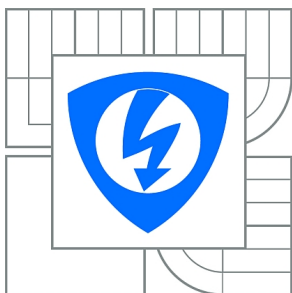


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

NÁVRH LABORATORNÍHO ZDROJE

LABORATORY POWER SOURCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

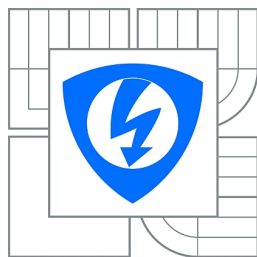
VÁCLAV LÍZNER

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZOLTÁN SZABÓ, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Václav Lízner

ID: 146891

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Návrh laboratorního zdroje

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s prací a programováním mikroprocesorů od firmy Atmel, dále s problematikou konstrukce laboratorních zdrojů stejnosměrných napětí a proudů a se způsoby testování jejich statických a dynamických vlastností. Navrhněte schéma zapojení laboratorního zdroje 2 x 30 V/3 A s nastavitelným výstupním napětím a nastavitelným proudovým omezením. Nastavení výstupního napětí a proudové omezení řešte analogově. Měřené hodnoty napětí a proudu budou zobrazeny na LCD panelu. Navržený laboratorní zdroj oživte a měřením jeho parametry ověřte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KREJČÍŘÍK, A. Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch. Praha: BEN technická literatura, 2002.

[2] MATOUŠEK, D. Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 320 s. ISBN 80-7300-174-8.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 30.5.2014

Vedoucí práce: Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá kompletním návrhem a realizací laboratorního zdroje stejnosměrného napětí. V práci je navržen zdroj s regulovatelným výstupním napětím v rozsahu 0 až 30V s nastavitelným proudovým omezením do 3A. Celý zdroj je řešen analogově, pouze pro měření hodnot napětí a proudu je použit mikrokontrolér. Naměřené veličiny jsou zobrazeny pomocí LCD displeje. Součástí práce je i rozdělení stejnosměrných zdrojů, kde se zaměřuje zejména na zdroje spínané, u kterých jsou detailně popsány všechny základní zapojení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Napájecí zdroj, spínaný zdroj, DC/DC měnič, ATmega16, optické oddělení

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the complete design and realization of the laboratory DC power source. There is designed a power supply with adjustable output voltage from 0 to 30V and with adjustable current limiter up to 3A. All output values are analog controlled, the microcontroller is used only for the voltage and current measuring. This data is shown on the LCD display. The thesis includes also participation of the DC sources, what is focused on the basic wiring of the switching DC sources.

KEYWORDS

Power supply, switching power supply, DC/DC converter, ATmega16, optical isolation

LÍZNER, V. *Návrh laboratorního zdroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2014. 40 s., 12 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Zoltán Szabó, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

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

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

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Z. Szabóovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	x
Úvod	1
1 Lineární napájecí zdroje	2
1.1 Transformátor	2
1.2 Usměrnovač	3
1.3 Filtr.....	3
1.4 Stabilizátor	3
1.4.1 Parametrické stabilizátory.....	3
1.4.2 Lineární stabilizátory	4
2 Spínané napájecí zdroje	5
2.1 Rozdělení spínaných zdrojů.....	6
2.2 Spínané zdroje bez transformátoru	6
2.2.1 Snižující měnič (buck)	6
2.2.2 Zvyšující měnič (boost)	7
2.2.3 Zvyšující a snižující měnič (cuk).....	8
2.2.4 Invertující (buck-boost)	9
2.3 Spínané zdroje s transformátory	10
2.3.1 Akumulující měnič (flyback).....	10
2.3.2 Propustný (forward)	11
2.3.3 Rezonanční měnič	13
2.4 Dvojčinné měniče s transformátorem	13
2.4.1 Měnič v zapojení push-pull.....	13
2.4.2 Měnič v zapojení polomost (half bridge).....	15
2.4.3 Měnič v zapojení plný most (full bridge)	15
2.5 Porovnání lineárních a spínaných zdrojů.....	15
3 Mikrokontrolér ATmega16	16
3.1 Popis mikrokontroléru	16
3.2 Vstupně/výstupní obvody	16

3.3	Interní A/D převodník.....	16
4	Návrh a popis zdroje	18
4.1	Volba zdroje.....	18
4.2	Popis kompletního zdroje	18
4.3	Popis regulovatelného zdroje 0-30V/0-3A	19
4.4	Popis desky s 5V zdrojem a relé	21
4.5	Popis desky s mikrokontrolérem.....	21
4.6	Optické oddělení	22
4.6.1	Linearita optočlenu IL300	23
4.7	Popis programu	24
5	Konstrukce zdroje	26
5.1	Regulovatelný zdroj	26
5.2	Deska s 5V zdrojem a relé	27
5.3	Deska s mikrokontrolérem.....	27
5.4	Kompletní konstrukce.....	28
5.5	Obsluha zdroje	30
6	Měření charekteristik	31
6.1	Účinnost zdroje	31
6.2	Zatěžovací charakteristika	33
6.3	Zvlnění výstupního napětí	34
6.4	Charakteristiky 5V zdroje	36
7	Závěr	38
	Literatura	39
	Seznam příloh	40

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1:	Blokové schéma lineárního zdroje.....	2
Obr. 2.1:	Blokové schéma spínaného zdroje.....	5
Obr. 2.2:	Snižující měnič – tranzistor T_1 sepnut.	6
Obr. 2.3:	Snižující měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.....	7
Obr. 2.4:	Zvyšující měnič – tranzistor T_1 sepnut.	7
Obr. 2.5:	Zvyšující měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.....	8
Obr. 2.6:	Zvyšující a snižující měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.	8
Obr. 2.7:	Zvyšující a snižující měnič – tranzistor T_1 sepnut.	9
Obr. 2.8:	Invertující měnič – tranzistor T_1 sepnut.....	9
Obr. 2.9:	Invertující měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.	10
Obr. 2.10:	Akumulující měnič – tranzistor T_1 sepnut.	10
Obr. 2.11:	Akumulující měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.....	11
Obr. 2.12:	Propustný měnič – tranzistor T_1 sepnut.	12
Obr. 2.13:	Propustný měnič – tranzistor T_1 rozeprnut.....	12
Obr. 2.14:	Rezonanční měnič.	13
Obr. 2.15:	Měnič v zapojení push-pull – T_1 sepnut, T_2 rozeprnut.	14
Obr. 2.16:	Měnič v zapojení push-pull – T_1 rozeprnut, T_2 sepnut.....	14
Obr. 4.1:	Blokové schéma kompletního zdroje.....	19
Obr. 4.2:	Spínaný předregulátor a lineární stabilizátor	20
Obr. 4.3:	Regulace výstupního napětí a proudu	20
Obr. 4.4:	Zapojení zdroje 5V/1A	21
Obr. 4.5:	Optické oddělení s optočlenem IL300	22
Obr. 4.6:	Linearita optočlenu IL300.....	23
Obr. 4.7:	Vývojový diagram programu	25
Obr. 5.1:	Fotka regulovatelného zdroje.....	26
Obr. 5.2:	Fotka desky s relé a 5V zdrojem.....	27
Obr. 5.3:	Fotka desky s mikrokontrolérem	28
Obr. 5.4:	Fotka vnitřního uspořádání	29
Obr. 5.5:	Pohled na kompletní zdroj	29
Obr. 5.6:	Displej – stav 1.....	30
Obr. 5.7:	Displej – stav 2.....	30

Obr. 5.8:	Displej – stav 3.....	30
Obr. 5.9:	Displej – stav 4.....	31
Obr. 5.10:	Displej – stav 5.....	31
Obr. 6.1:	Graf účinnosti zdroje 1.....	32
Obr. 6.2:	Graf účinnosti zdroje 2.....	32
Obr. 6.3:	Zatěžovací charakteristika zdroje 1	34
Obr. 6.4:	Zatěžovací charakteristika zdroje 2	34
Obr. 6.5:	Zvlnění pro $U_{výst} = 30V$, $I_{výst} = 3A$	36
Obr. 6.6:	Zatěžovací charakteristika 5V zdroje.....	37
Obr. 6.7:	Účinnost 5V zdroje	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1.1:	Typy a vlastnosti usměrňovačů (pro kmitočet 50Hz).	3
Tab. 6.1:	Tabulka výstupního zvlnění pro oba zdroje.....	35

ÚVOD

Cílem této práce je kompletní návrh a realizace napět'ového laboratorního zdroje. Zdroj má dva samostatné regulovatelné výstupy, které se dají regulovat v rozsahu od 0 do 30V s nastavitelným proudovým omezením do 3A.

Práce je rozdělena na několik částí. V první z nich se zaměřuje na rozdělení stejnosměrných zdrojů, kde jsou zejména detailně popsány základní zapojení spínaných zdrojů. Po této části následuje krátká kapitola, která se věnuje mikrokontroléru ATmega16 a jeho používaným periferiím.

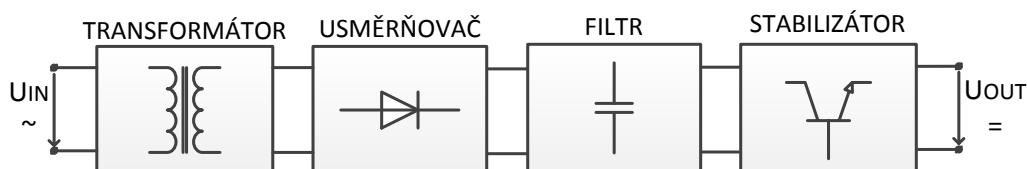
V další části je navrženo kompletní zapojení zdroje spolu s dalšími obvody, které slouží pro jeho obsluhu a měření. V této kapitole je také rozebráno optické oddělení zdrojů od měřicí jednotky.

Následující kapitola je věnována realizaci jednotlivých částí zdroje a samotné konstrukci.

V poslední kapitole jsou zdroje detailně proměřeny a z naměřených hodnot jsou sestaveny grafy a vypočítány jednotlivé parametry zdroje.

1 LINEÁRNÍ NAPÁJECÍ ZDROJE

V této kapitole bude představena základní struktura lineárního zdroje. Lineární zdroje se skládají ze čtyř základních prvků a to transformátoru, usměrňovače, filtru a stabilizátoru. Každá z těchto částí bude v následujícím textu popsána. [2]



Obr. 1.1: Blokové schéma lineárního zdroje.

1.1 Transformátor

Transformátor u lineárního zdroje má za úkol snížit, nebo zvýšit vstupní střídavé napětí. Dalším jeho úkolem je galvanické oddělení výstupu od vstupu, což je vhodné zejména pokud je vstupní napětí získáváno ze sítě.

Primární vinutí transformátoru slouží k převodu elektrické energie na magnetickou. Proud, který protéká primárním vinutím, vytváří v jádru transformátoru magnetický tok Φ , tento magnetický tok pak vybudí napětí na sekundárním vinutí transformátoru. Výstupní napětí je také střídavé a má stejnou fázi jako vstupní napětí, pouze jeho amplituda může být jiná. Vztah pro převod transformátoru vychází z indukčního zákona, a po dosazení veličin pro primární a sekundární vinutí je získána rovnici ideálního transformátoru

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1.1)$$

kde p je převod transformátoru, U_1 je napětí na primárním vinutí, U_2 je napětí na sekundárním vinutí, N_1 je počet závitů primární cívky a N_2 počet závitů sekundární cívky. Pokud $p > 1$ jde o transformátor, který napětí snižuje, pokud $p < 1$ jde o transformátor napětí zvyšující. Výstupní napětí U_2 musí být voleno tak, aby jeho maximální hodnota U_{2MAX} , měla o něco vyšší hodnotu, než požadovaná hodnota výstupního napětí U_{OUT} . To proto, že musí být počítáno s úbytky napětí, které vzniknou na usměrňovači, filtru a stabilizátoru.

Transformátor pro lineární zdroj musí být správně dimenzovaný pro požadovaný výkon zdroje, z toho důvodu je potřeba vhodně volit průřezy vodičů a rozměry samotného jádra. [2]

1.2 Usměrňovač

Funkcí usměrňovače je převedení střídavého napětí na stejnosměrné. Typ usměrňovače je volen podle požadavků na výstupní napětí, proud a zvlnění. Při návrhu zdroje musí být vždy počítáno s úbytky napětí, které vznikají na usměrňovacích diodách.[2]

Tab. 1.1: Typy a vlastnosti usměrňovačů (pro kmitočet 50Hz).

typ usměrňovače	napětí	proud	zvlnění
jednocestný	vysoké	malý	velké
dvoucestný	nízké	velký	malé
můstkový	střední	velký	malé
zdvojovač	Vysoké		velké
násobič	velmi vysoké	velmi malý	velké

1.3 Filtr

U lineárních zdrojů se ve většině případů jako filtr používá filtrační kondenzátor. Úkolem filtračního kondenzátoru je akumulace energie v době, kdy je napětí přiváděné na filtr nižší než požadované napětí na výstupu filtru. Hlavním parametrem při jeho volbě je kapacita. Pokud se kondenzátor nabíjí, průběh napětí na něm odpovídá části sinusovky, při vybíjení je průběh dán exponenciálou. Vzhledem k malé části exponenciály, může být průběh považován za lineární. Po zavedení tohoto zjednodušení, se filtrační kondenzátor dá vypočítat podle vzorce

$$C = \frac{k \cdot I}{U_{ST}}, \quad (1.2)$$

Kde C [μF] je výsledná kapacita kondenzátoru, I [A] odebíraný proud a U_{ST} [V] je efektivní hodnota střídavé složky napětí na filtračním kondenzátoru. Pro jednocestné usměrnění je $k=600$, pro dvoucestné usměrnění $k=300$. Chyba způsobená zjednodušením výpočtu je nižší než výrobní tolerance elektrolytických kondenzátorů.[2]

1.4 Stabilizátor

Lineárních stabilizátorů je celá řada. Jsou to obvody, které umožňují stabilizovat výstupní napětí, případně proud. Stabilizátory napětí stabilizují většinou při změně výstupního proudu, vstupního napětí nebo teploty okolí.[2]

1.4.1 Parametrické stabilizátory

Jejich funkce je založena na rozdílu mezi stejnosměrným a dynamickým odporem

stabilizačního prvku v jeho pracovním bodě. Pokud je v pracovním bodě dynamický odpor mnohem menší než odpor stejnosměrný, jde o parametrický stabilizátor napětí (dioda v propustném směru, Zenerova dioda). Pokud je tomu naopak a stejnosměrný odpor je mnohem vyšší, než dynamický, jde o parametrický stabilizátor proudu (výstupní charakteristika bipolárního tranzistoru v aktivní oblasti). Nejjednodušším zapojením je stabilizátor s diodou nebo stabilizátor se Zenerovou diodou.[2]

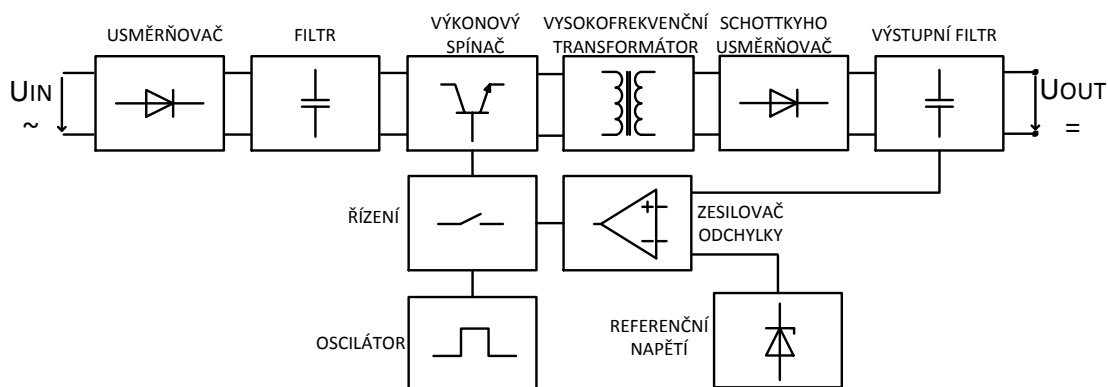
1.4.2 Lineární stabilizátory

Základem lineárního stabilizátoru je referenční napětí U_{REF} a zesilovač regulační odchylky, který má vysoké zesílení. Výstupní napětí U_{OUT} může být shodné s velikostí referenčního, nebo jeho násobkem či podílem. Stabilizátor se snaží udržovat na výstupu konstantní hodnotu U_{OUT} , při změnách U_{OUT} se snaží hodnotu stabilizovat na hodnotu původní. Ideální stabilizátor se tedy chová jako ideální zdroj napětí s nulovým vnitřním odporem.

Pro lineární stabilizátor je nejdůležitější částí napěťová reference, která by měla být ideálně teplotně nezávislá, nebo by se měla teplotně kompenzovat. Jako nejjednodušší napěťová reference se používá Zenerova dioda. [2]

2 SPÍNANÉ NAPÁJECÍ ZDROJE

Spínané zdroje pracují, na rozdíl od lineárních, nespojitě. Napětí na výstupu je získáno pomocí spínání, od toho také pochází název pro spínané zdroje. Základní blokové schéma spínaného zdroje je zobrazeno na Obr 2.1. Toto schéma ale neplatí pro všechny typy spínaných zdrojů, protože u některých variant některé bloky nejsou vůbec, nebo naopak mají další bloky navíc.



Obr. 2.1: Blokové schéma spínaného zdroje.

Základní podmínkou u spínaných zdrojů je, že pracují se stejnosměrným napětím, které lze získat zdrojem již stejnosměrného napětí, nebo usměrněním střídavého napětí. Pokud je použit zdroj stejnosměrného napětí, ve schématu nám odpadá vstupní usměrňovač a také jsou kladeny menší nároky na vstupní filtr. V druhém případě je potřeba usměrnit střídavé napětí, které bývá většinou síťové. Toto napětí může být rovnou usměrněno, nebo může být před usměrňovačem zařazen ještě transformátor. Po usměrnění je dále potřeba toto napětí vyhladit, proto je za usměrňovačem zařazen vstupní filtr. Pro správnou funkci je potřeba, aby bylo napětí dostatečně vyhlazeno, proto je potřeba volit vhodný filtrační člen (C, RC nebo LC), který bude mít na daném kmitočtu nízké ztráty, aby nepoklesla celková účinnost zdroje.

Dále je potřeba vstupní stejnosměrné napětí převést na střídavý tvar, aby mohlo být následně transformováno. K tomuto účelu je použit vysokofrekvenční spínací tranzistor. Frekvence spínání se pohybuje od 20kHz až do 10MHz. Toto střídavé napětí je pak transformováno cívkou nebo vysokofrekvenčním transformátorem. Po transformaci je potřeba napětí usměrnit a vyfiltrovat. Pro usměrnění musí být použity diody s dostatečně malou spínací a zejména vypínací dobou. Na výstupní filtr už nejsou kladeny takové požadavky, díky vysokému kmitočtu.

