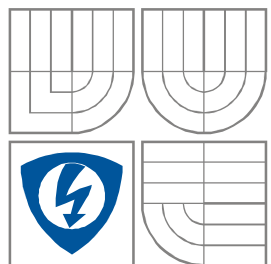


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

SIMULACE A REALIZACE LABORATORNÍHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

SIMULATION AND REALIZATION OF LABORATORY DC POWER SUPPLY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S PROJECT

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

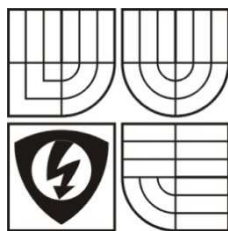
Bc. Ladislav Mach

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Šotner

BRNO, 2010



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**
Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií
Ústav radioelektroniky

Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Bc. Ladislav Mach
Ročník: 2

ID: 77806
Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Studiem doporučené literatury a dalších zdrojů se seznámte s principem napájecích laboratorních zdrojů s možností regulace výstupního napětí a proudovou pojistkou. Zaměřte se na co nejjednodušší zapojení využívající operační zesilovače v kombinaci s výkonovým členem (tranzistor).

Navrhněte laboratorní zdroj 2x 0 až 30 V (symetrický) s výstupním proudem min. 2 A a nastavitelnou proudovou pojistkou. Aktivní bloky vybírejte tak, aby byly k dispozici jako makromodely v knihovně OrCAD a proveďte počítačovou analýzu.

Navrhněte vlastní desku plošného spoje, osadte a oživte obvod. Měřením ověřte vlastnosti zdroje a porovnejte je s výsledky simulací.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. Napájení elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [2] VRBA, K., HERMAN, I., KUBÁNEK, D. Konstrukce elektronických zařízení. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.

Termín zadání: 8.2.2010

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Roman Šotner

Konzultanti diplomové práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ladislav Mach
Bytem: Jívoví 37, Křižanov, 594 51
Narozen/a (datum a místo): 20. června 1986 ve Velkém Meziříčí

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací
technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
- ☒ diplomová práce
- ☐ bakalářská práce
- ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
(dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Roman Šotner

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy
(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 19. května 2010

.....

Nabyvatel

.....

Autor

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá rozбором laboratorních zdrojů s regulovatelným výstupním napětím. Rovněž jsou rozebrány druhy zapojení proudové pojistky. V práci je popsáno několik nejčastějších schémat zapojení zdrojů. Pomocí analýz (simulačního programu OrCAD) jsou zjištěny vlastnosti a chování uvedených zdrojů. K nastavení výstupního napětí je velmi často použito struktury operačních zesilovačů nebo lineárního třísvorkového stabilizátoru napětí. Navržený zdroj je prakticky odzkoušen a jeho parametry porovnány se simulacemi. Velikost výstupního napětí a proudu je možné řídit digitálně pomocí počítače s rozhraním USB. Pro řízení byly použity digitální potenciometry, ovládané přes sběrnici I²C od firmy Philips.

KLÍČOVÁ SLOVA

Symetrický zdroj, proudová pojistka, stabilizátor, simulace, digitální potenciometr, elektronické řízení, USB, I²C, FT232BM.

ABSTRACT

The thesis deals with analyses of the laboratory symmetrical supplies with adjustable output voltage. It also describes different kinds of current cut-out circuits and several most frequent supply connection schemes. Analyses (simulation program OrCAD) show the characteristics and behaviour of the mentioned supplies. To set the output voltage, operational amplifier structures or linear three-terminal voltage regulator are very often used. The suggested supply was tested and its parameters compared with the simulations. The value of output voltage and current can be controlled with a computer with a USB port. For controlling of the output voltage and current the digital potentiometers were used and controlled by I²C bus.

KEYWORDS

Symmetrical supply, current cut-out, stabilizer, simulation, digital potentiometer, electronic adjusting, USB, I²C, FT232BM.

MACH, L. *Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2010. 61 s., 24 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí diplomové práce Ing. Roman Šotner

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Simulace a realizace laboratorního napájecího zdroje jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce ing. Romanu Šotnerovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	xi
Seznam tabulek	xiii
Úvod	14
1 Teorie Laboratorního zdroje	15
1.1 Regulace výstupního napětí	15
1.1.1 Napěťový referenční zdroj	15
1.1.2 Funkční (blokové) schéma integrovaného stabilizátoru	16
1.1.3 Zapojení s operačním zesilovačem	17
1.1.4 Zapojení s třísvorkovým lineárním stabilizátorem	17
1.2 Regulace výstupního proudu	18
1.2.1 Elektronická pojistka omezovací	19
1.2.2 Elektronická pojistka rozpojovací	19
1.2.3 Proudové posílení výstupu	19
1.2.4 Ochranné obvody třísvorkových stabilizátorů	21
1.3 Porovnání zdrojů	22
1.3.1 Zdroj č.1	22
1.3.2 Zdroj č.2	25
1.3.3 Zdroj č.3	30
1.3.4 Zdroj č.4	34
1.3.5 Zhodnocení vlastností simulovaných zdrojů	38
2 Návrh zdroje	39
2.1 Návrh zdroje č.1	39
2.2 Návrh zdroje č.2	43
2.3 Digitální potenciometry	48
2.3.1 Základní parametry	48
2.3.2 Komunikace pomocí I ² C sběrnice	50
2.3.3 Digitální potenciometr AD5252	51
2.3.4 Převodník USB /I ² C	52

2.3.5	Aplikace pro ovládání digitálních potenciometrů.....	55
2.4	Vstupní síťová část	56
2.5	Návrh pomocné desky	57
2.6	Návrh chlazení zdroje	61
3	Měření zdroje	63
3.1	Zdroj 1.....	63
3.2	Zdroj 2.....	65
4	ZÁVĚR	68
	Literatura	69
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	71
	Seznam příloh	73

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Základní blokové schéma síťového zdroje.....	15
Obr. 1.2: Funkční blokové schéma integrovaného stabilizátoru [2].....	16
Obr. 1.3: Náhradní schéma integrovaného stabilizátoru napětí [3]	17
Obr. 1.4: Regulace napětí pomocí OZ a tranzistoru [1].....	17
Obr. 1.5: Základní zapojení regulátoru LM 317 [2]	18
Obr. 1.6: Způsoby omezení proudu [3].....	19
Obr. 1.7: Proudové posílení třísvorkového regulátoru [2].....	20
Obr. 1.8: Zapojení proudové ochrany posilovače proudu [2].....	20
Obr. 1.9: Ochrana proti přepólování výstupu [2].....	21
Obr. 1.10: Ochrana proti zkratu na vstupu [2].....	21
Obr. 1.11: Schéma zapojení zdroje č.1	22
Obr. 1.12: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro maximální výstupní napětí	23
Obr. 1.13: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 15 V	23
Obr. 1.14: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 5,2 V	24
Obr. 1.15: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 2,5 V	24
Obr. 1.16: Schéma zapojení zdroje č.2 (převzato z [7])	26
Obr. 1.17: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro maximální výstupní napětí	27
Obr. 1.18: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 15 V	27
Obr. 1.19: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 5 V	28
Obr. 1.20: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 2,5 V	28
Obr. 1.21: Zatěžovací charakteristika pro pevnou proudovou pojistku.....	29
Obr. 1.22: Schéma zapojení zdroje č.3 (převzato z [8])	31
Obr. 1.23: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro maximální výstupní napětí	32
Obr. 1.24: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 15 V	32
Obr. 1.25: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 5 V	33
Obr. 1.26: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 2,5 V	33
Obr. 1.27: Schéma zapojení zdroje č.4 (převzato z [9])	35
Obr. 1.28: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro maximální výstupní napětí	36
Obr. 1.29: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 15 V	36
Obr. 1.30: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 5 V	37

Obr. 1.31: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 2,5 V	37
Obr. 2.1: Schéma zapojení zdroje č. 1 pro návrh hodnot jednotlivých součástek s rozmístěním měřících bodů (TP).....	39
Obr. 2.2: Schéma zdroje pro návrh hodnot součástek s rozmístěním měřících bodů (TP)	44
Obr. 2.3: Příklad vnitřní struktury duálního digitálního potenciometru AD5252 řízeného pomocí I ² C sběrnice (převzato z [13]).....	49
Obr. 2.4: Příklad vnitřní struktury duálního digitálního potenciometru AD5232 řízeného pomocí SPI sběrnice (převzato z [14]).....	49
Obr. 2.5: Celkový průběh komunikace na sběrnici I ² C (převzato z [15])	51
Obr. 2.6: Základní struktura pro přístup k zařízení přes I ² C sběrnici	51
Obr. 2.7: Převodní charakteristika digitálního potenciometru AD5252 (100 kΩ)	52
Obr. 2.8: Struktura zápisu do digitálního potenciometru AD5252 (převzato z [13]).....	52
Obr. 2.9: Zachycená komunikace sběrnice I ² C.....	53
Obr. 2.10: Schéma zapojení převodníku USB / I ² C a digitálních potenciometrů	54
Obr. 2.11: Vzhled hlavního okna ovládacího programu.....	55
Obr. 2.12: Vzhled nápovědy ovládacího programu	56
Obr. 2.13: Schéma zapojení vstupní síťové části.....	56
Obr. 2.14: Převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru s hysterezí	58
Obr. 2.15: Teplotní závislost odporu senzoru KTY81/110	58
Obr. 2.16: Schéma zapojení pomocné desky zdroje	60
Obr. 2.17: Uspořádání chladičů a ventilátoru	62
Obr. 3.1: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 26 V	64
Obr. 3.2: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V	64
Obr. 3.3: Zatěžovací charakteristika pro maximální výstupní napětí	65
Obr. 3.4: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V	66
Obr. 3.5: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 5 V	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace	25
Tab. 1.2: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace	25
Tab. 1.3: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace	29
Tab. 1.4: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace	29
Tab. 1.5: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace	30
Tab. 1.6: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace	30
Tab. 1.7: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace	34
Tab. 1.8: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace	34
Tab. 2.1: Funkce konektorů zdroje č.2	47
Tab. 2.2: Funkce konektorů převodníku USB / I ² C.....	53
Tab. 2.3: Funkce konektorů vstupní síťové části.....	57
Tab. 2.4: Funkce konektorů pomocné desky	61
Tab. 3.1: Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z programu OrCAD	63
Tab. 3.2: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 26 V	63
Tab. 3.3: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V	63
Tab. 3.6: Naměřená zatěžovací charakteristika pro maximální výstupní napětí	65
Tab. 3.7: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V	66
Tab. 3.8: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 5 V	66
Tab. 3.9: Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z programu OrCAD	67

ÚVOD

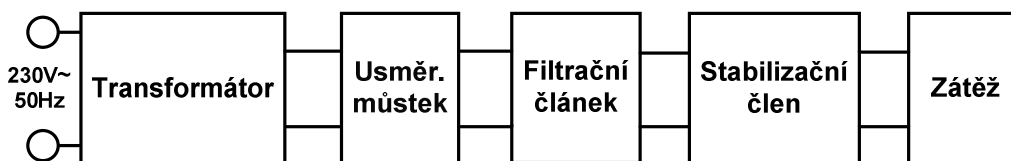
Práce pojednává o laboratorních napájecích zdrojích symetrického napětí. Jde tedy o zdroje dodávající kladné a záporné napětí vůči nulové svorce GND. Samozřejmostí je možnost nastavení výstupního napětí a také proudové pojistky. Požadavky jsou kladeny na co nejjednodušší obvodové zapojení, které k ovládání výstupu požívá výkonový prvek - tranzistor. Pro analyzování obvodů simulačním programem je nutné používat komerčně dostupné makromodely aktivních prvků. Používané aktivní bloky pro návrh obvodů jsou operační zesilovače (OZ), tranzistory (T) a třísvorkové stabilizátory. Dostupná nalezená zapojení zdrojů jsou pro zjištění vlastností podrobena střídavé a stejnosměrné analýze programem OrCAD. Cílem je vytvořit regulovatelný napěťový symetrický zdroj s nízkým zvlněním výstupního napětí doplněný elektronickou proudovou pojistkou (omezením).

1 TEORIE LABORATORNÍHO ZDROJE

Napájecí zdroje jsou součástí prakticky všech elektronických zařízení. Jejich úkolem je do napájeného obvodu dodávat elektrickou energii.

Pro práci s některými integrovanými obvody, hlavně s operačními zesilovači, je zapotřebí zdroj symetrického napětí (někdy označováno jako napětí souměrné). Takový zdroj napětí sestává ze dvou větví – kladné a záporné. Vznikne poměrně jednoduše, a to spojením výstupů dvou jednoduchých zdrojů do série. Laboratorní zdroj, jak již název napovídá, bývá určen pro napájení zařízení s různým napájecím napětím. Je tedy přímo nutností, aby jeho výstupní napětí bylo možné nastavovat na požadovanou hodnotu. Při oživování nového zapojení se s výhodou uplatní obvod pro omezování procházejícího proudu. Při závadě na tomto zařízení zamezí zničení zdroje a v mezním případě i samotného zařízení.

Klasické řešení síťového zdroje se skládá z transformátoru, usměrňovače, filtru a stabilizátoru (viz blokové schéma obr. 1.1) [1]. Transformátor mění vysoké střídavé napětí na malé napětí a rovněž galvanicky odděluje zařízení od rozvodné sítě. Usměrňovač usměrní protékající proud, a tedy i napětí na zátěži. Na výstupu usměrňovače je stejnosměrné pulzující napětí, které je třeba co nejvíce vyhladit pomocí vyhlazovacího filtru. Ten hromadí elektrický náboj a dodává jej do obvodu v okamžiku poklesu pulzujícího vstupního napětí. Kondenzátor spolu s odporem diody a transformátoru tvoří dolní propust (integrační článek), která odstraňuje vysokofrekvenční spektrální složky signálu. Na výstup se zařazuje stabilizátor napětí, který se snaží udržet výstupní napětí konstantní při kolísání vstupního napětí a při změně proudového odběru do spotřebiče. Nezbytnou součástí laboratorního zdroje jsou rovněž panelová měřidla napětí a proudu. Slouží nejen pro správné nastavení výstupních hodnot, ale i pro možné odhalení poruchy napájeného přístroje. Na přední panel je také dobré umístit indikační LED diody např. o chodu zařízení, činnosti proudového omezení apod. Jak bylo uvedeno výše symetrický zdroj se sestává ze dvou jednoduchých zdrojů, a proto bude dále popisována pouze kladná větev zdroje.



Obr. 1.1: Základní blokové schéma síťového zdroje

1.1 Regulace výstupního napětí

1.1.1 Napěťový referenční zdroj

Úkolem napěťových referenčních zdrojů je vygenerovat mezi danými vývody napětí definované úrovně. Závislost tohoto napětí na vnějších veličinách, kterými jsou především teplota a pracovní proud musí být velmi malá, v ideálním případě nulová.

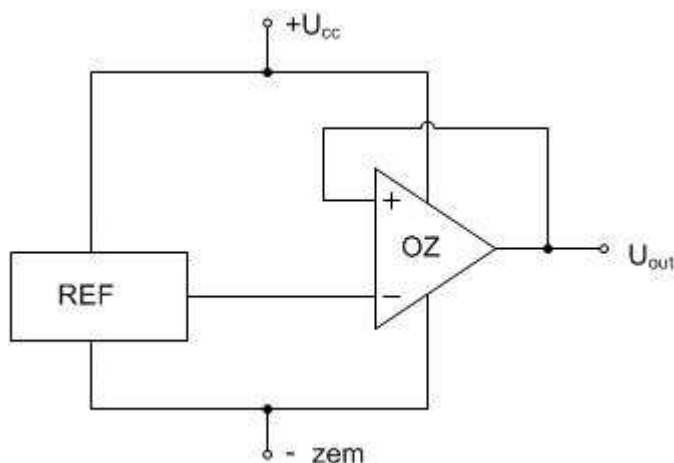
Důležitá je také tolerance výstupního napětí. Základním prvkem jednoduchých referenčních zdrojů je Zenerova dioda. Pro odstranění teplotní závislosti se dioda integruje do integrovaného obvodu společně s vytápěcím termostatem, který zvýší teplotu oproti okolnímu prostředí a udržuje ji konstantní (např. LM199).

V dnešní době, se místo klasických Zenerových diod, konstruovaných na principu degenerovaného PN přechodu, čím dál více uplatňují integrované obvody. Mají také dvě pouze dvě svorky označované jako katoda a anoda a mají i stejnou funkci – stabilizovat napětí při průchodu různých hodnot proudu. Dosahují mnohem lepších parametrů, jak z hlediska stability napětí, tak i tolerance vzhledem ke katalogové hodnotě. Nejdokonalejšími obvody tohoto typu jsou takové, které umožňují hodnotu výstupního napětí nastavit pomocí vnějšího odporového děliče (např. TL431).

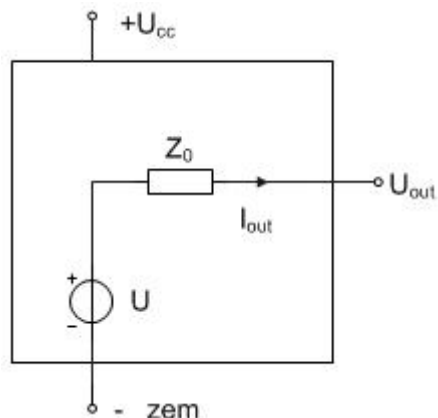
1.1.2 Funkční (blokové) schéma integrovaného stabilizátoru

Základní funkční blokové schéma obvodů integrovaného stabilizátoru napětí [2] je ukázáno na obr. 1.2. Sestává se ze stabilní reference, jejímž výstupem je U_{ref} a zesilovače regulační odchylky s velkým zesílením. Výstupní napětí U_{out} je buď shodné velikosti s referenčním, nebo jeho násobkem (popř. podílem). Stabilizátor má snahu udržovat výstupní napětí U_{out} konstantní při jakýchkoliv změnách hodnoty U_{out} jeho navrácením k původní hodnotě. Ideální stabilizátor napětí se tedy chová jako ideální zdroj napětí s konstantním výstupním napětím (také ovšem s nulovým vnitřním odporem).

Nicméně v praxi je integrovaný stabilizátor reprezentován modelem podle obr. 1.3 [3]. Na tomto obrázku je stabilizátor modelován jako napěťový zdroj s kladnou hodnotou výstupního odporu. Hodnota výstupního napětí takového stabilizátoru napětí tedy není konstantní, ale je proměnná nejen se zatížením tohoto napěťového zdroje, ale i se změnou teploty jeho přechodů, závislé jak na vnější teplotě, tak na vlastním ztrátovém výkonu. Výstupní napětí U_{out} je tedy závislé na úbytku napětí na vnitřním odporu (obecně impedanci) Z_0 , který je způsoben výstupním proudem I_{out} .



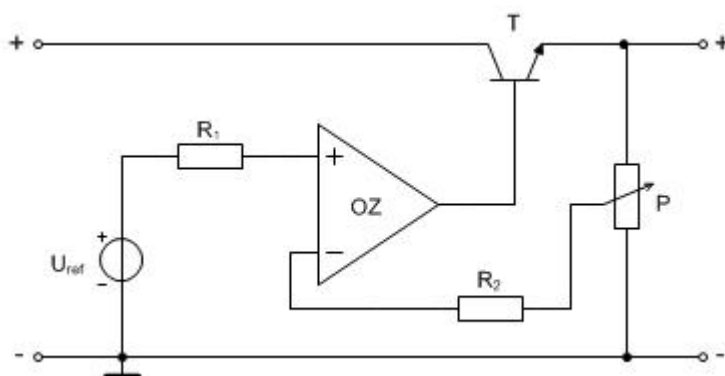
Obr. 1.2: Funkční blokové schéma integrovaného stabilizátoru [2]



Obr. 1.3: Náhradní schéma integrovaného stabilizátoru napětí [3]

1.1.3 Zapojení s operačním zesilovačem

Nejvíce užívané zapojení s operačním zesilovačem (obr. 1.4) [1] je ve funkci rozdílového zesilovače. Na neinvertující vstup se přivádí napětí z referenčního zdroje. Zatímco na invertující vstup se přivede napětí z výstupní svorky zdroje. Operační zesilovač tedy porovnává napětí nastavené (referenční) s napětím skutečným (z výstupu zdroje). Pokud se výstupní napětí zvýší nad referenční hodnotu, na výstup OZ se dostane nižší (zápornější) napětí, které přivě tranzistor.



Obr. 1.4: Regulace napětí pomocí OZ a tranzistoru [1]

1.1.4 Zapojení s třísvorkovým lineárním stabilizátorem

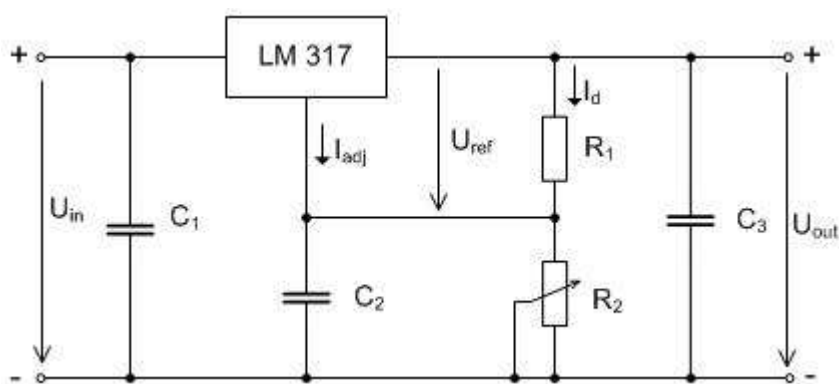
Regulátor kladného napětí nese označení LM317 (pro záporné napětí LM337), popř. podobné dané různými výrobci. Drobným nedostatkem je dolní prahové napětí 1,25 V. Všechny regulátory mají uvnitř vestavěné ochranné obvody proti zkratu na výstupu i proti účinkům nadměrného oteplení. Pokud stejnosměrný zdroj dodá do stabilizátoru tvrdé napětí, stačí aby vstupní napětí bylo jen o 3 V vyšší než požadované výstupní napětí.

V základním zapojení s odporovým děličem (obr. 1.5) [2], je výstupní napětí dáno tímto děličem. Pro možnost regulace výstupního napětí se rezistor R_2 nahrazuje potenciometrem, kterým teče proud samotného děliče I_d společně s proudem I_{adj} ,

reprezentující vlastní spotřebu integrovaného obvodu. Na rezistoru R_1 integrovaný obvod stabilizuje své referenční napětí. Výstupní stabilizované napětí U_{out} je tedy dáno vztahem

$$U_{out} = U_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) + (I_{adj} \cdot R_2). \quad (1.1)$$

Kondenzátor C_1 je nabíjecím kondenzátorem předřazeného usměrňovače. Použijeme jej v případě, kdy je nabíjecí kondenzátor napájecího zdroje vzdálen více než asi 10 cm od vlastního stabilizátoru. Na rozdíl od C_1 nemá kondenzátor C_3 funkci filtrační, ale zabráňuje rozkmitání stabilizátoru na vysokém kmitočtu. Kondenzátor C_2 se užívá ke zlepšení činitele zvlnění.



Obr. 1.5: Základní zapojení regulátoru LM 317 [2]

1.2 Regulace výstupního proudu

Všechny novější integrované obvody stabilizátorů obsahují vnitřní obvody, který chrání stabilizátor před překročením maximální hodnoty proudu a výkonu [3]. Jsou schopné dodat i proud v řádu jednotek ampér, než ochranný obvod začne reagovat. Při napájení zařízení se závadou to může znamenat jeho zničení. Horší situace nastává jestliže tento ochranný obvod chybí zcela, potom je ohrožen i samotný zdroj. Takové škodě nelze předejít při použití trubičkové tavné pojistky, která polovodičové prvky neochrání, a to ani tehdy, když se přepálí. Pro tranzistory a integrované obvody je již pozdě.

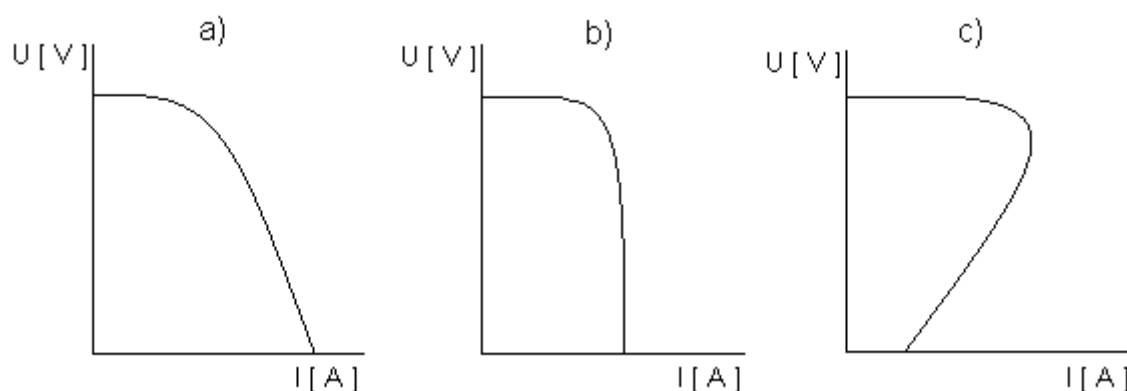
U novějších elektronických napájecích zdrojů je běžné, že do určitého, často nastavitelného, zatěžovacího proudu se obvod chová jako zdroj napětí, po jeho překročení jako zdroj proudu. Tomuto opatření, které okamžitě reaguje na zvýšený proud, říkáme nadproudová ochrana, omezení proudu, elektronická pojistka. Jedině tak je možné polovodičové prvky zachránit. Toto platí pouze za předpokladu, že je nastavená hodnota proudu jen o málo vyšší než je skutečný nebo předpokládaný proud zkoušeného obvodu.

V praxi to znamená, že kromě vnitřní ochrany integrovaného stabilizátoru je zapotřebí další pojistky, nastavitelné na mnohem menší proud než je maximální proud stabilizátoru.

Obecně rozlišujeme dva druhy pojistek. Oba typy pojistek se vyznačují jednou společnou nevýhodou. Z principu činnosti vyplývá, že vyhodnocují napětí na odporu, vloženém do cesty protékajícímu proudem. Tento odpor zvyšuje – třebaže jen nepatrně – vnitřní odpor stabilizovaného zdroje. I přes tuto skutečnost představuje elektronická pojistka důležitý prvek usnadňující práci konstruktéra.

1.2.1 Elektronická pojistka omezovací

Tyto pojistky [2], [3] omezí protékající proud na hodnotu, předem nastavenou ovládacím prvkem na panelu zdroje. Při překročení proudu poklesne nastavené napětí, a tím se zamezí dalšímu zvyšování proudu. Na obr. 1.6 jsou uvedeny možné případy funkce pojistky. Při klesajícím napětí stále ještě slabě roste proud (obr. 1.6a), nebo zdroj napětí přechází ve zdroj proudu (obr. 1.6b), nebo dokonce se může křivka obracet zpátky a zkratový proud je menší, než proud pracovní (obr. 1.6c).



Obr. 1.6: Způsoby omezení proudu [3]

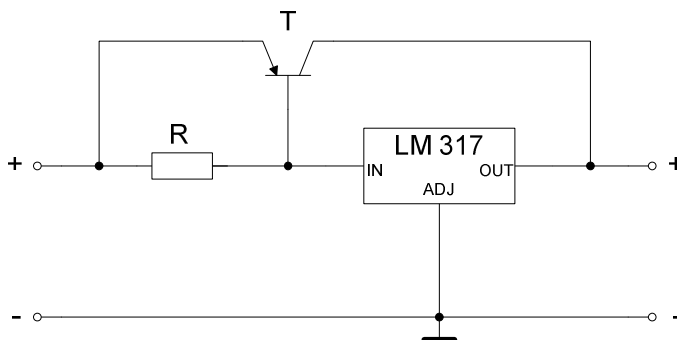
1.2.2 Elektronická pojistka rozpojovací

Jiný druh představuje pojistka, která neomezuje proud, nýbrž rozpojí obvod mezi zdrojem a připojeným zařízením. Proud okamžitě klesne téměř na nulovou hodnotu a ampérmetr tuto změnu spolehlivě indikuje. Nevýhoda „vypínací“ pojistky nastává v případě, že je k ní připojen obvod s filtrační kapacitou. V takové situaci ampérmetr nezaznamená žádný proud, ale obvod přesto přerušen není. Pojistka je nastavena na předpokládanou provozní hodnotu proudu, ale nabíjecí proud „vybitého“ kondenzátoru je značný a rozhodně větší než běžný proud tekoucí obvodem. Proudová pojistka velmi rychle reaguje a obvod rozpojí hned na začátku proudové špičky. Nezbývá nic jiného než napětí na zdroji zvyšovat postupně, aby nedošlo k prudkému nárůstu proudu.

