

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Dvojitý napájecí zdroj
Jiří Holakovský

Bakalářská práce
2022

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Holakovský**
Osobní číslo: **I19196**
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Dvojitý napájecí zdroj**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Navrhněte a realizujte dvojitý regulovatelný lineární 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 obou výstupů bude probíhat vzájemně nezávisle v rozsahu od 0 do 20 V s volitelnými kroky 5 mV/50 mV/500 mV, proudové omezení bude pevné 100 mA. Přesnost nastaveného napětí musí být do 1 % v celém pracovním rozsahu. Krok regulace a výstupní napětí budou nastavovány rotačními enkodéry a zobrazovány na dvou displejích. Na displejích se rovněž bude zobrazovat odebíraný proud. Pomocí dalších tlačítek bude možné upravit rozsahy měřených napětí a proudů.

Součástí textové práce bude kontrolní měření jednotlivých subsystémů a celku. Respektujte základní pravidla bezpečnosti při práci s elektrickým proudem.

Rozsah pracovní zprávy: **40 stran A4**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené 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.

MATOUŠEK, David. Aplikace mikrokontrolérů ATmega644. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2013, ca 200 s. v různém stránkování. ISBN 978-80-7300-492-7.

VÁŇA, Vladimír. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C : popis a práce ve vývojovém prostředí CodeVisionAVR C. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2003, 215 s. ISBN 80-730-0102-0.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Bc. David Matoušek, Ph.D.**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

Prohlášení autora

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., 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.

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. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 21.12. 2022

Jiří Holakovský

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Bc. Davidu Matouškovi Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a trpělivost při konzultacích.

Dále bych chtěl poděkovat rodině, které vděčím za podporu po celou dobu mého studia.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Janu Pidaničovi Ph.D. za rady ohledně přípravy bakalářské práce a velké poděkování náleží i mým spolužákům, kteří mi byli oporou při studiu.

Anotace

Tato práce je věnována návrhu dvojitého regulovatelného zdroje. Zdroj bude řízen mikrokontrolérem a výstupní hodnoty budou nastavovány uživatelem pomocí rotačního enkodéru. Výstupní hodnoty budou měřeny a zobrazovány na LCD displeji.

Klíčová slova

Mikrokontrolér, ATmega16, rotační enkodér, tranzistor, operační zesilovač, měnič napětí, LCD displej, A/D převodník, D/A převodník, I²C, SPI

Title

Dual Power Supply

Annotation

This bachelor thesis is devoted to design and build dual power supply. The supply will be controlled by microcontroller and outputs will be set by user using rotary encoder. Output values will be measured and shown on the display.

Keywords

Microcontroller, ATmega16, rotary encoder, transistor, operational amplifier, voltage converter, LCD display, A/D converter, D/A converter I²C, SPI

Obsah

Seznam zkratk	9
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Úvod do napájecích zdrojů	13
1.1 Ideální a skutečný zdroj.....	13
1.1.1 Zapojení naprázdno a nakrátko.....	14
1.2 Stejnoseměrné zdroje	15
1.3 Stejnoseměrné regulovatelné zdroje.....	15
1.3.1 Síťový transformátor	16
1.3.2 Usměrnovač	17
1.3.3 Regulační prvek – tranzistor.....	18
1.3.4 Snímač napětí	18
1.3.5 Operační zesilovač.....	18
1.3.6 Zdroj referenčního napětí	19
1.4 Střídavé zdroje napětí	19
2 Návrh dvojitého napájecího zdroje	20
2.1 Mikroprocesor	20
2.2 AC/DC měnič	23
2.3 Pomocný DC/DC zdroj.....	24
2.4 DAC převodník MCP4821	25
2.5 Operační zesilovač.....	26
2.6 Výkonový tranzistor	27
2.7 Snímače proudu	29
2.8 Snímače napětí.....	31
2.9 Chladič.....	32
2.10 Periferie	33
2.10.1 Displej.....	34
2.10.2 Enkodér.....	34
2.10.3 Tlačítka	35
3 Firmware zdroje a popis funkcí	36

3.1	Funkce ADC_read	36
3.2	Funkce bit10_bit12	36
3.3	Funkce cti_tlacitka.....	37
3.4	Funkce pro odesílání dat na DAC	37
3.5	Smyčka while(1).....	38
3.6	Přerušení ISR.....	41
3.7	Proudová pojistka	42
4	DPS a konstrukce zdroje.....	43
4.1	DPS.....	43
4.2	Konstrukce zdroje.....	45
5	Měření jednotlivých částí a celku.....	46
5.1	Měření DAC 4821	46
5.2	Měření tranzistoru a OZ	47
5.3	Měření proudových snímačů	48
5.4	Měření proudové pojistky.....	50
5.5	Výstupní měření celého zdroje	51
5.5.1	Zatěžovací charakteristiky zdrojů.....	51
5.5.2	Měření výstupních hodnot napětí	52
	Závěr	53
	Literatura	54
	Příloha A – Schéma zapojení.....	57
	Příloha B – Seznam součástek	58
	Příloha C – DPS	59
	Příloha D – Firmware.....	60

Seznam zkratek

OZ	Operační zesilovač
A/D	Převod analogového signálu na digitální
ADC	Analog/digital convertor
D/A	Převod digitálního signálu na analogový
DAC	Digital/analog convertor
VCC	Napájecí napětí
GND	Zkratka pro uzemnění v elektrotechnice
DPS	Deska plošných spojů
THT	Through-hole-technology (typ montáže do DPS)
MIPS	Million instructions per second
I/O	Input/output
EPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
SRAM	Static Random Access Memory
PWM	Pulse Width Modulation
SCK	Hodiny pro SPI sběrnici
SDA	Datový signál I2C rozhraní
SCL	Hodinový signál I2C rozhraní
ADC	A/D převodník mikrokontroléru
AC	Střídavé napětí
DC	Stejnoseměrné napětí
SPI	Seriál Peripheral Interface (sériové periferní rozhraní)
MOSI	Master Out/Slave in pro SPI kanál
MISO	Slave in/Master Out pro SPI kanál
SS	Slave Select kanálu SPI
SMD	Surface mount device (povrchová montáž)
RISC	Reduced Instruction Set Computer
AREF	Analog Reference
RST	RESET
LCD	Liquid Crystal Display
SHDN	Shutdown
LDAC	Latch DAC input
LED	Light-Emitting Diode
EAGLE	Easily Applicable Graphical Layout Editor
DGND	Digitální signál GND
AGND	Analogové signál GND

Seznam obrázků

Obrázek 1	Obecné blokové schéma napájecích zdrojů	13
Obrázek 2	Zatěžovací charakteristika ideálního a skutečného zdroje	13
Obrázek 3	Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje a sériový náhradní obvod skutečného zdroje s připojenou zátěží [3]	14
Obrázek 4	Skutečný zdroj ve stavu naprázdno a ve stavu nakrátko [3]	15
Obrázek 5	Blokové schéma napájecího zdroje [4]	15
Obrázek 6	Napájecí zdroj se stabilizátorem s lineární regulací [2]	16
Obrázek 7	Můstkový usměrňovač s filtrem [5]	17
Obrázek 8	Zpětnovazební stabilizátor se sériovou regulací [2]	18
Obrázek 9	Graf popisující vlastnosti střídavého (sinusového) napětí [8]	19
Obrázek 10	Blokové schéma navrhovaného zdroje	20
Obrázek 11	Popis výstupních portů ATmega16 [10]	21
Obrázek 12	ATmega16 [11]	21
Obrázek 13	Signály šesti pinového konektoru MLW06G [12]	23
Obrázek 14	Schéma zapojení ATMega16	23
Obrázek 15	AC/DC měnič LO10-13B24 [13]	23
Obrázek 16	DC/DC měnič R-78E5.0-0.5 [14]	24
Obrázek 17	Schéma zapojení DC/DC měniče ve schématu	25
Obrázek 18	Popis výstupních pinů DAC MCP4821 [15]	25
Obrázek 19	Schéma zapojení MCP4821	25
Obrázek 20	Popis jednotlivých bitů D/A převodníku [15]	26
Obrázek 21	Popis výstupních pinů OZ LM358P [16]	26
Obrázek 22	Schéma zapojení LM358P	27
Obrázek 23	Schéma zapojení tranzistorů (Darlingtonovo zapojení)	28
Obrázek 24	Výkonový tranzistor 2SC5200OTU [20]	28
Obrázek 25	Popis výstupních pinů INA21x [21]	29
Obrázek 26	Schéma zapojení snímačů proudu INA21x	30
Obrázek 27	Zobrazení vývodů rezistoru LVK na DPS	31
Obrázek 28	Schéma zapojení měřicích děličů napětí	32
Obrázek 29	LCD displej 16x2	34
Obrázek 30	Příklad připojení rotačního enkodéru se středovým tlačítkem [23]	34
Obrázek 31	Enkodér s RC článkem	35
Obrázek 32	Tlačítko ON-OFF	35
Obrázek 33	Deska plošných spojů – horní vrstva	43
Obrázek 34	Deska plošných spojů – spodní vrstva	44
Obrázek 35	Osazená deska plošných spojů (bez připojených vodičů)	44
Obrázek 36	Rozložená konstrukce zdroje	45
Obrázek 37	Finální vzhled dvojitěho regulovatelného zdroje	45
Obrázek 38	Adaptér pro MCP4821	46
Obrázek 39	Schéma zapojení pro měření D/A převodníku MCP4821	46
Obrázek 40	Schéma zapojení pro měření tranzistoru a OZ se zátěží	48

Obrázek 41 Adaptér pro INA21x	48
Obrázek 42 Schéma zapojení pro měření proudového snímače INA212.....	49

