

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
**DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA**

**RENOVACE LABORATORNÍHO ZDROJE 40V/40A**

**Petr Dašek**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
**2009**

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě  
Akademický rok: 2008/2009

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr DAŠEK**  
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**  
Studijní obor: **Dopravní infrastruktura-Elektrotechnická zařízení v dopravě**  
Název tématu: **Renovace laboratorního zdroje 40V/40A**

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

1. Seznámení s uspořádáním rekonstruovaného zdroje a zjištění použitelných částí
2. Návrh realizace nové elektronické části laboratorního zdroje
3. Návrh výkonové části laboratorního zdroje
4. Návrh snižovacího transformátoru/tlumivky
5. Realizace návrhu a zapracování do původního zdroje
6. Měření vlastností výsledného zdroje.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje I. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 352 s. ISBN 80-86056-02-3
- [2] KREJČIŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje II. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 352 s. ISBN 80-86056-03-1
- [3] KREJČIŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje III. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 349 s. ISBN 80-86056-56-2

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Ondřej Černý**

Katedra elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací  
techniky v dopravě

Datum zadání bakalářské práce: **14. ledna 2009**

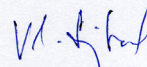
Termín odevzdání bakalářské práce: **1. června 2009**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



prof. Ing. Vladimír Schejbal, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 18. února 2009

## **Prohlašuji:**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Použité literární prameny a informace, které jsem využil ke své práci, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že na moji práci se vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a dále s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. května 2009

Petr Dašek

## PODĚKOVÁNÍ

*Chci poděkovat vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Černému za jeho ochotu a odbornou pomoc při návrhu a realizaci laboratorního zdroje.*

*Také chci poděkovat všem, kteří mi pomohli svými cennými radami nebo tím, že mi vyšli vstříc.*

*V neposlední řadě chci poděkovat rodině a spolužákům, kteří mě v průběhu celého studia na vysoké škole podporovali.*

## **NÁZEV**

Renovace laboratorního zdroje 40V/40A

## **SOUHRN**

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou regulace a řízením větších výkonů. V bakalářské práci je návrh nové výkonové a řídicí části laboratorního zdroje. Jeho popis funkce a zdůvodnění vybraného způsobu řízení.

V závěrečné části jsou zhodnoceny naměřené hodnoty a celkové zhodnocení zdroje.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Stejnoseměrný měnič, regulace napětí a proudu, laboratorní zdroj

## **TITLE**

Renovation laboratory source 40V/40A

## **ABSTRACT**

My Bachelor work deals with the question of the regulation and the proceeding of bigger performances. There is a concept of the new high efficiency and operating part of the laboratory source in the thesis. His description of the function and the reason of the way of the proceeding.

In the last part there is a evaluation of the measured values and overall assessment of the generator.

## **KEYWORDS**

DC transducer, regulation tension and current, laboratory source

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Transformátor a jeho návrh .....	10
1.1 Funkce a princip transformátoru.....	10
1.2 Jádro transformátoru.....	10
1.3 Vinutí transformátoru .....	11
1.4 Vířivé proudy.....	12
1.5 Návrh transformátoru .....	12
2 Měniče .....	16
2.1 Stejnoseměrné měniče napětí .....	17
2.2 Činnost stejnosměrného přímého měniče napětí.....	17
3 Spínané zdroje .....	20
3.1 Nábojové pumpy .....	20
3.2 Spínané zdroje s indukčnostmi .....	21
3.3 Princip činnosti spínaných stabilizátorů .....	22
3.4 Základní zapojení spínaných stabilizátorů .....	23
4 Návrh realizace nové elektronické části laboratorního zdroje .....	24
4.1 Základní myšlenka konstrukce nového zdroje .....	24
4.2 Popis funkce IO TL 497A .....	25
4.3 Výběr použitelných částí starého zdroje.....	28
4.4 Návrh principu řízení výstupního U a I.....	31
4.5 Volba usměrňovacího prvku.....	31
4.6 Volba filtračních kondenzátorů .....	33
4.7 Měřicí odpor .....	35
4.8 Spínací část.....	35
4.9 Volba spínacího tranzistoru .....	35
4.9.1 Popis funkce tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem .....	38
4.10 Návrh vyhlazovací indukčnosti a kapacity .....	39
4.10.1 Návrh indukčnosti .....	40
4.11 Návrh kapacity.....	40
4.12 Nulová dioda .....	41
4.13 Návrh řídicí části zdroje .....	42
4.14 Ochrana jednotlivých pinů .....	44
4.15 Zdroj napětí pro Integrované obvody TL 071 a TL 072.....	44
4.15.1 Integrovaný obvod TL 071 a TL 072 .....	46
4.16 Zapojení budičů FET tranzistorů.....	46
4.17 Realizace proudové pojistky.....	47
4.18 Zapínání zdroje .....	49

5	Konstrukční provedení .....	51
5.1	Spínací část.....	52
6	Naměřené hodnoty .....	55
	Závěr.....	57
	Seznam obrázků .....	58
	Seznam tabulek .....	59
	Použitá literatura .....	60



## ÚVOD

Jak již sám název napovídá, tato práce se zabývá renovací, neboli obnovením funkčnosti laboratorního zdroje 40V/40A. Tento zdroj je součástí laboratoří KEEZ. Zdroj byl napájen z jednofázové střídavé sítě napájecím napětím 230V/50Hz. Napětí bylo přiváděno na transformátor, kde bylo transformováno na nižší napětí přibližně 70V/50Hz. V původním návrhu bylo výstupní napětí regulováno jednofázovým polořízeným můstkovým usměrňovačem, dále bylo filtrováno filtrační tlumivkou a vyhlazeno filtračními elektrolytickými kondenzátory.

Řízení tohoto můstku však již nebylo ve funkčním stavu. Navíc k tomuto zdroji nebyla žádná dostupná technická dokumentace, která by objasnila celé zapojení a řízení výstupního napětí. Z tohoto důvodu se zdála být oprava velice náročná. Proto se přišlo s řešením, navrhnout a zkonstruovat novou vnitřní výkonovou i řídicí část, která se zabuduje do původního šasi a z původního zdroje se použijí možné ještě fungující součásti.

Naše řešení výkonové části zdroje se od původního liší. Námi navržená výkonová část laboratorního zdroje již není konstruována jako v původním zdroji ve střídavé části, ale až v části stejnosměrného napětí a proudu stejnosměrným měničem. Z původního zdroje se tedy některé ještě fungující části využily, ale některé musely být zcela nahrazeny novými, z důvodu jiného řízení výstupního napětí.

# 1 TRANSFORMÁTOR A JEHO NÁVRH

## 1.1 Funkce a princip transformátoru

Transformátor je jedním z důležitých prvků přenosových soustav. Pracuje jako měnič napětí s vysokou účinností přenosu elektrické energie. Nemá však jen funkci změny úrovně napětí, ale také pracuje jako galvanické oddělení jednotlivých obvodů, impedanční přizpůsobení vnitřního odporu apod. Transformátory jsou považovány za elektrické stroje bez pohyblivých částí.

Funkce transformátoru je následující. Primární (vstupní) vinutí musí být napájeno střídavým napětím. To vyvolá v magnetickém obvodu střídavý magnetický tok, který je magneticky spřažený se sekundárním vinutím. Časovou změnou magnetického spřaženého toku  $\Psi$  se v sekundárním vinutí indukuje elektrické napětí podle rovnice:

$$e = -u_i = -\frac{d\psi}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

kde  $u_i$  - indukované napětí,

$N$  - počet závitů,

$d\phi$  - změna magnetického toku,

$dt$  - změna času.

Velikost indukovaného napětí závisí na převodu transformátoru. To je poměr počtu závitů primárního a sekundárního vinutí. Velikost napětí se vypočítá:

$$u_2 = u_1 \frac{N_2}{N_1} \quad [\text{V}] \quad (2)$$

kde  $u_1$  - vstupní napětí,

$u_2$  - výstupní napětí,

$N_1$  - počet závitů primárního vinutí,

$N_2$  - počet závitů sekundárního vinutí.

## 1.2 Jádru transformátoru

Jádru transformátoru neboli také magnetický obvod transformátoru je zhotoveno z materiálu s vysokou relativní permeabilitou  $\mu_r$ . Jádrem transformátoru se uzavírá magnetický tok  $\Phi$ . Transformátory pro nízké kmitočty (řádově do několika kHz) jsou sestaveny ze speciálních plechů pro elektroniku. Tvary těchto plechů jsou podobné

písmenům E a I nebo U a I a jejich tloušťka je obvykle 0,28 mm; 0,35 mm nebo 0,5 mm.

Jednotlivé plechy jsou od sebe odizolovány například papírem, lakem nebo tenkou izolační vrstvičkou oxidu z důvodu zmenšení ztrát vířivými proudy, které způsobují v jádře energetické ztráty a tím ho zahřívají. Tyto ztráty se dají zmenšit zvětšením činného odporu plechů, to se docílí legováním křemíkem. Izolace mezi vrstvami ocelových plechů se většinou skládá z jednostranné vrstvy laku široké 6 až 10  $\mu\text{m}$ , oboustranných vrstev fosforečnanu s tloušťkou 2 až 3  $\mu\text{m}$  a kysličníku 2 až 3  $\mu\text{m}$ . Pro vyšší kmitočty se jádra transformátorů odlévají z feritů. Je to keramický materiál, který má nízkou vodivost a vysokou relativní permeabilitou.

### **1.3 Vinutí transformátoru**

Transformátor má zpravidla dvě vinutí. První z nich je primární a druhé je sekundární. Transformátor však ale může mít i více než jedno sekundární vinutí. Primární vinutí je připojeno ke zdroji energie a sekundární je připojeno k zátěži. Obě vinutí jsou navinuta na společném jádře a musí vyhovovat v těchto parametrech :

- **tepelně** – jeho oteplení při chodu (průtoku proudu vodičem) nesmí překročit povolenou hodnotu
- **mechanicky** – musí být dostatečně mechanicky pevné hlavně proti silám působícím při zkratu
- **napěťově** – hlavně u vinutí na vysoká napětí

Železné jádro transformátoru ovlivňuje jeho funkci dvěma zásadními způsoby. Jeden z nich je ten, že zvyšuje elektrický odpor vinutí v souladu s přiloženým střídavým napětím. Proud procházející vinutím navinutém na železném jádře je asi čtyřikrát menší, než proud procházející vinutím se vzduchovým jádrem.

Za druhé železo je feromagnetický kov s neuspořádaným magnetickým polem. Jeho indukční siločáry jsou vzájemně vyváženy tak, že se na povrch nejeví jako magnet. Indukční siločáry jsou ale pohyblivé a působením externího magnetického pole, lze jeho magnetizmus výrazně zesílit. Toto zesílené magnetické pole vytváří i zesílenou vlastní indukčnost.

## 1.4 Vířivé proudy

Železné jádro transformátoru je elektricky vodivé. Jeho obvod tvoří uzavřenou smyčku a funguje jako kompaktní uzavřený závit. Indukuje se v něm napětí a teče jím proud. Můžeme si představit v tomto jádru velké množství takovýchto smyček, ve kterých tečou malé proudy. Tyto proudy nazýváme vířivými a způsobují ztrátu výkonu. Projevují se zahříváním jádra během provozu transformátoru. Ztráty můžeme zmenšit složením jádra z tenkých ocelových plechů, které jsou vzájemně elektricky odizolovány. Elektrickou vodivost jádra můžeme navíc zmenšit přidáním malého množství křemíku k oceli.

## 1.5 Návrh transformátoru

Při návrhu síťového transformátoru nás nejvíce zajímá přenášený výkon. Ten závisí na výstupním napětí a výstupním proudem. Také nás zajímá hodnota síťového kmitočtu (50 Hz) a maximální hodnota magnetické indukce, která je povolena pro daný typ magnetického obvodu (pro FeSi4 plechy EI je to 1 T).

- Výstupní výkon :

$$P_{vyst} = U_{vyst} \cdot I_{vyst} \text{ [W]} \quad (3)$$

- Primární výkon :

$$P_{vst} = P_{vyst} \cdot \frac{100}{\eta} \text{ [W]} \quad (4)$$

kde  $U_{vyst}$  - výstupní napětí,

$I_{vyst}$  - výstupní proud,

$P_{vyst}$  - výstupní výkon,

$\eta$  - účinnost.

Účinnost transformátoru lze přibližně určit z Tabulka 1

Tabulka 1 - Odhad účinnosti transformátoru

výkon P [W]	<10	10 - 100	100 - 1000
účinnost $\eta$ [%]	70	80	90

$$I_{vyst} = \frac{P_{vst}}{U_{vst}} = \frac{P_{vst}}{230} \text{ [A]} \quad (5)$$

Když víme, jaký bude vstupní výkon, následuje návrh průřezu magnetického obvodu (u EI plechů je to střední sloupek transformátoru), který přenesení daný výkon při magnetické indukci  $B = 1 \text{ [T]}$ , při které se obvod nepřesytí.

$$S_{Fe} = \sqrt{P_{vst}} \text{ [cm}^2; \text{W]} \quad (6)$$

EI plechy se nevyrábějí libovolných rozměrů. Vyrábějí se pouze určitých rozměrů (šířky středního sloupku). Šířku středního sloupku vypočítáme ze vztahu

$$2 \cdot a = \sqrt{S_{Fe}} \text{ [-; W]} \quad (7)$$

kde  $2a$  - číslovka v označení plechů EI XX. Je zapotřebí, aby se tvar středního sloupku blížil co nejvíce čtvercovému průřezu, z důvodu co nejkratší délky závitů. Délka závitů a počet závitů mají vliv na vnitřní odpor vinutí.

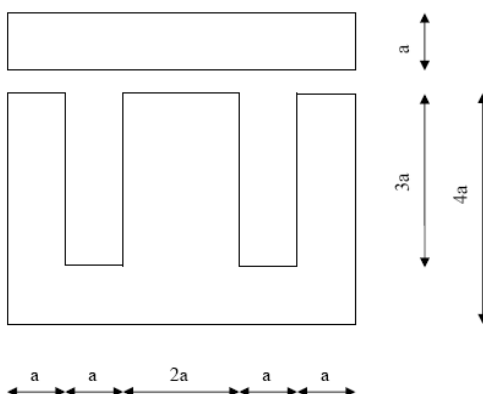
Plech EI se vyrábějí ve standardních rozměrech tloušťky  $t = 0,28 \text{ mm}$ ,  $t = 0,35 \text{ mm}$  a  $t = 0,5 \text{ mm}$ . Počet plechů se určí ze vztahu

$$n = \frac{S_{Fe}}{(2 \cdot a \cdot t)} \text{ [-]} \quad (8)$$

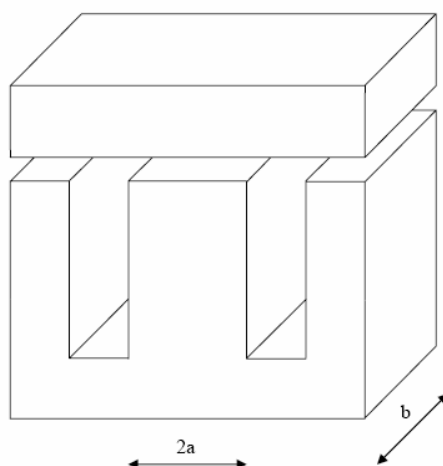
Transformátor je skládán z plechů, z důvodu zmenšení ztrát vířivými proudy. Tvar a rozměry plechů jsou na obrázku Obr. 1 a Obr. 2. Aby skládání z plechů mělo smysl, musí být ještě jednotlivé plechy odizolovány. Proto jsou jednotlivé plechy od sebe odizolovány slabou izolační vrstvou. Po nanesení izolační vrstvy mezi jednotlivé plechy se zvětší průřez jádra na

$$S_c = 2 \cdot a \cdot n \cdot (t + d) \text{ [cm}^2\text{]} \quad (9)$$

kde  $d$  - tloušťka izolační vrstvy v mm.



Obr. 1 - Rozměry EI plechů



Obr. 2 - Jádru složené z EI plechů

Pro výpočet počtu závitů na primárním a sekundárním vinutí je potřebný koeficient  $N_j$  závislý na průřezu Fe jádra  $S_{Fe}$ .

$$N_j = 45 / S_{Fe} \text{ [z/M]} \quad (10)$$

Pro výpočet závitů na primárním vinutí platí vzorec

$$N_{PRIM} = N_j \cdot 230 \cdot 0,97 \text{ [závitů]} \quad (11)$$

počet závitů násobíme 0,97 z důvodu pokrytí ztrát na primárním vinutí. Pro výpočet závitů na sekundárním vinutí platí vzorec

$$N_{SEK} = N_j \cdot U_{SEK} \cdot 1,03 \text{ [závitů]} \quad (12)$$

zde počet závitů násobíme 1,03, abychom pokryli ztráty na sekundárním vinutí. Ještě musíme vypočítat průřez vodiče, abychom nepřekročili maximální proudovou hustotu  $J$  [A/mm<sup>2</sup>]. Pro spodní vinutí volíme  $J = 2,5 \text{ A/mm}^2$  a pro horní vinutí z důvodu lepšího chlazení můžeme volit  $J = 3,5 \text{ A/mm}^2$ . Průměr vodiče pro zvolenou proudovou hustotu vypočítáme ze vztahu

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot I}{J \cdot \pi}} \text{ [mm]} \quad (13)$$

Vodiče se vyrábějí v jednotlivých číselných řadách, proto volíme nejbližší vyšší hodnotu průměru vodiče.

Primární a sekundární vinutí nesmí být položeno přímo na sobě, ale musí být mezi nimi proklad. Při více navinutých vrstvách v jednom vinutí, se musí prokládat každá vrstva vinutí zvlášť, aby se zabránilo propadnutí vodiče mezi vrstvami a následnému průrazu izolace z důvodu většího rozdílu napětí než je povolená hodnota.

V posledním kroku se musí zjistit, jestli se vinutí do námi navržených plechů vejde.

