

UNIVERZITA PARDUBICE

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A  
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Pavel Poskočil

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2018/2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Poskočil**  
Osobní číslo: **I16036**  
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

Navrhněte a realizujte regulovatelný napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem.  
Zvolte vhodný typ mikrokontroléru pro řešení této úlohy. Po konzultaci s vedoucím práce navrhněte obvodové řešení. Vytvořte potřebný firmware pro mikrokontrolér. Realizujte zdroj na desce plošných spojů.  
Regulace napětí bude v rozsahu od 0 do 20 V s krokem 100 mV, proudové omezení bude nastavitelné od 10 mA do 2 A s krokem 10 mA. Přesnost nastavených a snímaných veličin musí být do 1% v celém pracovním rozsahu. Napětí a proud bude regulováno rotačním spínačem a zobrazováno na displeji.  
Součástí textové práce bude kontrolní měření jednotlivých subsystémů a celku. Respektujte základní pravidla bezpečnosti při práci s elektrickým proudem.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **40 stran A4**

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

Seznam odborné literatury:

**VOBECKÝ, Jan. a Vít ZÁHLAVA. Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady. 3., rozš. vyd. Praha: Grada Publishing, 2005. ISBN 978-80-247-1241-3.**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Bc. David Matoušek, Ph.D.**

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17. května 2019**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan

Ing. Jan Piďanič, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2018

Prohlašuji:

Tuto práci jsem 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., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, 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.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 20. 07. 2020

Pavel Poskočil

## **PODĚKOVÁNÍ**

V první řadě bych chtěl poděkovat své rodině, které vděčím za podporu při celé době studia a samotnému umožnění studia.

Dále bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Davidu Matouškovi, Ph.D. za jeho trpělivost a velmi cenné rady, které mi pomohly vytvořit tuto bakalářskou práci.

Také bych chtěl poděkovat spolužákovi a kamarádovi panu Bc. Marku Veselému, za pomoc a rady ohledně samotného programování mikrokontrolérů AVR.

## **ANOTACE**

Práce se zabývá napájecími zdroji. Účelem je navrhnout regulovatelný napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem. Součástí postupu návrhu je volba vhodných součástek, konstrukce desek plošných spojů a mechanická konstrukce.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Napájecí zdroj, mikrokontrolér, ATmega16, A/D převodník, sedmi-segmentový displej, rotační enkodér.

## **TITLE**

Power supply controlled by microcontroller.

## **ANNOTATION**

This work deals with power supplies. The purpose is to design a controllable power supply controlled by a microcontroller. Part of the design process is the selection of suitable components, PCB design and mechanical construction.

## **KEYWORDS**

Power supply, microcontroller, ATmega 16, A/D converter, seven-segment display, rotary encoder.

## OBSAH

PODĚKOVÁNÍ.....	6
ANOTACE.....	7
KLÍČOVÁ SLOVA.....	7
TITLE.....	7
ANNOTATION .....	7
KEYWORDS .....	7
OBSAH .....	8
SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK .....	10
SEZNAM ZKRATEK.....	12
ÚVOD .....	13
1. NAPÁJECÍ ZDROJE OBECNĚ .....	14
2. SÍŤOVÉ NAPÁJECÍ ZDROJE.....	14
2.3. POROVNÁNÍ OBOU VARIANT .....	15
2.4. ZÁVĚR.....	15
3. NÁVRH REGULOVATELNÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE.....	16
3.1. Transformátor.....	18
3.2. Pomocný zdroj pro napájení řídicích prvků .....	19
3.3. Usměrňovač a filtr.....	20
3.4. Mikrokontrolér .....	23
3.5. D/A převodník.....	25
3.6. Snímání výstupních hodnot mikrokontrolérem.....	27
3.7. Operační zesilovač pro řízení výkonového tranzistoru .....	28
3.8. Regulační tranzistor.....	30
3.9. Chladič výkonového tranzistoru.....	31
3.10. Rotační enkodér.....	32
3.11. Sedmi-segmentový displej .....	35
3.12. Ovládání sedmi-segmentových displejů.....	36
3. KONSTRUKCE NAPÁJECÍHO ZDROJE .....	39
4.1. Desky plošných spojů.....	39
4.2. Kryt napájecího zdroje .....	42
4. PROGRAM PRO NAPÁJECÍ ZDROJ .....	43
4.1. Funkce: ADC_read .....	43
4.2. Funkce: Test_prepinac .....	43
4.3. Funkce: Test_ekoder .....	44



4.4. Funkce: Zobrazit .....	46
4.5. Funkce: Test_napeti_proud.....	48
4.6. Hlavní funkce programu .....	49
5. MĚŘENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍHO ZDROJE .....	51
5.1. Měření zatěžovací charakteristiky .....	51
5.2. Zkouška proudového omezení .....	53
5.3. Měření vstupní hodnoty A/D převodníku v obvodu pro snímání proudu.....	54
5.4. Měření výstupní hodnoty D/A převodníku .....	55
ZÁVĚR.....	56
NÁPADY NA MOŽNÉ VYLEPŠENÍ .....	57
POUŽITÁ LITERATURA.....	58
PŘÍLOHY .....	60

## SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

Obrázek 1: Obecný napájecí zdroj .....	14
Obrázek 2: Blokové schéma navrhovaného napájecího zdroje.....	16
Obrázek 3: Toroidní transformátor INDEL TST 50/013 .....	18
Obrázek 4: Modulový napájecí zdroj IRM-10-5 .....	19
Obrázek 5: Dvojecestný můstkový usměrňovač .....	20
Obrázek 6: Můstkový usměrňovač v pouzdře KBL02 .....	21
Obrázek 7: Rozdělení vývodů ATmega16 .....	23
Obrázek 8: Zapojení mikrokontroléru ATmega16.....	25
Obrázek 9: Rozdělení vývodů MCP4822-E/P .....	25
Obrázek 10: Formát komunikace mezi MCP4822-E/P a ATmega16 .....	26
Obrázek 11: Schéma zapojení pro snímání výstupních hodnot .....	27
Obrázek 12: Rozdělení vývodů LM258P .....	28
Obrázek 13: Schéma zapojení LM258P v návrhu napájecího zdroje .....	29
Obrázek 14: Rozdělení vývodů regulačního tranzistoru .....	30
Obrázek 15: Tepelné schéma .....	31
Obrázek 16: Chladič CH14/125 s výkonovým regulačním tranzistorem.....	32
Obrázek 17: Enkodér ALPS EC11B se základními parametry .....	33
Obrázek 18: Princip rotačního enkodéru.....	33
Obrázek 19: Schéma zapojení enkodéru .....	34
Obrázek 20: Sedmi-segment použitý v displeji.....	35
Obrázek 21: Vnitřní zapojení displeje.....	35
Obrázek 22: Vnitřní zapojení rezistorové sítě.....	36
Obrázek 23: Rozdělení vývodů 74HC595 .....	36
Obrázek 24: Schéma zapojení displeje.....	38
Obrázek 25: DPS_1 .....	39
Obrázek 26: DPS_2 .....	40
Obrázek 27: DPS_3 .....	41
Obrázek 28: DPS_4 .....	41
Obrázek 29: Kryt napájecího zdroje.....	42
Obrázek 30: Generování hodnot rotačním enkodérem.....	44
Obrázek 31: Znázornění funkce: Test_enkoder .....	45
Obrázek 32: Zobrazení hodnot na displeji .....	46
Obrázek 33: Výsledná podoba napájecího zdroje .....	55

Tabulka 1: Parametry toroidního transformátoru .....	18
Tabulka 2: Parametry modulového zdroje IRM-10-5 .....	19
Tabulka 3: Parametry můstkového usměřovače.....	21
Tabulka 4: Parametry regulačního tranzistoru .....	30
Tabulka 5: Pravdivostní tabulka.....	44
Tabulka 6: Závislost poklesu napětí na odebíraném proudu zátěží.....	51
Tabulka 7: Jednoprocentní přesnost napájecího zdroje.....	56
Graf 1: Závislost poklesu výstupního napětí na odebíraném proudu.....	52
Graf 2: Zatěžovací charakteristika .....	53
Graf 3: Závislost výstupního napětí na odebíraném proudu při činnosti proudové pojistky (napětí naprázdno 20 V, pojistka nastavena na proud 1 A) .....	53
Graf 4: Vstupní hodnoty A/D převodníku.....	54
Graf 5: Výstupní napětí D/A převodníku .....	55

## SEZNAM ZKRATEK

A/D	Analog na digitál
AREF	Analog Reference
AVCC	Napájecí napětí pro A/D převodník
D/A	Digitál na analog
E <sup>2</sup> PROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GND	Bod s nulovým potenciálem ,zem‘
MISO	Master In Slave Out
MOSI	Master Out Slave in
PWM	Pulse Width Modulation
RAM	Random Acces Memory
SCK	Serial Clock
SS	Slave Select
VCC	Napájecí napětí

## ÚVOD

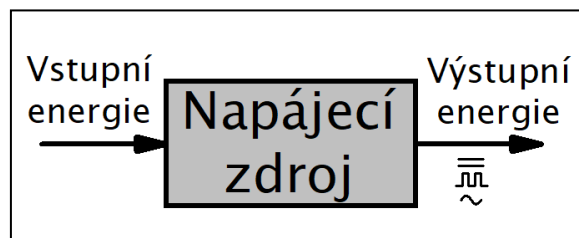
Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a následnou realizací regulovatelného síťového napájecího zdroje. Každé elektronické zařízení vyžaduje dodávku elektrické energie v podobě napájecích zdrojů, které tuto energii elektronickým obvodům dodávají. Regulovatelné napájecí zdroje jsou poté tvoří naprostý základ každé laboratoře, kde slouží k ožívování zařízení, ale i zapojení, desek plošných spojů a různých obvodů, například za účelem proměření parametrů nebo zjištění závady.

Navrhovaný napájecí zdroj bude, jak je z názvu bakalářské práce patrné, řízen mikrokontrolérem, což přináší řadu výhod. Nejpodstatnější je zajisté výhoda, že na již realizovaném zařízení pouhou změnou kódu programu můžeme velmi zásadně změnit parametry celého napájecího zdroje a také samotnou funkčnost.

Teoretický základ tvoří první a druhá kapitola, které pojednávají o napájecích zdrojích obecně a poté o dvou základních typech síťových napájecích zdrojů. Následuje třetí kapitola, ve které je popsán návrh napájecího zdroje. Samotná konstrukce je tématem páté kapitoly. Pátá kapitola je věnována programu, který je nahrán do zvoleného typu mikrokontroléru a ovládá tak celý napájecí zdroj. Následuje poslední kapitola týkající se měření jednotlivých parametrů vyrobeného napájecího zdroje.

## 1. NAPÁJECÍ ZDROJE OBECNĚ

Napájecí zdroje jsou využívány v mnoha elektronických zařízeních jako zdroje elektrické energie pro samotnou činnost zařízení. Ve své podstatě se jedná o měniče energie, tedy měniče vstupní energie různého druhu na výstupní elektrickou energii. [1]



Obrázek 1 – Obecný napájecí zdroj [1]

Podle vstupní energie můžeme rozdělit napájecí zdroje na:

1. Síťové napájecí zdroje,
2. Elektrochemické napájecí zdroje,
3. Mechanické napájecí zdroje,
4. Fotoelektrické zdroje. [1]

Podle výstupní elektrické energie můžeme rozdělit napájecí zdroje na:

1. Stejnoseměrné,
2. Střídavé. [1]

Dále se bakalářská práce bude zabývat tématem síťových napájecích zdrojů, které na svém výstupu vytvářejí stejnosměrné napětí, neboť tento typ napájecího zdroje je v bakalářské práci navrhován a později i konstruován jako laboratorní regulovatelný napájecí zdroj.

## 2. SÍŤOVÉ NAPÁJECÍ ZDROJE

Síťové napájecí zdroje nachází své uplatnění v zařízeních využívající elektrickou energii z distribuční sítě ve formě střídavého napětí: 230 V / 50 Hz. Naprostá většina těchto zařízení u koncových spotřebitelů využívá ke své funkci, na rozdíl od střídavého napětí v distribuční síti, stejnosměrné napětí. Účel síťových napájecích zdrojů tedy v prvotní řadě je toto napětí správně přeměnit. Dalším úkolem je poté přeměněné napětí stabilizovat, a tím eliminovat možné výkyvy například z distribuční sítě, nebo při změně zátěže. Princip stabilizace vstupního napětí je kritérium, podle kterého se síťové zdroje klasifikují. Síťové napájecí zdroje tedy dle tohoto kritéria rozdělit do dvou základních skupin:

1. Lineární síťové zdroje,
2. Impulsní síťové zdroje. [1] [2]

Obě tyto skupiny se ve své podstatě liší pouze způsobem, jakým se stabilizuje vstupní napětí. U lineárních síťových zdrojů je výkonový prvek zajišťující stabilizaci, resp. samotnou regulaci řízen lineárně. Tento výkonový prvek pracuje jako lineárně proměnný odpor. Ovšem základem impulsní stabilizace je rozstrídání nestabilního stejnosměrného napětí frekvencí elektronického spínače. [1]

### **2.3. POROVNÁNÍ OBOU VARIANT**

Klasické síťové zdroje s lineární regulací se vyznačují jistě svou jednoduchostí. Nízká cena, která ale roste s požadovaným výkonem na napájecí zdroj. Mezi další výhodné vlastnosti určitě patří menší zvlnění, žádné rušení okolí z hlediska použitých součástek a také rychlá odezva na změnu zátěže. Jsou velikostně větší a také ohledně hmotnosti těžší. Obrovskou nevýhodou je, že lineární stabilizace, resp. regulace je ve své podstatě založena na změně odporu regulačního výkonového prvku. To má své zapříčinění v nízké účinnosti celého napájecího zdroje. U lineárních zdrojů vzniká vlivem vysokého ztrátového výkonu přebytečné teplo, které je potřeba odvádět. [3]

Síťové napájecí zdroje s impulsní regulací se vyznačují do jisté míry větším počtem součástek a s tím spojeným složitějším návrhem. Ale i tak jsou velikostně menší a ohledně hmotnosti lehčí. S impulsní regulací, u které dochází pouze ke spínání regulačního výkonového prvku, přichází také i daleko větší účinnost, která je okolo 75 – 90%. Zdroje s impulsní regulací jsou ovšem zdrojem rušivých signálů, dosahují také většího zvlnění a mají pomalejší odezvu na změnu zátěže. [3]

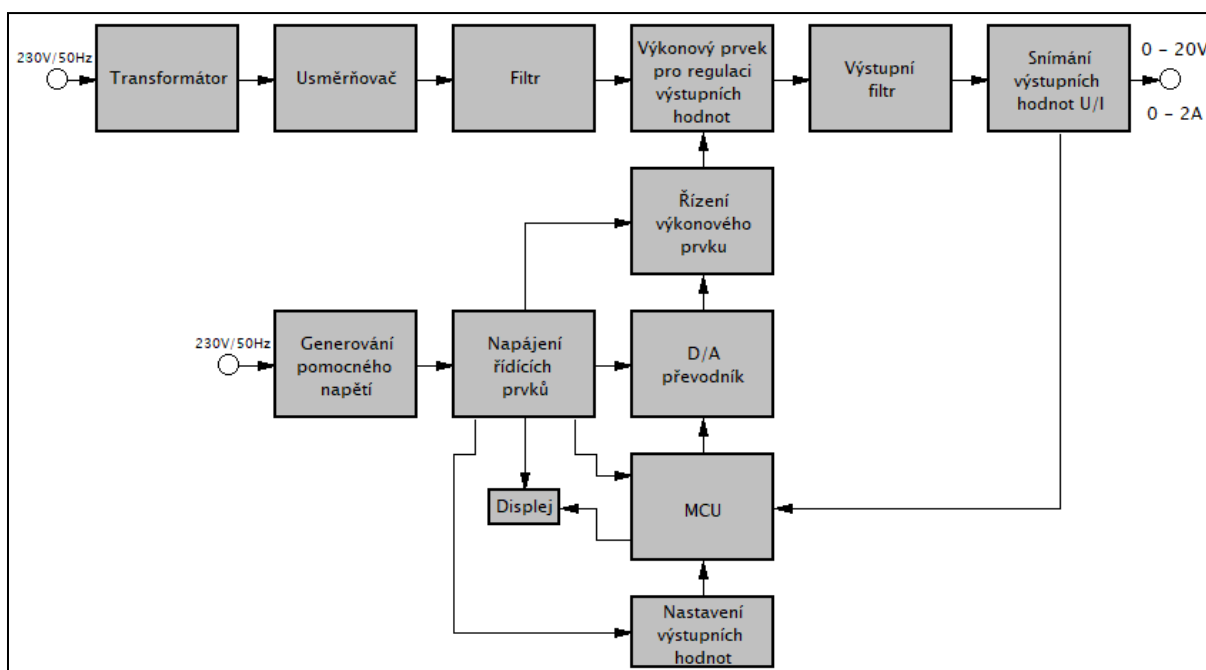
### **2.4. ZÁVĚR**

Po porovnání vlastností byla zvolena koncepce lineárního stabilizace. Síťový zdroj s lineární regulací mají menší výstupní zvlnění a jejich principiální funkce a konstrukce je podstatně jednodušší, tomu odpovídá i cena z hlediska samotné výroby. Při výběru této koncepce také odpadne potřeba řešit případné rušení, které je charakteristické pro síťové zdroje s impulsní regulací. Určitou modifikaci bude přinášet zakomponování mikrokontroléru do ovládání řízení celého napájecího zdroje, který bude probrán v následujících kapitole.

