

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem
Martin Chudomel

Bakalářská práce

2014

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Chudomel**
Osobní číslo: **I11261**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Navrhňte a realizujte napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem.

Výstupní napětí bude plynule nastavitelné v rozsahu 0 až 20 V, též bude možné nastavit proudové omezení v rozsahu 0 až 2 A.

Mikrokontrolér bude sloužit pro řízení hodnoty výstupního napětí a proudové pojistky a pro měření veličin.

Pro nastavení napětí a proudu použijte rotační enkodér.

Měřené hodnoty budou zobrazovány na LCD nebo 7-segmentovém displeji, výška znaků minimálně 12,7 mm, formát minimálně 3-místný.

Řešte otázku vhodného nastavení proudové pojistky (zpožděná reakce, filtrace krátkých špiček apod.).

Rozvažte volbu vhodného typu mikrokontroléru pro realizaci úlohy.

Ověřte funkčnost zdroje a proveďte sérii měření jeho parametrů (minimálně: zatěžovací charakteristiky, zvlnění výstupního napětí při různých zatíženích, rychlost vybavení proudové ochrany,

citlivost změny výstupního napětí na změnu vstupního napětí, rychlost reakce výstupu při skokové změně zátěže).

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Lineární napájecí zdroje. 1. vyd. Praha: BEN -
technická literatura, 2001, 136 s. ISBN 80-7300-002-4.
[2] ATMEL CORPORATION. Atmel ATmega16 datasheet [online]. 1. vyd.
Atmel, 2010 [cit. 2013-11-01]. Dostupné z:
<http://www.atmel.com/Images/doc2466.pdf>

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Bc. David Matoušek
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

20. prosince 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

9. května 2014



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2014

Prohlášení autora

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9. 5. 2014

Martin Chudomel

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Davidu Matouškovi za jeho odbornou pomoc a rady.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za důvěru a psychickou i finanční podporu po dobu celého studia. Také bych chtěl poděkovat Simoně Konfrštové za oporu, kterou pro mě po dobu školních let byla. V neposlední řadě chci poděkovat všem kamarádům, kteří mi pomáhali, jmenovitě Karlu Jurycovi a Josefu Řehákovi za rady, bez kterých by tato práce neměla současnou podobu.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem lineárního napájecího zdroje. Jejím cílem je navrhnout a vyrobit regulovatelný napájecí zdroj. Popisuje také principy, druhy a parametry zdrojů.

Klíčová slova

napájecí zdroj, napětí, parametry zdroje, rotační enkodér

Title

Power supply controlled by a microcontroller

Annotation

This bachelor work describes the design of a linear power supply. Its objective is to design and manufacture a controllable power supply. It also describes the principles, types and sources parameters.

Keywords

Power supply, voltage, source parameters, rotary encoder

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK.....	9
SEZNAM GRAFŮ	10
ÚVOD:.....	11
1. NAPÁJECÍ ZDROJE	12
1.1. IDEÁLNÍ ZDROJ NAPĚTÍ.....	12
1.2. REÁLNÝ ZDROJ NAPĚTÍ.....	12
2. SÍŤOVÉ NAPÁJECÍ ZDROJE.....	14
2.1. SPÍNANÉ ZDROJE	14
2.1.1. <i>Spínané zdroje s regulací v sekundárním vinutí.....</i>	<i>14</i>
2.1.2. <i>Spínané zdroje s regulací v primárním vinutí</i>	<i>15</i>
2.1.3. <i>Popis jednotlivých bloků</i>	<i>16</i>
2.1.4. <i>Princip regulace</i>	<i>17</i>
2.1.5. <i>Shrnutí</i>	<i>18</i>
2.2. LINEÁRNÍ ZDROJE	18
2.2.1. <i>Popis jednotlivých bloků</i>	<i>20</i>
2.2.1.1. <i>Vstupní měnič.....</i>	<i>20</i>
2.2.1.2. <i>Zpětnovazební stabilizátor</i>	<i>20</i>
2.3. POROVNÁNÍ OBOU VARIANT.....	20
2.3.1. <i>Spínané zdroje</i>	<i>20</i>
2.3.2. <i>Lineární zdroje</i>	<i>21</i>
3. NÁVRH ZAPOJENÍ LINEÁRNÍHO ZDROJE.....	22
3.1. BLOKOVÉ SCHÉMA.....	22
3.1.1. <i>Transformátor a pojistky</i>	<i>23</i>
3.1.2. <i>Usměrňovač + filtr</i>	<i>24</i>
3.1.3. <i>Regulační tranzistor</i>	<i>29</i>
3.1.4. <i>Filtr a snímač výstupního napětí a proudu</i>	<i>31</i>
3.1.5. <i>Řízení regulačního tranzistoru.....</i>	<i>32</i>
3.1.6. <i>Napájení řídicích prvků.....</i>	<i>34</i>
3.1.7. <i>Periferie</i>	<i>35</i>
3.1.8. <i>Logika</i>	<i>37</i>
3.2. SCHÉMA ZAPOJENÍ	39
3.2.1. <i>Hlavní část zdroje</i>	<i>39</i>
3.2.2. <i>Periferie zdroje</i>	<i>41</i>
4. SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ.....	42
4.1. ROTAČNÍ ENKODÉR.....	42
4.2. ZOBRAZENÍ DAT NA DISPLEJI	43
4.3. NASTAVENÍ VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ A PROUDU	44
5. VÝROBA A OŽIVENÍ DESKY	45
6. MĚŘENÍ PARAMETRŮ ZDROJE	46

6.1.	MĚŘENÍ ZATĚŽOVACÍ CHARAKTERISTIKY ZDROJE.....	46
6.2.	MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO NAPĚTÍ ZDROJE A NAPĚTÍ NA VÝSTUPU RC FILTRU NA ZMĚNĚ OCR1A	47
7.	ZÁVĚR.....	49
7.1.	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	49
7.2.	MOŽNÉ ZLEPŠENÍ.....	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
	PŘÍLOHA A – ZDROJOVÝ KÓD PROGRAMU V ATMEL STUDIU.....	51

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Schematická značka a VA charakteristika ideálního zdroje napětí	12
Obrázek 2 - Schematická značka a VA charakteristika reálného zdroje napětí	13
Obrázek 3 - Spínaný zdroj s regulací v sekundárním vinutí[1].....	15
Obrázek 4 - Spínaný zdroj s regulací v primárním vinutí [1].....	16
Obrázek 5 - Náhradní schéma výstupní části spínaného zdroje pro snižování napětí [2]	17
Obrázek 6 - Cyklus spínání [1]	18
Obrázek 7 - Napájecí zdroj s lineární regulací [1]	19
Obrázek 8 - Blokové schéma vyrobeného lineárního zdroje.....	22
Obrázek 9 - schematická značka transformátoru	23
Obrázek 10 - Jednocestný usměrňovač[2].....	24
Obrázek 11 - Průběhy na jednocestném usměrňovači [2].....	25
Obrázek 12 - Dvoucestný usměrňovač [2].....	26
Obrázek 13 - Průběhy na dvoucestném i můstkovém usměrňovači [2]	26
Obrázek 14 - Můstkový usměrňovač [2].....	27
Obrázek 15 - Darlingtonovo zapojení	29
Obrázek 16 - schéma výstupního filtru a snímačů napětí a proudu	31
Obrázek 17 - Řízení regulačního tranzistoru.....	32
Obrázek 18 - náhradní schéma dolní RC propusti 2. řádu pro určení maximální hodnoty výstupního napětí	33
Obrázek 19 - Zapojení LM350[5]	34
Obrázek 20 - Obvod pro generování pomocného napětí -5 [V].....	35
Obrázek 21 - Simulace obvodu pro generování pomocného napětí -5,1 [V] v programu PSpice ...	35
Obrázek 22 - Princip rotačního enkodéru[3].....	36
Obrázek 23 - sedmi-segment se společnou anodou.....	36
Obrázek 24 - sedmi-segmentový LED displej[6].....	37
Obrázek 25 - Rozložení pinů [4].....	38
Obrázek 26 - schéma hlavní části zdroje.....	39
Obrázek 27 - periferie připojené ke zdroji	41
Obrázek 28 - Vývojový diagram rotačního enkodéru	42
Obrázek 29 - Algoritmus pro zobrazení napětí a proudu na displeji.....	43
Obrázek 30 - Algoritmus nastavení výstupního napětí a proudu	44
Obrázek 31 - Fotka finálního zapojení.....	45

Seznam tabulek

Tabulka 1 - pravdivostní tabulka rotačního enkodéru.....	42
Tabulka 2 - naměřené hodnoty výstupního napětí a napětí na výstupu RC filtru v závislosti na změně OCR1A	47

Seznam grafů

Graf 1 - zatěžovací charakteristika zdroje.....	46
Graf 2 - vnitřní odpor zdroje v závislosti na odebíraném proudu	47
Graf 3 - graficky znázorněná závislost výstupního napětí zdroje a napětí na výstupu RC filtru v závislosti na změně OCR1A	48

Úvod:

Napájecí zdroje jsou nedílnou součástí každé laboratoře. Najdeme je ve zjednodušené podobě v podstatě ve všech elektrických zařízeních, neboť všude se musí zajistit dodávka energie. Z tohoto důvodu je hlavní částí návrhu jakéhokoliv přístroje jeho napájení. U něj se musí určit a propočítat, jak velkou bude mít zařízení spotřebu při zvoleném napětí.

Tato bakalářská práce se však nezabývá implementovaným zdrojem uvnitř přístroje, ale samostatným zdrojem, který se používá pro napájení nejrůznějších aplikací nebo přístrojů. Těmito aplikacemi rozumíme například zapojení na kontaktním poli. Pokud má zdroj navíc proudové omezení, může se s ním například nabíjet baterie a zároveň chrání napájená zařízení.

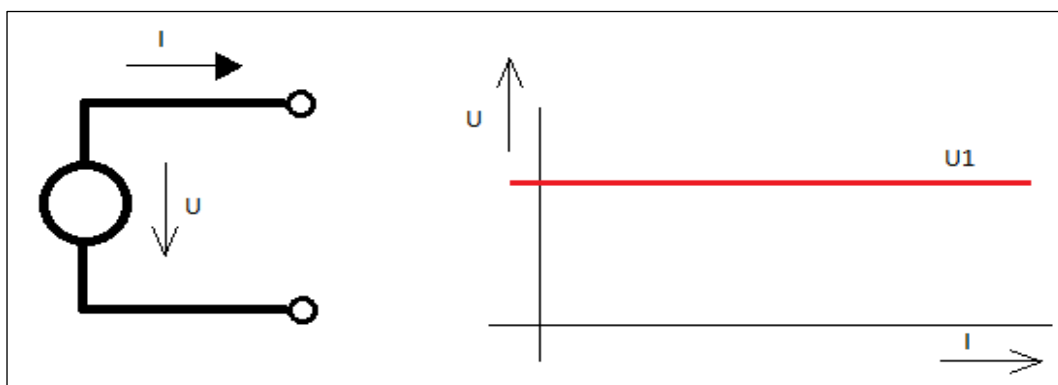
V první části bude uveden pohled na zdroje ideální a na zdroje reálné. Ve druhé části budou vyloženy dva základní principy dnešních zdrojů. Jsou to zdroje spínané a lineární. Budou probrány také jejich parametry a vlastnosti. Nejprve se zmíníme o spínaných zdrojích, jelikož náš zdroj bude realizován jako lineární a bude mu věnován zbytek práce. Rozhodnutí pro stavbu lineárního zdroje bylo provedeno na základě znalosti jeho dobrých vlastností, které jsou především menší výstupní zvlnění a jeho jednodušší realizace. Třetí část obsahuje konkrétní realizaci zdroje podle zadání. Bude zde uveden návrh, blokové schéma a vysvětlení jednotlivých bloků, v neposlední řadě se také zmíníme o dalších možnostech zapojení a jiných řešení. Ve čtvrté kapitole je znázorněna softwarová část pomocí vývojových diagramů. Celý kód je součástí přílohy. Pátá kapitola se věnuje výrobě a oživení desky. Poslední kapitola shrnuje naměřené vlastnosti a parametry zdroje.

1. Napájecí zdroje

Napájecí zdroje jsou elektrická zařízení schopná dodávat elektrickou energii do vnějšího obvodu. Jsou to v podstatě měniče energie, které převádějí vstupní energii (mechanickou, elektrickou, elektrochemickou atd.) na výstupní elektrickou energii. Na výstupních svorkách se pak objeví rozdílný potenciál napětí. Po uzavření obvodu jím teče elektrický proud.

1.1. Ideální zdroj napětí

Ideálním zdrojem napětí rozumíme takovou součástku, která dodává libovolné množství energie bez ohledu na to, jak velká zátěž je připojena. Je však jasné, že takové zdroje v praxi sestavit nelze. Můžeme se jim jen částečně přibližovat, ale to jen v určitém intervalu proudů. Jedná se o prvek, který dodává konstantní (zvolené) napětí, bez ohledu na proud, který zdrojem teče.



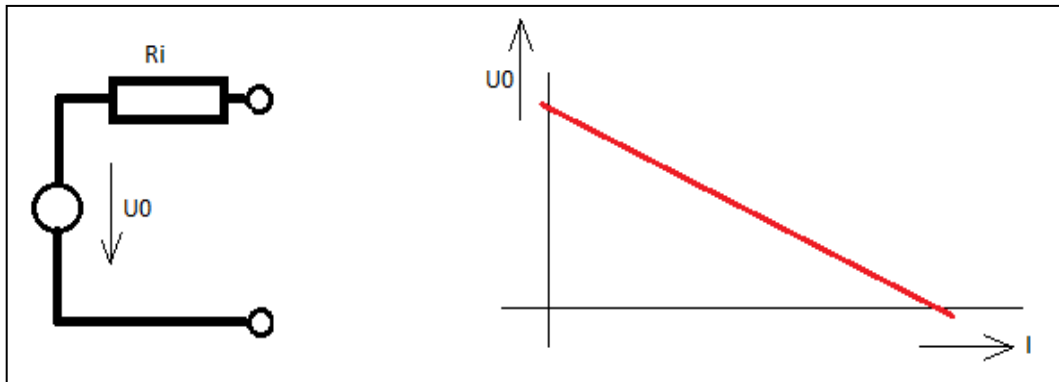
Obrázek 1 - Schematická značka a VA charakteristika ideálního zdroje napětí

$$U_1 = \text{konstanta}$$

1.2. Reálný zdroj napětí

U reálného zdroje napětí zatěžovací VA charakteristika vždy klesá, protože zdroj není schopen dodat neomezenou energii.

Skutečný napěťový zdroj, se kterým přijdeme v praxi do styku, lze nahradit spojením ideálního zdroje napětí a v sérii řazeného odporu R_i . Tento odpor nám určuje vnitřní odpor zdroje, který by měl být co nejmenší, ale nikdy nebude nulový.



Obrázek 2 - Schematická značka a VA charakteristika reálného zdroje napětí

Dále je dobré doplnit, že VA charakteristika u reálného zdroje klesá nelineárně, protože povaha zdroje není z principu lineární.

2. Síťové napájecí zdroje

Z historického hlediska byly první zdroje lineární (analogové) a až potom se vyvinuly zdroje spínané. Nejdříve ale probereme zdroje spínané, jelikož zdrojům lineárním bude věnován zbytek práce. Spínané zdroje se začaly objevovat až s příchodem výkonných spínaných tranzistorů. Jako spínací tranzistor se většinou používají MOSFETy, které jsou dnes nahrazovány integrovanými obvody typu TOPSwitch.

TOPSwitch jsou integrované obvody určené k řízení spínaných zdrojů. Tyto obvody jsou uplatňovány ve zdrojích s výkonem do 250 [W] a jsou určeny pro napájení přímo ze sítě 230 [V]. Velmi často se s nimi lze setkat v pouzdře TO220 a jsou tedy aplikačně velmi jednoduché, stejně jako třísvorkové stabilizátory s lineární regulací. Účinnost při využití zpětnovazebního řízení přesahuje 90 [%]. Dále jsou tyto obvody doplněny proudovou a tepelnou ochranou.

2.1. Spínané zdroje

Nejprve je dobré říci, že do této skupiny spadá celá řada zdrojů, které jsou však založeny na stejném principu a tím je nějaký spínací prvek. My se zde budeme zabývat pouze těmi nejpoužívanějšími, které jsou součástí většiny zařízení. Těmto zdrojům se říká *spínané zdroje s indukčnostmi*. I tyto zdroje lze dále dělit a to podle toho, na jaké straně transformátoru dochází k regulaci.