Seznam tabulek

Tabulka 1 Funkce jednotlivých vývodů mikrokontroléru [9]	21
Tabulka 2 Vlastnosti AD/DC měniče LO10-113B24 [13].....	24
Tabulka 3 Vlastnosti DC/DC měniče [14]	25
Tabulka 4 Vlastnosti tranzistoru 2SC5200OTU [18].....	27
Tabulka 5 Vlastnosti tranzistoru BC547B [19].....	28
Tabulka 6 Vlastnosti snímače proudu INA21x [21].....	29
Tabulka 7 Výsledné napětí z měřících snímačů proudu INA21x.....	30
Tabulka 8 Výsledné napětí z měřících děličů napětí.....	32
Tabulka 9 Vlastnosti enkodéru [24]	35
Tabulka 10 Výpočet koeficientů pro různý proud pro měření proudu	40
Tabulka 11 Výsledky měření D/A převodníku MCP4821	47
Tabulka 12 Výsledky měření tranzistoru se zátěží a naprázdno	48
Tabulka 13 Výsledky měření proudového snímače INA212	49
Tabulka 14 Výsledky měření proudové pojistky.....	50
Tabulka 15 Výsledky měření vnitřního odporu zdrojů při 10 V.....	51
Tabulka 16 Výsledky měření zatěžovacích charakteristik	51
Tabulka 17 Výsledky měření rozdílu mezi požadovanou a reálnou hodnotou napětí.....	52
Graf 1 Závislost výstupního napětí D/A převodníku na nastavovaném vstupním napětí ...	47
Graf 2 Měřený proud pomocí snímače INA212 na zátěži R_z	50
Graf 3 Zatěžovací charakteristika obou zdrojů.....	52

Úvod

Cílem této práce je návrh a realizace dvojitého regulovatelného laboratorního zdroje. K fungování jakéhokoliv elektrického zařízení je potřeba zdroj elektrické energie. Zdroje se dají rozdělit na mnoho druhů. Pro některá zařízení může být zdroj přímo tzv. síťové napětí 230 V/50 Hz, ale většina slaboproudé elektroniky potřebuje speciální zdroje, které síťové napětí změní, upraví velikost a vyfiltrují tak, aby vyhovovalo danému zařízení. Dalším druhem jsou regulovatelné zdroje. Tento typ je základem této bakalářské práce, která popíše návrh, realizaci a kontrolní měření navrhovaného zdroje.

První kapitola bakalářské práce pojednává o napájecích zdrojích obecně. Je zde popsán základní stejnosměrný zdroj a jeho blokové schéma. Větší důraz je kladen na regulovatelný zdroj z důvodu úzké spojitosti s touto bakalářskou prací. Je zde přiloženo blokové schéma a je popsáno blok po bloku, aby byl čtenář seznámen se základním principem sériové regulace takovýchto zdrojů.

Druhá část popisuje návrh samotného zdroje. Každá jednotlivá část je popsána v samostatné podkapitole. Čtenář je seznámen se základní myšlenkou návrhu, jak a proč byly komponenty vybrány a spojení daných částí do sebe.

Další kapitola popisuje firmware, který byl napsán pro mikrokontrolér, který ovládá celý zdroj. Jako v předchozí části jsou popsány jednotlivé funkce. Jejich návrh a provedení. Popsány jsou pouze stěžejní funkce a celý kód je vložen v příloze D.

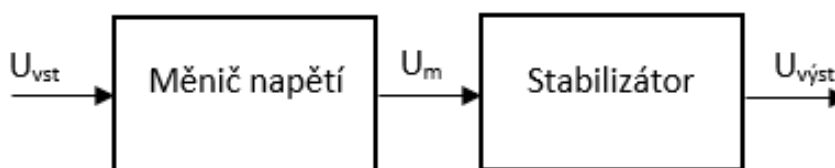
Čtvrtá kapitola ukazuje navržené desky plošných spojů. Zobrazeny jsou pomocí obrázků a následně vyfoceny osazené i v reálné podobě. Následně je zde vyobrazen samotný zdroj v reálné podobě.

Poslední kapitola popisuje měření jednotlivých subsystémů zdroje, zatěžovací charakteristiku obou zdrojů, výpočet vnitřního odporu a také měření, kde se porovnává, jaký je rozdíl mezi výstupním napětím oproti napětí, které je nastaveno rotačním enkodérem. Z výsledků lze vyčíst přesnost zdroje.

1 Úvod do napájecích zdrojů

Napájecí zdroj je takové zařízení, které poskytuje danému elektrickému obvodu nebo zařízení požadované napájecí napětí a proud tak, aby bylo schopno provozu. Zdroje lze rozdělit do tří základních skupin:

- Stejnosměrné
- Střídavé [1]
- S jiným výstupním průběhem (např. impulsní) [2]

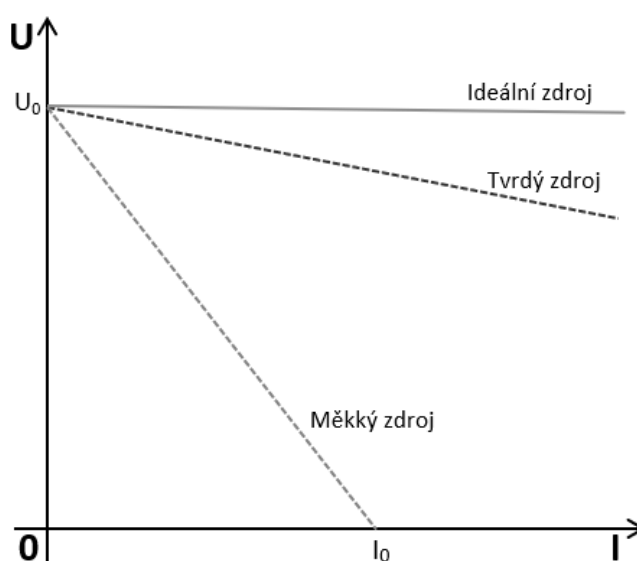


Obrázek 1 Obecné blokové schéma napájecích zdrojů

Každý zdroj se dá popsat dvěma bloky. První část přeměňuje napětí, a to většinou z většího na menší. U_{vst} bývá typicky 230 V/50 Hz, tedy síťové napětí, a pomocí měniče se přeměňuje na požadované napětí U_m . Druhý blok stabilizuje napětí U_m , které kolísá a neudrží stálou hodnotu.

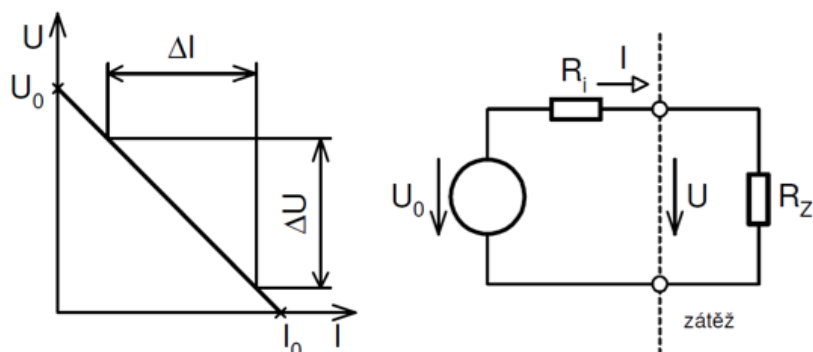
1.1 Ideální a skutečný zdroj

Ideální zdroj je pouze teoretický předpoklad a využívá se ke zjednodušeným výpočtům. Takový zdroj má nulový vnitřní odpor a dokáže udržet konstantní výstupní napětí, tedy napětí naprázdno U_0 se rovná výstupní napětí U .



Obrázek 2 Zatěžovací charakteristika ideálního a skutečného zdroje

Skutečný zdroj má vnitřní odpor a na něm vznikají úbytky napětí a ztráty. Takový zdroj lze překreslit do náhradního schématu, kde je znázorněn vnitřní odpor samotného zdroje R_i .



Obrázek 3 Zatěžovací charakteristika skutečného zdroje a sériový náhradní obvod skutečného zdroje s připojenou zátěží [3]

Toto zapojení lze popsat jednoduchým vztahem:

$$U = U_0 - R_i \cdot I \quad (1) [3]$$

kde U – je napětí zátěže
 U_0 – je napětí naprázdno
 R_i – vnitřní odpor zdroje
 I – odebíraný proud

Slovy lze vztah popsat jako: „pokles svorkového napětí U vlivem odebíraného proudu I lze vysvětlit napěťovým úbytkem na rezistoru R_i .“ [3] Tento úbytek napětí (a proudu) je znázorněn na obrázku č.3

Hodnotu odporu R_i lze vypočítat dle vzorce:

$$R_i = \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (2) [3]$$

1.1.1 Zapojení naprázdno a nakrátko

Stav zdroje, kdy je na výstupních svorkách zatížen rezistorem, je popsán v minulé kapitole. Tato část popisuje zdroj, který na výstupních svorkách nemá zátěž a mluví se o tzv. stavu naprázdno. V tomto případě je proud (I) roven nule a výstupní napětí $U = U_0$.

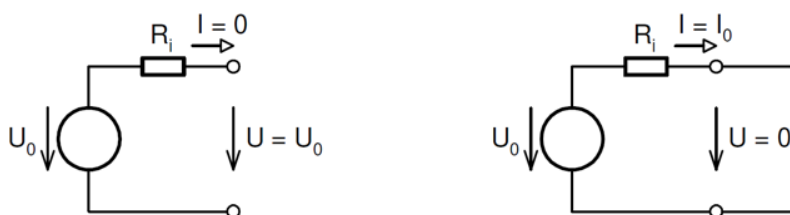
„Pokud svorky skutečného zdroje zkratujeme, bude svorkové napětí nulové ($U = 0$) a bude jimi téct proud I_0 “ [3] Tomuto případu se říká tzv. stav nakrátko a proud zkratovanými svorkami můžeme nazvat jako proud nakrátko.

Napětí $U = 0$ a rovnice pro proud nakrátko lze odvodit ze vzorce (1):

$$\begin{aligned}
 U &= U_0 - R_i \cdot I \\
 0 &= U_0 - R_i \cdot I \\
 U_0 &= R_i \cdot I
 \end{aligned}
 \tag{3} [3]$$

$$I_0 = \frac{U_0}{R_i}$$

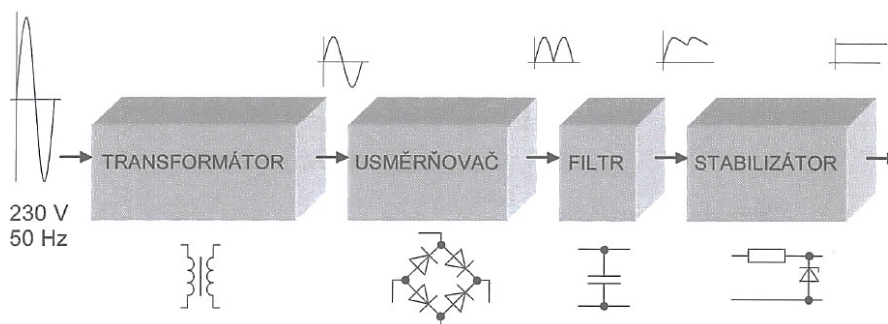
Schéma zapojení dvou výše zmíněných stavů:



Obrázek 4 Skutečný zdroj ve stavu naprázdno a ve stavu nakrátko [3]

1.2 Stejnosměrné zdroje

Nejčastěji používanou skupinou zdrojů jsou stejnosměrné zdroje. Nejjednodušší koncepce takového lineárního zdroje je zobrazena obrázku č.4. Tento zdroj je lineární a skládá se ze 4 hlavních bloků, kde každý z nich plní velmi důležitou a nepostradatelnou roli. Ze schématu je patrné, že daný zdroj nelze regulovat, a tedy funguje podle charakteristik a hodnot daných součástek v blocích. Součástky zde slouží jen pro úpravu signálu. V případě, že by byl ve schématu aktivní prvek (a na něj přivedena zpětná vazba), bude takový zdroj regulovatelný. Regulovatelné zdroje budou popsány podrobně v další kapitole.