### 3. NÁVRH REGULOVATELNÉHO NAPÁJECÍHO ZDROJE

Obrázek 2 představuje blokové schéma navrhovaného napájecího zdroje. Jak bylo zmíněno v závěru předešlé kapitoly, navrhovaný napájecí zdroj bude mít lineární koncepci. A tudíž hlavním blokem provádějící regulaci, resp. stabilizaci je výkonový tranzistor, který bude představovat proměnlivý odpor.

Nejjednodušší způsob regulace, resp. stabilizace, který je u většiny klasických lineárních napájecích zdrojů je za pomoci operačního zesilovače. Na diferenční vstupy operačního zesilovače je připojen napěťový signál zpětné vazby a například potenciometr, kterým se nastavuje požadovaná výstupní hodnota. Výstupní rozdílový napěťový signál z operačního zesilovače poté řídí regulační výkonový tranzistor.



Obrázek 2 – Blokové schéma navrhovaného napájecího zdroje

Ve schématu návrhu vlastního napájecího zdroje (Obrázek 2) je také použit operační zesilovač, ovšem jeho regulace není prováděna pomocí potenciometru, ale do schématu je zakomponován mikrokontrolér, který řídí celou logiku regulace. Samotné nastavení hodnoty je poté prováděné pomocí rotačního enkodéru. Použitím mikrokontroléru lze dostat hned dvě možnosti, jak na operační zesilovač poslat napětí z mikrokontroléru.



První možností by jistě bylo využití pulzně šířkové modulace (PWM signálu) vyslanou z mikrokontroléru. V takovém případě by za výstupem mikrokontroléru musel být RC filtr typu dolní propust, který by sloužil k vytvoření spojitého analogového signálu ze signálu PWM. Následný analogový signál by se poté šířil na vstup operačního zesilovače. V závislosti na střídě PWM signálu vyslaného na vstup operačního zesilovače přes RC filtr by poté operační zesilovač řídil regulační tranzistor.

Druhou možností je pomocí D/A převodníku, který by digitální signál z mikrokontroléru převáděl na signál analogový a ten by následně putoval na vstup operačního zesilovače. Z hlediska praktičnosti a požadavkům na přesnost celého zdroje byla vybrána druhá možnost. Ovládání pomocí PWM signálu by znamenalo k mikrokontroléru připojit RC filtr typu dolní propust, a to více než prvního řádu.

V blokovém schématu je také mnoho součástek, které se podílejí na procesu regulace a pro svou činnost vyžadují napájení, a proto je součástí celého schématu vytvoření pomocného napájecího napětí pro takovéto řídicí prvky. Tento pomocný zdroj musí mít dostatečný proudový odběr, neboť zařizuje napájení displeje, který, jak bude níže probráno dosahuje teoreticky proudového odběru až 0,672 A. Dále pomocný zdroj napájí samotný mikrokontrolér, D/A převodník, posuvné registry a také je připojen k rotačnímu enkodéru, který na základě napájení generuje obdélníkový signál. Tento pomocný zdroj, jak bude zmíněno v následující podkapitole funguje na síťové napětí. Z hodnoty 230 V / 50 Hz střídavého napětí tedy toto napětí transformuje na 5 V stejnosměrného napětí. Maximální proudový odběr tohoto zdroje může být 2,08 A.

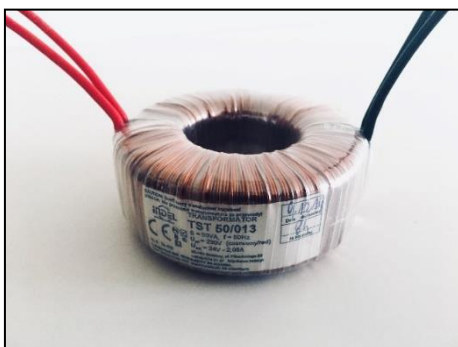
### 3.1. Transformátor

Transformátor využívá principu elektromagnetické indukce. Na základě tohoto principu převádí elektrickou energii ze svého vstupu tzv. primáru na výstup tzv. sekundáru. Poměr přenesené energie určuje převod transformátoru  $p$ , který je definován rovnicí (1). [2]

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}, \quad [2] (1)$$

kde  $U_1$  a  $U_2$  je vstupní a výstupní napětí,  $I_1$  a  $I_2$  vstupní a výstupní proud,  $N_1$  počet závitů primárního vinutí a  $N_2$  počet závitů sekundárního vinutí. [2]

Podle parametrů navrhovaného napájecího zdroje, který má mít regulovatelné napětí v rozsahu 0-20 V a proud v rozsahu 0-2 A, což dává maximální výkon výstupu 40 VA. Je v této bakalářské práci použit toroidní sériově vyráběný transformátor od firmy INDEL (Obrázek 3), jehož hlavní parametry jsou vypsány v tabulce 1. Z tabulky 1 je již patrné, že hlavní parametry zvoleného transformátoru jsou dostatečné k použití v návrhu napájecího zdroje.



Obrázek 3 – Toroidní transformátor INDEL TST 50/013

Výkon	50 VA
Vstupní primární napětí	230 V / 50 Hz
Výstupní sekundární napětí	24 V / 50 Hz
Výstupní sekundární proud	2,08 A

Tabulka 1 – Parametry toroidního transformátoru

### 3.2. Pomocný zdroj pro napájení řídicích prvků

Pro napájení všech prvků, které se podílejí na správné funkci a řízení napájecího zdroj byl vybrán modulový zdroj pro montáž na desku plošných spojů. Tento zdroj napájí veškeré řídicí prvky. Výjimku tvoří pouze operační zesilovač, který je napájen z hlavní větve zdroje.

Veškeré vybrané řídicí prvky pro napájení pomocným zdrojem jsou napájeny napětím 5 V. Ohledně odběru proudu bude mít největší vliv celkový displej tvořený ze sedmi-segmentových displejů. Tento odběr se při uvažování rozsvícení všech segmentů displeje a odběru proudu pro jeden segment 14 mA pohybuje na hodnotě 672 mA Tato hodnota proudu je volena s dostatečnou rezervou, neboť rozsvícení všech segmentů displeje je z hlediska správné funkčnosti nepravděpodobné. Ostatní prvky zapojené k tomuto zdroji (mikrokontrolér, D/A převodník, posuvný registr 74HC595 a rotační enkodér) už mají v porovnání s displejem odběr velmi malý. Lze tedy s dostatečnou rezervou uvažovat maximální proudový odběr pomocného zdroje okolo 1 A.

Po zohlednění parametrů se jako nejvhodnější k použití stal modulový zdroj IRM-10-5 od firmy MEAN WELL. Tento zdroj je schopný do obvodu dodat maximální proud 2 A, je tedy dvojnásobně dostačující než maximální proudový odběr, který už tak je volen s velmi dostatečnou rezervou. Navíc tento zdroj funguje, jak je z tabulky 2 patrné na střídavé napětí 230 V. Lze ho tedy snadno v celém návrhu připojit k síťovému napětí.



Obrázek 4 – Modulový napájecí zdroj IRM-10-5 [4]

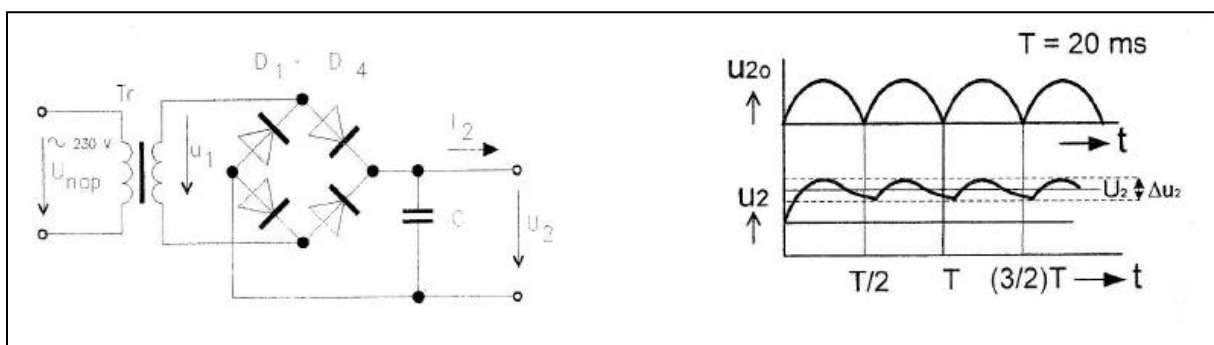
Výkon	50VA
Vstupní primární napětí	230V/50Hz
Výstupní sekundární napětí	24V/50Hz
Výstupní sekundární proud	2,08A

Tabulka 2 – Parametry modulového zdroje IRM-10-5 [4]

### 3.3. Usměrňovač a filtr

Usměrňovače obstarávají v síťových napájecích zdrojích přeměnu střídavého napětí na napětí jedné polaridy. Toto výstupní napětí je ovšem na výstupu usměrňovače stále pulzujícího charakteru. Proto se k výstupu usměrňovače připojuje filtr v podobě elektrolytického kondenzátoru, který má za následek pulzující stejnosměrné napětí ve větší míře vyhladit, resp. potlačit zvlnění.

Pro tuto bakalářskou práci byl vybrán typ dvojcestného můstkového usměrňovače, tedy zapojení se čtyřmi diodami. Tento typ je v napájecích zdrojích použit zcela běžně ve většině případů.



Obrázek 5 – Dvojcestný můstkový usměrňovač [1]

Vhodně navržený usměrňovač se skládá ze správně nadimenzovaných diod, u kterých jsou zásadní následující parametry:

- Maximální závěrné napětí  $U_{RRM}$ ,
- Maximální proud  $I_F$ ,
- Maximální impulsní proud  $I_{FSM}$ . [5]

Pro dimenzování diod dvojcestného můstkového usměrňovače platí rovnice (2), (3) a (4).

$$U_{RRM} \geq U_{1MAX} , \quad [5] (2)$$

$$I_F = \frac{I_Z}{2} , \quad [5] (3)$$

$$I_{FSM} = \frac{U_{1MAX}}{R_{TRS}} , \quad [5] (4)$$

kde  $U_{1MAX}$  je maximální hodnota amplitudy napětí na sekundární straně transformátoru,  $I_Z$  výstupní zatěžovací proud a  $R_{TRS}$  odpor sekundárního vinutí transformátoru.

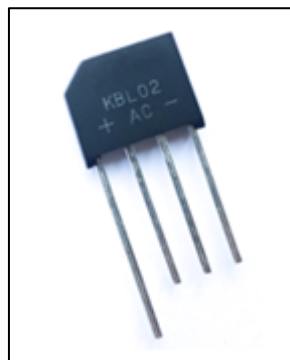
Volba parametrů usměrňovače na základě zmíněných rovnic je spíše optimistické dimenzování v teorii. V praxi se používá pesimističtější dimenzování, kdy se nepředpokládá, že dvě diody nemají identické parametry, a proto na nich například v případě můstkové usměrňovače nemůže být stejnoměrně rozloženo napětí. Parametry jsou proto voleny s rezervou minimálně 50% a v ideálním případě 100%.

Maximální hodnota napětí  $U_{1MAX}$  je dána rovnicí (5). S rezervou 100% je tedy maximální závěrné napětí  $U_{RRM}$  rovno 68 V.

$$U_{1MAX} = \sqrt{2} \cdot U_{1EF} = \sqrt{2} \cdot 24 \doteq 34 \text{ V} \quad (5)$$

Maximální výstupní zatěžovací proud  $I_Z$  může být až 2 A. Z rovnice (3) a s rezervou 100% poté vyplívá, že maximální proud  $I_F$  by měl být optimálně pro můstkový usměrňovač dimenzován také na 2 A.

Odpor sekundárního vinutí transformátoru byl změřen o hodnotě 1  $\Omega$ . Maximální impulsní proud je poté podle rovnice (4) 34 A. S počítáním 100% rezervy tedy 68 A.



Obrázek 6 – Můstkový usměrňovač v pouzdře KBL02 [6]

URRM	Maximální závěrné napětí	200 V
IF	Maximální proud	4 A
IFSM	Maximální impulsní proud	200 A

Tabulka 3 – Parametry můstkového usměrňovače [6]

Můstkový usměrňovač byl vybrán v jednom pouzdře KBL02 (Obrázek 6), čtveřice diod tedy je v jedné součástce jako celek. Z parametrů tohoto můstkového usměrňovače (Tabulka 3) je již patrné, že usměrňovač bude vyhovující s více jak 100% rezervou pro vypočítané parametry.

Jak již bylo zmíněno filtr je tvořen elektrolytickým kondenzátorem připojeným na výstup usměrňovače. Pro vhodně zvolenou kapacitu tohoto kondenzátoru, která nesmí být z hlediska potlačení zvlnění výstupního napětí příliš malá a z hlediska možných vzniků proudových maxim vlivem velkých kapacit příliš velká. Pro tuto kapacitu platí empirická rovnice (6):

$$C_F \geq \frac{K \cdot I_{ZMAX}}{p \cdot U_0} , \quad [3] (6)$$

kde  $C_F$  je hodnota kapacity,  $K$  je konstanta rovna pro jednocestné usměrnění 600 a pro dvoucestné 300,  $I_{ZMAX}$  je maximální výstupní proud v jednotkách miliampér,  $p$  je zvlnění výstupního napětí, tato hodnota se pohybuje v rozmezí 5 až 10 procent a  $U_0$  je střední hodnota výstupního napětí. [3]

Po dosazení do rovnice (7), kde  $p = 7,5 \%$  vychází výsledná kapacita:

$$C_F \geq \frac{K \cdot I_{ZMAX}}{p \cdot U_0} = \frac{300 \cdot 2 \cdot 10^3}{7,5 \cdot 22} = \frac{6 \cdot 10^5}{165} \doteq 3600 \mu F \quad [3] (7)$$

Dimenzování napětí kondenzátoru je nutné stanovit na maximální hodnotu usměrněného napětí, který je podle rovnice (8):

$$U_{C_{MAX}} \geq \sqrt{2} \cdot U_2 - U_D = \sqrt{2} \cdot 24 - 1 \doteq 34 - 1 \doteq 33 V \quad (8)$$

kde  $U_{C_{MAX}}$  je maximální pracovní napětí kondenzátoru,  $U_s$  je efektivní hodnota napětí na sekundární straně transformátoru a  $U_D$  je úbytek napětí na můstkovém usměrňovači.

Ohledně výsledné napěťové hodnoty je třeba uvažovat případné výchylky napětí ze sítě a pracovní napětí kondenzátoru volit alespoň s 50% rezervou, a tedy zhruba hodnotu 50 V.