Podle vzorce

$$\sum SCuL + SP < SV \quad (14)$$

kde  $S_P$  - je průřez všech prokladů,

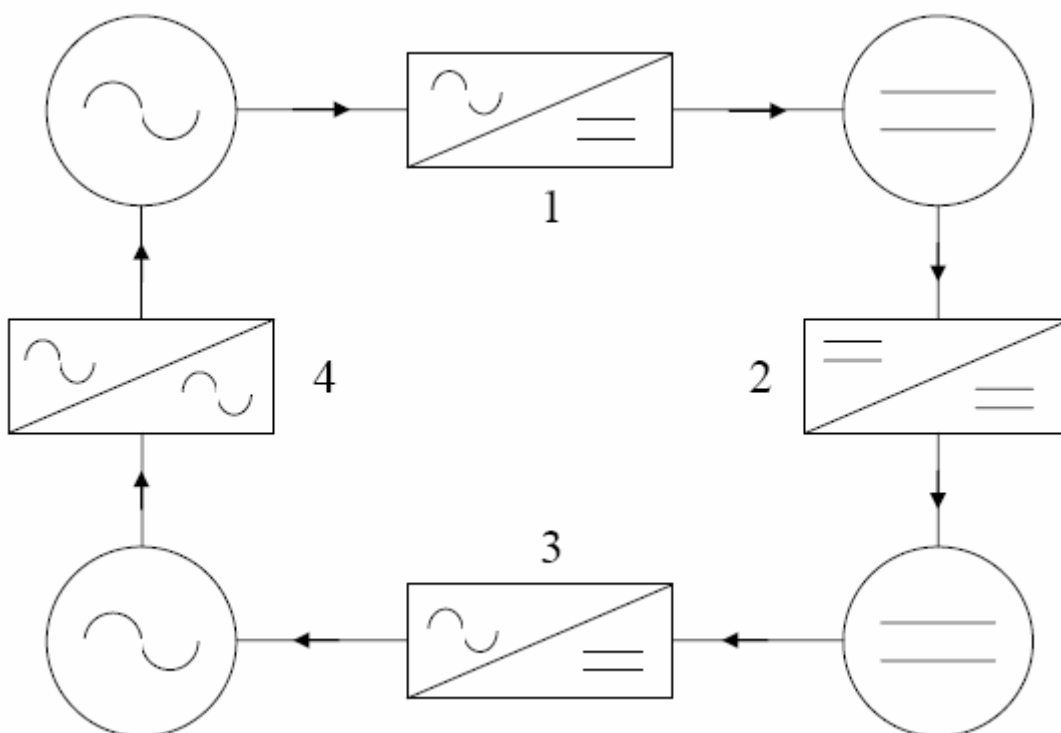
$S_{CuL}$  - je plocha vinutí, která se vypočítá

$$S_{CuL} = D^2 \cdot N \quad (15)$$

$S_V$  - je plocha pro vinutí, která se dá vyčíst z hodnot o EI plechách.

## 2 MĚNIČE

Měnič slouží k přeměně elektrické energie. Dělí se do čtyř základních skupin podle toho, jak mění vstupní energii na výstupní. Zdroj energie mohou být v podobě stejnosměrného proudu a napětí nebo v podobě střídavého proudu a napětí. Základní rozdělení měničů představuje obrázek Obr. 3.



Obr. 3 - Základní rozdělení měničů

1. **Usměrňovače** – přeměňují vstupní střídavé napětí a proud na výstupní stejnosměrné napětí a proud
2. **Stejnoseměrné měniče** – stejnosměrné měniče nemění průběh stejnosměrného napětí a proudu, ale pouze upravují jeho velikost
3. **Střídače** – mění vstupní stejnosměrné napětí a proud na výstupní střídavé napětí a proud dané frekvence
4. **Střídavé měniče** – mění vstupní střídavé napětí a proud dané frekvence a počtu fází na jiné střídavé napětí a proud požadované frekvence a počtu fází. Podle toho, jak střídavé měniče přeměňují střídavé napětí a proud, se dále dělí na :
  - a) **Střídavé měniče napětí** – přeměňují pouze velikost amplitudy a zachovávají stejnou frekvenci a stejný počet fází



- b) **Střídavé měniče frekvence** – přeměňují amplitudu a frekvenci a zachovávají stejný počet fází
- c) **Střídavé měniče počtu fází** – tyto měniče mění všechny parametry (amplitudu, frekvenci, počet fází)
- d) **Střídavé měniče impedancí** – tyto měniče pracují jako proměnná impedance

## 2.1 Stejnosměrné měniče napětí

Stejnosměrné měniče napětí slouží k přeměně stejnosměrné energie. Na vstupu měniče je vstupní stejnosměrné napětí a vstupní stejnosměrný proud a na výstupu je výstupní stejnosměrné napětí jiné hodnoty a výstupní stejnosměrný proud jiné hodnoty. Stejnosměrný měnič lze použít v případě, že potřebujeme regulovat výstupní stejnosměrné napětí a proud a máme zdroj stejnosměrného napětí a proudu. Dříve se používaly k regulaci výstupního stejnosměrného napětí a proudu předřadné odpory. To bylo dost neekonomické z důvodu velkých ztrát na odporech a tedy malé účinnosti. Zavedením polovodičových měničů se tato nevýhoda odstranila. Stejnosměrný měnič může pracovat jako přímý a nepřímý.

- **Přímý měnič** - spíná a rozpíná stejnosměrný proud a tím řídí množství energie proudící do zátěže
- **Nepřímý měnič** – je sestaven většinou ze střídače, ze střídavého meziobvodu a ze řízeného usměrňovače. Stejnosměrné napětí se pomocí střídače přemění na střídavé napětí o požadované frekvenci (řádově 10ky kHz) dále se transformuje pomocí transformátoru a pak se usměrní řízeným usměrňovačem. Výhoda tohoto principu je galvanické oddělení. Další výhodou je, že při vysokých kmitočtech transformovaného napětí vychází transformátor konstrukčně mnohem menší než na síťový kmitočet ( $f = 50\text{Hz}$ ).

## 2.2 Činnost stejnosměrného přímého měniče napětí

Princip činnosti se dá vysvětlit na náhradním schéma, které je na Obr. 4. Vstupní stejnosměrné napětí a proud dodává ideální zdroj. Ten se dá v praxi realizovat pomocí kapacitního filtru. Polovodičový spínač je pro názornost nahrazen spínacím kontaktem. Spínací kontakt spíná vstupní proud. Tím do zátěže pouští jen požadované množství energie.

Z průběhu proudu na Obr. 4 se dá odvodit, že perioda

$$T = t_z + t_v \quad (16)$$

kde  $T$  - doba periody,

$t_v$  - doba vypnutí,

$t_z$  - doba zapnutí.

A pomocí toho lze vypočítat střední hodnotu napětí

$$U_{2(AV)} = \frac{1}{T} \int_0^z U_1 \cdot dt = \frac{t_z}{T} \cdot U_1 = z \cdot U_1 \quad (17)$$

a střední hodnota proudu

$$I_{2(AV)} = \frac{U_1}{R} \cdot z = I_{2\max} \cdot z = \frac{U_1}{\frac{R}{z}} = \frac{U_1}{R_e} \quad (18)$$

kde  $z$  - poměrná doba zapnutí neboli střída a jeho velikost se mění od 0 do 1,

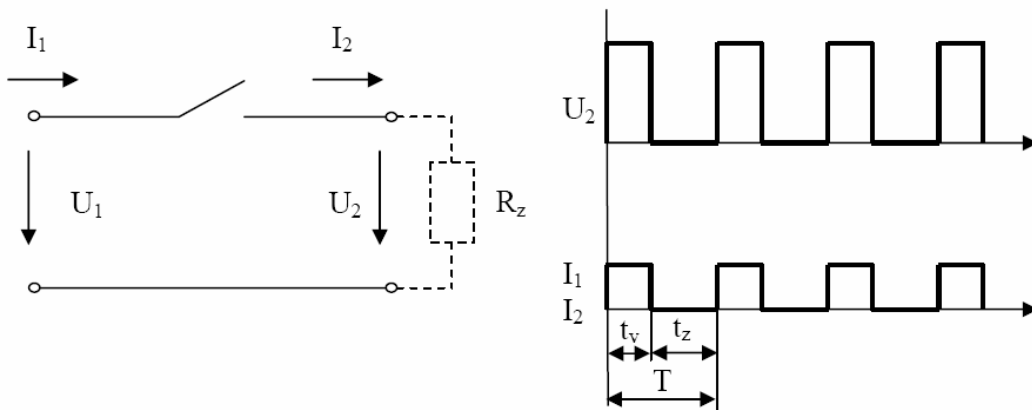
$R_e$  - ekvivalentní odpor

$$R_e = \frac{R_1}{z} \quad (19)$$

a jelikož  $z$  nabývá hodnot od 0 do 1, hodnota  $R_e$  nabývá hodnot od  $\infty$  do  $R$ . Z toho vyplývá, že maximální hodnota výstupního napětí může být  $U_1$ . Tento měnič je pouze snižující.

Aby proud a napětí nebyly pulsující, je ke spínacímu prvku ještě přidán filtr. Do série se zatěžovacím odporem je do obvodu umístěna filtrační cívka.

Paralelně k zátěži a cívce je ještě umístěna nulová dioda tak, aby nezkratovala zátěž. Ve chvíli kdy je spínač sepnutý a obvodem prochází proud, se cívka nabíjí a ve chvíli kdy je spínač rozepnut, se snaží proud zátěží udržet. V tu chvíli proud prochází přes zátěž, cívku a přes nulovou diodu. Správně navržená cívka tedy udrží proud v obvodu po celou periodu.



Obr. 4 - Náhradní schéma měniče a průběhy napětí a proudů

### 3 SPÍNANÉ ZDROJE

Rozšíření výroby a použití spínaných zdrojů je otázkou několika posledních let. Funkce spínaných zdrojů je známa již mnoho let, ale jejich výrobě a používání bránil rozvoj techniky. Pro jejich konstrukci je potřeba velkého množství polovodičových součástek, které byly z počátku velmi drahé. Dnes při sériové výrobě je jejich cena pro konstrukci příznivá.

Spínané zdroje mají řadu nesporných výhod. Mezi hlavní patří menší hmotnost, menší objem a vyšší účinnost než u zdrojů s lineární regulací. Avšak mají i své nevýhody. Mezi hlavní patří složitost návrhu a výstupní zvlnění oproti zdrojům s lineární regulací.

Rozdíl mezi zdroji s lineární regulací a spínanými zdroji je v řízení výstupního napětí a proudu. U spínaných zdrojů se výstupní parametry řídí impulsně z pravidla spínáním spínacích tyristorů a tranzistorů oproti spojitě regulaci u lineární zdrojů.

Spínané zdroje jsou v zapojení jako:

- a) **Nábojové pumpy** – zapojení spínaného zdroje bez indukčností
- b) **Spínané zdroje s indukčností**
- c) **Další méně používaná zapojení**

#### 3.1 *Nábojové pumpy*

Tyto spínané zdroje „pumpují“ náboj mezi kondenzátory. Z tohoto důvodu se nazývají nábojové pumpy. Pomocí elektrických spínačů se spínají jednotlivé kondenzátory. Z toho je patrné, že podle způsobu zapojení mohou nábojové pumpy pracovat v několika režimech. Jako násobič napětí, jako dělič napětí nebo v inverzním režimu. V režimu násobiče napětí může pracovat jako zdvojovač. Toto zapojení potřebuje dva kondenzátory a čtyři spínače. V prvním kroku je ke zdroji připojen pouze jeden z kondenzátorů, který se nabíjí na napájecí napětí. Druhý kondenzátor je v tu samou dobu připojen pouze k zátěži. V dalším kroku se spínače sepnou a rozepnou tak, že do série s napájecím napětím je připojen nabitý kondenzátor. Druhý kondenzátor se připojí a nabije se na dvojnásobné napájecí napětí. Následně se zase opakuje první krok. První kondenzátor se znovu nabije na napájecí napětí a druhý kondenzátor, který je nabitý na dvojnásobné napětí se vybíjí do zátěže.

V režimu děliče napětí pracuje zapojení se stejnými součástkami v obdobném režimu. Rozdíl je v tom, že kondenzátory jsou v prvním kroku spojeny sériově a zátěž

je připojena pouze na druhý kondenzátor. Jelikož mají oba kondenzátory stejnou kapacitu, napětí na jednotlivých kondenzátorech bude polovina napájecího napětí. V druhém kroku se kondenzátory spojí paralelně. První kondenzátor dobíjí druhý kondenzátor, ke kterému je připojena zátěž. Napětí na kondenzátorech a tedy i na výstupu je polovina napájecího napětí.

V inverzním režimu jsou použity zase stejné součástky. V prvním kroku se první kondenzátor připojí na napájecí napětí. K druhému kondenzátoru je připojena zátěž. Ve druhém kroku se první kondenzátor připojí ke druhému, ale s opačnou polaritou. První kondenzátor dobíjí druhý kondenzátor. Na výstupu je napájecí napětí stejné velikosti ale opačné polarity.

Tyto zdroje mají několik výhod. Neobjevují se zde žádná špičková indukovaná napětí, jelikož v obvodu se žádné indukčnosti nevyskytují. Mají malé ztráty a účinnost je až 90 %. Nevyzařují téměř žádné rušivé signály.

Elektronické spínače jsou realizovány tranzistory typu CMOS.

Důležité je správné zvolení spínacího kmitočtu spínačů. Čím vyšším kmitočtem spínáme, tím jsou menší rozměry a menší zvlnění výstupního signálu, ale čím je kmitočet nižší, tím je nižší spotřeba a vyšší účinnost. Dále se kmitočet z důvodu šumu musí volit tak, aby byl vyšší než nejvyšší zpracovávaný kmitočet.

### **3.2 Spínané zdroje s indukčnostmi**

Tato skupina obsahuje největší část zdrojů pracujících s impulsní regulací. Na vstupu stabilizátoru může být stabilizované nebo nestabilizované napětí a na výstupu je stabilizované výstupní napětí. Stabilizátor tedy mění stejnosměrné napětí, proto se tomuto zapojení také říká stejnosměrný neboli DC/DC měnič. Na vstupu stabilizátoru je stejnosměrné napětí, které je spínané spínací součástkou (nejčastěji tranzistorem) s frekvencí obvykle větší než 20 kHz. Je snaha použít co nejvyšší kmitočet z důvodu menší velikosti a tedy i menší hmotnosti použitých součástek a z důvodu lepší filtrace výstupního napětí. To však klade vyšší požadavky na vyhlazovací indukčnost, na impulsní transformátor a na spínací součástku. Všechny stabilizátory pracují ve zpětnovazebním režimu, to znamená, že spínání spínací součástky je ovládáno zpětnou vazbou (obvodem), který porovnává požadovanou a skutečnou hodnotu výstupního napětí nebo proudu.

Tyto zdroje mohou pracovat se síťovým nebo s impulsním transformátorem.

Zdroje se síťovým transformátorem se obecně nazývají Spínané zdroje s regulací v sekundáru. Nevýhodou tohoto zapojení jsou velké rozměry a hlavně velká hmotnost použitého transformátoru. Výhodou těchto zapojení je vysoká účinnost, jelikož se síťové napětí nejdříve transformuje lze použít nízkonapěťové tranzistory a díky použitému transformátoru je zajištěno galvanické oddělení od sítě.

Zdroje s impulsním transformátorem se nazývají Spínané zdroje s regulací v primáru. Toto zapojení se používá častěji než Spínané zdroje s regulací v sekundáru. Síťové napětí je usměrněno a vyfiltrováno. Dále je napětí přivedeno na spínací prvek, který je ovládán zpětnovazební regulací. Toto napětí je rozpínáno spínacím prvkem na obdélníkový průběh o kmitočtech desítek až stovek kHz. Poté je impulsním transformátorem transformováno, usměrněno Schottkyho diodami (diody musí být rychle z důvodu vysokých kmitočtů) a vyfiltrováno. Nevýhodou tohoto zapojení je velké výstupní zvlnění, z důvodu spínání síťového napětí musí být použity spínací tranzistory na vysoká napětí, na vstupu zdroje musí být filtr, který zabrání zpětnému pronikání rušení ze zdroje zpět do sítě. Výhodou tohoto zapojení je však velká účinnost, malá hmotnost a také velikost. Toto zapojení se může také použít jako stejnosměrný měnič. Na vstup se nepřipojí střídavé napětí sítě, ale stejnosměrné napětí z baterie, ze stejnosměrného dynama nebo z jiného stejnosměrného zdroje elektrické energie.

### **3.3 Princip činnosti spínaných stabilizátorů**

Regulace výstupního napětí se provádí pomocí spínání spínacího prvku. Regulované napětí musí být po spínání následně filtrováno. U nižších výkonů kondenzátorem u vyšších výkonů kondenzátorem a indukčností.

Řídící signál tranzistoru je tvořen spínacím pulsem. Ten je rozdělen na  $T_a$  – délka sepnutí spínače (po tuto dobu filtr akumuluje energii),  $T_b$  – délka rozepnutí spínače (po tuto dobu filtr dodává energii do zátěže), celková délka  $T_a$  a  $T_b$  je  $T_c$  – délka periody pulsu.

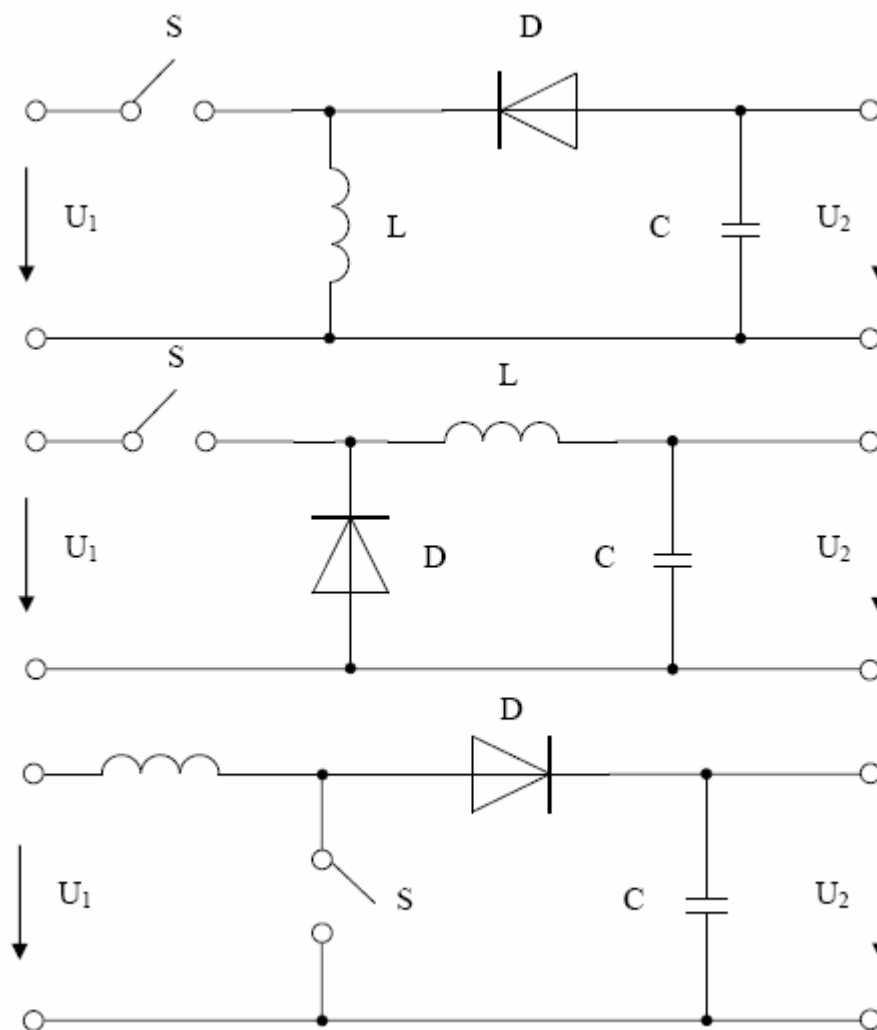
Řídící signál může být tvořen pomocí impulsně-šířkové modulace PWM, která má stále stejnou délku periody a mění se délka sepnutí a rozepnutí. Nebo impulsně-frekvenční modulací PFM která má proměnou délku periody a stále stejnou délku sepnutého nebo rozepnutého pulsu.

