

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Rekonstrukce napájecího zdroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří SMOLÍK**  
Osobní číslo: **E10B0073K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Rekonstrukce napájecího zdroje**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Prostudujte možnosti obvodových zapojení regulovatelných napájecích zdrojů.
2. Navrhněte schéma zapojení regulovatelného zdroje s maximálním výstupním napětím 30 V a proudem 10 A.
3. Navrhněte plošný spoj, zdroj zkonstruuje.
4. Parametry zdroje ověřte měřením.

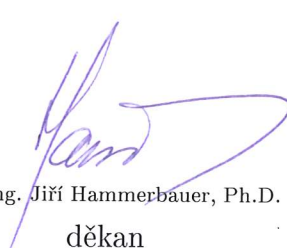


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

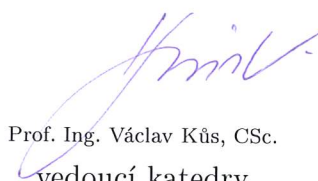
**Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.**

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je rozdělena na pět hlavních částí. V první, rešeršní části, jsou popsány jednotlivé možnosti konstrukcí stejnosměrných zdrojů, popsán princip fungování jednotlivých částí zdroje, uvedena jednotlivá zapojení a možnosti aplikací. V druhé části je řešen návrh zapojení, výpočty součástek, návrh a výroba desky plošných spojů. Ve třetí části je popsáno sestavení zdroje. Ve čtvrté je zapsáno zjištění, během orientační zkoušky zdroje. V páté části je popsán postup měření. V poslední části jsou vyhodnoceny údaje z měření a vyvozeny závěry na základě naměřených hodnot.

## **Klíčová slova**

Stabilizovaný zdroj, stabilizátor, usměrňovač, transformátor, EAGLE, návrh DPS, tranzistor, proudový posilovač, omezení proudu, 78xx, 79xx, UA723, Zenerova dioda, výroba DPS, zatěžovací charakteristika, TL431, L200, LM317, parametrický stabilizátor, násobič napětí, Graetzův můstek, vnitřní odpor zdroje

## **Abstract**

This bachelor thesis is divided into five main parts. The first part, search part, describes design possibilities of different direct current power supplies, describe principles of operation of individual parts, shows particular designs and applications. The second part is design diagrams, calculations of components, design and manufacture of printed circuit boards. The third part describes assembly of power supply. In the fourth part are written findings during indicative test. The fifth section describes the measurement procedure. The last part consist of evaluations of measured data and conclusion based on measured values.

## **Key words**

Stabilised power supply, stabilisator, rectifier, transformator, EAGLE, PCB designing, transistor, current booster, current limitation, 78xx, 79xx, UA723, Zener diode, making of PCB, load characteristics, TL431, L200, LM317, parametric stabilisator, voltage multiplier, Graetz bridge, internal resistance of power supply

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 14.6.2013

Jiří Smolík

## **Poděkování**

Velmi rád bych touto cestou velice poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Zdeňkovi Kubíkovi, Ph.D. za velmi vstřícný přístup a také za značnou pomoc při nalézání příčin potíží se zdrojem během měření v laboratoři. V neposlední řadě také za velmi cenné profesionální rady a postřehy, které mi objasnily příčiny potíží, kterých se napříště budu moci vyvarovat.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VLASTNOSTI, PRINCIP A SOUČÁSTI NAPÁJECÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>12</b>
1.1 Síťový transformátor .....	12
1.2 USMĚRŇOVAČE A JEJICH ZAPOJENÍ .....	20
1.2.1 Jednocestný usměrňovač .....	20
1.2.2 Dvoucestný usměrňovač .....	25
1.2.3 Můstkový usměrňovač – Graetzův můstek .....	28
1.2.4 Zatěžovací charakteristiky usměrňovačů .....	29
1.2.5 Násobiče napětí .....	30
1.3 STABILIZÁTORY .....	33
1.3.1 Parametrický stabilizátor – se Zenerovou diodou .....	34
1.3.2 Zpětmovazební stabilizátory .....	37
1.3.3 Stabilizátory 78xx, 79xx - s pevným napětím .....	38
1.3.4 Stabilizátor LM317 – s nastavitelným napětím .....	40
1.3.5 Stabilizátor TL431 .....	41
1.3.6 Stabilizátor 723 s nastavitelným napětím a proudovým omezením .....	41
1.3.7 Stabilizátor L200 s nastavitelným napětím a proudem .....	43
1.3.8 Ochrany stabilizátorů .....	43
1.3.9 Proudové posílení výstupu .....	44
1.3.10 Externí nadproudová ochrana .....	45
<b>2 NÁVRH NAPÁJECÍHO ZDROJE</b> .....	<b>46</b>
2.1 NÁVRH ZAPOJENÍ OBECNĚ .....	46
2.2 NÁVRH SCHÉMATU ZAPOJENÍ .....	48
2.3 NÁVRH DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ – DPS .....	59
2.4 VÝROBA PLOŠNÉHO SPOJE .....	63
2.4.1 Lakování desky .....	65
2.4.2 Osvit desky .....	66
2.4.3 Vytváření desky .....	66
2.4.4 Kontrola a oprava .....	67
2.4.5 Leptání desky .....	67
2.4.6 Očištění .....	69
2.4.7 Kontrola .....	69
2.4.8 Lakování .....	70
2.4.9 Plošné cínování .....	70
2.4.10 Vrtání desky .....	70
2.4.11 Pájení a osazení desky .....	70
2.4.12 Očištění od tavidla .....	72
2.4.13 Lakování ochranným lakem .....	73
<b>3 SESTAVENÍ ZDROJE</b> .....	<b>73</b>
3.1.1 Montáž desky do skříně .....	73
3.1.2 Sestavení výkonových prvků .....	73
3.1.3 Umístění potenciometrů .....	75
3.1.4 Umístění síťového vypínače .....	76
3.1.5 Umístění voltmetru a ampérmetru .....	77
3.1.6 Umístění výstupních svorek .....	77
3.1.7 Umístění transformátorů .....	77

---

3.1.8	<i>Umístění kontrolky napětí z usměrňovacích můstků .....</i>	<i>77</i>
3.1.9	<i>Propojení jednotlivých komponent.....</i>	<i>77</i>
<b>4</b>	<b>ORIENTAČNÍ ZKOUŠKA ZDROJE .....</b>	<b>78</b>
<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ ZDROJE.....</b>	<b>78</b>
5.1	MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY .....	79
5.2	URČENÍ VNITŘNÍHO ODPORU ZDROJE .....	79
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>83</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>I</b>

## Seznam symbolů a zkratek

$f$ .....	Kmitočet
$U$ .....	Elektrické napětí
$u_i$ .....	Indukované napětí
$\phi$ .....	Magnetický tok
$N$ .....	Počet závitů
$p$ .....	Převod
$S$ .....	Zdánlivý výkon
$I$ .....	Elektrický proud
$X$ .....	Reaktance
$R$ .....	Odpor
$l$ .....	Délka vodiče
$\rho$ .....	Měrný odpor
$P_z$ .....	Ztrátový výkon
$R_z$ .....	Ztrátový odpor
$\Delta U$ .....	Úbytek napětí
$C$ .....	Kapacita
$t$ .....	Čas
$U_{ef}$ .....	Efektivní hodnota napětí
$u$ .....	Časový průběh napětí
$q$ .....	Náboj
$GND$ .....	Zemní svorka
$OUT$ .....	Výstupní svorka
$IN$ .....	Vstupní svorka
$ADJUST$ .....	Svorka pro nastavení
$H_{FE}$ .....	Proudový zesilovací činitel
$EAGLE$ .....	Easy Applicable Graphics Layout Editor



## Úvod

Téma „Rekonstrukce napájecího zdroje“ jsem si vybral, protože mám praktické zkušenosti s konstrukcí již několika napájecích zdrojů a nabíječek olověných akumulátorů. S různými konstrukcemi zdrojů se setkáváme každý den v mnoha elektronických zařízeních, proto mi toto téma přijde velice zajímavé a bez napájecích zdrojů by nemohla pracovat většina elektroniky, kterou denně používáme. Denně se setkáváme například s nabíječkou pro mobilní telefon, zdrojem k notebooku a v PC, nebo také se zdrojem používaným pro ovládací elektroniku v elektrickém kotli nebo klimatizaci.

Obsah práce je dělen do dvou hlavních částí, kde první část se zabývá teoretickými poznatky ohledně používaných zapojení při konstrukcích zdrojů a popisuje principy jednotlivých stěžejních částí. Jedná se o souhrn teoretických poznatků, které budou využity při návrhu konkrétního zapojení. Je zde popsán princip fungování transformátoru. Je zde popsán princip fungování jednotlivých usměrňovačů a jsou zde shrnuty vlastnosti jednotlivých zapojení. Obsahem další části je způsob filtrace vstupního napětí – velikosti filtračních kapacit a jejich vliv na zvlnění napětí. Druhá část se zabývá praktickým návrhem stejnosměrného regulovatelného lineárního zdroje s rozsahem 0 – 30 V a maximálním odebíraným proudem 10 A. Řeší se zde návrh pouze elektronické části zdroje, protože transformátory a skříně zdroje jsou dány. Transformátory jsou také stále plně funkční, a jelikož jde o rekonstrukci zdroje se shodnými parametry, jaké měl původní zdroj, plně vyhovují z hlediska proudových a napěťových požadavků. Během návrhu zdroje bude třeba řešit návrh usměrňovače, velikost kapacity vyhlazovacího kondenzátoru, volbu správného typu stabilizátoru s potřebným proudovým posílením, jelikož se stabilizátory na výstupní proud 10 A nevyrobějí. Návrh proudového posílení musí být dostatečně dimenzován, jelikož zdroj bude použit v laboratoři, kde je vysoké riziko, že bude některým ze studentů zapojen do zkratu – výkonové části musí vydržet špičkový proud, než zareaguje nadproudová ochrana. Bude tedy nutné správně vypočítat rezistory pro nastavení proudové ochrany zdroje, aby nemohlo dojít k přetížení a destrukci některé ze součástek.

# 1 Vlastnosti, princip a součásti napájecích zdrojů

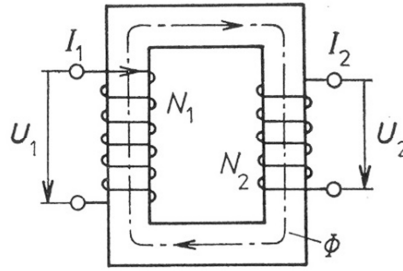
Napájecí zdroje se dají rozdělit na dvě hlavní skupiny: Lineární napájecí zdroje obsahující klasický síťový transformátor a Spínané napájecí zdroje, které transformátor v konstrukci neobsahují. Změna napětí je řešena pomocí kapacit a indukčností. Tato práce se zabývá pouze lineárními napájecími zdroji, jelikož se rekonstrukce týká právě tohoto druhu zdroje.

## 1.1 Síťový transformátor

Transformátor je vlastně elektrickým strojem, který ale neobsahuje žádné pohyblivé části. Součástí transformátoru je jádro, které zpravidla tvoří FeSi plechy, případně ferit (používá se u vysokofrekvenčních transformátorů a transformátorů typu toroid), které tvoří magnetický obvod, primární vinutí, na které přivádíme napájecí napětí, a sekundární vinutí, které tvoří výstup a z nějž odebíráme proud do připojených obvodů. Sekundárních vinutí můžeme na transformátoru mít i několik, případně můžeme mít sekundární vinutí se středovým vývodem nebo odbočkami pro různé úrovně výstupního napětí. Princip transformátoru by se dal popsat takto: Po přivedení napájecího napětí  $U_1$  na primární vinutí transformátoru je průchodem proudu  $I_1$  o frekvenci  $f$  vyvolán v jádře transformátoru magnetický tok  $\phi$ , který se uzavírá v primárním i sekundárním vinutí. Vlivem tohoto magnetického toku pak dochází v obou dvou vinutích k indukci napětí, jemuž odpovídá vztah:

$$u_i = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N = N \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1)$$

Kde:  $f$  je frekvence,  $N$  je počet závitů daného vinutí,  $u_i$  je indukované napětí a  $\phi$  je magnetický tok. Díky tomu se pak objeví napětí i na sekundárním vinutí.



Obrázek 1.1 – Princip fungování ideálního transformátoru [15]

Převod transformátoru se dá spočítat jako:

$$p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N_1}{4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot N_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.2)$$

Kde:  $p$  je převod,  $f$  je frekvence,  $\phi$  je magnetický tok,  $u_{i1}$  je indukované napětí v primárním vinutí,  $u_{i2}$  je indukované napětí v sekundárním vinutí,  $N_1$  je počet závitů na primárním vinutí a  $N_2$  je počet závitů na sekundárním vinutí. Po vykrácení nám vyjde vztah:

$$p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1.3)$$

Jelikož je indukované napětí ve vinutí téměř shodné s velikostí svorkového napětí, dá se převod vyjádřit také vztahem:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.4)$$

Kde:  $U_1$  je svorkové napětí na primárním vinutí a  $U_2$  je svorkové napětí na sekundárním vinutí.

Pokud bychom uvažovali ideální transformátor, tak by se zdánlivý výkon rovnal zdánlivému výkonu a platily by vztahy:

$$S_1 = S_2 \quad (1.5)$$

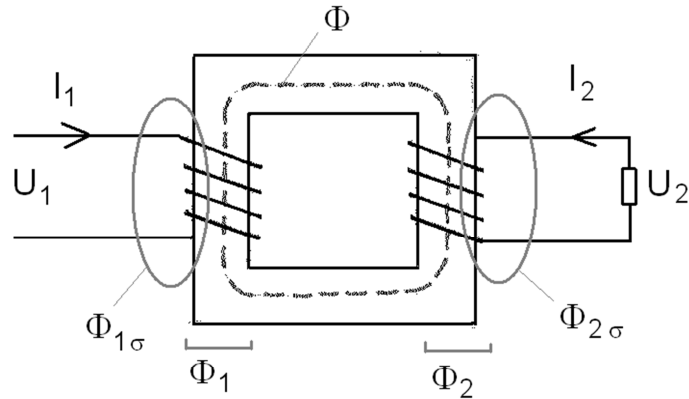
$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (1.6)$$

Z uvedených vztahů nám po dosazení vyplývá kompletní vztah pro převod:

$$p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \doteq \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.7)$$

Kde:  $p$  je převod,  $u_{i1}$  je indukované napětí na primárním vinutí,  $u_{i2}$  je indukované napětí na sekundárním vinutí,  $N_1$  je počet závitů na primárním vinutí,  $N_2$  je počet závitů na sekundárním vinutí,  $U_1$  je svorkové napětí na primárním vinutí,  $U_2$  je svorkové napětí na sekundárním vinutí,  $I_1$  je proud tekoucí primárním vinutím a  $I_2$  je proud tekoucí sekundárním vinutím.

Všechny výše uvedené vztahy ale platí pouze v případě, kdy se magnetický tok uzavírá pouze přes jádro. V praxi tomu tak ale není a proto je nutné počítat u skutečného transformátoru ještě s rozptylovými magnetickými toky, které se uzavírají přes okolní prostředí, nejčastěji vzduch. Schematické zobrazení rozptylových magnetických toků je znázorněno na obrázku *Obrázek 1.2*.



$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{1\sigma} \qquad \Phi_2 = \Phi + \Phi_{2\sigma}$$

Obrázek 1.2 – Magnetické toky v reálném transformátoru [16]

Platí, že magnetický tok  $\phi$  je úměrný proudu  $I$ ,  $\phi = L \cdot I$ . Rovněž platí, že každé indukčnosti  $L$  odpovídá induktivní reaktance  $X = \omega \cdot L$ . Z těchto dvou závislostí vyplývá, že každý magnetický tok  $\phi$  má přiřazenou rovněž reaktanci  $X$ . Z uvedeného tedy odvodíme, že hlavnímu magnetickému toku  $\phi_H$  odpovídá hlavní reaktance  $X_H$ , rozptylovému toku primárního vinutí  $\phi_{\sigma 1}$  rozptylová reaktance  $X_{\sigma 1}$  a rozptylovému toku sekundárního vinutí  $\phi_{\sigma 2}$  rozptylová reaktance  $X_{\sigma 2}$ .

Vinutí transformátoru je navinuto z vodiče s délkou  $l$ , který má průřez  $S$ , a měrný odpor  $\rho$ . Odpor primárního vinutí můžeme tedy vyjádřit vztahem:

$$R_1 = \rho \cdot \frac{l_1}{S_1} \qquad (1.8)$$

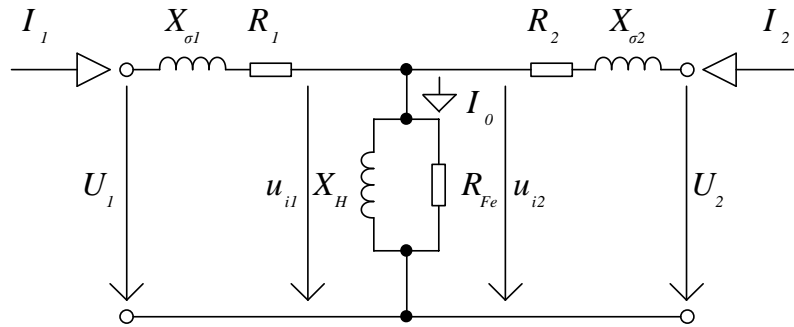
A k tomu analogicky odpor sekundárního vinutí:

$$R_2 = \rho \cdot \frac{l_2}{S_2} \qquad (1.9)$$

V magnetickém jádru transformátoru vznikají ztráty, které se projevují ztrátovým výkonem  $P_z$ . Ztrátovému výkonu potom odpovídá ztrátový odpor  $R_z$ , což je patrné z následujícího vztahu:

$$P_z = \frac{u_i^2}{R_z} \quad (1.10)$$

Transformátor tedy můžeme znázornit náhradním schématem:



Obrázek 1.3 - Náhradní schéma transformátoru [2]

Z uvedeného schématu plyne, že  $u_{i1} = u_{i2}$ . Proto platí pouze pro transformátor s převodem  $p = 1$ . Aby bylo možno toto schéma aplikovat i na transformátor s převodem jiným, než 1, je nutné přepočítat veličiny z jedné strany na druhou. Při přepočítávání sekundární strany na primární se zavádějí přepočtené veličiny. Sekundární strana se označuje indexem 2 a primární strana indexem 1. Jelikož se musejí rovnat indukovaná napětí, je sekundární napětí přepočítané na primární stranu dáno vztahem:

$$u_{i1} = u_{i21} \quad (1.11)$$

Z již výše uvedeného vztahu pro převod, sice  $p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{N_1}{N_2} \doteq \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$ , vyplývá, že:

$$p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{u_{i21}}{u_{i2}} \quad (1.12)$$

Takže pro  $u_{i21}$  bude platit vztah:

$$u_{i21} = p \cdot u_{i2} \quad (1.13)$$

Analogicky pro ostatní veličiny:

$$p = \frac{U_{21}}{U_2} = \frac{I_2}{I_{21}} \quad (1.14)$$

A z toho vyplývající vztah pro přepočet napětí:

$$U_{21} = p \cdot U_2 \quad (1.15)$$

A také pro přepočet proudu:

$$I_{21} = \frac{I_2}{p} \quad (1.16)$$

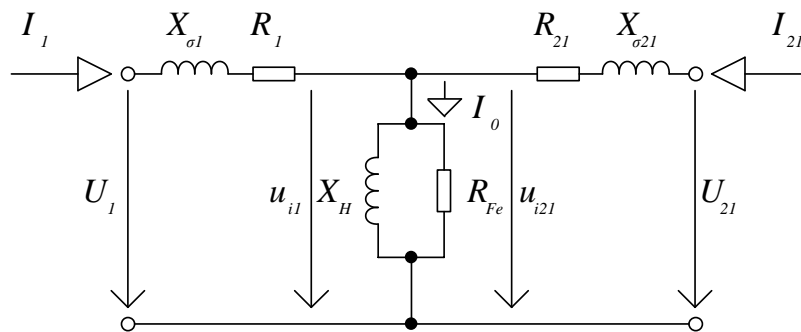
Přepočítaný odpor je dán vztahem:

$$R_{21} \frac{U_{21}}{I_{21}} = \frac{p \cdot U_2}{\frac{I_2}{p}} = p^2 \cdot \frac{U_2}{I_2} = p^2 \cdot R_2 \quad (1.17)$$

Přepočítaná reaktance je dána vztahem:

$$X_{\sigma 21} = \frac{U_{21}}{I_{21}} = \frac{p \cdot U_2}{\frac{I_2}{p}} = p^2 \cdot \frac{U_2}{I_2} = p^2 \cdot X_{\sigma 2} \quad (1.18)$$

Z výše uvedených vztahů můžeme sestavit odpovídající náhradní schéma transformátoru:



Obrázek 1.4 - Náhradní schéma transformátoru při přepočtu veličin [2]

Pokud bychom chtěli přepočítávat primární veličiny na sekundární stranu, budou platit inverzní vztahy, tj. ze vztahu:  $p = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{u_{i1}}{u_{i12}}$ ,  $u_{i12} = \frac{u_{i1}}{p}$  bude rovnice pro napětí:

$$U_{12} = \frac{U_1}{p} \quad (1.19)$$

Pro proud:

$$I_{12} = p \cdot I_1 \quad (1.20)$$

Pro odpor:

$$R_{12} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{\frac{U_1}{p}}{p \cdot I_1} = \frac{U_1}{p^2 \cdot I_1} = \frac{R_1}{p^2} \quad (1.21)$$

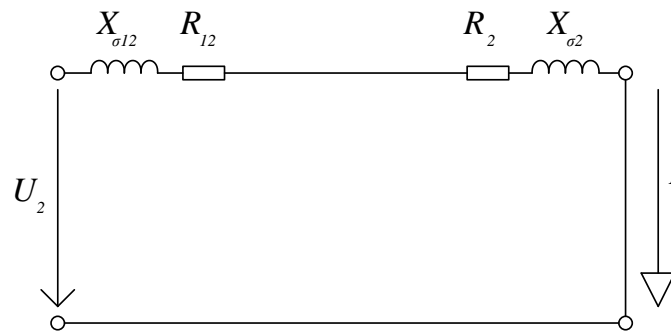
A pro rozptylovou reaktanci:

$$X_{\sigma 12} = \frac{U_{12}}{I_{12}} = \frac{\frac{U_1}{p}}{p \cdot I_1} = \frac{U_1}{p^2 \cdot I_1} = \frac{X_{\sigma 1}}{p^2} \quad (1.22)$$

Popsané přepočítávací rovnice slouží k přibližnému výpočtu zkratových proudů transformátoru napájecího zdroje. Pokud známe parametry transformátoru:  $R_1$  – odpor primárního vinutí,  $R_2$  – odpor sekundárního vinutí,  $X_{\sigma 1}$  – rozptylovou reaktanci primárního



vinutí,  $X_{\sigma 2}$  – rozptylovou reaktanci sekundárního vinutí a  $p$  – převod transformátoru, tak můžeme nakreslit schéma obvodu dle obrázku *Obrázek 1.5*, dle kterého dokážeme vypočítat proud při zkratu sekundárních svorek. Uvažujeme, že proud  $I_0$  je zanedbatelný (mezi 5 – 10 % jmenovitého proudu).



Obrázek 1.5 - Schéma zapojení transformátoru pro výpočet zkratového proudu [2]

Celková reaktance je dle schématu:

$$X = X_1 + X_{12} = \frac{X_1}{p^2} + X_2 \quad (1.23)$$

Celkový odpor:

$$R = R_1 + R_{12} = \frac{R_1}{p^2} + R_2 \quad (1.24)$$

Z uvedeného sestavíme rovnici pro výpočet zkratového proudu:

$$I = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (1.25)$$

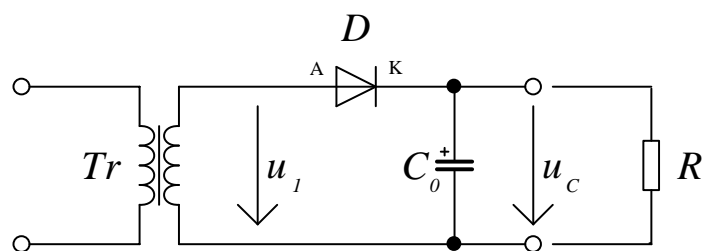
[1], [2], [3], [15], [16]

## 1.2 Usměrňovače a jejich zapojení

Usměrňovače slouží k přeměně střídavé proudu na proud stejnosměrný. Usměrňovače se dnes téměř vždy používají sestavené z polovodičových součástek - křemíkových diod (neřízené) nebo z tyristorů (řízené). Kdysi se ale používaly také usměrňovače rtuťové, elektronkové, nebo polovodičové selenové a germaniové. Usměrňovače můžeme dělit na jednocestné, dvoucestné a můstkové.

### 1.2.1 Jednocestný usměrňovač

Jednocestný usměrňovač používá pouze jeden diodový, popř. tyristorový, ventil. Nevýhoda tohoto zapojení spočívá v tom, že ze sinusového průběhu je ventilem blokována záporná část (dioda v závěrném směru nevede) a v tuto dobu je amplituda napětí za usměrňovačem na nule – za usměrňovačem je tzv. tepavý proud. Klade to tedy veliké požadavky na filtrační kondenzátor, který bývá za usměrňovačem zapojen k vyhlazení průběhu napětí. Jeho kapacita musí být dostatečná k tomu, aby v závislosti na výstupním proudu a délce púlperiody, byl schopen zásobovat naakumulovanou energií obvod na výstupu bez poklesu napětí pod stanovenou a požadovanou mez. Nejedná se tedy o vhodný usměrňovač pro větší proudy, ale jelikož jsou náklady na diodu velmi nízké, je vhodné jej použít pro obvod s velmi nízkým odběrem proudu a u aplikací, kde poklesy napětí nevadí. Schéma zapojení jednocestného usměrňovače je na obrázku: *Obrázek 1.6*.



Obrázek 1.6 - Jednocestný diodový usměrňovač [2]

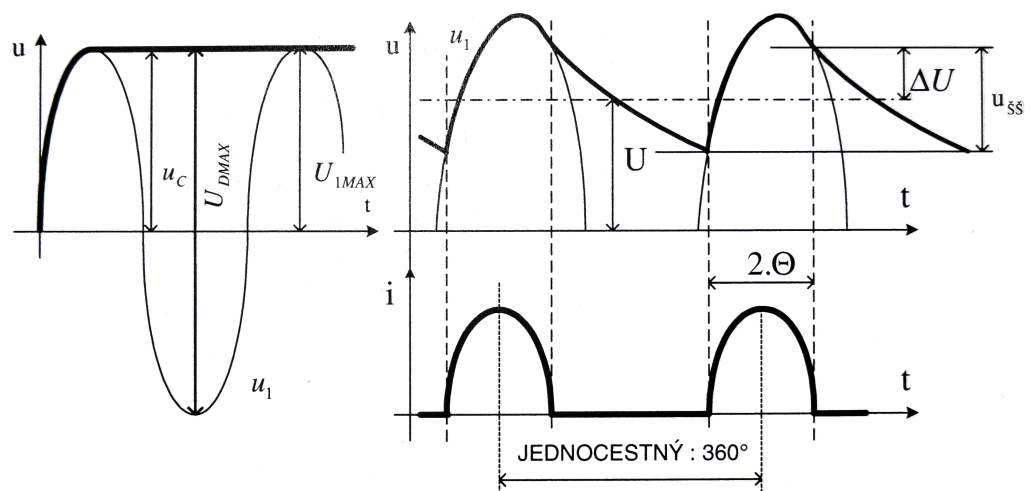
Jednocestný usměrňovač s filtračním kondenzátorem funguje asi takto: (uvažujme, že kondenzátor  $C_0$  není nabitý). Na vstupu diody se objeví kladná okamžitá hodnota napětí  $u_1$ , a jelikož je  $C_0$  vybitý, je vyšší, než  $u_c$ :  $u_1 > u_c$ . Dioda  $D$  otevře a začne jí procházet proud. Kondenzátor se začne nabíjet až na úroveň maximální hodnoty napětí ponížené o úbytek napětí na křemíkové diodě, což je přibližně 0,7 V:  $U_c = (U_1 - \Delta U_D) \cdot \sqrt{2}$ . Jak amplituda

klesá, začne se kondenzátor vybíjet a v tuto chvíli je napětí  $u_c$  větší, než napětí  $u_1$ . Jelikož je dioda polarizována v závěrném směru, nebude jí procházet žádný proud. Ve chvíli, kdy se napětí  $u_1$  dostane do maximální hodnoty záporné půlplny, je dioda namáhána dvojnásobným maximálním napětím  $u_1$ , protože  $C_0$  je stále nabitý na kladnou maximální hodnotu  $u_1$ , kdežto na vstupu diody máme maximální hodnotu  $-u_1$ . Dioda tedy musí vydržet minimální napětí:

$$2 \cdot U_1 \cdot \sqrt{2} \doteq 2 \cdot U_{Cmax} \quad (1.26)$$

Tuto dimenzaci je při návrhu usměrňovače nutno dodržet, jinak se dioda prorazí.