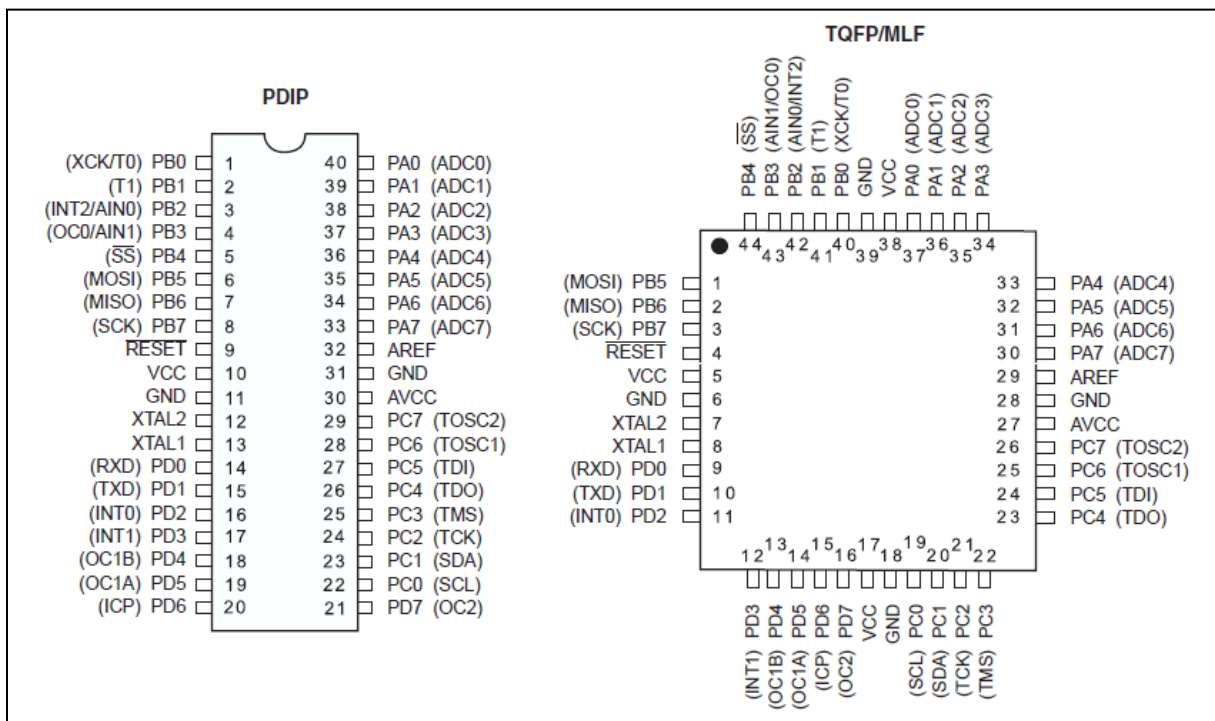
Na základě vypočítané kapacity a pracovního napětí byl vybrán elektrolytický kondenzátor 4700  $\mu F$  / 50 V. Výsledné zvlnění výstupního napětí z filtru je nyní vlivem zvýšení kapacity dáno úpravou rovnice 7:

$$p = \frac{300 \cdot I_{ZMAX}}{C_F \cdot U_0} = \frac{300 \cdot 2 \cdot 10^3}{4,7 \cdot 10^3 \cdot 22} = 5,8 \% \quad [3] (9)$$

### 3.4. Mikrokontrolér

Následující podkapitoly budou zaměřeny na mikrokontroléry AVR, tedy přesněji na mikrokontrolér AVR ATmega16. Tento typ z řady ATmega byl zvolen pro tuto bakalářskou práci. ATmega16 svými parametry spíše představuje základ samotné řady ATmega. Pro tuto bakalářskou práci jsou ale tyto parametry naprosto dostačující. Především se jedná o interní A/D převodník s rozlišením 10bitů, tedy 1024 stavů. To dává při použití interní reference 2,56 V napěťové rozlišení 2,5 mV, což je pro výsledné parametry dostačující. Samotný program se ukládá do zabudované paměti FLASH o kapacitě 16 KB. Výdrž přeprogramování WRITE/ERASE této paměti je 10 000 cyklů. Paměť typu E<sup>2</sup>PROM pro uložení dat i po odpojení napájení má velikost o kapacitě 512 B. Výdrž této paměti pro přeprogramování WRITE/ERASE je až 100 000 cyklů. Datová paměť RAM pro ukládání aktuálních dat má velikost o kapacitě 1 KB. Z hlediska paměti je také mikrokontrolér ATmega 16 dostačující. S okolím lze mikrokontrolér komunikovat pomocí čtveřice osmi bitových INPUT/OUTPUT portů PA, PB, PC a PD. Tedy celkem pomocí 32 vývodů. [7]

Rozhodující tedy pro použití mikrokontroléru ATmega16 byla dostupnost ve smyslu použití již na dřívějších zapojeních v průběhu studia v poměru výše uvedených parametrů.



Obrázek 7 – Rozdělení vývodů ATmega16 [8]

### 3.4.2. Zapojení mikrokontroléru ATmega16

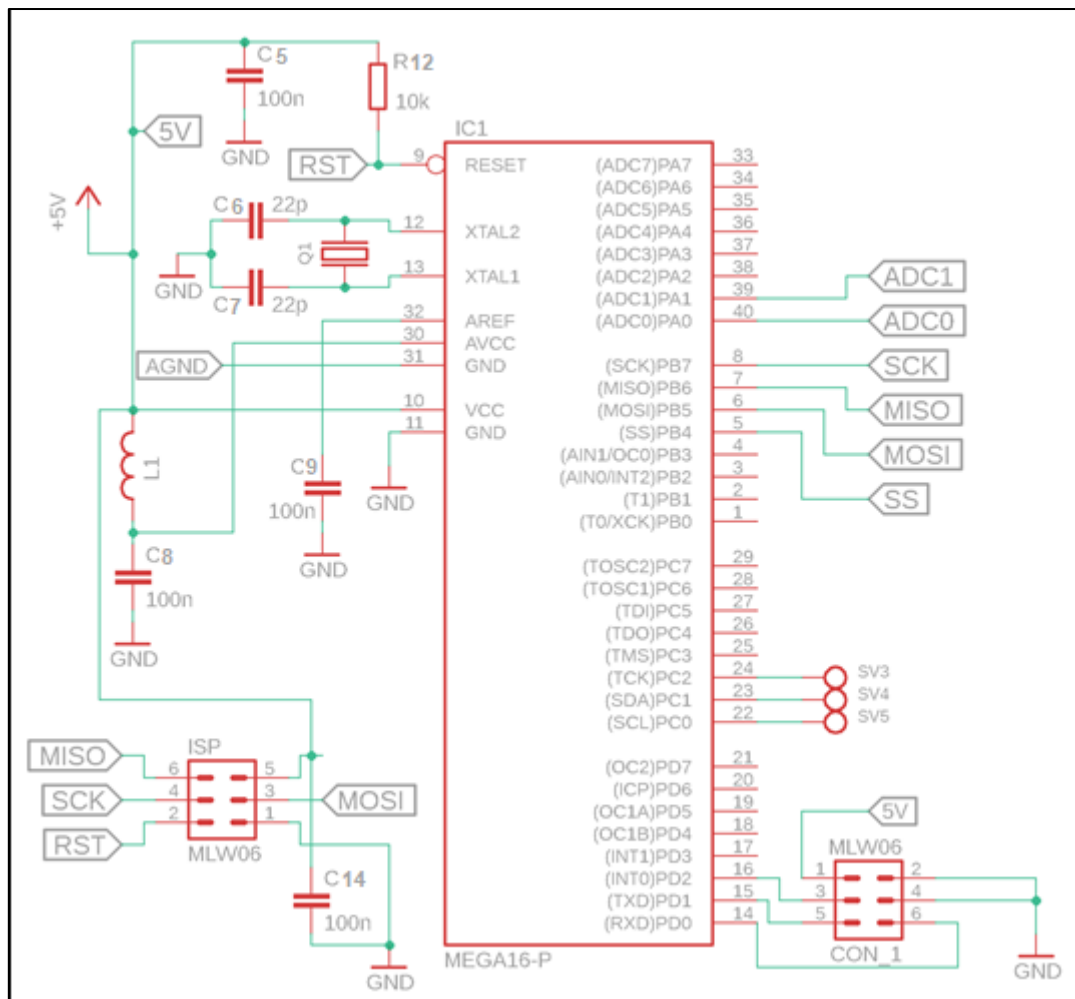
Na obrázku 14 lze vidět schéma zapojení mikrokontroléru. Z pomocného napájecího zdroje IRM-10-05 je přivedeno napájecí napětí 5 V a zem, tento přívod je připojen na vývod 10: VCC, který napájí mikrokontrolér a vývod 11: GND. Rezistor R1 chrání mikrokontrolér před nechtěným resetem.

Napájecí napětí je také vedeno přes LC filtr na vývod 30: AVCC sloužící k napájení vnitřního A/D převodníku. Důvod vedení přes LC filtr je potlačení případného rušení, které by se mohlo s napájecím napětím dostat na vývod: AVCC. Digitální obvody většinou případné rušivé vlivy v napájecím napětí dovedou tolerovat, ovšem analogové obvody by tímto trpěly. Vývod 30: GND, který je zemí pro přívod vnitřního A/D převodníku je připojen k zemi výstupu napájecího zdroje. Důvodem je, aby měřené napětí mělo se zemním vývodem 30 společnou analogovou zem o stejném zemním potenciálu a nedocházelo tak k případným odchylkám, které by mohli nastat připojením k zemi digitální. Posledním důležitým vývodem ohledně vnitřního A/D převodníku je vývod 32: AREF, na jehož vývod je přivedeno napětí v případě využití externí napěťové reference pro převodník. Na vývodu AREF tedy je napěťová hodnota, vůči které převodník vztahuje výsledky převodu. V případě zapojení je na AREF připojen blokovací kondenzátor, který definuje použití vnitřní hodnoty napěťové reference 2,56 V.

Dále jsou k mikrokontroléru připojeny vnější hodiny v podobě 16 MHz krystalu. Vývody: PA0 a PA1 jsou první dva vstupy vnitřního A/D převodníku, tyto dva vývody jsou vyvedeny na dva výstupy, které se podílejí na snímání výstupního napětí u výstupu napájecího zdroje.

Vývody: PB5 (SCK), PB6 (MISO) a PB7 (MOSI) jsou společně s vývody: RESET, VCC a GND vyvedeny na ISP konektor typu MLW06 určený k připojení programátoru. Vývody SCK a MOSI jsou také vedeny společně s vývodem SS na D/A převodník. Vývody: PC0 až PC2 slouží ke komunikaci s rotačním enkodérem, kterým se nastavuje požadovaná hodnota výstupního napětí, popř. proudu. Poslední využité vývody na mikrokontroléru jsou PD0 až PD2. Tyto vývody jsou připojeny na šesti pinový konektor typu MLW. Prostřednictvím tohoto konektoru komunikuje mikrokontrolér s vnějším panelovým displejem.

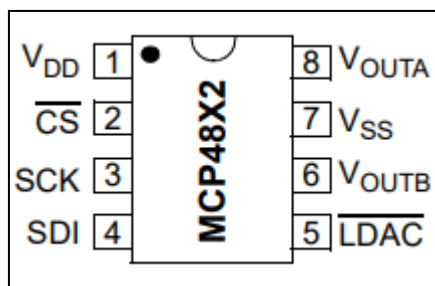




Obrázek 8 – Zapojení mikrokontroléru ATmega16

### 3.5. D/A převodník

Převod digitálního signálu na signál analogový obstarává D/A převodník MCP4822-E/P od společnosti MICROCHIP TECHNOLOGY. D/A převodník je v pouzdře DIL8, rozdělení vývodů je zobrazeno na obrázku 9.



Obrázek 9 – Rozdělení vývodů MCP4822-E/P [9]

Jedná se o dvoukanálový D/A převodník (přičemž druhý kanál nebude využit) s rozlišením 12 bitů a interní napěťovou referencí 2,048 V. Napěťovou referenci lze dvojnásobně zesílit na hodnotu 4,096V. D/A převodník komunikuje pomocí SPI rozhraní, a tedy k samotné komunikaci využívá tři vývody mikrokontroléru (SCK, MOSI, SS) pro své tři vývody (SCK, SDI, CS).

REGISTER 5-1: WRITE COMMAND REGISTER FOR MCP4822 (12-BIT DAC)															
W-x	W-x	W-x	W-0	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x	W-x
$\bar{A}/B$	—	$\bar{G}A$	$\bar{S}HDN$	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 15								bit 0							

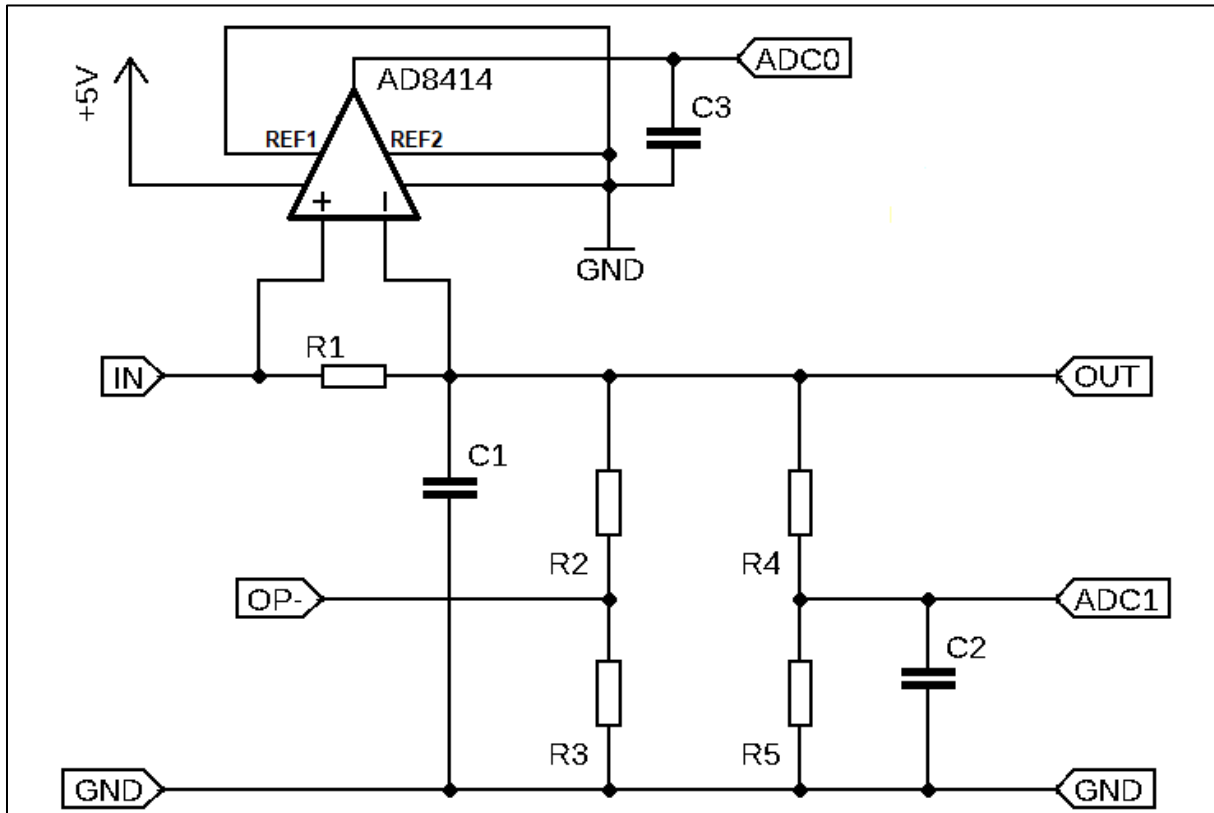
Obrázek 10 – Formát komunikace mezi MCP4822-E/P a ATmega16 [9]

Data z mikrokontroléru jsou do D/A převodníku odesílána v 16 bitové komunikaci, tak jak je vyobrazeno na obrázku 10. Prvních 12 bitů, tedy bit 0 až bit 11 udává informaci o signálu určeného k převodu. Zbylé 4 pozice jsou určeny pro konfigurační bity a mají následující význam. [8]

- Bit 12 – povolení výstupu:
  - 0 pro stav vysoké impedance,
  - 1 pro povolení výstupu.
- Bit 13 – volba zesílení výstupního zesilovače:
  - 0 pro  $2 \cdot U_{REF} = 4,096 \text{ V}$ ,
  - 1 pro  $1 \cdot U_{REF} = 2,048 \text{ V}$ .
- Bit 14 – neobsazená pozice.
- Bit 15 – volba kanálu:
  - 0 pro kanál A,
  - 1 pro kanál B. [9]

### 3.6. Snímání výstupních hodnot mikrokontrolérem

Obrázek 11 ukazuje zapojení pro měření výstupního napětí a proudu. Kondenzátor C1 tvoří výstupní filtr napájecího zdroje. Dále se zapojení skládá ze dvou odporových děličů. První dělič vytvořený z rezistorů R2 a R3 snímá na svém vstupu výstupní napětí napájecího zdroje. Výstup děliče je poté připojen na invertující vstup operačního zesilovače, jehož zapojení a funkce bude probrána v následující podkapitole. Tyto rezistory R2 a R3 jsou v poměru 1:4 a tedy napětí na výstupu odporového děliče by mělo teoreticky při 20 V vstupu nabývat hodnoty 4 V.



Obrázek 11 – Schéma zapojení pro snímání výstupních hodnot

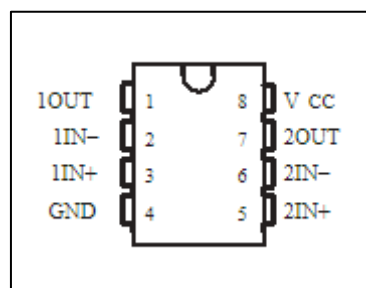
Druhý napěťový dělič je součástí měření výstupního napětí mikrokontrolérem, tento dělič je v poměru 1:9. Při maximálním výstupním napětí 20 V je tedy na výstupu napěťového děliče napětí 2 V. Interní napěťová reference A/D převodníku, jak již bylo zmíněno činní 2,56 V. Je tedy dostatečná rezerva (teoreticky 0,56 V) pro měření maximálního výstupního napětí napájecího zdroje.

Snímání výstupního proudu je řešeno prostřednictvím rezistoru R1 o hodnotě 50 mΩ. Na tomto snímacím rezistoru se vlivem procházejícího proudu vytvoří úbytek napětí, který se prostřednictvím operačního zesilovače AD8414 se zabudovanými rezistory zesílí 20x. Zesílené napětí je přivedeno na A/D převodník mikrokontroléru. Tento způsob byl zvolen z důvodu rozlišení A/D převodníku. Při úvaze 10 bitového A/D převodníku v mikrokontroléru ATmega16 s interní referencí 2,56 V. Je rozlišení A/D převodníku 2,5 mV.

Výstupní proud napájecího zdroje musí být regulovatelný v kroku 10 mA, a tedy i minimální nastavený proud je 10 mA. Pro minimální proud 10 mA je napěťový úbytek vzniklý na snímacím rezistoru R1 0,5 mV. Zesílený úbytek napětí na výstupu operačního zesilovače je poté 10 mV. Pro jeden regulovatelný proudový krok 10 mA je tedy rozlišení 2,5 mV více jak dostačující, neboť zesílený úbytek 10 mV je 4x větší, než rozlišení 2,5 mV. Pro maximální výstupní proud 2 A je napěťový úbytek 0,1 V. Zesílený úbytek napětí je poté 2 V, což za použití interní reference 2,56 V dává také dostatečnou rezervu.