U všech spínaných zdrojů je zavedena zpětná vazba, kterou jsou řízeny spínací tranzistory.[1]

2.1 Rozdělení spínaných zdrojů

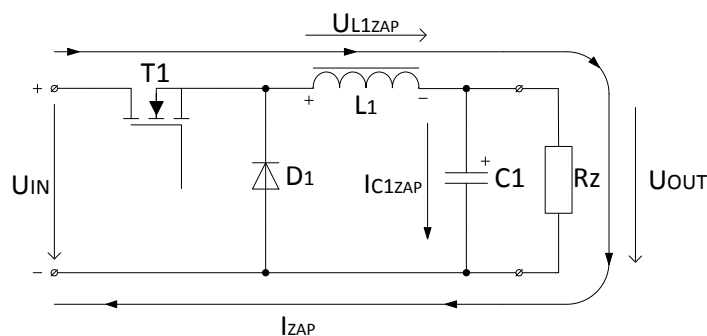
Spínané zdroje se dělí podle principu do několika skupin. První skupinou jsou spínané zdroje se spínanými kondenzátory. U těchto zdrojů nejsou použity žádné cívky ani transformátory a z toho důvodu jsou levné a poměrně jednoduché. Další skupinou jsou zdroje se spínanými indukčnostmi. Ty se dále dají rozdělit, podle toho jestli je k transformaci napětí použita cívka, nebo transformátor. V této kapitole budou probrány jen typy měničů, které jsou součástí spínaného zdroje, vstupní část a zpětná vazba je vynechána.[1]

2.2 Spínané zdroje bez transformátoru

U těchto zdrojů je k transformaci energie použita cívka, vstup a výstup jsou galvanicky spojeny, pokud není galvanické oddělení realizováno již na vstupu.[1]

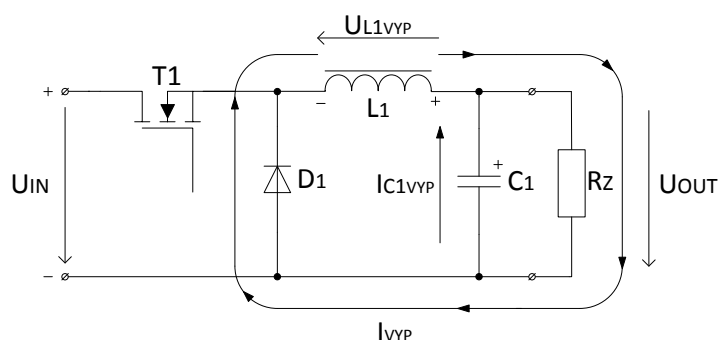
2.2.1 Snižující měnič (buck)

Jedná se o jeden ze základních principů, kdy měnič napětí snižuje. Pokud je tranzistor T_1 sepnut, proud do zátěže teče přes cívku L_1 a zároveň nabíjí kondenzátor C_1 . Dioda D_1 je polarizována v závěrném směru, a proto jí neprotéká žádný proud. Cívka L_1 se chová jako spotřebič a akumuluje se do ní energie.



Obr. 2.2: Snižující měnič – tranzistor T_1 sepnut.

Při rozepnutí tranzistoru T_1 je odpojen zdroj napětí U_{IN} a cívka L_1 se začne chovat jako zdroj, obrátí se na ní polarita napětí, ale proud zachová svůj směr. Tento proud I_{ZAP} se poté uzavírá přes diodu D_1 a je dodáván do zátěže. K tomuto proudu se ještě přidává proud z kondenzátoru C_1 , na kterém zůstává stejná polarita napětí, ale proud svou polaritu otáčí. Střídou je regulována hodnota výstupního napětí a ta může být v rozsahu od 0% až do 100%. Maximální hodnotou výstupního napětí U_{OUT} je hodnota vstupního napětí U_{IN} .



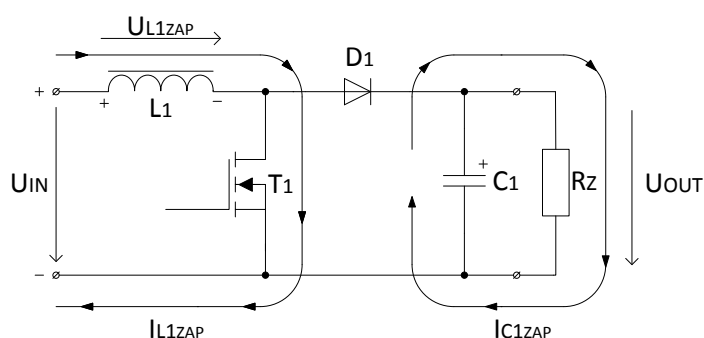
Obr. 2.3: Snížující měnič – tranzistor T_1 rozepnut.

Nevýhodou tohoto zapojení je, že pokud dojde ke zkratu na výstupu, může dojít ke zničení tranzistoru T_1 . Výhodou je jednoduchost zapojení a nízká cena.[1]

2.2.2 Zvyšující měnič (boost)

Dalším základním zapojením je zvyšující měnič, pomocí kterého je zvyšováno vstupní napětí.

V okamžiku, kdy je spínač T_1 sepnut, proud se uzavírá pouze přes cívku L_1 a energie je tak akumulována do magnetického pole cívky.

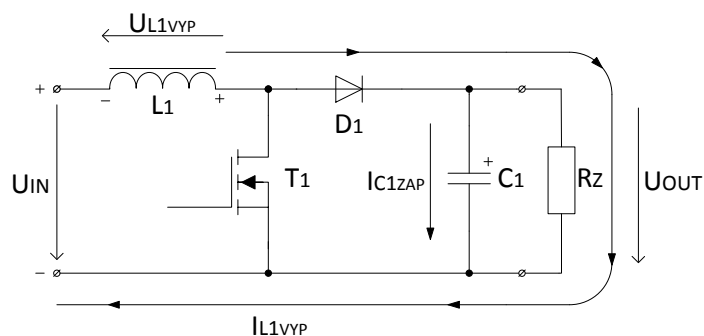


Obr. 2.4: Zvyšující měnič – tranzistor T_1 sepnut.

Pokud je spínač T_1 rozepnut, na cívce se obrátí polarita napětí a začne se chovat jako zdroj. Zdroj napětí U_{IN} je nyní sériově spojen se zdrojem, který je tvořen cívku L_1 a společně dodávají proud do zátěže přes diodu D_1 , současně také nabíjí kondenzátor C_1 . Dioda D_1 slouží k tomu, aby se kondenzátor nevybíjel přes sepnutý tranzistor T_1 . Výstupní napětí U_{OUT} je vždy vyšší, než vstupní napětí U_{IN} a je dáno vztahem

$$U_{OUT} = U_{IN} + U_{L1ZAP} - U_D - U_{CES}, \quad (2.1)$$

Kde U_D je napětí na diodě v propustném směru a U_{CES} je napětí na sepnutém tranzistoru T_1 .



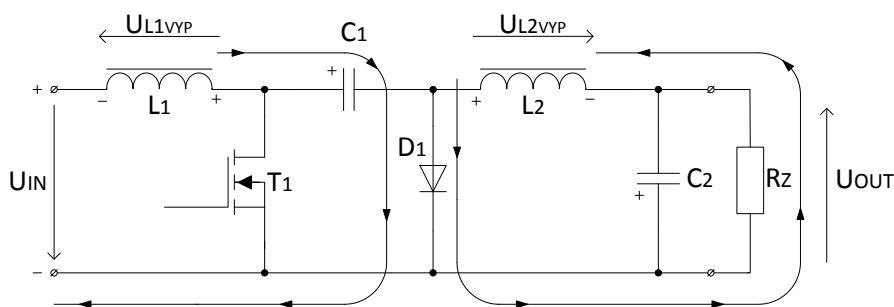
Obr. 2.5: Zvyšující měnič – tranzistor T_1 rozeprt.

Nevýhodou zapojení je vyšší zvlnění výstupního napětí a malý výkon. Výhodou je opět jednoduchost a nízká cena, ale také zvýšení napětí bez nutnosti použít transformátor.[1]

2.2.3 Zvyšující a snižující měnič (cuk)

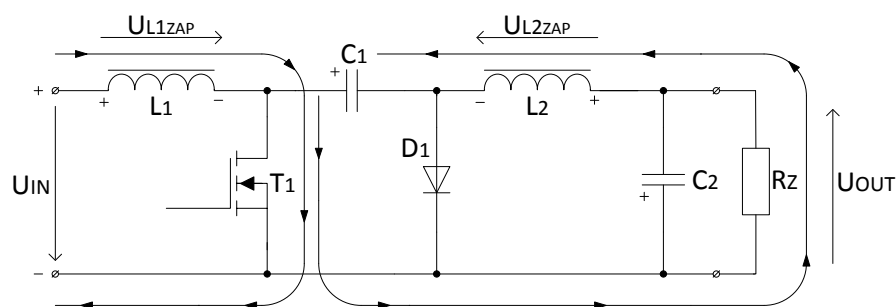
Následující typ měniče umí napětí jak zvyšovat, tak snižovat. Respektive výstupní napětí udržuje na konstantní hodnotě, při změně vstupního. Proto pracuje někdy jako zvyšující a někdy jako snižující.

V prvním stavu je tranzistor T_1 vypnut a proud teče ze zdroje U_{IN} v sérii s cívkou L_1 , která se chová jako zdroj, protože je v ní uložena energie z minulého cyklu. Proud teče přes kondenzátor C_1 a uzavírá se přes diodu D_1 . Kondenzátor C_1 se nabíjí a elektromagnetické pole cívky L_1 klesá. Musí být ale vhodně zvolena délka tohoto intervalu, protože kondenzátor C_1 se nabíjí na napětí $U_{IN} + U_{L1VYP}$ a po nabití by se opět vybíjel do zdroje U_{IN} .



Obr. 2.6: Zvyšující a snižující měnič – tranzistor T_1 rozeprt.

V dalším stavu dojde k sepnutí tranzistoru T_1 , cívkou L_1 začne protékat proud, který se bude uzavírat přes tranzistor T_1 do zdroje U_{IN} a na cívce L_1 se začne zvyšovat indukované napětí (cívka se chová jako spotřebič). Také se začne vybíjet kondenzátor C_1 přes tranzistor T_1 , zátěž R_Z paralelně s kondenzátorem C_2 a cívku L_2 . Tímto proudem je nabíjen kondenzátor C_2 a také se začne indukovat napětí v cívce L_2 .



Obr. 2.7: Zvyšující a snižující měnič – tranzistor T_1 sepnut.

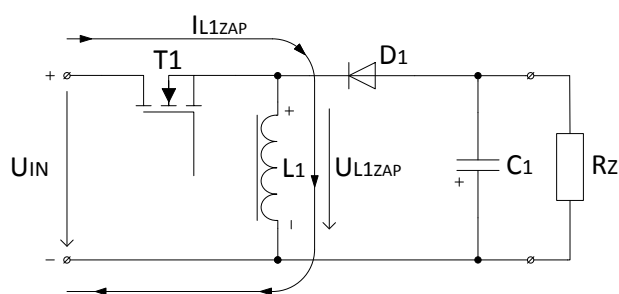
Ve třetím kroku je opět rozepnut tranzistor T_1 a dochází k opakování činnosti z prvního kroku. Navíc se na cívce L_2 otočí polarita napětí a začne se chovat jako zdroj a dodávat proud přes diodu D_1 do zátěže R_Z a společně s tím nabíjet paralelně zapojený kondenzátor C_2 .

Tento typ obvodu se používá v případech, pokud je jako zdroj napětí použit akumulátor, u kterého s časem klesá velikost napájecího napětí. Další výhodou je, že obvod otáčí polaritu výstupního napětí U_{OUT} , oproti vstupnímu napětí U_{IN} , čehož lze využít např. pro symetrické napájení. Nevýhodou je použití většího množství součástek.[1]

2.2.4 Invertující (buck-boost)

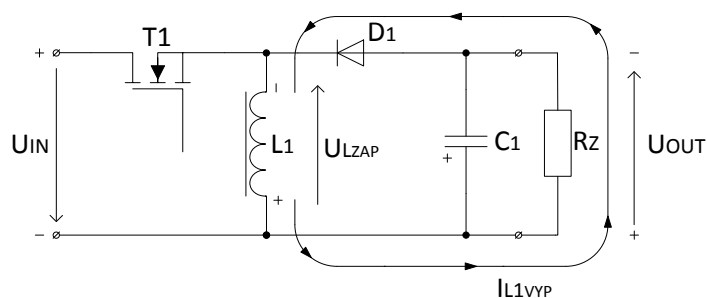
V předcházejícím zapojení je otáčena polarita výstupního napětí, vzhledem ke vstupnímu, to ale není hlavní podstatou cuk měniče. Pokud je potřeba otáčet polaritu napětí používá se k tomu invertující měnič, který je jednodušší než měnič cuk.

V prvním stavu je tranzistor T_1 sepnut a v cívce L_1 se indukuje napětí (chová se jako spotřebič). Do zátěže proud neteče, protože mu v tom brání závěrně polarizovaná dioda D_1 .



Obr. 2.8: Invertující měnič – tranzistor T_1 sepnut.

V druhém stavu je tranzistor T_1 rozepnut, na cívce L_1 se otáčí polarita napětí a tak se uzavírá smyčka přes zátěž paralelně s kondenzátorem C_1 a poté přes diodu D_1 , zpět k druhému pólu cívky. V tomto stavu se nabíjí kondenzátor C_1 a výstupní napětí tak má opačnou polaritu oproti vstupnímu.[1]



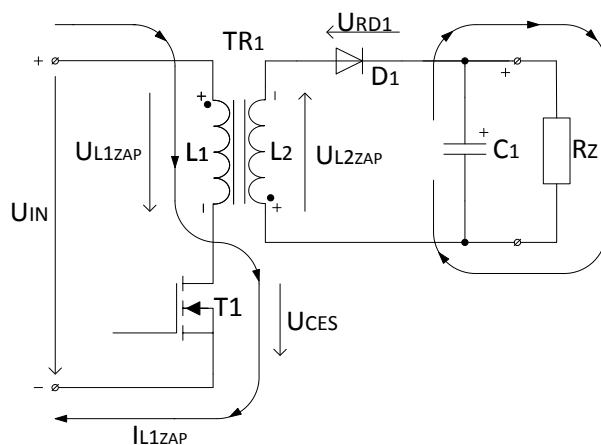
Obr. 2.9: Invertující měnič – tranzistor T_1 rozepnut.

2.3 Spínané zdroje s transformátory

U spínaných zdrojů s transformátory je použit k akumulaci energie transformátor, který současně zaručuje galvanické oddělení. Používají se zejména v zapojeních, kde je potřeba vyšší výkon. Další výhodou těchto zapojení je možnost vytvořit více výstupních napětí, pomocí více sekundárních vinutí transformátoru. Nevýhodou je stejnosměrné sycení jádra transformátoru, které neumožňuje využívat celou plochu hysterezní smyčky a z toho důvodu musí mít transformátor větší rozměry, hmotnost a tím pádem i cenu.[1]

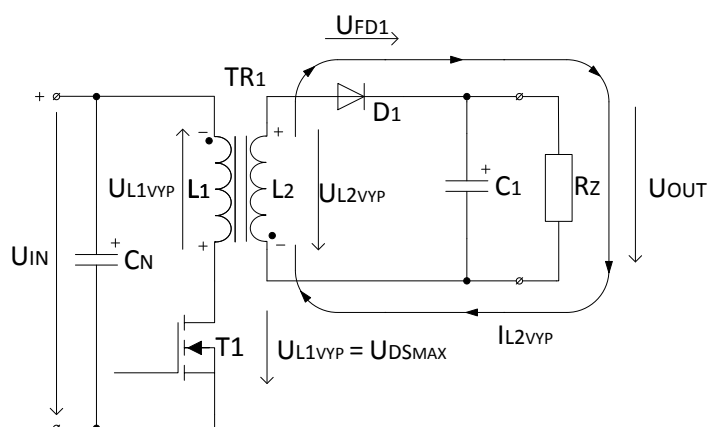
2.3.1 Akumulující měnič (flyback)

Tento typ měniče je nejjednodušším zapojením měniče s transformátorem. V prvním stavu je tranzistor T_1 sepnut a proud protéká ze zdroje U_{IN} do primárního vinutí L_1 transformátoru TR_1 . Na primárním vinutí transformátoru je konstantní napětí tvořené U_{IN} snížené o úbytek napětí na spínacím tranzistoru T_1 . Tímto obvodem protéká proud, který lineárně narůstá a změna tohoto proudu vyvolá lineární změnu magnetického toku. Magnetický tok pak indukuje napětí na sekundárním vinutí L_2 . Transformátor má opačně polarizované sekundární vinutí, oproti vstupnímu a díky diodě D_1 , která je polarizována v závěrném směru, neprotéká výstupním obvodem žádný proud.



Obr. 2.10: Akumulující měnič – tranzistor T_1 sepnut.

V druhém stavu je tranzistor T_1 rozeprt a napětí na obou cívkách transformátoru se otáčí. V sekundárním obvodu je teď cívka L_2 s opačnou polaritou a dioda je nyní polarizována v propustném směru, proto obvodem protéká proud přes diodu do zátěže R_Z paralelně zapojenou s kondenzátorem C_1 , který se nabíjí. Na primárním vinutí L_1 vzniká napěťová špička, protože rozeprtne tranzistor T_1 a cívka L_1 se snaží udržet proud, který obvodem procházel před rozeprtím. Díky vysoké impedanci tranzistoru v rozeprtém stavu se vysoké napětí objeví také mezi kolektorem a emitorem. Tato špička je omezena proudem sekundárního vinutí, protože energie akumulovaná v magnetickém poli cívky L_1 je odebírána cívkou L_2 , dále je omezena parazitní kapacitou primárního vinutí.



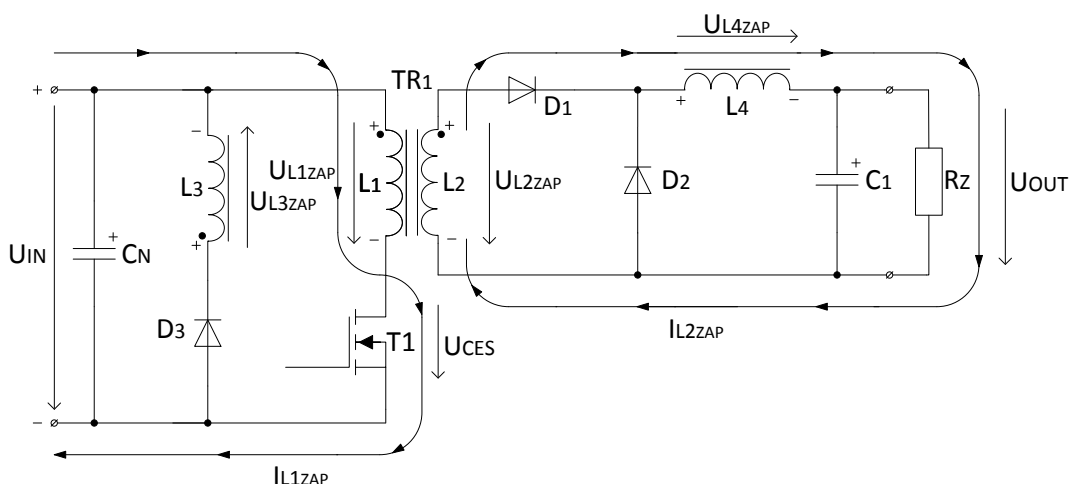
Obr. 2.11: Akumulující měnič – tranzistor T_1 rozeprt.

I tak je nutné tranzistor T_1 proti těmto špičkám chránit, aby nedošlo k jeho zničení. Jedná se o nejjednodušší zapojení transformátorového měniče. Používá se, pokud je potřeba galvanického oddělení obvodů. Je zde také možnost přidání dalších sekundárních vinutí, tak je možné získat například zdroj symetrického napájení. Výstupní výkon je omezen objemem magnetického materiálu, a proto se tento typ měniče většinou používá do výkonu 150W.[1]

2.3.2 Propustný (forward)

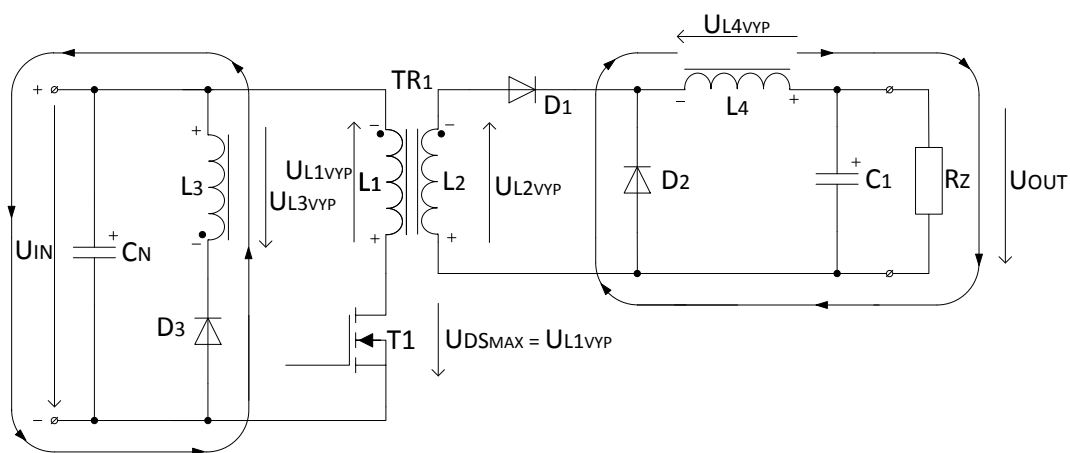
Na opačném principu transformátoru pracuje měnič v propustném režimu. Na rozdíl od akumulujícího měniče, je energie z transformátoru odebírána v okamžiku, kdy je tranzistor T_1 sepnut, z toho důvodu může být také použit menší transformátor. Nevýhodou je, že po vypnutí tranzistoru T_1 není z transformátoru odebírána žádná energie. A kvůli zbytkové energii, která zůstane v transformátoru naakumulována, by byl ohrožen tranzistor T_1 nárůstem napětí na L_1 . Z toho důvodu je do obvodu zařazeno rekuperační vinutí L_3 .