1.2.3 Proudové posílení výstupu

Některé elektronické obvody vyžadují ke své činnosti větší proud než může poskytnout samotný integrovaný stabilizátor. V takovém případě se nejčastěji připojí výkonový tranzistor (obr. 1.7) [2], [4], který umožní průchod poměrně velkému proudu. Mezi emitor a bázi výkonového tranzistoru vodivosti PNP je připojen rezistor R . Na vhodně zvolené hodnotě rezistoru R se vytváří úbytek napětí právě tak velký, aby došlo k otevření tranzistoru T a ten převzal zbývající část proudu zátěže. Je-li zvolen tranzistor T křemíkový, začíná se otevírat při hodnotách U_{BE} asi od 0,4 V a výše.

Protože tranzistory výkonového typu mají při hodnotách kolektorových proudů v řádu jednotek ampér velmi nízké proudové zesílení (v praxi lze počítat s hodnotou h_{21E} v řádu desítek), není hodnota proudu báze, vtékající rovněž do vstupu stabilizátoru, zanedbatelná. Je nutné ji při návrhu zapojení zohlednit.

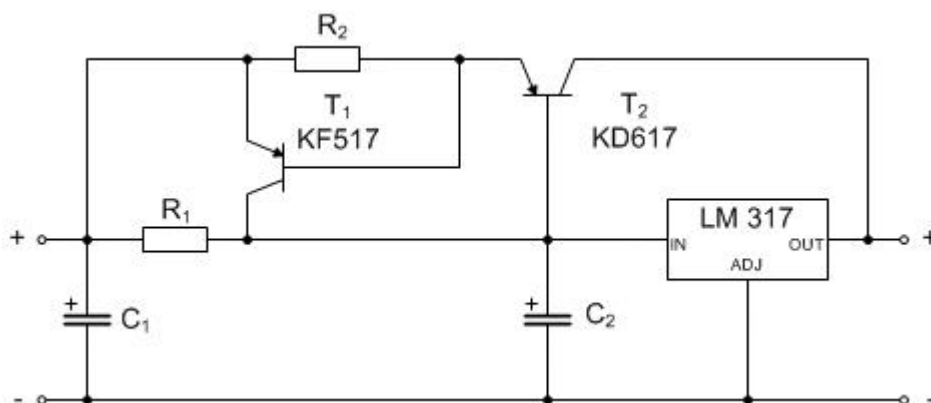


Obr. 1.7: Proudové posílení třísvorkového regulátoru [2]

V zapojení na obr. 1.8 [2] je přidán ochranný tranzistor T_1 , který zabezpečuje omezení velikosti proudu tranzistorem T_2 a tak jej chrání proti proudovému a výkonovému přetížení v případě zkratu na výstupu (popř. nadměrnému odběru). Odpořem protéká rozdíl celkového proudu zdroje a proudu, který protéká integrovaným stabilizátorem. Vzniká na něm úbytek napětí, který otevírá tranzistor T_1 a ten v případě svého otevření následně zkratovává napětí U_{BE2} a tím zavírá tranzistor T_2 . Hodnota R_2 je dána vztahem

$$R_2 = U_{BE1} / (I_{out} - I_{stab}), \quad (1.2)$$

kde I_{stab} je proud procházející samotným stabilizátorem. Zařazením tohoto odporu se však nutně mění hodnota odporu R_1 , kdy úbytek napětí na něm musí krýt jak napětí U_{BE2} pro otevření T_2 , tak i úbytek na R_2 . Přesný výpočet je komplikovaný vzhledem k individuálním hodnotám napětí U_{BE1} a U_{BE2} , při kterých se začínají oba tranzistory otevírat.

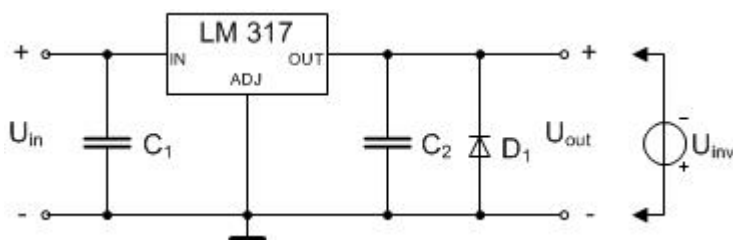


Obr. 1.8: Zapojení proudové ochrany posilovače proudu [2]

1.2.4 Ochranné obvody třísvorkových stabilizátorů

Ochrana proti přepolarizování výstupu

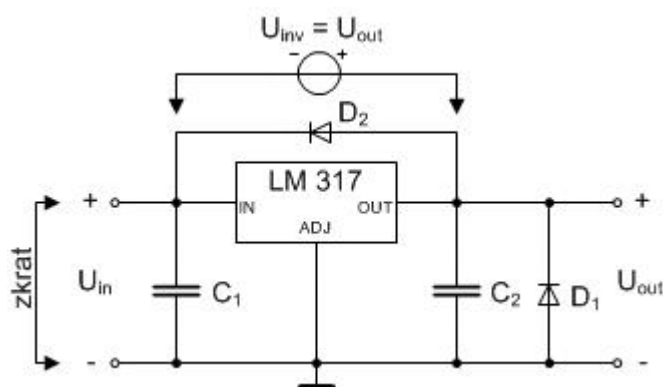
V mnoha aplikacích může vzniknout možnost připojení napětí s opačnou polaritou na výstup zdroje. Aby i v takovéto situaci zdroj nebyl zničen, je vhodné na jeho výstup připojit antiparalelně polarizovanou diodu. Dioda je v normálním režimu polarizována v závěrném směru a její vliv se neuplatní. Při namáhání výstupu inverzním napětím U_{inv} dioda povolí pouze napětí $U_F = 0,7 \text{ V}$. Pro prevenci před tímto stavem se užívá ochranná dioda, zapojená podle obr. 1.9.



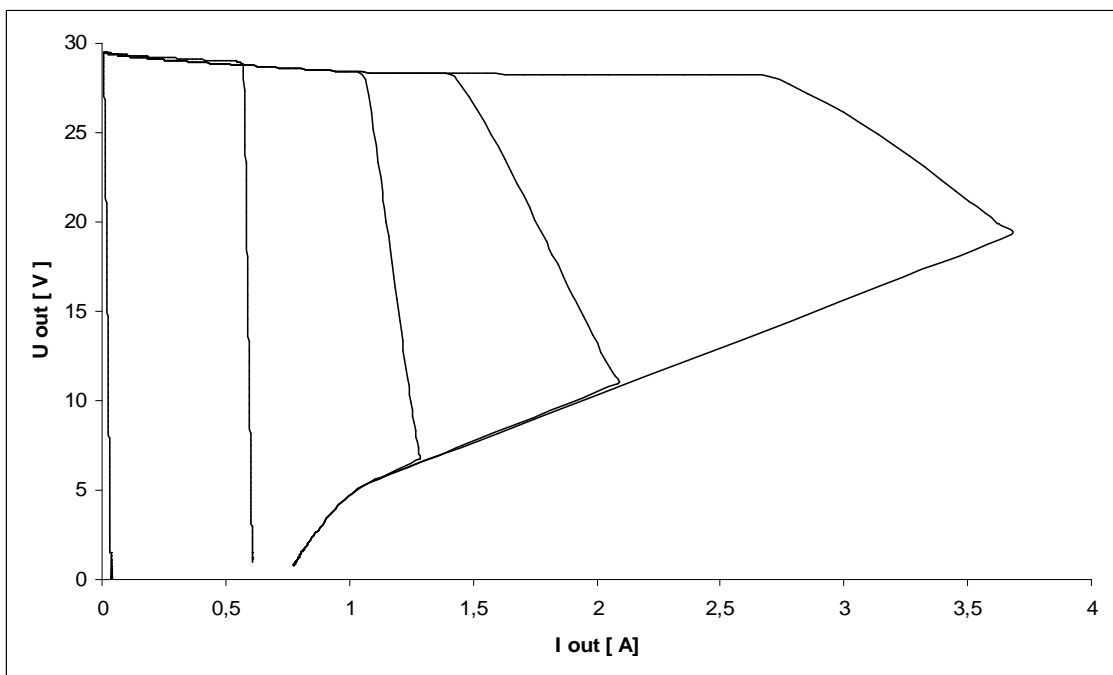
Obr. 1.9: Ochrana proti přepólování výstupu [2]

Ochrana proti zkratu na vstupu

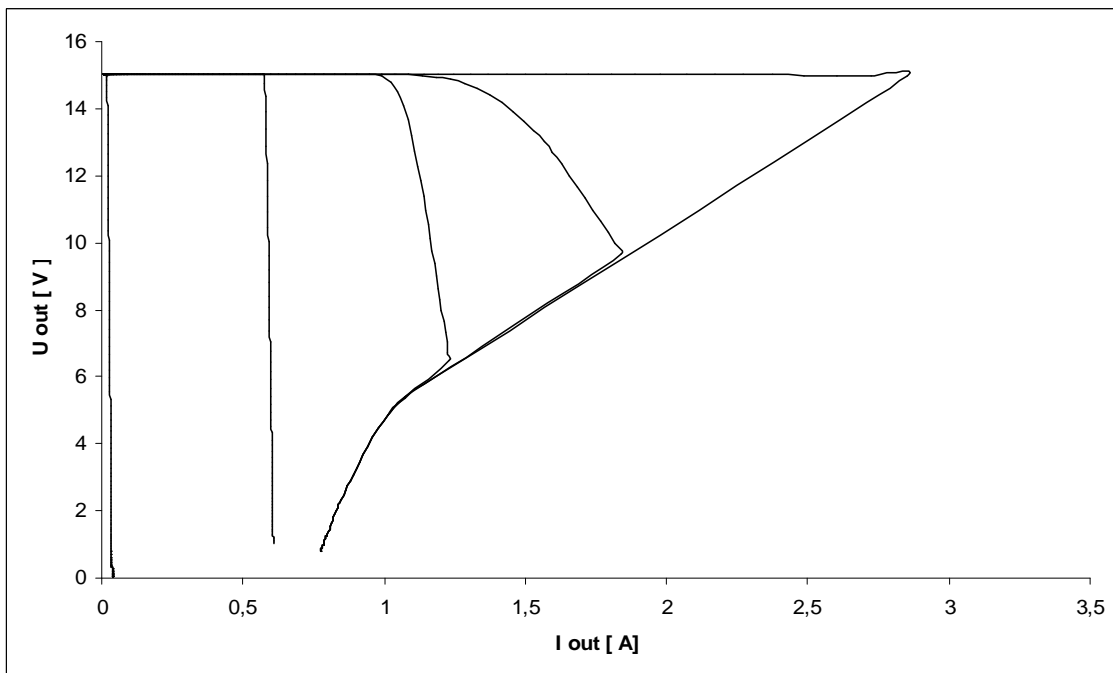
Ve všech aplikacích dále vždy existuje možnost vzniku zkratu na výstupu napájecího zdroje, tj. na vstupu popisovaného stabilizátoru. Tato situace např. vznikne, je-li zdroj vybaven ochranou proti přetížení a z toho důvodu vypne a klesá jeho výstupní napětí (tedy klesá i vstupní napětí stabilizátoru). Poté se náboj kondenzátoru C_2 na výstupu vybije přes vnitřní obvody stabilizátoru. Vstupní elektroda je v tom okamžiku na nižším potenciálu než výstupní, protože C_2 je stále nabitý. Náboj se v okamžiku vyrovná velkým proudem a pravděpodobně zničí část integrovaného obvodu. Velikost náboje závisí na kapacitě kondenzátoru C_2 a okamžitém výstupním napětí. Obr. 1.10 ukazuje doporučenou ochranu třísvorkového stabilizátoru diodou.



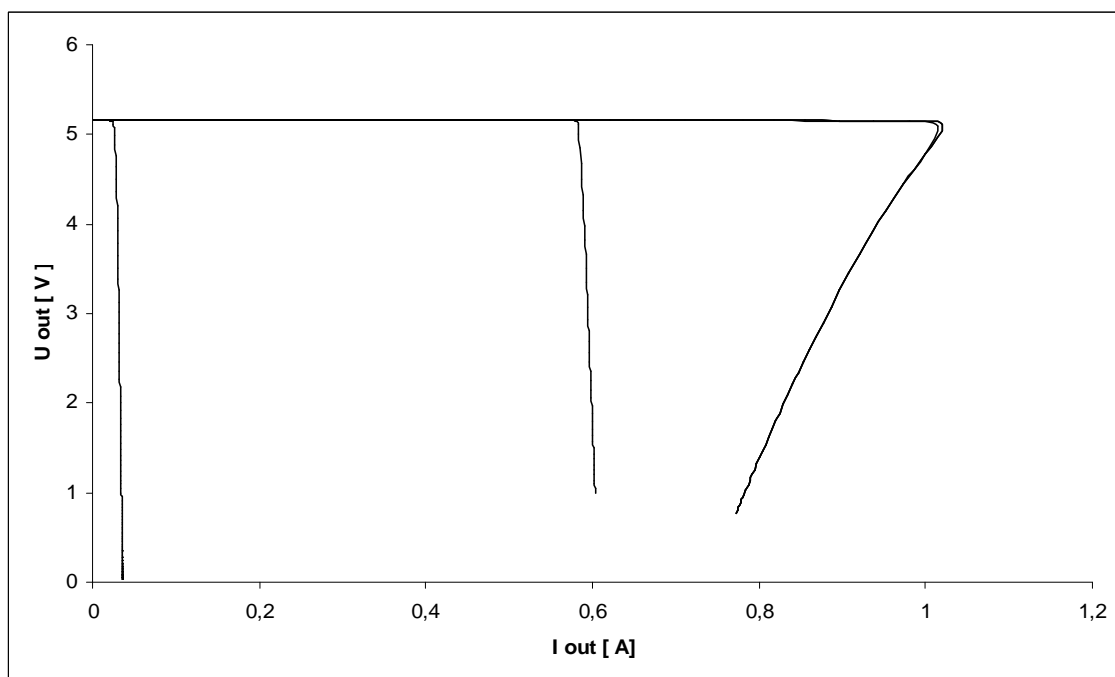
Obr. 1.10: Ochrana proti zkratu na vstupu [2]



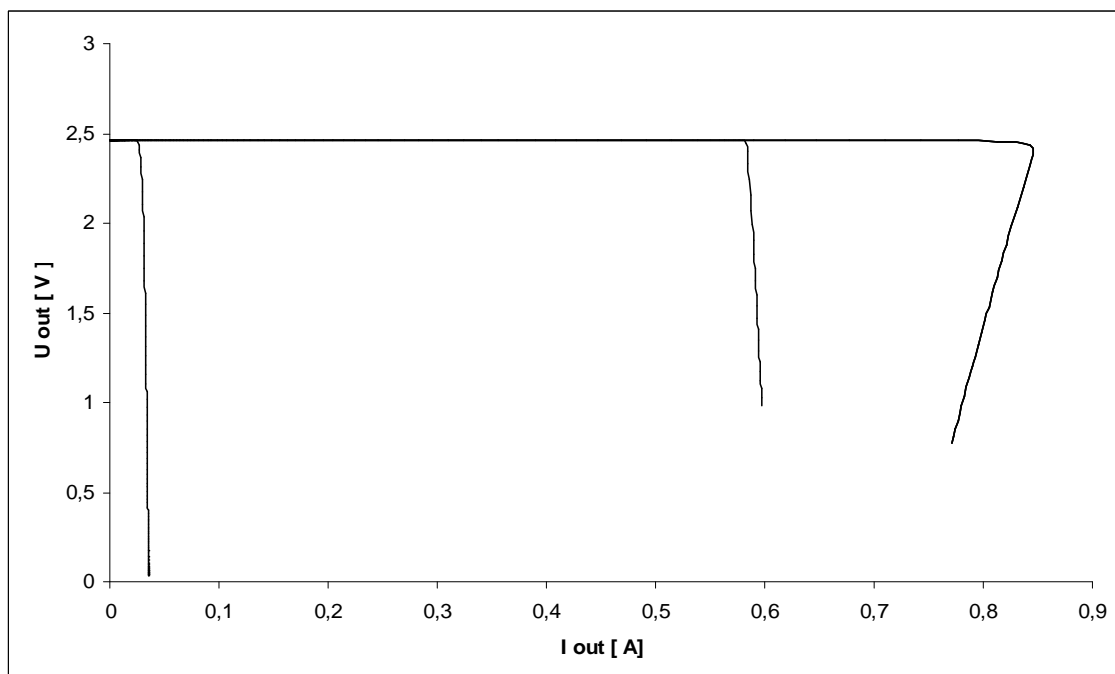
Obr. 1.12: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro maximální výstupní napětí



Obr. 1.13: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 15 V



Obr. 1.14: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 5,2 V



Obr. 1.15: Zatěžovací charakteristika zdroje č.1 pro výstupní napětí 2,5 V

Tab. 1.1: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace

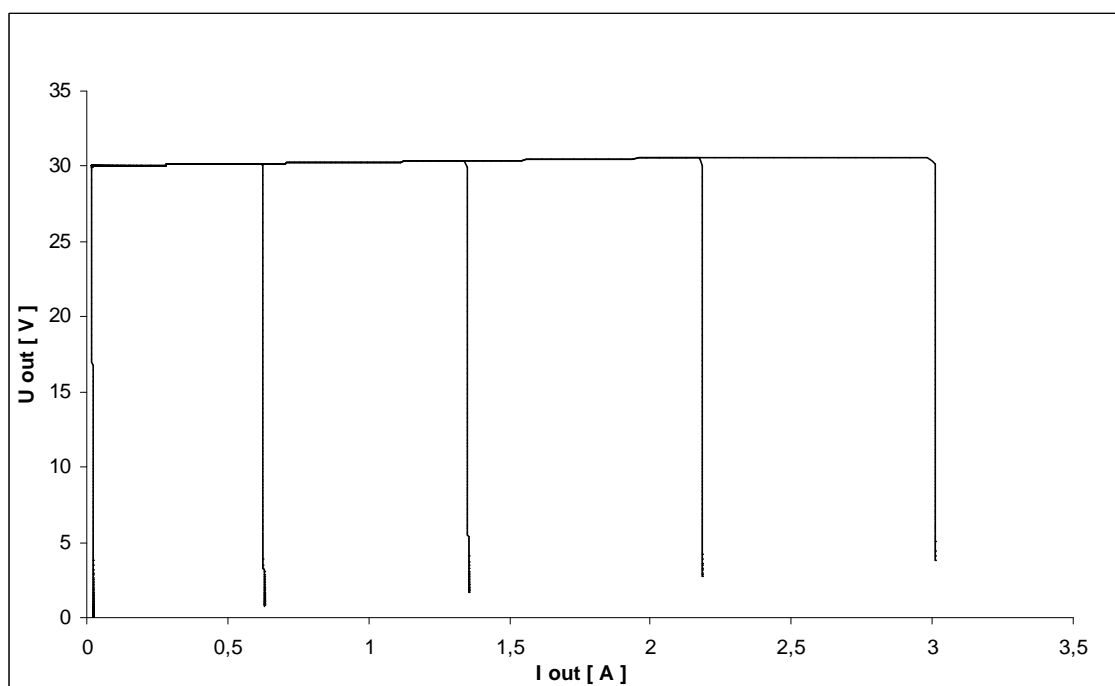
U_{out}	ΔU_{out}
[V]	[mV]
2,5	0,1
5,0	0,3
10,0	0,9
15,0	4,6
20,0	10,1
25,0	21,8
27,6	1870,0

Tab. 1.2: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace

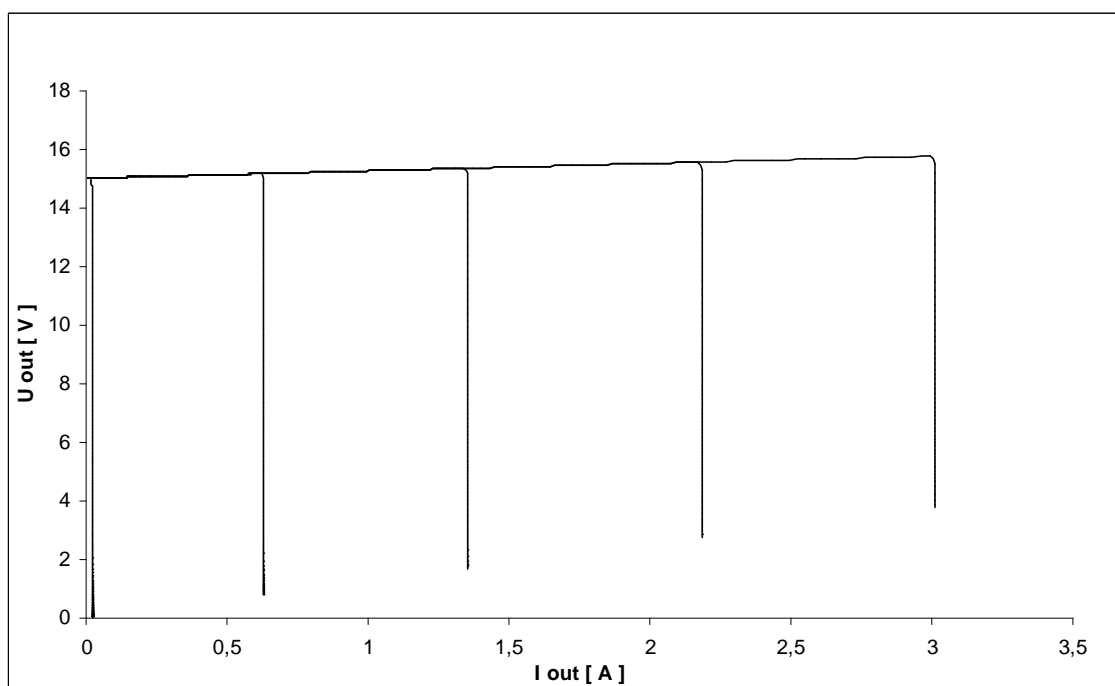
I_{out}	ΔU_{out}	R_Z
[mA]	[mV]	[Ω]
10	0,3	2510,0
50	1,3	512,0
500	2,0	50,0
1000	2,2	25,0
3000	19,1	8,4

1.3.2 Zdroj č.2

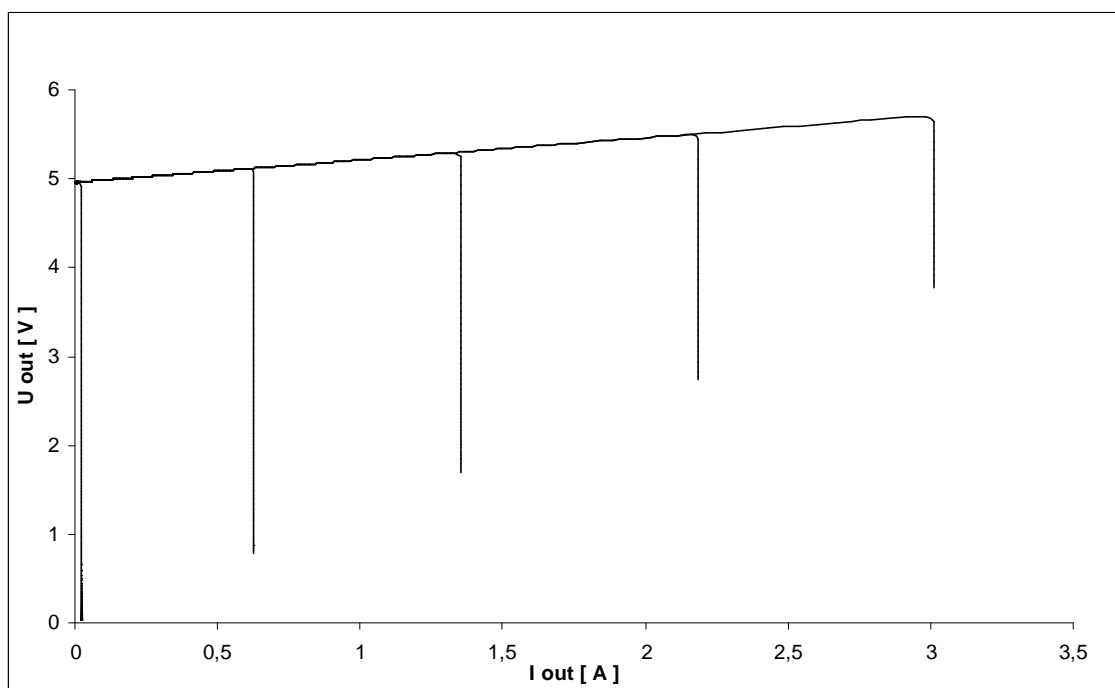
Přesné napětí zajišťuje zdroj referenčního napětí TL431 (referenční napětí 2,5V). Pro ovládání výstupu zdroje (obr. 1.16) [7] jsou použity dva operační zesilovače (OZ), které pracují v režimu komparátoru. OZ₁ udržuje nastavené výstupní napětí (OZ₁). Porovnává referenční napětí a výstupní napětí snížené děličem R_6 , R_7 . Jeho výstup je přes rezistor R_2 připojen na tranzistor T₁, který tvoří tranzistorový mezistupeň. Toto zesílení je nutné, protože výkonové tranzistory nemají potřebné zesílení. Druhý OZ nastavuje maximální proud zátěží. Opět porovnává napětí reference TL431 a napětí, resp. úbytek napětí na snímacím rezistoru R_8 . Tento rezistor musí být dobře výkonově dimenzován, neboť jím protéká celý zatěžovací proud. Výstup OZ₂ je přes diodu D₁₀ připojen na bázi tranzistoru T₃. V provozním stavu zdroje, kdy není překročen nastavený proud, je na výstupu OZ₂ kladné napětí. V případě překročení povoleného výstupního proudu se tranzistor T₃ otevírá a snižuje napětí na bázi T₁. Záporné napájecí napětí pro OZ je vytvořeno pomocným usměrňovačem s diodami D₇, D₈ a kondenzátory C₄, C₇. Není tedy třeba další vinutí na síťovém transformátoru. Kondenzátor C₄ se v jedné půlperiodě nabije přes diodu D₇ a ve druhé půlperiodě se z něj nabije kondenzátor C₇ přes diodu D₈. Tento zdroj je „měkký“ (proudový odběr je řádově desítky mA), ale pro napájení operačních zesilovačů dostačující. Napětí z kondenzátoru C₇ je stabilizováno integrovaným stabilizátorem 7905 na -5 V. Kladné napájecí napětí OZ obstarává integrovaný stabilizátor 7805. Nespornou výhodou je zde chlazení pouze jednoho aktivního prvku – tranzistoru T₂. Složitější obvodová struktura může vést ke komplikacím při návrhu desky plošného spoje. Zatěžovací charakteristika (obr. 1.17) ukazuje, že aktivací proudového omezení se z napěťového zdroje stává zdroj proudu.