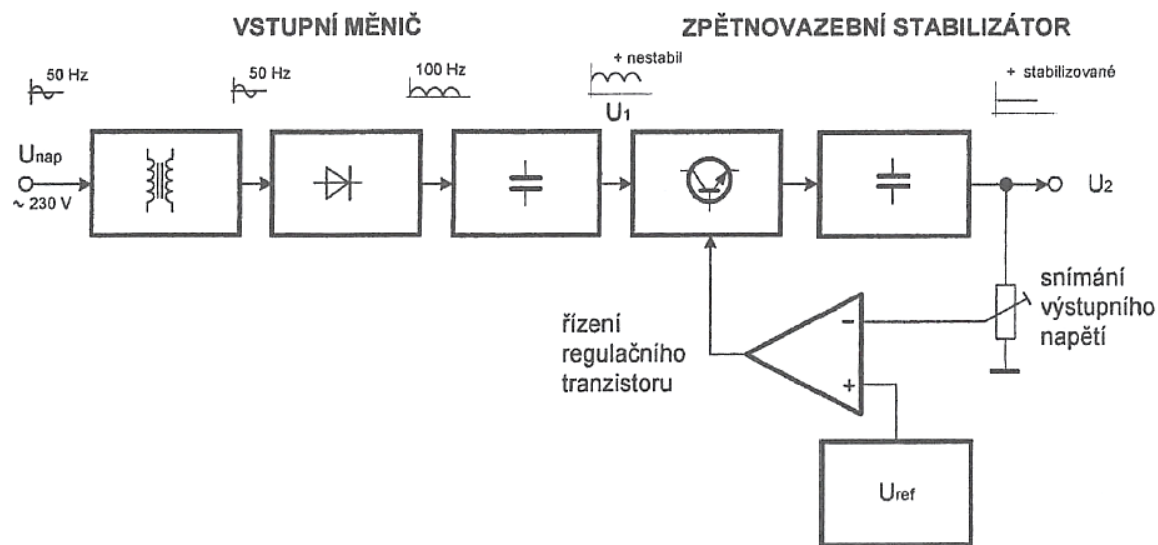


Obrázek 5 Blokové schéma napájecího zdroje [4]

1.3 Stejnosměrné regulovatelné zdroje

Stejnosměrné regulovatelné zdroje jsou takové zdroje, které se dají regulovat. Hlavní změnou je počet bloků ve schématu a jejich uspořádání. Nově přibudou do schématu 3-4 bloky. Prvním je aktivní prvek, který je nejčastěji tvořen tranzistorem. Dále blok řízení tranzistoru složený z operačního zesilovače. Následuje blok referenčního napětí, který vstupuje do kladného vstupu OZ. Předposlední nový blok je snímání výstupního napětí

vstupující do záporného vstupu OZ. Poslední je filtr potřebný z důvodu kolísavosti napětí, které vychází z aktivního prvku.



Obrázek 6 Napájecí zdroj se stabilizátorem s lineární regulací [2]

„Stabilitu výstupního napětí ovlivňují změny proudového zatížení zdroje, časové změny parametrů použitých součástí, změny vstupního síťového napětí, teplo vyzářené některými součástkami vlastního zdroje a změna teploty okolního prostředí. Stabilizační činitel p je definován následovně:“

$$p = \frac{\frac{\Delta U_1}{U_1}}{\frac{\Delta U_2}{U_2}} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} \quad (4) [2]$$

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

Stabilizační činitel p se pohybuje v rozmezí 10^2 až 10^3 . [2]

1.3.1 Síťový transformátor

První blok celého zdroje je síťový transformátor. „Využívá se ke změně velikosti vstupního střídavého napětí a proudu, ke galvanickému oddělení obvodů stabilizátoru od napětí sítě, ale také i jako filtr zabraňující vyzařování vyšších harmonických stabilizátoru zpět to napájecí sítě.“ [2] Základní rovnice popisující transformátor zní následovně:

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (5)$$

kde p – je převod transformátoru
 N_1 – je počet závitů primárního vinutí
 N_2 – je počet závitů sekundárního vinutí
 U_1 – je vstupní napětí
 U_2 – je výstupní napětí
 I_1 – je proud primárního vinutí
 I_2 – je proud sekundárního vinutí

Přesné výsledky rovnice platí pouze za ideálních podmínek. V transformátoru vznikají ztráty např.: ve vedení, v jádře a ztráty vířivými proudy. V reálném případě bude napětí U_2 menší, než dostaneme z výpočtu rovnice. Účinnost $[\eta]$ transformátoru je tedy menší než 100 %.

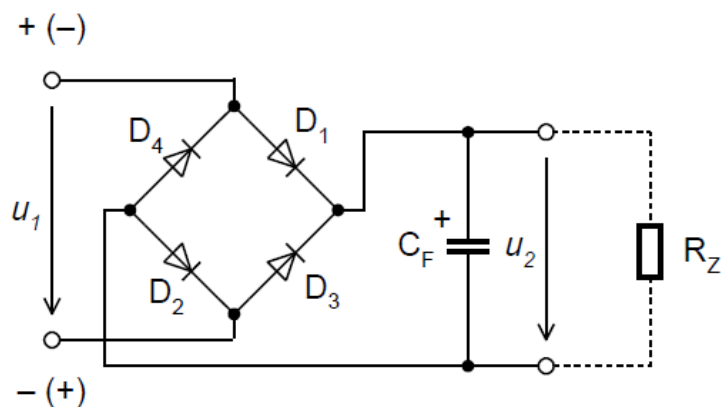
Jednotka p udává převod transformátoru. V případě, že je $p > 1$, pak transformátor napětí snižuje ($U_2 < U_1$). V opačném případě, kdy $p < 1$, se napětí zvyšuje ($U_2 > U_1$).

1.3.2 Usměrňovač

Dalším blokem je usměrňovač, který zmenšené střídavé napětí usměrní na požadovaný průběh. Hlavní součástí usměrňovače je usměrňovací dioda, mající závislost na přiloženém napětí. Při kladné polaritě jí napětí prochází, naopak při záporné polaritě je dioda uzavřena a procházející proud je zanedbatelný. Těchto vlastností využívají všechny tři základní druhy usměrňovačů:

- Jednocestný
- Dvoucestný
- Můstkový (neboli Graetzův)

Poslední zmíněný usměrňovač je nejvyužívanější. Graetzův můstek se skládá ze čtyř diod. Základní princip je ve směru zapojení diod. Díky nim prochází obvodem jak záporná, tak kladná půlvlna sinusového průběhu. Zapojení je znázorněno na obrázku 5:



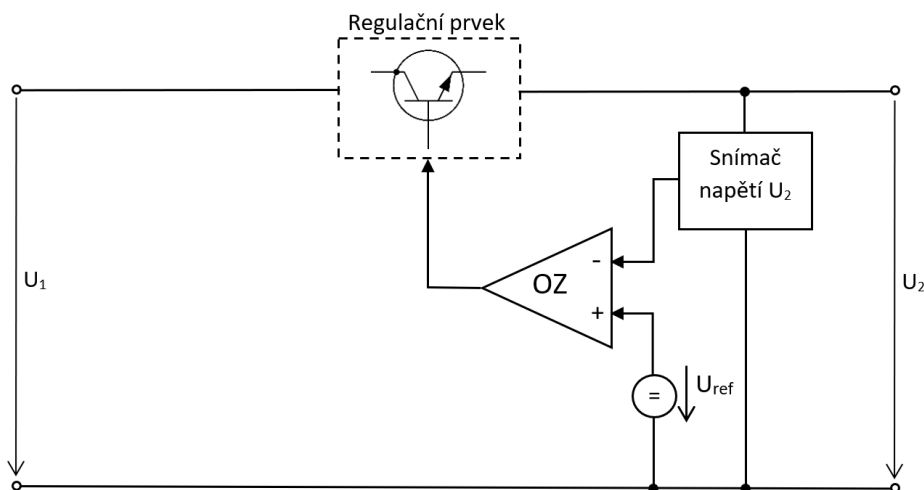
Obrázek 7 Můstkový usměrňovač s filtrem [5]

Principem můstkového usměrňovače jsou čtyři diody, které se střídají při vedení procházejícího proudu. Při kladné půlvlně jsou použity diody D_1 , D_2 a při záporné D_3 , D_4 . Laicky řečeno, můstek převrátí záporné půlvlny do kladného spektra. Frekvence kmitání je tedy 2x vyšší. Na výstup je připojen filtrační kondenzátor, který se nabíjí v době růstu půlvlny. Jakmile napětí dosáhne vrcholu a začne klesat, kondenzátor se začne vybíjet do zátěže a tím vyhlazovat průběh výstupního napětí U_2 . Hlavní výhodou je výše zmíněný (skoro stabilizovaný) výsledný průběh, ale také menší potřebné dimenzování diod, jelikož jsou použity vždy 2 diody najednou.

1.3.3 Regulační prvek – tranzistor

Hlavním prvkem celého zapojení je tranzistor. Je zde využíván jako regulační prvek a je zapojen do série se zátěží. Jedná se o nejpoužívanější způsob, a to kvůli nejlepší stabilizaci. Nevýhodou v porovnání se spínanými zdroji je malá účinnost. [2]

Na kolektor tranzistoru přichází zmenšené, usměrněné a vyfiltrované napětí z usměrňovače. Tranzistor je ovládán výstupem z operačního zesilovače. Tento výstup je připojen na bázi regulačního prvku a ovládá jeho regulaci. Emitor tranzistoru je připojen na výstup celého zdroje.