### 3.4 Základní zapojení spínaných stabilizátorů

Existuje mnoho zapojení spínaných stabilizátorů a v různých literaturách mají i různá pojmenování. Můžeme však říci, že jednu vlastnost mají prakticky všechny stabilizátory stejnou. Všechny mají použity tři základní součástky při realizaci – spínač, akumulární indukčnost a rekuperační neboli nulovou diodu.

Výběr vhodného zapojení pak ovlivňují požadavky na vlastnosti výstupního napětí např. polarita, velikost výstupního napětí a proudu a jiné.

Přehled základních zapojení spínaných stabilizátorů je na Obr. 5.

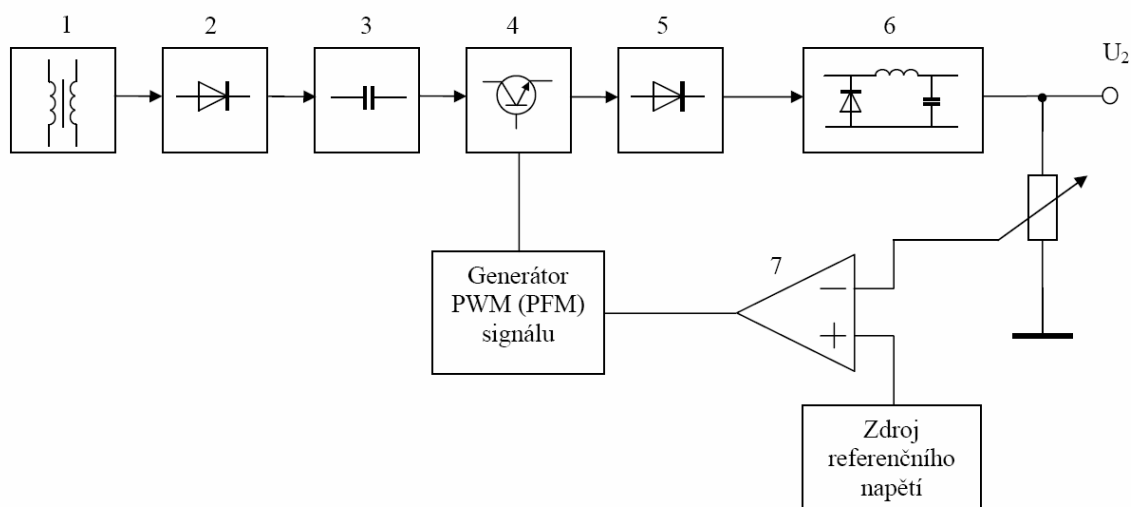


Obr. 5 - Přehled základních zapojení spínaných stabilizátorů

## 4 NÁVRH REALIZACE NOVÉ ELEKTRONICKÉ ČÁSTI LABORATORNÍHO ZDROJE

### 4.1 Základní myšlenka konstrukce nového zdroje

Stejně jako všechny spínané zdroje je konstruován i tento zdroj. Dle blokového schéma se dá popsat, jak se napětí upravuje, abychom na výstupních svorkách měli napětí požadované hodnoty. Blokové schéma je naznačeno na Obr. 6.



Obr. 6 - Blokové schéma navrhovaného zdroje

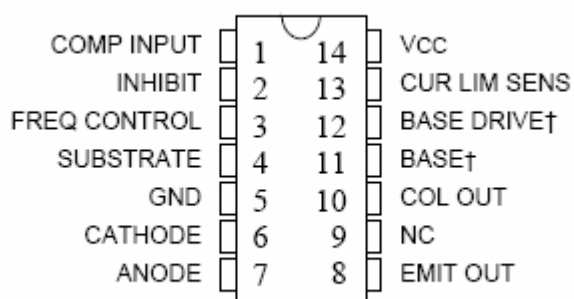
V blokovém schématu jsou znázorněny všechny části, které zdroj obsahuje. Zdroj je napájen z jednofázové napájecí sítě 230V/50Hz pomocí klasického třížilového napájecího kabelu. Jednotlivé vodiče jsou fázový vodič, nulový vodič a ochranný vodič. Vstupní střídavé napětí se transformuje pomocí transformátoru na nižší napětí, s kterým dále pracujeme. Napětí z transformátoru má stále sinusový průběh, proto ho musíme následně usměrnit můstkovým usměrňovačem a ještě toto napětí vyfiltrovat filtračním kondenzátorem. Po vyfiltrování je již napětí stejnosměrné. Toto napětí je dále spínáno spínacím tranzistorem. Následně je zase vyfiltrováno filtrační cívkou a kondenzátorem. Filtrační cívka je použita z důvodu udržení stálé hodnoty odebíraného proudu a filtrační kondenzátor je použit k udržení stálé hodnoty výstupního napětí. Bez těchto součástí by výstupní napětí a proud pulsovaly v závislosti na spínání tranzistoru. Toto je již výstupním napětím a proudem ze zdroje do spotřebiče připevněného na výstupní svorky. Hodnota velikosti výstupního napětí se navíc používá jako zpětnovazební informace pro řídicí obvod, který porovnává



výstupní napětí ze zdroje s požadovanou hodnotou výstupního napětí a podle toho příslušně spíná spínací tranzistor.

## 4.2 Popis funkce IO TL 497A

Integrovaný obvod TL 497A je zástupcem integrovaných obvodů pro konstrukci a řízení spínaných stabilizátorů. IO TL 497A je produktem společnosti TEXAS INSTRUMENTS. Jeho konstrukční provedení je v pouzdře DIL 14. Schéma integrovaného obvodu TL 497A s popisem jednotlivých pinů je na Obr. 7



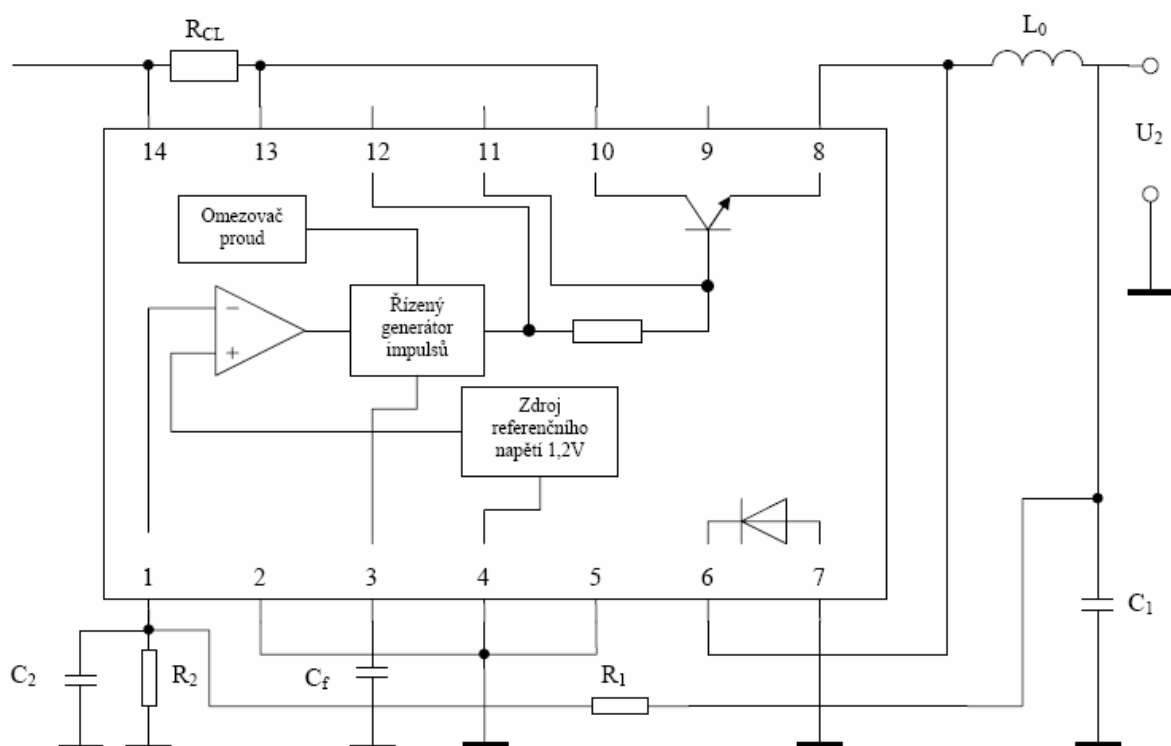
Obr. 7 - Integrovaný obvod TL 497A

IO je navržen tak, že obsahuje všechny funkce potřebné ke konstrukci spínaného stabilizátoru. IO může pracovat ve třech různých zapojeních jako :

1. **snižovací regulátor kladného napětí,**
2. **zvyšovací regulátor kladného napětí,**
3. **invertující regulátor.**

Obvod dále může pracovat ve dvou režimech. V prvním sám řídí a následně reguluje výstupní napětí a maximální výstupní proud pomocí integrovaného tranzistoru a nulové diody. To je však výkonově omezeno vnitřním návrhem a vlastnostmi integrovaných součástek. Ve druhém režimu pracuje obvod jen jako řídicí člen jiných výkonových prvků. Toto zapojení je vhodné pro spínání vyšších výkonů.

Obvod obsahuje generátor řízených impulsů, operační zesilovač, zdroj konstantního referenčního napětí 1,2 V, spínací tranzistor, nulovou diodu, zdroj konstantního proudu a proudovou pojistku. Vnitřní uspořádání IO TL 497A a jeho základní zapojení jako snižovací regulátor kladného napětí je vyobrazeno na Obr. 8



Obr. 8 - Vnitřní uspořádání IO TL 497A a doporučené zapojení dle výrobce

Hlavním prvkem obvodu je Řízený generátor impulsů. Tento generátor pracuje s pevnou šířkou impulsu, který spíná integrovaný tranzistor. Šířka spínacího impulsu se nastavuje kondenzátorem připojeným mezi FREQ CONTROL (pin 3) a GND. Tento kondenzátor je nabíjen z vnitřního zdroje konstantního proudu až k předem stanovenému prahovému napětí. Puls je časově stejně dlouhý jako doba nabíjení kondenzátoru. Výrobce uvádí délku spínacího impulsu pro některé hodnoty kapacity. Viz Tabulka 2.

Tabulka 2 - Tabulka hodnot časů pro různé hodnoty rezistorů

Časový kondenzátor [pF]	200	250	350	400	500	750	1000	1500	2000
Čas pulzu [μs]	19	22	26	32	44	56	80	120	180

Dle výrobce má spínací impuls konstantní velikost i v případě změny vstupního napětí v intervalu od 4,5 V až do 12 V. Z toho vyplývá, že napájecí napětí integrovaného obvodu je od 4,5 V až do 12 V. Maximální napájecí napětí je 15 V. Výstupní napětí je regulováno pomocí napětí z odporového děliče  $R_1$  a  $R_2$  umístěného mezi svorky výstupního napětí. Rezistor  $R_2$  je připojen na GND a měl by mít dle výrobce hodnotu 1,2 kΩ. Velikost výstupního napětí závisí na hodnotě rezistoru  $R_1$ . Napětí ze středu tohoto děliče se přivádí na svorku COMP INPUT

(pin 1). Tato svorka je přivedena na invertující vstup integrovaného operačního zesilovače, na neinvertující vstup tohoto zesilovače je pak přiváděno referenční napětí o velikosti 1,2 V. V operačním zesilovači se tato dvě napětí porovnávají a jejich rozdíl se následně zesílí. V případě, že napětí na odporu  $R_2$  je menší než referenční, je na výstupu z operačního zesilovače nulové napětí a generátor impulsů generuje impulsy pro spínání integrovaného tranzistoru. Ve chvíli kdy napětí na  $R_2$  stoupne nad hodnotu 1,2 V, se rozdíl napětí zesílí, na výstupu z OZ je kladné napětí, generátor impulsů je zablokován napětím z OZ a přestává spínat spínací tranzistor. V případě, že se do děliče místo odporu  $R_1$  vloží potenciometr, lze výstupní napětí regulovat až do výše vstupního (napájecího) napětí. IO však reguluje napětí až od 1,2 V. To je způsobeno tím, že se v OZ porovnává napětí na odporu  $R_2$  s referenčním napětím 1,2 V. V případě, že na odporu  $R_2$  a tedy i na výstupních svorkách není napětí minimálně 1,2 V, tak generátor spíná tranzistor tak, aby výstupní napětí zvýšil.

Další funkcí IO je proudová pojistka. Proudová pojistka je řešena velmi jednoduše. Do obvodu protékajícího proudu je připojen snímací odpor  $R_{CL}$ , který je připojen mezi svorky  $V_{CC}$  (pin 14) a CUR LIM SENS (pin 13). Při průchodu proudu přes snímací odpor na něm vzniká úbytek napětí. Proudová ochrana se aktivuje ve chvíli, kdy je úbytek napětí na odporu a tedy i rozdíl napětí mezi oběma piny 0,7 V.

Obvod má ještě jeden vstupní pin. Je pojmenován INHIBIT. Už jeho název napovídá, jaká je jeho funkce. V případě, že je tento pin připojen na GND tak obvod reguluje napětí. V případě, že je pin připojen na hodnotu log 1. (napětí přibližně 5 V) je odvod odpojen a nepracuje. Je to způsobeno tím, že pin INHIBIT je připojen na výstup OZ a simuluje překročení výstupního napětí, což zablokuje generátor impulsů.

Maximální proud procházející přes spínací tranzistor je omezen tím, že je integrován do pouzdra samotného obvodu a jeho hodnota je 500 mA. Z tohoto důvodu je i maximální dovolený proud procházející v propustném směru nulovou diodou 500 mA. Některé základní pracovní hodnoty IO jsou v Tabulka 3.

Tabulka 3 - Doporučené pracovní podmínky

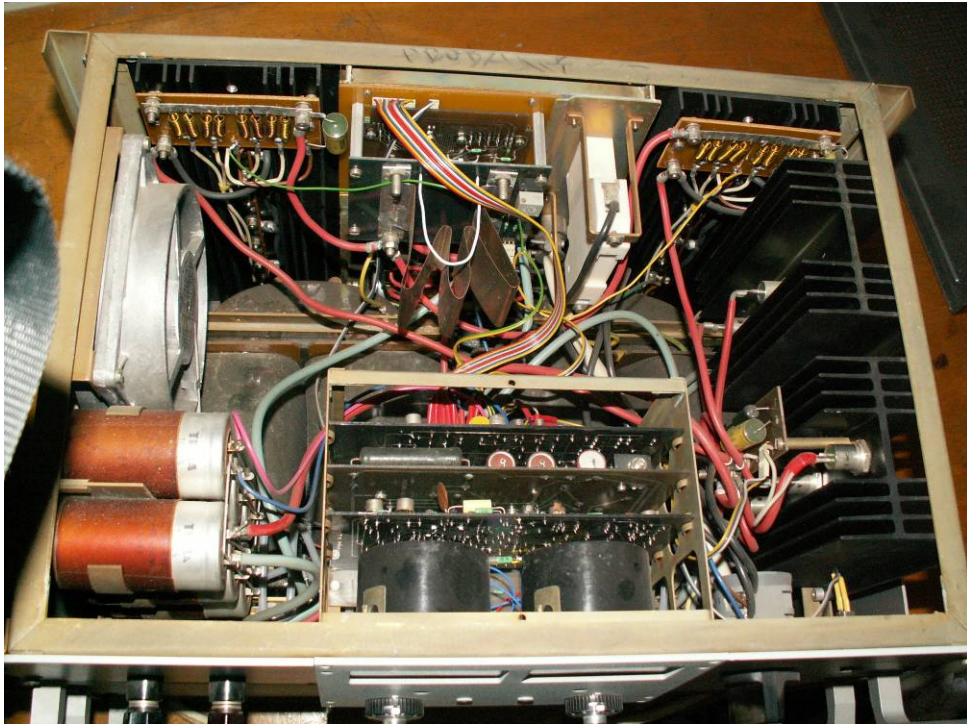
	MIN	MAX	
Napájecí napětí	4,5	12	V
Vstupní napětí INHIBIT	2,5		V
Výstupní napětí		35	V
Výstupní proud		500	mA
Propustný proud diodou		500	mA
Pracovní teplota	0	70	°C

### 4.3 Výběr použitelných částí starého zdroje

V první fázi jsme se snažili ze zdroje vybrat součásti a součástky, které byly funkční a které by se daly použít v další fázi renovace. Původní zdroj je na Obr. 9 a Obr. 10.



Obr. 9 - Laboratorní zdroj - pohled z předu



Obr. 10 - Laboratorní zdroj - pohled z vrchu

Základní funkční částí laboratorního zdroje bylo šasi. U toho se ani nepředpokládalo, že by se musely některé jeho části měnit. Je tedy použito celé. Jeho vnitřní návrh dále velice usnadňuje zapracování všech potřebných funkčních částí. Její robustní konstrukce do ní také dovoluje bez jakýchkoli problémů umístit rozměrnější a těžší součástky. Některé již v šasi byly umístěny.

V přední masce šasi jsou umístěny dva ručičkové měřicí budíky. Jeden byl určen pro zobrazování velikosti výstupního svorkového napětí a druhý byl určen pro nastavení maximální hodnoty proudu. Pod oběma budíky byly umístěny dva vysokootáčkové potenciometry. Jeden sloužil k regulaci výstupního napětí a druhý sloužil k ovládní proudové pojistky. Tyto potenciometry použít nelze. Oba jsou již nefunkční. V levé části od měřících budíků a potenciometrů jsou umístěny ještě výstupní svorky.

Na zadní straně šasi byly umístěny další dvě výstupní svorky, jistič a pod nimi byl připevněn přívodní napájecí kabel. Kabel byl bez mechanického poškození a i po proměření byl funkční, proto se u zdroje nechal. Kabel je připojen přes jistič k transformátoru. Jistič je 1J M 14A.

Další funkční částí byla pro nás dost důležitá součást. U ní by bylo časově a hlavně finančně velmi náročné její nahrazení. Byl to transformátor.

Transformátor je konstruován z transformátorových plechů tvaru U a I. Materiál, z kterého jsou vyrobeny transformátorové plechy, je jistě železo s příměsí křemíku.

Tento materiál je vhodný na konstrukci jader transformátoru pro síťový kmitočet, což je u nás 50 Hz. V blokovém schéma na Obr. 6 je vidět, že transformátor je připojen na síťové napětí. I tento transformátor byl v původním použití připojen přímo na síťové napětí.

U transformátoru neznáme jeho hlavní vlastnost, kterou je maximální vstupní a výstupní proud. Proto tedy nevíme, na jaký maximální povolený přenášený výkon je transformátor konstruován. Jelikož ale byl transformátor ve zdroji použit, je tedy jasné, že námi požadovaný výkon který je z výstupních hodnot napětí a proudu a účinnosti lehce vypočitatelný

$$P_{\min} = \frac{40 \cdot 40}{0,8} = 2000W . \quad (20)$$

Tato hodnota je hodnota maximální. Zdroj již v původním provedení měl maximální výstupní napětí 40 V a maximální výstupní proud 40 A. Proto musí být transformátor schopný transformovat požadovaný výkon z primárního vinutí na sekundární.