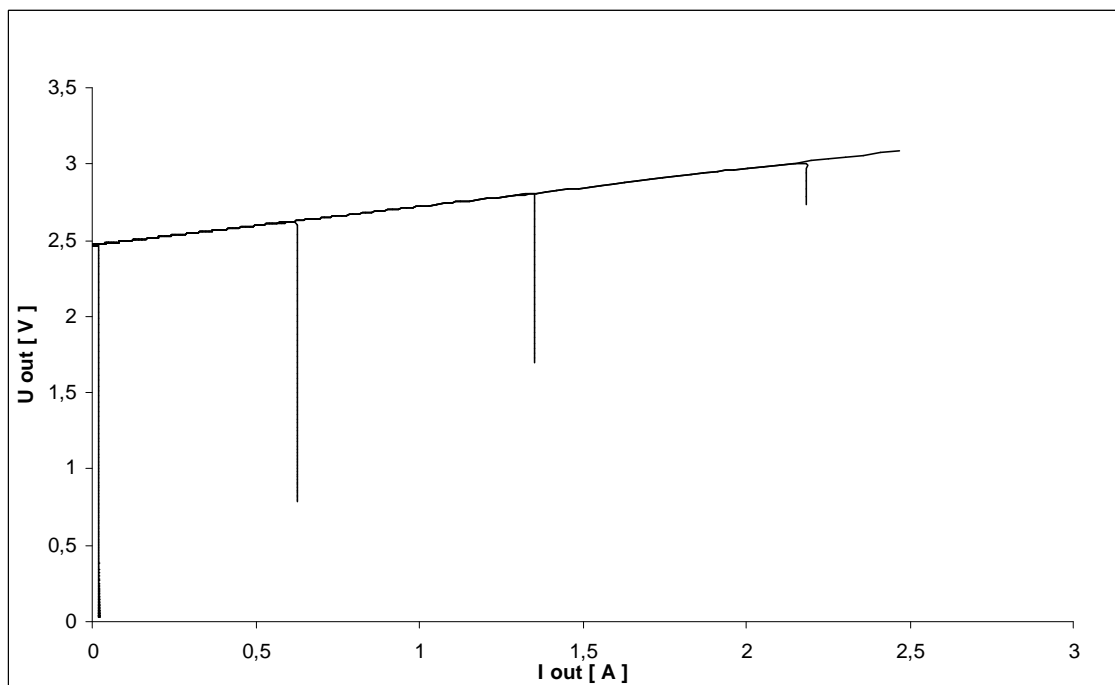
Obr. 1.17: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro maximální výstupní napětí



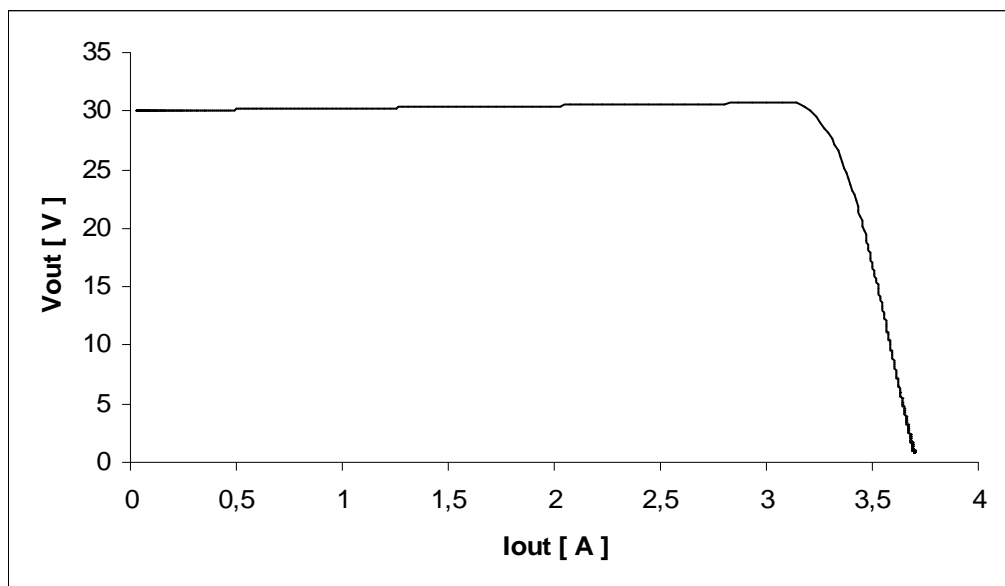
Obr. 1.18: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 15 V



Obr. 1.19: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 5 V



Obr. 1.20: Zatěžovací charakteristika zdroje č.2 pro výstupní napětí 2,5 V



Obr. 1.21: Zatěžovací charakteristika pro pevnou proudovou pojistku

Tab. 1.3: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace

U_{out}	ΔU_{out}
[V]	[mV]
2,5	1,1
5,0	1,0
10,0	0,6
15,0	0,6
20,0	0,7
25,0	1,4
30,0	1300,00

Tab. 1.4: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace

I_{out}	ΔU_{out}	R_Z
[mA]	[mV]	[Ω]
10	1	2400,0
50	1	480,0
500	1	48,0
1000	2	24,0
3000	10	8,4

1.3.3 Zdroj č.3

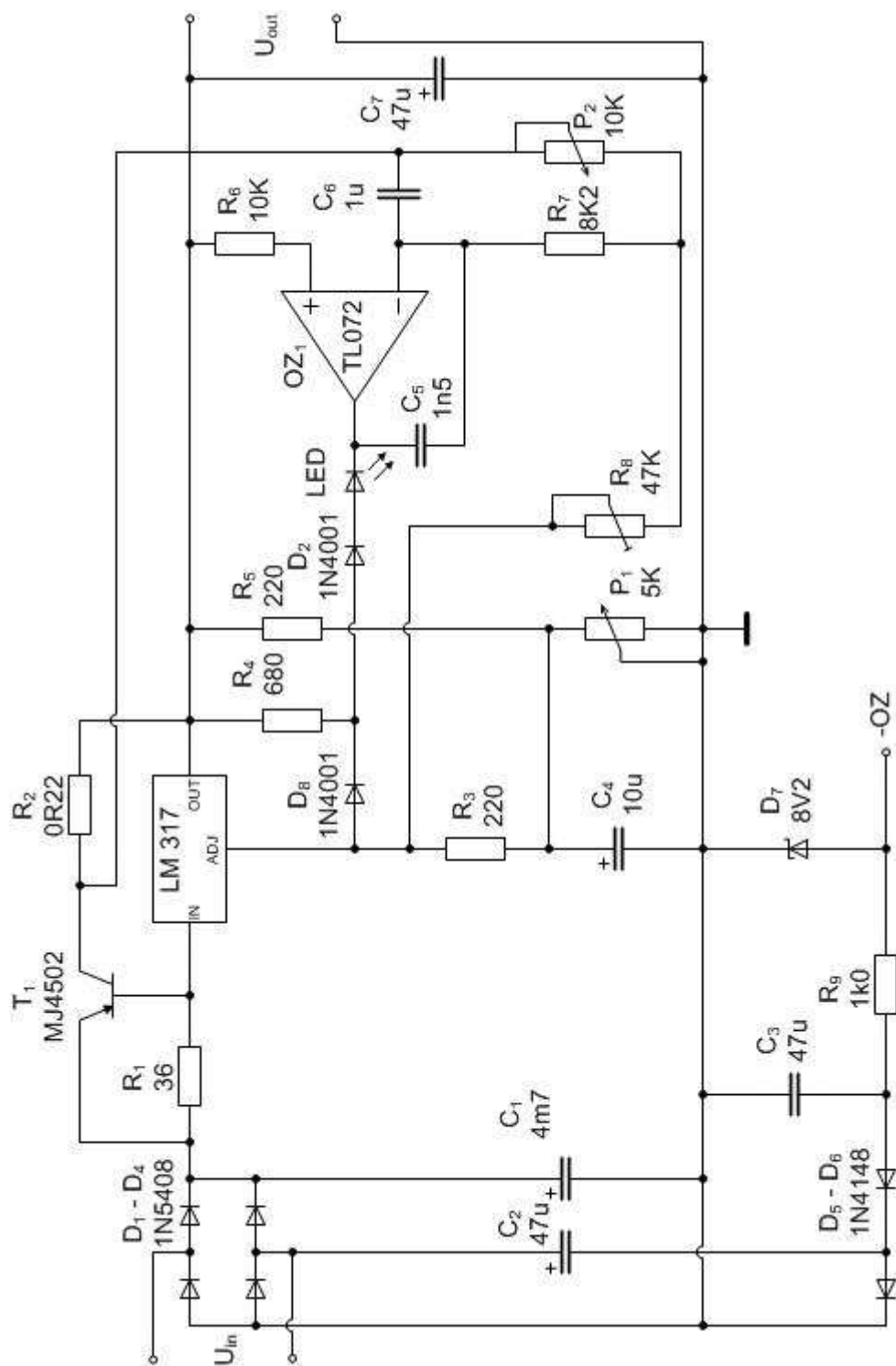
Základem zdroje č.3 (obr. 1.22) [8] je třísvorkový stabilizátor LM317. Napěťová regulace je řešena pomocí externího odporového děliče R_5 , Pot_1 , který dodává potřebné napětí pro řídicí svorku stabilizátoru. Opět je zde pro zvýšení proudu doplněn tranzistor T_1 . V sérii s ním je rezistor R_2 . Úbytek na tomto rezistoru vyhodnocuje operační zesilovač TL072, který plní funkci elektronické proudové pojistky. V případě aktivace pojistky se z tohoto zdroje stane zdroj proudu (viz. zatěžovací charakteristika obr. 1.23). Její činnost je signalizována diodou LED. Hodnota rezistoru R_2 je navržena tak, že proud tekoucí stabilizátorem je malý. Díky tomu není nutno stabilizátor LM317 umisťovat na chladič, protože na něm nevzniká téměř žádné ztrátové teplo. Tento zdroj však neumožňuje řízení napětí od nulové hodnoty. Nejnižší dosažitelná hodnota je 1,25 V a je dána stabilizátorem LM317.

Tab. 1.5: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace

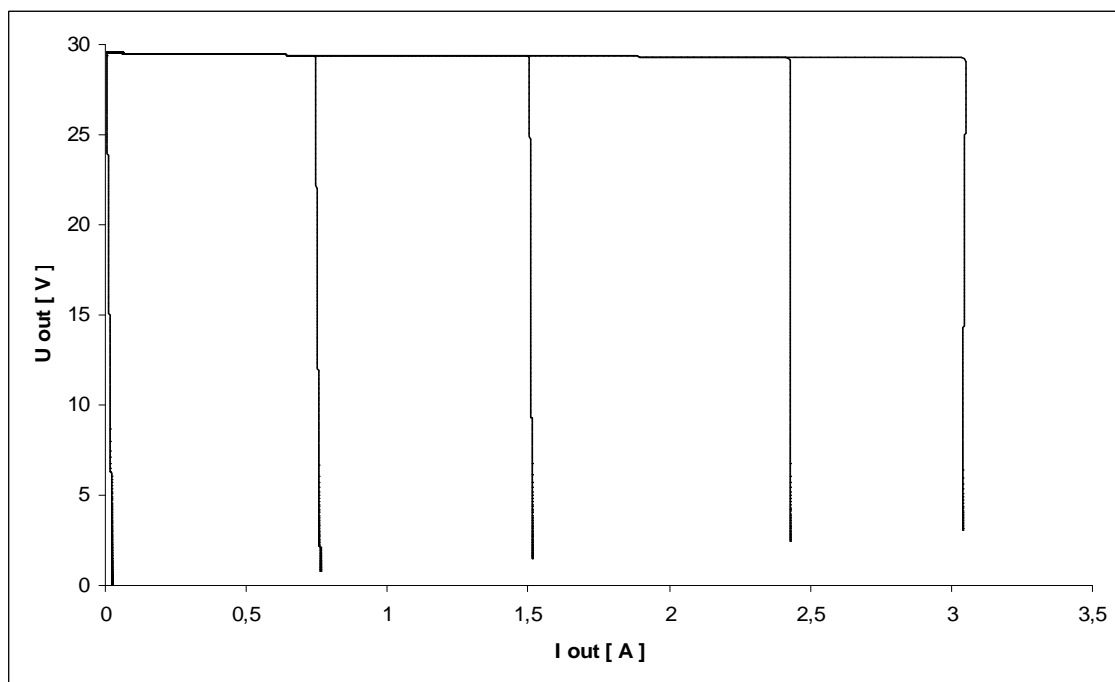
U_{out}	ΔU_{out}
[V]	[mV]
2,5	0,2
5,0	0,1
10,0	0,4
20,0	3,0
25,0	5,0
27,2	300,00

Tab. 1.6: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace

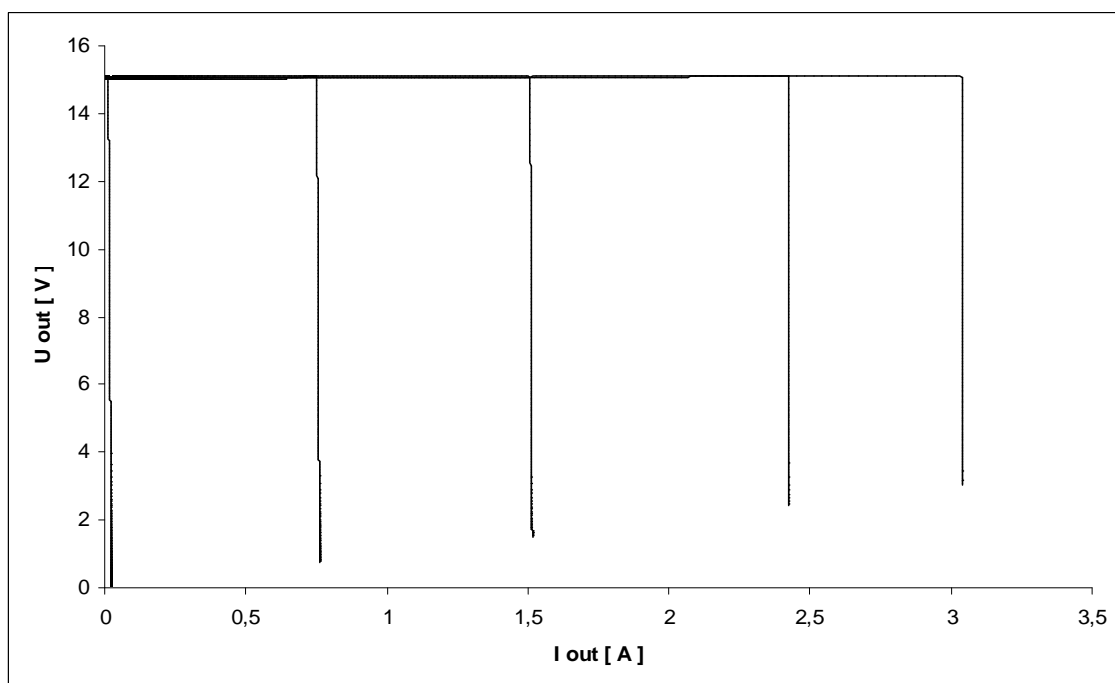
I_{out}	ΔU_{out}	R_Z
[mA]	[mV]	[Ω]
10	0,9	2500,0
50	1,0	500,0
500	2,3	50,0
1000	5,0	25,0
3000	24,2	8,3



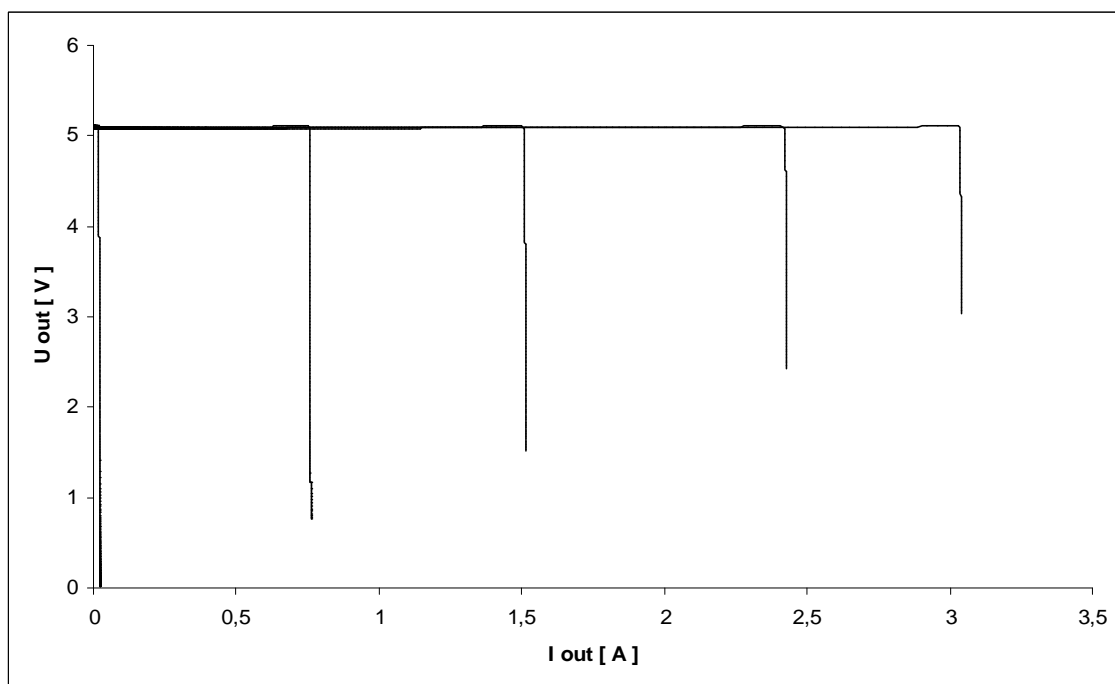
Obr. 1.22: Schéma zapojení zdroje č.3 (převzato z [8])



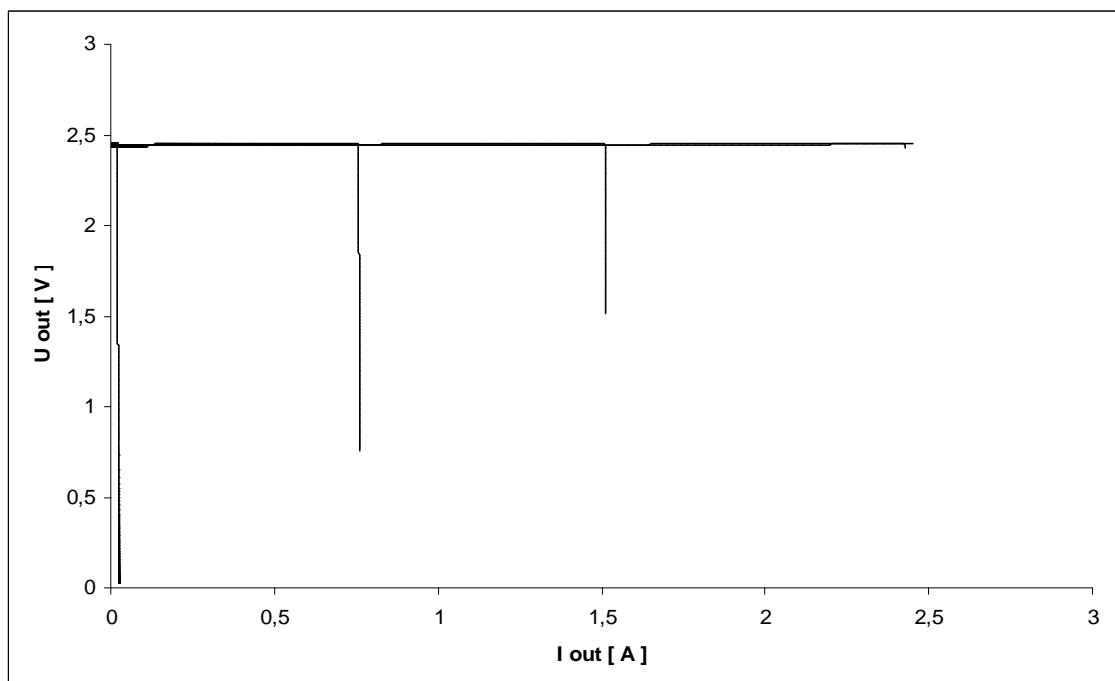
Obr. 1.23: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro maximální výstupní napětí



Obr. 1.24: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 15 V



Obr. 1.25: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 5 V



Obr. 1.26: Zatěžovací charakteristika zdroje č.3 pro výstupní napětí 2,5 V

1.3.4 Zdroj č.4

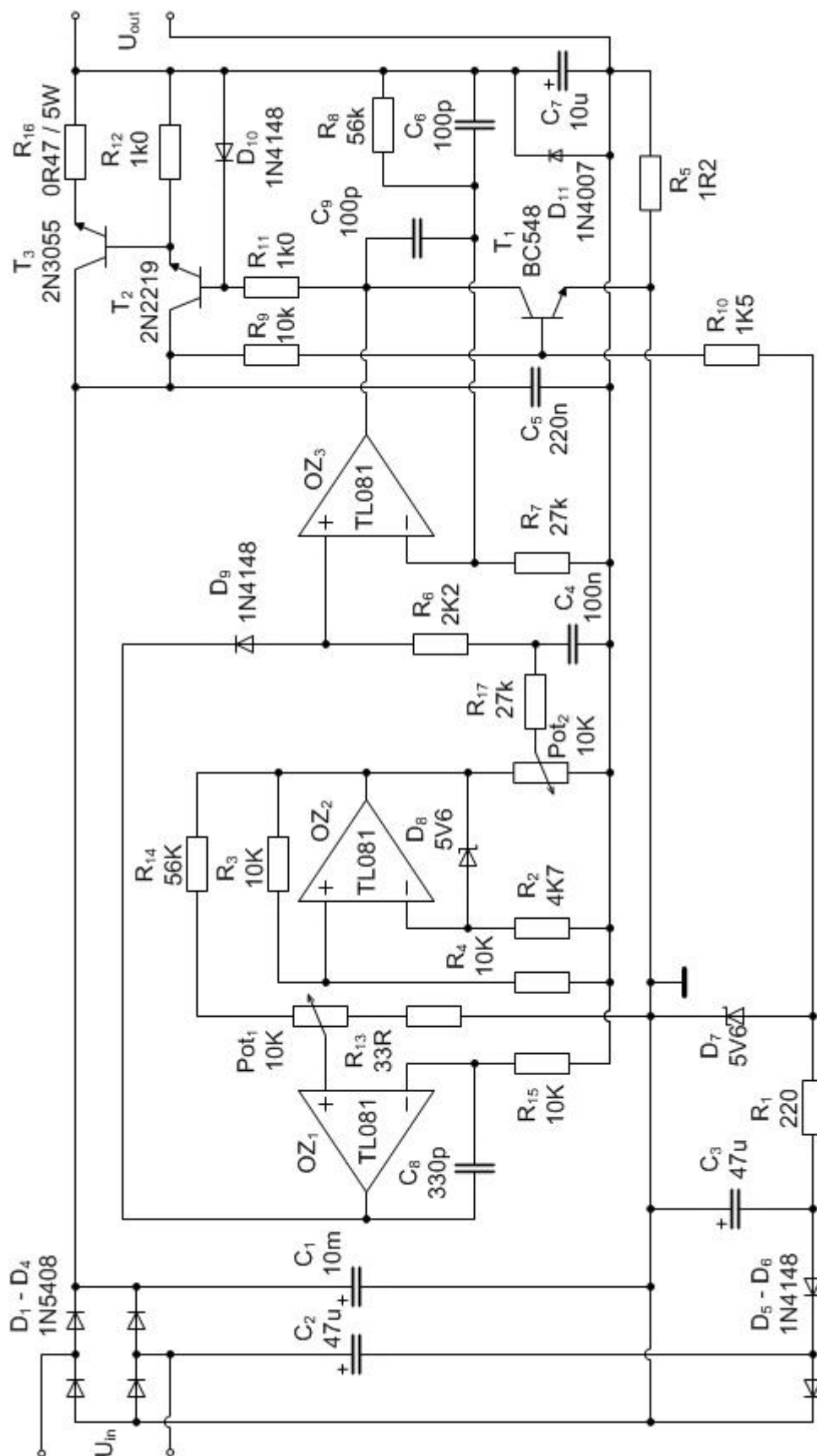
Tento zdroj (obr. 1.27) [9] ke své činnosti využívá tří operačních zesilovačů. Přičemž jeden – OZ_2 - společně se Zenerovou diodou D_8 vytváří zdroj referenčního napětí. Pomocí potenciometru Pot_2 se nastavuje výstupní napětí na OZ_3 , který ovládá prostřednictvím tranzistoru T_2 výkonový tranzistor T_3 . OZ_1 je ve funkci proudové pojistky. Při překročení nastavené hodnoty proudu se na výstupu OZ_1 objeví záporné napětí, které projde přes diodu D_9 na vstup OZ_3 (řízení napětí), a tím poklesne výstupní napětí U_{out} . Záporné napětí pro OZ zajišťuje Zenerova dioda D_7 . Díky třem OZ a tranzistorům je obvodová složitost vyšší a opět mohou při realizaci plošného spoje nastat komplikace, které je nutné zvážit. V zapojení je však nutné chladit pouze jeden prvek – výkonový tranzistor T_1 .

Tab. 1.7: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního napětí při zátěži $R_Z = 10 \Omega$ – simulace

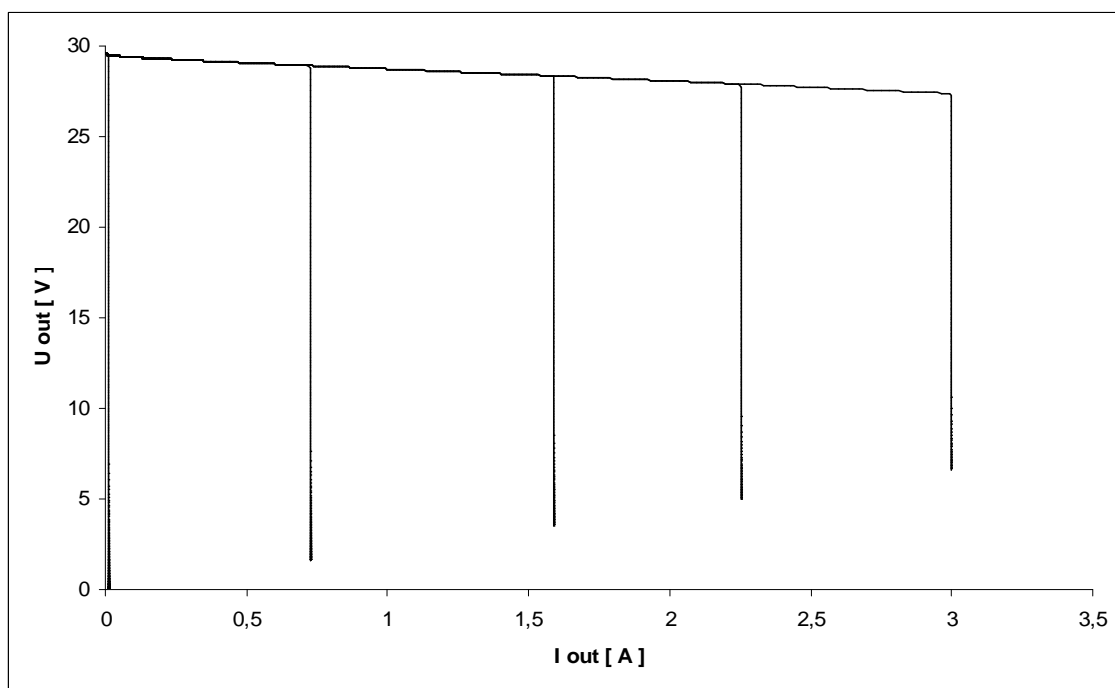
U_{out}	ΔU_{out}
[V]	[mV]
2,5	0,1
5,0	0,2
10,0	0,5
20,0	0,9
25,0	1,2
27,0	1669,0

Tab. 1.8: Hodnoty zvlnění napětí pro různé nastavení výstupního proudu při nastaveném výstupním napětí $U_{out} = 25 \text{ V}$ – simulace

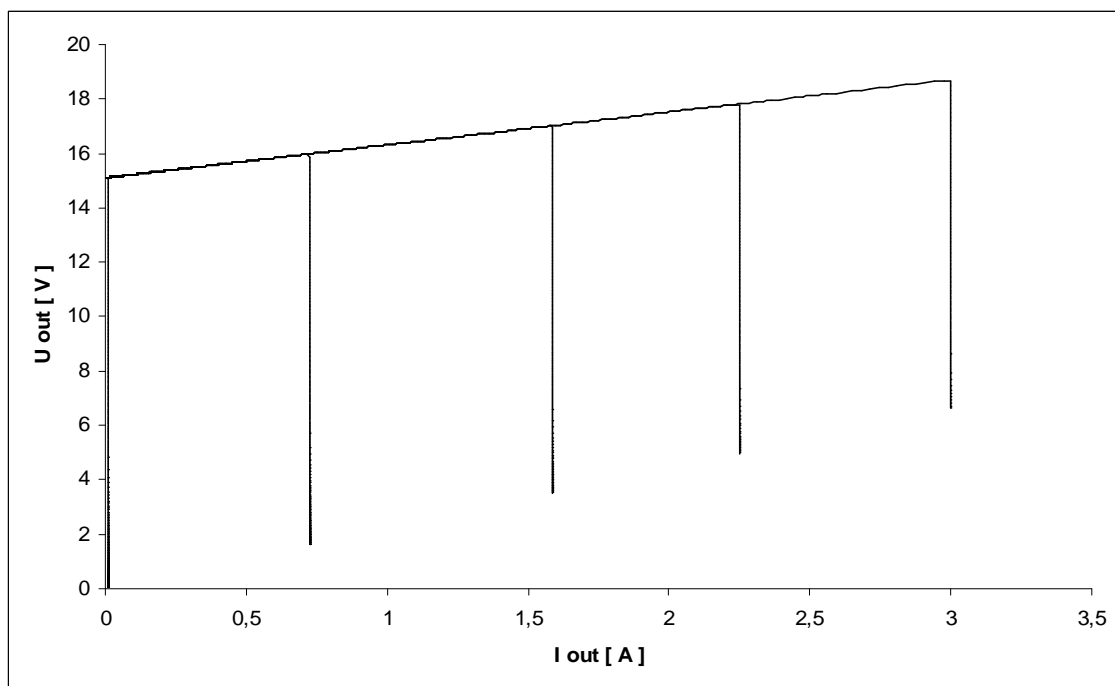
I_{out}	ΔU_{out}	R_Z
[mA]	[mV]	[Ω]
10	0,4	2500
50	0,6	480
500	3,0	48
1000	6,0	24
3000	1444,00	10