Obrázek 8 Zpětnovazební stabilizátor se sériovou regulací [2]

1.3.4 Snímač napětí

Blok snímače napětí je paralelně připojen k výstupnímu napětí U_2 . Tento snímač je nejčastěji tvořen odporovým děličem, jehož střed je vyveden na záporný vstup operačního zesilovače.

1.3.5 Operační zesilovač

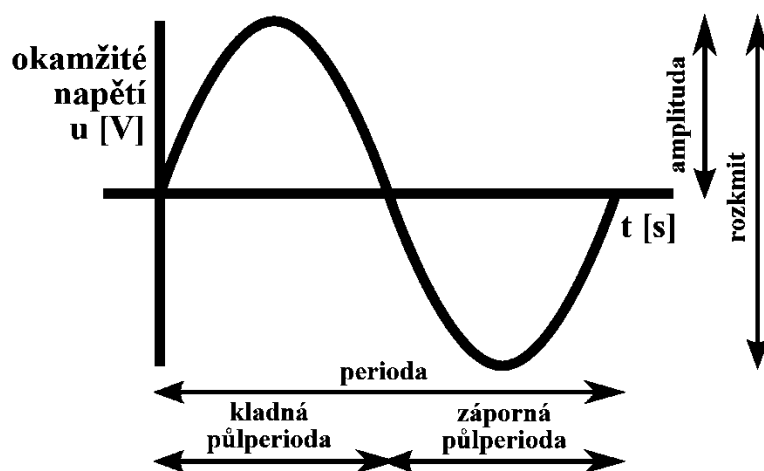
Operační zesilovač funguje na principu zesílení odchylky napětí. Do kladného pólu je zapojen zdroj referenčního napětí U_{ref} . Do záporného pólu snímač napětí U_2 . Odchylka mezi těmito zdroji se zesílí a je přivedena do regulačního prvku, který je nejčastěji tvořen tranzistorem. „Zapojení tranzistoru musí být takové, aby změna vnitřního odporu působila proti změně, která odchylku vyvolala.“ [2]

1.3.6 Zdroj referenčního napětí

Zdroj referenčního napětí musí být velmi stabilní, proto je nejčastěji tvořen parametrickým stabilizátorem a nemá na svém výstupu velký proud. Tedy v ideálním případě vstupní odpor OZ musí být nekonečný, resp. mít nulový vstupní proud. V reálném případě má vstup OZ velmi velkou impedanci, a proto je předpoklad velkého odporu splněn.

1.4 Střídavé zdroje napětí

Střídavý zdroj je takový zdroj, na jehož výstupních svorkách je měnící se polarita napětí, velikost a směr proudu. „Také je důležité v tomto případě hovořit i o frekvenci daného napětí.“ [6] „Frekvence f je definována jako počet opakování děje za daný časový úsek.“ [7] Perioda je doba jednoho zopakování.



Obrázek 9 Graf popisující vlastnosti střídavého (sinusového) napětí [8]

Např. v elektrické síti je frekvence 50 Hz a počet zopakování sinusového průběhu 50x za jednu vteřinu. Ze vztahu:

$$T = \frac{1}{f} \quad (6)$$

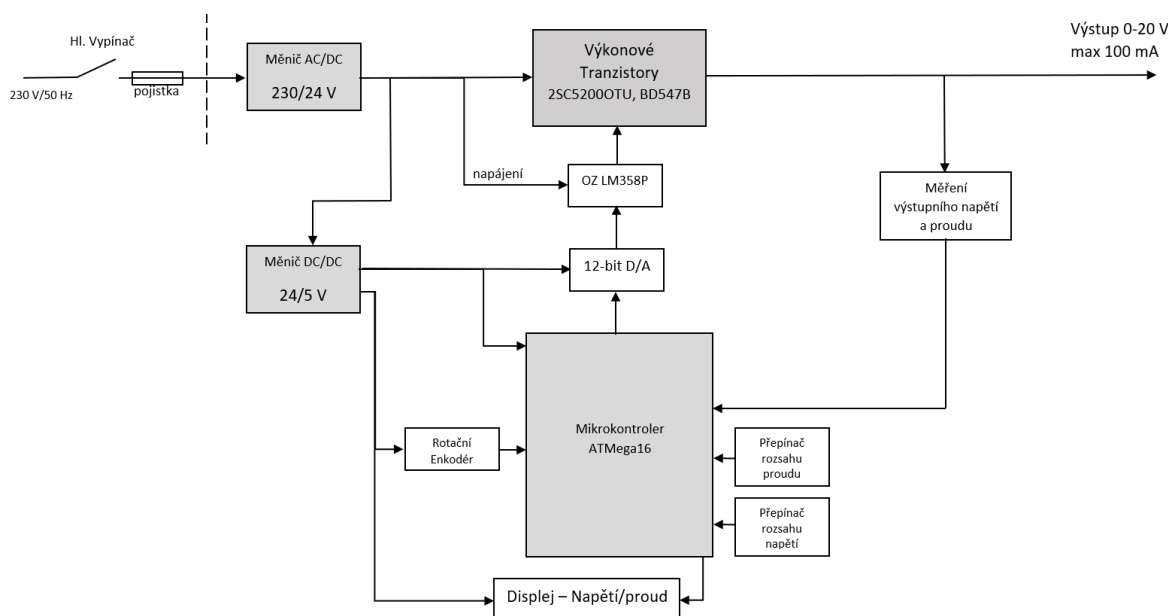
lze tedy spočítat, že jeden sinusový průběh proběhne jednou za 0,02 s. Střídavé zdroje ale nemají pouze sinusové napětí. Mohou mít též tzv. pilovité napětí, obdélníkový průběh apod. Důležité je, že se tyto děje opakují periodicky a nedějí se náhodně, popř. úmyslně. Střídavé zdroje mohou být též regulovatelné. Lze na nich měnit a upravovat výše zmíněné vlastnosti, tedy frekvenci (tím pádem i periodu) a amplitudu (tedy i rozkmít). Takové zdroje mají nejvíce využití v laboratořích, školách, vývojových centrech a v radiokomunikaci. Základní dva druhy střídavých zdrojů jsou:

- Generátor střídavého napětí – např.: regulovatelné laboratorní zdroje
- Pevné – např.: síťový transformátor (snížení na nižší napětí při stejné frekvenci)

2 Návrh dvojitého napájecího zdroje

Tato část se bude zabývat samotným návrhem stejnosměrného regulovatelné zdroje. Postup bude popsán v následující kapitolách, které jsou rozděleny podle samotných částí zdroje. Zdroj je sice dvojitý, ale jelikož jsou oba zdroje identické, je popisován návrh pouze jednoho, který ve výsledné fázi je vyroben dvakrát a vložen do celkové konstrukce. Jediný společný bod je síťový vypínač. Do tohoto konektoru je připojen z vnější strany přívodní síťový kabel s napětím 230 V/50 Hz.

V blokovém schématu jsou zobrazeny jednotlivé bloky. O napájecí celek se starají dva měniče. Hlavní větev je napájena z AC/DC měniče, který přeměňuje síťové napětí na napětí stejnosměrné o velikosti 24 V. Na tuto větev je připojen i pomocný napájecí zdroj, který toto napětí dále snižuje na 5 V, a napájí komponenty potřebující menší napětí.



Obrázek 10 Blokové schéma navrhovaného zdroje

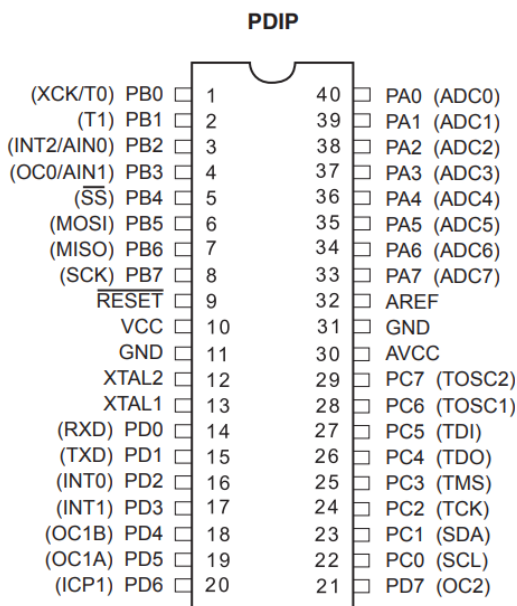
Hlavním řídicím prvkem je mikrokontrolér, který řídí veškerou logiku včetně regulace výstupního napětí. Hlavní tranzistor funguje na principu proměnného rezistoru. Změna odporu rezistoru vyvolá úbytek napětí a změni napětí na výstupu.

Požadované hodnoty jsou nastavovány uživatelem pomocí rotačního enkodéru. Nastavované a měřené výstupní hodnoty jsou zobrazovány na displeji. Mikrokontrolér řídí otevírání hlavního tranzistoru přes operační zesilovač a D/A převodník.

2.1 Mikroprocesor

K této práci byl vybrán mikrokontrolér od firmy Atmel řada AVR označovaná jako ATmega. Konkrétně ATmega16, která je založena na rozšířené architektuře AVR RISC. „Tím, že provádí výkonné instrukce v jediném hodinovém cyklu, dosahuje 1 MIPS na frekvenci 1 MHz.“ [9] To má za následek to, že si uživatel může optimalizovat spotřebu

procesoru a jeho rychlost. [10] Procesor má čtyři I/O registry každý o délce 8 bitů, tedy celkem 32 vstupně/výstupních portů a dalších 8 portů pro napájení, reset a pro další funkce. Dohromady má tedy procesor v pouzdře PDIP 40 vývodů.