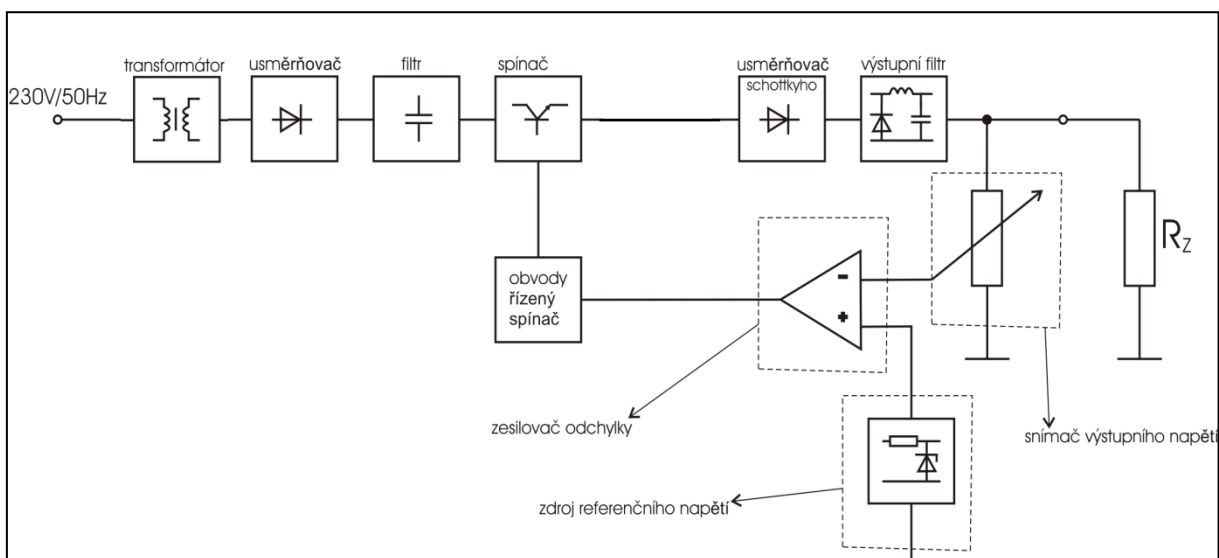
Spínané zdroje dále dělíme také podle pracovní frekvence. Existují i zdroje bez indukčnosti, kterým se říká nábojové pumpy. Tyto zdroje pracují na principu „pumpování“ náboje mezi kondenzátory. Jednoduše spínáme vhodně zapojené kondenzátory, což umožňuje násobit vstupní napětí, popř. můžeme realizovat jeho inverzi nebo dělení. Obvody na takovém principu se dělají převážně integrované, z tohoto důvodu jsou jen pro malé proudy. Pokud bychom chtěli odebírat větší výkon, musíme ještě připojit externí kapacity.

2.1.1. Spínané zdroje s regulací v sekundárním vinutí

Spínané zdroje s regulací v sekundárním vinutí využívají transformátor jen na svém vstupu. Síťové napětí je nejprve převedeno na určité napětí, které je následně usměrněno. Poté je vyhlazeno (zbaveno střídavé složky) vstupním filtrem a následně je rozkmitáno na střídavý obdélníkový průběh, který má frekvenci vyšší než 20 [kHz] (vyšší než akustické pásmo). Dnes se používá frekvence okolo 1 [MHz]. Toto napětí je pak zase usměrněno a vyhlazeno výstupním filtrem. Do obvodu je vždy zařazena zpětná vazba, která kontroluje velikost výstupního napětí a zároveň řídí spínání spínacího tranzistoru. U těchto zdrojů je kladen velký důraz na použité součástky, zejména na použitý spínač, transformátor a výstupní diody, které musí být velice rychlé a musí mít co nejmenší kapacitu přechodu.

Výhody: Díky transformátoru, který je zařazen na vstupu, může být spínací tranzistor nízkonapěťový. Další výhodou je, že rušivá napětí nepronikají přes transformátor do sítě.

Nevýhody: Velký objem a hmotnost kvůli použitému transformátoru a vyhlazovacím kondenzátorům.



Obrázek 3 - Spínaný zdroj s regulací v sekundárním vinutí[1]

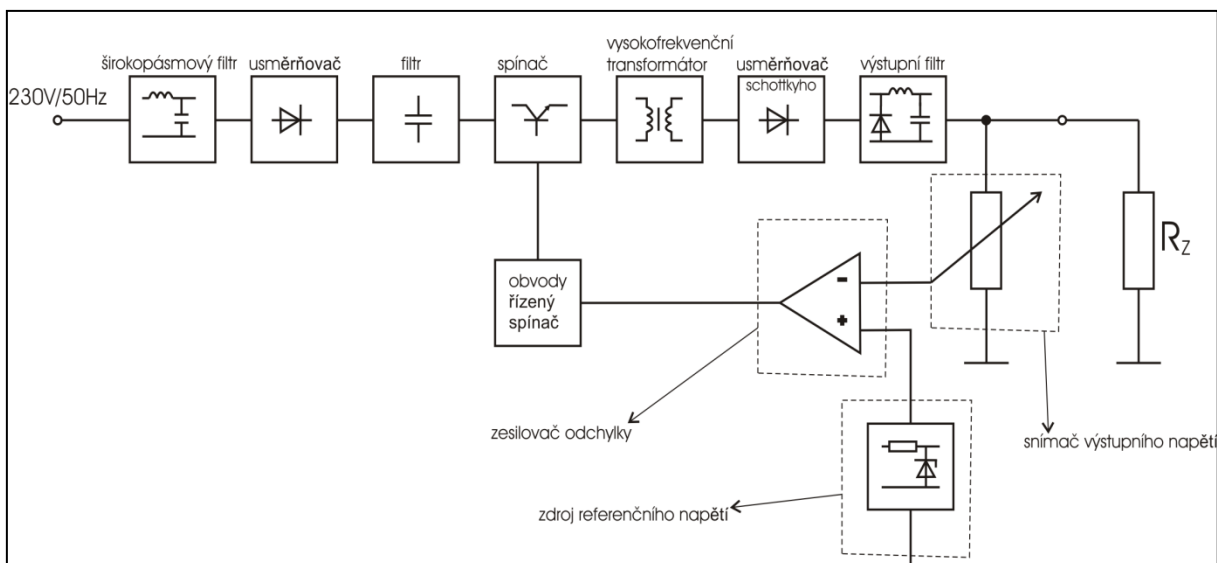
2.1.2. Spínané zdroje s regulací v primárním vinutí

Spínané zdroje s regulací v primárním vinutí jsou nejpoužívanějšími zdroji a to především kvůli jejich malým rozměrům a velkému výkonu.

Síťové napětí, které je přivedeno na vstup, je nejprve usměrněno pomocí diodového můstku a potom vyhlazeno na vstupním širokopásmovém filtru, který zároveň zabraňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje do sítě. Pak se napětí rozkmitá na obdélníkový průběh pomocí spínacího tranzistoru, který pracuje na frekvenci vyšší než 20 [kHz]. Ten je opět řízen obvodem zpětné vazby, která zajišťuje jeho spínání a dále hlídá, aby výstupní napětí bylo konstantní. Dále je napětí přivedeno na primární vinutí impulsního transformátoru. Na straně sekundárního vinutí máme již námi zvolené napětí, které je opět usměrněno rychlými Schottkyho diodami a filtrováno výstupním filtrem.

Výhody: Velká účinnost, malé rozměry a hmotnost.

Nevýhody: Nutnost použít vysokonapěťový spínací tranzistor. Velké výstupní zvlnění a nutnost zařazení vstupního filtru, který brání pronikání rušení ze zdroje do sítě. Špatné dynamické vlastnosti (kolísání výstupního napětí, při skokové změně zátěže).



Obrázek 4 - Spínaný zdroj s regulací v primárním vinutí [1]

2.1.3. Popis jednotlivých bloků

Širokopásmový filtr: Zabraňuje pronikání rušivých signálů ze zdroje do sítě. Toto rušení vzniká na spínacím prvku, který má vysoký kmitočet se strmými hranami.

Usměrňovač: Usměrňovače se dnes používají výhradně v můstkovém zapojení. Na vstupu máme střídavé síťové napětí (230V/50Hz), na výstupu máme stejnosměrné napětí, které v sobě má střídavou složku o frekvenci 100 [Hz]. Diody můstku musí být vhodně dimenzovány, jelikož jsou v trvalé zátěži.

Filtr: Blok filtru je tvořen elektrolytickým kondenzátorem, popřípadě jich může být paralelně řazeno více. Tato část zdroje slouží k odfiltrování střídavé složky, která zde zůstala po usměrnění. Pro výpočet kondenzátoru musíme určit činitel zvlnění definovaný jako:

$$p = \frac{\Delta U_2}{U_2} * 100 [\%] \quad (1)$$

Kde ΔU_2 je mezivrcholová (peak-to-peak) hodnota výstupního stejnosměrného zvlnění. Napětí U_2 je střední hodnota výstupního napětí.

Dále musíme znát odebíraný proud I . Poté můžeme dosadit do následujícího vztahu:

$$C = \frac{k * I}{p * U_2} [\mu F, mA, \%, V] \quad (2)$$

Kde „ k “ je konstanta (pro dvoucestné zapojení je rovna 300, pro jednocestné usměrnění 600).

Spínač: Převádí usměrněné napětí sítě na obdélníkový průběh s frekvencí 20 [kHz] až 1 [MHz], na něj jsou kladeny zvláštní požadavky, které musí splňovat. Z toho důvodu je

nutné, aby byl schopný spínat výše zmíněné frekvence a aby byl schopen vysokého závěrného napětí U_{CE} a velmi malé spínací resp. vypínací časy. Další důležitou vlastností je proud I_D (proud Drainu). Doba sepnutí by měla být menší než 2 [%] z pracovního cyklu zdroje, aby docházelo k co nejmenším ztrátám.

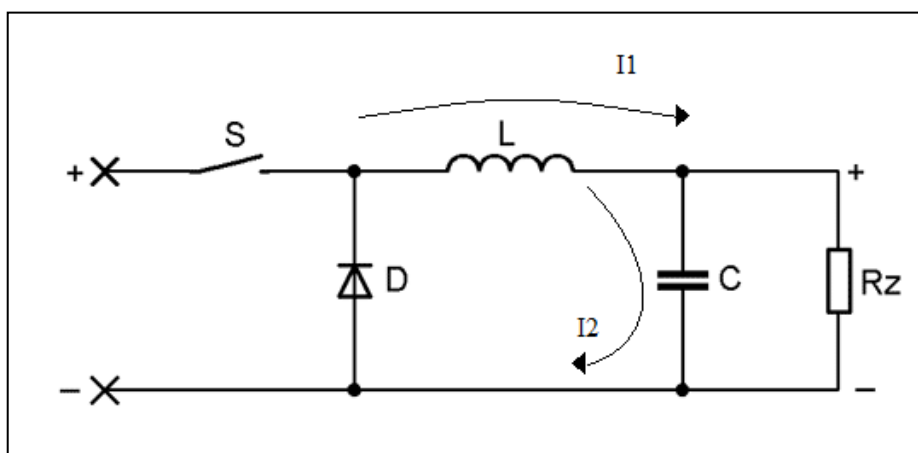
Vysokonapět'ový (Impulsní) transformátor: Impulsní transformátor je základním a nejdůležitějším prvkem pro činnost spínaného zdroje, který nám určuje celkové vlastnosti zdroje a zajišťuje změnu amplitudy obdélníkového napětí. Jeho návrh je asi nejtěžším bodem z celého zdroje.

Usměrňovač: U výstupního usměrňovače nemůžeme použít klasické usměrňovací diody. Tyto diody musí být vhodně dimenzovány, aby stihly usměrnit obdélníkové napětí a kmitočtu až 1 [MHz]. Musí tedy mít rychlé zotavovací časy a menší úbytek napětí v propustném směru, zároveň se podílí na celkové účinnosti zdroje.

Výstupní filtr: Výstupní filtr potlačuje střídavou složku po usměrnění obdélníkového průběhu s frekvencí až 1 [MHz]. Musí mít velký činitel potlačení zvlnění, aby výstupní napětí bylo kvalitně vyhlazené.

Obvod zpětné vazby: V tomto obvodu je zařazeno několik bloků, které slouží k regulaci a stabilizaci výstupního napětí. Je zde zdroj referenčního napětí a také generátor pracovní frekvence pro spínání spínače.

2.1.4. Princip regulace



Obrázek 5 - Náhradní schéma výstupní části spínaného zdroje pro snižování napětí [2]

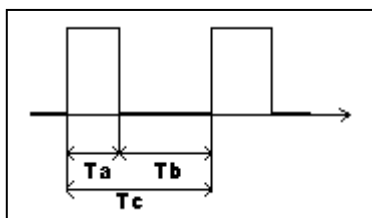
Princip zapojení je následující: pokud je spínač S sepnut (spínací tranzistor je zde nahrazen spínačem), akumuluje se v indukčnosti L energie a výstupní napětí roste. Jestliže se S rozezne, cívka L se snaží držet směr proudu I_1 a energie v ní se mění na nabíjecí proud I_2 , který nabíjí kondenzátor C , napětí na výstupu klesá. Aby však mohl proud I_2 dobíjet kapacitu, musí se obvod uzavřít přes diodu D .

Výstupní napětí U_{OUT} může být maximálně tak veliké, jako je U_{IN} (avšak pomocí trochu jiného uspořádání součástí může být $U_{OUT} > U_{IN}$). Ale také ho můžeme měnit pomocí

řízení doby sepnutí a doby vypnutí spínače (Obr. 8.). Pokud chceme výstupní napětí zvýšit, musíme prodloužit dobu t_1 a zkrátit t_2 . Chceme-li napětí naopak snížit, musíme t_1 zkracovat a t_2 prodlužovat.

Regulace časů t_1 a t_2 může být prováděna dvěma způsoby:

- A) Jeden z časů je konstantní (z principu nezáleží na tom, jaký z nich to bude) a mění se čas druhý. Toto řešení však vede na obvody s proměnnou frekvencí, což může někdy být na škodu.
- B) Součet obou časů je konstantní $t=t_1 + t_2 = \text{konstanta}$. K regulaci dochází tím způsobem, že se doba t_1 zkrátí a t_2 se o stejnou část prodlouží. Tento princip je v dnešní době nejrozšířenější.