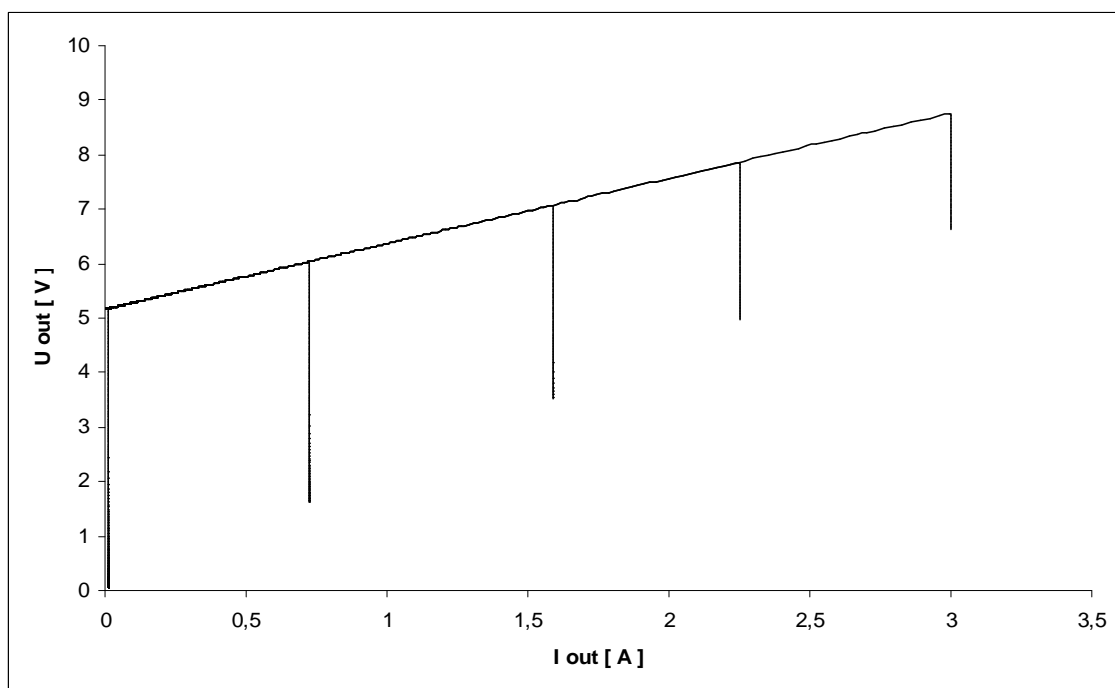
Obr. 1.27: Schéma zapojení zdroje č.4 (převzato z [9])



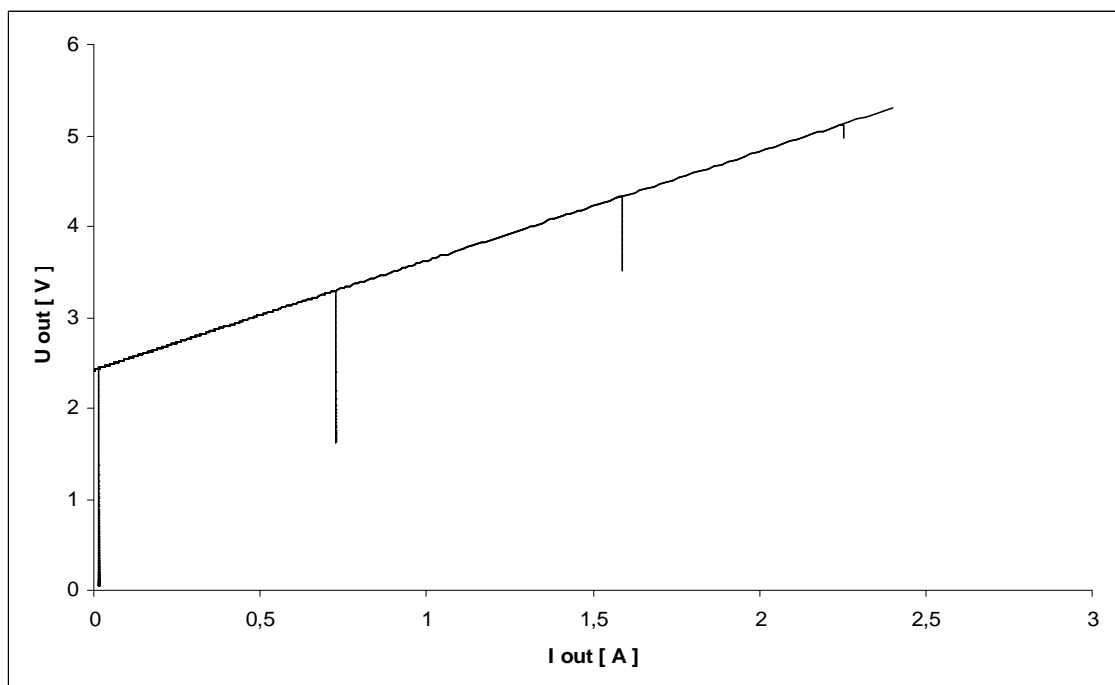
Obr. 1.28: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro maximální výstupní napětí



Obr. 1.29: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 15 V



Obr. 1.30: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 5 V



Obr. 1.31: Zatěžovací charakteristika zdroje č.4 pro výstupní napětí 2,5 V

1.3.5 Zhodnocení vlastností simulovaných zdrojů

Všechny zdroje vybrané pro jejich porovnání vlastností byly podrobeny simulacím programu OrCAD. Základním kritériem porovnání byly zatěžovací charakteristiky zdroje a zvlnění výstupního napětí při simulování různých podmínek na zátěži. Podmínkami jsou myšleny různé hodnoty výstupního napětí a proudu v zátěži.

Ze zatěžovací charakteristiky prvního zdroje pro nastavené maximální výstupní napětí je vidět, že toto napětí s narůstajícím zatěžujícím proudem poklesne. Je to dáno parametrem pro minimální úbytek (tzv. dropout voltage) na stabilizátoru. Pro nižší nastavené napětí je již jeho průběh konstantní. Po aktivaci proudového omezení napětí rychle klesá a od určitého bodu začne klesat i proud. Zvlnění výstupního napětí bylo ze zkoumaných zdrojů největší.

Druhý zdroj používající pro nastavování výstupu operačních zesilovačů se stává v okamžiku omezování proudu zdrojem konstantního proudu. Jedinou nevýhodou bylo mírné zvyšování výstupního napětí se vzrůstajícím proudem. Zvlnění výstupního proudu bylo velmi dobré až do nastavení maximálního výstupního napětí.

Třetí zdroj vykazoval podobný průběh zatěžovací charakteristiky jako předchozí zdroj. Zvlnění výstupního napětí bylo rovněž nízké.

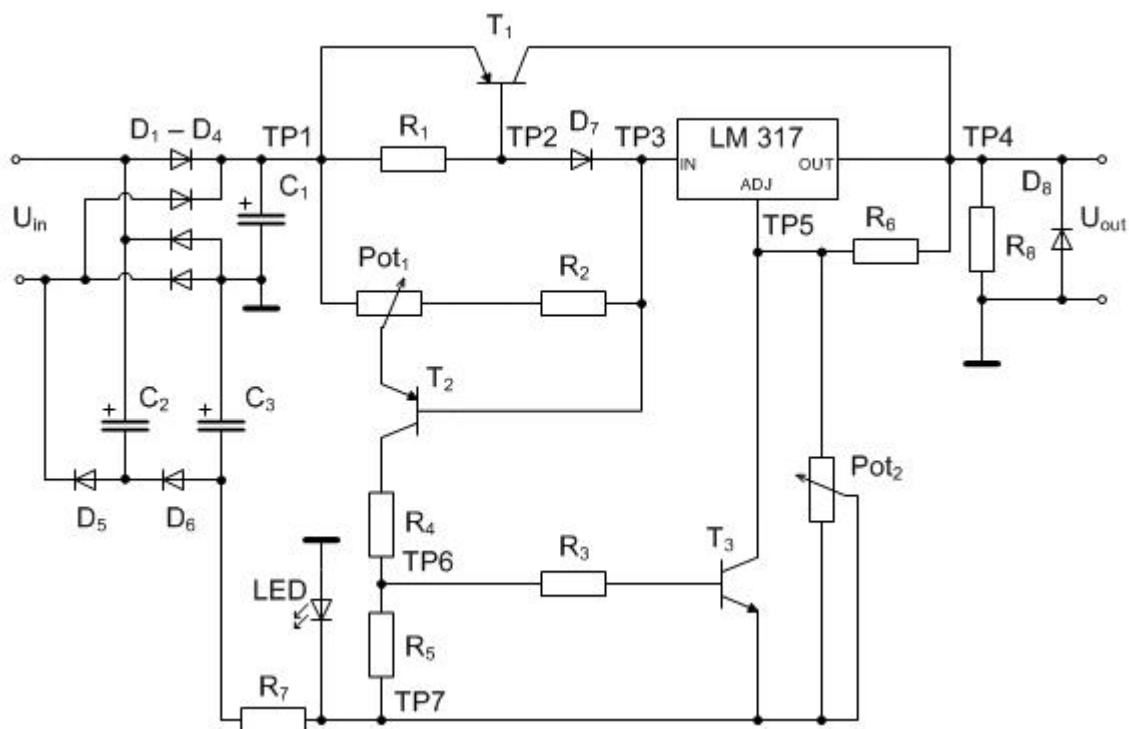
Poslední zdroj i přes svoji obvodovou náročnost vykazoval nejhorší vlastnosti co se týče zatěžovacích charakteristik. Zvlnění výstupního napětí bylo průměrné.

2 NÁVRH ZDROJE

Ze čtyř výše popisovaných schémat zdrojů byly vybrána dvě zapojení, pro která bude proveden podrobný návrh jednotlivých součástek. Zapojení zdroje (zdroj č. 1 ze strany 22) ovládaného pomocí integrovaného stabilizátoru LM317 není až tak běžné, a proto je dobré jej detailněji prozkoumat. Druhým zapojením je zdroj č. 2 (str. 26), který vykazoval nejlepší parametry.

Pro výpočty je nutné znát parametry tranzistorů (h_{21E} , U_{CE} , I_C , U_{BE} , atd.). V katalogových listech jsou jednotlivé závislosti mezi zmiňovanými parametry většinou uváděny při napětí $U_{CE} = 5$ V. Z tohoto důvodu byly parametry zjištěny simulací konkrétního případu pomocí programu OrCAD.

2.1 Návrh zdroje č.1



Obr. 2.1: Schéma zapojení zdroje č. 1 pro návrh hodnot jednotlivých součástek s rozmístěním měřících bodů (TP)

Vstupní část zdroje

Podle zadání má zdroj dodávat proud 3 A. Pro usměrňovač v Grätzově zapojení jsem zvolil pro usměrňovací diody typu P600K, které vydrží proud až 6 A. Písmeno K značí velikost závěrného napětí 800 V. Při použití transformátoru o výstupním napětí 24 V bylo pomocí simulace zjištěno, že na filtračním kondenzátoru C_1 je při zatížení zvlněné napětí se střední hodnotou přibližně 32 V. Toto napětí je zároveň vstupním napětím U_{in} zdroje.

Velikost kapacity filtračního kondenzátoru C_1 se doporučuje 2 mF na každý odebíraný ampér. Vyšší kapacita není na závadu. Pro tento případ je zvolena 10 mF. V praxi, i když se přímo vyrábí tato hodnota, se používají dva paralelně spojené kondenzátory poloviční kapacity 2 x 4,7 mF. Tímto je zamezeno situaci, kdy se kondenzátor zničí nebo se razantně sníží jeho kapacita např. z důvodu stárnutí. Jinak by nefiltrované zvlněné napětí mohlo zničit integrované obvody.

Na diody pomocného usměrňovače nejsou kladeny velké nároky, a proto stačí použít typ 1N4148. Odebíraný proud je závislý na kapacitě kondenzátorů C_2 , C_3 . Hodnota kapacity kondenzátorů je v tomto případě 100 μ F.

Odběr proudu ze záporné větve usměrňovače, nesmí být větší než odběr proudu z kladné větve [9]. Jinak by se napětí na filtračním kondenzátoru C_1 mohlo zvýšit nad mezní hodnotu vstupního napětí integrovaného stabilizátoru a následně jej zničit. Zároveň musí být stabilizátor pro zachování napěťové regulace zatížen minimálním proudem 3,5 mA [10], a proto musí být zapojen rezistor $R_8 = 1,2$ k Ω . Na výstupu je jako ochrana proti přepólování antiparalelně dioda D₇. Dioda LED udržuje záporné napětí přibližně 1,8 V, které je třeba pro regulaci výstupního napětí od nuly. Procházející proud diodou LED je omezen rezistorem $R_7 = 2,7$ k Ω , který plní funkci předřadného rezistoru.

Řízení výstupního napětí

Potřebné parametry integrovaného stabilizátoru LM317T pro další výpočty jsou

- referenční napětí $U_{ref} = 1,25$ V
- proud řídící elektrodou $I_{adj} = 50$ μ A

Hodnota odporu potenciometru Pot₂ byla zvolena 10 k Ω . Ze základního vzorce (2.1) [10] pro výpočet výstupního napětí stabilizátoru LM317 se vyjádří rezistor R_6

$$U_{out} = U_{ref} \left(1 + \frac{Pot_2}{R_6} \right) + (I_{adj} \cdot Pot_2) - U_E \quad (2.1)$$

$$\frac{U_{out} + U_E - (I_{adj} \cdot Pot_2)}{U_{ref}} - 1 = \frac{Pot_2}{R_6} \quad (2.2)$$

$$R_6 = \frac{Pot_2}{\frac{U_{out} + U_E - U_{ref} - (I_{adj} \cdot Pot_2)}{U_{ref}}} \quad (2.3)$$

$$R_6 = \frac{U_{ref} \cdot Pot_2}{U_{out} + U_E - U_{ref} - (I_{adj} \cdot Pot_2)} \quad (2.4)$$

Dosažením hodnot do upraveného vzorce získáme hodnotu rezistoru R_6

$$R_6 = \frac{1,25 \cdot 10^4}{30 + 1,8 - 1,25 - (50 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4)} = 416 \, \Omega \quad (2.5)$$

Hodnotu rezistoru R_6 získáme jako sériovou kombinací rezistoru $330 \, \Omega$ a nastavovacího trimru o hodnotě $100 \, \Omega$.

Při maximálním výstupním proudu $3 \, \text{A}$, je zvolen proud $I_{RI} = 700 \, \text{mA}$. Výkonový tranzistor T_1 musí dodat zbylý proud $2,3 \, \text{A}$. Tomuto proudu odpovídá na přechodu B-E tranzistoru T_1 úbytek napětí $U_{BE1} = 0,84 \, \text{V}$. Velikost rezistoru R_I lze vypočítat jako

$$R_I = \frac{U_{RI}}{I_{RI}} = \frac{U_{BE1}}{I_{RI}} = \frac{0,84}{0,7} = 1,2 \, \Omega \quad (2.6)$$

$$P_{RI} = U_{RI} \cdot I_{RI} = 0,84 \cdot 0,7 = 588 \, \text{mW} \quad (2.7)$$

Tento rezistor bude z pasivních součástek nejvíce zatěžován, a proto je důležité jej dobře výkonově dimenzovat. Pro ztrátový výkon $588 \, \text{mW}$ bude postačující metal – oxidový rezistor na $2 \, \text{W}$.

Výkonový tranzistor T_1 je zvolen MJ2955, je schopný dodávat trvalý proud $15 \, \text{A}$ a ztrátový výkon může být až $115 \, \text{W}$.

Proud diodou D_1 je složen ze dvou složek. Jednak je to proud rezistoru R_I a dále proud báze výkonového tranzistoru T_1 .

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{h_{21E1}} = \frac{2300 \cdot 10^{-3}}{44} = 52 \, \text{mA} \quad (2.8)$$

$$I_{D1} = I_{RI} + I_{B1} = 700 \cdot 10^{-3} + 52 \cdot 10^{-3} = 752 \, \text{mA} \quad (2.9)$$

Při zjištění proudu diodou $752 \, \text{mA}$ a připočtení rezervy se může použít dioda např. typ 1N5408.

Řízení výstupního proudu

Pracovní bod tranzistoru T_3 musí být navržen tak, aby při plné aktivaci proudové pojistky bylo mezi jeho svorkami saturační napětí U_{CES3} asi do $0,6 \, \text{V}$. Kolektorový proud pro $U_{out} = 0 \, \text{V}$ je potom dán

$$I_{C3} = \frac{(U_{out} + U_E) - U_{CES3}}{R_6} = \frac{(0 + 1,8) - 0,6}{410} = 2,93 \, \text{mA} \quad (2.10)$$

a tím i proud báze tranzistoru T_3

$$I_{B3} = \frac{I_{C3}}{h_{21E3}} = \frac{2,93 \cdot 10^{-3}}{196} = 14,95 \mu A \quad (2.11)$$

Rezistor $R_3 = 220 \Omega$ je pouze ochranný a úbytek na něm je zanedbatelný.

$$U_{R3} = R_3 \cdot I_{B3} = 220 \cdot 14,95 \cdot 10^{-6} = 3,3 \text{ mV} \quad (2.12)$$

$$P_{R3} = U_{R3} \cdot I_{R3} = 3,3 \cdot 10^{-3} \cdot 14,95 \cdot 10^{-6} = 49,3 \text{ nW} \quad (2.13)$$

Napětí na přechodu C-E tranzistoru T_2 se při přechodu z klidového stavu proudové pojistky do plné aktivace změní pouze o několik desetin voltu. Napětí na přechodu C-E jsem zvolil $U_{CE2} = 25 \text{ V}$ a procházející proud $I_{C2} = 270 \mu A$ při plné aktivaci proudového omezení. Proud rezistorem R_5 je potom

$$I_{R5} = I_{C2} - I_{B3} = 270 \cdot 10^{-6} - 14,95 \cdot 10^{-6} = 255,05 \mu A \quad (2.14)$$

Napětí U_{BE3} je při zjištěném U_{CES3} a I_{C3} přibližně 0,69 V. Při zanedbání úbytku U_{R3} je na rezistoru napětí rovné úbytku napětí na přechodu B-E tranzistoru T_3 . Hodnota rezistoru tedy je

$$R_5 = \frac{U_{BE3}}{I_{R5}} = \frac{0,69}{255,05 \cdot 10^{-6}} = 2705 \Omega \quad (2.15)$$

Při nastavení maximálního omezování proudu, tj. na výstupu zdroje bude zanedbatelný proud, je potenciometr Pot_1 v krajní poloze a na emitor tranzistoru T_2 je přivedeno plné napájecí napětí. Napětí na rezistoru R_4 je dáno rovnicí

$$U_{R4} = U_{in} - U_{CE2} - U_{BE3} + U_{LED} = 32 - 25 - 0,69 + 1,8 = 8,11 \text{ V} \quad (2.16)$$

Hodnota rezistoru R_4 je tedy vypočítána jako

$$R_4 = \frac{U_{R4}}{I_{C2}} = \frac{8,11}{270 \cdot 10^{-6}} = 30,04 \text{ k}\Omega \quad (2.17)$$

Pro proud $I_{C2} = 270 \mu A$ jsem odečetl napětí $U_{BE} = 0,67 \text{ V}$. Hodnota rezistoru R_2 určuje maximální výstupní proud. Kvůli výrobním odchylkám v parametrech tranzistoru je lepší hodnotu rezistoru R_2 dostavit pomocí trimru. Pomocí programu OrCAD byla získána hodnota 860Ω . Je vhodné použít sériovou kombinaci rezistoru 470Ω a trimru rovněž o hodnotě 470Ω .

2.2 Návrh zdroje č.2

Řízení výstupního napětí

Počáteční nastavení pro výpočet je $U_{out} = 30 \text{ V}$, $I_{out} = 3 \text{ A}$. Úbytek na rezistoru R_8 je daný především proudem ze zátěže. Možné přídatné proudy netvoří ani celé jedno procento proudu zátěže, a proto je možné je zanedbat. Úbytek napětí U_{R8} při hodnotě rezistoru $R_8 = 0,22 \Omega$ tedy je

$$U_{R8} = R_8 \cdot I_Z = 0,22 \cdot 3 = 0,66 \text{ V} \quad (2.18)$$

$$P_{R8} = U_{R8} \cdot I_Z = 0,66 \cdot 3 = 1,98 \text{ W} \quad (2.19)$$

Rezistor $R_7 = 2,2 \text{ k}\Omega$ je zajišťuje správný proud, přibližně 15 mA, do obvodu napěťové reference TL431. Při nastavení plného výstupního napětí je na jezdcí potenciometru Pot₁ referenční napětí z TL431, zvýšené o úbytek U_{R8} . Toto napětí 3,16 V je přímo přivedeno na neinvertující vstup operačního zesilovače (OZ₁) NE5532, který pracuje jako komparátor bez hystereze. Pro stálý stav musí být na invertující vstup OZ₁ přivedeno stejné napětí jako na neinvertující vstup. Na rezistoru R_7 tedy musí být úbytek

$$U_{R4} = U_{1+} - U_{R8} = 3,16 - 0,66 = 2,5 \text{ V} \quad (2.20)$$

Na rezistorech R_4 a R_6 je celé výstupní napětí. V případě, že na R_4 je zapotřebí napětí 2,5 V, zbývá na rezistor R_6 napětí 27,5 V. Poměr úbytků napětí je 1 : 11. Podle ohmova zákona je napětí přímo úměrné velikosti odporu, a proto můžeme zvolit rezistory $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$ a $R_6 = 11 \text{ k}\Omega$. Celkový proud těmito rezistory je:

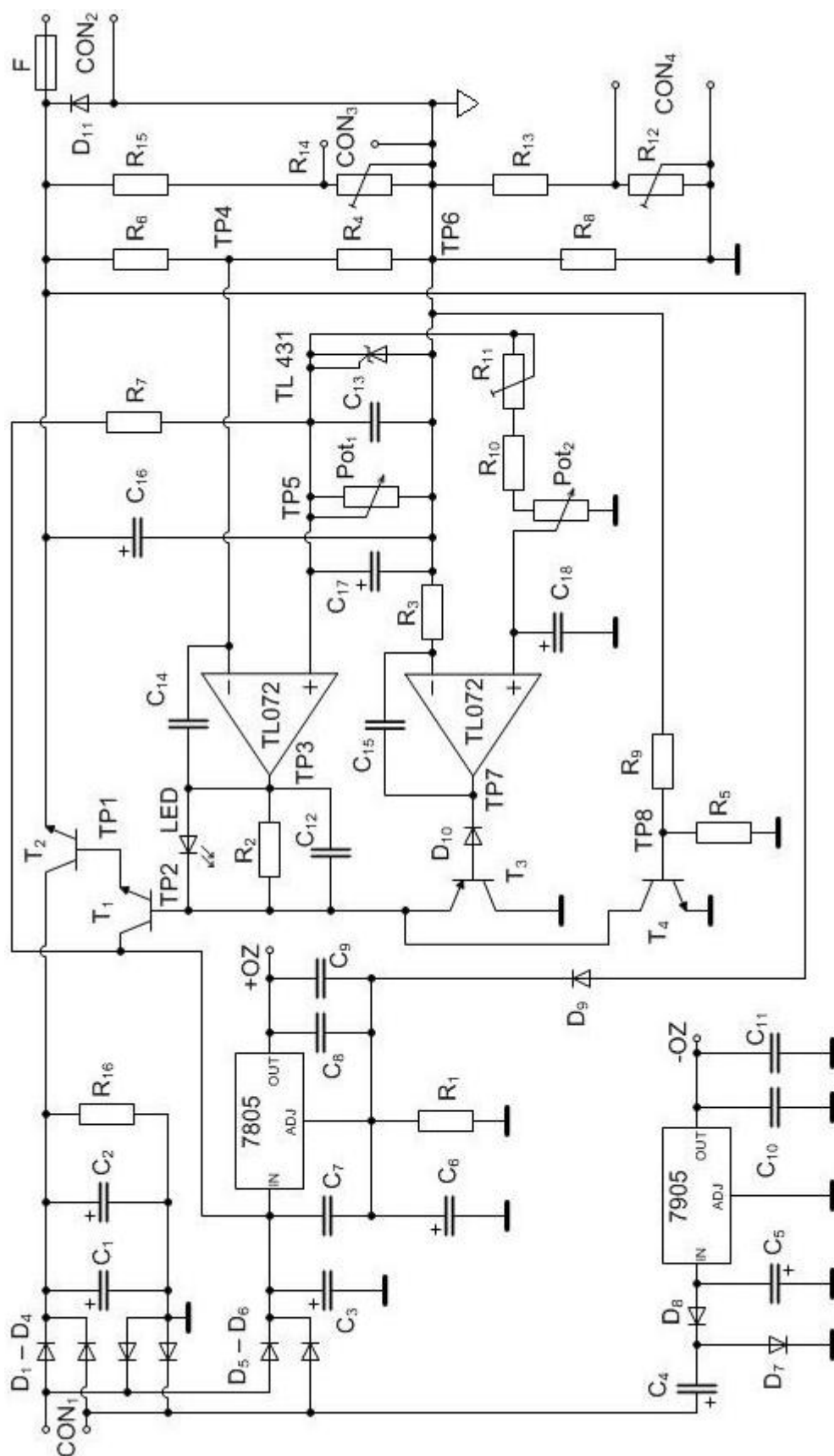
$$I_{R4, R6} = \frac{U_{out}}{R_4 + R_6} = \frac{30}{10^3 + 11 \cdot 10^3} = 2,5 \text{ mA} \quad (2.21)$$

Na výstup OZ₁ je připojen rezistor $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, na kterém se vytváří úbytek napětí potřebný pro LED diodu. Její funkce je signalizace činnosti proudové pojistky.

Protože výkonové tranzistory obecně mají malé zesílení, je nutné řídicí proud z OZ zesílit. V zapojení je pro tento mezistupeň použit tranzistor v Darlingtonově zapojení TIP122. Jako výkonový tranzistor je použit typ MJ15003, který má maximální ztrátový výkon až 250 W a nízký tepelný odpor čip-pouzdro.

Proudové řízení

Proudové řízení obstarává druhá polovina integrovaného obvodu, tedy druhý operační zesilovač OZ₂. Na invertující vstup OZ₂ je přes rezistor R_3 přiveden úbytek napětí U_{R8} . Rezistor $R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ je pouze ochranný a proud, který přes něj teče do vstupu OZ₂ je v řádech desítek pikoampér. Protože na něm vznikne nepatrný úbytek napětí, není při výpočtech uvažován.



Obr. 2.2: Schéma zdroje pro návrh hodnot součástek s rozmístěním měřicích bodů (TP)

Hodnota potenciometru Pot_2 je zvolena $1\text{ k}\Omega$. Pro maximální hodnotu výstupního proudu, kdy proudová pojistka ještě nezasahuje do činnosti zdroje, musí být jezdec potenciometru v krajové poloze. V poloze, ve které odebírá napětí přímo z kladnější svorky potenciometru. Aby se operační zesilovač nepřeklopil, musí být na neinvertujícím vstupu napětí stejné nebo větší než na invertujícím vstupu OZ. Na vstupu OZ tedy musí být napětí $0,66\text{ V}$. Napětí na rezistoru U_{R10} je

$$U_{R10} = U_{TL431} + U_{R8} - U_{Pot2} = 2,5 + 0,66 - 0,66 = 2,5\text{ V} \quad (2.22)$$

Je-li úbytek $U_{Pot2} = 2,5\text{ V}$ na potenciometru o velikosti $1\text{ k}\Omega$, potom hodnota rezistoru R_4 je dána jako

$$R_{10} = Pot_2 \frac{U_{R10}}{U_{R8}} = 1000 \frac{2,5}{0,67} = 3,7\text{ k}\Omega \quad (2.23)$$

Potenciometry však mají značnou toleranci, a proto je zvolena hodnota nejbližší nižší $R_{10} = 3,3\text{ k}\Omega$. Pro přesnější dostavení proudového omezení je použito sériové kombinace rezistoru $R_{10} = 3\text{ k}\Omega$ a odporového trimru $R_{11} = 500\text{ }\Omega$. Při pozdějším použití digitálního potenciometru o hodnotě $100\text{ k}\Omega$ se hodnoty zvětší v poměru, tedy $100\times$. Potom tedy $R_{10} = 300\text{ k}\Omega$ a $R_{11} = 50\text{ k}\Omega$.

Dioda D_{10} blokuje kladné napětí z výstupu OZ₂. Docházelo by ke zbytečnému namáhání přechodu B-E tranzistoru T_3 .

Pevná nadproudová pojistka

Zapojení obsahuje přídatnou pevnou pojistku, která je aktivní jen při zkratovém proudu nebo při poruše na proudovém omezení. Její funkce je omezit výstupní proud při poruše regulovatelné proudové pojistky. Aby nezasahovala do funkce nastavitelné pojistky začíná pracovat při proudu I_{out} asi $3,2\text{ A}$. Pracovní bod tranzistoru je nastaven pomocí děliče napětí napájeného ze snímacího rezistoru R_8 . Při výstupním proudu $I_{out} = 3,2\text{ A}$ je samozřejmě i jiný úbytek napětí na rezistoru R_8

$$U_{R8} = R_8 \cdot I_Z = 0,22 \cdot 3,2 = 0,70\text{ V} \quad (2.24)$$

Je třeba znovu vypočítat výkonovou ztrátu rezistoru

$$P_{R8} = U_{R8} \cdot I_Z = 0,7 \cdot 3,2 = 2,24\text{ W} \quad (2.25)$$

Tranzistor se otevírá přibližně od napětí $U_{BE} = 0,59\text{ V}$. Při překročení maximální hodnoty I_{out} musí být toto napětí na rezistoru R_{10} . Zvolená hodnota je $R_{10} = 1\text{ k}\Omega$. Na rezistor R_9 tedy zbývá

$$U_{R9} = U_{R8} - U_{R10} = 0,7 - 0,63 = 0,07\text{ V} \quad (2.26)$$

$$R_9 = R_5 \frac{U_{R9}}{U_{R5}} = 820 \frac{0,07}{0,59} = 97,29 \, \Omega \quad (2.27)$$

Při hodnotě $R_9 = 100 \, \Omega$ bude tranzistor T_4 reagovat o několik miliampér později.