Průběhy napětí a proudu na zatíženém usměrňovači jsou patrné z obrázku: *Obrázek 1.7*. Jak je patrné, kapacitu kondenzátoru  $C_0$  musíme vypočítat takovou, aby bylo dosaženo minimálního přijatelného zvlnění. Jelikož kondenzátorem dodáváme energii při výpadku jedné půlplny, bude potřebná kapacita kondenzátoru cca dvojnásobná oproti kapacitě, pokud bychom použili dvoucestný, případně můstkový, usměrňovač. Během vybíjení totiž napětí na kondenzátoru klesá a dochází tedy ke zvlnění výstupního napětí o velikosti  $\Delta U$  s mezivrcholovou hodnotou  $u_{\text{řř}}$  a stejnou frekvencí, jakou má střídavé napětí, které je usměrňováno. Pokud máme za usměrňovačem zapojený např. stabilizátor, hodnota výstupního napětí nesmí při maximálním povoleném odebíraném proudu klesnout pod minimální povolenou úroveň danou stabilizátorem – obvod by potom nepracoval.



Obrázek 1.7 - Průběhy napětí a proudu na jednocestném usměrňovači – vlevo naprázdno, vpravo pod zatížením [2]

Velikost zvlnění  $\Delta U$  kolem střední hodnoty o velikosti  $U$ :

$$U = \sqrt{2} \cdot U_{1ef} \cdot \cos\Theta \quad (1.27)$$

Kde:  $U$  je střední hodnota velikosti usměrněného zvlněného napětí,  $U_{1ef}$  je velikost efektivní hodnoty vstupního napětí a  $\Theta$  je  $\frac{1}{2}$  velikosti úhlu otevření ventilu v radiánech, lze vyjádřit z rovnosti náboje  $q$  dodaného v průběhu nabíjení kondenzátoru  $C_0$  po dobu otevření  $2 \cdot \Theta$ :

$$q = C_0 \cdot 2\Delta U \quad (1.28)$$

A náboje  $q$  po zbytek periody zátěží odebíraného během vybíjení kondenzátoru  $C_0$ , přičemž uvažujeme, že  $2 \cdot \Theta = \frac{\pi}{2}$ :

$$C_0 \cdot 2 \cdot \Delta U = \frac{U}{R} \cdot \frac{2\pi - \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (1.29)$$

Po úpravě vztahu dostaneme:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{0,75}{2 \cdot f \cdot R \cdot C_0} \quad (1.30)$$

Kde:  $R$  je odpor připojené zátěže,  $f$  je frekvence,  $C_0$  je kapacita kondenzátoru,  $U$  je střední hodnota a  $\Delta U$  je hodnota zvlnění napětí.

Maximální velikosti proudových pulsů mají stejný odstup, jako velikosti pulsů napětí – po  $360^\circ$ . Prvotní proudový impuls nastane po zapnutí transformátoru, tedy jeho připojením k síťovému napětí, kdy kondenzátor není nabitý. Tuto proudovou špičku musí usměrňovací dioda vydržet, aniž by došlo k jejímu zničení. Velikost tohoto špičkového proudu je dána pouze odporem vinutí transformátoru, tzv. nabíjecím odporem. Vztah pro výpočet tohoto proudu je uveden ve vztahu ( 1.24 ).

Na základě uvedených vztahů se v datasheetech a katalozích uvádí u usměrňovacích diod hodnoty: usměrňovaného napětí  $U_{ef}$ , úbytek napětí na diodě v propustném směru  $U_F$  při proudu  $I_F$ , špičkové závěrné napětí  $U_{RM}$ , nabíjecí odpor  $R_{MIN}$  (ten je dán transformátorem, resp. jeho vinutím) a maximální vstupní kapacita kondenzátoru  $C_{MAX}$ . Hodnoty kondenzátoru  $C_{MAX}$  vycházejí ze vztahu:  $Q = C_0 \cdot U$ . Po dosazení do vztahu za náboj  $Q$ :

$$I \cdot t = C_0 \cdot U \quad (1.31)$$

Po úpravě:

$$I = C_0 \cdot \frac{U}{t} \quad (1.32)$$

Z upravené rovnice je viditelné, že velikost proudu tekoucí diodou je úměrná velikosti kapacity připojeného vyhlazovacího kondenzátoru. Čím bude větší kapacita, tím bude úměrně vyšší i proud. Tento proud nesmí diodu zničit. Z toho důvodu je hodnota  $C_{MAX}$  v katalogu uvedena.

V případě, že bychom usměrňovač zapojili nakrátko, byl by kondenzátor  $C_0$  vlastně zkratován a usměrňovač by se choval jako usměrňovač s odporovou zátěží. Střední hodnota usměrňovaného napětí  $U$  naprázdno je vyjádřena obsahem plochy pod polovinou sinusovky rozprostřenou do celé periody:

$$\int_0^{\pi} U_M \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = U \cdot 2 \cdot \pi \quad (1.33)$$

Odkud:

$$\begin{aligned}
 U &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} U_M \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \int_0^{\pi} \sin \alpha \cdot d\alpha = \\
 &= \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot [-\cos \alpha]_0^{\pi} = \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos 0)] = \\
 &= \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot [ -(-1) - (-1) ] = \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot 2 = \frac{U_M}{\pi} = \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi}
 \end{aligned} \tag{1.34}$$

Při zatížení bude tato střední hodnota nižší o úbytek napětí na odporu diody  $R_D$ , který vyvolal proud  $i$ . Sníží se tedy na hodnotu:

$$\frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} - i \cdot R_D \tag{1.35}$$

Při chodu nakrátko je toto napětí nulové:

$$\frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} - I_K \cdot R_D = 0 \tag{1.36}$$

Po úpravě vztahů tedy proud nakrátko bude:

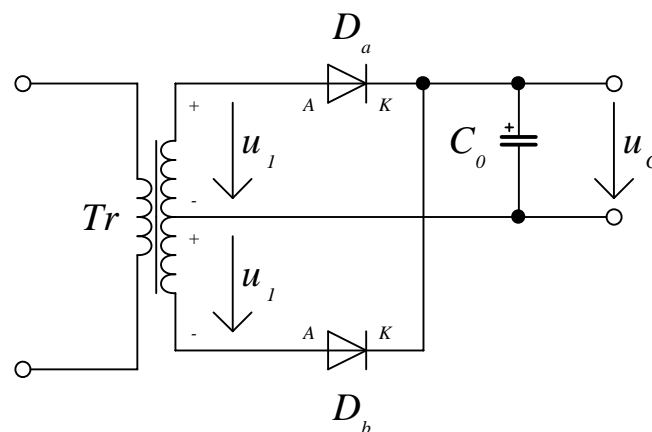
$$\frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = I_K \cdot R_D \tag{1.37}$$

$$I_K = \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot R_D}$$

Vlastností tohoto zapojení je, a i nevýhodou, že stejnosměrná složka proudu zatěžovacím odporem  $R$  se uzavírá i transformátorem, jehož jádro je touto složkou syceno navíc, takže se zmenšuje využitelná oblast v magnetizační charakteristice. [1], [2]

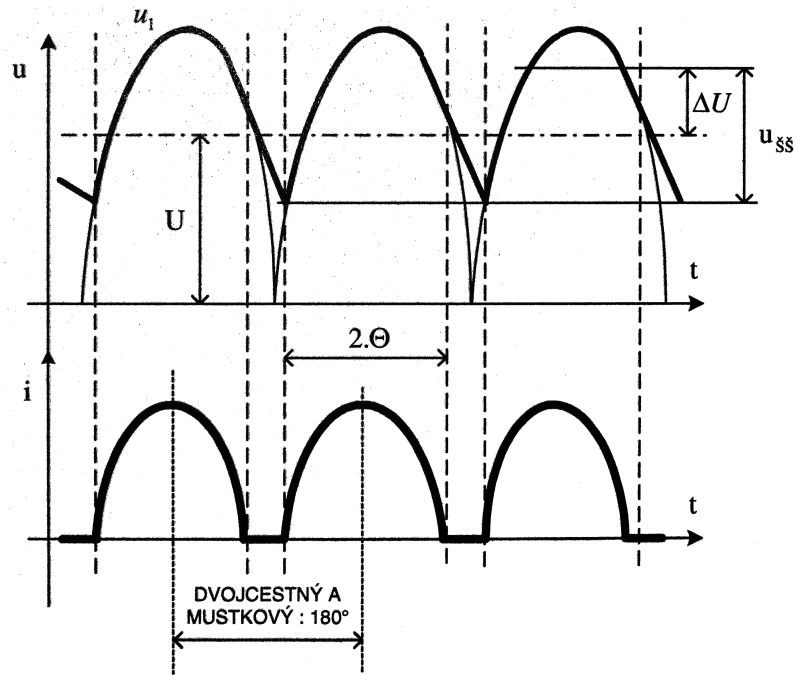
### 1.2.2 Dvoucestný usměrňovač

Dvoucestný usměrňovač, jak již název napovídá, je tvořen dvěma diodami. Nevýhodou tohoto zapojení je, že vyžaduje speciální transformátor, jehož sekundární vinutí má vyveden středový vývod – jedná se o nulový potenciál. Výhodou oproti jednocestnému je, že při kladné půlvlně teče proud jednou diodou a při záporné půlvlně teče proud diodou druhou. Schéma zapojení usměrňovače je zobrazeno na obrázku: *Obrázek 1.8*.



Obrázek 1.8 - Dvoucestný diodový usměrňovač [2]

Tento typ usměrňovače je vhodný pro použití ve zdrojích, kde potřebujeme odebrat velký proud. To je jeho výhoda oproti jednocestnému. Filtrační kondenzátor  $C_0$  může mít pouze poloviční kapacitu, oproti kapacitě při použití jednocestného usměrňovače. Dosáhneme takto podstatně nižšího zvlnění, což je žádoucí. Na výstupu usměrňovače totiž sice máme poklesy amplitudy na nulu (pokud bychom nezapojili kondenzátor), ale délka trvání nulového napětí se prakticky blíží téměř nule – začíná totiž další půlvlna. Na nezátíženém usměrňovači, se zapojeným filtračním kondenzátorem  $C_0$ , máme na výstupu maximální hodnotu napětí vstupního snížené zase o úbytek na diodě 0,65 V. Sice jsou v usměrňovači diody dvě, ale každá půlvlna jde pouze přes jednu diodu, tudíž počítáme pouze s jednou. Kondenzátor se zcela nabije na hodnotu  $u_1$  a bez připojené zátěže se nevybíjí. Diody jsou napětově namáhané na napětí  $u_1 + u_c$ , což je  $U_D = 2 \cdot u_1$ . Opět je nutné na toto brát při návrhu zřetel. Vše je patrné na obrázku: *Obrázek 1.8*.



Obrázek 1.9 - Průběhy napětí a proudu - dvoucestný usměřovač [2]

Při zatížení usměřovače se střední hodnota proudu rozdělí na obě dvě diody. Kmitočet zvlnění usměrněného napětí bude dvojnásobný oproti kmitočtu střídavého napětí, které je na výstupu transformátoru – proudové špičky jsou přítomné dvakrát během jedné periody. Graficky znázorněno na obrázku: *Obrázek 1.9*. Velikost zvlnění můžeme opět určit z rovnosti náboje  $q$  kondenzátorem  $C_0$  dodaného během úhlu otevření  $2 \cdot \Theta$ :

$$q = C_0 \cdot 2 \cdot \Delta U \quad (1.38)$$

A náboje  $q$ , který je z kondenzátoru  $C_0$  po zbytek půlperiody (po dobu  $\pi$ ) odebírán zátěží. Uvažujeme opět, že  $2 \cdot \Theta = \frac{\pi}{2}$ :

$$q = i \cdot t = \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{f'} = \frac{U}{R} \cdot \frac{\pi - \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (1.39)$$

Po úpravě vztahu dostaneme:

$$C \cdot 2 \cdot \Delta U = \frac{U}{R} \cdot \frac{\pi - \frac{\pi}{2}}{\omega} \quad (1.40)$$



Z uvedeného vztahu je patrné, že zvlnění bude výrazně menší, protože se kondenzátor do zátěže vybíjí mnohem kratší dobu.

Během chodu usměrňovače nakrátko máme kondenzátor  $C_0$  zkratován – usměrňovač pracuje s odporovou zátěží. Střední hodnota usměrněného napětí  $U$  je určena obsahem plochy pod absolutní hodnotou sinusovky (při chodu do odporové zátěže je:  $2 \cdot \Theta = 180^\circ$ , tj.:  $2 \cdot \Theta = \pi$ ), roztaženou do celé periody (tj.:  $2 \cdot \pi$ ). Odpovídá tomu vztah:

$$\int_0^{2\pi} U_M \cdot |\sin \alpha| \cdot d\alpha = U \cdot 2 \cdot \pi \quad (1.41)$$

Z čehož:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi U_M \cdot |\sin \alpha| \cdot d\alpha = \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot \int_0^\pi \sin \alpha \cdot d\alpha = \\ &= \frac{2 \cdot U_M}{2 \cdot \pi} \cdot [-\cos \alpha]_0^\pi = \frac{U_M}{\pi} \cdot [-\cos \pi - (-\cos 0)] = \\ &= \frac{U_M}{\pi} \cdot [ -(-1) - (-1) ] = 2 \cdot \frac{U_M}{\pi} = 2 \cdot \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \\ &= \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot [ -(-1) - (-1) ] = \frac{U_M}{2 \cdot \pi} \cdot 2 = \frac{U_M}{\pi} = \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} \end{aligned} \quad (1.42)$$

Pokud usměrňovač zatížíme, klesne střední hodnota napětí o úbytek napětí na vnitřním odporu diody, který je vyvolán proudem  $i$ :

$$2 \cdot \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} - i \cdot R_D \quad (1.43)$$

Pokud bude výstup zapojen nakrátko, toto napětí je nulové:

$$2 \cdot \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} - I_K \cdot R_D = 0 \quad (1.44)$$

Po úpravě vztahu je tedy rovnice pro proud nakrátko:

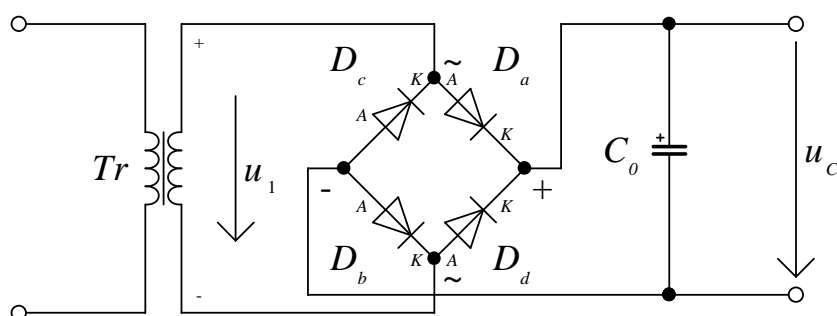
$$2 \cdot \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi} = I_K \cdot R_D \quad (1.45)$$

$$I_K = 2 \cdot \frac{U_{ef} \cdot \sqrt{2}}{\pi \cdot R_D}$$

[2], [3]

### 1.2.3 Můstkový usměrňovač – Graetzův můstek

Můstkový usměrňovač, Graetzův můstek, je nejpoužívanější typ usměrňovače v elektronice. Jeho nespornou výhodou je, že nepotřebujeme mít speciální transformátor se středovým vývodem, tudíž je široce použitelný. I přes to je na jeho výstupu stejný průběh napětí, jako za usměrňovačem dvoucestným. Nevýhodou je fakt, že během kladné půlvlny teče proud přes dvě diody ( $D_a$  a  $D_b$ ) a v záporné půlvlně přes další dvě ( $D_d$  a  $D_c$ ). Musíme tedy počítat s úbytkem napětí na dvou diodách, tj. cca 1,3 V. Výhodou ale je, že diody nejsou napěťově namáhány dvojnásobným napětím, ale pouze napětím  $u_1 \approx u_c$ . Všechny diody v usměrňovači by měly být stejného typu a dimenzovány na špičkový proud, kterým se nabíjí kondenzátor  $C_0$ . U tohoto typu usměrňovače přes transformátor neteče stejnosměrná složka proudu, takže jí není přidavně sycen. Schéma je na obrázku: *Obrázek 1.10*. [1], [2]



Obrázek 1.10 - Schéma zapojení můstkového usměrňovače [2]

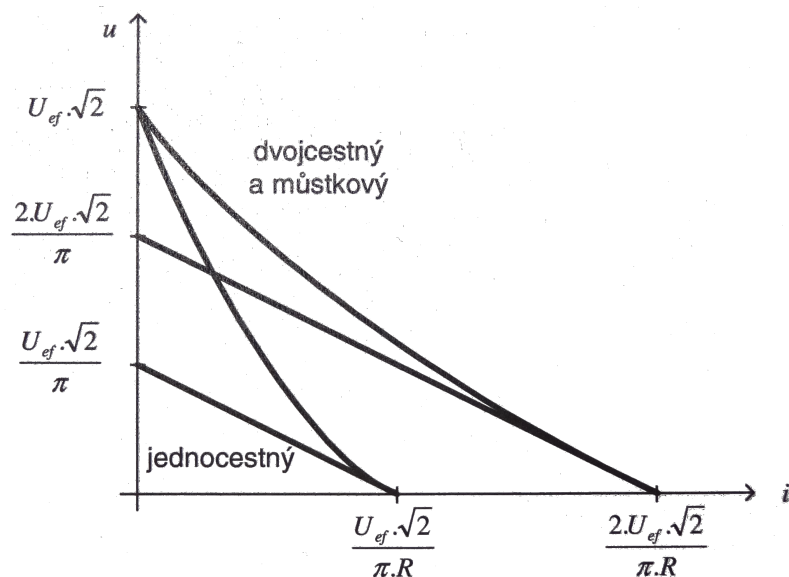
### 1.2.4 Zatěžovací charakteristiky usměrňovačů

Pro porovnání vlastností jednotlivých usměrňovačů se dají na základě vypočítaných a odvozených rovnic sestavit zatěžovací charakteristiky, které graficky znázorňují jejich chování při jednotlivých druzích zátěže. Pro všechny tři typy usměrňovačů je zakreslena charakteristika s filtračním kondenzátorem  $C_0$  a s odporovou zátěží. Charakteristiky se nacházejí na obrázku: *Obrázek 1.11*.

Z grafického znázornění je patrné, že dvojcestný usměrňovač a můstkový usměrňovač s odporovou zátěží dávají vyšší napětí, než jednocestný usměrňovač.

Naprázdko mají největší napětí usměrňovače s vyhlazovacím kondenzátorem  $C_0$ . U jednocestného má ale napětí větší pokles, má větší zvlnění. Dvojcestný usměrňovač a můstkový představují tvrdší zdroje, zatím co jednocestný je měkký.

Nakrátko jsou proudy u můstkového i dvoucestného usměrňovače stejné, jak s připojeným vyhlazovacím kondenzátorem  $C_0$ , tak i bez něj. Jsou ale vyšší, než u jednocestného usměrňovače, a to s připojeným kondenzátorem, nebo bez něj. [1], [2], [3]



Obrázek 1.11 - Zatěžovací charakteristiky usměrňovačů [2]

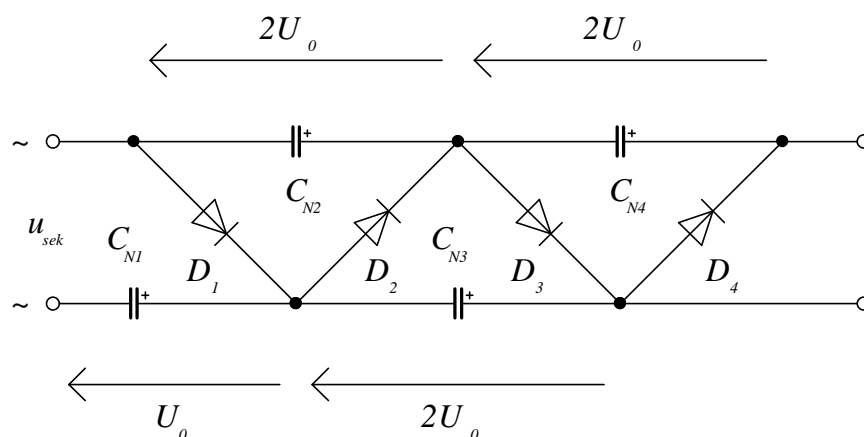
## 1.2.5 Násobiče napětí

Násobiče napětí slouží ke změně napětí, resp. dokáží znásobit vstupní napětí. U těchto násobičů se nevyužívá transformátoru. Napětí se mění pomocí kondenzátorů a diod zapojených kaskádovitě. Tyto zapojení slouží pouze v obvodech, kde je třeba malý výstupní proud. Princip spočívá v tom, že z pohledu střídavého napětí jsou stupně k sobě zapojeny paralelně, avšak z pohledu stejnosměrného výstupu sériově. Násobiče napětí jsou odvozeny ze zapojení usměrňovačů. Násobiče napětí existují jednocestné, dvoucestné a můstkové. Jejich zapojení jsou složena z polovodičových diod a kondenzátorů. Užívá se kondenzátorů elektrolytických a u některých typů násobičů kondenzátorů bipolárních. [2]

### 1.2.5.1 Jednocestný (Delonův) násobič

Jednocestný násobič napětí, tzv. Delonův, funguje na principu nabití kondenzátoru ve chvíli, kdy je na jedné svorce kladná půlvlna oproti svorce druhé. V okamžiku, kdy je na stejném místě záporná půlvlna, dioda nedovolí vybití kondenzátoru zpět do zdroje, ale může téci pouze do zátěže. Na výstupu máme nyní maximální hodnotu vstupního napětí, nikoli efektivní. Násobiče můžeme kaskádově řadit za sebe. Vstupní napětí se dá vynásobit až přibližně desetkrát. V zapojení se všechny kondenzátory, až na první, nabíjejí na dvojnásobek maximální hodnoty vstupního napětí. První kondenzátor se nabíjí pouze na maximální hodnotu vstupního napětí. Schéma zapojení čtyřstupňového násobiče je uvedeno na obrázku:

Obrázek 1.12



Obrázek 1.12 - Čtyřstupňový Delonův násobič napětí [2]

Vztah pro výpočet výstupního napětí:

$$u_{vst} \cdot \sqrt{2} + U_0(na C_{N1}) + 2 \cdot U_0(na C_{N3}) -$$

$$-2 \cdot U_0(na C_{N2}) = 2 \cdot U_0(na C_{N4}) \quad (1.46)$$

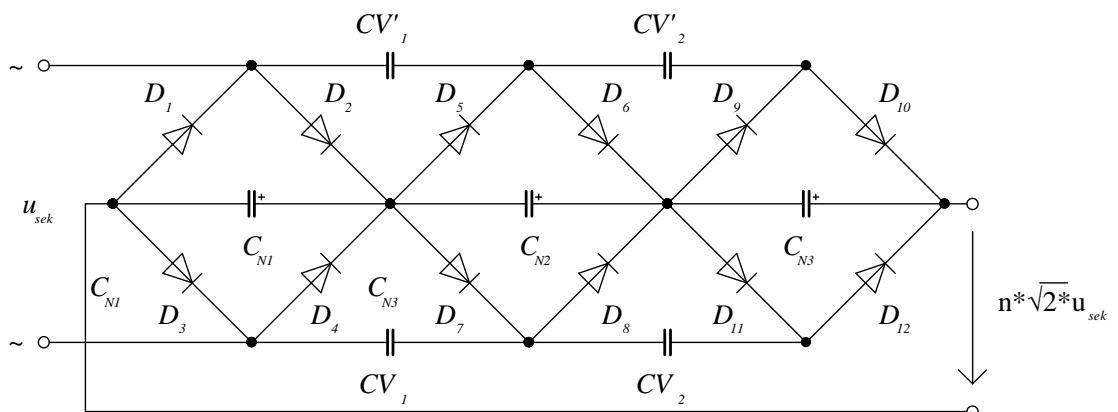
Ze vztahu a schématu plyne, že na spodních kondenzátorech jsou v součtu liché násobky  $U_0$  a na horních kondenzátorech jsou v součtu sudé násobky  $U_0$ .

Z uvedených skutečností můžeme napsat, že diody je nutné dimenzovat vždy na minimální napětí  $2 \cdot U_0$  a propustný proud zátěže. Kapacitu kondenzátorů vybíráme dle vztahu:

$$C_N > 2 \cdot n \cdot (n + 2) \cdot \frac{I}{U_0 \cdot f} \quad (1.47)$$

[2]

### 1.2.5.2 Kaskádní dvoucestný násobič z Graetzových můstků



Obrázek 1.13 - Kaskádní dvoucestný násobič z Graetzových můstků [2]

Tento násobič funguje tak, že kondenzátory  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$ , ...,  $C_{Nn}$  se nabíjejí. Pokud z nich není odebírán proud zátěží, je segment odpojen od zdroje. Přes vazební kondenzátory  $C_V$  je nabíjen kondenzátor dalšího zařazeného můstku, kde se opět nabije kondenzátor  $C_N$ . Tento postup se opakuje i na dalších můstcích. Rostoucí počet sériově zapojených vazebních kondenzátorů však omezuje nabíjecí proud a tím také zatížitelnost výstupu. Z hlediska výstupu jsou kondenzátory řazeny v sérii a výstupní napětí je součtem napětí na kondenzátorech. Pro  $n$  stupňů platí:

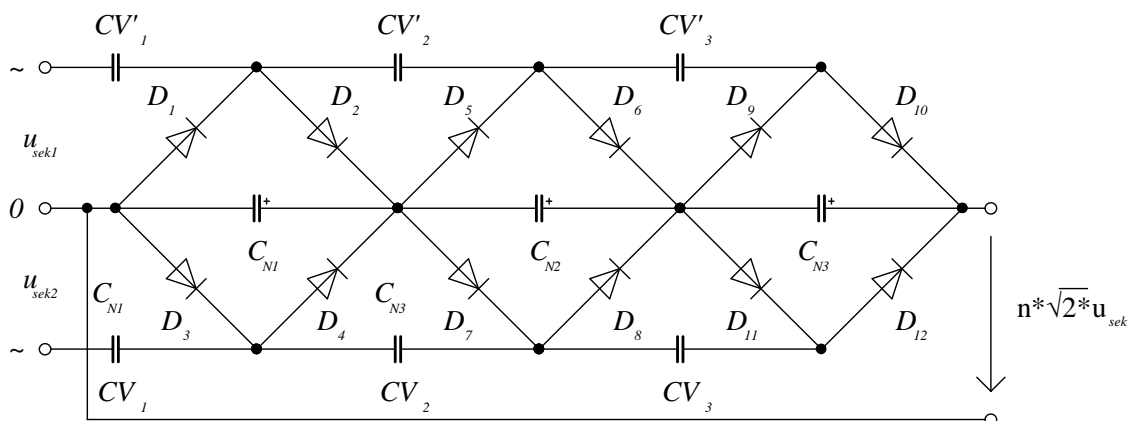
$$U_{výst} = n \cdot U_0 = n \cdot \sqrt{2} \cdot U \quad (1.48)$$

Schéma zapojení je na obrázku: *Obrázek 1.13*

Velkou nevýhodou tohoto násobiče napětí je fakt, že je třeba použít bipolární kondenzátory jako vazební  $C_V$ , jejichž kapacita musí být mnohem vyšší, než je kapacita  $C_N$ . Je to z toho důvodu, aby neomezovaly nabíjení kondenzátorů  $C_N$ . [2]

### 1.2.5.3 Kaskádní dvoucestný násobič ze dvou Delonových

Jedná se o můstkové zapojení, které je podobné zapojení s Graetzovým můstkem. Rozdíl tohoto zapojení je v tom, že máme vyveden středový vstup. Princip fungování je totožný, jako zapojení s Graetzovým můstkem. Schéma zapojení je na následujícím obrázku: *Obrázek 1.14*



Obrázek 1.14 - Dvoucestný násobič ze dvou Delonových [2]

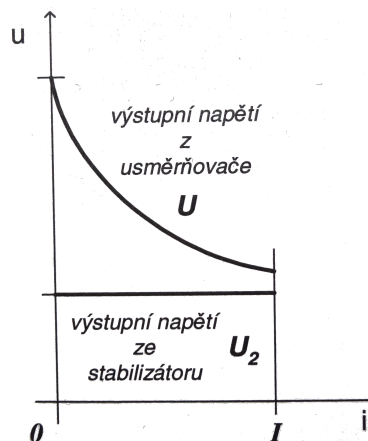
### 1.3 Stabilizátory

Stabilizátory slouží k ustálení výstupních hodnot napětí u napájecích zdrojů. Z usměrňovače totiž vychází napětí zvlněné a navíc se v závislosti na proudu tekoucím do zátěže mění. To pochopitelně není žádoucí stav – elektronické obvody jsou na tyto změny velice citlivé. Stabilizátory mají za úkol udržet konstantní hladinu napětí, aby se neměnila ani se zvyšujícím se, popř. snižujícím se, odebíraným proudem. Mají za úkol zdroj idealizovat. Jedním z nutných podmínek, aby stabilizátor mohl fungovat, je nutnost mít na vstupu stabilizátoru napětí vyšší, než požadujeme na výstupu. Stabilizátory umějí napětí pouze snižovat, tudíž nám na stabilizátoru vzniknou vždy ztráty. Tento ztrátový výkon  $P_Z$  by se dal vyjádřit vztahem:

$$P_Z = \int_0^{I_{MAX}} U_1 \cdot di - \int_0^{I_{MAX}} U_2 \cdot di \quad (1.49)$$

Kde:  $I_{MAX}$  je maximální proud stabilizátorem,  $U_1$  je napětí na vstupu stabilizátoru,  $U_2$  je napětí na výstupu stabilizátoru a  $P_Z$  je ztrátový výkon.