Obrázek 6 - Cyklus spínání [1]

$$T_c = T_a + T_b \quad (3)$$

doba cyklu = doba sepnutí + doba rozepnutí

2.1.5. Shrnutí

Spínané zdroje mají většinou na výstupu více konstantních napětí s různými výkony (např. počítačový zdroj). Napájeny jsou ze sítě 230 V/50 Hz a liší se vnitřním zapojením. Na výstupu však vždy musí být stabilizované napětí s daným zvlněním a výstupním proudem. Ve svém zapojení mají vždy obvod zpětné vazby, která na vše dohlíží a zpravidla bývá galvanicky oddělena z důvodů bezpečnosti, a to buď transformátorem, nebo optočlenem. Dnes se výhradně používají zapojení s vysokonapěťovým spínačem, který bývá často realizován pomocí Darlingtonova zapojení s MOSFET. Na tyto tranzistory jsou kladeny vysoké požadavky, které musí splňovat. Musí mít velké zesílení a mezní kmitočet vyšší než 4 [MHz]. Velký důraz je také kladen na výstupní usměrňovač, který musí být velice rychlý. Často bývá realizován pomocí Schottkyho diod, ale používají se i jiné polovodičové součástky jako klopné obvody nebo hradla. [1]

2.2. Lineární zdroje

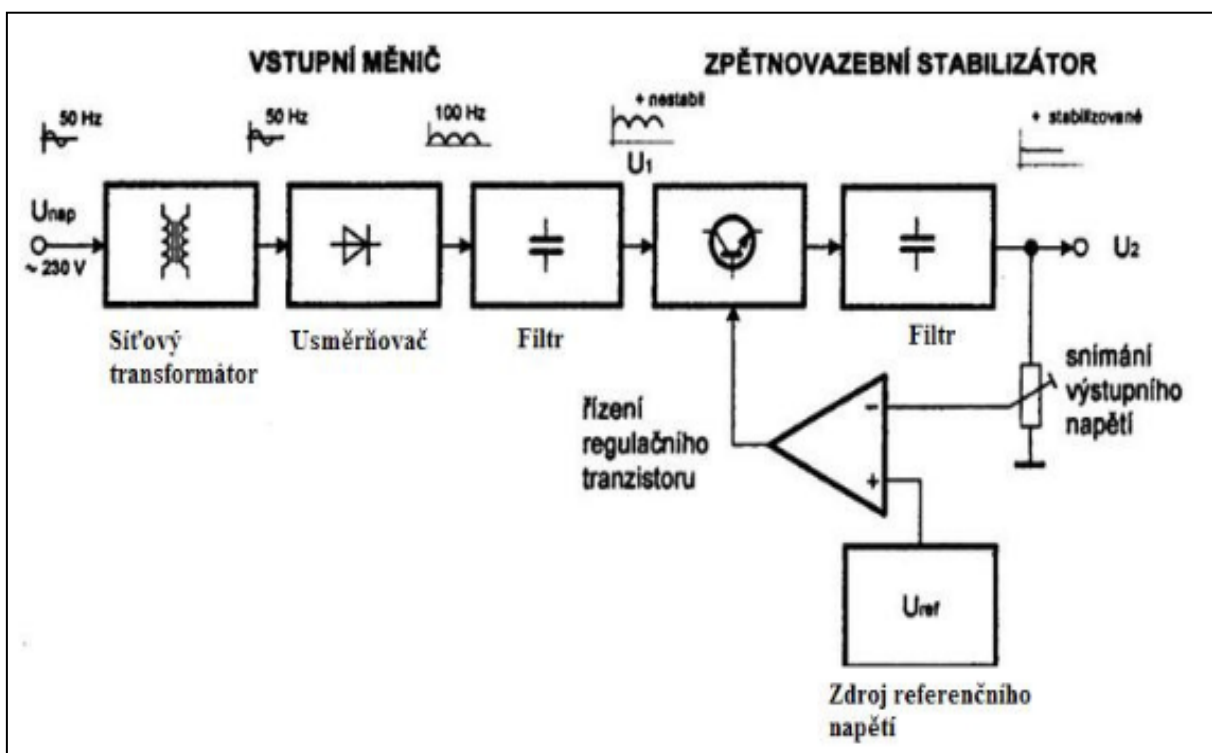
Lineární zdroje jsou z principu jednodušší než spínané zdroje. U lineárních zdrojů nedochází ke spínání výkonového prvku, nýbrž pouze ke změně jeho odporu. Tato regulace je hlavní nevýhodou lineárních zdrojů, poněvadž zde dochází ke ztrátě energie a tato ztráta způsobuje nadměrné ohřívání, ztrátový výkon je navíc třeba odvádět.

Na rozdíl od spínaných zdrojů se jako výkonový prvek, který reguluje výstupní napětí, používá obvykle bipolární tranzistor. Ten zde pracuje jako rezistor s proměnným odporem. U spínaného zdroje je unipolární tranzistor zatěžován impulsně.

Stabilitu výstupního napětí ovlivňuje hned několik faktorů. Jako jsou proudové zatížení zdroje, změny vstupního napětí, změny parametrů součástek v průběhu času a teplotní změny. Stabilizační činitel je definován takto:

$$p = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} = \frac{U_2}{U_1} * \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \quad (4)$$

kde U_1 je vstupní napětí, ΔU_1 je absolutní změna vstupního napětí, U_2 je výstupní napětí, ΔU_2 je absolutní změna výstupního napětí.



Obrázek 7 - Napájecí zdroj s lineární regulací [1]

Náš zdroj se bude realizovat jako lineární pro jeho dobré vlastnosti. Z principu má menší výstupní zvlnění a pro realizaci je lehčí. V následujících kapitolách budou rozebrány jednotlivé bloky lineárního zdroje.

2.2.1. Popis jednotlivých bloků

2.2.1.1. Vstupní měnič

Vstupní měnič se skládá ze **tří** částí, které významně ovlivňují vlastnosti zdroje.

a) Síťový transformátor

Síťové transformátory u lineárních zdrojů nejsou tak obtížné jako u zdrojů spínaných, nemusí pracovat s frekvencí až 1 [MHz]. Zde nám slouží ke změně síťového napětí (230V/50Hz) na požadovanou hodnotu, ale také ke galvanickému oddělení obvodů zdroje od sítě. Také zabraňuje pronikání vyšších harmonických složek ze zdroje zpět do napájecí sítě. Ovlivňuje také celkovou účinnost zdroje.

b) Usměrňovač

Slouží pro převod střídavého napětí dvojí polarity z výstupu transformátoru na napětí, které má jen kladné půlvlny. Usměrňovač je doplněn o nabíjecí kapacitu (jednoduchý filtr), která vytvoří z kladných půlvln, jež obsahují nulové hodnoty, napětí s nenulovými hodnotami.

c) Filtr

Jedná se o zapojení kapacity paralelně k usměrňovači. Je vždy součástí vstupního měniče (pouze u nabíječek akumulátorů není). Na jeho výstupu je zvlněné napětí, které však již neklesá k nule. Velikost kapacity se určí s ohledem na požadované zvlnění.

2.2.1.2. Zpětnovazební stabilizátor

Zpětnovazební stabilizátor využívá zmenšování výstupní odchylky napětí oproti požadovanému napětí, pomocí zavedené záporné zpětné vazby. Tato odchylka je zesílena a přivedena na vstup stabilizátoru tak, aby se výstupní odchylka zmenšila. Existují stabilizátory napětí nebo proudu a také stabilizátory sériové nebo paralelní. Toto dělení je určeno tím, zda je regulační tranzistor v sérii se zátěží nebo je k zátěži připojen paralelně.

2.3. Porovnání obou variant

2.3.1. Spínané zdroje

Výhody: malá hmotnost, velká účinnost, vhodné pro široký rozsah vstupního napětí, vhodné pro velké výstupní výkony, možnost galvanického oddělení, $U_{OUT} > U_{IN}$ je zde možné

Nevýhody: zdroj rušivých signálů (musí se řešit), složitější návrh, větší počet součástek, pomalá odezva na změnu zátěže

2.3.2. Lineární zdroje

Výhody: menší zvlnění, žádné rušení okolí, žádné cívky ani transformátory, lehčí návrh, méně součástek, nízká cena, rychlá odezva na změnu zátěže

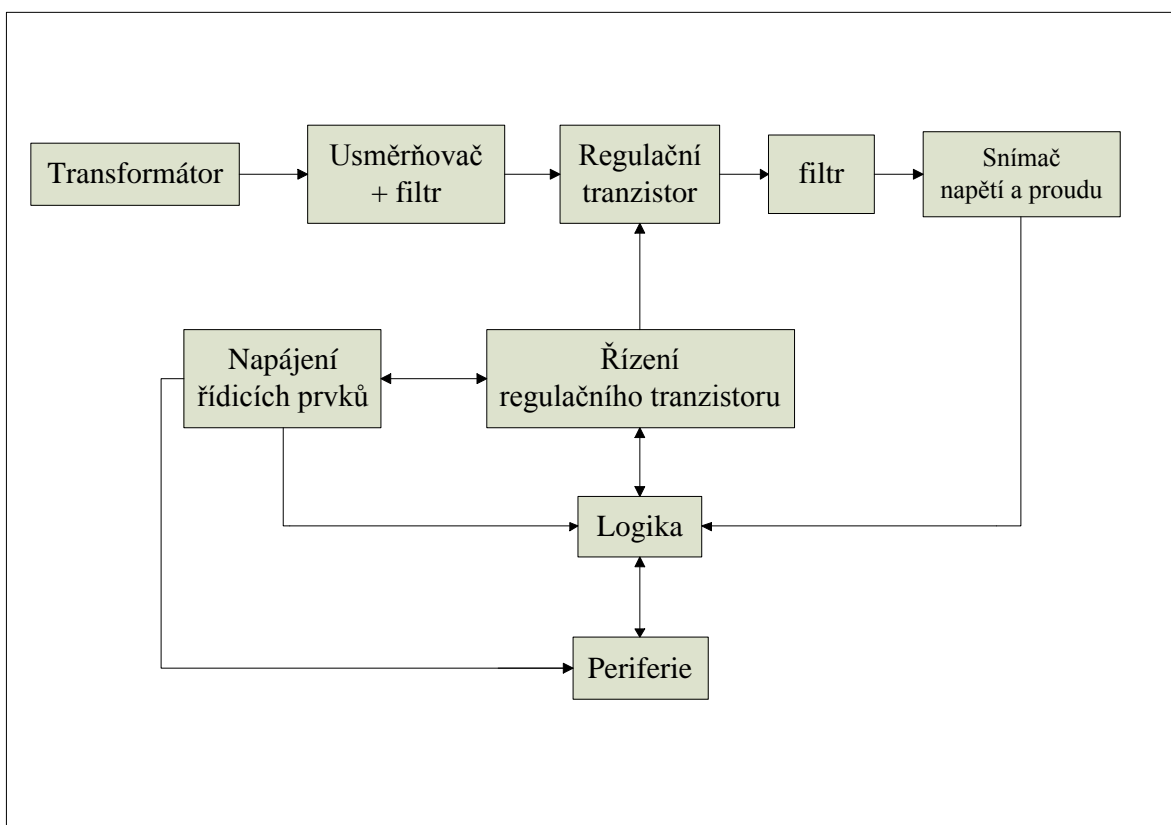
Nevýhody: hodně hřeje, cena roste s výkonem, menší účinnost, větší hmotnost, snaha o minimalizaci rozdílu $U_{OUT} - U_{IN}$, $U_{OUT} > U_{IN}$ nelze

3. Návrh zapojení lineárního zdroje

Tento napájecí zdroj je navržen na dvou DSP (deska plošných spojů). První deska je celý funkční zdroj a druhá deska obsahuje pouze zobrazovací a ovládací část.

Blokové schéma je hodně podobné schématu na obrázku 7, zde ale máme pár věcí navíc. Většina čistě lineárních jednoduchých zdrojů reguluje výstupní napětí pomocí potenciometru, zde se k regulaci používá mikrokontrolér. Ten vše obsluhuje a řídí, má také na starosti zobrazení nastavené hodnoty i její samotné nastavování. V následujících podkapitolách budou probrány jednotlivé bloky a jejich princip. Budou probrány možnosti jednotlivých zapojení a výběr konkrétních součástek, které zajistí správnou funkci celku, v neposlední řadě také ukážeme výpočet chladičů pro výkonově namáhané prvky.

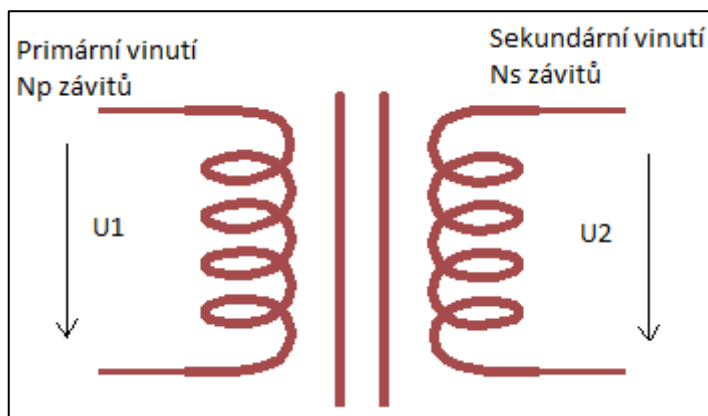
3.1. Blokové schéma



Obrázek 8 - Blokové schéma vyrobeného lineárního zdroje

Takto vypadá principiální blokové schéma našeho lineárního zdroje. V několika dalších podkapitolách si probereme detailněji jednotlivé bloky a jejich řešení. Dále uvedeme další možná řešení a zapojení jednotlivých bloků, které se v praxi také používají.

3.1.1. Transformátor a pojistky



Obrázek 9 - schematická značka transformátoru

Návrh transformátoru jako takového je složitá a problematická věc. Často nestačí vše jen dobře propočítat, ale je důležité mít určitý cit pro výrobu transformátoru, který se získá až delší praxí. Proto se zde nebudeme zabývat celým a komplikovaným návrhem, ale pouze základními výpočty jako je výkon transformátoru, velikost potřebného napětí na sekundární straně a výpočet pojistek, které jsou jak na primárním, tak i na sekundárním vinutí.

V Evropě pracují transformátory s kmitočtem sítě 50 Hz/230 V a v USA s 60 Hz/110 V. Pro jejich realizaci se používají křemíkové plechy, které nejsou vhodné pro vyšší kmitočty, kvůli rostoucím ztrátám. Pro ideální transformátor platí, že velikost napětí a proudu na sekundární straně je dána poměrem závitů na primární a sekundární straně a výkon se rovná příkonu.

$$p = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_s}{N_p} = \frac{I_1}{I_2} \quad (5)$$

Tento vzorec však platí pouze pro ideální transformátor. U reálného vznikají ztráty a jeho účinnost je vždy nižší než 100 [%]. Ztráty vznikají v jádře transformátoru a jeho primárním i sekundárním vinutí díky reálnému odporu těchto vinutí.

Náš zdroj by měl mít podle zadání na výstupu napětí 20 [V] a proud 2 [A]. Z tohoto důvodu byl zvolen transformátor s napětím 17 [V]. Toto napětí po můstkovém usměrnění dosáhne hodnoty přibližně.

$$U_{OUT} = U_{IN} * \sqrt{2} - 2 * U_S \quad (6)$$

$$U_{OUT} \approx 23 [V]$$

Kde U_S je ztráta na diodě (0,5-1).

Proud sekundárního vinutí je 2,94 [A], což dává výkon:

$$P = U * I \quad (7)$$

$$P \approx 50 \text{ [VA]}$$

Pojistky jsou nedílnou součástí každého zdroje. Je to nejjednodušší způsob, jak zabránit zkratu a zničení součástek. U našeho zdroje je pojistkou osazena jak primární, tak sekundární strana transformátoru. Na primární straně byla zvolena pomalá pojistka na 4 [A] právě kvůli možným špičkám vlivem velkých kapacit. Na sekundární stranu se dopočítala pojistka podle vztahu (5) o velikosti cca. 0,3 [A].

$$I_1 = I_2 * \frac{U_2}{U_1} \approx 0,3 \text{ [A]}$$

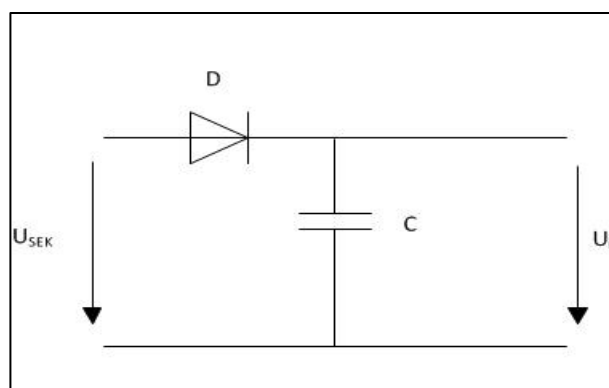
Kde I_2 je 4 [A].

3.1.2. Usměrňovač + filtr

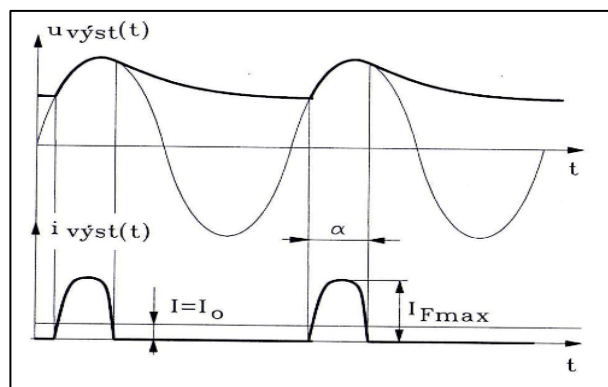
V této části probereme několik zapojení usměrňovačů (jednocestné, dvoucestné, můstkové), abychom si mohli vybrat to nejvhodnější. V praxi se však používá výhradně zapojení můstkové, protože má nejlepší vlastnosti a to si také ukážeme. Usměrňovač je vždy doplněn o nabíjecí kondenzátor (jednoduchý filtr), ten je vynechán jen výjimečně u speciálních zapojení (nabíjení akumulátorů). U jednotlivých zapojení budou vypočítány velikosti nabíjecích kapacit a jejich vhodné dimenzování, dále bude probrán rovněž návrh a dimenzování usměrňovacích diod. Vše bude počítáno pro parametry našeho zdroje, které jsou 24 [V] (efektivní hodnota na výstupu transformátoru) a 2 [A].

