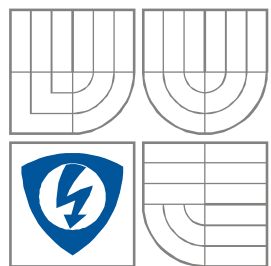


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH DVOJITÉHO STABILIZOVANÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

DESIGN OF DOUBLE STABILIZED POWER SUPPLY

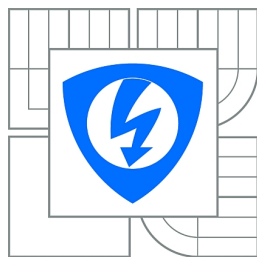
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Pavel Vlček

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. Lubomír Brančík, CSc.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Pavel Vlček

ID: 134661

Ročník: 3

Akademický rok: 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte problematiku lineárních napájecích zdrojů a navrhnete koncepci stabilizovaného zdroje $2 \times 0 - 30 \text{ V} / 5 \text{ A}$. Napájecí zdroj doplňte indikátory výstupního napětí a proudu, zdroj rovněž opatřete vhodnými elektronickými ochranami. Navržená obvodová zapojení simulujte v programu PSpice.

Na základě předchozích návrhových prací proveďte konstrukci laboratorního napájecího zdroje předepsaných parametrů, včetně návrhu desek plošných spojů programem Eagle a návrhu vhodného transformátoru. Zapojení oživte a proměřte jeho parametry. Výsledky měření porovnejte s parametry získanými počítačovou simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. Praha: BEN - technická literatura, 2002.

[2] BASSO, CH. P. Switch-Mode Power Supplies - Spice Simulations and Practical Designs. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 31.5.2013

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

Práce pojednává o návrhu zapojení laboratorního zdroje s vysokou stabilitou výstupního napětí, přídavných ochran pro bezpečnější provoz napájeného zařízení a provoz samotného zdroje. Práce popisuje komplexní stavbu napájecího zdroje od návrhu schématu v simulátoru, jeho doladění k požadovaným parametrům, návrhu síťového transformátoru až po konstrukci a stavbu výsledného zařízení použitelného v laboratoři. Dále pak měření a zhodnocení dosažených parametrů jako zvlnění výstupního napětí, rychlost reakce proudového omezení a rychlost reakce teplotní pojistky.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí zdroj, lineární, laboratorní, omezení proudu, teplotní pojistka, měkký náběh zdroje.

ABSTRACT

This work deals with a design scheme of a laboratory power supply with high stability of output voltage and additional protections for safer operation of both powered device and the power supply itself. The work describes complex construction of power supply from the design of scheme in the simulator, through its tuning to the required parameters and the design of mains transformer to the construction and building of resulting device applicable in a laboratory. In addition, measuring and evaluation of achieved parameters, such as the ripple of the output voltage, the velocity of reaction current limitation, velocity of reaction the thermal electronic fuse are given.

KEYWORDS

Power supply, linear, laboratory, current limitation, thermal fuse, soft start of power supply

VLČEK, P. *Návrh dvojitého stabilizovaného napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2012. 63 s., 16 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

Seznam obrázků	vi
Seznam tabulek	viii
Úvod	1
1 VÝBĚR TYPU A KONCEPTU ZDROJE	2
1.1 Typy zdrojů.....	2
1.1.1 Lineární zdroj.....	2
1.1.2 Impulsní zdroj	3
1.2 Koncepty lineárních zdrojů.....	3
1.2.1 Integrovaný regulátor napětí	3
1.2.2 Sériový regulátor s omezovacím prvkem ve výkonové části	4
1.2.3 Sériový regulátor s omezovacím prvkem mimo výkonovou část.....	4
2 NÁVRH ZAPOJENÍ ZDROJE	5
2.1 Blokové schéma zdroje	5
2.2 Výběr operačního a komparačního zesilovače	6
2.3 Zdroj konstantního (referenčního) napětí	6
2.3.1 Stabilizátor se Zenerovou diodou	6
2.3.2 Zdroj referenčního napětí s operačním zesilovačem	8
2.4 Napěťový zesilovač	9
2.5 Ochrany.....	13
2.5.1 Omezení výstupního proudu	13
2.5.2 Přepínání výkonu	17
2.5.3 Teplotní pojistka	20
2.5.4 Měkký náběh zdroje (softstart)	21
2.6 Proudový zesilovač	23
3 NÁVRH TRANSFORMÁTORU	25
3.1 Požadované parametry:	25
3.2 Výpočet parametrů.....	25
3.2.1 Celkový výkon P_{OUT} a příkon P_{IN}	25

3.2.2	Volba průřezu jádra	26
3.2.3	Počet závitů primárního vinutí N_1 a sekundárních vinutí N_2	26
3.2.4	Proud primárním vinutím I_1 a průřezy vodičů	26
4	KONSTRUKCE	28
4.1	Návrh desek plošných spojů	28
4.2	Oživení desky zdroje	29
4.3	Oživení desky ochran.....	30
4.4	Chlazení	31
4.5	Panelová měřidla.....	32
5	MĚŘENÍ PARAMETRŮ ZDROJE	33
5.1	Stabilita a zvlnění zdroje.....	33
5.2	Odezva teplotní pojistky	34
6	Závěr	35
	Literatura	36
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	37
	Seznam příloh	38

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr 1.1:	Základní zapojení zdroje s integrovaným regulátorem (převzato z [10]).	3
Obr 1.2:	Základní zapojení zdroje s omezovacím prvkem ve výkonové části.	4
Obr 1.3:	Základní zapojení zdroje s omezovacím prvkem ve výkonové části (převzato z [8]).	4
Obr 2.1:	Blokové schéma stabilizovaného zdroje.	5
Obr 2.2:	Schéma stabilizátoru se Zenerovou diodou a jeho simulace.	7
Obr 2.3:	Schéma referenčního zdroje s operačním zesilovačem a jeho simulace.	8
Obr 2.4:	Simulace zdroje s operačním zesilovačem a různými hodnotami R_1 a R_2 .	9
Obr 2.5:	Schéma napěťového zesilovače a jeho simulace.	9
Obr 2.6:	Schéma napěťového zesilovače s kladným a záporným napájecím napětím.	10
Obr 2.7:	Převodní charakteristika napěťového zesilovače v oblasti nulového vstupního napětí.	10
Obr 2.8:	Schéma a výsledek simulace napěťového zesilovače se záporným výstupním napětím.	11
Obr 2.9:	Schéma a výsledek simulace rozdílných zapojení zpětných vazeb.	12
Obr 2.10:	Blokové schéma jednoduchého omezení proudu.	13
Obr 2.11:	Schéma a simulace nastavení proudu nakrátko.	14
Obr 2.12:	Blokové schéma omezení proudu s operačním zesilovačem.	14
Obr 2.13:	Schéma a simulace omezení proudu s operačním zesilovačem.	15
Obr 2.14:	Simulace závislosti výstupního maximálního proudu na rozmítání odporů R_2 a R_5 .	16
Obr 2.15:	Schéma přepínání výkonu.	17
Obr 2.16:	Náhrada obvodu komparátoru pro úroveň U_{1HL} (nalevo) a její simulace (napravo).	17
Obr 2.17:	Náhrada obvodu komparátoru pro úroveň U_{1LH} (nalevo) a její simulace (napravo).	18
Obr 2.18:	Zobrazení rozhodovacích úrovní komparátoru a napětí na výstupu.	19
Obr 2.19:	Schéma a simulace zapojení tepelné pojistky (schéma komparátoru převzato z [4]).	20
Obr 2.20:	Simulace závislosti výstupního napětí na rozmítání odporu termistoru.	20
Obr 2.21:	Schéma softstartu.	21

Obr 2.22:	Závislosti proudů ve zpožďovacím obvodu na čase.	22
Obr 2.23:	Simulace výstupního napětí v závislosti na čase.	22
Obr 2.24:	Schéma zapojení a simulace tranzistorového proudového zesilovače.	23
Obr 2.25:	Simulace tranzistorového proudového zesilovače s maximálním výkonem na tranzistorech	24
Obr 4.1:	Graf proudové zatížitelnosti v závislosti na požadovaném oteplení [13]. ...	28
Obr 4.2:	Graf hodnoty odporu termistoru v závislosti na teplotě.....	30
Obr 5.1:	Odezva teplotní pojistky	34
Obr 6.1:	Konstrukce přístrojové krabice	54
Obr 6.2:	Konstrukce přístrojové krabice	55
Obr 6.3:	Zapojování a zkušební provoz zdroje	56
Obr 6.4:	Zapojování zkušební provoz zdroje	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1:	Průřez vodiče pro jednotlivá vinutí.....	27
Tab. 4.1:	Stabilita výstupního napětí zdroje v závislosti na výstupním proudu.....	33

ÚVOD

Úvodem bych chtěl sdělit, proč jsem si vybral toto téma a jaké parametry zdroje jsou cílem práce. Každý konstruktér v oboru elektrotechniky potřebuje na svém pracovišti laboratorní zdroj. Jeden z požadavků na výsledný zdroj je proudové omezení, které se může hodit v případě, že by se v testovaném či vyvíjeném zařízení vyskytla chyba. Součástí je i teplotní ochrana výkonového prvku, tato ochrana odpojí zátěž, pokud teplota výkonového prvku stoupne nad určitou stanovenou hodnotu. Zdroj bude osazen dvěma panelovými digitálními měřidly, pro přesnější nastavení hodnot na výstupu zdroje je nutno v každém případě použít laboratorní měřidla. Zdroj bude dvojitý, aby umožňoval symetrické napájení, např. operačních zesilovačů, audio zesilovačů, atd. Parametry zdroje budou 2x 0-30 V / 0-5 A.

1 VÝBĚR TYPU A KONCEPTU ZDROJE

Výběr samotného konceptu zapojení zdroje záležel na těchto faktorech:

- Stabilita výstupního napětí (zvlnění),
- Přesnost,
- Rychlost,
- účinnost η .

Po zvážení vlastností lineárních a impulsních zdrojů, uvedených níže, byl vybrán lineární typ zdroje pro jeho velmi vysokou stabilitu výstupního napětí, a vysokou rychlost reakce. A také proto, že není zdrojem rušivého signálu, proto se lineární zdroj hodí pro napájení všech typů zařízení. Rozměry a hmotnost nejsou v tomto případě až tak důležité, jelikož se nejedná o přenosný přístroj, ale laboratorní. Obvody jsou simulovány v programu OrCAD Pspice.

1.1 Typy zdrojů

1.1.1 Lineární zdroj

Jednou z výhod lineárních zdrojů je stabilita a nízké zvlnění výstupního napětí, které je u kvalitních laboratorních zdrojů menší než 0,01 % výstupního napětí, což je při výstupním napětí 30 V pouhých 30 mV zvlnění. Dalšími výhodami jsou: téměř okamžitá odezva na změnu výstupního napětí a vysoká přesnost.

Avšak lineární zdroje mají i své nevýhody. Jednou z nich je hmotnost takového laboratorního zdroje. Lineární zdroj o výstupním výkonu např. 300 W může vážit i 10 kg, proto konstrukce lineárního zdroje s výkonem např. 1 kW by byla nákladnější, a jeho hmotnost by mohla být až několik desítek kilogramů. Další nevýhodou těchto zdrojů je omezení již zmíněného výstupního výkonu, v případě výkonu 1 kW by chladič systém musel být velmi účinný, aby udržel zdroj při takovém výkonu v chodu. Jeho vlastnosti lze shrnout takto:

- Vysoká stabilita výstupního napětí (malé zvlnění),
- vysoká přesnost,
- téměř okamžitá rychlost reakce,
- malá účinnost η ,
- velká hmotnost a většinou velké rozměry zařízení,
- téměř vždy nutné chlazení výkonového prvku,
- není zdrojem žádného rušení.

1.1.2 Impulsní zdroj

Jeho hlavní výhodou je účinnost, která se u vyšších výkonů, např. 300 W přibližuje hodnotě 90 %. Dalšími výhodami jsou velmi malá hmotnost i rozměry v porovnání s lineárními zdroji, není nutné chlazení u zdrojů s menším výkonem.

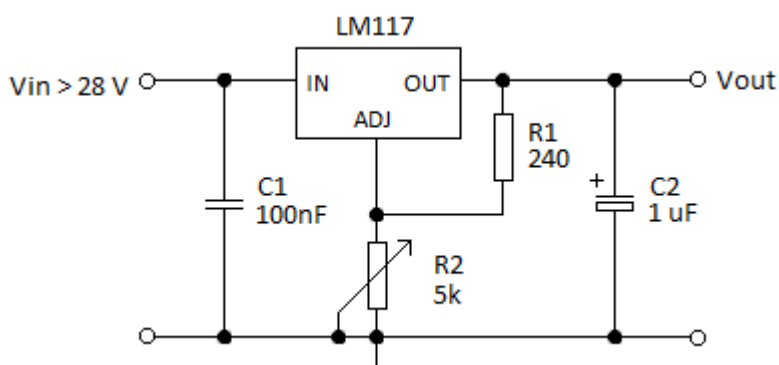
Avšak hlavní nevýhodou je zvlnění výstupního napětí, které je několikanásobně vyšší než u lineárních zdrojů, v literatuře [7]. A u vyšších výkonu i rušení. Jeho vlastnosti lze shrnout:

- Nižší stabilita výstupního napětí (velké zvlnění),
- velmi vysoká účinnost η ,
- vysoká přesnost,
- pomalejší rychlost reakce,
- malá hmotnost i rozměry zařízení,
- není nutné chlazení výkonového prvku,
- může být zdrojem rušení.

1.2 Koncepty lineárních zdrojů

1.2.1 Integrovaný regulátor napětí

Při návrhu lze použít známého regulátoru napětí LM317, který má mnoho výhod, jednoduchost zapojení a obsahuje tepelnou i proudovou pojistku. Při požadavku na vyšší proud než dokáže poskytnout samotný integrovaný obvod LM317, lze výstup posílit tranzistorem. Jeho nevýhoda je velké zvlnění výstupního napětí, pokud je regulátor nezatížený, je zvlnění podobné jako u jiných typů lineárních zdrojů, typicky 0.01 % z hodnoty výstupního napětí nebo menší, avšak zvlnění roste s rostoucím výstupním proudem, hodnota zvlnění pak může být až 1 % výstupního napětí, což při hodnotě 30 V na výstupu zdroje je zvlnění 300 mV. To je srovnatelné s hodnotou zvlnění impulsních zdrojů. Základní zapojení zdroje s LM117, LM317, atd. doporučené výrobcem je na obrázku Obr 1.1.

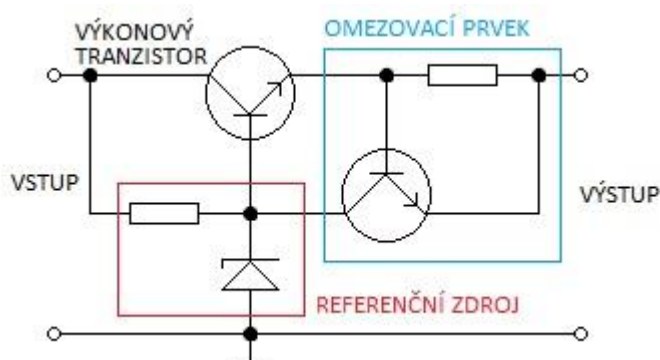


Obr 1.1: Základní zapojení zdroje s integrovaným regulátorem (převzato z [10]).

1.2.2 Sériový regulátor s omezovacím prvkem ve výkonové části

Sériový regulátor s omezovacím prvkem ve výkonové části dosahuje výrazně lepších hodnot zvlnění výstupního napětí. Hodnota zvlnění závisí pouze na použitých součástkách, preciznosti zapojení a především stabilitě a zvlnění referenčního zdroje. Hodnota zvlnění může být i při zatížení menší než 0,01 % z výstupního napětí.

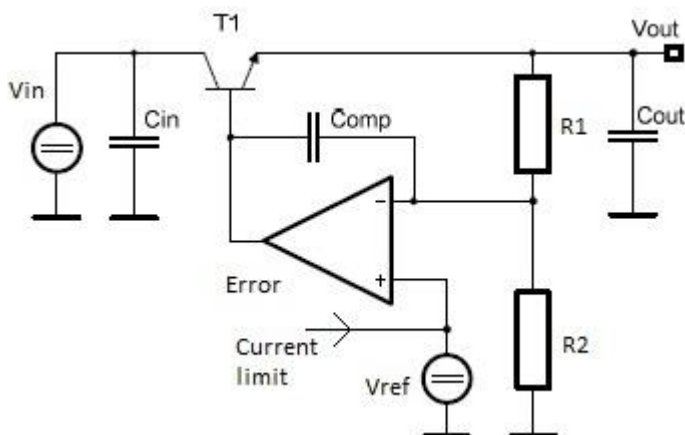
Hlavní nevýhodou, jak plyne z názvu, je umístění omezovacího prvku ve výkonové části. Výkonovým prvkem je tranzistor v zapojení SB (se společnou bází, v režimu zesílení proudu), omezovací prvek je pak umístěn před nebo za výkonovým tranzistorem. Kromě úbytku na výkonovém prvku, který je samozřejmě nutný pro funkci zdroje, při větším výstupním proudu vzniká úbytek také na omezovacím prvku, což je nežádoucí, zvyšuje se tím tedy pokles výstupního napětí při zatíženém výstupu.



Obr 1.2: Základní zapojení zdroje s omezovacím prvkem ve výkonové části.

1.2.3 Sériový regulátor s omezovacím prvkem mimo výkonovou část

Druhý typ sériového regulátoru dosahuje stejného zvlnění výstupního napětí, jako regulátor v kapitole 1.2.2. Jeho hlavní výhodou je minimální pokles výstupního napětí v zatíženém stavu, jelikož omezovací prvek není ve výkonové části, nevzniká na něm úbytek, který by ovlivňoval výstupní napětí. Princip tohoto zapojení je vysvětlen v kapitolách 2.3, 2.4 a 2.5. Principiální schéma je na obrázku Obr 1.3.

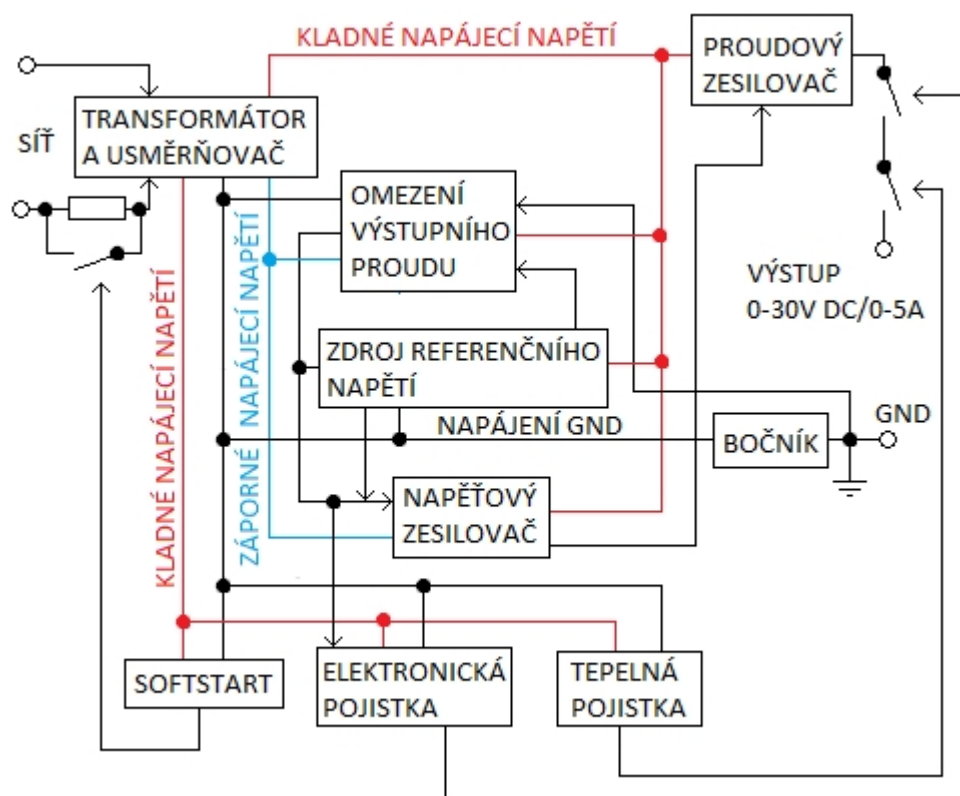


Obr 1.3: Základní zapojení zdroje s omezovacím prvkem ve výkonové části (převzato z [8]).