Další funkční částí zdroje byla vyhlazovací cívka. Její jádro bylo konstruováno ze stejného materiálu jako jádro transformátoru. Byla tedy velmi objemná co do velikosti tak i do hmotnosti. Toto jádro je vhodné pro nízké kmitočty (používá se hlavně pro síťové kmitočty). My však potřebujeme mít vyhlazovací cívku až v místě za spínacím prvem. Tam jsou kmitočty okolo 10 kHz až 20 kHz. Pro tyto kmitočty je již toto jádro zcela nevhovující.

Dále byly ve zdroji použity výkonové polovodičové součástky. Byly to dva tyristory a dvě diody. Ty byly součástí polořízeného usměřňovacího můstku. Jelikož k nim však nebyla žádná dokumentace a nebylo možné zjistit jejich parametry, dále jsme je v návrhu nepoužili.

Na výstupu byl filtr konstruován nejen z filtrační cívky ale ještě obsahoval šest sériově seřazených elektrolytických kondenzátorů. Každý z kondenzátorů měl kapacitu 4,7 mF a byl konstruován na 63 V. Všechny kondenzátory byly funkční a také byly použity v naší realizaci.

V původním zdroji bylo ovládání řízení tyristorů realizováno na 3 deskách plošných spojů. Na těchto deskách byly použity rezistory, kondenzátory a polovodičové prvky. Tyto součástky jsem však z důvodu možného poškození při demontáži a z cenové dostupnosti nových součástek nepoužili.

#### **4.4 Návrh principu řízení výstupního $U$ a $I$**

Úplně první věcí kterou jsme museli řešit bylo, jakým způsobem bude zdroj pracovat. Nejjednodušším řešením bylo částečně zachovat způsob řízení z předešlého návrhu. Čímž je myšleno, že se bude napětí řídit až za transformátorem. Odstoupili jsem však od řízení napětí při usměrnění v řízeném usměrňovacím můstku, ale rozhodli jsme se pro řízení napětí až ve stejnosměrné části. V tu chvíli bylo jasné, že z původního zdroje se použije transformátor k transformaci síťového napětí.

Primární vinutí je připojeno na síťové napětí 230V/50Hz a na výstupu sekundárního vinutí je střídavé efektivní napětí přibližně 65 V.

V dalším kroku jsme museli vybrat správný řídicí obvod pro spínaný stabilizátor. Na tyto výkony jsme nenašli žádný stabilizátor, který by dokázal ovládat výstupní napětí bez použití dalších externích součástek. Proto jsme se mohli rozhodnout pro výběr libovolného stabilizátoru na nižší výkony, který bude ovládat externí součástky. Pro řízení stabilizátoru jsme vybrali integrovaný obvod od firmy TEXAS INSTRUMENTS, kterým byl TL 497A.

Při dalším návrhu nového výkonového obvodu a nového řídicího obvodu jsme vycházeli z blokového schéma spínaného zdroje řízeného v sekundáru a z doporučeného zapojení, které udává sám výrobce IO TL 497A na Obr. 8.

#### **4.5 Volba usměrňovacího prvku**

Z blokového schéma je patrné, že transformované napětí se musí dále usměrnit. K usměrnění jsme použili místo čtyř usměrňovacích diod zapojených do můstku rovnou integrovaný můstkový usměrňovač. Usměrňovací můstek se musí dimenzovat dle dvou hlavních vlastností. První vlastností je velikost závěrného napětí. Je to napětí, které musí usměrňovací součástka vydržet v závěrném směru. Špičkové výstupní napětí z transformátoru je přibližně

$$U_{\max} = U_{ef} \cdot \sqrt{2} = 65 \cdot \sqrt{2} \cong 92V \quad (21)$$

proto by závěrné napětí mělo být alespoň 180 V. Druhou vlastností je proud v propustném směru. Je to maximální proud, který může procházet přes polovodičový přechod PN. Maximální výstupní proud je 40 A. S ohledem na tyto hodnoty, jsme vybrali usměrňovací můstek KBPC 5006. Je to výrobek společnosti HY ELECTRONIC. Závěrné napětí tohoto můstku je 600 V střídavých a maximální

proud v propustném směru je 35 A. Výrobce doporučuje používat tento můstek pro usměrňování napětí 240 V až 400 V střídavých. V našem návrhu jsou tyto můstky použity dva a jsou zapojeny paralelně. Takto zapojeny jsou proto, že potřebujeme proud 40 A a jeden můstek je konstruován jen na 35 A. Proto se v paralelním zapojení tento proud rozdělí na dva přibližně stejně velké proudy cca 20 A.

V pracovním režimu na součástce vlivem průchodu proudu vznikají ztráty, které se projevují tak, že součástku zahřívají. Můstkem prochází proud v propustném i v závěrném směru. V závěrném směru je na součástce celé usměrňené a vyfiltrované napětí. Výrobce udává závěrný proud přibližně 10  $\mu$ A. Ztrátový výkon v závěrném směru  $P_{ZZS}$  je tedy

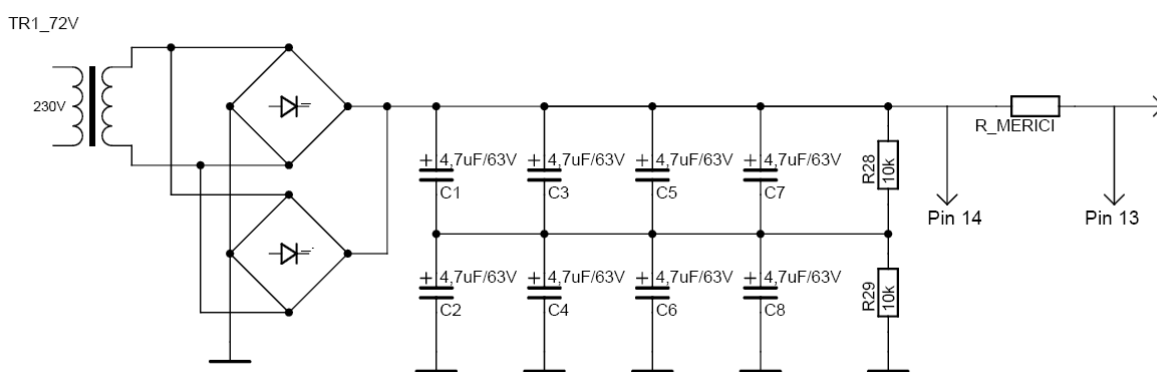
$$P_{ZZS} = U \cdot I = 92 \cdot 10^{-5} = 0,92mW \quad (22)$$

V propustném směru protéká součástkou proud přibližně 40 A a úbytek napětí na součástce udává výrobce 1 V. Ztrátový výkon v propustném směru  $P_{ZPS}$  je tedy

$$P_{ZPS} = U \cdot I = 1 \cdot 20 = 20W . \quad (23)$$

Tyto ztráty se musí ze součástky odvést pryč, jinak by součástku zničily. Proto jsou oba usměrňovací můstky přidělány na chladič, ze kterého se teplo rozptýlí do okolí. Pro lepší přenos tepla ze součástky na chladič je ještě mezi chladič a součástku nanesena teplovodná pasta.

Zapojení usměrňovacích můstků je na Obr. 11.



Obr. 11 - Schéma usměrňovacích můstků, vyhlazovacích C a měřícího odporu



#### 4.6 Volba filtračních kondenzátorů

Toto usměrněné napětí je v tuto chvíli pulsující. Proto je potřeba ho ještě vyfiltrovat. K vyfiltrování jsou použity filtrační kondenzátory. V původním zdroji bylo použito šest kondenzátorů každý s kapacitou 4,7 mF na napětí 63 V. Jelikož má usměrněné špičkové napětí hodnotu přibližně 92 V, nemohou se kondenzátory připojit na napětí přímo, ale musí se připojit v sérioparalelní kombinaci. K těmto šesti kondenzátorům z předešlého zdroje jsme ještě přidali další dva kondenzátory se stejnými parametry. Kondenzátory jsou tedy zapojeny paralelně po dvou v každé větvi.

Aby se napětí na kondenzátorech rozložilo rovnoměrně, je ke kondenzátorům připojena ještě jedna větev tvořena dvěma výkonovými rezistory. Každý z kondenzátorů má hodnotu 10 k $\Omega$  a ztrátový výkon má 3 W. Tyto rezistory také zajistí, že při vypnutí zdroje nezůstanou kondenzátory nabity, ale že se přes tyto odpory vybíjí.

Vybíjení kondenzátoru lze spočítat ze vzorce

$$U_2 = U_{MAX} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 92 \cdot e^{-\frac{t}{188}} \quad (24)$$

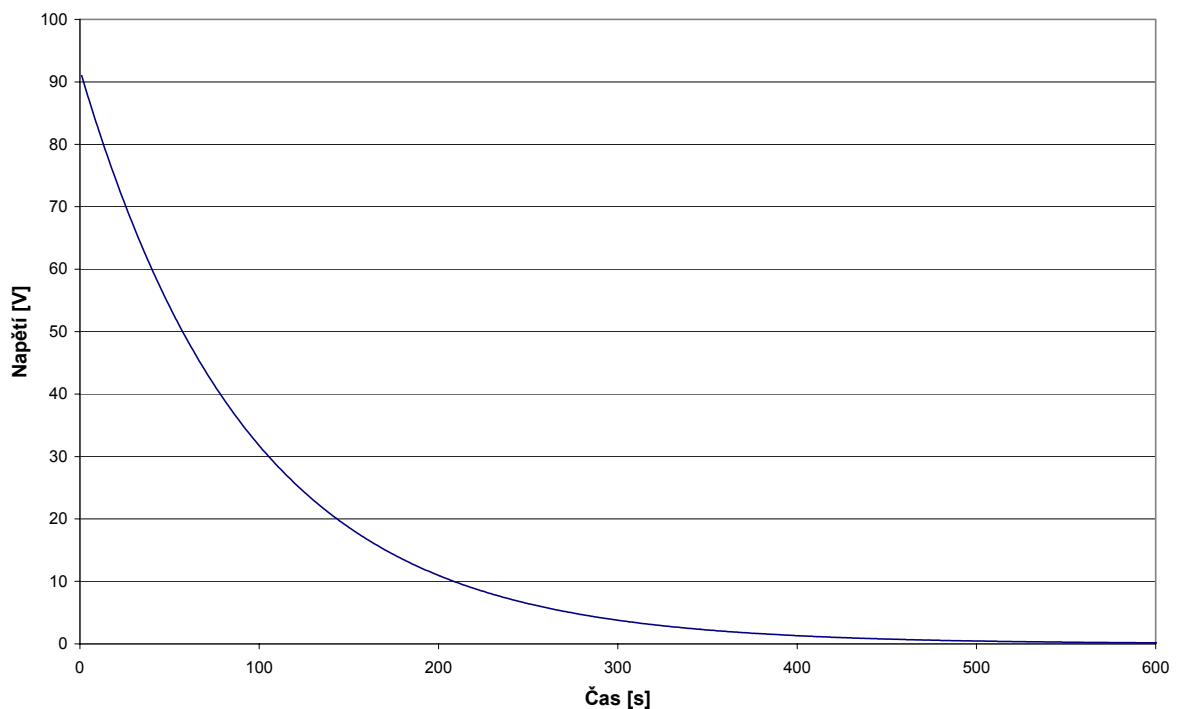
kde  $U_2$  - je napětí na kondenzátoru,

$U_{MAX}$  - je počáteční napětí,

$\tau$  - je časová konstanta která se vypočítá  $R \cdot C$ ,

$t$  - je reálný čas

Na Obr. 12 je vidět, jak se kondenzátory přes odpory vybíjejí.



Obr. 12 - Vybíjení kondenzátorů před odpory

V tomto zapojení se na kondenzátory může připojit špičkové napětí až 126 V. Celková kapacita tohoto zapojení je 9,4 mF. Při maximálním zatížení 40 A se dle vzorců pro můstkové zapojení může vypočítat maximální zvlnění.

Výpočet kapacity za můstkovým usměřňovačem :

$$C = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I}{p \cdot U_2} \quad (25)$$

Výpočet zvlnění napětí :

$$p = \frac{\Delta U_2}{U_2} \cdot 100\% \quad (26)$$

Výpočet zvlnění :

$$p = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{I}{C \cdot U_2} = 3 \cdot 10^{-3} \frac{40}{9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 92} = 0,139 \quad (27)$$

$$\Delta U_2 = \frac{p \cdot U_2}{100} = \frac{0,139 \cdot 92}{100} = 0,128V \quad (28)$$

kde  $I$  - maximální procházející proud,  
 $U_2$  - je maximální výstupní proud,  
 $p$  - zvlnění,  
 $C$  - kapacita kondenzátoru.

Zvlnění je přibližně 0,128 V při maximálním odebíraném proud. Zapojení vyhlazovacích kondenzátorů je na Obr. 11.

#### **4.7 Měřící odpor**

Další součástkou zapojenou ve výkonové části obvodu je měřící odpor. Ten je realizován pomocí plechu, který je připojen na samostatné desce. Přes tuto součástku prochází celkový proud. Impedance této součástky je 0,012  $\Omega$ . Při průchodu proudu přes měřící odpor na něm vzniká úbytek napětí. Toto napětí se přivádí na řídicí desku, kde se následně upravuje. Zapojení měřícího odporu je na Obr. 11.

#### **4.8 Spínací část**

Za měřícím odporem se výkonová část dělí na dvě symetrické větve. Jelikož jsou obě naprosto stejné a jsou řízeny stejným řídicím signálem, bude zde popsána jen jedna větev.

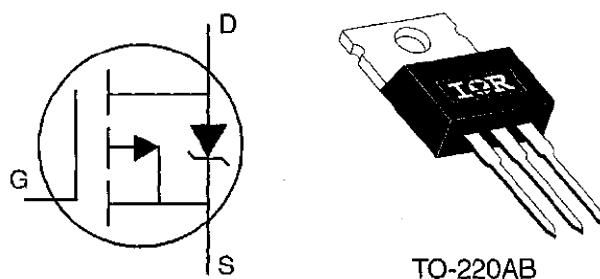
Následující část je částí spínací, doplněná o filtrační cívku. Jelikož jsou tyto větve ve zdroji dvě, předpokládáme, že každou větví poteče polovina celkového proudu. Polovina předpokládaného protékaného proudu je 20 A. Proto byla každá větev dimenzována na proud 25 A, aby byla ještě rezerva 5 A.

V případě, že by větví měl procházet proud větší než 25 A, je před spínacími tranzistory umístěna tavná pojistka na 25 A. Ta se v případě přetížení přepálí a tím ochrání spínací tranzistory, nulové diody a filtrační cívky. Hodnota tavné pojistky je několik korun, na rozdíl od toho je hodnota spínacích tranzistorů, nulových diod a filtračních cívek, které by byly v případě přetížení proudem zničeny, několik set korun.

#### **4.9 Volba spínacího tranzistoru**

Výběr spínacích tranzistorů byl závislý hlavně na velikosti spínaného proudu, spínaného napětí, na konstrukčním provedení a v neposlední řadě také na ceně součástky. Pro spínání jsme vybrali tranzistor IRF 9640. Je to produkt společnosti INTERNATIONAL RECTIFIER. Je to tranzistor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) neboli tranzistor řízený polem. Schématická

značka a provedení pouzdra tranzistoru je na Obr. 13. Základní vlastnosti udávané výrobcem tranzistoru jsou v Tabulka 4.



Obr. 13 - Schématická značka a pouzdro tranzistoru IRF 9640

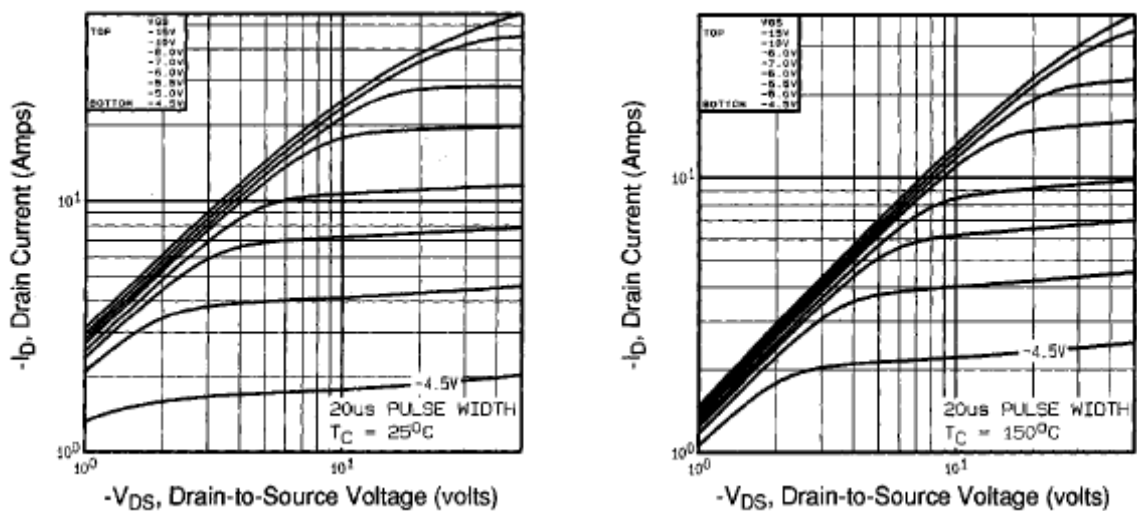
Tabulka 4 - Tabulka maximálních hodnot tranzistoru IRF 9640

$I_D$ $T_c = 25^\circ\text{C}$	Trvalý protékající proud $V_{GS} = -10\text{V}$	- 11	A
$I_D$ $T_c = 125^\circ\text{C}$	Trvalý protékající proud $V_{GS} = -10\text{V}$	- 6,8	
$I_{DM}$	Maximální pulsující proud	- 44	
$P_D$ $T_c = 25^\circ\text{C}$	Ztrátový výkon	125	W
$V_{GS}$	Napětí Hradlo - Source	$\pm 20$	V
$dv/dt$	Maximální změna napětí za čas	- 5	V/ns
$T_J$	Pracovní teplota	- 55 až + 150	$^\circ\text{C}$
$T_{STG}$	Skladovací teplota		
	Pájecí teplota pro $t = 10\text{ s}$		

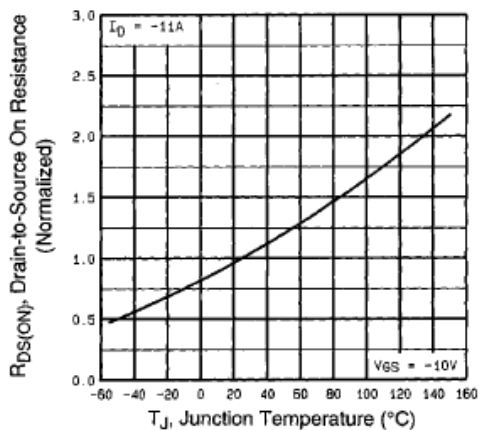
Z tabulky můžeme vyčíst, že maximální napětí, které tento tranzistor dokáže rozepnout je 200 V. Což splňuje náš požadavek na velikost spínacího napětí. Druhý důležitý parametr je protékající proud. Maximální stálý proud je 11 A, ale tento proud nemůžeme v našem případě brát jako proud, který tranzistorem může téci. Náš proud tekoucí tranzistorem bude totiž pulsující. Dle spínání musíme počet tranzistorů zjistit z grafu Obr. 16 - Maximální bezpečná pracovní oblast. Na x-ové ose je v logaritmickém měřítku napětí mezi elektrodami S a D, na y-ové ose je v logaritmickém měřítku maximální povolený proud. Čárkovaně je vytyčena oblast, v které může tranzistor pracovat.