### 3.7. Operační zesilovač pro řízení výkonového tranzistoru

Pro účel této bakalářské práce byl vybrán operační zesilovač LM258P od společnosti Texas Instruments. Jedná se o dvoukanálový OZ, přičemž druhý kanál není využit. LM258P je v pouzdře DIL8, rozdělení vývodů pro toto pouzdro ukazuje obrázek 12.

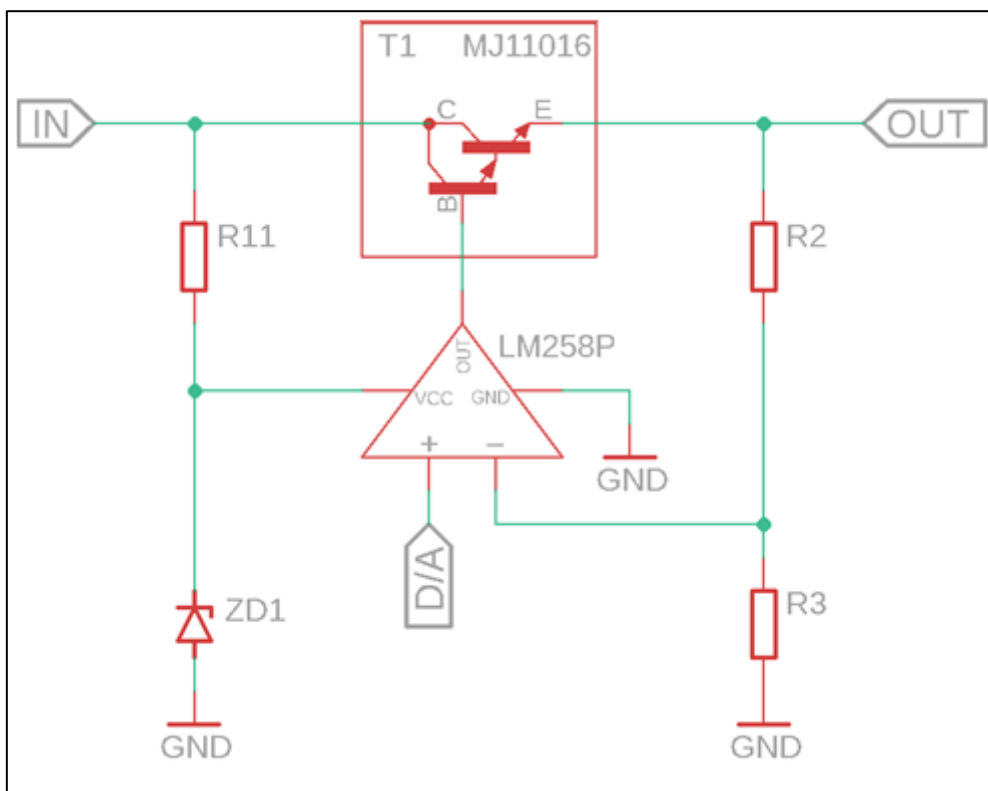


Obrázek 12 – Rozdělení vývodů LM258P [10]

Uplatnění funkce operačního zesilovače je znázorněno na obrázku 13. Na invertující vstup operačního zesilovače je připojen výstup z napěťového děliče tvořeného rezistory R2 a R3. Tento napěťový dělič je svým vstupem připojen na výstup napájecího zdroje, a tedy snímá výstupní napětí napájecího zdroje v poměru 1:4. Na invertujícím vstupu se tak pro rozsah výstupního napětí napájecího zdroje 0-20 V může objevit napětí 0 – 4 V. Tento rozsah 0 – 4 V odpovídá rozsahu napětí, který může poskytnout D/A převodník MCP4822-E/P, a tak ho dodat na neinvertující vstup.

Základní myšlenkou tedy je, že operační zesilovač LM258P, jehož výstup je zapojen na výkonový tranzistor T1. Je zapojen jako komparátor, který na základě rozdílu napětí na svých diferenčních vstupech řídí již zmíněný výkonový tranzistor.

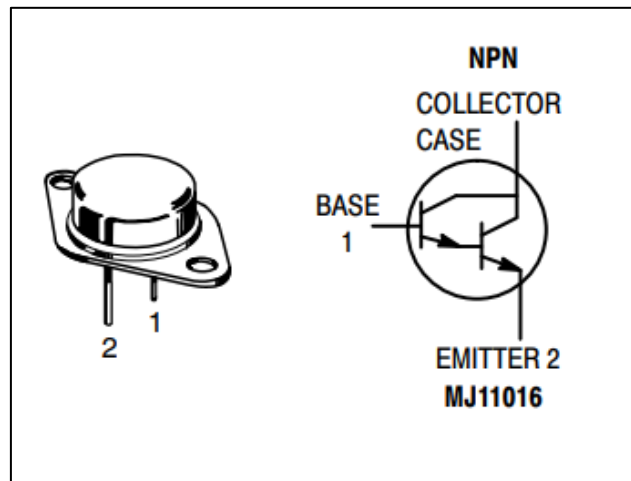
Operační zesilovač je napájen z kladné větve napájecího zdroje před vstupem výkonového tranzistoru. LM258P pracuje pod napájecím napětím od 3 V do 32 V. Na vstupu výkonového tranzistoru ale je napětí přibližně 33 V vůči zemi. Toto napětí je sraženo pomocí Zenerovy diody 27 V.



Obrázek 13 – Schéma zapojení LM258P v návrhu napájecího zdroje

### 3.8. Regulační tranzistor

Pro účel návrhu napájecího zdroje byl vybrán výkonový tranzistor v Darlingtonově zapojení v pouzdře TO3. Rozdělení vývodů lze vidět na obrázku 14 a parametry vybraného tranzistoru lze vidět v tabulce 4.



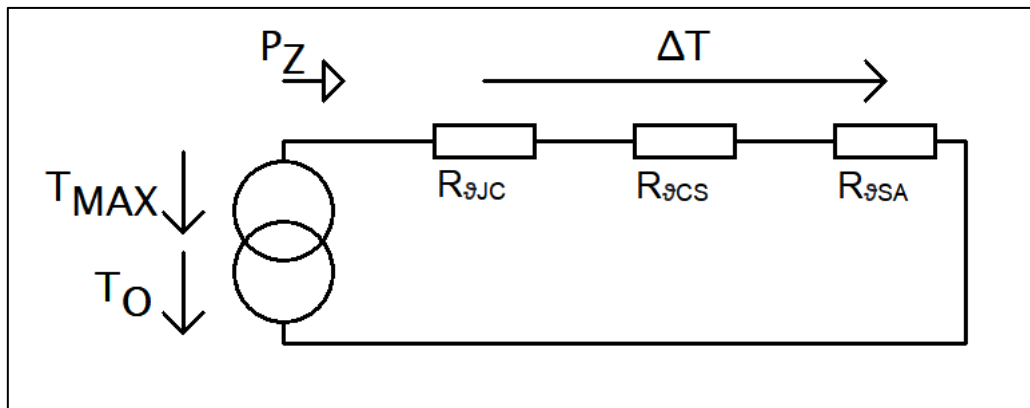
Obrázek 14 – Rozdělení vývodů regulačního tranzistoru [11]

$P_{MAX}$	Maximální výkon	200 W
$U_{CE}$	Maximální napětí kolektor-emitor	120 V
$U_{CB}$	Maximální napětí kolektor-báze	120 V
$U_{CE}$	Maximální napětí emitor-báze	5 V
$I_{CMAX}$	Maximální proud kolektoru	30 A
$h_{21e}$	Zesilovací činitel	Až 1000
$T_{EMP}$	Provozní teplota	Až 200 °C
$R_{JC}$	Teplota odporu přechod-pouzdro	0,87 C/W

Tabulka 4 – Parametry regulačního tranzistoru [11]

### 3.9. Chladič výkonového tranzistoru

Součástka může vlivem zvyšující se teploty měnit své parametry a tím se i mohou ovlivnit její vlastnosti a samotná funkčnost. Velké teplo přesahující maximální parametry na součástce může součástku trvale poškodit. Proto se toto vzniklé teplo v samotné součástce musí odvést do jejího pouzdra ze kterého je přes vhodnou plochu k tomu určenou převedeno do chladiče. Celé šíření tepla lze charakterizovat tepelným schématem podle obrázku 15. [12]



Obrázek 15 – Tepelné schéma [12]

Pro následující tepelné schéma (Obrázek 15) lze sestavit rovnici (10) pro celkový tepelný odpor:

$$R_{\theta TH} = \frac{T_{MAX} - T_O}{P_Z} = R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA} \quad , \quad [12] \quad (10)$$

kde  $T_{MAX}$  je maximální teplota součástky stanovená výrobcem,  $T_O$  je teplota okolí, jejíž hodnota pro běžné prostředí činí  $35^{\circ}\text{C}$ ,  $P_Z$  je ztrátový výkon na součástce,  $R_{\theta JC}$  je vnitřní tepelný odpor součástky, který je stejně jako maximální teplota součástky udáván v katalogovém listu výrobcem.  $R_{\theta CS}$  je tepelný odpor přechodu mezi pouzdem součástky a chladičem, tento tepelný odpor lze najít v tabulkách.  $R_{\theta SA}$  je tepelný odpor chladiče s místním okolím. [12]

Maximální ztrátový výkon  $P_Z$  bude na výkonovém regulačním tranzistoru za situace zkratování výstupních svorek napájecího zdroje. V takovém případě bude maximální ztrátový výkon dán rovnicí (10):

$$P_Z = \left[ (U_{VST} - U_{VYST}) \cdot \frac{2}{\pi} \right] \cdot I = \left[ (33 - 0) \cdot \frac{2}{\pi} \right] \cdot 2 \doteq 22 \cdot 2 = 44 \text{ W} \quad (11)$$

Vyjádřením  $R_{\theta SA}$  z tepelné rovnice (9) lze získat velikost tepelného odporu chladiče.

$$R_{\theta SA} = \frac{200 - 35}{48} - 0,87 - 1 = 3,44 - 0,87 - 0,5 = 2,07 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \quad [12] \quad (12)$$

kde celkový tepelný odpor  $R_{9TH}$  je roven  $3,44 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ , vnitřní tepelný odpor součástky  $R_{9JC}$  je roven  $0,87 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$  a tepelný odpor přechodu  $R_{9CS}$  je roven  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ . Hodnota pro  $R_{9CS}$  je dle normy pro přechod pomocí slídové izolační podložky pro pouzdro součástky TO3 a za použití teplovodivé pasty. Na základě rovnice (12) byl vybrán chladič CH14/125 (Obrázek 21) s tepelným odporem  $1,7 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$ .

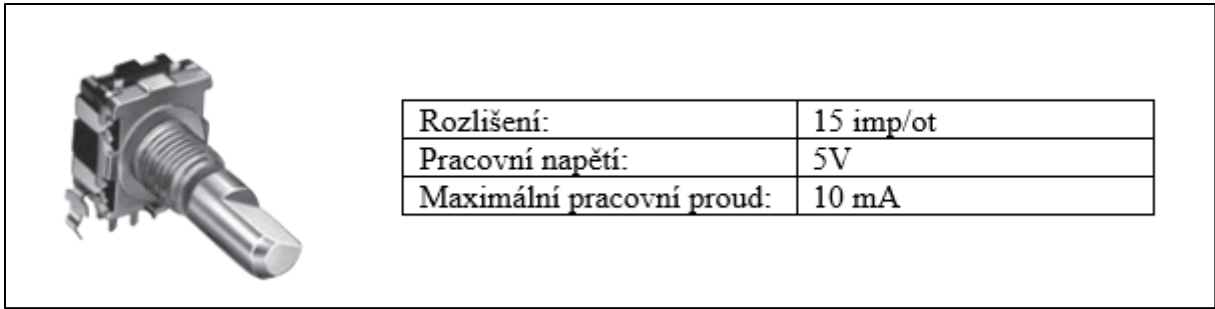


Obrázek 16 – Chladič CH14/125 s výkonovým regulačním tranzistorem

### 3.10. Rotační enkodér

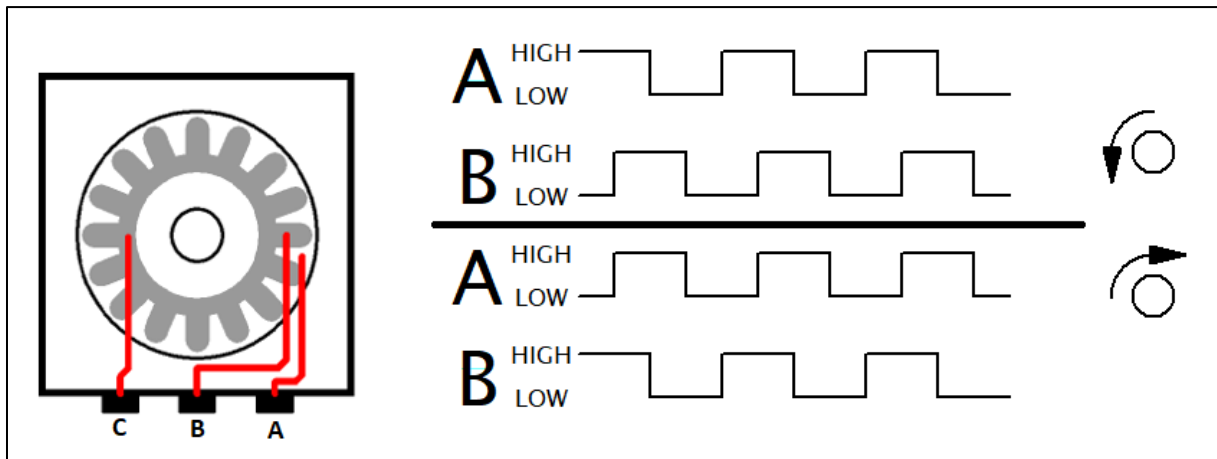
Požadovaná výstupní hodnota je po stránce nastavení od uživatele realizována pomocí inkrementálního rotačního enkodéru: ALPS EC11B (Obrázek 22) se zabudovaným mikrotlačítkem, kterým se volí typ regulované veličiny (napětí nebo proud). Rotační enkodéry jsou v dnešní době v elektronice značně využívány. Dá se říci, že se jedná o novější verzi, již dřívějších potenciometrů s podstatnou výhodou. Potenciometr funguje na principu změny elektrického odporu vůči jezdcí po odporové dráze. Takováto odporová dráha ovšem není nekonečná, a tudíž potenciometr má svou hranici, resp. začátek a konec. Inkrementální enkodéry jsou ale již konstruovány tak, že nemají koncové polohy.



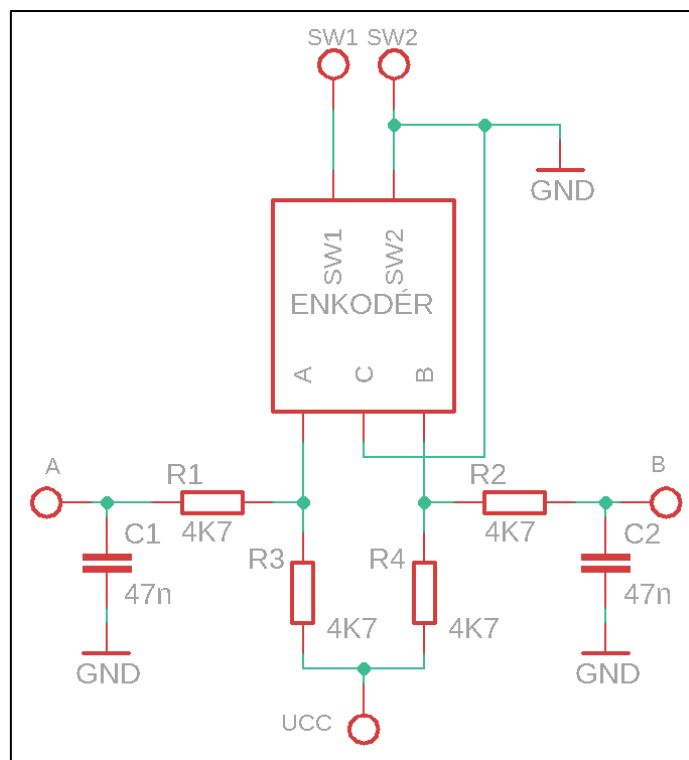


Obrázek 17 – Enkodér ALPS EC11B se základními parametry [12]

Enkodér generuje dva digitální signály, které posléze vyhodnocuje mikrokontrolér (Obrázek 18). Vše je řešeno mechanicky, kdy je základem ozubené kolečko uvnitř enkodéru pevně spojeno s pohyblivou hřídelkou. Vlivem otáčení hřídelky dochází ke spínání a rozpínání kontaktů A a B a tím dochází ke generování signálů. Oba kontakty jsou vůči sobě posunuty, a proto i generované signály jsou posunuté o 90°. Tím, jaký signál předbíhá, resp. se zpožďuje se vyhodnocuje směr otáčení.