2 NÁVRH ZAPOJENÍ ZDROJE

Je tedy zvolen koncept s omezovacím prvkem mimo výkonovou část, jelikož splňuje všechny požadované vlastnosti.

2.1 Blokové schéma zdroje



Obr 2.1: Blokové schéma stabilizovaného zdroje.

2.2 Výběr operačního a komparačního zesilovače

Výběr operačního zesilovače (OZ) závisí na požadovaných parametrech krajních zdroje, a to na minimální a maximální hodnotě rozsahu výstupního regulovatelného napětí. Bylo uvažováno o OZ TL082 [9], LM358 [11], LM324 [12].

Z grafů v katalogových listech LM324 i LM358 je vidět, že tyto operačního zesilovače umí porovnávat vstupní napětí od cca. 10 mV, ale protože jejich maximální napájecí napětí je pouze 32 V, vyhoví pro zdroj 0-30 V bez omezení výstupního proudu, jelikož omezení v tomto zdroji požaduje pro svou funkci níže položenou zem, tzn. záporné napájecí napětí. I napájecí napětí 32 V je na hranici možností, jelikož je úbytek na proudovém zesilovači. Tomuto požadavku vyhoví TL082, jehož maximální napájecí napětí je 36 V. Však tento OZ neporovnává nízká vstupní napětí jako LM324 a LM358, tento nedostatek odstraňuje již zmíněné záporné napájecí napětí.

Komparační zesilovače byly vybrány LM393 z důvodu maximálního napájecího napětí 36 V, také velmi nízké odezvy 300 ns při překlopení výstupu z vysoké do nízké úrovně a naopak.

2.3 Zdroj konstantního (referenčního) napětí

Zdroj konstantního napětí je při stavbě zdroje potřeba zejména pokud zdroj má mít možnost omezit výstupní proud, referenčního zdroje je potřeba pro nastavení rozhodovací úrovně, která představuje hodnotu výstupního limitního proudu. Druhý důvod použití je jako zdroj napětí pro napěťový zesilovač, který je potřebný pro stabilizaci výstupního napětí.

2.3.1 Stabilizátor se Zenerovou diodou

Zdroj konstantního napětí může být stabilizátor se Zenerovou diodou, avšak i tento stabilizátor potřebuje napětí, které nebude klesat. V případě laboratorního stabilizovaného zdroje, který je napájen většinou napájen transformátorem, je i zdroj konstantního napětí většinou napájen ze stejného vinutí, kterým je napájen samotný zdroj, v případě zatížení výstupu zdroje, klesne i napájecí napětí pro zdroj a tím se mění napětí na Zenerově diodě.

Napětí na výstupu závisí na požadavku výstupního proudu a napájecího napětí. Pokud není napájecí napětí alespoň dvakrát větší než výstupní napětí, a výstupní proud je požadován např. 100 mA, může se stát, že dioda není schopna udržet napětí při takovém odebíraném proudu. Avšak pokud je požadován malý výstupní proud, např. 1 mA, podmínka 2x většího napájecího napětí už neplatí. Velmi malý proud je požadován např. pro buzení báze bipolárního tranzistoru, který má zesilovací činitel $h_{21E} = 400$, výstupní proud je požadován např. 40 mA, pak je požadován proud do báze v řádech stovek μA . Další případ může být MOS-FET tranzistor, k jehož funkci je požadován proud řídící elektrodou I_G , který je téměř nulový, takže při návrhu stabilizátoru, stačí počítat s proudem diody I_Z , pak je proud diodou, také velmi malý, a předřadný odpor bývá v desítkách $k\Omega$, a to i při rozdílu vstupního a výstupního napětí 2 V.

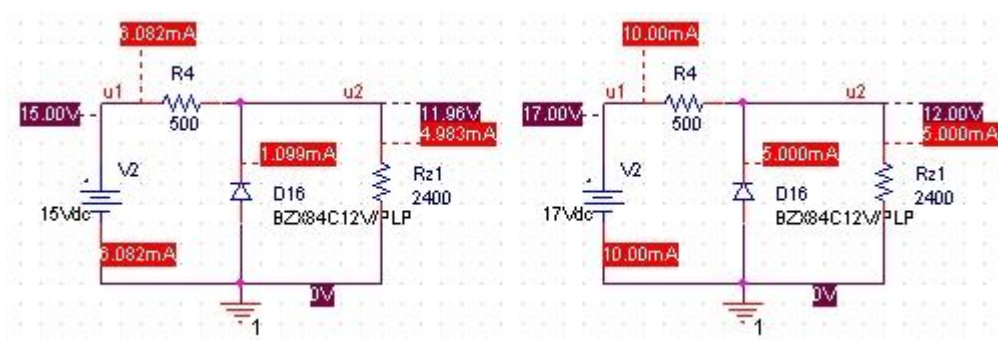
Parametry stabilizátoru se nastavují předřadným odporem R_1 , který určuje proud diodou a výstupní proud. Je požadováno výstupní napětí 12 V a výstupní proud 5 mA, tudíž není potřeba dvakrát větší napájecí napětí U_1 , je zvoleno 17 V. Pak pro odpor R_1 platí vztahy (2.1), (2.2) a (2.3). Na obrázku Obr 2.2 je znázorněno schéma stabilizátoru a jeho simulace, simulace potvrzuje zde uvedené vztahy. Pro výkon zenerovy diody platí vztah (2.4), je vhodná dioda s maximálním dovoleným výkonem 300 mW a odpor s maximálním dovoleným výkonem 250 mW.

$$I_{ZD} \geq I_2, \quad (2.1)$$

$$R_1 = \frac{U_1 - U_2}{I_{ZD} + I_2} = \frac{17 - 12}{5 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}} = 500 \Omega, \quad (2.2)$$

$$P_{R1} = (U_1 - U_2) \cdot (I_{ZD} + I_2) = (17 - 12) \cdot (5 \cdot 10^{-2} + 5 \cdot 10^{-2}) = 50 \text{ mW}, \quad (2.3)$$

$$P_{ZD} = U_2 \cdot I_{ZD} = 12 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 60 \text{ mW}, \quad (2.4)$$



Obr 2.2: Schéma stabilizátoru se Zenerovou diodou a jeho simulace.

Simulace porovnává dva stavy, kdy poklesne napájecí napětí o 2 V. Jak je vidět, napětí na diodě není úplně stabilní. Je to způsobeno změnou závěrného proudu diody, jelikož zenerova dioda má rozsah pracovního stabilizačního napětí, závislého na proudu. Lépe se chová zdroj s operačním zesilovačem, jehož princip je vysvětlen v následující podkapitole.

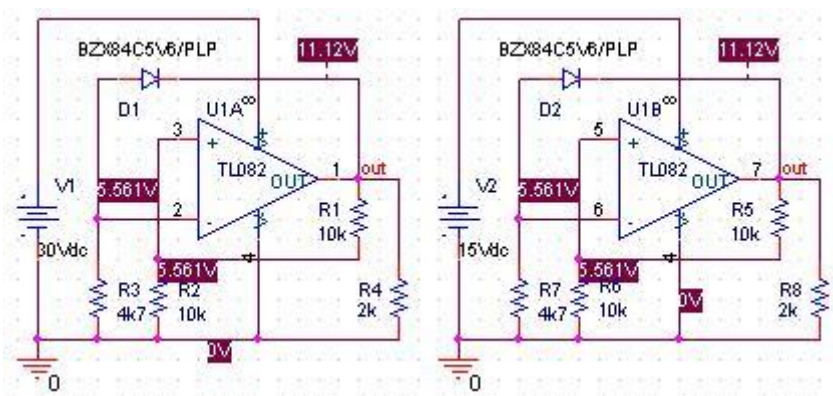
2.3.2 Zdroj referenčního napětí s operačním zesilovačem

Nedostatek z předchozí kapitoly odstraňuje použití operačního zesilovače. I v případě poklesu napájecího napětí je napětí na výstupu stále konstantní, jelikož není stanovené pevné napájecí napětí pro operační zesilovač. Zdroj s operačním zesilovačem má stejné výstupní napětí při maximálním napájecím napětí, tj. pokud je laboratorní zdroj naprázdno (bez zátěže), stejně tak při poklesu napájecího napětí tzn., pokud je laboratorní zdroj zatížen. To přispívá k vyšší stabilitě laboratorního zdroje, a jeho tvrdosti, zdroj dokáže lépe držet výstupní napětí v zatíženém stavu.

Princip tohoto referenčního zdroje spočívá v téměř nulovém rozdílu napětí mezi vstupy operačního zesilovače. Na obrázku Obr 2.3 je vidět, že v simulaci je tento rozdíl nulový, avšak ve skutečnosti je rozdíl v řádu stovek nV. Zenerova dioda D₁, nastavuje mezi výstupem a záporným vstupem napětí 5,6 V, protože je mezi vstupy operačního zesilovače nulové napětí, je tedy i na odporu R₁ napětí 5,6 V. Odpor R₂ má stejnou hodnotu jako odpor R₁ a je na něm také 5,6 V. Na výstupu je tedy celkové napětí U₂ = 11,2 V. Odpor R₃ už jen nastavuje pracovní bod diody. Pro výstupní napětí platí vztah (2.5). Simulace porovnává dvě různé zátěže

$$U_2 = U_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 5,6 \cdot \left(1 + \frac{10 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) = 11,2 \text{ V}, \quad (2.5)$$

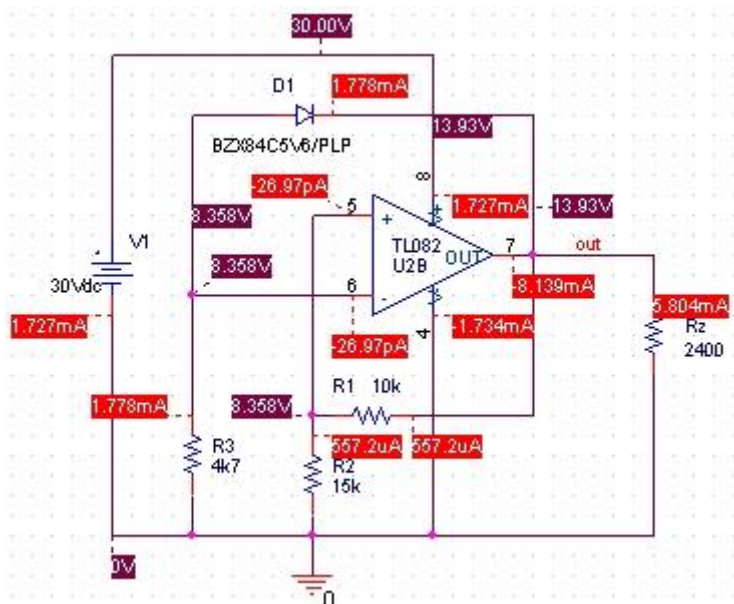
Z výsledku simulace je vidět, že výstupní napětí operačního zesilovače se nemění ani při změně napájecího napětí o 15 V, proto je tento zdroj vhodnější jako referenční zdroj.



Obr 2.3: Schéma referenčního zdroje s operačním zesilovačem a jeho simulace.

Operační zesilovač je možné zapojit i s různými hodnotami odporů R₁ a R₂. Jestliže je změněn odpor R₂ na hodnotu 15 kΩ a hodnota R₁ je ponechána, dosadí se vztahu (2.6) a dostáváme výsledné napětí 14 V, což dokazuje i simulace na obrázku Obr 2.4.

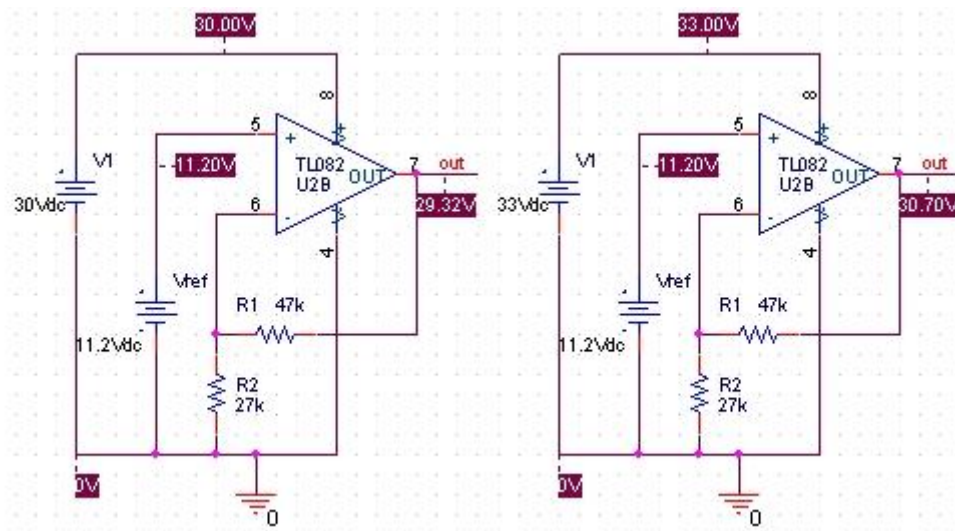
$$U_2 = U_1 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 5,6 \cdot \left(1 + \frac{15 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}\right) = 14 \text{ V}, \quad (2.6)$$



Obr 2.4: Simulace zdroje s operačním zesilovačem a různými hodnotami R_1 a R_2 .

2.4 Napěťový zesilovač

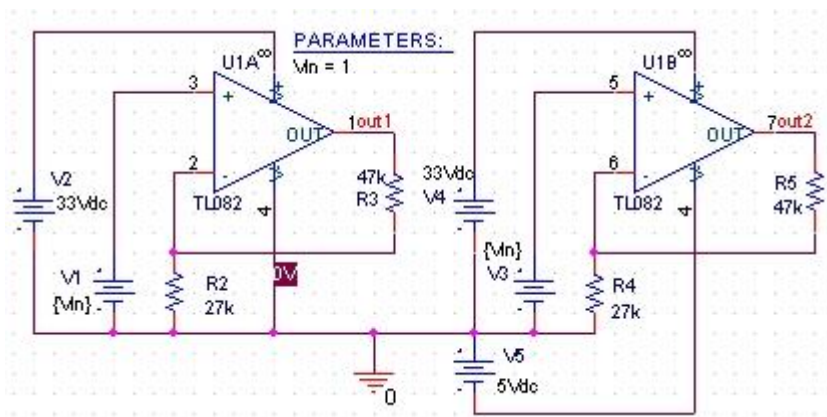
Napěťový zesilovač má za úkol zvýšit napětí referenčního zdroje a stabilizovat výstupní napětí a dorovnávat jej při případném poklesu. Odporů R_1 a R_2 je nastaveno opět zesílení a na kladný vstup zesilovače je přivedeno referenční napětí. Napěťový zesilovač je zapojen jako neinvertující zesilovač.



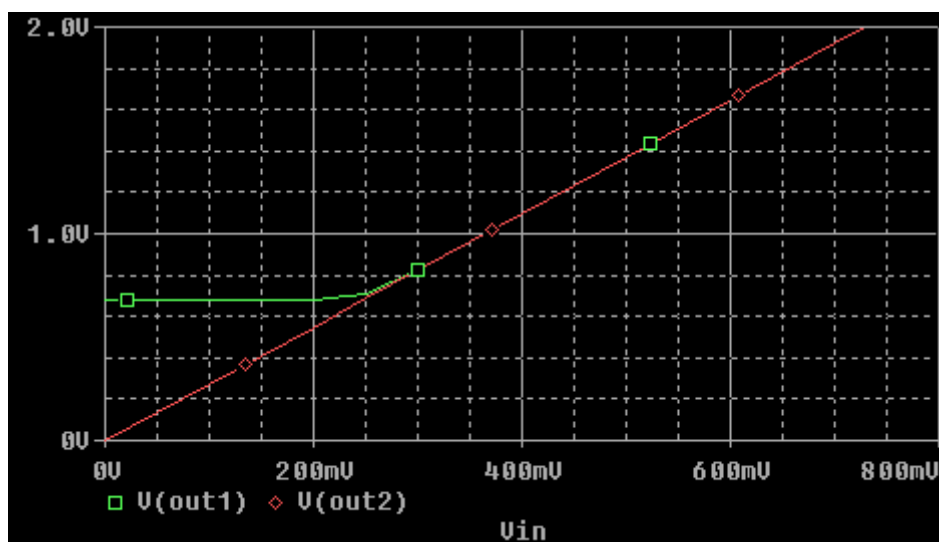
Obr 2.5: Schéma napěťového zesilovače a jeho simulace.

$$U_2 = U_1 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 11,2 \cdot \left(1 + \frac{47 \cdot 10^3}{27 \cdot 10^3}\right) = 30,7V, \quad (2.7)$$

Na obrázku Obr 2.5 je výsledek simulace, který je možný ověřit výpočtem, avšak tento výpočet nesouhlasí s výsledkem první simulace, jelikož nastavené výstupní by přesahovalo napájecí napětí, je jím limitováno a výpočet nezohledňuje limitaci napájecím napětím. Avšak na výstupu nelze dosáhnout ani plného napájecího napětí v důsledku úbytku napětí na operačním zesilovači. Druhá simulace potvrzuje výpočet vztah (2.7). Aby bylo možné nastavit na výstupu zdroje nulové napětí, jako napájecí napětí musí být přivedeno, namísto 33 V proti zemi (0V), 33 V proti -5 V. Tím pádem zesilovač považuje jako zem záporné napájecí napětí a je možné nastavit na výstupu zdroje 0 V, což dokazuje simulace na obrázku Obr 2.7.



Obr 2.6: Schéma napěťového zesilovače s kladným a záporným napájecím napětím.

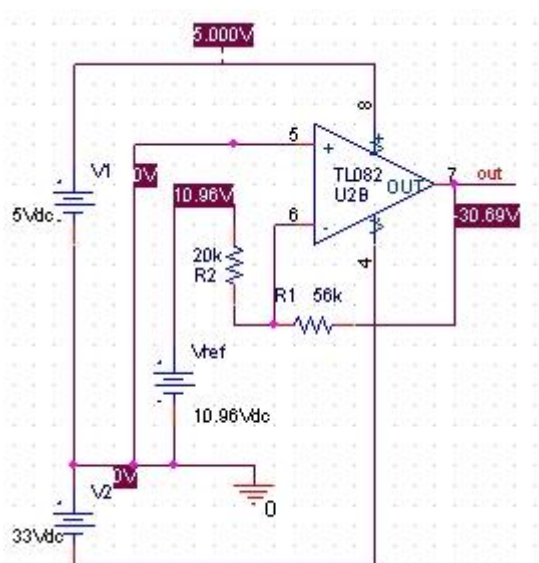


Obr 2.7: Převodní charakteristika napěťového zesilovače v oblasti nulového vstupního napětí.

Na obrázku Obr 2.7 je znázorněna převodní charakteristika napěťového zesilovače, tj. závislost výstupního napětí U_{OUT} na vstupním napětí V_{in} . Tato převodní charakteristika porovnává výstupní napětí operačního zesilovače s přídavným záporným napájecím napětím a výstupní napětí operačního zesilovače s pouze kladným napájecím napětím.

Jestliže by byl požadavek na záporné výstupní napětí, není potřeba zdroj záporného referenčního napětí, je třeba změnit typ zapojení operačního zesilovače na invertující zesilovač, kde je použit pouze záporný vstup. Kladný vstup je uzemněn, mezi vstupy je opět nulové napětí a pro výstupní napětí tohoto zapojení platí vztah (2.8). Také se musí změnit napájecí napětí, jelikož napájecí napětí opět limituje výstupní napětí, je nutné napájení +5 V a -33 V.