Jednocestný usměrňovač

Jedná se o nejjednodušší zapojení usměrňovače, což má za následek nejhorší parametry.



Obrázek 10 - Jednocestný usměrňovač[2]



Obrázek 11 - Průběhy na jednocestném usměrňovači [2]

Kvůli tomu, že je v zapojení pouze jedna dioda, je na výstup propuštěna jen každá kladná půlvlna a každá záporná je potlačena. To je nevýhodné, poněvadž jedna půlperioda je vždy vynechána a dochází tak ke zbytečným ztrátám. Tento nedostatek částečně kompenzuje kondenzátor, který se snaží pokrýt dobu, kdy je na vstupu záporná půlvlna. Úhel α je úhel, po kterém diodou teče proud. Tento proud nabývá velkých hodnot, neboť v krátké době musí nabít poměrně velký kondenzátor.

Výpočet filtrační kapacity:

Velikost filtračního kondenzátoru se nejrychleji navrhne pomocí empirického vztahu:

$$C = \frac{600 * I}{p * U_2} [\mu F, mA, \%, V]$$

Kde p je zvlnění, I je výstupní proud a U_2 je výstupní napětí. Pokud není velikost zvlnění specifikována, použije se obvykle do 10 [%].

$$C = \frac{600 * 2000}{10 * 24} = 5 [mF]$$

Pokud hodnota kondenzátoru neodpovídá žádné z vyráběné řady kondenzátorů, volíme vždy nejbližší vyšší hodnotu.

Dále musíme určit napětí kondenzátoru, které je rovno:

$$U_{cmin} = U = 24 [V]$$

Zde platí stejné pravidlo jako pro velikost kondenzátoru, vždy se volí nejbližší vyšší hodnota. Nutno podotknout, že tato hodnota je skutečně minimální možná.

Dimenzování diod:

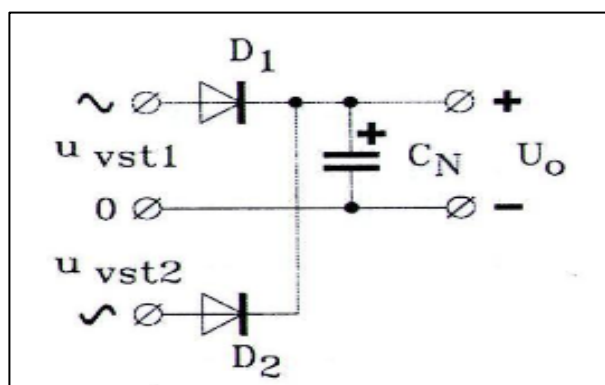
$$U_{Rmax} = 2 * U = 2 * 24 = 48 [V]$$

$$I_{Fmax} = I = 2 [A]$$

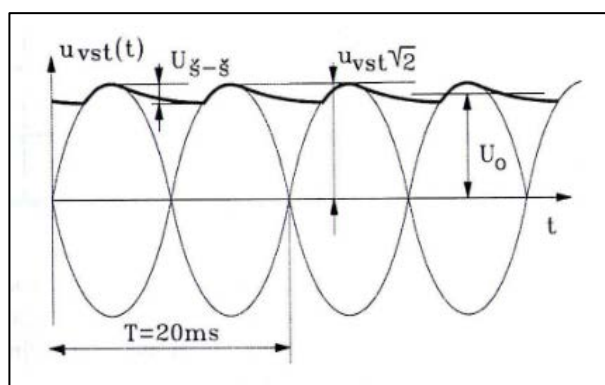
V řadě případů je na diodě tak velký ztrátový výkon, že je nutno ji připevnit na chladič. Volba diody se provádí vždy s rezervou minimálně 20-100 [%].

Dvoucestný usměrňovač

Toto zapojení má dobré vlastnosti, ale jednu velkou nevýhodu. Touto nevýhodou je nutnost transformátoru, který má vyvedeny dvě sekundární vinutí.



Obrázek 12 - Dvoucestný usměrňovač [2]



Obrázek 13 - Průběhy na dvoucestném i můstkovém usměrňovači [2]

Toto zapojení využívá dvojitého symetrického vinutí a ve výsledném průběhu není teda žádná „pauza“ v podobě vynechání záporné půlvlny. Další výhodou je to, že kondenzátor zde nemusí pokrývat tak velké mezery a výstupní napětí je tedy méně zvlněné. Dokonce nám stačí poloviční kapacita oproti jednocestnému usměrňovači při zachování stejného zvlnění. Dále je dobré říci, že napětí za usměrňovačem má dvojnásobnou frekvenci, tedy 100 [Hz].

Výpočet filtrační kapacity:

Velikost filtrační kapacity se opět provede na základě požadavku na výstupní zvlnění podle vztahu:

$$C = \frac{300 * I}{p * U_2} [\mu F, mA, \%, V]$$

Vzorec je prakticky stejný až na změnu konstanty! Po dosazení dostáváme:

$$C = \frac{300 * I}{p * U_2} = \frac{300 * 2000}{10 * 24} = 2,5 [mF]$$

Z výsledku je patrné, že velikost filtrační kapacity při požadavku na stejné zvlnění je poloviční.

Napětí na kondenzátoru se určí stejně jako u jednocestného usměřovače.

$$U_{cmin} = U = 24 [V]$$

Dimenzování diod:

Napětově se diody dimenzují shodně jako u jednocestného usměřovače.

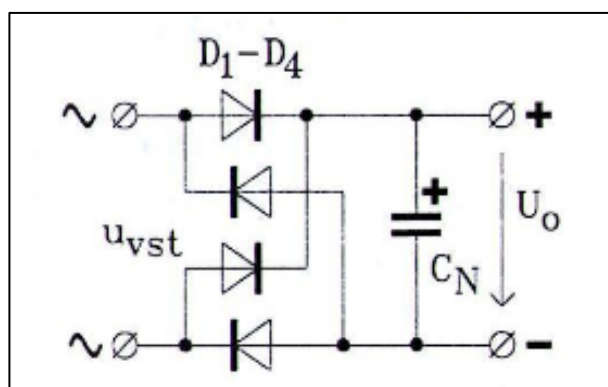
$$U_{Rmax} = 2 * U = 2 * 24 = 48 [V]$$

Proudové dimenzování diody vychází z předpokladu, že jednou diodou teče pouze polovina výstupního proudu. Rozhodující je střední hodnota proudu diodou za dobu jedné periody, ta způsobuje výkonové namáhání diody. Proudově jsou však diody mnohonásobně přetížitelné. Výsledný vztah pro dimenzování proudu vypadá následovně.

$$I_{Fmax} = \frac{I}{\pi} [A]$$

Můstkový usměřovač

Jedná se o nejpoužívanější zapojení, které se vyrábí i jako jednotlivá součástka se čtyřmi vývody. Jeho hlavní výhodou je ta, že není potřeba transformátor, který má dvě symetrická vinutí.



Obrázek 14 - Můstkový usměřovač [2]

Výstupní průběh je shodný s dvoucestným zapojením, proto ho zde nebudeme uvádět. Výstupní zvlnění má opět frekvenci 100 [Hz].

Výpočet filtrační kapacity:

Volba filtrační kapacity se provádí opět na základě požadavku na výstupní zvlnění podle vzorce:

$$C = \frac{300 * I}{p * U_2} = \frac{300 * 2000}{10 * 24} = 2,5 [mF]$$

Jak je vidět z výsledku, stačí nám poloviční velikost filtrační kapacity při zachování stejného zvlnění oproti jednocestnému usměřovači. Stejného parametru dosáhl i dvoucestný usměřovač.

Volba jmenovitého napětí se určí stejně jako u jednocestného a dvoucestného usměřovače. Tedy:

$$U_{cmin} = U = 24 [V]$$

Dimenzování diod:

Napěťové dimenzování diod je velmi obtížné, jelikož existují dvě hypotézy. První říká, že se napětí na dvou diodách rozloží rovnoměrně a stačilo by je navrhnout podle vztahu:

$$U_{Rmax} = U = 24 [V]$$

To je ale velmi nepravděpodobný stav a je tedy nutné zvážit druhou hypotézu, která říká, že dvě závěrně polarizované diody mají odlišné parametry a jejich závěrné napětí bude také velmi odlišné. Z toho důvodu se diody dimenzují na plné závěrné napětí:

$$U_{Rmax} = 2 * U = 2 * 24 = 48 [V]$$

To ale také není úplně pravda, protože skutečné hodnota leží někde mezi těmito intervaly, ale z tohoto vztahu se v můstkovém zapojení vychází, neboť se diody dimenzují s velkou rezervou. Kvůli tomu volíme diody s rezervou ještě okolo 50 [%].

Proudové dimenzování diody vychází z předpokladu, že jednou diodou teče pouze polovina výstupního proudu. Rozhodující je střední hodnota proudu diodou za dobu jedné periody, ta způsobuje výkonové namáhání diody. Proudově jsou však diody mnohonásobně přetížitelné. Výsledný vztah pro dimenzování proudu proto vypadá shodně jako u dvoucestného usměřovače.

$$I_{Fmax} = \frac{I}{\pi} [A]$$

Výběr našeho usměřovače

Do našeho zapojení byl vybrán můstkový usměřovač kvůli jeho parametrům. Nemusíme proto kupovat transformátor, který má dvě vinutí, ale musíme mít čtyři diody. Jejich cena je však zanedbatelná.

Byly zvoleny diody 1N5408, které mají závěrné napětí 1000 [V] a maximální proud 3 [A], přestože by stačily obyčejné 1N4007, které mají shodné závěrné napětí, ale maximální proud může nabývat hodnoty pouze 1 [A], což by teoreticky mělo stačit, neboť každou diodou prochází pouze polovina maximálního proudu, který je 2 [A]. Ale diody v usměrňovačích se dimenzují s rezervou klidně okolo 100 [%], proto byly zvoleny výkonnější.

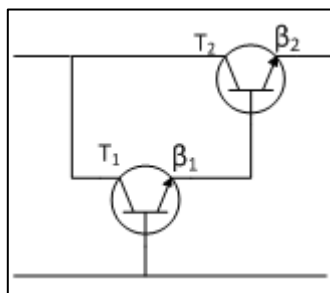
Velikost filtrační kapacity byla zvolena o hodnotě 4700 [μ F]. Velikost napětí U_{cmin} byla zvolena na hodnotu 50 [V].

Po upravení a dosazení do vzorečku pro výpočet velikosti filtrační kapacity dostáváme následující velikost zvlnění:

$$p = \frac{300 * I}{C * U_2} = \frac{300 * 2000}{4700 * 24} = 5,3 \text{ [%]}$$

3.1.3. Regulační tranzistor

Jako regulační prvek jsou zde dva tranzistory, které jsou v Darlingtonově zapojení. Toto zapojení se používá tam, kde je potřeba velké proudové zesílení, neboť výsledné zesílení je násobkem dílčích zesílení. To je také hlavní výhoda tohoto zapojení, které bylo zvoleno z důvodu malého proudového zatěžování mikrokontroléru.



Obrázek 15 - Darlingtonovo zapojení

$$\beta' = \beta_1 * \beta_2 \text{ [-]} \tag{8}$$

Takto za sebe můžeme zařadit i více tranzistorů a výsledné zesílení je násobkem všech dílčích. Toto zapojení se také vyznačuje velkým vstupním odporem. Jeho nevýhodou je však větší úbytek napětí, který narůstá s počtem tranzistorů, jež jsou v tomto zapojení.

V našem zapojení je jako pomocný tranzistor T_1 použit obyčejný *BD237*, který má podle katalogových hodnot zesílení $\beta = h_{21} = 40$. Tento tranzistor není nijak výkonově namáhán, a proto nemusí být umístěn na chladiči. Tranzistor T_2 bude probrán později, jelikož se nejdřív musí spočítat chladič a poté vybrat tranzistor s vhodnými parametry.

Výpočet chladiče pro T₂:

Tímto tranzistorem bude procházet výkon maximálně 26 [W], protože na výstupu transformátoru máme maximálně 23 [V], z toho střední hodnota je 14 [V] ($23 \frac{2}{\pi}$) a proud bude omezován na 2 [A], to dává podle rovnice (7) výkon právě 26 [W].

Nejdřív si musíme vypočítat tepelný odpor, který se spočítá odečtením teploty okolí od maximální teploty pouzdra tranzistoru a podělením maximálním ztrátovým výkonem.

$$R = \frac{\Delta t}{P} = \frac{t_j - t_a}{P} = \frac{150 - 30}{26} = 4,61 \text{ [K/W]} \quad (9)$$

Poté musíme vypočítat odpor konstrukce při prostupu tepla.

$$R_T = R_S + R_{CH} + R_P \quad (10)$$

Kde:

R_S je teplotní odpor součástky.

R_{CH} je teplotní odpor chladiče, který musíme zvolit tak, aby celkový součet odporů byl nižší než 4,61 [°K/W].

R_P je teplotní odpor přechodu, který je průměrně roven 0,5 [K/W].

Rovnice (10) nám dává určitou svobodu ve volbě součástek, jelikož nám stačí to, že vyhovíme podmínce, kde součet všech tepelných odporů bude menší než 4,61 [K/W]. Z tohoto důvodu jsme vybrali chladič za rozumnou cenu s tepelným odporem 2,4 [K/W]. Po dosazení nám vyjde, že tepelný odpor tranzistoru může být maximálně 1,71 [K/W].

$$R_T = R_S + R_{CH} + R_P \implies R_S = 4,61 - 0,5 - 2,4 = 1,71 \text{ [K/W]}$$

Pro tento účel byl zvolen tranzistor *MJL3281AG*, který má $h_{21} > 75$ a jeho tepelný odpor je 0,625 [K/W], který spolehlivě vyhovuje. Jeho maximální výkon je 200 [W] a napětí, které vydrží mezi elektrodami kolektor-emitore je 260 [V]. Dalším důležitým parametrem je proud kolektoru, ten může být až 15 [A]. Je patrné, že tento tranzistor je poněkud předimenzovaný a že mohl být použit slabší. Důvod jeho použití je ten, že byl snadno k dostání a za příznivou cenu.

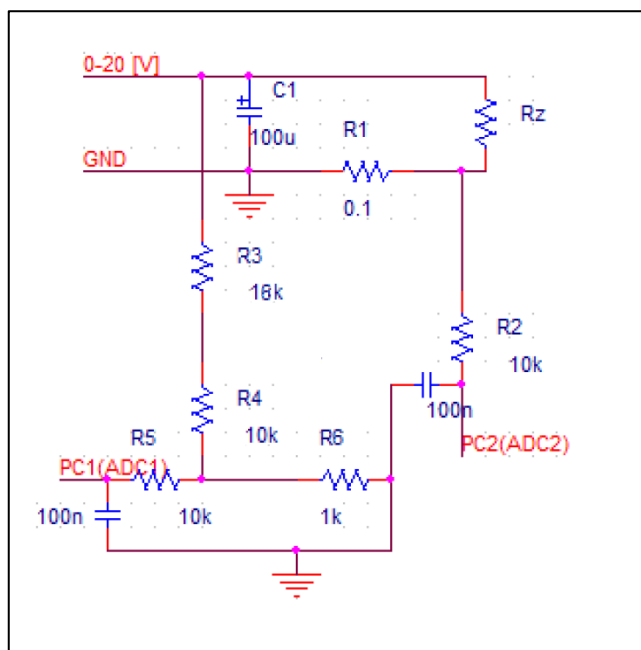
Po znalostech parametrů obou tranzistorů můžeme určit celkový zesilovací činitel regulačního tranzistoru, který je roven:

$$\beta' = 40 * 75 = 3000$$

Je-li potřeba na výstupu kolektoru T₂ proud 2 [A], stačí nám na vstup báze T₁ přivést proud:

$$\beta' = h_{21} = \frac{I_c}{I_b} \implies I_b = \frac{I_c}{h_{21}} = \frac{2}{3000} = 0,666 \text{ [mA]} \quad (11)$$

3.1.4. Filtr a snímač výstupního napětí a proudu



Obrázek 16 - schéma výstupního filtru a snímačů napětí a proudu

Výstupní filtr je tvořen jednoduchým kondenzátorem o hodnotě 100 [μF]. Snímání výstupního napětí je znázorněno v první svislé větvi. Dělič je zde tvořen odpory R3,R4,R6,pomocí něhož se napětí vydělí 20x, následně je přivedeno přes ochranný odpor R5 na ADC převodník mikrokontroléru (PORT PC1). Maximální napětí přivedené na tento ADC je tak 1 [V], vstup ADC přitom snese napětí maximálně 2,5 [V], máme tak ještě rezervu. Snímání proudu je realizováno ve druhé svislé větvi pomocí odporu R1. Tento odpor byl zvolen co nejmenší a jeho funkce je následující. Pokud obvodem poteče proud 1 [A], tak se na odporu o hodnotě 0,1 [Ω]vytvoří napěťový úbytek hodnoty 0,1[V] podle rovnice (12).

