



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# **NÁVRH DVOJITÉHO STABILIZOVANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE**

DESIGN OF DUAL REGULATED POWER SUPPLY

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**JIŘÍ MOŠTĚK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

prof. Ing. LUBOMÍR BRANČÍK, CSc.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Jiří Moštěk

**ID:** 125552

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2011/2012

## NÁZEV TÉMATU:

### Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Provedte návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje 0 až 20 V a 0 až 40 V, s proudovou zatížitelností 3 A a s možností zapojení výstupních svorek do symetrického výstupu. Zdroj opatřete elektronickou pojistkou a ukazateli napětí a proudů. Zapojení zdroje simulujte v programu PSpice či obdobném a navrhnete desky plošných spojů v Eagle.

Na základě předchozích návrhových prací realizujte napájecí zdroj předepsaných vlastností, včetně výpočtu parametrů potřebného transformátoru. Zapojení oživte a proveďte měření jeho základních parametrů. Výsledky měření srovnajte s parametry očekávanými v rámci návrhu i obdrženými počítačovou simulací.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČIŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje - příklady výpočtů. Praha: BEN – technická literatura, 2002.

[2] FAKTOR, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

**Termín zadání:** 6.2.2012

**Termín odevzdání:** 25.5.2012

**Vedoucí práce:** prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí symetrického stabilizovaného napájecího zdroje opatřeného nastavitelnou elektronickou proudovou pojistkou. Koncepce zdroje je zvolena jako lineární se dvěma rozsahy výstupního napětí. Na prvním rozsahu je možné regulovat napětí od 0V do 20V s proudovým omezením 2mA – 4A nebo 2mA – 8A. Druhý napěťový rozsah umožňuje nastavit výstupní napětí od 0V do 40V s proudovým omezením 2mA – 4A. Součástí bakalářské práce je simulace zdroje, odzkoušení v nepájivém poli, návrh DPS, oživení, návrh chlazení a konstrukčního řešení. Na závěr jsou uvedeny výsledky měření zdroje a fotodokumentace.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Lineární stabilizovaný zdroj, symetrický zdroj, regulace napětí a proudu, elektronická proudová pojistka, operační zesilovač, DPS, chlazení, proudová charakteristika, napěťová charakteristika.

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with design and construction of a symmetric stabilized power supply provided with an adjustable electronic current fuse. The concept of source is chosen as a linear with two-output voltage ranges. The first range is possible to regulate the voltage from 0V to 20V with current limit 2mA – 4A or 2mA – 8A. The second voltage range allows you to adjust the output voltage from 0V to 40V with current limit 2mA – 4A. Included in this bachelor thesis is the simulation source, testing in non-soldering field, PCB design, commissioning, draft cooling and design of structural solutions. At the end of bachelor thesis are given the results of measurements laboratory resources and photos.

## **KEYWORDS**

Linear stabilized power supply, symmetric source, voltage and current regulation, current electronic fuse, operational amplifier, PCB, cooling, current characteristic, voltage characteristics.

Moštěk, J. *Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 52 s., 28 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Lubomíru Brančíkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

<b>Seznam obrázků</b>	<b>vi</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>viii</b>
<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teorie napájecích zdrojů</b>	<b>2</b>
1.1 Srovnání zapojení spojitých a spínaných zdrojů.....	3
1.1.1 Zdroje spínané koncepce .....	3
1.1.2 Zdroje lineární (spojité) koncepce .....	4
1.1.3 Srovnání .....	5
1.2 Regulace výstupního napětí lineárních zdrojů.....	6
1.2.1 Napěťová reference.....	6
1.2.2 Zesilovač regulační odchylky .....	7
1.2.3 Paralelní stabilizátory napětí.....	7
1.2.4 Sériové stabilizátory napětí.....	8
1.2.5 Třísvorkové lineární stabilizátory .....	10
1.3 Regulace výstupního proudu lineárních zdrojů .....	11
1.3.1 Elektronická pojistka s omezením proudu.....	11
1.3.2 Elektronická pojistka s odpojením zátěže.....	12
<b>2 Návrh laboratorního zdroje</b>	<b>13</b>
2.1 Zdroje A, B .....	13
2.1.1 Usměrňovač, filtr a přepínač sekundárních vinutí .....	14
2.1.2 Zdroj napětí -5,6V a +18V.....	15
2.1.3 Napěťová reference.....	16
2.1.4 Zesilovač stabilizační odchylky a výkonový regulační prvek .....	16
2.1.5 Elektronické omezení proudu .....	18
2.2 Ovládání rozsahů a spínání výstupních svorek.....	20
2.3 Pomocné obvody.....	21
<b>3 Simulace – parametry zdroje</b>	<b>23</b>
3.1 Napěťové charakteristiky zdroje.....	23

3.2	Proudové charakteristiky zdroje .....	25
3.3	Voltampérové charakteristiky zdroje .....	27
<b>4</b>	<b>Návrh chlazení</b>	<b>29</b>
<b>5</b>	<b>Změřené parametry zdroje</b>	<b>31</b>
5.1	Zatěžovací charakteristiky zdroje .....	31
5.1.1	Napěťové charakteristiky zdroje .....	31
5.1.2	Proudové charakteristiky zdroje .....	36
5.1.3	Voltampérové charakteristiky zdroje .....	41
5.2	Časová stabilita výstupních veličin .....	42
5.3	Účinnost zdrojů .....	44
5.4	Zhodnocení naměřených charakteristik .....	46
<b>6</b>	<b>Konstrukční řešení zdroje</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>
	<b>Literatura</b>	<b>50</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>53</b>

# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Principiální schéma síťového napájecího zdroje. ....	2
Obr. 1.2	Principiální schéma spínaného zdroje (Převzato z [1])......	3
Obr. 1.3	Průběhy napětí v různých bodech spínaného zdroje (Převzato z [2])......	3
Obr. 1.4.	Principiální schéma lineárního zdroje (Převzato z [3])......	4
Obr. 1.5	Průběhy napětí v různých bodech lineárního zdroje (Převzato z [2])......	4
Obr. 1.6	Blokové schéma obvodu TL431 (Převzato z [4])......	6
Obr. 1.7	Zesilovač regulační odchylky (Převzato z [6]). ....	7
Obr. 1.8	Zapojení stabilizátoru se Zenerovou diodou (Převzato z [4])......	8
Obr. 1.9	Proudové posílení stabilizátoru (Převzato z [7])......	8
Obr. 1.10	Nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru (Převzato z [4])......	9
Obr. 1.11	Stabilizátor s operačním zesilovačem (Převzato z [7])......	10
Obr. 1.12	Regulovatelný zdroj s LM117 (Převzato z [9]). ....	10
Obr. 1.13	Způsoby omezení výstupního proudu (Převzato z [11])......	11
Obr. 2.1	Blokové schéma zapojení laboratorního zdroje. ....	13
Obr. 2.2	Blokové zapojení jednotlivých částí zdroje. ....	13
Obr. 2.3	Zapojení usměrňovače, filtru a přepínání vinutí .....	14
Obr. 2.4	Zapojení zdroje záporného napětí .....	15
Obr. 2.5	Průběhy napětí na kondenzátorech ve zdroji záporného napětí. ....	15
Obr. 2.6	Zdroj referenčního napětí.....	16
Obr. 2.7	Zapojení zesilovače regulační odchylky a budícího stupně.....	17
Obr. 2.8	Graf závislosti výstupního napětí na natočení potenciometru. ....	18
Obr. 2.9	Schéma zapojení elektronické regulace proudu.....	19
Obr. 2.10	Graf závislosti výstupního proudu na natočení potenciometru.....	20
Obr. 2.11	Schéma zapojení obvodu "stiskem zapni, stiskem vypni".....	20
Obr. 2.12	Průběhy napětí v obvodu při spínání tlačítka.....	21
Obr. 2.13	Schéma zapojení obvodu Soft Start. ....	21
Obr. 2.14	Schéma zapojení pomocného zdroje.....	22
Obr. 2.15	Schéma zapojení tepelné ochrany. ....	22
Obr. 3.1	Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 4A. ....	23
Obr. 3.2	Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 8A. ....	24

Obr. 3.3	Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 40V / 4A. ....	24
Obr. 3.4	Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 4A. ....	25
Obr. 3.5	Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 8A. ....	26
Obr. 3.6	Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 40V / 4A. ....	26
Obr. 3.7	Voltampérová charakteristika pro rozsahy 20V / 4A. ....	27
Obr. 3.8	Voltampérová charakteristika pro rozsahy 20V / 8A. ....	28
Obr. 3.9	Voltampérová charakteristika pro rozsahy 40V / 4A. ....	28
Obr. 5.1	Zapojení pracoviště pro měření zatěžovacích charakteristik. ....	31
Obr. 5.2	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A. ....	32
Obr. 5.3	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A. ....	33
Obr. 5.4	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A. ....	33
Obr. 5.5	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A. ....	35
Obr. 5.6	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A. ....	35
Obr. 5.7	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A. ....	36
Obr. 5.8	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A. ....	37
Obr. 5.9	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A. ....	38
Obr. 5.10	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A. ....	38
Obr. 5.11	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A. ....	40
Obr. 5.12	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A. ....	40
Obr. 5.13	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A. ....	41
Obr. 5.14	Celková voltampérová charakteristika zdroje A. ....	41
Obr. 5.15	Celková voltampérová charakteristika zdroje B. ....	42
Obr. 5.16	Časová stabilita výstupních veličin zdroje A. ....	43
Obr. 5.17	Časová stabilita výstupních veličin zdroje B. ....	43
Obr. 5.18	Zapojení pracoviště pro měření účinnosti zdroje. ....	44
Obr. 5.19	Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním napětí. ....	45
Obr. 5.20	Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním proudu. ....	45
Obr. 6.1	Přední panel s popisem ovládacích a kontrolních prvků. ....	48

# SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1	Srovnání zdrojů lineární a spínané koncepce.....	5
Tab. 1.2	Parametry napěťových referenčních obvodů (Převzato z [4]). .....	6
Tab. 1.3	Základní parametry obvodu TL431 (Převzato z [4]). .....	7
Tab. 1.4	Některé parametry obvodu LM317 [9]. .....	10
Tab. 5.1	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A. ....	31
Tab. 5.2	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A. ....	32
Tab. 5.3	Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A. ....	32
Tab. 5.4	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A. ....	34
Tab. 5.5	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A. ....	34
Tab. 5.6	Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A. ....	34
Tab. 5.7	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A. ....	36
Tab. 5.8	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A. ....	37
Tab. 5.9	Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A. ....	37
Tab. 5.10	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A. ....	39
Tab. 5.11	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A. ....	39
Tab. 5.12	Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A. ....	39
Tab. 5.13	Časová stabilita výstupních veličin zdroje A. ....	42
Tab. 5.14	Časová stabilita výstupních veličin zdroje B. ....	42
Tab. 5.15	Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním napětí. ....	44
Tab. 5.16	Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním proudu. ....	44
Tab. 5.17	Tabulka poklesu výstupního napětí při zatížení zdroje A. ....	46
Tab. 5.18	Tabulka ztrát při maximálním výstupním napětí a proudu pro zdroj A. ....	46
Tab. 5.19	Tabulka poklesu výstupního napětí při zatížení zdroje B. ....	46
Tab. 5.20	Tabulka ztrát při maximálním výstupním napětí a proudu pro zdroj B. ....	46

# ÚVOD

Tato práce se zabývá návrhem symetrického laboratorního zdroje. Jde tedy o zapojení, které je schopné dodat jak kladné, tak i záporné napětí vůči společné svorce GND. Jedná se o dva samostatné nesymetrické zdroje, které je možné spojit v jeden zdroj symetrický. Samozřejmostí je plynule nastavitelné výstupní napětí a elektronické omezení výstupního proudu. Laboratorní zdroj bude využíván zejména pro ožívání zařízení z oblasti nízkofrekvenční techniky. Proto byla koncepce zdroje zvolena jako lineární kvůli menšímu zvlnění výstupního napětí, menšímu rušení a rychlejším reakcím při změně zátěže. Malá účinnost lineárních zdrojů je částečně kompenzována použitím transformátoru se dvěma sekundárními vinutími pro každý ze zdrojů. Sekundární vinutí jsou ke stabilizátoru připojena buď paralelně, nebo sériově podle zvoleného rozsahu výstupního napětí. Tím je dosaženo snížení napětí a ztrátového výkonu na regulačním tranzistoru při malých výstupních napětích stabilizátoru.

V kapitole 1 jsou srovnány vlastnosti lineárních a spínaných napájecích zdrojů. Následuje teorie zapojení lineárních stabilizátorů napětí. Kapitola 2 se zabývá návrhem a simulací zapojení v programu Multisim pomocí komerčně dostupných modelů tranzistorů a operačních zesilovačů. Výsledky simulací jsou uvedeny v kapitole 3. V kapitole 4 je uveden návrh chlazení součástek. Po sestavení a odzkoušení zdroje byly změřeny zatěžovací charakteristiky, které je možné porovnat s charakteristikami získanými v programu Multisim (Kapitola 5). Na závěr práce jsou v příloze uvedeny schémata, návrhy DPS a osazovací plány všech dílčích obvodů. Součástí příloh jsou také výkresy pro výrobu krabice zdroje a fotodokumentace.

# 1 TEORIE NAPÁJECÍCH ZDROJŮ

Napájecí zdroj je elektronické zařízení, které je schopné dodat potřebnou energii do připojeného zařízení. Napájecí zdroj musí být schopen dodat do obvodu požadovanou velikost elektrického napětí a elektrického proudu. Velikost napětí a proudu by měla být udržována na předem nastavené hodnotě s uvedenou tolerancí. Na Obr. 1.1 je uvedeno principiální schéma napájecího zdroje.



Obr. 1.1: Principiální schéma síťového napájecího zdroje.

## Rozdělení napájecích zdrojů:

podle principu činnosti:

- Spojité (lineární) napájecí zdroje
- Spínané napájecí zdroje

podle druhu dodávaného výkonu:

- Zdroje stejnosměrných napětí a proudů
- Zdroje střídavých napětí a proudů

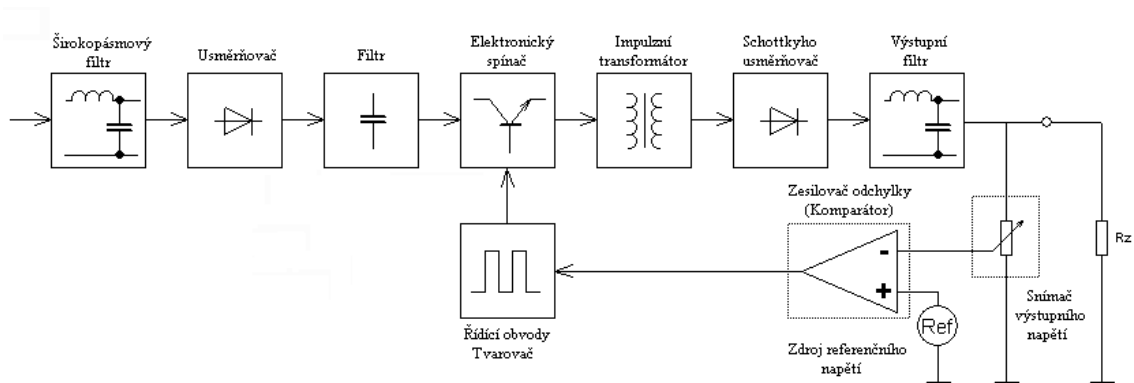
podle regulovatelnosti výstupních veličin:

- Neregulovatelné zdroje (pevně nastavené výstupní napětí)
- Regulovatelné zdroje (skokově nebo spojitě)

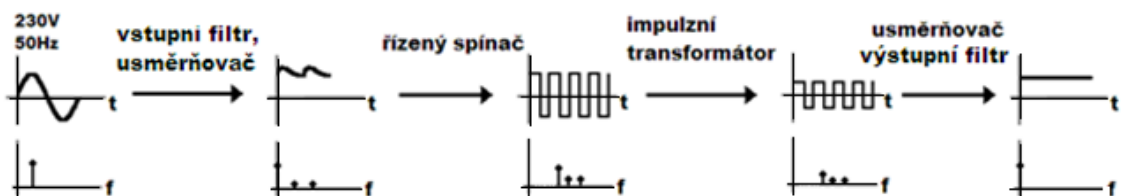
## 1.1 Srovnání zapojení spojitých a spínaných zdrojů

### 1.1.1 Zdroje spínané koncepce

Tato kapitola se zabývá principem spínaných zdrojů. Na Obr. 1.2 Je uvedeno principiální blokové schéma spínaného zdroje. Vstupní síťové napětí je nejprve usměrněno, následně vyfiltrováno a poté přivedeno na elektronický spínač. Zde je napětí rozkmitáno na obdélníkový signál o kmitočtu řádu stovek kHz. Napětí je přivedeno na vysokofrekvenční transformátor, kde je přetransformováno na potřebnou hodnotu. Následně je signál usměrněn a vyfiltrován. Požadovaná hodnota výstupního napětí je udržována pomocí zesilovače odchylky, na jehož vstup je přiváděno výstupní napětí a je porovnáváno s referenční hodnotou. Obr. 1.3 zobrazuje průběhy napětí v různých bodech spínaného zdroje.



Obr. 1.2 Principiální schéma spínaného zdroje (Převzato z [1]).



Obr. 1.3 Průběhy napětí v různých bodech spínaného zdroje (Převzato z [2]).

**Širokopásmový filtr** zabraňuje průniku vyšších harmonických složek, vznikajících spínáním usměrněného napětí, do sítě. Filtr také odfiltruje rušivé signály z rozvodné sítě vstupující do zdroje.

**Usměrňovač a filtr** přemění vstupní střídavé napětí na stejnosměrné. Usměrňovač může být zapojen jako jednocestný nebo dvoucestný. Nejčastějším typem je dvoucestný usměrňovač zapojený jako Graetzův můstek. Filtr je tvořen kondenzátorem o vysoké kapacitě.

**Elektronický spínač** na základě signálů ze zesilovače regulační odchylky připíná usměrněné napětí na výstup. Ve většině zapojení je spínač (tranzistor) spínán konstantním kmitočtem a mění se střída signálu – PWM modulace.

**Impulzní transformátor** je většinou tvořen feritovým jádrem a příslušnými vinutími. Díky spínacímu kmitočtu řádově stovky kHz jsou rozměry i hmotnost transformátoru několikanásobně menší, než u síťového transformátoru.

**Schottkyho usměrňovač a filtr** slouží k usměrnění a vyfiltrování napětí na výstupu impulzního transformátoru. Usměrňovač je tvořen Schottkyho diodou. Obvyčejné usměrňovací diody nelze použít kvůli vysokému kmitočtu. Filtr je tvořen filtračním kondenzátorem a nárazovou tlumivkou. Kondenzátor je připojen k výstupu paralelně a pro stejnosměrnou složku má nekonečně velký odpor. Pro střídavé složky se odpor s kmitočtem zmenšuje. Tlumivka je připojena k výstupu sériově. Pro stejnosměrnou složku má tlumivka nulový odpor a pro střídavé složky se odpor s kmitočtem zvyšuje.

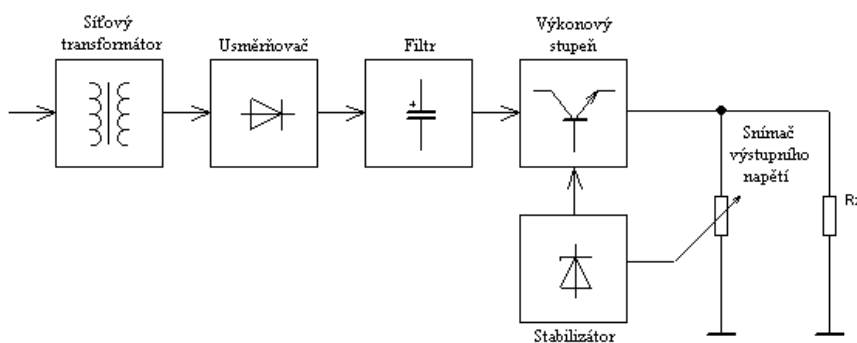
**Snímač výstupního napětí** umožňuje získat na výstupu násobek referenčního napětí.

**Zesilovač odchylky** je tvořen komparátorem, který porovnává výstupní napětí s referenčním napětím a tím řídí střidu elektronického spínače.

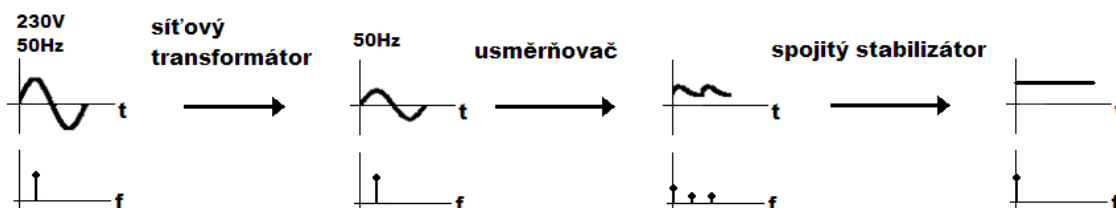
**Řídící obvody** slouží k tvarování signálů z výstupu komparátoru pro elektronický spínač.

## 1.1.2 Zdroje lineární (spojité) koncepce

Kapitola popisuje princip lineárních napájecích zdrojů. Na Obr. 1.4 je blokové schéma lineárního napájecího zdroje. Síťové napájecí napětí je nejprve přivedeno na transformátor, kde je přetransformováno na požadovanou velikost. Poté je napětí usměrněno a vyfiltrováno. Následuje spojitá stabilizace napětí.



Obr. 1.4. Principiální schéma lineárního zdroje (Převzato z [3]).



Obr. 1.5 Průběhy napětí v různých bodech lineárního zdroje (Převzato z [2]).

**Transformátor** je dvojbran, který umožňuje získat potřebnou velikost střídavého napětí ze sítě a také zajišťuje galvanické oddělení. Transformátory v lineárních zdrojích jsou konstruovány pro síťový kmitočet 50Hz (60Hz) a proto dosahují s rostoucím výkonem velkých rozměrů a hmotnosti.

**Usměrňovač** je ve většině případů zapojen jako Graetzův můstek.

**Filtr** je nejčastěji tvořen kondenzátorem a vysoké kapacitě. Výpočet hodnoty filtračního kondenzátoru pro Graetzův můstek podle [4]:

$$C = \frac{300 \cdot I_{OUT}}{p \cdot U_{OUT}}, \quad (1.1)$$

kde  $I_{OUT}$  je požadovaný výstupní proud,  $p$  je požadovaná hodnota maximálního výstupního zvlnění a  $U_{OUT}$  je výstupní napětí.

**Výkonový stupeň** je tvořen tranzistorem. Ten je řídicím napětím otvírán a zavírán. Tranzistor se chová v podstatě jako proměnný rezistor a tím je regulováno výstupní napětí. Nepotřebný výkon ze zdroje je přeměněn v teplo.

**Stabilizátor** je tvořen komparátorem, který porovnává výstupní napětí (nebo jeho díl pro zvýšení napětí na výstupu) s referenční hodnotou a signálem na výstupu ovládá výkonový člen.

### 1.1.3 Srovnání

Parametry jednotlivých topologií napájecích zdrojů jsou srovnány v Tab. 1.1 podle [5].

Tab. 1.1 Srovnání zdrojů lineární a spínané koncepce

Parametr	Jednotka	Lineární zdroj	Spínaný zdroj
Poměr výkon/váha	[W/kg]	20	100
Poměr výkon/objem	[W/cm <sup>3</sup> ]	0,05	0,2
Účinnost	[%]	40 - 50	>80
Výstupní zvlnění	[mV]	5	50
Výstupní šum	[mV]	50	200
Odezva na skokovou změnu zátěže	[ms]	0,02	1
Doba náběhu	[ms]	2	20
Cena		Prudce stoupá a výkonem	Mírně stoupá s výkonem
<b>Poznámka:</b> S rostoucím kmitočtem se zlepšují kvalitativní ukazatele v prospěch spínaných zdrojů.			

## 1.2 Regulace výstupního napětí lineárních zdrojů

### 1.2.1 Napěťová reference

Napěťová reference slouží jako „vzor“ pro porovnávání výstupního napětí s požadovanou hodnotou. Malá výstupní napětí jsou přímo porovnávána s referenční hodnotou. Při požadavku vyššího výstupního napětí, než je referenční hodnota, je s touto hodnotou porovnáván jen díl výstupního napětí zdroje. Pro získání napěťové reference se používají obvody, jejichž úkolem je na svých svorkách udržet co nejpřesněji dané napětí nezávislé na protékajícím proudu, teplotě a stáří. Ve skutečnosti nelze dosáhnout nulové závislosti na těchto parametrech a hodnota napětí je udržována s danou tolerancí.

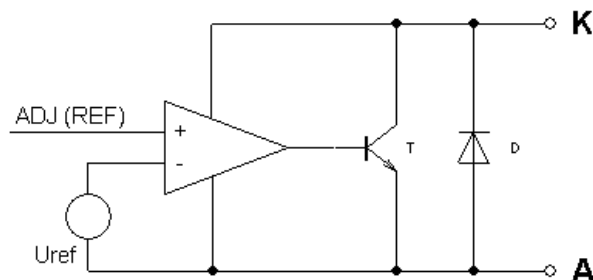
Nejzákladnějším typem napěťových referenčních obvodů jsou Zenerovy diody. Pro zmenšení vlivu teploty okolí bývá dioda umístěna v pouzdře s dalšími součástkami, které zvyšují a udržují teplotu diody na konstantní hodnotě, která je vyšší, než teplota okolí.

V dnešní době se často místo Zenerových diod s PN přechodem často používají integrované obvody, které mají taky pouze dvě svorky, označované jako katoda a anoda [4]. Tyto obvody dosahují mnohem větší stability výstupního napětí a mají menší toleranci výstupního napětí vzhledem k uváděné hodnotě. Vlastnosti některých těchto obvodů jsou uvedeny v Tab. 1.2.

Tab. 1.2 Parametry napěťových referenčních obvodů (Převzato z [4]).

Parametr	LM185-2.5	LT1004CD-1.2	LT1009C
Referenční napětí [V]	2,5	1,2	2,5
Přesnost [%]	1,5	0,33	0,2
Vnitřní odpor [ $\Omega$ ]	0,2	0,2	0,3
Teplotní koef. [ppm/K]	$\pm 20$	$\pm 20$	15

Nejrozšířenějším typem napěťového referenčního obvodu je obvod TL431. Jeho vnitřní zapojení je uvedeno na Obr. 1.6. Jedná se o paralelní regulaci napětí. Pomocí vývodu ADJ (REF) je možné nastavit velikost výstupního napětí. Obvod je možné použít například jako parametrický stabilizátor. Základní parametry obvodu jsou uvedeny v Tab. 1.3.



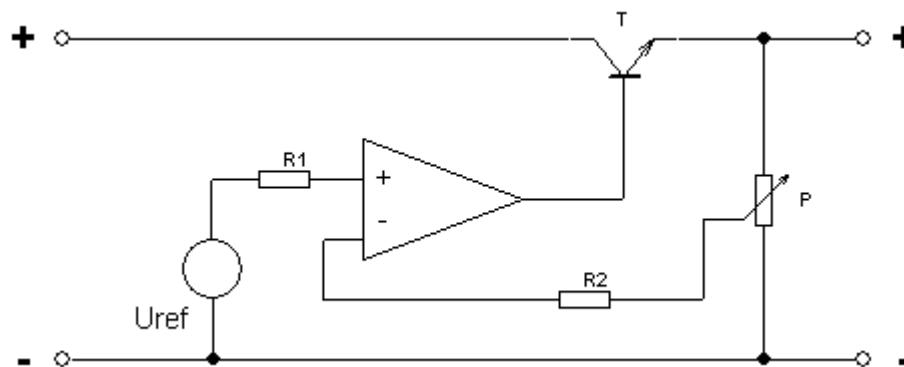
Obr. 1.6 Blokové schéma obvodu TL431 (Převzato z [4]).

Tab. 1.3 Základní parametry obvodu TL431 (Převzato z [4]).

	$U_{ref}$ [V]	$I_{ref}$ [mA]	$I_{KA}$ [mA]	$I_{AK}$ [mA]	$P_Z$ [mW]
<b>TL431</b>	2,495	2	150	100	500 - 1800

### 1.2.2 Zesilovač regulační odchyšky

Zesilovač regulační odchyšky je tvořen komparátorem, který porovnává výstupní napětí (nebo jeho část nastavenou děličem) s referenční hodnotou. Zesiluje se zde rozdílové napětí mezi referenční hodnotou (přivedenou na neinvertující vstup) a výstupním napětím zdroje (invertující vstup). Výstup zesilovače budí například sériový regulační tranzistor. Poklesne-li napětí na výstupu zdroje například vlivem změny zátěže, vzroste regulační napětí, tranzistor se více otevře. Tím se zmenší jeho odpor, poklesne na něm napětí a výstupní napětí zdroje vzroste. Princip komparátoru ve funkci zesilovače regulační odchyšky je uveden na Obr. 1.7.



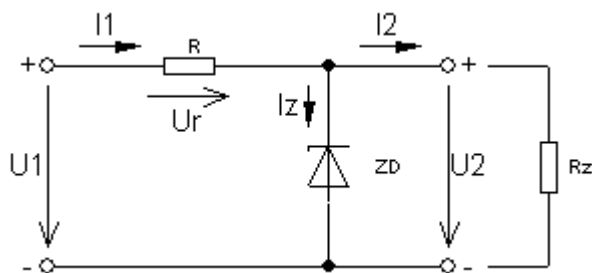
Obr. 1.7 Zesilovač regulační odchyšky (Převzato z [6]).