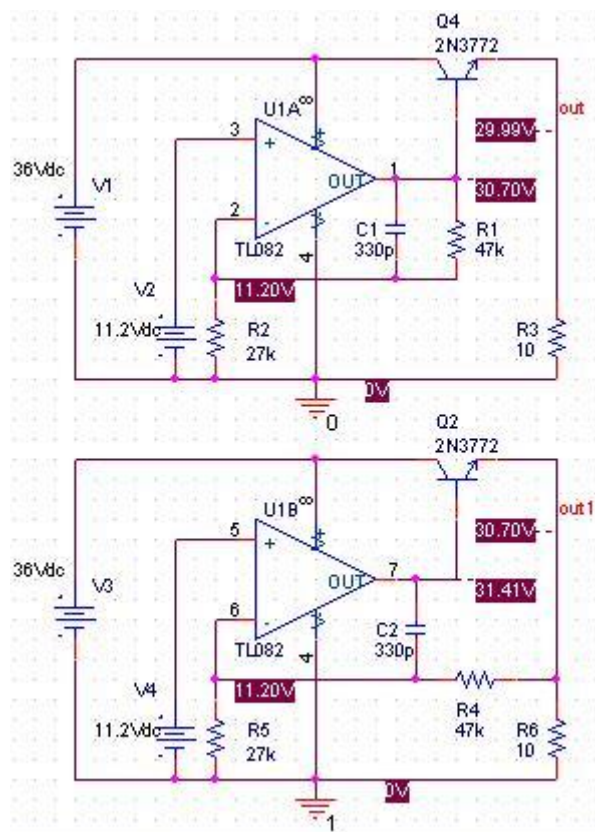
$$U_2 = U_1 \cdot \left(-\frac{R_1}{R_2}\right) = 10,96 \cdot \left(-\frac{56 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^3}\right) = -30,69 \text{ V}, \quad (2.8)$$



Obr 2.8: Schéma a výsledek simulace napětového zesilovače se záporným výstupním napětím.

Stabilizace výstupního napětí probíhá pomocí záporné zpětné vazby, kterou je odpor vedoucí z výstupu operačního zesilovače nebo výstupu zdroje na záporný vstup operačního zesilovače. Na obrázku Obr 2.9 je schéma a simulace napětového zesilovače s proudovým zesilovačem. Poměrem odporů R_1 (R_4) a R_2 (R_5), je dáno zesílení operačního zesilovače. Jak je vidět z principiálního schématu v kapitole 1.2.3, operační zesilovač je ve funkci chybového zesilovače, v případě poklesu napětí na výstupu, jej dorovná na nastavené napětí.

Dokazuje to výsledek simulace, v prvním případě operační zesilovač nastavil na svém výstupu požadované napětí, ale vlivem úbytku napětí na výkonovém tranzistoru je na výstupu menší napětí o 0,7 V. V druhém případě vede zpětná vazba až na výstup zdroje, operační zesilovač tedy nastavuje požadované napětí na výstupu zdroje a ne na svém vstupu, tím pádem vlivem úbytku na výkonovém tranzistoru operační zesilovač nastavuje na svém výstupu větší napětí než výstupní, aby dorovnal úbytek vzniklý na výkonovém tranzistoru.



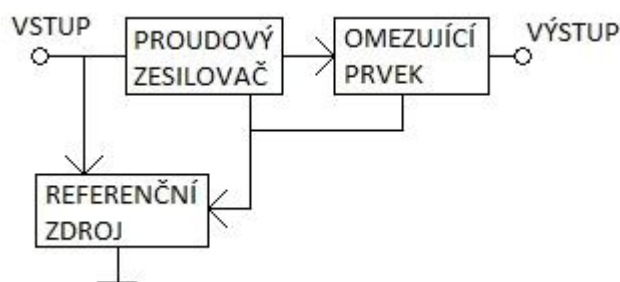
Obr 2.9: Schéma a výsledek simulace rozdílných zapojení zpětných vazeb.

2.5 Ochrany

2.5.1 Omezení výstupního proudu

V případě vyššího proudu odebíraným testovaným zařízením než je nastavená hodnota obvodem omezení proudu, zdroj se chová jako zdroj proudu, a upravuje výstupní napětí, dokud výstupní odebíraný proud neklesne zpět pod stanovený limit.

Nejjednodušším zapojením omezení proudu tranzistor s odporem, je to omezení s pevně nastaveným proudem. Avšak jednoduchost má i své nevýhody, zapojení nemá vysokou účinnost, proto se doporučuje pro omezení menších proudů, např. 100 mA. Zapojení využívá referenčního zdroje a proudového zesilovače. Princip spočívá v úbytku napětí na odporu R_1 , při překročení stanového limitu se na odporu R_1 objeví prahové napětí, které otvírá tranzistor Q_1 a ten snižuje napětí na bázi tranzistoru Q_2 , tj. napětí referenčního zdroje. Nevýhoda tohoto omezení proudu je umístění omezujícího prvku až za proudovým zesilovačem, tím klesá účinnost.



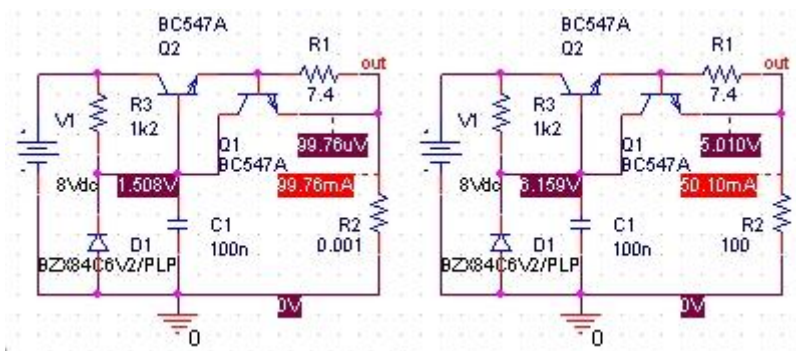
Obr 2.10: Blokové schéma jednoduchého omezení proudu.

Je k dispozici zdroj s výstupním napětím 8 V, jsou dány požadavky na výstupní parametry 5 V / 50 mA a omezení 100 mA, omezení v tomto případě nemůže být rovno maximálnímu proudu při výstupním napětí 5 V, jelikož zdroj kvůli odporu R_1 má vyšší výstupní odpor. Pro výstupní napětí 5 V je potřeba referenční zdroj cca 6,2 V kvůli úbytku cca 1,2 V na omezujícím členu. Pro odpor R_1 platí vztahy (2.9) a (2.10).

$$R_1 = \frac{U_{Q1BE}}{I_{OUTMAX}} = \frac{0,65}{10^{-1}} = 6,5\Omega, \quad (2.9)$$

$$P_{R1} = U_{Q1BE} \cdot I_{OUTMAX} = 6,5 \cdot 10^{-1} = 650\text{mW}, \quad (2.10)$$

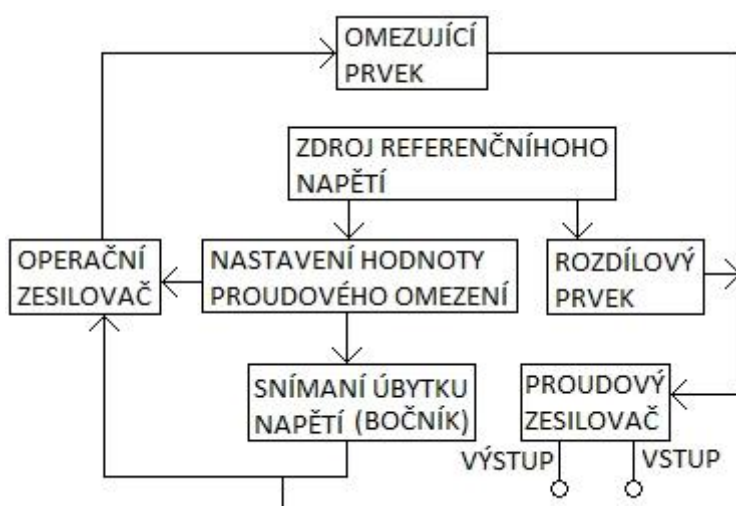
Avšak takto nastavená pojistka ještě není přesná, je nutné zkratovat výstup a doladit odpor R_1 , pokud je proud ve zkratu větší než je požadovaných 100mA, tranzistor má větší prahové napětí, proto je třeba zvýšit odpor R_1 a tím i napětí U_{Q1BE} .



Obr 2.11: Schéma a simulace nastavení proudu nakrátko.

Pokud je proud nakrátko menší než 100 mA, znamená to, že tranzistor Q_1 je otevřený příliš a napětí na odporu R_1 již přesahuje prahové napětí U_{BE} tranzistoru Q_1 a odpor R_1 je třeba snížit. Protože se nevyrábějí hodnoty např. v našem případě 7,4 Ω , ale nejbližší hodnoty 6,8 Ω a 8,2 Ω , vybere se vyšší hodnota 8,2 Ω a doladí na požadovanou hodnotu paralelním odporem 82 Ω .

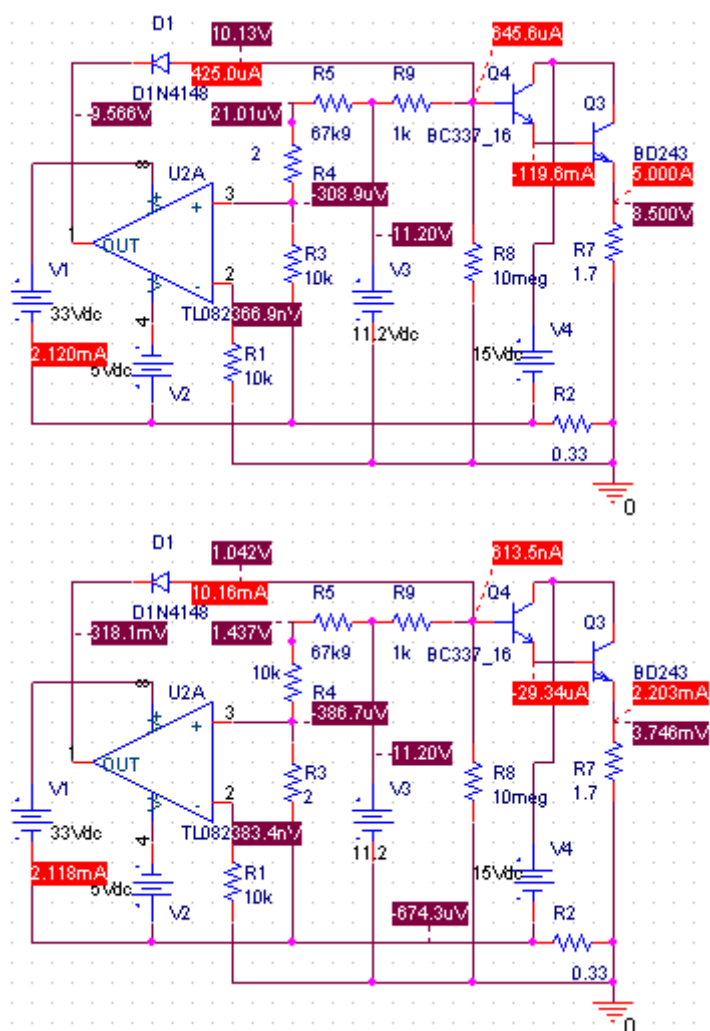
Na obrázku Obr 2.12 je blokové schéma omezení proudu s operačním zesilovačem, zajišťuje nastavený limit a zároveň minimální pokles napětí v zatíženém stavu. Princip je stejný jako u předchozího zapojení, snímá se úbytek napětí na odporu, potenciometrem se nastaví hodnota omezení proudu, ta představuje určitou úroveň napětí, které je na kladném vstupu operačního zesilovače, na záporný vstup je připojena úroveň úbytku napětí. Tzn. operační zesilovač pracuje jako komparátor. Ve stavu, kdy limit proudu není překročen, je na výstupu operačního zesilovače plné napětí cca 32 V a omezující prvek, v tomto případě pouze dioda v závěrném směru, při plném napětí je zavřena, která představuje řízený odpor. Jestliže hodnota přesáhne hodnotu limitu proudu, napětí na výstupu operačního zesilovače klesá a dioda se otvírá a omezuje tak napětí na zesilujícím prvku.



Obr 2.12: Blokové schéma omezení proudu s operačním zesilovačem.

Z výsledku simulace je vidět, že omezení pracuje už od 2-3 mA, odpory R_3 a R_4 představují potenciometr pro nastavení omezení proudu. Zdroj V_3 představuje zdroj referenčního napětí. Dioda D_1 je omezující prvek, odpor R_9 je rozdílový prvek, na kterém se objevuje úbytek napětí, pokud dojde k omezení proudu. Tento prvek je nutný, aby se při aktivním omezení nesnížilo výstupní napětí referenčního zdroje. Odpor R_8 představuje operační zesilovač, který zajistí nulový úbytek na rozdílovém prvku, jestliže není překročen limit omezení proudu a dvojice tranzistorů v zapojení darlington je proudový zesilovač.

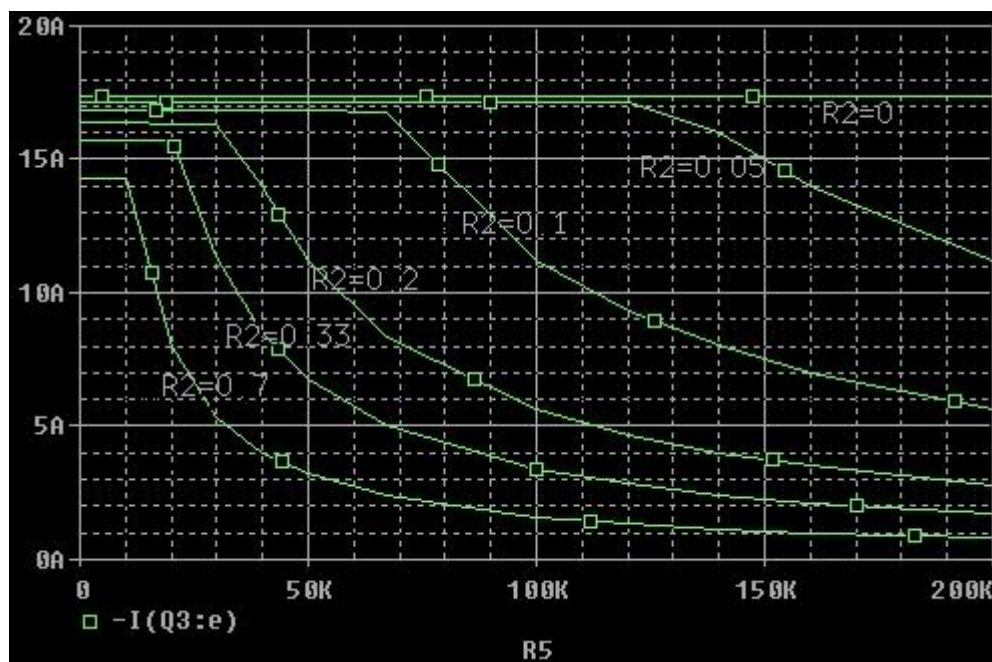
Pojistka v tomto zapojení poskytuje proud do zkratu až 5 A a to i do zátěže s maximálním napětím 8,5 V na výstupu. Výstupní napětí je samozřejmě možné nastavit v libovolném rozsahu v mezích dovolených hodnot tranzistorů či operačních zesilovačů. Pokles z nezatíženého do plně zatíženého stavu s maximálním napětím je pouze 1 V.



Obr 2.13: Schéma a simulace omezení proudu s operačním zesilovačem.

Maximální proud pojistky lze nastavit kombinací hodnot odporů R_2 a R_5 . Snížením hodnoty u obou odporů se dosáhne vyššího maximálního proudového limitu. Avšak nijak významně výstupní proud neomezuje, způsobuje pouze úbytek napětí. Slouží

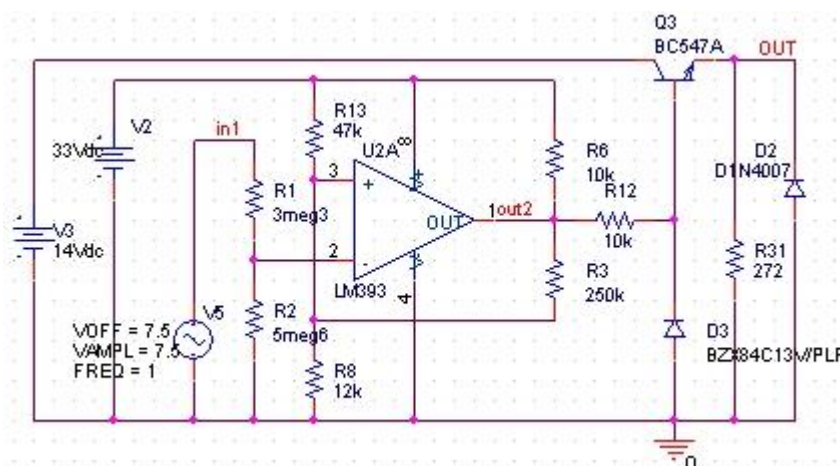
pouze k porovnávání napětí. Pokud zvýšíme R_5 , dosáhneme nižší hodnoty maximálního proudu. Na obrázku Obr 2.14 je závislost maximálního výstupního proudu na změně odporu R_5 , jednotlivé křivky jsou pro hodnoty odporu R_2 , je poznat, že od hodnoty $0,33 \Omega$ se průběh křivky už příliš nemění, roste jen úbytek napětí mezi hlavním zdrojem V_4 a výstupním napětím. Také s rostoucí hodnotou odporu R_5 nad $200 \text{ k}\Omega$ se maximální proud pojistky téměř nemění, je to způsobeno poměrem hodnoty potenciometru a odporu R_5 , který se také nemění. Pokud v zapojení bude místo odporu R_2 zkrat, nastaví se tím pevná hodnota omezení proudu, protože operační zesilovač je ve funkci komparátoru, a nemá již druhou hodnotu k porovnání.



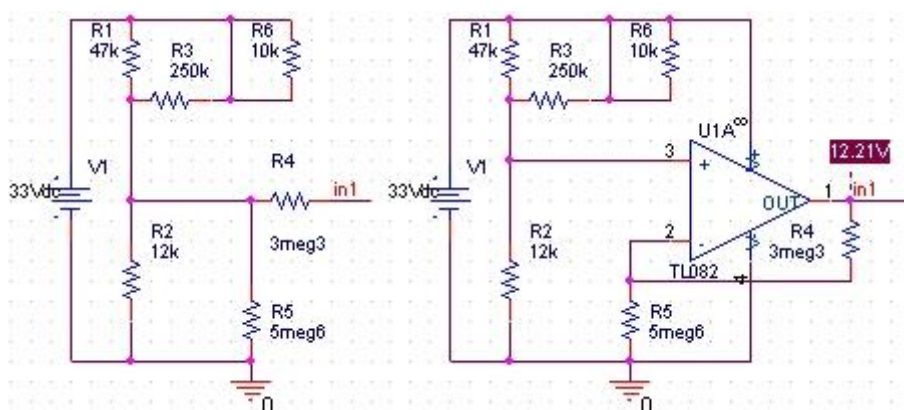
Obr 2.14: Simulace závislosti výstupního maximálního proudu na rozmítání odporů R_2 a R_5 .

2.5.2 Přepínání výkonu

Přepínání výkonu bylo navrženo z důvodu zmenšení výkonové ztráty na výkonových tranzistorech. Transformátor má odbočku na 12 V_{AC}. Po usměrnění je na této odbočce 14 V. Tedy komparátor je navržen taky, aby svůj výstup překlápěl při úrovních cca 10 V a 12 V. Rozhodovací úrovně lze určit náhradou zapojení komparátoru jeho odporovým zapojením.

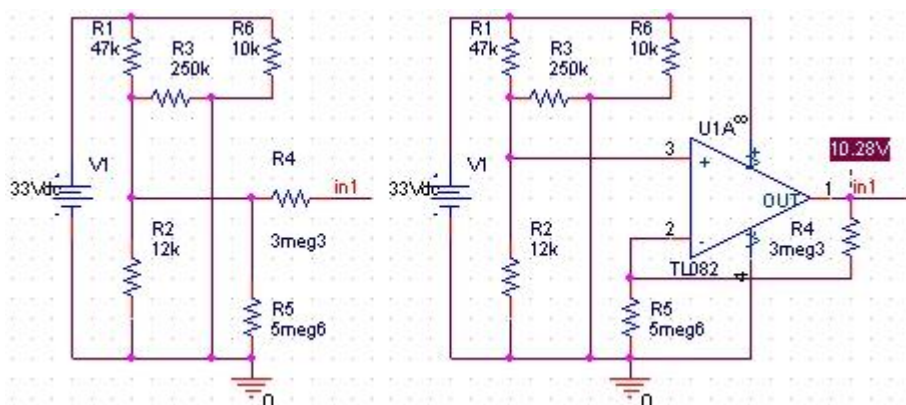


Obr 2.15: Schéma přepínání výkonu.



Obr 2.16: Náhrada obvodu komparátoru pro úroveň U_{IHL} (nalevo) a její simulace (napravo).