Napájení operačních zesilovačů

Kladné napětí je získáno pomocí stabilizátoru 7805, který je vstupem připojen na pomocný usměrňovač. V řídicí elektrodě stabilizátoru je rezistor $R_I = 1 \, \text{k}\Omega$. Proud řídicí elektrodou je typicky $I_{adj} = 5 \, \text{mA}$, ale může být až $8 \, \text{mA}$ [11]. Úbytek na rezistoru R_I je

$$U_{R_I} = R_I \cdot I_{adj} = 10^3 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 5 \, \text{V} \quad (2.28)$$

Napětí na výstupu stabilizátoru je prostým součtem napětí samotného stabilizátoru a napětí na rezistoru R_I . Přibližně tedy $10 \, \text{V}$. Do řídicí svorky stabilizátoru ještě vstupuje napětí přivedené přes diodu D_9 z výstupu zdroje. Napětí je samozřejmě zmenšené o úbytek na diodě, který je asi $0,6 - 0,7 \, \text{V}$. Pokud bude napětí přiváděné z výstupu (zmenšené o úbytek napětí na diodě D_9) menší nebo rovné úbytku na rezistoru R_I bude na výstupu stabilizátoru výše zmiňovaných $10 \, \text{V}$. Jestliže však bude diodou D_9 přiváděné napětí vyšší než $5 \, \text{V}$ bude na výstupu stabilizátoru 7805 napětí

$$U_{7805out} = U_{7805} + U_{out} - U_{D9}, \quad (2.29)$$

kde U_{7805} je napětí samotného stabilizátoru ($5 \, \text{V}$), U_{out} je výstupní napětí zdroje a U_{D9} je úbytek napětí na diodě D_9 .

Záporné napětí je získáno ze stabilizátoru 7905 napájeného z kombinace C_4 , C_5 , D_7 a D_8 .

Jednotlivé použité kondenzátory a jejich hodnoty jsou voleny z katalogových zapojení. Rezistor R_{I6} je zapojen pro rychlé vybití filtračních kondenzátorů.

Přizpůsobení pro měřicí přístroje

Pro měření napětí a proudu jsou použity hotové digitální panelové moduly. Přímou na DPS měřicího modulu je možné pomocí rezistorů nastavit vstupní dělič a tím i měřicí rozsah měřidla. Při koncepci jednoho měřicího modulu na zdroj je nutné přepínat měřicí vstup. Aby se nemusel při přepínání měření napětí/proud také přepínat vstupní dělič měřidla je přizpůsobovací dělič umístěn přímo na DPS zdroje. Samozřejmě se jedná o samostatný dělič pro měření napětí a samostatný dělič pro měření proudu. Maximální vstupní napětí měřidla bez zásahu do vstupního děliče měřidla je $200 \, \text{mV}$. Maximální napětí zdroje $30 \, \text{V}$ je nutné měřit na rozsahu $200 \, \text{V}$. Z této úvahy plyne, že na měřicích svorkách bude napětí $30 \, \text{mV}$. Toto napětí je zajištěno děličem R_{I4} , R_{I5} . Rezistor R_{I5} je zvolen o hodnotě $240 \, \text{k}\Omega$. Velikost rezistoru R_{I4} se vypočítá jako

$$U_{R14} = U_{out} \frac{R_{14}}{R_{14} + R_{15}}, \quad (2.30)$$

po úpravě vztahu

$$R_{14} = R_{15} \frac{U_{R14}}{U_{out} + U_{R14}} = 240 \cdot 10^3 \frac{30 \cdot 10^{-3}}{30 - 30 \cdot 10^{-3}} = 240,24 \, \Omega. \quad (2.31)$$

Pro přesné dostavení je na pozici rezistoru R_{14} umístěn odporový trimr $500 \, \Omega$.

Pro přizpůsobení měřicího vstupu měřidla proudu je postup návrhu stejný. Pro výstupní proud $3 \, A$ bude napětí na rezistoru $R_8 = 0,66 \, V$ a na měřicích svorkách bude opět $30 \, mV$. Při zvoleném rezistoru $R_{13} = 18 \, k\Omega$ zbývá vypočítat rezistor R_{12}

$$R_{12} = R_{13} \frac{U_{R12}}{U_{R8} + U_{R12}} = 18 \cdot 10^3 \frac{30 \cdot 10^{-3}}{0,66 - 30 \cdot 10^{-3}} = 857,14 \, \Omega, \quad (2.32)$$

opět je použito odporového trimru tentokrát o hodnotě $R_{12} = 1 \, k\Omega$.

Tab. 2.1: Funkce konektorů zdroje č.2

Konektor	Funkce
CON1	Vstup
CON2	Výstup
CON3	Měření napětí
CON4	Měření proudu
CON5	Signalizace LED o proudovém omezení
CON6	Potenciometr – výstupní napětí
CON7	Potenciometr – proudová pojistka
CON8	Výkonový tranzistor MJ15003

2.3 Digitální potenciometry

V dnešní době již digitální potenciometry nejsou novinkou. Stále častěji nacházejí své místo v elektronických zapojeních, kde nahrazují potenciometry mechanické. Jejich funkce je naprosto shodná. Z mnoha možných oblastí, kam tyto součástky již výrazně pronikly, je možné jmenovat například hudební průmysl. Digitální potenciometry se vyrábějí formou integrovaných obvodů v převážné většině pro povrchovou montáž SMT. K nejznámějším výrobcům patří Analog Devices, Texas Instruments, Maxim Dallas Semiconductor, Intersil a další.

2.3.1 Základní parametry

Základním parametrem, podle kterého je možné potenciometry rozdělovat, je počet pozic jezdce pro nastavení odporu. V současné době jsou na trhu potenciometry, které mají 32, 64, 128, 512 a až 1024 možných pozic jezdce. Jedná se o hodnoty mocniny čísla 2, které přímo souvisí s počtem bitů rozlišení odporové dráhy. Pro výpočet počtu kroků N platí vztah

$$N = 2^M, \quad (2.33)$$

kde M je počet bitů.

Někteří výrobci nabízejí kromě lineární odporové dráhy potenciometru také logaritmický charakter odporové dráhy. Digitální potenciometry jsou nabízeny s odporovou dráhou o hodnotě 1 k Ω , 2,5 k Ω , 5 k Ω , 10 k Ω , 20 k Ω , 25 k Ω , 50 k Ω , 100 k Ω , 200 k Ω , 500 k Ω a 1 M Ω . Dalším možným kritériem rozdělení je na skupinu potenciometrů, které si svoji nastavenou hodnotu (pozici jezdce) „pamatuji“ i při odpojení napájecího napětí. Označují se jako nonvolatile. Součástí jejich pouzdra je paměť, nezávislá na napájecím napětí, do které se ukládá poslední nastavená hodnota. Po připojení napájení se tato hodnota načte z paměti a automaticky nastaví. Druhá skupina je tvořena potenciometry s pamětí závislou na napájecím napětí – volatile (po odpojení od napájení je poslední nastavená hodnota ztracena). Je také možné pořídit potenciometr označen jako One Time Programmable (OTP). Umožňuje nastavit hodnotu jezdce pouze jedenkrát. Po přijetí datového bajtu (popř. bajtů, v případě potenciometru s více než 256 pozicemi) zablokuje vnitřní pojistka další ovládání součástky. Toto blokování je trvalé a není možné změnit.

V některých případech je zapotřebí zajistit souběh hodnot odporů u dvou nebo více potenciometrů. Výhodné je použít vícekanálové potenciometry (několik potenciometrů v jediném pouzdře integrovaného obvodu). Je třeba dát pozor na vzájemnou odchylku jednotlivých odporových kanálů, protože se pohybuje od jednotek do desítek procent.

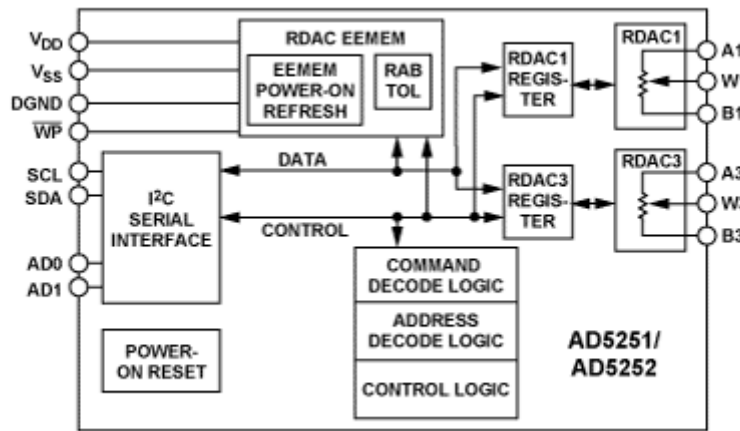
Digitální potenciometry jsou v převážné většině případů řízeny pomocí digitálního rozhraní I²C (obr. 2.3) [13] nebo SPI (obr. 2.4) [14]. Samotný potenciometr je možné si představit jako $N-1$ rezistorů (N je počet poloh jezdce) zapojených do série mezi svorky A a B. Svorka W je připojena na jezdec potenciometru, který je podle řídících dat připojován k rezistorové síti.

Hodnotu nastaveného odporu lze vypočítat podle vztahu (převzato z datasheetu AD5252 [13])

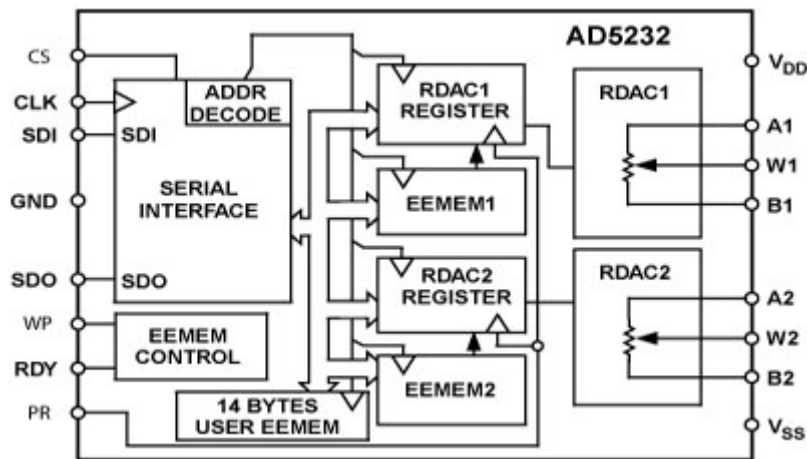
$$R_{WB} = \frac{D}{256} \cdot R_{AB} + R_W, \quad (2.34)$$

kde D je dekadická hodnota polohy jezdce, nastavená datovým bajtem (v binární podobě), hodnota 256 značí počet pozic jezdce, R_{AB} nominální odpor mezi svorkami A a B, R_W je odpor jezdce.

Existuje ještě jedno řízení potenciometru a to pomocí dvou tlačítek, tzv. UP / Down řízení (nahoru / dolů). Toto řízení se používá v případě, kdy je třeba měnit pozici jezdce po nejmenších krocích, tedy po jednom kroku.



Obr. 2.3: Příklad vnitřní struktury duálního digitálního potenciometru AD5252 řízeného pomocí I²C sběrnice (převzato z [13])



Obr. 2.4: Příklad vnitřní struktury duálního digitálního potenciometru AD5232 řízeného pomocí SPI sběrnice (převzato z [14])

Jednou z nevýhod digitálních potenciometrů je odpor jezdce, daný nenulovým odporem sepnutého elektronického spínače. Tato hodnota se pohybuje řádově v desítkách až stovkách ohmů. Další nevýhodou je vysoká parazitní kapacita vývodů, která je omezuje pouze pro aplikace na nízkých kmitočtech v řádu stovek kHz.

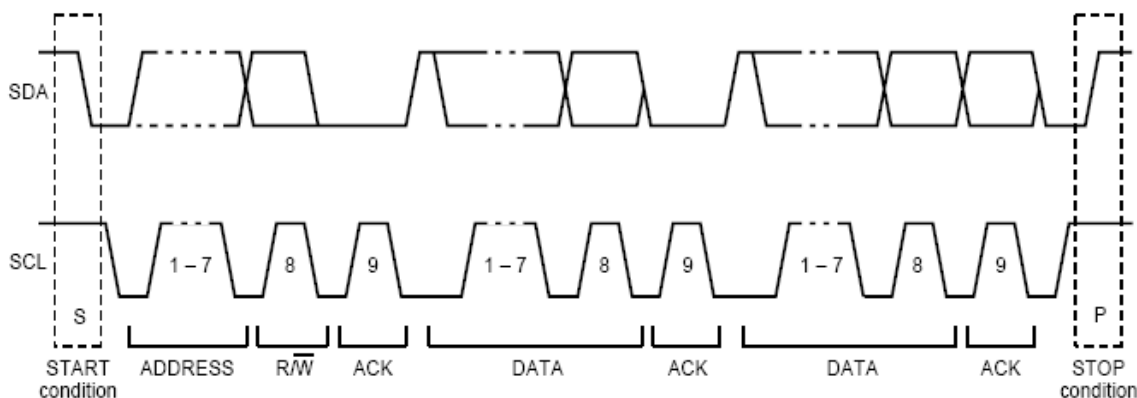
2.3.2 Komunikace pomocí I²C sběrnice

Sběrnice I²C byla původně vytvořena firmou Philips [15], [16] pro komunikaci mikroprocesoru s podřízenými zařízeními. Provoz na sběrnici řídí vždy zařízení nastavené jako master. Samotná sběrnice je tvořena dvěma linkami SDA a SCL. Přičemž linka SDA je určena pro sériový přenos dat a linka SCL je pro hodinový signál, pomocí kterého jsou komunikující zařízení synchronizována. Obě linky jsou obousměrné. Je nutné je však připojit na kladné napájecí napětí pomocí zdvihacích rezistorů, tzv. pull-up rezistorů. Za dobu jednoho hodinového taktu linky SCL je přenesen po lince SDA právě jeden datový bit. Po celou dobu trvání hodinového taktu se nesmí změnit data na lince SDA, protože by tato změna byla vyhodnocena jako řídicí impuls. Pro zajištění komunikace mezi zařízeními má protokol sběrnice I²C řadu přesně definovaných situací.

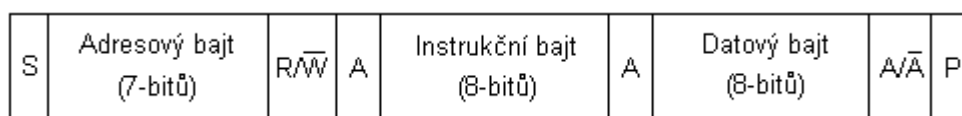
Jednou z nich je tzv. klidový stav, při kterém nejsou na sběrnici přenášena žádná data. Pozná se podle toho, že obě linky jsou ve vysoké úrovni. Přenos po sběrnici začíná uvozujícím bitem, start-bitem (S). Příchod start-bitu znamená, že se stav datové linky SDA změní z vysoké úrovně na úroveň nízkou, přičemž linka SCL zůstává ve vysoké úrovni. Konec přenosu je oznámen pomocí stop-bitu (P), kdy přejde linka SDA do vysoké úrovně, zatímco linka SCL zůstává ve vysoké úrovni. Samotný přenos dat se dá popsat tak, že se nejprve přenesou 8 adresních bitů (tedy jeden adresní bajt) a jeden nebo několik datových bajtů. Tyto bajty jsou postupně vysílány po jednotlivých bitech za sebou a posouvány po SDA lince hodinovým signálem SCL. Jako první se z vysílače vždy vysune bit s nejvyšší prioritou MSB. Po každém přijetí nového bajtu následuje bit ACK (acknowledge), který slouží k potvrzení správného přijetí dat [15] (ve schématech označován ACK nebo písmenem A). Ack bit se odesílá stejným způsobem jako by se odesílal devátý bit dat, ale s tím rozdílem, že ho generuje čip, který přijímal (přijímač) a nikoliv ten, který data odesílal. Pokud přenos proběhl v pořádku tak odešle logickou 0. Logická 0 potvrzujícího bitu znamená rovněž to, že je přijímač připraven na příjem dalšího byte, který následuje okamžitě po něm při dalším pulzu na SCL. Pokud přenos selhal odešle logickou 1. Nebo pokud má dojít k ukončení přenosu, tak "neodešle nic". Pull-up rezistor pak zajistí, že bude na SDA logická 1 a Ack bit (v logické 0, označuje se jako A s negací) odešle vysílač. Tímto stavem je datový přenos ukončen a následuje stop-bit. Z obr.2.5 je vidět kompletní přenos po sběrnici I²C. Je nutné také podotknout, že řídicí obvod master může pracovat jako vysílač i jako přijímač, stejně tak je tomu i u řízeného obvodu slave.

U nejjednodušších obvodů lze při komunikaci po I²C sběrnici, vyslat jeden adresní bajt a poté jen bajty datové. U digitálních potenciometrů je komunikace (obr. 2.6) zahájena start-bitem a poté vysláním adresního bajtu. Adresní bajt je tvořen pevnou částí adresy, uživatelem nastavitelnou částí adresy a bitem, který určuje směr komunikace. Pevná část adresy obvodu je zjistitelná z katalogu dané součástky. Nastavitelná část adresy slouží pro splnění základní podmínky a to té, že na sběrnici

nesmí být zařízení se stejnou adresou. Počet bitů této adresy není obecně dán, ale ve většině případů se jedná o dva nebo tři bity. Směrem komunikace je myšleno, jestli se jedná o čtení nebo zápis (R/W) do obvodu. Po zaslání adresního bajtu je již navázána komunikace s konkrétním obvodem. Po potvrzení bitem ACK následuje bajt instrukční.



Obr. 2.5: Celkový průběh komunikace na sběrnici I²C (převzato z [15])

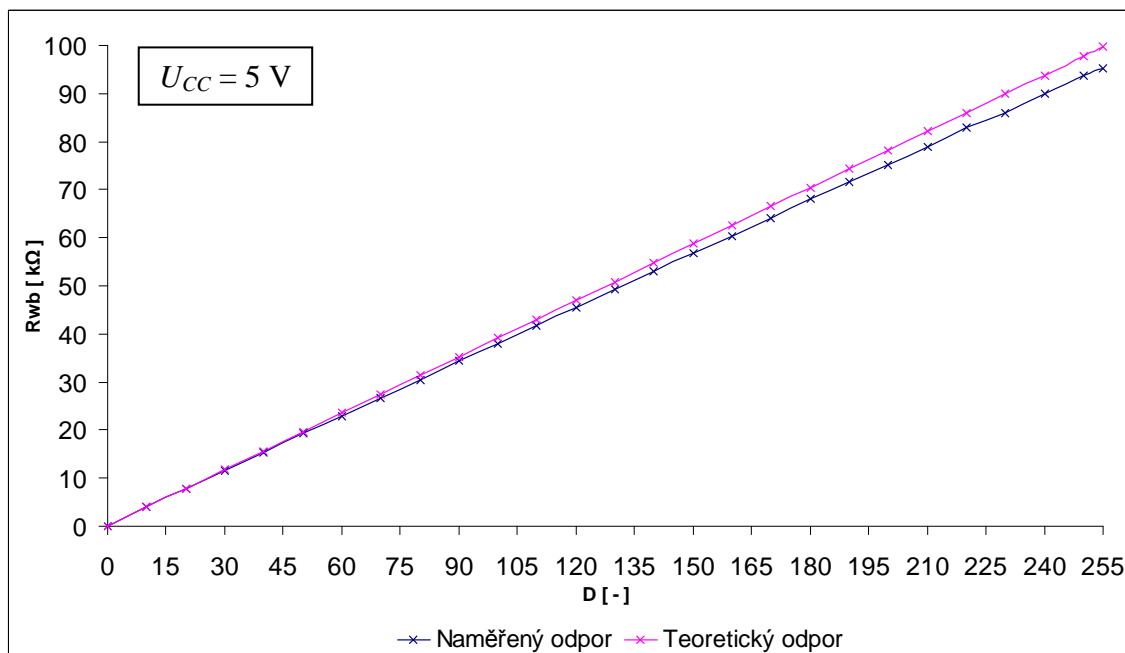


Obr. 2.6: Základní struktura pro přístup k zařízení přes I²C sběrnici

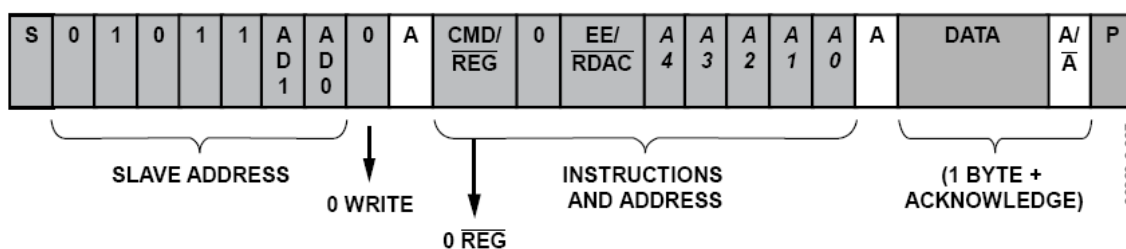
2.3.3 Digitální potenciometr AD5252

Jako náhrada za analogový převodník je použit digitální potenciometr od firmy Analog Devices. Je vyráběn v pouzdře TSSOP pro povrchovou montáž. Typ AD5252 [13] značí, že digitální potenciometr je dvoukanálový. Lze tedy řídit pomocí jednoho pouzdra výstupní napětí a proud jednoho zdroje. Druhá varianta, která bude použita, je využít jednoho integrovaného obvodu pro řízení výstupního napětí obou zdrojů a druhého obvodu pro řízení výstupních proudů zdrojů. Vybraný potenciometr umožňuje nastavit svoji odporovou dráhu do 256 pozic. Pro výstupní napětí 30 V představuje jeden krok přibližně 0,12 V. Zvětšením rozlišení je pouze volba potenciometru s vyšším počtem kroků popř. sériovou kombinací potenciometrů. AD5252 je vyráběn s odporovou dráhou o velikosti 1 kΩ, 10 kΩ, 50 kΩ a 100 kΩ. Jak již bylo zmíněno výše i při nastavení nulové pozice není odpor nulový. Tento fakt je dán odporem samotného jezdcce, který dosahuje i několika desítek ohmů. Typická hodnota jezdcce je 75 Ω. Při použití potenciometru s odporem dráhy 1 kΩ představuje jezdec odpor mnoha kroků. Proto je vybrána hodnota odporu dráhy 100 kΩ, kde je odpor jezdcce vůči odporu jednoho kroku zanedbatelný. Potenciometr AD5252 vykazuje při napájení 5 V toleranci $\delta_R = \pm 20 \%$, a proto je vhodné zjistit jeho převodní charakteristiku (obr. 2.7). Naměřený odpor jezdcce R_W dosahoval hodnoty 65 Ω. Převodní charakteristika byla naměřena mezi svorkami W_1 a B_1 ve stavu naprázdno, kdy do měření zasahoval pouze vstupní odpor digitálního multimetru (10 MΩ). Maximální hodnota odporu mezi svorkami W_1 , B_1 činila 95,4 kΩ. Po proměření kanálů dvou integrovaných obvodů, nepřekročil rozdíl odporů jednotlivých kanálů v rámci jednoho integrovaného hodnotu 200 Ω.

Na obr. 2.8 je vidět struktura komunikace při zápisu do integrovaného obvodu. Je jasně patrná pevná část adresy obvodu a nastavitelná (bity AD0, AD1). Bit CMD/REG nastavený na nízkou úroveň znamená, že je pracováno s registry (RDAC), které nastavují pozici jezdců. V opačném případě, tedy při nastavené vysoké úrovni, se pracuje s tzv. rychlými příkazy (např. inkrementace či dekrementace o jeden krok). Bit EE/RDAC určuje práci s pamětí nebo s registry RDAC.



Obr. 2.7: Převodní charakteristika digitálního potenciometru AD5252 (100 kΩ)



Obr. 2.8: Struktura zápisu do digitálního potenciometru AD5252 (převzato z [13])

2.3.4 Převodník USB /I²C

Komunikace sběrnice USB se sběrnicí RS232 je zajištěna pomocí převodníku od firmy FTDI. Jedná se o integrovaný obvod pod typovým označením FT232BM [17]. Obvod je možné napájet přímo z USB portu nebo pomocí externího zdroje. Napěťové úrovně sériového portu obvodu FT232BM jsou 0 V a 5 V, čili úrovně TTL logiky. Tyto úrovně se od úrovně standardního sériového portu liší. Řízení digitálních potenciometrů se provádí právě pomocí TTL úrovní, a proto je možné přímé napojení převodníku bez další úpravy signálových úrovní (např. pomocí obvodu MAX232). Pro kontrolu napěťových rovní a strmosti hran byla zachycena komunikace sběrnice I²C (obr. 2.9).

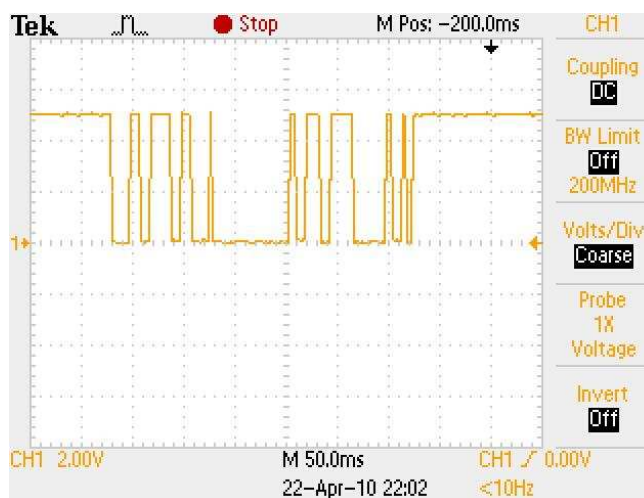
E²PROM rozhraní

Přestože může obvod FT232BM pracovat i bez vnější E²PROM paměti, doporučuje se tuto paměť připojit [18]. E²PROM slouží k uložení VID, PID, sériového čísla, řetězce popisu výrobku a hodnoty odebíraného proudu. Paměť je rovněž vyžadována v případě, že je k počítači více než jeden obvod FT232BM (unikátní sériové číslo se sváže s unikátním virtuálním sériovým portem). E²PROM musí být v 16bitové šíři jako například u Microchip 93LC46B [19] nebo ekvivalentní. Příkladem může být například obvod 93LC56, u kterého je navíc nutné správně zapojit vývod ORG, který udává šířku slova paměti (8 nebo 16 bitů). Musí být schopná pracovat na rychlosti 1 Mb/s při napájení 4,4 až 5,25 V. Paměť je programovatelná přímo na desce pomocí speciálního programu. To dovoluje osadit desku prázdnou E²PROM a naprogramovat ji přímo ve vývoji. Není-li paměť připojena nebo je prázdná, použije obvod FT232BM výchozí hodnoty VID, PID popisu výrobku a proudového odběru.

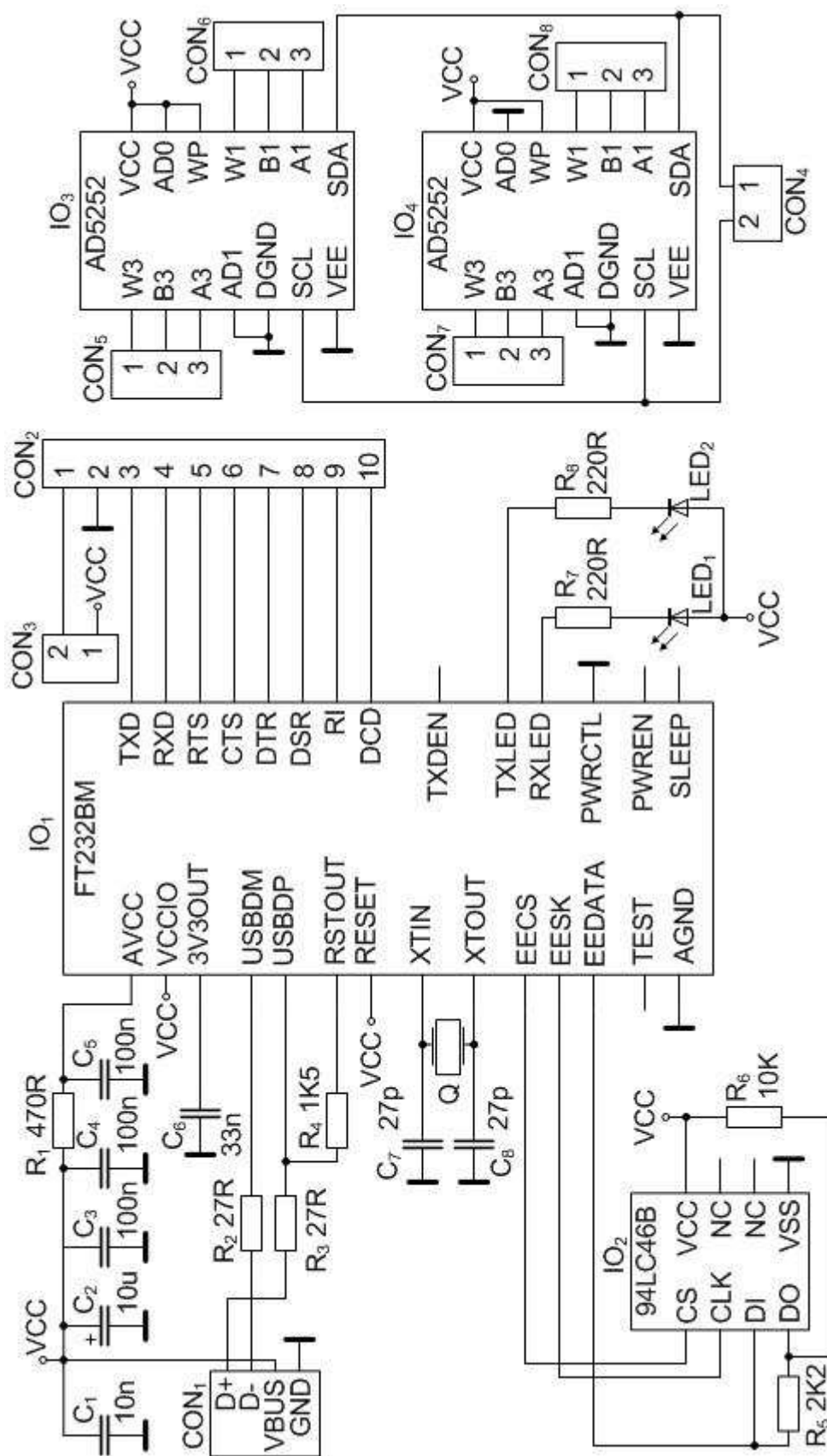
Vlastní zapojení převodníku USB / I²C je na obr.2.7 (částečně převzato z [18]). Konektor CON₁ je přes propojovací kabel typu A-B připojen k počítači. Je-li dostupný externí zdroj napětí 5 V potom se propojí propojka na konektoru CON₃. Na konektor CON₄ se přivedou vybrané linky portu UART. Pro signál SCL je použita výstupní linka TxD a pro signál SDA výstupní linka RTS, která je zároveň spojena se vstupní linkou CTS. Linkou CTS se testuje potvrzovací signál ACK.