Při sepnutí tranzistoru T_1 proud teče ze zdroje U_{IN} přes cívku L_1 transformátoru T_1 a zpět do zdroje. Na výstupní cívkě L_2 je transformováno napětí se stejnou polaritou jako na vstupní. Proud tak teče přes diodu D_1 , cívku L_4 , která je zde jako spotřebič, a poté do zátěže R_Z a současně nabíjí kondenzátor C_1 . Rekuperačním vedením neteče žádný proud, díky diodě D_3 .



Obr. 2.12: Propustný měnič – tranzistor T_1 sepnut.

Při rozepnutí tranzistoru se změní polarita na všech cívkách. Cívka L_4 se chová jako zdroj a dodává proud do zátěže R_Z , spolu s kondenzátorem C_1 a obvod se uzavírá přes diodu D_2 . Z cívky L_2 již proud protékat nemůže, díky závěrně polarizované diodě D_1 , která je tak namáhána plným inverzním napětím U_{L2VYP} . Z toho důvodu roste napětí na cívkce L_1 a ohrožuje tak tranzistor T_1 , proto je potřeba ho chránit. Řešením je použití Zenerovy diody nebo RC členu, ale tím je snížena účinnost měniče. Nejvhodnějším řešením je použití rekuperačního vinutí transformátoru L_3 , pomocí kterého je zatížena cívka L_2 a sníženo tak napětí U_{L2VYP} . Indukované napětí U_{L3ZAP} by mělo mít větší hodnotu než U_{IN} , aby energii vracelo v podobě nabíjení kondenzátoru C_N a tak nesnižovalo účinnost měniče. Počet závitů cívky L_3 bývá obvykle volen stejný jako počet závitů cívky L_1 a tak aby napětí U_{L3VYP} bylo větší než U_{IN} .

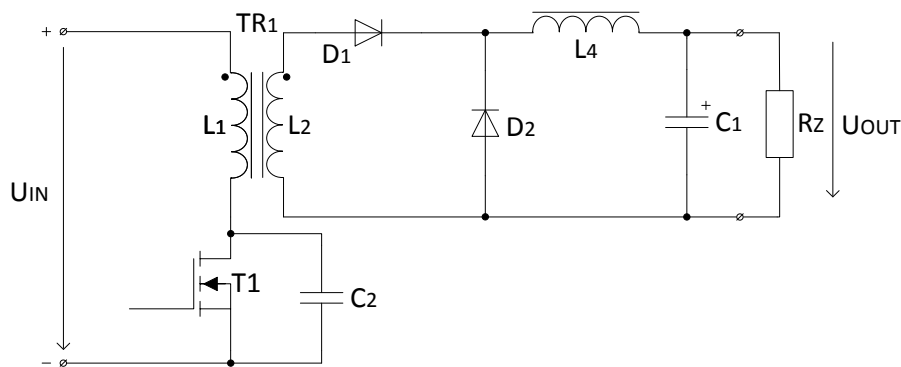


Obr. 2.13: Propustný měnič – tranzistor T_1 rozepnut.

Propustný měnič je obdobou snižujícího měniče, ale díky transformátoru se dá použít jako snižující i jako zvyšující měnič, obvykle se používá jako snižující. [1]

2.3.3 Rezonanční měnič

Zapojení propustného měniče může být upraveno připojením kondenzátoru C_2 paralelně k tranzistoru T_1 . Kapacita tohoto kondenzátoru se musí volit s ohledem na parazitní kapacitu primárního vinutí transformátoru a parazitní kapacitu tranzistoru T_1 , tak aby spolu s indukčností L_1 vytvořili rezonanční obvod.



Obr. 2.14: Rezonanční měnič.

Rezonanční frekvence tohoto obvodu musí být nastavena tak aby při spínání tranzistoru T_1 měly obvodové veličiny lineární průběhy. Toto zapojení se volí pro zvýšení účinnosti a pro snížení vyzařování rušení do okolí. Návrh tohoto obvodu je ale poměrně komplikovaný, hlavně volba kondenzátoru C_2 , jehož přesná kapacita se volí až při hotovém a zapájeném plošném spoji. Rezonanční měniče se používají většinou do výkonu 40W.[1]

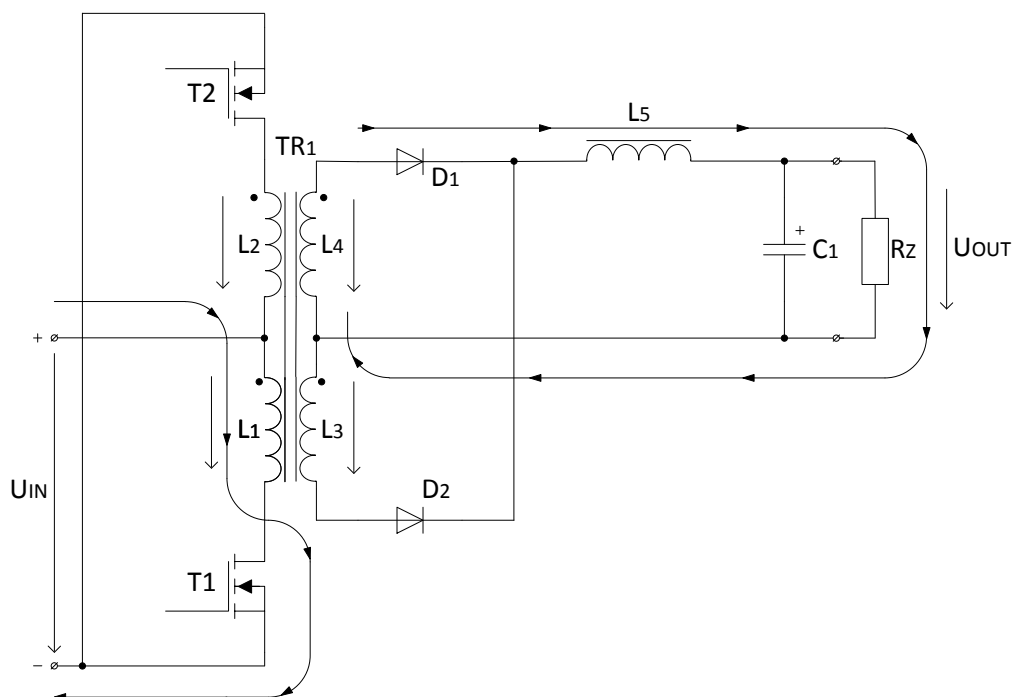
2.4 Dvojčinné měniče s transformátorem

Hlavní nevýhodou jednočinných zapojení je stejnosměrné sycení magnetického jádra transformátoru, tím není využívána celá plocha jejich hysterezní smyčky. Proto je výhodné přidat další vinutí na sekundární stranu a vytvořit tak dvoucestný usměrňovač a na primární přidat také další vinutí a tím vytvořit střídavé buzení. Dvojčinné měniče se používají pro vysoké výstupní výkony.[1]

2.4.1 Měnič v zapojení push-pull

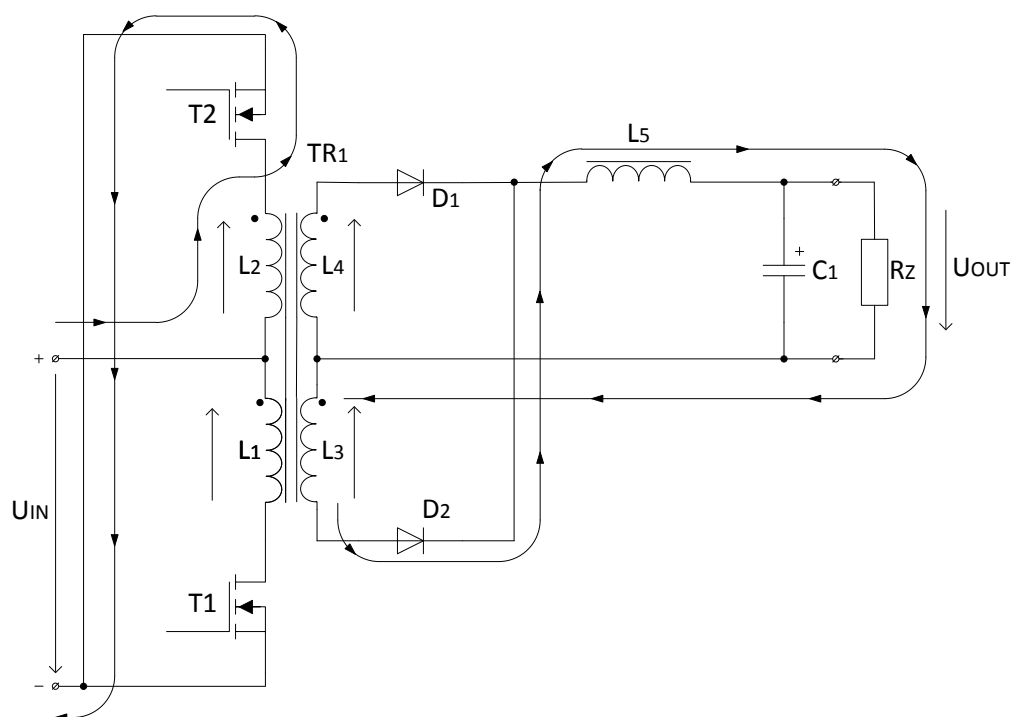
Základním zapojením dvojčinného měniče je kombinace dvou základních zapojení spojených jedním transformátorem. Protože jde o symetrické zapojení, mají cívky L_1 a L_2 stejný počet závitů. Cívky L_3 a L_4 mají také stejný počet závitů.

V první fázi je sepnut tranzistor T_1 a rozepnut tranzistor T_2 . Proud proto teče přes cívku L_1 přes tranzistor T_1 zpět do zdroje. Tranzistor T_2 je namáhán napětím, daným součtem napětí U_{IN} a napětím naindukovaným na cívce L_1 . V tomto intervalu je pouze na jedné z cívek napětí, které umožňuje průtok proudu a to napětí na cívce L_4 . Dioda D_2 je namáhána závěrným napětím, daným součtem obou naindukovaných napětí na cívkách L_3 a L_4 . [1]



Obr. 2.15: Měnič v zapojení push-pull – T_1 sepnut, T_2 rozepnut.

V druhé fázi se vše zrcadlově změní. Tranzistor T_1 se vypíná a po určité době (dead time) tranzistor T_2 spíná. Jestliže jsou všechny vinuty vinuty jedním směrem, nedochází tak k stejnosměrnému sycení transformátoru a je využívána celá plocha hysterezní smyčky. Z toho důvodu stačí poloviční objem jádra oproti jednočinným zapojením.



Obr. 2.16: Měnič v zapojení push-pull – T_1 rozepnut, T_2 sepnut.

Velkou výhodou tohoto zapojení je dvojnásobný kmitočet zvlnění výstupního napětí. Díky tomu může být použita čtyřikrát menší indukčnost cívky L_5 výstupního filtru. Celkově toto zapojení umožňuje snížení hmotnosti a velikosti oproti jednočinnému. Měníče typu push-pull se používají většinou do výkonu 150W. [1]

2.4.2 Měníč v zapojení polomost (half bridge)

Dvojčinných zapojení s můstkem je celá řada a dělí se podle uspořádání jednotlivých prvků v mostu. Nejčastějšími zapojeními jsou tzv. polomosty. Název polomost je odvozen z toho, že polovinu mostu tvoří dva spínací tranzistory a druhou polovinu dva kondenzátory.

Výhodou těchto zapojení je, že kondenzátory v mostu pokrývají část impulzního proudu, který by musel jinak dodávat zdroj stejnosměrného napětí. Tranzistory jsou spínány v protifázi se střídou maximálně 80% a je nutné dodržet podmínku, aby nebyly sepnuty oba tranzistory zároveň (dead time).

Měníče typu polomost se používají zejména pro výkony v rozsahu od 50W do 400W. [1]

2.4.3 Měníč v zapojení plný most (full bridge)

Zapojení plných mostů je velice podobné zapojením polomostu. Rozdíl je v tom, že kondenzátory jsou nahrazeny za spínací tranzistory.

V tomto zapojení jsou vždy sepnuty dva tranzistory zároveň a vstupní napětí je přímo přivedeno na primární vinutí cívky. Poté jsou tyto tranzistory rozepnuty a po krátkém mrtvém čase (dead time) jsou sepnuty druhé dva tranzistory. Proud ale prochází primárním vinutím opačným směrem a takto je využívána celá plocha hysterezní smyčky. Díky tomu se zapojení používá pro vysoké výkony, přesahující 500W. Nevýhodou je složitější buzení spínacích tranzistorů. [1]

2.5 Porovnání lineárních a spínaných zdrojů

Výhodou lineárních zdrojů je to, že jsou historicky starší, jsou jednoduché, mají nízký výstupní šum a nízkou hodnotu výstupního odporu. Nevýhodou je nízká účinnost a také velké rozměry a hmotnost. Naopak spínané zdroje dosahují vysoké účinnosti, mají malé rozměry a malou hmotnost. Nevýhodou je vysokofrekvenční rušení, které vzniká při spínání tranzistorů a vyšší šum, proto je nevhodné je používat např. pro audiotechniku. [5]

3 MIKROKONTROLÉR ATMEGA16

3.1 Popis mikrokontroléru

Mikrokontrolér ATmega16 obsahuje mikroprocesor, čtyři 8bitové vstupně/výstupní porty, 16kB paměť Flash, 1kB paměť SRAM, 512B paměť EEPROM, dva 8bitové a jeden 16bitový čítač/časovač, čtyři PWM kanály, analogový komparátor, osm 10bitových A/D převodníků a další periferie.

ATmega16 je 8bitový mikrokontrolér, který obsahuje instrukční sadu o 131 instrukcích i když obsahuje redukovanou instrukční sadu (RISC) a je optimalizován pro programovací jazyk C. [4]

3.2 Vstupně/výstupní obvody

U ATmegy16 jsou čtyři vstupně/výstupní porty. Jsou 8bitové, označené písmeny A, B, C a D, tedy celkově 32 vstupně výstupních pinů.

U každého portu jsou 3 registry, kterými je definována funkce daného portu, případně každého pinu zvlášť.

1. **DDRx** (Data Direction Register)
DDRx je směrový registr, pomocí kterého je definováno, které piny budou nastaveny jako vstupní a které jako výstupní. Pokud je bit nastaven na hodnotu 0, tak je pin definován jako vstupní, naopak pokud je nastaven na 1, je nastaven jako výstupní.
2. **PORTx** (Data Register)
Datový registr. Pokud je hodnota v registru DDRx definován jako vstupní (1), tak tímto registrem je nastavena hodnota na výstupu. Pokud je port DDRx nastaven jako vstupní (0), tak je aktivní úroveň aktivován pull-up rezistor, při nule jsou pull-up rezistory neaktivní.
3. **PINx** (Port Input Register)
Hodnota uložená v tomto registru udává aktuální stav na daném pinu. Hodnota z tohoto registru je použita, pokud je potřeba načítat logickou hodnotu pinu daného portu. [7]

3.3 Interní A/D převodník

Tento převodník umožňuje převod spojitého signálu na signál diskrétní. Zpracování signálu probíhá ve třech krocích:

1. **Vzorkování** – dochází k odebrání vzorků signálu v čase a to vždy po stejných časových intervalech

2. **Kvantování** – vzorek odebraný při vzorkování se zaokrouhlí na nejbližší hodnotu, která je dána kvantovací úrovní. Kvantovací úroveň A/D převodníku je dána hodnotou 2^n , kde n je počet bitů převodníku.
3. **Kódování** – při kódování dochází k převodu kvantovaných hodnot na číselné hodnoty. Tato operace probíhá většinou současně s kvantováním.

Převodník u ATmegy16 obsahuje 8 samostatných převodníků na portu A, které nejdou používat zároveň, ale multiplexují se. A/D převodník převádí vstupní napětí na 10 bitovou hodnotu, dle vztahu

$$ADC = \frac{U_{VST} \cdot 1023}{U_{REF}}, \quad (3.1)$$

kde ADC je výstupní hodnota převodu, U_{VST} je vstupní hodnota napětí a U_{REF} je referenční napětí A/D převodníku.

Hodnota U_{REF} je napětí přivedené na pin AVCC, další možností je použití interní napěťovou referenci 2,56V. [7]

4 NÁVRH A POPIS ZDROJE

4.1 Volba zdroje

Vzhledem k požadavku navrhnout regulovatelný zdroj, který bude dosahovat výkonu až 90W (při výstupním napětí 30V a proudu 3A), není vhodné zvolit jednoduchý lineární zdroj. Největším problémem by byly vysoké požadavky na stabilizátor, na kterém by vznikaly velké výkonové ztráty (nejvíce ve stavu, kdy by bylo nastaveno nízké výstupní napětí a vysoký výstupní proud). Tyto ztráty by byly reprezentovány zejména teplem, které by muselo být odváděno chladičem o velkých rozměrech. Řešením by mohlo být použít vstupní transformátor s více výstupy, které by se přepínaly, podle nastaveného výstupního napětí a úbytek na stabilizátoru by se tak snížil. Toto řešení je ale poměrně komplikované, náročné na realizaci a také dražší.

Z toho vyplývá, že je výhodné použít spínaný zdroj a vzhledem k tomu, že má být zdroj regulovatelný je vhodné použít snižující, akumulující nebo propustný měnič. Protože maximální výkon zdroje je 90W, je vhodným řešením snižující měnič, bez nutnosti použití transformátoru v samotném měniči.

U základního zapojení snižujícího měniče by ale docházelo ke značnému zvlnění, zejména při větších odběrech proudu. Z toho důvodu bylo rozhodnuto, že spínaný měnič bude použit jako předregulátor, za který bude zařazen lineární zdroj, tím se zvlnění sníží. V tomto zapojení bude zdroj dosahovat i dobré účinnosti, protože spínaný předregulátor má vysokou účinnost a na lineárním zdroji bude vždy konstantní malý úbytek napětí. Díky vysoké účinnosti nejsou kladeny vysoké nároky na chlazení a také na rozměry.

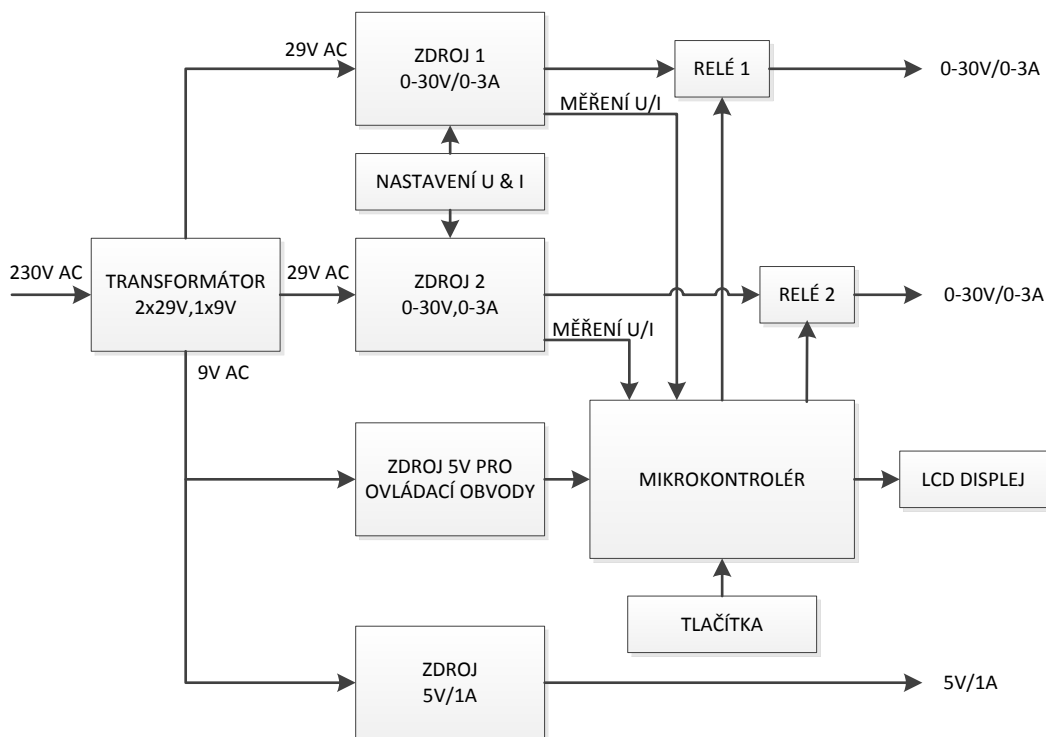
4.2 Popis kompletního zdroje

Na vstupu zdroje je střídavé napětí 230V získávané ze sítě, které je přivedeno na transformátor s třemi sekundárními vinutími (2x29V, 1x9V). Výstupy 29V jsou použity pro dva samostatné regulovatelné zdroje 0-30V a výstup 9V je použit pro napájení ovládacích obvodů a pro zdroj 5V.