Obrázek 11 Popis výstupních portů ATmega16 [10]



Obrázek 12 ATmega16 [11]

Stručný popis funkce jednotlivých vývodů:

Tabulka 1 Funkce jednotlivých vývodů mikrokontroléru [9]

Vývod	Funkce/Význam
RESET	Nulovací vstup
AIN0	Vstup analogového komparátoru (+)
AIN1	Vstup analogového komparátoru (-)
\overline{SS}	Slave Select kanálu SPI
MOSI	Master Out/Slave In kanál SPI
MISO	Master In/Slave Out kanál SPI
SCK	Hodinový signál kanálu SPI
RxD	Vstup USART
TxD	Výstup USART
XCK	Hodinový signál pro synchronní režim USART
INT0	Vstup vnějšího přerušení 0
INT1	Vstup vnějšího přerušení 1
INT2	Vstup vnějšího přerušení 2
T0	Hodinový vstup čítače/časovače 0

T1	Hodinový vstup čítače/časovače 1
OC0	Output Compare čítače/časovače 0
OC1A	Output Compare čítače/časovače 1 (Kanál A)
OC1B	Output Compare čítače/časovače 1 (Kanál B)
OC2	Output Compare čítače/časovače 2
ICP	Input capture čítače/časovače 1
TDI	Vstupní data JTAG rozhraní
TDO	Výstupní data JTAG rozhraní
TMS	Výběr režimu JTAG rozhraní
TCK	Hodinový signál JTAG rozhraní
SDA	Datový signál TWI(I ² C) rozhraní
SCL	Hodinový signál TWI(I ² C) rozhraní
ADC0 až 7	Kanály A/D převodníku

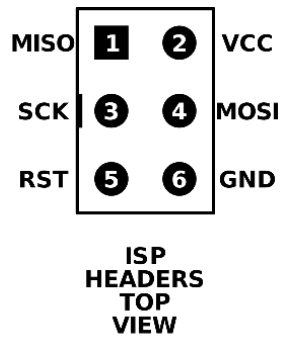
Další funkce procesoru jsou například 512-byte EEPROM, 1kByte internal SRAM, JTAG interface, 4 PWM kanály, 8 ADC převodníků, analogový on-chip komparátor, programovatelný watchdog a mnoho dalších.

Pro tuto bakalářskou práci jsou využity funkce pro ovládání periférií a ostatních potřebných částí zdroje. Displej je řízen přes sériovou sběrnici I²C pomocí signálu datového SDA a hodinového SCL. Pro převod měřených hodnot z výstupu jsou použity ADC převodníky. Pro enkodér jsou použity dva vývody pro externí přerušeni, kde je zvolena varianta kdy přerušeni reaguje na jakoukoliv změnu logické hodnoty. Pro SPI kanál jsou použity funkce MOSI, SCK a SS. Reset je zapojen na 5 V a nebude tedy použit. Mikrokontrolér je napájen napětím 5 V z pomocného DC/DC měniče.

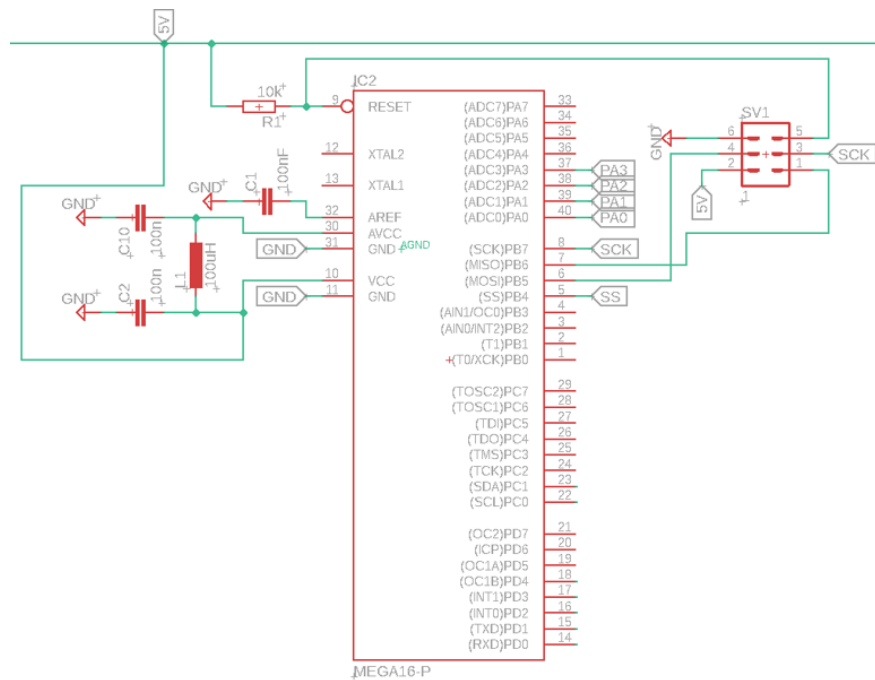
Další využití piny jsou AREF, jakožto analogová reference pro A/D převodníky. Pro ADC převodníky je zvoleno vnitřní referenční napětí 2,56 V a je potřeba připojit filtrační kondenzátor na pin AREF k potlačení šumu. RESET pin je na pevně připojen na signál +5 V, což způsobí permanentní zablokování funkce.

Dále je doporučováno připojit pin AVCC k pinu Vcc přes dolnoproustný LC filtr, který slouží k filtraci vyšších harmonických. Důležité je nespojovat signály GND na DPS ihned, ale rozděleně vést analogovou a digitální část, a spojit je až v jednom bodě, který bude blízko vstupních svorek (viz. kapitola 4). Frekvence samotného procesoru je pomocí CKSEL pojistek nastavena na vnitřní 8 MHz oscilátor se start-up time 6 CK + 64 ms.

Pro jednodušší programování byl na desku přidán MLW06G konektor, který má 6 pinů: MISO, VCC, SCK, MOSI, RST a GND. Na obrázku je vidět značka u signálu SCK. Ta značí to, kde má konektor bezpečnostní zámek z důvodu správného připojení.



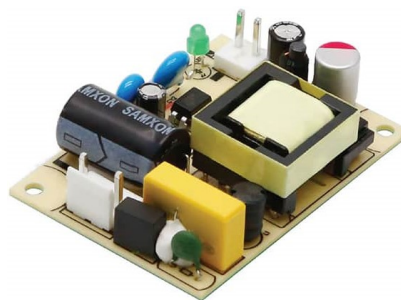
Obrázek 13 Signály šesti pinového konektoru MLW06G [12]



Obrázek 14 Schéma zapojení ATmega16

2.2 AC/DC měnič

Pro snížení ze síťového napětí na napětí menší byl použit AC/DC měnič od firmy MORNSUN. Měnič se vyrábí ve více provedení a pro tento zdroj byl vybrán s označením LO10-13B24. Zařízení se vyznačuje vysokou spolehlivostí a úsporností. Obsahuje také přepětovou a nadproudovou pojistku.



Obrázek 15 AC/DC měnič LO10-13B24 [13]

Základní vlastnosti vybraného AC/DC měniče

Tabulka 2 Vlastnosti AD/DC měniče LO10-113B24 [13]

Vstupní napětí	85-305 VAC
Výstupní napětí	24 V
Výstupní proud	450 mA
Výstupní výkon	10 W
Účinnost při 230V	81 %

2.3 Pomocný DC/DC zdroj

Pro napájení některých komponent na DPS je potřeba nižšího napětí než 24 V, které jsou v hlavní větvi zdroje. Základní požadavky na měnič jsou:

- Vstupní napětí 24 V
- Výstupní napětí 5 V
- Výstupní proud větší než 200 mA
- Montáž na DPS

Vstupní napětí 24 V je požadováno z důvodu, že výstupní napětí hlavního AC/DC měniče je 24 V. Výstupní napětí 5 V je standardní napájecí napětí velkého množství komponent a je vyhovující pro toto provedení. Nejdůležitější parametr je výstupní proud, který musí být dostatečně naddimenzován, aby dokázal napájet všechny komponenty připojené na jeho výstup. Tento proud je třeba vypočítat, a to tak, že sečteme maximální proudové odběry připojených součástek. Jmenovitě: mikrokontrolér, displej, D/A převodník a rotační enkodér. Největší odběr má displej, a to maximálních 100 mA. Zbytek komponent má odběry v řádech jednotek až nižších desítek miliampér, a proto maximální zatížení bude do 200 mA.

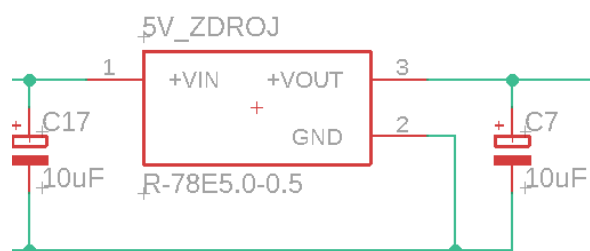


Obrázek 16 DC/DC měnič R-78E5.0-0.5 [14]

Všechny požadované hodnoty splňuje zdroj vyráběný společností RECOM s názvem R-78E5.0-0.5. Výhodou tohoto zdroje je jeho dostupnost, cena a rozměry. Vybraný zdroj je jednorázový a provedení montáže je THT. Funguje na stejnosměrném napětí, a lze ho jednoduše zapojit k výstupu AC/DC měniče. V datasheetu lze nalézt, že pro optimální fungování zdroje je potřeba na vstup a výstup připojit filtrační kondenzátory.

Tabulka 3 Vlastnosti DC/DC měniče [14]

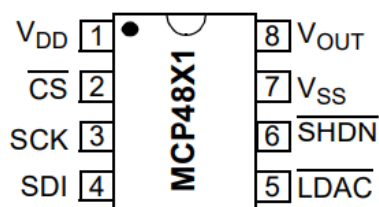
Vstupní napětí	7 až 28 V
Výstupní napětí	5 V
Výstupní proud	500 mA
Výstupní výkon	2,5 W



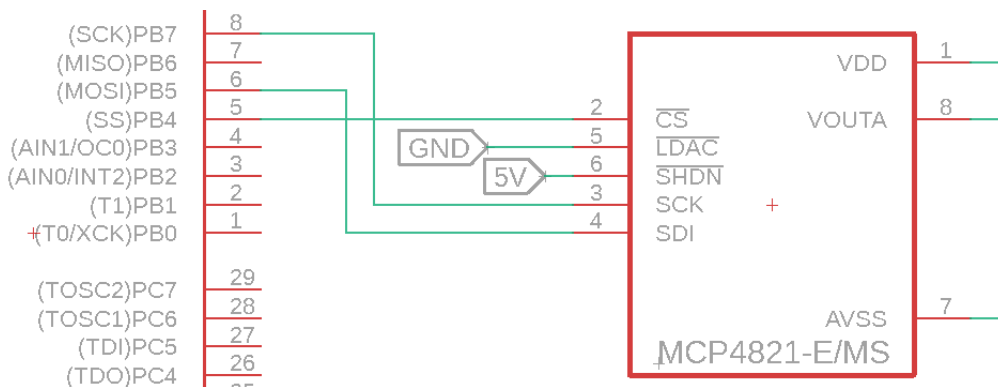
Obrázek 17 Schéma zapojení DC/DC měniče ve schématu

2.4 DAC převodník MCP4821

K převodu z digitální do analogové podoby je zde tzv. digitálně analogový convertor – DAC. Mikrokontrolér odesílá přes SPI sběrnici digitální signál. Ten nese informaci o požadovaném napětí, které je nastavováno pomocí rotačního enkodéru. Toto napětí je pomocí D/A převodníku převedeno na napětí analogové. Vybrán byl D/A převodník od firmy Microchip s názvem MCP4821. Rozlišení je 12ti bitové a disponuje pouze jedním kanálem. D/A převodník je napájen z pomocného DC/DC měniče napětím 5V a vnitřní referenční napětí je 2.048V.