Obrázek 18 – Princip rotačního enkodéru

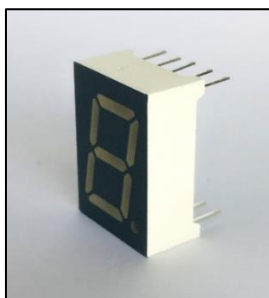


Obrázek 19 – Schéma zapojení enkodéru

Na obrázku 19 lze vidět schéma zapojení pro rotační enkodér použité v návrhu napájecího zdroje. Rezistory  $R_3$  a  $R_4$  zde slouží k omezení vstupního proudu. Kondenzátory  $C_1$  a  $C_2$  slouží jako ošetření případně vzniklých zákmitů, neboť jak bylo popsáno výše, otáčení enkodéru vesměs znamená rychlé spínání a rozpínání kontaktů u čehož mohou zákmity vznikat. Kondenzátory se při sepnutí enkodéru vybíjí velmi rychle, naopak při rozepnutí se kondenzátory nabíjí přes rezistory  $R_3$  a  $R_4$ . Přidáním rezistorů  $R_1$  a  $R_2$  bude i vybíjení probíhat omezenou rychlostí. Vývody SW1 a SW2 jsou vývody mikrotlačítka. SW2 je připojen k zemi a vývod SW1 na vývod mikrokontroléru se zapnutým pull-up rezistorem.

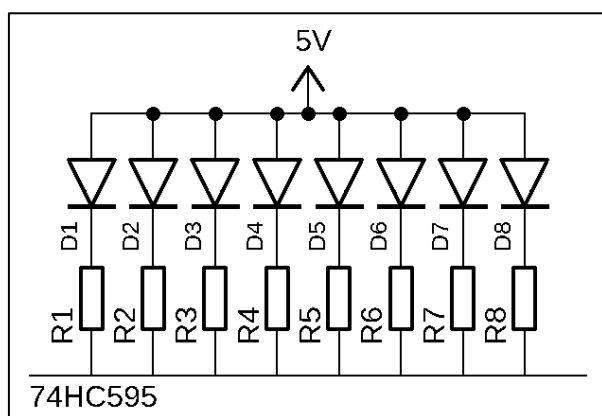
### 3.11. Sedmi-segmentový displej

Zobrazení výstupních hodnot je uskutečněno prostřednictvím šesti sedmi-segmentových displejů (Obrázek 25).



Obrázek 20 – Sedmi-segment použitý v displeji

Napájecí zdroj má mít regulovatelný rozsah 0 – 20 V s krokem 0,1 V pro napětí a rozsah 0 – 2 A s krokem 10 mA pro proud. Tedy pro každou veličinu jsou potřebné minimálně tři pozice na displeji, což v případě šesti sedmi-segmentových displejů je akorát, a tedy tři sedmi-segmentové displeje zobrazují výstupní napětí a zbylé tři výstupní proud.



Obrázek 21 – Vnitřní zapojení displeje

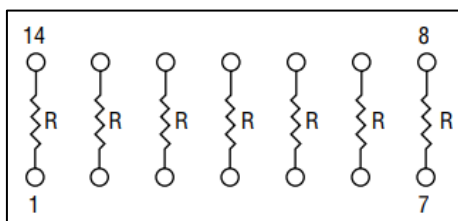
Šestice sedmi-segmentových displejů je v zapojení se společnou anodou (Obrázek 26). Na každý sedmi-segment je přivedeno napájecí napětí 5 V z pomocného napájecího zdroje IRM-10-5. Jeden sedmi-segment vyžaduje dle katalogového listu optimální napájecí napětí 2 V. Maximální pracovní proud jedním segmentem, tedy jednou diodou je 20 mA. Hodnota pracovního proudu tedy byla se čtvrtinovou rezervou zvolena na 15 mA. Pro omezovací rezistor potom platí rovnice (11):

$$R = \frac{(U_N - U_{LED})}{I} = \frac{(5 - 2)}{15 \cdot 10^{-3}} = 200 \Omega \quad [14] \quad (13)$$

Na základě tohoto výsledku byl zvolen rezistor o hodnotě 220 Ω. Čímž se tedy nepatrně zvýšil odpor a tím se i nepatrně zvýšila rezerva pro maximální pracovní proud, pracovní proud je tedy teď 13,6mA, tedy přibližně 14mA. Ztrátový výkon rezistoru je dán rovnicí (12):

$$P = U \cdot I = 3 \cdot 14 \cdot 10^{-3} = 28 \text{ mW} \quad [14] \quad (14)$$

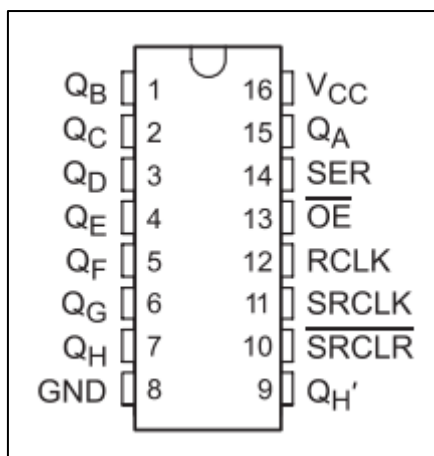
Ohledně samotného typu rezistoru byla z hlediska praktičnosti vybraná rezistorová síť 220 Ω se zakomponovanými 8 rezistory v pouzdře DIL8 (Obrázek 27). Maximální ztrátový výkon na tuto součástku je 0,28 W, což 8 rezistorů ( $8 \cdot 28 \text{ mW} = 224 \text{ mW}$ ) s rezervou splňuje.



Obrázek 22 – Vnitřní zapojení rezistorové sítě [15]

### 3.12. Ovládání sedmi-segmentových displejů

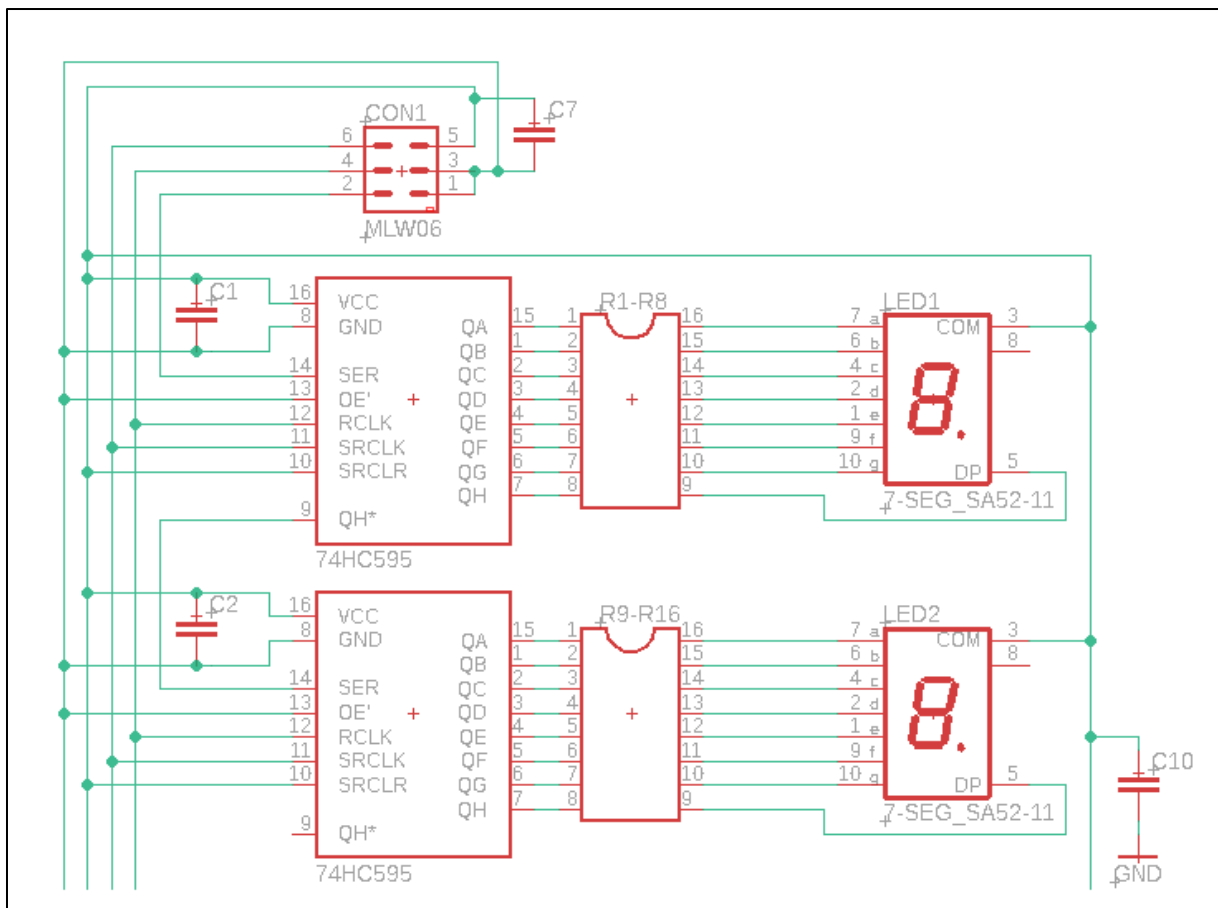
V případě této bakalářské práce zařizuje ovládání displejů sériově paralelní osmi bitový posuvný registr 74HC595, který je připojen ke každému displeji. Následně jsou všechny 74HC595 zapojeny v kaskádě za sebou. Výhoda této možnosti ovládání je ohledně počtu vývodů mikrokontroléru taková, že se při zvyšujícím se počtu sedmi-segmentových displejů se nijak nezvyšuje nárok na počet vývodů mikrokontroléru. Ohledně předešlých možností řešení navíc postačuje pouze pět vývodů pro celé ovládání, a i oněch pět vývodů se v mnoha případech nevyužije.



Obrázek 23 – Rozdělení vývodů 74HC595 [16]

74HC595 se vyrábí v pouzdře DIL16. Na obrázku výše lze vidět rozdělení vývodů. Vývody QA až QH představují paralelní výstupy a jsou to výstupy pro sedmi-segmentový displej. Samozřejmostí je vývod: VCC pro napájecí napětí 5 V a vývod: GND pro zemnicí potenciál. Vývod SER představuje sériový vstup, na něž jsou přivedena bitová data, která společně s příchodem hodinového signálu přivedeného na vstup SRCLK jsou zapisována do posuvného registru. Ve své podstatě 74HC595 obsahuje dva registry o délce 8 bitů. Samotný posuvný registr a poté tzv. úložný registr. Proces zápisu do posuvného registru s příchodem hodinového signálu se děje bez jakéhokoliv narušování paralelních výstupů QA až QH. Bitová data se dostanou na paralelní výstupy pouze v případě nastavení logické 1 na řídicí vstup RCLK, který ovlivní úložný registr a obsah posuvného registru se zkopíruje do úložného registru, a tedy se nakonec obsah bitových dat objeví na paralelních výstupech obvodu. Následně jsou bitová data v úložném registru uchována až do příchodu další logické 1 na vstup RCLK. Jeden z posledních vývodů QH' představuje sériový výstup, kterým se propojuje více posuvných registrů sériově do kaskády. Poslední dva vývody SRCLR, který umožňuje resetovat posuvný registr a EO, který povoluje výstup není nutné použít. A proto je SRCLR připojen společně s vývodem VCC na napájecí napětí a EO společně s GND na zemnicí potenciál. [17]

Na obrázku 29 lze vidět principiální schématické zapojení části displeje včetně sedmi-segmentového zobrazovače. Podle katalogového zapojení bylo ke každému posuvnému registru připojen blokovací kondenzátor. Totéž bylo provedeno i u konektoru MLW06 a pro napájení samotných sedmi-segmentových displejů.



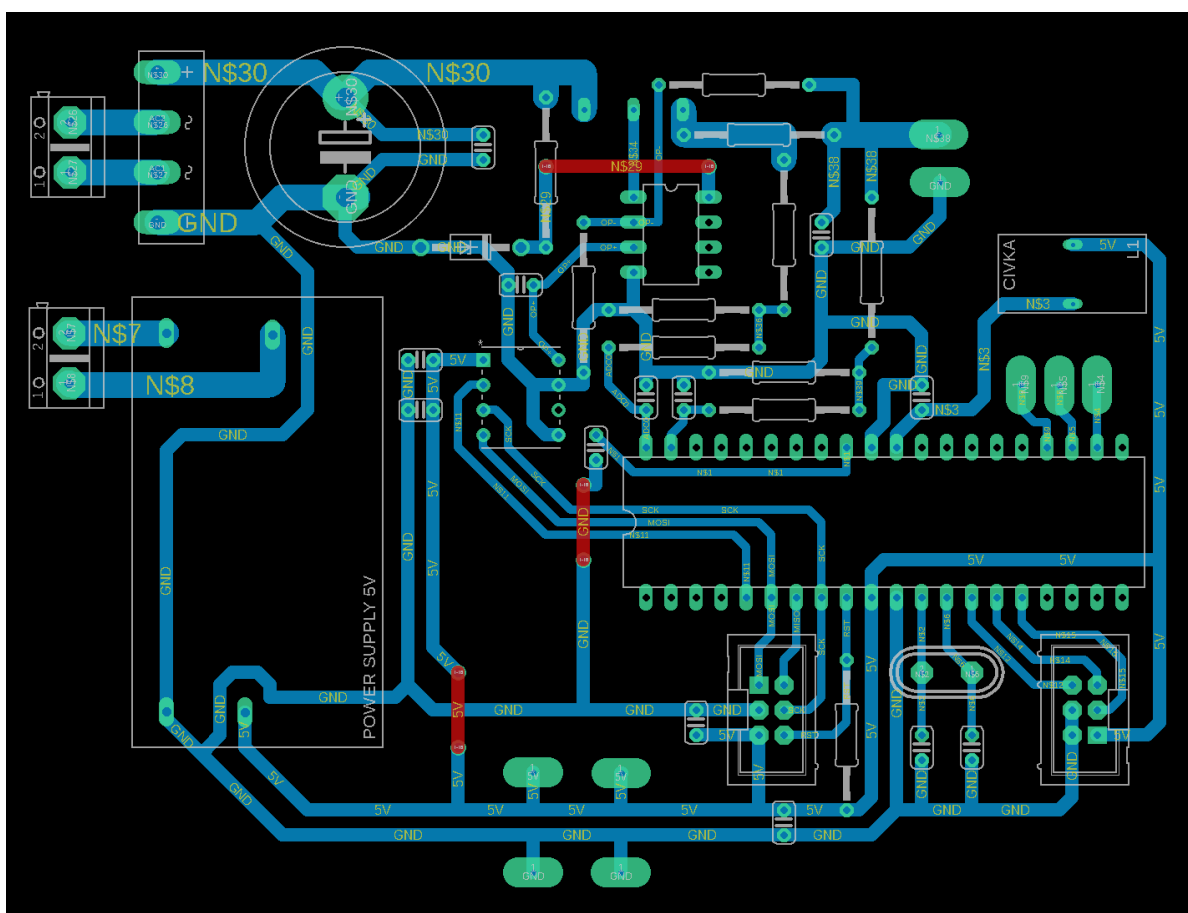
Obrázek 24 – Schéma zapojení displeje

### 3. KONSTRUKCE NAPÁJECÍHO ZDROJE

Tato kapitola je zaměřena na popis návrhu desek plošných spojů (DPS) a popisu konstrukce krytu napájecího zdroje.

#### 4.1. Desky plošných spojů

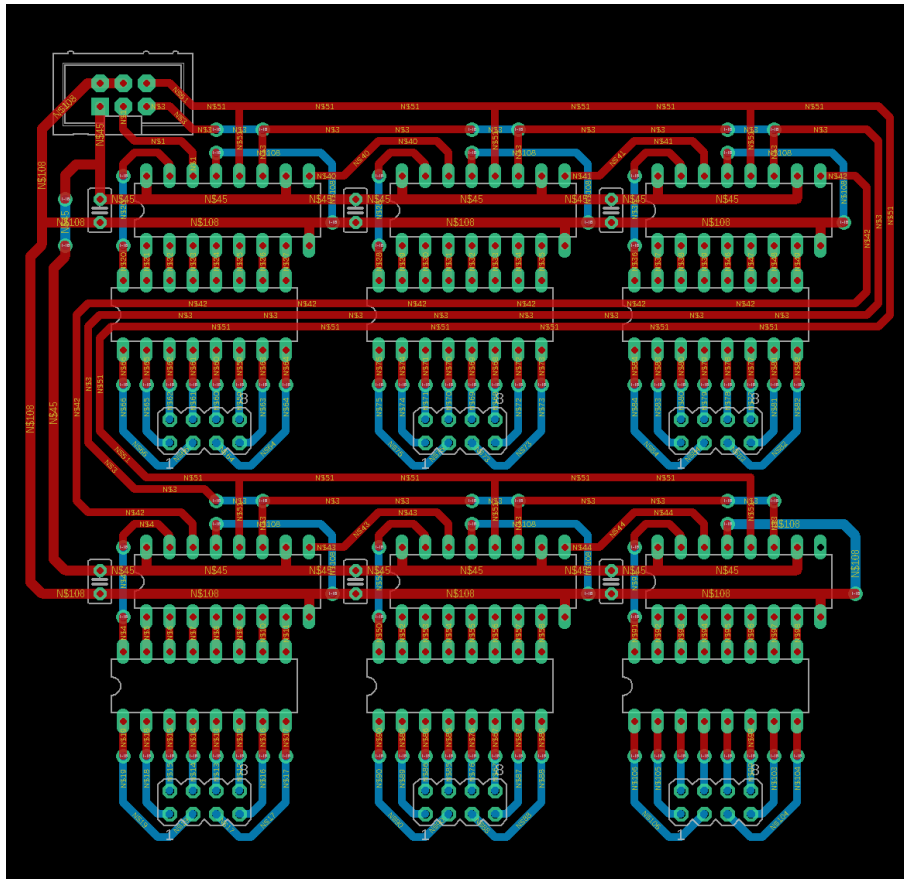
Celé zapojení napájecího zdroje je rozděleno do celkem čtyř DPS. DPS\_1 tvoří hlavní desku napájecího zdroje a jsou zde veškeré prvky podílející se na funkci zdroje bez periférií. Tato deska je jednostranná s použitím pár drátových propojek. Tato DPS\_1 má své schématické zapojení v příloze A.