Střídavé napětí 29V je přivedeno ke zdroji, kde je převedeno na napětí stejnosměrné, které se dá regulovat v rozsahu 0-30V s regulovatelným omezením proudu 0-3A. Výstupní napětí a maximální výstupní proud jsou nastavovány pomocí potenciometrů. Toto napětí je pak přes relé, které je ovládáno mikrokontrolérem, přivedeno na výstup zařízení. Takto jsou realizovány oba dva regulovatelné zdroje.

Střídavé napětí 9V je přivedeno ke zdroji 5V s maximálním proudem 1A a také k dalšímu samostatnému zdroji 5V, který je určen pro ovládací obvody, kterými jsou mikrokontrolér, LCD displej a relé. Zdroje 5V jsou použity dva proto, aby byl stále aktivní zdroj, který slouží k napájení ovládacích obvodů. A to i v případě že druhý zdroj bude zkratován nebo zatížen tak, že výrazně poklesne jeho napětí. K mikrokontroléru jsou připojena tlačítka, kterými jsou zdroje spouštěny a pomocí kterých se také zdroje

ovládají. S tím souvisí i ovládání relé mikrokontrolérem. Dále jsou mikrokontrolérem měřeny hodnoty napětí a proudu obou zdrojů, které jsou následně zobrazovány na LCD displeji.

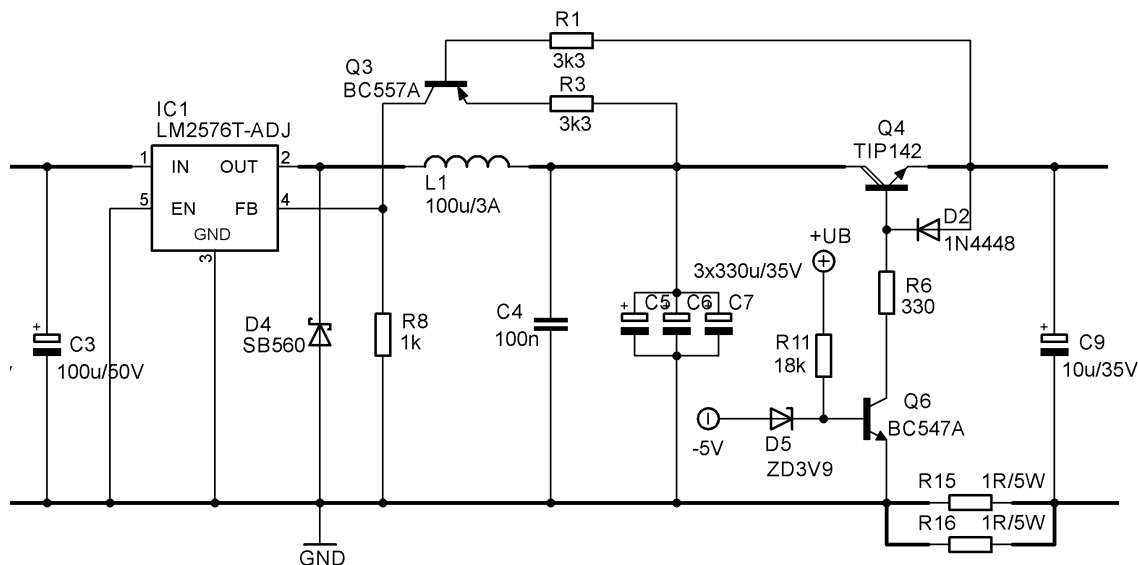


Obr. 4.1: Blokové schéma kompletního zdroje.

4.3 Popis regulovatelného zdroje 0-30V/0-3A

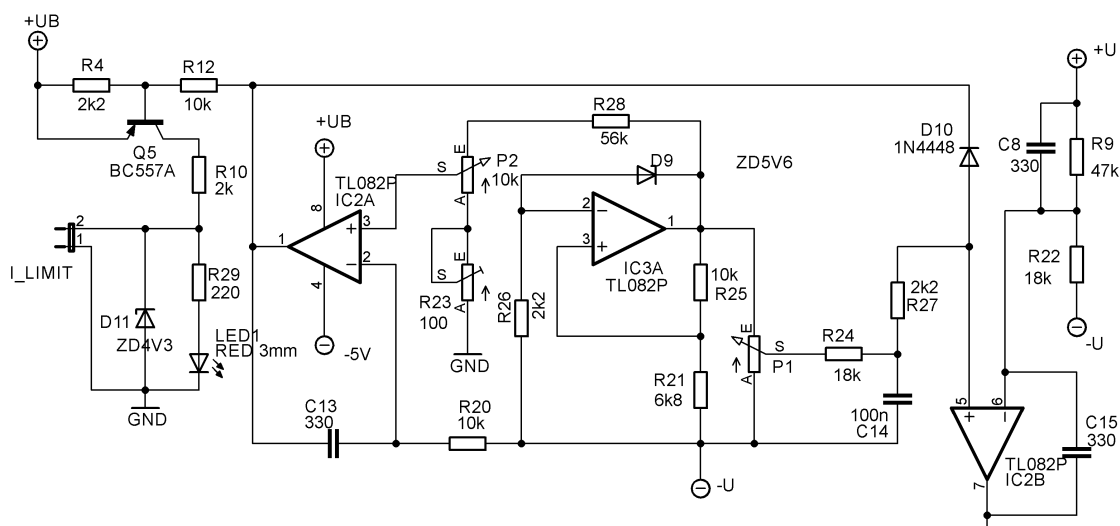
Schéma zapojení zdroje je v příloze A1. Na vstup zdroje je přivedeno střídavé napětí 29V z transformátoru. Toto napětí je usměrněno diodovým dvoucestným usměrňovačem a následně vyhlazeno kondenzátorem C2 na hodnotu asi 40V. Z tohoto napětí je pomocí jednoduchého parametrického stabilizátoru vytvořeno napájecí napětí pro operační zesilovače o hodnotě asi 33V. Pro získání nulového napětí na výstupu a také pro napájení operačních zesilovačů je ještě vytvořen zdroj napětí o hodnotě -5V.

Vyhlazené napětí je přivedeno na předregulátor LM2576, který je využíván jako snižující měnič. Napětí z LM2576 je dále přivedeno na lineární stabilizátor s tranzistorem Q4. Napětí za LM2576 a za stabilizátorem je snímáno a pomocí tranzistoru Q3 přivedeno jako zpětná vazba do předregulátoru LM2576. Takto zapojený obvod zajišťuje to, že před lineárním stabilizátorem je napětí vždy cca o 5V vyšší, než na výstupu zdroje. Díky tomu vzniká na tranzistoru mnohem menší ztrátový výkon, než kdyby na jeho vstup bylo trvale připojeno vyfiltrované napětí o hodnotě 40V. Zapojení předregulátoru a stabilizátoru je na Obr.4.2.



Obr. 4.2: Spínaný předregulátor a lineární stabilizátor

Nastavení požadovaného výstupního napětí a proudového omezení je zajištěno pomocí potenciometrů P1 pro napětí a P2 pro proud. Výstupní napětí je sledováno pomocí děliče napětí R9 - R22 a je porovnáváno s nastavenou hodnotou pomocí OZ IC2B. Tento operační zesilovač pak řídí pomocí tranzistoru Q6 stabilizátor Q4. Proudové omezení zajišťuje OZ IC2A. Při dosažení maximálního proudu dojde na jeho výstupu ke snížení napětí pod 0V, dioda D10 se otevírá a výstupní napětí zdroje se sníží. Současně s tím dochází k otevření tranzistoru Q5 a rozsvícení signalizační LED1, která signalizuje dosažení maximálního proudu. Schéma zapojení této části je na Obr. 4.3.



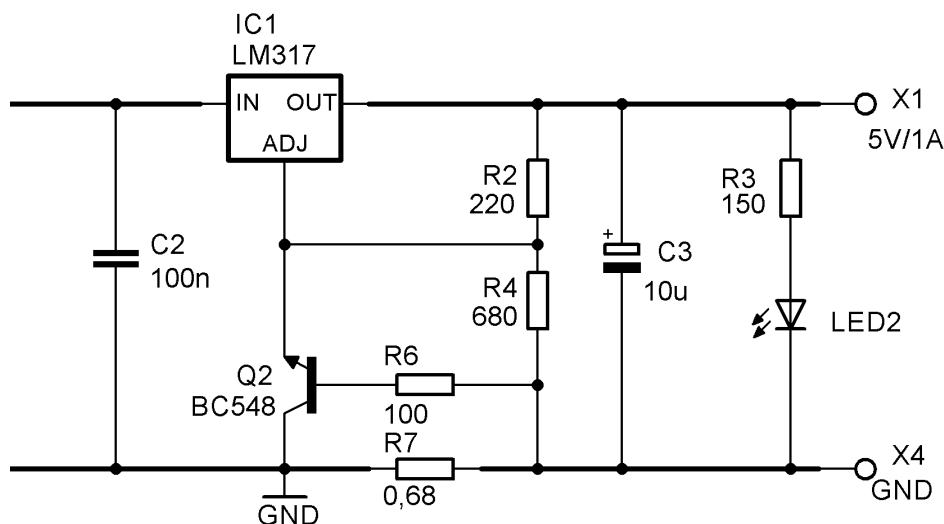
Obr. 4.3: Regulace výstupního napětí a proudu

Výstupní napětí je snímáno pomocí děliče napětí R5 - R14 přímo na výstupu zdroje. Výstupní proud je snímán na paralelní kombinaci výkonových rezistorů R15, R16 v podobě úbytku napětí a pomocí operačního zesilovače zesilován. Volbou hodnot

rezistorů jsou oba tyto rozsahy v rozmezí 0-4,5V. Současně je snímáno i dosažení maximálního proudu a to na zenerově diodě D11.

4.4 Popis desky s 5V zdrojem a relé

Kompletní schéma zapojení desky s 5V zdrojem a relé je v příloze A2. Na vstup je přivedeno střídavé napětí 9V, získané s transformátoru. Z tohoto napětí jsou vytvořeny dva zdroje. První zdroj je vytvořen pomocí stabilizátoru LM317(Obr. 4.4). U tohoto zdroje je realizováno proudové omezení 1A pomocí rezistoru R7, na kterém je snímán proud v podobě napětí. Pokud proud vzroste nad 800mA, začne se přes R6 otevírat tranzistor Q2, díky čemuž dojde k snížení napětí na vstupu ADJ a díky tomu k poklesu výstupního napětí.



Obr. 4.4: Zapojení zdroje 5V/1A

Dále je na desce další 5V zdroj, realizovaný pomocí 7805, který slouží pro napájení relé, mikrokontroléru a LCD displeje. Na desce jsou také relé, kterými jsou aktivovány výstupy regulovatelných zdrojů 0-30V a dalšími relé jsou výstupy zkratovány pro nastavení proudového omezení.

4.5 Popis desky s mikrokontrolérem

Schéma desky s mikrokontrolérem je v příloze A3. Na této desce je umístěn mikrokontrolér ATmega16, kterým jsou ovládány všechny potřebné komponenty. Dále je na desce umístěn LCD displej, patice pro naprogramování mikrokontroléru, relé, vývody k tlačítkům a také optočleny, které slouží ke galvanickému oddělení zdrojů od mikrokontroléru.

Toto oddělení je použito proto, aby bylo možné zdroje propojovat, například kvůli získání symetrického napájení. Bez použití oddělení by byly zdroje galvanicky spojeny

již na desce s mikrokontrolérem a nedaly by se již propojovat, dokonce by mohlo docházet k chybnému A/D převodu. Dalším důvodem je ochrana mikrokontroléru před případným vysokým napětím, které by se mohlo objevit na jeho pinech při poruše některého ze zdrojů.

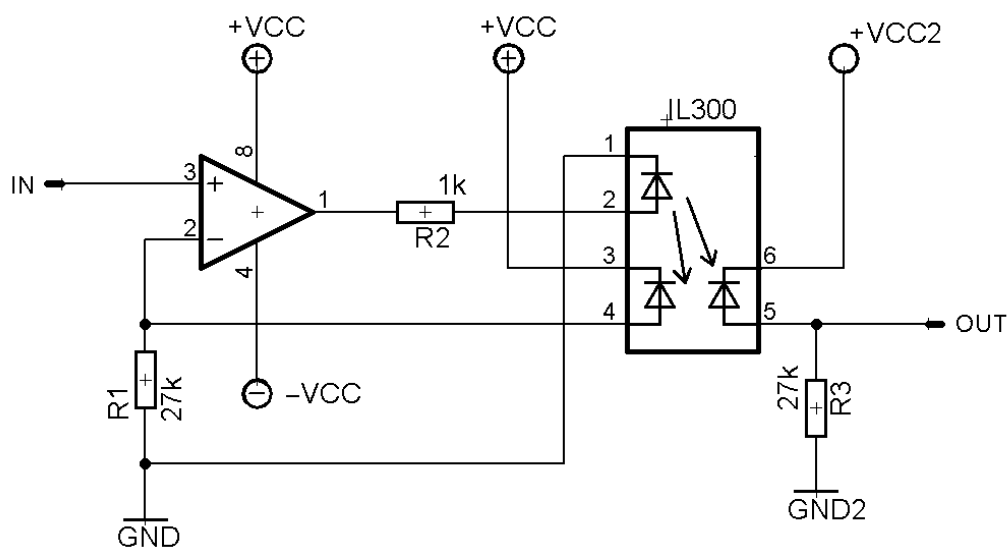
4.6 Optické oddělení

Pro galvanické oddělení jsou použity dva typy optočlenů. Prvním typem jsou jednoduché optočleny TIL191 s fototranzistorem, které slouží pro signalizaci limitace proudu. Na jeho vstupu je napětí pouze ve dvou stavech, buď 0V nebo 5V, proto nejsou kladeny velké nároky na přesnost převodu. Stačí se omezit na dvoustavový převod informace. Druhým použitým typem optočlenů jsou precizní IL300, díky kterým je dosažena vysoká přesnost převodu (v datasheetu je uvedena přesnost převodu 2%).

Použité zapojení s optočlenem IL300 je uvedeno na Obr. 4.5 a slouží pouze k převodu kladných napětí, které v tomto případě postačuje. Ve vstupní části je použit operační zesilovač, na jehož výstupu je potřeba získat napětí již od 0V, proto je nutností mít k dispozici i záporné napětí. Použití operačního zesilovače typu rail-to-rail se neosvědčilo, protože na výstupu OZ bylo stále zbytkové napětí, které ale stačilo k tomu, aby obvod vykazoval značný offset při převodu hodnot okolo 0V.

Svitivost infračervené diody je úměrná vstupnímu napětí a díky tomu, že je použita záporná zpětná vazba, je dosaženo vysoké linearoty převodu. Světlo v pouzdře IL300 totiž svítí rovnoměrně na dvě totožné fotodiody. Jedna je použita pro zpětnou vazbu, druhá je použita pro výstup.

Výstupní napětí zdroje je snímáno na odporovém děliči R5-R14, který je zapojen na výstupu zdroje. Rozsah napětí je tak upraven z 0-30V na 0-4,5V. Výstupní proud je snímán v podobě úbytku napětí na paralelní kombinaci výkonových rezistorů R15 a R16. Tento úbytek napětí je dále zesílen pomocí operačního zesilovače v neinvertujícím zapojení a rozsah je upraven, stejně jako u výstupního napětí, na 0-4,5V.



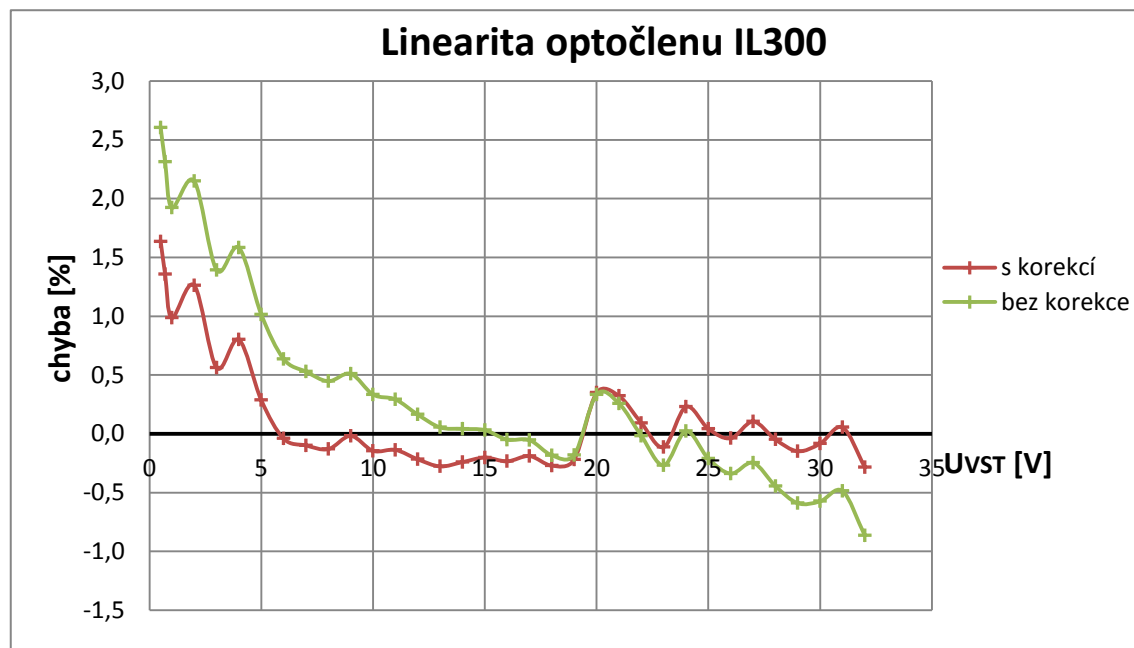
Obr. 4.5: Optické oddělení s optočlenem IL300

4.6.1 Linearita optočlenu IL300

Pro měření linearity byl zvolen převod napětí. Stejně je tomu i u převodu proudu, protože napětí je na obvod s optočlenem přiváděno také v rozsahu 0-4,5 V. Rozdílný je pouze převod naměřené hodnoty mikrokontrolérem, který je řešen již softwarově. Naměřené hodnoty jsou v příloze C.1.

V grafu je vidět, že linearita převodníku je pro potřeby měření stejnosměrného napětí dostačující. Chyba převodu je u nižších hodnot napětí lehce nad 2%, poté se pohybuje většinou pod 1%. Z grafu je patrné, že chyba klesá z kladných hodnot do záporných, díky čemuž se dala navrhnout softwarová korekce převodu, pomocí které byla dosažena ještě vyšší přesnost. V nejpoužívanějším rozsahu zdroje od 5 do 30V byla chyba převodu s korekcí nižší než 0,4%.

Jako ještě lepší řešení by bylo vhodné realizovat A/D převodník přímo na desce se zdrojem a hodnoty z převodníku by se pak přenášely pomocí sériové komunikace, která by byla opticky oddělena jednoduchými optočlenem TIL191, nebo podobným. Poté by byla chyba měření omezena pouze na kvantovací chybu A/D převodníku.