V grafu na Obr. 14 jsou výstupní charakteristiky pro teploty tranzistoru  $T = 25^\circ\text{C}$  a  $T = 125^\circ\text{C}$ . Na těchto charakteristikách je zřetelné, že při vyšší teplotě je při stejném řídicím napětí a stejném napětí mezi drain a source menší protékající proud tranzistorem. Z toho vyplývá, že tranzistor musí mít při vyšší teplotě větší odpor  $R_{DS}$ . Závislost odporu přechodu drain - source na teplotě naznačuje graf na Obr. 15. Z důvodu vyššího odporu přechodu se zmenšuje proud, který může tranzistorem

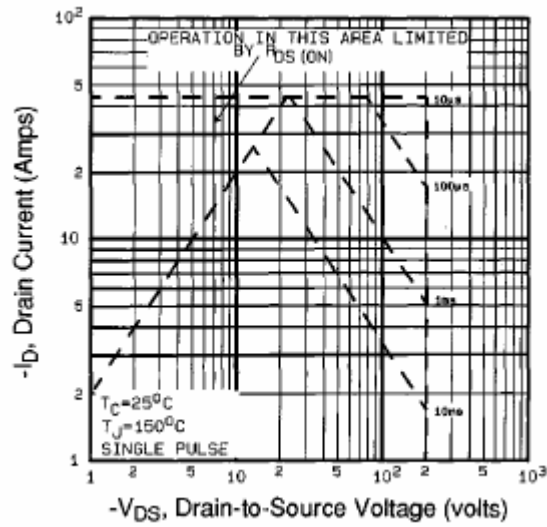
téct. Je to z důvodu vyšších ztrát na tranzistoru. V grafu na Obr. 17 je naznačena velikost proudu, který může protékat v závislosti na teplotě tranzistoru.



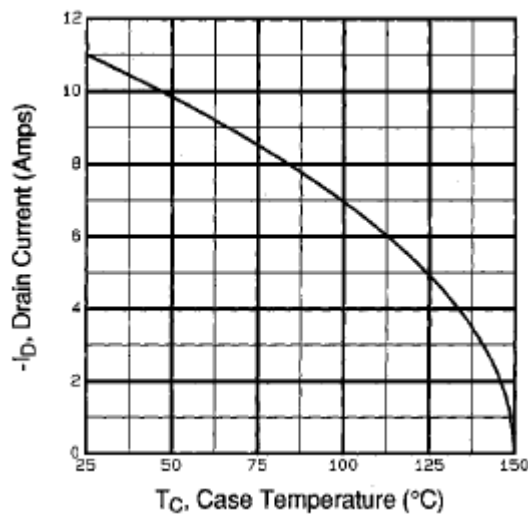
Obr. 14 - Výstupní charakteristiky tranzistoru IRF 9640



Obr. 15 - Závislost odporu  $R_{DS}$  na teplotě



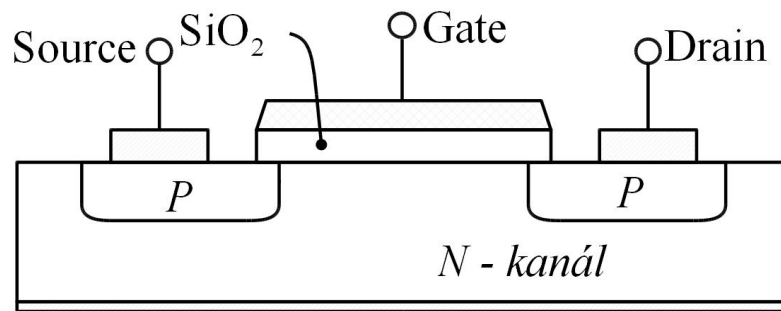
Obr. 16 - Maximální bezpečná pracovní oblast



Obr. 17 - Závislost povoleného maximálního proudu na teplotě tranzistoru

#### 4.9.1 Popis funkce tranzistoru MOSFET s indukovaným kanálem

Na Obr. 18 je znázorněn tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem.



Obr. 18 - Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem

Je tvořen dvěma polovodiči. Základní destička je tvořena polovodičem typu N. Na této destičce jsou další dvě oblasti, které jsou od sebe odděleny a každá je tvořena polovodičem typu P. K těmto oblastem jsou připojeny elektrody, které se nazývají source - S a drain - D. Ještě je na obrázku vidět třetí elektroda. Ta se nazývá hradlo - G a ta je od samotného přechodu odizolována slabou vrstvou oxidu křemíku  $\text{SiO}_2$ .

Při nulovém napětí na hradle G jsou elektrody S a D od sebe odizolovány vrstvou polovodiče N, která má velký odpor. Po připojení napětí mezi elektrody S a D neteče žádný proud. Po přivedení záporného napětí na G se pod vrstvičkou  $\text{SiO}_2$  indukuje vodivý kanál z kladných nábojů. Ten propojí elektrody S a D, odpor mezi elektrodami značně klesne a součástkou začíná procházet proud. Velikost proudu mezi elektrodami S a D je závislý na velikosti napětí přiváděného na hradlo G. Proud se však nemůže zvětšovat do nekonečna. Při překročení určitého napětí na hradle G se proud již nezvětšuje a zůstane stálý. V tu chvíli je tranzistor maximálně otevřen a je tedy v saturaci.

Závislost výstupního proudu na velikosti napětí mezi S a D a na velikosti napětí na hradle G je takzvaná Výstupní charakteristika. Tu udává výrobce v dokumentaci o součástce. Když tuto charakteristiku výrobce neudává, lze ji změřit v laboratoři. Tato charakteristika tranzistoru IRF 9640 je na Obr. 14.

#### **4.10 Návrh vyhlazovací indukčnosti a kapacity**

Z důvodu spínání ss napětí je výstupní napětí a proud pulsující, obdélníkového průběhu. Z tohoto důvodu se musí tento proud a napětí vyhladit. Návrh vyhlazovací indukčnosti a vyhlazovacího kondenzátoru byl závislý na spínání řídicího obvodu.

#### 4.10.1 Návrh indukčnosti

Pro návrh indukčnosti musíme vědět délku spínacího pulsu. Výrobce integrovaného obvodu TL 497A sám udává u svého doporučeného zapojení i vzorce pro výpočet velikosti indukčnosti i kapacity. Velikost indukčnosti (pro kondenzátor  $C_p = 350 \text{ pF}$ ) se vypočítá ze vztahu :

$$L(\mu H) = \frac{U_1}{I(pk)} \cdot t_{on}(\mu s) = \frac{100}{40} 26 = 65 \mu H \quad (29)$$

Vypočítaná velikost indukčnosti je tedy  $65 \mu H$ . V tuto chvíli jsou dvě možnosti. První možností je indukčnost navrhnout a vyrobit. Při návrhu indukčnosti nejdříve vybíráme jádro vhodné pro konstrukci cívky. Jádro musí mít takové vlastnosti, abychom nemuseli řadit příliš velké množství jader vedle sebe z důvodu přesycení jádra a abychom nemuseli vinout příliš velký počet závitů. V druhé fázi musíme vybrat vhodný vodič. Vodič musí být dimenzován na proud, který jím bude procházet, aby nebyla překročena proudová hustota.

Druhou možností je použít indukčnost, která je běžně dostupná v nabídce firem zabývajících se touto problematikou. V nabídce firmy RADION jsme našli vhodnou cívku. Její indukčnost je  $80 \mu H$  a je konstruována na proud  $10 \text{ A}$ . Jelikož je blok konstruován na proud  $25 \text{ A}$  řešíme toto tím, že cívky zapojíme paralelně. Třemi paralelně zapojenými cívkami může téct celkový proud až  $30 \text{ A}$ . Tím splňujeme proudovou podmínku.

#### 4.11 Návrh kapacity

Součástí vyhlazovacího filtru není jen cívka ale i kondenzátor. Ten ve filtru slouží k vyhlazení pulsujícího napětí. To vyplývá už ze zapojení. Kondenzátor je totiž zapojen paralelně k výstupním svorkám tedy i k zátěži. I pro výpočet kapacity kondenzátoru udává výrobce IO TL 497A vzorec

$$C_0(\mu F) = t_{on}(\mu s) \cdot \frac{\left( \frac{U_1}{U_0} I + I_0 \right)}{U_{ZVL}} = 20 \cdot \frac{\left( \frac{1}{90} \cdot 40 \right)}{0,125} = 800 \mu F \quad (30)$$

Po dosazení a vypočítání by měla být kapacita filtračního kondenzátoru  $800 \mu F$ . My jsme však velikost filtračního kondenzátoru nepočítali. Připojili jsme filtrační kondenzátory ještě před tím, než jsme velikost kapacity počítali. Měli jsme již vytvořené dvě desky plošných spojů (DPS) se svitkovými kondenzátory.



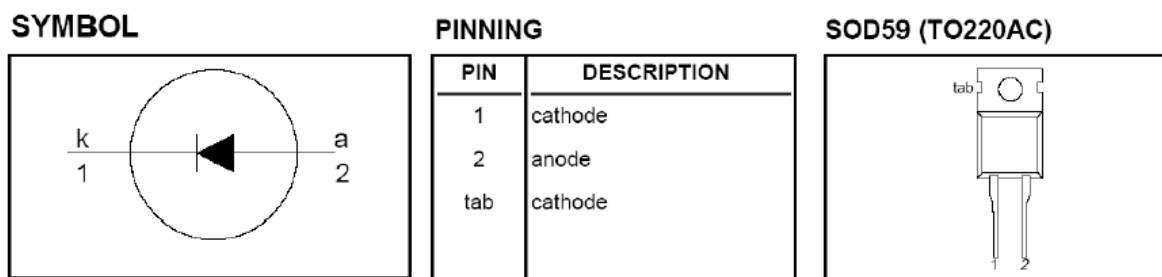
Kondenzátorů bylo celkem patnáct a všechny byly řazeny paralelně, každý s kapacitou 220 nF. Při zkoušení vyhlazovacího filtru jsme nejprve připojili jen svitkové kondenzátory. S těmi výstupní napětí pulsovalo a se zatížením výstupní napětí klesalo. Proto jsme na tři volná místa dodali tři elektrolytické kondenzátory každý z nich měl kapacitu 200  $\mu\text{F}$  a byl konstruován na napětí 70 V. poté jsme kondenzátory znovu připojili a vyzkoušeli. V tomto zapojení již byla filtrace napětí dostatečná. Napětí bylo stálé a i při zatěžování neklesalo. Celková kapacita filtračních kondenzátorů je

$$C_F = \sum_1^i C_{SVi} + \sum_1^j C_{ELj} = 15 \cdot 0,22 + 3 \cdot 200 = 603,3 \mu\text{F} \quad (31)$$

- kde  $C_F$  - celková kapacita;  
 $C_{SV}$  - kapacita svitkového kondenzátoru;  
 $C_{EL}$  - kapacita elektrolytického kondenzátoru;  
*i* a *j* - počet jednotlivých kondenzátorů;

#### 4.12 Nulová dioda

Potřebujeme, aby proud tekla do zátěže stále a byl co nejméně pulsující. Toho docílíme tím, že do obvodu zapojíme tzv. nulovou diodu. Na vlastnosti této diody jsou kladeny dvě podmínky, stejné jako u usměrňovacího můstku. V závěrném směru musí dioda vydržet závěrné napětí minimálně 40 V a v propustném směru musí dioda vydržet proud 25 A. Tyto parametry nesplňovaly žádné dostupné součástky. Proto jsme museli použít více diod a zapojit je paralelně, aby se proud rozložil rovnoměrně na více diod. Vybrali jsme diodu BYV29/500. Schématická značka a pouzdro s popisem jsou na Obr. 19. Je to produkt společnosti PHILIPS SEMICONDUCTORS.



Obr. 19 - Schématická značka a pouzdro diody BYV 29/500

Tabulka 5 - Maximální hodnoty diody BYV29/500

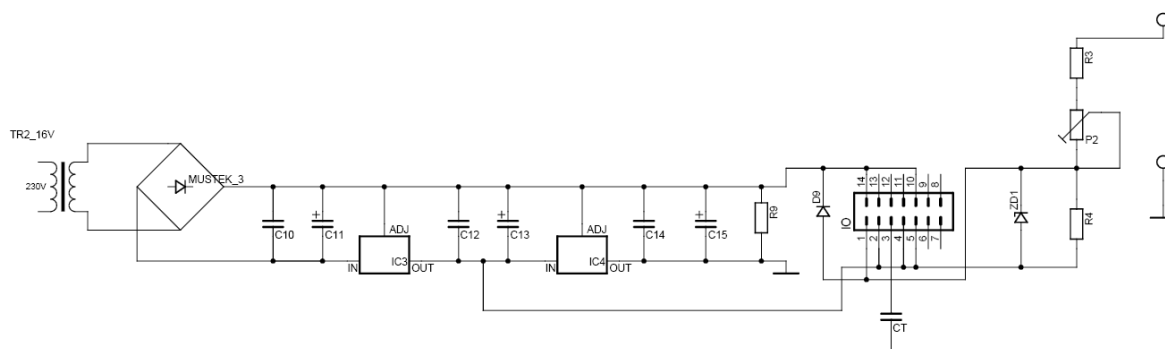
Maximální hodnoty diody BYV BYV29/500	
Opakovatelná špičková hodnota napětí v závěrném směru	500 V
Propustné napětí	0,9 V
Propustný proud	9 A
Závěrná zotavovací doba	25 ns

Napětí v závěrném směru je 500 V. Tuto vlastnost dioda splňuje.

V propustném směru požadavek na velikost proudu nespĺňuje. Podle hodnot udávaných výrobcem by stačily diody tři, ale z důvodu rezervy jsme použili čtyři.

#### 4.13 Návrh řídicí části zdroje

K napájení v řídicí oblasti jsme použili ten samý transformátor, který jsem použili i ve výkonové části. Transformátor má totiž ještě další dvě sekundární vinutí. Výstupní napětí těchto vinutí jsou 16 V a 32 V.



Obr. 20 - Napájení IO a děliče R3, P1 a R4

Při návrhu řídicí části jsem vycházel z zapojení doporučeného výrobcem IO. První problém, který jsme museli řešit, bylo řízení výstupního napětí. Jelikož se v IO porovnává velikost napětí na odporu R4 s konstantním napětím 1,2 V ze zdroje referenčního napětí, musí být na odporu R4 a tedy i na výstupu napětí minimálně 1,2 V. My však potřebujeme regulovat napětí již od nuly. Tento problém jsme vyřešili tím, že jsme speciálně vymysleli napájení IO a odporového děliče umístěného na výstupu.

Jelikož nemůžeme změnit velikost referenčního napětí v IO, musíme referenční napětí a napětí na děliči vůči sobě posunout. Na Obr. 20 je schéma napájení IO a také odporového děliče R3, P1 a R4 umístěného na výstupu.

Napájení této větve je ze sekundárního vinutí s napětím 16 V. Toto napětí je přivedeno na usměrňovací můstek, kde je usměrněno. Za usměrňovačem jsou umístěny dva kondenzátory. Elektrolytický kondenzátor C11 který slouží k vyhlazení pulsujícího usměrněného napětí. Druhý kondenzátor C10 je keramický o kapacitě 100 nF. Ze vztahu pro reaktanci kondenzátoru

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (32)$$

kde  $\omega$  - úhlová rychlost,

$C$  - kapacita kondenzátoru,

$f$  - frekvence,

vyplývá, že čím vyšší kmitočet, že tím menší je reaktance kondenzátoru. Ten tedy slouží ke zkratování vysokofrekvenčních rušivých signálů.

Další součástí je stabilizátor napětí IC1. Je to stabilizátor 7912, který stabilizuje záporné napětí, to označuje číslo 79 v názvu. Další dvojčíslí v tomto případě 12 značí velikost napětí tedy 12 V. Následuje další dvojice kondenzátorů C12 a C13. Elektrolytický pro vyfiltrování napětí a keramický pro zkratování vysokofrekvenčního rušení. Odtud je odvedeno záporné napětí - 3 V na dělič napětí a na piny 2, 4 a 5 IO. Následuje další stabilizátor IC2 typu 7909. Dle číselného označení je to stabilizátor záporného napětí o velikosti 9 V. Výstup tohoto stabilizátoru je připojen na zem označenou GND\_KOSTRA. Z toho je vidět, že napětí mezi stabilizátory IC1 a IC2 je o 3 V nižší než napětí na GND\_KOSTRA, které považujeme za nulové.

Pin 4 IO je napájení pro zdroj referenčního napětí. Jelikož je velikost tohoto napětí - 3 V proti GND\_KOSTRA, má výsledné referenční napětí - 1,8 V proti zemi. Za stabilizátorem je zase umístěna dvojice kondenzátorů C14 a C15 a ještě odpor R11, který slouží jako zátěž pro stabilizátor 7909. Když by stabilizátor zatížen nebyl, mohl by začít kmitat.

Kladné napětí ze stabilizátoru je přivedeno na pin 14 a na pin 10. Pin 14 slouží k napájení a pin 10 je emitor integrovaného tranzistoru.

K integrovanému obvodu je ještě připojen kondenzátor  $C_T$ . Ten určuje čas trvání pulsu. Kapacita kondenzátoru je 300 pF. Ze vztahu

$$t_{on}(\mu s) = \frac{C_T(pF)}{12} = \frac{300}{12} = 25 \mu s \quad (33)$$

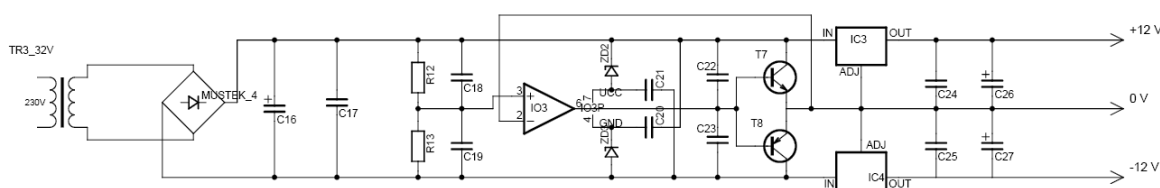
určíme délku pulsu. Ta bude přibližně 25  $\mu s$ .