### 1.2.3 Paralelní stabilizátory napětí

Výkonový regulační prvek je k zátěži připojen paralelně, jak je uvedeno Obr. 1.8 a Obr. 1.9. Nevýhodou tohoto typu regulace je, že zmenšujeme-li proud zátěží, roste proud regulačním členem [7]. Regulační člen proto musí být dostatečně dimenzován. Výhodami tohoto zdroje jsou odolnost tranzistoru proti zkratům na výstupu a schopnost propouštět proud dodávaný aktivní zátěží.

Nejjednodušším typem paralelního stabilizátoru je parametrický stabilizátor se Zenerovou diodou a rezistorem. Rozšířením zapojení o tranzistor lze dosáhnout proudového posílení.

Porovnáme-li činitel napěťové a proudové stabilizace s účinností, zjistíme, že při optimální stabilizaci má stabilizátor nulovou účinnost a naopak při dobré účinnosti (okolo 50%) stabilizátor stabilizuje málo [4]. Proto se tyto stabilizátory používají v nenáročných aplikacích a malým výkonem, kde je zátěž trvale připojena k diodě.



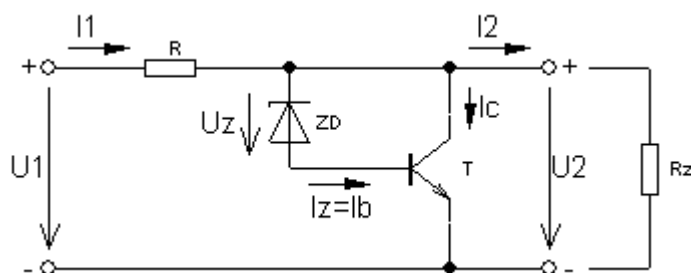
Obr. 1.8 Zapojení stabilizátoru se Zenerovou diodou (Převzato z [4]).

Vzorec pro výpočet rezistoru R:

$$R = \frac{U_R}{I_{IN}} = \frac{U_{IN} - U_Z}{I_{OUT} + I_Z}, \quad (1.2)$$

kde  $U_R$  je napětí na rezistoru R,  $I_{IN}$  je vstupní proud,  $U_{IN}$  je vstupní napětí,  $U_Z$  je napětí na Zenerově diodě,  $I_{OUT}$  je výstupní proud a  $I_Z$  je proud Zenerovou diodou.

Stabilizátor posílený tranzistorem tvoří dělič napětí, jehož horní část tvoří rezistor R a dolní část regulační tranzistor. Regulací měníme poměr děliče a odkládáme proud od zátěže.

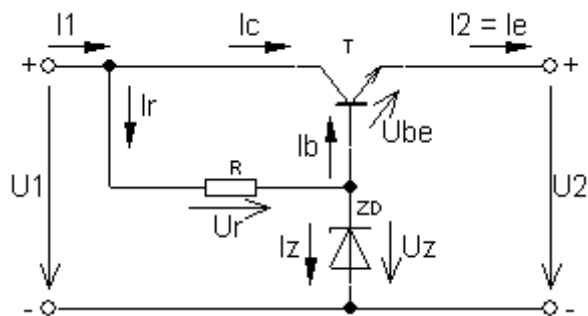


Obr. 1.9 Proudové posílení stabilizátoru (Převzato z [7]).

## 1.2.4 Sériové stabilizátory napětí

Zesilovač regulační odchylky budí tranzistor, který je zapojen sériově se zátěží. Regulační tranzistor zde tvoří proměnný odpor v děliči napětí. Proud protékající tranzistorem je roven proudu procházejícím zátěží. Z toho plyne největší nevýhoda sériových regulátorů. Při zkratu na výstupu se na tranzistoru objeví vstupní napětí a prochází jím velký zkratový proud [7]. Proto je nutné tyto stabilizátory opatřit proudovou ochranou. Proudová ochrana je realizována elektronickými obvody, ne tavnou pojistkou.

Nejjednodušším zapojením je stabilizátor se Zenerovou diodou rozšířený o emitorový sledovač na Obr. 1.10. Báze tranzistoru je napájena ze stabilizátoru tvořeného rezistorem R a Zenerovou diodou. Proud do báze tranzistoru je malý a nezatěžuje tak Zenerovu diodu.



Obr. 1.10 Nejjednodušší zapojení sériového stabilizátoru (Převzato z [4]).

Pro výstupní napětí platí vztah

$$U_2 = U_Z - U_{BE}. \quad (1.3)$$

Pro proud do báze tranzistoru platí

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}}. \quad (1.4)$$

Velikost proudu  $I_R$  protékajícího rezistorem R je

$$I_R = I_B + I_Z. \quad (1.5)$$

Hodnotu rezistoru R získáme ze vztahu

$$R = \frac{U_1 - U_Z}{I_R}. \quad (1.6)$$

Velikost vstupního proudu

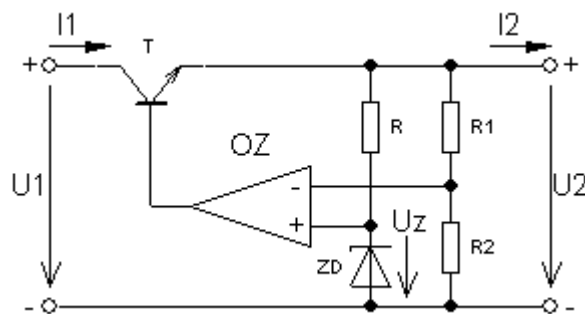
$$I_1 = I_C + I_R, \quad (1.7)$$

kde  $U_1$  je vstupní napětí,  $U_2$  je výstupní napětí,  $U_Z$  je Zenerovo napětí,  $U_{BE}$  napětí na přechodu Báze – Emitor,  $I_B$  označuje proud bázi,  $I_C$  proud kolektorem (výstupní proud),  $I_R$  je proud rezistorem R a  $h_{21E}$  je proudový zesilovací činitel tranzistoru.

Napětí na zátěži bude vždy o  $U_{BE}$  větší, než Zenerovo napětí. Výstupní proud může být mnohokrát větší díky zesílení tranzistoru. Rezistor R určuje velikost proudu diodou a také proud do báze tranzistoru.

Dokonalejším řešením sériových stabilizátorů je použití operačního zesilovače zapojeného jako komparátor. Na neinvertující vstup je přivedeno referenční napětí (například ze Zenerovy diody, obvodu TL431) a na invertující vstup je přivedena část napětí z výstupu odebraná z děliče. Podle toho, jak velkou část výstupního napětí přivedeme na vstup, se mění výstupní napětí stabilizátoru.

Poklesne-li napětí na výstupu zdroje, zvýší se regulační napětí na výstupu OZ a tím se více otevře tranzistor. Otevřením tranzistoru klesne jeho odpor a zmenší se na něm úbytek napětí. Protože je tranzistor v sérii se zátěží, napětí na zátěži vzroste. Způsob zapojení regulátoru s OZ je uveden na Obr. 1.11.



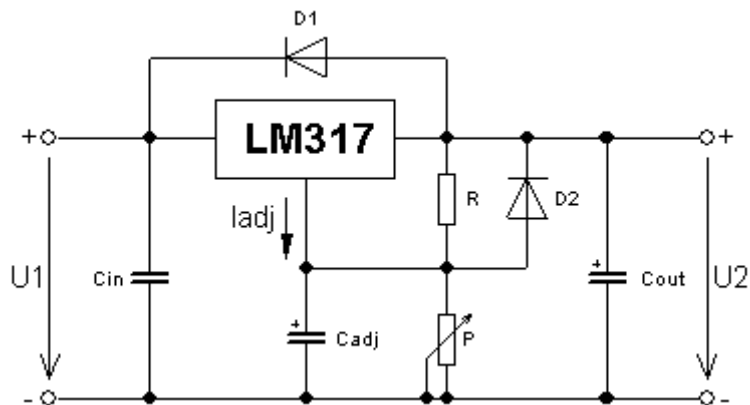
Obr. 1.11 Stabilizátor s operačním zesilovačem (Převzato z [7]).

### 1.2.5 Třísवorkové lineární stabilizátory

Tyto stabilizátory jsou vnitřně zapojeny jako sériové regulátory. Vyrábějí se jak obvody s pevně daným výstupním napětím, tak i s nastavitelným napětím. Obvody jsou opatřeny ochrannými obvody, jako je elektronická proudová pojistka a tepelná ochrana.

Stabilizátory s pevným výstupním napětím se vyrábí v řadě 5V, 5,2V, 6V, 8V, 8,5V, 9V, 10V, 12V, 15V, 18V a 24V [8] a to jak pro kladné, tak i pro záporné napětí. Maximální výstupní proud se pohybuje v rozmezí od 0,1A do 3A.

U stabilizátorů s nastavitelným výstupním napětím lze dosáhnout rozsahu napětí 1,2V – 40V a proudu 0,1A – 3A [4]. Příklad zapojení stabilizátoru i s ochrannými prvky je uveden na Obr. 1.12.



Obr. 1.12 Regulovatelný zdroj s LM117 (Převzato z [9]).

Kondenzátor  $C_{IN}$  je nabíjecím kondenzátorem předřazeného usměrňovače. Použijeme jej, pokud je zdroj vzdálen více než asi 10cm od stabilizátoru.  $C_{OUT}$  zabraňuje rozkmitání stabilizátoru a  $C_{ADJ}$  zlepšuje činitel zvlnění. Potenciometrem P nastavujeme výstupní napětí stabilizátoru. Diody  $D_1$  a  $D_2$  chrání proti přepolarizování vstupu a výstupu.

Tab. 1.4 Některé parametry obvodu LM317 [9].

	$U_{OUT}$ [V]	$I_{OUT}$ [A]	$U_{REF}$ [V]	$I_{ADJ}$ [ $\mu$ A]
LM317	3 - 37	1,5	1,25	50

## 1.3 Regulace výstupního proudu lineárních zdrojů

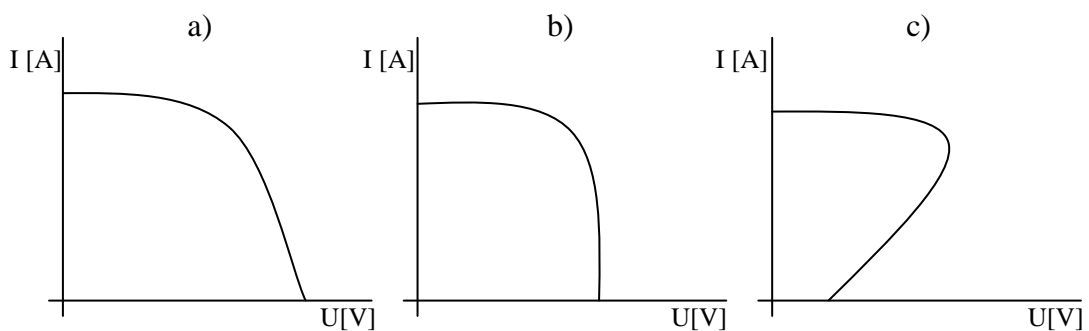
K výbavě laboratorního zdroje neodmyslitelně patří obvody pro omezení výstupního proudu. Většina integrovaných stabilizátorů již obsahuje nějaký typ elektronické pojistky. Ta ale slouží především pro ochranu samotného stabilizátoru a reaguje až při překročení maximálního výstupního proudu. Při napájení obvodu s poruchou je takovýto druh pojistky nedostatečný a může dojít k poškození zkoušeného zařízení. Pokud elektronická pojistka chybí úplně, může být ohrožen i samotný laboratorní zdroj. Takovému poškození nelze předejít ani použitím tavné trubičkové pojistky, která je příliš pomalá.

Moderní laboratorní zdroje proto bývají vybaveny nastavitelnou elektronickou proudovou pojistkou, která je až 100x rychlejší, než tavná pojistka. Zdroje s takovou ochranou se do určitého výstupního proudu, který je nastavitelný, chovají jako zdroj napětí a po překročení nastavené úrovně výstupního proudu se chovají jako zdroj proudu. Pokud je tedy proudové omezení nastaveno na hodnotu jen o málo větší, než je proudový odběr v normálním režimu (nebo předpokládaný odběr), je možné zachránit připojené zařízení. Principiálně rozeznáváme proudové pojistky s omezením proudu a pojistky s odpojením zátěže.

Nevýhodou elektronických pojistek je zvýšení vnitřního odporu zdroje. Elektronické pojistky totiž sledují napěťový úbytek na sledovacím rezistoru, přes který protéká výstupní proud. Další nevýhodou je velký ztrátový výkon na regulačním tranzistoru při aktivaci pojistky. Na tranzistoru je totiž celé napájecí napětí a teče jím proud nastavený elektronickou pojistkou [10]. I přes tyto nevýhody je elektronická pojistka důležitým prvkem laboratorních zdrojů.

### 1.3.1 Elektronická pojistka s omezením proudu

Tyto proudové pojistky omezují výstupní proud na nastavenou hodnotu. Pokud je proud do zátěže menší, než je tato hodnota, proudová pojistka nereaguje. Překročíme-li tuto hodnotu, elektronická pojistka omezí proud na nastavené hodnotě a klesne výstupní napětí [11]. Na Obr. 1.13 jsou uvedeny možné průběhy reakce proudové pojistky. Po překročení nastavené úrovně proud ještě slabě roste a napětí klesá (Obr. 1.13a), napěťový zdroj přechází v proudový zdroj (Obr. 1.13b) nebo se křivka vrací k počátku a ztrátový proud klesá pod hodnotu pracovního proudu (Obr. 1.13c).



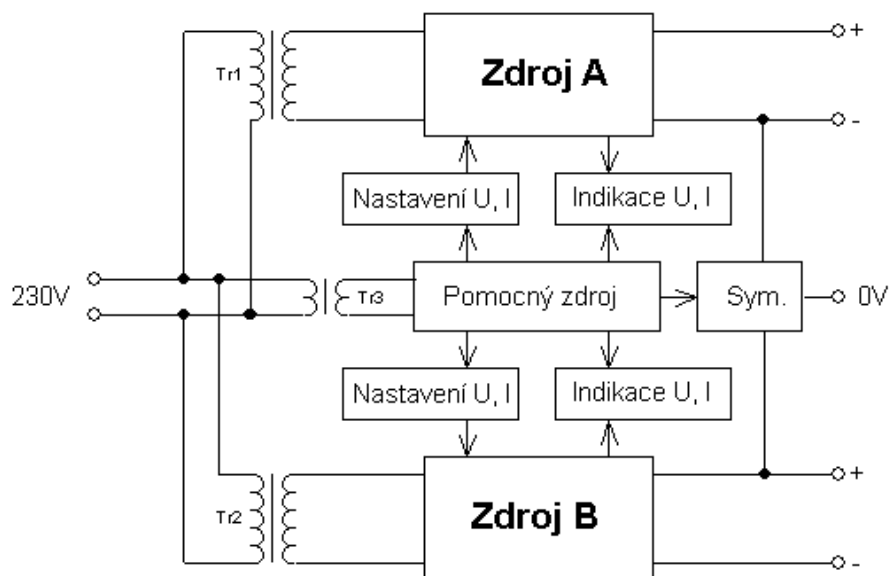
Obr. 1.13 Způsoby omezení výstupního proudu (Převzato z [11])

### **1.3.2 Elektronická pojistka s odpojením zátěže**

Proud protékající sledovacím odporem je porovnáván s nastavenou hodnotou. Pokud výstupní proud překročí tuto hodnotu, je zátěž odpojena od zdroje. Opětovné připojení ke zdroji je buď automatické, nebo po stisku resetovacího tlačítka.

## 2 NÁVRH LABORATORNÍHO ZDROJE

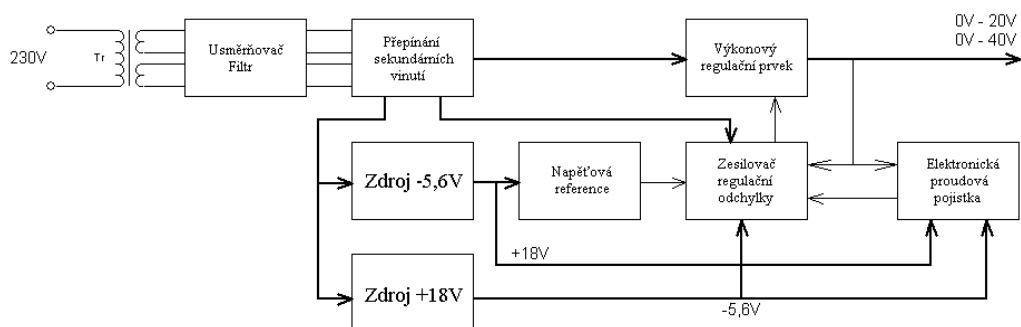
Symetrický laboratorní zdroj je řešen jako dva samostatné napájecí zdroje s možností propojení výstupního napětí k získání symetrického napětí. U obou zdrojů je možné nezávisle na druhém zdroji měnit jak napěťový, tak i proudový rozsah a pomocí ovládacích prvků měnit pro každý zdroj zvlášť výstupní napětí a maximální výstupní proud. Blokové schéma celého zapojení zdroje je uvedeno na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Blokové schéma zapojení laboratorního zdroje.

### 2.1 Zdroje A, B

Základní princip zapojení zdroje je převzat z [12] a [13]. Výhodou tohoto zapojení oproti zapojením s integrovanými stabilizátory je dosažení nulové hodnoty výstupního napětí a možnost regulace proudu již od 2mA. Obr. 2.2 znázorňuje zapojení jednotlivých částí laboratorního zdroje.



Obr. 2.2 Blokové zapojení jednotlivých částí zdroje.

### 2.1.1 Usměrňovač, filtr a přepínač sekundárních vinutí

Na vstup usměrňovače je připojen toroidní síťový transformátor a výkonu 120VA se dvěma sekundárními vinutími. Napětí obou sekundárních vinutí je 15V a maximální odebíraný proud z jednoho vinutí je 4A. Každé z těchto napětí je přivedeno na můstkový usměrňovač s hodnotou maximálního propustného proudu 10A. Po dvoucestném usměrnění je napětí filtrováno kondenzátorem o kapacitě vypočítané podle vztahu (1.1).

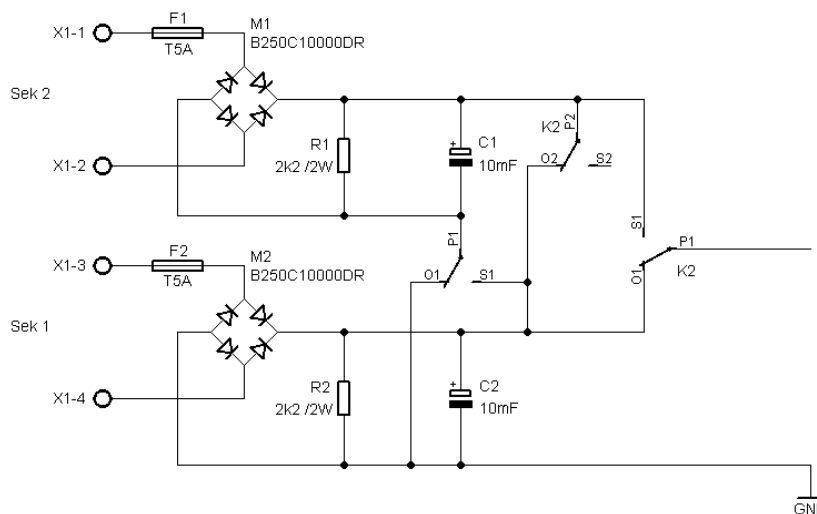
$$C = \frac{300 \cdot I_Z \cdot 10^3}{U_Z \cdot p} \cdot 10^{-6} = \frac{300 \cdot 4 \cdot 10^3}{15 \cdot \sqrt{2} \cdot 10} \cdot 10^{-6} = 5,656mF, \quad (2.1)$$

kde  $I_Z$  je maximální zatěžovací proud,  $U_Z$  je výstupní napětí a  $p$  je maximální zvlnění výstupního napětí.

Hodnota kondenzátoru byla zvolena 10mF, čemuž odpovídá hodnota zvlnění

$$p = \frac{300 \cdot I_Z \cdot 10^3}{U_Z \cdot C} \cdot 10^{-6} = \frac{300 \cdot 4 \cdot 10^3}{15 \cdot \sqrt{2} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^{-6} = 5,66\%. \quad (2.2)$$

Protože byl ke konstrukci zvolen lineární způsob regulace napětí, byl do obvodu přidán přepínač sekundárních napětí. Pokud by bylo ze zdroje odbíráno např. 10V a rozsah zdroje by byl 40V, zůstávalo by na regulačním prvku 30V. Při velkých proudových odběrech (např. 4A) to znamená značný výkon přeměněný v teplo (120W), což způsobí velké ztráty a hlavně jsou namáhány výkonové tranzistory. Přepínač vinutí umožňuje zapojit dvě vinutí transformátoru buď paralelně, nebo sériově. Navíc při paralelním spojení vinutí můžeme ze zdroje na nižším rozsahu odebrat dvojnásobný proud. Tímto zapojením je umožněno přepínat mezi rozsahy 0 – 20V a 0 – 40V. U vyššího rozsahu je výstupní proud omezen na 4A, kdežto u menšího rozsahu je možnost volby mezi omezením na 4A nebo na 8A. Další výhodou přepínání je lepší citlivost nastavení malých hodnot napětí a proudu na nižších rozsazích. Schéma zapojení vstupní části zdroje je na Obr. 2.3.



Obr. 2.3 Zapojení usměrňovače, filtru a přepínání vinutí

## 2.1.2 Zdroj napětí -5,6V a +18V

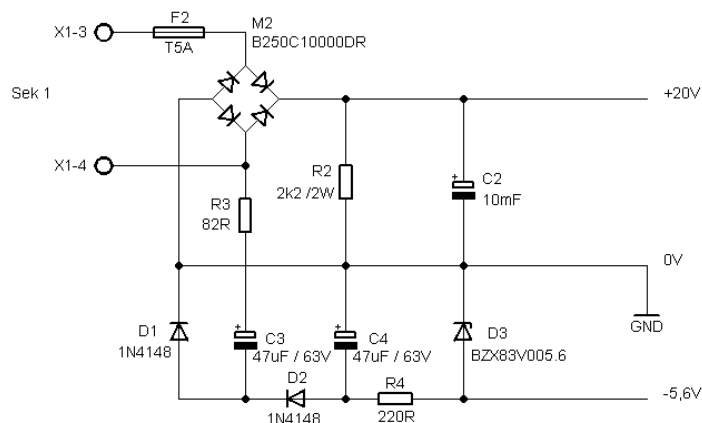
Pro správnou funkci operačních zesilovačů je v zapojení vytvořeno záporné napájecí napětí -5,6V. Díky tomuto napětí je možné nastavit offset OZ a tím získat dostatečnou přesnost komparátoru elektronické pojistky a nastavit přesně nulové napětí na výstupu při stáhnutí ovládacích prvků na minimum.

Zdroj je tvořen součástkami R3, R4, D1, D2, D3, C3 a C4. Při kladné hodnotě vstupního střídavého napětí je nabíjen přes diodu D1 kondenzátor C3 (zelený průběh na Obr. 2.5) a v záporné půlperiodě se z C3 nabíjí přes diodu D2 kondenzátor C4 (modrý průběh na Obr. 2.5). Napětí z kondenzátoru je stabilizováno parametrickým stabilizátorem tvořeným Zenerovou diodou D3 a rezistorem R4. Napětí z takového stabilizátoru je velmi měkké, ale dostatečné pro napájení OZ. Hodnotu R4 pro výstupní proud stabilizátoru např. 60mA (pro TL071 je  $I_{CC} = 2,5\text{mA}$  bez zátěže) vypočteme podle vztahu

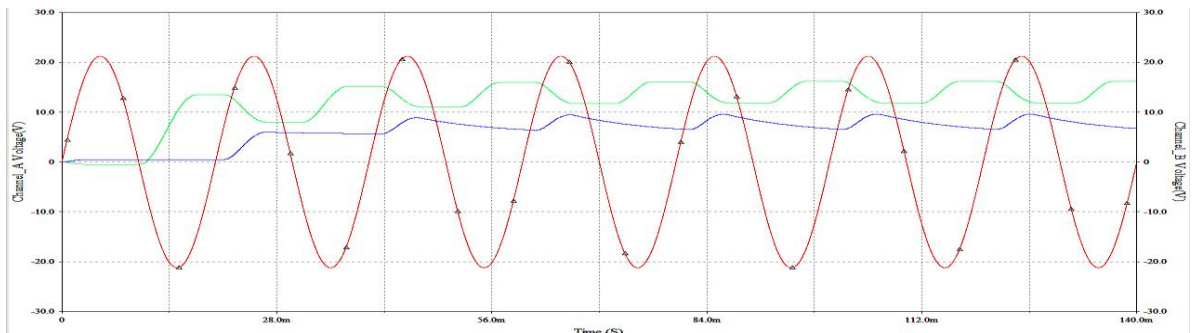
$$R_4 = \frac{U_{R_4}}{I_{R_4}} = \frac{U_{IN} - U_Z}{I_Z + I_{OUT}} = \frac{15 \cdot \sqrt{2} - 5,6}{0,005 + 0,06} = 240\Omega, \quad (2.3)$$

kde  $U_{IN}$  je napětí na vstupu stabilizátoru (napětí na kondenzátoru C4),  $I_{OUT}$  je maximální výstupní proud stabilizátoru,  $U_Z$  je Zenerovo napětí a  $I_Z$  je proud Zenerovou diodou.

Zapojení zdroje záporného napětí je na Obr. 2.4.



Obr. 2.4 Zapojení zdroje záporného napětí

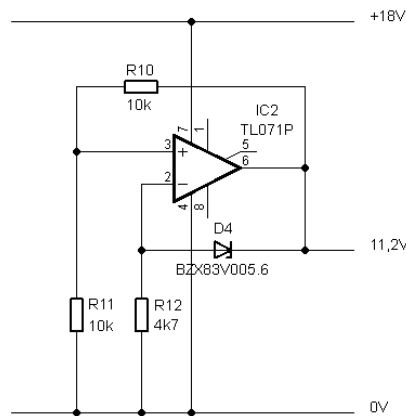


Obr. 2.5 Průběhy napětí na kondenzátorech ve zdroji záporného napětí.

Zdroj +18V slouží k napájení OZ a tvoří jej integrovaný stabilizátor 7805 se dvěma blokovacími kondenzátory C12 a C13. Zdroj byl do obvodu přidán kvůli zachování napěťových úrovní v děličích při přepínání mezi rozsahy. Napětí 18V je získáváno jak z 20V, tak i ze 40V.

### 2.1.3 Napěťová reference

Základem celého zdroje je zdroj referenčního napětí tvořený operačním zesilovačem IC2, rezistory R10, R11, R12 a Zenerovou diodou D4. Zenerova dioda zajišťuje teplotní stabilizaci, napětí na výstupu IC2 se zvyšuje, dokud se dioda neotevře. Poté se obvod stabilizuje a na rezistoru R10 se objeví 5,6V (Zenerovo napětí). Proud neinvertujícího vstupu je zanedbatelný a proto rezistorem R11 protéká stejný proud jako přes R10. Oba rezistory mají stejnou hodnotu. Tím získáme na výstupu OZ 11,2V (2x5,6V). Zapojení zdroje referenčního napětí je uvedeno na Obr. 2.6.



Obr. 2.6 Zdroj referenčního napětí.

### 2.1.4 Zesilovač stabilizační odchylky a výkonový regulační prvek

Referenční napětí 11,2V je přivedeno přes dvojici potenciometrů pro regulaci napětí na neinvertující vstup operačního zesilovače IC3. Zesílení zesilovače je pevně nastaveno podle vzorce

$$A = \frac{R_{15} + R_{24}}{R_{15}} = \frac{R_{16} + R_{24}}{R_{16}}. \quad (2.4)$$

Napěťové zesílení je přepínáno mezi zesílením  $A = 1,8$  pro rozsah 20V a  $A = 3,6$  pro rozsah 40V. Hodnota  $R_{24} = 56k\Omega$ , čemuž pro dvě daná zesílení odpovídají hodnoty  $R_{15}$  a  $R_{16}$ :

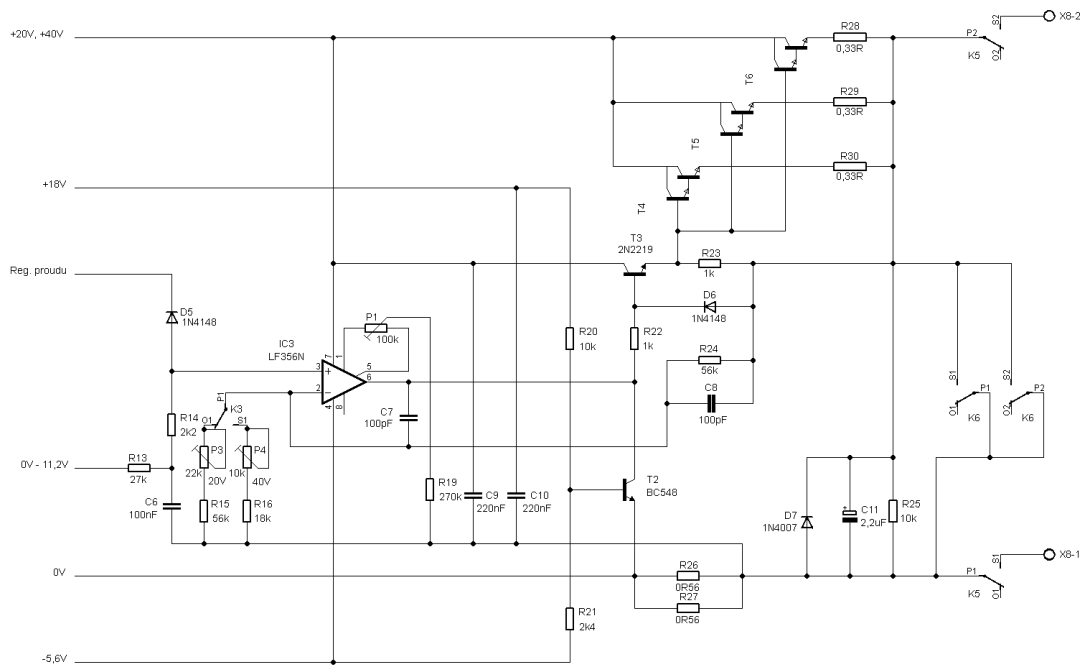
$$R_{15} = \frac{R_{24}}{A_{20} - 1} = \frac{56 \cdot 10^3}{1,8 - 1} = 70k\Omega \quad (2.5)$$

$$R_{16} = \frac{R_{24}}{A_{40} - 1} = \frac{56 \cdot 10^3}{3,6 - 1} = 21,54k\Omega \quad (2.6)$$

Pro zesílení  $A = 20$  byl zvolen  $R15 = 56k\Omega$  v sérii s trimrem  $P3 = 22k\Omega$  a pro zesílení  $A = 40$  byl vybrán  $R16 = 18k\Omega$  v sérii s trimrem  $P4 = 10k\Omega$ . Trimry slouží pro plynulé nastavení zesílení. Pro 20V rozsah je možné zesílení měnit v rozmezí 1,72 – 2,00 a pro rozsah 40V zesílení 3,00 – 4,11 (odvozeno z (2.4)).