Obr. 4.6: Linearita optočlenu IL300

4.7 Popis programu

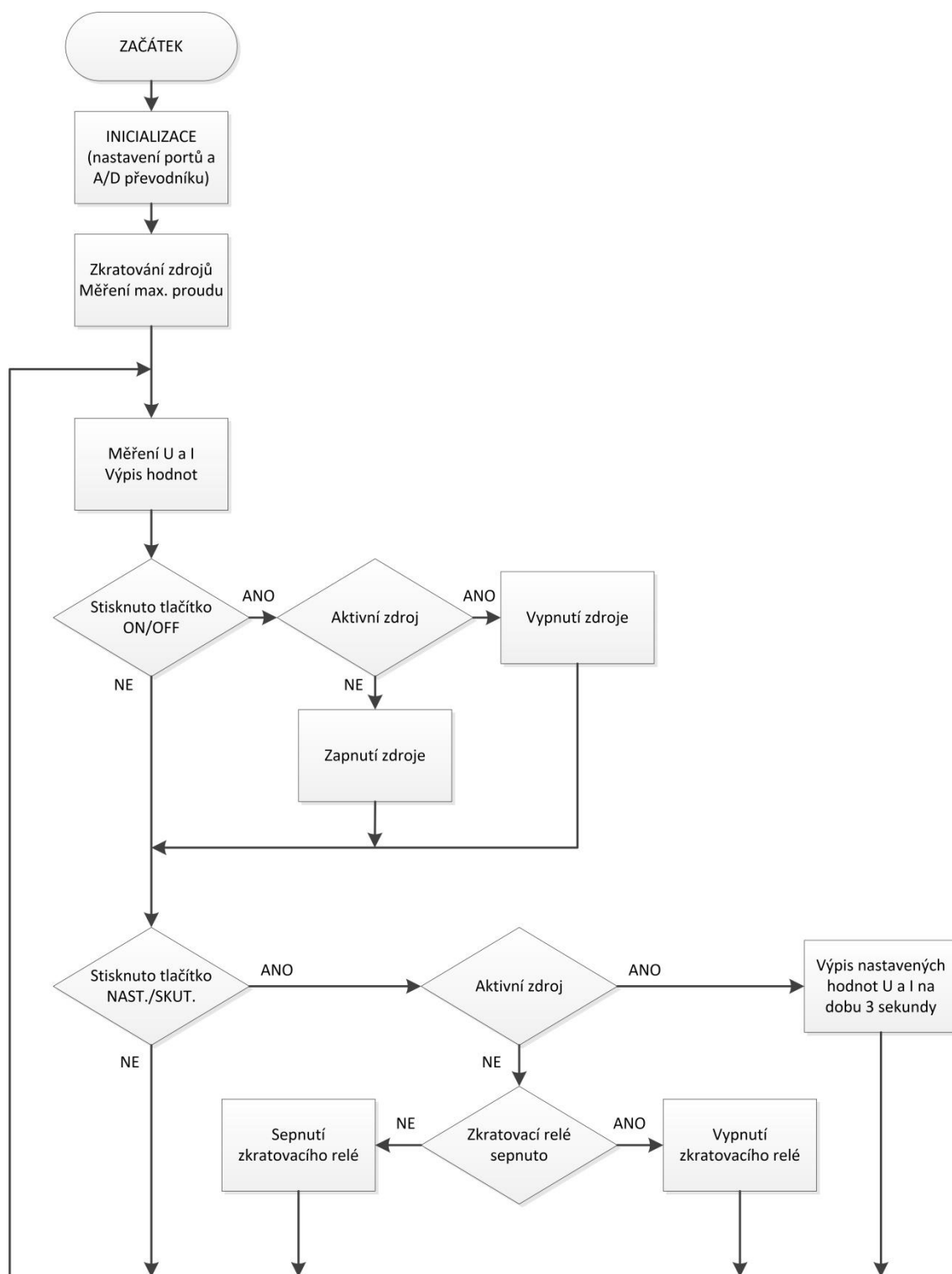
Kompletní program, i s podrobným popisem, je přiložen na CD1. Vývojový diagram programu (Obr.4.7) je kvůli přehlednosti uveden pouze pro jeden zdroj. Pro další zdroj by byly přidány další podprogramy, které by však byly stejné jako u prvního zdroje, pouze s rozdílnými vstupy a výstupy.

Na začátku programu dojde k inicializaci (vložení knihoven, nastavení vstupních a výstupních portů, inicializaci LCD displeje a nastavení A/D převodníku). Poté jsou sepnuty relé, které zkratují oba zdroje a je změřen a uložen maximální proud. Po změření dojde zase k rozepnutí těchto relé, výstupy zdrojů jsou po celou dobu vypnuty.

Nyní začíná smyčka, vytvořená pomocí cyklu „while“, která se neustále opakuje. První dojde ke změření a poté k výpisu hodnot výstupního napětí a proudu na LCD displej. Při měření dochází ještě k průměrování a korekci naměřených hodnot. Poté jsou testovány všechny tlačítka, zda některé z nich není stisknuté, pokud ano, dojde pomocí podmínky „if“ k provedení určitého podprogramu.

Při stisknutí tlačítka ON/OFF je otestováno, zda je již zdroj sepnut, pokud ano, zdroj vypne, pokud je naopak vypnut, tak zdroj zapne. Při stisknutí tlačítka Nastavená/Skutečná je otestována další podmínka, jestli je zdroj aktivní. Pokud aktivní není tak sepne/rozepne zkratovací relé podle toho jestli je relé rozepnuto/sepnuto. Pokud aktivní je, dojde k výpisu nastavených hodnot napětí a proudu. Nastavené hodnoty jsou zobrazeny po dobu 3 sekund, poté zdroj pokračuje ve výpisu aktuálních hodnot a v kontrole tlačítek.

Na konci každého podprogramu je testováno opět tlačítko, jestli je stále stisknuto, pokud ano tak čeká v nekonečné smyčce na okamžik, kdy stisknuto nebude. Stisky tlačítek jsou také ošetřeny pomocí funkcí, aby nedošlo k náhodnému sepnutí při nahodilém rušení.



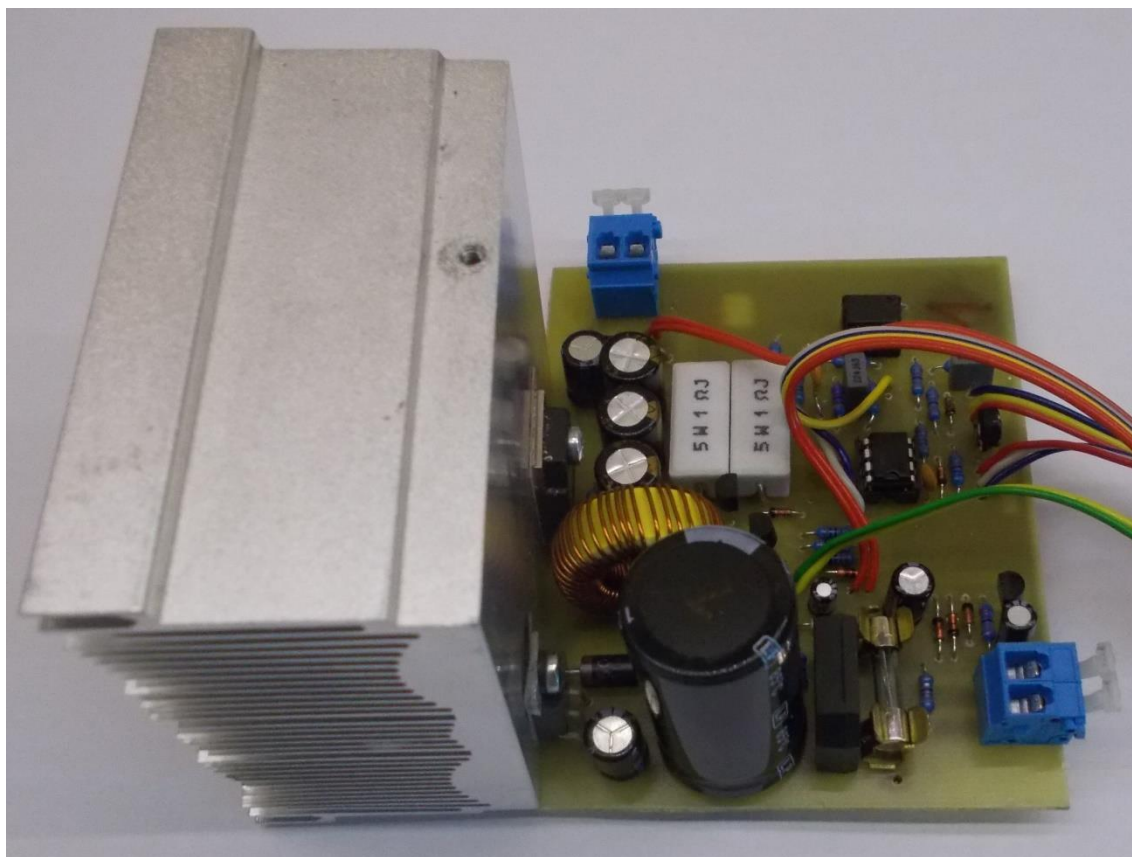
Obr. 4.7: Vývojový diagram programu

5 KONSTRUKCE ZDROJE

5.1 Regulovatelný zdroj

Pro každý ze dvou regulovatelných zdrojů je vytvořena samostatná deska. Pro připojení výstupů z transformátoru jsou použity pružinové svorkovnice WAGO, tyto svorkovnice jsou použity také pro výstup. Na jedné straně desky jsou vedle sebe umístěny spínaný předregulátor a také výkonový tranzistor, který je součástí stabilizátoru. Obě tyto součástky jsou přes izolační podložku s použitím teplovodivé pasty přišroubovány na chladič.

Z desky je dále vyveden kabel s červenou LED, která signalizuje limitaci proudu, tak je vyvedena na čelní panel. Dále je vyveden kabel, který vede na desku s mikrokontrolérem a slouží k měření hodnot napětí a proudu. Je přidán dodatečně, proto je z desky vyváděn na více místech.

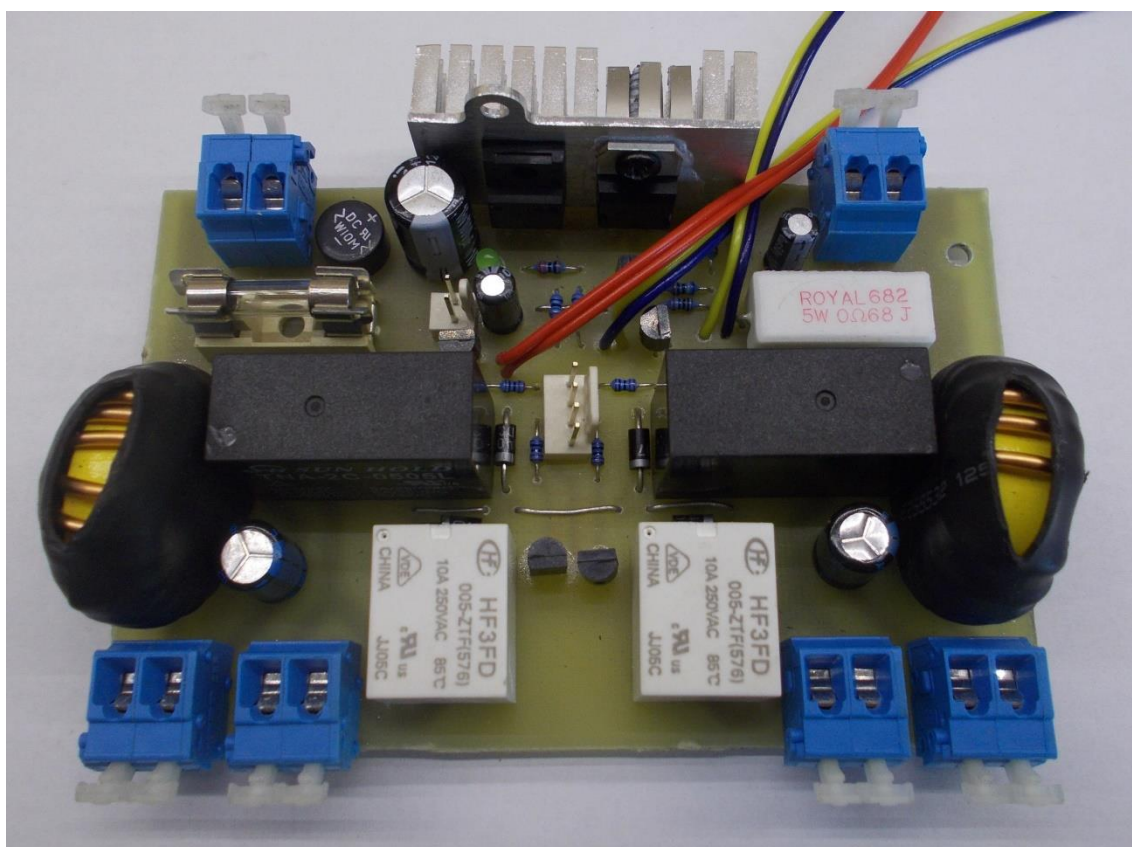


Obr. 5.1: Fotka regulovatelného zdroje

5.2 Deska s 5V zdrojem a relé

Na desce jsou umístěny 2 stabilizátory, které jsou oba připevněny na jeden chladič. Prvním stabilizátorem je jednoduché zapojení se 7805, které slouží hlavně pro napájení relé, a dále je vyvedeno na konektor, který slouží k přivedení napájení k desce s mikrokontrolérem. Druhý stabilizátor je vytvořen s obvodem LM713, který slouží pro samostatný zdroj 5V, který je vyveden na čelní panel.

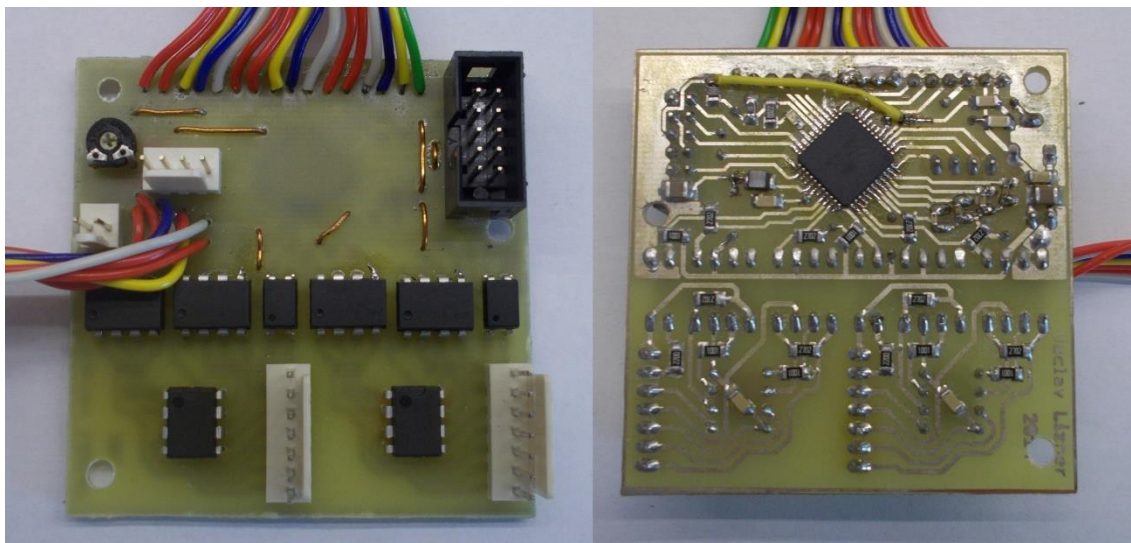
Z desky jsou dále vyvedeny LED signalizující sepnutí relé a tím přivedení výstupy regulovatelných zdrojů na svorky, které jsou na čelním panelu. Další LED slouží pro signalizaci 5V zdroje. 4 pinový konektor ve středu desky je přiveden na desku s mikrokontrolérem a slouží k ovládání relé. Pro vstupy i výstupy jsou na desce také použity pružinové svorkovnice WAGO.



Obr. 5.2: Fotka desky s relé a 5V zdrojem

5.3 Deska s mikrokontrolérem

Deska je pomyslně rozdělena na dvě poloviny. Na jedné z nich se nachází mikrokontrolér, vstupy z tlačítek a výstupy na LCD display a na řízení relé a také konektor pro naprogramování a signalizační LED. Na druhé polovině desky je realizované optické oddělení a uprostřed desky je řada optočlenů.



Obr. 5.3: Fotka desky s mikrokontrolérem

5.4 Kompletní konstrukce

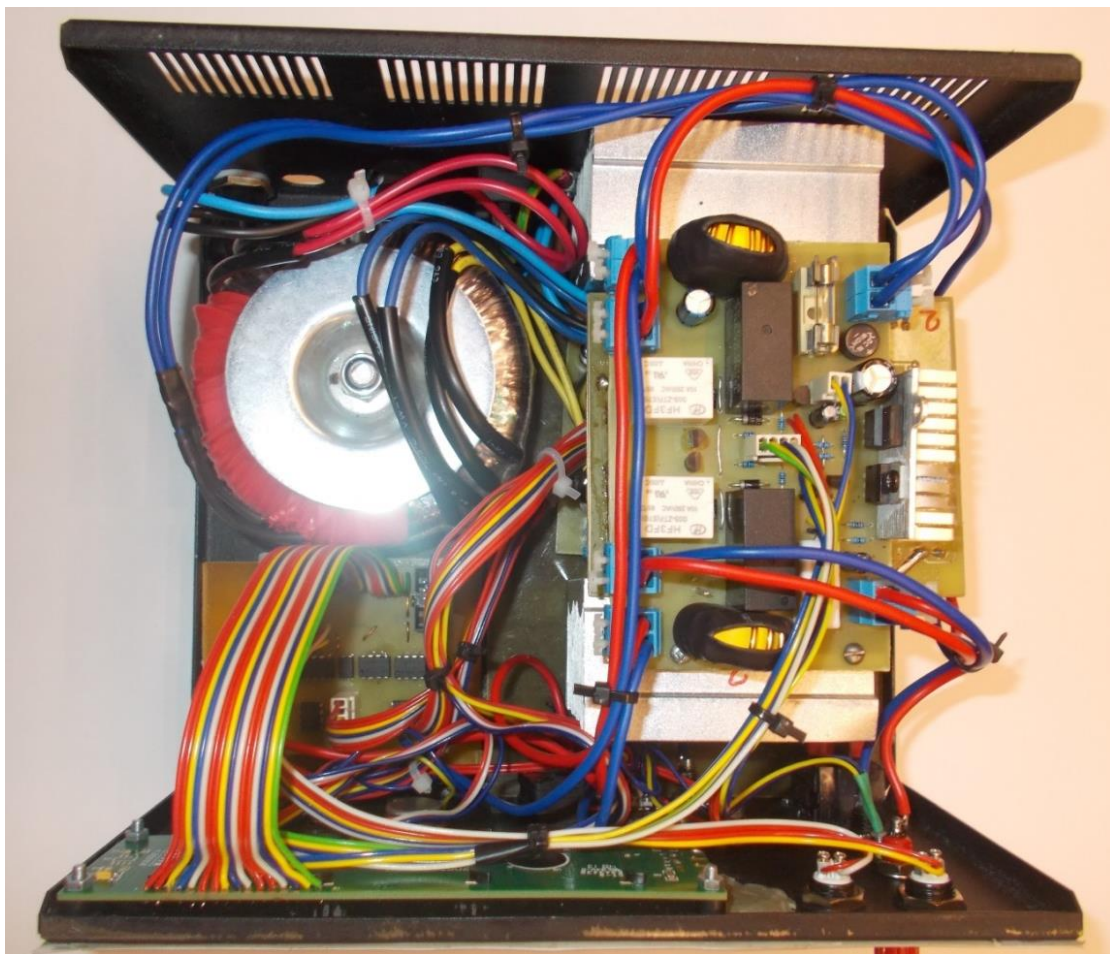
Pro celý zdroj byla vybrána kovová přístrojová krabice o rozměrech 234x124x217 mm, která byla volena tak aby se do ní vešly všechny komponenty, ale aby nebyla příliš rozměrná a zdroj byl kompaktní.