Přenos komparátoru se vynásobí s přenosem děliče, jelikož dělič není přímo spojen s rezistory v komparátoru, ale je oddělen vstupem operačního zesilovače, který má vstupní odpor 10 M Ω . Přenos děliče se počítá jako jeho obrácená hodnota (a to je přenos neinvertujícího zapojení s operačním zesilovačem), protože přívod in1 není výstup ale vstup. Pro učení rozhodovací úrovně U_{IHL} se zapojení nahradí zapojením na obrázku Obr 2.16. Pro učení rozhodovací úrovně U_{ILH} se zapojení nahradí zapojením na obrázku Obr 2.17. Odpor R_6 není třeba v náhradě odporovým zapojením uvažovat, jelikož jak je vidět, při úrovni U_{IHL} komparátor připojí výstup na napájení, tj. zdroj V_1 , při rozhodovací úrovni U_{ILH} připojí výstup na zem, takže odpor R_6 opět neovlivňuje rozhodovací úrovně.



Obr 2.17: Náhrada obvodu komparátoru pro úroveň U_{ILH} (nalevo) a její simulace (napravo).

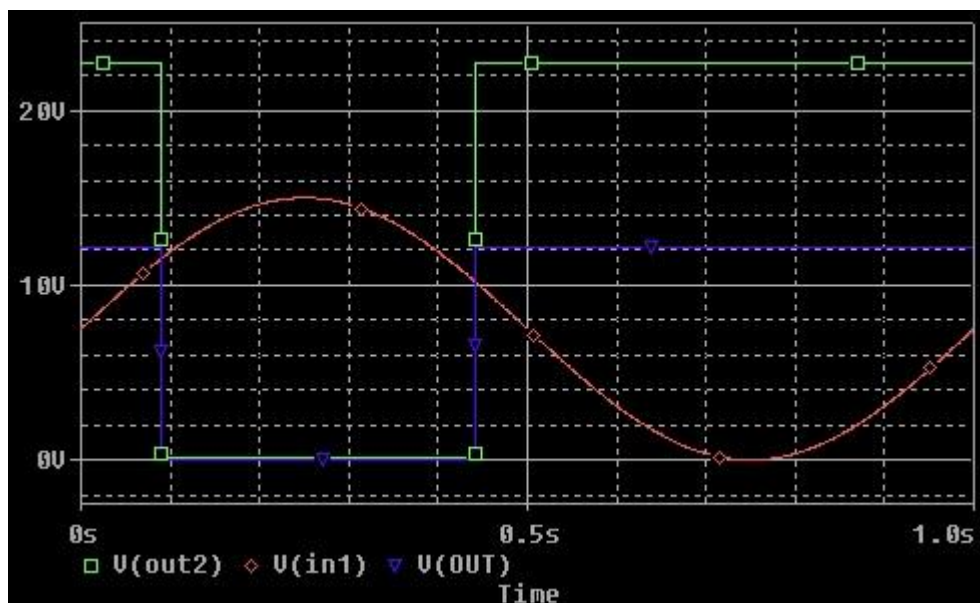
Pro rozhodovací úroveň U_{IHL} platí vztah (2.11) a pak upravený vztah (2.12), pro rozhodovací úroveň U_{ILH} platí vztah (2.13) a upravený vztah (2.14).

$$U_{IHL} [V] = U_{V4} \cdot \frac{R_2}{\left(R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}\right)} \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_5}, \quad (2.11)$$

$$U_{IHL} = U_{V4} \cdot \frac{(R_2 \cdot R_4 + R_2 \cdot R_5) \cdot (R_1 + R_3)}{R_5 \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3)} = 12,21V, \quad (2.12)$$

$$U_{ILH} [V] = U_{V4} \cdot \frac{\frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}}{\left(R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}\right)} \cdot \frac{R_4 + R_5}{R_5}, \quad (2.13)$$

$$U_{ILH} = U_{V4} \cdot \frac{R_2 \cdot R_3 \cdot (R_4 + R_5)}{R_5 \cdot (R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3)} = 10,27V, \quad (2.14)$$



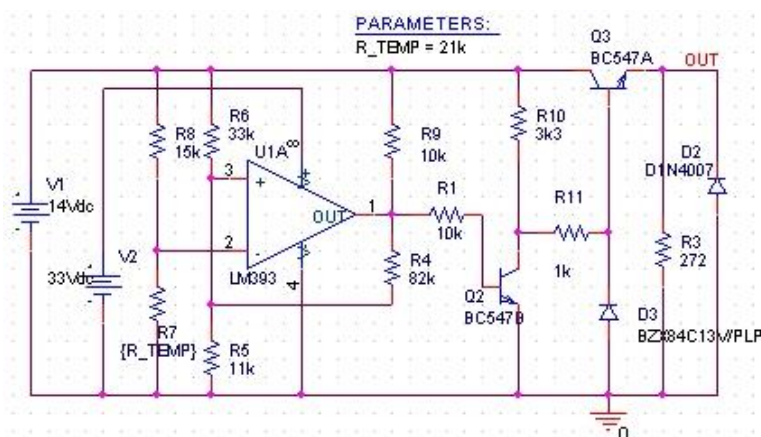
Obr 2.18: Zobrazení rozhodovacích úrovní komparátoru a napětí na výstupu.

Na Obr 2.18 jsou vidět rozhodovací úrovně komparátoru, jsou to průsečíky sinového průběhu na vstupu komparátoru a obdélníkového průběhu na výstupu komparátoru out2, výstup OUT je napětí na cívce relé. Pro samotnou činnost přepínání výkonu není důležité, jestli komparátor při přechodu úrovní 12,21 V k 0 V přepne do maximální nebo minimální úrovně, v tomto případě závisí pouze na zapojení kontaktů relé, které lze prohodit.

2.5.3 Teplotní pojistka

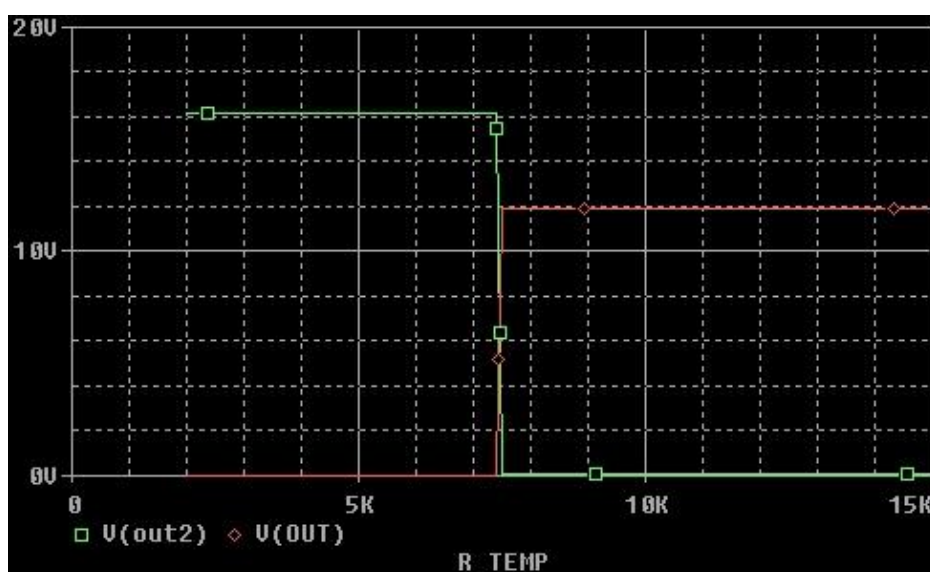
Pokud teplota na chladiči výkonového prvku překročí stanovenou hodnotu cca 70 °C, obvod odpojí zátěž od výstupu zdroje.

Je využito téměř stejného zapojení komparátoru jako u přepínání výkonu, avšak na vstupu není dělič zapojen na regulovaný zdroj napětí, ale na pevné napětí. V děliči je zapojen negativní termistor NTC, který je upevněn na chladiči výkonového prvku, s hodnotou 47 kΩ při teplotě 25 °C a 2,3 kΩ při teplotě 100 °C. Výstup bude odpojen při hodnotě termistoru cca 7,5 kΩ, což by mělo představovat teplotu 70 °C (pouze předpokládaná, v praktické části bude změřena).



Obr 2.19: Schéma a simulace zapojení tepelné pojistky (schéma komparátoru převzato z [4]).

Výsledek simulace rozmítání odporu termistoru ukazuje, že napětí na výstupu je stabilní až po hodnotu termistoru $R_7 = 7,5 \text{ k}\Omega$, což představuje teplotu na chladiči přibližně 70 °C, při hodnotě $R_7 = 7,5 \text{ k}\Omega$ se výstup odpojí.



Obr 2.20: Simulace závislosti výstupního napětí na rozmítání odporu termistoru.

2.5.4 Měkký náběh zdroje (softstart)

Softstart odstraní nárazovou špičku při zapnutí zdroje, a tím i zamezí zákmitu, v případě zapnutí zdroje s připojenou zátěží. Zesilovací činitel h_{21E} je zvolen 200, pak pro proud bázi platí vztah (2.18). Podmínka pro návrh stabilizátoru určuje stejný nebo větší proud Zenerovou diodou než je proud tekoucí zátěží, platí vztah (2.19). Vztah (2.20) určuje výstupní napětí operačního zesilovače, které je vstupním napětím pro stabilizátor. A pro odpor R_1 platí Ohmův zákon ve vztahu (2.21). Pro časovou konstantu zpožďovacího obvodu platí vztah (2.22). Výsledek časové konstanty se dá ověřit vztahem (2.23), čas t , kdy napětí na kondenzátoru dosáhne hodnoty $u_{CAP}(t)$, se rovná časové konstantě τ .

$$I_B = \frac{I_C}{h_{21E}} = \frac{44 \cdot 10^{-3}}{200} = 220 \mu A, \quad (2.18)$$

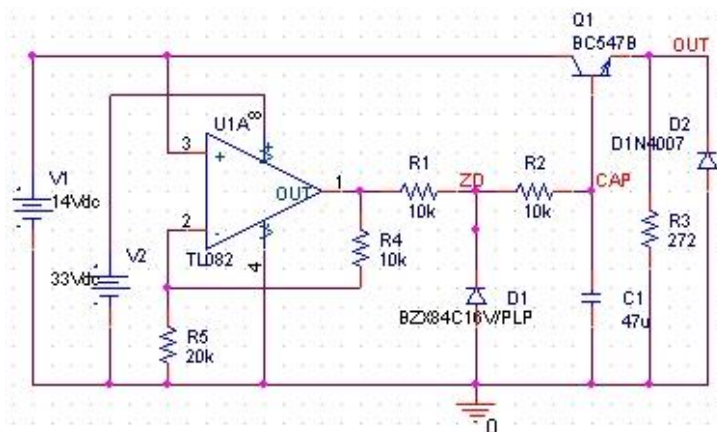
$$I_{R1} = 2 \cdot I_B = 2 \cdot 259 \cdot 10^{-6} = 440 \mu A, \quad (2.19)$$

$$U_1 = U_{V1} \cdot \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right) = 14 \cdot \left(1 + \frac{10^4}{20 \cdot 10^3}\right) = 21V, \quad (2.20)$$

$$R_1 = \frac{U_1 - U_{ZD}}{I_{R1}} = \frac{21 - 16}{440 \cdot 10^{-6}} = 11,4k\Omega, \quad (2.21)$$

$$\tau = R_2 \cdot C_1 = 10^4 \cdot 47 \cdot 10^{-6} = 470ms, \quad (2.22)$$

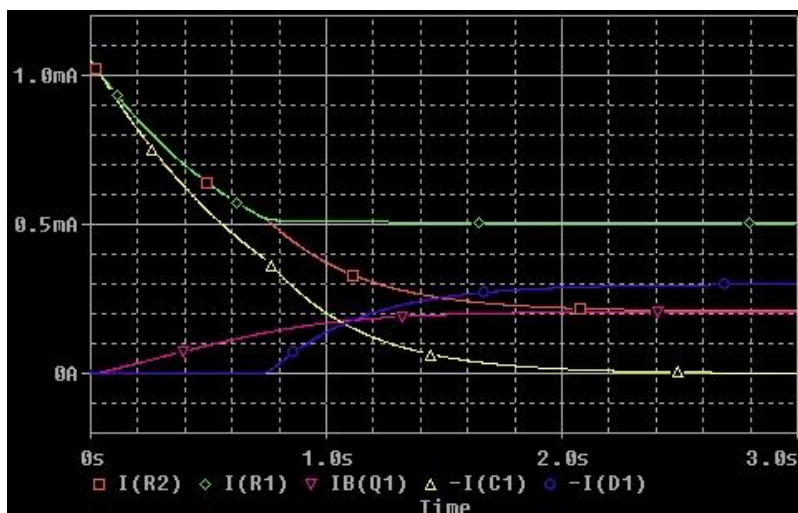
$$u_{CAP}(t) = 0,63 \cdot U_{CAPMAX} = 0,63 \cdot 13 = 8,19V, \quad (2.23)$$



Obr 2.21: Schéma softstartu.

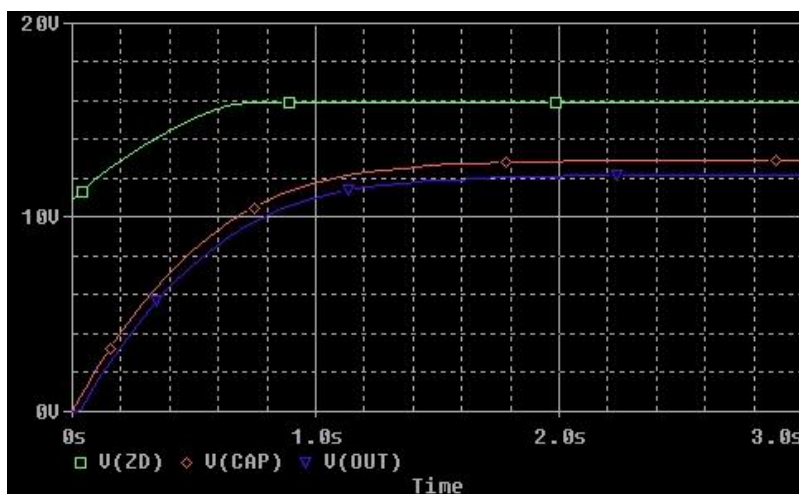
Softstart využívá nabíjení kondenzátoru jako zpoždění. Simulace na obrázku Obr 2.22 ukazuje proud tekoucí kondenzátorem, který se zpočátku rovná proudům odpory R_1 i R_2 , avšak proud R_1 neklesá tak rychle jako proud kondenzátorem, tím také stoupá proud do báze tranzistoru Q_1 , v čase 2s se proudy odporem R_2 a bázi tranzistoru

Q_1 již téměř rovnají, protože proud kondenzátorem je nulový. Proud zenerovou diodou D_1 je jen o málo vyšší, je to nastavenou rezervou, jelikož odpory byly vypočítány 11,4 k Ω . Byly voleny 10 k Ω pro proudovou rezervu.



Obr 2.22: Závislosti proudů ve zpožďovacím obvodu na čase.

Proud odporem R_1 je 2,5x vyšší vůči proudu odporem R_2 , protože je nutné dodržet podmínku (2.1) pro návrh stabilizátoru se Zenerovou diodou. Proto je nutné, aby se odpory R_1 a R_2 rovnaly, odpor R_2 zajišťuje stejný proud do báze tranzistoru Q_1 jako je proud tekoucí diodou D_1 . Jestliže by odpor R_2 byl menší, bázi tranzistoru Q_1 by tekla větší proud než diodou D_1 , podmínka (2.1) by byla porušena a napětí stabilizátoru by mohlo poklesnout. Pokud bude odpor R_2 větší než R_1 , stabilizátor bude sice pracovat správně, ale bude růst úbytek napětí na odporu R_2 , a tím klesat napětí na výstupu. Na obrázku Obr 2.23 je vidět stoupající napětí na diodě, kondenzátoru a na výstupu, tj. na cívce relé. Tzn. relé sepne kontakt za cca 1,2 s od zapnutí zdroje. OZ je použit právě kvůli zmíněné podmínce rovnosti odporů R_1 a R_2 , bez operačního zesilovače a s dodržáním podmínky (2.1) by napětí na výstupu nedosahovalo 12 V.



Obr 2.23: Simulace výstupního napětí v závislosti na čase.

2.6 Proudový zesilovač

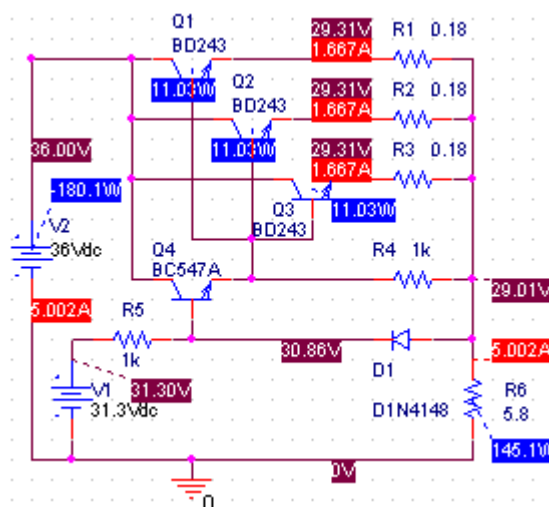
Na výstupu napěťového zesilovače je napětí v rozsahu 0 až 31,3 V, tj. téměř požadované výstupní napětí. Jako proudový zesilovač jsou použity tranzistory v darlingtonově zapojení. Z výsledku simulace je možné vidět, že účinnost zdroje stoupá s rostoucím výstupním napětím. Výkonový prvek má nejnižší účinnost při nulovém napětí na výstupu. Např. při výstupním napětí 1,9 V a připojené zátěži $R_6 = 5,8 \Omega$, je do zátěže dodáván výkon v řádu stovek mW, na výkonovém prvku je ztráta $P_{Q1+Q2+Q3} = 4 \text{ W}$, a účinnost zdroje je téměř nulová. Při nastaveném výstupním napětí $U_{OUT1} = 30 \text{ V}$ je na výstupu pokles 0,99 V, tzn. výstupní napětí je 29,01 V a na výkonovém prvku je úbytek 6,69 V, ještě na výkonových odporech zařazených v emitorech je úbytek 0,3 V. Z Ohmova zákona, zátěží i výkonovým prvkem protéká proud $I_{R12} = 5,00 \text{ A}$, je to dáno vztahem (2.24) a ztráta na výkonovém prvku tak dosahuje $P_{Q1+Q2+Q3} = 33,45 \text{ W}$ (vztah (2.26)), do zátěže, odporu R_{12} , je dodáván výkon $P_{R6} = 145,1 \text{ W}$ (vztah (2.25)). Účinnost je nejvyšší při maximálním výstupním proudu i napětí, dokazuje to vztah (2.27)

$$I_{R12} = I_{Q1E} + I_{Q2E} + I_{Q3E} = \frac{U_{OUT1}}{R_{12}} = \frac{29,01}{5,80} = 5,00 \text{ A}, \quad (2.24)$$

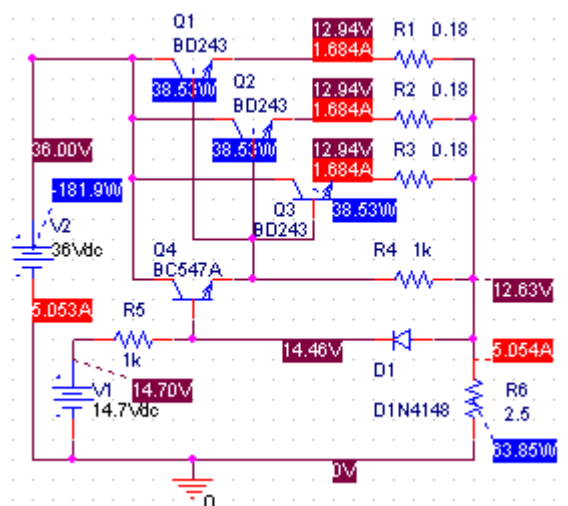
$$P_{R6} = (I_{Q1E} + I_{Q2E} + I_{Q3E}) \cdot U_{OUT1} = 5,00 \cdot 29,01 = 145,1 \text{ W}, \quad (2.25)$$

$$P_{Q4+Q6} = (I_{Q1E} + I_{Q2E} + I_{Q3E}) \cdot (U_{V2} - U_{R6} - U_{R1}) = 5,00 \cdot (36 - 29,01 - 0,3) = 33,45 \text{ W}, \quad (2.26)$$

$$\eta = \frac{P_{R6}}{P_{V2}} \cdot 100 = \frac{145,1}{180,1} \cdot 100 = 80,57\%, \quad (2.27)$$



Obr 2.24: Schéma zapojení a simulace tranzistorového proudového zesilovače.