Obrázek 25 – DPS\_1

Ostatní desky jsou součástí periférií, tedy displeje a rotačního enkodéru. Jejich rozdělení na tři samostatné desky je z důvodu snadnějšího přizpůsobení pro přidělení na přední panel krytu napájecího zdroje. Displej a jeho ovládání je tvořeno ze dvou dvoustranných DPS. První deska displeje DPS\_2 obsahuje šestici posuvných registrů 74HC595 a k nim na vstup připojené blokovací kondenzátory, a na paralelní výstup odporové sítě. Druhá deska displeje DPS\_3 obsahuje pouze sedmi-segmentové displeje. Obě desky jsou navzájem propojeny, respektive

první deska je vsazena do druhé přes šestici čtyř párových hřebinkových konektorů. Dále DPS\_2 komunikuje s hlavní deskou pomocí MLW06 konektoru, kde je také obsaženo napájení a zemnicí potenciál. Na desku DPS\_3 obsahující pouze sedmi-segmenty je z hlavní desky připojeno napájení a zemnicí potenciál pomocí připájených kabelových licen. Schématické zapojení DPS\_2 a DPS\_3 lze vidět v příloze B a C.



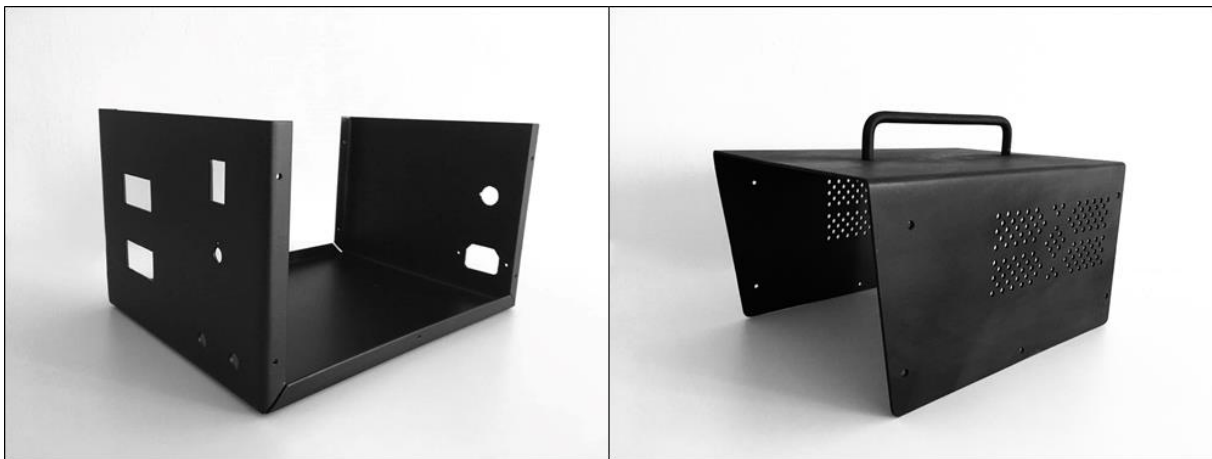
Obrázek 26 – DPS\_2





## 4.2. Kryt napájecího zdroje

Kryt napájecího zdroje je vyroben z hliníkového plechu o tloušťce 1,5 mm. Z toho plechu jsou vytvořené dva U profily. První U profil na obrázku představuje dno napájecího zdroje, strany U profilu poté představují přední a zadní panel napájecího zdroje. Na předním panelu z hlediska uživatele budou dva displeje, rotační enkodér, výstupní svorky a hlavní vypínač celého zdroje. Na zadním panelu je poté přívod pomocí IEC 60320 konektoru a také patice pro pojistku napájecího zdroje. Na zadním panelu je poté přívod pomocí IEC 60320 konektoru a také patice pro vstupní pojistku napájecího zdroje.



Obrázek 29 – Kryt napájecího zdroje

Druhý U profil tvoří kryt prvního U profilu. Na tomto druhém U profilu jsou vyvrtané díry po obou bočních stranách k proudění vzduchu, a tak přispívající k trochu lepšímu chlazení.

## 4. PROGRAM PRO NAPÁJECÍ ZDROJ

V této kapitole bude probrán kód programu nahraný do napájecího zdroje. Nejdříve budou probrány jednotlivé funkce a poté hlavní funkce programu.

### 4.1. Funkce: ADC\_read

Měření A/D převodníku obstarává funkce: ADC\_read. Při měření výstupních hodnot jsou využity dva kanály. Toto rozhoduje podmínka - if. Následuje spuštění převodu zápisem log. 1 do bitu ADSC registru ADCSRA. Pomocí cyklu while se poté čeká na převod, který je řízen bitem ADIF registru ADCSRA. Funkce poté vrátí hodnotu z A/D převodníku.

```
int ADC_read(uint8_t prevodnik)
{
    if (prevodnik == 0)
    {
        ADMUX &= (~(1<<MUX0));
    } else
    {
        ADMUX |= (1<<MUX0);
    }
    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    while(!(ADCSRA & (1<<ADIF)));
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return (ADC);
}
```

### 4.2. Funkce: Test\_prepinac

Tato funkce zjišťuje zmáčknutí tlačítka. Tato funkce je popsána pomocí komentářů v samotném kódu.

```
uint8_t Test_prepinac(void)
{
    if ((enkoder & (1<<prepinac)) == 0)
    {
        _delay_ms(1); //Ošetření zámků
        if ((enkoder & (1<<prepinac)) == 0)
        {
            return 1; //Tlačítko na enkodéru je zmáčknuté
        }
        else
        {
            return 0; //Tlačítko na enkodéru není zmáčknuté
        }
    }
    else
    {
        return 0; //Tlačítko na enkodéru není zmáčknuté
    }
}
```

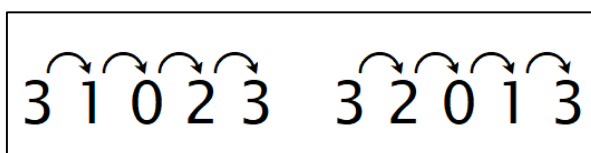
### 4.3. Funkce: Test\_enkoder

Funkce: Test\_enkoder obstarává rozpoznávání otáčení rotačního enkodéru. Jak již bylo zmíněno rotační enkodér je ve své podstatě tvořen dvěma vzájemně posunutými spínači, představuje tedy dva vstupy. Lze tedy pro tyto dva vstupy sestavit snadnou pravdivostní tabulku.

SPÍNAČ 1	SPÍNAČ 2	BIN do DEC
1	1	3
0	1	1
1	0	2
0	0	0

Tabulka 5 – Pravdivostní tabulka

Stavy sloupce: SP1 a SP2 v tabulce představují binární číslo, které reprezentuje dekadický převod ve třetím sloupci tabulky pro snadnější vysvětlení. Tyto čísla, resp. stavy se během otáčení enkodéru opakovaně generují, jak značí obrázek X. Z tohoto poznatku celá funkce vychází.



Obrázek 30 – Generování hodnot rotačním enkodérem

První podmínka testuje, zda se právě enkodér nachází v nule. Pokud se nejedná o nulu, tzn. na enkodéru se právě nachází 11, 01 nebo 10, tak se zapisuje předchozí hodnota. Pokud je ale podmínka splněna a na enkodéru se nachází nula, tato nula se zapíše do první pozici pole a proměnná enk\_k se nastaví do hodnoty 2. Druhá podmínka má za následek zjištění kompletního pootočení. V této podmínce jsou vnořené podmínky na zjištění otočením enkodéru vpravo a vlevo.

```

uint8_t Test_ekoder(void)
{
    if ((ekoder & ((1<<ekoder_A) | (1<<ekoder_B))) == 0)
    {
        enk_p[1] = (ekoder & ((1<<ekoder_A) | (1<<ekoder_B)));
        enk_k = 2;
    }
    else
    {
        enk_p[enk_k] = (ekoder & ((1<<ekoder_A) | (1<<ekoder_B)));
    }
    if ((enk_k == 2) && ((ekoder & ((1<<ekoder_A) | (1<<ekoder_B))) != 0))
    {
        enk_k = 0;
        if (enk_p[0] < enk_p[2])
        {
            return 1;
        }
        if (enk_p[0] > enk_p[2])
        {
            return 2;
        }
    }
    return 0;
}

```

Průběh funkce lze vyjádřit graficky pomocí obrázku X. Proměnná enk\_k představuje index pole, který je defaultně roven nule. Sloupce poté značí index pole a řádky aktuální časový průběh.

enk_k = 0	Index 0	Index 1	Index 2	Default
	3	3	3	
	⋮	⋮	⋮	
	3	3	3	Pootočení do stavu 01
	1	3	3	
	⋮	⋮	⋮	
enk_k = 2	1	0	3	Pootočení do stavu 00
	1	0	2	Pootočení do stavu 10

Porovnání  
Indexu 0 a Indexu 2

Obrázek 31 – Znázornění funkce: Test\_ekoder

Jak již bylo řečeno pokaždé se testuje, zda se na enkodéru nachází nula. Výchozí hodnoty v tabulce jsou nastaveny na tři. Tyto hodnoty jsou stejné až do prvního pootočení, kde se na nulté pozici pole nahraje stav 1, resp. 01. Tento stav trvá až do dalšího pootočení. Při dalším pootočení následuje stav 0, resp. 00. Nyní se na pozici indexu 1 nahraje nula a proměnná `enk_k` se nastaví na 2. Následně nastává poslední stav kompletního cyklu otočení, tedy stav 2, resp. 10. První podmínka testuje, zda se nachází na enkodéru nula. Nula se nenachází, a tedy program jde do `else` a na pozici `enk_k` se nahraje aktuální hodnota na enkodéru, tedy 2.

Následně se testuje dotažení celého kompletního cyklu, toto si lze v programu představit jako druhou podmínku `if`, že pokud je `enk_k` rovna dvou a hodnota na enkodéru se nerovná nule.

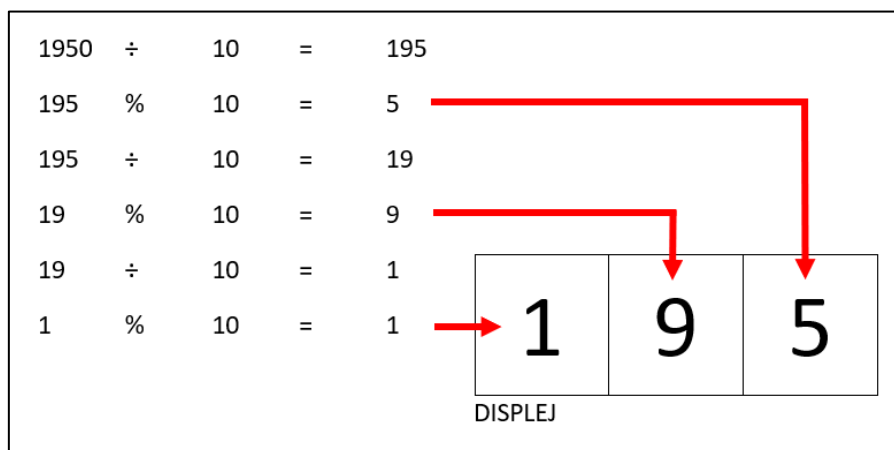
```
if ((enk_k == 2) && ((enkoder & ((1<<enkoder_A) | (1<<enkoder_B))) != 0))
```

Po této podmínce jsou dvě podmínky, které testují, jestli hodnota v indexu 0 a indexu 2 je větší, nebo naopak menší. A podle toho, která hodnota je menší a která větší se rozpoznává otáčení enkodéru doleva, či doprava (pro případ obrázku je zobrazeno otáčení enkodéru směrem vpravo).

```
if (enk_p[0] < enk_p[2])
{ return 1; }
if (enk_p[0] > enk_p[2])
{return 2; }
```

#### 4.4. Funkce: Zobrazit

Tato funkce má dva vstupní parametry, jeden parametr pro hodnotu horní části displeje, druhý parametr pro hodnotu spodní část displeje. Tyto dvě hodnoty jsou následně kvůli přesnosti vyděleny deseti, v každém kroku dělení je obsažen dělení modulo, tedy dělení, které vrací zbytek po této operaci. Celý princip vysvětluje podrobněji obrázek.



Obrázek 32 – Zobrazení hodnot na displeji

Nutno zdůraznit, že z hlediska programu každý segment představuje index v poli. Horní displej reprezentující se indexy 3, 4 a 5. Spodní displej reprezentující se indexy 0, 1, a 2. Při volbě měřené veličiny (napětí/proud) je pro napětí aktivní horní displej a pro proud spodní displej. Toto ovlivňuje podmínka, při které, jestliže je hodnota pro horní displej podrobena dělení a tím i vyobrazení na displej, do indexů druhého displeje jsou dány pevně hodnoty 10.

```
void Zobrazit(unsigned int horni, unsigned int dolni)
{
    uint8_t segmenty[6]; // Založení pole na segmenty displeje
    if ((stav_prom & 1) == 0)
    {
        horni = horni / 10;
        segmenty[3] = horni % 10;
        horni = horni / 10;
        segmenty[4] = horni % 10;
        horni = horni / 10;
        segmenty[5] = horni % 10;
        segmenty[0] = 10;
        segmenty[1] = 10;
        segmenty[2] = 10;
    } else
    {
        dolni = dolni / 10;
        segmenty[3] = 10;
        segmenty[4] = 10;
        segmenty[5] = 10;
        segmenty[0] = dolni % 10;
        dolni = dolni / 10;
        segmenty[1] = dolni % 10;
        dolni = dolni / 10;
        segmenty[2] = dolni % 10;
    }
}
```

Ve funkci následuje cyklus FOR, který projede šestkrát, to je kvůli počtu segmentů displeje. Proměnná data slouží k vyčtení pozice z tabulky znaků. Následují podmínky pro rozsvícení tečky. První podmínka IF říká, že pokud probíhá regulace napětí, a zároveň se jedná o čtvrtý segment. Tak se nastaví tečka do proměnné: Data pomocí logického OR dosadí. Podobně funguje i následující IF s rozdílem pro regulaci proudu.

```
for(uint8_t k = 0; k < 6; k++)
{
    uint8_t data = tab[segmenty[k]];
    if ((k == 4) && ((stav_prom & 1) == 0))
    {
        data |= (1<<1);
    }
    if ((k == 2) && ((stav_prom & 1) == 1))
    {
        data |= (1<<1);
    }
}
```

Pomocí následujícího FOR cyklu se odesílá posloupnost 8 bitů.

```
for (uint8_t i = 0; i < 8; i++)
{
    if ((data & (1<<i)) != 0)
    {
        displej &= (~(1<<DS));
    }
    else
    {
        displej |= (1<<DS);
    }
}
```

Následuje nahrání dat a povolení výstupu do paralelního registru.

```
    _delay_us(10);           // Nahrání dat
    displej |= (1<<SCK);     // Nástupná hrana
    _delay_us(10);
    displej &= (~(1<<SCK)); // Sestupná hrana na sériových hodinách
    _delay_us(10);
}

displej |= (1<<RCK);        // Dostání dat na výstup do paralelního registru
_delay_us(10);
displej &= (~(1<<RCK));
_delay_us(10);
}
```

#### 4.5. Funkce: Test\_napeti\_proud

V této funkci se především upravuje hodnota výstupu. Tato úprava je na základě změření skutečné výstupní hodnoty od požadované hodnoty. Zdroj by měl splňovat přesnost do 1 % v celém pracovní rozsahu. Tedy pro nejnižší hodnotu 0,1 V je dovolená odchylka 1 mV.

Na začátku psaní programu byla úvaha o použití nějaké matematické funkce a jejím zakomponování do programu. Toto se z hlediska přesnosti moc neosvědčilo. A proto se zvolilo nastavení hodnoty  $k_n$  pro určitý rozsah na pevně. Pro rozsah 0,1 – 1 V je dovolená odchylka velmi malá a o hodnotě výstupu může takřka rozhodovat cokoliv za náhodný jev. Proto je pro tuto minimalizaci zvolen rozsah odpovídající kroku 0,1 V. Od hodnoty 1 V je rozsah pro úpravu výstupu hodnotou  $k_n$  větší, s krokem 0,5 V až do maximální hodnoty výstupu 20 V.



```

void Test_napeti_proud(void) {
    zm_napeti = ((ADC_read(0))*25)/10;           //Zjištění napětí
    zm_proud = ((ADC_read(1))*25)/10;          //Zjištění proudu
    switch (zm_napeti) {
        case 0 ... 4: {k_n = 0; break;}
        case 5 ... 10: {k_n = 0; break;}
        case 11 ... 19: {k_n = -5; break;}
        case 20 ... 29: {k_n = -5; break;}
        :
        case 1850 ... 1899: {k_n = 60+20; break;}
        case 1900 ... 1949: {k_n = 63+20; break;}
        case 1950 ... 2100: {k_n = 65+20; break;}
    }
}

```

Stejným způsobem je upraven i výstupní proud v této funkci. Rozdíl, a to, zda zdroj splňuje dovolenou odchylku 1%. Je popsáno v další kapitole, která se už zaměřuje na měření parametrů napájecího zdroje.