Zpětná vazba celého zesilovače je tvořena rezistorem  $R24$  a kondenzátorem  $C8$ . Z výstupu  $IC3$  je přes  $R22$  buzen pomocný tranzistor  $T3$ , který ovládá výkonové tranzistory. Pomocí trimru  $P1$  a rezistoru  $R19$  je možné nastavit nulovou hodnotu výstupního napětí při nulovém napětí na neinvertním vstupu.

Jako regulační prvek byly zvoleny tři tranzistory typu TIP3055, které byly později nahrazeny Darlingtonovými tranzistory TIP141. Emitorové rezistory  $R28$ ,  $R29$ ,  $R30$  zajišťují rovnoměrné rozdělení výkonu na všech výkonových tranzistorech a tím eliminují vliv rozptylu jejich parametrů. Úbytkem napětí na  $R26$ ,  $R27$  je možné měřit výstupní proud a regulovat tak proudové omezení. Napětí na paralelní dvojici rezistorů je totiž úměrné protékajícímu proudu. Směrnicí úměrnosti je odpor jejich paralelní kombinace. Celé zapojení je uvedeno na Obr. 2.7.

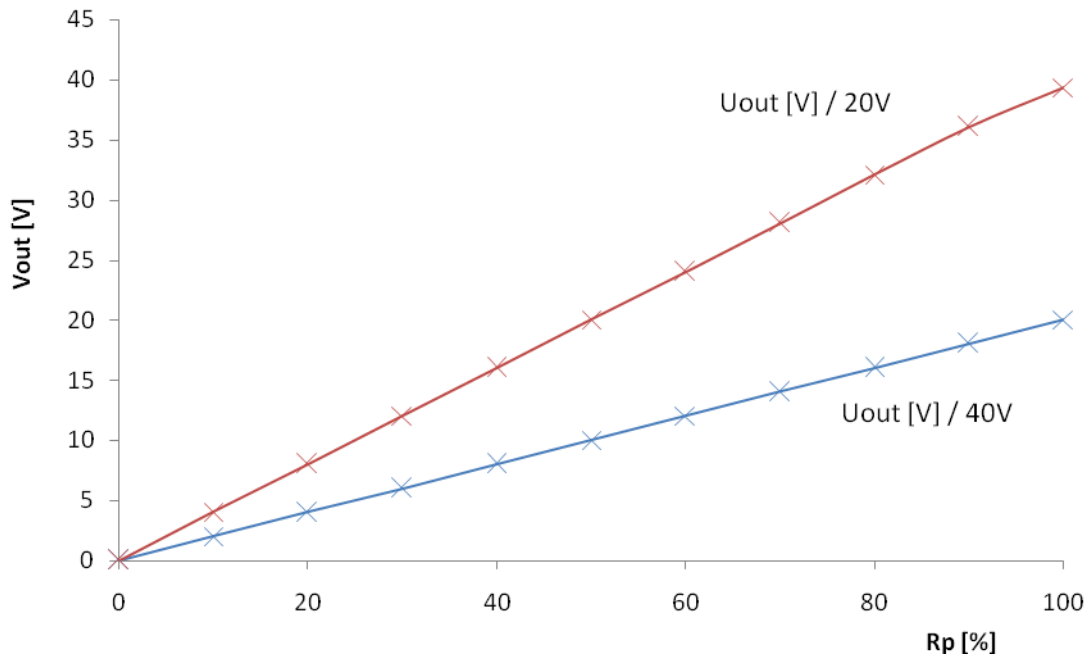


Obr. 2.7 Zapojení zesilovače regulační odchylky a budícího stupně.

Proti výpadku záporného napětí 5,6V je zdroj jištěn rezistory  $R20$ ,  $R21$  a tranzistorem  $T2$ . V normálním režimu je tranzistor v bázi blokován závěrným napětím. Pokud z nějakého důvodu vypadne záporné napětí, na bázi se objeví napětí +800mV, tranzistor se otevře a uzemní výstup  $IC3$ . Tím se přestanou budit výstupní tranzistory. Toto zapojení zároveň potlačí napěťovou špičku při zapnutí zdroje. Dioda  $D5$  umožňuje zasáhnout proudové ochrany do regulace napětí.

Dioda  $D7$  zajišťuje ochranu proti přepólování výstupu.  $R25$  je vybíjecí rezistor pro výstupní kondenzátor  $C11$ . Zdroj je opatřen relátkem pro odpojení výstupu a zkratovacím relátkem pro pohodlné nastavení proudového omezení.

Závislost výstupního napětí na procentuálním natočení potenciometru je vynesena Obr. 2.8.



Obr. 2.8 Graf závislosti výstupního napětí na natočení potenciometru.

### 2.1.5 Elektronické omezení proudu

Jak již bylo zmíněno, výstupní proud zdroje teče přes paralelní kombinaci rezistorů R26 a R27. Úbytek napětí na těchto rezistorech je přiveden na invertující vstup komparátoru IC1. Na neinvertující vstup je přivedeno napětí z nastavitelného děliče tvořeného rezistory R17 (R18), R9 a potenciometry pro regulaci proudu.

Nastavíme-li děličem napětí na vstup komparátoru např. 1V, nevznikne na rezistorech R26 a R27 větší úbytek než právě 1V. Tomu bude odpovídat maximální výstupní proud:

$$I_{OUT} = \frac{U_{neinv.}}{R_{26} \parallel R_{27}} = \frac{1}{0,28} = 3,571A, \quad (2.7)$$

kde  $I_{OUT}$  je výstupní proud,  $U_{neinv.}$  je porovnávací napětí na neinvertujícím vstupu OZ.

Pokud výstupní proud překročí tuto hodnotu, vznikne na sledovacích rezistorech napětí větší než 1V, zareaguje proudová pojistka a přes diodu D5 omezí výstupní napětí pomocí zesilovače IC3. Zásah pojistky do regulace je také indikován LED diodou pomocí tranzistoru T1. Kondenzátor C5 zvyšuje stabilitu obvodu.

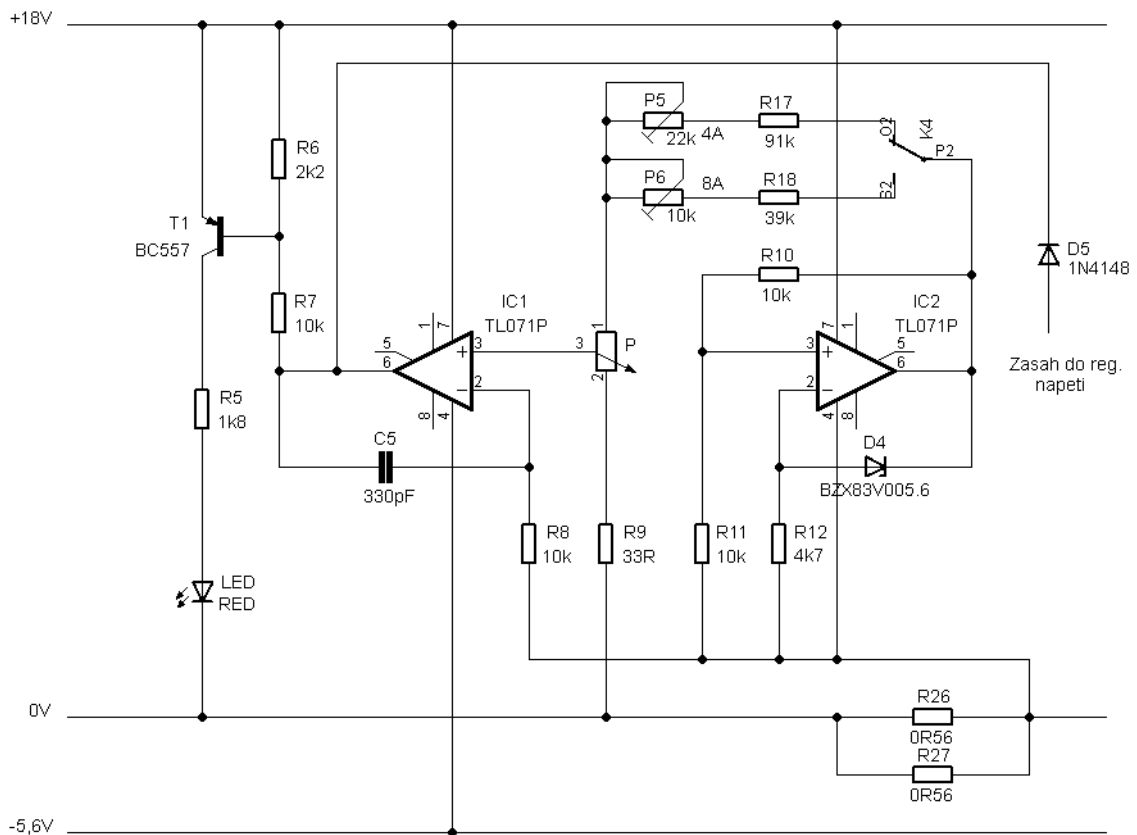
Pro proudový rozsah 4A je mezní hodnota úbytku napětí na rezistorech 1,12V a pro rozsah 8A je to hodnota 2,24V. Výpočet rezistorů R17 (R18) v děliči je následující:

$$R_{17} = \frac{U_{ref}(R_{pot} + R_9)}{I_{OUT_{4A}} \cdot R_{26} \parallel R_{27}} - R_{pot} - R_9 = \frac{11,2(11 \cdot 10^3 + 33)}{4 \cdot 0,28} - 11 \cdot 10^3 - 33 = 99,297k\Omega \quad (2.8)$$

$$R_{18} = \frac{U_{ref}(R_{pot} + R_9)}{I_{OUT_{8A}} \cdot R_{26} \parallel R_{27}} - R_{pot} - R_9 = \frac{11,2(11 \cdot 10^3 + 33)}{8 \cdot 0,28} - 11 \cdot 10^3 - 33 = 44,132k\Omega \quad (2.9)$$

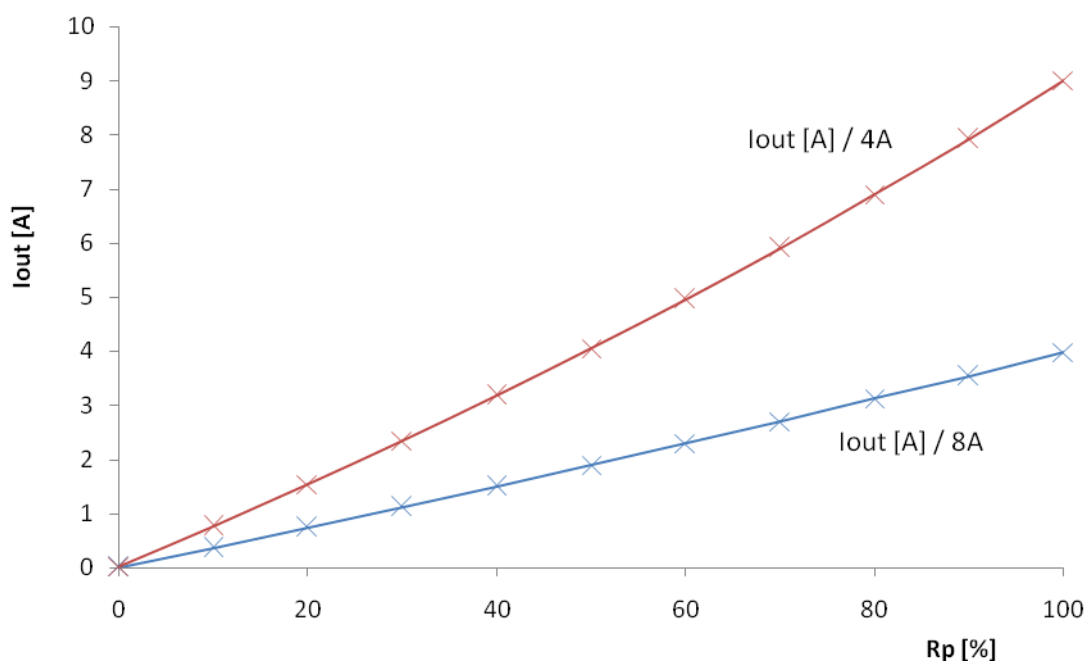
kde  $U_{ref}$  je referenční napětí na výstupu OZ2 (11,2V),  $R_{pot}$  je odpor potenciometru pro regulaci proudu,  $I_{OUT}$  je požadovaný výstupní proud

Pro proudový rozsah 4A byl zvolen rezistor  $R_{17} = 91k\Omega$  v sérii s trimrem  $P_5 = 22k\Omega$  a pro rozsah 8A rezistor  $R_{18} = 39k\Omega$  s trimrem  $P_6 = 10k\Omega$ . Trimry zde slouží pro nastavení maximálního proudu regulace. U prvního rozsahu lze nastavit proud od 3,56A do 4,33A a u druhého rozsahu od 7,35A do 8,82A. Celé zapojení regulace proudu je na Obr. 2.9.



Obr. 2.9 Schéma zapojení elektronické regulace proudu.

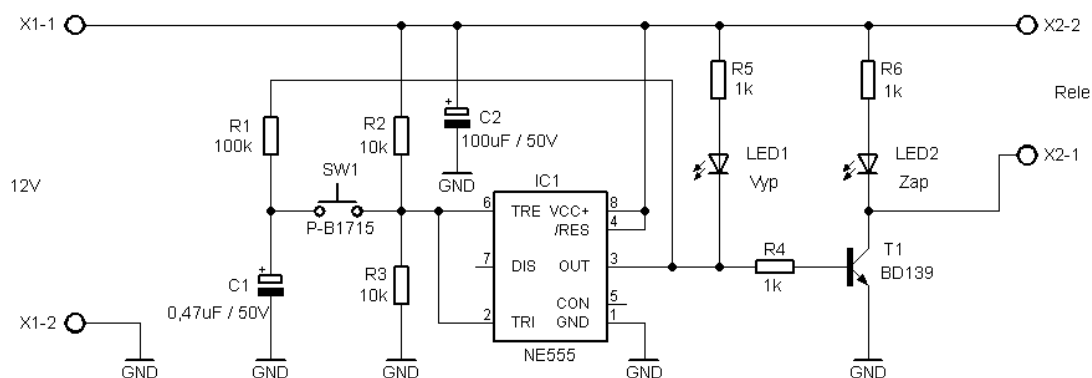
Na Obr. 2.10 je uvedena závislost nastavení mezního proudu elektronické pojistky na procentuálním úhlu natočení potenciometru.



Obr. 2.10 Graf závislosti výstupního proudu na natočení potenciometru.

## 2.2 Ovládání rozsahů a spínání výstupních svorek

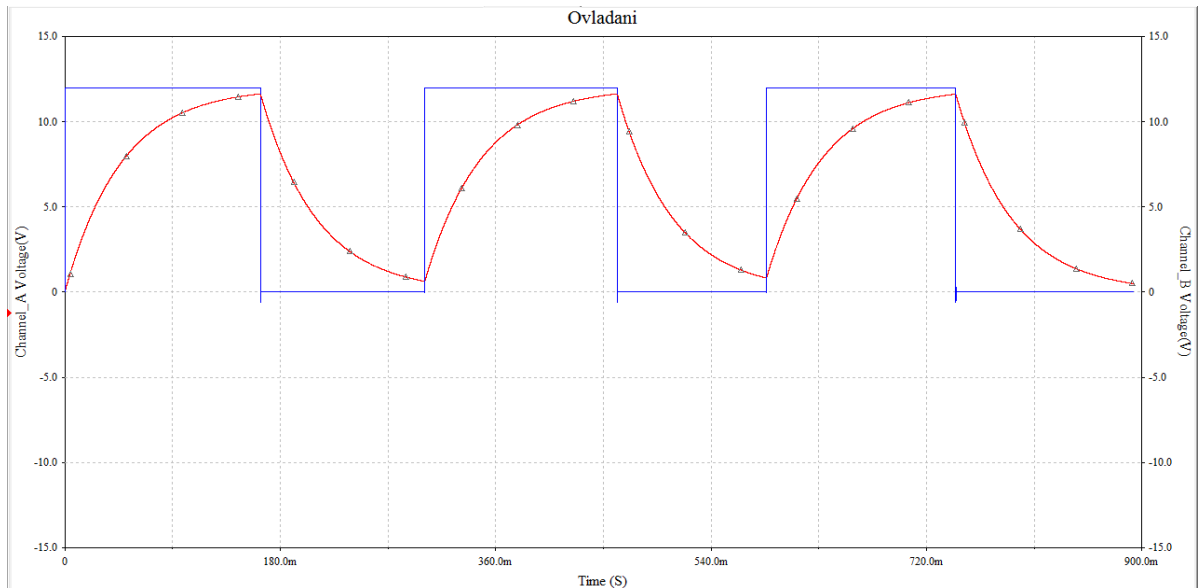
Přepínání rozsahů a spínání výstupních svorek je realizováno pomocí relé. Aby bylo možné relé ovládat tlačítkem způsobem „stiskem zapni, stiskem vypni“, bylo použito zapojení s NE555. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 2.11.



Obr. 2.11 Schéma zapojení obvodu "stiskem zapni, stiskem vypni".

Na vstupy 2 a 6 je z děliče R2 a R3 přivedena polovina napájecího napětí, která tvoří rozhodovací úroveň. Kondenzátor C1 se nabíjí přes R1. Po stisknutí tlačítka se úroveň na výstupu přeploží na opačnou. Z výstupu 3 je přes R4 ovládán tranzistor, který spíná relé. U každého relé je navíc připojena paralelně k vinutí dioda pro potlačení napěťové špičky při rozepnutí relé. Oba stavy jsou indikovány pomocí LED diod.

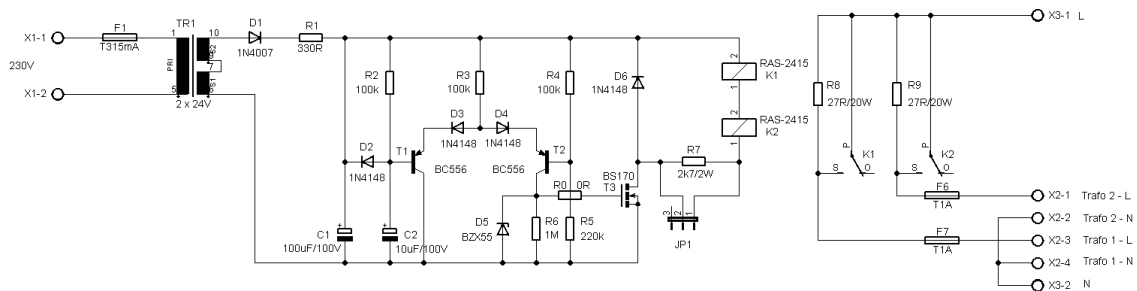
Obr. 2.12 zobrazuje průběh napětí na kondenzátoru (červeně) a průběh výstupního napětí (modře) při spínání tlačítka.



Obr. 2.12 Průběhy napětí v obvodu při spínání tlačítka.

## 2.3 Pomocné obvody

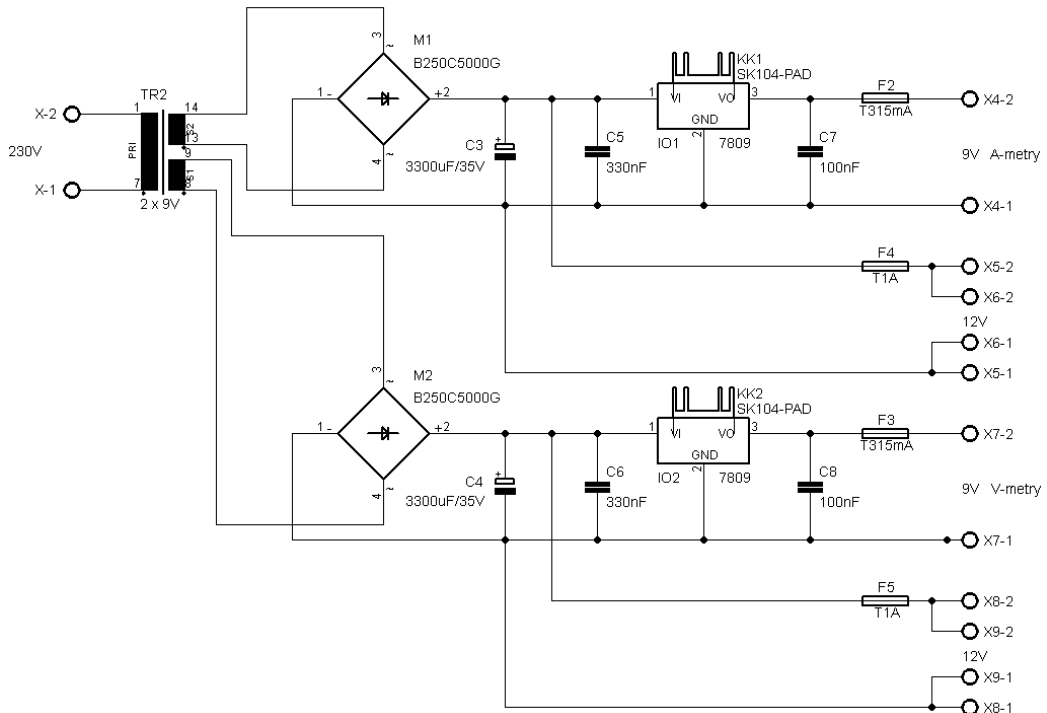
Prvním z pomocných obvodů je Soft Start pro transformátory nastavitelných zdrojů. Úkolem tohoto obvodu je zpožděné připojení transformátorů k síti. Důvodem je omezení proudové smyčky, která vzniká vlivem sycení jádra transformátoru a nabíjením filtračních kondenzátorů. Transformátory jsou proto k síti nejdříve připojeny přes výkonové rezistory R8, R9 = 27R a asi po dvou vteřinách jsou zkratovány kontakty relé. Zapojení obvodu Soft Start je uvedeno na Obr. 2.13.



Obr. 2.13 Schéma zapojení obvodu Soft Start.

Z důvodu potřeby napájení přepínacích obvodů a měřidel napětí a proudu byl do zapojení přidán pomocný napájecí zdroj. Tvoří jej síťový transformátor, Graetzův můstek a filtrační kondenzátor. Pro napájení měřících přístrojů je zdroj doplněn stabilizátorem napětí 7809.

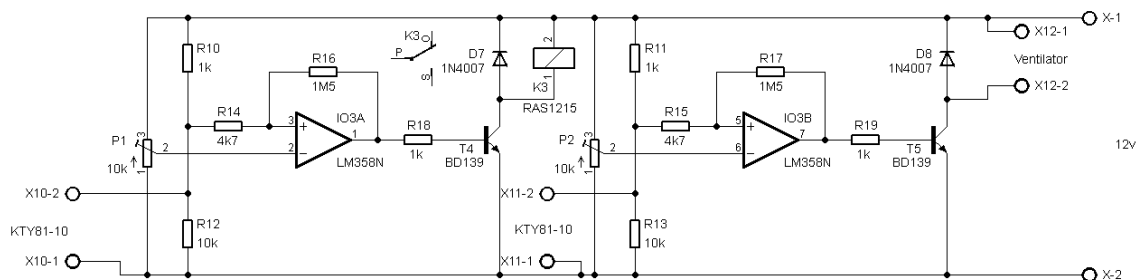
Pro měřicí přístroje nelze použít společnou zem, protože zem voltmetru je na jiném potenciálu, než zem ampérmetru. Proto byl použit transformátor se dvěma sekundárními vinutími. Tím byly vytvořeny dva samostatné zdroje. Pro měřicí přístroje druhé poloviny zdroje je zapojení téměř totožné, ale nachází se na desce relé pro symetrický výstup. Tento zdroj napájí pouze dva měřicí přístroje. Schéma je uvedeno na Obr. 2.14.



Obr. 2.14 Schéma zapojení pomocného zdroje.

Posledním pomocným obvodem je tepelná ochrana zdroje. Tepelná ochrana je dvoustupňová. Při dosažení nižší nastavené teploty jsou sepnuty ventilátory a při překročení vyšší nastavené teploty je odpojen Soft Start od sítě. Tím jsou odpojeny oba nastavitelné zdroje, ale ostatní obvody fungují. Tím je zajištěno, že se při poklesu teploty pod nastavenou mez zdroj vrátí do normálního režimu.

Základním prvkem tepelné ochrany je obvod LM358N. Ten je tvořen dvojicí komparátorů. Pro každý z nich je možné nastavit samostatně mezní teplotu pro sepnutí. První z komparátorů spíná přes tranzistor ventilátory, druhý relé, jehož kontakty jsou zapojeny v primárním vinutí obvodu Soft Start. Schéma je uvedeno na Obr. 2.15.

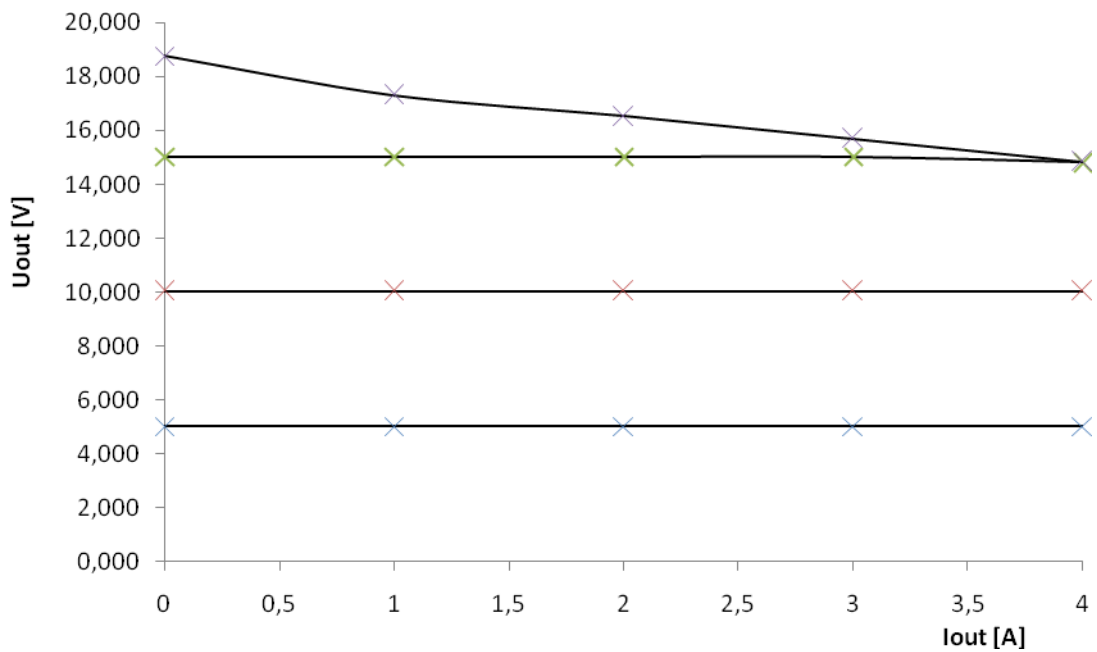


Obr. 2.15 Schéma zapojení tepelné ochrany.