Obr 2.25: Simulace tranzistorového proudového zesilovače s maximálním výkonem na tranzistorech

3 NÁVRH TRANSFORMÁTORU

3.1 Požadované parametry:

Napětí na výstupech sekundárních vinutí jsou určeny vztahy, vychází se z hodnot požadovaných pro stejnosměrné obvody, tj. samotný zdroj a ochrany.

$$\begin{aligned}U_{ZDROJ} &= 36V_{DC}, I_{ZDROJ} = 5A_{DC}, \\U_{ZAPORNE} &= -11V_{DC}, I_{ZAPORNE} = 100mA_{DC}, \\U_{OCHRANY} &= 14V_{DC}, I_{OCHRANY} = 1A_{DC}, \\P_{CELKOVY} &= U_{ZDROJ} \cdot I_{ZDROJ} + U_{ZAPORNE} \cdot I_{ZAPORNE} + \\&+ U_{OCHRANY} \cdot I_{OCHRANY} = 390W,\end{aligned}\tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}U_1 &= 230V_{AC}, \\U_{21} = U_{22} &= \frac{U_{ZDROJ}}{\sqrt{2}} \cdot 1,1 = 28V_{AC}, \\U_{22} = U_{22} &= \frac{U_{ZAPORNE}}{\sqrt{2}} \cdot 1,1 = 9V_{AC}, \\U_{23} = U_{22} &= \frac{U_{OCHRANY}}{\sqrt{2}} \cdot 1,1 = 12V_{AC}\end{aligned}\tag{3.2}$$

3.2 Výpočet parametrů

Síťové transformátory mají velmi vysokou účinnost, je to způsobeno přítomností magnetického jádra, na kterém jsou cívky navinuty, magnetické jádro usměřňuje magnetický indukční tok. Jestliže by transformátor jádro neměl, účinnost by byla mnohem nižší, a na sekundární cívce by byl jen zlomek z příkonu na primárním vinutí.

Transformátory EI mají účinnost η cca 70 až 93 % podle hodnoty výkonu. Účinnost η toroidních transformátorů je vyšší, díky celistvosti jádra a kvalitnějšímu materiálu jádra, je to 90 až 95% podle výkonu, s rostoucím výkonem roste i účinnost pro EI i toroidní transformátory. Transformátor se navrhuje pro frekvenci $f = 50$ Hz. Pro návrh byl vybrán typ transformátoru toroidní, právě kvůli jeho vysoké účinnosti a velmi dobrým vlastnostech v amatérských podmínkách.

3.2.1 Celkový výkon P_{OUT} a příkon P_{IN}

Příkon transformátoru je dán výkonem transformátoru, ztrátami ve vinutí P_{VINUTI} a ztrátami v jádře P_{JADRO} . Účinnost toroidního transformátoru je již zmíněných 90 až 95 %, ztráty tedy tvoří 5 až 10 % příkonu, tyto ztráty procentuálně klesají s rostoucím výkonem.

$$P_{IN} = \frac{P_{CELKOVY}}{\eta} (1 + k) = \frac{390}{0,9} \cdot 1,1 = 477VA, \quad (3.3)$$

Použit bude transformátor 500VA.

3.2.2 Volba průřezu jádra

Jádro pro toroidní transformátor je vyráběno a navíjeno z anizotropních trafoplechů s keramickou izolací o tloušťce 230 až 350 μm a po navinutí regeneračně vyžeháno. Vinutí jsou navinuta z měděných vodičů s izolací 2L, od jádra jsou izolována víčky (polypropylen, polyester), nebo lakem naneseným práškovou metodou.

$$S_{JADRO} = \sqrt{\frac{P_{IN}}{B}} = \sqrt{\frac{500}{1,6}} = 17,7cm^2, \quad (3.5)$$

3.2.3 Počet závitů primárního vinutí N_1 a sekundárních vinutí N_2

Pro výpočet počtu závitů primárního vinutí se vychází ze vztahu (3.6), kvalitní trafoplechy mají sycení $B = 1,65 T$ až $1,5 T$, je voleno $B = 1,6 T$.

$$U_1 = 4,44 \cdot B \cdot S_{JADRO} \cdot f \cdot N_1, \quad (3.6)$$

$$N_1 = \frac{U_1}{4,44 \cdot B \cdot S_j \cdot f} = \frac{230}{4,44 \cdot 1,6 \cdot 17,7 \cdot 10^{-4} \cdot 50} = 366, \quad (3.7)$$

$$N_{21} = N_{22} = U_{21} \cdot \frac{N_1}{U_1} = 28 \cdot \frac{366}{230} = 46, \quad (3.8)$$

$$N_{23} = N_{24} = U_{23} \cdot \frac{N_1}{U_1} = 9 \cdot \frac{366}{230} = 15, \quad (3.9)$$

$$N_{25} = N_{26} = U_{25} \cdot \frac{N_1}{U_1} = 12 \cdot \frac{366}{230} = 19, \quad (3.10)$$

3.2.4 Proud primárním vinutím I_1 a průřezy vodičů

$$I_1 = \frac{P_{IN}}{U_1} = \frac{500}{230} = 2,2A, \quad (3.11)$$

$$I_{21} = I_{ZDROJ} \cdot 1,3 = 5 \cdot 1,3 = 6,3A, \quad (3.12)$$

$$I_{23} = 0,2\text{A (voleno)},$$

$$I_{25} = I_{ZDROJ} \cdot 1,3 = 1 \cdot 1,3 = 1,3\text{A}, \quad (3.13)$$

$$S_{L1} = \frac{I_1}{J} = \frac{2,2}{2,5} = 0,88\text{mm}^2, \quad (3.14)$$

$$S_{L21} = S_{L22} = \frac{I_{21}}{J} = \frac{6,3}{2,5} = 2,52\text{mm}^2, \quad (3.15)$$

$$S_{L23} = S_{L24} = \frac{I_{23}}{J} = \frac{0,2}{2,5} = 0,08\text{mm}^2, \quad (3.16)$$

$$S_{L25} = S_{L26} = \frac{I_{25}}{J} = \frac{1,3}{2,5} = 0,52\text{mm}^2, \quad (3.17)$$

Proudová hustota je volena $J = 2,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Zvolené hodnoty průřezů vodičů udává tabulka Tab. 3.1. Na vinutích L_{21} a L_{22} bude odbočka na 12 V_{AC}.

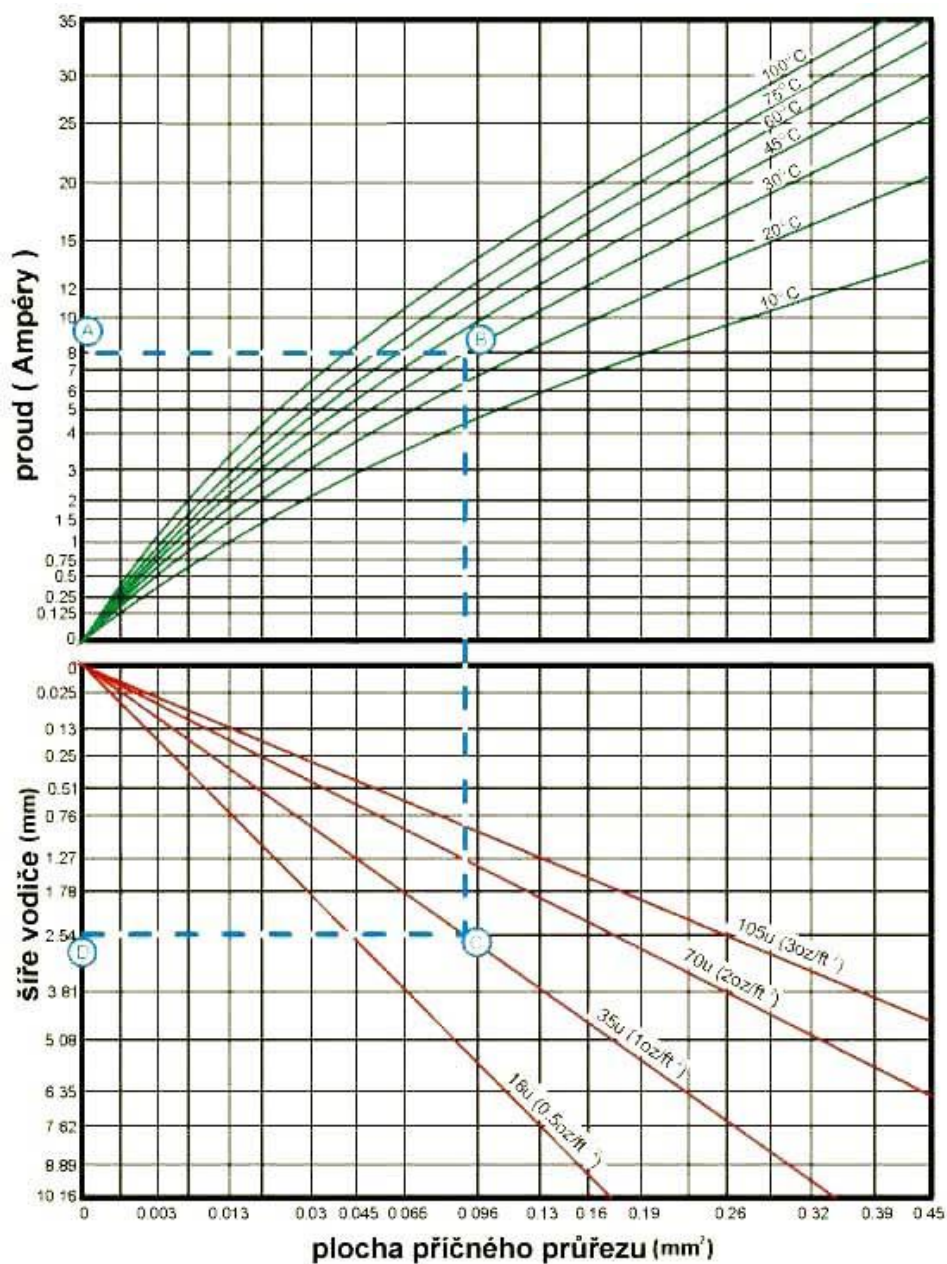
Tab. 3.1: Průřez vodiče pro jednotlivá vinutí.

Vinutí	Zatížitelnost vinutí [A]	Průřez vodiče $S_{Lnn} [\text{mm}^2]$	Průměr vodiče $d_{Lnn} [\text{mm}]$	Počet závitů $N_{nn} [-]$
Primární L_1	2,2	0.88	1,06	366
Sekundární L_{21}	6,3	2.52	1,80	39
Sekundární L_{22}	6,3	2.52	1,80	39
Sekundární L_{23}	0,2	0.08	0,32	15
Sekundární L_{24}	0,2	0.08	0,32	15
Sekundární L_{25}	1,3	0.52	0,82	19
Sekundární L_{26}	1,3	0.52	0,82	19

4 KONSTRUKCE

4.1 Návrh desek plošných spojů

Plošné spoje musí být dimenzovány na maximální proud, který jimi bude protékat, tak aby teplota po delším provozu byla přijatelná. Plošné spoje jsou vyrobeny na desce s měděnou vrstvou o tloušťce 35 μm . Maximální proud plošnými spoji je 5 A.



Obr 4.1: Graf proudové zatížitelnosti v závislosti na požadovaném oteplení [13].

Plošné spoje, kterými bude protékat proud 5 A, je tedy nutné dimenzovat na šířku 2,54mm. Jak je vidět z grafu na obrázku Obr 4.1, pokud plošný spoj bude dimenzován na 2.54mm, bude při protékajícím proudu 4,5 A plošný spoj oteplen o 10 °C, pokud jím bude protékat 6,5 A, bude plošný spoj oteplen o 20 °C, tedy v případě protékajícího proudu 5 A bude plošný spoj oteplen o cca 12 °C.

Plošné spoje pro SMD jsou dimenzovány na šířku 0,81 mm, plošné spoje mezi kontakty SMD součástek jsou z důvodu dodržení izolační mezery dimenzovány na šířku 0,61 mm. Ostatní spoje jsou dimenzovány na šířku 1,27 mm.

4.2 Oživení desky zdroje

Názvy součástek, které jsou používány dále v textu, jsou brány podle zapojení v příloze. Při zapojení napájení deska fungovala na první pokus. Pro testování zdroje je nejlepší místo pouzder DIL8 operačních zesilovačů osadit patice pro DIL8. Jestliže nefunguje, je nutné proměřit bloky, které jsou v této práci popsány, tzn. je nutné změřit napětí referenčního zdroje, jestliže se na výstupu referenčního zdroje (IC₂ – pin 7) nachází cca 11 V, odpojíme diodu D₇ z výstupu operačního zesilovače pro omezení proudu, zdroj by měl fungovat i bez zapojené části omezení proudu.

Pak je nutné změřit napětí na kladném vstupu operačního napěťového zesilovače (IC₁ – pin 5) se zesílením 2.74. Napětí na tomto vstupu se musí rovnat napětí referenčního zdroje, jelikož napětí na odporech mezi referenčním zdrojem a kladným vstupem operačního zesilovače (OZ) je nulové, protože odpor mezi vstupy OZ je několikanásobně vyšší. Pokud je nastaveno napětí 30 V na výstupu zdroje, na výstupu napěťového OZ (IC₁ – pin 1) by se mělo nacházet 32 V, jelikož operační zesilovač nestabilizuje svůj výstup, ale výstup zdroje. Na svém výstupu dorovnává napětí, tak aby bylo vyšší o úbytek napětí na tranzistorech v zapojení se společnouází, což je proudový zesilovač.

Pokud zdroj funguje, jak je zde popsáno, zapojíme diodu D₇, kterou jsme odpojili pro testování. Funkci omezení proudu můžeme ověřit změřením úbytku napětí na výkonovém odporu (2 odpory paralelně R₁₁ a R₁₂), který slouží jako bočník, a spojuje napájecí zem a výstupní zem zdroje. Pokud je hodnota toho odporu volena 0,34 Ω, je na tomto odporu při odběru 5 A ze zdroje úbytek 1,7 V. Pokud není překročen nastavený limit výstupního proudu, je na výstupu OZ (IC₁ – pin 1) pro omezení proudu 30 V, pokud je překročen, napětí na výstupu tohoto OZ klesne k 0V, tento stav otevře tranzistor pro signalizaci omezení proudu a LED₁ se připojí k napájecímu napětí. Zároveň je v aktivním režimu dioda D₇, dorovnává napětí, na kladném vstupu napěťového OZ, tak aby nebyl překročen limit proudu, to se projeví vznikem úbytku na již zmíněném odporovém článku mezi referenčním zdrojem a napěťovým OZ.

Funkčnost zdroje lze ověřit připojením ampermetru (s vyšším rozsahem, např. 10 A) na výstup zdroje, před připojením ampermetru musí být jezdec trimru R₁₀ nastaven na maximální hodnotu. Napětí musí klesnout k nule, a jestliže je jezdec potenciometru pro nastavení proudového limitu na hodnotě 10 kΩ, je nastaven limit 5 A, a tedy ampermetr musí ukazovat přibližně 5 A, odpory R₁₉ a R₂₀ lze nastavit hodnotu přesně 5 A, byla nastavena hodnota 5,04 A. Odpory R₁₉ a R₂₀ jsou paralelně, Odpor R₁₉ má hodnotu 68 kΩ, pokud je zapojen pouze R₁₉, je pak maximální výstupní proud asi 4,85 A, hodnotou odporu R₂₀ 2,2 MΩ je maximální výstupní proud dorovnán

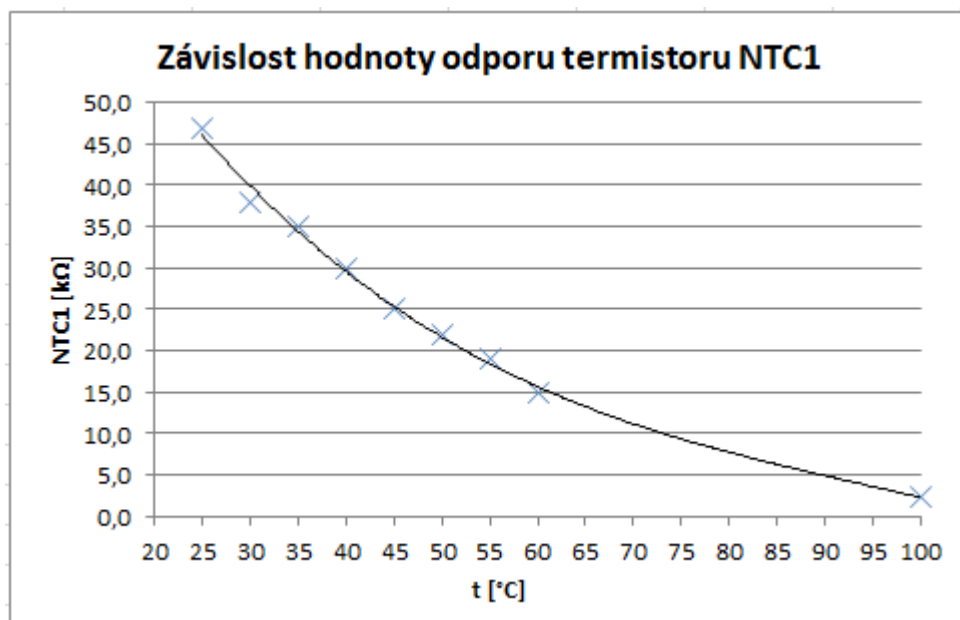
na 5,04 A. Pokud vytočíme jezdec potenciometru R17 pro nastavení proudového limitu na minimální hodnotu, je pak minimální výstupní proud nastaven na cca 30 mA. Opět je připojen ampermetr s nižším rozsah, např. 500 mA, a otačíme trimrem R10, tak dlouho, dokud se nerozsvítí LED₁, proud protekající těsně před rozsvícením LED₁ je hranice minimálního výstupního proudu, tato hranice je asi 4 mA.

4.3 Oživení desky ochran

Při ožívování této desky byl nejprve oživen softstart, je připojeno napájecí napětí 14 V pro tuto desku a napájení 33 V pro OZ a komparátory, do svorkovnice J₅ zatím nejsou připojeny síťové vodiče. Za 1.2 sekundy relé zkratuje odpor R₉, jehož hodnota je 47 Ω / 10 W. Po té zkratuje relé odpor, změříme odpor na svorkovnici J₅, jeho hodnota musí být blízka nule. Dobu, za jak dlouho relé zkratuje odpor, lze nastavit odpory R₃₁, R₃₂ a kondenzátorem C₂.

Následně je připojeno externí napětí laboratorního zdroje na svorkovnici J4 kontakt vedoucí na odpor R₄. Napětí toho zdroje regulujeme od 30 V až k 0 V, při přeskočení 10,4 V relé přepne na druhý kontakt (svorkovnice J₃ – kontakt dál od okraje desky), při zpětné regulaci napětí zdroje k 30 V, při přechodu napětí 12 V, relé přepne zpět na kontakt blíže k okraji desky.

Hodnoty rozhodovacích úrovní lze nastavit R₁, R₄, R₂, R₃ a R₅. Avšak odpory R₁ a R₄ doporučuji nechat v řádu MΩ, nejlépe nechat na těchto hodnotách, aby odpory neovlivňovaly výstupní napětí operačního zesilovače. Doporučuji měnit odpory R₂ a R₃, odpor R₅ má vliv na rozdíl mezi rozhodovacími úrovněmi, tedy hodnotu odporu R₅ je dobré volit minimálně dvakrát až třikrát vyšší než hodnoty odporů R₂ a R₃.



Obr 4.2: Graf hodnoty odporu termistoru v závislosti na teplotě

Teplotní pojistka je nastavena téměř stejně, pouze vstupní napětí na záporném vstupu

není externí, ale vytváří jej dělič, složený z odporu R_{22} a termistoru NTC_1 . Při ožívování je místo termistoru NTC_1 připojen trimr $47\text{ k}\Omega$. Relé přepne přepne při přechodu hodnotou odporu $8,9\text{ k}\Omega$, na cívce relé pak klesne napětí na 0 V . Při zpětném přechodu hodnotou $20\text{ k}\Omega$ se na cívce oběví opět 12 V , a relé připojí zpět výstup zdroje. Také je lepší volit odpor R_{24} pro hysterezi, tak aby ovlivňoval rozhodovací úroveň více, než je tomu u přepínání výkonu, tzn. blíže hodnotám R_{10} , R_{21} , R_{22} . Pokud by tento odpor byl volen vyšší a neovlivňoval by tak rozhodovací úroveň, pak by se výstup odpojil např. při $70\text{ }^\circ\text{C}$, a zpět připojil např. při $65\text{ }^\circ\text{C}$ nebo i dříve. Z grafu na obrázku Obr 4.2 je vidět, že při teplotě $70\text{ }^\circ\text{C}$ termistor odpor asi $11\text{ k}\Omega$, hodnotu cca $9\text{ k}\Omega$ má termistor při $74\text{ }^\circ\text{C}$.