#### 4.6. Hlavní funkce programu

Tato podkapitola zobrazuje část kódu ve funkci: int main(void). V první řadě je volána funkce: Test\_napeti\_proud, která vrácí změřenou hodnotu napětí a proudu pomocí D/A převodníku. Následuje podmínka: switch, která rozhoduje o regulovatelné veličině. V této podmínce je další vnořená podmínka switch, která na základě funkce: Test\_enkoder() rozhoduje o regulaci, resp. zvýšení nebo naopak snížení regulovatelné hodnoty.

```

Test_napeti_proud();
switch (stav_prom & 1) {
    case 0:
    {
        //nastavujeme napětí
        switch (Test_enkoder())
        {
            case 1:
            {
                //Otočení do prava
                if (napeti < 2000)
                {
                    napeti += 10;
                }
                break;
            }
            case 2:
            {
                //Otočení do leva
                if (napeti != 0)
                {
                    napeti -= 10;
                }
                break;
            }
        }
    }
}

```

Následuje testování proudu, resp. aktivace proudové pojistky. Po této podmínce následuje odeslání dat na D/A převodník.

```

if (zm_proud > 2100)
{
    x -= 1;
    if (napeti > (zm_napeti + k_n))
    {
        napeti = ((zm_napeti + k_n)/10)*10; // Zbavení řádu
    }
}
else
{
    if ((zm_napeti < 2065) && (zm_napeti < (napeti + k_n)) && (x != 4095))
    {
        x++;
    }
    if ((zm_napeti > 0) && (zm_napeti > (napeti + k_n)) && (x != 0))
    {
        x--;
    }
}
MCPDAC(&PORTB, PB4, 12, x, 1, 2, 0);

```

Následující část kódu řeší zobrazení hodnot na displeji. Pro příklad kódu se jedná o regulaci napětí, tedy na horním displeji se nastavuje hodnota výstupního napětí. Proud protékající zátěží ze zdroje se vyobrazuje na spodním displeji. Ohledně citlivosti a rychlosti měření A/D převodníku se ale tato hodnota na displeji jeví přeblikáváním displeje.

Toto řeší proměnná: `zpozdeni_proudu`, kdy se při každém cyklu inkrementuje tato proměnná o jedničku, a tedy plní roli čítače. Následuje podmínka, která je splněna po sto cyklech. V této podmínce se nahraje do proměnné: `zobrazeni_proudu` průměrná hodnota. Další podmínka obstarává volání funkce `_Zobrazit`, která se už stará o vyobrazení hodnot na displeji. U parametrů této funkce jsou pomocí proměnných: `k_n` a `k_p` odebrány kalibrační odchylky.

```

zpozdeni_proudu = zpozdeni_proudu + 1;
if (zpozdeni_proudu == 100)
{
    zobrazeni_proudu = ((9*zobrazeni_proudu + (zm_proud))/10);
    zobrazeni_napeti = ((9*zobrazeni_napeti + (zm_napeti))/10);

    if (zobrazeni_proudu < 10)
    {
        Zobrazit(napeti, zobrazeni_proudu - k_p);
    }
    else
    {
        Zobrazit(zobrazeni_napeti - k_n, zobrazeni_proudu - k_p);
    }

    zpozdeni_proudu = 0;
}
break;

```

Zde je program pro regulaci napětí u konce. Další část tvoří regulace proudu, která je analogicky stejná a své odlišnosti má pouze v záměně regulovatelné veličiny.

## 5. MĚŘENÍ PARAMETRŮ NAPÁJECÍHO ZDROJE

Následuje měření jednotlivých parametrů, dle zadání bakalářské práce. Zatěžovací charakteristika, zkouška proudového omezení, měření výstupního napětí z D/A převodníku a měření výstupního napětí z operačního zesilovače AD8414.

### 5.1. Měření zatěžovací charakteristiky

V první řadě byla změřena zatěžovací charakteristika zdroje, která ukazuje závislost poklesu napětí na odebíraném proudu. Při připojení zátěže k napájecímu zdroji, začne zdroj dodávat, resp. protlačovat elektrický proud. Napájecí zdroj má také svůj vnitřní odpor, který se projeví úbytkem výstupního napětí se zvyšujícím se odebíraným proudem. Tento vnitřní odpor se vypočítá podle rovnice 15.

$$R_i = \frac{U_0 - U_z}{I}, \quad [2] \quad (15)$$

kde  $R_i$  je vnitřní odpor napájecího zdroje,  $U_0$  výstupní napětí naprázdno,  $U_z$  výstupní napětí při zatížení, a  $I$  výstupní proud protékající zátěží.

Tabulka 6 poté ukazuje tuto závislost, tedy závislost poklesu napětí na odebíraném proudu pro napětí 5 V, 10 V, 15 V a 20 V i s vypočítaným vnitřním odporem podle rovnice 15. V této tabulce jsou také zahrnuty napěťové rozdíly podle rovnice 16 (což je ve své podstatě číselník rovnice 15 vnitřního odporu).

$$\Delta_{xV} = |U_{xV I=0} - U_{xV I \neq 0}|, \quad (16)$$

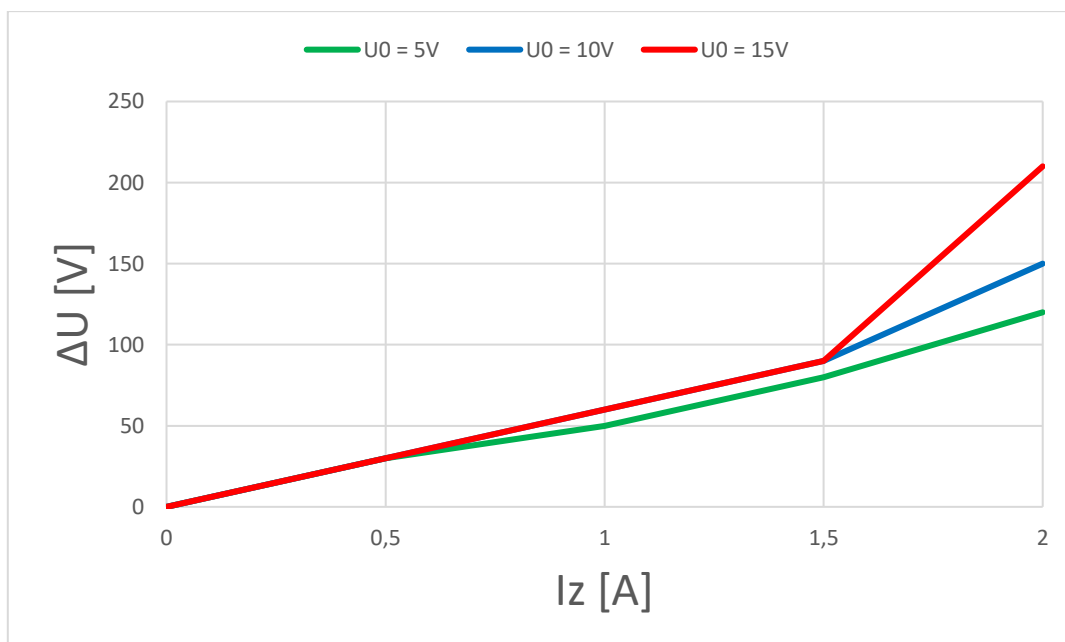
kde  $\Delta_{xV}$  je napěťový rozdíl napětí naprázdno a při zatížení pro konkrétní nastavené napětí  $x$  V,  $U_{xV I=0}$  je napětí naprázdno, a  $U_{xV I \neq 0}$  je napětí při zatížení.

Z tabulky 6 níže je poté patrné, že se vnitřní odpor 7 pohybuje kolem hodnoty 60 mΩ. Vyšší hodnota vnitřního odporu se projevuje pro maximální proud 2 A v posledních dvou nastavených napětích.

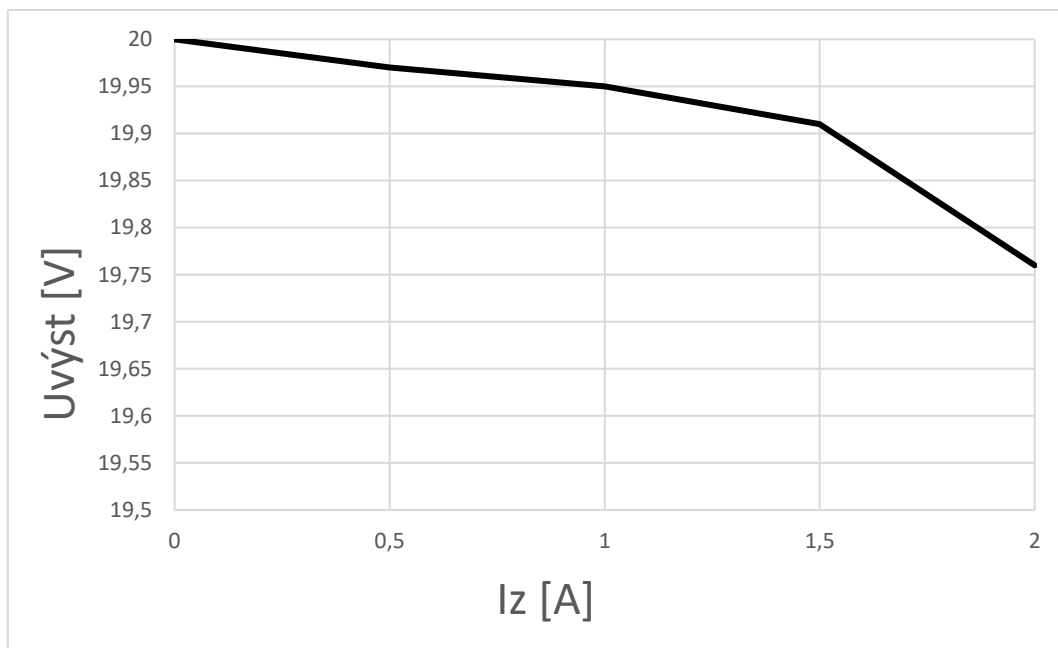
I	[A]	0	0,5	1	1,5	2
$U_{5V}$	[V]	5,06	5,03	5,01	4,98	4,94
$\Delta_{5V}$	[mV]	-	30	50	80	120
$R_{i(5V)}$	[m $\Omega$ ]	-	60	50	$\approx 53$	60
$U_{10V}$	[V]	10,06	10,03	10	9,97	9,91
$\Delta_{10V}$	[mV]	-	30	60	90	150
$R_{i(10V)}$	[m $\Omega$ ]	-	60	60	60	75
$U_{15V}$	[V]	15,03	15	14,97	14,94	14,82
$\Delta_{15V}$	[mV]	-	30	60	90	210
$R_{i(15V)}$	[m $\Omega$ ]	-	60	60	60	105
$U_{20V}$	[V]	20	19,97	19,95	19,91	19,76
$\Delta_{20V}$	[mV]	-	30	50	90	240
$R_{i(20V)}$	[m $\Omega$ ]	-	60	50	60	120

Tabulka 6 – Závislost poklesu napětí na odebíraném proudu zátěží

Dle tabulky 6 byl vytvořen graf 1 a graf 2. V grafu 1 lze pozorovat změnu hodnoty napětí vůči hodnotě napětí naprázdno podle rovnice 16 pro měřených 5 V, 10 V a 1 V. Graf 2 poté ukazuje přímo hodnotu napětí pro měřených 20 V.



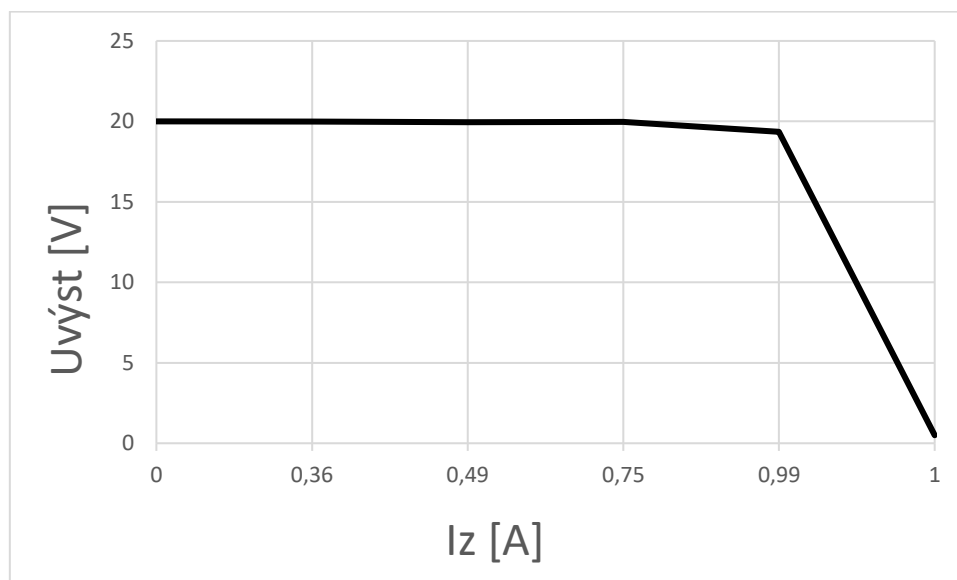
Graf 1 – Závislost poklesu výstupního napětí na odebíraném proudu



Graf 2 – Zatěžovací charakteristika

## 5.2. Zkouška proudového omezení

Rotačním enkodérem se nastaví, tedy resp. omezí maximální proud do zátěže. Ze zdroje napětí se tak stane zdroj konstantního proudu. Tedy jinak řečeno napětí na výstupu se omezí tak, aby do zátěže tekla právě nastavený proud. Graf 3 ukazuje aktivaci proudového omezení pro 1 A.



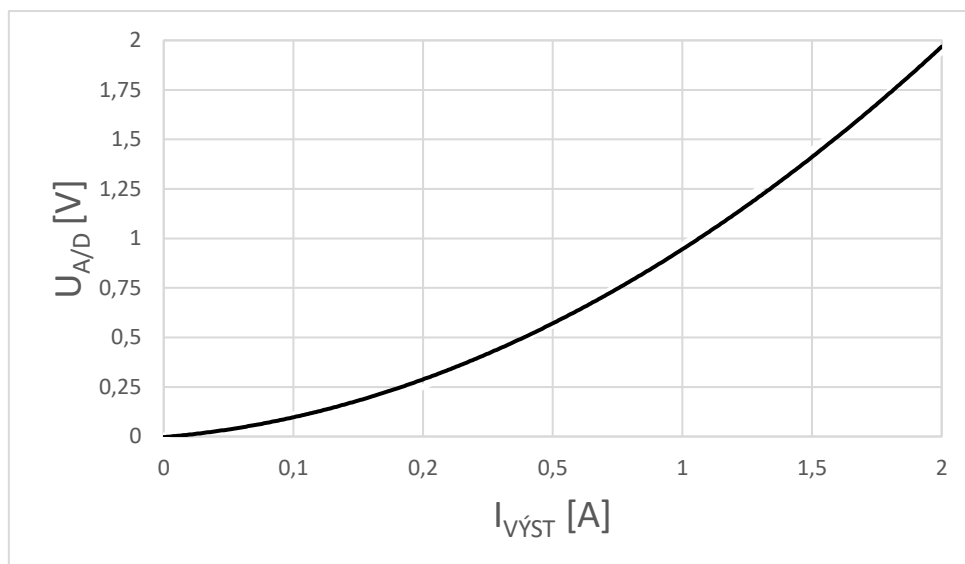
Graf 3 – Závislost výstupního napětí na odebíraném proudu při činnosti proudové pojistky (napětí naprázdno 20 V, pojistka nastavena na proud 1 A)

Jak lze vidět z grafu 3 napětí začne rapidně klesat u hodnoty 0,99 A. Napájecí zdroj drží proudové omezení, které v průběhu snižování odporu zátěže vzroste na 1 A. Tedy o 0,01 A.

### 5.3. Měření vstupní hodnoty A/D převodníku v obvodu pro snímání proudu

Jak již bylo zmíněno snímání proudu je řešeno pomocí rezistoru o hodnotě: 50 mΩ zapojeného v kladné výstupní větvi zdroje. Tento rezistor je paralelně připojen k neinvertujícímu a invertujícímu vstupu operačního zesilovače AD8414 tak, aby operační zesilovač zesiloval vzniklý napěťový úbytek na rezistoru. Nutno ještě připomenout, že operační zesilovač AD8414 je v jednom pouzdře s vyváženými rezistory, které zesilují úbytek vzniklý na rezistoru 20x. Pro příklad, kdy v kladné větvi poteče výstupní proud 1 A bude vzniklý napěťový úbytek 50 mV, zesílený napěťový úbytek poté 1 V. Tento 1 V je poté vstupní napětí na portu ADC0 interního D/A převodníku sloužícího k měření výstupního proudu.