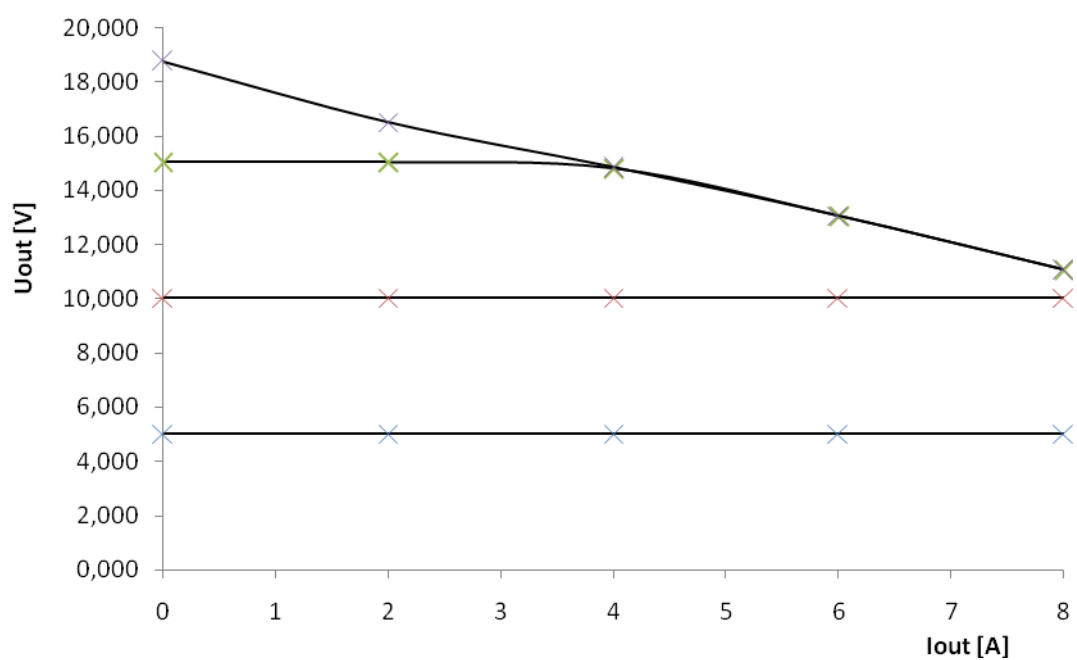
## 3 SIMULACE – PARAMETRY ZDROJE

### 3.1 Napěťové charakteristiky zdroje

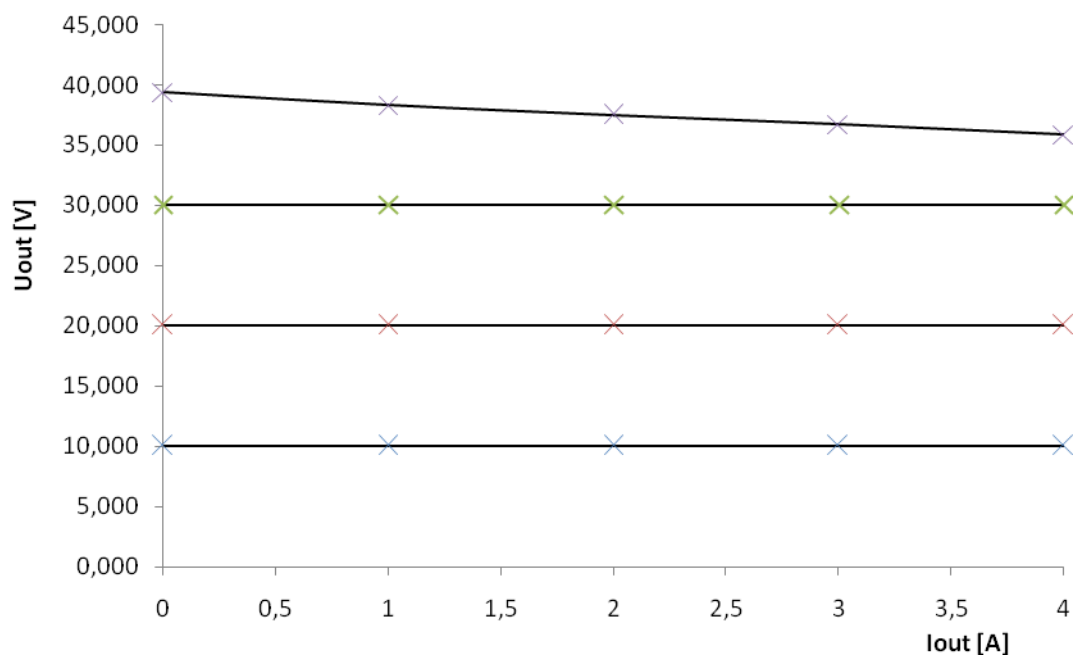
Při simulování napěťových charakteristik byla hodnota výstupního napětí nastavována v rozsahu 5V – 20V, případně 10V – 40V. Pro každou z těchto hodnot byl nastaven výstupní proud 0A – 4A, případně 0A – 8A. Závislosti velikosti napětí na výstupním proudu jsou vyneseny v následujících grafech.



Obr. 3.1 Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 4A.



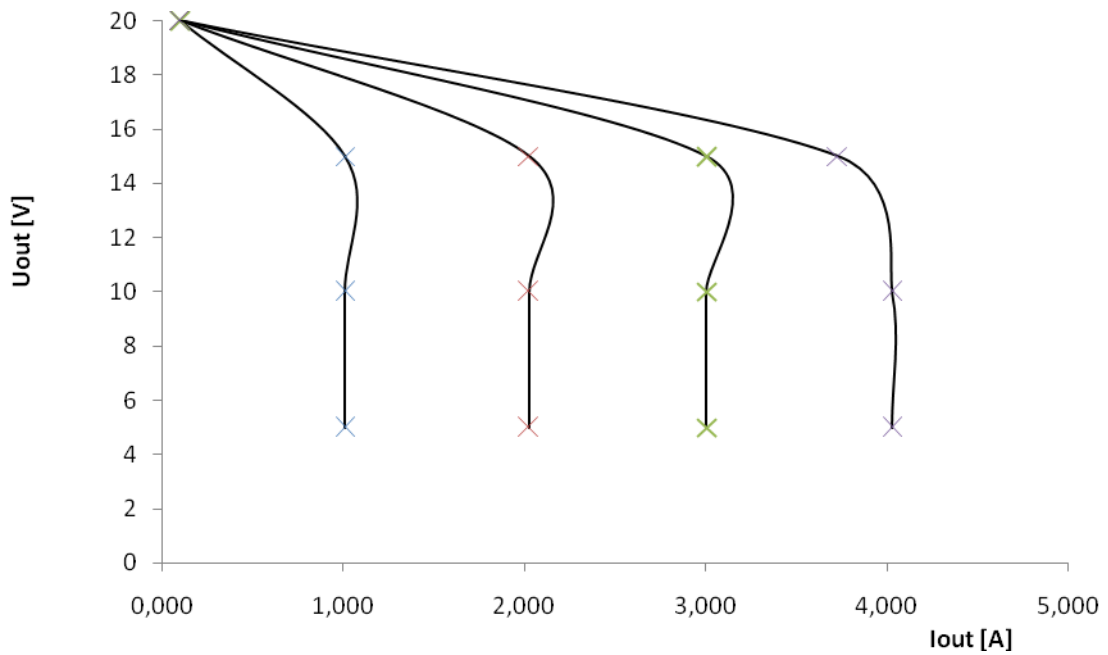
Obr. 3.2 Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 8A.



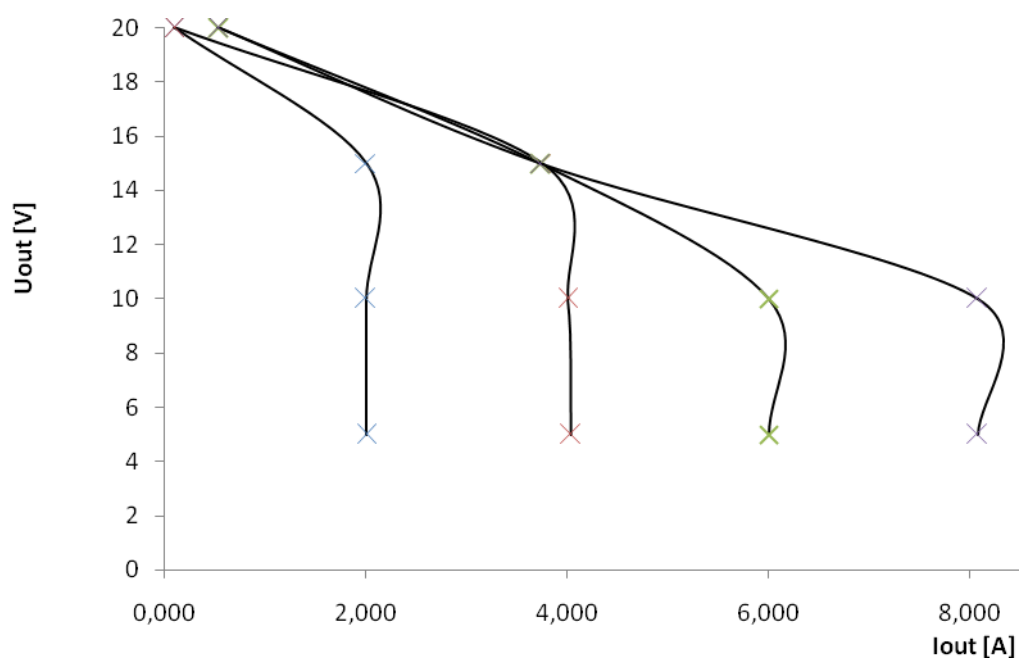
Obr. 3.3 Napěťová charakteristika zdroje pro rozsahy 40V / 4A.

## 3.2 Proudové charakteristiky zdroje

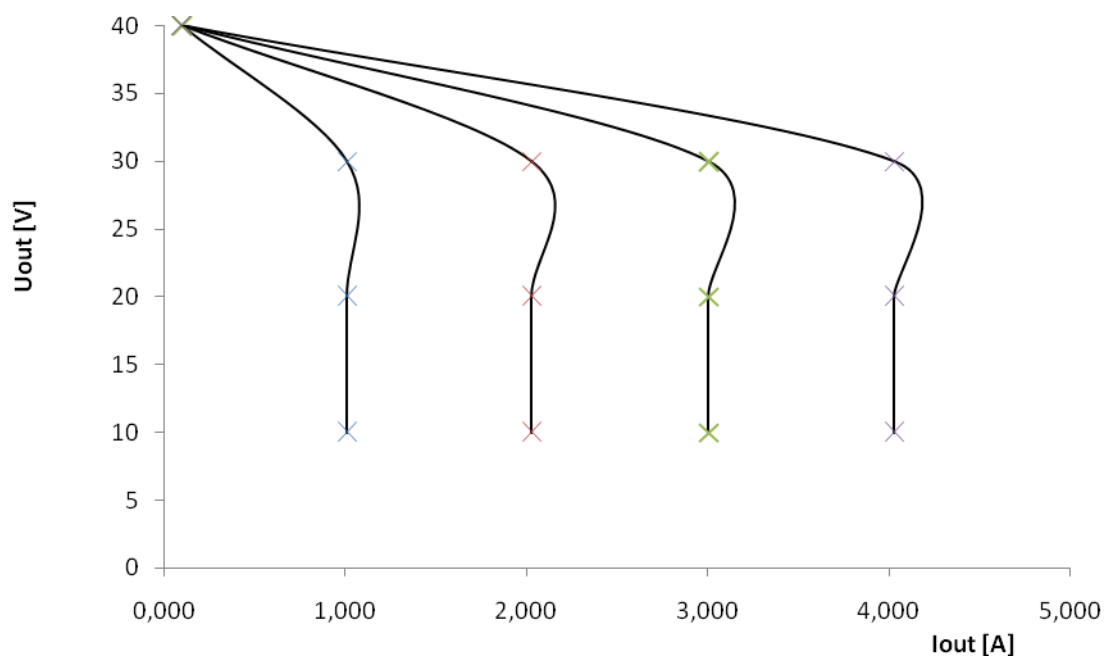
Při měření proudových charakteristik byl výstupní proud nastavován v rozsahu 1A - 4A nebo 2A - 8A. Pro tyto nastavené proudy byly nastavovány hodnoty výstupního napětí 5V - 20V nebo 10V - 40V v závislosti na zvoleném rozsahu. Závislost velikosti nastaveného proudu na hodnotě výstupního napětí je vynesena v následujících grafech.



Obr. 3.4 Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 4A.



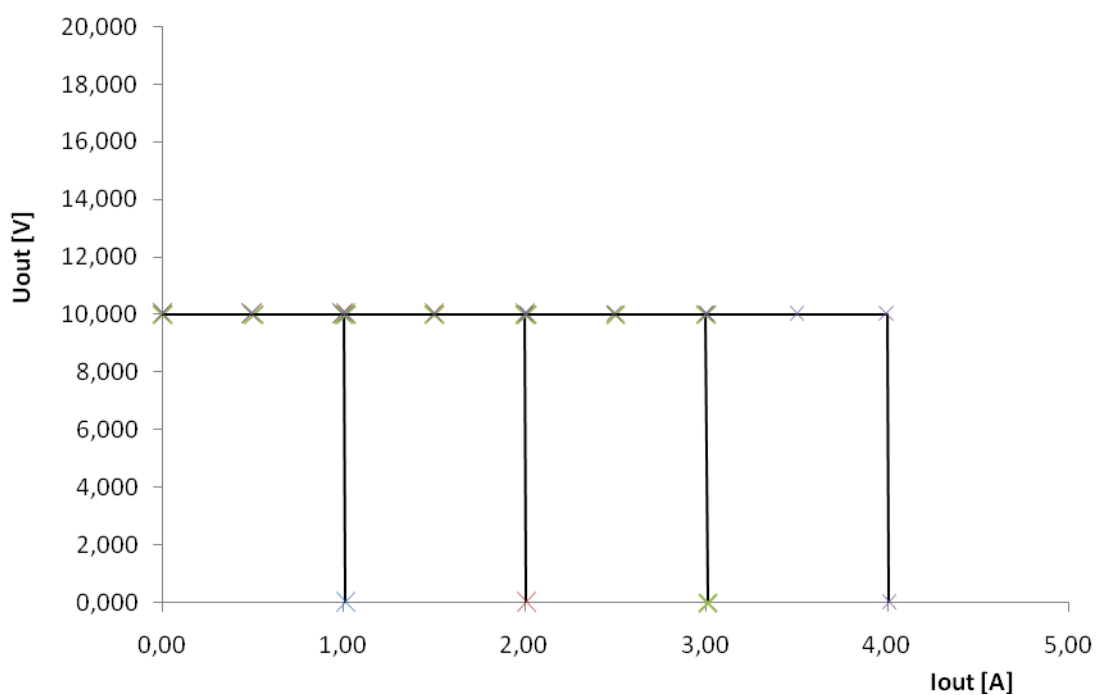
Obr. 3.5 Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 20V / 8A.



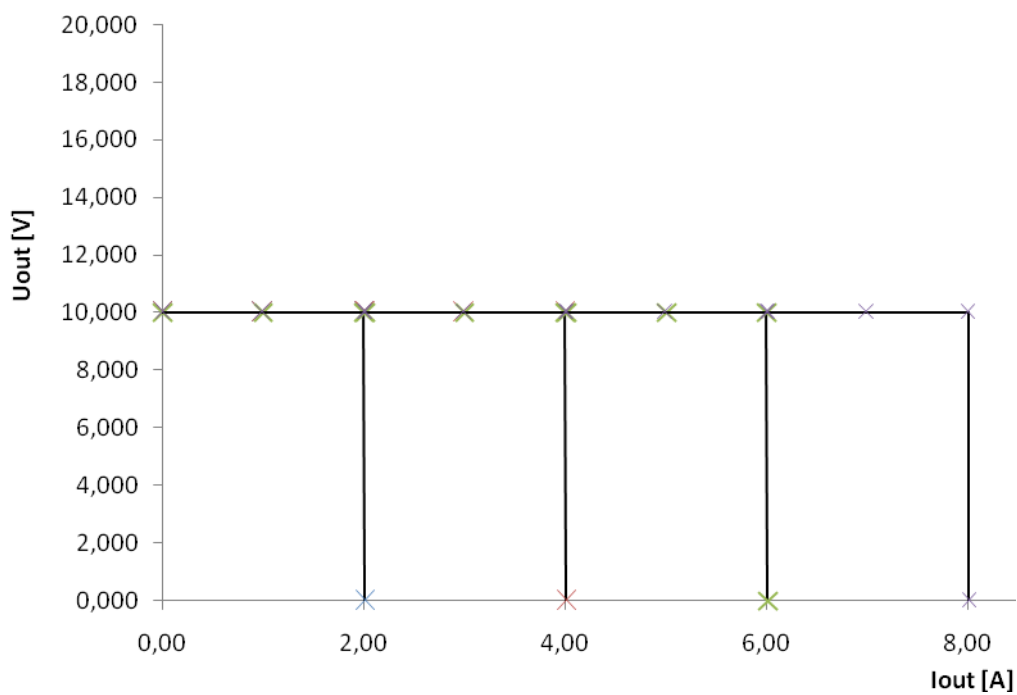
Obr. 3.6 Proudová charakteristika zdroje pro rozsahy 40V / 4A.

### 3.3 Voltampérové charakteristiky zdroje

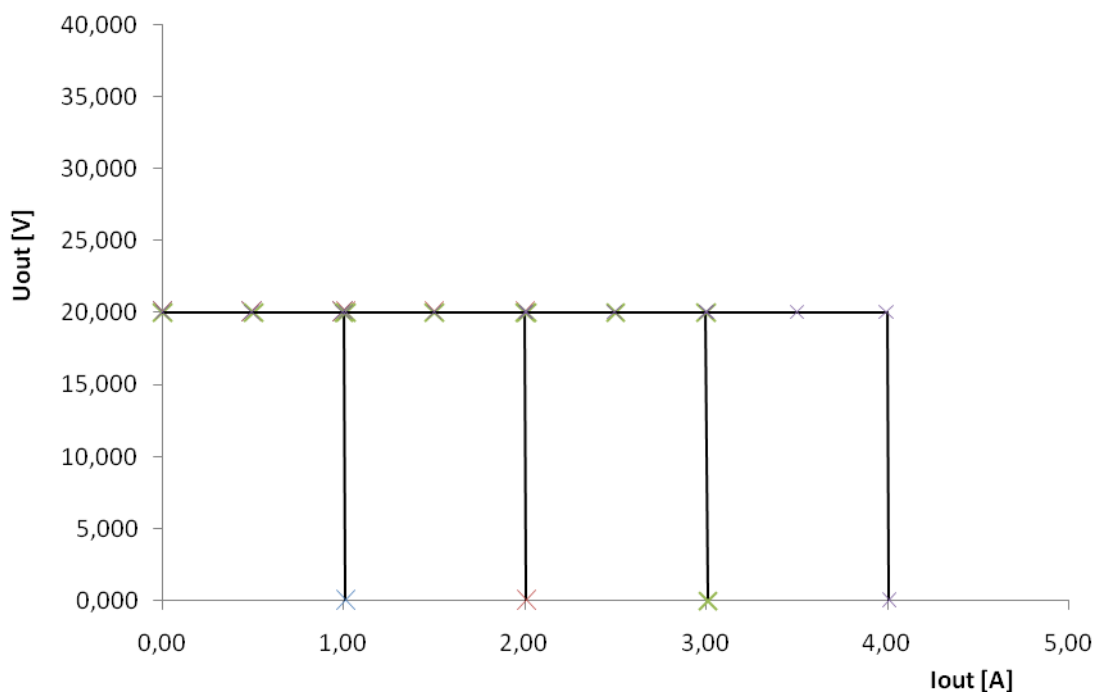
Voltampérové charakteristiky vzniknou spojením napěťových a proudových charakteristik. Na zdroji je nastaveno omezení výstupního proudu. Do nastavené hodnoty proudu se zdroj chová jako zdroj napětí a po dosažení mezního proudu se začíná chovat jako zdroj proudu. Průběhy voltampérových charakteristik pro dané rozsahy jsou uvedeny v následujících grafech.



Obr. 3.7 Voltampérová charakteristika pro rozsahy 20V / 4A.



Obr. 3.8 Voltampérová charakteristika pro rozsahy 20V / 8A.



Obr. 3.9 Voltampérová charakteristika pro rozsahy 40V / 4A.

## 4 NÁVRH CHLAZENÍ

Jak již bylo řečeno v úvodní teorii, funkce lineárních regulátorů napětí je založena na proměnném odporu regulačního tranzistoru. Tranzistor tak přeměňuje nepotřebnou energii v teplo a proto je nutné tyto regulační členy chladit. V navrhnutém zapojení je dále potřeba chladit usměrňovací můstky, budící tranzistory a stabilizátor napětí.

Tepelné ztráty budícího tranzistoru a stabilizátoru napětí jsou minimální, díky malým výstupním proudům a proto jsou chlazeny malými chladiči přímo v DPS.

Ztrátový výkon regulačních tranzistorů je dán součtem příkonu báze a kolektoru. V porovnání s kolektorovým příkonem je příkon báze zanedbatelný a proto jej nebudeme uvažovat. Největší ztrátový výkon na tranzistoru vzniká při odběru velkého proudu při malém výstupním napětí, kdy je na tranzistoru zbytek napájecího napětí. Tím vzniká velké ztrátové teplo. Ztrátový výkon bude dán vztahem:

$$P_Z = U_{CE_{max}} \cdot I_{C_{max}} \quad (4.1)$$

kde  $P_Z$  je ztrátový výkon,  $U_{CE_{max}}$  je maximální napětí na přechodu Báze – Emitor a  $I_{C_{max}}$  je maximální proud kolektorem

Pro rozsah 20V / 4A bude ztrátový výkon 80W, pro rozsah 20V / 8A bude ztráta 160W a pro rozsah 40V / 4A bude ztráta rovněž 160W. Při návrhu chlazení je nutné brát v úvahu nejvyšší možný ztrátový výkon, tj. 160W. Celková ztráta je rozložena mezi tři paralelně řazené tranzistory TIP141. Návrh chlazení pro tři tranzistory podle [19]:

$$R_{thcl} = \frac{U_{j_{max}} - U_a}{3 \cdot \frac{P_Z}{3}} - \left( \frac{R_{thjc}}{3} + \frac{R_{tht}}{3} \right) = \frac{U_{j_{max}} - U_a}{P_Z} - \left( \frac{R_{thjc}}{3} + \frac{R_{tht}}{3} \right) \quad (4.2)$$

$$R_{thcl} = \frac{150 - 40}{160} - \left( \frac{1}{3} + \frac{0,6}{3} \right) = 0,154 K/W$$

Výpočet ztrátového výkonu návrh chlazení pro dva usměrňovací můstky ( $I_{max} = 4A$ , protože při 8A rozsahu jsou můstky spojené paralelně):

$$P_Z = U_p \cdot I_{max} = 1,1 \cdot 4 = 4,4W$$

$$R_{thcl} = \frac{U_{j_{max}} - U_a}{2 \cdot P_Z} - \left( \frac{R_{thjc}}{2} + \frac{R_{tht}}{2} \right) = \frac{U_{j_{max}} - U_a}{P_Z} - \left( \frac{R_{thjc}}{2} + \frac{R_{tht}}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$R_{thcl} = \frac{125 - 40}{2 \cdot 4,4} - \left( \frac{2}{2} + \frac{0,15}{2} \right) = 7,91 K/W$$

kde  $R_{thcl}$  je tepelný odpor chladiče,  $R_{thjc}$  je tepelný odpor přechodu polovodič – pouzdro,  $R_{tht}$  je odpor pouzdro – chladič zahrnující odpor izolační podložky a tepelně vodivé pasty (podle [19] pro izolovaný a pastou potřený přechod 0,6 K/W a pro neizolovaný pastou potřený spoj 0,15 K/W),  $U_{j_{max}}$  je maximální teplota přechodu,  $U_a$  je teplota okolí (používaná hodnota 40°C),  $U_p$  je prahové napětí diod a  $P_z$  je ztrátový výkon součástky.

Výpočty chladičů jsou uvedeny pro limitní případ, proto jsou tranzistory i usměrňovací můstky umístěny na jednom chladiči s tepelným odporem 0,18 K/W. Chladič je mírně poddimenzovaný, což je kompenzováno tepelnou ochranou, která v prvním stupni spíná čtveřici ventilátorů. Použité ventilátory jsou rozměru 80 x 80 x 25 mm a dodávají 50m<sup>3</sup> vzduchu za hodinu při příkonu 1,44W a hlučnosti 25dB. V druhém stupni ochrany jsou regulátory odpojeny od sítě, dokud se nesníží teplota chladiče.

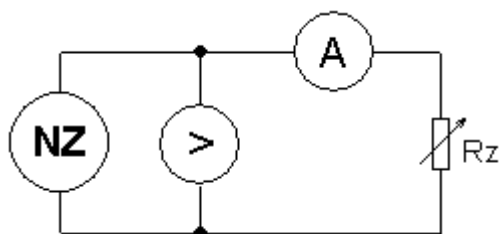
Tepelná ochrana je navrhována tak, aby při poruše této ochrany nedošlo k přehřátí chladiče z důvodu nevědomosti poruchy ochrany. Dojde-li například k přetržení vodiče od tepelného čidla, je tepelná ochrana aktivována i při studeném chladiči, čímž je indikována porucha.

## 5 ZMĚŘENÉ PARAMETRY ZDROJE

Pro oba vyrobené zdroje byly změřeny zatěžovací charakteristiky pro každý rozsah, závislost účinnosti na výstupních parametrech a stabilita výstupních veličin. Měření bylo prováděno pomocí multimetrů UNIT UT39C (ev. č. 3050039212), UT202 (ev. č. 811007882) a wattmetru PM001-F. Jako zátěž byly použity reostaty TESLA o odporu  $19\Omega$  a  $44\Omega$ .

Pro každé měření je uvedeno schéma zapojení měřících přístrojů a stručný popis způsobu měření. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulkách a vyneseny v grafech.

### 5.1 Zatěžovací charakteristiky zdroje



Obr. 5.1 Zapojení pracoviště pro měření zatěžovacích charakteristik.

- ZD      Laboratorní zdroj A nebo B
- V      Voltmetr – multimetr UNIT UT202 (ev. č. 811007882)
- A      Ampérmetr – multimetr UT 39C (ev. č. 3050039212)
- $R_Z$       Reostat TESLA  $19\Omega$ ,  $44\Omega$

#### 5.1.1 Napěťové charakteristiky zdroje

Při měření napěťových charakteristik bylo nastavováno výstupní napětí v rozsahu  $0V$  –  $20V$ , případně  $0V$  –  $40V$  a pro každou z nastavených hodnot byla změřena závislost na hodnotě výstupního proudu, který byl nastavován pomocí reostatu v rozsahu  $0A$  –  $4A$ , případně  $0A$  –  $8A$ . Proud byl nastavován pomocí multimetru UT39C a napětí bylo odečítáno na pomocí multimetru UT202.

Tab. 5.1 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah  $20V/4A$ .

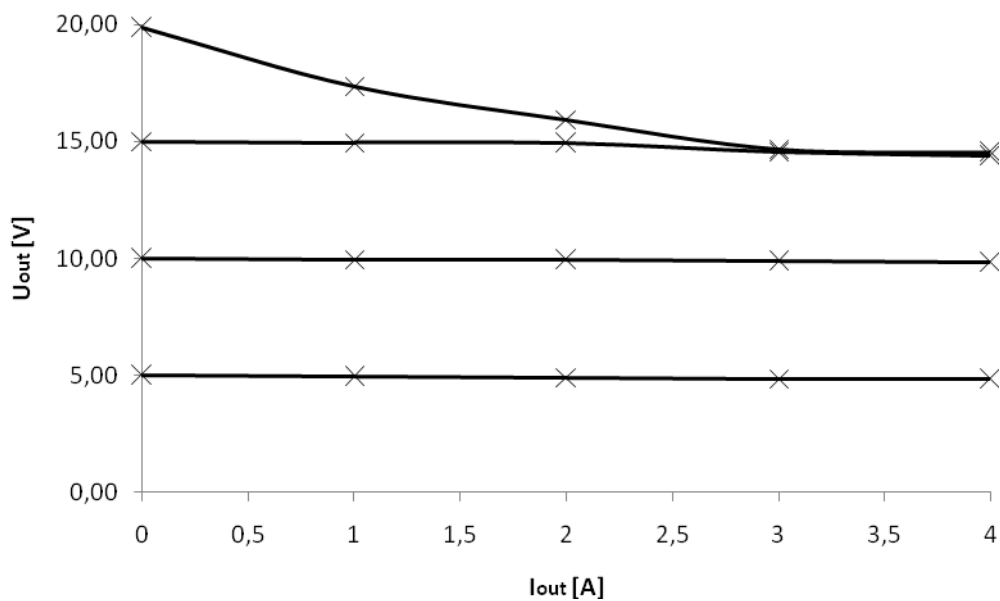
$U_{out}$ [V]	$I_{out}$ [A]				
	0	1	2	3	4
5	5,00	4,96	4,92	4,87	4,83
10	10,00	9,96	9,92	9,88	9,83
15	15,00	14,96	14,92	14,57	14,38
20	19,87	17,36	15,93	14,67	14,53

Tab. 5.2 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A.

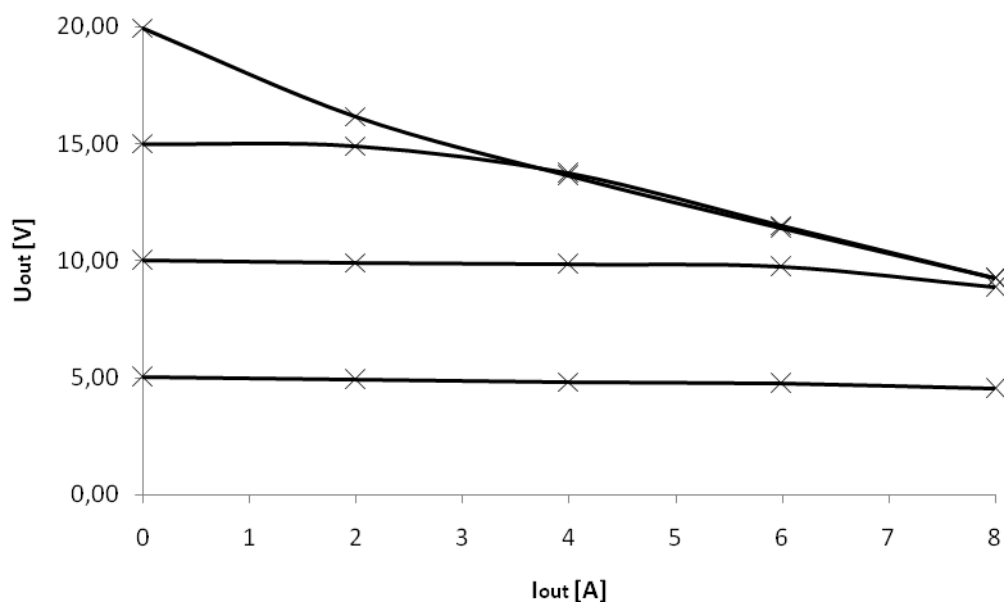
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]				
	0	2	4	6	8
5	5,00	4,92	4,83	4,73	4,51
10	10,00	9,92	9,83	9,73	8,86
15	15,00	14,91	13,73	11,50	9,22
20	19,95	16,16	13,61	11,36	9,22

Tab. 5.3 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A.