Tento vztah je graficky znázorněn na obrázku:



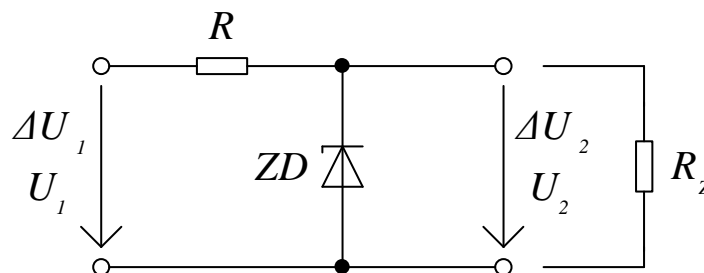
Obrázek 1.15 - Znázornění průběhů napětí a proudu před a za stabilizátorem [2]

Ztrátový výkon  $P_Z$  se vždy přeměňuje v teplo, proto je vždy velice nutné stabilizátor adekvátním způsobem chladit. Jak je patrné z obrázku: *Obrázek 1.15*, tak ztráty budou nižší tím, čím blíže k sobě budeme mít křivky grafu. Dá se tedy říci, že vysoké vstupní napětí na

stabilizátoru není žádoucí, protože velká část by se přeměňovala v teplo. Z toho důvodu je velmi důležité provádět řádně návrh stabilizátoru a samozřejmě také usměrňovače, filtračního kondenzátoru a transformátoru. Vstupní napětí na stabilizátoru zase ale nesmí být příliš nízké. U některých typů je nutný rozdíl minimálně 1 V a musíme také počítat se zvlněním síťového napětí, což obvykle bývá přes 10%. [2]

### 1.3.1 Parametrický stabilizátor – se Zenerovou diodou

Jedná se o nejjednodušší stabilizátor napětí, který využívá jevu Zenerovy diody. Schéma zapojení takového stabilizátoru je na obrázku: *Obrázek 1.16*. Dioda se zapojuje vždy v závěrném směru paralelně k výstupním svorkám a sériově je jí předřazen rezistor. Pokud bychom Zenerovu diodu zapojili v propustném směru, bude se chovat jako obyčejná usměrňovací dioda.



Obrázek 1.16 - Stabilizátor se Zenerovou diodou [2]

Při zapojení naprázdno odpovídá bodu  $P_{01}$  průsečík: zatěžovací charakteristiky se sklonem, který odpovídá velikosti odporu rezistoru  $R$  při vstupním napětí  $U_1$ , s charakteristikou Zenerovy diody. Tomuto bodu potom odpovídá napětí na stabilizátoru  $U_2$ . Jestliže dojde k poklesu napětí  $U_1$  o velikost  $\Delta U_1$ , napětí  $U_2$  na výstupu stabilizátoru poklesne o velikost napětí  $\Delta U_2$ . Jak je patrné z obrázku: *Obrázek 1.17*, pokles výstupního napětí je výrazně nižší, než pokles vstupního napětí. Matematicky vyjádřeno:

$$\Delta U_2 \ll \Delta U_1 \quad (1.50)$$

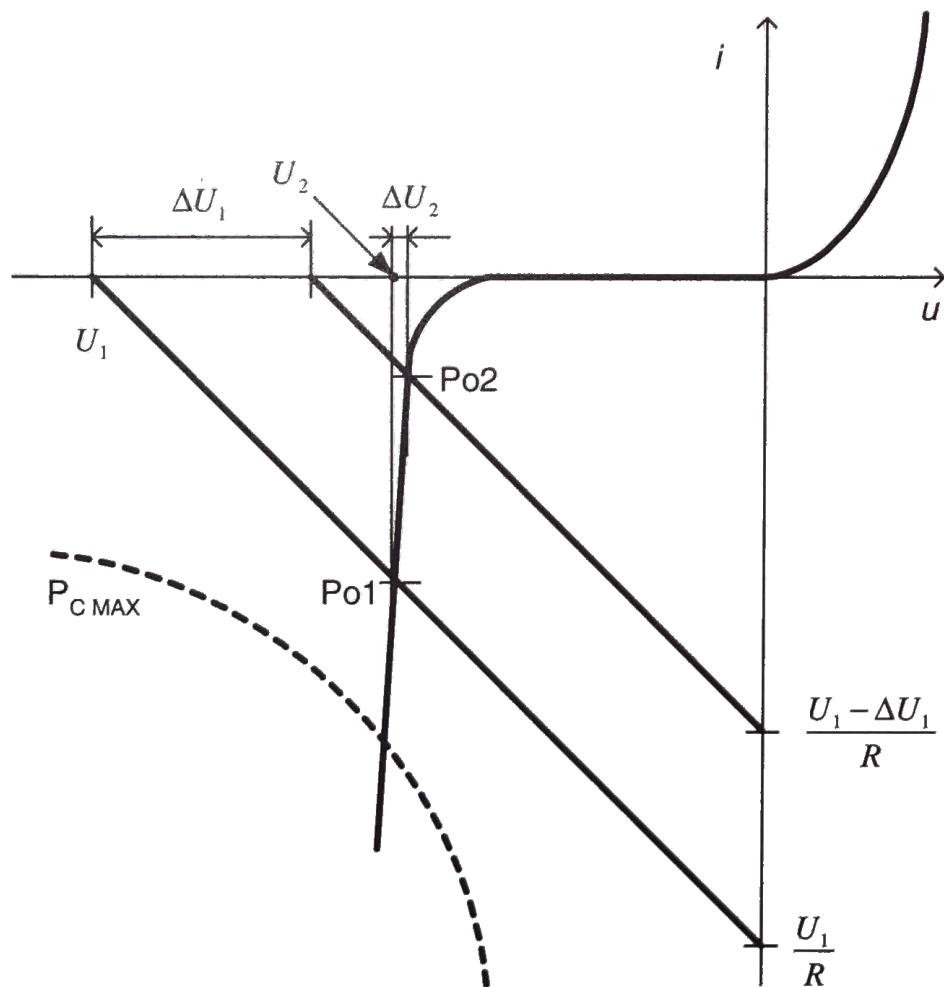
Obvod má tedy vlastnost, že snižuje kolísání výstupního napětí – stabilizuje jej.

Z charakteristik rovněž vyčteme, že při výpočtu vhodné Zenerovy diody musíme věnovat pozornost také maximálnímu možnému ztrátovému výkonu, který na diodě vzniká (v



charakteristice vyznačen jako  $P_{C\ MAX}$ ). Pracovní body se musejí nacházet nad touto hyperbolou, aby nedošlo ke zničení diody vlivem vysokých teplot.

Při praktickém návrhu budeme postupovat tak, že budeme volit velikost odporu  $R$  co možná nejnižší, a to z důvodu, aby na něm nevznikal velký úbytek napětí. Pokud bychom ale připojenou zátěž na výstupu během chodu odpojili, potom by veškerý proud, který tekł přes odpor  $R$  do zátěže, tekł přes odpor a Zenerovu diodu. Z katalogových hodnot se dá vyčíst, že maximální výkonové ztráty na Zenerových diodách bývají v jednotkách Wattů. Z toho vyplývá, že i maximální přípustný proud tekoucí přes Zenerovu diodu bývá ve stovkách mA. Proto je tento stabilizátor vhodný pouze pro zátěže, přes které tečou velmi malé proudy.

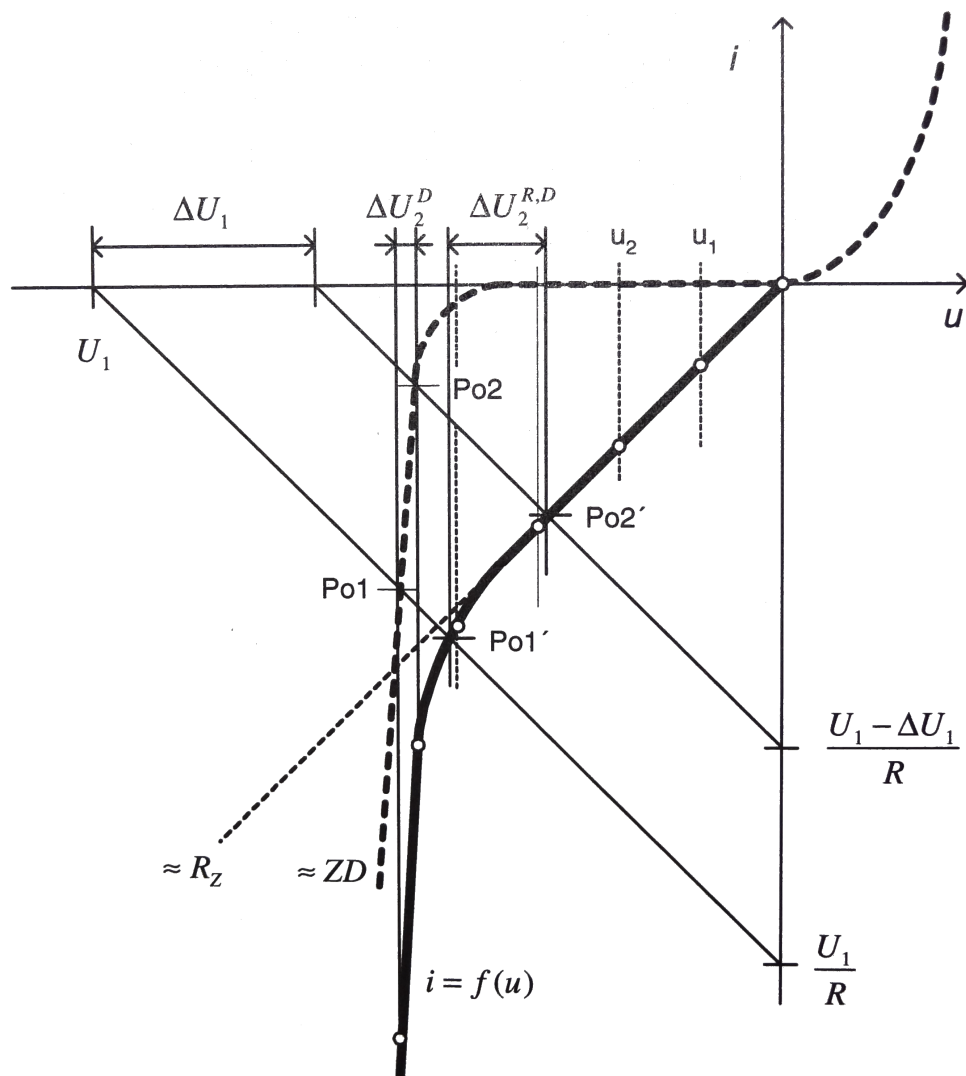


Obrázek 1.17 - Charakteristika stabilizátoru se Zenerovou diodou naprázdno [2]

Pokud zapojíme na svorky výstupu stabilizátoru zátěž  $R_Z$  (zapojeno paralelně k Zenerově diodě), budeme na zátěži mít totožné napětí, jaké je právě na Zenerově diodě. Výsledný proud

bude tedy součet proudu tekoucí Zenerovou diodou a proudu tekoucího přes zátěž. Vlivem zátěže se nám stabilizační charakteristika výrazně zhorší. Platí totiž, že pokud nám poklesne vstupní napětí  $U_1$  o velikost  $\Delta U_1$ , potom výstupní napětí  $U_2$  poklesne o velikost  $\Delta U_2^{R,D}$ . V případě zapojení naprázdno pokleslo pouze o  $\Delta U_2^D$ . Z obrázku: *Obrázek 1.18* vyplývá, že platí:

$$\Delta U_2^{R,D} > \Delta U_2^D \quad (1.51)$$



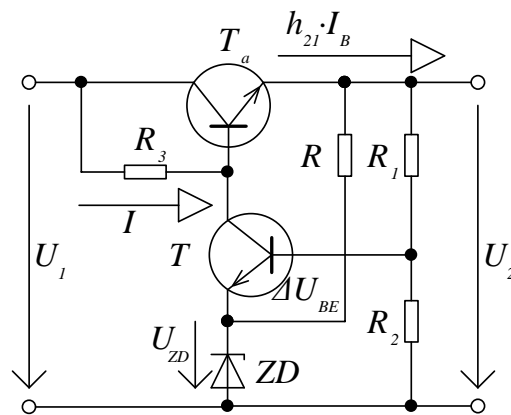
Obrázek 1.18 - Charakteristika stabilizátoru se Zenerovou diodou při zatížení [2]

To je také důvod, proč se na výstup tohoto stabilizátoru používá proudové posílení – zapojuje se tranzistor (proudovým posílením se zabývá samostatná kapitola). Výstupní napětí

je pak nižší o úbytek napětí na tranzistoru, který vznikne na přechodu báze – emitor. Tento úbytek napětí má velikost 0,7 V. Dosáhneme tak ale vyšší stabilizační schopnosti obvodu. [1], [2], [3].

### 1.3.2 Zpětnovazební stabilizátory

Zpětnovazební stabilizátory jsou složeny z parametrického stabilizátoru (Zenerovy diody), snímače výstupního napětí (odporový dělič napětí), tranzistoru (porovnávajícího velikost napětí na odporovém děliči a napětí na Zenerově diodě) a výkonového tranzistoru na výstupu. Schéma takového stabilizátoru je na obrázku: Obrázek 1.19 - Zpětnovazební stabilizátor



Obrázek 1.19 - Zpětnovazební stabilizátor [2]

Stabilizátor funguje na principu zjišťování hodnoty výstupní veličiny (zpětná vazba). Na výstupu máme zapojený dělič napětí složený z rezistorů  $R_1$  a  $R_2$ . Tranzistor  $T$  je uzavřen v případě, kdy na děliči napětí je menší (nebo stejné) napětí, než napětí na Zenerově diodě  $U_{ZD}$ . Z toho důvodu nemůže proud  $I$  téci do kolektoru tranzistoru  $T$ , ale teče do báze tranzistoru  $T_a$ . Tranzistor  $T_a$  je z toho důvodu otevřen a propouští. Na výstupu napětí  $U_2$  roste. Jestliže ale napětí na děliči vzroste a je vyšší, než napětí  $U_{ZD}$ , tranzistor  $T$  se otevře. Proud  $I$  začne téci také do kolektoru tranzistoru  $T$ . Proud do báze tranzistoru  $T_a$  klesá, tranzistor  $T_a$  se uzavírá a napětí  $U_2$  na výstupu tedy klesá.

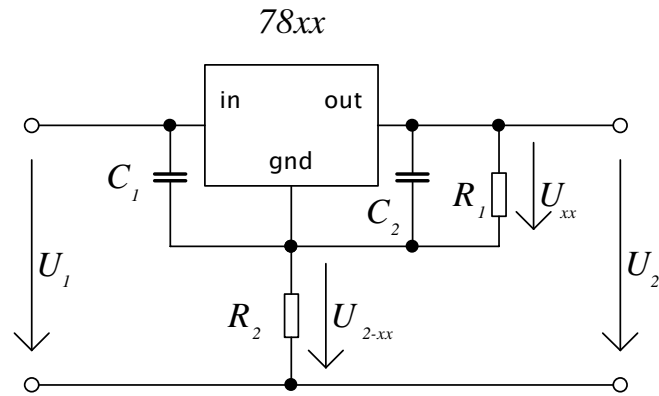
Toto zapojení se vyrábí jako hotové integrované obvody a značí se 78xxx. [2]

### 1.3.3 Stabilizátory 78xx, 79xx - s pevným napětím

Jedná se o hotové integrované obvody, které pracují na principu zapojení popsaného v kapitole: Zpětnovazební stabilizátory. Tyto stabilizátory se vyrábějí pro různá napětí. Nejčastějšími napětími jsou: 5V, 12V, 15V, 24V. Tyto hodnoty byly historicky nejpoužívanější. Dnes ale vyrábějí i pro hodnoty: 2,6V, 9V, 10V, 18V, 20V. Výrobou základní řady se zabýval i Československý výrobce Tesla, který ale již bohužel neexistuje. Stabilizátory byly stavěné na maximální výstupní proud 1A a na vstupu vyžadovaly minimálně o 2V více, než byla hodnota výstupního napětí. Provedení bylo v pouzdru TO3 (celokovové pouzdro). V dnešní době se nejčastěji používají pouzdra TO220, TO92 pro provedení L a různá další pro provedení SMD.

Z kódu stabilizátoru vyčteme, o jaký typ jde. Vyrábějí se pro kladná napětí, značeno 78xx, a pro záporná napětí, 79xx. Stabilizátory pro záporná napětí využijeme hlavně při napájení operačních zesilovačů, které potřebují symetrické napájení, ale také v dalších aplikacích. Dále může být v označení vloženo písmeno, kde: L – označení stabilizátoru pro max. výstupní proud 0,1 A, M – označení pro max. výstupní proud 0,5 A, S – označení pro max. výstupní proud 2 A, T – pro max. výstupní proud 3 A, H – pro max. výst. Proud 2,3 A, P – pro max. výstupní proud 10 A. Pokud v názvu není vloženo písmeno, jde o stabilizátor s max. výstupním proudem 1A. Velikost výstupního napětí vyčteme z posledního dvojčíslí ve značení stabilizátoru. Např. obvod MA7812 má hodnoty 12V, 1A. Obvod 78L05 – 5V, 0,1A. Velikosti max. vstupního napětí bývají nejčastěji 35 V nebo 40 V, úbytky napětí zase 0,9 V nebo 2 V. Jak již bylo zmíněno, minimální hodnota napětí na vstupu musí být součet výstupního napětí s úbytkem. Nutno ještě podotknout, že veškeré tyto stabilizátory jsou vnitřně vybaveny teplotní a nadproudovou pojistkou, které zabraňují zničení obvodu při přetížení. Všechny tyto hodnoty jsou k dispozici v katalogu výrobce integrovaného obvodu.

Stabilizátory mají pevná napětí daná výrobcem, ale tato hodnota se dá zvýšit zvolením vhodného děliče napětí mezi vývody. Napětí jde pouze zvýšit, nikoli snížit. Obvod 7805 můžeme použít pro napětí např. 7 V, ale obvod 7812 již použít nelze. Jeden rezistor se zapojuje mezi výstup OUT a svorku GND stabilizátoru a druhý rezistor se zapojuje mezi svorku GND a skutečnou zem v obvodu. Svorka GND stabilizátoru tedy ve skutečnosti napřímo k zemi obvodu zapojena není. Příklad tohoto zapojení je na obrázku: *Obrázek 1.20*



Obrázek 1.20 - Zvětšení výstupního napětí pomocí děliče napětí [2]

Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  mají za úkol odfiltrovat vstupní vf napětí a zajistit stabilitu (zabránit rozkmitávání) stabilizátoru. Hodnoty bývají:  $C_1 = 330nF$  a  $C_2 = 100nF$ . Jde o keramické kondenzátory. Elektrolytické nebo svitkové nelze použít a musí se zapojit co nejbližší vývodům integrovaného obvodu. Kdybychom je do obvodu nezařadili, docházelo by k rozkmitávání a tím pádem by výstupní napětí nebylo vyhlazené.

Výpočet rezistorů v děliči napětí se provede takto:

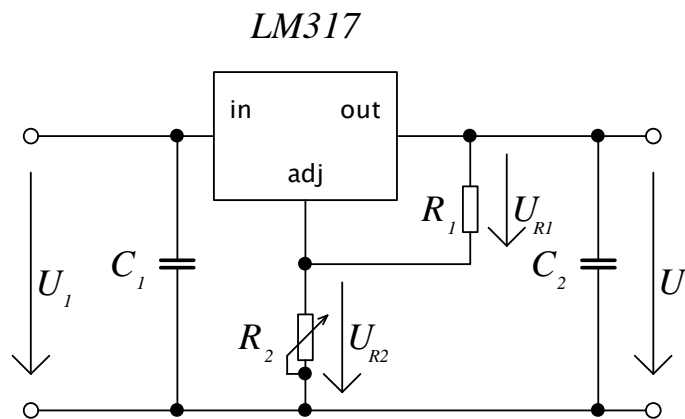
$$R_1 = \frac{U_{xx}}{5 \cdot I_{gnd}} \quad (1.52)$$

$$R_2 = \frac{U_2 - U_{xx}}{I_{gnd} + 5 \cdot I_{gnd}} \quad (1.53)$$

Kde:  $U_{xx}$  je napětí dané typem stabilizátoru,  $I_{gnd}$  je proud na svorce GND u stabilizátoru (z katalogu – někde značen  $I_B$  nebo  $I_G$ ),  $U_2$  je požadované výstupní napětí. Násobek proudu  $I_{gnd}$  je dán katalogem. Nejčastěji bývá násobek 5. Je to minimální proud do zátěže. S touto hodnotou musíme také počítat, protože skutečný max. možný proud na výstupu bude o tuto hodnotu nižší. [2], [3]

### 1.3.4 Stabilizátor LM317 – s nastavitelným napětím

Jelikož byl požadavek na integrovaný stabilizátor s možností regulace výstupního napětí, vznikl obvod LM317. Tento stabilizátor má možnost nastavit výstupní napětí v rozmezí 1,2 V – 37 V. Toto nastavení výstupního napětí se provádí externím obvodem, který se k stabilizátoru připojuje. Nejčastěji to bývá odporový dělič napětí, jako v případě zvětšení rozsahu 78xx, případně zapojení série diod v propustném směru (v tom případě by bylo výstupní napětí  $U_2 = 1,2 + (0,7 \cdot n)$   $n$  – počet diod v kaskádě), nebo připojení Zenerovy diody v závěrném směru mezi svorku ADJUST a zem ( $U_2 = 1,2 + U_Z$ ,  $U_Z$  – Zenerovo napětí). Příklad zapojení stabilizátoru s odporovým děličem je uveden na obrázku: *Obrázek 1.21*



Obrázek 1.21 - Zapojení obvodu LM317 [2]

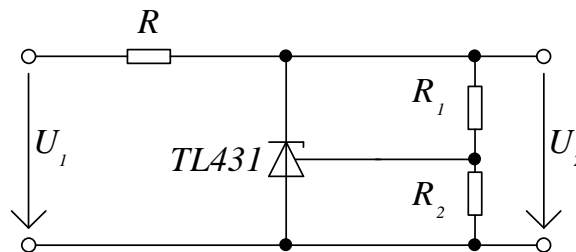
Rezistor  $R_1$ , resp. jeho velikost, je dán výrobcem stabilizátoru – bývá 240Ω. Rezistor  $R_2$  můžeme nahradit potenciometrem a v tom případě dostaneme plně regulovatelný zdroj s minimálním výstupním napětím  $U_2$  1,2 V a maximálním výstupním napětím  $U_2$  daným napětím vstupním  $U_1$  méně 5 V:  $U_{2max} = U_1 - 5$  (to je dáno výrobcem). Kondenzátor  $C_1$  má doporučenou kapacitu 100 nF a kondenzátor  $C_2$  kapacitu 1 μF. Tyto hodnoty jsou opět doporučeny výrobcem.

Maximální výstupní proud je u obvodu interně omezen na 1,5 A. Obvod má rovněž tepelnou pojistku. Obě tyto ochrany chrání obvod před zničením při přetížení.

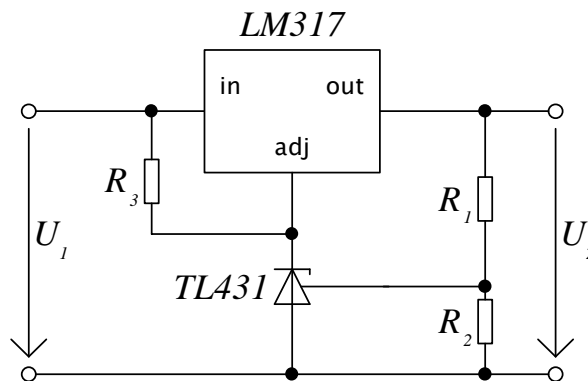
Za zmínku také stojí, že obvod se vyrábí v různých kategoriích. LM117, LM217 – obvody mají stejné specifikace, avšak se liší v provozních teplotách. Dále se vyrábí obvod LM337, který má stejné specifikace, jako odvod LM317, ale je určen ke stabilizaci záporného napětí. [2], [3]

### 1.3.5 Stabilizátor TL431

Stabilizátor TL431 je říditelná Zenerova dioda. Jedná se o integrovaný obvod se třemi vývody, jehož vnitřní zapojení obsahuje Zenerovu diodu a operační zesilovač. Tento obvod je vhodný jako napěťová reference a na výstupu nesmí být zatěžován. Jediným zatížením může být ovládání tranzistoru, případně ovládání dalších proudově nenáročných obvodů. Napětí se opět nastavuje děličem napětí velikostí rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  mezi katodou a referenčním výstupem a referenčním výstupem a anodou – patrné na obrázku: *Obrázek 1.22*. Tento obvod se dá využít ve spojení s obvodem LM317 nebo obvodem řady 78xx k nastavení výstupního napětí. Příklad tohoto zapojení je na následujícím obrázku: *Obrázek 1.23*



Obrázek 1.22 - Zapojení obvodu TL431 [2]



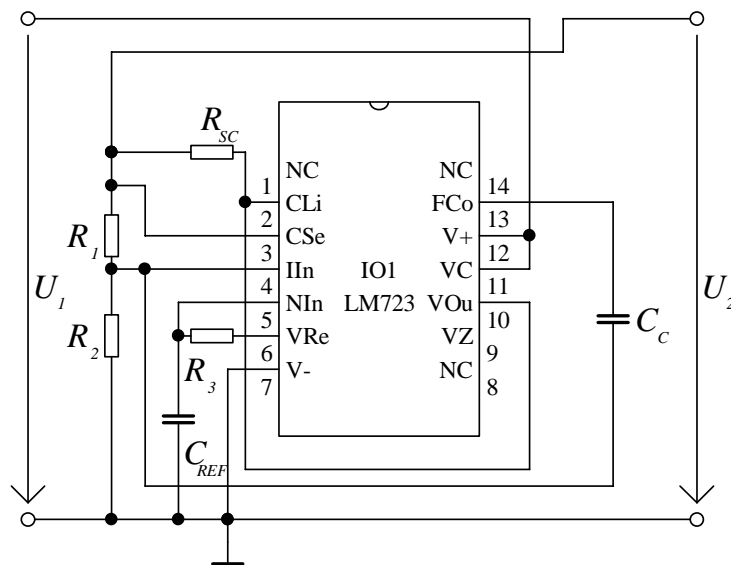
Obrázek 1.23 - Zapojení obvodu TL431 ve spojení s LM317 [2]

[2], [3]

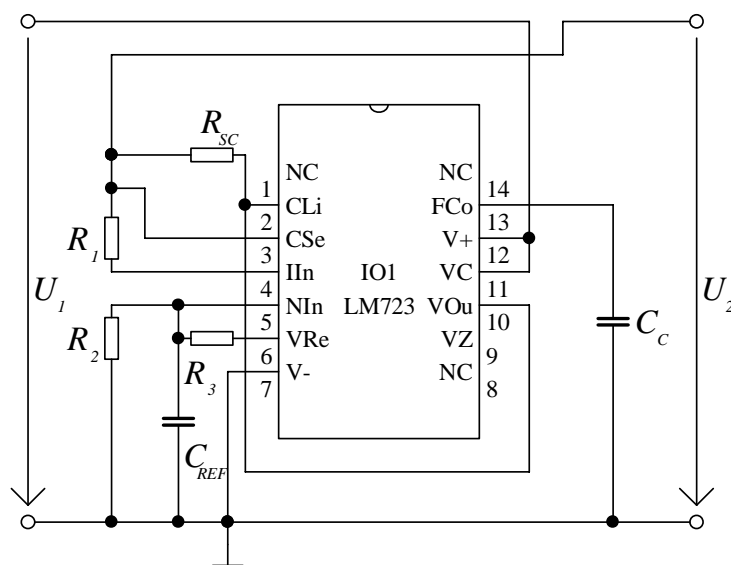
### 1.3.6 Stabilizátor 723 s nastavitelným napětím a proudovým omezením

Stabilizátor 723 patří mezi nejpoužívanější integrované obvody, pokud se týká stabilizátorů s nastavitelným napětím a proudovým omezením. Jde prakticky o nejuniverzálnější obvod. Jeho maximální vstupní napětí  $U_1$  je 40 V a jeho výstup lze zatížit proudem 150 mA. Obvod v sobě obsahuje Zenerovu diodu jako zdroj referenčního napětí a obvod zajišťující proudové omezení. Pomocí tohoto stabilizátoru lze vhodným zapojením

sestavit regulovatelný zdroj s nastavitelným napětím a nastavitelnou proudovou limitací. Také lze sestavit obvod pro stabilizaci kladného i záporného napětí. Dále je možné pomocí externích součástek využít proudového omezení, kdy výstupní proud po dosažení kritické hranice automaticky klesá (foldback) při snižování odporu na nulu. To je zvláště vhodné, pokud potřebujeme zajistit, abychom neměli samotný obvod, případně externí tranzistory, přetěžované ztrátovým výkonem. S tím samozřejmě klesá také výstupní napětí. Dle datasheetu výrobce má obvod dvě základní doporučená zapojení. První zapojení je vhodné pro výstupní napětí do 7,15 V: *Obrázek 1.24* a druhé zapojení je vhodné pro výstupní napětí nad 7,15 V: *Obrázek 1.25*.