Obrázek 18 Popis výstupních pinů DAC MCP4821 [15]



Obrázek 19 Schéma zapojení MCP4821

Propojení s mikrokontrolerem je přes SPI sběrnici pomocí pinů CS, SCK a SDI. Vývod VDD slouží k napájení. AVSS je připojen na signál GND. Vývod V_{OUTA} slouží jako výstup a je zapojen do kladného pólu operačního zesilovače. Vývod SHDN slouží jako hardware shutdown input. Tato funkce není použita a bude blokována připojením na 5V. LDAC při připojení na zem způsobí, že V_{OUT} je aktualizován s příchozími daty z mikrokontroléru. Změna je vyvolána náběžnou hranou na pinu CS.

REGISTER 5-1: WRITE COMMAND REGISTER FOR MCP4821 (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
0	—	$\overline{\text{GA}}$	$\overline{\text{SHDN}}$	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
bit 15								bit 0							

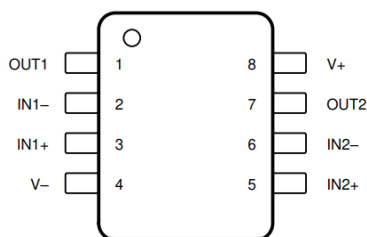
Obrázek 20 Popis jednotlivých bitů D/A převodníku [15]

- kde
- bit 15 – 0 = write to DAC register, 1 = ignore this command
 - bit 14 – don't care
 - bit 13 – output gain (1 = 1x; 0 = 2x)
 - bit 12 – shutdown (1 = active mode operation; 0 = shutdown the device)
 - bit 11-0 – data bits [15]

V tomto případě bylo zvoleno nastavení 0x01, tedy zápis do registru, zesílení 2x a vypnutý shutdown. Dále už se zde nacházejí datové bity a ty budou nastaveny uživatelem. Přesnější využití funkce je popsáno v kapitole 3 o funkcích v kódu.

2.5 Operační zesilovač

Operační zesilovač se nachází mezi D/A převodníkem a tranzistory. Slouží zde pro zesílení napětí, které posílá D/A převodník. OZ je dvoukanálový, ale využít je pouze jeden kanál. Vybrán byl OZ od firmy Texas Instruments jménem LM358P. Jeho hlavní důvody jsou dostupnost, cena a jednoduchost.

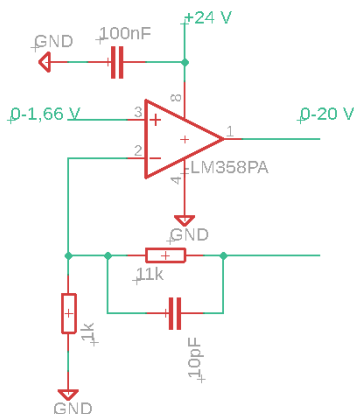


Obrázek 21 Popis výstupních pinů OZ LM358P [16]

Zesílení bude dáno poměrem rezistorů, které se zde zapojí v obecně známém zapojení „neinvertující napěťový zesilovač“. Tedy na invertující vstup bude zapojen napěťový dělič. Výpočet zesílení napětí je dán vztahem:

$$U_{výst} = U_{vst} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \quad (7) [4]$$

V tomto případě jsou rezistory $R_2=11\ 000\ \Omega$ a $R_1=1000\ \Omega$. Výsledek závorky je 12 a tedy vstupní napětí OZ se násobí koeficientem 12.



Obrázek 22 Schéma zapojení LM358P

Zbývající vývody operačního zesilovače je potřeba zapojit z důvodu možného kmitání. Vývody druhého kanálu jsou spojené následovně: IN2+ spojeno s V- a IN2- propojeno s V+.

2.6 Výkonový tranzistor

Hlavním prvkem celého zdroje je výkonový tranzistor 2SC5200OTU vyráběný firmou ONSEMI. Tranzistor je bipolární s polaritou NPN. K němu je do kaskády připojen tranzistor BD547B v tzv. darlingtonově zapojení. Takové zapojení slouží k získání velké hodnoty proudového zesilovacího činitele h_{21e} . Zapojení spočívá v připojení emitoru jednoho tranzistoru na bázi druhého. „Výsledný proudový zesilovací činitel je dán součinem dílčích zesilovacích činitelů h_{21e} .“ [17]

$$h_{21e} = h_{21e1} \cdot h_{21e2} \quad (8) [17]$$

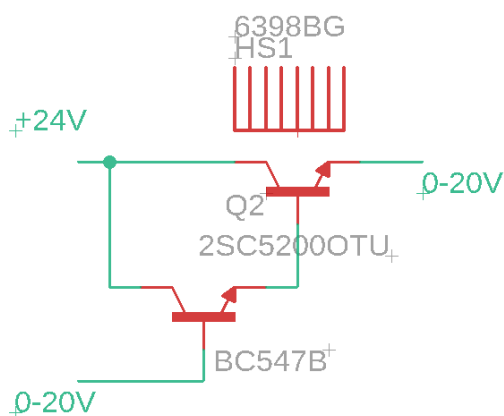
Tabulka 4 Vlastnosti tranzistoru 2SC5200OTU [18]

U_{CE}	250 V
U_{CB}	250 V
U_{BE}	5 V
I_C	17 A
I_B	1,5 A
P_D	150 W
Provozní teplota	-50 až +150 °C
h_{21e}	80
R_{ths}	0,83 °C/W

Druhý tranzistor v zapojení je bipolární tranzistor BC547B vyráběný firmou SEMTECH. Polarita je NPN a z důvodu malého proudového zatížení není potřeba tento tranzistor chladit.

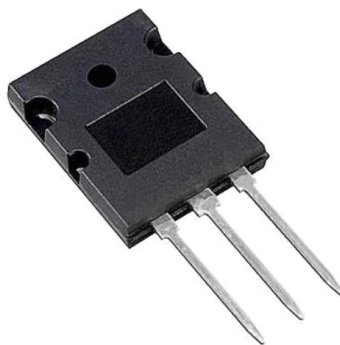
Tabulka 5 Vlastnosti tranzistoru BC547B [19]

U_{CE}	45 V
U_{CB}	50 V
U_{BE}	6 V
I_C	100 mA
P_D	500 mW
Provozní teplota	-65 až +150 °C
h_{21e}	200 až 450
R_{ths}	0,83 °C/W



Obrázek 23 Schéma zapojení tranzistorů (Darlingtonovo zapojení)

Ve schématu je vidět i chladič, který chladí tranzistor 2SC5200OTU, jelikož je proudově namáhán a je vyžadováno jeho chlazení.



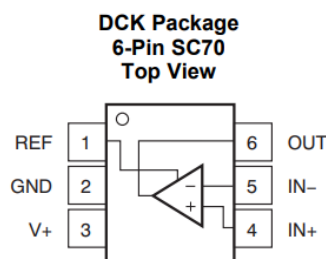
Obrázek 24 Výkonový tranzistor 2SC5200OTU [20]

2.7 Snímače proudu

K měření proudu, který teče zátěží, byly použity snímače proudu. Tyto snímače mají šest vývodů z toho dva slouží ke snímání úbytku napětí na rezistoru. Tento úbytek se zesílí předem daným koeficientem dle vnitřního zapojení operačního zesilovače. Proto se tyto snímače také mohou nazývat zesilovač směru proudu.

Rezistor, na kterém se měří úbytek napětí, nesmí mít velký odpor, jelikož by na něm vznikl velký úbytek napětí a zahřival by se. Rezistor je zapojen na hlavní větvi, kde prochází proud až o hodnotách 100 mA.

Pro tuto bakalářskou práci byli vybrány snímače od firmy Texas Instruments s označením INA211 a INA212. Jejich hlavní výhodou je velké zesílení, a proto mohou být použity rezistory s velmi nízkými hodnotami ohmů. Vyšší hodnoty rezistorů by způsobili vyšší úbytky napětí v hlavní větvi zdroje.



Obrázek 25 Popis výstupních pinů INA21x [21]

Tabulka 6 Vlastností snímače proudu INA21x [21]

Napájecí napětí	2,7-26 VAC
Provozní proud	100 μ A
Zesílení	500 V/V; 1000 V/V
Počet kanálů	1
Měřené napětí na rezistoru	-0,3 až 26 V