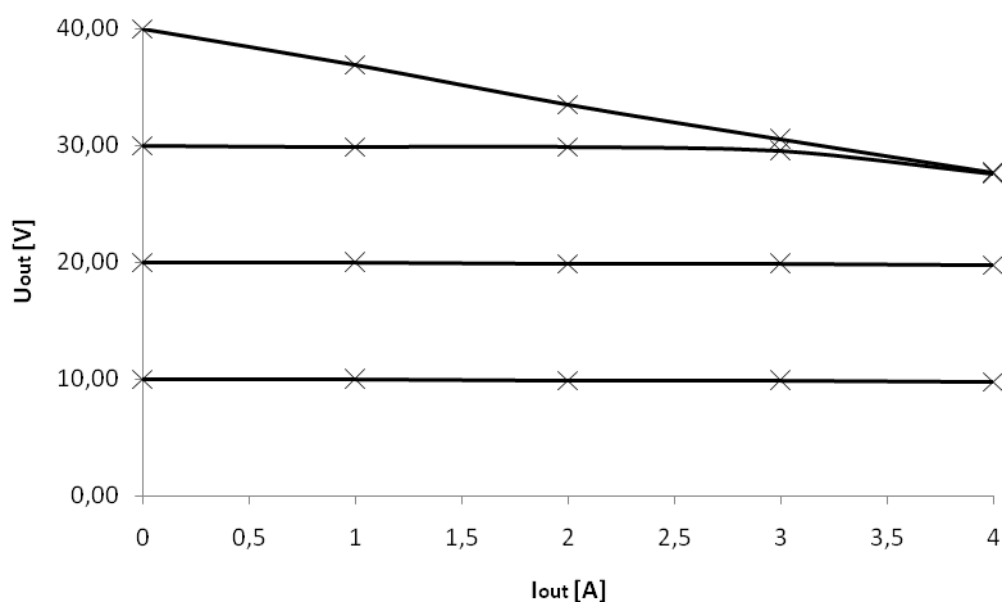
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]				
	0	1	2	3	4
10	10,00	9,94	9,89	9,84	9,78
20	20,00	19,95	19,90	19,85	19,79
30	30,00	29,90	29,90	29,50	27,50
40	40,00	36,90	33,50	30,50	27,60



Obr. 5.2 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A.



Obr. 5.3 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A.



Obr. 5.4 Napěťová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A.

Tab. 5.4 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A.

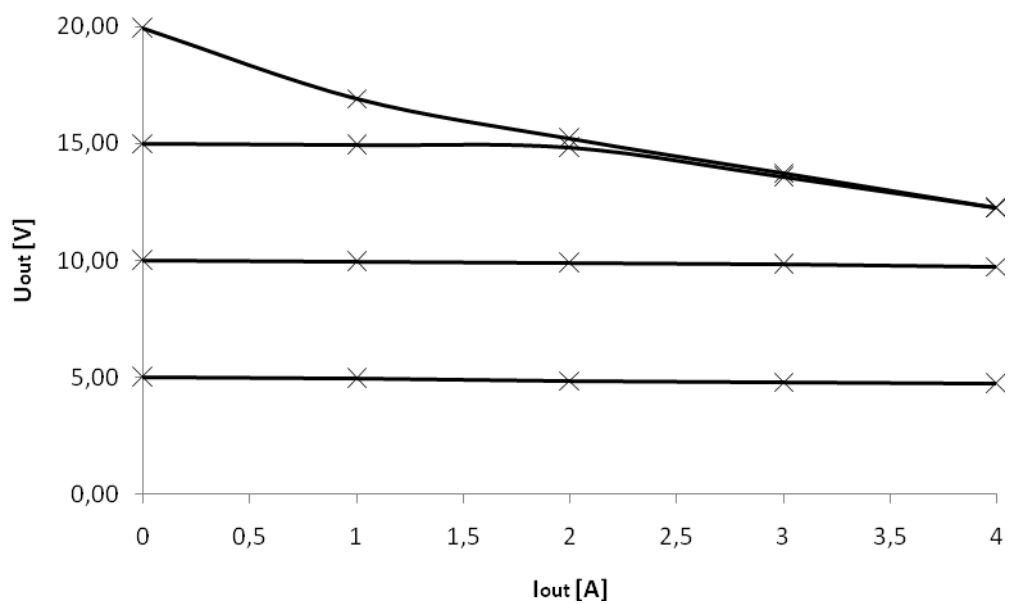
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]				
	0	1	2	3	4
5	5,00	4,94	4,86	4,80	4,74
10	10,00	9,94	9,87	9,81	9,75
15	15,00	14,94	14,83	13,54	12,24
20	19,91	16,92	15,19	13,74	12,26

Tab. 5.5 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A.

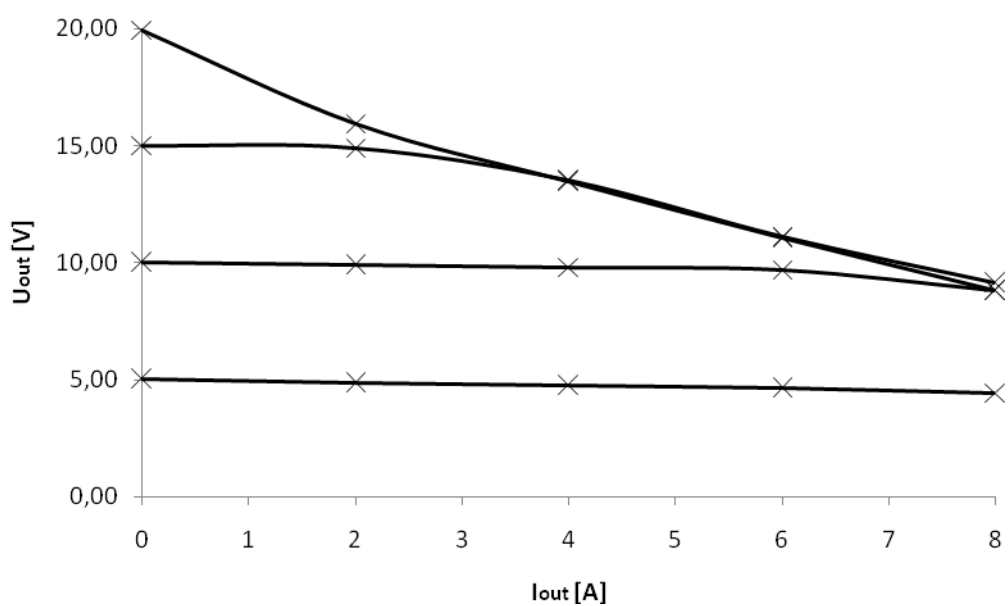
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]				
	0	2	4	6	8
5	5,00	4,86	4,74	4,63	4,45
10	10,00	9,90	9,81	9,70	8,79
15	15,00	14,90	13,52	11,12	9,13
20	19,93	15,94	13,46	11,05	8,81

Tab. 5.6 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A.

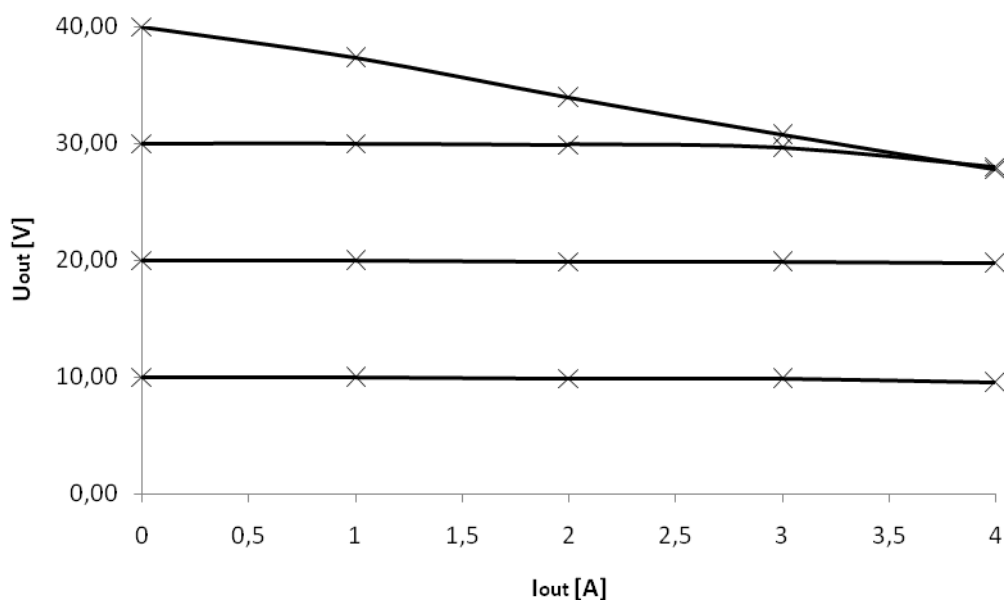
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]				
	0	1	2	3	4
10	10,00	9,93	9,86	9,79	9,51
20	20,00	19,94	19,90	19,81	19,74
30	30,00	30,00	29,90	29,60	28,00
40	40,00	37,30	33,90	30,70	27,80



Obr. 5.5 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A.



Obr. 5.6 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A.



Obr. 5.7 Napěťová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A.

### 5.1.2 Proudové charakteristiky zdroje

Při měření proudových charakteristik byl nastavován výstupní proud v rozsahu 0A – 4A, případně 0A – 8A. Pro každou nastavenou hodnotu proudu bylo nastavováno výstupní napětí v rozsahu 0V – 20V, případně 0V – 40V. Měřící přístroje byly ve stejném zapojení, jako při měření napěťových charakteristik.

Tab. 5.7 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A.

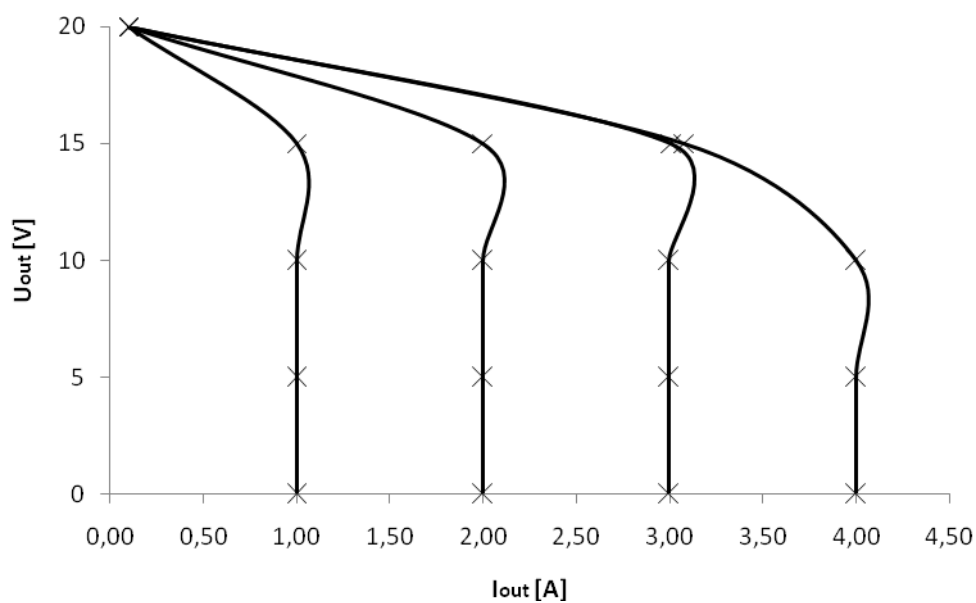
$U_{out}$ [V]	$I_{out}$ [A]			
	1	2	3	4
0	1,00	2,00	3,00	4,00
5	1,00	2,00	3,00	4,00
10	1,00	2,00	3,00	4,00
15	1,00	2,00	3,01	3,08
20	0,10	0,10	0,10	0,10

Tab. 5.8 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A.

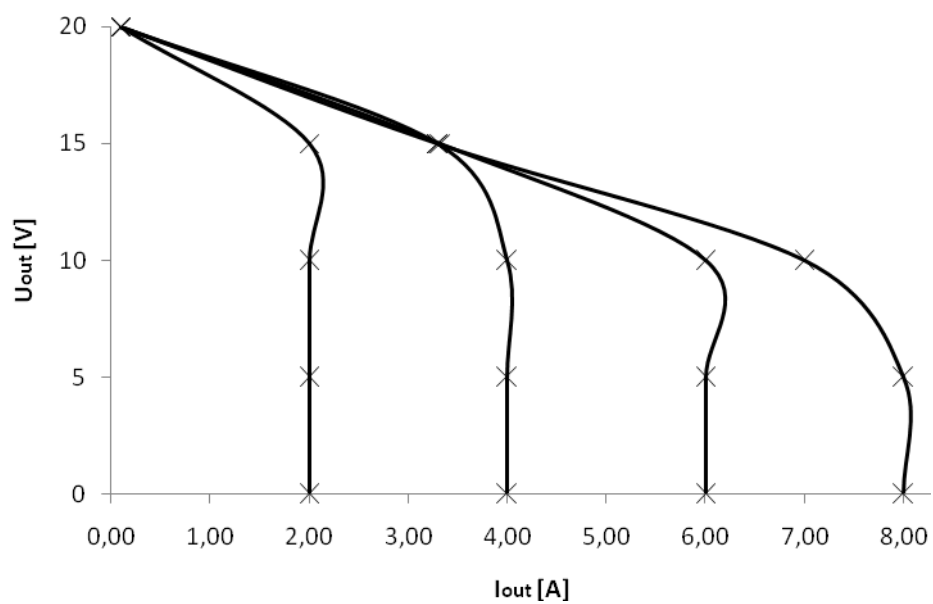
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]			
	2	4	6	8
0	2,00	4,00	6,00	8,00
5	2,00	4,00	6,00	8,00
10	2,00	4,00	6,00	7,00
15	2,00	3,30	3,33	3,30
20	0,10	0,10	0,10	0,10

Tab. 5.9 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A.

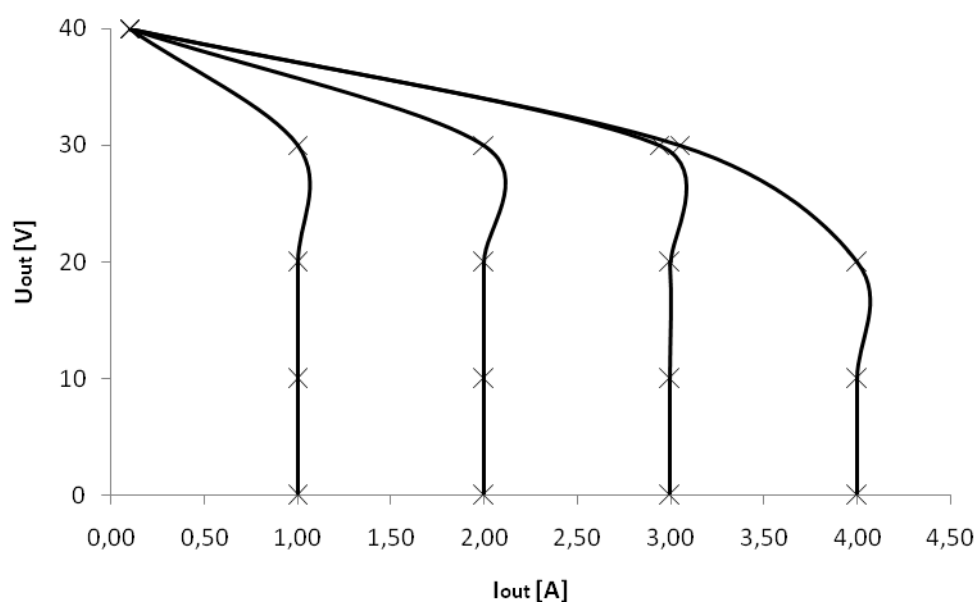
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]			
	1	2	3	4
0	1,00	2,00	3,00	4,00
10	1,00	2,00	3,00	4,00
20	1,00	2,00	3,00	4,00
30	1,00	2,00	2,94	3,05
40	0,10	0,10	0,10	0,10



Obr. 5.8 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/4A.



Obr. 5.9 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 20V/8A.



Obr. 5.10 Proudová charakteristika zdroje A - Rozsah 40V/4A.

Tab. 5.10 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A.

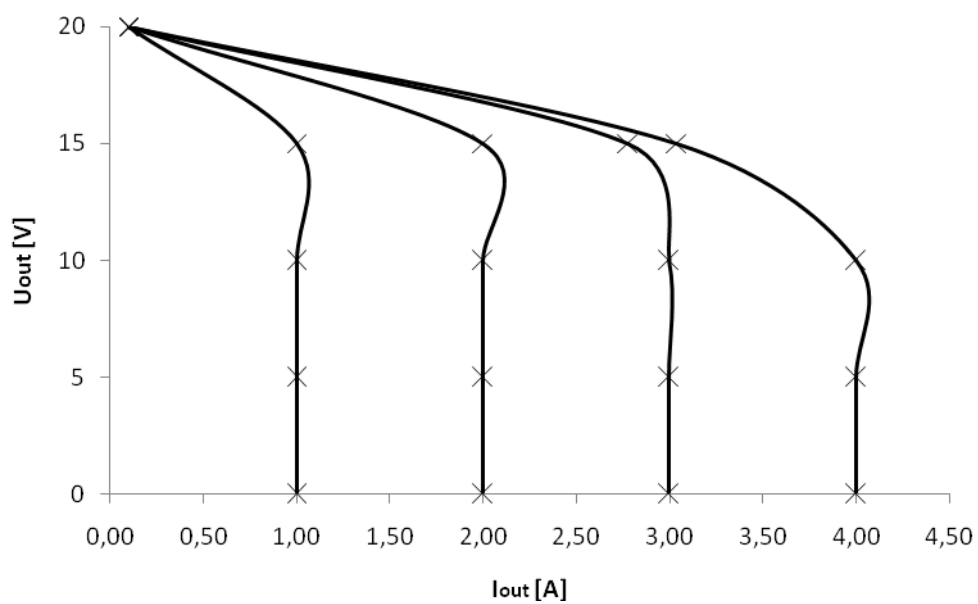
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]			
	1	2	3	4
0	1,00	2,00	3,00	4,00
5	1,00	2,00	3,00	4,00
10	1,00	2,00	3,00	4,00
15	1,00	2,00	2,78	3,04
20	0,10	0,10	0,10	0,10

Tab. 5.11 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A.

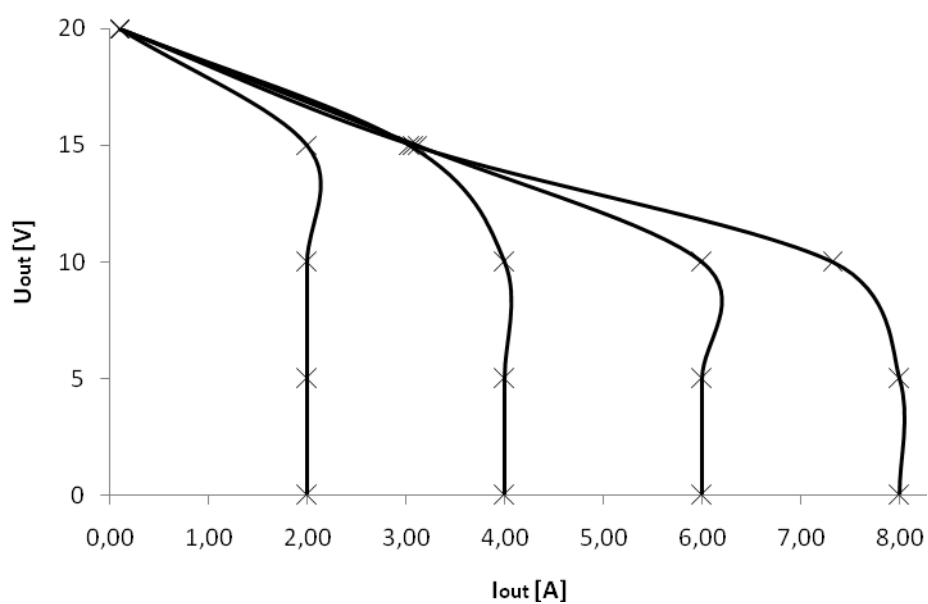
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]			
	2	4	6	8
0	2,00	4,00	6,00	8,00
5	2,00	4,00	6,00	8,00
10	2,00	4,00	6,00	7,32
15	2,00	3,04	3,11	3,08
20	0,10	0,10	0,10	0,10

Tab. 5.12 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A.

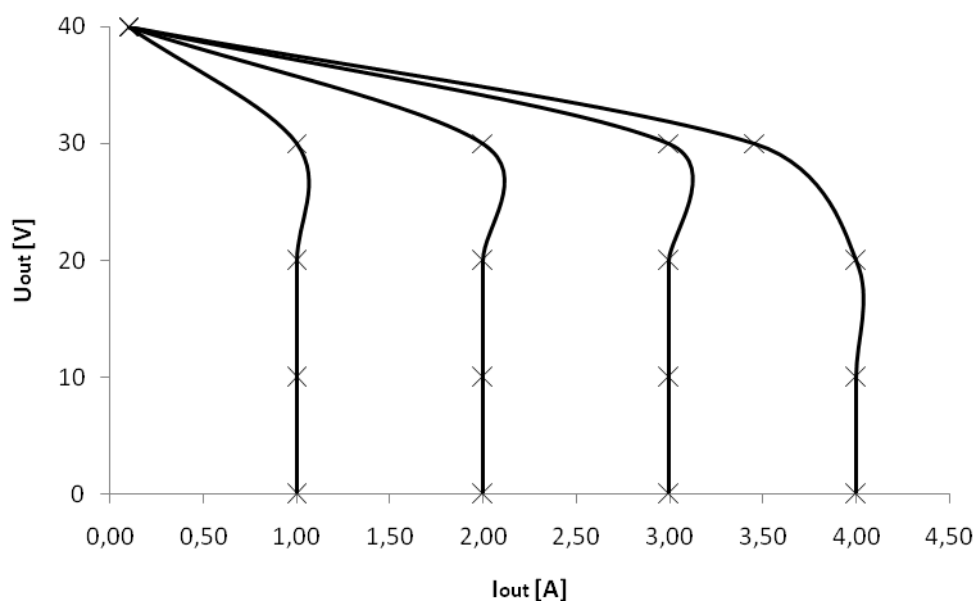
U <sub>out</sub> [V]	I <sub>out</sub> [A]			
	1	2	3	4
0	1,00	2,00	3,00	4,00
10	1,00	2,00	3,00	4,00
20	1,00	2,00	3,00	4,00
30	1,00	2,00	3,00	3,46
40	0,10	0,10	0,10	0,10



Obr. 5.11 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/4A.



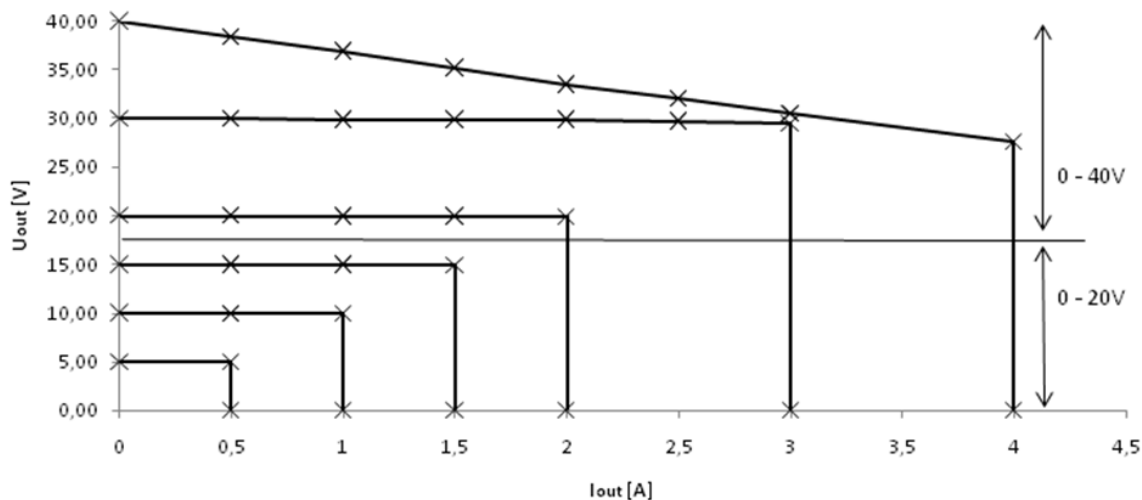
Obr. 5.12 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 20V/8A.



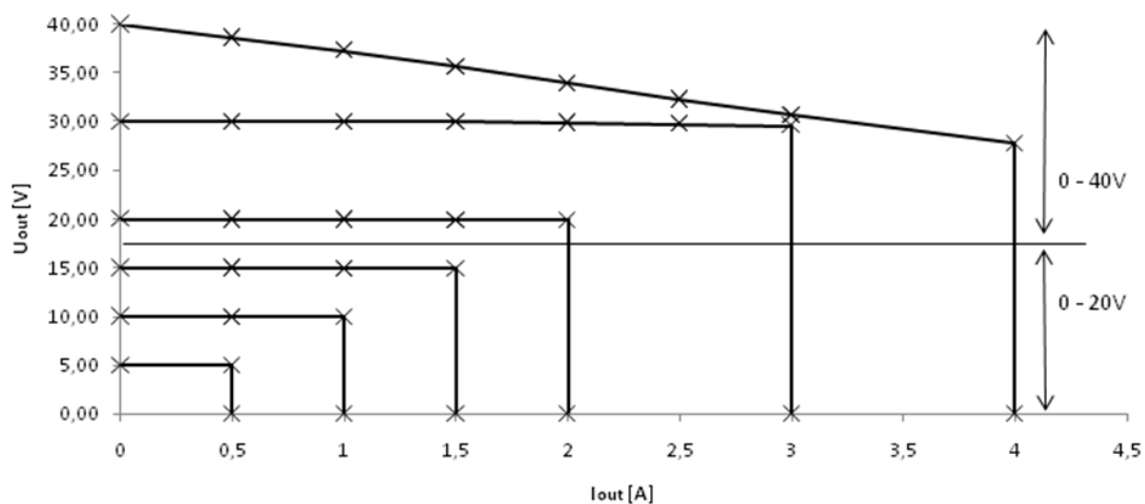
Obr. 5.13 Proudová charakteristika zdroje B - Rozsah 40V/4A.

### 5.1.3 Voltampérové charakteristiky zdroje

Spojíme-li napěťové a proudové charakteristiky v jednom grafu, získáme voltampérové charakteristiky. Zdroj má nastavenou hodnotu výstupního napětí a výstupního proudu. Odebíráme-li ze zdroje proud menší, než je nastavená hodnota, chová se zdroj jako zdroj napětí. Přesáhneme-li tuto nastavenou hodnotu, zdroj se začne chovat jako zdroj proudu. Následující grafy určují celkovou voltampérovou charakteristiku zdroje s přepnutím rozsahů pro dosažení vyššího výstupního napětí. Jsou zde pro oba zdroje vyneseny křivky pro některé kombinace výstupního napětí a proudu.



Obr. 5.14 Celková voltampérová charakteristika zdroje A.



Obr. 5.15 Celková voltampérová charakteristika zdroje B.

## 5.2 Časová stabilita výstupních veličin

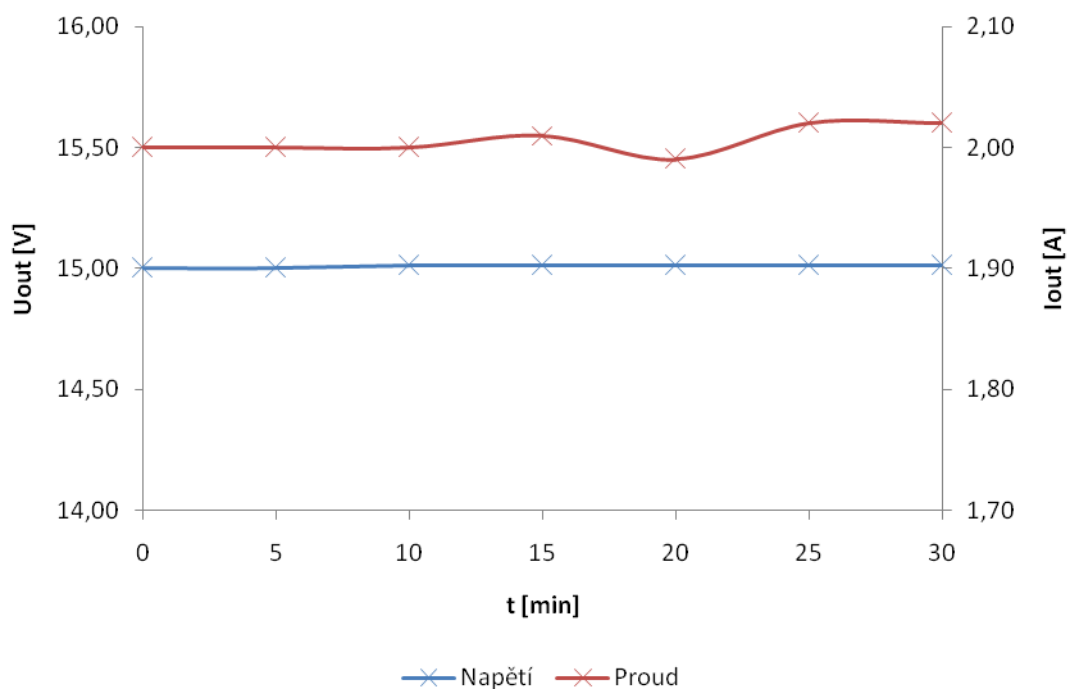
Časová stabilita výstupních veličin udává stálost nastavených veličin při zatížení zdroje v závislosti na čase. Závislost byla proměřena pomocí zapojení z Obr. 5.1 v délce 30 minut.