4.4 Chlazení

Jelikož odvést z tranzistorů ztrátu 300 W by bylo náročné, bylo využito odbočky s nižším napětím na sekundárním vinutí 12 V_{AC} , na kterou se napájení zdroje přepne, jakmile napětí na výstupu zdroje klesne pod 12 V_{DC} . Na tranzistorech jednoho zdroje je tedy maximální výkonová ztráta 100 W , a na chladiči 200 W , protože je zdroj dvojí. Jak vybrat chladič, tak aby uchlادil maximální výkonovou ztrátu a v požadovaném teplotním rozsahu? Je potřeba znát hodnotu maximální výkonové ztráty a maximální požadovanou teplotu na chladiči. Maximální teplotu na chladiči požadujeme $70\text{ }^\circ\text{C}$, tuto hodnotu dosadíme do vztahu pro výpočet tepelného odporu chladiče. Dostáváme hodnotu $R_{CH} = 0,225\text{ }^\circ\text{C/W}$, to znamená, že s každým 1 W výkonu, stoupne teplota o $0,225\text{ }^\circ\text{C}$. Byl zakoupen chladič s aktivním chlazením s tepelným odporem $0,22\text{ }^\circ\text{C/W}$.

$$R_{CH} = \frac{\Delta T}{P_{MAX}} = \frac{T_{MAX} - T_{OKOLNI}}{P_{MAX}} = \frac{70 - 25}{200} = 0,225\text{ }^\circ\text{C/W}, \quad (4.1)$$

Jako výkonové tranzistory byly vybrány tranzistory BD911, z důvodu nemožnosti použití pouzdra TO3, jelikož chladič má rovnou pouze jednu stranu. Tranzistor BD911 má parametry $U_{CE0} = 100\text{ V}$, $I_C = 15\text{ A}$, $P_d = 90\text{ W}$. Parametry tranzistoru musí splňovat nejkritičtější podmínky, a to výstupní proud zdroje 5 A , napětí na výstupu zdroje může být 0 V , U_{CE0} minimálně 30 V , a dovolený výkon P_d , alespoň 200 W (bráno s rezervou). Tranzistory byly dány 3 paralelně s vyrovnávacími odpory $0,18\text{ }\Omega / 2\text{ W}$ v emitorech, tedy celkový dovolený výkon tranzistorů je pak 240 W .

Při zkoušení zdroje v provozu bylo však zjištěno, že pouzdro TO220 má příliš malou chladičskou plošku, a nedokáže odvést cca 33 W . Tranzistor BD911 dokázal s tímto chlazením odvést maximálně 25 W , což je celková ztráta na chladiči 75 W , teplota chladiče byla po 5 minutách provozu $40\text{ }^\circ\text{C}$. Tranzistory byly nahrazeny výkonnějšími tranzistory 2SC5200 v pouzdech TO264 s parametry $U_{CE0} = 230\text{ V}$, $I_C = 15\text{ A}$, $P_d = 150\text{ W}$, prozatím byla automatická regulace otáček ventilátorů v závislosti na teplotě chladiče nahrazena stabilizovaným pevným napětím 11 V . Při provozu jednoho zdroje mají tranzistory maximální teplotu $50\text{ }^\circ\text{C}$. Zatím jsou tranzistory podloženy slídovými podložkami s tepelným odporem $0,4\text{ }^\circ\text{C/W}$, tyto podložky budou vyměněny za kaptonové podložky s tepelným odporem pouze $0,15\text{ }^\circ\text{C/W}$, což výrazně pomůže odvodu tepla z chladičské plošky tranzistoru.

4.5 Panelová měřidla

Měření okamžitého výstupního napětí a proudu je prováděno pomocí již zhotovených digitálních panelových voltmetrů a ampermetrů dostupných v GMe. Ačkoliv v manuálu je napsáno pouze nutnost odděleného napájení měřidla od měřících svorek, při praktickém zapojení, bylo nutné také oddělené napájení všech měřidel, tedy každé měřidlo musí mít svoje napájení. Avšak nutnost vzájemného oddělení byla zjištěna až po té, když síťový transformátor byl vyroben. Proto byl zakoupen dodatečný transformátor 230 V / 2x9 V / 2x28 mA.

Napájení pro ampermetry byla realizována seriovým stabilizátorem se zenerovou diodou 10 V, jejíž výstup je posílen tranzistorem BC547A. Voltmetry jsou napájeny opět sériovými stabilizátory, které jsou napájeny napájecím napětím pro ochrany (teplotní pojistka, přepínání výkonu a softstart).

Odběr panelových měřidel je 15mA, jelikož jsou použity tranzistory BC547A, jehož zesilovací činitel h_{21e} je 110 až 220, pro výpočet je brána nižší hodnota. Napětí po usměrnění na prázdko je 11,5 V, je použit jednocestný usměrňovač, jelikož není požadován výstupní proud v řádu jednotek A, ale pouze v řádu desítek mA, je tak dosaženo vyššího napětí po usměrnění díky menšímu úbytku napětí na usměrňovači.

$$I_B = \frac{I_{OUT}}{\beta} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{110} = 136 \mu A, \quad (4.2)$$

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{U_{CC} - U_{ZD}}{2I_B} = \frac{11,5 - 10}{2 \cdot 136 \cdot 10^{-6}} = 5,6 k\Omega, \quad (4.3)$$

5 MĚŘENÍ PARAMETRŮ ZDROJE

5.1 Stabilita a zvlnění zdroje

Tab. 5.1: Stabilita výstupního napětí zdroje v závislosti na výstupním proudu.

Výstupní proud [A]	1	2	3	4	5	5,03
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 5V)	5,00	5,00	4,99	4,98	4,93	0
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 10V)	10,00	10,00	10,00	9,98	9,94	0
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 15V)	15,00	15,00	15,00	14,97	14,92	0
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 20V)	20,00	20,00	20,00	19,98	19,95	0
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 25V)	25,00	25,00	25,00	24,99	24,93	0
Napětí při zatížení [V] (nastavené napětí 29.7V)	29,71	29,44	28,38	27,09	26,35	0

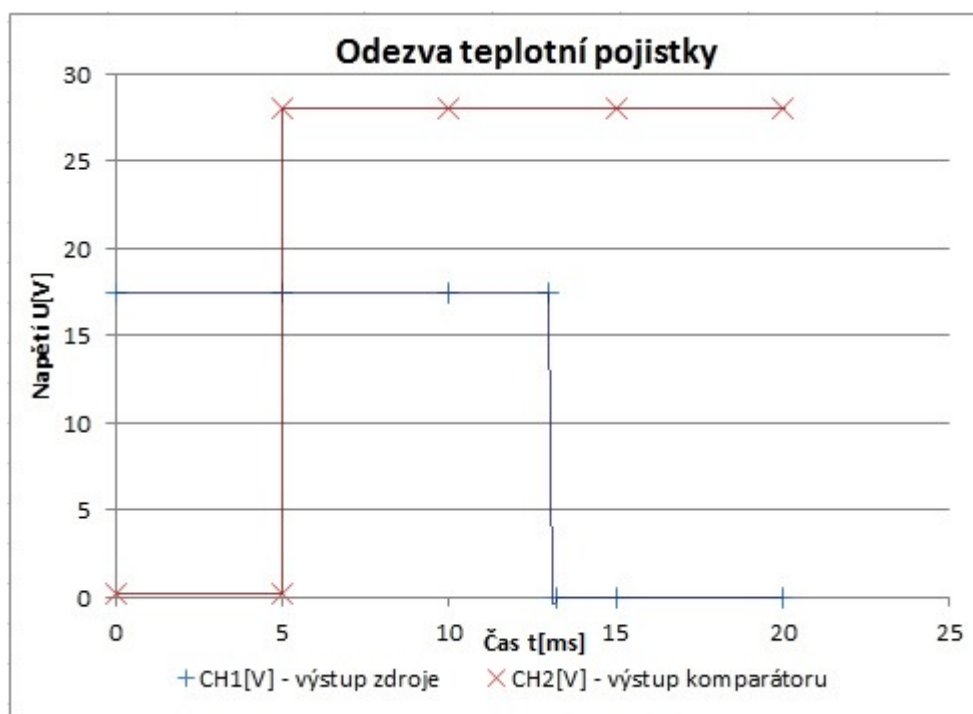
Tabulka udává stabilitu výstupního napětí v závislosti na výstupním proudu odebíraném zátěží, tj. pokles výstupního napětí vůči nastavenému napětí, tento pokles činí maximálně 100 mV.

Bylo dosaženo zvlnění výstupního napětí 10 mV_{pk-pk} při zatížení nad 2 A, zvlnění se pak s rostoucím proudem nemění. Pokud je zdroj nezatížen nebo výstupní proud je do 1 A, je zvlnění téměř nulové, a nelze změřit.

Bylo dosaženo účinnosti, při výstupním napětí 26,35 V a výstupním proudu 5 A, 73,2%.

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{P_{ZATEZ}}{P_{ZATEZ} + P_{Q4+Q6}} \cdot 100 = \frac{U_{ZATEZ} \cdot I}{U_{ZATEZ} \cdot I + U_{TRANZISTORY} \cdot I} \cdot 100 = \\
 &= \frac{26,35 \cdot 5}{26,35 \cdot 5 + 9,65 \cdot 5} \cdot 100 = 73,2\%
 \end{aligned}
 \tag{2.27}$$

5.2 Odezva teplotní pojistky



Obr 5.1: Odezva teplotní pojistky

Graf na obrázku Obr 5.1 byl vytvořen ze změřených hodnot zobrazených na osciloskopu. Měření bylo nastaveno jako reakce na změnu pomocí triggeru, reakce byla nastavena na kanál CH2 na náběžnou hranu a hodnota úrovně triggeru nastavena na 6 V, nicméně lze ji nastavit v rozsahu měřeného napětí na kanálu CH2, tj. cca 0,2 až 27 V.

Odezva teplotní pojistky byla změřena 8,2 ms, je to časový rozdíl mezi reakcí analogového komparátoru, který reaguje do 300 ns, a reakcí relé, které připojuje výstup zdroje k výstupní svorce. Jelikož reakce komparátoru je pouze 300 ns a vůči reakci relé je tato hodnota zanedbatelná, lze reakci relé považovat za reakci teplotní pojistky, tj. 8,2 ms.

6 ZÁVĚR

V mé práci jsem vycházel ze známého schématu zdroje G400 z [1]. Zdroj umožňuje plynulou regulaci od 0 do 30 V, omezení cca od 3 mA do 3 A. První úpravou byla úprava limitu maximálního proudu zdroje z 3 A na 5 A. Dále náhrada získávání záporného napětí pomocí zdvojovače samostatným vinutím pro napájení operačních zesilovačů (pro regulaci napětí od nuly a zejména pro funkci samotného omezení proudu). A tak tranzistor, který při startu zdroje zkratuje výstup napěťového zesilovače (na katodě Zenerovy diody je kladné napětí a to otvírá tranzistor), není potřebný, jeho funkci, tj. zapnutí zdroje až při plném napájení operačních zesilovačů, a tak i odstranění případných zákmitů na výstupu při startu zdroje, spolehlivě plní softstart (měkký náběh zdroje), zkratuje odpor během 1,2 s. Další doplňkovou ochranou je tepelná ochrana, jejíž snímač snímá teplotu na chladiči, jakmile teplota stoupne nad určitou mez, relé odpojí kontakt, který spojuje zátěž s výstupem zdroje.

Dvojitý laboratorní zdroj byl úspěšně zkonstruován, omezení výstupního proudu omezuje již od 4,4 mA na obou částech zdroje, maximální proudový limit obou zdrojů je 5,03 A. Zvlnění výstupního napětí je minimální, při nezatíženém výstupu nebylo pozorováno žádné zvlnění, maximální zvlnění výstupního napětí bylo změřeno 10 mV při výstupním proudu 5 A. Reakce teplotní pojistky byla změřena 8,2 ms.

LITERATURA

- [1] PaJa-trb. JANÍK, P. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://paja-trb.cz/konstrukce/zdroj.html>
- [2] KREJČÍŘÍK, A. Lineární napájecí zdroje. 1.vyd. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-002-4.
- [3] BRANČÍK, L., DOSTÁL, T. *Analogové elektronické obvody*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [4] KOLOUCH, J., BIOLKOVÁ, V. *Impulzová a číslicová technika*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2009.
- [5] Kutilův koutek. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://www.dmaster.wz.cz/postupy/trafo/trafo.htm>
- [6] SPŠE - slaboproud. MORAVEC, S. VOŠ A SPŠE PLZEŇ. [online]. [cit. 2012-10-20]. Dostupné z: <http://moryst.sweb.cz/elt2/stranky2/eltpr001.htm>
- [7] ZELINOVÁ, Lenka. *Laboratorní zdroj s vysokou účinností*. Brno, 2011. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=39398 . Diplomová práce. VUT v Brně, FEKT. Vedoucí práce Jiří Petržela.
- [8] PANÁČEK, Jiří. *Návrh a konstrukce regulovatelného laboratorního zdroje s měřením proudu*. Brno, 2008. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=10149 . Diplomová práce. VUT v Brně, FEKT. Vedoucí práce Martin Magát.
- [9] *TL082 Datasheet*. National Semiconductor, 1994. [online]. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS008357.PDF>
- [10] *LM317 Datasheet*. National Semiconductor, 1996. [online]. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009063.PDF>
- [11] *LM358 Datasheet*. National Semiconductor, 1994. [online]. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS007787.PDF>
- [12] *LM324 Datasheet*. National Semiconductor, 1994. [online]. [cit. 2012-11-11]. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/nationalsemiconductor/DS009299.PDF>
- [13] Pragoboard. [online]. [cit. 2013-04-29]. Dostupné z: http://www.pragoboard.cz/images/graf_spoj.jpg

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

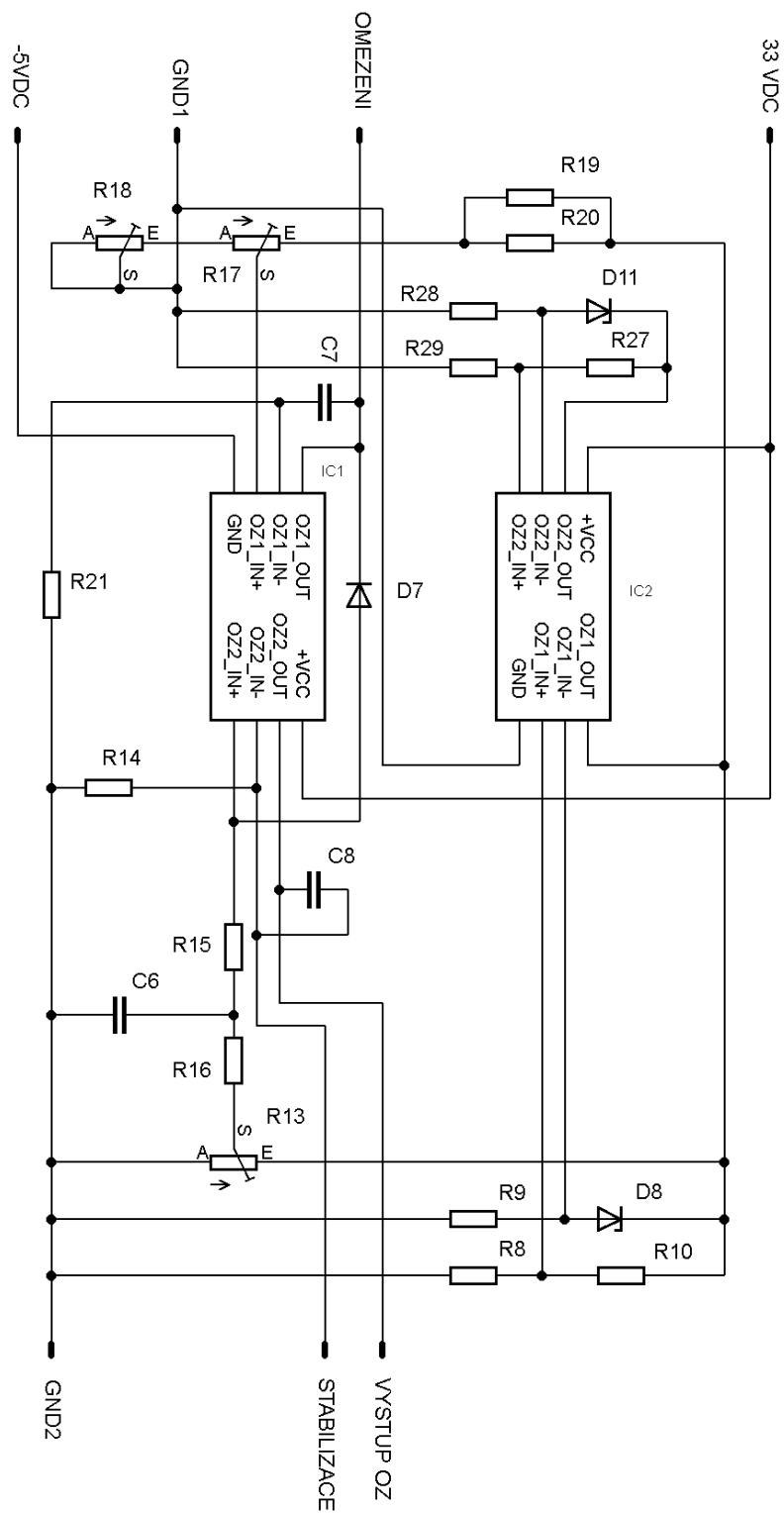
U	Napětí
I	Proud
P	Výkon
N	Počet závitů vinutí
J	Proudová hustota
S	Plocha, průřez
η	Účinnost
OZ	Operační zesilovač

SEZNAM PŘÍLOH

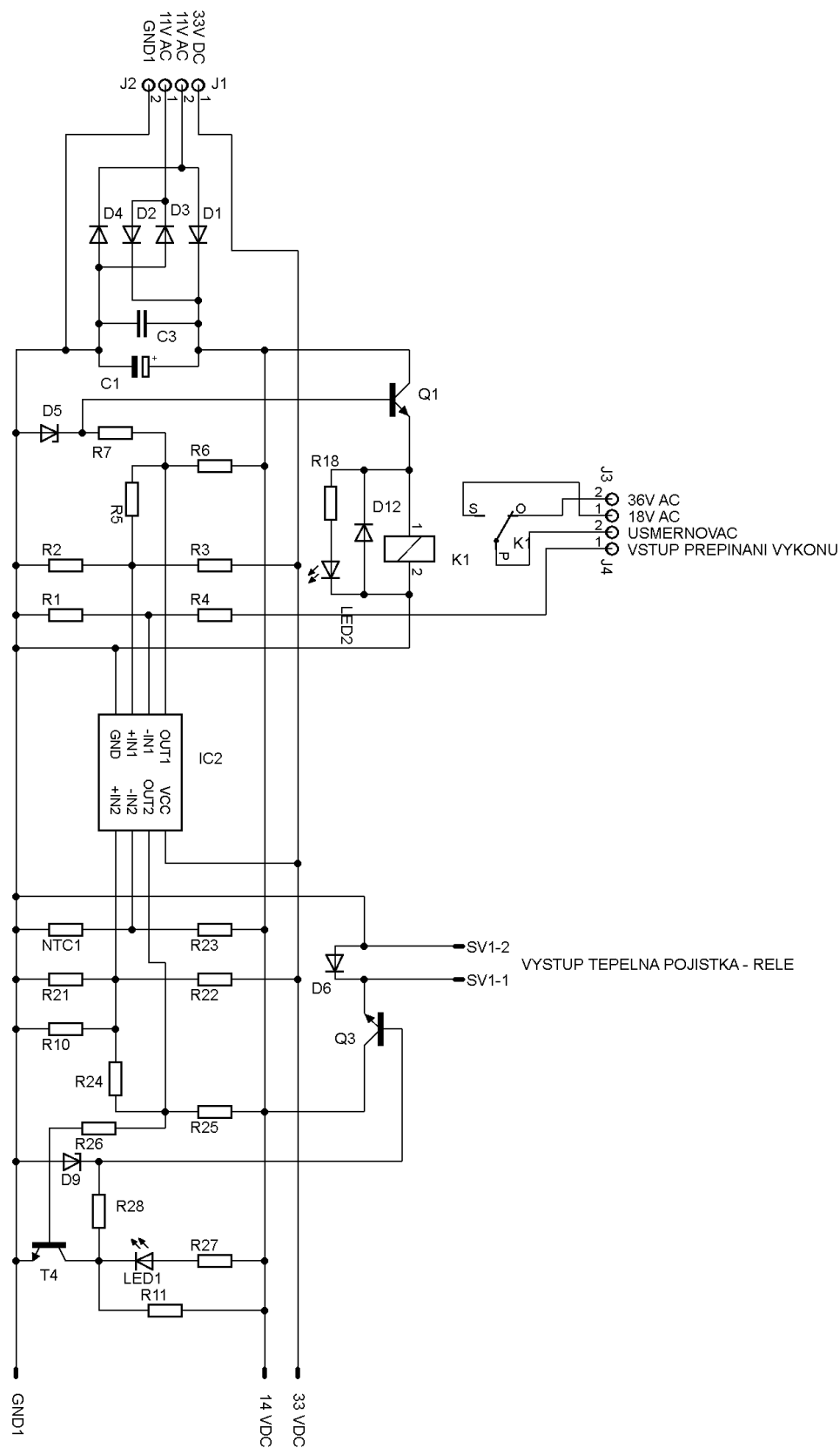
A	Návrh zařízení	39
A.1	Obvodové zapojení zdroje	39
A.2	Obvodové zapojení ochran	41
A.3	Obvodové zapojení napájení měřidel	43
A.4	Deska plošného spoje zdroje – top (strana součástek).....	44
A.5	Deska plošného spoje zdroje – bottom (strana spojů)	45
A.6	Deska plošného spoje ochran – top (strana součástek).....	46
A.7	Deska plošného spoje ochran – bottom (strana spojů)	47
A.8	Deska plošného spoje napájení měřidel – top (strana součástek).....	48
A.9	Deska plošného spoje napájení měřidel – bottom (strana spojů).....	48
B	Seznam součástek	49
B.1	Deska zdroje	49
B.2	Deska ochran.....	51
B.3	Deska napájení měřidel.....	53
C	Fotodokumentace	54