Důležité je, aby výsledné napětí, které přijde na A/D převodník, nebylo moc malé. A proto nejmenší možné napětí musí být větší než nejmenší vzorek napětí A/D převodníku. Měření proudu probíhá na obou snímačích zároveň a každý je pro jiné velikosti proudu, aby bylo možné měřit jak stovky mikroampér, tak i desítky miliampér. Vybrané rezistory jsou 0,05 Ω a 2,49 Ω . Rovnice pro výpočty úbytku napětí na rezistorech a zesílení snímačů:

$$U_{INA211} = (R_M \cdot I_Z) \cdot A_U = (0,05 \cdot 0,1) \cdot 500 = 2,5 \text{ V} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} U_{INA212} &= (R_M \cdot I_Z) \cdot A_U \\ U_{INA212} &= (2,49 \cdot 0,001) \cdot 1000 = 2,49 \text{ V} \end{aligned} \quad (10)$$

kde ΔU – je výsledné napětí na vývodu mikrokontroléru

R_M – je velikost měřeného rezistoru

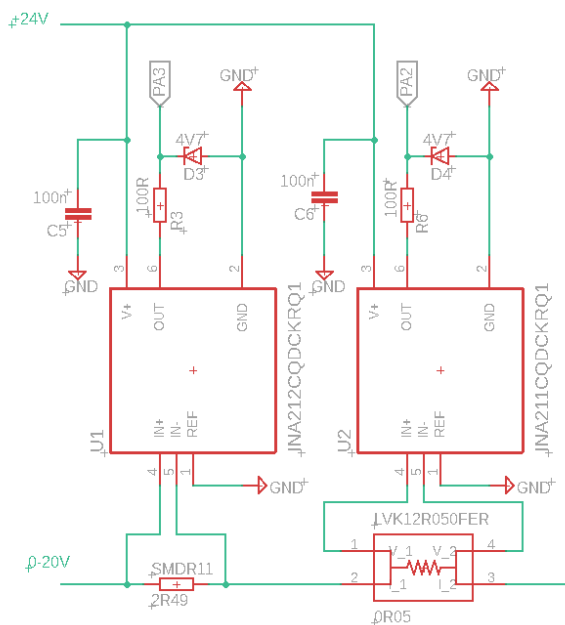
I_Z – je proud zátěže

A_U – je zesílení snímače napětí

Tabulka 7 Výsledné napětí z měřících snímačů proudu INA21x

$R_M[\Omega]$	$I_Z[A]$	A_U	$U_{PIN}[V]$
0,05	0,1	500	2,5
0,05	0,01	500	0,25
0,05	0,001	500	0,025
2,49	0,1	1000	Max
2,49	0,01	1000	Max
2,49	0,001	1000	2,49
2,49	0,0001	1000	0,249

Výsledek označován jako „max“ nese toto označení proto, protože při takovém proudu bude výsledek rovnice větší, než je maximální napětí snímače proudu INA212 a tedy na výstupu bude mít maximální možné napětí, které je v datasheetu udáváno jako napájecí napětí (24 V) plus 0,3 V.

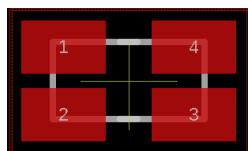


Obrázek 26 Schéma zapojení snímačů proudu INA21x

Snímače jsou napájeny 24 V ze vstupní svorky. Zde jsou doporučeny filtrační kondenzátory o velikost 10 až 100 nF. V této práci byl zvolen 100 nF. Výstupy jsou zapojeny na piny mikrokontroléru PA2 (ADC2) a PA3 (ADC3). Maximální napětí může být 24,3 V a z toho důvodu je zde zapojena Zenerova dioda pro ochranu mikrokontroléru. Rezistory R6

a R3 o velikosti 100 Ω jsou zde z důvodu omezení proudu. Vývod REF je zapojen dle datasheetu na signál GND.

Měřené rezistory R11 a LVK12 jsou zapojeny na vstupy IN+ a IN-. Rezistor LVK je určen přímo pro snímání proudu a je čtyř-terminálový. Má 4 plochy. Jeden pár (2-3) je pro průchod napětí a druhý (1-4) pro snímání proudu.



Obrázek 27 Zobrazení vývodů rezistoru LVK na DPS

2.8 Snímače napětí

Na výstupních svorkách je potřeba snímat napětí. Snímání probíhá přivedením signálu na A/D převodník mikrokontroléru, který signál převede a následně zobrazí na displeji. Každý pin mikrokontroléru ale snese maximálně 5 V. Při výrazně vyšším napětí dojde nenávratně k poškození, a proto je potřeba vývody chránit Zenerovou diodou. Pro tento případ byla vybrána dioda se zenerovým napětím 4,7 V. Při vyšším napětí se Zenerova dioda prorazí a přepětí je svedeno na zem. Pin mikrokontroléru je tedy dostatečně chráněn.

Měření napětí probíhá paralelně na dvou vstupech a uživatel si volí, jaký vstup chce zobrazovat na displeji. Jeden vstup je pro velké napětí 0-20 V a druhý pro menší 0-2 V.

V prvním případě je z důvodu vysokého napětí o velikosti 20 V připojen dělič napětí v poměru (děleno) 8,5. Tedy velikosti rezistorů jsou 7500 Ω a 1000 Ω . Při maximálním napětí bude napětí na A/D převodníku 2,35 V.

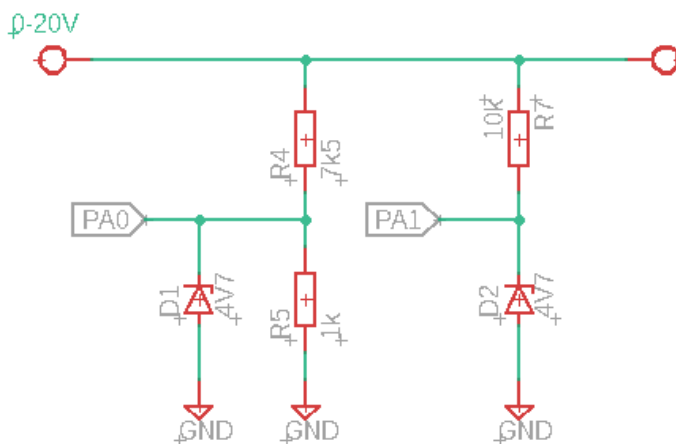
$$U_{PIN} = U_{Výst} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 20 \cdot \frac{1000}{1000 + 7500} = 2,35 V \quad (11)$$

Další důvod takového poměru je velikost referenčního napětí ATmega16. To je 2,56 V a měřené napětí musí být menší nebo rovno z důvodu, že při vyšším napětí, než je referenční, vykáže A/D převodník stejnou (maximální) hodnotu a to 4095.

$$ADC_{result} = \frac{V_{IN} * 4096}{V_{REF}} \quad (12) [10]$$

kde ADC_{result} – výsledek D/A převodu
 V_{REF} – referenční napětí mikrokontroléru 2,56 V
 4096 – počet vzorků 12-ti bitového měření
 V_{IN} – měřené (příchozí) napětí

V druhém případě je napětí měřeno napřímo bez jakéhokoliv děliče. Dle datasheetu zde musí být v cestě zapojen jeden 10 000 Ω rezistor, který chrání mikrokontrolér a stejně jako v prvním případě je zde Zenerova dioda se zenerovým napětím 4,7 V jako další ochrana před přepětím.



Obrázek 28 Schéma zapojení měřících děličů napětí

Tabulka 8 Výsledné napětí z měřících děličů napětí

U[V]	R ₁ [Ω]	R ₂ [Ω]	Dělicí koeficient	U _{PIN} [V]
20	1000	7500	8,5	2,35
15	1000	7500	8,5	1,76
10	1000	7500	8,5	1,18
5	1000	7500	8,5	0,59
2	1000	7500	8,5	0,24
1	1000	7500	8,5	0,12
20	-	-	1	4,7
15	-	-	1	4,7
10	-	-	1	4,7
5	-	-	1	4,7
2	-	-	1	2
1	-	-	1	1

Výsledky U_{PIN} jsou napětí, které budou měřeny na pinech samotného mikrokontroléru. Výsledky 4,7 V jsou v případě vyššího napětí, než je zenerovo napětí diody – 4,7 V.

2.9 Chladič

Hlavní tranzistor 2SC5200OTU je potřeba chladit, jelikož jeho zahřívání by mohlo měnit jeho vlastnosti, popř. měnit vlastnosti okolních komponent ve zdroji. V nejhorším případě by také mohlo dojít ke zničení. K chlazení tranzistoru byl vybrán pasivní chladič od

společnosti AAVID, jehož tepelný odpor je 4,4 C/W. Tranzistor bude napájen 24 volty a na výstupu bude mít 0-20 V. Je důležité spočítat ztrátový výkon na tranzistoru. Při situaci zkratovaného výstupu, resp. při nulovém napětí, vznikne na tranzistoru úbytek napětí 24 V.

$$P_z = (U_{vst} - U_{výst}) \cdot I = (24 - 0) \cdot 0,1 = 2,4 \text{ W} \quad (13)$$

Tepelný odpor se vypočítá tak, že sečteme všechny tepelné odpory tranzistoru, tzn. jeho částí a tepelný odpor chladiče. Tyto údaje najdeme v datasheetu tranzistoru a chladiče. Přejít mezi pouzdrem a chladičem je dán dle použité teplovodivé pasty.

Pro výpočet potřebného teplotního odporu R_{thr} je potřeba znát celkový tepelný odpor, který je vypočítán pomocí vzorce:

$$R_{th} = \frac{T_{MAX} - T_0}{P_z} = \frac{150 - 25}{2,4} = 52,08 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (14) [22]$$

Hodnoty lze vyčíst z datasheetu tranzistoru. T_{MAX} je maximální provozní teplota, T_0 je teplota pro optimální fungování a P_z je maximální ztrátový výkon tranzistoru. Následně ze vzorce vypočítáme potřebný tepelný odpor R_{thr} .

$$R_{thr} = R_{th} - R_{ths} - R_{thjc} \quad (15) [22]$$

$$R_{thr} = 52,08 - 0,5 - 0,83 = 50,75 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

kde R_{th} – celkový tepelný odpor

R_{thjc} – tepelný odpor polovodič – pouzdro

R_{ths} – tepelný odpor pouzdro – chladič

R_{thr} – tepelný odpor chladič – okolí

Výsledek 52,08 je poměrně vysoký kvůli nízkému maximálnímu proudu, který protéká zátěží. Výsledek ztrátového výkonu je potom nízký. Výsledek je ve jmenovateli celkového tepelného odporu. Kvůli vysokým provozním teplotám je pak výsledek takto vysoký.

Tyto výsledky nám dávají velkou volnost při výběru chladiče, protože je potřeba zvolit takový chladič, aby měl nižší tepelný odpor, než je 50,75 °C/W. To splňuje vybraný chladič 6398BG, který má tepelný odpor 4,4 C/W. Pokusným měřením bylo následně otestováno, zdali byl chladič vybrán správně a zdali uchladí tranzistor v delším časovém horizontu.

2.10 Periferie

Ke komunikaci s uživatelem a ovládání zdroje jsou použity tyto komponenty:

- LCD displej 16x2
- Enkodér se středovým tlačítkem
- Tlačítka ON-OFF

2.10.1 Displej

K zobrazování měřeného napětí a proudu byl vybrán modrý LCD displej s bílým podsvícením, který je řízený přes I²C sběrnici. Na něm bude zobrazována nastavovaná hodnota, a to jen ve chvíli otáčení enkodérem. Po určitém časovém úseku je displej nastaven zpět k zobrazování měřených hodnot na výstupních svorkách. Displej je propojen s deskou pomocí čtyř vodičů zakončené konektory JST se západkou. Dva vodiče slouží jako napájení a uzemnění. Zbylé dva jsou datové SDA a hodinové SCL, které jsou spojené s PC0(SCL) a PC1(SDA).