Ohmův zákon:

$$I = \frac{U}{R} [A] \quad (12)$$

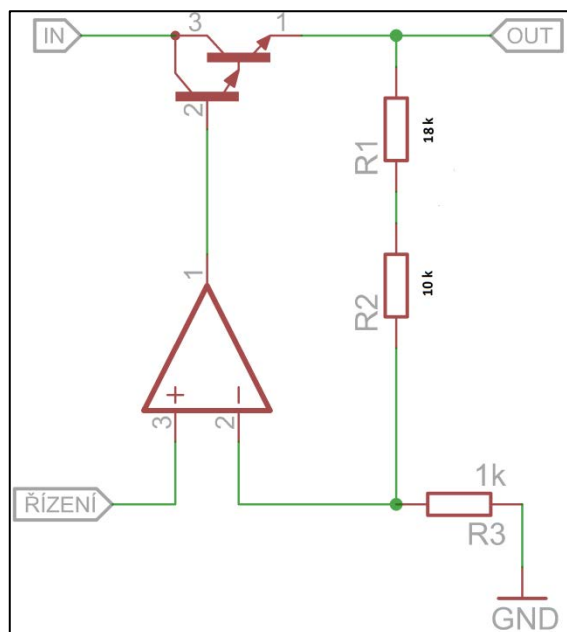
Jelikož maximální proud obvodem nabývá hodnoty 2 [A], potom napětí na vstupu ADC pro snímání proudu (PORT PC2) bude v rozmezí 0-0,2 [V]. Jestliže vynásobíme toto napětí 10x, dostaneme přímo hodnotu proudu. Na žádném jiném odporu v zapojení se neztratí výkon větší než 0,25 [W], až na odpory R1 a R35. Jejich maximální zátěž je:

$$P = R_1 * I^2 = 0,1 * 2^2 = 0,4 [W]$$

$$P = R_{35} * I^2 = 2200 * 0,011^2 = 0,26 [W]$$

Dovolený ztrátový výkon byl zvolen u R1 na hodnotu 2 [W] a u R35 na 0,6 [W].

3.1.5. Řízení regulačního tranzistoru



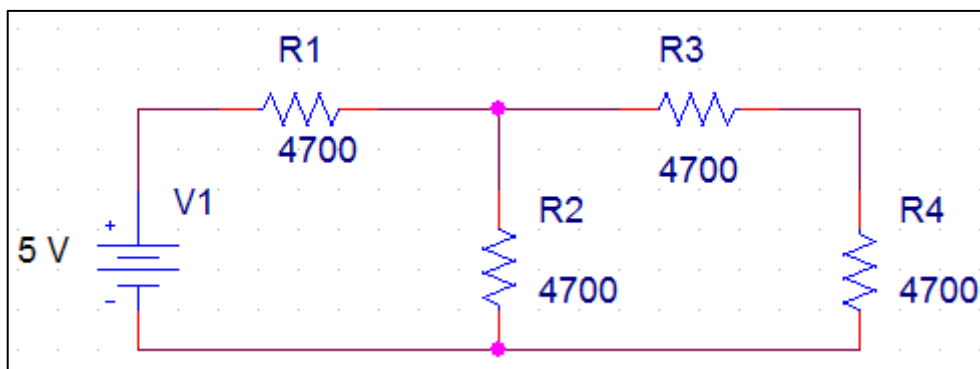
Obrázek 17 - Řízení regulačního tranzistoru

Na obrázku je znázorněno principiální schéma pro řízení výstupního napětí. Rezistory tvoří dělič, který zároveň snímá napětí U_2 . Vstup nazvaný „ŘÍZENÍ“ jde z mikrokontroléru a je to původně signál PWM0-5 [V], který je vyfiltrován dolní propustí RC 2. řádu na stejnosměrné napětí. Právě tato žádaná hodnota napětí je přivedena na vstup operačního zesilovače. Při změně střídy PWM signálu dojde ke změně stejnosměrného napětí, které řídí výstupní napětí. Operační zesilovač je zde zapojen jako komparátor, jenž porovnává požadované výstupní napětí se vstupním (řídícím) napětím, které jde z mikrokontroléru. Zmenšuje tak výstupní odchylku od požadovaného napětí.

Na výstupu komparátoru je:

$$U_{OUT} = \begin{cases} U_{S+} & \text{pokud } U_+ > U_- \\ U_{S-} & \text{pokud } U_+ < U_- \end{cases}$$

V kapitole 3.1.4 bylo zmíněno, že dělič pro snímání výstupního napětí dělí 20x, zde by bylo vhodné upřesnit proč. Na vstupu dolní propusti RC 2. řádu je PWM signál, na výstupu je však lineární napětí 0-1 [V]. Tato hodnota byla vypočítána a následně ověřena v laboratoři. Výpočet provedeme při 100 [%] střídy PWM, napětí tedy bude lineární o hodnotě 5 [V]. Při této úvaze můžeme použít náhradní schéma (viz obr. 17). Kondenzátory se v obvodu stejnosměrného napětí chovají jako rozpojený obvod, proto je můžeme vynechat.



Obrázek 18 - náhradní schéma dolní RC propusti 2. řádu pro určení maximální hodnoty výstupního napětí

Nejprve musíme vypočítat celkovou ohmickou zátěž.

$$R = \frac{(R_3 + R_4) * R_2}{R_3 + R_4 + R_2} + R_1 = 7833 [\Omega]$$

Poté se vypočítá proud, který teče ze zdroje (mikrokontroléru).

$$I = \frac{U}{R} = 0,64 [mA]$$

Tento proud vytvoří na rezistoru R_1 napěťový úbytek hodnoty 3 [V]. Protože

$$U = I * R_1 = 0,64 [mA] * 4700 = 3 [V]$$

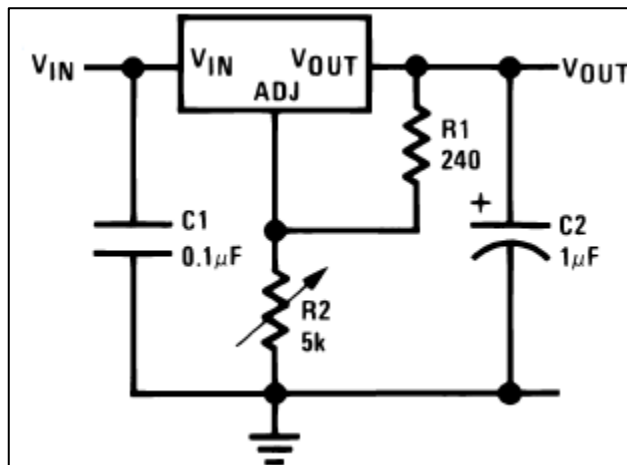
Mezi odpory R_2 a R_3+R_4 se proud rozdělí. Na odpory R_3+R_4 teče proud 0,212 [mA] a na odpor R_2 teče 0,428 [mA]. To má za následek napěťový úbytek na odporu R_3 o hodnotě 1 [V]. Na výstupu RC článku (mezi odpory R_3 a R_4) se tak objeví napětí o hodnotě 1 [V]. Je tedy jasné, že při změně střidy bude napětí v rozmezí 0-1 [V].

Nyní se již dostáváme k vysvětlení funkce zpětnovazebního děliče R_1+R_2 , R_3 . Už víme, že napětí na vstupu komparátoru bude maximálně 1 [V] a na výstupu regulačního členu bude maximálně 20 [V]. Pro správnou funkci komparátoru se tedy napětí na výstupu regulačního členu musí 20x vydělit, potom budou obě napětí vstupující do komparátoru rovna. Z principu však bude docházet k neustálým změnám a komparátor bude opakovaně otevírat a zavírat tranzistor T_1 tak, aby rozdíl výstupního napětí a požadovaného napětí byl co nejmenší. Je tedy jasné, že regulace nebude lineární, ale komparátor je dostatečně rychlý, aby se lineárnímu zdroji dostatečně přibližoval.

Dále by bylo vhodné říci, že regulace výstupního napětí se provádí pomocí změny střidy PWM a následné filtraci pomocí doplní propusti, protože našemu mikrokontroléru chybí D/A převodník. Kdyby byl k dispozici D/A převodník, mohli bychom vynechat dolní propust a signál přivést přímo na komparátor.

Další možností jak regulovat výstupní napětí by také bylo zapojení již hotového stabilizátoru, který má patřičné parametry na výstupu (alespoň 20 [V] a 2 [A]) a jeho

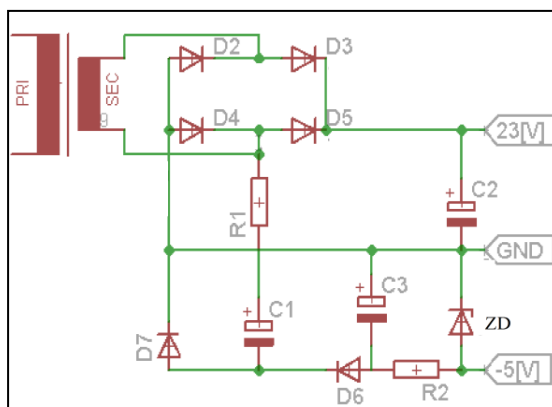
regulaci provádět pomocí číslicového odporu ovládaného přes mikrokontrolér. Obvod, který vyhovuje těmto parametrům je integrovaný stabilizátor LM350. Jeho zapojení je na obrázku 19. Odpor R_2 by byl číslicově řízený a jeho hodnota proměnná. Důvod, proč nebyla tato variant zvolena je ten, že stabilizátor neumí regulovat napětí od nuly, ale až od 1,2 [V]. To by znamenalo odklon od zadání.



Obrázek 19 - Zapojení LM350[5]

3.1.6. Napájení řídicích prvků

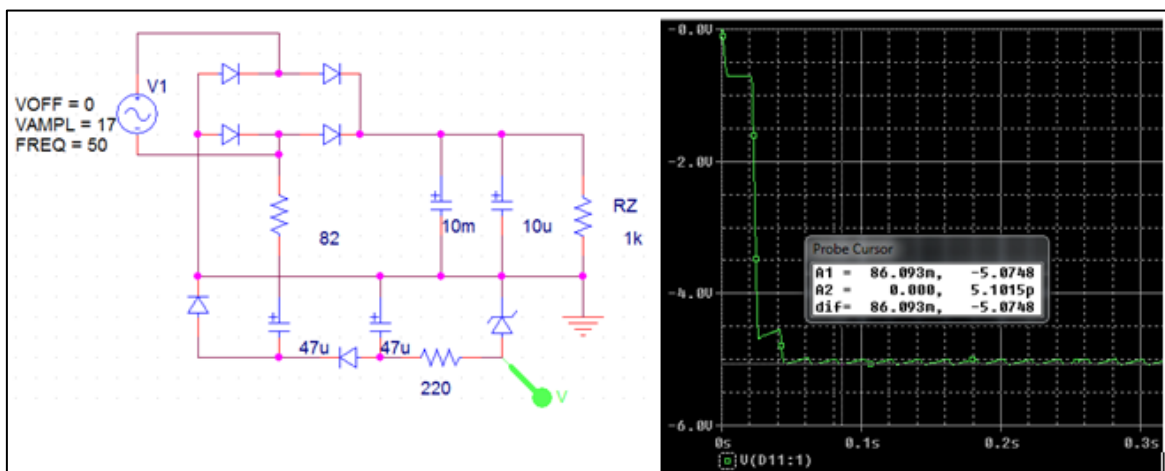
V našem obvodu jsou celkem 3 pomocná napětí ($2 \times +5$ [V] a -5 [V]). Napětí $+5$ [V] byla vytvořena jednoduše pomocí integrovaných obvodů LM317 a LM7805. Jelikož mikrokontrolér potřebuje napětí, které nebude nijak kolísat, napájí ho obvod LM317. Toto napětí nesmí kolísat, protože řídicí signál PWM musí mít konstantní amplitudu, aby byla zajištěna správná funkce zdroje. Nic jiného na něj není připojeno a stačí ho umístit na obyčejný chladič s plochou cca 3 cm^2 . Obvod LM7805 napájí vše ostatní (sedmi-segmentový displej, BCD dekodér, ovládání) a teče jím větší proud. Proto je umístěn na větším chladiči, který má tepelný odpor 11 [K/W] , neboť obvodem teče proud přibližně 264 [mA] (maximálně 30 [mA] na segment, kterých je osm a 24 [mA] pro BCD dekodér. Počítá se jen s jedním sedmi-segmentem, protože vždy svítí jen jeden) a ztrátové napětí má hodnotu 9 [V] po dosazení do rovnice (7) vyjde ztrátový výkon přibližně $2,4 \text{ [W]}$. Po dosazení do rovnic (9) a (10) zjistíme, že hodnota 11 [K/W] je hodnota zvolená s dostatečnou rezervou. Obvod pro výrobu -5 [V] je uveden na následujícím obrázku.



Obrázek 20 - Obvod pro generování pomocného napětí -5 [V]

Toto napětí je potřebné k napájení operačního zesilovače, aby mohl regulovat napětí od nuly.

Princip zapojení spočívá v přivedení záporné větve na usměrňovač tvořený pomocí diod D6, D7, záporné napětí je přivedeno na Zenerovu diodu a kladné je staženo na zem, následně je toto napětí vyfiltrováno pomocí RC článku C3, R2 a stabilizováno pomocí ZD na hodnotu přibližně -5,1 [V]. Na obrázku 19. je vidět provedená simulace v programu PSpice, který na výstupu naměřil -5,07 [V].

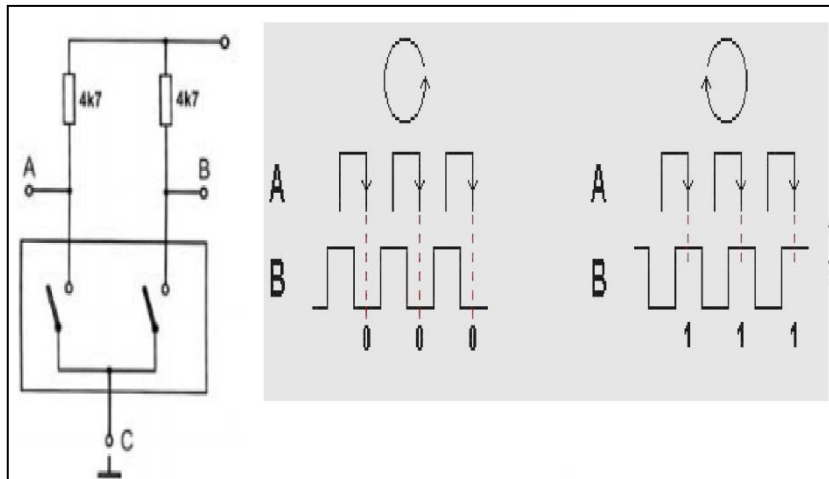


Obrázek 21 - Simulace obvodu pro generování pomocného napětí -5,1 [V] v programu PSpice

3.1.7. Periferie

Tento blok je na samostatné destičce a je propojen s hlavní deskou pomocí 20 pinového konektoru. Součástí tohoto bloku je ovládání a displej.

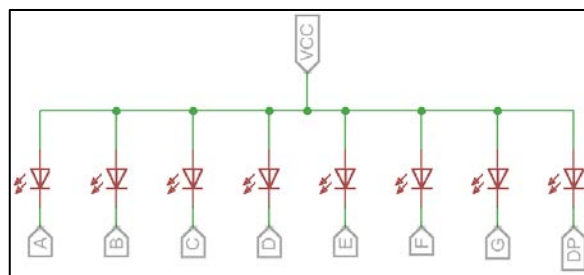
Ovládání: Je realizováno pomocí přepínače a rotačního enkodéru. Přepínačem si zvolíme, jestli chceme regulovat napětí nebo proud a rotačním enkodérem nastavujeme požadovanou hodnotu.