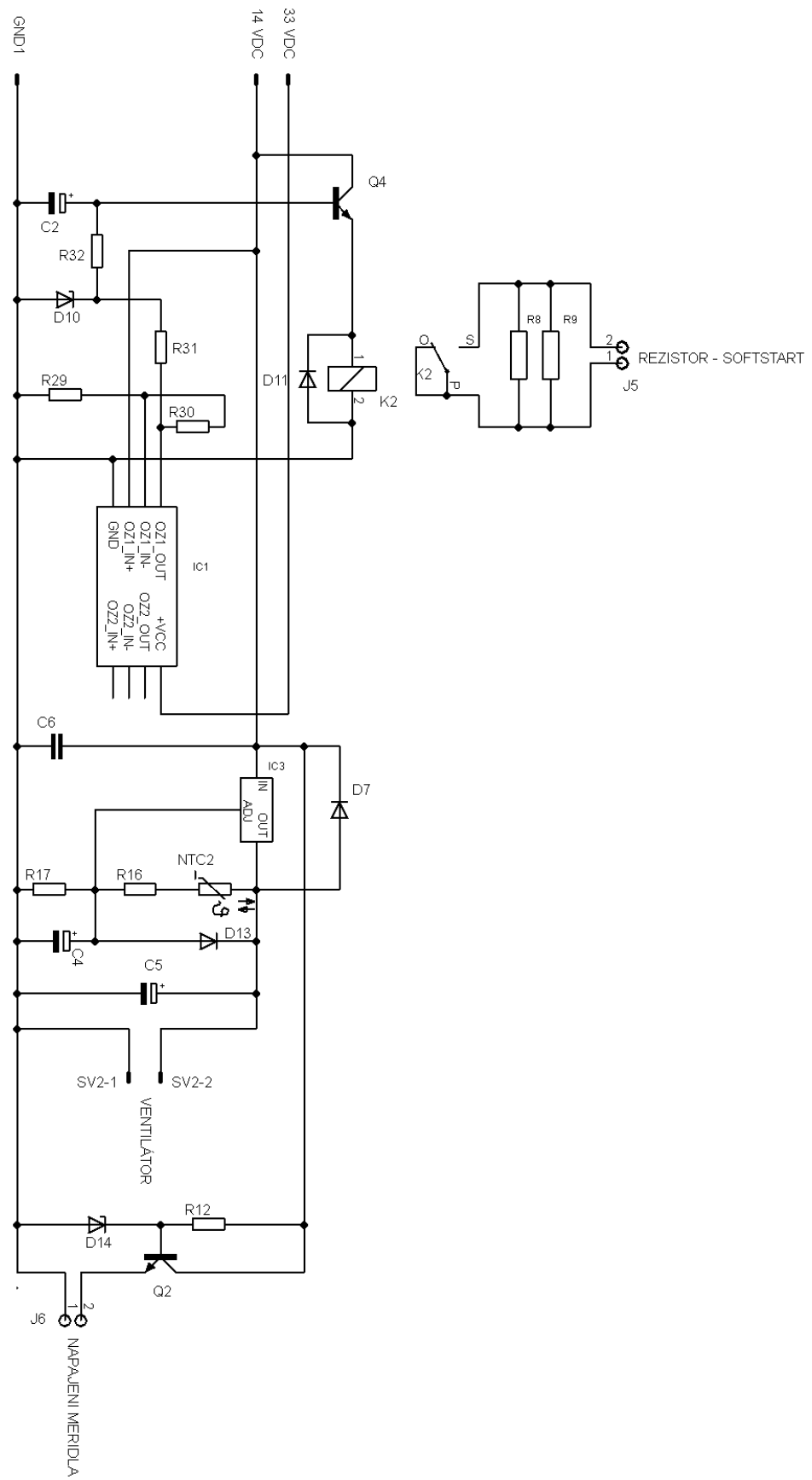
A.1 Obvodové zapojení zdroje



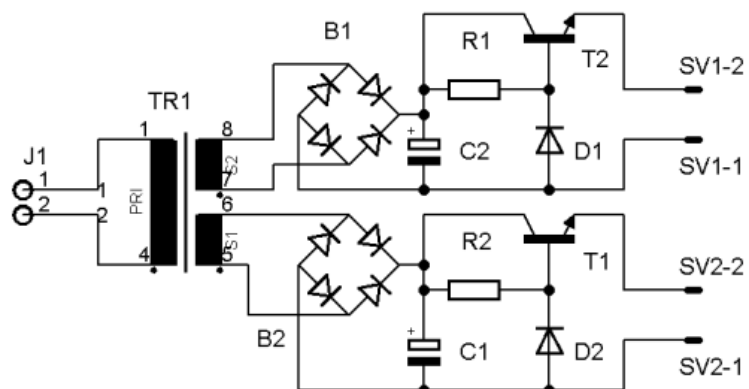


A.2 Obvodové zapojení ochran

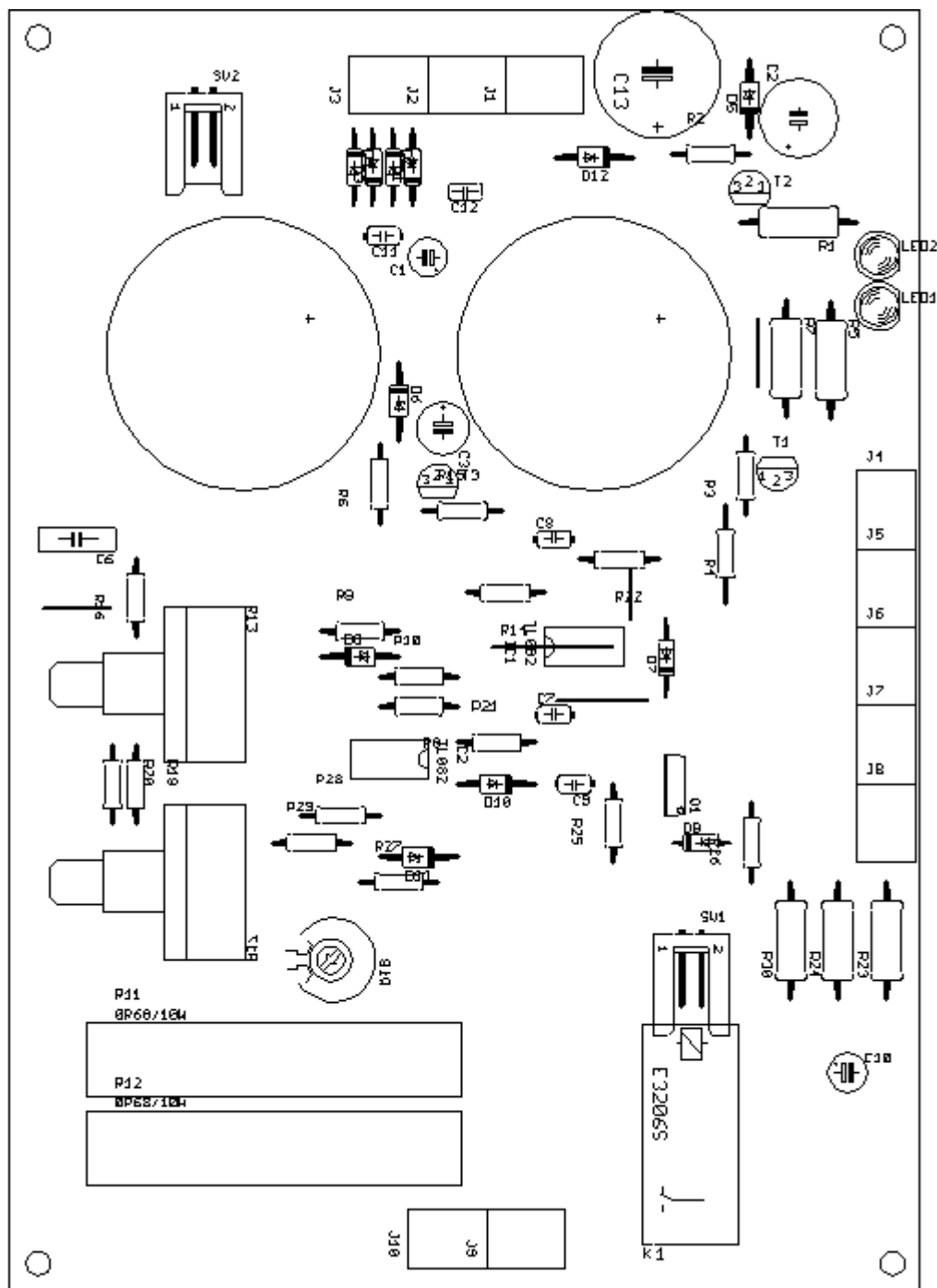




A.3 Obvodové zapojení napájení měřidel

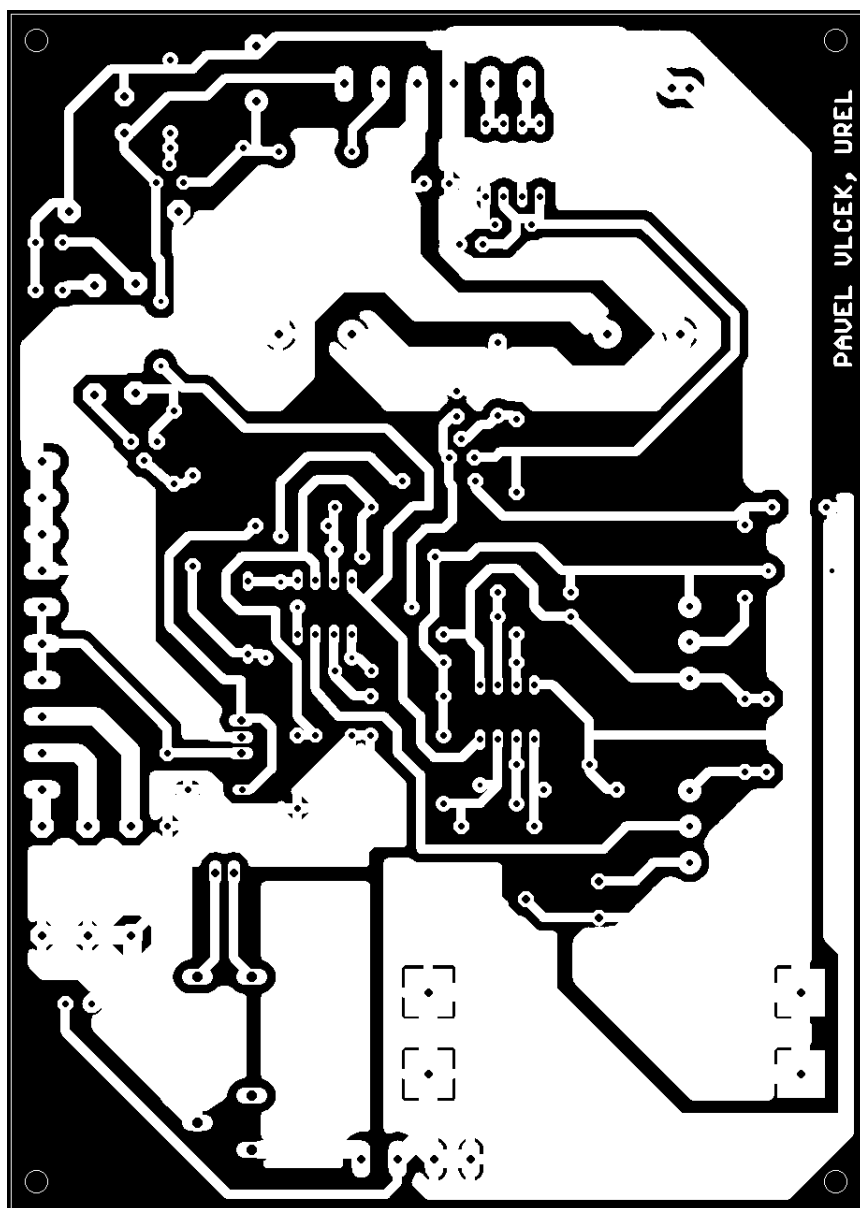


A.4 Deska plošného spoje zdroje – top (strana součástek)



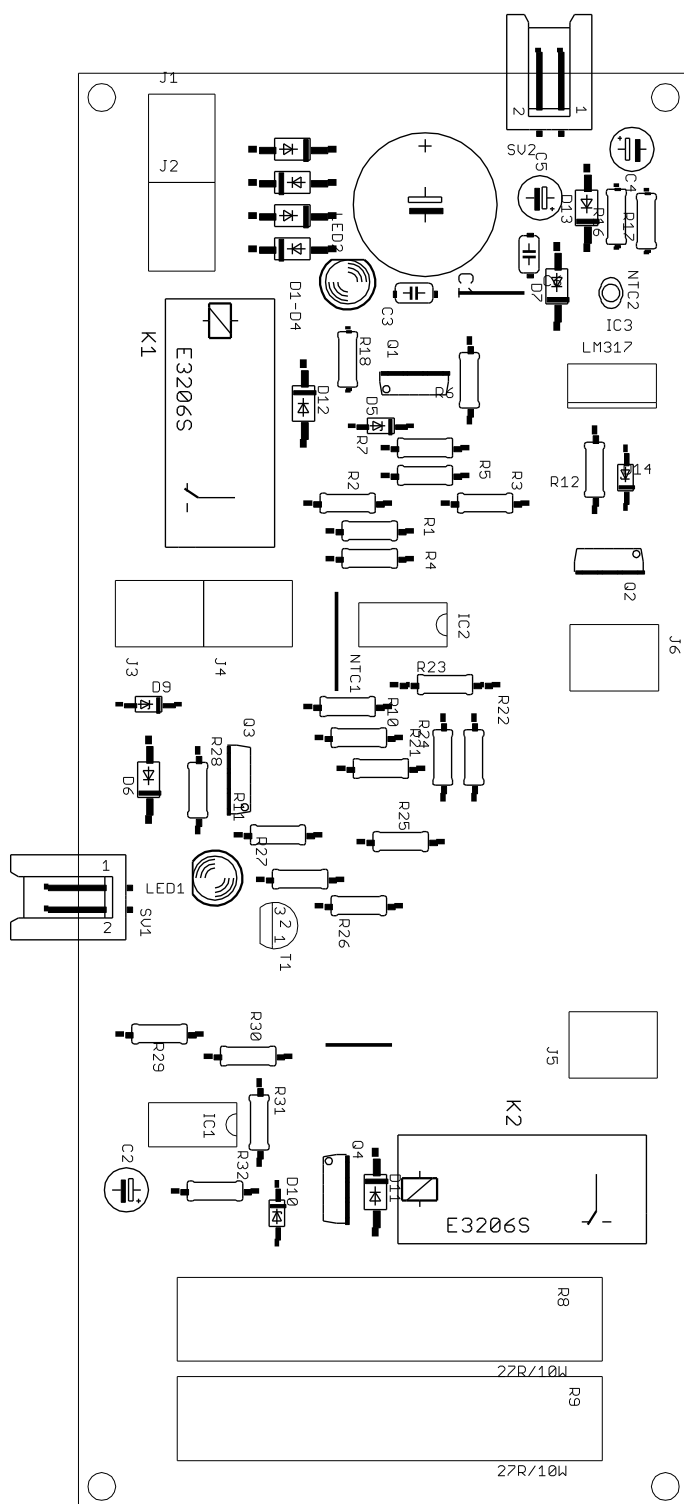
Rozměr desky 167.7 x 118.8 [mm], měřítko M1,34:1

A.5 Deska plošného spoje zdroje – bottom (strana spojů)



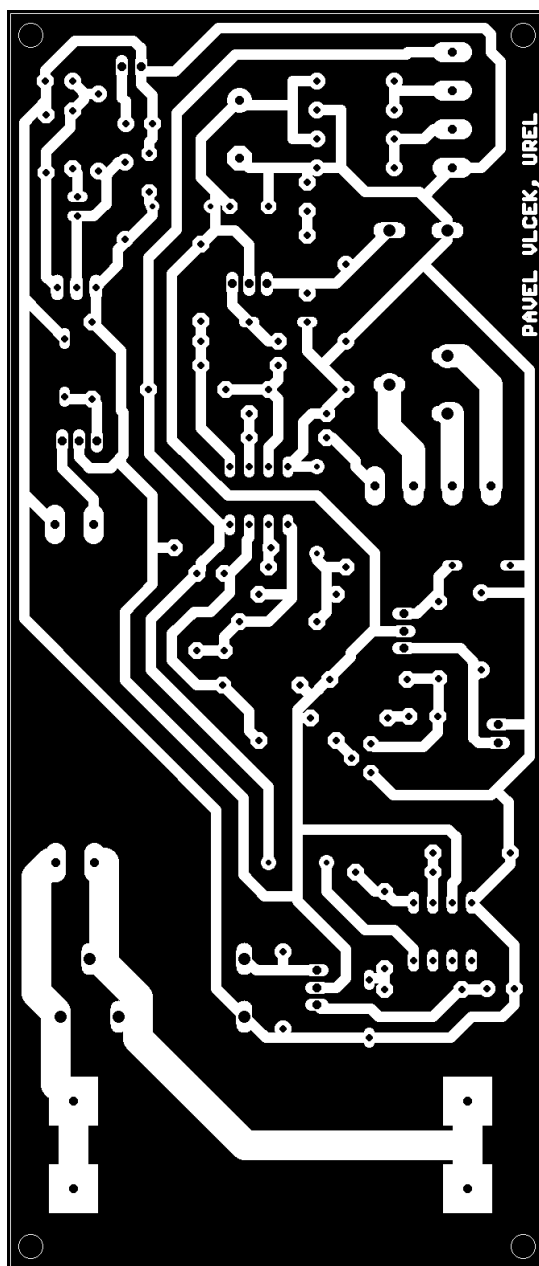
Rozměr desky 167.7 x 118.8 [mm], měřítko M1:1

A.6 Deska plošného spoje ochran – top (strana součástek)



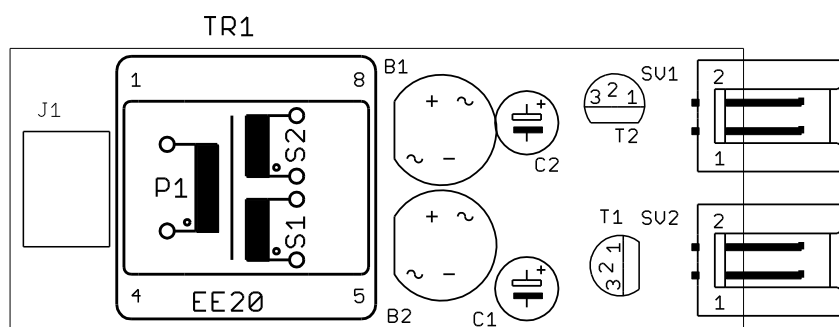
Rozměr desky 165.1 x 70.0 [mm], měřítko M1,15:1