Dělič napětí tvořený odpory R3, R4 a potenciometrem P1 je napájen z napětí na kladné výstupní svorce. Odpor R3 omezuje maximální proud, který může téct přes P1, ve chvíli kdy má nulový odpor. IO se snaží na odporu R4 udržet stálé napětí, stejné jako napětí referenčního zdroje. V našem případě je toto napětí - 1,8 V. Proto v případě, že je na výstupu napětí 0 V a potenciometr P1 je stažen na nulu, je na odporu R4 napětí přibližně - 1,6 V. IO je vypnutý a nespíná. Ve chvíli kdy se ohmická hodnota potenciometru P1 začne zvyšovat, napětí na odporu R4 začne ještě více klesat. Když klesne na napětí - 1,8 V, vyrovná se toto napětí s napětím referenčním. Při dalším zvyšování odporu P1, se napětí na R4 již nezmenšuje. Zůstává stejné a místo toho se začíná zvyšovat výstupní napětí. IO již dále udržuje na R4 konstantní napětí - 1,8 V.

#### 4.14 Ochrana jednotlivých pinů

Na pin 1 se může přivést maximální napětí 5 V. V případě napěťového pulsu by se na tento pin mohlo dostat vyšší napětí. Proto je mezi piny 2 a 1 umístěna Zenerova dioda ZD1 na napětí 4,7 V. V případě většího rozdílu napětí mezi piny se ZD otevře a puls se zmaří na diodě. Obdobnou funkci má dioda D9, která je zapojena mezi piny 1 a 14.

#### 4.15 Zdroj napětí pro Integrované obvody TL 071 a TL 072



Obr. 21 - Zdroj napájení pro TL 071 a TL 072

Zapojení je na Obr. 21. Třetí sekundární vinutí má výstupní napětí 32 V. Toto napětí je usměrněno můstkovým usměrňovačem a vyfiltrováno elektrolytickým kondenzátorem C16 s kapacitou 2,2 mF. Následuje ještě keramický kondenzátor C17 k filtraci.

Další je odporový dělič R12 a R13 tvořený dvěma odpory 100 kΩ. Je to proto, že potřebujeme přesně poloviční napětí z celkového napětí, ale nechceme zdroj

zbytečně zatěžovat. Napětí ze středu děliče je přivedeno na neinvertující vstup IO3. IO3 je operační zesilovač TL 071. Tento obvod musí být napájen symetrickým napětím maximální velikosti  $\pm 18$  V. Celkové napětí po vyfiltrování je přibližně 44 V. Proto jsou k napájecím svorkám IO3 připojeny v závěrném směru Zenerovy diody ZD2 a ZD3. Obě diody mají Zenerovo napětí 10 V. To znamená, že na každé z nich je úbytek napětí 10 V a napájecí napětí IO3 je 24 V neboli  $\pm 12$  V. Každá ZD je pak ještě pomocí keramického kondenzátoru spojena s opačným napětím.

Následují další dva filtrační kondenzátory. Výstup z IO3 je pak připojen mezi filtrační kondenzátory a dále na báze dvou komplementárních tranzistorů T7 a T8. Tranzistor T7 je typu NPN a je to BD 243C a tranzistor T8 je typu PNP a je to BD 244C. Vlastnosti těchto tranzistorů jsou v Tabulka 6.

Za komplementárními tranzistory jsou umístěny dva stabilizátory IC3 a IC4. IC3 je stabilizátor 7812 a IC4 je stabilizátor 7912. Stabilizátor 7812 stabilizuje kladné napětí 12 V a 7912 stabilizuje záporné napětí 12 V. Výstupní napětí ze stabilizátorů mají hodnoty + 12 V a - 12 V a mezi nimi je nulové napětí. V případě, že by se nulové napětí začalo měnit a přibližovat se ke kladnému napětí + 12 V, přenesou se tato reakce na invertující vstup IO3. Tam se odchylka zesílí a přivede se na báze tranzistorů T7 a T8 jako kladné napětí. NPN tranzistor T7 se začne více otevírat a PNP tranzistor T8 se začne přivírat. Takže na tranzistoru T7 se zmenší úbytek napětí a na tranzistoru T8 se zvětší úbytek napětí. Tím se všechna tři napětí vyrovnají na správnou hodnotu. V případě, že se nulové napětí začne přibližovat k zápornému napětí, opakuje se ten samý ale opačný děj. Za stabilizátory dále následují elektrolytické a keramické kondenzátory. Napětí tohoto zdroje se dále využívá jako napájecí napětí IO2A a IO2B a pro IO4.

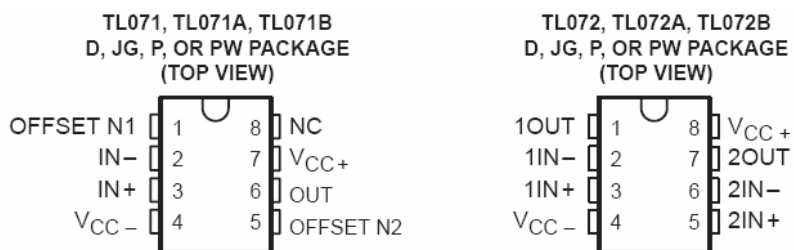
Tabulka 6 - Základní vlastnosti tranzistorů BD 243C a BD 244C

Vlastnosti tranzistoru BD 243C	
Napětí kolektor - emitor	100 V
Napětí kolektor - báze	100 V
Napětí emitor - báze	5 V
Kolektorový proud	6 A
Proud báze	2 A
Maximální ztráty	65 W
Pracovní teplota	- 65 + 150 °C

Vlastnosti tranzistoru BD 244C	
Napětí kolektor - emitor	100 V
Napětí kolektor - báze	100 V
Napětí emitor - báze	5 V
Kolektorový proud	6 A
Proud báze	2 A
Maximální ztráty	65 W
Pracovní teplota	- 65 + 150 °C

#### 4.15.1 Integrovaný obvod TL 071 a TL 072

IO TL 071 a TL 072 slouží jako zesilovací součástky. Pouzdro TL 071 a TL 072 je na obrázku Obr. 22 a základní vlastnosti v Tabulka 7.



Obr. 22 - Integrované obvody TL 071 a TL 072

Tabulka 7 - Tabulka hodnot IO TL 071 a TL 072

Maximální hodnoty	TL 071 TL 072
Napájecí napětí	$\pm 18 \text{ V}$
Vstupní napětí	$\pm 15 \text{ V}$
Pracovní teplota	0 až 70 °C
Vstupní proud	10 nA
Vstupní odpor	$10^{12} \Omega$

#### 4.16 Zapojení budičů FET tranzistorů

FET tranzistory chceme jen spínat a rozpínat. Proto nemusíme dle výstupních charakteristik Obr. 14 dlouze zjišťovat velikost řídicího napětí a můžeme použít maximální povolenou velikost. V našem případě použijeme nám dostupných  $\pm 12 \text{ V}$ . Zapojení je na Obr. 23.

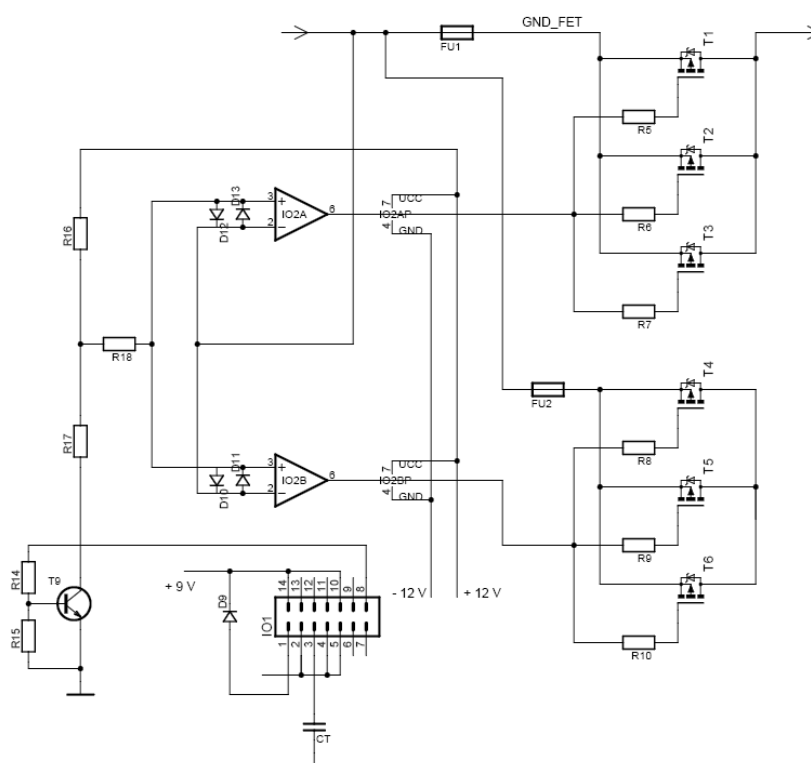
Spínání tranzistorů řídí IO1 dle výstupního napětí. Na kolektor integrovaného tranzistoru je přivedeno napětí 9 V. Z emitoru pokračuje na odporový dělič R14 a R15 a dále na GND\_KOSTRA. Z děliče R14 a R15 je přivedeno napětí na bázi tranzistoru T9. Ve chvíli kdy je na výstupu napětí vyšší než požadované, je integrovaný tranzistor rozepnut. Je na něm celé napětí 9 V a na odporovém děliči je napětí nulové. Tím je rozepnut i tranzistor T9. Ve chvíli, kdy se změní požadavek na vyšší napětí, je sepnut integrovaný tranzistor. Napětí se rozdělí na odpory R14 a R15. Tím je mezi odpory napětí proti GND\_KOSTRA vyšší než spínací, které sepne T9. A změní se napětí na děliči R16 a R17. Tím měníme rozdíly napětí mezi invertujícími a neinvertujícími vstupy IO a tím i výstupní napětí z IO2A a IO2B.

Odpor R18 je umístěn na řídicí desce a slouží jako omezení proudu a ochrana vstupů IO.

IO2A a IO2B jsou dva IO TL 071 pracující jako komparátory. Přepínají velikost výstupního napětí mezi napětími – 12 V a + 12 V. To je jejich napájecí napětí.

Spínací napětí je na odpory přiváděno před odpory R5 až R10. Tento odpor slouží zase jako ochranný v případě napěťového pulsu.

Ani u IO ani u FET tranzistorů předřadný odpor nijak neovlivňuje řídicí signál. Protože v ideálním případě mají IO i FET tranzistor nekonečně velký vstupní odpor.



Obr. 23 - Zapojení budičů FET

#### 4.17 Realizace proudové pojistky

Zapojení proudové pojistky je na Obr. 24.

Do obvodu protékajícího proudem je zařazen měřící odpor  $R_{MER}$ . Z tohoto odporu je úbytek napětí přiveden na vstup IO4. To je TL 071, který je zapojen jako invertující zesilovač. Zesílení tohoto zapojení vyjadřuje vzorec

$$Au = - \frac{R20 + P2}{R19} \quad (34)$$

kde  $R19$  - naznačuje odpor umístěný před invertujícím vstupem,

$R20 + P2$  - naznačuje odpor ve zpětné vazbě.

Výstupní napětí z IO se dělí do dvou větví. V jedné větví je LED dioda D15. Ta signalizuje, zda-li je proud v danou chvíli překračován a proudová pojistka tedy v tu chvíli omezuje maximální proud. Před diodou je ještě umístěn odpor R21. Ten funguje jako proudová ochrana diody. Ve chvíli kdy se dioda otevře, omezuje další strmé narůstání proudu. V druhé větví je umístěna propustně polarizovaná dioda D14 a odpor R22. Dioda D14 je připojena k pinům 1 a 2 optočlenu OK1.

V optočlenu OK1 je dioda a fototranzistor. Základní vlastnosti optočlenu naznačuje Tabulka 8. Velikost napětí na pinech 1 a 2 a tedy i na diodě ovládá spínání tranzistoru.

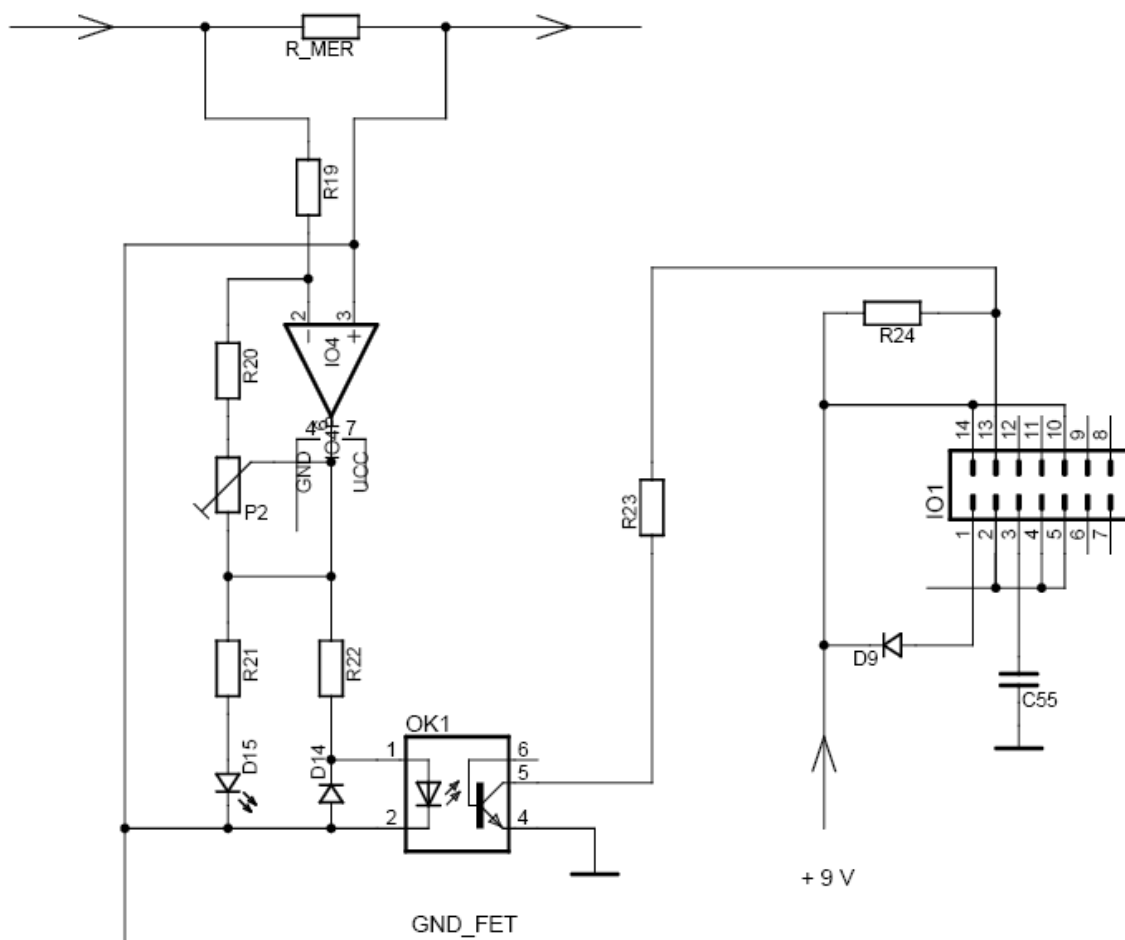
Když se na výstupu IO4 začne zvyšovat výstupní napětí, začíná se zvyšovat i úbytek napětí na D14. K omezení proudového nárůstu slouží odpor R22, stejně jako u LED diody D15. Úbytek napětí se přivádí na diodu v optočlenu a ta dále spíná fototranzistor.

S ním jsou do série připojeny odpory R23 a R24. Tento dělič je napájen napětím + 9 V. Když je fototranzistor rozepnutý je na něm celé napětí 9 V. Na odporech je napětí nulové a obvod reguluje výstupní napětí. Když je ale sepnut, napětí se rozdělí na děličích dle velikosti hodnot odporů. Na odporu R24 je napětí přibližně 0,82 V. Toto napětí je přivedeno na piny 14 a 13 IO1. V tuto chvíli je aktivována proudová pojistka a obvod přestává spínat integrovaný tranzistor a tím i FET tranzistory.