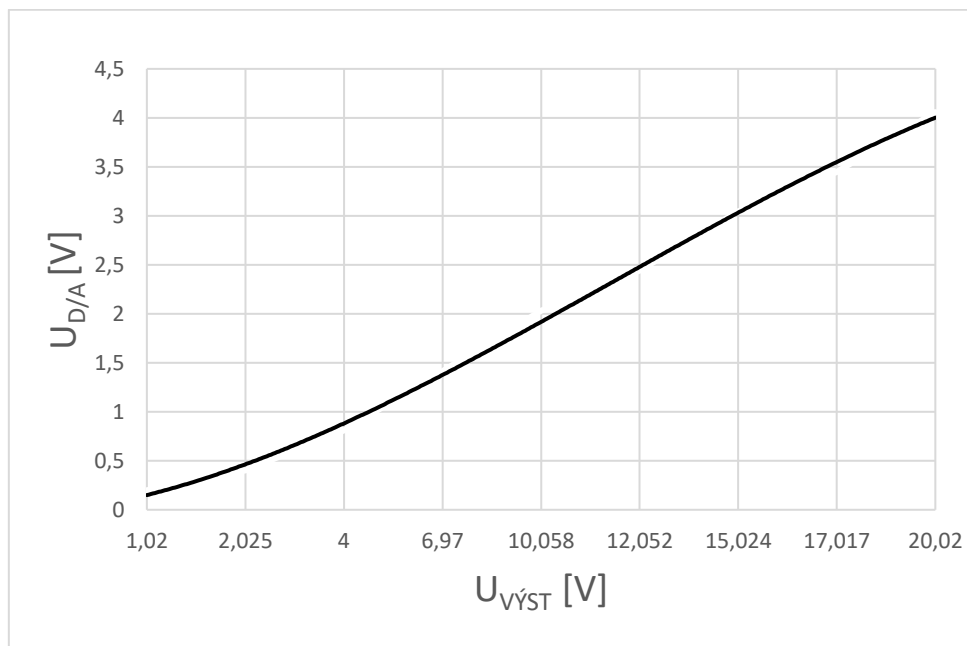
Graf 4 zachycuje právě již zmíněnou závislost zesíleného napěťového úbytku, resp. tedy vstupního napětí:  $U_{A/D}$  interního A/D převodníku na portu ADC0 a výstupního proudu  $I_{VYST}$  napájecího zdroje.



Graf 4 – Vstupní hodnoty A/D převodníku

#### 5.4. Měření výstupní hodnoty D/A převodníku

Graf 5 zachycuje závislost napětí z výstupu D/A převodníku, resp. tedy napětí na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače LM258P a nastaveného výstupního napětí napájecího zdroje.



Graf 5 – výstupní napětí D/A převodníku

## ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo zkonstruovat regulovatelný síťový napájecí zdroj řízený mikrokontrolérem, který poskytuje výstupní napětí 0-20 V a proudové omezení 0-2 A. Tento zadaný rozsah výstupních veličin byl splněn.

Napájecí zdroj měl dle zadání být řízen rotačním enkodérem se zobrazováním hodnot na displeji. Což je také splněno.

Dále rozsahy regulovaných veličin měli mít regulovatelný krok 0,1 V pro napětí a 0,01 A pro proud s 1% přesností. Z tabulky 7 lze vidět, že tato přesnost je téměř splněna v celém rozsahu. Nepřesnost má zdroj pouze při regulaci napětí u rozsahu hodnot 0-1 V. Pro tuto hodnotu je přesnost v desítkách a jednotkách milivolt. Tuto přesnost už při takto malých hodnotách může ovlivňovat téměř cokoliv. A pro napájení veškerých zapojení je v souvislosti s uplatněním napájecího zdroje tato nepřesnost zanedbatelná. S rostoucím jednocentním požadavkem na přesnost už je hodnota pro rozsah 1-20 V splněna. Pro regulaci proudu platí pro hodnoty 0-100 mA stejná analogická nepřesnost, kde se projevují nepatrně větší odchylky od jednocentní přesnosti. Tabulka 6 ukazuje přesnost napájecího zdroje pro regulaci napětí.

Nastavené napětí [V]	Měřené napětí [V]
0	0
0,1	0,14
0,2	0,206
0,3	0,302
0,4	0,403
0,5	0,506
0,6	0,605
0,7	0,703
0,8	0,8
0,9	0,91
1	1,09
2,5	2,5
5	5
10	9,92
15	15
20	20,1

Tabulka 7 – Jednocentní přesnost výstupního napětí





Obrázek 33 – Výsledná podoba napájecího zdroje

## NÁPADY NA MOŽNÉ VYLEPŠENÍ

Již na samotném funkčním napájecím zdroji jsem si vyzkoušel, jak moc dokáže regulační výkonový prvek zahřívat pasivní chladič k tomuto prvku připevněný. Za možné vylepšení bych po znalostech nabitých tímto návrhem považoval umístění chladiče pro výkonový prvek, alespoň na zadní vnější stranu napájecího zdroje. Nebo v lepším případě zakomponování teplotního čidla a aktivního chlazení do zapojení. Mikrokontrolér by poté vyhodnocoval přesah maximální teploty uvnitř napájecího zdroje, na jejímž základě by spouštěl aktivní chlazení, např. větráček na krytu napájecího zdroje pro lepší cirkulaci vzduchu.

Z pohledu uživatele by jisté vylepšení přinášelo lepší signalizace právě regulované hodnoty. Například pomocí samostatné diody umístěné vedle displejů. A v poslední řadě lepší signalizace překročení maximální hodnoty, jako například pomocí zvukového signálu piezoelektrickým reproduktorem také zakomponovaného do zapojení.

Toto jsou jen možné nápady na vylepšení napájecího zdroje, ke kterým jsem dospěl těsně před koncem samotného návrhu, nebo v průběhu testování a zkoušení funkčnosti napájecího zdroje. Tyto nápady ovšem nemají žádný vliv a základní funkci napájecího zdroje, kterou je poskytnout s rozumnou odchylkou napájecí napětí a proud pro všemožná elektronická zapojení.

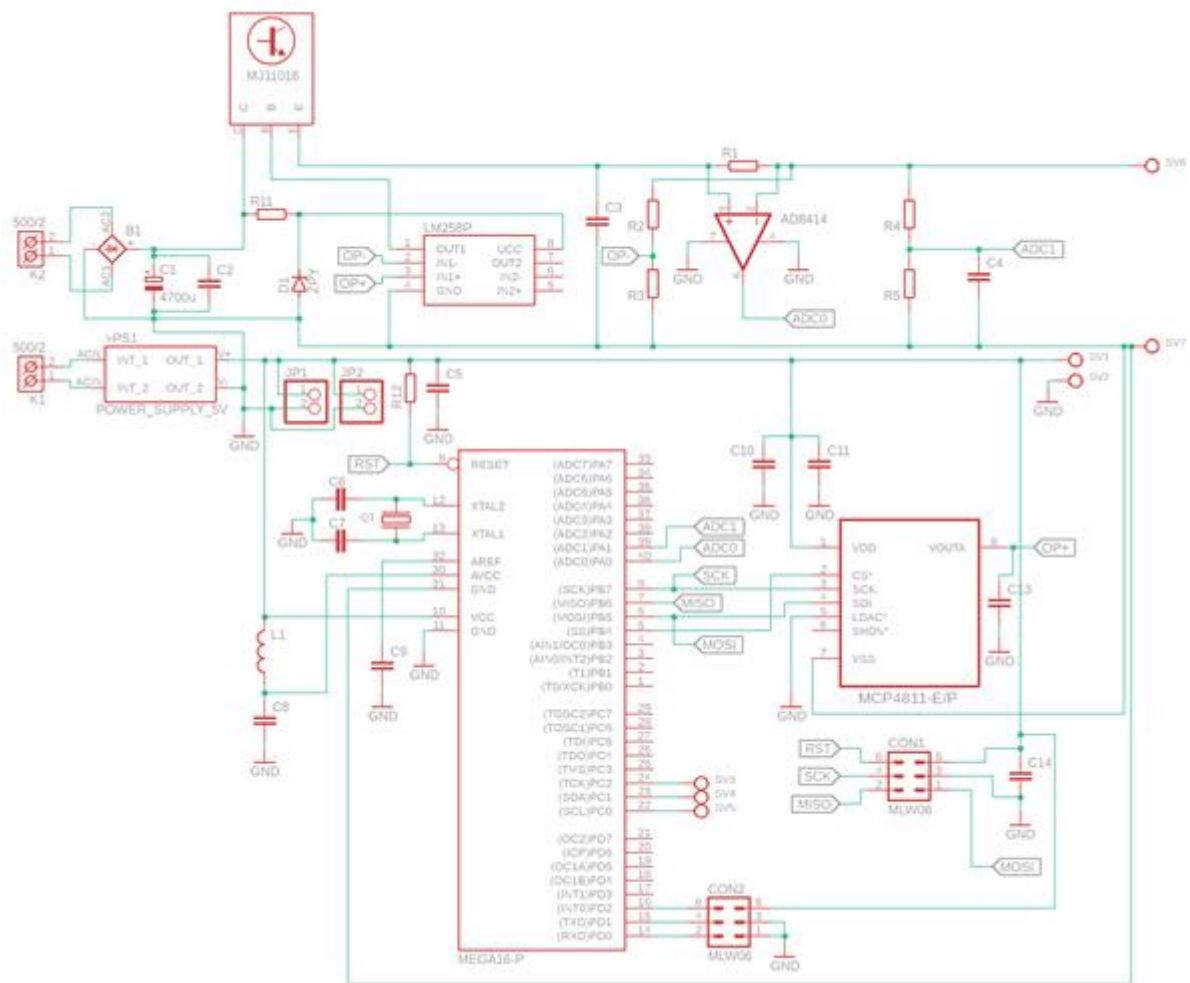
## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HUSÁK, Miroslav. *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku: přednášky*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03398-8.
- [2] BRTNÍK, Bohumil. *Základní elektronické obvody*. 1. Vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-408-8.
- [3] DOLENSKÝ, Tomáš. *Návrh regulovaného zdroje 1-30 V/2 A* [Online]. Praha, 2018. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta elektrotechnická. Ing. Vít Hlínovský, CSc. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/76219/F3-BP-2018-Dolensky-Tomas-Navrh%20regulovaneho%20zdroje.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- [4] IRM-10-5 [Online]. Domašov u Brna, 2016 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <https://www.czech-meanwell.cz/fotky10575/fotov/IRM-10-spec.pdf>
- [5] MATOUŠEK, David. *Elektronické obvody – Obvody napájecích zdrojů* [přednáška]. Pardubice: Fakulta elektrotechniky a informatiky UPCE, předmět bakalářského studia, 2019.
- [6] KBL02 [Online]. Taichung, 2017 [cit. 20-04-10]. Dostupné z: <https://www.dccomponents.com/upload/product/original/213620656266.pdf>
- [7] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATmega16*. 1. Vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 978-80-7300-174-8.
- [8] *ATmega16* [Online]. San Jose, 2010 [cit.2020-04-10]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2466.pdf>
- [9] *MCP4822-E/P* [Online]. San Jose, 2010-2015 [cit.2020-04-12]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2466.pdf>
- [10] *LM258P* [Online]. Dallas, 2020 [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm258.pdf?ts=1595009822172&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fstore%252Fti%252Fen%252Fp%252Fproduct%252F%253Fp%253DLM258P](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm258.pdf?ts=1595009822172&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fstore%252Fti%252Fen%252Fp%252Fproduct%252F%253Fp%253DLM258P)
- [11] *MJ11016* [Online]. Denver, 2008 [cit. 2020-04-17]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MJ11012-D.PDF>
- [12] ULRICH, Daniel. Výpočet chladiče. [Online] 2011 [cit. 2020-05-10]. Dostupné z: [https://vyuka.hradebni.cz/file.php/110/Ostatni/Vypocet\\_chladice.pdf](https://vyuka.hradebni.cz/file.php/110/Ostatni/Vypocet_chladice.pdf)
- [13] *EC11B* [Online]. California, 2015 [cit. 2020-05-22]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/947fff760d3e8051ff1d91b3169c392a/ALPS-EC11.pdf>
- [14] *Tajned.cz*. In: Základní zapojení LED diod. [Online] 2016 [cit. 2020-07-10]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2014/09/zakladni-zapojeni-led-diody/>
- [15] *Rezistorová síť 4116R-1-RC* [Online]. Litho USA, 2019 [cit. 2020-07-11] [https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/4100r.pdf?sfvrsn=f3ca3032\\_5](https://www.bourns.com/docs/product-datasheets/4100r.pdf?sfvrsn=f3ca3032_5)

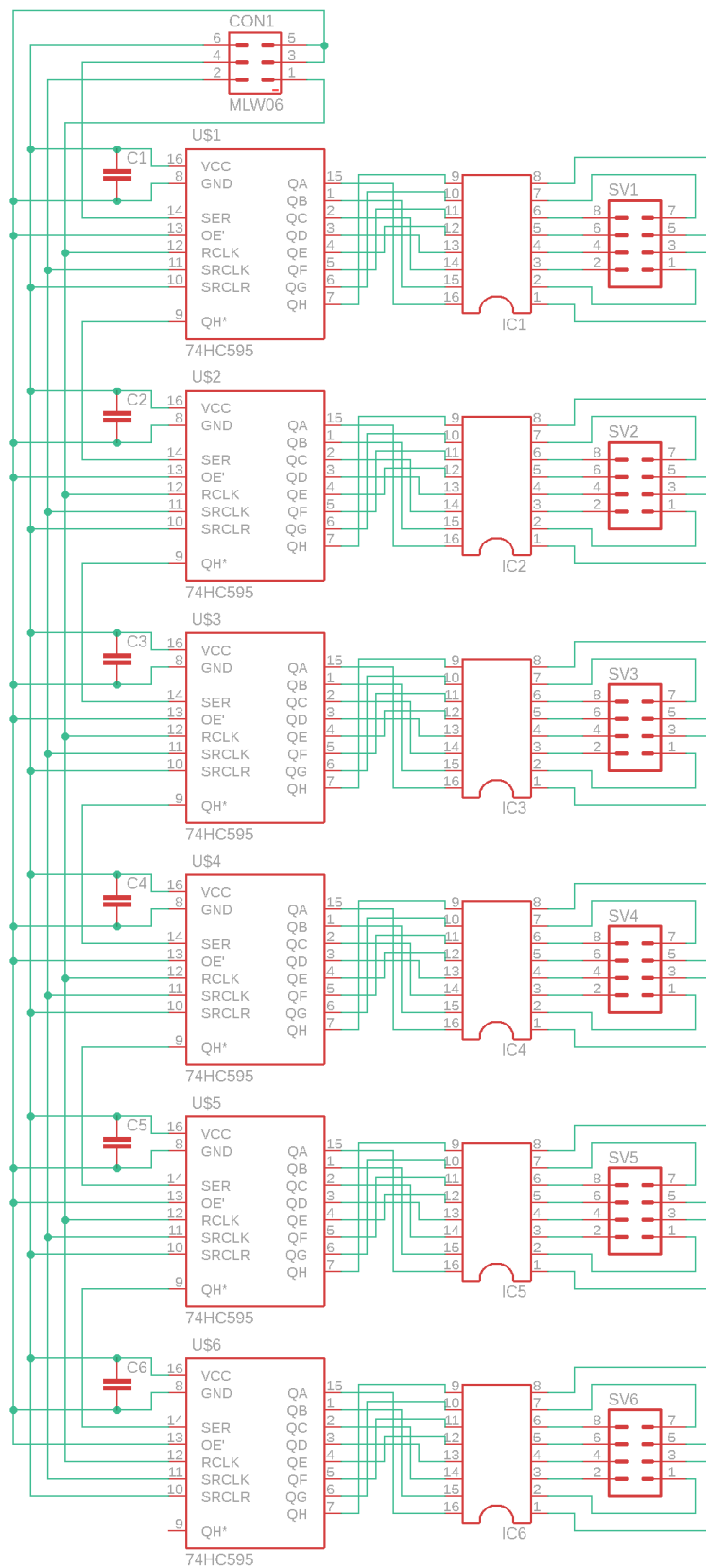
- [16] *74HC595* [Online]. Dallas, 2015 [cit.2020-04-20]. Dostupné z:  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf?ts=1593787697335&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsite%252Fdocs%252Funiversalsearch.jsp%253FsearchTerm%253Dsn74hc595n](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74hc595.pdf?ts=1593787697335&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fsite%252Fdocs%252Funiversalsearch.jsp%253FsearchTerm%253Dsn74hc595n)
- [17] *Lastminuteengineers.com*. In: How 74HC959 Shift Register Work & Interface it with Arduino. [Online] 2020 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z:  
<https://lastminuteengineers.com/74hc595-shift-register-arduino-tutorial/>

# PŘÍLOHY

## Příloha A – Schéma zapojení hlavní desky: DPS\_1



## Příloha B – Schéma zapojení první části displeje: DPS\_2



### Příloha C – Schéma zapojení druhé části displeje: DPS\_3