Jako transformátor byl použit toroidní transformátor s označením HEFEI TR-T200/2X29V, jehož výkon je 200W, což pro tento zdroj s výkonem max. 185W celkem postačuje. Na transformátor bylo ještě namotáno jedno sekundární vinutí s výstupním napětím 9V.

V zadní části zdroje je přívod síťového napájení, které je vedeno přes pojistku na síťový spínač v pravé dolní části čelního panelu. Spínač obsahuje i doutnavku jako indikaci zapnutí zdroje. Z transformátoru je napětí vedeno ke dvěma zdrojům, které jsou umístěny v pravé části nad sebou tak, aby došlo k šetření místem. Nad těmito zdroji je ještě na distančních sloupcích umístěna deska s relé a 5V zdrojem.

V levé přední části zdroje je umístěna deska s mikroprocesorem, ke které je přivedeno napájení 5V. K této desce jsou přivedeny výstupy ze zdrojů, sloužící k měření napětí a proudu, dále pak tlačítka, které slouží k obsluze zdroje. Z desky jsou vyvedeny výstupy pro LCD displej a výstupy, které ovládají relé.

Na čelní panel je upevněn LCD displej, tlačítka, signalizační LED, výstupy zdrojů a také potenciometry, které slouží pro nastavení výstupního napětí každého ze zdrojů. Na tyto potenciometry jsou přišroubovány otočné knoflíky. Všechny části, které jsou vyvedeny na čelní panel, jsou barevně odlišeny a také seskupeny tak, aby byla zlepšena přehlednost při ovládání a práce se zdrojem.



Obr. 5.4: Fotka vnitřního uspořádání



Obr. 5.5: Pohled na kompletní zdroj

5.5 Obsluha zdroje

Zdroj je ovládán pomocí šesti otočných potenciometrů a čtyř tlačítek. Čtyři z potenciometrů slouží k nastavení výstupního napětí, pro každý zdroj dva, jeden pro hrubé, druhý pro jemné. Další dva potenciometry slouží pro nastavení maximálního výstupního proudu. Dvě z tlačítek slouží k vypnutí a zapnutí zdroje 1 nebo 2. Další dvě tlačítka slouží pro nastavení maximálního výstupního proudu a také pro zobrazení nastavených veličin, oproti skutečným, při zatížení zdroje.

Po sepnutí síťového spínače, dojde ke zkratu zdroje a zdroj změří max. výstupní proudy, poté je zase odpojí a na displeji se objeví nastavené výstupní napětí, označené písmenem „s“, před samotnou hodnotou napětí (Obr 5.6). Požadovaná hodnota napětí lze nastavit pomocí potenciometrů s červenou barvou. Zdroje jsou odpojeny od výstupu.



Obr. 5.6: Displej – stav 1

Při stlačení zeleného tlačítka Nastavená/Skutečná, dojde ke zkratování zdroje pomocí zkratovacího relé a je zobrazen a současně měřen maximální nastavený výstupní proud. Také se rozsvítí červená LED signalizující dosažení max. proudu. Na displeji se před nastavovaným proudem objeví písmeno „s“ (Obr 5.7). Požadovaná hodnota je nastavena pomocí potenciometrů se stříbrnou barvou.



Obr. 5.7: Displej – stav 2

Když je stlačeno červené tlačítko ON/OFF dojde k rozepnutí zkratovacího relé (pokud je sepnuto) a také dojde k smazání písmena „s“ před hodnotou napětí i proudu. Zdroj je nyní připojen na výstup, rozsvítí se zelená LED signalizující připojení výstupu a zobrazují se měřené hodnoty napětí a proudu (Obr. 5.8).



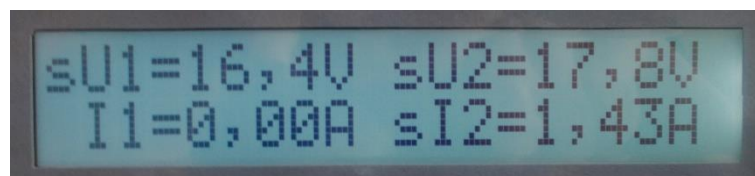
Obr. 5.8: Displej – stav 3

Pokud je zdroj zatížen natolik, že dojde k dosažení proudového omezení, rozsvítí se před měřenou hodnotou proudu písmeno „I“. Současně s tím je také rozsvícena červená LED signalizující proudový limit (Obr. 5.9).



Obr. 5.9: Displej – stav 4

Pokud je zdroj připojen na výstup (svítí zelená LED) a současně s tím je stisknuto tlačítko Nastavená/Skutečná, dojde k zobrazení nastavených hodnot napětí a proudu. Před těmito hodnotami se také vypíše písmeno „s“. V tomto zobrazení zdroj setrvá po dobu 3 sekundy a poté se opět zobrazuje skutečné naměřené veličiny (Obr 5.10).



Obr. 5.10: Displej – stav 5

6 MĚŘENÍ CHAREKTERISTIK

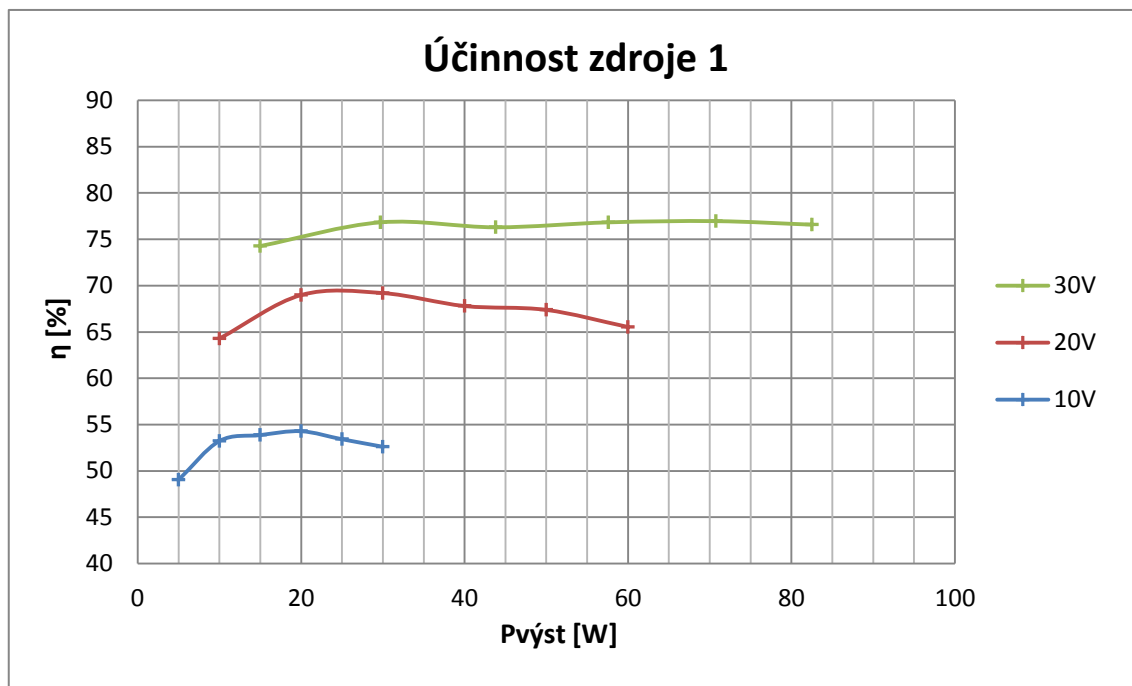
U regulovatelného zdroje byly proměřeny jeho charakteristické parametry. Základní parametry byly změřeny také u 5V zdroje. Pro měření byl použit osciloskop Agilent DSO6012, pomocí kterého bylo možné převést zobrazené průběhy v podobě obrázku na flash disk, čehož bylo využito při měření výstupního zvlnění. Dále byly použity čtyři multimetry, jeden UT60A a tři FT-3900, pro měření napětí a proudů. Jako zátěž byly použity výkonové rezistory s různými hodnotami a také dva reostaty, jeden s odporem $30\Omega/4,5A$ druhý s odporem $13\Omega/6,5A$.

6.1 Účinnost zdroje

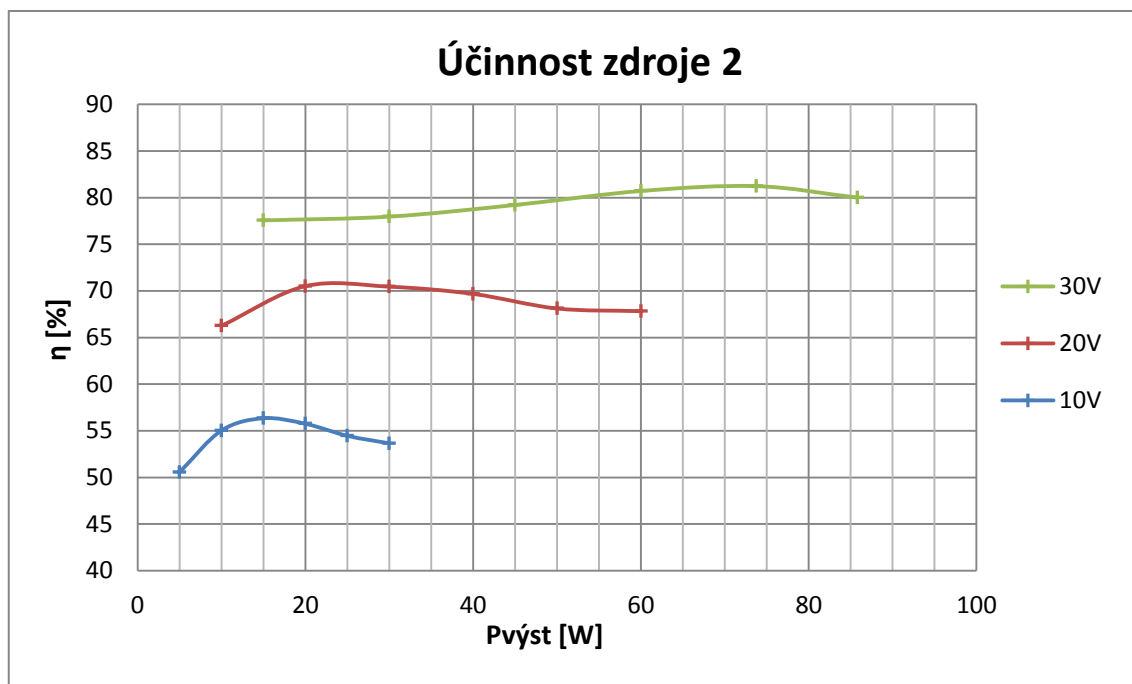
Účinnost obou zdrojů byla měřena při napětích 10, 20 a 30V s odběrem proudu v rozsahu 0 až 3A, to proto, aby byla pokryta velká škála výkonu a také různé nastavení zdroje, v kterých může potencionálně pracovat. Tabulky naměřených hodnot v příloze C.2 a C.3.

Z naměřených hodnot a grafů je patrné, že při rostoucím výstupním napětí účinnost zdroje roste. Nejlepší účinnosti zdroj také dosahuje při proudovém odběru kolem 1,5A. Z grafů je také vidět, že účinnost zdroje se pohybuje v rozmezí 50 až 80 %, z čehož lze vyvodit, že jeho průměrná účinnost je asi 65%.

Dalším parametrem zdroje, který byl z naměřených hodnot vypočítán, je ztrátový výkon, který je ve zdroji proměněn převážně na teplo, které je potřeba odvádět. Největší ztráty vznikají na tranzistoru TIP142 a na spínaném předregulátoru LM2576. Podle naměřených hodnot jsou ztráty maximálně 32W, a na tento výkon bylo potřeba dimenzovat chladič. Při nezátíženém zdroji jsou ztráty 1,56W.



Obr. 6.1: Graf účinnosti zdroje 1



Obr. 6.2: Graf účinnosti zdroje 2

6.2 Zatěžovací charakteristika

Měření zatěžovací charakteristiky bylo provedeno pro každý ze dvou zdrojů. Pro měření byly zvoleny hodnoty výstupního napětí 10V, 20V a 30V. Tyto hodnoty byly nastaveny při nezatíženém zdroji a poté byl postupně zvyšován proud po 200mA a odečítány skutečné hodnoty výstupního napětí. Tabulky naměřených hodnot jsou v příloze C.4 a C.5

Z naměřených hodnot vyplývá, že při nastavené hodnotě výstupního napětí 10V nebo 20V klesá skutečné napětí, se zvyšující se zátěží, jen nepatrně. Při nastavené hodnotě 30V se naměřené hodnoty zdrojů od sebe lehce liší. U zdroje 1 dochází k razantnějšímu poklesu napětí již při odběru 1A, zatímco u zdroje 2 dochází k podobnému poklesu až při 2,4A. Tuto skutečnost lze přehledně vidět v grafech níže. Mírný pokles napětí, se zvyšujícím se proudem lze přisuzovat vnitřnímu odporu zdroje, který je tvořen odporem vodičů, odporem kontaktů, apod. Tento vnitřní odpor je vypočítán podle vztahu

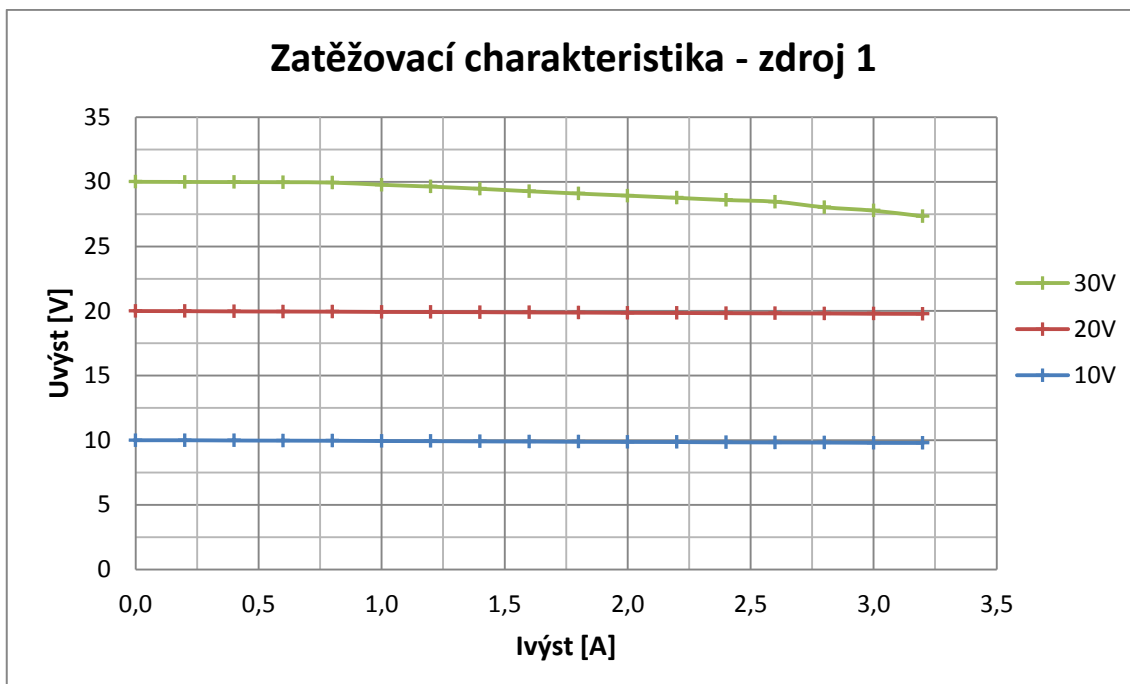
$$R_i = \frac{U_0 - U_{VYST}}{I_{VYST}} \quad (6.1)$$

kde R_i je vnitřní odpor zdroje, U_0 je výstupní napětí naprázdno, U_{VYST} je skutečné výstupní napětí a I_{VYST} je výstupní proud. Tento výstupní odpor je pro oba zdroje v rozsahu asi 50-70 mΩ, což je poměrně solidní hodnota.

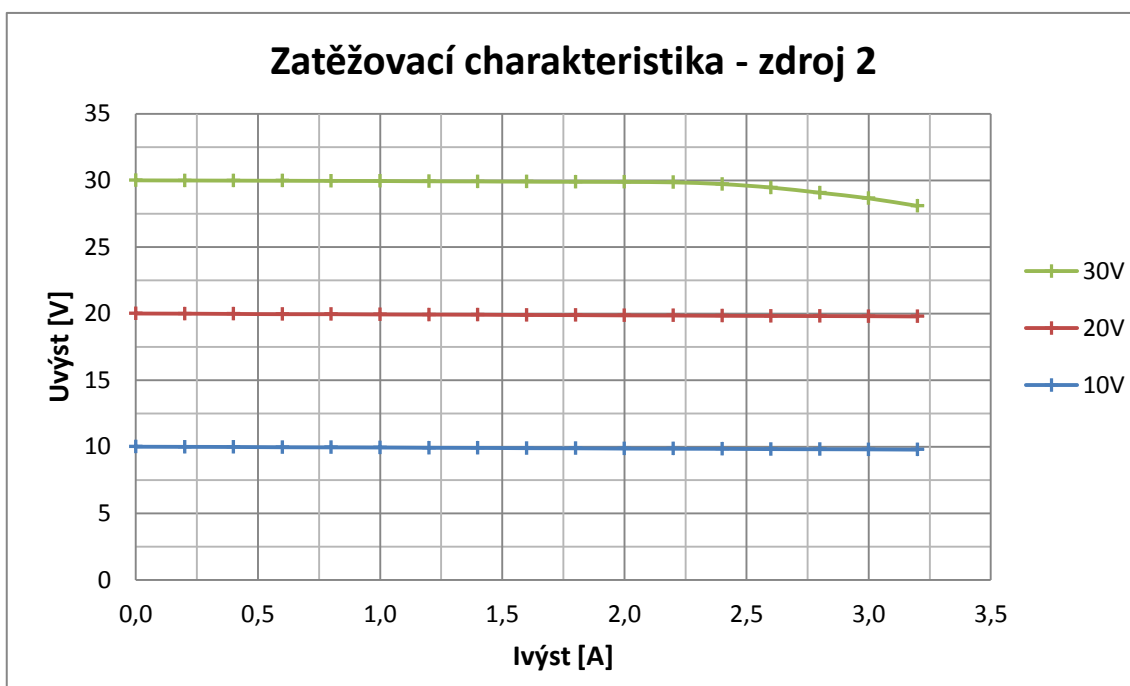
Tento vnitřní odpor by se dal ještě rapidně snížit za pomoci jednoduché úpravy v konstrukci zdroje a to tak, že zpětná vazba by nebyla vedena na plošném spoji z výstupu desky, ale byla by vyvedena až na výstupní svorky zdroje a tím by byl vnitřní odpor téměř eliminován. Zpětnou vazbou by zde byla pořád udržována nastavená hodnota výstupního napětí, až do okamžiku, kdy bude napětí omezeno výkonem zdroje.

Větší pokles napětí, který nastává při nastavené hodnotě 30V a vyšším zatěžovacím proudem je způsoben nedostatečným výkonem zdroje. Omezení výkonu způsobuje vyšší vnitřní odpor zdroje, který je při maximálním výkonu u prvního zdroje 743 mΩ a u druhého zdroje 450 mΩ.

Při měření zatěžovacích charakteristik bylo nastaveno proudové omezení na maximální hodnotu, které byla u obou zdrojů zhruba 3,3A. Po překročení tohoto proudu zareagovala proudová ochrana a to tak, že došlo ke snížení výstupního napětí. Zdroj se dá v tomto stavu využít jako zdroj konstantního proudu.



Obr. 6.3: Zatěžovací charakteristika zdroje 1



Obr. 6.4: Zatěžovací charakteristika zdroje 2

6.3 Zvlnění výstupního napětí

Zvlnění bylo měřeno pro oba zdroje. K měření zvlnění byly zvoleny dvě úrovně výstupního napětí a to 15V a 30V. Při obou těchto napětích byl nastavován proud 1, 2 a

3A. Pro hodnotu $U_{výst} = 15V$ vykazovaly oba zdroje prakticky stejné výsledky. Pro hodnotu $U_{výst} = 30V$ se při 2A a 3A zvlnění lišilo, jak je vidět v tabulce níže.