Obrázek 1.24- Doporučené zapojení LM723 do 7V [2]



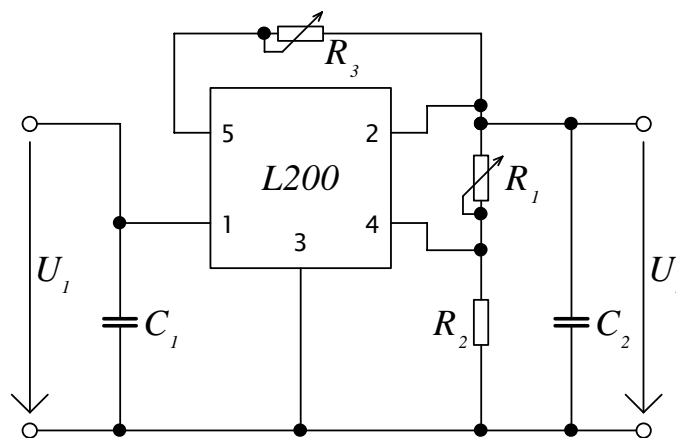
Obrázek 1.25 - Doporučené zapojení LM723 nad 7V [2]



Zapojení s obvodem 723 je celá řada. Obvod se dá například použít jako plovoucí stabilizátor nebo spínaný stabilizátor. Není prakticky možné v této práci obsáhnout všechny. Provedení integrovaného obvodu je realizováno v plastovém pouzdru DIL, které má 14 vývodů, nebo v kovovém pouzdru TO-5, které má 10 vývodů. Obecně mají kovová pouzdra větší rozsah teplot, ve kterých mohou pracovat. [6], [2]

### 1.3.7 Stabilizátor L200 s nastavitelným napětím a proudem

Obvod L200 představuje integrovaný stabilizátor s nastavitelným napětím i nastavitelným proudem. Jeho velká výhoda tkví v jeho mnohostranné použitelnosti a není třeba jej doplňovat složitým externím obvodem. K základní funkci postačí sestavit z rezistorů dělič napětí k nastavení výstupního napětí a mezi výstup a vývod 5 navrhnut rezistor k nastavení výstupního proudu. Tento obvod obsahuje proudové omezení a ochranu proti přehřátí obvodu. Jeho maximální vstupní napětí je 40 V. Napěťový rozsah výstupu je mezi 2,86 V – 36 V a maximální proudové zatížení výstupu je 2 A. Příklad zapojení obvodu je na obrázku: *Obrázek 1.26*.



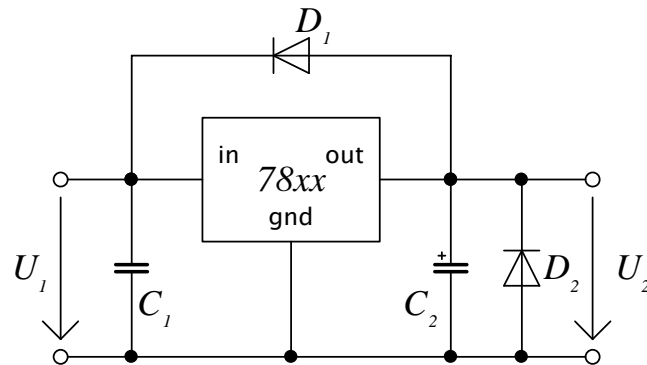
Obrázek 1.26 - Příklad zapojení obvodu L200 [1]

Na tento obvod jsem se ptal svého vedoucího práce, pana Ing. Zdeňka Kubíka Ph. D., a ten mi sdělil, že s ním nemá vůbec dobré zkušenosti. Např. regulace napětí prý není lineární. [2], [1]

### 1.3.8 Ochrany stabilizátorů

Jelikož je stabilizátor citlivý obvod, je nutné jej chránit před venkovními vlivy, které by jej mohly poškodit (myšleno elektrické vlivy přicházející z výstupu). Z tohoto důvodu se do obvodů zařazují diody v závěrném směru, které mají za úkol zajistit, že zkratové proudy

nebudou protékat stabilizátorem. Z tohoto důvodu se zapojuje jedna dioda v závěrném směru na výstup a druhá dioda v závěrném směru se zapojuje paralelně k stabilizátoru. Diody mají rovněž za úkol ochránit stabilizátor proti zkratu na výstupu a také proti zkratu na vstupu. Diody nám totiž zajišťují, že stabilizátor bude namáhán pouze napětím 0,7 V, což je úbytek napětí na přechodu PN u diody. Schéma, jak jsou diody umístěny, je vyobrazeno na obrázku: *Obrázek 1.27*.



Obrázek 1.27 - Zapojení ochranných diod [2]

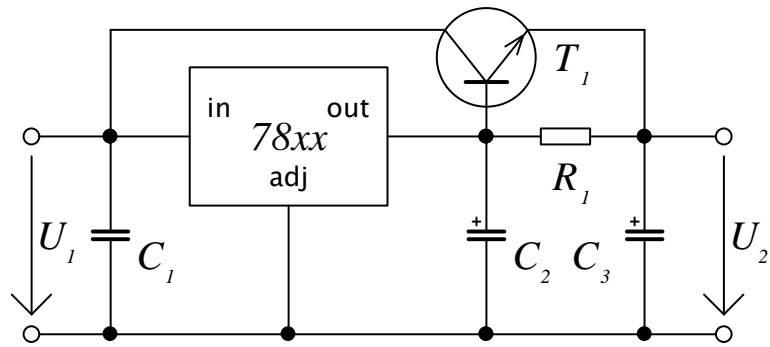
Toto zapojení ochranných diod můžeme použít i u jiných typů stabilizátorů, než jen u vyobrazeného 78xx. Např. u obvodu 723 nebo LM317. [2], [1]

### 1.3.9 Proudové posílení výstupu

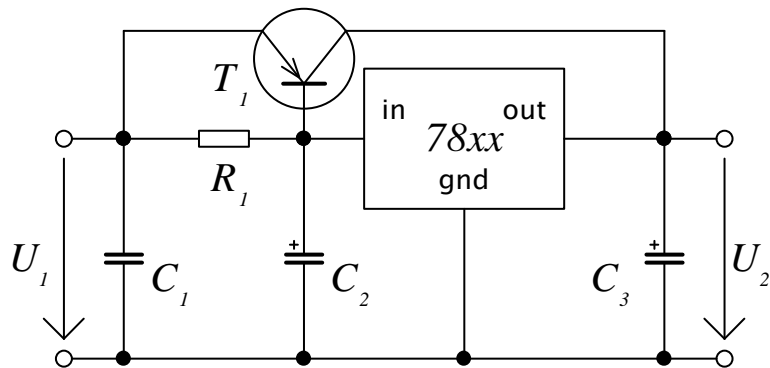
Proudové posílení výstupu se aplikuje v případě, že potřebujeme na výstupu maximální možné proudy větší, než jaké nám může poskytnout stabilizátor jako takový. Proudové posílení externím tranzistorem se dá konstruovat pomocí tranzistoru NPN nebo pomocí tranzistoru PNP.

U proudového posílení NPN tranzistorem je princip v tom, že výstupním napětím a proudem stabilizátoru otevíráme připojený tranzistor. Výstup ze stabilizátoru tedy připojujeme na bázi externího tranzistoru. Schéma je na obrázku:

U proudového posílení PNP tranzistorem zase proudem z emitoru do báze zajišťujeme tok proudu z emitoru do kolektoru. Výstupní proud je dán vstupním proudem do stabilizátoru (ten je dán výstupním proudem ze stabilizátoru a proudem ze zemní svorky na kostru) a proudovým zesilovacím činitelem  $H_{FE}$ . Schéma je na obrázku:



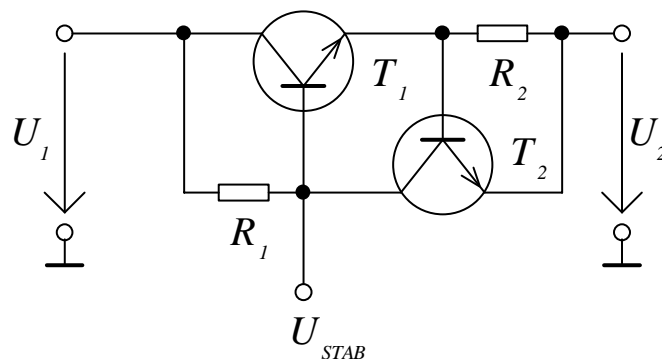
Obrázek 1.28 - Proudové posílení NPN tranzistorem [2]



Obrázek 1.29 - Proudové posílení PNP tranzistorem [2]

### 1.3.10 Externí nadproudová ochrana

Externí nadproudovou ochranu můžeme zkonstruovat za pomoci dvou NPN tranzistorů. Princip spočívá v tom, že proud do výstupu vyvolává úbytek napětí na rezistoru  $R_2$ . Pokud tento úbytek přesáhne  $0,66\text{ V}$ , otevře tranzistor  $T_2$  a tím sníží napětí na bázi tranzistoru  $T_1$ , který pak uzavírá. Tím nám na výstupu klesá napětí, ale proud zůstává konstantní. Ten závisí na hodnotě rezistoru  $R_2$ .



Obrázek 1.30 - Nadproudová ochrana pomocí dvou NPN tranzistorů [2]

## 2 Návrh napájecího zdroje

Z uvedených obvodových zapojení a možností konstrukce napájecího zdroje jsem si vybral návrh lineárního zdroje, zapojení s obvodem 723. Konkrétně integrovaným obvodem UA723. Vybral jsem si jej z toho důvodu, že se jedná o univerzální regulátor napětí s možným nastavením proudové limitace. Jak je uvedeno v zadání, zdroj má mít maximální možný proud na výstupu 10 A a má mít plynule regulovatelné napětí v rozmezí 0 – 30 V. Skříň zdroje jsem obdržel s dvěma plně funkčními transformátory. Není tedy důvod pro to, aby se konstruoval zdroj spínaný, případně měnily transformátory. Zbytečně by to nemale zvedalo náklady na konstrukci. Navíc je nutné zachovat bezpečnost zdroje, což galvanickým oddělením obvodu přes transformátory beze zbytku splním. Skříň jsem také použil původní, jelikož svým provedením se jedná o velmi robustní – je plně kovová s praktickými madly pro přenášení po stranách.

### 2.1 Návrh zapojení obecně

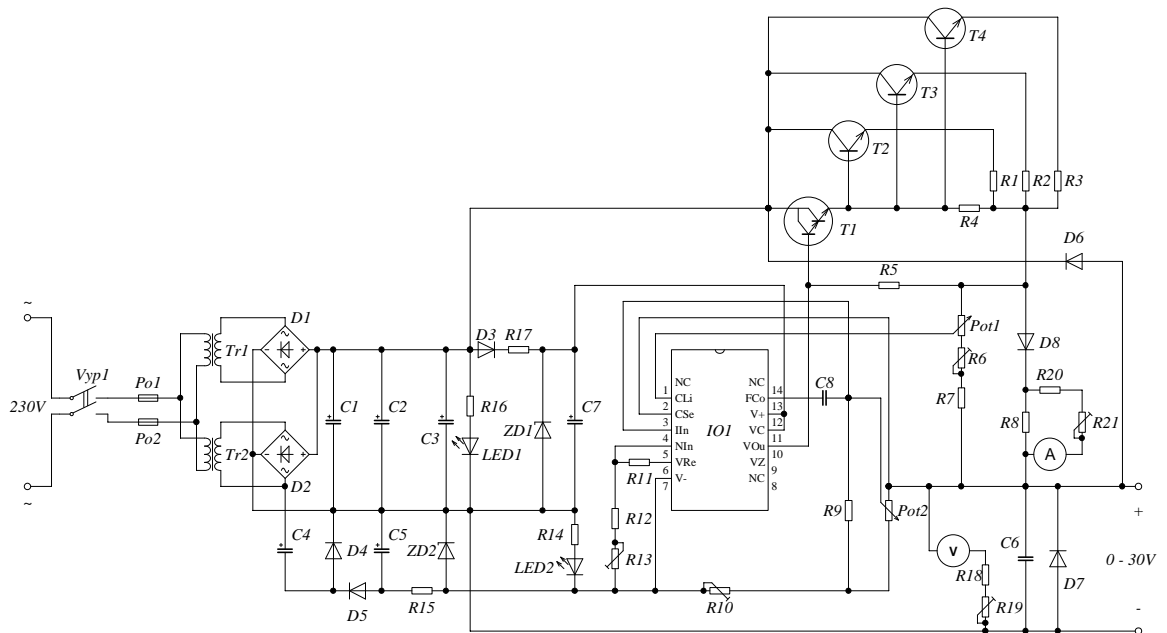
Při návrhu zapojení s obvodem 723 jsem vycházel z doporučeného zapojení výrobcem, který je k dispozici v datasheetu k integrovanému obvodu. Při návrhu zapojení jsem musel ale řešit tři nejdůležitější věci.

První věcí bylo proudové posílení výstupu – to je třeba vyřešit pomocí tranzistorů na výstupu. V mém případě jsem využil třech paralelně zapojených tranzistorů NPN, typ 2N3055, protože se mi jeví jednodušší, než použití tranzistorů PNP. Tranzistory jako takové by měly být dostatečně robustní, aby pokryly nároky na proudovou dimenzaci výstupu. Dle katalogových hodnot výrobce jsou tranzistory konstruovány na kolektorový proud 15 A. Zdroj sice má být konstruován na 10 A, ale ze zkušeností je dobré tento výkonový prvek značně dimenzovat. Nedochozí potom k takovému zahřívání tranzistoru a navíc, jelikož jde o laboratorní zdroj, nevím, co s ním budou studenti provádět. Důležité je, aby polovodič netvořil nejslabší prvek v obvodu. Dále je důležité, aby maximální ztrátový výkon na tranzistoru ležel pod hranicí stanovenou výrobcem. V opačném případě bychom polovodič nedokázali dostatečně uchlazení a mohlo by dojít k jeho zničení. Co se týká napětí, tranzistor plně vyhovuje. Maximální napětí kolektor-emitor je 70 V. To také plně dostačuje a na nižší napětí při stejném proudu jsem jiný tranzistor v katalogu prodejce nenalezl.

Druhou důležitou věcí je, jak zařídit, aby zdroj reguloval skutečně od nuly. Pokud bychom použili přesně zapojení dle výrobce, zdroj by regulovat od nuly nešel. To je dáno referenčním zdrojem napětí uvnitř IO. Napěťově bychom mohli být jen na stejné úrovni, jakou má onen zdroj. Tato hodnota napětí je výrobcem stanovena na 2 V jako minimální úroveň výstupního napětí. Řešením je, pokud si vytvoříme zdroj záporného napětí oproti nule a na toto záporné napětí vyvedeme veškeré svorky regulačního obvodu – stanovíme si pro obvod nulu níže, než je nula na výstupu zdroje. Potom, při dobrém nastavení, by nám mělo jít nakalibrovat výstup plus oproti výstupní nule na 0 V. Jelikož má obvod malou spotřebu a výstup máme zapojen přes výkonové tranzistory, můžeme konstrukci transformátoru se středovým vývodem, případně s odbočkou, obejít násobičem se zápornou orientací a napětí stabilizovat Zenerovou diodou. Když potom sečteme záporné napětí oproti nule a kladné napětí oproti nule, Rozdíl nesmí být vyšší, než je maximální povolené napětí výrobcem na integrovaném obvodu. Pokud bychom to nedodrželi, obvod by se zničil.

Třetí důležitou věcí je správný návrh proudového omezení. Obvod 723 je konstruován tak, že má vývod označen *Current Limit*, který se připojí před součástku, na které musíme vlivem protékajícího proudu vyvolat úbytek napětí. Druhý vývod *Current Sense* se používá právě pro zjišťování uvedeného úbytku. Dle vnitřního schématu integrovaného obvodu je výstup *Current Limit* zapojen na bázi vnitřního tranzistoru a výstup *Current Sense* na emitor uvedeného tranzistoru. Princip limitace je takový, že při vyšším úbytku napětí na součástce vložené mezi vývody *Current Limit* a *Current Sense*, než je 0,66 V, což je úbytek napětí na přechodu báze-emitor dojde k tomu, že začne procházet proud mezi právě bází a emitorem a tím pádem tranzistor otevře a začne protékat proud také mezi kolektorem a emitorem vnitřního tranzistoru. To má za následek, že v integrovaném obvodu se přivírá, až uzavře, výstupní tranzistor – na výstupu klesá napětí a tím pádem klesá také výstupní proud. Při použití externího výkonového tranzistoru je princip stejný, avšak vnitřním NPN tranzistorem přivíráme externí tranzistor NPN.

## 2.2 Návrh schématu zapojení



Obrázek 2.1 - Náčrt schématu zapojení

Při návrhu schématu zapojení jsem, jak již bylo řečeno, vycházel z doporučeného zapojení výrobcem. Přehledné schéma zapojení, rozkreslené pomocí software *profiCAD*, je umístěno v samostatné příloze této práce. V příloze je rovněž seznam součástek a jejich hodnoty.

Popis návrhu budu uvádět směrem odzadu, protože toto je správný postup během návrhu zařízení. Návrh předradníku u voltmetru je řešen za pomoci předradného odporu a trimru. Trimr nám umožní přesně nastavit správnou hodnotu napětí, protože hodnoty odporů mají svou toleranci, přesné hodnoty se navíc nevyrábějí (jsou k dispozici pouze hodnoty v řadě) a také musíme započítat úbytek napětí na vodičích. Hodnota rezistoru  $R_{18}$  vychází  $240\text{ k}\Omega$  a hodnota trimru  $R_{19}$  vychází  $100\text{ k}\Omega$ . Voltmetr je vlastně mikroampérmetr, který má 30 dílků na stupnici a na plné výchylce jím teče proud  $100\text{ }\mu\text{A}$ . Jeho vnitřní odpor je, dle dokumentace,  $510\text{ }\Omega$ . Hodnoty rezistoru a trimru jsou dány vztahem:

$$R_{pCELK} = \frac{U_{outMAX}}{I_{vMAX}} - R_v = \frac{30}{0,0001} - 510$$

$$= 299,49\text{ k}\Omega \quad (2.1)$$

Kde:  $R_{pCELK}$  je celková hodnota předřadníku,  $U_{outMAX}$  je maximální hodnota výstupního napětí,  $R_v$  je vnitřní odpor voltmetru a  $I_{vMAX}$  je maximální hodnota proudu voltmetrem při plné výchylce ručky. Pokud počítáme předřadník, vždy musíme počítat s maximálními hodnotami, které se v obvodu mohou objevit. Celkově vyšší hodnotu předřadníku je nutno volit z důvodu, abychom měli možnost regulace trimrem směrem nahoru i dolů. Ideálně tak, aby případné snížení hodnoty trimru na nulu nezpůsobilo poškození mikroampérmetru (voltmetru). Proto není vhodné dávat jako předřadník pouze trimr.

Bočník u ampérmetru jsem použil stávající. Jde o odporový drát, který má hodnotu  $0,1 \Omega$ . Tuto hodnotu jsem ověřil multimetrem UNI-T UT70A, ikdyž měřit takto nízké hodnoty tímto multimetrem je velmi nepřesné. Vhodnější by bylo použít např. Ohmovu metodu. Hodnota byla rovněž uvedena v manuálu k původnímu zdroji RFT, který se mi podařilo objevit ve formátu PDF na internetu. Chtěl jsem si být jist, že v průběhu času nedošlo k výrazné změně nebo poruše na bočníku. Zdroj byl přeci jen přes 30 let starý. V případě bočníku jde o odporový drát, který má relativně vysokou přesnost rezistivity a je na výstupní proud již navržen. Pokud bychom měli přistoupit k výpočtu hodnot odporů  $R_{20}$  a  $R_{21}$ , potom bočník  $R_8$  je dán, má tedy hodnotu  $0,1 \Omega$ . Úbytek napětí na něm bude:

$$\begin{aligned}\Delta U_b &= R_b \cdot I_{MAX} = 0,1 \cdot 9,9999 \\ &= 0,99999 \text{ V}\end{aligned}\tag{2.2}$$

Maximální proud mikroampérmetrem je  $I_{aMAX} = 100 \mu A$  a má stupnici 50 dílků. Vnitřní odpor ampérmetru je dle dokumentace  $510 \Omega$ . Při maximálním proudu  $10 A$  na výstupu poteče bočníkem proud  $9,9999 A$ , protože proud  $100 \mu A$  se rovná maximální výchylce ampérmetru. Proud  $100 \mu A$  teče rezistory  $R_{20}$ ,  $R_{21}$  a přes vnitřní odpor ampérmetru  $R_a$ . Kdybychom přistoupili k výpočtu předřadných odporů u mikroampérmetru, vztah by byl následující:

$$\begin{aligned}
 R_{pA} &= \frac{\Delta U_b}{I_{aMAX}} - R_a = \frac{0,99999}{0,0001} - 510 \\
 &= 9489,9 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Pro sestavení požadované hodnoty odporu opět použijeme rezistoru a trimru. Rezistor  $R_{20}$  zvolíme  $7,5 \text{ k}\Omega$  a hodnotu trimru  $R_{21}$  zvolíme  $2,2 \text{ k}\Omega$ . Celkově máme opět možnost trimrem doladit skutečný proud a to směrem nad i pod vypočítanou hodnotu.

Návrh proudového omezení spočívá v tom, že na součástce vznikne vlivem procházejícího proudu dostatečný úbytek napětí na to, aby otevřel tranzistor NPN uvnitř integrovaného obvodu a jím začal procházet proud. Tím se začne uzavírat vnitřní tranzistor na výstupu obvodu. Napětí na výstupu se pak snižuje a tím se omezuje i výstupní proud. Napětí, které má otevřít vnitřní tranzistor, si zajistíme pomocí úbytku napětí na rezistoru, který do obvodu zařadíme. Úbytek napětí na rezistoru totiž lineárně vzrůstá úměrně k velikosti protékajícího proudu, přičemž hodnota odporu zůstává konstantní. Jakmile na rezistoru dosáhneme úbytku napětí  $0,66 \text{ V}$ , měl by otevřít NPN tranzistor uvnitř integrovaného obvodu a tím dojít k proudovému omezení. Jelikož výstupní proud je veliký, tak bychom při proudu  $10 \text{ A}$  potřebovali rezistor v hodnotě  $0,066 \Omega$ , abychom vyvolali potřebný úbytek napětí. Jelikož máme k dispozici bočník k ampérmetru o hodnotě  $0,1 \Omega$ , použijeme jej rovněž k proudovému omezení. Rezistory s odporem  $0,066 \Omega$  není možné zakoupit a kdybychom se jej snažili poskládat z dostupných rezistorů v řadě pomocí sériového a paralelního řazení, byl by zdroj příliš velký a celková hodnota by nebyla vůbec přesná. Každý rezistor je vyráběn v jisté toleranci. Použijeme tedy uvedený bočník. Možností rovněž je zakoupit výkonové rezistory a použít tyto rezistory a bočník nechat pouze k ampérmetru, ale to je zcela zbytečné. Úbytek napětí na bočníku nám při proudu  $10 \text{ A}$  vyjde  $1 \text{ V}$ . Pokud bychom chtěli počítat dělič napětí s touto hodnotou napětí, hodnoty rezistorů by nám vyšly příliš malé. Je tedy vhodné použít řešení, kdy před bočník zařadíme polovodičovou diodu. Ta nám zajistí, že úbytek napětí v celém obvodu bude navýšen ještě o úbytek napětí na diodě. Celkově bychom tedy měli dosáhnout napětí  $1,7 \text{ V}$  při proudu  $10 \text{ A}$  a dle vlastností polovodičové diody,  $0,7 \text{ V}$  při nulovém proudu. Volím diodu  $D_8$  typ  $40FR60$ . Je na proud  $40 \text{ A}$ , tudíž by se neměla ani příliš zahřívat. Napětí na přechodu PN je víceméně konstantní, nebo se mění jen minimálně



v závislosti na procházejícím proudu.  $1,7\text{ V}$  je napětí, kde nám již nebude takovou roli hrát úbytek napětí na vodičích a i rezistory a potenciometr pro dělič napětí nebudou mít tak nízké hodnoty. Potřebné hodnoty rezistorů v děliči napětí tedy spočítáme pomocí vzorce pro výpočet děliče napětí. Na vstupu děliče máme při maximálním proudu tedy  $1,7\text{ V}$  a potřebujeme, aby napětí na výstupu bylo  $0,66\text{ V}$ . Toto jsou krajní hodnoty při maximálním proudu. Dělič navrhujeme tak, aby větší proudy nastavit nešly. Pouze nižší. Budeme tedy uvažovat, že součtem obou rezistorů poteče proud  $1,7\text{ mA}$ . Máme totiž v obvodu dvě neznámé a musíme si jeden rezistor určit. Potom by dle vztahu:

$$\Delta U = R \cdot I \quad (2.4)$$

Z toho vypočítáme  $R$ :

$$R = \frac{\Delta U}{I} = \frac{1,7}{0,0017} = 1000\ \Omega \quad (2.5)$$

Součet odporů tedy vychází  $1000\ \Omega$ .

Potenciometr se vyrábí s hodnotou  $500\ \Omega$ . Použijeme tedy tento jako  $Pot_1$ . Pro správný výpočet pevného rezistoru použijeme vztah pro dělič napětí.

$$U_{BE} = \Delta U \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

Po dosazení:

$$0,66 = 1,7 \cdot \frac{R_2}{500 + R_2} \quad (2.7)$$

Převédeme:

$$\frac{0,66}{1,7} = \frac{R_2}{500 + R_2} \quad (2.8)$$

Upravíme:

$$0,39R_2 + 194,12 = R_2 \quad (2.9)$$

Převédeme:

$$194,12 = 0,61R_2 \quad (2.10)$$

Spočítáme:

$$R_2 = 318,23 \doteq 320 \Omega \quad (2.11)$$

Rezistory tedy máme stanoveny: Potenciometr  $Pot_1$  500  $\Omega$ . bude zapojen odbočkou na integrovaný obvod. Rezistor  $R_2$  na 320  $\Omega$ . Rezistor je složen z trimru  $R_6$  500  $\Omega$  a rezistoru  $R_7$  100  $\Omega$ . Je to opět kvůli možnosti přesného nastavení. Trimr jsem použil větší, neboť jsem jej měl doma a na hodnotu 220  $\Omega$  jej lze doregulovat. Pokud provedeme kontrolu, abychom zjistili skutečný proud oběma rezistory, tak nám vyjde: 2 mA.