Obrázek 22 - Princip rotačního enkodéru[3]

Z obrázku je patrné, že enkodér má 3 vývody. Při otáčení získáme na výstupech A resp. B obdélníkový průběh (napájení nebo zem). Tyto průběhy jsou vůči sobě posunuty o 90° , můžeme tak rozpoznat směr otáčení a provést inkrementaci resp. dekrementaci požadované hodnoty.

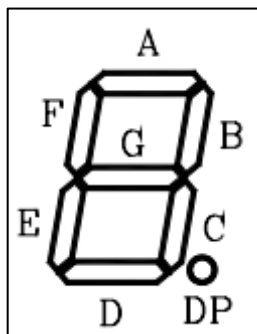
Displej: Jako displej byl zvolen šestimístný sedmi-segment. Na zobrazení napětí i proudu s jedním desetinným místem nám stačí pět sedmi-segmentů, z této příčiny jeden sedmi-segment nebude svítit a bude tvořit oddělovací část. Displej má vyvedenou společnou anodu, a z principu zapojení (obr. 19) se pro rozsvícení segmentu musí vývod spojit se zemí.



Obrázek 23 - sedmi-segment se společnou anodou

Na obrázku je schéma jednoho displeje, my jich ale máme 6, což by znamenalo šesti násobek vývodů. Náš displej je však zapojen maticově a na ovládání takového displeje nám stačí 14 vývodů. Pět vývodů je pro napájení jednotlivých displejů a osm vývodů je společných pro jednotlivé segmenty. To je důležité vědět, jelikož tomu musíme přizpůsobit program. Pokud chceme například na prvním displeji rozsvítit číslo „2“ a na druhém číslo „4“, musíme na krátkou dobu odeslat kombinaci vyhovující číslu 2 a přivést napájení na první sedmi-segment a hned poté odeslat kombinaci vyhovující číslu 4 a přivést napájení na druhý sedmi-segment. Mohlo by se zdát, že displej bude neustále blikat a bude to nepříjemné pro oči, ale mikrokontrolér toto přepínání dokáže řešit velice rychle. Oko je nedokonalé, a proto na displeji vidíme zřetelně číslo „24“, které neblíká. Kombinace pro

rozsvícení čísel se odešle v podobě čísla v dvojkové soustavě pomocí čtyř bitů na vstup BCD dekodéru, který ho převede na sedmi-segmentový kód. Jinými slovy zařídí rozsvícení segmentů, potřebných k zobrazení čísla.



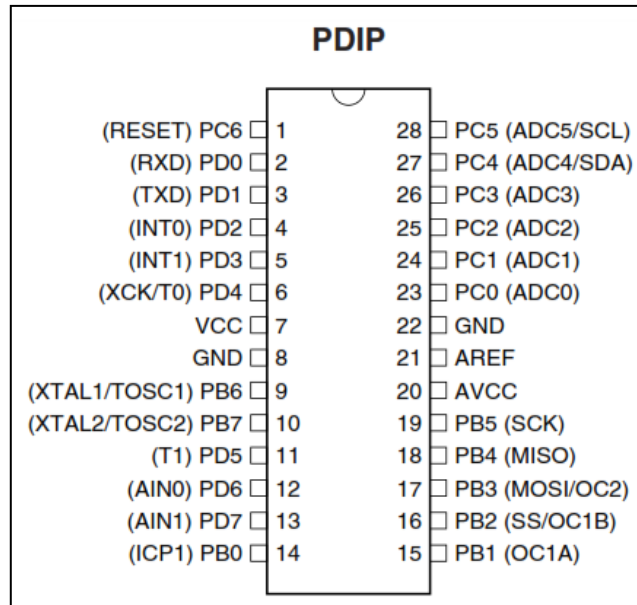
Obrázek 24 - sedmi-segmentový LED displej[6]

3.1.8. Logika

Řídící logiku tvoří mikrokontrolér ATmega8 z rodiny AVR, ten byl zvolen pro jeho dostatečné vlastnosti a příznivou cenu. K němu je připojen programátor pomocí 10 pinového ISP konektoru.

Atmega8 je založen na architektuře RISC, která má jednoduchou, ale dobře optimalizovanou sadu strojových cyklů, díky tomu je desetkrát rychlejší než CISC architektura. Ta obsahuje strojové instrukce pokrývající širokou škálu funkcí, které by však šly naprogramovat jednodušeji pomocí již použitých strojových instrukcí. Patří mezi malovýkonné CMOS 8-bitové mikrořadiče s rychlostí 0-16 [MHz] a napájením 4,4-5,5 [V]. Obsahuje 32 pracovních registrů, které jsou přímo spojeny s aritmetickou logickou jednotkou (ALU), jenž umožňuje přístup dvou nezávislých registrů v jednom hodinovém cyklu. Z registru se načtou obě instrukce aritmeticko-logických operandů, provede se výpočet a výsledek je uložen, to vše se provede v jednom hodinovém cyklu. Tato vlastnost dává procesorům Atmega velký výpočetní výkon.

Atmega8 dále obsahuje: 8 kB ISP flash paměti s funkcí Read-While-Write, 512 B EEPROM, 1 kB SRAM, 23 programovatelných vstupně/výstupních pinů, 32 univerzálních pracovních registrů, 3 flexibilní čítače/časovače s porovnávacími módy, vnitřní a vnější přerušení, sériový programovatelný USART, šesti-kanálový ADC s 10-bitovou přesností, programovatelný Watchdog s vnitřním oscilátorem, SPI sériový port.

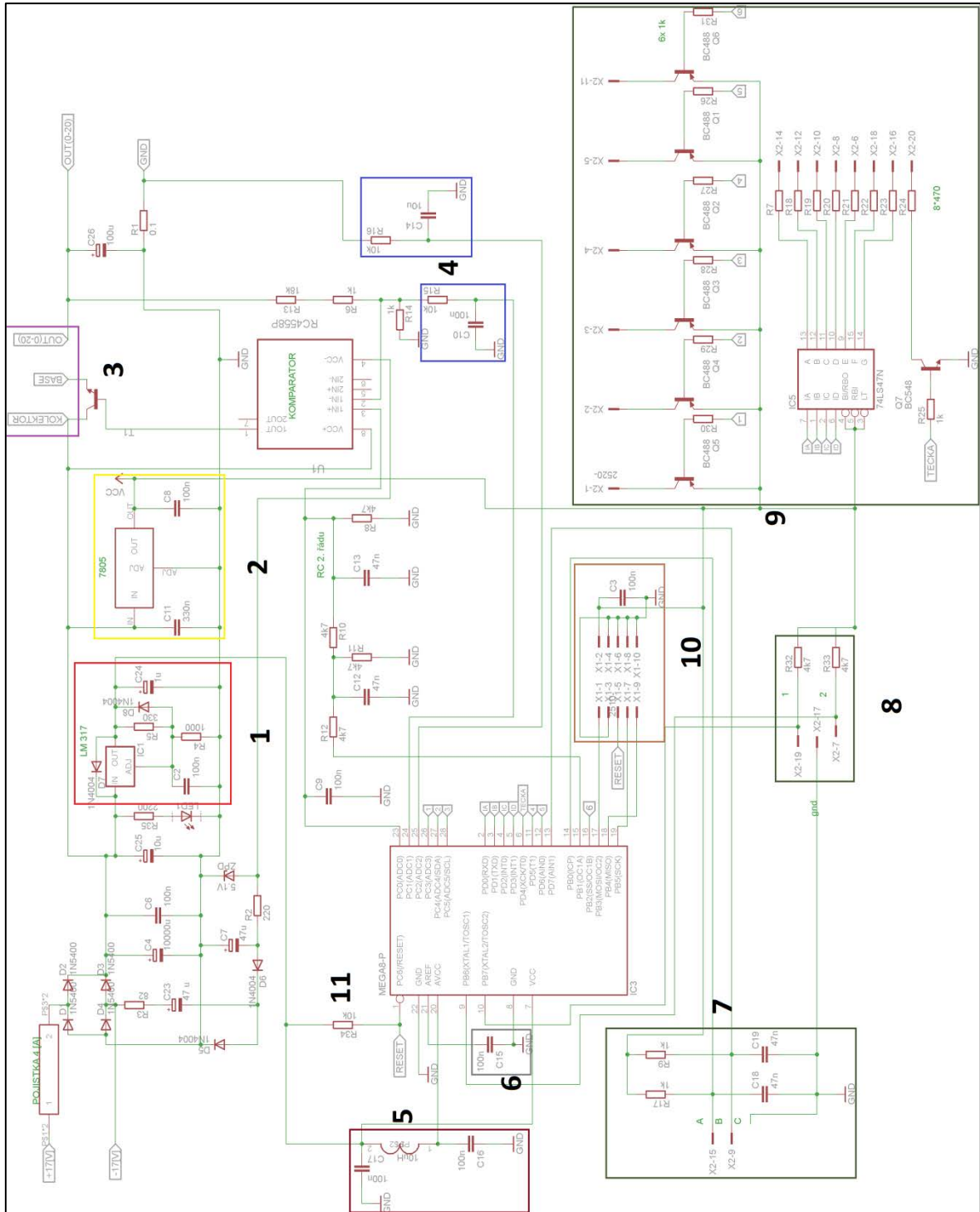


Obrázek 25 - Rozložení pinů [4]

3.2. Schéma zapojení

Schéma zdroje se skládá z dvou dílčích zapojení, zde budou obě schémata znázorněna a budou probány součástky, které nejsou uvedeny v blokovém schématu.

3.2.1. Hlavní část zdroje



Obrázek 26 - schéma hlavní části zdroje

Pro přehlednost bylo schéma doplněno o objekty s čísly. V následujícím textu probereme jednotlivé očíslované části.

1. Katalogové zapojení stabilizátoru LM317 s diodami, které chrání kondenzátory. Odporů R4 a R5 jsou zvoleny tak, aby na výstupu stabilizátoru bylo 5 [V].

Vzorec pro výpočet U_{OUT} :

$$U_{OUT} = 1,25 * \left(1 + \frac{R_4}{R_5}\right) + I_{ADJ} * R_4 \quad (13)$$

Kde I_{ADJ} se podle výrobce pohybuje okolo hodnoty 0,1 [mA]. Po dosazení dostaneme přibližně 5,13 [V].

$$U_{OUT} = 1,25 * \left(1 + \frac{1000}{330}\right) + 0,0001 * 1000 = 5,13 [V]$$

2. Typické zapojení stabilizátoru 7805 s filtračními kondenzátory.

3. Výstupy pro koncový výkonový tranzistor *MJL3281AG*, který je umístěn na chladiči.

4. Dva RC články typu dolní propust. Díky těmto článkům by nedošlo k aliasingu, který by způsobila příliš vysoká frekvence na vstupu A/D převodníku, který umí vzorkovat signál s frekvencí maximálně 7,6 [kHz].

5. Katalogové připojení napájení k mikrokontroléru.

6. Připojením daného kondenzátoru na vstup AREF říkáme, že chceme použít vnitřní referenční napětí pro A/D převodník.

7. Připojení rotačního enkodéru. Ochranné odpory jsou zde kvůli omezení proudu a kondenzátory slouží pro „zachycení“ škodlivých zářivostí.

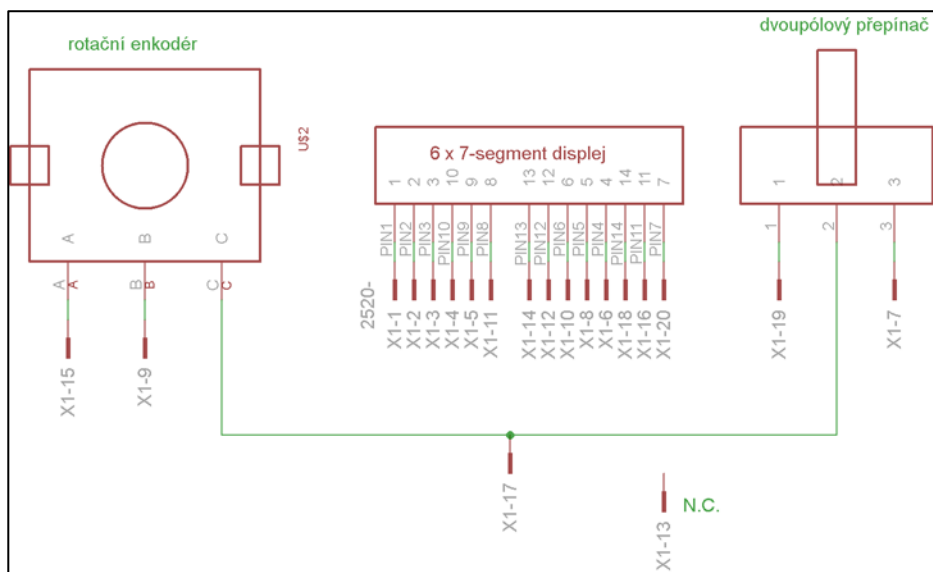
8. Připojení dvoupólového přepínače s ochrannými odpory.

9. Komplexní blok pro řízení displeje. Tranzistory nám slouží k přepínání napájecího napětí mezi jednotlivými sedmi-segmenty. BCD dekodér připojený na mikrokontrolér zajišťuje převod čísla z dvojkové soustavy na sedmi-segmentový kód. Všechny výstupy jsou doplněny o ochranné odpory.

10. Deseti pinový konektor pro připojení programátoru.

11. Odpor chrání mikrokontrolér před nechtěným restartem.

3.2.2. Periferie zdroje



Obrázek 27 - periferie připojené ke zdroji

Tento blok je na samostatné destičce z důvodu možnosti vyvedení periférií na přední část panelu zdroje. Z hlavní části zdroje je propojen pomocí 20 – pinového konektoru. Je zde umístěn displej pro zobrazení napětí (3 místa vpravo) a proudu (2 místa vlevo), mezi těmito veličinami je jeden sedmi-segment vypnut kvůli oddělení. Dále je zde umístěn přepínač, jímž nastavujeme veličinu, kterou chceme regulovat. Posledním prvkem na této desce je rotační enkodér, kterým nastavujeme požadovanou hodnotu.

4. Softwarové řešení

Nyní probereme softwarovou část zdroje. Nebude zde uveden celý zdrojový kód, ale pouze ukázky jednotlivých vývojových diagramů a jejich popis. Kompletní kód je součástí přílohy.

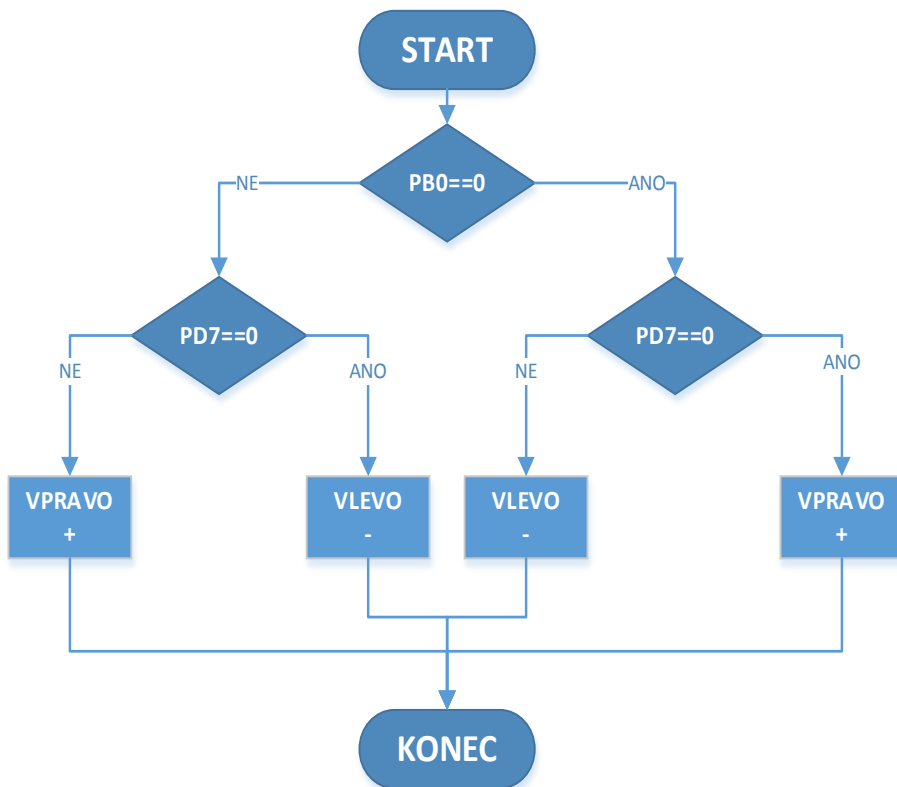
4.1. Rotační enkodér

Nejprve ukážeme vývojový diagram rotačního enkodéru, který je připojen na piny **PD7** a **PB0**. Princip detekce je patrný z obrázku 22, proto zde uvedeme pouze pravdivostní tabulku.