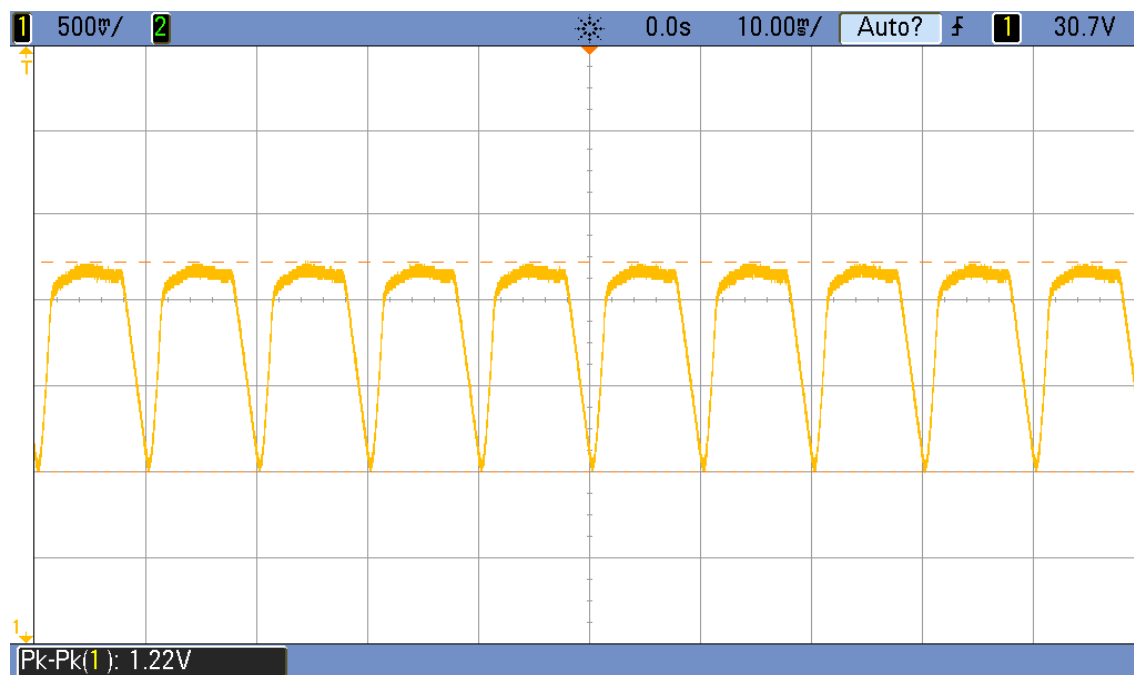
Při hodnotách 15V byla dána hodnota zvlnění převážně šumem, který se na výstupu objevuje pravděpodobně kvůli zpětné vazbě, která není až tak precizně řešena. Při nastavení $U_{výst} = 30V$, $I_{výst} = 3A$ se na výstupu objevilo výrazné zvlnění. Toto zvlnění má frekvenci $f = 100Hz$, z čehož vyplývá, že jde o zvlnění, které vzniká kvůli nedostatečnému výkonu dodávaného již do spínaného předregulátoru. Při takto nastaveném zdroji došlo po čase k většímu zahřátí zdroje, čímž pravděpodobně klesla účinnost předregulátoru a lineárního stabilizátoru a zvlnění pak ještě nepatrně vzrostlo.

Zvlnění by se dalo snížit použitím filtračního kondenzátoru o větší kapacitě. Tím by se zvlnění snížilo, ale výstupní napětí by pravděpodobně nedosáhlo nastavené hodnoty výstupního napětí $U_{výst} = 30V$. Proto ještě lepším řešením by bylo zvýšit výkon toroidního transformátoru, který je na vstupu zdroje. S tím by ani nemusel být volen filtrační kondenzátor o větší kapacitě.

Při připojení osciloskopu přímo na výstup desky samotného zdroje bylo zjištěno, že se zde objevují napěťové špičky, které jsou způsobeny spínáním předregulátorem. Po připojení přes desku s relé, na které je umístěn také LC filtr se již na výstupu tyto špičky neobjevily.

Tab. 6.1: Tabulka výstupního zvlnění pro oba zdroje

$I_{výst}$	Zdroj 1		Zdroj 2	
	$U_{výst}=15V$	$U_{výst}=30V$	$U_{výst}=15V$	$U_{výst}=30V$
	U p-p	U p-p	U p-p	U p-p
A	mV	mV	mV	mV
1	85	100	85	100
2	90	105	100	150
3	100	1220	105	2600



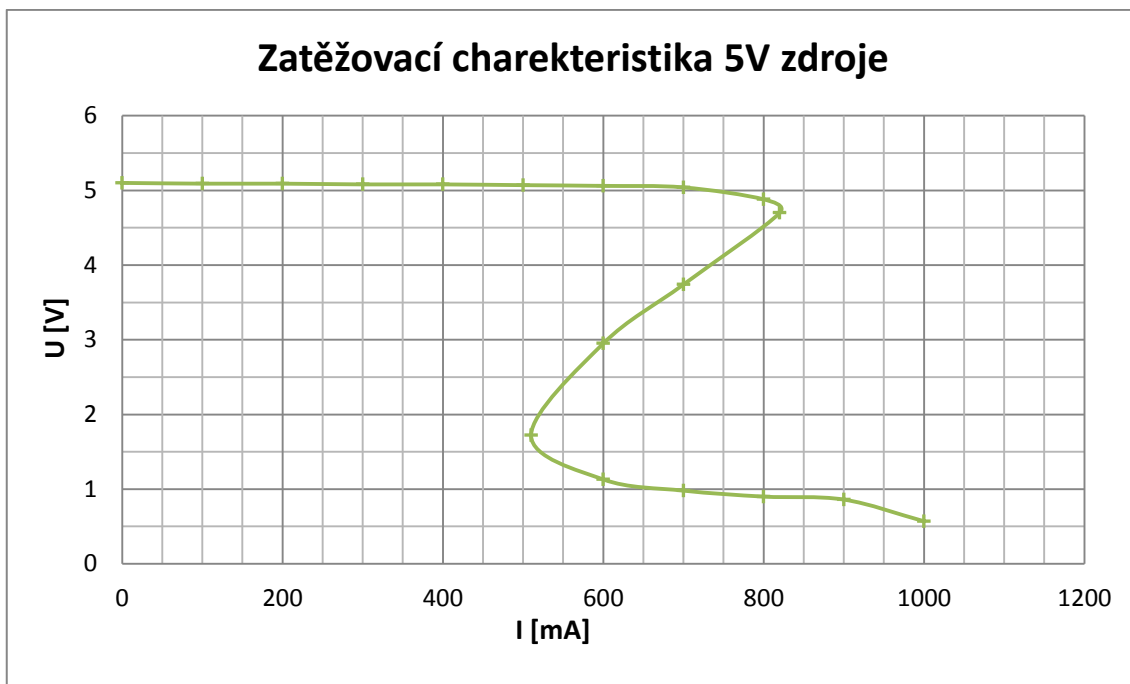
Obr. 6.5: Zvlnění pro $U_{výst} = 30V$, $I_{výst} = 3A$

6.4 Charakteristiky 5V zdroje

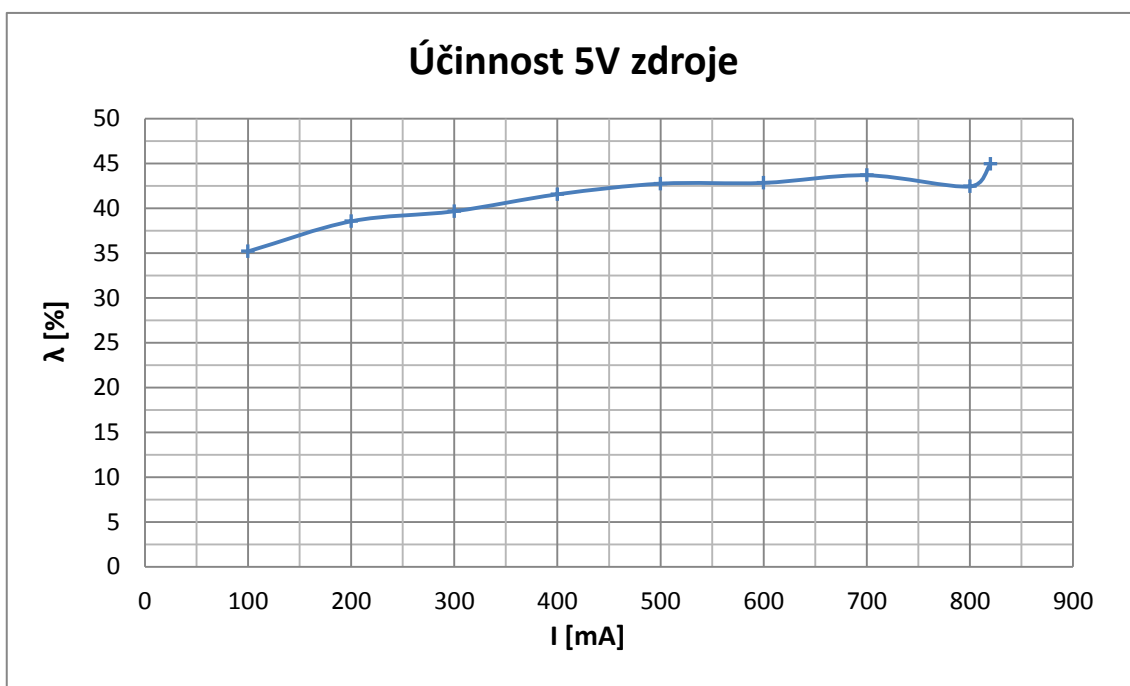
Pro 5V zdroj byly změřeny hodnoty vstupního a výstupního napětí i proudu v závislosti na zatížení. Jako zátěž byl použit reostat, u kterého bylo posouváno jezdcem a poté odečítány hodnoty tak aby se výstupní proud měnil po 100mA. V tabulce jsou změřeny také hodnoty, kdy docházelo k reakci pojistky, která omezovala výstupní napětí i výstupní proud. Naměřené hodnoty jsou v příloze C.6.

Z dynamické zatěžovací charakteristiky zdroje je vidět, že zdroj je vhodný používat do hodnoty výstupního proudu maximálně 800mA, poté začne reagovat pojistka a výstupní napětí je omezeno, tak aby nedocházelo k přetěžování stabilizátoru.

Dalším měřeným parametrem 5V zdroje je účinnost, která dosahuje hodnoty 35 až 40 procent. Účinnost oproti regulovatelnému zdroji tedy není moc vysoká, ale vzhledem k malému výkonu zdroje to není až tak kritické. Zdroj 5V bude většinou sloužit k napájení obvodů, které mají malý proudový odběr.



Obr. 6.6: Zatěžovací charakteristika 5V zdroje



Obr. 6.7: Účinnost 5V zdroje

7 ZÁVĚR

Cílem teoretické části bylo, seznámení se s napájecími zdroji. Práce se zabývá zejména zdroji spínanými, u kterých jsou detailně popsána všechna základní zapojení.

Hlavním cílem práce byl návrh a realizace laboratorního zdroje. V práci se povedlo navrhnout regulovatelný zdroj v rozsahu 0 až 30V s proudovým omezením do 3A. Zdroj využívá zapojení se spínaným předregulátorem LM2576 a lineárním stabilizátorem s TIP142. Regulace výstupního napětí a omezení proudu je řešeno pomocí zpětné vazby, která řídí předregulátor. Ke dvěma regulovatelným zdrojům byl ještě doplněn jeden zdroj 5V. Dále je ve zdroji použit mikrokontrolér ATmega16, který slouží k měření výstupního napětí a proudu a tyto hodnoty jsou pak zobrazovány na LCD displeji.

Předpokládané parametry, kterých měl zdroj dosahovat, se potvrdily při jeho realizaci, kde byl zdroj po částech sestaven a oživen. Byly změřeny parametry obou zdrojů jednotlivě a většinou byly téměř shodné. Účinnost obou zdrojů byla určena průměrem naměřených hodnot a pohybuje se zhruba kolem hodnoty 65%. Zatěžovací charakteristiky byly uspokojivé, až na zatížení prvního zdroje při 30V, kdy docházelo k většímu poklesu výstupního napětí. Při měření zvlnění zdroje dopadly poměrně dobře až při maximálním napětí 30V a proudu nad 2,5A docházelo ke značnému zvlnění, které bylo způsobeno nedostatkem dodávané energie z transformátoru. Pozitivní bylo, že se na výstupu neobjevovalo impulzní rušení způsobené spínáním předregulátoru.

Zdroj by se dal vylepšit použitím transformátoru o vyšším výkonu, díky čemuž by nedocházelo ke zvlnění při maximálním výkonu zdroje. Dále by se místo optického oddělení s přenosem spojitého signálu dalo použít optického oddělení s přenosem digitálního signálu. A/D převodník by musel být realizován již na desce se zdrojem. Tím by se dalo dosáhnout ještě větší přesnosti při měření výstupních hodnot napětí a proudu.

LITERATURA

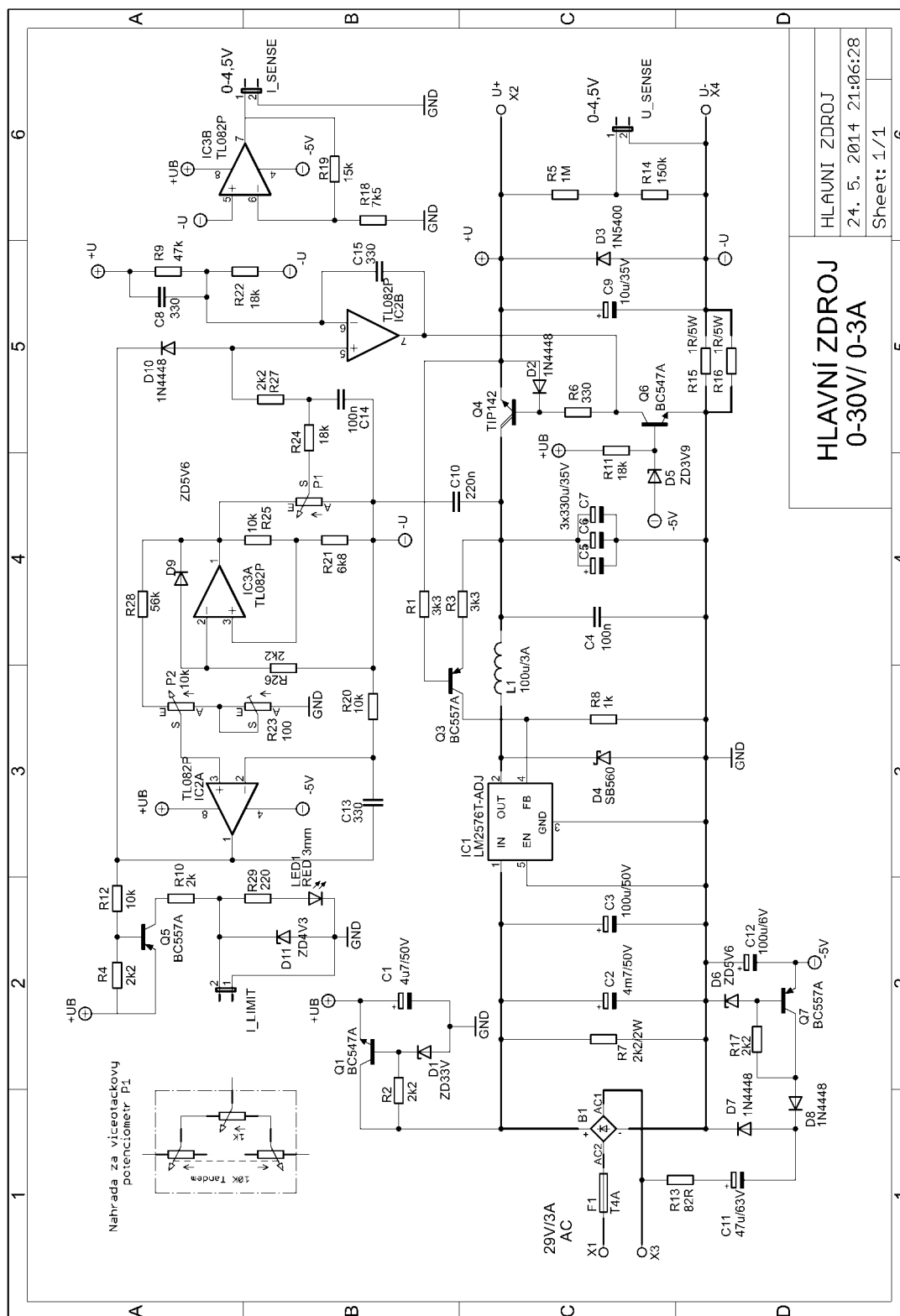
- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče Jak pracují*. Praha: BEN - technická literatura, 2001. 112 s. ISBN 80-7300-045-8.
- [2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996. 352 s. ISBN 80-86056-02-3.
- [3] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a tlumivky pro napájecí zdroje*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 248 s. ISBN 80-86056-91-0.
- [4] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR - ATmega16*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 320 s. ISBN 80-7300-174-8.
- [5] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Spínané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch*. Praha: BEN - technická literatura, 2002. 397 s. ISBN 80-7300-031-8.
- [6] KREJČÍŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje III: Pasivní součástky v napájecích zdrojích a preregulátory - aktivní harmonické filtry*. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 349 s. ISBN 80-86056-56-2.
- [7] Atmel Corporation. *8-bit Microcontroller ATmega16* [online]. 2008. 352 s. Dostupný z WWW:< www.atmel.com/Images/doc2466.pdf >.