Tab. 2.2: Funkce konektorů převodníku USB / I²C

Konektor	Funkce
CON1	USB vstup
CON2	UART port
CON3	Propojka pro externí zdroj napětí
CON4	I ² C sběrnice digitálních potenciometrů
CON5	Potenciometr – výstupní napětí zdroje 1
CON6	Potenciometr – výstupní napětí zdroje 2
CON7	Potenciometr – proudová pojistka zdroje 1
CON8	Potenciometr – proudová pojistka zdroje 2



Obr. 2.9: Zachycená komunikace sběrnice I²C



Obr. 2.10: Schéma zapojení převodníku USB / I²C a digitálních potenciometrů

2.3.5 Aplikace pro ovládání digitálních potenciometrů

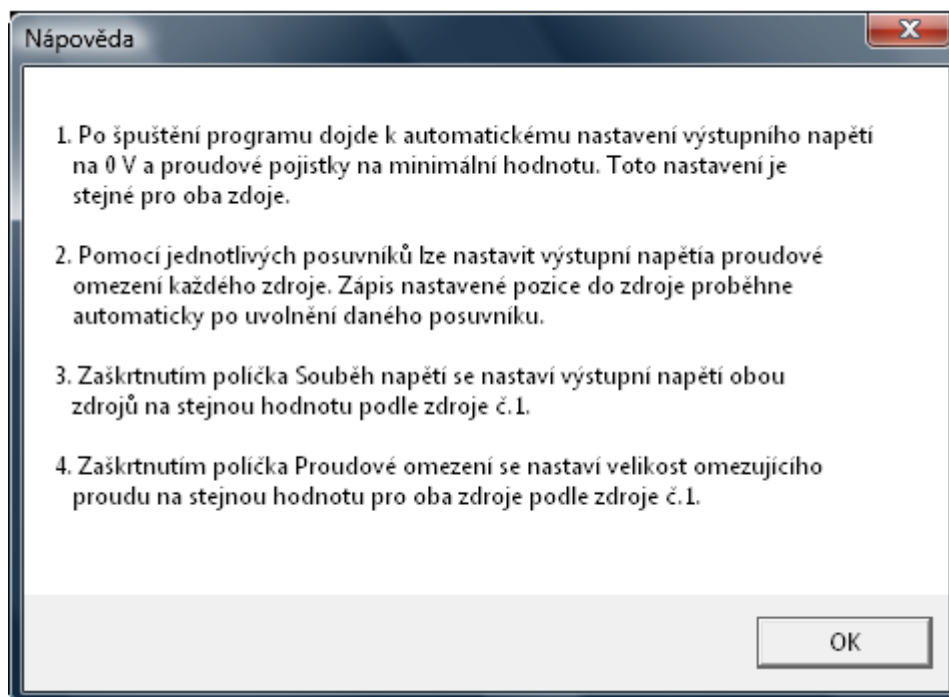
Pro vytvoření ovládacího programu je zvoleno programovací prostředí Borland C++ Builder 6.0 [20], [21]. Pro správnou funkci programu je nutné nainstalování upraveného ovladače pro obvod FTDI232BM. Dále se naprogramuje paměť E²PROM např. pomocí programu FTD2XXST.exe. Po tomto kroku je zařízení jednoznačně identifikováno ovládacím programem. Ovladač i program pro naprogramování paměti jsou umístěny na přiloženém CD (rovněž je možné je nalézt i na doprovodném CD [18]).

Při otevírání aplikace je ihned testováno jestli je zařízení připojeno. Pokud není, aplikace se ani neotevře a zobrazí se hlášení – Zařízení není připojeno. Po úspěšném spuštění programu se automaticky odešlou do digitálních potenciometrů počáteční nastavovací data. Je to z důvodu automatického nastavení pozice jezdců do poloviny odporové dráhy potenciometrů po připojení napájecího napětí. Základní okno aplikace (obr. 2.11) obsahuje čtyři posuvníky určené pro samostatné ovládání výstupního napětí a proudové pojistky každého zdroje. Dále obsahuje políčko „Souběh napětí“, které po zaškrtnutí nastaví stejnou hodnotu výstupního napětí do obou zdrojů. Podobně reaguje i políčko „Proudové omezení“, které nastaví stejnou hodnotu omezujícího proudu do obou zdrojů.



Obr. 2.11: Vzhled hlavního okna ovládacího programu

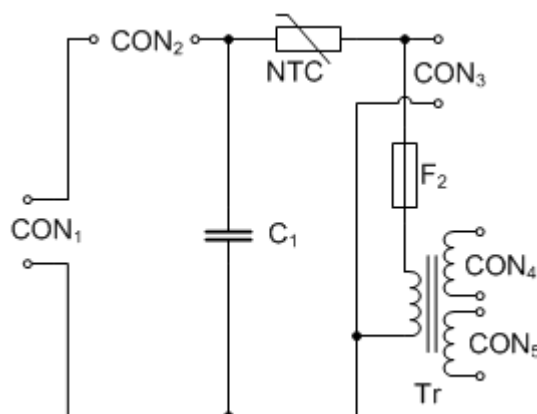
Ovládací program obsahuje i jednoduchou uživatelskou nápovědu (obr. 2.12), ve které je ve čtyřech bodech shrnuta práce s programem.



Obr. 2.12: Vzhled nápovědy ovládacího programu

2.4 Vstupní síťová část

Síťová část zdroje je umístěna na vlastním plošném zdroji za účelem zvýšení bezpečnosti, tj. obvodů a tím i samotné obsluhy. Na vstupu samotné desky (obr. 2.13) je ještě síťový euro konektor kombinovaný se síťovým filtrem a dvoupólový vypínač. Na konektoru CON₂ je vyvedena pojistka na zadní panel přístrojové krabice. Kondenzátor C₁ slouží jako dodatečné odrušení pro vysoké kmitočty. Termistor NTC tlumí proudové nárazy při zapnutí zdroje. Pomocný transformátor Tr slouží pro napájení měřicích modulů, přepínání relé a teplotní spínání ventilátoru. Na primární straně je v sérii s vinutím zařazena ochranná pojistka. Při práci se síťovým napětím je nutné při návrhu dodržet bezpečné vzdálenosti spojů a použít konektory s větší roztečí pinů.



Obr. 2.13: Schéma zapojení vstupní síťové části

Tab. 2.3: Funkce konektorů vstupní síťové části

Konektor	Funkce
CON1	Vstup 230V~
CON2	Pojistka na zadním panelu zařízení
CON3	Výstup pro toroidní transformátor
CON4	Výstupní napětí 1. vinutí pro pomocnou desku
CON5	Výstupní napětí 2. vinutí pro pomocnou desku

2.5 Návrh pomocné desky

Pomocná deska obr. 2.16 vznikla z důvodu zvláštního napájení pro měřicí přístroje. Měřicí přístroje nemohou mít společnou napájecí a měřicí zem. Na desku jsou ze vstupní síťové části, kde je umístěn pomocný transformátor se dvěma sekundárními vinutími, přiváděna dvě střídavá napětí 2 x 12 V. První napětí je usměrněno a pomocí stabilizátorů stabilizováno na napětí 9 V a 12 V. Napětím 9 V je napájen první měřicí modul, napětí 12 V slouží pro teplotní spínač ventilátoru. Napětí z druhého sekundárního vinutí transformátoru je rovněž stabilizováno na 9 V a 12 V. Napětí 9 V je použito pro druhý měřicí modul a napětí 12 V je potřeba pro ovládání cívek relé. Použitím více stabilizátorů je zapříčiněno rozložení výkonu mezi obě vinutí transformátoru. Je potom možné použít transformátor s nižším výkonem. Pro správnou činnost stabilizátorů je nutné zajistit minimální klidový proud kolem 5 mA, a proto jsou k jejich výstupům připojeny zatěžovací rezistory.

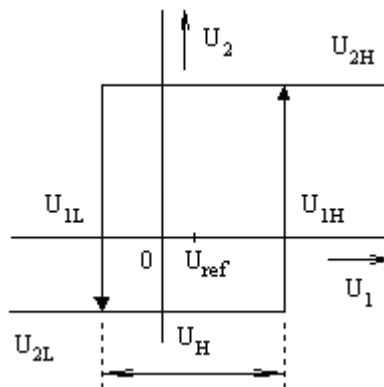
Zobrazování napětí a proudu na předním panelu zařízení je řešeno dvěma digitálními panelovými měřicími přístroji. Pomocí přepínače na předním panelu umístěným pod příslušným měřicím modulem se ovládají cívky relé. Zajišťují připojování měřicích bodů pro napětí a proud, přepínání desetinné tečky a indikaci veličiny, která je aktuálně měřena. K této signalizaci jsou použity LED diody v sérii s ochrannými odpory R_{11} a R_{12} o velikosti

$$R_{11} = R_{12} = \frac{U_{CC} - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12 - 2}{8 \cdot 10^{-3}} = 1250 \Omega. \quad (2.35)$$

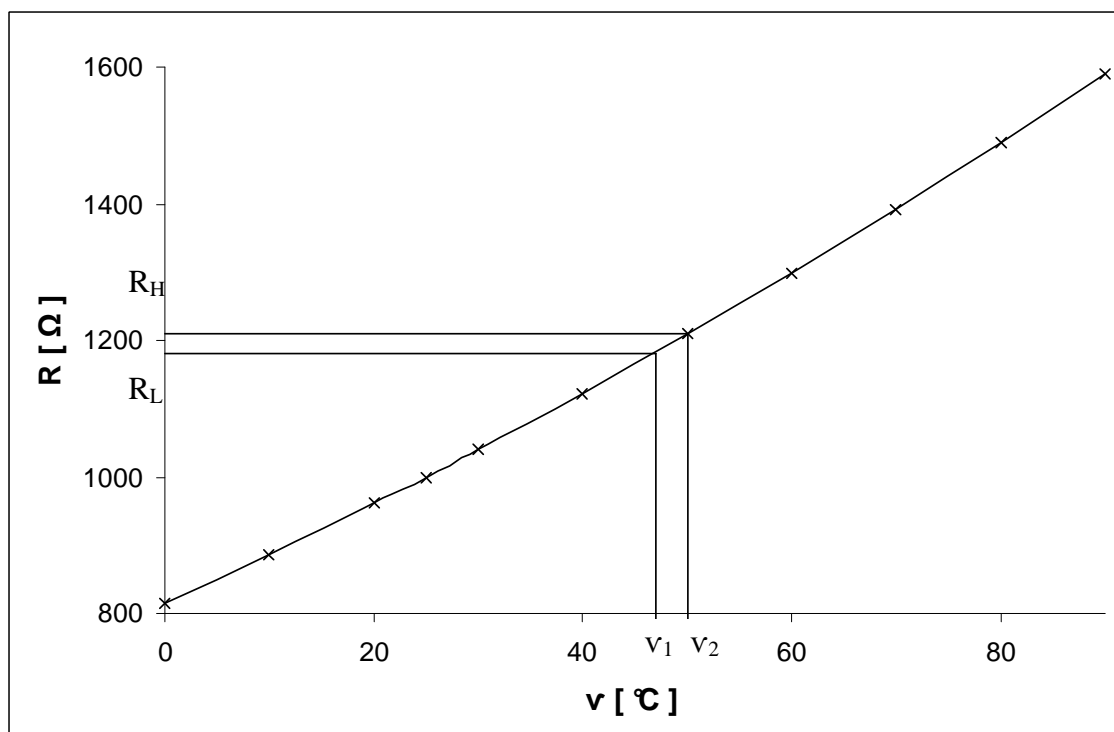
V řadě odpovídají rezistory o velikosti 1200 Ω . Diody D₁-D₃ chrání obvody v situaci odpojení napájecího napětí, kdy na vinutích cívek zůstávají magnetizační proudy. Přepětíové ochrany D₄, D₅, v podobě transilů, byly na plošný spoj dodány dodatečně (ze strany spojů), avšak v příloze v předloze pro výrobu jsou již zakresleny.

Ventilátor je spínán pomocí dvou teplotních čidel KTY81/110, která jsou umístěna přímo na chladičích s výkonovými tranzistory. Teplotní čidlo KTY81/110 je termistor s pozitivním koeficientem odporu - PTC (někdy označován také jako pozistor). Jeho odpor s teplotou roste. O vyhodnocení teploty se stará neinvertující komparátor s hysterezí. Na obr. 2.14 je převodní charakteristika tohoto komparátoru. Zavedená hystereze zajišťuje, aby komparátor překlopením nereagoval na sebemenší snížení a zvýšení teploty. Komparátor by kmital kolem jedné nastavené teploty, což je nevýhodné z hlediska životnosti ventilátoru apod. Výstup operačního zesilovače je přes ochranný

rezistor R_{I0} připojen na bázi tranzistoru T_1 , který pracuje v režimu spínače.



Obr. 2.14: Převodní charakteristika neinvertujícího komparátoru s hysterezí



Obr. 2.15: Teplotní závislost odporu senzoru KTY81/110

Pomocí hodnot odporů při dané teplotě udávaných výrobcem byl sestaven graf (viz. obr. 2.15), ze kterého byly odečteny odpory čidla pro teploty, při kterých se má komparátor překlápět. Odečtené hodnoty pro teploty $v_1 = 47^\circ\text{C}$ a $v_2 = 50^\circ\text{C}$ jsou $R_L = 1180\ \Omega$ a $R_H = 1209\ \Omega$. Protože je použito dvou sériově zapojených senzorů, je třeba hodnoty zdvojnásobit $R_L = 2360\ \Omega$ a $R_H = 2418\ \Omega$.

Výsledný odpor paralelní kombinace rezistoru R_7 a teplotního senzoru je

$$R_{7,L} = \frac{R_7 \cdot R_L}{R_7 + R_L} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 2360}{10 \cdot 10^3 + 2360} = 1909,4\ \Omega \quad (2.36)$$

$$R_{7,H} = \frac{R_7 \cdot R_H}{R_7 + R_H} = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 2418}{10 \cdot 10^3 + 2418} = 1947,2 \Omega \quad (2.37)$$

Napětí na této paralelní kombinaci vyplývá z řešení napěťového děliče

$$U_{1L} = U_{cc} \frac{R_{7,L}}{R_6 + R_{7,L}} = 12 \frac{1909,4}{10 \cdot 10^3 + 1909,4} = 1,922V, \quad (2.38)$$

$$U_{1H} = U_{cc} \frac{R_{7,H}}{R_6 + R_{7,H}} = 12 \frac{1947,2}{10 \cdot 10^3 + 1947,2} = 1,955V, \quad (2.39)$$

kde U_{1L} je nízká úroveň vstupního napětí pro překlopení komparátoru a U_{1H} je vysoká úroveň vstupního napětí pro překlopení komparátoru.

Velikost hysterezního napětí U_H (šířka hysterezí smyčky) je

$$U_H = U_{1H} - U_{1L} = 1,955 - 1,922 = 33mV \quad (2.40)$$

Na nepájivém konektorovém poli bylo zjištěno výstupní napětí $U_{2L} = 30 mV$ a $U_{2H} = 10,33 V$. Hodnota rezistoru R_8 je zvolena $4,7 k\Omega$. Rezistor R_9 se vypočítá podle vztahu

$$R_9 = R_8 \cdot \frac{U_{2H} - U_{2L}}{U_H} = 4,7 \cdot 10^3 \cdot \frac{10,33 - 30 \cdot 10^{-3}}{33 \cdot 10^{-3}} = 1466970 \Omega, \quad (2.41)$$

kde U_{2L} je nízká úroveň výstupního (saturačního) napětí komparátoru a U_{2H} je vysoká úroveň výstupního (saturačního) napětí komparátoru.

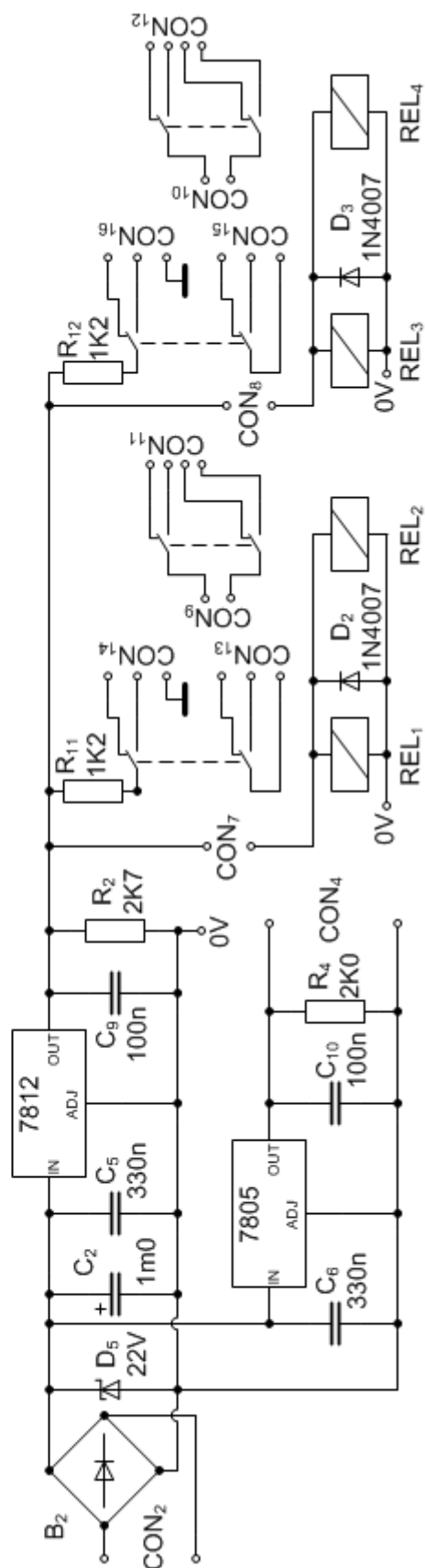
Velikost rezistoru R_9 je nejbližší hodnotě $1,5 M\Omega$. Pro překlápění komparátoru při zvolených teplotách je nutné na invertující vstup OZ_1 přivést správné referenční napětí. Toto napětí je dodáváno odporovým trimrem R_5 a je možné ho získat např. ze vztahu pro výpočet rozhodovací úrovně U_{1L}

$$U_{1L} = U_r \cdot \frac{R_8 + R_9}{R_9} - U_{2H} \cdot \frac{R_8}{R_9} \quad (2.42)$$

Po úpravě vztahu je již možné vypočítat velikost referenčního napětí

$$U_{ref} = \frac{1}{R_8 + R_9} \cdot (R_9 \cdot U_{1L} + R_8 \cdot U_{2H}) \quad (2.43)$$

$$U_{ref} = \frac{1}{4,7 \cdot 10^3 + 1,5 \cdot 10^6} \cdot (1,5 \cdot 10^6 \cdot 1,922 + 4,7 \cdot 10^3 \cdot 10,33) = 1,948V \quad (2.44)$$



60

Tab. 2.4: Funkce konektorů pomocné desky

Konektor	Funkce
CON1	Vstupní napětí z 1. vinutí pomocného transformátoru
CON2	Vstupní napětí z 2. vinutí pomocného transformátoru
CON3	Napájení 1. měřicího přístroje
CON4	Napájení 2. měřicího přístroje
CON5	Teplotní čidlo
CON6	Ventilátor
CON7	Přepínač U / I pro 1. měřicí přístroj
CON8	Přepínač U / I pro 2. měřicí přístroj
CON9	Měřicí vstup pro 1. měřicí přístroj
CON10	Měřicí vstup pro 2. měřicí přístroj
CON11	Měřicí body napětí a proudu pro 1. měřicí přístroj
CON12	Měřicí body napětí a proudu pro 2. měřicí přístroj
CON13	Nastavení desetinné tečky pro 1. měřicí přístroj
CON14	Signalizace (LED) měření U / I pro 1. měřicí přístroj
CON15	Nastavení desetinné tečky pro 2. měřicí přístroj
CON16	Signalizace (LED) měření U / I pro 2. měřicí přístroj

2.6 Návrh chlazení zdroje

Všechny elektronické součástky, které vykazují elektrický činný odpor, produkují při průchodu elektrického proudu teplo (Joule-Lencův zákon) [22]. Ve zvolené koncepci zdroje je nutné chladit pouze sériově řazený výkonový tranzistor MJ15003 [23].

U tranzistoru je ztrátový výkon dán elektrickým příkonem báze a kolektoru.

$$P_Z = P_C + P_B = U_{CE} \cdot I_C + U_{BE} \cdot I_B, \quad (2.45)$$

kde hodnoty U_{CE} , I_C , U_{BE} , I_B jsou hodnoty platící pro klidový pracovní bod. V tomto případě je ztrátový výkon báze oproti ztrátovému výkonu kolektoru zanedbatelně malý, a proto ve výpočtu nebude uvažován. Největší ztrátový výkon nastává při nastaveném velkém výstupním proudu a malém výstupním napětí, kdy výkonový tranzistor musí velkou část vstupního napětí blokovat. Vzniká na něm poměrně velký úbytek napětí a tím i ztrátové teplo. Měřením bylo zjištěno, že při výstupním napětí 2 V a proudovém odběru 3 A bude vstupní napětí výkonového tranzistoru 35 V. Ztrátový výkon tedy je

$$P_Z = (U_1 - U_2) \cdot I_2 = (35 - 2) \cdot 3 = 99 \text{ W} \quad (2.46)$$

Celkový tepelný odpor

$$R_t = \frac{\vartheta_j - \vartheta_a}{P_Z} = \frac{200 - 25}{99} = 1,78 \text{ K / W}, \quad (2.47)$$

kde v_j je maximální pracovní teplota přechodu a v_a je teplota okolí. Tepelný odpor chladiče je

$$R_{vsa} = R_{vj} - R_{vjc} - R_{vcs} = 1,78 - 0,7 - 0,3 = 0,78 \text{ K/W} , \quad (2.48)$$

kde R_{vsa} je tepelný odpor použitého chladiče, R_v celkový tepelný odpor, R_{vjc} vnitřní tepelný odpor tranzistoru a R_{vcs} je tepelný odpor styku s chladičem. Podle katalogů různých firem se vypočítané hodnotě nejvíce přibližuje chladič typu ZH-2476 [24] s hodnotou tepelného odporu 0,8 K/W při délce 100 mm. Při výběru je zároveň velmi důležitý tvar chladiče a možnost uchycení do přístrojové krabice. Chlazení je řešeno použitím samostatného chladiče pro každý výkonový tranzistor. Chladiče jsou v krabici umístěny ve vodorovné poloze žebrováním proti sobě (viz. obr. 2.17). Chladiče jsou spojeny bočními plechy, které zároveň zabraňují vstupu teplého vzduchu do přístrojové krabice. Tímto uspořádáním je vytvořen jakýsi tunel. Na jedno čelo tunelu je připevněn ventilátor 80 x 80 mm, který nucenou cirkulací vzduchu zlepšuje chlazení. Pomaluběžný tichý ventilátor odebírá 1 W a dodává 53 m³/hod při 2500 otáčkách za minutu.



Obr. 2.17: Uspořádání chladičů a ventilátoru

3 MĚŘENÍ ZDROJE

3.1 Zdroj 1

Měření proběhlo při hodnotě zatěžovacího proudu $I_{out} = 1,5 \text{ A}$ při maximálním nastavení výstupního napětí a bez použití proudového omezení.