Tabulka 1 - pravdivostní tabulka rotačního enkodéru

PD7 (signál A)	PB0 (signál B)	směr
1	1	vpravo
1	0	vlevo
0	1	vlevo
0	0	vpravo

Z pravdivostní tabulky už můžeme sestavit vývojový diagram.



Obrázek 28 - Vývojový diagram rotačního enkodéru

4.2. Zobrazení dat na displeji

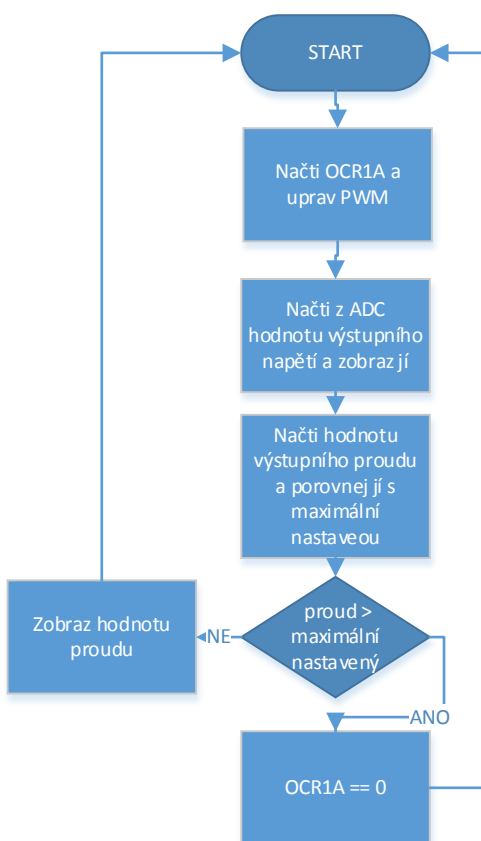
Pro zobrazování napětí a proudu zde musí být speciální algoritmus, který zajišťuje neustále posílání dat na sedmi-segment. Jak již bylo řečeno v kapitole 3.1.7, displej je zapojen maticově, a proto se k němu musí přistupovat trochu jiným způsobem. Jelikož jsme nuceni odesílat čísla postupně, musí zde být speciální algoritmus, který to zajistí. Nemůžeme najednou odeslat číslo „12“, ale nejprve ho musíme vydělit deseti a zaokrouhlit. Tím nám vznikne číslo „1“, které odešleme na BCD dekodér, který je ale společný pro všechny sedmi-segmenty. Proto musíme zajistit, aby na konkrétní sedmi-segment, na kterém má být zobrazeno číslo „1“, bylo přivedeno napájení. Poté se od původního čísla „12“ naopak odečte deset, tím vznikne číslo „2“, které se opět odešle na BCD dekodér a náš algoritmus musí zajistit, aby bylo napětí přivedeno na vedlejší sedmi-segment oproti číslu „1“. Atmega8 toto dokáže řešit velice rychle, proto naše oko nic nepostřehne, můžeme tak na displeji vidět číslo „12“.



Obrázek 29 - Algoritmus pro zobrazení napětí a proudu na displeji

4.3. Nastavení výstupního napětí a proudu

Hodnota výstupního napětí je regulována pomocí velikosti středy PWM signálu. Změnou hodnoty registru OCR1A se nastaví jiný vrchol čítače a tím se změní střída. To znamená, že pokud máme správně nastavenou PWM, můžeme střídu měnit pouze změnou hodnoty registru OCR1A. Výstupní napětí tak bude přímo nastavitelné. Nastavení výstupního proudu je realizováno jako proudová pojistka. Pomocí enkodéru nastavíme maximální hodnotu, kterou ze zdroje chceme brát a při překročení nastaví mikrokontrolér OCR1A na hodnotu 0, tedy i výstupní napětí bude nulové a zdroj se „vypne“.



Obrázek 30 - Algoritmus nastavení výstupního napětí a proudu

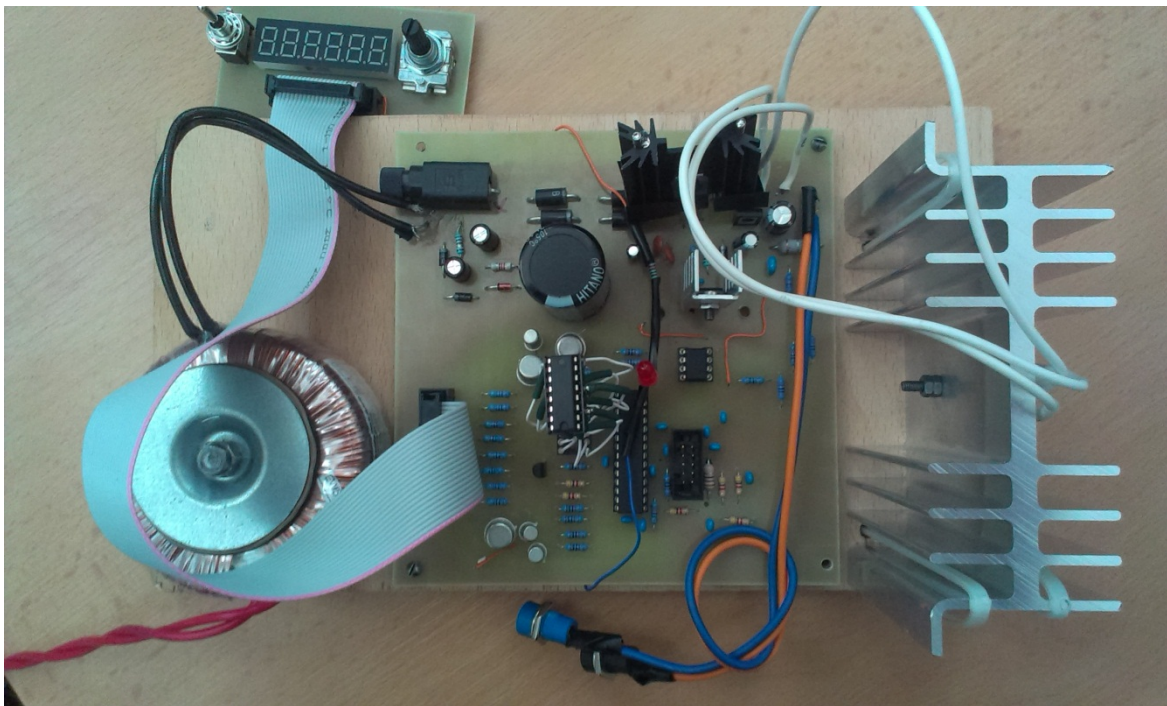
5. Výroba a oživení desky

Plošné spoje byly vyleptány na fotosenzitivní destičku. Návrh se podařilo zhotovit na jednostrannou desku, díky tomu mohla být vyrobena v laboratoři ve škole. Deska měla rozměry 200x150 [mm], takže se na ní vešly obě destičky, které tvoří zdroj. Hlavní část má rozměry 133x127 [mm] a část pro zobrazení má 80x45 [mm].

Po napájení všech součástek a prvotním zapojení do sítě bylo zjištěno, že napětí pro napájení stabilizátorů bylo 40 [V], což mělo za následek jejich okamžité zničení. Po dlouhém proměřování se zjistilo, že na vině je obvod pro generování pomocného napětí -5 [V]. Tento obvod je v podstatě zdvojovač napětí a pokud zdroj není zatížen, tak se toto napětí přičte k napětí za usměrňovačem. Z tohoto důvodu byla připojena zátěž v podobě rezistoru R35 a kontrolní LED diody. Po zapojení tohoto odporu už byla hodnota napětí shodná s prvotním předpokladem. Bohužel na tento neduh se přišlo až po finálním sestavení desky plošných spojů a z časových důvodů nebylo možné desku upravit. Proto byla zátěž připájena k filtrační kapacitě pomocí drátků.

Další problém nastal při pokusu o rozsvícení displeje. Zvolený typ BCD dekodéru nebyl správný a bylo nutné ho vyměnit za jiný. Původně vybraný obvod „74LS247“ byl nahrazen obvodem „4543“. Tento obvod má však jiné rozložení pinů, proto byl vložen do další patice. Na tuto patici se připájely drátky a zapojily se do desky podle přechozí konfigurace pinů.

Vše ostatní už pracovalo tak, jak bylo plánováno.



Obrázek 31 - Fotka finálního zapojení

6. Měření parametrů zdroje

V této kapitole budou probrány naměřené vlastnosti a parametry vyrobeného zdroje.

6.1. Měření zatěžovací charakteristiky zdroje

Nejdříve byla změřena zatěžovací charakteristika zdroje. Tato charakteristika je základní údaj o zdroji, protože určuje takzvanou „tvrdost“ zdroje. Ze znalosti zatěžovací charakteristiky určíme vnitřní odpor zdroje, který by měl být co nejmenší, jelikož nám přímo definuje onu tvrdost. Čím je vnitřní odpor větší, tím strmější je zatěžovací charakteristika.

Vnitřní odpor je definovaný jako:

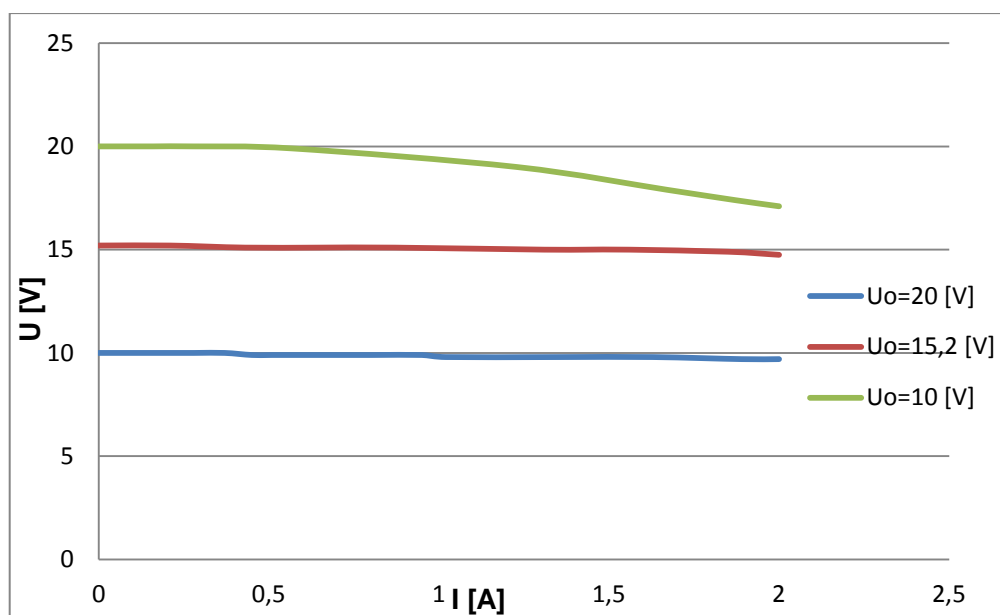
$$R_i = \frac{U_0 - U_1}{I} \quad [\Omega] \quad (14)$$

Kde:

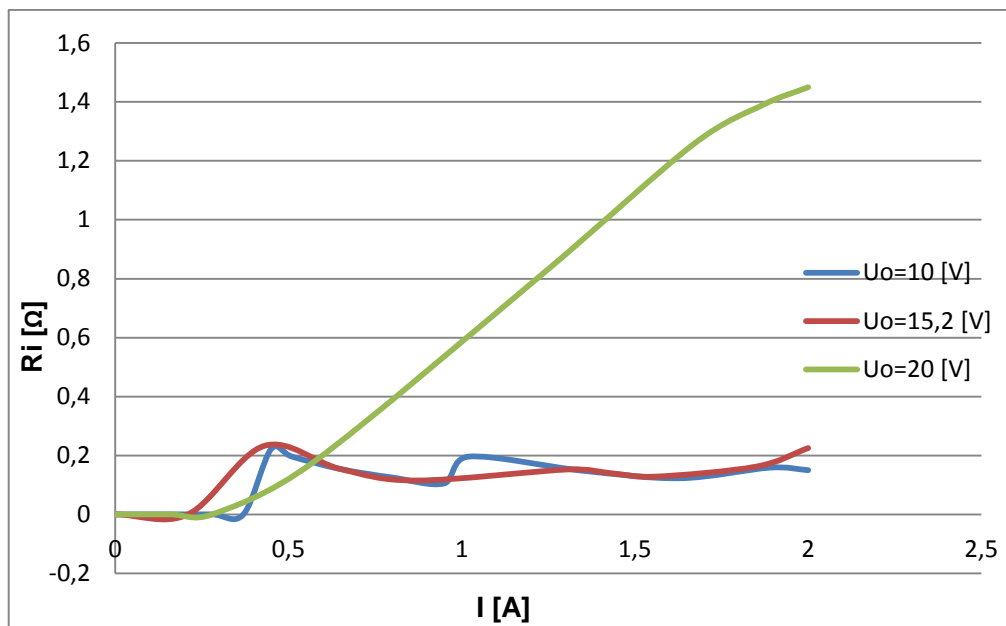
U_0 je napětí na prázdko

U_1 je napětí při zátěži

I je proud protékající zátěží



Graf 1 - zatěžovací charakteristika zdroje



Graf 2 - vnitřní odpor zdroje v závislosti na odebíraném proudu

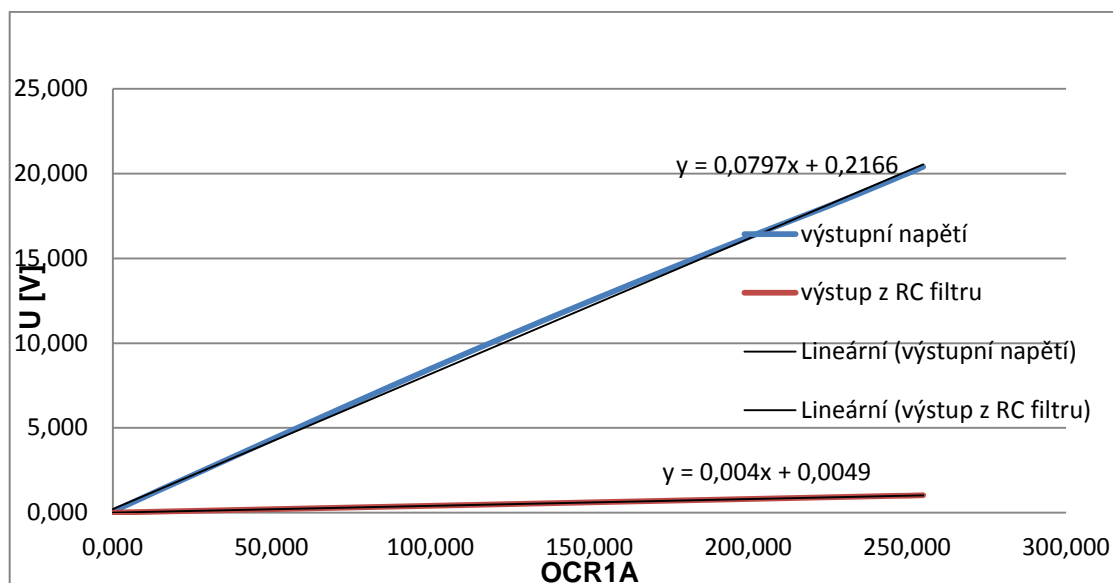
Z výše uvedených grafů (graf 1, graf 2) je vidět, že největší vnitřní odpor je při $U_0=20$ [V]. Je to dané tím, že vstupní transformátor má efektivní hodnotu napětí 17 [V]. Navíc je v obvodu zařazen odpor pro snímání proudu o hodnotě 0,1 [Ω], který vnitřní odpor zvyšuje. Tento neduh by se dal softwarově vyřešit tím, že by se při poklesu napětí zvýšila hodnota OCR1A, tím by došlo ke zvýšení výstupního napětí a zmenšení vnitřního odporu.