SEZNAM PŘÍLOH

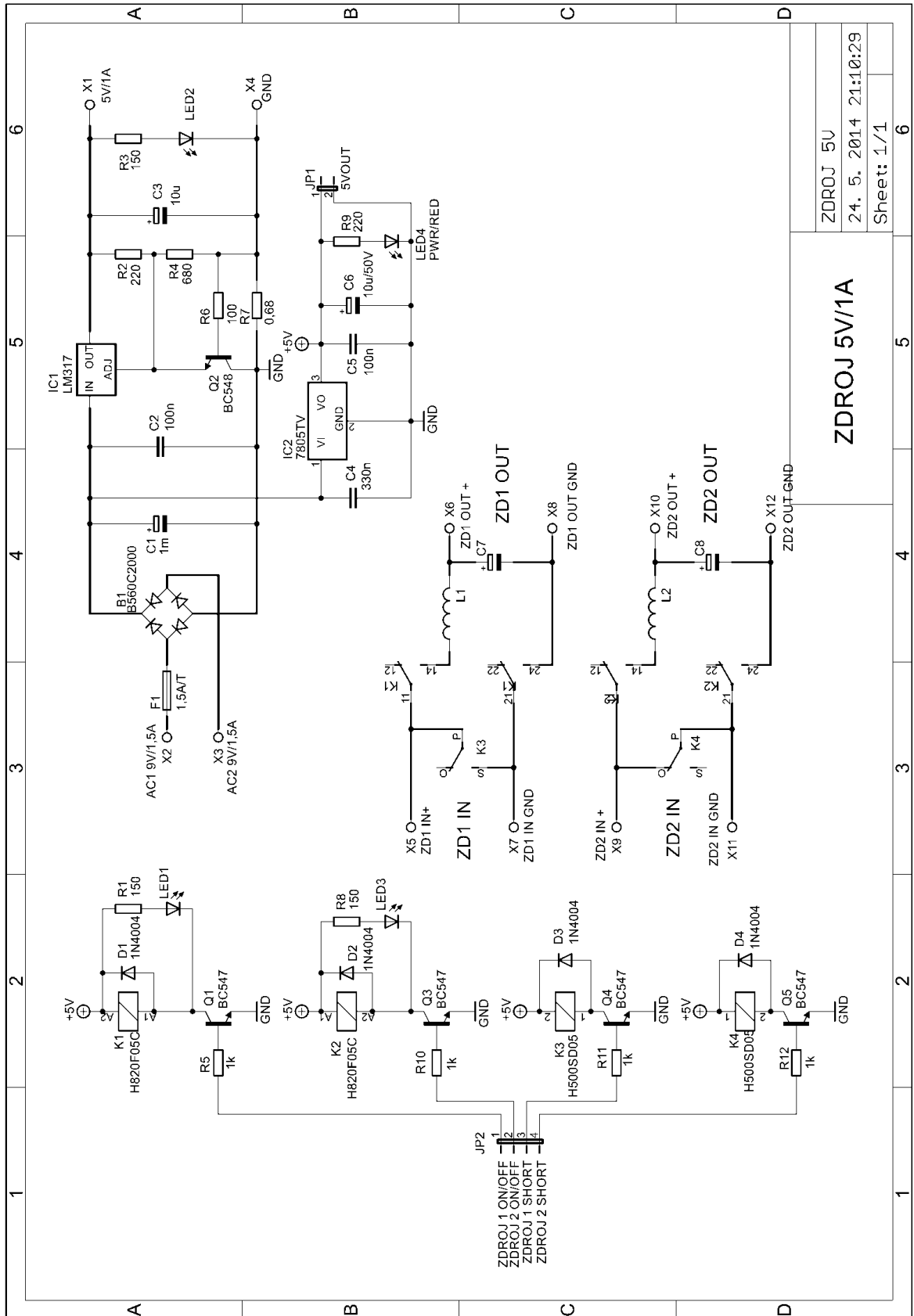
A	Schémata zapojení	41
A.1	Hlavní deska zdroje	41
A.2	Deska s 5V zdrojem a relé	42
A.3	Deska s mikrokontrolérem.....	43
B	Desky plošných spojů	44
B.1	Hlavní zdroj	44
B.2	Deska s 5V zdrojem a relé	45
B.3	Deska s mikrokontrolérem.....	46
C	Tabulky naměřených hodnot	47
C.1	Naměřené hodnoty pro optické oddělení s IL300.....	47
C.2	Naměřené hodnoty pro účinnost zdroje 1	48
C.3	Naměřené hodnoty pro účinnost zdroje 2	49
C.4	Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky zdroje 1	50
C.5	Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky zdroje 2	51
C.6	Naměřené hodnoty pro 5V zdroj	52

A SCHÉMATA ZAPOJENÍ

A.1 Hlavní deska zdroje



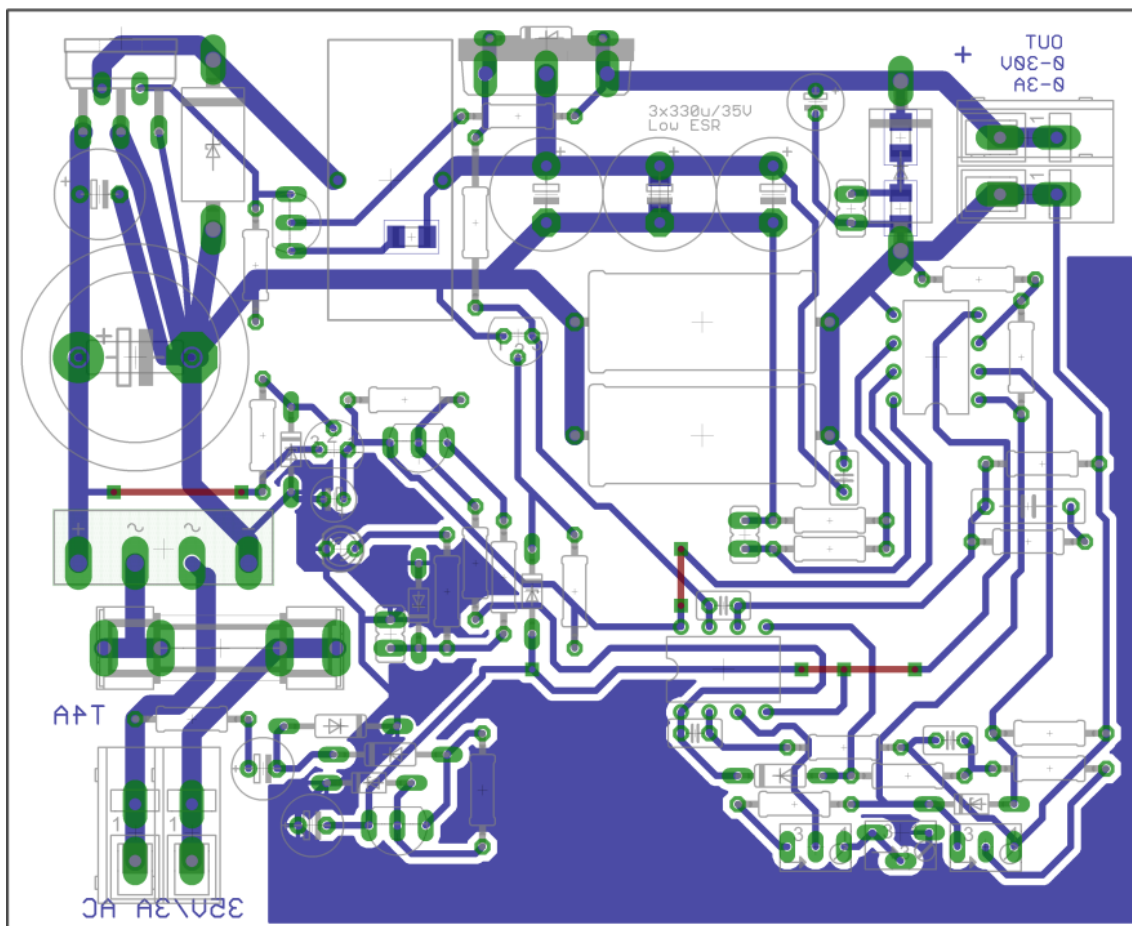
A.2 Deska s 5V zdrojem a relé



The diagram illustrates the electrical schematic of a custom microcontroller board, labeled 'DESKA S MIKROKONTROLEREM'. The central component is an ATmega16-A microcontroller (IC2), which is interfaced with an LCD display (DIS1) via an I2C or similar protocol. The board includes several input/output modules: a relay control module (U1) with two relays (OK1, OK2) and two sensors (U2, U3); a keypad (JP2) with 16 pins; and a status indicator module (U4) with two LEDs (IC3A, IC3B). Power management is handled by a +32V/1 regulator (IC1A) and a -5V/2 regulator (IC1B), both using TL082P operational amplifiers. The board also features a 16x2 LCD display (DIS1) and a 16-pin header (JP1) for additional connections. Various passive components, including resistors (R1-R20), capacitors (C1-C8), and inductors (L1, L2), are used for signal conditioning and power filtering. The layout is organized into four main sections: A (Power and Input), B (Microcontroller and I/O), C (Relay and Sensor Control), and D (Status and Display). The board is labeled 'DESKA S MIKROKONTROLEREM' and '24. 5. 2014 21:01:48'.

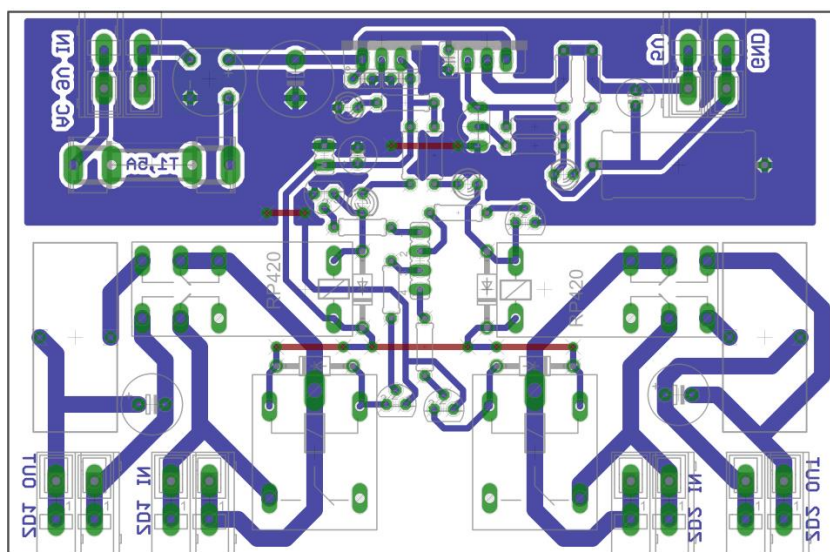
B DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

B.1 Hlavní zdroj



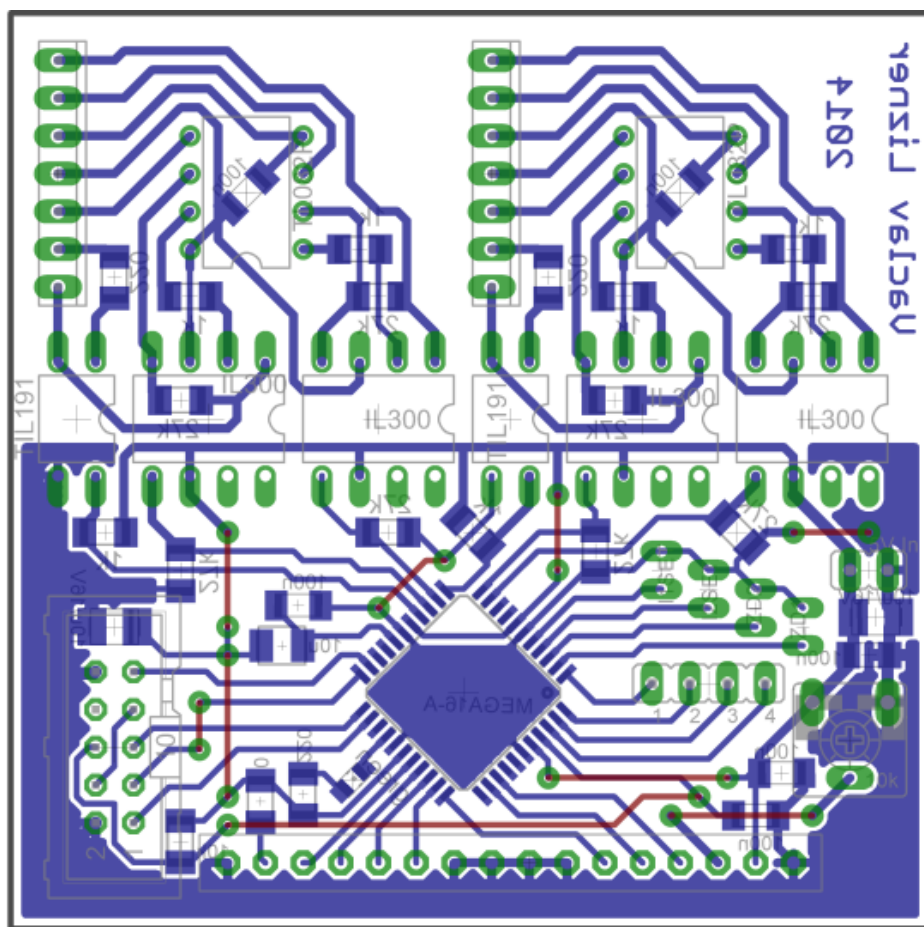
Rozměry 101 x 83 [mm], měřítko 1,5:1

B.2 Deska s 5V zdrojem a relé



Rozměry 110 x 72 [mm], měřítko 1:1

B.3 Deska s mikrokontrolérem



Rozměry 62 x 62 [mm], měřítko 2:1

C TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT

C.1 Naměřené hodnoty pro optické oddělení s IL300

UIN	UOUT	převod	bez korekce		s korekcí	
			UOUT	chyba	UOUT	chyba
V	mV	-	V	%	V	%
0,5	45,2	11,06	0,51	2,60	0,51	1,64
0,7	63,1	11,09	0,72	2,31	0,71	1,36
1	89,8	11,14	1,02	1,92	1,01	0,99
2	180	11,11	2,04	2,15	2,03	1,26
3	268	11,19	3,04	1,39	3,02	0,56
4	358	11,17	4,06	1,58	4,03	0,80
5	445	11,24	5,05	1,02	5,01	0,29
6	532	11,28	6,04	0,64	6,00	-0,04
7	620	11,29	7,04	0,53	6,99	-0,10
8	708	11,30	8,04	0,45	7,99	-0,13
9	797	11,29	9,05	0,51	9,00	-0,02
10	884	11,31	10,03	0,33	9,99	-0,14
11	972	11,32	11,03	0,29	10,98	-0,14
12	1059	11,33	12,02	0,16	11,97	-0,22
13	1146	11,34	13,01	0,05	12,96	-0,28
14	1234	11,35	14,01	0,04	13,97	-0,24
15	1322	11,35	15,00	0,03	14,97	-0,20
16	1409	11,36	15,99	-0,05	15,96	-0,23
17	1497	11,36	16,99	-0,05	16,97	-0,19
18	1583	11,37	17,97	-0,18	17,95	-0,27
19	1671	11,37	18,97	-0,18	18,96	-0,22
20	1768	11,31	20,07	0,33	20,07	0,35
21	1855	11,32	21,05	0,26	21,07	0,32
22	1938	11,35	22,00	-0,02	22,02	0,09
23	2021	11,38	22,94	-0,27	22,97	-0,11
24	2115	11,35	24,01	0,02	24,06	0,23
25	2198	11,37	24,95	-0,21	25,01	0,04
26	2283	11,39	25,91	-0,34	25,99	-0,04
27	2373	11,38	26,93	-0,25	27,03	0,10
28	2456	11,40	27,88	-0,44	27,99	-0,05
29	2540	11,42	28,829	-0,59	28,957	-0,15
30	2628	11,42	29,828	-0,57	29,975	-0,08
31	2718	11,41	30,849	-0,49	31,017	0,05
32	2795	11,45	31,723	-0,86	31,909	-0,28

C.2 Naměřené hodnoty pro účinnost zdroje 1

Uvst~	Ivst~	Pvst	Uvýst=	Ivýst=	Pvýst	η	Pztr
V	A	W	V	A	W	%	W
31,1	0,05	1,56	0,0	0,0	0,0	0,0	1,56
30,9	0,33	10,20	10,0	0,5	5,0	49,0	5,20
30,8	0,61	18,79	10,0	1,0	10,0	53,2	8,79
30,6	0,91	27,85	10,0	1,5	15,0	53,9	12,85
30,2	1,22	36,84	10,0	2,0	20,0	54,3	16,84
30,0	1,56	46,80	10,0	2,5	25,0	53,4	21,80
29,7	1,92	57,02	10,0	3,0	30,0	52,6	27,02
30,5	0,51	15,56	20,0	0,5	10,0	64,3	5,56
30,2	0,96	28,99	20,0	1,0	20,0	69,0	8,99
29,9	1,45	43,36	20,0	1,5	30,0	69,2	13,36
29,5	2,00	59,00	20,0	2,0	40,0	67,8	19,00
29,1	2,55	74,21	20,0	2,5	50,0	67,4	24,21
28,7	3,19	91,55	20,0	3,0	60,0	65,5	31,55
30,6	0,66	20,20	30,0	0,5	15,0	74,3	5,20
30,2	1,28	38,66	29,7	1,0	29,7	76,8	8,96
29,9	1,92	57,41	29,2	1,5	43,8	76,3	13,61
29,4	2,55	74,97	28,8	2,0	57,6	76,8	17,37
29,0	3,17	91,93	28,3	2,5	70,8	77,0	21,18
28,5	3,78	107,73	27,5	3,0	82,5	76,6	25,23

C.3 Naměřené hodnoty pro účinnost zdroje 2

Uvst~	Ivst~	Pvst	Uvýst=	Ivýst=	Pvýst	η	Pztr
V	A	W	V	A	W	%	W
31,1	0,05	1,56	0,0	0,0	0,0	0,0	1,56
30,9	0,32	9,89	10,0	0,5	5,0	50,6	4,89
30,8	0,59	18,17	10,0	1,0	10,0	55,0	8,17
30,6	0,87	26,62	10,0	1,5	15,0	56,3	11,62
30,4	1,18	35,87	10,0	2,0	20,0	55,8	15,87
30,2	1,52	45,90	10,0	2,5	25,0	54,5	20,90
29,9	1,87	55,91	10,0	3,0	30,0	53,7	25,91
30,8	0,49	15,09	20,0	0,5	10,0	66,3	5,09
30,5	0,93	28,37	20,0	1,0	20,0	70,5	8,37
30,2	1,41	42,58	20,0	1,5	30,0	70,5	12,58
29,9	1,92	57,41	20,0	2,0	40,0	69,7	17,41
29,6	2,48	73,41	20,0	2,5	50,0	68,1	23,41
29,1	3,04	88,46	20,0	3,0	60,0	67,8	28,46
30,7	0,63	19,34	30,0	0,5	15,0	77,6	4,34
30,3	1,27	38,48	30,0	1,0	30,0	78,0	8,48
29,9	1,90	56,81	30,0	1,5	45,0	79,2	11,81
29,5	2,52	74,34	30,0	2,0	60,0	80,7	14,34
29,1	3,12	90,79	29,5	2,5	73,8	81,2	17,04
28,6	3,75	107,25	28,6	3,0	85,8	80,0	21,45

C.4 Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky zdroje 1

I _{výst}	U _{výst0} = 10V		U _{výst0} = 20V		U _{výst0} = 30V	
	U _{výst}	R _i	U _{výst}	R _i	U _{výst}	R _i
A	V	mΩ	V	mΩ	V	mΩ
0,0	10,00	-	20,00	-	30,00	-
0,2	10,00	0	19,99	50	29,99	50
0,4	9,98	50	19,97	75	29,98	50
0,6	9,97	50	19,96	67	29,97	50
0,8	9,96	50	19,95	63	29,94	75
1,0	9,94	60	19,93	70	29,77	230
1,2	9,93	58	19,92	67	29,63	308
1,4	9,91	64	19,91	64	29,46	386
1,6	9,90	62	19,89	69	29,27	456
1,8	9,88	67	19,88	67	29,09	506
2,0	9,87	65	19,86	70	28,93	535
2,2	9,86	64	19,85	68	28,76	564
2,4	9,84	67	19,83	71	28,59	588
2,6	9,83	65	19,82	69	28,46	592
2,8	9,82	64	19,81	68	28,03	704
3,0	9,80	67	19,79	70	27,77	743
3,2	9,79	66	19,78	69	27,33	834

C.5 Naměřené hodnoty zatěžovací charakteristiky zdroje 2

I _{výst}	U _{výst0} = 10V		U _{výst0} = 20V		U _{výst0} = 30V	
	U _{výst}	R _i	U _{výst}	R _i	U _{výst}	R _i
A	V	mΩ	V	mΩ	V	mΩ
0,0	10,00	-	20,00	-	30,00	-
0,2	9,99	50	19,99	50	29,99	50
0,4	9,98	50	19,97	75	29,98	50
0,6	9,96	67	19,95	83	29,97	50
0,8	9,95	63	19,95	63	29,96	50
1,0	9,94	60	19,93	70	29,95	50
1,2	9,92	67	19,92	67	29,93	58
1,4	9,91	64	19,91	64	29,92	57
1,6	9,89	69	19,89	69	29,90	63
1,8	9,88	67	19,88	67	29,89	61
2,0	9,86	70	19,86	70	29,88	60
2,2	9,85	68	19,85	68	29,85	68
2,4	9,84	67	19,83	71	29,72	117
2,6	9,82	69	19,82	69	29,46	208
2,8	9,81	68	19,81	68	29,07	332
3,0	9,80	67	19,80	67	28,65	450
3,2	9,78	69	19,78	69	28,08	600

C.6 Naměřené hodnoty pro 5V zdroj

U _{vst~}	I _{vst~}	P _{vst}	U _{výst=}	I _{výst=}	P _{výst}	λ
V	mA	W	V	mA	W	%
9,71	22	0,21	5,10	0	0,00	0,00
9,64	150	1,45	5,09	100	0,51	35,20
9,60	275	2,64	5,09	200	1,02	38,56
9,53	403	3,84	5,08	300	1,52	39,68
9,51	514	4,89	5,08	400	2,03	41,57
9,41	630	5,93	5,07	500	2,54	42,76
9,36	757	7,09	5,06	600	3,04	42,85
9,28	870	8,07	5,04	700	3,53	43,70
9,28	991	9,20	4,88	800	3,90	42,45
9,30	922	8,57	4,70	820	3,85	44,95
9,35	874	8,17	3,74	700	2,62	32,04
9,40	749	7,04	2,95	600	1,77	25,14
9,44	630	5,95	1,72	510	0,88	14,75
9,40	730	6,86	1,13	600	0,68	9,88
9,33	861	8,03	0,98	700	0,69	8,54
9,30	990	9,21	0,90	800	0,72	7,82
9,41	1090	10,26	0,86	900	0,77	7,55
9,18	1226	11,25	0,57	1000	0,57	5,06