Tab. 3.1: Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z programu OrCAD

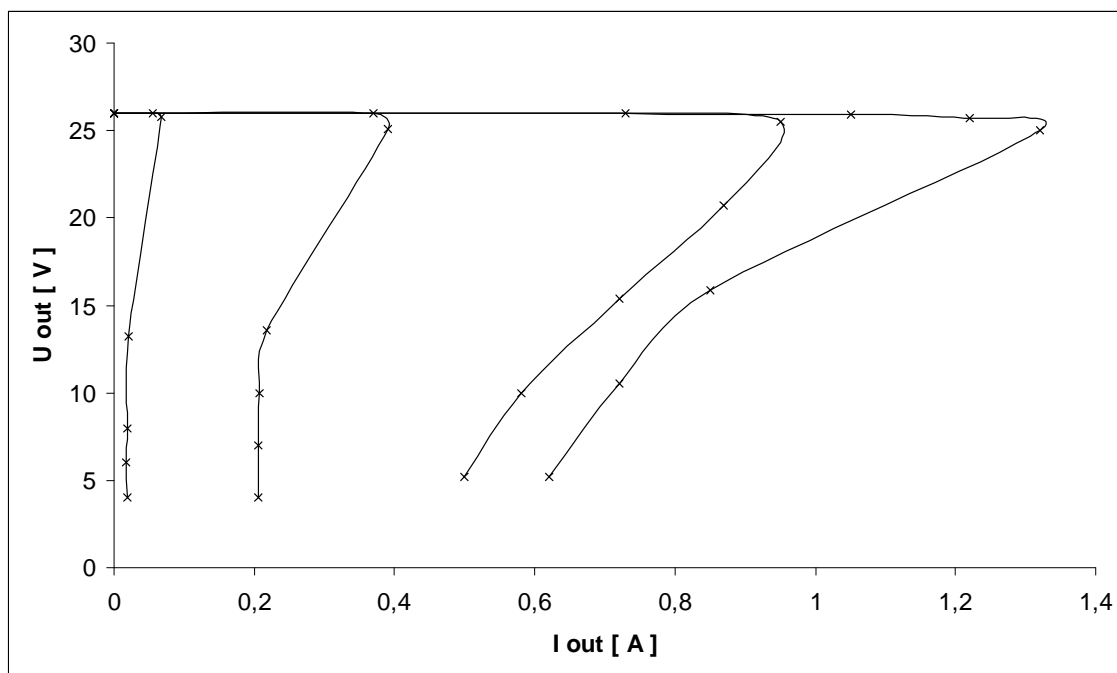
Měřicí bod	Hodnota programu OrCAD	Naměřená hodnota
-	[V]	[V]
TP1	31,50	31,40
TP2	30,71	30,70
TP3	29,88	29,90
TP4	27,86	27,90
TP5	26,74	26,80
TP6	-1,28	-1,19
TP7	-1,8	-1,73

Tab. 3.2: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 26 V

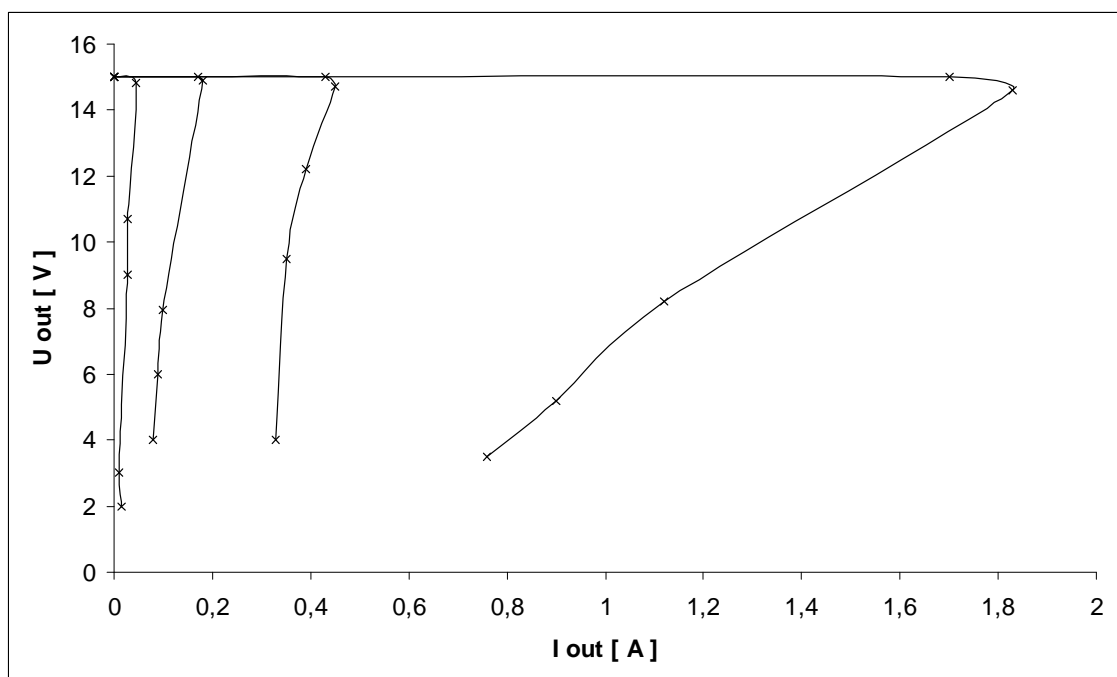
U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}
[V]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]
26,0	0	26,0	0	26,0	0	26,0	0
26,0	55	26,0	0,37	26,0	0,73	25,9	1,05
25,8	68	25,1	0,39	25,5	0,95	25,7	1,22
13,2	20	13,6	0,22	20,7	0,87	25,0	1,32
8,0	19	10,0	0,21	15,4	0,72	15,9	0,85
6,0	18	7,0	0,21	10,0	0,58	10,5	0,72
4,0	19	4,0	0,21	5,2	0,50	5,2	0,62

Tab. 3.3: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V

U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}
[V]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]
15,0	0	15,0	0	15,0	0	15,0	0
14,8	45	15,0	0,17	15,0	0,43	15,0	1,70
10,7	26	14,9	0,18	14,7	0,45	14,6	1,83
9,0	27	7,9	0,10	12,2	0,39	8,2	1,12
3,0	11	6,0	0,09	9,5	0,35	5,2	0,90
2,0	14	4,0	0,08	4,0	0,33	3,5	0,76



Obr. 3.1: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 26 V



Obr. 3.2: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V

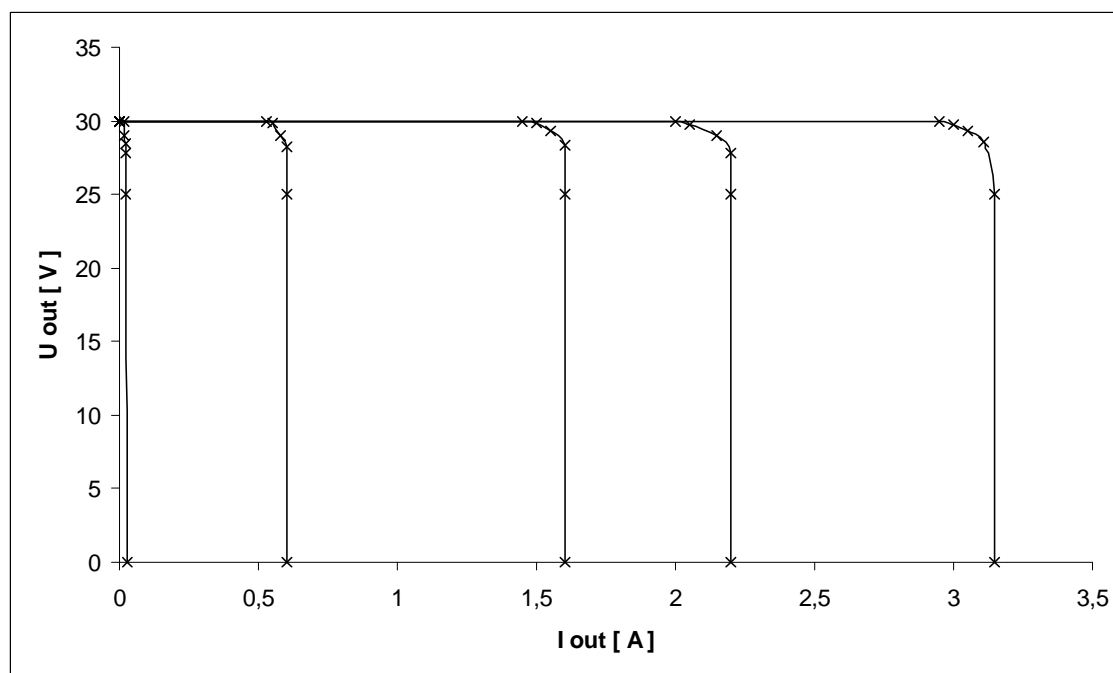
3.2 Zdroj 2

Při ožiování vznikl problém se stabilitou výstupního napětí. Požadované maximální napětí $U_{out} = 30 \text{ V}$ bylo na výstupu pouze při zatížení naprázdno. Při postupném zatížení napětí rychle klesalo. Důvod byl takový, že při zatížení klesalo i výstupní napětí transformátoru. Současně klesalo i napětí na výstupu OZ, který řídí výkonový tranzistor T_2 skrze tranzistor T_1 . Výkonový tranzistor se se zátěží postupně „zavíral“. Problém byl vyřešen použitím transformátoru s vyšším sekundárním napětím.

Měření proběhlo při hodnotě zatěžovacího proudu $I_{out} = 2 \text{ A}$ při maximálním nastavení výstupního napětí a bez použití proudového omezení.

Tab. 3.4: Naměřená zatěžovací charakteristika pro maximální výstupní napětí

U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}
[V]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]
30,0	0	30,0	0	30,0	0	30,0	0	30,0	0
30,0	18	30,0	0,53	30,0	1,45	30,0	2,00	30,0	2,95
29,0	19	29,8	0,55	29,8	1,50	29,7	2,05	29,7	3,00
28,4	20	29,0	0,58	29,3	1,55	29,0	2,15	29,3	3,05
27,8	20	28,2	0,60	28,3	1,60	27,8	2,20	28,6	3,11
25,0	23	25,0	0,60	25,0	1,60	25,0	2,20	25,0	3,15
0	27	0	0,60	0	1,60	0	2,20	0	3,15



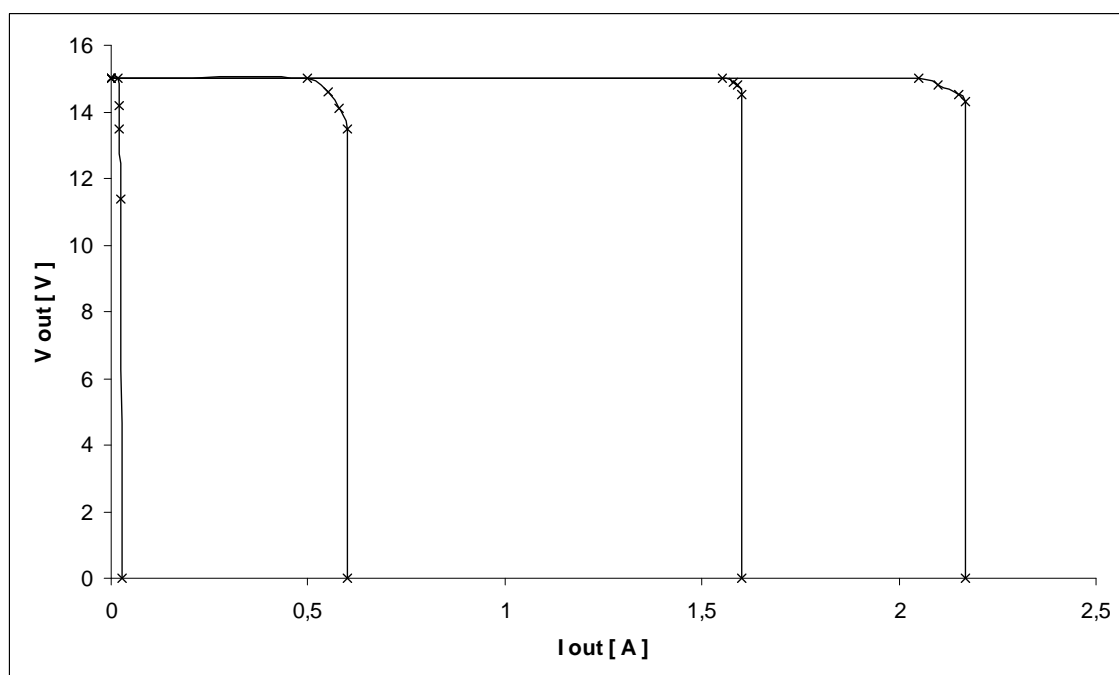
Obr. 3.3: Zatěžovací charakteristika pro maximální výstupní napětí

Tab. 3.5: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V

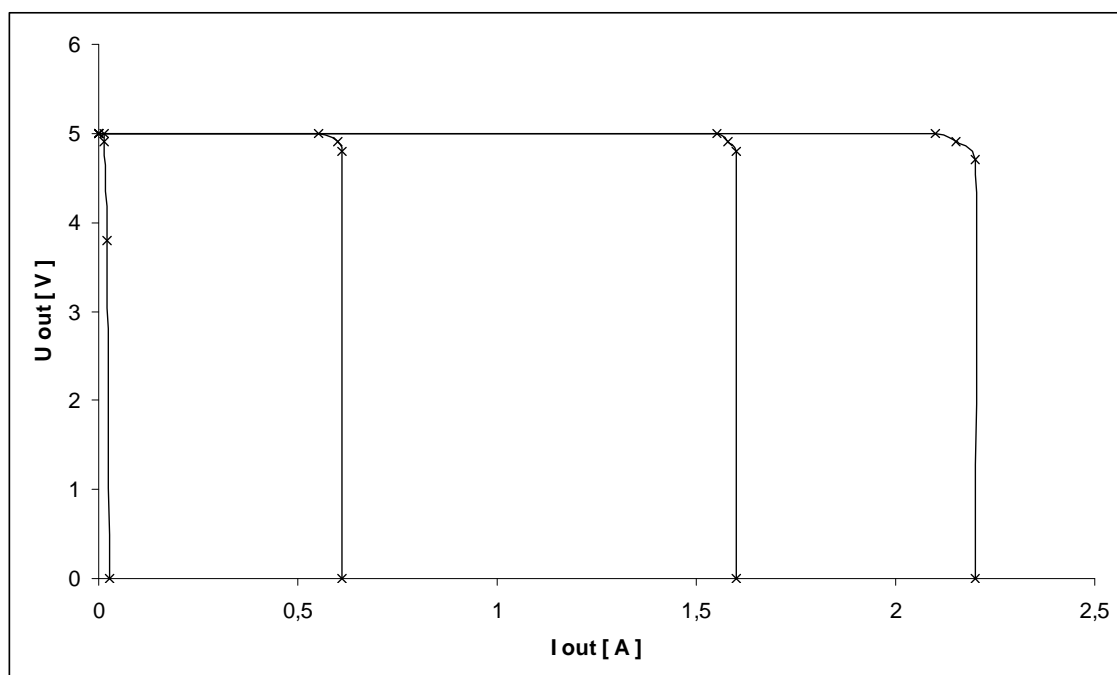
U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}
[V]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]
15,0	0	15,0	0	15,0	0	15,0	0
15,0	18	15,0	0,50	15,0	1,55	15,0	2,05
14,2	20	14,6	0,55	14,9	1,58	14,8	2,10
13,5	21	14,1	0,58	14,8	1,59	14,5	2,15
11,4	24	13,5	0,60	14,5	1,60	14,3	2,17
0	27	0	0,60	0	1,60	0	2,17

Tab. 3.6: Naměřená zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 5 V

U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}	U_{out}	I_{out}
[V]	[mA]	[V]	[A]	[V]	[A]	[V]	[A]
5,0	0	5,0	0	5,0	0	5,0	0
5,0	14	5,0	0,55	5,0	1,55	5,0	2,10
4,9	15	4,9	0,60	4,9	1,58	4,9	2,15
3,8	21	4,8	0,61	4,8	1,60	4,7	2,20
0	26	0	0,61	0	1,60	0	2,20



Obr. 3.4: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 15 V



Obr. 3.5: Zatěžovací charakteristika pro výstupní napětí 5 V

Tab. 3.7: Porovnání naměřených hodnot s hodnotami z programu OrCAD

Měřicí bod	Hodnota programu OrCAD	Naměřená hodnota
-	[V]	[V]
TP1	31,21	31,10
TP2	32,42	32,30
TP3	32,58	32,40
TP4	2,94	2,92
TP5	2,94	2,94
TP6	0,44	0,43
TP7	34,10	34,10
TP8	0,40	0,39

U zdroje bylo proměřeno zvlnění výstupního napětí pro různé situace. V první situaci bylo nastavováno různé výstupního napětí při zatěžovacím rezistoru $R_Z = 10 \Omega$. Ve druhém případě při výstupním napětí 30 V byly postupně nastaveny různé zatěžovací proudy. Pro všechna nastavení bylo naměřeno zvlnění 4 mV. Měření bylo provedeno pomocí milivoltmetru Instek.

4 ZÁVĚR

Pro realizaci laboratorního zdroje napětí existuje velmi mnoho různě obtížných zapojení. Zaměřil jsem se na zdroje, které pro nastavení výstupního napětí využívají operačních zesilovačů nebo lineárního třísvorkového stabilizátoru napětí. Součástí zadání bylo i řešení proudové pojistky.

V této práci jsem uvedl několik často používaných zapojení zdrojů. Jejich funkci a vlastnosti jsem ověřil pomocí analýz v simulačním programu OrCAD. Pomocí stejnosměrné analýzy jsem zjistil chování zdrojů v limitních podmínkách. Ze zatěžovacích charakteristik bylo možné určit typ proudového omezení. Většina zkoumaných zdrojů používá proudovou pojistku, která při proudovém přetížení mění charakter zdroje – ze zdroje napětí se stane zdroj proudu. Ve střídavé analýze jsem zkoumal zvlnění výstupního napětí pro různá nastavení výstupního proudu a napětí. Na základě kritérií jako obvodová složitost, chlazení výkonových prvků a především výše uvedených zatěžovacích charakteristik a zvlnění výstupního napětí jsem vybral jeden zdroj, konkrétně zdroj č. 2, pro praktickou realizaci. Pro ověření jsem ještě realizoval zdroj č. 1. Pro oba zdroje jsem provedl numerický návrh hodnot jednotlivých součástek. Dále jsem v programu Eagle navrhnul desky plošného zdroje a posléze je osadil součástkami.

Oba zmíněné zdroje jsem oživil a proměřil jejich zatěžovací charakteristiky a zvlnění výstupních napětí. Zvlnění výstupního napětí i zatěžovací charakteristiky druhého zdroje se shodovaly s výsledky provedených analýz. Potýkal jsem se s problémem poklesu výstupního napětí při již malém proudovém zatížení. Problém byl již na začátku – výstupní napětí toroidního transformátoru se zatížením rychle klesalo. Situaci jsem vyřešil použitím silnějšího toroidního transformátoru.

Zdroj, vybraný na základě nejlepších výsledků porovnání, jsem rozšířil o digitální řízení pomocí počítače. Jedná se o nahrazení běžných analogových potenciometrů potenciometry digitálními, které jsou řízeny sběrnici I²C. Zdroj je k počítači připojitelný pomocí portu USB. O převod na sběrnici I²C se stará ve zdroji integrovaný převodník typu FT232BM. Pro ovládání zdroje (digitálních potenciometrů) jsem napsal v programovacím prostředí C++ Builder aplikaci. Program počítá i možnosti souběhu výstupních parametrů – výstupního napětí a proudového omezení. Obsahuje i jednoduchou uživatelskou nápovědu.

Nutností bylo navrhnout aktivní chladicí jednotku. Zdroj je také vybaven síťovým filtrem, který odstraňuje přicházející rušení ze sítě a rovněž zamezuje rušení ostatních zařízení. Nechybí ani zobrazení výstupního napětí a proudu v podobě digitálních panelových modulů. Na závěr jsem navrhnul konstrukci přístrojové skříňky a realizoval ji. Skříňka je vyrobena z materiálu s povrchovou úpravou proti poškrábání.

Tento zdroj se vyrovná i profesionálním přístrojům jak funkčností, parametry, tak i vzhledem. Stabilizace tohoto napájecího zdroje je velmi dobrá, proudová rezerva je dostatečná a přesnost měření je rovněž dobrá a to jsou nároky na kvalitní laboratorní zdroj.

K tomuto zdroji je vytvořena kompletní podkladová dokumentace pro následnou výrobu včetně konstrukčních výkresů pro výrobu přístrojové skříňky.

LITERATURA

- [1] LÁNÍČEK, R. *Elektronika, obvody – součástky – děje* / 1.vyd.. Praha: BEN – technická literatura, 1998. 479s.
- [2] KREJČÍŘÍK, A. *Lineární napájecí zdroje* / 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2001. 136s.
- [3] MALINA, V. *Poznáváme elektroniku 2* / 1.vyd. České Budějovice: KOPP, 1995, 193s.
- [4] NOVOTNÝ, V., VOREL, P., PATOČKA, M. *Napájení elektronických zařízení*. Elektronické skriptum. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004, 139s.
- [5] Redakce HW serveru, technický server pro oblast techniky a hardware. [online]. Dostupné na WWW: <<http://hw.cz>>
- [6] KOMP, P. *Napájecí zdroj Z02* [online]. [cit. prosinec 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.czechaudio.com/Projects/Z02/Z02_CZ.htm>
- [7] HAVLÁT, L., *Laboratorní zdroj* [online]. [cit. prosinec 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.sob.xf.cz/zdroj.php>>
- [8] SLÁNSKÝ, M. *Regulovatelný napájecí zdroj 0-30V / 0-5A* [online]. [cit. prosinec 2009] Dostupné na WWW: <http://michal.slansky.sweb.cz/data/regulovatelny_napajeci_zdroj_0_30v_0_5a/text.pdf>
- [9] ŠMÍD, D. *Laboratorní zdroj 0-30V/2mA-3A* [online]. 2005. Dostupné na WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1438-Napajeci-zdroj-0-30V-s-regulovatelny-m-proudem-2mA--3A.html>>
- [10] SLÁNSKÝ, M. *Napájecí stabilizovaný regulovatelný zdroj s obvodem L200* [online]. 2007. Dostupné na WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1815-Napajeci-stabilizovany-regulovatelny-zdroj-s-obvodem-L200.html>>
- [11] Texas Instruments. 3-Terminal adjustable regulator [online]. Datasheet, 16 s., 2003. Dostupné na WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/lm317.pdf>>
- [12] Thompson. 7805-STM [online]. Datasheet, 34 s., 2004. Dostupné na WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-149/dsh.330-149.1.pdf>
- [13] Analog Devices, P. O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106,USA. *Dual-Channel, I₂C Compat., 256 Position, Digital Potentiometer AD5252* [online]. Datasheet, 28 s., 2009. Dostupné na www: <<http://www.analog.com/>>.
- [14] Analog Devices, P. O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106,USA. *Dual-Channel, 256 Position, Digital Potentiometer AD5232* [online]. Datasheet, 24 s., 2009. Dostupné na www: <<http://www.analog.com/>>.
- [15] Philips Semiconductors. *I₂C Bus Specification* [online]. Datasheet, 51 s., 2003. Dostupné na www: <<http://www.nxp.com>>.
- [16] HW server. *Stručný popis sběrnice I₂C a její praktické využití k připojení externí eeprom 24LC256 k mikrokontroléru PIC16F877* [online]. 2000. Dostupné na WWW: <<http://hw.cz/teorie-praxe/navrhy-vyvojare/art1922-strucny-popis-sbernice-i2c-jeji-prakticke-vyuziti-k-pripojzeni-e>>.

- [17] Future Technology Devices International Ltd. FT232BM USB UART IC [online]. Datasheet, 31 s., 2009. Dostupné na WWW: <<http://www.ftdichip.com>>.
- [18] MATOUŠEK, D. *USB prakticky obvody FTDI*. 1.díl, Praha: BEN – technická literatura, 272 s., 2003.
- [19] Microchip, 1 K Serial EEPROM 93LC46B [online]. Datasheet, 12 s, 1997. Dostupné na WWW:< http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/414/414-049/dsh.414-049.1.pdf >
- [20] MATOUŠEK, D. *C++ Builder: Vývojové prostředí: určeno pro verze 4.0, 5.0, 6.0*. 1. díl, Praha, 2002.
- [21] HEROUT, P., *Učebnice jazyka C*. 3. upravené vydání, České Budějovice: Kopp, 269 s., 2001.
- [22] FUKÁTKO, T., FUKÁTKO, J. *Teplo a chlazení v elektronice 2* / 1.vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 118s.
- [23] ON Semiconductor, *Silikon power transistor MJ15003* [online]. Datasheet, 3 s., 2005. Dostupné na WWW: <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/211/211-211/dsh.211-211.1.pdf>
- [24] GAMA aluminium, *Chladič ZH-2476/100AL* [online]. Datasheet, 1 s. Dostupné na WWW: <http://www.soselectronic.com/a_info/kat/i17.pdf>

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ACK	Potvrzovací bit na sběrnici I ² C
C	Kondenzátor
D	Dioda
GND	Nulová svorka – „zem“
I_{adj}	Pracovní proud třísvorkového stabilizátoru
I_d	Proud odporového děliče
I_{out}	Výstupní proud
I_Z	Proud zátěží
I ² C	Typ sběrnice
LED	Dioda LED
MSB	Bit s nejvyšší prioritou
M	Počet bitů nutných k určení pozice jezdce digitálního potenciometru
N	Počet pozic jezdce digitálního potenciometru
OZ	Operační zesilovač
Pot	Potenciometr
R	Rezistor
R_{AB}	Nominální odpor digitálního potenciometru – mezi svorkami A a B
R_W	Vlastní odpor jezdce digitálního potenciometru
R_{WB}	Nastavený odpor digitálního potenciometru s odporem jezdce
T	Tranzistor
U_{1+}	Napětí na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače (pro OZ ₁)
U_{1-}	Napětí na invertujícím vstupu operačního zesilovače (pro OZ ₁)
U_{1H}	Vysoká úroveň vstupního napětí pro překlopení komparátoru
U_{1L}	Nízká úroveň vstupního napětí pro překlopení komparátoru
U_{2H}	Vysoká úroveň výstupního napětí komparátoru
U_{2L}	Nízká úroveň výstupního napětí komparátoru
U_{BE}	Napětí na přechodu báze – emitor tranzistoru
U_{CE}	Napětí na přechodu kolektor – emitor tranzistoru
U_{CES}	Saturační napětí tranzistoru na přechodu kolektor – editor
U_E	Pomocné záporné napětí

U_F	Napětí diody v propustném směru
U_{in}	Vstupní napětí
U_H	Hysterezní napětí
U_{inv}	Inverzní napětí
U_{out}	Výstupní napětí
U_{7805}	Výstupní napětí samotného stabilizátoru
$U_{7805out}$	Výstupní napětí na výstupních svorkách stabilizátoru
U_{TL431}	Napětí dodávající referenční zdroj TL431
U_{ref}	Referenční napětí
SCL	Linka hodinového signálu
SDA	Datová linka
SPI	Typ sběrnice
OTP	Potenciometr na jedno trvalé naprogramování pozice jezdce
v_a	Teplota okolí
v_j	Maximální pracovní teplota přechodu
$R_{\theta sa}$	Tepelný odpor použitého chladiče
$R_{\theta jc}$	Vnitřní tepelný odpor tranzistoru
$R_{\theta sc}$	Tepelný odpor styku s chladičem

SEZNAM PŘÍLOH

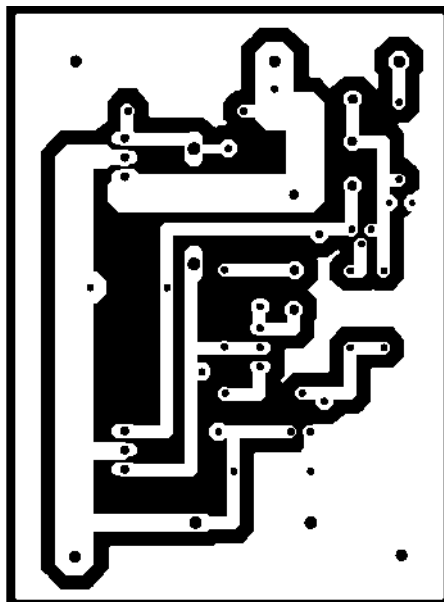
A	Dokumentace plošných spojů	75
A.1	Zdroj 1 – deska plošného spoje (bottom).....	75
A.2	Zdroj 1 – osazovací plán plošného spoje	75
A.3	Zdroj 2 – deska plošného spoje (bottom).....	76
A.4	Zdroj 2 – osazovací plán plošného spoje	77
A.5	Zdroj 2 – deska plošného spoje (bottom).....	78
A.6	Zdroj 2 – osazovací plán plošného spoje	78
A.7	Vstupní síťová část – deska plošného spoje (bottom)	79
A.8	Vstupní síťová část – osazovací plán plošného spoje.....	79
A.9	Pomocná deska – deska plošného spoje (bottom)	80
A.10	Pomocná deska – osazovací plán plošného spoje	80
A.11	Převodník USB – deska plošného spoje (bottom)	81
A.12	Převodník USB – osazovací plán plošného spoje.....	81
B	Seznam součástek	82
B.1	Zdroj 1.....	82
B.2	Zdroj 2.....	83
B.3	Vstupní síťová část	84
B.4	Převodník USB / I ² C.....	84
B.5	Pomocná deska	85
B.6	Další materiál	86
C	OBRAZOVÁ DOKUMENTACE	87
C.1	Zdroj č.1	87
C.2	Zdroj č.2.....	87
C.3	Převodník USB / I ² C – Bottom.....	88
C.4	Převodník USB / I ² C – Top	88
C.5	Pomocná deska	89
C.6	Kompletní osazení zdrojové skříně – pohled shora	89
C.7	Kompletní osazení zdrojové skříně – boční pohled.....	90
C.8	Přední panel zdrojové skříně.....	90
C.9	Zadní panel zdrojové skříně.....	91

C.10 Kompletní zhotovení zdroje symetrického napětí **Chyba! Zálůžka není definována.**

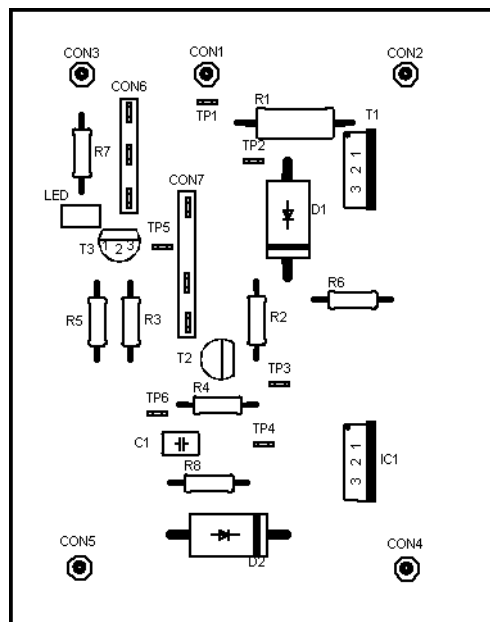
D Programová část	92
D.1 Výběr z programového kódu	92
D.2 Vývojový diagram programu	94

A DOKUMENTACE PLOŠNÝCH SPOJŮ

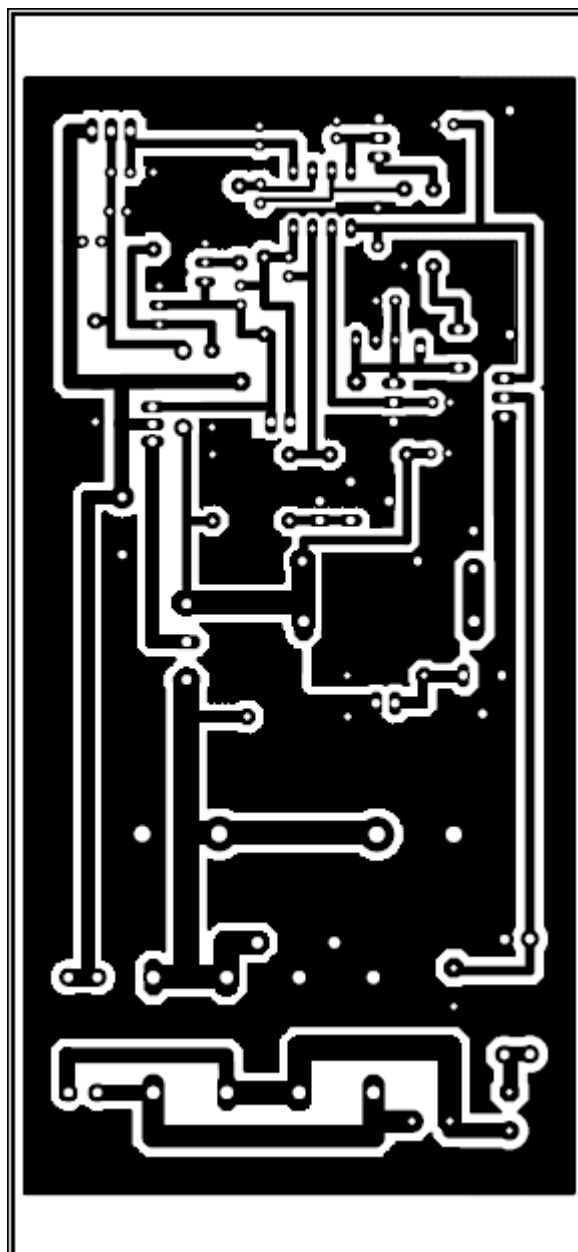
A.1 Zdroj 1 – deska plošného spoje (bottom)