Při návrhu výkonových tranzistorů postupujeme tak, že ze zapojení určíme, jaké maximální napětí kolektor-emitor budeme v obvodu mít. Dle zapojení by mělo být maximálně:  $24 \cdot \sqrt{2}$ , protože 24 V je efektivní hodnota napětí na svorkách sekundárního vinutí transformátoru a kondenzátory se nám nabijí na maximální hodnotu. Celkově tedy přibližně 34 V. Vybíráme rovněž dle maximálního kolektorového proudu. Používáme tranzistory 3, takže by stačil tranzistor pro max. kolektorový proud  $\frac{10}{3}$ . Zde bychom ale neměli žádnou dimenzaci. Zvolíme tedy tranzistor, který odolá i špičkovému proudu a má solidní proudové zesílení. Z katalogu tedy vybírám tranzistory 2N3055, přičemž použiji 3 kusy jako  $T_2$ ,  $T_3$  a  $T_4$ . Další hodnota, která nás zajímá, je proudový zesilovací činitel. Ten nám

udává, jakého proudu na emitoru dosáhneme při určitém proudu do báze tranzistoru. Máme tři tranzistory. Potřebujeme tedy na jednom dosáhnout proudu, zaokrouhleme, 4 A, abychom měli rezervu. Proudový zesilovací činitel tranzistoru  $h_{FE}$  je minimálně 20. Proud do báze tedy bude:

$$I_B = \frac{I_{CE}}{h_{FE}} = \frac{4}{20} = 200 \text{ mA} \quad (2.12)$$

Tento proud vynásobíme třemi a celkově tedy potřebujeme proud 600 mA, abychom tranzistory dostatečně otevřeli. Jelikož nám integrovaný obvod je schopen poskytnout pouze 150 mA, bude nutné použít ještě jeden tranzistor, kterým otevřeme výkonové. Abychom zajistili malé proudové zatížení výstupu, a dosáhli velkého proudového zesilovacího činitele, použijeme Darlingtonovo zapojení tranzistorů. Znovu vybíráme na maximální napětí 34 V maximální kolektorový proud minimálně 1 A. Z katalogu jsem vybral tranzistor BDX33C jako tranzistor  $T_1$ . Maximální možné napětí kolektor-emitor je až 100 V, kolektorový proud až 10 A a proudový zesilovací činitel  $h_{FE}$  minimálně 750. Potřebný proud do báze tohoto tranzistoru tedy bude:

$$I_B = \frac{I_{CE}}{h_{FE}} = \frac{0,6}{750} = 800 \text{ } \mu\text{A} \quad (2.13)$$

Tranzistor tedy spolehlivě otevřeme a jím spolehlivě otevřeme i výkonové tranzistory. Rezistory  $R_4$  47  $\Omega$  a  $R_5$  560  $\Omega$ , které máme do obvodu osazené, zajišťují, že tranzistory budou správně zavírat. Do silového obvodu volím jako  $R_1$ ,  $R_2$  a  $R_3$  co nejmenší hodnoty - 0,1  $\Omega$  jako rezistory v každém emitoru tranzistorů. Na všech vznikne úbytek napětí 0,4 V. Jde o rezistory, které mají zajistit, že všemi tranzistory poteče stejný proud. Proud prvním rezistorem  $R_4$  volím 25 mA a rezistorem  $R_5$  na výstupu integrovaného obvodu 3 mA. Jejich hodnoty se dají spočítat pomocí Ohmova zákona:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1,06}{0,025} = 42,4 \doteq 47 \text{ } \Omega \quad (2.14)$$

A druhý rezistor:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1,72}{0,003} = 573,3 \Omega \doteq 560 \Omega \quad (2.15)$$

Rezistory jsem vybral z řady. Jejich hodnota není tak kritická a je možno ji zaokrouhlit.

Dělič napětí z výstupu referenčního napětí na invertovaný vstup integrovaného obvodu a svorku záporného napětí jsem zvolil pro hodnotu proudu  $1,5 \text{ mA}$ . Dle datasheetu jde výstup zatížit až  $15 \text{ mA}$ , ale nechceme zdroj referenčního napětí uvnitř IO zbytečně zatěžovat. Na výstupu referenčního napětí tedy máme  $7,15 \text{ V}$ . Pokud zvolíme rezistory stejné velikosti, budeme mít na neinvertujícím vstupu polovinu referenčního napětí. Velikosti těchto rezistorů nám, v mém případě, nastavují hranici minimálního výstupního napětí. Pro výpočet celkového odporu rezistorů použijeme vztah:

$$R = \frac{U_{REF}}{I_R} = \frac{7,15}{0,0015} = 4766 \Omega \quad (2.16)$$

Dělič počítáme tímto způsobem, protože proud do neinvertujícího vstupu je zanedbatelný, až nulový. Jde o vstup operačního zesilovače. Rezistory  $R_{11}$  a  $R_{12}$  tedy zvolíme o velikostech  $2,2 \text{ k}\Omega$ . Na neinvertujícím vstupu nyní máme napětí  $3,575 \text{ V}$ . To je v tuto chvíli minimální napětí, jaké můžeme dosáhnout na výstupu ze zdroje. Abychom se posunuli směrem k nule, můžeme využít zdroje záporného napětí. Ten nám minimální hodnotu výstupního napětí posune až na nulu, pokud jej připojíme místo země na rezistor děliče napětí, který je mezi neinvertujícím vstupem a zemí. Nesmíme ale zapomenout na záporné napětí připojit také mínus vývod napájení obvodu  $UA723$ . V ideálním případě použijeme zdroj záporného napětí, jehož hodnota je vyšší, než původní napětí na neinvertujícím vstupu a zemí. Umístíme rovněž trimr, abychom mohli hodnotu napětí přesně doladit na nulu na výstupu zdroje. V mém případě jsem použil Zenerovu diodu s hodnotou  $4,7 \text{ V}$ , která je zapojena v závěrném směru mezi nulou a záporným napětím. Výpočet velikosti trimru mezi odporový dělič a zápornou svorku spočteme ze vztahu:

$$R = \frac{-(U_{zap})}{I_R} = \frac{4,7}{0,0015} = 3133 \Omega \quad (2.17)$$

Vybral jsem trimr  $R_{13}$  o velikosti  $4,7\text{ k}\Omega$ , který je větší, ale máme zde širší možnost regulace napětí směrem nahoru i dolů. Výpočty jsou pro krajní nastavení. Pokud hodnotu zvýšíme, referenční napětí na neinvertujícím vstupu bude vyšší a tím pádem i napětí na výstupu. Pokud hodnotu snížíme, výstupní napětí bude nižší.

Regulaci napětí na výstupu provádíme pomocí změny úbytku napětí na deliči napětí do invertujícího vstupu. Jestliže na tomto vstupu bude kladnější napětí, než na neinvertujícím, regulátor by měl výstupní napětí snižovat. Pokud bude kladnější napětí na invertujícího vstupu, regulátor by měl napětí zvyšovat. Výpočet provedeme obdobně. Opět zanedbáváme proud tekoucí do vstupu, jelikož jde opět o operační zesilovač. Proud děličem si zvolíme  $3\text{ mA}$ . Napětí mezi výstupem a záporným napětím máme  $34,7\text{ V}$ . Celkovou hodnotu tedy spočítáme:

$$R = \frac{U_{celk}}{I_R} = \frac{34,7}{0,003} = 11567\ \Omega \quad (2.18)$$

Hodnotu trimru pro nastavení maximálního napětí zvolíme:

$$R_T = \frac{U_Z}{I_R} = \frac{4,7}{0,003} = 1566\ \Omega \quad (2.19)$$

Volím trimr  $R_{10}$  s větší hodnotou odporu, aby byl prostor pro nastavení -  $2,2\text{ k}\Omega$ .

Hodnotu potenciometru  $Pot_2$  vybíráme dle vyráběných. Nejbližší hodnota je  $10\text{ k}\Omega$ . Zapojíme jej tak, že jezdec je připojen k invertujícímu vstupu, jeden vývod je připojen na kladné výstupní napětí zdroje a druhý vývod je připojen k trimru, který je připojen na záporné napětí. Paralelně k jezdcí a výstupu připojenému k zápornému napětí zavádíme ještě jeden rezistor  $R_9$  o hodnotě  $1\text{ k}\Omega$ . Ten nám zajistí, že proud děličem napětí bude při poklesu výstupního napětí stejný a to nízký. Rezistor brání proudu téci do zdroje záporného napětí a tak jej nadměrně zatěžovat. Tímto jsou rezistory zapojeny paralelně a jejich celkový odpor je nižší, než odpor každého z nich. Při maximální výchylce potenciometru bude celkový odpor  $1\text{ k}\Omega$  a při minimální bude  $10\text{ k}\Omega$ . Hodnotu rezistoru spočítáme vztahem:

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{4,7}{0,003} = 1566,7 \Omega \quad (2.20)$$

Volím rezistor 1 k $\Omega$ . Trimr má větší hodnotu, takže není nutné se rozdílem příliš zabývat.

Zenerovu diodu před obvod volíme dle maximálního povoleného napětí na obvodu. Slouží zde jako ochrana před přepětím a zničením obvodu. Obvod dle datasheetu může mít maximální napětí 40 V. Záporná část má napětí  $-4,7$  V. Abychom zajistili správnou funkci, volíme Zenerovu diodu takovou, aby součet záporného napětí a napětí na obvodu oproti kostře byl menší, než 40 V. Vybereme tedy Zenerovu diodu na 33 V. Zenerova dioda musí mít předřadný odpor. K jeho určení musíme znát proud za Zenerovou diodou, tzn. Proud tekoucí do integrovaného obvodu. Sečteme tedy veškeré proudy, které z obvodu tečou. Musíme sečíst proud rezistorem na výstupu, proud tranzistorem a proud děličem napětí v retenčním zdroji napětí. Dále je třeba přičíst proud obvodu v klidovém stavu. Proud tedy bude:

$$1 + 3 + 1,5 + 2 = 7,5 \text{ mA} \quad (2.21)$$

Na výstupu za Zenerovou diodou tedy poteče proud 10,5 mA. Zenerovou diodu  $ZD_1$  volíme s rezervou. Já zvolil BZX85C33, která má max. proud  $I_Z = 33 \text{ mA}$  a maximální ztrátový výkon  $P_D = 1,3 \text{ W}$ . Výpočet rezistoru  $R_{17}$  před Zenerovou diodou provedeme vztahem:

$$R = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + I_2} = \frac{37 - 33}{0,033 + 0,0075} = 98 \Omega \quad (2.22)$$

Rezistor  $R_{17}$  volíme z řady - 100  $\Omega$  - a výkonově jej dimenzujeme minimálně na ztrátový výkon Zenerovy diody. Rezistory se prodávají 2W. Použijeme tedy tento.

Zenerovu diodu  $ZD_2$  pro stabilizaci záporného napětí vybereme totožného typu, pouze s napětím 4,7 V. Vybral jsem tedy typ BZX85C4V7. Rezistor  $R_{15}$  k Zenerově diodě vypočteme stejným vztahem:

$$R = \frac{U_1 - U_Z}{I_Z + I_2} = \frac{68 - 4,7}{0,215 + 0,0075} = 285 \Omega \quad (2.23)$$

Rezistor volíme opět z řady a opět výkonově dimenzujeme stejně, jako Zenerovu diodu.

Vyhlazovací kondenzátory volíme na vyšší napětí, než je maximální hodnota napětí za usměrňovačem. Za usměrňovačem máme napětí  $24 \cdot \sqrt{2}$ , takže volíme kondenzátory na napětí 50 V. Na vyšší napěťovou hladinu jsou výrazně dražší, tudíž není vhodné takto moc předimenzovávat. Kapacitu kondenzátorů spočítáme:

$$I = C \frac{du_c}{dt} \quad (2.24)$$

Maximální pokles napětí na kondenzátoru, který přichází v úvahu, je 3 V.

$$10 = C \frac{4}{0,01} \quad (2.25)$$

Po úpravě:

$$10 = 400C \quad (2.26)$$

Výsledek je tedy:

$$C = 0,025 = 25 \text{ mF} \quad (2.27)$$

Jako  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  volím kondenzátory 3 kusy o kapacitách 10 mF.

K zajištění záporného napětí sestavíme násobič napětí. Použijeme pouze jednostupňový. Kapacitu kondenzátoru do násobiče volíme dle vztahu:

$$C_N > 2 \cdot n \cdot (n + 2) \cdot \frac{I}{U_0 \cdot f} \quad (2.28)$$

Po dosazení

$$C_N > 2 \cdot 1 \cdot (1 + 2) \cdot \frac{0,0075}{16,97 \cdot 50} \quad (2.29)$$

Kapacita tedy musí být:

$$C_N > 0,000053 \quad (2.30)$$

Kondenzátor musí být větší, než  $53 \mu F$ . Jako  $C_4$  volím  $100 \mu F$  na napětí  $63 V$ , aby zde byla dostatečná rezerva, pokud by bylo potřeba nějak upravit zapojení. Diody do násobiče stačí běžné na proud  $1 A$ . Prakticky musí vydržet špičkový proud nabíjení kondenzátorů. Vyrábějí se však na  $1000 V$ . Standardně by ale stačila min. dimenzace na  $2 \cdot U_0$ . Jako  $D_3$ ,  $D_4$  a  $D_5$  volím typ  $1N4007$ , ikdyž jimi bude procházet proud pouze  $40 mA$ . Vyhlašovací kapacitu počítáme stejným způsobem, jako filtrační kondenzátory. Při max. vstupním napětí je třeba, aby kondenzátor držel napětí v době, kdy máme na vstupu výpadek jedné půlvlny. Kapacitu  $C_5$  volíme  $470 \mu F / 63 V$ . Měl jsem jej doma. Pokud bychom počítali hodnotu, musíme brát v úvahu, že je zapojen za jednocestným usměrňovačem. Musí tedy být schopen vykryt výpadek napětí po dobu  $0,02 s$  a napětí nesmí poklesnout pod hodnotu  $6 V$ .

Diodové můstky jsou dva. Jejich proudová zatížitelnost, na jeden kus, je, dle datasheetu,  $15 A$  a špičkový proud snesou  $300 A$ . Provedl jsem měření odporu vinutí transformátoru. Odpor je:  $0,2 \Omega$ . Při nabíjení kondenzátorů jimi bude procházet proud:

$$I_{MAX} = \frac{U_{MAX}}{R} = \frac{34}{0,2} = 170 A \quad (2.31)$$



Jedná se o typ: *KBPC1506*, který jsem vybral jako můstky  $D_1$  a  $D_2$ . Dle vypočítaných a katalogových hodnot nedojde k jejich zničení.

Dle katalogu LED diodou teče proud  $20\text{ mA}$ . Výpočet rezistoru  $R_{16}$  pro LED diodu je:

$$R = \frac{U_{MAX} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{34 - 2}{0,02} = 1600\ \Omega \quad (2.32)$$

Rezistor tedy vychází  $1600\ \Omega$ .

Kapacitu kondenzátoru  $C_6$  dávám dle doporučení výrobce IO na výstup a o hodnotě  $100\text{ nF}/50\text{ V}$ .

Kapacita kondenzátoru  $C_8$  je rovněž dána doporučením výrobce a je  $100\text{ pF}/50\text{ V}$ .

Kondenzátor  $C_7$  na vstup napájení IO dávám jen pro jistotu, kdyby docházelo nadměrným odběrem na výstupu zdroje k většímu zvlnění napětí, na které je IO také připojen. Vybral jsem kapacitu  $47\ \mu\text{F}/40\text{ V}$ , která je dostatečná na to, aby dle odběru IO pokryla i 100% zvlnění.

Diody  $D_6$  a  $D_7$  slouží jako ochranné. Použil jsem typ *BYV79E200*. Jsou stavěné na proud  $15\text{ A}$ , což je více než dostatečné. Maximální napětí v závěrném směru je  $200\text{ V}$ .

[5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13]

### 2.3 Návrh desky plošných spojů – DPS

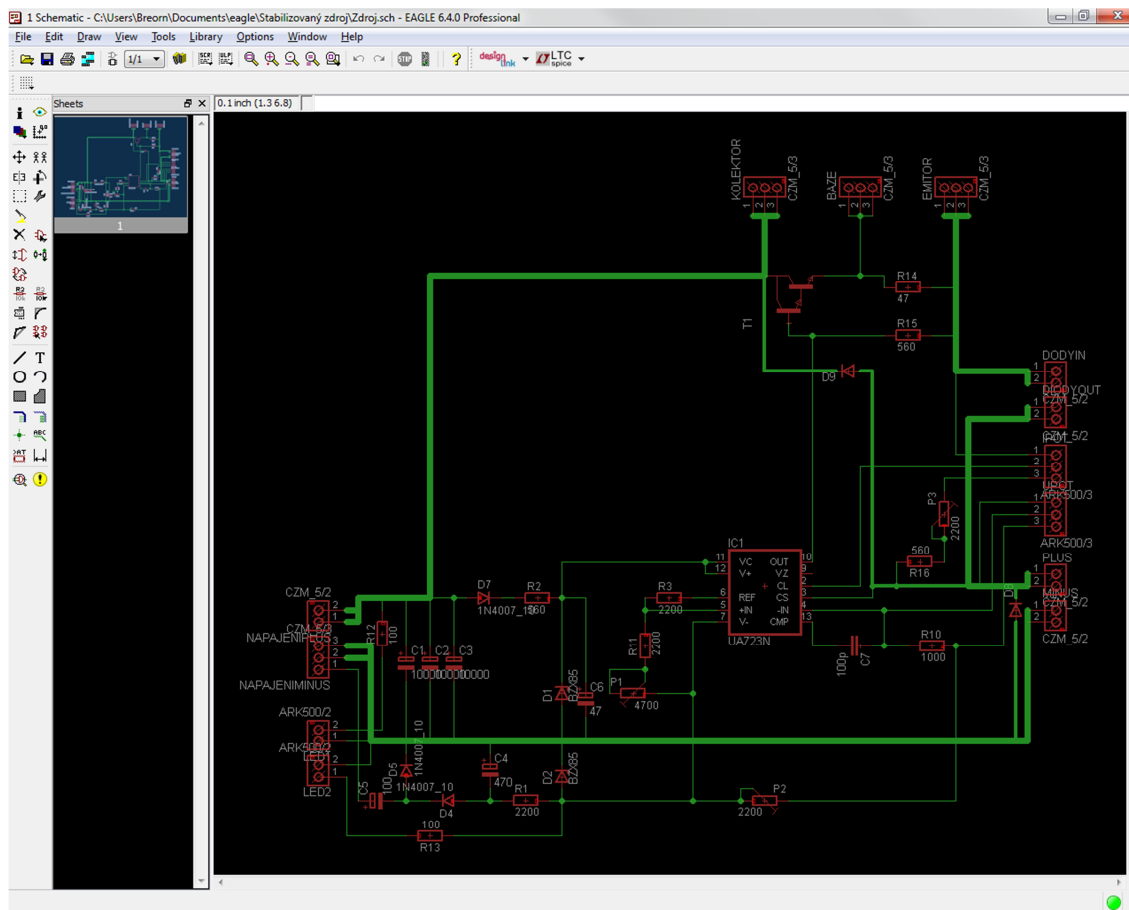
K návrhu desky plošných spojů jsem použil známý program Eagle a to ve verzi 6.4.0. Tento program umožňuje zakreslit schéma zapojení a dle něj navrhnout plošný spoj, přičemž respektuje rozměry vývodů a rozměry pouzder daných součástek. Velkou nevýhodou programu je, že v základním provedení, i přes velkou rozsáhlost databáze, neobsahuje všechna použitá pouzdra součástek a často je nutné knihovny buď stáhnout z internetu, pokud jsou dostupné, nebo si součástku musíme nakreslit sami.

V mém případě jsem použil součástky, které již byly v databázi, nebo jsem si stáhl knihovny z internetu. Jednalo se hlavně o použité svorkovnice do desky plošných spojů. V případě diod *BYV79E200* jsem použil univerzální diodu s pouzdem *TO220AC*, které je použité i u této diody, a samozřejmě si dal pozor na správnou orientaci vývodů (Anoda, Katoda). Ke stažení jsou knihovny obsahující součástky, které prodává společnost GM Electronic. Já nakupoval v GES Electronic, avšak sortiment těchto firem se liší jen minimálně. Jedinou součástku, kde jsem si musel nakreslit pouzdro sám, byl elektrolytický kondenzátor  $10000 \mu F/50 V$  v pouzdru *RM12,5*. Ostatní kondenzátory byly ve stažených knihovnách.

Práce s tímto programem není složitá, pouze je časově náročná a pracná. Je to ale rozhodně rychlejší a snazší, než navrhovat desku ručně. V případě tohoto obvodu by ruční návrh zase tak pracný nebyl, ale v případě složitějších obvodů, např. s větším množstvím hradel a klopných obvodů, už ano.

Postup návrhu DPS je takový, že v programu si nejprve nakreslíme schéma zapojení (File – New – Project a potom File – New - Schematic) a to se všemi svorkovnicemi a vývody, které budeme potřebovat. Do schématu nevkládáme součástky, které montujeme externě na chladič nebo součástky, které se montují na přední panel. Kreslíme pouze to, co má být na desce osazeno a výstupy na součástky mimo DPS osadíme svorkami, případně drátovým vývodem, který v knihovně součástek je. V mém případě jsem osadil všechny výstupy a vstupy šroubovacími svorkovnicemi. Usnadňuje to montáž a v případě poruchy také usnadňuje demontáž desky plošných spojů ze zdroje. To samé jsem provedl i v případě potenciometrů, které se instalují na panel zdroje. Jakmile máme správně nakreslené schéma, je třeba přejít k návrhu desky. To provedeme tak, že klikneme na tlačítko *Generate/switch to board*. Potom stačí potvrdit dialogové okno, že opravdu chceme vytvořit desku dle schématu. Program se nám přepne do rozhraní návrhu desky, kde se nám zobrazí „vrabčí hnízdo“ s použitými součástkami, které jsou propojeny vzdušnými spoji, a obdélník, který reprezentuje desku, na kterou chceme součástky umístit. V první řadě tedy nastavíme správně velikost desky dle žádaného rozměru. Potom začneme umísťovat součástku po součástce na desku, až je budeme mít umístěné dle našich představ. Je dobré mít na paměti, které součástky by nám mohly hřát a které ne. Není dobré, když nám hřející rezistor ohřívá například elektrolytický kondenzátor. Dochází k jeho brzkému vyschnutí. Rovněž musíme dbát na to, aby byl zabezpečen průchod vzduchu a součástky mohly větrat.

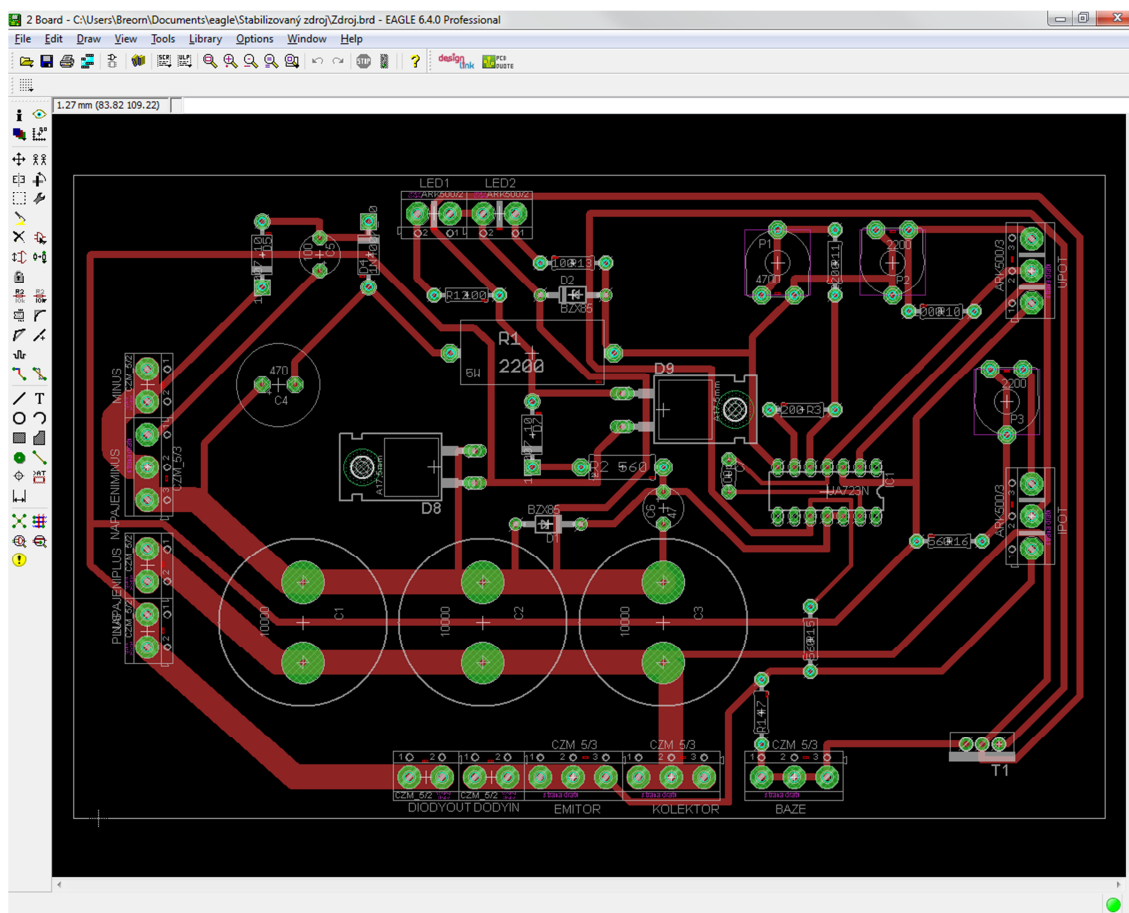
Další důležitou věcí je, aby sousedily součástky, které mají být mezi sebou propojené. Pokud bychom to neudělali, dráhy budou vedené prakticky přes celou desku a to nám učiní desku velice složitou.



Obrázek 2.2 - Rozhraní programu EAGLE pro kresbu schémat

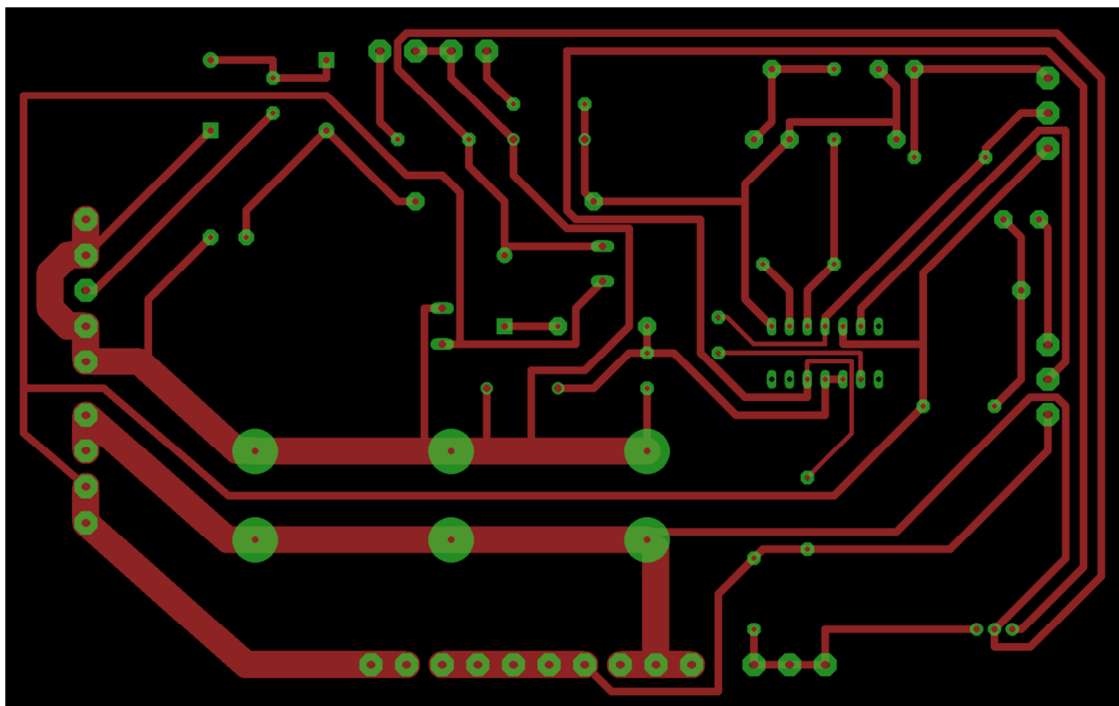
Jakmile máme součástky tedy správně umístěné, začneme všechny vzdušné spoje nahrazovat spoji skutečnými. Jestliže mohu doporučit, silové spoje (velké proudové zatížení) je vhodné nakreslit ručně a natáhnout je v co nejkratší dráze. Musíme rovněž správně nastavit šířku spoje (to se provádí přes kontextové menu v položce *Width*). Jakmile máme všechny tyto proudově namáhané spoje nakreslené, můžeme dále spoje kreslit ručně, nebo spustit funkci *Autoroute*, která propojení provede za nás. Nesmíme ale zapomenout na to, že desku máme jednostrannou (v mém případě) a že spoje mají být na jedné vrstvě. Tento systém totiž, jako většina CADových systémů, podporuje vrstvy a umožňuje tedy několikavrstvé plošné spoje. Funkce *Autoroute* se snaží provést propojení všech vývodů tak, jak jsou propojené ve schématu. Během návrhu se může stát, že se nepovede propojit všechny vývody a návrh skončí někde u konce, např. na 93%. V tom případě je vhodné upravit rozmístění součástek a

spustit funkci znovu. Osobně se mi povedlo vše propojit až na asi desátý pokus. Jakmile máme návrh desky hotov a splňuje naše představy, můžeme přejít k tisku návrhu. V menu vrstev si vybereme: Top (vrchní vrstva), Bottom (spodní vrstva – v mém případě nikoli), Pads (plošky vývodů součástek a svorkovnic), Vias (prostory skrz vrstvy – v mém případě nepoužiji) a Dimension (rozměry desky – ohraničení). Potom přejdeme na funkci Tisk. Je důležité si uvědomit, že pohled na PC je pohled zvrchu. Pro osvětlení a leptání musíme zaškrtnout položky: Mirror, Black, Solid. Tyto volby nám vytisknou matici zrcadlově obrácenou a spoje černě.

