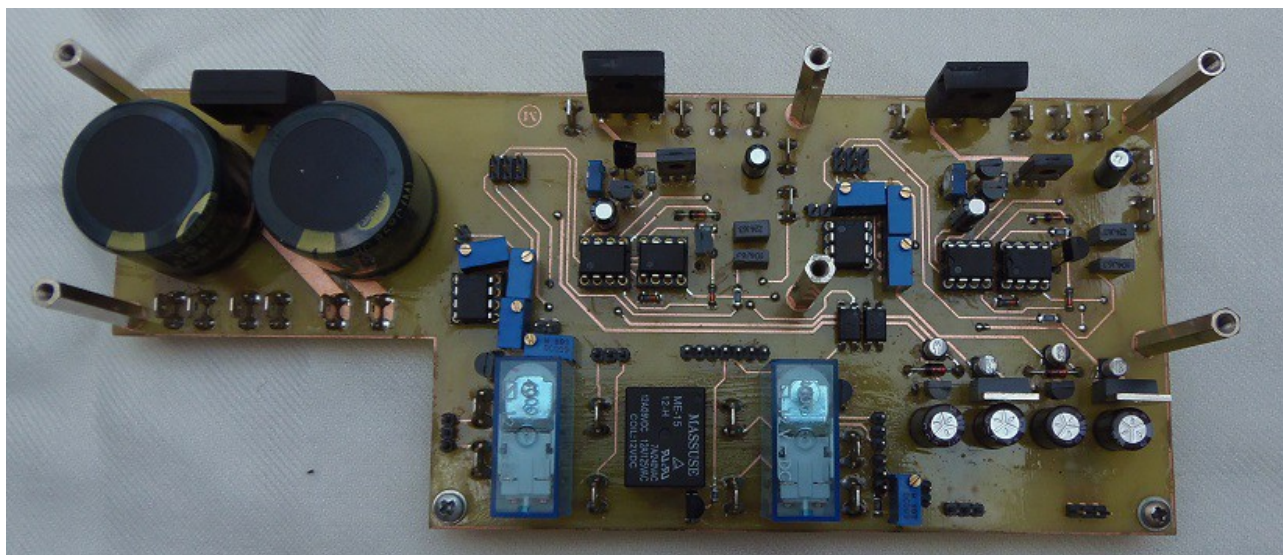
Príloha 10: Zoznam súčiastok



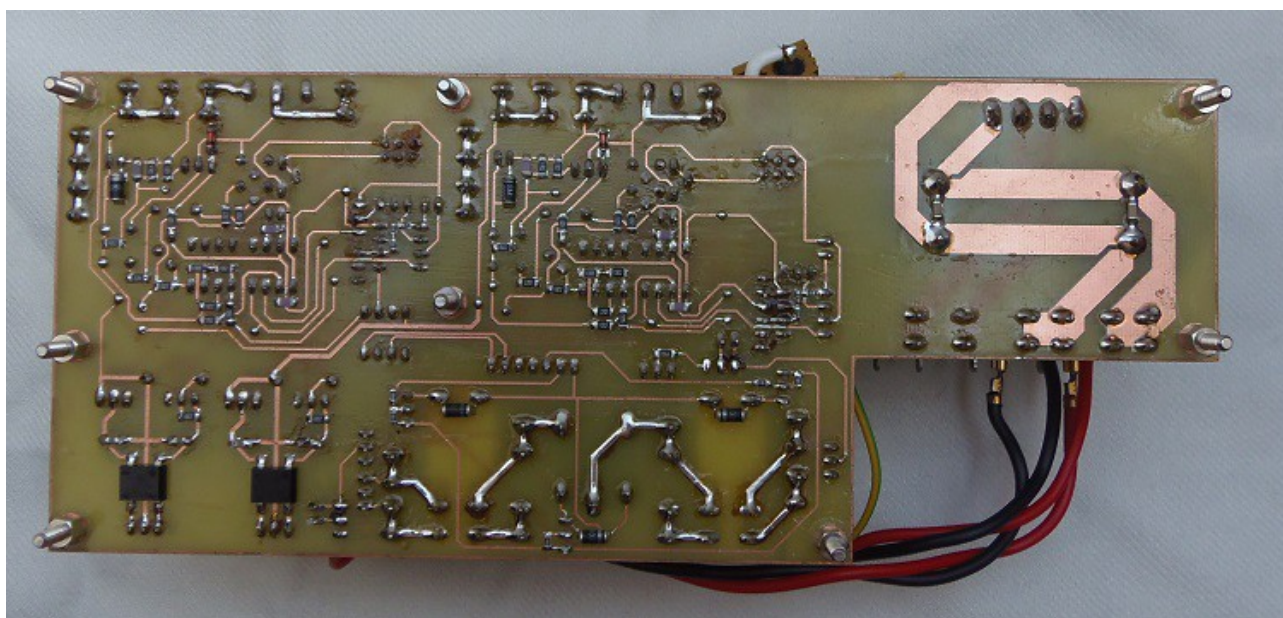
Príloha 11: Hotový modul dvojitého zdroja



Príloha 12: Hotový modul zadná strana



Príloha 13: DPS lineárnej časti strana súčiastok



Príloha 14: DPS lineárnej časti strana spojov