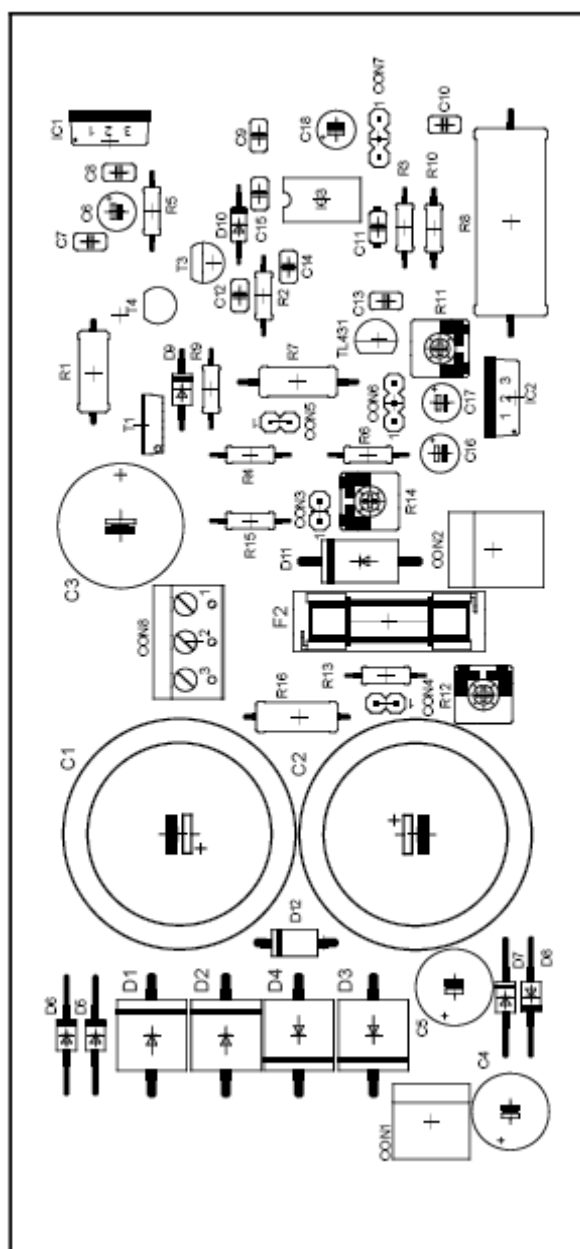
A.2 Zdroj 1 – osazovací plán plošného spoje



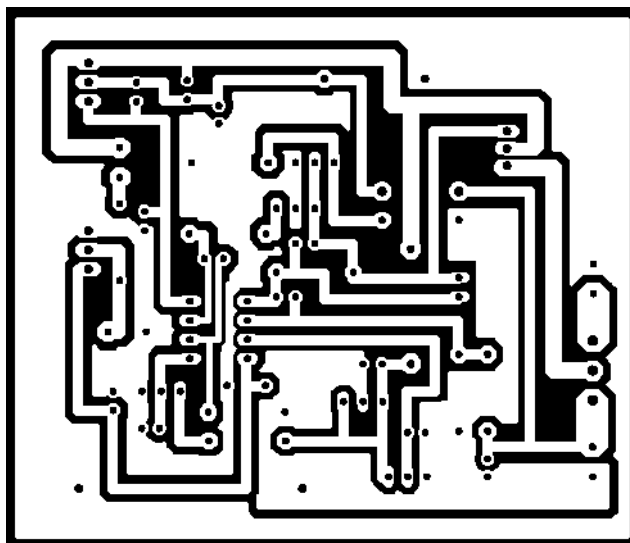
A.3 Zdroj 2 – deska plošného spoje (bottom)



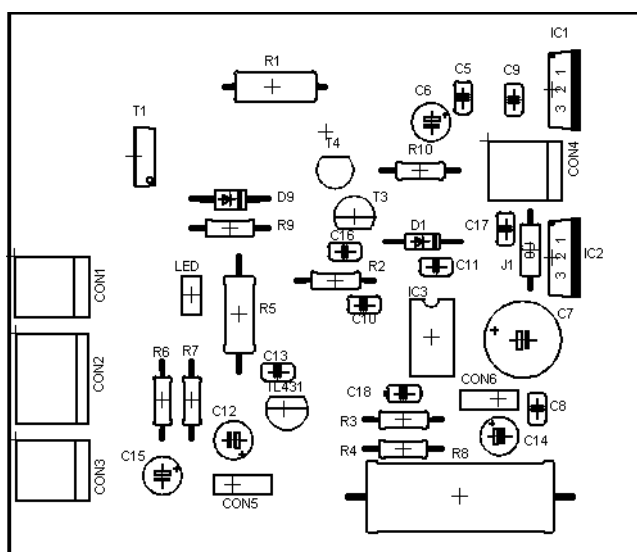
A.4 Zdroj 2 – osazovací plán plošného spoje



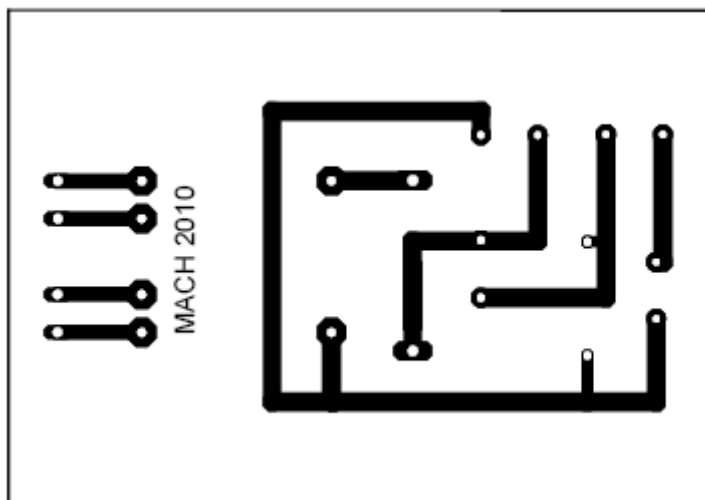
A.5 Zdroj2 – deska plošného spoje (bottom)



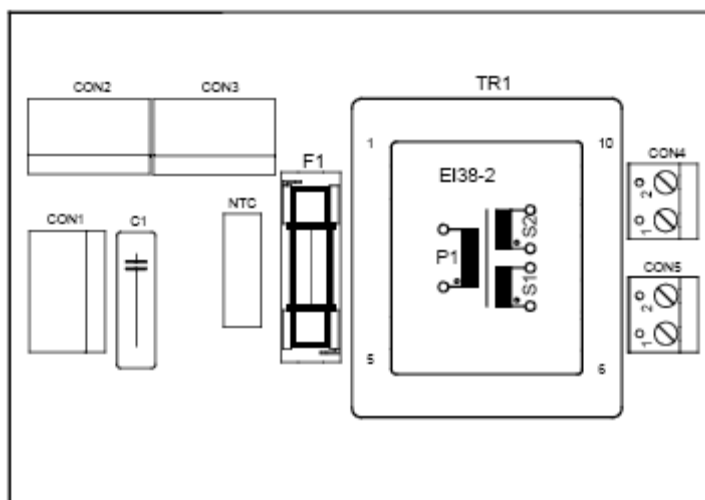
A.6 Zdroj 2 – osazovací plán plošného spoje



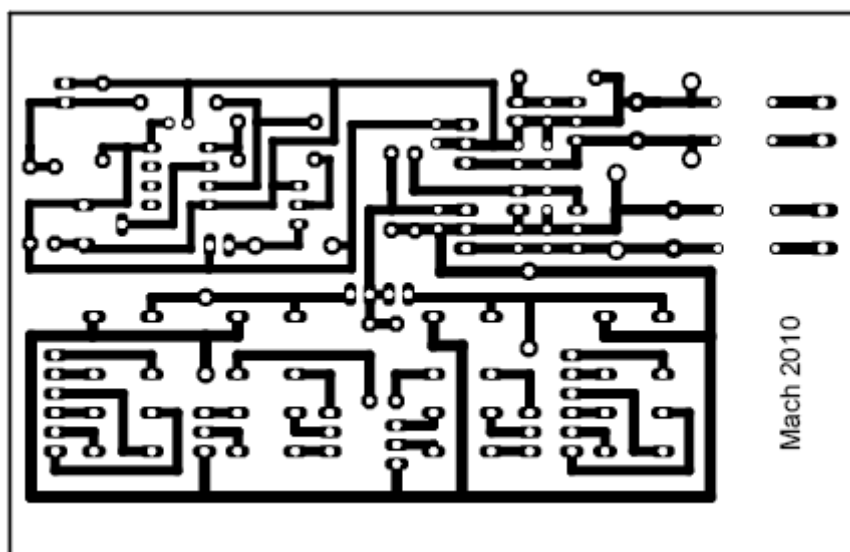
A.7 Vstupní síťová část – deska plošného spoje (bottom)



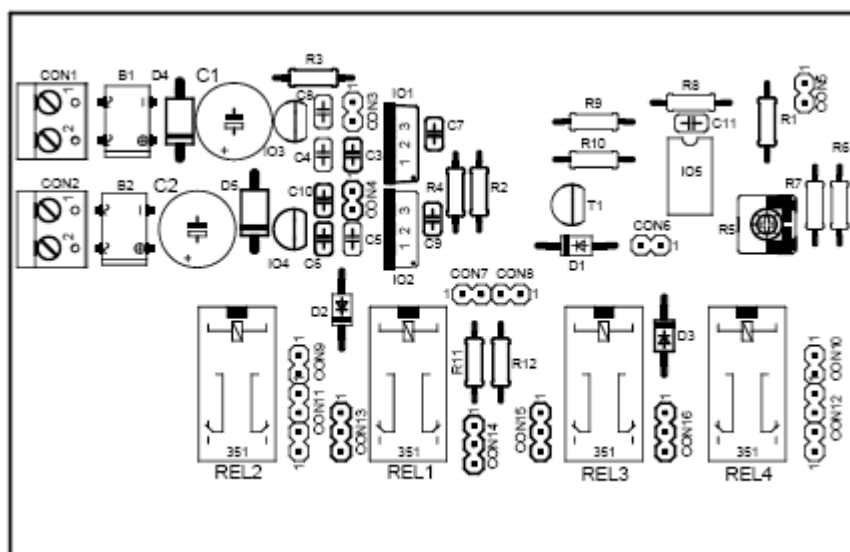
A.8 Vstupní síťová část – osazovací plán plošného spoje



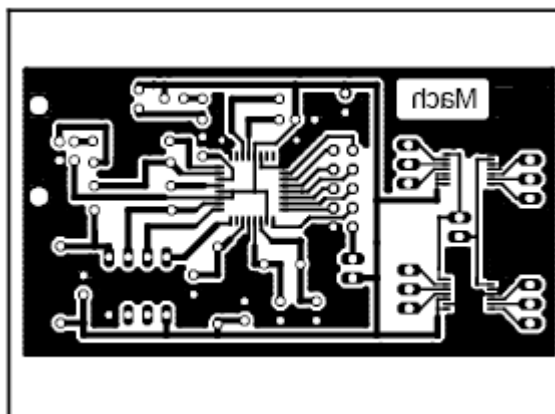
A.9 Pomocná deska – deska plošného spoje (bottom)



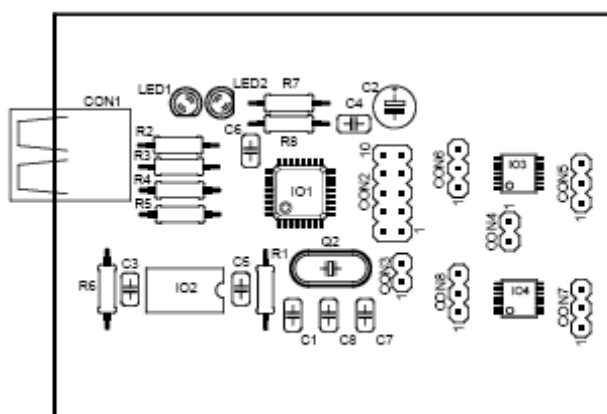
A.10 Pomocná deska – osazovací plán plošného spoje



A.11 Převodník USB – deska plošného spoje (bottom)



A.12 Převodník USB – osazovací plán plošného spoje



B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Zdroj 1

Označení	Hodnota	Popis
IC1	LM317T	Stabilizátor napětí
T1	BD244	Tranzistor
T2	BC557	Tranzistor
T3	BC547	Tranzistor
D1-D4	P600K	Dioda
D5-D6	1N4007	Dioda
D7-D8	1N5408	Dioda
R1	1R2	Výkonový rezistor
R2	860R	Rezistor
R3	220R	Rezistor
R4	30K	Rezistor
R5	2K7	Rezistor
R6	410R	Rezistor
R7	2K7	Rezistor
LED	červená	LED dioda
Pot1	1K	Lineární potenciometr
Pot2	10K	Lineární potenciometr
CON1	1-pin	Pájecí plocha
CON2	1-pin	Pájecí plocha
CON3	1-pin	Pájecí plocha
CON4	1-pin	Pájecí plocha
CON5	1-pin	Pájecí plocha
CON6	1 x 3-pin	Počítačový konektor
CON7	1 x 3-pin	Počítačový konektor

B.2 Zdroj 2

Označení	Hodnota	Popis
IC1	7805	Stabilizátor napětí
IC2	7905	Stabilizátor napětí
IC3	NE5532	Dvojitý operační zesilovač
TL431	TL431	Referenční zdroj napětí
T1	TIP122	NPN tranzistor
T2	MJ15003	NPN tranzistor
T3	BC557	PNP tranzistor
T4	BC547	NPN tranzistor
D1-D4	P600K	Dioda
D5-D9	1N4007	Dioda
D10	1N4148	Dioda
D11	1N5408	Dioda
D12	47V	Transil
R1	1K0 / 1W	Výkonový rezistor
R2-R5	1K0	Rezistor
R6	11K	Rezistor
R7	2K2	Výkonový rezistor
R8	0R22 / 5W	Výkonový rezistor
R9	100R	Rezistor
R10	300K	Rezistor
R11	50K	O odporový trimr
R12	1K0	O odporový trimr
R13	18K	Rezistor
R14	500R	O odporový trimr
R15	240K	Rezistor
R16	2K2 / 2W	Výkonový rezistor
C1-C2	4m7 / 50V	Elektrolytický kondenzátor
C3	1m0 / 50V	Elektrolytický kondenzátor
C4-C5	220u / 50V	Elektrolytický kondenzátor
C6	10u	Elektrolytický kondenzátor
C7	330n	Keramický kondenzátor
C8-C13	100n	Keramický kondenzátor
C14-C15	47p	Keramický kondenzátor
C16-C18	1u / 50V	Elektrolytický kondenzátor
CON1	2-pin	Šroubovací svorkovnice (5mm)
CON2	2-pin	Šroubovací svorkovnice (5mm) 90°
CON3-CON5	1 x 2-pin	Počítačový konektor
CON6-CON7	1 x 3-pin	Počítačový konektor
CON8	3-pin	Šroubovací svorkovnice (5mm) 45°
F	4A	Rychlá pojistka + držák

B.3 Vstupní síťová část

Označení	Hodnota	Popis
C1	110n / 275VAC	Fóliový kondenzátor
NTC	40Ω / 4A	Termistor
F1	2 A	Pojistka
F2	50mA	Rychlá pojistka
Tr	2 x 12V / 4VA	Síťový transformátor
CON1-CON3	2-pin	Šroubovací svorkovnice (7,5mm)
CON5-CON6	2-pin	Šroubovací svorkovnice (5mm)

B.4 Převodník USB / I²C

Označení	Hodnota	Popis
IO1	FT232BM	Převodník USB/RS232
IO2	93LC46B	Paměť EEPROM
IO3-IO4	AD5252	Digitální potenciometr
Q	6 MHz	Krystal
LED1-LED2	5 mm, zelená	LED dioda
R1	470R	Rezistor
R2 - R3	27R	Rezistor
R4	1K5	Rezistor
R5	2K2	Rezistor
R6	10K	Rezistor
R7 - R8	220R	Rezistor
C1	10n	Keramický kondenzátor
C2	10u / 25V	Elektrolytický kondenzátor
C3-C5	100n	Keramický kondenzátor
C6	33n	Keramický kondenzátor
C7-C8	27p	Keramický kondenzátor
CON1	typ B	USB konektor
CON2	2 x 5-pin	Počítačový konektor
CON3-CON4	1 x 2-pin	Počítačový konektor
CON5-CON8	1 x 3-pin	Počítačový konektor

B.5 Pomocná deska

Označení	Hodnota	Popis
IO1-IO2	7812	Stabilizátor napětí
IC3-IO4	79L09	Stabilizátor napětí
IC5	TL072	Dvojitý operační zesilovač
T1	BC338-40	NPN tranzistor
D1-D3	1N4007	Dioda
D4-D5	22V	Transil
B1-B2	DB102	Diodový můstek
C1-C2	1000 μ / 25V	Elektrolytický kondenzátor
C3-C6	330n	Keramický kondenzátor
C7-C10	100n	Keramický kondenzátor
R1-R2	2K7	Rezistor
R3-R4	2K	Rezistor
R5	10K	Trimr
R6-R7	10K	Rezistor
R8	4K7	Rezistor
R9	1M5	Rezistor
R10	1K0	Rezistor
REL1-REL4	RELEM4	Relé 2x přepínací kontakt (12V)
CON1-CON2	2-pin	Šroubovací svorkovnice (5mm)
CON3-CON10	1 x 2-pin	Počítačový konektor
CON11-CON12	1 x 4-pin	Počítačový konektor
CON13-CON16	1 x 3-pin	Počítačový konektor

B.6 Další materiál

Množství [ks]	Hodnota	Popis
1	2 x 29 V / 300 VA	Toroidní transformátor
2	G850M	Digitální měřidla do panelu
4	GF2	Přístrojové nožky
1	WSB 3100	2-pólový přepínač
2	PB 02AKB	Přepínač s aretací
2	ZH-2476/100AL	Hliníkový chladič
1	80 x 80 mm, 12 V / 1W	Ventilátor
6	LDC500	Průchodka na LED 5 mm
2	Červené	Přístrojové svorky
3	Černé	Přístrojové svorky
1	230 V~ / 3 A	Sítový filtr
2	Pro pouzdro TO-3	Slídová podložka
-	S-SIL pasta EX	Teplovodná pasta
4	Šroub x šroub, 45 mm	Distanční sloupek M3
4	Matice x šroub, 45 mm	Distanční sloupek M3
4	Šroub x šroub, 64 mm	Distanční sloupek M3
4	Matice x šroub, 5 mm	Distanční sloupek M3
4	Matice x šroub, 8 mm	Distanční sloupek M3
4	Matice x šroub, 12 mm	Distanční sloupek M3
-	M3, M4	Spojovací materiál
-	-	Vodiče

C OBRAZOVÁ DOKUMENTACE

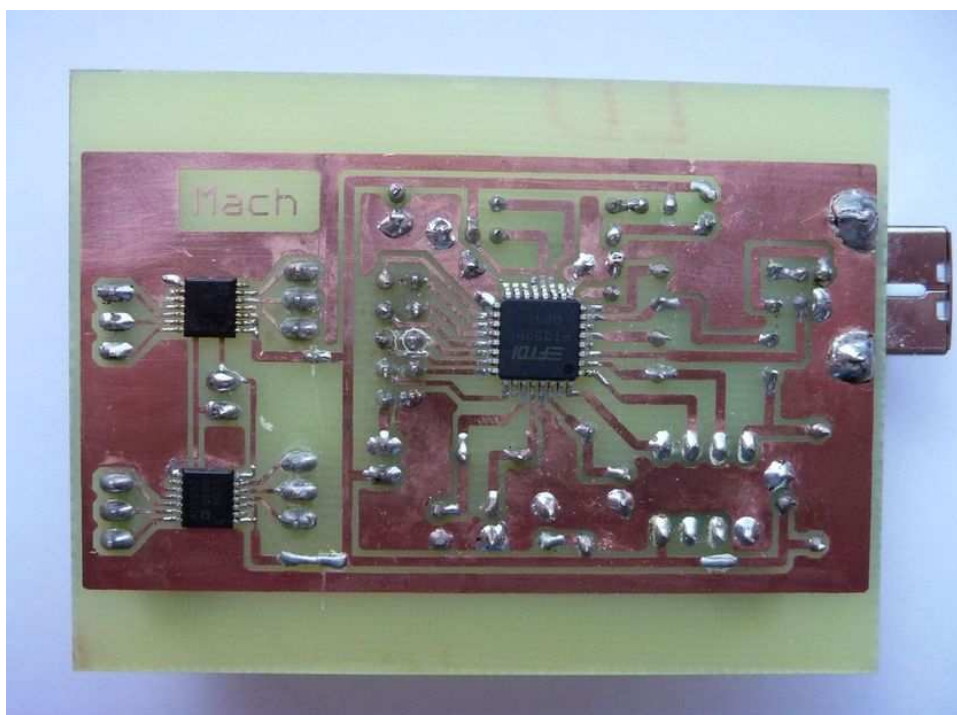
C.1 Zdroj č.1



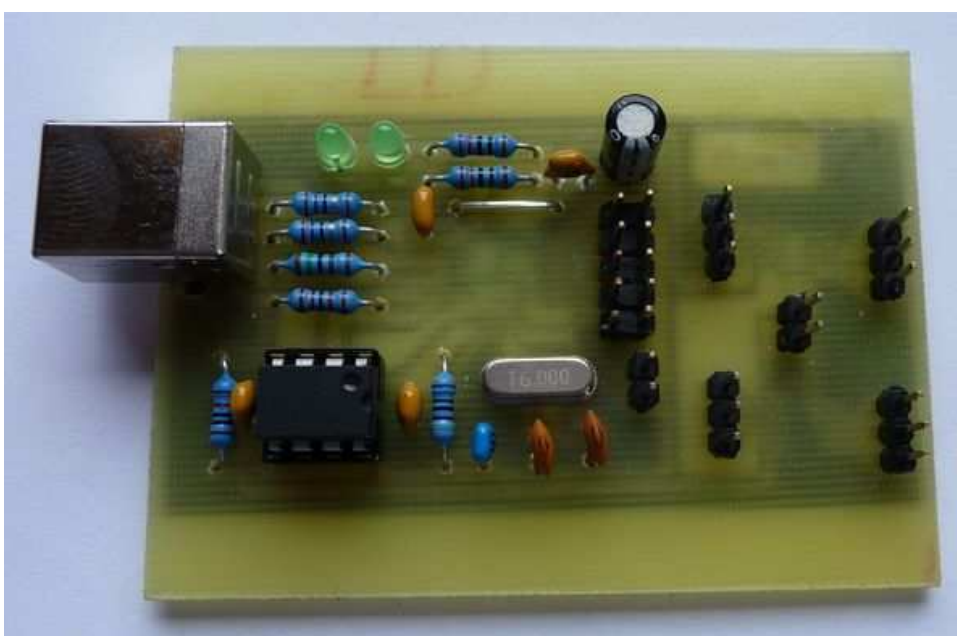
C.2 Zdroj č.2



C.3 Převodník USB / I²C – Bottom



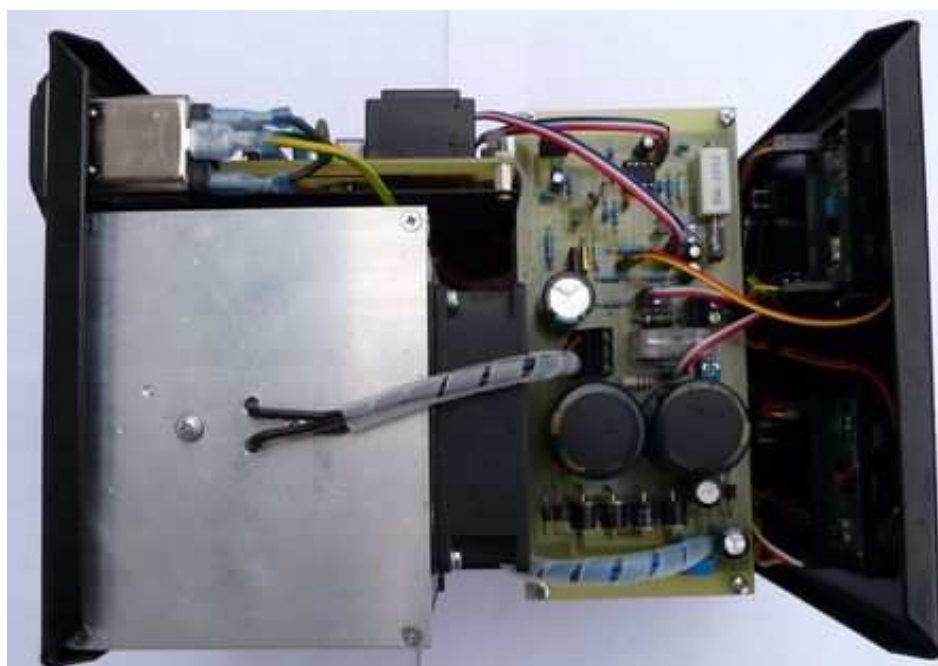
C.4 Převodník USB / I²C – Top



C.5 Pomocná deska



C.6 Kompletní osazení zdrojové skříně – pohled shora



C.7 Kompletní osazení zdrojové skříně – boční pohled



C.8 Přehled panel zdrojové skříně



C.9 Zadní panel zdrojové skříně



D PROGRAMOVÁ ČÁST

D.1 Výběr z programového kódu

Funkce pro ovládání linky SDA

```
void __fastcall TForm1::SDA(bool b)
{
    FT_W32_EscapeCommFunction(ftHandle,b?CLRRTS:SETRTS);
}
```

Funkce pro ovládání linky SCL

```
void __fastcall TForm1::SCL(bool b)
{
    FT_W32_EscapeCommFunction(ftHandle,b?CLRBREAK:SETBREAK);
}
```

Funkce pro generování Start bitu

```
void __fastcall TForm1::Start() //definice Start-bitu
{
    SDA(1);
    SCL(1);
    Sleep(1); //ustálení signálu 1 ms
    SDA(0);
    Sleep(1);
    SCL(0);
    Sleep(1);
}
```

Funkce pro vysílání bajtů a testování ACK bitu

```
void __fastcall TForm1::Posli(Byte b)
{
    for(int i=0; i<8; i++)
    {
        SDA(b&0x80); //začíná od MSB bitu
        SCL(1);
        Sleep(1);
        b<<=1;
        SCL(0);
        Sleep(1);
    }

    SDA(1); //testování ACK bitu
    SCL(1);
    FT_W32_GetCommModemStatus(ftHandle,&d); //čtení linky SDA
    if (!(d&MS_CTS_ON)) //vymaskování bitu CTS
        throw Exception("Obvod není připojen");
    Sleep(1);
    SCL(0);
    Sleep(1);
}
```

Funkce pro generování Start bitu

```
void __fastcall TForm1::Stop() // definice Stop bitu
{
    SDA(0);
    Sleep(1);
    SCL(1);
    Sleep(1);
    SDA(1);
}
```

Funkce pro obsluhu posuvníku a souběhu (zde nastavení napětí)

Pozn. V případě souběhu napětí zdrojů se napětí nastavuje podle prvního zdroje.

```
void __fastcall TForm1::ScrollBarScroll1(TObject *Sender,
    TScrollCode ScrollCode, int &ScrollPos)
{
    Byte Adresa=0x5A; //adresa Pot1(AD1=0,AD0=0,R/W=0)
    Byte Prikaz=0x01; //zápis do RDAC1 Pot1
    Byte Data=ScrollBar1->Position; //čtení pozice posuvníku

    if(ScrollCode==scEndScroll) //je-li konec nastavování
    {
        Start();
        Posli(Adresa);
        Posli(Prikaz);
        Posli(Data);
        Stop();
        if(CheckBox1->Checked==true) //podmínka při souběhu
        {
            Prikaz=0x03;
            Start();
            Posli(Adresa);
            Posli(Prikaz);
            Posli(Data);
            Stop();
            float Uref=30;
            Label8->Caption=FormatFloat("0.0 V",Data*Uref/255);
        }
        float Uref=30;
        Label7->Caption=FormatFloat("0.0 V",Data*Uref/255);
    }
}
```

D.2 Vývojový diagram programu