Tabulka 8 - Základní vlastnosti optočlenu 4N25

4N25	
Proud diodou v propust. směru	80 mA
Kolektorový proud	100 mA
Napětí kolektor - emitor	30 V
Napětí emitor - kolektor	7 V
Max. ztrát. výkon na diodě	150 mW
Max. ztrát. výkon na tranzistoru	150 mW
Celkový max. ztrát. výkon	250 mW

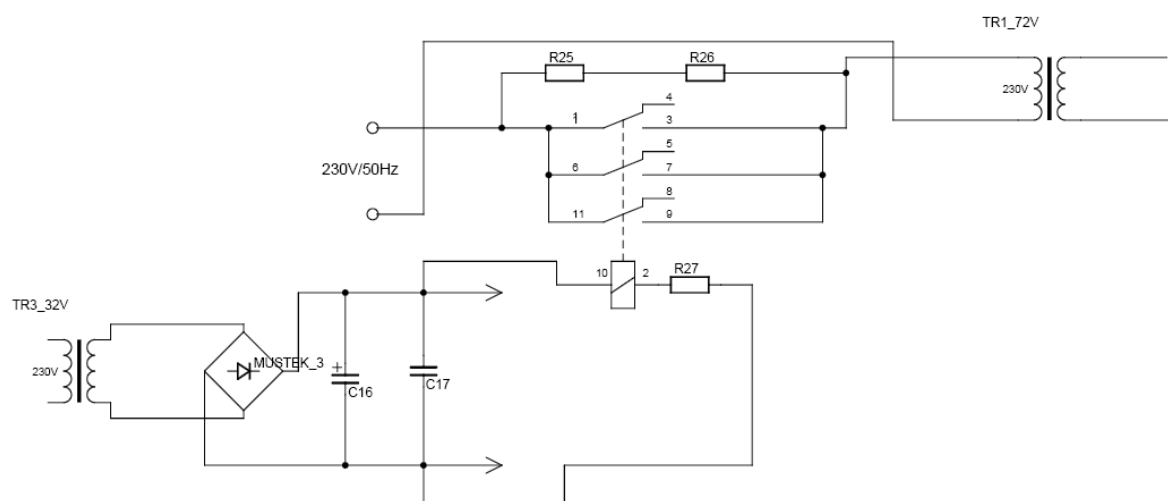




Obr. 24 - Zapojení proudové pojistky

#### 4.18 Zapínání zdroje

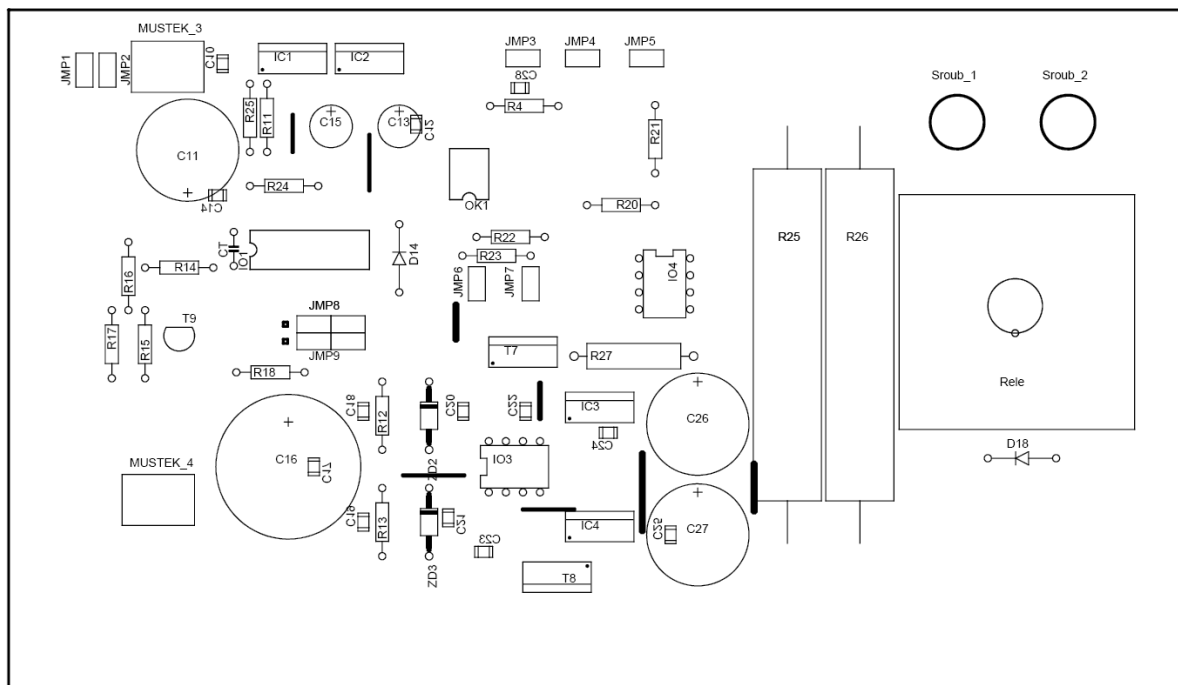
Při zapínání zdroje v laboratoři jsme měli problém s tím, že vyhazoval pojistky. V laboratoři jsou umístěny pojistky typu B na 16A, ty jsou konstruovány na zkratový proud okolo 7mi až 10ti násobku proudu jmenovitého. Proud který protéká při připnutí transformátorem je až 15ti násobek. To by se dalo vyřešit změnou jističe. To je ale nerealizovatelné. Museli jsme tento problém vyřešit jinak. Ve zdroji je umístěno relé. Nejprve se transformátor připíná na síť se dvěma sériově připojenými odpory 22Ω/10W. Tyto odpory omezí maximální proud při zapnutí. Ve chvíli kdy je na zdroji - Zdroj napětí pro Integrované obvody TL 071 a TL 072 napětí přibližně 40 V. Toto napětí přitáhne relé, přemostí oba rezistory a připojí transformátor již přímo k síti. Použití relé je na Obr. 25.



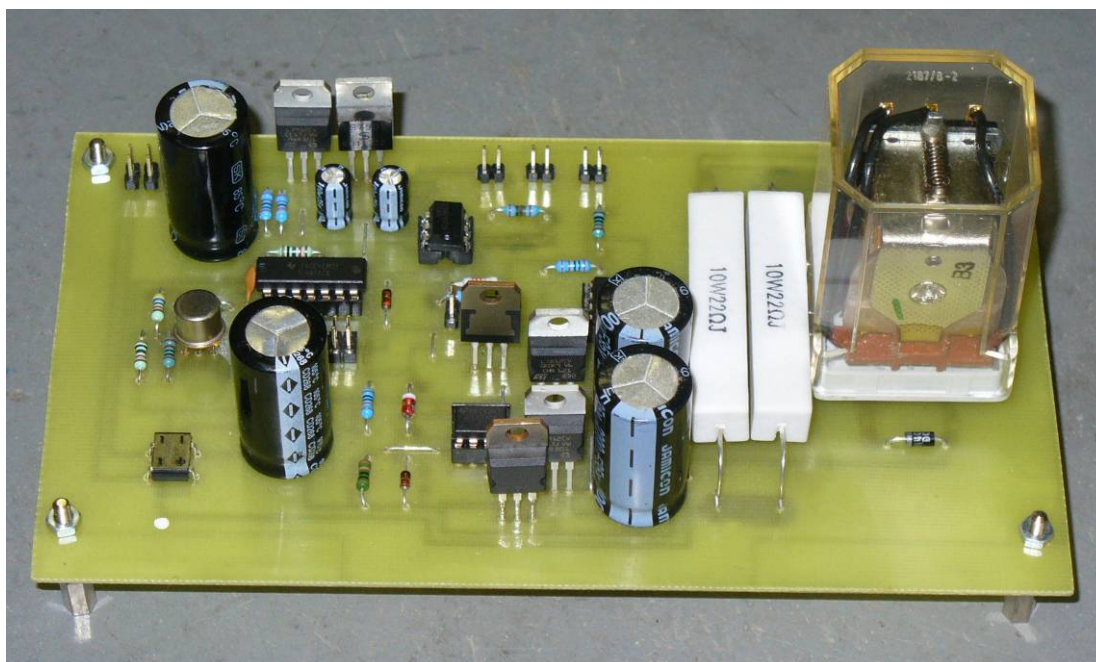
Obr. 25 - Zapojení relé, a odporů R25 a R26

## 5 KONSTRUKČNÍ PŘÍLOHA

Na Obr. 26 je rozpis součástek na řídicí desce. Jejich popis je v Příloha č.1. Deska plošného spoje je v Příloha č.2. Na Obr. 27 je vyrobená řídicí deska.



Obr. 26 - Rozmístění součástek na DPS – řídicí část



Obr. 27 - Řídicí deska

Na desce jsou ještě jumpery jako vstupy a výstupy z desky. Pro jednoduchost montáže a demontáže desky ze zdroje.

Seznam Jumperů :

- JMP 1.** napájení 32V střídavých (nezáleží na shodě pinů),
- JMP 2.** napájení 16V střídavých (nezáleží na shodě pinů),
- JMP 3.** svorka pro přívod velikosti výstupního napětí (zem vlevo),
- JMP 4.** potenciometr P1 (nezáleží na shodě pinů),
- JMP 5.** potenciometr P2 (nezáleží na shodě pinů),
- JMP 6.** svorka pro LED diodu D15 (nahore je anoda, dole je katoda),
- JMP 7.** svorka pro přívod napětí z měřícího odporu R\_MER,
- JMP 8.** propojení se spínacími tranzistory (řídící signál, - 12 V, 0 V, + 12 V) (shodný pin na řídící i na budící desce je ve schématu rozmístění součástek označen tečkou)
- JMP 9.** propojení se spínacími tranzistory (řídící signál, - 12 V, 0 V, + 12 V) (shodný pin na řídící i na budící desce je ve schématu rozmístění součástek označen tečkou)

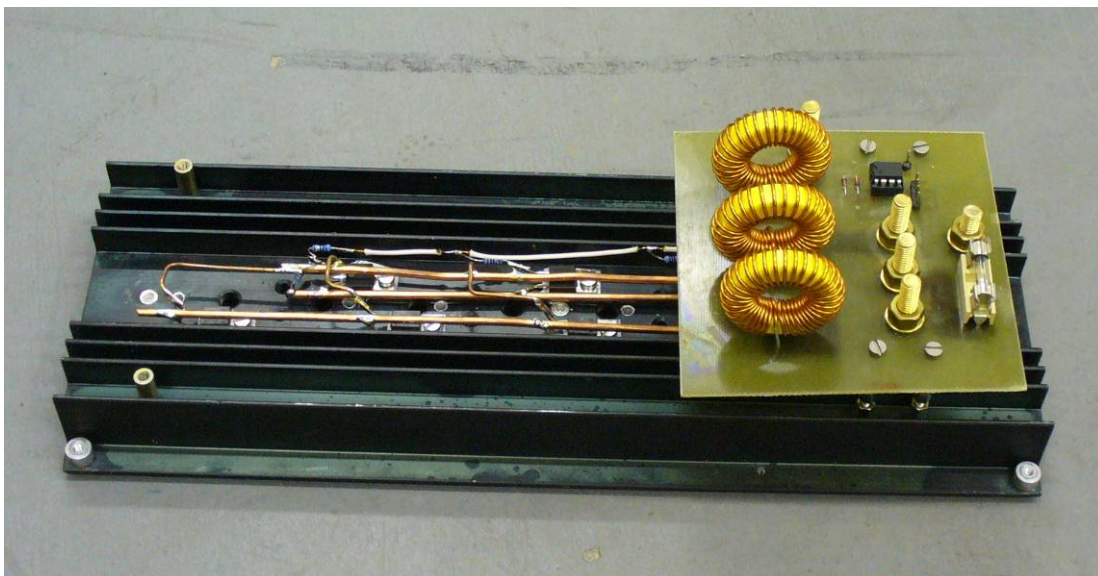
Všechny jumpery (JMP1 až JMP7) jsou propojeny dvoužilovými vodiči. Na Obr. 26 mají některé součástky popis obrácený. To značí, že součástka je umístěna ze strany vodivých cest. Jsou to keramické kondenzátory, které jsou v provedení SMD.

## **5.1 Spínací část**

Jak již bylo dříve řečeno, jsou ve zdroji dvě naprosto shodné spínací části. Ty jsou tvořeny trojicí spínacích tranzistorů, čtveřicí nulových diod. Tyto součástky jsou přidělány společně na jeden chladič a jsou propojeny měděnými vodiči.

Tranzistory jsou buzeny IO2A a IO2B. Tyto budící obvody jsou přidělány co nejbliže k tranzistorům, aby nedocházelo ke zpoždění a aby mezi budičem a tranzistory byly co nejkratší propojovací vodiče. Dále jsou ještě na desce s budícím IO umístěny vyhlazovací cívky.

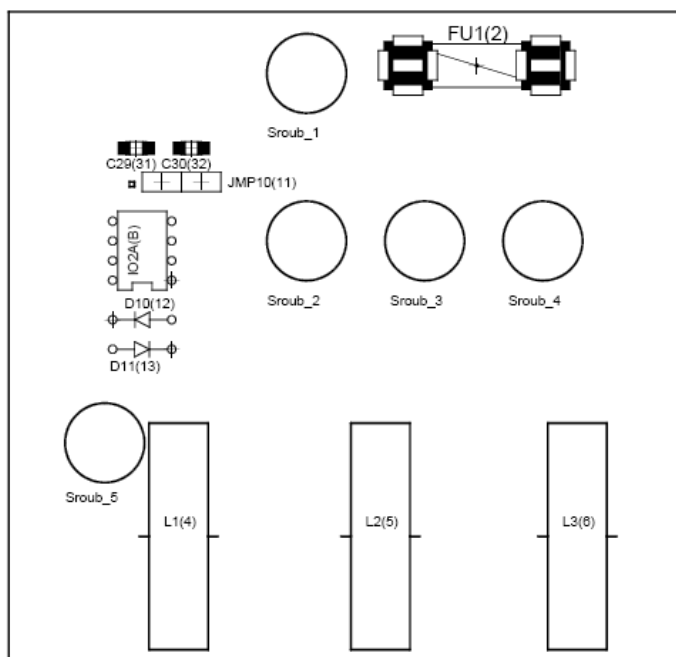
Přívody k jednotlivým součástkám jsou pomocí mosazných šroubů připevněných k desce. Cestky pro průchod proudu jsou ještě z důvodu splnění proudové hustoty pocínovány. Celá spínací část s chladičem je na Obr. 28.



Obr. 28 - Spínací část umístěná na chladiči

Na Obr. 29 je rozmístění součástek na desce. To, že jsou oba bloky naprosto shodné, značí popis součástek. Součástky jsou popsány dvojími čísly.

Deska řídicí části a deska spínacího bloku je propojena čtyřžilovým vodičem. Společné piny jsou na obrázku rozložení součástek označeny tečkou vedle jumperu.



Obr. 29 - Rozmístění součástek na DPS – spínací blok

Seznam šroubů :

**Šroub 1.** Přívod napětí od měřícího odporu R\_MER (připojen vodič),

**Šroub 2.** vývod od Drain – FET Tranzistoru k cívkám (bez vodiče),

**Šroub 3.** přívod k Source - FET tranzistoru (bez vodiče),

**Šroub 4.** Výstupní záporné napětí. Vývod na svorky výstupního napětí (-)  
(připojen vodič),

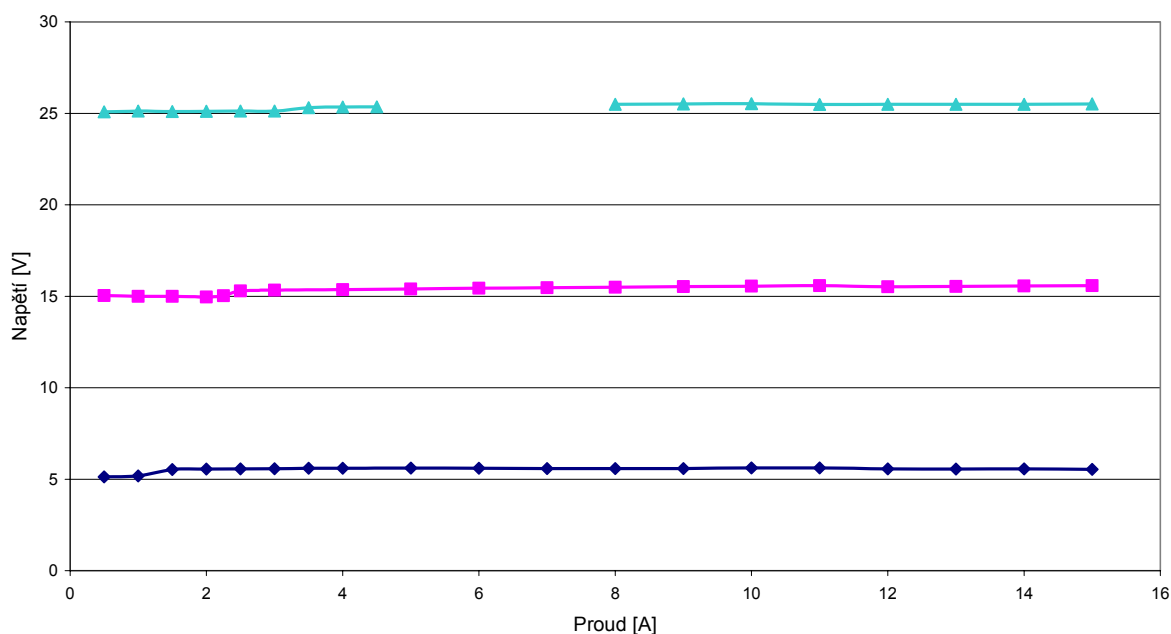
**Šroub 5.** Výstupní kladné napětí. Vývod na svorky výstupního napětí (+)  
(připojen vodič).

Deska plošného spoje je v Příloha č.3.

## 6 NAMĚŘENÉ HODNOTY

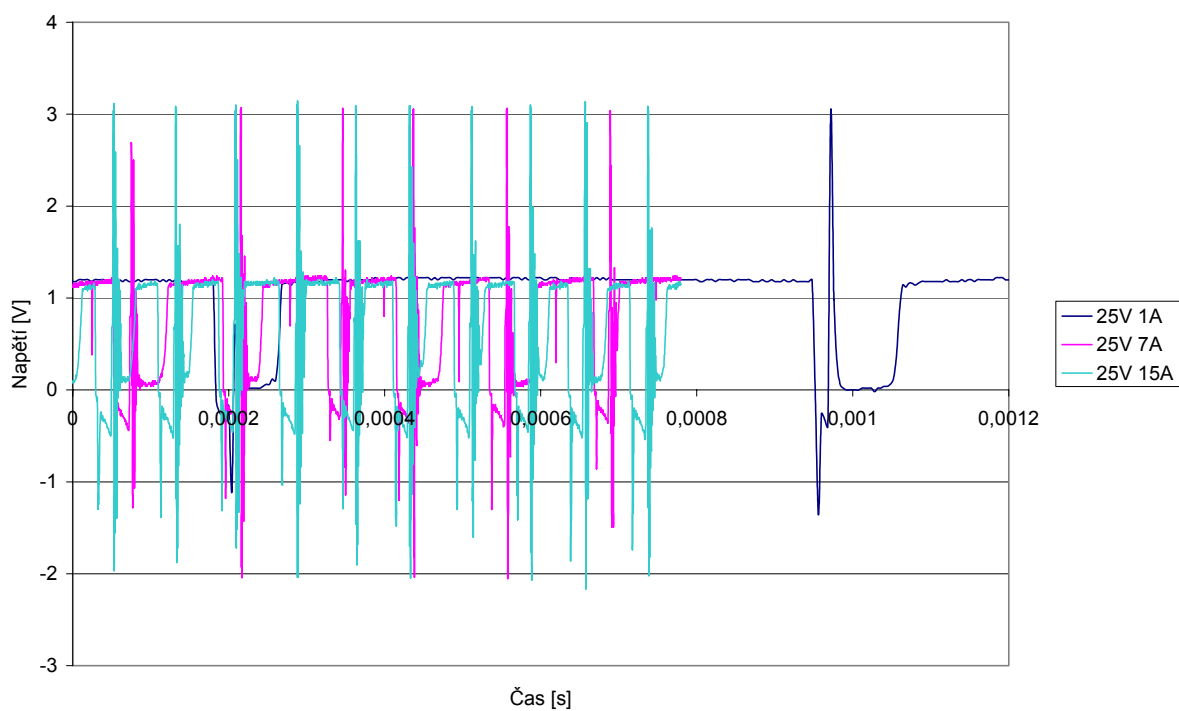
V závěrečném měření jsme prováděli měření zatěžovací charakteristiky. Všechny hodnoty jsme vynesli do grafu a ten je na Obr. 30. Při měření na rozsahu 25 V je vidět, že měřená řada je přerušena. To bylo z toho důvodu, že v tomto rozsahu jsme nedokázali zatěžovacím odpor zatížit zdroj tak, abychom mohli změřit požadované hodnoty.