A.7 Deska plošného spoje ochran – bottom (strana spojů)



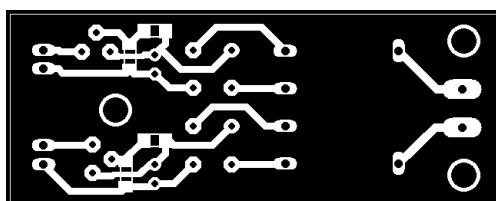
Rozměr desky 65 x 25 [mm], měřítko M1:1

A.8 Deska plošného spoje napájení měřidel – top (strana součástek)



Rozměr desky 65 x 25 [mm], měřítko M1,5:1

A.9 Deska plošného spoje napájení měřidel – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 65 x 25 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Deska zdroje

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	47u/25V	E2-5	Elektrolytický kondenzátor
C2	100u/63V	E5-10,5	Elektrolytický kondenzátor
C3	22u/50V	E2,5-7	Elektrolytický kondenzátor
C4	6m8/63V	E10-35	Elektrolytický kondenzátor
C5	6m8/63V	E10-35	Elektrolytický kondenzátor
C6	100n	C075-032X103	Keramický kondenzátor
C7	330p	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C8	330p	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C9	100p	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C10	10u/63V	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C11	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C12	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C13	220u/63V	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
D1	1N4148DO35-10	DO-35	Rychlá dioda
D2	1N4148DO35-10	DO-35	Rychlá dioda
D3	1N4148DO35-10	DO-35	Rychlá dioda
D4	1N4148DO35-10	DO-35	Rychlá dioda
D5	ZD 33V/0.5W	DO-35	Zenerova dioda
D6	ZD 5V6/0.5W	DO-35	Zenerova dioda
D7	1N4148DO35-10	DO-35	Rychlá dioda
D8	ZD 5V6/0.5W	DO-35	Zenerova dioda
D9	1N4148DO35-7	DO-35	Rychlá dioda
D10	1N4007	DO-41	Usměrňovací dioda
D11	ZD 2V4/0.5W	DO-35	Zenerova dioda
D12	1N4007	DO-41	Usměrňovací dioda
IC1	TL082	DIL8	2x JFET OZ
IC2	TL082	DIL8	2x JFET OZ
J1	28VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J2	28VAC/12VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J3	9VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J4	CC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J5	CC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm

J6	BB	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J7	BE	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J8	EE	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J9	Výstup +, -	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J10	2x výstup -	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
K1	250VAC/10A 12VDC	E3206S	Relé
LED1	Červená LED 5mm	LED5MM	LED (omezení proudu)
LED2	Modrá LED 5mm	LED5MM	LED (síť)
Q1	BD139-16	TO126AV	Tranzistor NPN
R1	10k/2W	0411	Rezistor
R2	1k3/0.6W	0207	Rezistor
R3	2k2/0.6W	0207	Rezistor
R4	10k/0.6W	0207	Rezistor
R5	6k8/2W	0411	Rezistor
R6	10k/0.6W	0207	Rezistor
R7	6k8/2W	0411	Rezistor
R8	10k/0.6W	0207	Rezistor
R9	10k/0.6W	0207	Rezistor
R10	10k/0.6W	0207	Rezistor
R11	0R68/10W	KERAM	Drátový rezistor
R12	0R68/10W	KERAM	Drátový rezistor
R13	10k/0,6W	CIP20C-6MM	Potenciometr
R14	27k/0,6W	0207	Rezistor
R15	2k2/0,6W	0207	Rezistor
R16	27k/0,6W	0207	Rezistor
R17	10k/0,6W	CIP20C-6MM	Potenciometr
R18	100R	PT-10	Trimr
R19	68k/0.6W	0207	Rezistor
R20	2M2/0.6W	0207	Rezistor
R21	10k/0.6W	0207	Rezistor
R22	1k/0.6W	0207	Rezistor
R23	0R18/2W	0207	Rezistor
R24	0R18/2W	0207	Rezistor
R25	47k/0.6W	0207	Rezistor
R26	1k/0.6W	0207	Rezistor
R27	10k/0.6W	0207	Rezistor
R28	10k/0.6W	0207	Rezistor
R29	10k/0.6W	0207	Rezistor

R30	0R18/2W	0207	Rezistor
SV1	12V – relé	L02P	Amp mt konektor
SV2	2x GND - napájecí	L02P	Amp mt konektor
T1	BC557B	TO92	Tranzistor PNP
T2	BC547A	TO92	Tranzistor NPN
T3	BC557A	TO92	Tranzistor PNP

B.2 Deska ochran

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
C1	2200u/35V	E7,5-16	Elektrolytický kondenzátor
C2	47u/25V	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C3	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
C4	10u/50V	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C5	1u/50V	E2,5-5	Elektrolytický kondenzátor
C6	100n	C050-024X044	Keramický kondenzátor
D1	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D2	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D3	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D4	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D5	13/0.5W	DO35	Zenerova dioda
D6	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D7	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D8	12V/0.5W	DO35	Zenerova dioda
D9	13/0.5W	DO35	Zenerova dioda
D10	13/0.5W	DO35	Zenerova dioda
D11	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D12	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
D13	1N4007	DO41	Usměrňovací dioda
IC1	TL082	DIL8	2x JFET OZ
IC2	LM393	DIL8	Rychlý komparátor
IC3	LM317	TO220	Regulátor napětí
J1	33VDC, 12VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J2	12VAC, GND - napájecí	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J3	28VAC, 12VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J4	Usměroňovač – AC, vstup komp.	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm

J5	11VDC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
J6	softstart	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
K1	250VAC/10A 12VDC	E3206S	Relé
K2	250VAC/10A 12VDC	E3206S	Relé
LED1	Žlutá LED 5mm	LED5MM	LED (teplotní pojistka)
LED2	Zelená LED 5mm	LED5MM	LED (přepínání výkonu)
NTC1	47k@25°C	P640	Negativní termistor
NTC2	1k@25°C	P640	Negativní termistor
Q1	BD139	TO126AV	Tranzistor NPN
Q2	BD139	TO126AV	Tranzistor NPN
Q3	BD139	TO126AV	Tranzistor NPN
Q4	BD139	TO126AV	Tranzistor NPN
R1	5M6/0,6W	0207	Rezistor
R2	15k/0,6W	0207	Rezistor
R3	47k/0,6W	0207	Rezistor
R4	3M3/0,6W	0207	Rezistor
R5	82k/0,6W	0207	Rezistor
R6	16k/0,6W	0207	Rezistor
R7	1k5/0,6W	0207	Rezistor
R8	47R/10W	KERAM	Drátový rezistor
R9	47R/10W	KERAM	Drátový rezistor
R10	22k/0,6W	0207	Rezistor
R11	3k9/0,6W	0207	Rezistor
R12	3k9/0,6W	0207	Rezistor
R16	100R/0.6W	0207	Rezistor
R17	2k7/0.6W	0207	Rezistor
R18	820R/0.6W	0207	Rezistor
R21	22k/0,6W	0207	Rezistor
R22	33k/0,6W	0207	Rezistor
R23	15k/0,6W	0207	Rezistor
R24	82k0,6W	0207	Rezistor
R25	11k/0,6W	0207	Rezistor
R26	110k/0,6W	0207	Rezistor
R27	3k3/0,6W	0207	Rezistor
R28	1k/0,6W	0207	Rezistor
R29	20k/0,6W	0207	Rezistor
R30	10k/0,6W	0207	Rezistor
R31	10k/0,6W	0207	Rezistor
R32	10k/0,6W	0207	Rezistor
SV1	Teplotní pojistka	L02P	Konektor se zámkem

SV2	Aktivní chlazení	L02P	Konektor se zámkem
T1	BC547B	TO92	Tranzistor NPN

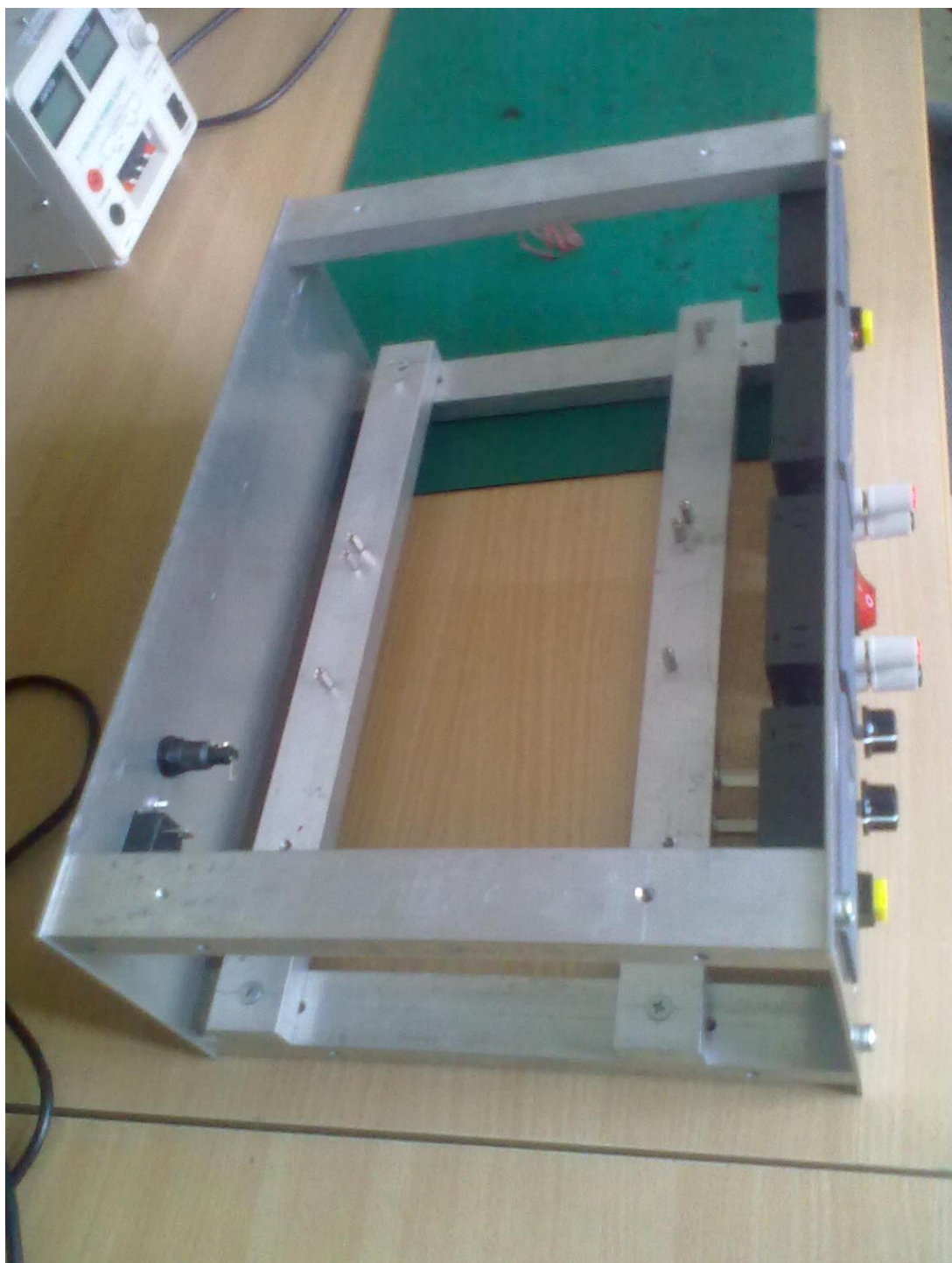
B.3 Deska napájení měřidel

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
B1	1000V/1.5A	RB1A	usměrňovač
B2	1000V/1.5A	RB1A	usměrňovač
C1	47u/25V	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
C2	47u/25V	E2,5-6	Elektrolytický kondenzátor
D1	ZD 10V	SOD80C	Zenerova dioda
D2	ZD 10V	SOD80C	Zenerova dioda
J1	230VAC	SVORKOVNICE _2KONTAKTY	Svorkovnice, rozteč kontaktů 5mm
R1	5k6	R1206	Rezistor
R2	5k6	R1206	Rezistor
SV1	Výstup	L02P	Konektor se zámkem
SV1	Výstup	L02P	Konektor se zámkem
T1	BC547A	TO92	Tranzistor NPN
T2	BC547A	TO92	Tranzistor NPN
TR1	230V/2x9VAC/0.5VA	EE20-2	transformátor

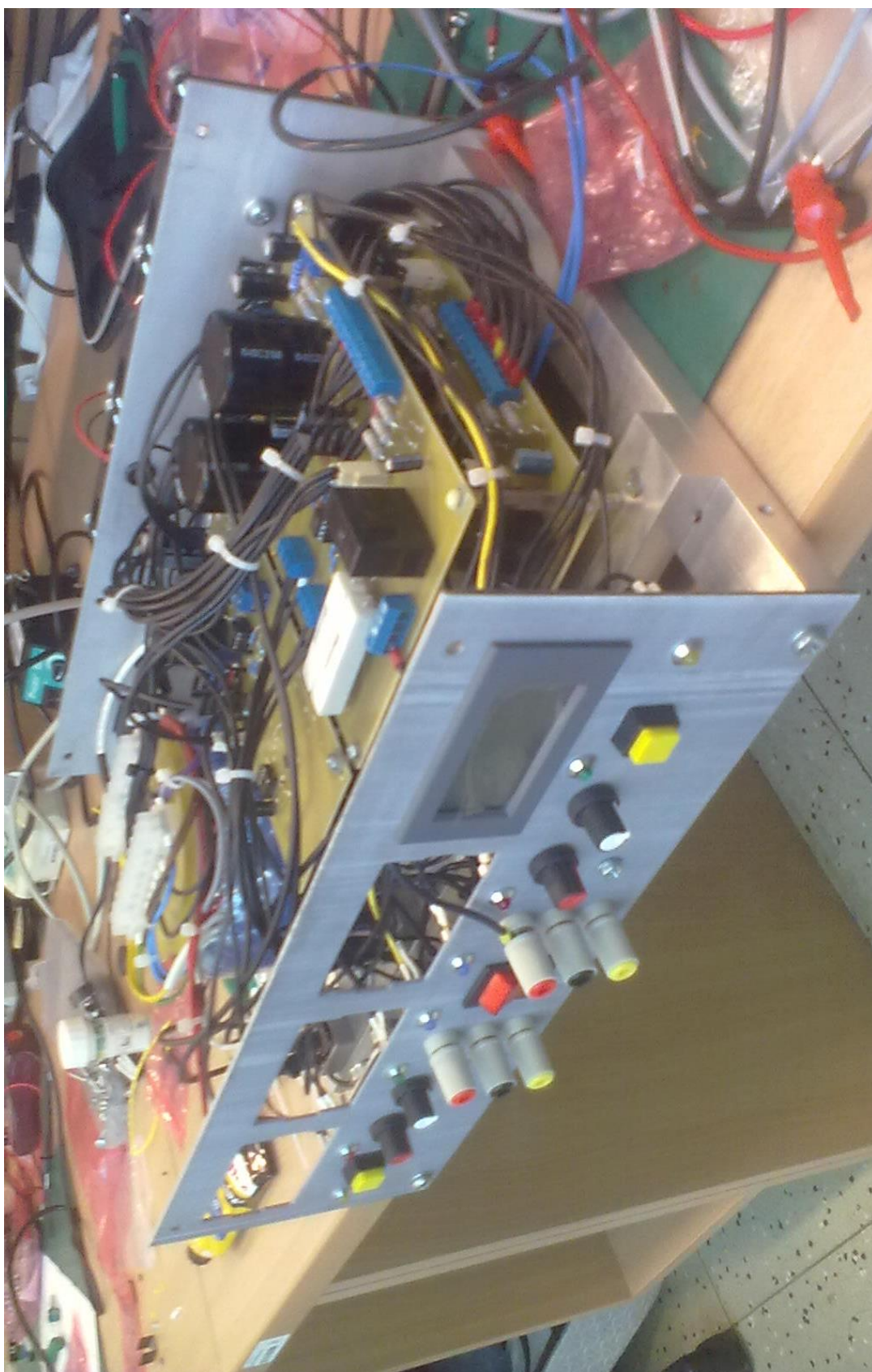
C FOTODOKUMENTACE



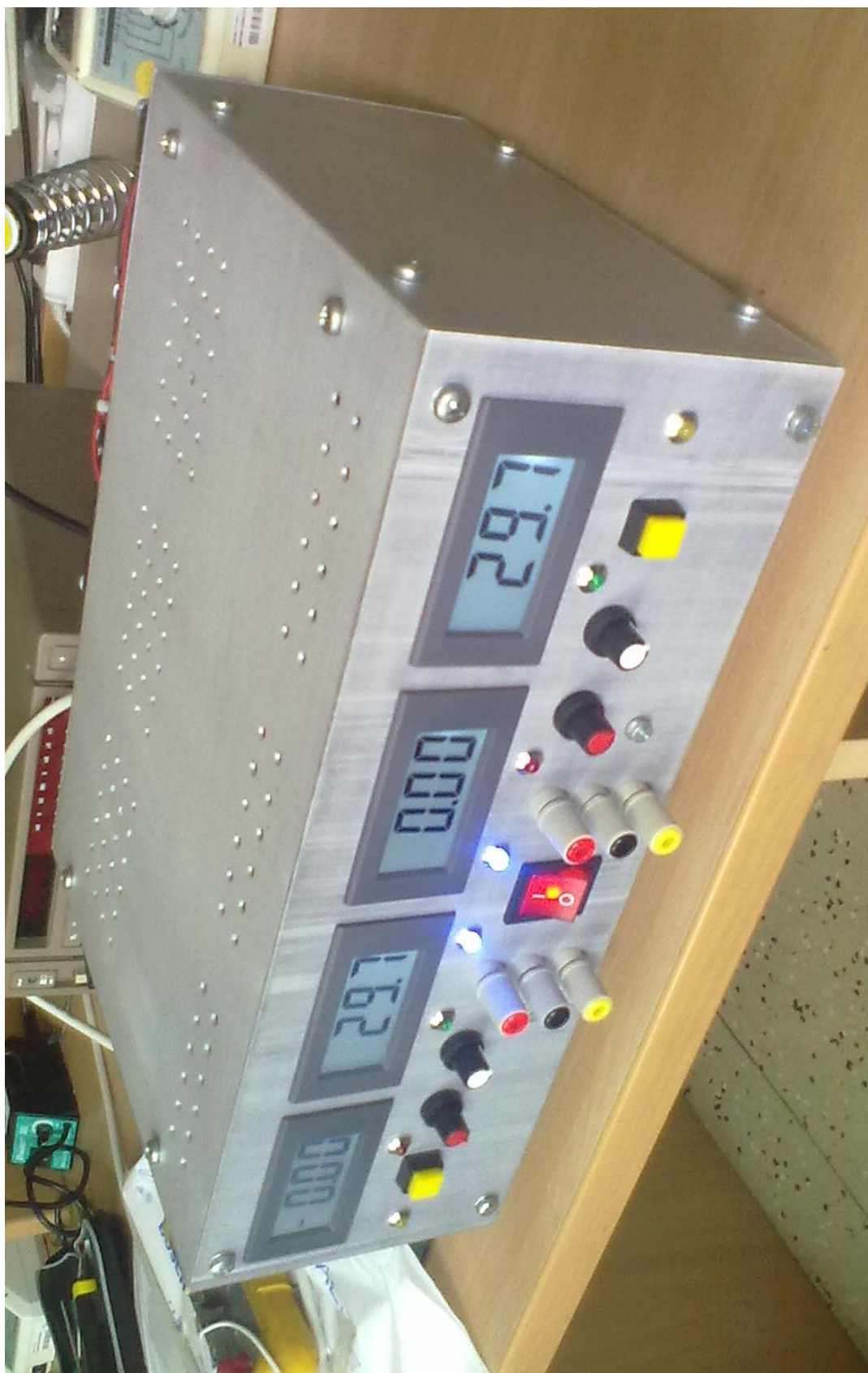
Obr 6.1: Konstrukce přístrojové krabice



Obr 6.2: Konstrukce přístrojové krabice



Obr 6.3: Zapojování a zkušební provoz zdroje



Obr 6.4: Zdroj v provozu