6.2. Měření závislosti výstupního napětí zdroje a napětí na výstupu RC filtru na změně OCR1A

Další důležitý parametr našeho zdroje je závislost výstupního napětí a napětí na výstupu RC filtru na změně parametru OCR1A. Tento filtr byl probrán v kapitole 3.1.5., ve které je spočítáno, že výstupní napětí je maximálně 1 [V]. Po proměření parametrů zdroje se však zjistilo, že napětí na výstupu nabývá hodnoty až 1,029 [V].

Tabulka 2 - naměřené hodnoty výstupního napětí a napětí na výstupu RC filtru v závislosti na změně OCR1A

OCR1A	výstupní napětí	výstup z RC filtru	OCR1A	výstupní napětí	výstup z RC filtru
1,000	0,172	0,009	150,000	12,470	0,608
2,000	0,253	0,013	175,000	14,380	0,708
5,000	0,503	0,025	200,000	16,250	0,808
10,000	0,930	0,045	225,000	18,070	0,908
15,000	1,360	0,065	240,000	19,220	0,969
25,000	2,200	0,105	245,000	19,610	0,989
50,000	4,320	0,206	249,000	19,930	1,000
75,000	6,420	0,306	250,000	20,000	1,001
100,000	8,490	0,406	255,000	20,400	1,029
125,000	10,500	0,507			



Graf 3 - graficky znázorněná závislost výstupního napětí zdroje a napětí na výstupu RC filtru v závislosti na změně OCR1A

Z předchozího grafu (graf 3) je patrné, že graf je téměř lineární a že hodnota výstupního napětí při maximálním OCR1A (=255) nabývá hodnoty převyšující 20 [V]. Proto je nutné vložit do softwaru podmínku, která bude zajišťovat, že výstupní napětí nepřekročí 20 [V] (OCR1A=250).

Do grafu je přidána spojnice trendu, která proloží průběh výstupního napětí lineárním průběhem. U tohoto lineárního průběhu je vložena rovnice trendu, která nám slouží pro přepočítání OCR1A na výstupní napětí. Stejná pomůcka je přidána i u průběhu zobrazující výstupní napětí z RC filtru.

Rovnice pro výpočet výstupního napětí:

$$y = 0,0797x + 0,2166$$

Kde „x“ znázorňuje OCR1A a „y“ je hodnota výstupního napětí zdroje.

Rovnice pro výpočet výstupního napětí z RC filtru:

$$y = 0,004x + 0,0047$$

Kde „x“ znázorňuje OCR1A a „y“ je hodnota výstupního napětí u RC filtru.

7. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout lineární napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem. Tento zdroj by měl regulovat napětí od 0-20 [V] a obsahovat obvod pro proudové omezení 0-2 [A]. Tyto funkce by měl řešit mikrokontrolér a nastavení hodnoty provádět rotační enkodér. Dále by zdroj měl obsahovat displej pro zobrazení obou veličin. Posledním bodem v zadání bylo změřit parametry vyrobeného zdroje.

7.1. Zhodnocení dosažených výsledků

Zdroj se podařilo navrhnout, vyrobit a uvést do provozu. Bylo objeveno několik hardwarových nedostatků, které byly dořešeny dopájením chybějících součástek pomocí drátků. Celkový výrobek tak nevypadá moc vzhledně, ale to by se dalo napravit opětovným vyrobením desky plošných spojů a napájením součástek z již ověřeného prototypu. To se z časových důvodů bohužel nedalo stihnout.

Zdroj byl však plně funkční a dané parametry bez problému zvládal. Bylo možné regulovat napětí od 0,17-20 [V] a nastavovat proudovou pojistku v rozsahu 0-2 [A]. Nastavení proudové pojistky bylo realizováno pomocí mikrokontroléru, který detekuje odebíraný proud a porovná ho s maximální nastavenou hodnotou proudu. Po překročení nastaveného proudu zdroj přestane dodávat energii. Rychlost vybavení proudové pojistky byla realizována hardwarově pomocí RC článku. Tento článek má časovou konstantu 0,1 [s], která udává čas, po který může zdroj dodávat větší proud, než nastavil uživatel. Naměřené parametry jsou shrnuty v kapitole 6.

Bohužel se nepodařilo změřit tyto parametry: výstupní zvlnění, citlivost změny výstupního napětí na změnu vstupního napětí a rychlost reakce výstupu při skokové změně zátěže. Nepodařilo se je změřit, protože zdroj přestal fungovat kvůli zkratu. Ten byl zapříčiněn častými změnami v hardwaru, které byly řešeny přepájením dané součástky. Mírný odklon od zadání je ve velikosti znaků displeje. Byl zvolen displej s velikostí 9,1 mm, který je menší, než bylo požadováno. Tento displej byl vybrán, protože měl šest sedmi-segmentů v jednom pouzdře. Navíc byl zapojen maticově, což ulehčilo návrh desky a práci se zobrazením.

7.2. Možné zlepšení

Užitečným zlepšením by bylo implementování softwarové funkce pro dorovnávání změn výstupního napětí při zatížení zdroje. Tím by se zmenšil vnitřní odpor zdroje, protože by nedocházelo k větším poklesům výstupního napětí.

Seznam použité literatury

Knižní literatura:

[1] HUSÁK, Miroslav. Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku: přednášky. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006, 154, v s. ISBN 80-010-3398-8.

[2] KREJČÍŘÍK, Alexandr. Napájecí zdroje I: Základní zapojení analogových a spínaných napájecích zdrojů. 2. vyd. Praha: BEN, 1997, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.

Datasheety:

[3] P-RE24 - rotační enkodér

[4] ATmega8L - mikrokontrolér

[5] LM317T - lineární regulátor napětí

[6] HD-BXM326RD - sedmi – segmentový displej

[7] 7805 - stabilizátor napětí

Skripta:

[8] KONEČNÝ, Jiří. Lineární obvody. FEI. Skripta. UPCE.

Internetové odkazy:

[9] Wikipedie [online].2002[cit.2014-5-5].Dostupný z

WWW:<<http://cs.wikipedia.org/>>.

[10] SLÁNSKÝ, Michal. Konstrukce laboratorního zdroje 0 - 30V / 0 - 5A [online]. Praha, 2002 [cit. 2014-05-04].

Příloha A – Zdrojový kód programu v ATMEL studiu

```
#define F_CPU800000UL
#include <avr/io.h>
#include <math.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include <util/delay.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>

volatile double napeti;
// návratová metoda pro dělení=>nemusí se přetypovávat a nedojde k zaokrouhlení
int stovky(int I)
{
    if(I==0)
    {
        return 1;
    }
    else if(I==1)
    {
        return 10;
    }
    else
    {
        return 100;
    }
}

void ctvrtyazsesty(int ktera) // metoda zajistí rozsvícení daného sedmi-segmentu
{
    switch(ktera)
    {
        case 0:
            // rozsvícení 4 sedmi-segmentu
            {
                PORTD|=(1<<PD5);
                PORTC&=~((1<<PC3)|(1<<PC4)|(1<<PC5));
                PORTD&=~(1<<PD6);
                PORTB&=~(1<<PB2);
                break;
            }
        case 1:
            // rozsvícení 5 sedmi-segmentu
            {
                PORTD|=(1<<PD6);
                PORTC&=~((1<<PC3)|(1<<PC4)|(1<<PC5));
                PORTD&=~(1<<PD5);
                PORTB&=~(1<<PB2);
                break;
            }
        case 2:
            // rozsvícení 6 sedmi-segmentu
            {
                PORTB|=(1<<PB2);
                PORTC&=~((1<<PC3)|(1<<PC4)|(1<<PC5));
                PORTD&=~((1<<PD6)|(1<<PD5));
                break;
            }
        default:
            break;
    }
}
```

```

void mezera() // mezera mezi napětím a proudem
{
    PORTC|=(1<<PC5);
    PORTC&=~((1<<PC3)|(1<<PC4));
    PORTD&=~((1<<PD5)|(1<<PD6));
    PORTB&=~(1<<PB2);
}
void prvniazdruhy(int která) // metoda zajistí rozsvícení daného sedmi-segmentu
{
    switch(která)
    {
        case 0:
            // rozsvícení 1 sedmi-segmentu
            {
                PORTC|=(1<<PC3);
                PORTC&=~((1<<PC4)|(1<<PC5));
                PORTD&=~((1<<PD5)|(1<<PD6));
                PORTB&=~(1<<PB2);
                break;
            }
        case 1:
            // rozsvícení 2 sedmi-segmentu
            {
                PORTC|=(1<<PC4);
                PORTC&=~((1<<PC3)|(1<<PC5));
                PORTD&=~((1<<PD5)|(1<<PD6));
                PORTB&=~(1<<PB2);
                break;
            }
    }
}
void poslicislo(int cislo) // metoda pro odeslání čísla na základě proměnné "cislo"
{
    switch(cislo)
    {
        case 0:
            {
                PORTD&=~((1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD2)|(1<<PD3));
                break;
            }
        case 1:
            {
                PORTD&=~((1<<PD1)|(1<<PD2)|(1<<PD3));
                PORTD|=(1<<PD0);
                break;
            }
        case 2:
            {
                PORTD&=~((1<<PD0)|(1<<PD2)|(1<<PD3));
                PORTD|=(1<<PD1);
                break;
            }
        case 3:
            {
                PORTD&=~((1<<PD2)|(1<<PD3));
                PORTD|=(1<<PD0)|(1<<PD1);
                break;
            }
    }
}

```

```

        case 4:
        {
            PORTD&=~((1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD3));
            PORTD|=(1<<PD2);
            break;
        }
        case 5:
        {
            PORTD&=~((1<<PD1)|(1<<PD3));
            PORTD|=(1<<PD0)|(1<<PD2);
            break;
        }
        case 6:
        {
            PORTD&=~((1<<PD0)|(1<<PD3));
            PORTD|=(1<<PD1)|(1<<PD2);
            break;
        }
        case 7:
        {
            PORTD&=~(1<<PD3);
            PORTD|=(1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD2);
            break;
        }
        case 8:
        {
            PORTD&=~((1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD2));
            PORTD|=(1<<PD3);
            break;
        }
        case 9:
        {
            PORTD&=~((1<<PD1)|(1<<PD2));
            PORTD|=(1<<PD0)|(1<<PD3);
            break;
        }
        default: // mezera
        {
            PORTD|=(1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD2)|(1<<PD3);
            break;
        }
    }
}
}
unsigned int Read_ADC(unsigned char channel) //metoda pro přečtení daného kanálu
{
    // vlož číslo ADC kanálu, vymaskuj nepoužité bity
    ADMUX&=0xF0;
    ADMUX|=channel&0x0F;
    // start převodu
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    // čekej na příznak skončení převodu
    while(!(ADCSRA&(1<<ADIF)));
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    // návratová hodnota - výsledek ADC převodu
    return ADCH; // ADLAR== 1 =>čteme jen horních 8 bitů
}

```

```

int main(void)
{
    // // vstupy - výstupy ---- DDR = 1 => výstup
    //
    DDRB|=(1<<PB2)|(1<<PB1); // výstupy - 6.displej, PWM
    DDRC|=(1<<PC3)|(1<<PC4)|(1<<PC5); // výstupy - 1-3 displej
    DDRD|=(1<<PD0)|(1<<PD1)|(1<<PD2)|(1<<PD3)|(1<<PD4)|(1<<PD5)|(1<<PD6);
    // výstupy - segment A, B, C, D, DP - displej 4 a 5
    DDRD&=~((1<<PD7)); // vstupy - enkoder A
    DDRB&=~((1<<PB0)|(1<<PB6)|(1<<PB7));
    // vstupy - enkodér B, třípolohový přepínač
    //
    // // vstupy - výstupy konec
    // // nastavení ADC
    //
    // ADLAR = zarovná výsledek od shora (můžeme číst jen horních 8bitů= ADCH),
REFS1=0 => reference pro ADC 1.1V
    ADMUX|=(1<<ADLAR)|(1<<REFS1)|(1<<REFS0);
    // povolení ADC převodníku, Interrupt flag, před dělička 128 při frekvenci
    hodin 8MHz
    ADCSRA|=(1<<ADEN)|(1<<ADIF)|(1<<ADPS2)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS0);
    //
    // // nastavení ADC konec
    // // nastavení PWM
    //
    TCCR1A|=(1<<COM1A1)|(1<<WGM10); // COM1A1 = neinvertující režim, WGM10 a
WGM12 = FAST PWM 8 bit
    TCCR1B|=(1<<WGM12)|(1<<CS10); // CS10 = před dělička 256
    //
    // // nastavení PWM konec
    OSCCAL=0xA5; // nastavení kalibračního bytu interního RC oscilátoru
    sei(); // globální povolení přerušení
    // proměnné
    //
    unsignedint adc;
    double proud;
    int cislo=0;
    int I;
    int caszpozdeni=100;
    unsignedchar a,b,c;
    double pomocnaint=0;
    double pomocnaint2=0;
    char P=0;
    int zobrazproud=0;
    //
    // proměnné konec
    proud=1.2; // přednastavená hodnota proudu
    OCR1A=60; // přednastavená hodnota výstupního napětí

```

```

while(1)
{
    if(bit_is_clear(PINB,PB6))
    {
        P=1;
    }
    // nastavování napětí
    if(P==1)
    {
        // detekce pohybu enkodéru
        a=(bit_is_set(PIND,PD7)>0)*2+(bit_is_clear(PINB,PB0)>0);
        _delay_us(1000);
        b=(bit_is_set(PIND,PD7)>0)*2+(bit_is_clear(PINB,PB0)>0);
        c=a*10+b;
        if(c==02||c==23||c==31||c==10)
        {
            if(OCR1A<=249) // horní mez napětí
            {
                OCR1A=OCR1A+1;
            }
        }
        if(c==01||c==13||c==32||c==20)
        {
            if(OCR1A>=5) // spodní mez napětí
            {
                OCR1A=OCR1A-1;
            }
        }
    }
    // nastavování napětí konec
    // nastavování proudu
    if(bit_is_clear(PINB,PB7))
    {
        P=0;
    }
    if(P==0)
    {
        a=(bit_is_set(PIND,PD7)>0)*2+(bit_is_clear(PINB,PB0)>0);
        _delay_us(1000);
        b=(bit_is_set(PIND,PD7)>0)*2+(bit_is_clear(PINB,PB0)>0);
        c=a*10+b;
        if(c==02||c==23||c==31||c==10)
        {
            if(proud<=2) // horní mez proudu
            {
                proud=proud+0.1;
            }
        }
        if(c==01||c==13||c==32||c==20)
        {
            if(proud>=0) // spodní mez proudu
            {
                proud=proud-0.1;
            }
        }
    }
    // nastavování proudu konec

```

```

PORTD&=~(1<<PD4); // vypnutí tečky
// volání ADC převodu
adc=Read_ADC(1); // výstupní napětí
pomocnaint=(adc*1.1/256.0)*200.0; // přepočítání pro napětí
// zobrazení napětí
for(I=0;I<=2;I++)
{
    PORTD&=~(1<<PD4);
    cislo=pomocnaint/stovky(2-I);
    poslicislo(cislo);
    if(I==1)
        // zobrazí tečku na 2 sedmi-segmentu
        {
            PORTD|=(1<<PD4);
        }
    ctvrtyazsesty(I);
    pomocnaint=pomocnaint-stovky(2-I)*cislo;
    _delay_us(caszpozdeni);
}
// zobrazení napětí konec
// mezera
PORTD&=~(1<<PD4);
poslicislo(10);
mezera();
// mezera konec
// volání ADC převodu
adc=Read_ADC(2); // výstupní proud
pomocnaint2=(0.4153*adc+0.2297); // přepočítání pro proud
if((pomocnaint2/10.0)>=proud)
{
    OCR1A=0; // vypnutí zdroje při překročení nastavené meze proudu
}
// zobrazení proudu
zobrazproud=10*proud; // násobení 10 pro získání čísla bez desetinné
tečky
_delay_us(caszpozdeni);
for(I=0;I<=1;I++)
{
    PORTD&=~(1<<PD4);
    cislo=zobrazproud/stovky(1-I);
    poslicislo(cislo);
    if(I==0)
        // zobrazí tečku na 5 sedmi-segmentu
        {
            PORTD|=(1<<PD4);
        }
    prvniazduhy(I);
    zobrazproud=zobrazproud-stovky(1-I)*cislo;
    _delay_us(caszpozdeni);
}
// zobrazení proudu konec
}
return 0;
}

```