Závislost napětí na proudu při  $U_{\text{výst}} = 5\text{V}, 15\text{V}$  a  $25\text{V}$

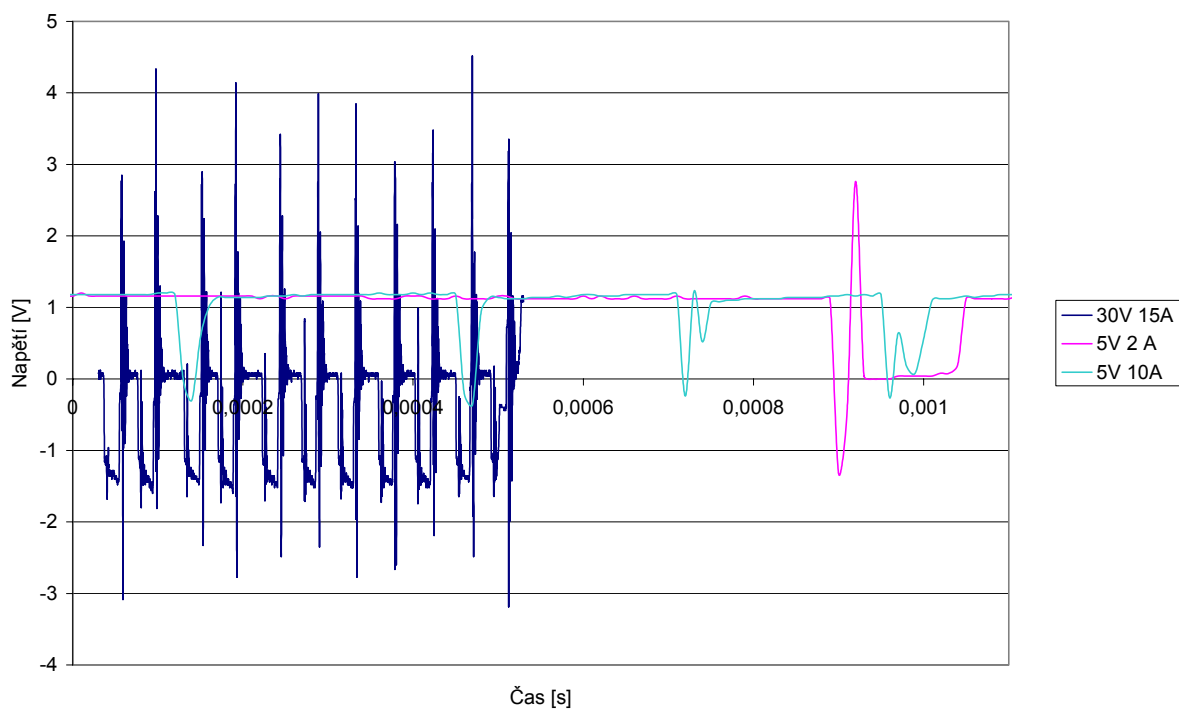


Obr. 30 - Graf závislosti proudu na napětí

Důležité také je, jak jsou spínány spínací tranzistory. Průběh těchto řídicích signálů je na Obr. 31, kde je spínací signál pro napětí 25 V a tři hodnoty proud 1 A, 7 A a 15 A a Obr. 32, kde je porovnání spínacích signálů pro 30 V a 15 A, 5 V a 2 A, 5 V a 10 A.



Obr. 31 - Průběh řídicího signálu při napětí 25 V a různých proudech



Obr. 32 - Průběh řídicího signálu pro různá napětí a proudy



## ZÁVĚR

Závěrem této práce je navržená a vyrobená řídicí a výkonová část laboratorního zdroje.

Oproti původnímu návrhu se řídicí část opticky hodně zjednodušila. Místo tří DPS je teď řídicí část jen na jedné DPS. Je to z důvodu použití integrovaných obvodů. Hlavně pak díky použití integrovaného stabilizátoru. Jelikož je regulace až v sekundáru, je stále použit velký a objemný transformátor. Z důvodů vysokého spínacího kmitočtu se ale hodně zmenší filtrační cívka.

Výběr filtračních součástek byl správný. V celém rozsahu měření jsem neměl problém s kolísáním napětí nebo proudu při zatěžování. I výběr spínacích tranzistorů, nulových diod a jejich dimenzování byl v pořádku. Ve chvíli maximálního zatěžování jednoho bloku, se chladiče příliš nezahřály.

Řešení řízení napětí od nulové hodnoty bylo také navrženo dobře. Regulace napětí byla bezproblémová v celém rozsahu.

Problém při výběru vhodné součástky ale zřejmě nastal při vybírání integrovaného stabilizátoru. Při měření jsem si ověřil, že zdroj nemá takové vlastnosti jaké by jsem u něho požadoval. Při měření zatěžovacích charakteristik jsem zjistili, že při zatěžování zdroj neudrží stálé napětí na výstupu. Jak je vidět z grafu, výstupní napětí při zatěžování v krátkém intervalu stoupne o přibližně 0,5 V a pak se drží na této hodnotě. Tento interval se se zvyšujícím výstupním napětím posouvá k vyšší hodnotě proudu.

Dalším důležitým prvkem je proudová pojistka. Ta ale nefunguje. Zapojení proudové pojistky je konstruováno dle doporučeného zapojení od výrobce. Ani v případě, že jsem na piny 14 a 13 přivedl napětí z cizího zdroje a tím simulovali překročení povoleného proudu tekoucího přes měřící odporu, se my nepovedlo proudovou pojistku uvést do provozu.

Proto volba integrovaného stabilizátoru TL 497A zřejmě nebyla vhodná. V novém návrhu by bylo potřeba tuto součástku nepoužít a místo ní vybrat jinou.

Návrh ostatních částí zdroje byl funkční a ty pracují tak jak by měly.

Celkově by zdroj nemohl být využíván hlavně z důvodu nefungující proudové pojistky. Ta je u tohoto zdroje nezbytná. A dále by byl problém se zvýšením výstupního napětí při zatěžování.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Rozměry EI plechů .....	13
Obr. 2 - Jádro složené z EI plechů .....	14
Obr. 3 - Základní rozdělení měničů .....	16
Obr. 4 - Náhradní schéma měniče a průběhy napětí a proudů .....	19
Obr. 5 - Přehled základních zapojení spínaných stabilizátorů .....	23
Obr. 6 - Blokové schéma navrhovaného zdroje .....	24
Obr. 7 - Integrovaný obvod TL 497A .....	25
Obr. 8 - Vnitřní uspořádání IO TL 497A a doporučené zapojení dle výrobce .....	26
Obr. 9 - Laboratorní zdroj - pohled z předu .....	28
Obr. 10 - Laboratorní zdroj - pohled z vrchu .....	29
Obr. 11 - Schéma usměrňovacích můstků, vyhlazovacích C a měřicího odporu .....	32
Obr. 12 - Vybíjení kondenzátorů před odpory .....	34
Obr. 13 - Schématická značka a pouzdro tranzistoru IRF 9640 .....	36
Obr. 14 - Výstupní charakteristiky tranzistoru IRF 9640 .....	37
Obr. 15 - Závislost odporu RDS na teplotě .....	37
Obr. 16 - Maximální bezpečná pracovní oblast .....	38
Obr. 17 - Závislost povoleného maximálního proudu na teplotě tranzistoru .....	38
Obr. 18 - Tranzistor MOSFET s indukovaným kanálem .....	39
Obr. 19 - Schématická značka a pouzdro diody BYV 29/500 .....	41
Obr. 20 - Napájení IO a děliče R3, P1 a R4 .....	42
Obr. 21 - Zdroj napájení pro TL 071 a TL 072 .....	44
Obr. 22 - Integrované obvody TL 071 a TL 072 .....	46
Obr. 23 - Zapojení budičů FET .....	47
Obr. 24 - Zapojení proudové pojistky .....	49
Obr. 25 - Zapojení relé, a odporů R25 a R26 .....	50
Obr. 26 - Rozmístění součástek na DPS – řídicí část .....	51
Obr. 27 - Řídicí deska .....	51
Obr. 28 - Spínací část umístěná na chladiči .....	53
Obr. 29 - Rozmístění součástek na DPS – spínací blok .....	53
Obr. 30 - Graf závislosti proudu na napětí .....	55
Obr. 31 - Průběh řídicího signálu při napětí 25 V a různých proudech .....	56
Obr. 32 - Průběh řídicího signálu pro různá napětí a proudy .....	56

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Odhad účinnosti transformátoru.....	12
Tabulka 2 - Tabulka hodnot časů pro různé hodnoty rezistorů .....	26
Tabulka 3 - Doporučené pracovní podmínky .....	28
Tabulka 4 - Tabulka maximálních hodnot tranzistoru IRF 9640 .....	36
Tabulka 5 - Maximální hodnoty diody BYV29/500 .....	42
Tabulka 6 - Základní vlastnosti tranzistorů BD 243C a BD 244C.....	45
Tabulka 7 - Tabulka hodnot IO TL 071 a TL 072.....	46
Tabulka 8 - Základní vlastnosti optočlenu 4N25 .....	48

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje I. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 352 s.  
ISBN 80-86056-02-3
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje II. 2. vyd. Praha: BEN, 1997. 352 s.  
ISBN 80-86056-03-1
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje III. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 349 s.  
ISBN 80-86056-56-2
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Lineární napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN, 2001. 144 s.  
ISBN 80-7300-002-4
- [5] STENGL Jens Peer. TIHANYI, Jenő. Výkonové tranzistory MOSFET. 1. vyd. Praha: BEN, 1999. 192 s. ISBN 80-86056-02-3
- [6] BEZOUŠEK, Pavel. SCHEJBAL, Vladimír. ŠEDIVÝ, Pavel. Elektrotechnika. 1. vyd. Univerzita Pardubice. 2003. 214 s. ISBN 80-7194-621-6
- [7] FOIT, Julius. HUDEC, Lubomír. Součástky moderní elektrotechniky. 1. vyd. Vydavatelství ČVUT. 1996. 289 s. ISBN 80-01-01409-6
- [8] HUSÁK, Miroslav. Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku - Přednášky. 1. vyd. Nakladatelství ČVUT. 2006. 159 s. ISBN 80-01-03398-8
- [9] HUSÁK, Miroslav. JIRÁSEK, Lubor. KREJČÍŘÍK, Alexandr. Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku - Cvičení. 1. vyd. Nakladatelství ČVUT. 2006. 174 s.  
ISBN 80-01-03397-X
- [10] Datasheet IRF 9640, [online] c2009, aktualizováno 22.1.2009.  
Dostupné z: <<http://www.ges.cz/sheets/i/irf9640.pdf>>
- [11] Datasheet BYV 29/500, [online] c2009, aktualizováno 22.1.2009.  
Dostupné z: <<http://www.ges.cz/sheets/b/byv29.pdf>>
- [12] Datasheet KBPC 5006, [online] c2009, aktualizováno 29.1.2009.  
Dostupné z: <[http://www.ges.cz/sheets/k/kbpc1\\_50.pdf](http://www.ges.cz/sheets/k/kbpc1_50.pdf)>
- [13] Datasheet BC 243C, [online] c2009, aktualizováno 29.1.2009.  
Dostupné z: <<http://www.ges.cz/sheets/b/bd244c.pdf>>
- [14] Datasheet BC 24AC, [online] c2009, aktualizováno 29.1.2009.  
Dostupné z: <<http://www.ges.cz/sheets/b/bd244c.pdf>>

[15] Datasheet 4N25, [online] c2009, aktualizováno 22.1.2009.

Dostupné z: <<http://www.ges.cz/sheets/4/4n25a.pdf>>

[16] Datasheet BF 257, [online] c2009, aktualizováno 5.3.2009.

Dostupné z: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/CEMI/mXyzvqwu.pdf>>

[17] Datasheet DB106, [online] c2009, aktualizováno 22.1.2009.

Dostupné z: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/bytes/DB104.pdf>>

[18] Tranzistor MOSFET, [online] c2009, aktualizováno 15.5.2009.

Dostupné z : <[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lateral\\_mosfet.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lateral_mosfet.svg)>



## **SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č.1 - Seznam použitých součástí

Příloha č.2 - DPS - Řídící deska

Příloha č.3 - DPS - Spínací deska

Příloha č.4 - Schéma

## Příloha č.1

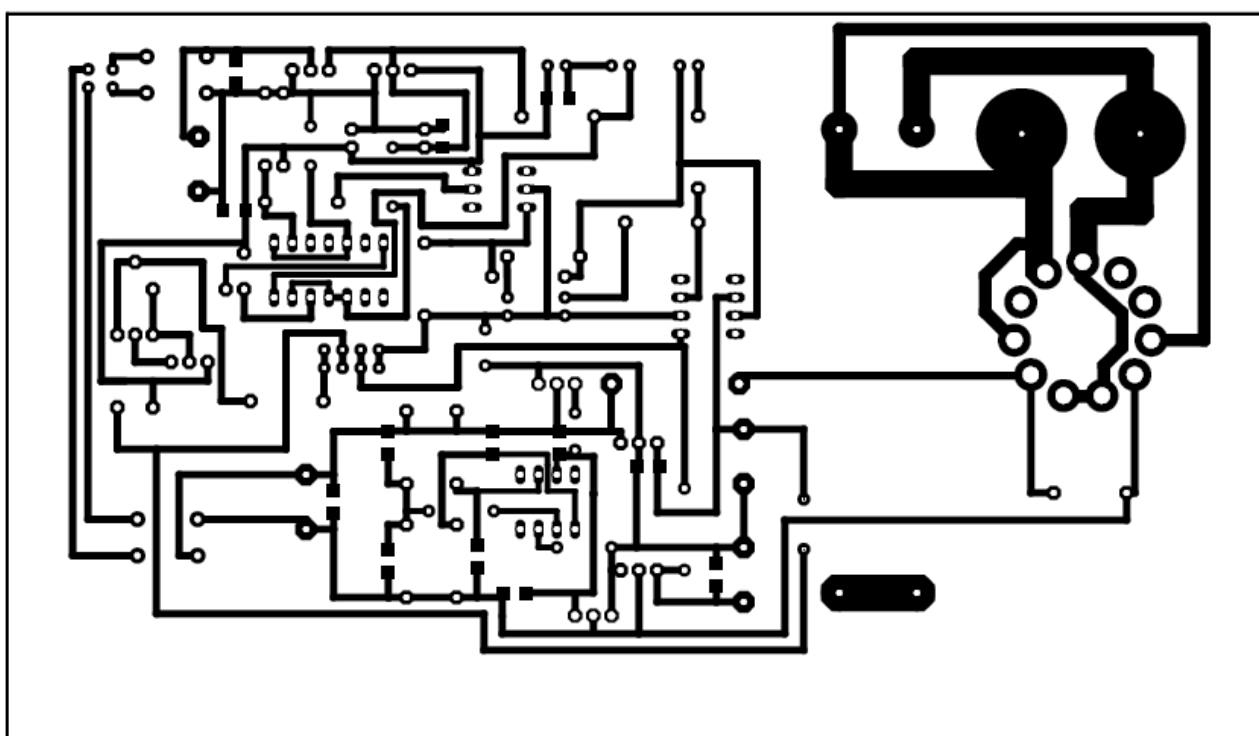
## Seznam použitých součástek

Pozice	Hodnota	Počet
<b>Kondenzátory</b>		
C1 - C8	4,7mF/63V	8 x
C9	603 $\mu$ F	1 x
C10, C12, C14, C17 - C25, C28, C29 – C32	100 nF	13 x
C11, C26, C27	2,2 mF/63V	3 x
C13, C15	100 $\mu$ F/63V	2 x
C16	2,2 mF/63 V	1 x
C <sub>T</sub>	300 nF	1 x
<b>Rezistory</b>		
R1, R2	10 k $\Omega$ / 3W	2 x
R3, R19, R24	1 k $\Omega$	3 x
R4, R20	1,2 k $\Omega$	1 x
R5 - R10	10 $\Omega$	6 x
R11	9 k $\Omega$	1 x
R12, R13	100 k $\Omega$	2 x
R14, R15, R16, R18, R23	10 k $\Omega$	6 x
R17	8,2 k $\Omega$	1 x
R21	2 k $\Omega$	1 x
R22	220 $\Omega$	1 x
R25, R26	22 $\Omega$	2 x
R27	150 $\Omega$	1 x
<b>Zenerovy diody</b>		
ZD1	4,7 V	1 x
ZD2, ZD3	10 V	2 x
<b>Diody</b>		
D1 - D8	BYV29/500	8 x
D9 - D12, D14	1N4148	5 x
D15	LED - zelená	1 x
D16, D17, D18	1N4007	3 x
<b>Potenciometry</b>		
P1	47 k $\Omega$	1 x
P2	50 k $\Omega$	1 x
<b>Stabilizátory</b>		
IC1, IC4	7912	2 x

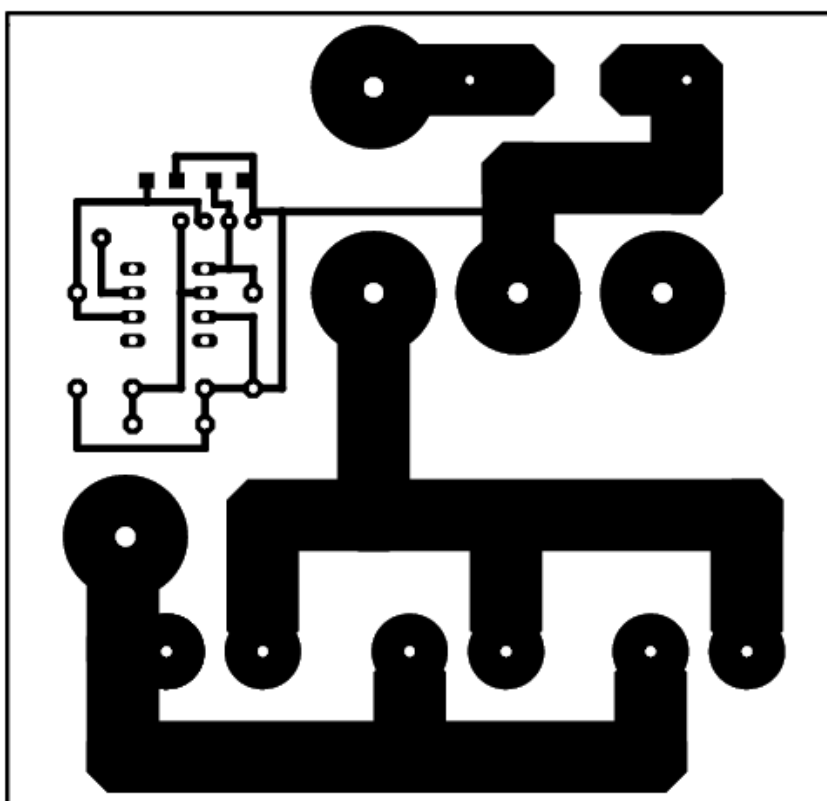


<b>Pozice</b>	<b>Hodnota</b>	<b>Počet</b>
IC2	7909	1 x
IC3	7812	1 x
Integrované obvody		
IO1	TL 497A	1 x
IO2A, IO2B	TL 072	1 x
IO3, IO4	TL 071	2 x
Tranzistory		
T1 - T6	IRF 9640	6 x
T7	BC 243C	1 x
T8	BC 244C	1 x
T9	BF 257	1 x
Můstky		
Mustek_1, Mustek_2	KBPC 5006	2 x
Mustek_3, Mustek_4	DB106	2 x
Optočlen		
OK1	4N25	1 x
Cívky		
L1 - L6	80 $\mu$ H	6 x
Jumpery		
JMP1 - JMP7	Jumper (2piny)	7 x
JMP8, JMP9	Jumper (4piny)	2 x

Příloha č.2



Příloha č.3



# Příloha č.4