Tab. 5.13 Časová stabilita výstupních veličin zdroje A.

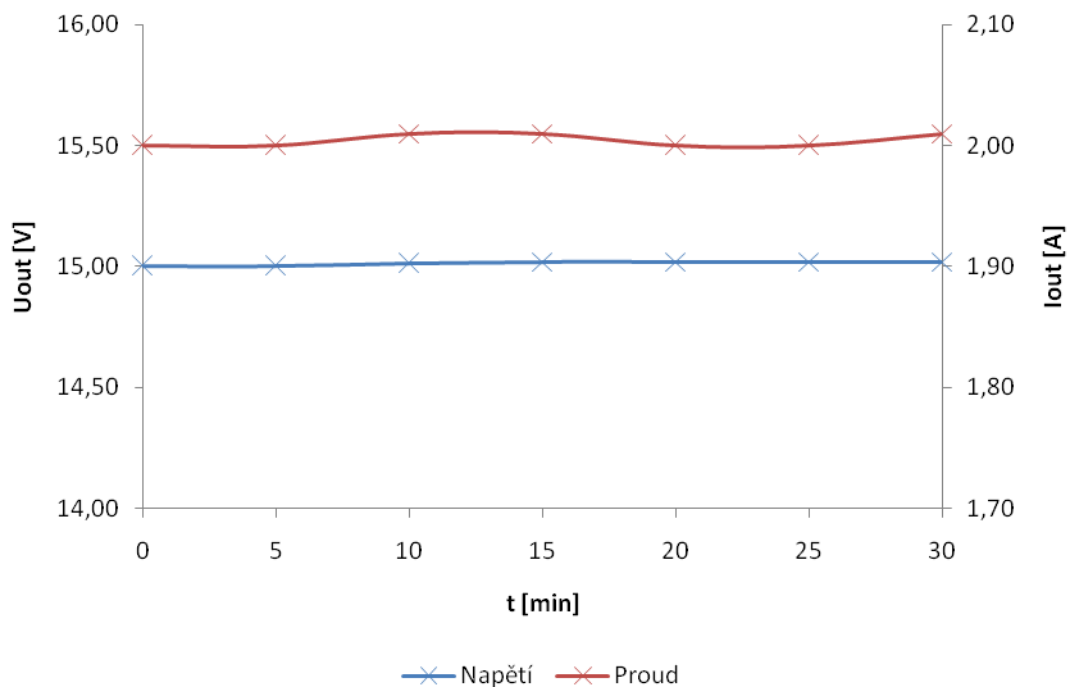
t [min]	0	5	10	15	20	25	30
U <sub>out</sub> [V]	15,00	15,00	15,01	15,01	15,01	15,01	15,01
I <sub>out</sub> [A]	2,00	2,00	2,00	2,01	1,99	2,02	2,02

Tab. 5.14 Časová stabilita výstupních veličin zdroje B.

t [min]	0	5	10	15	20	25	30
U <sub>out</sub> [V]	15,00	15,00	15,01	15,02	15,02	15,02	15,02
I <sub>out</sub> [A]	2,00	2,00	2,01	2,01	2,00	2,00	2,01



Obr. 5.16 Časová stabilita výstupních veličin zdroje A.



Obr. 5.17 Časová stabilita výstupních veličin zdroje B.

### 5.3 Účinnost zdrojů

Příkon zdroje byl změřen pomocí wattmetru PM01-F a výstupní výkon byl získán roznásobením výstupního napětí a proudu. Při měření zdroje byl měřen celkový příkon přístroje. Tím byl do celkového příkonu zahrnut příkon druhého zdroje naprázdno, příkon pomocných obvodů napájejících displeje, ochrany apod. Pracoviště bylo zapojeno podle obrázku Obr. 5.18. Závislost účinnosti byla změřena při změně výstupního napětí i při změně proudu. Charakteristiky byly proměřeny pro oba zdroje a poté zprůměrovány.



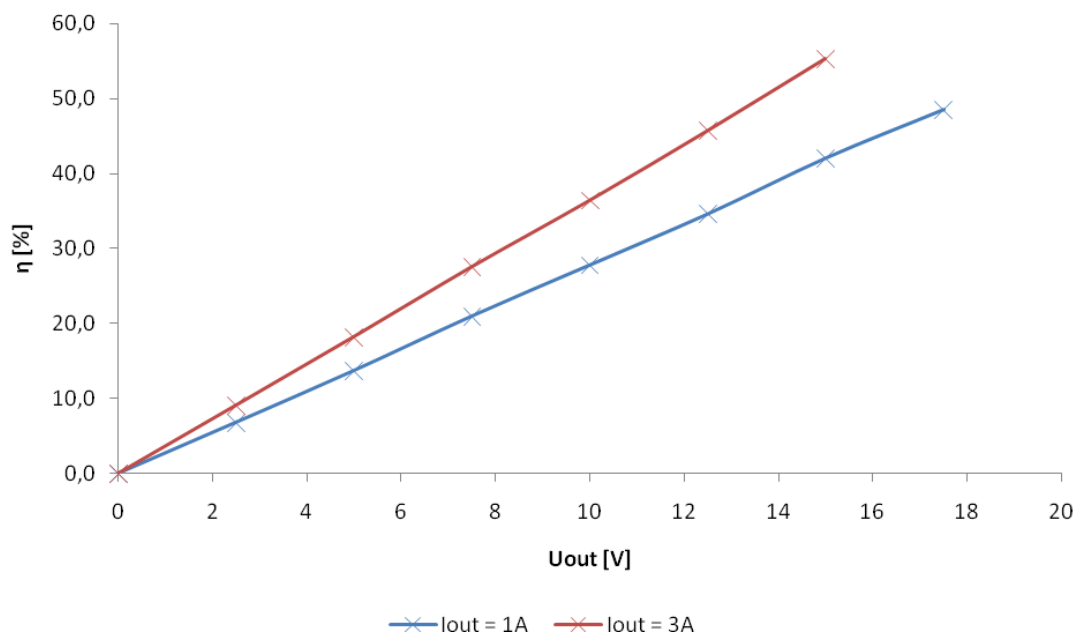
Obr. 5.18 Zapojení pracoviště pro měření účinnosti zdroje.

Tab. 5.15 Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním napětí.

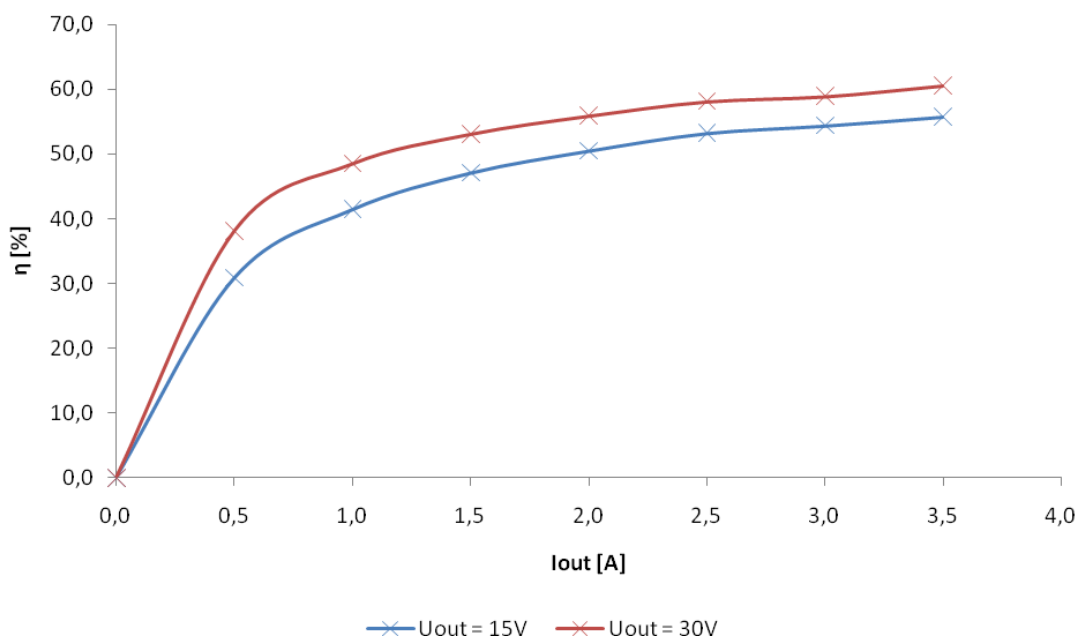
U out [V]	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5
$\eta$ [%] 1A	0,0	6,8	13,7	21,0	27,8	34,6	42,0	48,5
$\eta$ [%] 3A	0,0	9,1	18,2	27,5	36,4	45,7	55,3	

Tab. 5.16 Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním proudu.

I out [A]	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$\eta$ [%] 15V	0,0	30,9	41,4	47,1	50,5	53,2	54,3	55,7
$\eta$ [%] 30V	0,0	38,1	48,5	53,1	55,9	58,1	58,9	60,5



Obr. 5.19 Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním napětí.



Obr. 5.20 Účinnost zdrojů v závislosti na výstupním proudu.

## 5.4 Zhodnocení naměřených charakteristik

Naměřené charakteristiky odpovídají simulacím. Z grafů je patrné, že zdroj nedodá při plném výstupním napětí daného rozsahu maximální proud. Pro rozsah 0V – 20V lze tento nedostatek vykompenzovat přepnutím na vyšší rozsah. Pro vykompenzování nedostatku na rozsahu 0V – 40V by bylo nutné vyměnit transformátory zdrojů za jiné s vyšším sekundárním napětím. Pro představu o ztrátách byly při výstupním napětí 20V a proudu 4A změřeny úbytky napětí na různých místech zdrojů, které jsou v cestě výstupního proudu (tranzistory, snímací rezistory).

Tab. 5.17 Tabulka poklesu výstupního napětí při zatížení zdroje A.

	<b>U [V]</b>
U <sub>out</sub> při I <sub>out</sub> = 0A	19,90
U <sub>out</sub> při I <sub>out</sub> = 4A	13,34
Pokles napětí	<b>6,56</b>

Tab. 5.18 Tabulka ztrát při maximálním výstupním napětí a proudu pro zdroj A.

<b>Místo změřeného úbytku</b>	<b>ΔU [V]</b>	<b>Poznámka</b>
Pokles napětí na transformátoru		ΔU = 0,855V stř
Pokles napětí za filtrem	2,000	Vliv transformátoru, usm. diod
Ztráta na Darlingt. tranzistorech	2,983	
Ztráta na emitorových rezistorech	0,447	R = 0,11R
Ztráta na sledovacích rezistorech	1,140	R = 0,28R
<b>Celkové ztráty</b>	<b>6,570</b>	

Tab. 5.19 Tabulka poklesu výstupního napětí při zatížení zdroje B.

	<b>U [V]</b>
U <sub>out</sub> při I <sub>out</sub> = 0A	19,90
U <sub>out</sub> při I <sub>out</sub> = 4A	13,32
Pokles napětí	<b>6,58</b>

Tab. 5.20 Tabulka ztrát při maximálním výstupním napětí a proudu pro zdroj B.

<b>Místo změřeného úbytku</b>	<b>ΔU [V]</b>	<b>Poznámka</b>
Pokles napětí na transformátoru		ΔU = 0,810V stř
Pokles napětí za filtrem	2,200	Vliv transformátoru, usm. diod
Ztráta na Darlingt. tranzistorech	2,951	
Ztráta na emitorových rezistorech	0,449	R = 0,11R
Ztráta na sledovacích rezistorech	1,142	R = 0,28R
<b>Celkové ztráty</b>	<b>6,742</b>	

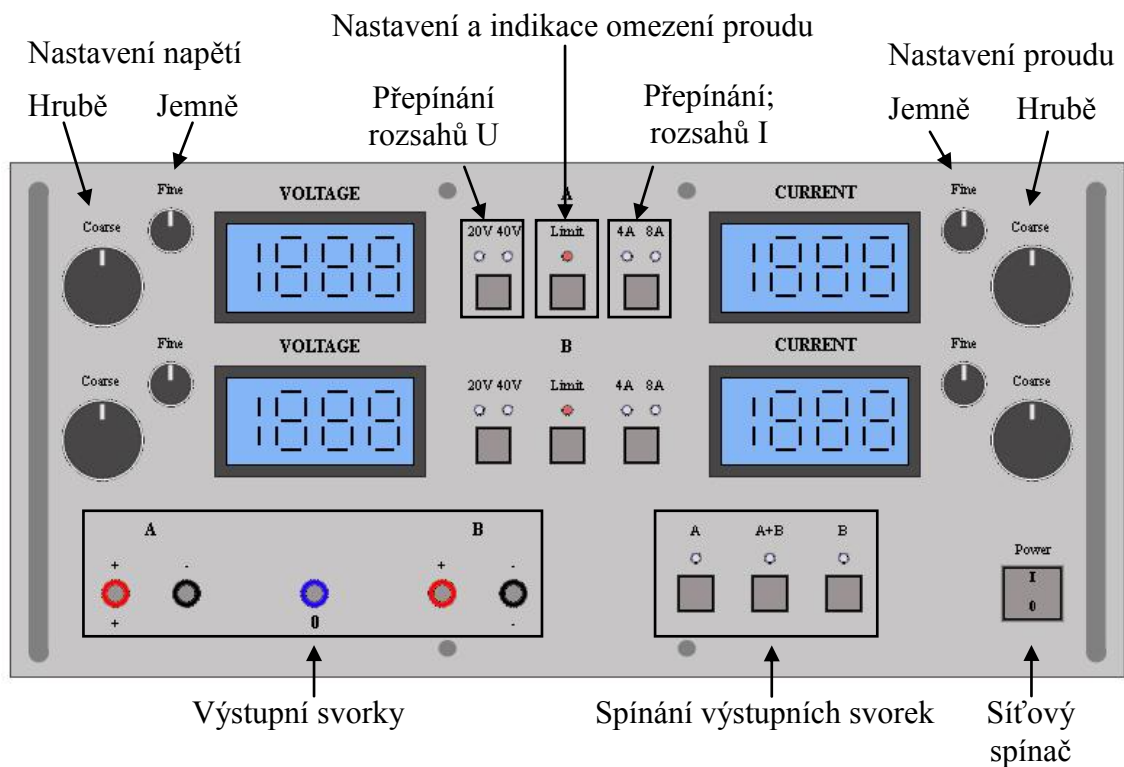
Jak bylo řečeno v teorii zdrojů, lineární zdroje nedosahují takové účinnosti, jako spínané zdroje. U zkonstruovaného zdroje bylo dosaženo účinnosti 60%. Hodnota je zkreslena příkonem pomocných obvodů. Protože se jedná o laboratorní zdroj, nebude zdroj v trvalém provozu, a proto není menší účinnost tak kritická.

## 6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZDROJE

Základním nosným prvkem celé konstrukce je rám z železného L profilu 20 x 20 mm a 15 x 15 mm. Desky plošných spojů jsou uchyceny pomocí hliníkových lyžinek. Na nosný rám jsou přišroubovány nerezové plechy tloušťky 2mm. Výrobní výkresy pro všechny plechy jsou uvedeny v příloze. Nerezové plechy i lyžinky byly z důvodu lepšího vzhledu opískovány. Na plechy byly napsány popisky ovládacích a kontrolních prvků a poté byly plechy přelakovány. K zadnímu panelu byly přišroubovány ochranné nožky a k přednímu panelu dvě madla pro lepší manipulaci.

Na zadní stěně jsou čtyři velké otvory kryté mřížkami pro uchycení ventilátorů, přišroubovaných na chladiči. Na zadní stěně je umístěn také EURO konektor pro přívod 230V. Součástí konektoru je také pouzdro na pojistku.

Přední stěna zdroje je dvojitá z důvodu připevnění potenciometrů a desek plošných spojů. Na přední stěně jsou umístěny všechny ovládací (potenciometry pro hrubou a jemnou regulaci výstupních veličin, tlačítka pro přepínání rozsahů) a kontrolní (indikační LED, displeje V-metrů a A-metrů) prvky. Panel je rozdělen na tři vodorovné části. V první části jsou prvky pro zdroj A, v druhé části prvky pro zdroj B a třetí část obsahuje výstupní svorky, jejich ovládání a síťový spínač. Vzhled předního panelu a popis ovládacích a kontrolních prvků je uveden na Obr. 6.1. Popis ovládacích prvků je uveden pouze pro zdroj A, ovládání zdroje B je totožné.



Obr. 6.1 Přední panel s popisem ovládacích a kontrolních prvků.

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se věnuje problematice laboratorních napájecích zdrojů a to jak lineárních, tak i spínaných. V první kapitole jsou uvedeny a stručně popsány základní konstrukční bloky obou typů zdrojů. Na závěr jsou srovnány lineární a spínané zdroje.

Následující část kapitoly se věnuje regulaci napětí a proudu u lineárních stabilizátorů. Podrobněji jsou zde popsány jednotlivé bloky zdroje a možnosti jejich zapojení používaných v praxi.

Při návrhu napájecího zdroje bylo zvoleno zapojení tvořené operačním zesilovačem s pevně nastaveným zesílením referenčního napětí, které je pomocí zpětné vazby udržováno na konstantní hodnotě. Součástí zdroje je také elektronické omezení proudu. Dosáhne-li výstupní proud nastavené mezní hodnoty, přechází zdroj ze zdroje napětí na zdroj proudu.

V druhé kapitole je uvedeno kompletní blokové schéma navrhovaného laboratorního zdroje. Celý zdroj je poté ještě doplněn obvodem Soft Start, tepelnou ochranou a pomocnými zdroji pro měřidla a ochrany. V této kapitole je podrobný popis a schéma každého z bloků doplněné o vzorce pro návrh nejdůležitějších součástek. Zapojení je možné ještě rozšířit např. použitím elektronických potenciometrů.

Po návrhu zapojení byly jednotlivé bloky odsimulovány v programu Multisim. Zdroj byl simulován pomocí stejnosměrné analýzy a byly změřeny napěťové, proudové a voltampérové charakteristiky zdroje. Z charakteristik je zřejmé, že zdroj je schopen dodat na nižším rozsahu max. 15V/4A a na vyšším rozsahu max. 30V/4A. Při vyšších napětích na daném rozsahu výstupní proud klesá a zdroj nedodá daný proud. Pro kontrolu zapojení s reálnými součástkami bylo zapojení realizováno a odzkoušeno v nepájivém kontaktním poli. Po ověření funkčnosti všech částí zdroje byly v programu Eagle navrhnuty DPS.

Osazené desky všech plošných spojů byly postupně oživeny a byla ověřena funkčnost všech částí zařízení. Následně byly všechny části zdroje zamontovány do navržené krabice. Po propojení všech modulů byla odzkoušena funkčnost zdroje a byly změřeny charakteristiky zdroje. Změřené charakteristiky odpovídají charakteristikám odsimulovaným. Jak již plyne ze simulací, bylo by vhodné použít pro zdroj transformátor s vyšším sekundárním vinutím, protože není schopen dodat maximální proud při napětí 40V. Maximální účinnost zdroje byla naměřena 60%. Skutečná účinnost samotného zdroje bude vyšší, protože účinnost 60% zahrnuje napájení ostatních obvodů.

# LITERATURA

- [1] Střední průmyslová škola elektrotechnická, Mohelnice: Napájecí zdroje. [cit. 2011-11-15]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/zdroje.htm>.
- [2] ZELINOVÁ, L. *Laboratorní zdroj s vysokou účinností*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011.
- [3] Laboratorní zdroj. [cit. 2011-11-16]. Dostupné z: <http://www.ohm.wz.cz/view.php?cislocclanku=2005051502>.
- [4] KREJČÍŘÍK, A. *Lineární napájecí zdroje*. 1. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-002-4.
- [5] DVOŘÁK, J. *Spínaný zdroj*. Bakalářská práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2008.
- [6] LÁNÍČEK, R. *Elektronika obvodu - součástky - děje*. 1. Praha: BEN, 1998. ISBN 80-86056-25-2.
- [7] Stejnoseměrné zdroje napětí. [cit. 2011-12-01]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART1858-Stejnosemerne-zdroje-napeti.html>.
- [8] STMicroelectronics, *L7800 series* [online]. Datasheet, 34 s., 2004. Dostupné z: [http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/330/330-005/dsh.330-005.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-005/dsh.330-005.1.pdf).
- [9] Texas Instruments, *LM317* [online]. Datasheet, 10 s., 2001. Dostupné z: [http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/331/331-004/dsh.331-004.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/331/331-004/dsh.331-004.1.pdf).
- [10] Proudová elektronická pojistka pro napájecí zdroj. [cit. 2011-12-04]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1745-Proudova-elektronicka-pojistka-pro-napajeci-zdroj.html>.
- [11] MACH, L. *Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje*. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2010.
- [12] Laboratorní zdroj 0V-30V/2mA-3A. [cit. 2011-12-10]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1628-Laboratorni-zdroj-0-30V-2mA-3A.html>.
- [13] Napájecí zdroj 0V-30V s regulovatelným proudem 2mA-3A. [cit. 2011-12-10]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1438-Napajeci-zdroj-0-30V-s-regulovatelnym-proudem-2mA--3A.html>.
- [14] STMicroelectronics, *TIP 141/141/142, TIP 145/146/147* [online]. Datasheet, 4 s., 2000. Dostupné z: [http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/211/211-077/dsh.211-077.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/211/211-077/dsh.211-077.1.pdf).
- [15] STMicroelectronics, *TL071 – TL071A – TL071B* [online]. Datasheet, 10 s., 2001. Dostupné z: [http://www.gme.cz/\\_dokumentace/dokumenty/311/311-012/dsh.311-012.1.pdf](http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/311/311-012/dsh.311-012.1.pdf).
- [16] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2002.
- [17] Katalog GM 2007. Praha: GM electronic, 2007. 464 s.
- [18] Katalog TME 2007. Printing House LCL, 2007. 1264 s.
- [19] ŠVÁBENÍK, Petr. *Napájení elektronických zařízení: Prezentace z přednášek* [<https://www.vutbr.cz/elearning/>]. Brno, 2010 [cit. 2012-02-15].
- [20] ZDENĚK FAKTOR. *Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje*. 1. vyd. Praha: BEN, 2002, 240 s. ISBN 80-86056-91-0.

[21] ZDENĚK FAKTOR. *Transformátory a cívky*. 1. vyd. Praha: BEN, 2002, 400 s. ISBN 80-86056-49-X.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

$I_{IN}$	Vstupní proud
$I_{OUT}$	Výstupní proud
$I_Z$	Proud Zenerovou diodou
$I_R$	Proud rezistorem
$I_B$	Proud báze
$I_C$	Proud kolektoru
$I_E$	Proud emitoru
$I_{ADJ}$	Proud řídicí elektrody třísvorkového stabilizátoru
$U_{IN}$	Vstupní napětí
$U_{OUT}$	Výstupní napětí
$U_Z$	Napětí na Zenerově diodě
$U_R$	Napětí na rezistoru
$U_{BE}$	Napětí na přechodu B-E
$U_{REF}$	Referenční napětí
$U_{inv}$	Napětí na invertujícím vstupu OZ
$U_{neinv}$	Napětí na neinvertujícím vstupu OZ
$R$	Odpor
$C$	Kapacita
$L$	Indukčnost
$p$	Zvlnění na výstupu usměrňovače
$A$	Zesílení
$h_{21}$	Proudový zesilovací činitel tranzistoru
$GND$	Nulová svorka – zem
$LED$	Luminiscenční dioda
$OZ$	Operační zesilovač

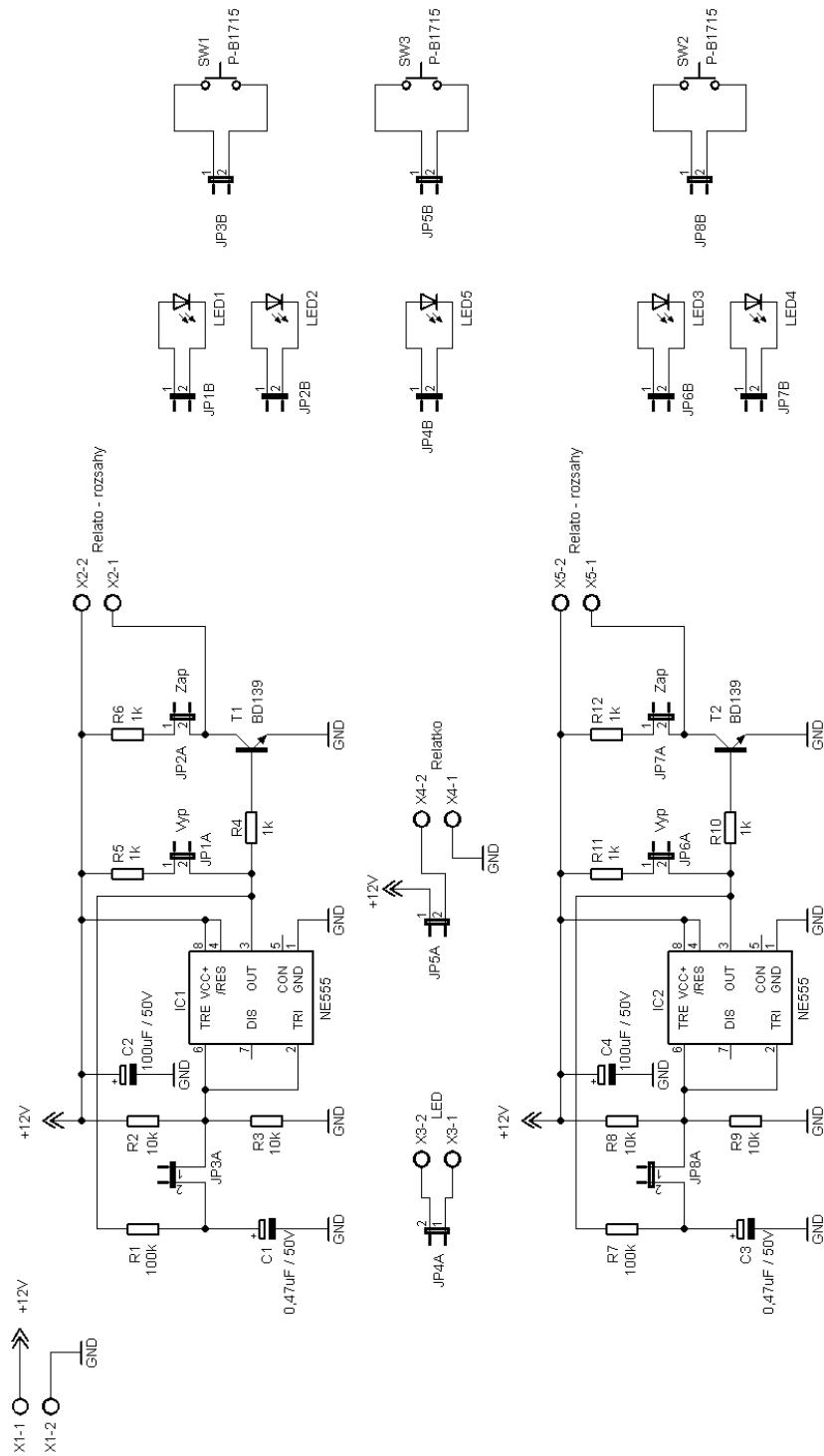
# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Návrh zařízení</b>	<b>55</b>
A.1	Ovládání rozsahů - Obvodové zapojení.....	55
A.2	Ovládání rozsahů - Deska plošného spoje .....	56
A.3	Ovládání rozsahů – Osazovací plán.....	56
A.4	Spínání výstupů - Obvodové zapojení .....	57
A.5	Spínání výstupů – Deska plošného spoje.....	58
A.6	Spínání výstupů – Osazovací plán .....	58
A.7	Relé pro symetrický výstup a zdroj – Obvodové zapojení .....	59
A.8	Relé pro symetrický výstup a zdroj – Deska plošného spoje .....	59
A.9	Relé pro symetrický výstup a zdroj – Osazovací plán.....	59
A.10	Pomocné obvody – Obvodové zapojení .....	60
A.11	Pomocné obvody – Deska plošného spoje.....	61
A.12	Pomocné obvody – Osazovací plán .....	62
A.13	Laboratorní zdroj – Obvodové zapojení .....	63
A.14	Laboratorní zdroj – Deska plošného spoje .....	64
A.15	Laboratorní zdroj – Osazovací plán.....	65
<b>B</b>	<b>Seznam součástek</b>	<b>66</b>
B.1	Ovládání rozsahů - odpovídá jednomu zdroji.....	66
B.2	Spínání výstupů.....	67
B.3	Relé pro symetrický výstup a zdroj .....	68
B.4	Pomocné obvody.....	68
B.5	Laboratorní zdroj - odpovídá jednomu zdroji.....	70
<b>C</b>	<b>Zapojení konektorů</b>	<b>73</b>
C.1	Ovládání rozsahů .....	73
C.2	Spínání výstupů.....	73
C.3	Relé pro symetrický výstup .....	73
C.4	Pomocné obvody.....	73
C.5	Laboratorní zdroj .....	74