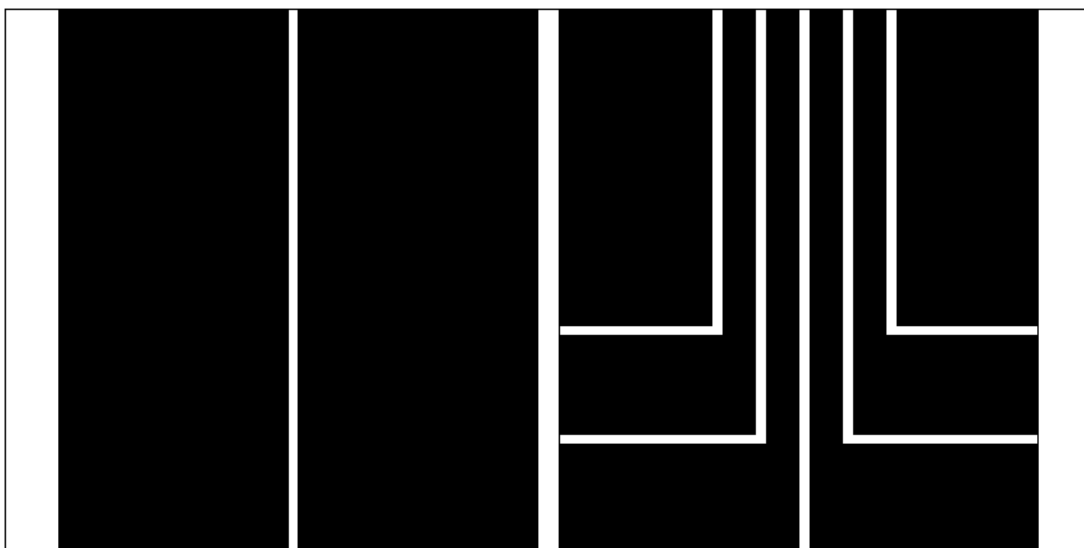


Obrázek 2.3 - Rozhraní programu EAGLE pro návrh DPS

Desku plošných spojů pro rezistory jsem prováděl ručně. Je velice jednoduchá a v tomto případě je ruční návrh a kreslení rychlejší a také levnější. Prakticky jde pouze o desku s přívodními a výstupními svorkovnicemi a rezistory.



Obrázek 2.4 - Exportovaný návrh DPS z programu Eagle

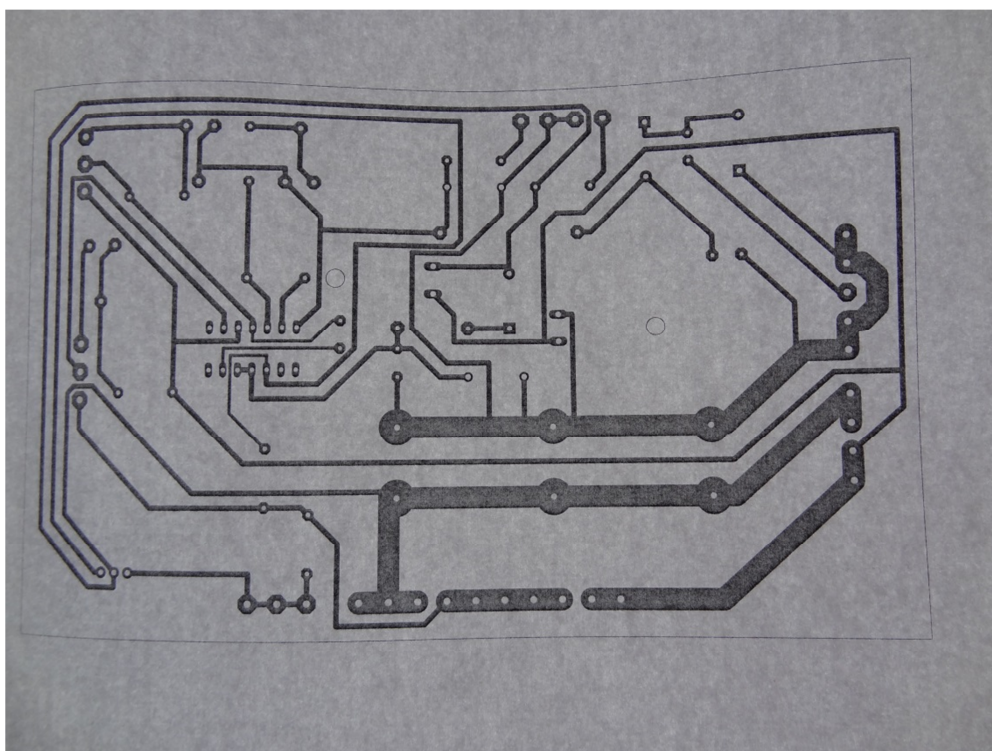


Obrázek 2.5 - Rezistorová DPS

## 2.4 Výroba plošného spoje

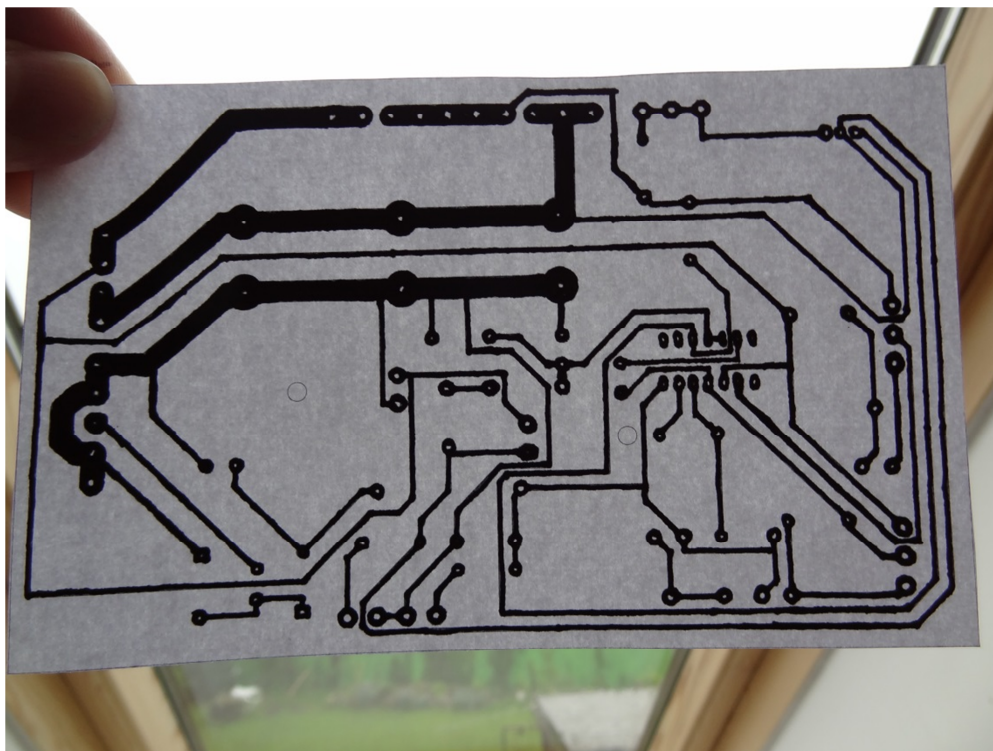
Výroba plošného spoje začíná u tisku předlohy z programu Eagle. Vzhledem ke zkušenostem je vhodné předlohu vytisknout na fólii nebo pauzovací papír. Dobře poslouží i klasický kancelářský papír, ale ten je nutné nastříkat zprůhledňovačem (dá se zakoupit ve spreji v obchodě s elektronickými součástkami pod názvem Transparent 21). Pokud bychom tiskli na folii, je vhodné použít trik pro zvětšení kontrastu. Spočívá v tom, že zakoupíme černou fixu na bílé školní tabule a celou předlohu přemalujeme. Nemusíme jen cesty, ale

můžeme celou. Fix potom jemně otřeme vatou. Částičky barvy z fixu nám ulpí pouze v nerovnostech způsobených nerovnostmi toneru a tím zakryjí případné nedokonalosti vzniklé při tisku. Pozor ale na velmi jemné spoje. Při tisku na pauzovací papír nebo obyčejný papír je vhodné zlepšit krytí tím, že celý motiv opatrně obtáhneme jemným černým fixem. Tato metoda je ale zase nevhodná pro jemné motivy a navíc se nám může fix v papíru rozpíjet. Další možností je pauzovací papír s předlohou nebo obyčejný papír s předlohou vložit na cca 10 – 15 minut do nádoby, která obsahuje výpary acetonu. Barva na vytištěném motivu nám nabobtná a zvýší se kryvost. Nesmíme ale motiv přímo namáčet. Barva by se nám smyla. Osobně jsem při výrobě použil kancelářský papír. Moje tiskárna ale nemá tak dobrý kontrast, takže jsem musel celou předlohu obtáhnout černým fixem, abych zabezpečil, že nebudou UV světlem osvětleny i vodivé cesty. Potom jsem použil zprůhledňovací sprej Transparent 21. Pokud bych jej nepoužil, neosvítíla by se místa, která je nutné odleptat.



Obrázek 2.6 - Vytištěný návrh DPS neobtažený fixem





Obrázek 2.7 - Vytisknutý a obtažený návrh DPS

U rezistorové desky, která byla navrhována ručně, jsem přerýsoval předlohu za pomoci pravítka na cuprexit pomocí lihového fixu. Je postavena metodou přerušovaných spojů, takže je většina desky překryta barvou a odleptává se jen malá část. Tímto vytvoříme izolační mezery. Po vybarvení desky ji dáváme rovnou leptat do chloridu železitého.

#### 2.4.1 Lakování desky

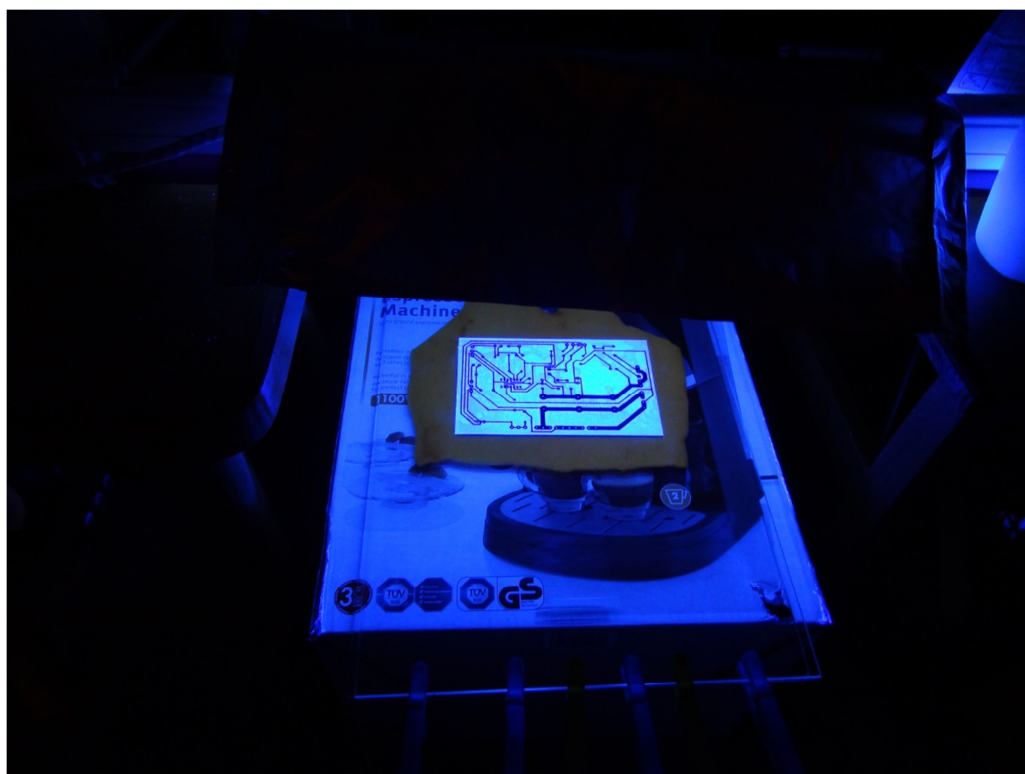
V mém případě jsem zakoupil desku fotocitlivým lakem již opatřenou, ale nalakovat si ji můžeme i sami. K tomu se prodává sprej Positiv, který se dá opět koupit v obchodě s elektronickými součástkami. Pokud bychom si vyráběli desku sami, je nutné ji před nastříkáním velmi dobře očistit. Při stříkání je rovněž nutné dávat pozor na prachové částice. Po nastříkání se deska nechá cca 24 hodin při teplotě cca 20 °C vytvrdnout. Vytvrdnutí urychlíme např. v troubě, kde troubu ohřejeme na 70 °C a vypneme ji. Vložíme desku a necháme tvrdnout cca 15 minut. Musíme dát pozor na UV záření, aby se nám deska neosvítila.

Pro osvit je nutné použít dvě skleněné tabulky. Na první tabulku položíme molitanový čtverec. Ten nám zajistí rovnoměrný přítlak desky s předlohou k vrchnímu sklu. Na molitan umístíme desku s fotocitlivou vrstvou a na ni předlohu. Na předlohu umístíme další tabulku

skla. Tabulky skla k sobě zafixujeme například kolíčky na prádlo. Je to nejrychlejší a nejdostupnější řešení.

### 2.4.2 Osvit desky

Osvícení provádíme UV lampou. Osobně jsem použil 50 cm zářivkovou UV trubici, která se dá koupit například v Hornbachu. Pozor ale na tzv. UV žárovky. Jsou vedeny často jako UV, ale jde pouze o imitaci. S UV nemají společného nic. Použít ale můžeme i UV LED diody, ale těch je nutné zakoupit více a lampu si postavit. Dobré zkušenosti jsou také s rtuťovými výbojkami z pouličního osvětlení nebo s „horským sluníčkem“. V případě nouze jde prý použít i halogenové světlo 500 W, avšak to jsem nikdy nezkoušel, tudíž nemohu sdělit, jestli to funguje, či ne. Dobu osvitu musíme volit podle výkonu UV lampy. Osobně jsem 18 W zářivkovou trubicí osvětloval 40 minut. Je vhodné veškeré manipulace provádět v temné komoře a rozhodně není dobré se do UV světla příliš dívat. Pro oči není dobré.



Obrázek 2.8 - Osvit desky v improvizované temné komoře

### 2.4.3 Vyvolání desky

Pro vyvolání desky je nutné si připravit roztok louhu (Hydroxid sodný – NaOH). Roztok slouží jako vývojka, kde se nám osvětlená místa rozpustí a neosvětlená nikoli. Roztok se



připravuje tak, že do 1 l vody, která má pokojovou teplotu, rozpustíme 10 g hydroxidu sodného. Vhodné jsou plastové vaničky. Musíme dávat pozor – hydroxid je velmi silná žíravina, která reaguje s organickými materiály. Rovněž dáváme hydroxid do vody. Ne naopak.

Pokud jsme použili zprůhledňovací sprej, je nutné desku nejdříve omýt mýdlem a vodou, jelikož sprej je mastný a odpuzoval by nám roztok vývijky. Do připravené lázně vložíme osvětlenou desku měděnou vrstvou nahoru. Desku necháme v lázni cca 2 minuty a krouživými pohyby s nádobou urychlujeme vyvolávání. V průběhu vyvolávání bychom měli postupně vidět motiv. Délka vyvolávání ale záleží na vytvrzenosti a tloušťce fotocitlivého laku. Někdy je třeba vyvolávat i 10 minut, což byl případ mnou vyráběné desky. Je třeba rovněž uvést, že vyvolávání by mělo probíhat v temnější místnosti se slabým umělým osvětlením, případně v temné komoře s ochranným osvětlením (červená lampa). Po vyvolání desku důkladně opláchneme čistou vodou.

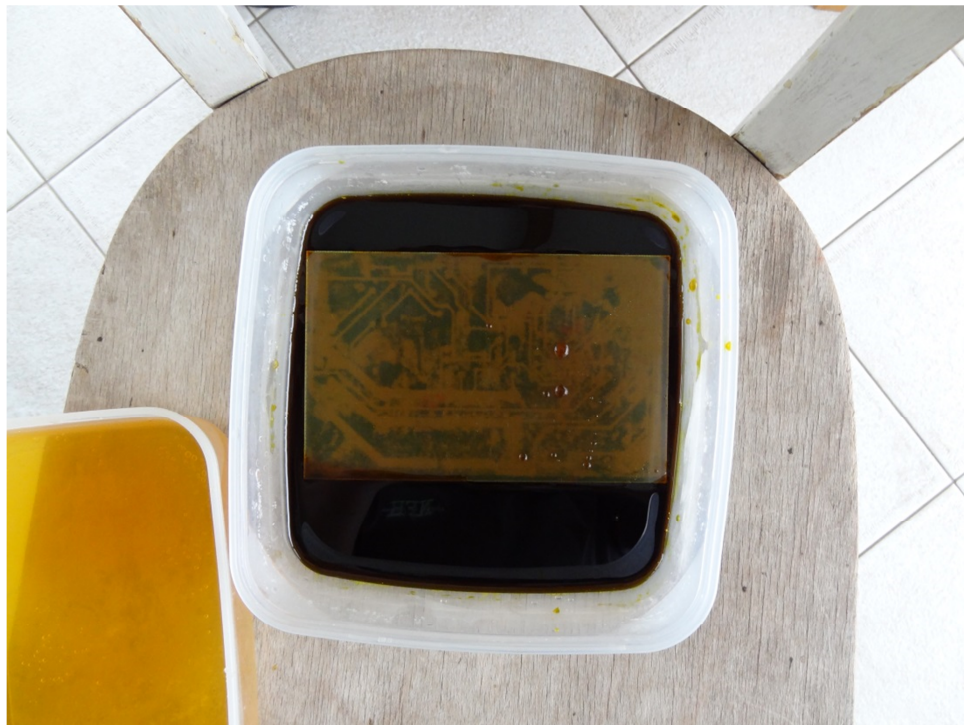
#### **2.4.4 Kontrola a oprava**

Po vyvolání desku důkladně zkontrolujeme, zda-li nedošlo na některých místech vodivých cest k narušení, případně rozpuštění, laku. Pokud najdeme na desce místa, která jsou matná, je vhodné tato místa překrýt. Na to se hodí tenký černý lihový fix. Fotocitlivý lak, pokud není narušen, má být lesklý. Pokud matná místa nepřekryjeme, hrozí nám proleptání spojů.

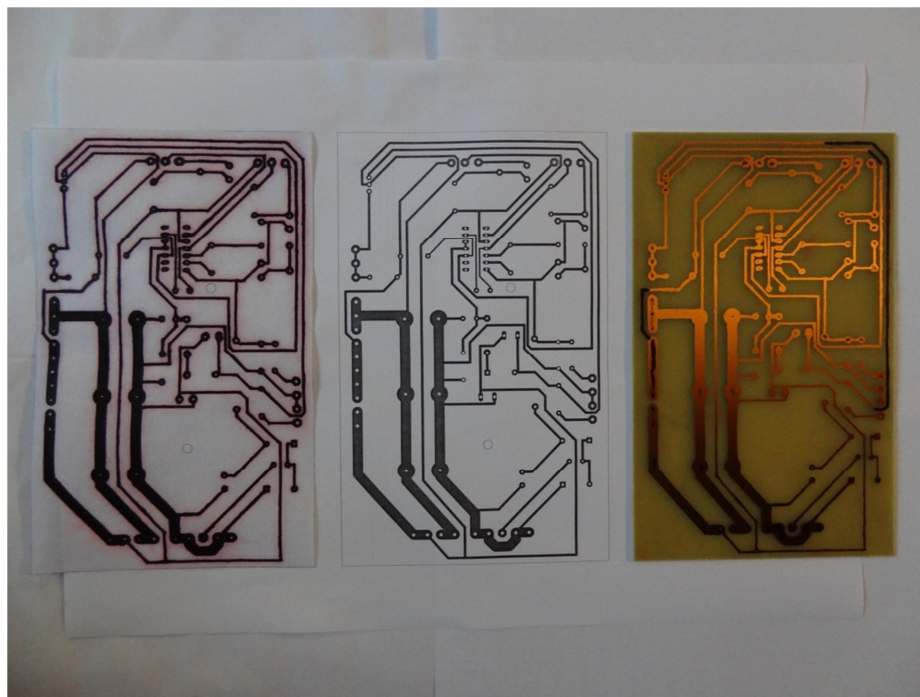
#### **2.4.5 Leptání desky**

K leptání desky používáme chlorid železitý nalitý do plastové vaničky. Chlorid železitý nenarušuje fotocitlivý lak a ani lihový fix. Do chloridu desku vkládáme tak, že ji necháme plavat na hladině měděnou vrstvou dolů. Důležité je, abychom desku vkládali tak, aby nevznikly bubliny. Ty by bránily v odleptání desky. Doba potřebnou k leptání zkrátíme tak, že chlorid ohřejeme v lázni s teplou vodou. Je také potřeba uvést, že u vyčerpaného roztoku se doba potřebná pro leptání značně zvyšuje. Nový roztok nám spoj odleptá řádově rychleji. Během leptání je vhodné desku kontrolovat. Můžeme narazit na problém, kdy se nám nechtějí některá místa odleptat. To způsobuje fotocitlivý lak, který mohl na některých místech zůstat. Je totiž tak tenký, že není vidět. V tomto případě můžeme desku vyndat z roztoku chloridu, dobře ji umýt vodou a pokračovat ve vyvolávání. Nevýhodou ale je, že louh rozpustí lihový

fix. Po omytí je nutné provést opravu spojů znovu. Během leptání bychom měli skrz desku slabě vidět již vyleptané cesty. V tuto chvíli je vhodné desku kontrolovat častěji. Kdybychom totiž nechali desku v chloridu příliš dlouho, došlo by k jejímu podleptání (přerušení žádoucích spojů) a tím zničení. Po skončení leptání desku omyjeme pod čistou vodou od chloridu. Desku je třeba omýt důkladně, protože zbytky chloridu způsobují pokračující chemický proces a deska se podleptá. Na obrázku: Obrázek 2.10 je jasně vidět porovnání obtažené předlohy, neobtažené předlohy a hotového plošného spoje.



Obrázek 2.9 - Leptání plošného spoje



Obrázek 2.10 - Porovnání předloh a vyleptané hotové desky

#### 2.4.6 Očištění

Po omytí vodu od chloridu je nutné desku zbavit fotocitlivého laku a barevného fixu. To jsem provedl tak, že jsem desku omyl v lihu. Nemusí to být přímo v roztoku, ale stačí namočit hadr v lihu a desku důkladně otřít. Po zbavení laku musíme desku důkladně očistit. Pokud zanedbáme čištění, deska půjde pájet velmi těžko, či nepůjde vůbec, pájet. Na očištění desky je ideální některý z přípravků na ruce nebo písek na nádobí. Osobně jsem použil tekutý písek Cif, jelikož má jemnou zrnitost. Desku tedy velmi důkladně očistíme a osušíme.

#### 2.4.7 Kontrola

Po očištění desky je vhodné provést kontrolu desky, jestli nemáme někde nežádoucí zkrat a také jestli jsou všechny vodivé cesty skutečně vodivé, jak mají být. Tuto kontrolu je vhodné použít multimetrem. Dá se použít funkce na kontrolu diod, kdy nám multimetr akusticky signalizuje, že spoj vede, nebo měření odporů, kde nulový odpor znamená vodivý spoj (zkrat) a nekonečný odpor znamená, že cesta je nevodivá (přerušená). Tuto kontrolu je vhodné provést před samotným osazením desky. Pokud najdeme nějaké cesty spojené v místě, kde tomu tak být nemá, vhodnou jehlou měděnou vrstvu proškrábeme a potom znovu zkontrolujeme multimetrem. Během těchto procedur se rozhodně nedotýkáme prsty měděné vrstvy.

### 2.4.8 Lakování

Po důkladném očištění následuje lakování desky pájitelným lakem. Tento lak zabraňuje oxidaci desky, zabraňuje oxidaci pájky a zlepšuje smáčivost pájkou. Lak můžeme koupit hotový nebo si jej vyrobit sami rozpuštěním kalafuny v lihu. Tímto lakem desku rovnoměrně natřeme. Důležité je, aby k lakování došlo co možná nejdříve po očištění. Deska, resp. měděná vrstva, po očištění začíná oxidovat.

### 2.4.9 Plošné cínování

Pokud předpokládáme, že s deskou se bude často manipulovat, případně se nám deska příliš nepodařila (došlo místy k částečnému podleptání), je vhodné celou desku plošně pocínovat. To se provádí mikropáječkou. Pistolová páječka není vhodná pro svou vysokou teplotu. Vlivem vysoké teploty by mohlo dojít k odpaření vodivé cesty a zničení spoje. Pocínování se provádí po celé desce a to velmi tenkou vrstvou. Pocínování jsem provedl na hlavní desce s integrovaným obvodem. Desku s rezistory jsem necínoval, jelikož to nebylo nutné. Deska má vodivé plochy, nikoli pouze cesty.

### 2.4.10 Vrtání desky

Odvrtání otvorů skrz desku jsem provedl malou ruční vrtačkou určenou přímo na plošné spoje. Deska se odvrtává ze strany spojů a je nutné, aby byly díry odvrtány kolmo k desce. Ideálnější by bylo desku odvrtat stojanovou vrtačkou, jelikož máme zajištěnu přesnou kolmost, ale takovou vrtačkou nedisponuji. Průměry otvorů skrz desku volíme dle průměrů vývodů součástek.

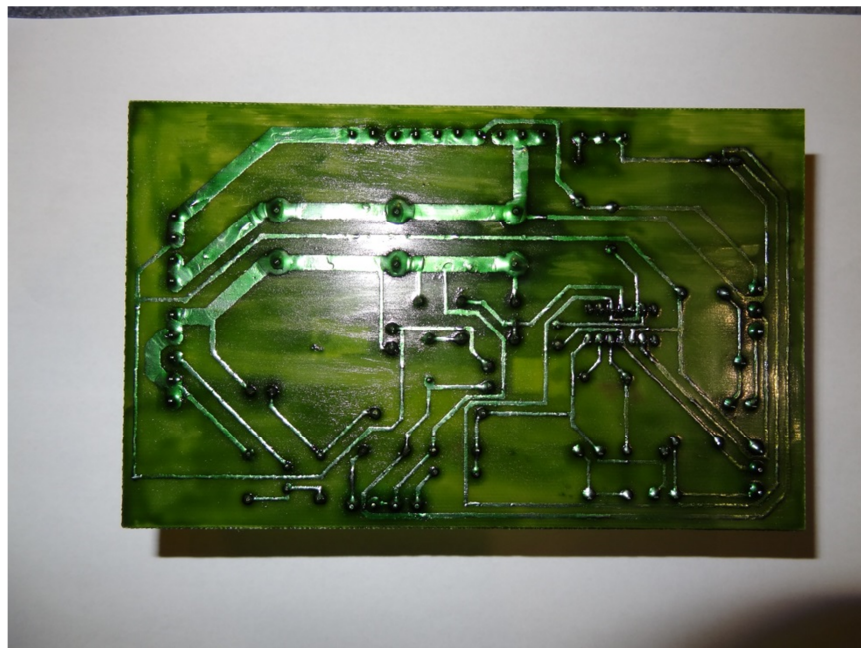
### 2.4.11 Pájení a osazení desky

Osazení desky a pájení součástek se provádí v pořadí: konektory, rezistory, kondenzátory, diody, tranzistory, integrované obvody. A to tak, jak je uvedeno. První tedy osadíme veškeré svorkovnice, patice a konektory. Jako pájku používáme cín s olovem a jako tavidlo kalafunu. Dávám pozor, aby spoje nebyly zbytečně moc ohřívány, ale také na to, aby byly dostatečně prohřáté a došlo ke slítí pájky. Správně zapájený spoj má být lesklý a má být patrně kvalitní rozlité pájky. Součástky, které se ohřívají, je vhodné osadit tak, aby nebyly položené přímo na desce. Zlepší se odvod tepla. Po celkovém osazení odštípeme štípacími

kleštěmi přebytečné vývody součástek. Na Darlingtonovo zapojení tranzistorů - tranzistor  $T_1$  - BDX33C jsem ještě namontoval malý chladič a pod tranzistor dal teplovodnou pastu.