<b>D</b>	<b>Konstrukční výkresy</b>	<b>75</b>
D.1	Boční stěny .....	75
D.2	Vrchní a spodní stěna.....	76
D.3	Zadní panel .....	77
D.4	Přední panel .....	78
<b>E</b>	<b>Fotodokumentace</b>	<b>79</b>

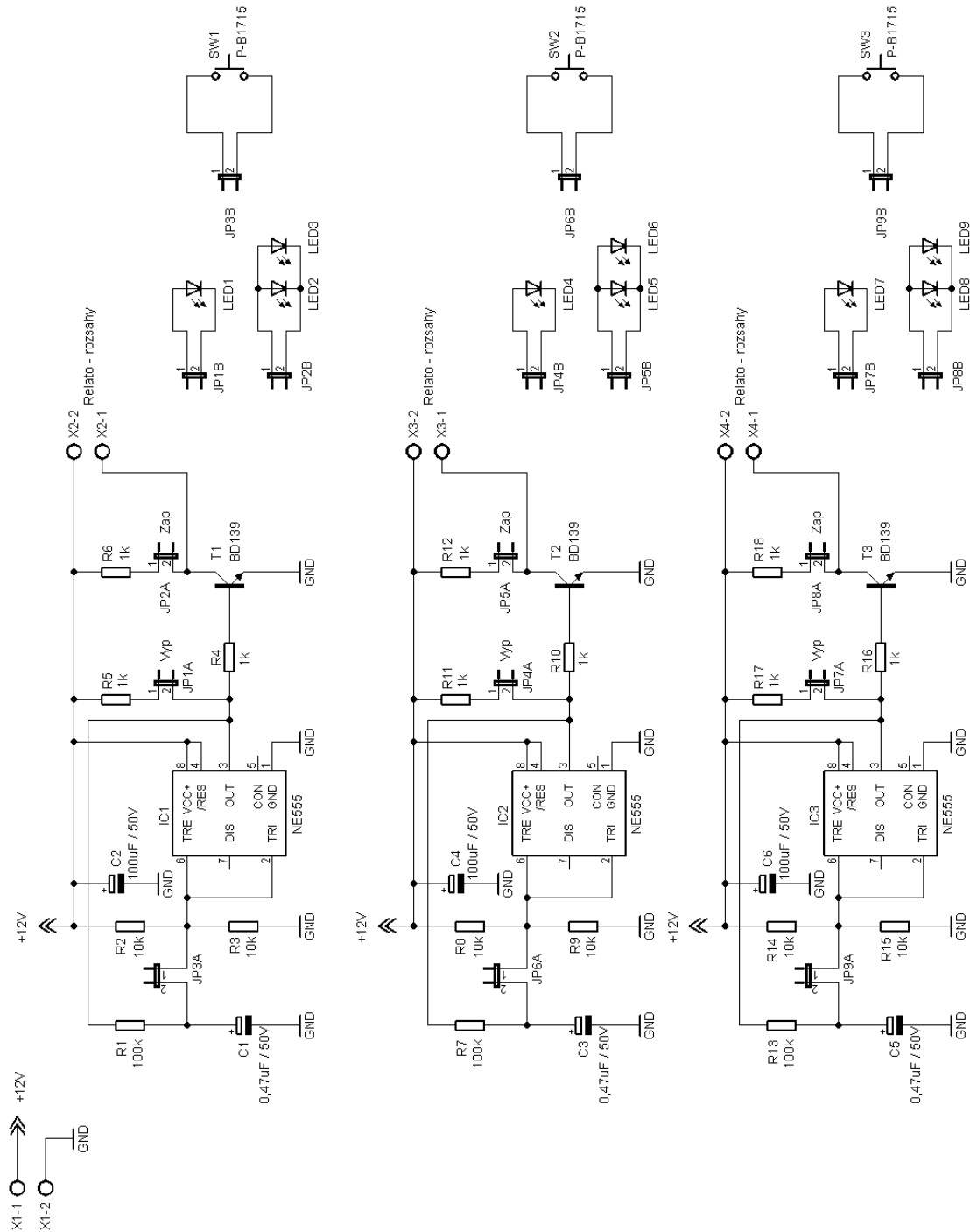
# A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

## A.1 Ovládání rozsahů - Obvodové zapojení

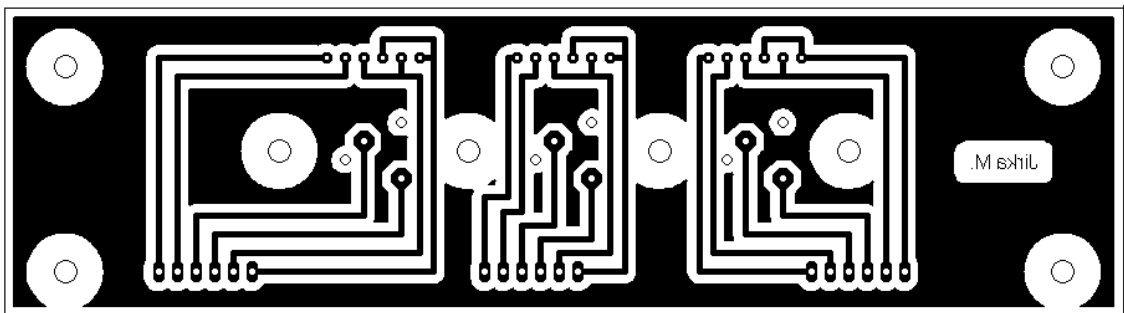
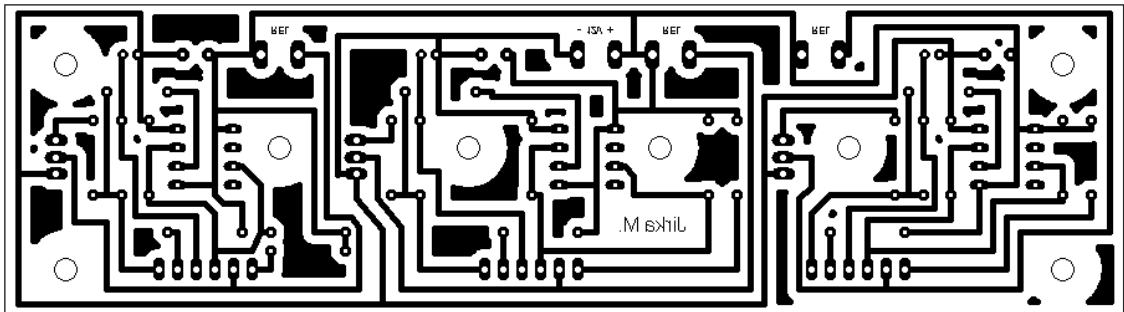




## A.4 Spínání výstupů - Obvodové zapojení

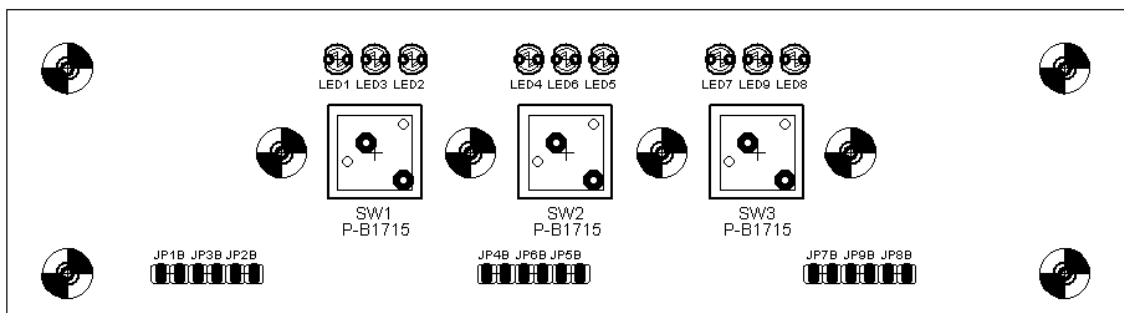
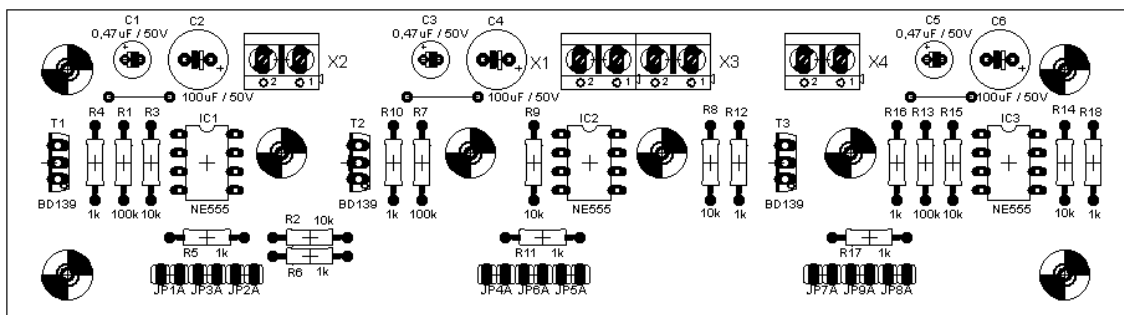


## A.5 Spínání výstupů – Deska plošného spoje

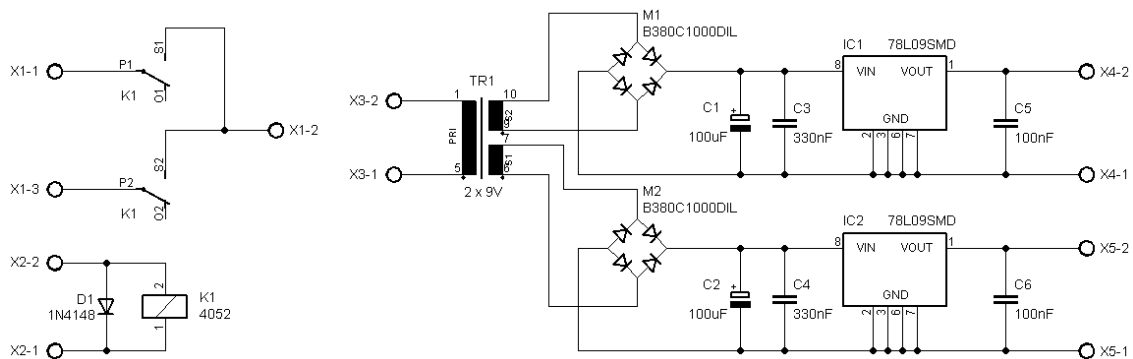


Rozměr desky 155 x 40 a 132 x 34,5 [mm], měřítko M1:1

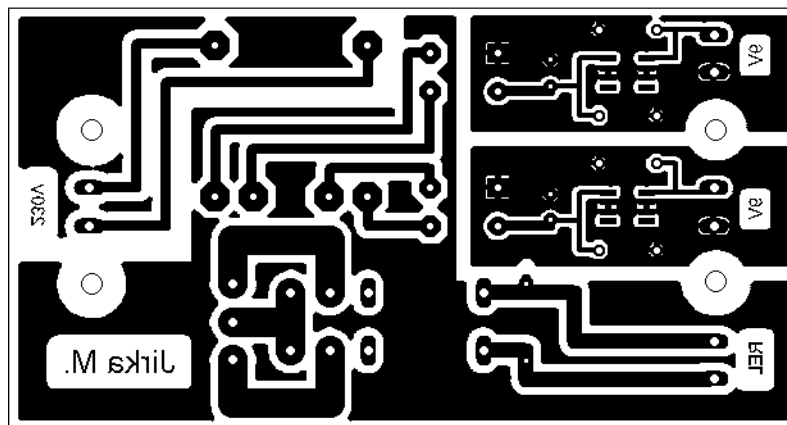
## A.6 Spínání výstupů – Osazovací plán



## A.7 Relé pro symetrický výstup a zdroj – Obvodové zapojení

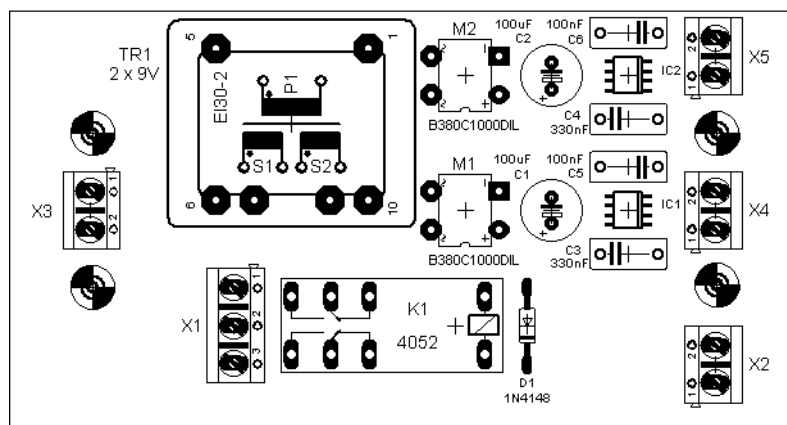


## A.8 Relé pro symetrický výstup a zdroj – Deska plošného spoje

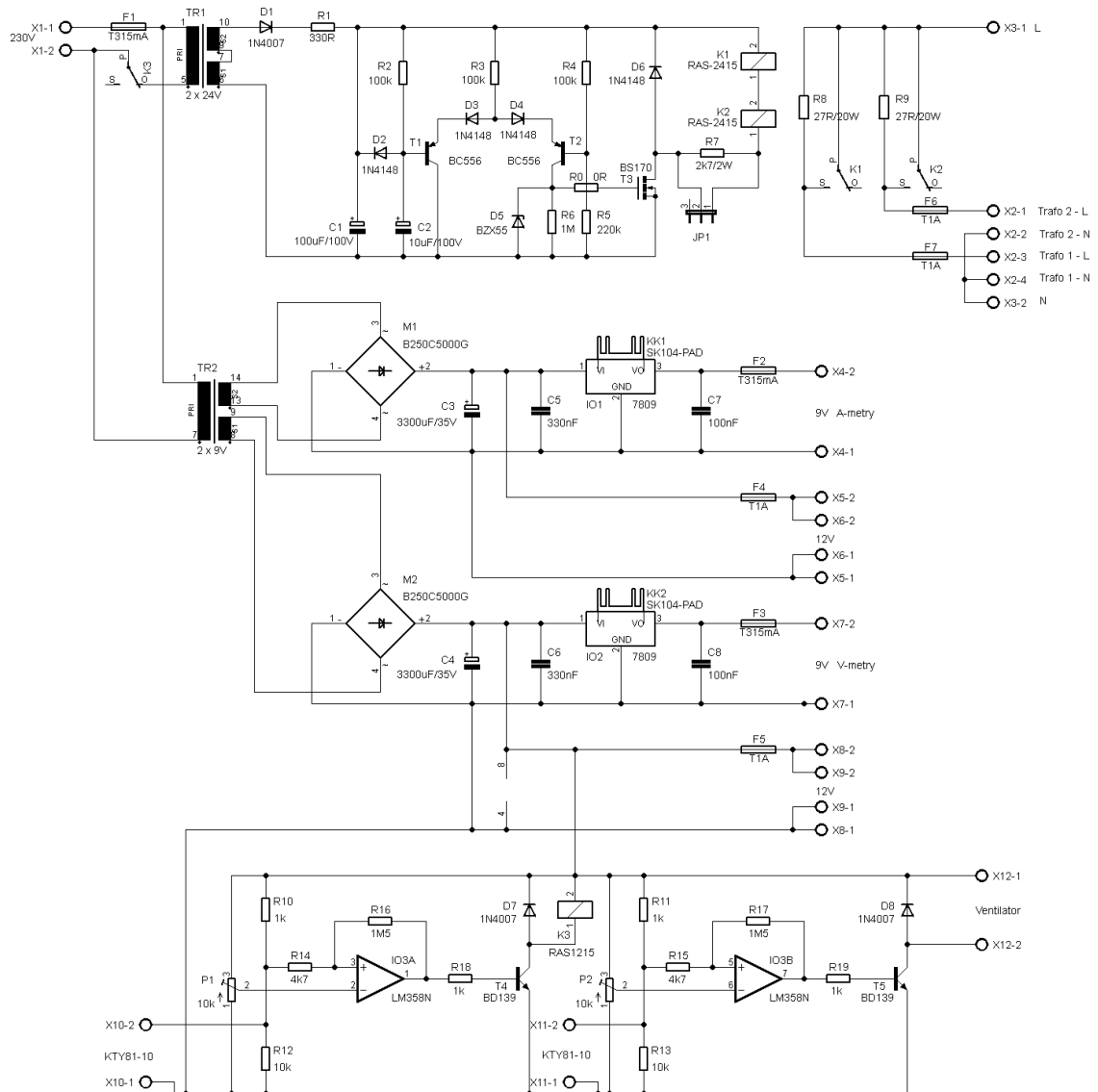


Rozměr desky 29 x 57 [mm], měřítko M1:1

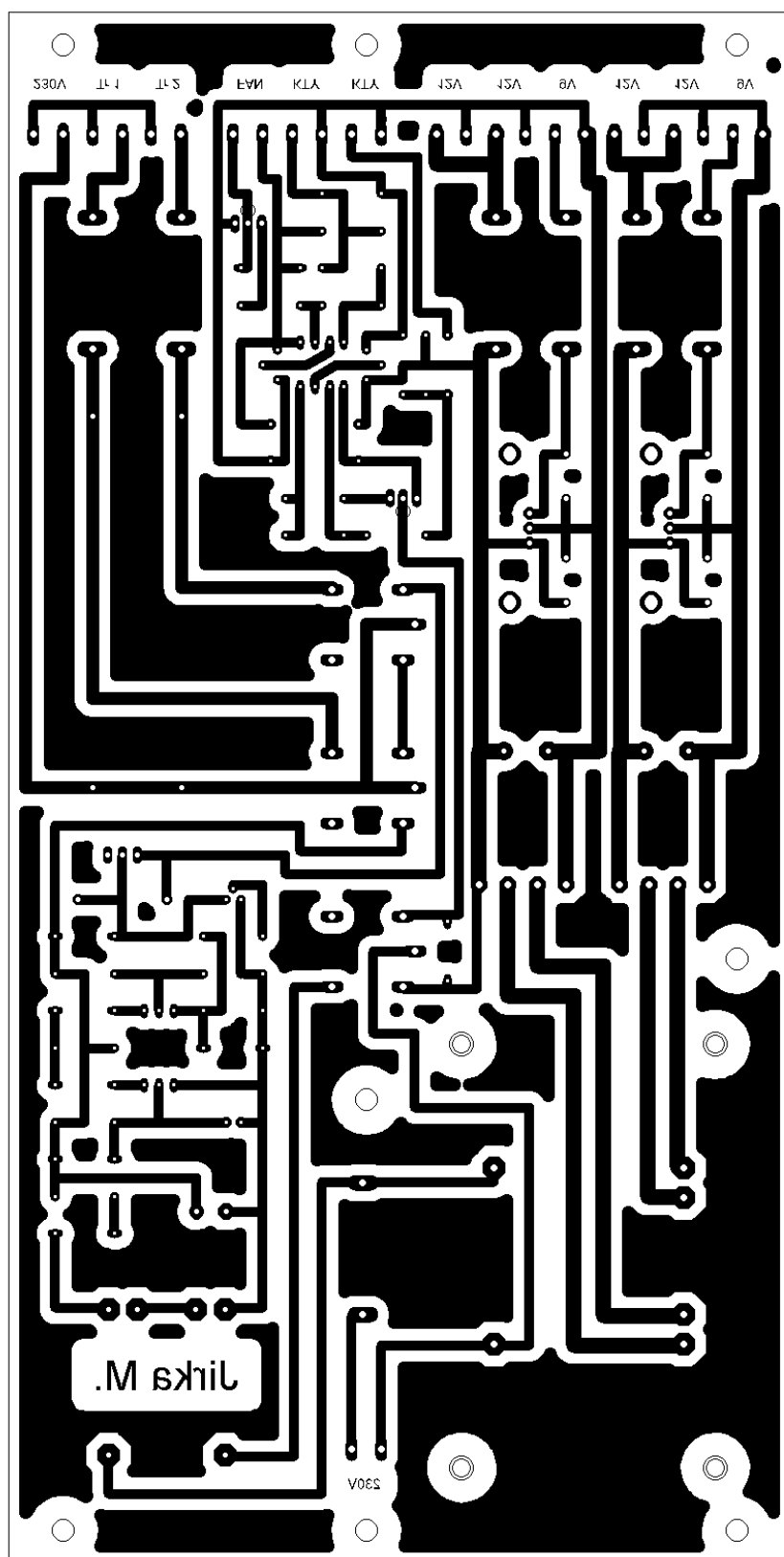
## A.9 Relé pro symetrický výstup a zdroj – Osazovací plán



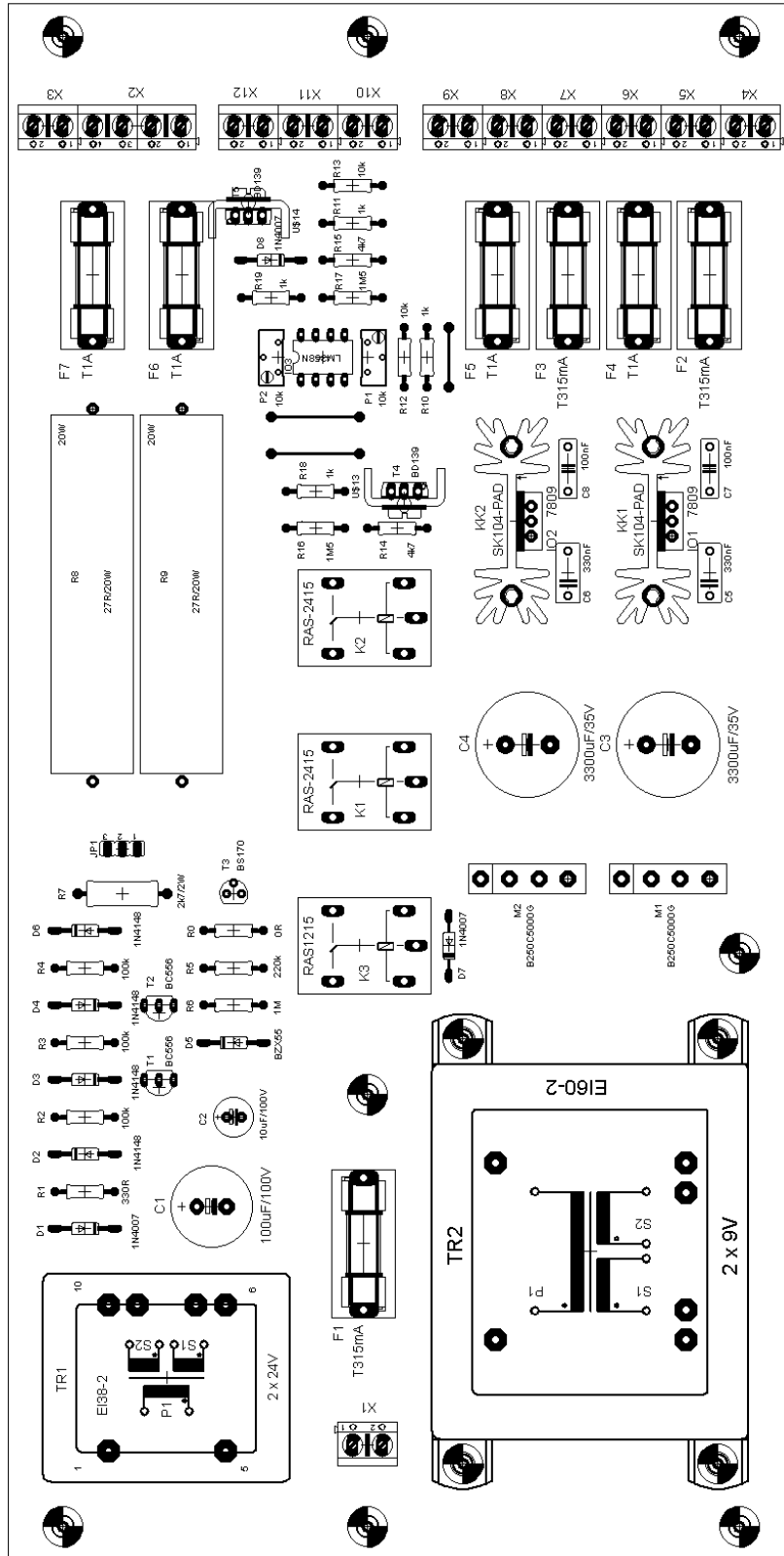
## A.10 Pomocné obvody – Obvodové zapojení



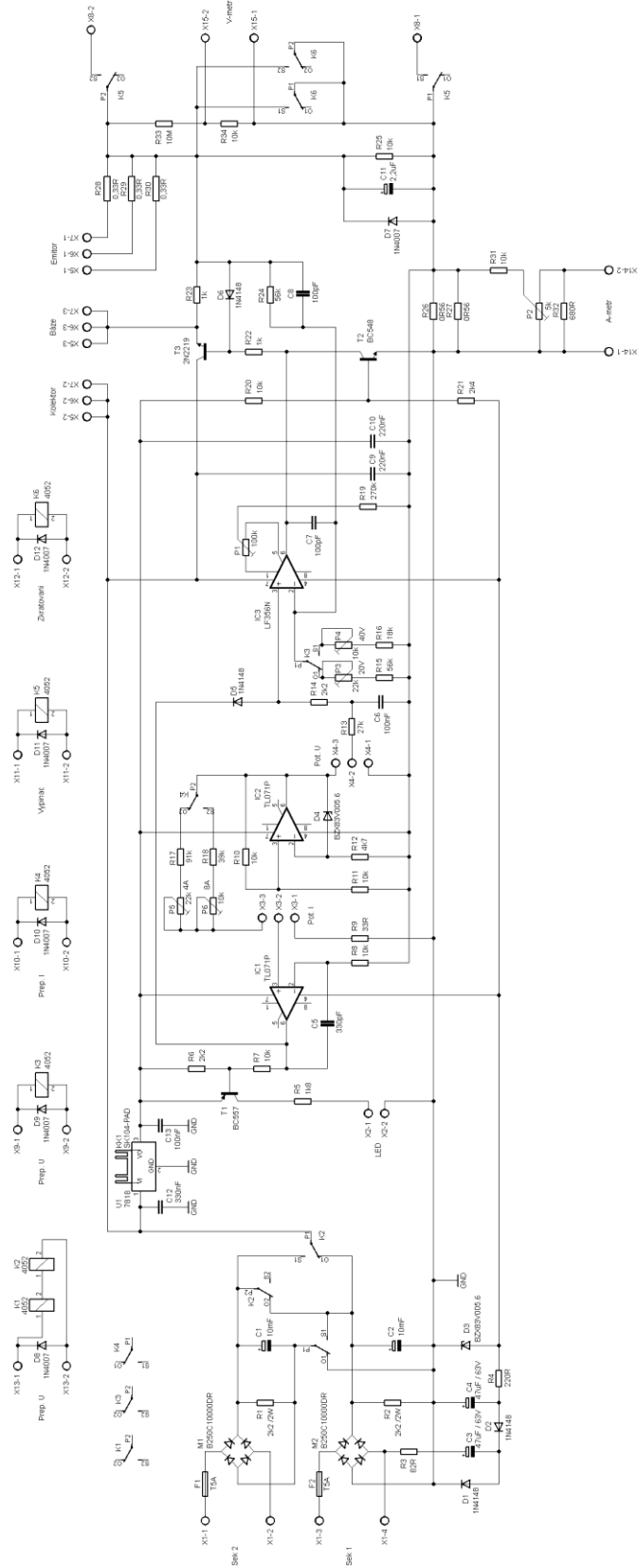
## A.11 Pomocné obvody – Deska plošného spoje



## A.12 Pomocné obvody – Osazovací plán

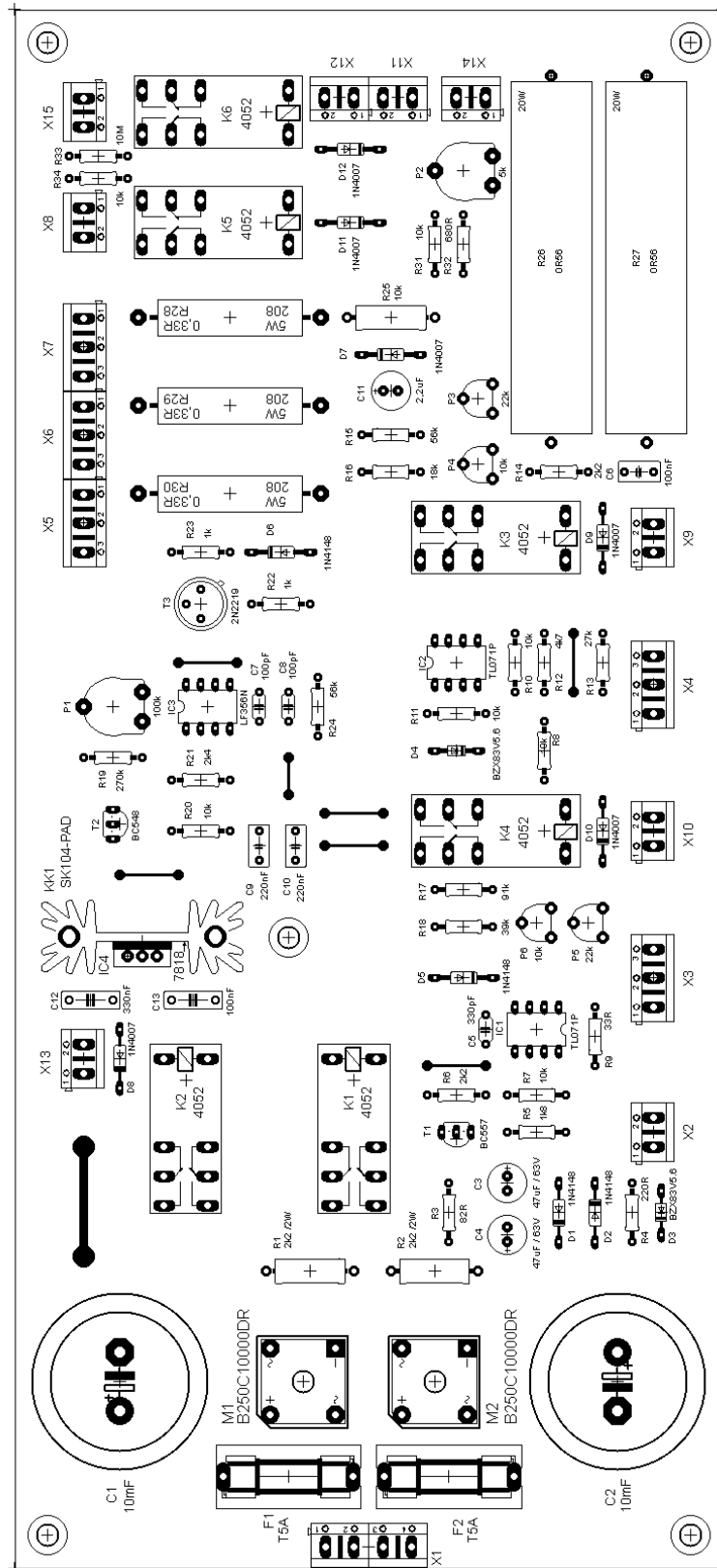


# A.13 Laboratorní zdroj – Obvodové zapojení





# A.15 Laboratorní zdroj – Osazovací plán



## B SEZNAM SOUČÁSTEK

### B.1 Ovládání rozsahů - odpovídá jednomu zdroji

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R2	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R3	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R4	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R5	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R6	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R7	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R8	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R9	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R10	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R11	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R12	1k	0207	Rezistor metalizovaný
C1	0,47 $\mu$ F / 50V	E2-5	Kondenzátor elektrolytický
C2	100 $\mu$ F / 50V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
C3	0,47 $\mu$ F / 50V	E2-5	Kondenzátor elektrolytický
C4	100 $\mu$ F / 50V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
LED1	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED2	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED3	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED4	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED5	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
T1	BD139	TO126AV	Bipolární tranzistor NPN
T2	BD139	T0126AV	Bipolární tranzistor NPN
IC1	NE555	DIL-08	Časovač
IC2	NE555	DIL-08	Časovač
SW1	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
SW2	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
SW3	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
X1 – X5	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
JP1 – JP8	JP	JP	Kolíková + Dutinková lišta

## B.2 Spínání výstupů

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R2	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R3	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R4	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R5	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R6	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R7	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R8	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R9	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R10	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R11	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R12	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R13	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R14	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R15	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R16	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R17	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R18	1k	0207	Rezistor metalizovaný
C1	0,47 $\mu$ F / 50V	E2-5	Kondenzátor elektrolytický
C2	100 $\mu$ F / 50V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
C3	0,47 $\mu$ F / 50V	E2-5	Kondenzátor elektrolytický
C4	100 $\mu$ F / 50V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
C5	0,47 $\mu$ F / 50V	E2-5	Kondenzátor elektrolytický
C6	100 $\mu$ F / 50V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
LED1	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED2	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED3	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED4	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED5	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED6	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED7	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED8	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
LED8	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
T1	BD139	TO126AV	Bipolární tranzistor NPN
T2	BD139	T0126AV	Bipolární tranzistor NPN
T3	BD139	T0126AV	Bipolární tranzistor NPN
IC1	NE555	DIL-08	Časovač
IC2	NE555	DIL-08	Časovač
IC3	NE555	DIL-08	Časovač

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
SW1	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
SW2	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
SW3	P-B1715	P-B1715	Tlačítko
X1 – X4	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
JP1 – JP9	JP	JP	Kolíková + Dutinková lišta

### B.3 Relé pro symetrický výstup a zdroj

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	100 $\mu$ F / 25V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
C2	100 $\mu$ F / 25V	E3,5-8	Kondenzátor elektrolytický
C3	330nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
C4	330nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
C5	200nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
C6	100nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
D1	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
M1	B380C1000DIL	DIL-08	Usměrňovací můstek
M2	B380C1000DIL	DIL-08	Usměrňovací můstek
IC1	78L09SMD	SO8	Stabilizátor napětí
IC2	78L09SMD	SO8	Stabilizátor napětí
K1	RELEF4052-12	F4052	Relé 12V, 2 x přep.
TR1	EI 30/12,5	EI30-2	Transformátor 2 x 9V,
X1	AK500/3	AK500/3	Svorkovnice 3 piny
X2 – X5	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny

### B.4 Pomocné obvody

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R0	0R	0207	Propojka
R1	330R	0207	Rezistor metalizovaný
R2	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R3	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R4	100k	0207	Rezistor metalizovaný
R5	220k	0207	Rezistor metalizovaný
R6	1M	0207	Rezistor metalizovaný
R7	2k7	0414	Rezistor metalizovaný 2W
R8	27R	RRW20	Rezistor drátový 20W
R9	27R	RRW20	Rezistor drátový 20W
R10	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R11	1k	0207	Rezistor metalizovaný

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R12	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R13	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R14	4k7	0207	Rezistor metalizovaný
R15	4k7	0207	Rezistor metalizovaný
R16	1M5	0207	Rezistor metalizovaný
R17	1M5	0207	Rezistor metalizovaný
R18	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R19	1k	0207	Rezistor metalizovaný
P1	10k	64Y	Trimr cermentový
P2	10k	64Y	Trimr cermentový
C1	100 $\mu$ F / 100V	E5-13	Kondenzátor elektrolytický
C2	10 $\mu$ F / 100V	E2,5-7	Kondenzátor elektrolytický
C3	3,3mF / 35V	E7,5-18	Kondenzátor elektrolytický
C4	3,3mF / 35V	E7,5-18	Kondenzátor elektrolytický
C5	330nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
C6	330nF	C075-042x103	Kondenzátor fóliový
C7	100nF	C075-032x103	Kondenzátor fóliový
C8	100nF	C075-032x103	Kondenzátor fóliový
D1	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D2	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D3	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D4	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D5	BZX55/10V	DO35z-10	Zenerova dioda 10V
D6	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D7	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D8	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
M1	BC250C5000G	DB4B	Usměrňovací můstek
M2	BC250C5000G	DB4B	Usměrňovací můstek
T1	BC556	TO92-EBC	Bipolární tranzistor PNP
T2	BC556	TO92-EBC	Bipolární tranzistor PNP
T3	BS170	SOT54E	Unipolární tranzistor N-kanál
T4	BD139	TO126AV	Bipolární tranzistor NPN
T5	BD139	TO126AV	Bipolární tranzistor NPN
IC1	7809	TO-220S	Stabilizátor napětí
IC2	7809	TO-220S	Stabilizátor napětí
IC3	LM358	DIL-08	2 x Operační zesilovač
K1	RAS-2415	G5LE	Relé 24V, 1 x přep.
K2	RAS-2415	G5LE	Relé 24V, 1 x přep.
K3	RAS-1215	G5LE	Relé 12V, 1 x přep.
TR1	EI38/13,6 224	EI38-2	Transformátor 2 x 24V, 4VA
TR2	EI60/21 209	EI60-2	Transformátor 2 x 9V, 25VA
F1	T315mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F2	T315mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
F3	T315mA	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F4	T1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F5	T1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F6	T1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F7	T1A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
X1	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
X2	AK500/4	AK500/4	Svorkovnice 4 piny
X3 – X12	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
JP1	JP	JP	Jumper 3 piny + Propojka
KK1, KK2	V7143	SK104-PAD	Chladič pro TO220
Mimo DPS	KTY81-10	SOD70	Termistor PTC
Mimo DPS	KTY81-10	SOD70	Termistor PTC
Mimo DPS	EB60251B1-999		Ventilátor 12V, 60 x 60 x 25
Mimo DPS	EB60251B1-999		Ventilátor 12V, 60 x 60 x 25

## B.5 Laboratorní zdroj - odpovídá jednomu zdroji

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R1	2k2	0414	Rezistor metalizovaný 2W
R2	2k2	0414	Rezistor metalizovaný 2W
R3	82R	0207	Rezistor metalizovaný
R4	220R	0207	Rezistor metalizovaný
R5	1k8	0207	Rezistor metalizovaný
R6	2k2	0207	Rezistor metalizovaný
R7	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R8	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R9	33R	0207	Rezistor metalizovaný
R10	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R11	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R12	4k7	0207	Rezistor metalizovaný
R13	27k	0207	Rezistor metalizovaný
R14	2k2	0207	Rezistor metalizovaný
R15	56k	0207	Rezistor metalizovaný
R16	18k	0207	Rezistor metalizovaný
R17	91k	0207	Rezistor metalizovaný
R18	39k	0207	Rezistor metalizovaný
R19	270k	0207	Rezistor metalizovaný
R20	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R21	2k4	0207	Rezistor metalizovaný
R22	1k	0207	Rezistor metalizovaný
R23	1k	0207	Rezistor metalizovaný

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
R24	56k	0207	Rezistor metalizovaný
R25	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R26	0R56	RRW20	Rezistor drátový 20W
R27	0R56	RRW20	Rezistor drátový 20W
R28	0R33	RKH208-8	Rezistor drátový 5W
R29	0R33	RKH208-8	Rezistor drátový 5W
R30	0R33	RKH208-8	Rezistor drátový 5W
R31	10k	0207	Rezistor metalizovaný
R32	680R	0207	Rezistor metalizovaný
R33	10M	0207	Rezistor metalizovaný
R34	10k	0207	Rezistor metalizovaný
P1	100k	PT-10V	Trimr uhlíkový 10mm
P2	5k	PT-10V	Trimr uhlíkový 10mm
P3	22k	PT-6V	Trimr uhlíkový 6mm
P4	10k	PT-6V	Trimr uhlíkový 6mm
P5	22k	PT-6V	Trimr uhlíkový 6mm
P6	10k	PT-6V	Trimr uhlíkový 6mm
C1	10mF	E10-35	Kondenzátor elektrolytický
C2	10mF	E10-35	Kondenzátor elektrolytický
C3	47 $\mu$ F / 63V	E2,5-7	Kondenzátor elektrolytický
C4	47 $\mu$ F / 63V	E2,5-7	Kondenzátor elektrolytický
C5	330pF	C050-024x044	Kondenzátor keramický
C6	100nF	C050-035x075	Kondenzátor fóliový
C7	100pF	C050-024x044	Kondenzátor keramický
C8	100pF	C050-024x044	Kondenzátor keramický
C9	220nF	C050-035x075	Kondenzátor fóliový
C10	220nF	C050-035x075	Kondenzátor fóliový
C11	2,2 $\mu$ F / 63V	E2,5-7	Kondenzátor elektrolytický
C12	330nF	C075-032x103	Kondenzátor fóliový
C13	100nF	C075-032x103	Kondenzátor fóliový
D1	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D2	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D3	BZX83V5,6	DO35z-10	Zenerova dioda 10V
D4	BZX83V5,6	DO35z-10	Zenerova dioda 10V
D5	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D6	1N4148	DO35-10	Dioda usměrňovací
D7	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D8	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D9	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D10	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D11	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
D12	1N4007	DO35-10	Dioda usměrňovací
M1	B250C10000DR	DM BR-3	Usměrňovací můstek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
M2	B250C10000DR	DM BR-3	Usměrňovací můstek
T1	BC557	TO92-EBC	Bipolární tranzistor PNP
T2	BC548	TO92-EBC	Bipolární tranzistor NPN
T3	2N3440	TO39	Bipolární tranzistor NPN
IC1	TL071P	DIL-08	Operační zesilovač
IC2	TL071P	DIL-08	Operační zesilovač
IC3	LF356N	DIL-08	Operační zesilovač
IC4	7818	TO-220S	Stabilizátor napětí
K1	RELEF4052-06	F4052	Relé 6V, 2 x přep.
K2	RELEF4052-06	F4052	Relé 6V, 2 x přep.
K3	RELEF4052-12	F4052	Relé 12V, 2 x přep.
K4	RELEF4052-12	F4052	Relé 12V, 2 x přep.
K5	RELEF4052-12	F4052	Relé 12V, 2 x přep.
K6	RELEF4052-12	F4052	Relé 12V, 2 x přep.
F1	T5A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
F2	T5A	SH22,5A	Pojistka trubičková 5 x 20mm
X1	AK500/4	AK500/4	Svorkovnice 4 piny
X2	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
X3 – X7	AK500/3	AK500/3	Svorkovnice 3 piny
X8 – X15	AK500/2	AK500/2	Svorkovnice 2 piny
KK1	V7143	SK104-PAD	Chladič pro TO220

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
T4	TIP141	TO218	Darlintonův tranzistor NPN
T5	TIP141	TO218	Darlintonův tranzistor NPN
T6	TIP141	TO218	Darlintonův tranzistor NPN
P1	10k	φ6mm	Uhlíkový potenciometr
P2	1k	φ6mm	Uhlíkový potenciometr
P3	10k	φ6mm	Uhlíkový potenciometr
P4	1k	φ6mm	Uhlíkový potenciometr
LED	LED 3mm	LED 3mm	Luminiscenční dioda
Tr	55141-P1S2		Transformátor 2 x 15V, 120VA
MP1	PAN.LCD200MV		Panelové měřidlo pro napětí
MP2	PAN.LCD200MV		Panelové měřidlo pro napětí

# C ZAPOJENÍ KONEKTORŮ

## C.1 Ovládání rozsahů

- X1 Napájení 12V.
- X2 Připojení relé pro ovládání rozsahu napětí (prop. DPS zdroje – X9,X13).
- X3 LED indikující překročení povoleného proudu (prop. s DPS zdroje - X2).
- X4 Připojení relé zkratující výstup (prop. s DPS zdroje – X12).
- X5 Připojení relé pro ovládání rozsahu proudu (prop. s DPS zdroje – X10).

## C.2 Spínání výstupů

- X1 Napájení 12V
- X2 Připojení relé spínající výstup zdroje A (propojeno s DPS zdroje – X14).
- X3 Připojení relé pro symetrický výstup (propojeno s DPS relé – X2).
- X4 Připojení relé spínající výstup zdroje B (propojeno s DPS zdroje – X14).

## C.3 Relé pro symetrický výstup

- X1 Připojení kladné svorky zdroje A a záporné svorky zdroje B, výstup 0V symetrického zdroje.
- X2 Připojení ovládání relé (propojeno s DPS spínání výstupů – X3).
- X3 Připojení sítě 230V.
- X4 Zdroj 9V pro V-metr 2.
- X5 Zdroj 9V pro A-metr 2.

## C.4 Pomocné obvody

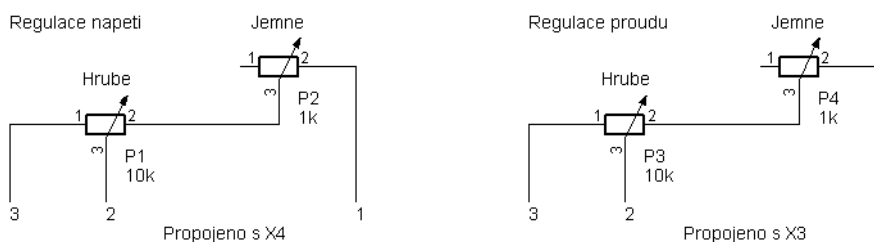
- X1 Připojení sítě 230V.
- X2 Připojení primárních vinutí transformátorů laboratorního zdroje.
- X3 Připojení sítě 230V pro transformátory laboratorních zdrojů.
- X4 Zdroj 9V pro V-metr 1.
- X5 Zdroj 12V.
- X6 Zdroj 12V.

- X7 Zdroj 9V pro A-metr 1.
- X8 Zdroj 12V.
- X9 Zdroj 12V.
- X10 Připojení teplotního čidla pro odpojení zdroje od sítě
- X11 Připojení teplotního čidla pro spínání ventilátorů
- X12 Připojení ventilátorů 12V

## C.5 Laboratorní zdroj

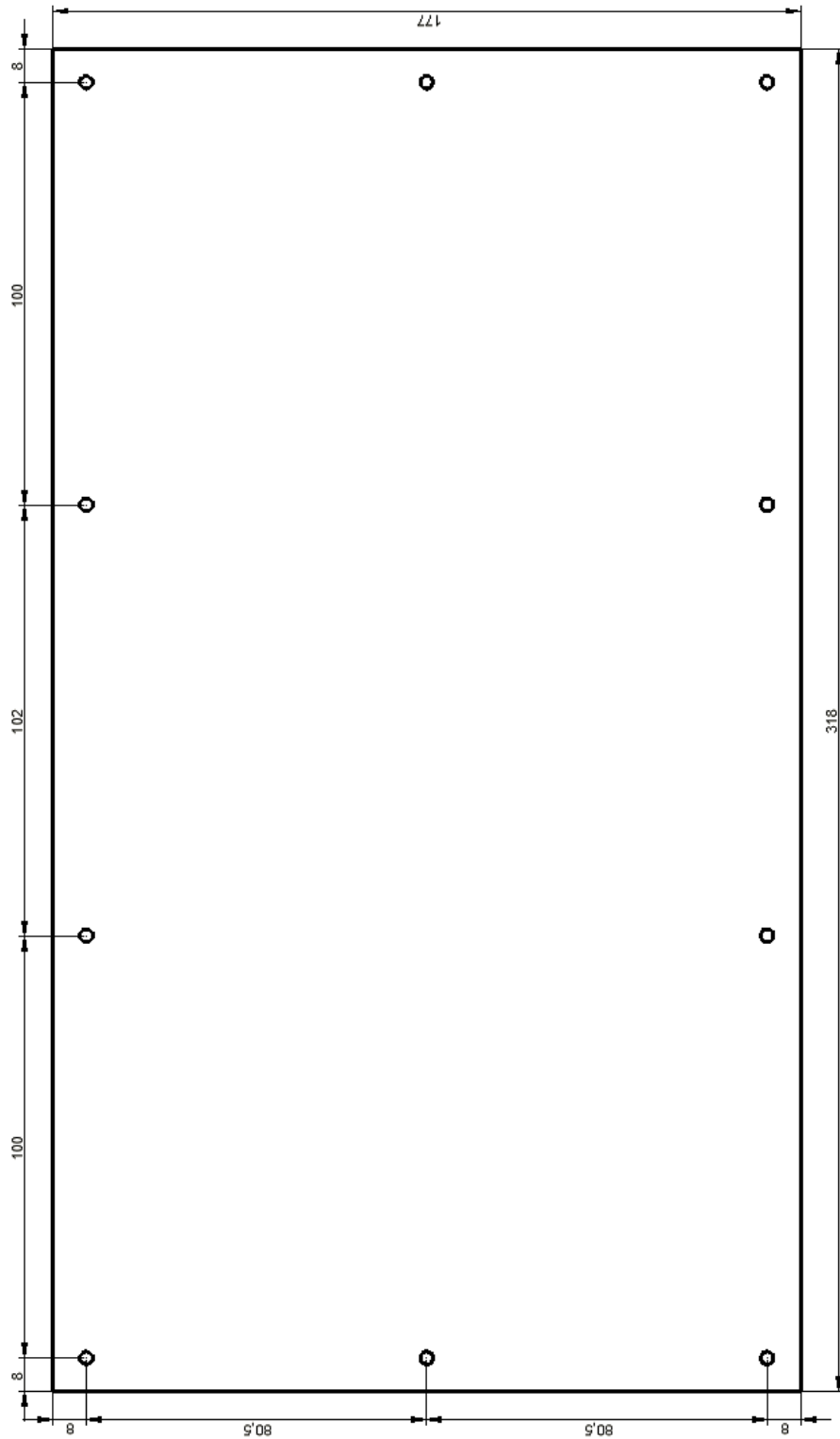
- X1 Připojení sekundárních vinutí transformátoru.
- X2 LED proudové ochrany (propojeno s DPS ovládání rozsahů – X3).
- X3 Připojení potenciometrů pro regulaci proudu.
- X4 Připojení potenciometrů pro regulaci napětí.
- X5 Připojení regulačního tranzistoru T4.
- X6 Připojení regulačního tranzistoru T5.
- X7 Připojení regulačního tranzistoru T6.
- X8 Výstup regulovaného napětí.
- X9 Připojení ovládání relé pro přepínání napěťových rozsahů (propojeno s DPS ovládání rozsahů – X2).
- X10 Připojení ovládání relé pro přepínání proudových rozsahů (propojeno s DPS ovládání rozsahů – X5).
- X11 Připojení ovládání relé pro spínání výstupu zdroje (propojeno s DPS spínání výstupů – X2 případně X4).
- X12 Připojení ovládání relé pro zkratování výstupu (propojeno s DPS ovládání rozsahů – X4).
- X13 Připojení ovládání relé pro přepínání napěťových rozsahů (propojeno s DPS ovládání rozsahů – X2).
- X14 Připojení A-metru.
- X15 Připojení V-metru.

Zapojení potenciometrů pro hrubé a jemné nastavení napětí a proudu:

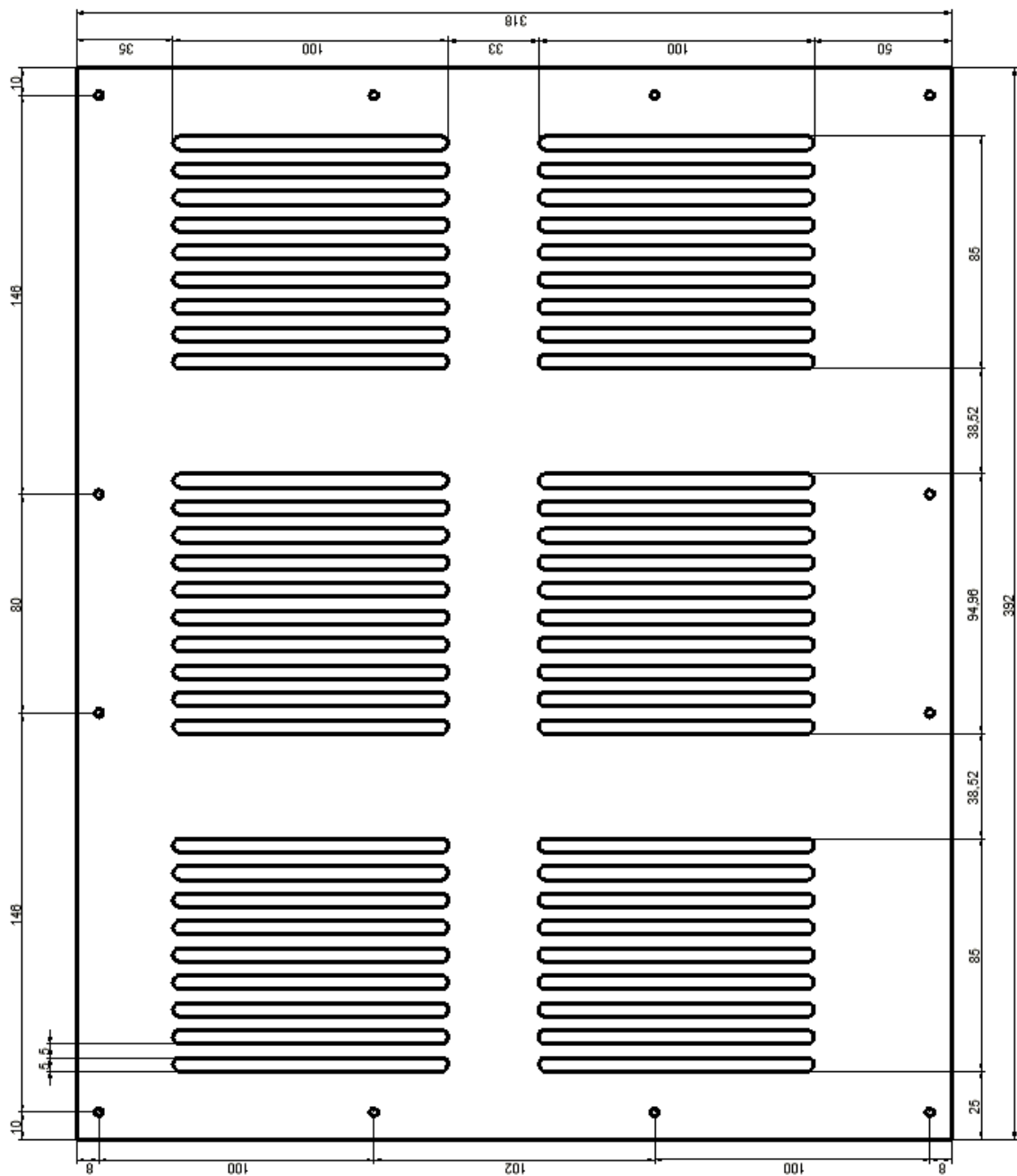


# D KONSTRUKČNÍ VÝKRESY

## D.1 Boční stěny

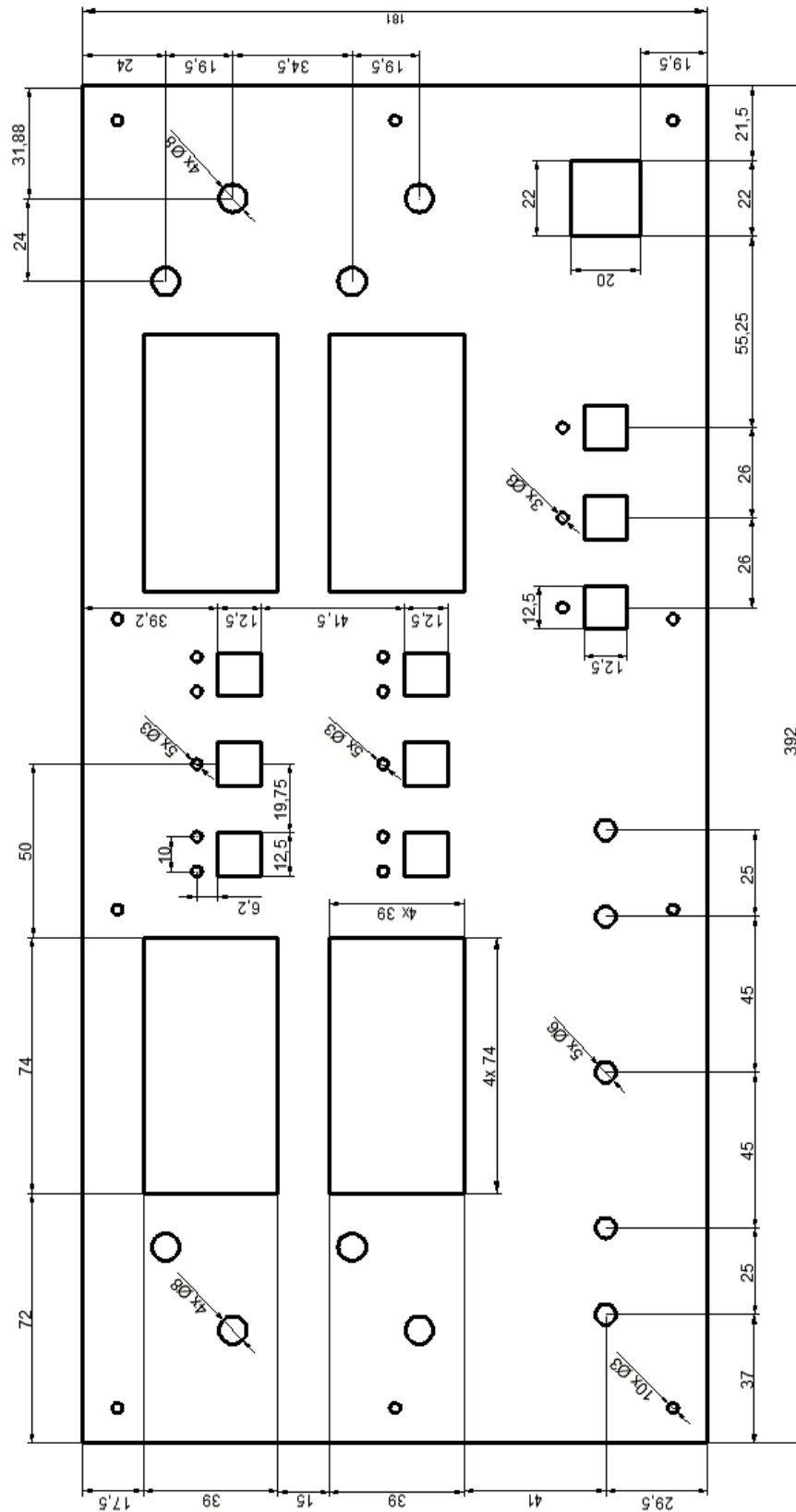


## D.2 Vrchní a spodní stěna





## D.4 Přední panel



## E FOTODOKUMENTACE