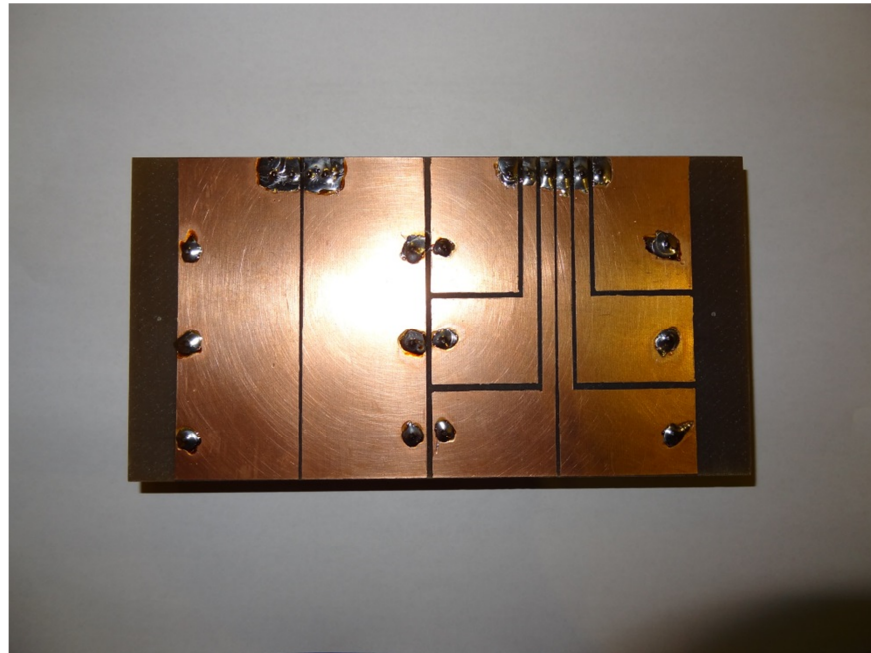


Obrázek 2.11 - Osazená deska - strana součástek

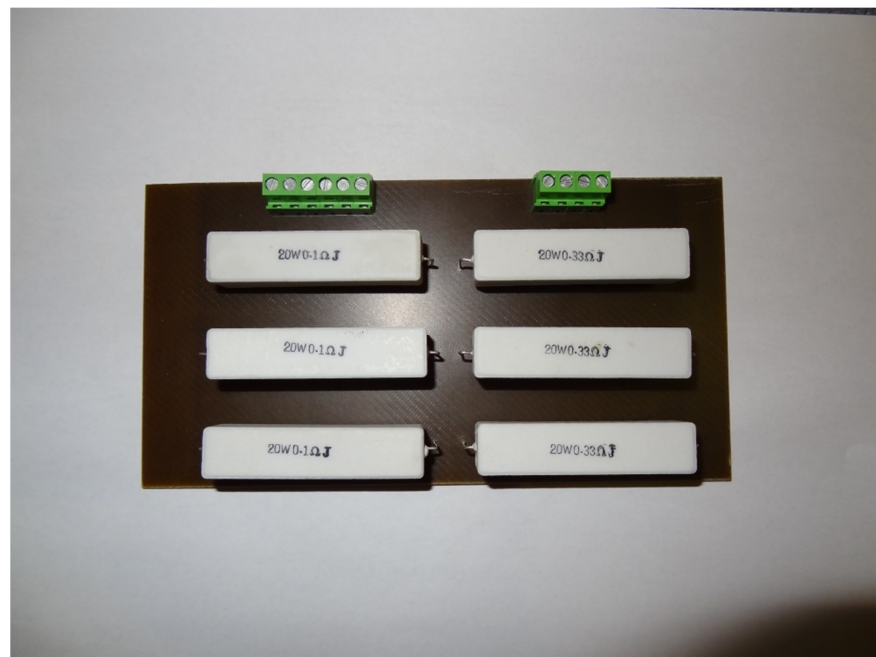


Obrázek 2.12 - Osazená a nalakovaná deska - strana spojů





Obrázek 2.13 - Osazená deska rezistorů - strana spojů



Obrázek 2.14 - Osazená deska s rezistory - strana součástek

#### 2.4.12 Očištění od tavidla

Očištění desky od tavidla provedeme v roztoku lihu, přičemž není dobré, aby se nám líh, který bude obsahovat kalafunu, dostal do trimrů. Kalafuna by znemožnila jejich fungování. Do vaničky tedy dáme takové množství lihu, aby byl pouze na spodní straně desky a nepřetekl na vrchní stranu. Do roztoku desku ponoříme a necháme působit. Kalafuna se v lihu rozpustí. Pokud někde přeci jen zůstaly zbytky, použijeme štětec. Důkladné očištění kalafuny je

nezbytné, protože kalafuna časem váže vlhkost a způsobilo by to korozi spojů. Po očištění desku znovu důkladně zkontrolujeme, zda-li někde nemáme zkrat. Tato kontola je spíše vizuální. S osazenými součástkami totiž multimetrem nezměříme správné údaje. Pokud je někde zkrat, opravíme jej a desku znovu očistíme lihem.

### 2.4.13 Lakování ochranným lakem

Lakování desky ochranným lakem se provádí jako ochrana proti vzdušné vlhkosti a následné oxidaci. Lak zakoupíme v obchodě s elektronickými součástkami. Vrchní zelený lak nanášíme štětcem na stranu spojů. Toto je finální úprava desky a tento lak se nedá pájet. Po rovnoměrném natření desky necháme lak řádně uschnout. Tímto je deska hotova.

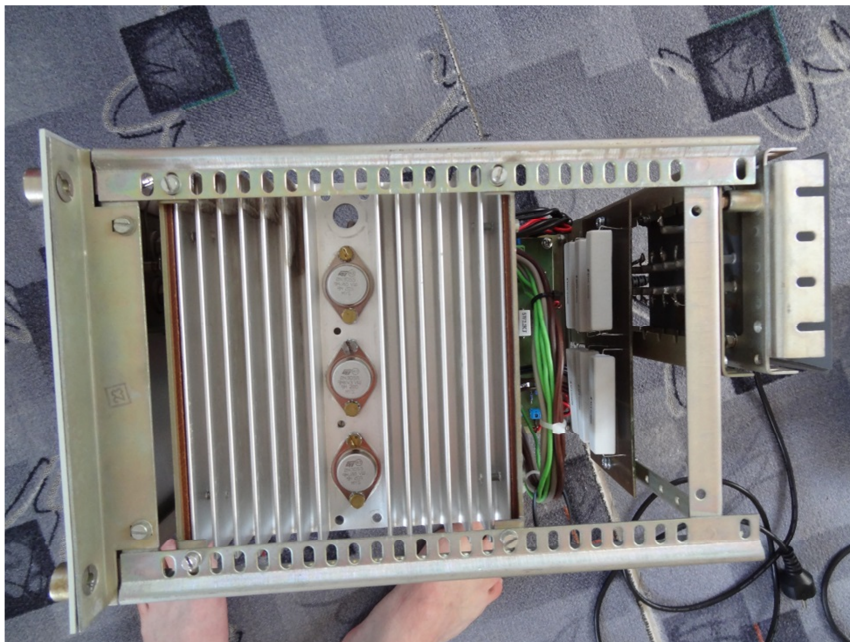
## 3 Sestavení zdroje

### 3.1.1 Montáž desky do skříně

Uchycení desky plošných spojů jsem provedl pomocí čtyř kusů šroubků M4 a distančních sloupků, kterými jsem zajistil, aby nedošlo ke zkratování spodní části desky o kostru skříně. Výhodou také je, že deska může řádně větrat.

### 3.1.2 Sestavení výkonových prvků

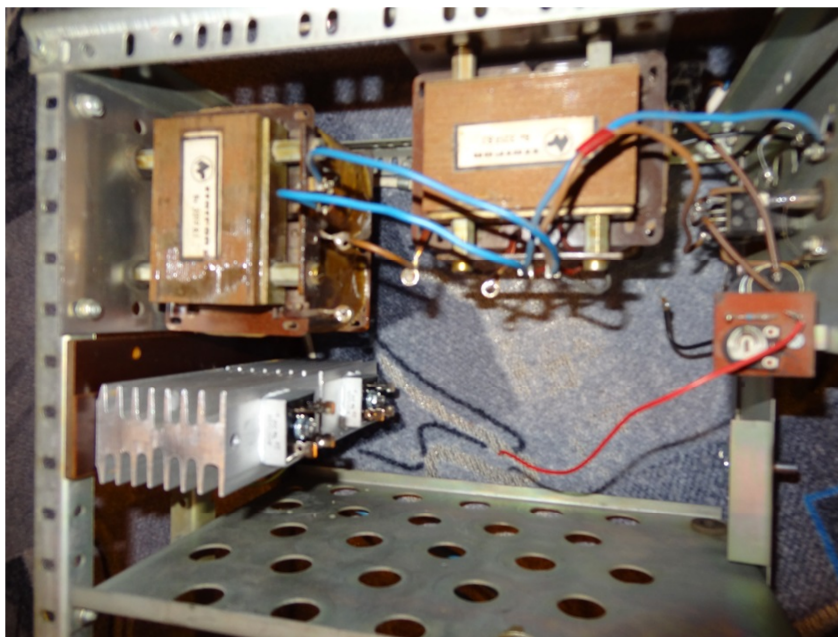
Výkonové prvky zdroje nejsou umístěné na desce plošných spojů. Vzhledem ke ztrátovému výkonu a tím vyzářenému teplu je vhodnější umístění přímo na chladiči. Chladič jsem použil stávající, jelikož svými rozměry a tvarem vyhovuje. Není tedy třeba instalovat jiný. Byl výrobcem spočítán na ztrátový výkon 300 W. Stejný ztrátový výkon bude i v tomto případě. Výkonové tranzistory 2N3055 jsem přišrouboval na chladič bez izolačních podložek. Tranzistory mají vyvedený kolektor na kovové pouzdro. Tato svorka je společná pro všechny tyto tranzistory a tudíž doplnění slídových podložek nebylo nutné. Celý chladič je totiž přišroubován přes izolační sloupky do skříně zdroje. Tranzistory jsem opatřil teplovodivou pastou, aby se zlepšil odvod tepla. Vývody tranzistorů jsou k vodičům připájené přímo a na kolektor jsou použita kabelová oka. Báze a kolektory jsou vyvedeny vodiči do hlavní desky plošných spojů, vývody z emitoru jsou propojené vodiči k desce s výkonovými rezistory, které jsou z důvodu teplotního namáhání na samostatné desce. V práci se nezabývám výpočtem chladiče pro tranzistory, neboť ve zdroji již chladič pro 3 tranzistory byl umístěn a byl vypočítán výrobcem pro totožný ztrátový výkon.



Obrázek 3.1- Umístění chladiče a tranzistorů

Diodové můstky jsou umístěné každý na svém chladiči. Chladiče byly původní a s ohledem na zahřívání můstků plně dostačují k jejich chlazení. Můstky jsou dva a oba jsou dimenzovány na proud 15 A. Celkově bychom mohli odebrat proud až 30 A a špičkově až 600 A. Chladiče jsem ale musel srovnat – jejich plocha byla prohnutá a řádně nedoléhaly k můstkům. To jsem provedl pomocí brusného kamene a finální srovnání jsem provedl pomocí brusného papíru a skla. Sklo totiž zajistí téměř dokonalou rovinu. To jsem potom také zkontroloval pomocí hrany posuvného měřítka. Můstky jsou opět natřeny na styčné ploše s chladiči teplovodnou pastou, aby se zajistil dobrý přenos tepla a tím pádem dobré chlazení. Chladiče jsou opět upevněny ke skříni přes nevodivý materiál. V tomto případě jde o pertinax, což je starý materiál, ale z hlediska izolačního dostačuje, navíc má značnou pevnost a tvrdost. Chladiče na diodové můstky jsem použil taktéž původní. Používám můstky, které jsou naddimenzovány, proto nebudou produkovat teplo.





Obrázek 3.2 - Umístění transformátorů a diodových můstek

Výkonovou diodu, která slouží k navýšení úbytku napětí, jsem umístil na samostatný chladič. Ten je přes nevodivé podložky opět přišroubován ke skříni zdroje. Použil jsem opět teplovodnou pastu, abych zlepšil odvod tepla od součástky. Dioda je dimenzována na proud 40 A. Měla by tedy bez problémů vyhovovat maximálnímu odběru proudu a nemělo by docházet k jejímu přehřívání.

Výkonové rezistory jsou umístěny na samostatné desce plošných spojů. Tuto desku jsem umístil, s ohledem na produkované teplo, tak, aby nebyly zbytečně ohřívány ostatní komponenty. Rezistory jsou na ni umístěny svisle. To umožňuje lepší cirkulaci vzduchu a lepší odvod tepla. Rezistory jsou rovněž připájeny tak, že nejsou položeny přímo na desce, ale mezi deskou a tělem rezistoru je cca 1 cm volného prostoru.

### 3.1.3 Umístění potenciometrů

Pro regulaci napětí jsem použil desetitáčkový potenciometr, abych zajistil citlivou a plynulou regulaci napětí. To je vhodné, pokud potřebujeme napětí nastavit velmi přesně. Umístěn je na předním panelu pod voltmetrem v původním otvoru, což je intuitivní. Otvor po starém potenciometru jsem musel upravit, jelikož byl otvor příliš úzký. Také jsem musel upravit otvor pro tělo potenciometru. Původní potenciometr nebyl upevněn v čelním panelu, pouze jím procházela hřídel, ale byl upevněn na kostře skříně. To nový potenciometr

neumožňoval z důvodu velmi krátké hřídele. Musel jsem jej upevnit do předního panelu a otvor v kostře odvrtat a zapilovat.

Potenciometr pro regulaci proudového omezení je umístěn pod ampérmetrem v původním otvoru. To je také z důvodu intuitivního ovládání. Ten je montován přímo na kostru skříně, neboť konstrukčně je shodný se starým typem a stačila pouze jeho výměna a zkrácení hliníkové hřídele.

### 3.1.4 Umístění síťového vypínače

Původní síťový vypínač působil velmi opotřebovaně, proto jsem jej vyměnil za nový, který již obsahuje doutnavkovou kontrolku. Je to velmi praktické, protože je na první pohled vidět, jestli je zdroj v provozu, či není. Díru po původním vypínači jsem zvětšil pomocí vrtačky a následně pilníku, aby vyhovovala potřebám nového vypínače. Je umístěn na místě původního. Použil jsem vypínač dvojpólový (vypíná se nulový i fázový přívod najednou). To je třeba z toho důvodu, že některé starší rozbočky do síťové zásuvky převracejí strany mezi zdíčkou pracovního středového vodiče a fází. Filtr na vstupní napětí jsem nechal původní, jelikož fungoval. Stejně tak jsem ponechal původní pojistková pouzdra. Jsou kvalitní. Pouze jsem kompletně vyměnil veškeré vodiče a nahradil je novými, kde jsem pomocí smršťovací bužírky zaizoloval konce. To jsem provedl z důvodu vyšší bezpečnosti.



Obrázek 3.3 - Provedení předního panelu

### 3.1.5 Umístění voltmetru a ampérmetru

Umístění voltmetru a ampérmetru jsem nechal původní. Nebylo třeba jej měnit, jelikož je umístění přehledné a uvnitř nepřekáží žádnému prvku.

### 3.1.6 Umístění výstupních svorek

Výstupní svorky jsem nechal také původní. Jsou vyrobeny kvalitně a stále fungují bez problémů. Pouze jsem vyměnil veškeré vodiče, které k nim uvnitř zdroje vedou. Nahradil jsem je z toho důvodu, že nevyhovovaly délkově. Byly moc krátké.

### 3.1.7 Umístění transformátorů

Transformátory jsem ponechal umístěné na stejném místě, jako byly z výroby. Nebylo třeba s nimi nějakým způsobem manipulovat. Jen bych rád připomenul, že jsem z důvodu vyšší bezpečnosti odstranil z blízkosti transformátorů co nejvíce bloků. Ve stejné části zůstaly pouze diodové můstky. Vše ostatní je montováno ve slaboproudé části. Veškeré vodiče v silnoproudé části jsou opatřeny na koncích izolací, aby se minimalizovalo riziko úrazu elektrickým proudem.

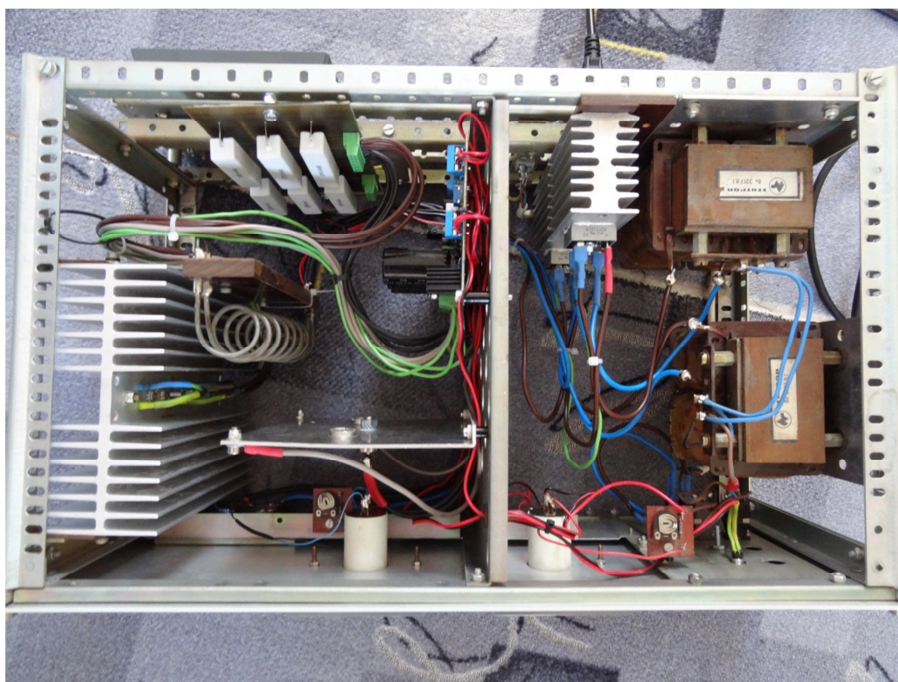
### 3.1.8 Umístění kontrolky napětí z usměrňovacích můstků

Kontrolku pro zjištění přítomnosti napětí za usměrňovacími můstky jsem umístil do otvoru, kde byla původně umístěna žárovka pro kontrolu síťového napětí. Kontrolka je LED dioda v kovovém pouzdře s předřazeným rezistorem. Vodiče od kontrolky jsou řádně zaizolovány a jsou umístěny tak, aby nemohlo dojít k výskytu síťového napětí na nich. Např. pokud by se vodič od LED diody časem uklepal.

### 3.1.9 Propojení jednotlivých komponent

K propojení jednotlivých hlavních komponent zdroje ve stejnosměrné části jsem použil zdvojený vodič - *Cu* lanko o průřezu  $2,5 \text{ mm}^2$  s PVC izolací. Maximální zatížitelnost tohoto vodiče je, dle tabulky, 20 A. Jelikož je vedení zdvojené, trvalá zátěž může být až 40 A. Maximální výstupný proud bude pouze 10 A, tudíž vodiče jsou řádně nadimenzované, až předimenzované. Veškeré konce vodičů jsou ocínovány, aby nedocházelo k jejich třepení a zajistil se dokonalý kontakt ve svorkovnicích. Dále jsem na silovou část 230 V použil totožný vodič. Bylo dodrženo barevné označení, které odpovídá ČSN, tudíž že fázový vodič je hnědý,

střední pracovní vodič je modrý a ochranný vodič je žlutý-zelený pruhovaný. Kontrolky a potenciometry jsou s deskou propojeny  $Cu$  vodičem – lankem o průřezu  $0,25\text{ mm}^2$  s PVC izolací, jelikož přes tyto vodiče prochází minimální proud. Dle tabulky se dají vodiče zatížit proudem až  $3\text{ A}$ , což je zcela dostatečné. Těmito obvody totiž bude procházet maximální proud v desítkách až stovkách  $mA$ . Není tedy nutné je příliš rozměrově dimenzovat.



Obrázek 3.4 - Horní pohled na sestavený zdroj

## 4 Orientační zkouška zdroje

Orientační zkoušku zdroje jsem provedl doma. Jediné, co jsem mohl provést, bylo nastavení hranic napětí. Proudové omezení jsem nastavit nemohl, proto jsem toto ponechal dobu, kdy proběhne měření zdroje. Orientačně jsem po nastavení na výstupu naměřil nejnižší napětí  $0\text{ V}$ , což odpovídá předpokladu. Maximální úroveň výstupního napětí jsem naměřil okolo  $27\text{ V}$ , což je o  $3\text{ V}$  méně, než byl požadavek. To je způsobeno úbytky napětí na polovodičích a nedostatečným napětím na sekundárním vinutí transformátoru.

## 5 Měření zdroje

Během měření zdroje jsme narazili na komplikace, které blíže popíši v závěru práce.

## 5.1 Měření zatěžovací charakteristiky

Měření zatěžovací charakteristiky spočívá v tom, že ověřujeme, jak je zdroj tvrdý a jak se bude chovat nastavené proudové omezení. Měření jsme prováděli pro 50 % a 100 % výstupního napětí (13 V a 26 V) při limitaci proudu nastavené na (50 % a 100 %) maximálního výstupního proudu. Postup měření je takový, že nastavíme limitaci proudu na požadovanou mez a úroveň napětí také. Postupně snižujeme odpor zátěže na výstupu zdroje, dokud nedosáhneme hranice proudové limitace. Jakmile dosáhneme hranice proudové limitace, výstupní napětí nám dosti poklesne. Proud ale zůstává trvale na hraniční velikosti. Postupně tedy dále snižujeme hodnotu odporu, dokud nedosáhneme nulové hodnoty, a odečítáme proud do zátěže na přístroji. Odečítáme také na osciloskopu úroveň zvlnění výstupního napětí. Kompletní tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze. V příloze jsou přiloženy i vypracované grafy.

## 5.2 Určení vnitřního odporu zdroje

Vnitřní odpor zdroje nám charakterizuje, jak se zdroj chová po připojení zátěže. Obecně se dá říci, že čím nižší je pokles napětí naprázdno oproti napětí pod zatížením, tím je zdroj tvrdší. Určujeme jej ze vztahu:

$$R_z = \frac{U_{napr} - U_z}{I} \quad (5.1)$$

Vypočtené hodnoty vnitřního odporu zdroje jsou uvedeny v příloze bakalářské práce.

## 6 Závěr

Během stavby napájecího zdroje jsem narazil na několik komplikací. První komplikace nastala při návrhu. Bylo potřeba co možná nejvíce využít stávající součásti. V původním zdroji byly transformátory řešeny tak, že byly zapojeny sekundárním vinutím do série. To mělo za následek, že výstupní napětí bylo příliš vysoké. Původní výrobce snížení napětí řešil tak, že použil řízený usměrňovač s tyristory. Tomu jsem se chtěl vyhnout, neboť při použití tyristorů se stavba komplikuje o obvod, který se stará o jejich správné otevírání, a jelikož je tyristor otevřen později (až za horní hranici maximálního napětí – přibližné zpoždění je:  $\alpha = 60^\circ$ ), je potřeba použít vyhlazovací kondenzátory s velmi velkou kapacitou. To má za následek značné prodražování konstrukce, neboť kondenzátory s velkou kapacitou jsou dosti drahé a je potřeba velká kapacita na zabezpečení minimálního poklesu napětí při plném zatížení. Lepším řešením by bylo použít transformátory paralelně a u obou upravit počet závitů – přidat cca 6 závitů, abychom na výstupu dosáhli efektivní hodnoty napětí 30 V. Transformátory mají ve skutečnosti 25 V. Transformátory jsem zapojil paralelně, ale závity jsem upravit nemohl. To má za následek, že na výstupu zdroje dosáhneme maximálně hodnoty cca 26 V stejnosměrných. Nesplníme tedy podmínku plných 30 V, ikdyž na vyhlazovacích kondenzátorech máme napětí 35,36 V. Pokles napětí na výstupu je dán úbytky napětí na polovodičích a rezistorech v obvodu. Výhodou ale je, že nyní by bylo možné zdroj zkonstruovat na vyšší výstupní proud použitím více tranzistorů. Paralelně zapojené transformátory je možné více zatížit.

Další komplikace vznikla během samotné výroby desky plošných spojů. Po osvětlení desky, vyvolání a ponoření do leptacího roztoku se některá místa nechtěla odleptávat. Jak jsem již uváděl, zůstal na nich osvětlený fotocitlivý lak, který byl průhledný. Provedl jsem tedy omytí desky vodou, důkladné odmaštění a opakované vyvolání ve vývojce, abych z desky odstranil zbytky laku. Lak se pravděpodobně nechtěl zcela smýt, protože po použití zprůhledňovače na desce zůstala mastná vrstva, která bránila vývojce ve správném kontaktu s lakem. Po těchto operacích se již deska odleptala tak, jak správně měla. Samotné osazení již proběhlo v pořádku.



Během ověřování funkce zdroje v laboratoři jsme s panem doktorem Kubíkem narazili na stav, kdy výstupní napětí bylo v pořádku, ale při zatížení zdroje odporovou zátěží, zdroj dodával maximální proud 0,2 A. Mysleli jsme si, že je problém ve špatném návrhu proudové limitace – špatně vypočítaný dělič napětí mezi vstupy *Current Limit* a *Current Sense* integrovaného obvodu. Napěťová regulace byla v pořádku. Zkoušel jsem tedy výpočet znovu, ale dopočítal jsem se stejných hodnot. Pan doktor následně přišel ve schématu na špatně zapojené rezistory  $R_4$  a  $R_5$ . Byly zapojeny z bází tranzistorů na emitory, což není správně a místo funkce zajištění správného otevírání tranzistorů tomu naopak bránily. Správně by měly být zapojeny mezi bází a kostrou zdroje. Po odpojení těchto rezistorů se již výstup dal zatížit a dosahovali jsme maximálního požadovaného výstupního proudu 10 A.

Po odstranění závady s rezistory jsme pomocí osciloskopu zjistili, že se regulátor značně rozkmitává. Na výstupu byl sice zapojen keramický kondenzátor 100 nF, ale zdroj měl zvlnění až 4 V. Pan doktor tedy navrhl, abychom vyzkoušeli dát mezi výstupní svorky ještě elektrolytický kondenzátor 10  $\mu$ F. To se ukázalo jako příčina kmitání. Po zapojení kondenzátoru zvlnění zmizelo. Je třeba poznamenat, že kdyby nebylo toto značné zvlnění odstraněno, ohrožovalo by to tranzistory, které by mohly být zničeny. Příčina takto vysokého zvlnění byla v tom, že když jsem zapojoval vodiče, snažil jsem se je svázat a umístit tak, aby co možná nejméně překážely a byly ve svazcích. Tím jsem ale dosáhl značných délek a ještě vytvořil indukčnosti. Napříště tato koncepce tedy není vhodná a nejlepší je dávat vodiče co možná nejkratší.

Během měření zatěžovacích charakteristik jsem vyhodnocením hodnot objevil, že zdroj je značně měkký a má tím pádem nízkou účinnost. Měkkost zdroje patrně způsobuje dioda, která je zapojena před bočníkem. Se vzrůstajícím proudem na ní totiž vzniká vyšší a vyšší úbytek napětí, což má za následek značný pokles výstupního napětí. V příští konstrukci je tedy velice nevhodné diodu do obvodu umísťovat. Lepší řešení je přepočítat dělič napětí do obvodu proudové limitace spočítat, v našem případě, na hodnotu 1 V. Další možnou příčinou měkkosti zdroje je fakt, že při proudu 10 A pracuje zdroj na hranici možností vyhlazovacích kondenzátorů průběh vyhladit. Vhodné by bylo kapacitu kondenzátorů více naddimenzovat, abychom omezili pokles napětí.

Také je patrné, že i při správném nastavení proudové limitace jsme v některých místech tuto proudovou mez překročili a to přes 10 %. Dle mého názoru je toto způsobeno chováním polovodičů při značném ohřátí přechodu a nemalý vliv na to bude mít i křemíková dioda.

Při vyhodnocování hodnot je také patrné, že pokud se dostáváme s hodnotou proudu blízko hodnoty nastavené proudové limitace, zdroj je čím dál více zvlněný. Příčinou bude kmitání regulačního obvodu. Toto zvlnění je největší brzy po zapůsobení proudové limitace. S postupným snižováním hodnoty odporu na výstupu je toto zvlnění nižší a nižší. Není to ale tím, že by obvod přestával kmitat. Spíše je to způsobeno velmi nízkým odporem na výstupu, kde při zkratu máme odpor pouze vodičů a tím pádem osciloskopem změříme tento úbytek napětí.

Během měření jsem také zjistil, že při velkém proudovém zatížení se chladič pro tranzistory značně zahříval. V kritických chvílích při měření s maximálním proudem 10 A a maximálním napětím 26 V v poloze za působením proudové limitace dosáhla teplota chladiče přes 70°C. Je to způsobeno velkým ztrátovým výkonem, který na tranzistorech v tuto dobu máme. Takto vysoká teplota je zcela nežádoucí stav. Patrně to bylo i způsobeno i tím, že jsme zdroj měli postavený naležato, tím pádem i chladič, a tato poloha znemožnila dostatečnou cirkulaci vzduchu kolem žebroví chladiče. I přes to by ale bylo vhodné, spíše než zvětšovat plochu chladiče, doinstalovat aktivní chlazení pomocí ventilátorů s teplotním spínačem a instalovat teplotní pojistku. Zvětší se tím schopnost výměny tepla na okolní vzduch a při použití teplotního spínače nám nebudou ventilátory běžet trvale. Teplotní pojistka zase zajistí, že nedojde k přehřátí tranzistorů a zapůsobením zdroj odpojí.

Z výše uvedeného vyplývá, že zkonstruovaný zdroj zcela nesplnil očekávání. Při dalším návrhu je tedy nutné se výše uvedeným nedostatkům vyhnout. Neinstalovat diodu do obvodu proudové limitace, nainstalovat filtrační kondenzátory s větší kapacitou, použít kratší vodiče, použít transformátor s větším výstupním napětím, do návrhu zapracovat ještě kondenzátor na výstupní svorky dle délky vodičů ve skříni, nainstalovat aktivní chlazení tranzistorů a správně zapojovat na kostru nebo nenavrhopvat rezistory na bázi tranzistorů.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Lineární napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 144 s. ISBN 80-7300-002-4
- [2] BRTNÍK, Bohumil. *Základní elektronické obvody*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2011. 156 s. ISBN 978-80-7300-408-8
- [3] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I.* 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 1997. 352 s. ISBN 80-86056-02-3
- [4] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje II.* 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2000. 352 s. ISBN 80-86056-03-1
- [5] RFT. *Bedienungsanleitung Typ 321*. Berlin: veb statron, 1980. 22 s.
- [6] ST Microelectronics. 2N3055 Product Datasheet. [online]. Poslední změna 2008. [Cit. 2008]. Dostupné z: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000895.pdf>
- [7] ON Semiconductor. BDX33C Product Datasheet. [online]. Poslední změna 10.2011 Rev.13. [Cit. 10.2011]. Dostupné z: [http://www.onsemi.com/pub\\_link/Collateral/BDX33B-D.PDF](http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/BDX33B-D.PDF)
- [8] NXP Semiconductors. BYV79E200 Datasheet. [online]. Poslední změna 6.1998. [Cit. 6.1998]. Dostupné z: [http://www.nxp.com/documents/data\\_sheet/BYV79E\\_SERIES.pdf](http://www.nxp.com/documents/data_sheet/BYV79E_SERIES.pdf)
- [9] Won-Top Electronics. KBPC15 Series Datasheet. [online]. Poslední změna 2006. [Cit. 2006]. Dostupné z: <http://www.wontop.com/pdf/KBPC15.pdf>
- [10] Texas Instruments. Precision Voltage Regulators (Rev.D). [online]. Poslední změna 21.5.1999. [Cit. 21.5.1999]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua723.pdf>
- [11] Agilent Technologies. DC Power Supply Handbook. [online]. Poslední změna 1.10.2000. [Cit. 1.10.2000]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5952-4020.pdf>
- [12] Taiwan Semiconductor. BZX85Cxx E11 Datasheet. [online]. Poslední změna 27.9.2011. [Cit. 27.9.2011]. Dostupné z: <http://www.ts.com.tw/DSfile/BZX85Cxx%20E11.pdf>
- [13] DIETMEIER, Ulrich. *Vzorke pro elektroniku*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2007. 256 s. ISBN 80-86056-53-8
- [14] BRTNÍK, Bohumil. *Elektrické obvody v příkladech*. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2012. 158 s. ISBN 978-80-7300-436-1
- [15] ZOZEI. Princip transformátoru. [online]. Poslední změna: neuváděno [Cit. Neznámo]. Dostupné z: <http://zozei.sssebrno.cz/thumb/userdata/imagelibrary/upload/princip-transformatoru.jpg?w=400&h=400>
- [16] Ústav mechatroniky a technické informatiky. ELM\_trafo.ppt. [online]. Poslední změna: neuváděno [Cit. Neznámo]. Dostupné z: [www.mti.tul.cz/files/elm/ELM\\_trafo.ppt? - ELM\\_trafo.ppt](http://www.mti.tul.cz/files/elm/ELM_trafo.ppt? - ELM_trafo.ppt)

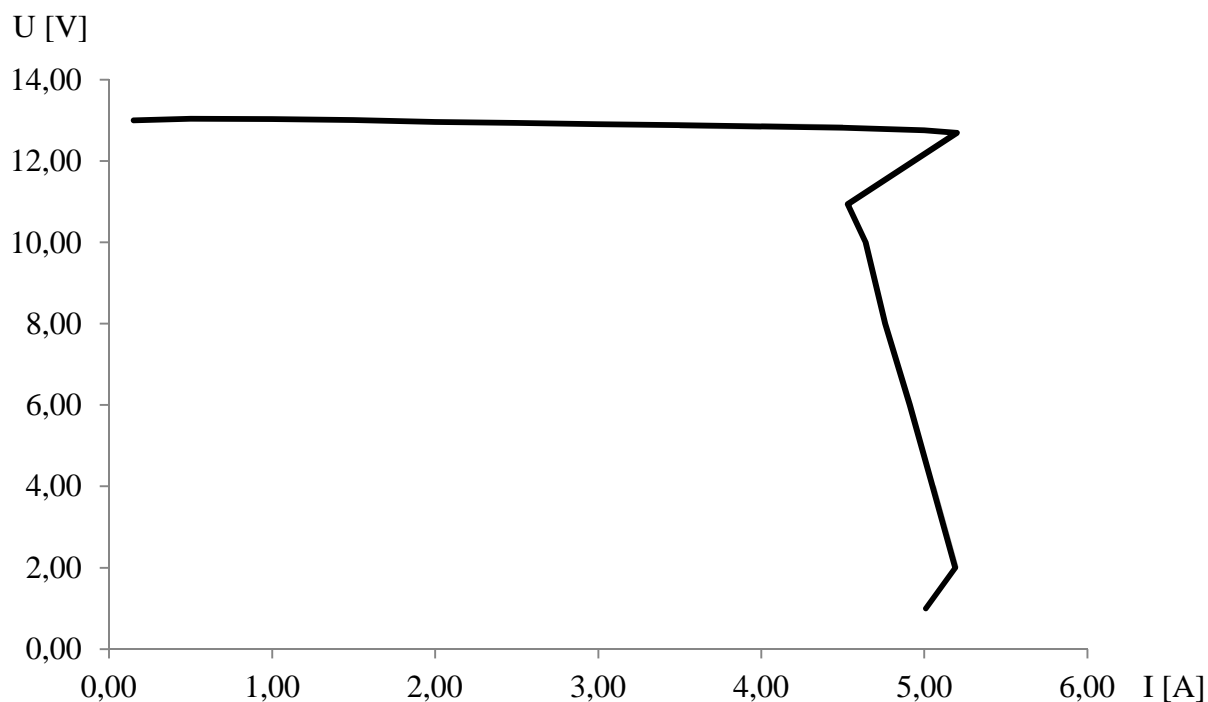
## Přílohy

### Příloha A – Tabulka a graf naměřených hodnot

#### Zatěžovací charakteristika - 50% U a 50% I – 13V a 5A

Tabulka 1 - Naměřené hodnoty při 50% U a 50% I

Č. Měření	I [A]	U [V]	Zvlnění U [mV]	Rz [Ohm]
1	0,15	13,00	10	0,00
2	0,50	13,04	12	0,00
3	1,00	13,03	18	0,00
4	1,50	13,01	20	0,00
5	2,00	12,96	45	0,02
6	2,50	12,94	50	0,02
7	3,00	12,91	52	0,03
8	3,50	12,88	53	0,03
9	4,00	12,85	80	0,04
10	4,50	12,82	84	0,04
11	5,00	12,76	100	0,05
12	5,20	12,69	100	0,06
13	4,53	10,94	2000	0,45
14	4,64	10,00	2000	0,65
15	4,76	8,00	2000	1,05
16	4,91	6,00	1000	1,43
17	5,05	4,00	500	1,78
18	5,19	2,00	300	2,12
19	5,01	1,00	200	2,40



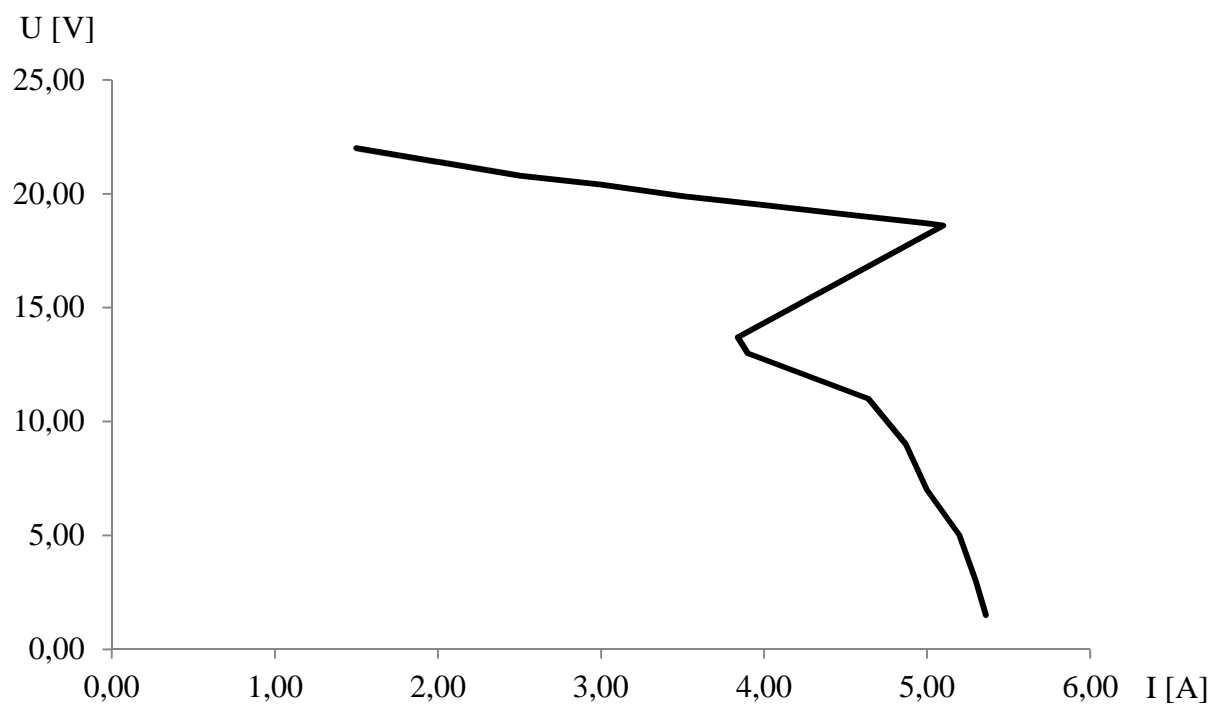
Obrázek 1 - Graf zatěžovací charakteristiky

## Příloha B – Tabulka a graf naměřených hodnot

## Zatěžovací charakteristika - 100% U a 50% I – 26V a 5A

Tabulka 2 - Naměřené hodnoty při 100% U a 50% I

Č. Měření	I [A]	U [V]	Zvlnění U [mV]	R <sub>z</sub> [Ohm]
1	1,50	22,00	25	2,67
2	2,00	21,40	50	2,30
3	2,50	20,80	50	2,08
4	3,00	20,40	50	1,87
5	3,50	19,90	75	1,74
6	4,00	19,50	75	1,63
7	4,50	19,10	100	1,53
8	5,00	18,70	110	1,46
9	5,10	18,60	100	1,45
10	3,84	13,70	400	3,20
11	3,90	13,00	400	3,33
12	4,64	11,00	1500	3,23
13	4,87	9,00	1200	3,49
14	5,00	7,00	1000	3,80
15	5,20	5,00	1100	4,04
16	5,30	3,00	500	4,34
17	5,36	1,50	250	4,57



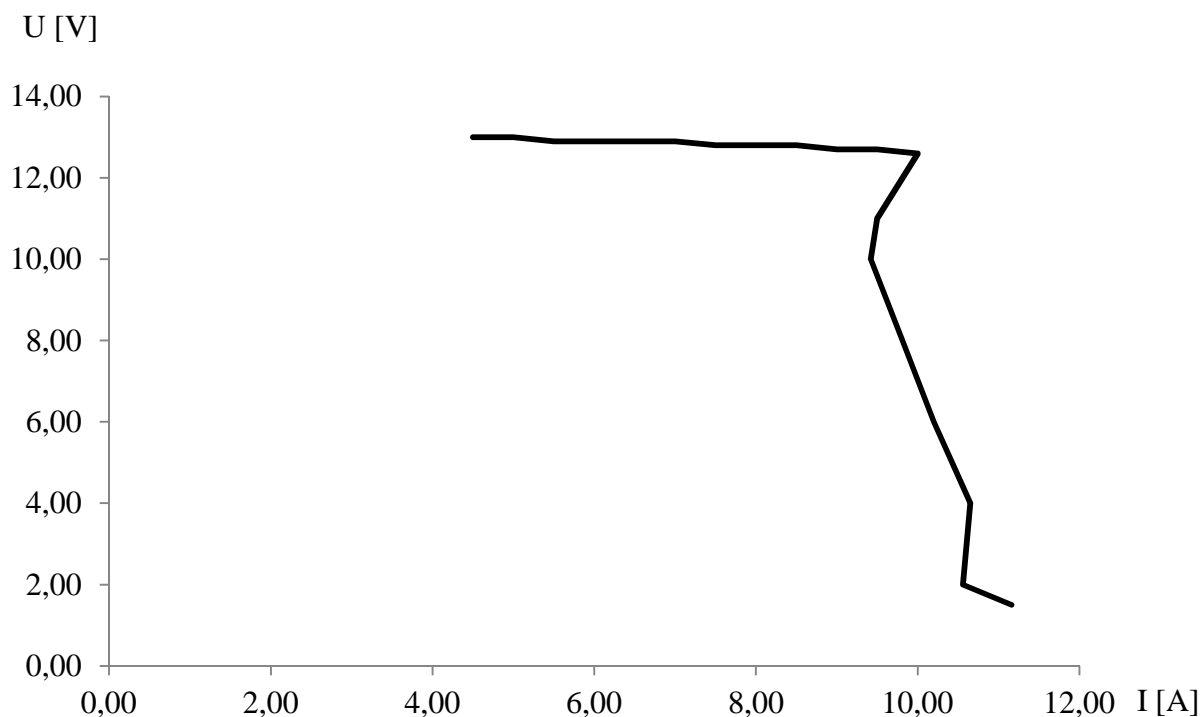
Obrázek 2 - Graf zatěžovací charakteristiky

## Příloha C – Tabulka a graf naměřených hodnot

## Zatěžovací charakteristika – 50% U a 100% I – 13V a 10A

Tabulka 3 - Naměřené hodnoty při 50% U a 100% I

Č. Měření	I [A]	U [V]	Zvlnění U [mV]	Rz [Ohm]
1	4,50	13,00	180	0,00
2	5,00	13,00	180	0,00
3	5,50	12,90	200	0,02
4	6,00	12,90	200	0,02
5	6,50	12,90	200	0,02
6	7,00	12,90	200	0,01
7	7,50	12,80	200	0,03
8	8,00	12,80	200	0,02
9	8,50	12,80	250	0,02
10	9,00	12,70	250	0,03
11	9,50	12,70	250	0,03
12	10,00	12,60	350	0,04
13	9,50	11,00	4 000	0,21
14	9,42	10,00	3 000	0,32
15	9,81	8,00	3 000	0,51
16	10,20	6,00	3 000	0,69
17	10,65	4,00	3 000	0,85
18	10,56	2,00	2 000	1,04
19	11,16	1,50	2 000	1,03



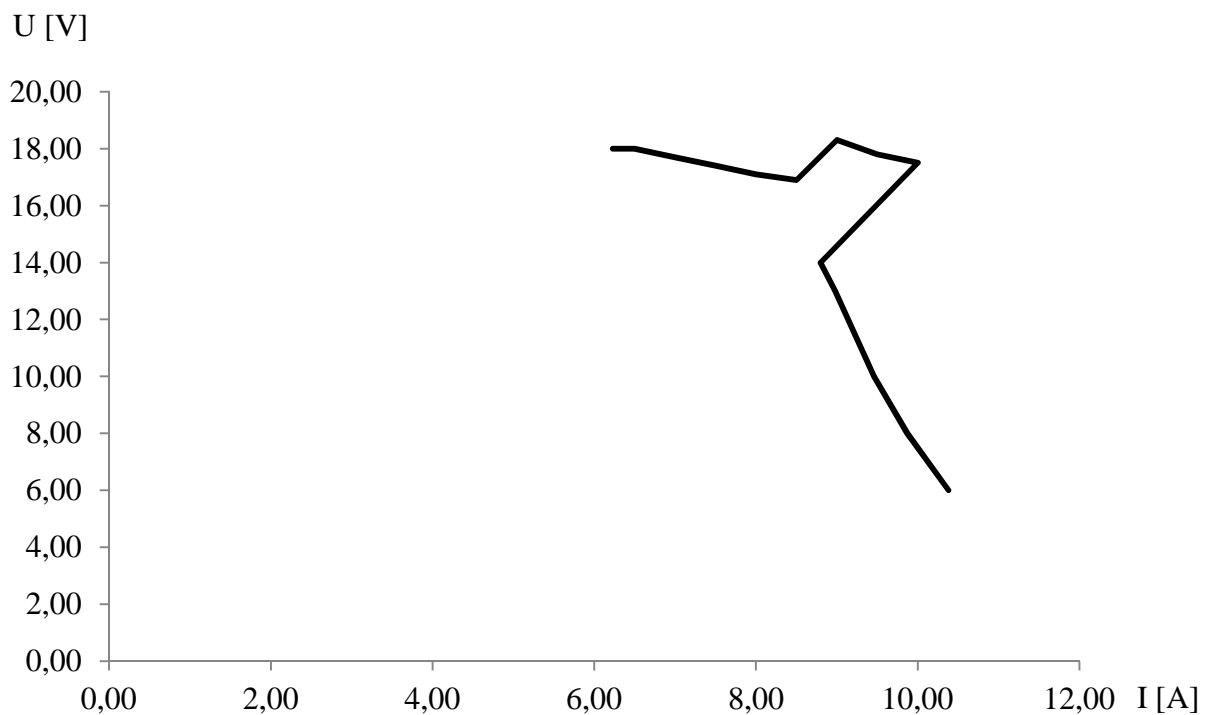
Obrázek 3 - Graf zatěžovací charakteristiky

## Příloha D – Tabulka a graf naměřených a vypočítaných hodnot

## Zatěžovací charakteristika – 100% U a 100% I – 26V a 10A

Tabulka 4 - Naměřené hodnoty při 100% U a 100% I

$I [A]$	$U [V]$	Zvlnění $U [mV]$	$R_z [Ohm]$
6,23	18,00	100	1,28
6,50	18,00	100	1,23
7,00	17,70	100	1,19
7,50	17,40	150	1,15
8,00	17,10	200	1,11
8,50	16,90	400	1,07
9,00	18,30	400	0,86
9,50	17,80	500	0,86
10,00	17,50	500	0,85
8,80	14,00	4000	1,36
8,98	13,00	3000	1,45
9,46	10,00	3000	1,69
9,87	8,00	2000	1,82
10,38	6,00	2000	1,93

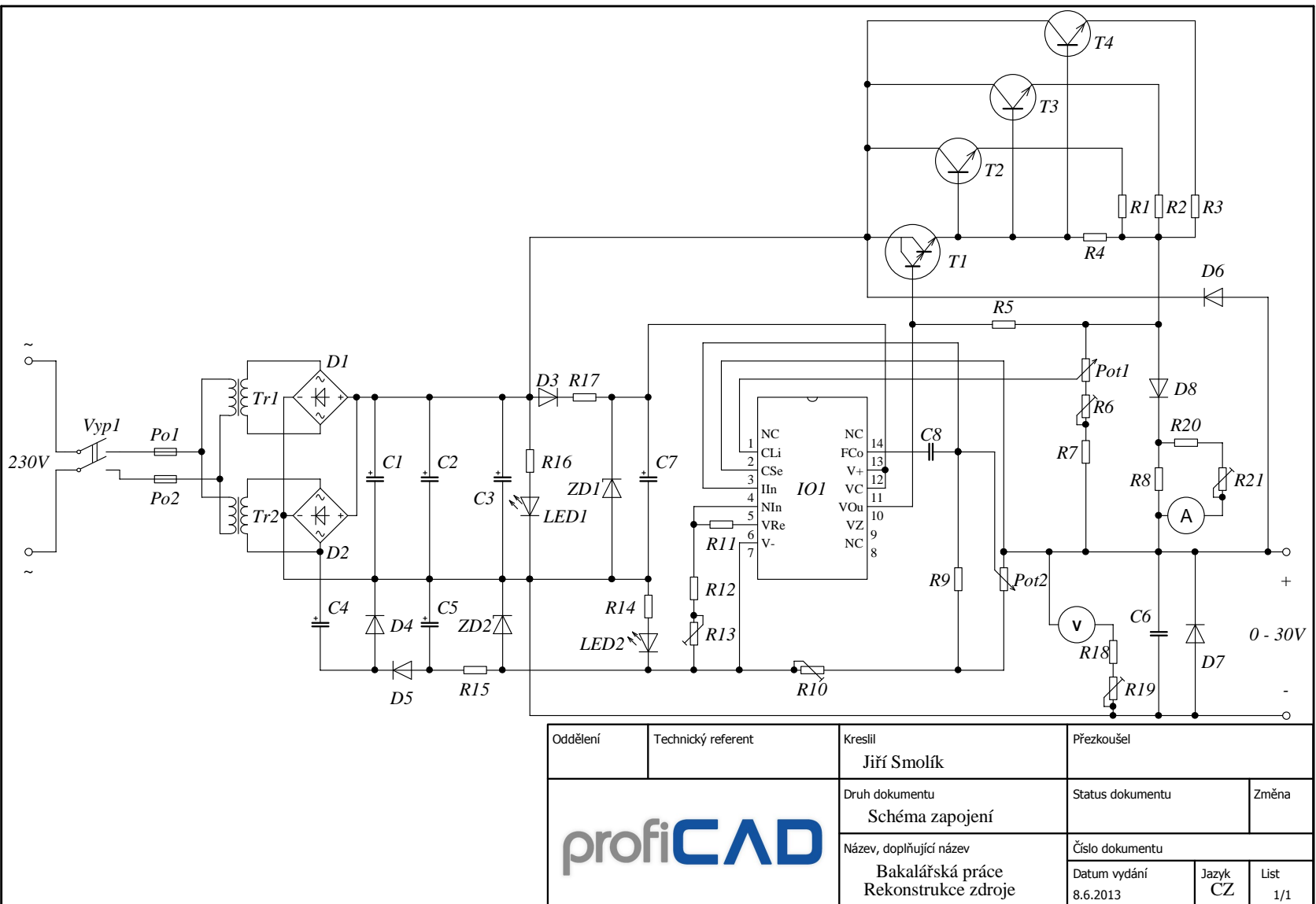



Obrázek 4 - Graf zatěžovací charakteristiky

**Příloha E – Seznam použitých součástek**

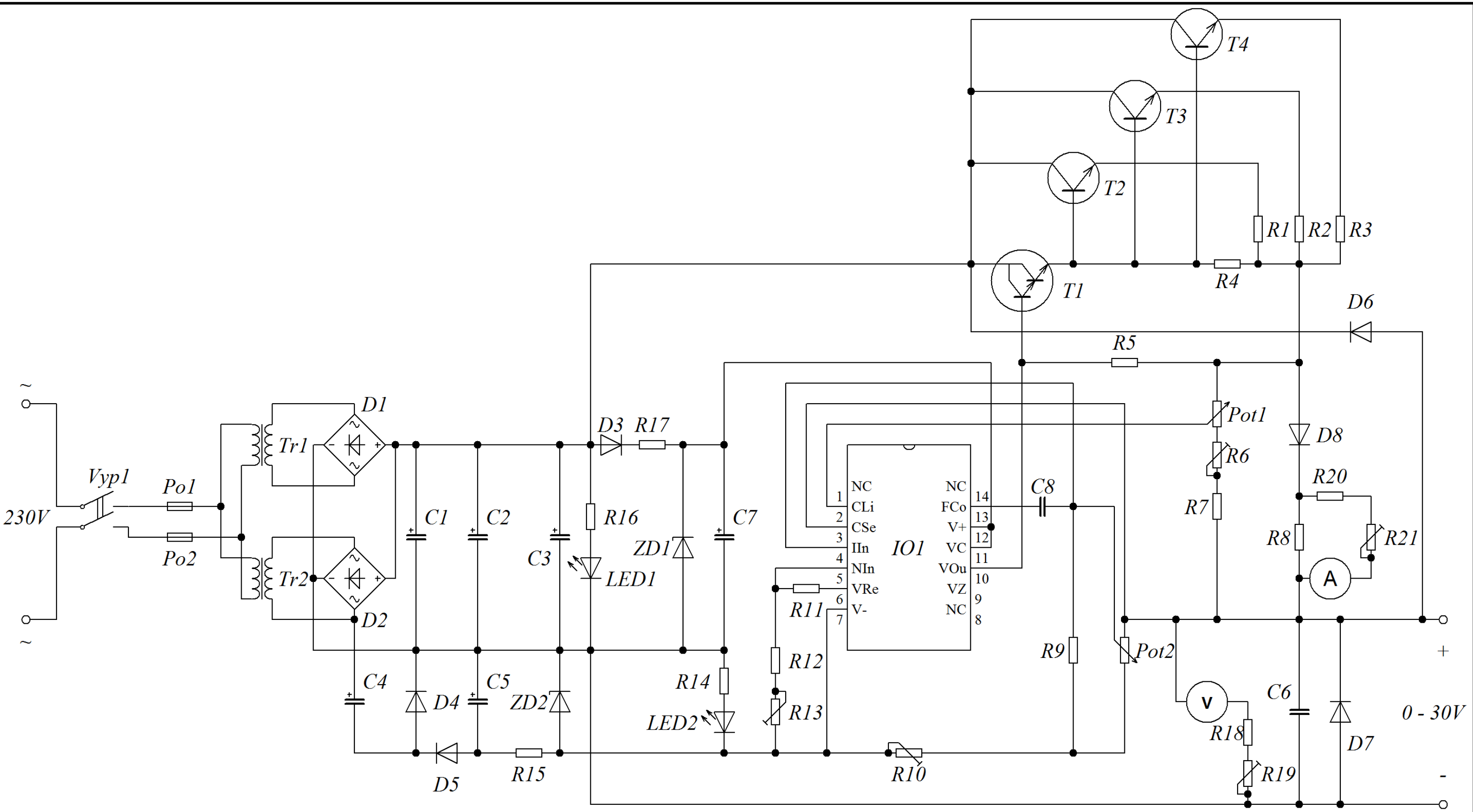
$C_1$ .....	10 000 $\mu F$ / 50 V	$R_{13}$ .....	Trimr 4,7 k $\Omega$
$C_2$ .....	10 000 $\mu F$ / 50 V	$R_{14}$ .....	160 $\Omega$
$C_3$ .....	10 000 $\mu F$ / 50 V	$R_{15}$ .....	2,2 k $\Omega$
$C_4$ .....	100 $\mu F$ / 63 V	$R_{16}$ .....	1,6 k $\Omega$
$C_5$ .....	470 $\mu F$ / 63 V	$R_{17}$ .....	330 $\Omega$ / 2 W
$C_6$ .....	100 nF / 50 V	$R_{18}$ .....	240 k $\Omega$
$C_7$ .....	47 $\mu F$ / 40 V	$R_{19}$ .....	100 k $\Omega$
$C_8$ .....	100 pF / 50 V	$R_2$ .....	0,1 $\Omega$ / 20 W
$D_1$ .....	KBPC1506	$R_{20}$ .....	7,5 k $\Omega$
$D_2$ .....	KBPC1506	$R_{21}$ .....	2,2 k $\Omega$
$D_3$ .....	1N4007	$R_3$ .....	0,1 $\Omega$ / 20 W
$D_4$ .....	1N4007	$R_4$ .....	47 $\Omega$
$D_5$ .....	1N4007	$R_5$ .....	560 $\Omega$
$D_6$ .....	BYV79E200	$R_6$ .....	Trimr 500 $\Omega$
$D_7$ .....	BYV79E200	$R_7$ .....	100 $\Omega$
$D_8$ .....	40FR60	$R_8$ .....	Drátový bočník 0,1 $\Omega$
$D_8$ .....	40FR60	$R_9$ .....	1 k $\Omega$
$LED_1$ .....	LED zelená	$T_1$ .....	BDX33C
$LED_2$ .....	LED zelená	$T_2$ .....	2N3055
$Pot_1$ .....	Potenciometr 500 $\Omega$	$T_3$ .....	2N3055
$Pot_2$ .....	Potenciometr 10 k $\Omega$	$T_4$ .....	2N3055
$R_1$ .....	0,1 $\Omega$ / 20 W	$ZD_1$ .....	BZX85C33
$R_{10}$ .....	Trimr 2,2 k $\Omega$	$ZD_2$ .....	BZX85C4V7
$R_{11}$ .....	2,2 k $\Omega$	$IO$ .....	UA723
$R_{12}$ .....	2,2 k $\Omega$		


Příloha F – Schéma zapojení zdroje



Oddělení	Technický referent	Kreslil Jiří Smolík	Přezkoušel	
		Druh dokumentu Schéma zapojení	Status dokumentu	Změna
		Název, doplňující název Bakalářská práce Rekonstrukce zdroje	Číslo dokumentu	Datum vydání 8.6.2013

Obrázek 5 - Schéma zapojení zdroje



Oddělení	Technický referent	Kreslil <b>Jiří Smolík</b>	Přezkoušel		
		Druh dokumentu <b>Schéma zapojení</b>	Status dokumentu	Změna	
		Název, doplňující název <b>Bakalářská práce Rekonstrukce zdroje</b>	Číslo dokumentu		
		Datum vydání 8.6.2013	Jazyk CZ	List 1/1	