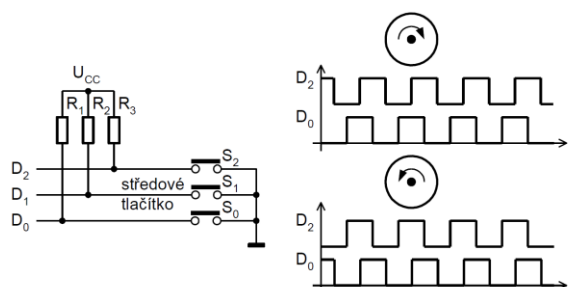


Obrázek 29 LCD displej 16x2

2.10.2 Enkodér

Enkodér v této práci slouží k nastavování velikosti hodnoty napětí. Enkodér má hlavní výhodu v nekonečném množství otočení a uživatel tedy není nijak omezen. Pracuje na principu přeměny energie mechanické na energii elektrickou, resp. na elektrické signály. „Spínače S₀ a S₂ jsou umístěny po obvodu ovládacího kolečka ve vzájemné úhlové vzdálenosti 90°. Tím je zaručeno, že při otáčení kolečkem existuje fáze, ve které se sepnutí obou spínačů překrývá. Jedině tak lze jednoznačně indikovat směr otáčení. Obsluha rotačního spínače tedy spočívá v tom, že nejdříve se sejme 1. vzorek stavu bitů a po krátké prodlevě se sejme 2. vzorek. Vzájemným porovnáním lze určit odpovídající směr otáčení.“ [23] Středové tlačítko enkodéru funguje na stejném principu jako klasické tlačítko. Při sepnutí dojde u signálu D₁ ke sražení k zemi.

Rezistory R₁, R₂ a R₃ jsou tzv. pull-up rezistory, které zdvihají napětí směrem k napájecímu napětí. Při odpojení tlačítek S₀, S₁ a S₂ jsou signály D₂, D₁ a D₀ rovny napájecímu napětí 5V.



Obrázek 30 Příklad připojení rotačního enkodéru se středovým tlačítkem [23]

V této bakalářské práci byl vybrán enkodér, který je dodáván na DPS se zabudovaným RC článkem k potlačení kmitání. Hlavní výhodou je cena, dostupnost a výše

zmíněný RC článek. RC článek ale nefungoval spolehlivě, a proto na DPS byly přidány další RC články. Názvy signálů se nepatrně liší od obrázku. Směr rotace určují S1 a S2 a středové tlačítko se nazývá KEY.

Tabulka 9 Vlastnosti enkodéru [24]

Napájení	5 V
Pulzů na otáčku	20
Výstupní piny	S1, S2, KEY, 5V a GND
Středové tlačítko	ANO
Životnost	30 000 cyklů



Obrázek 31 Enkodér s RC článkem

2.10.3 Tlačítka

Tlačítko je základní součást všech zařízení. Funguje jako vypínač nebo přepínač elektrických okruhů. U tohoto zdroje má funkci změny rozsahů měření. Pokud si uživatel bude chtít napětí zobrazit v milivoltech místo ve voltech, anebo proud v mikroampérech místo miliampérech, tak má možnost. Vybrané tlačítka jsou jednopólové ON-OFF. Jmenovité napětí 250 V a jmenovitý proud 1 A. Tyto hodnoty jsou vysoké, ale tlačítko plní jednoduchou funkci, a to spínání vůči zemi. Tlačítko bylo vybráno kvůli přívětivé ceně, velikosti, designu a jednoduché montáži, jelikož má vhodný závit, díky kterému ho lze snadno namontovat na konstrukci.



Obrázek 32 Tlačítko ON-OFF

3 Firmware zdroje a popis funkcí

Tato část popisuje použitý firmware, který ovládá veškerou logiku ve zdroji. Každá podkapitola popisuje jednotlivé funkce. Celý kód je potom nahrán do mikrokontroleru ATmega16 pomocí programátoru ATATMEL-ICE-BASIC přes SPI sběrnici. Samotný zdrojový kód je napsán v jazyce C pomocí programu Microchip Studio (dříve Atmel Studio) vyvíjené stejnojmennou společností Microchip Technology.

3.1 Funkce ADC_read

Funkce ADC_read má na starost převádění signálu z analogové do digitální podoby, které přicházejí z měřících obvodů na výstupu zdroje. Parametrem funkce je proměnná ADCx, která určí, jaký ADC kanál bude využit. To určují – if podmínky, které jsou v kódu čtyři. Na výběr je z ADC0 až ADC3 na vývodech PA0 až PA3. Druhá část funkce je pro samotný převod. Pomocí bitu ADSC je převod spuštěn. Cyklus while, který čeká na převod je řízen bitem ADIF z registru ADCSRA. Následně funkce return vrátí hodnotu z A/D převodníku.

```
int ADC_read (uint8_t ADCx) {
    ADMUX &= ~(1<<MUX1)|(1<<MUX0);           //nulování registrů MUX1 a MUX0
    if (ADCx == 0) {
        ADMUX &= (~1<<MUX0);                 //Nastavení ADC0
    }
    else if(ADCx == 1){
        ADMUX |= (1<<MUX0);                  //Nastavení ADC1
    }
    else if(ADCx == 2){
        ADMUX |= (1<<MUX1);                  //Nastavení ADC2
    }
    else if(ADCx == 3){
        ADMUX |= (1<<MUX1)|(1<<MUX0);        //Nastavení ADC3
    }

    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    while(!(ADCSRA & (1<<ADIF)));
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return(ADC);
}
```

3.2 Funkce bit10_bit12

Funkce bit10_bit12 slouží k převodu, resp. měření 12-ti bitového čísla pomocí 10-ti bitového A/D převodníku. Měření 12-ti bity je potřeba z důvodu vyššího rozlišení, a to 2^{12} vzorků, tedy 4096. Vzorec pro výpočet napěťového rozlišení:

$$U_{MAX} = \frac{U_{REF}}{2^n} = \frac{2,56}{2^{12}} = 0,625 \text{ mV} \quad (16)$$

kde U_{REF} – referenční napětí mikrokontroléru
 U_{MAX} – maximální napětí na výstupních svorkách
 2^n – počet vzorků 12-ti bitového měření

Princip změření 12-ti bitového čísla spočívá v opakování měření. Pomocí 10-ti bitového převodníku je napětí změřeno 16-krát a výsledky sečteny. Na konci je celý součet

posunut o 2 bity doprava, jinými slovy – vydělený čtyřmi. Výsledné číslo bude mít rozsah 12 bitů.

```
float bit10_bit12(uint8_t ADCx)
{
    uint16_t l = 0;
    for(uint8_t n = 0; n < 16; n++)
    {
        l += (ADC_read(ADCx));
    }
    return(l/4.0);
}
```

Základním kamenem funkce je for cyklus, který provádí výše zmíněné měření 16-krát. Všechny měření jsou průběžně přičítána k sobě a funkce return vrátí číslo vydělené čtyřmi. V parametru je stejná proměnná jako u funkce ADC_read, jelikož je zde funkce použita a ADCx udává, jaký A/D převodník chceme využít.

3.3 Funkce cti_tlacitka

Tato funkce má na starost čtení polohy tlačítek. Porty PD0 a PD1 mají zapnuté pull-up rezistory a jsou nastaveny jako vstup. Tlačítka mají dvě polohy a spínají vůči svorce, na kterou je připojen signál GND. Tedy při „zapnutí“ je vývod sražen k zemi a je splněna podmínka if. Naopak při rozepnutí je vývod pomocí pull-up rezistoru „vytažen“ na napájecí napětí 5 V neboli signál je jiný než 0. Proměnné x a y jsou čteny v hlavní funkci a v přerušení, kde rozhodují, zdali bude zobrazované měřené napětí ve voltech nebo milivoltech, a jestli proud bude zobrazován v miliampérech nebo mikroampérech.

```
void cti_tlacitka()
{
    if((PIND&(1<<DDD0)) == 0){           //PD0 napětí
        y = 0;}
    else
    {y = 1;}
    if((PIND&(1<<DDD1)) == 0){           //PD1 proud
        x = 0;}
    else
    {x = 1;}
}
```

3.4 Funkce pro odesílání dat na DAC

Řízení celého zdroje probíhá pomocí rotačního enkodéru, kterým uživatel nastavuje výstupní napětí. Nastavená hodnota je odesílána na D/A převodník přes SPI sběrnici. Pro zpřehlednění a jednoduchost byly vybrány knihovny z webu GitHub od autora Köhler Michael. [25] Knihovna byla napsána přímo pro použití na D/A převodníky s označením 4822/4821 v kombinaci s AVR mikrokontroléry. Je tedy plně kompatibilní a vyžaduje pouze změnu v používaných portech. V tomto případě PB4, PB5 a PB7. Z knihovny jsou použity pouze dvě funkce, ve kterých jsou nastaveny požadované parametry. Zbytek je již řízen pomocí samotných funkcí.

První funkce je `mcpDACInit()` a nachází se v `main(void)`. Slouží k inicializaci funkce. Jako parametry jsou zadávány porty, na kterých se nachází slave select SPI sériové sběrnice. V tomto případě na pinu PB4.

```
mcpDACInit(&PORTB,&DDRB,PINB4);
```

Druhá využitá funkce je `setMCPDAC()` a nachází se na čtyřech místech. První je v `main()`, kde slouží jako prvotní odeslání informace na D/A převodník a nastavení výstupního napětí na hodnotu proměnné `q`, která je defaultně nastavena na 0 V. Druhé místo je proudová pojistka, která bude popsána v další kapitole. Třetí umístění je ve funkci `if`, která slouží pro zobrazení nastavovaných hodnot enkodérem. Čtvrté místo je v podmínce `if`, která obstarává zmenšení napětí při změně tlačítka, které upravuje měřicí rozsah napětí na 0-2 V.

```
setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
```

Parametry funkce jsou porty, kde se nachází slave select. Číslo 12 určuje rozlišení D/A převodníku, tedy 12 bitů. Hodnota `q` je hodnota, která se převádí do analogové podoby, a je odesílána na operační zesilovač. Z důvodu následného zesílení operačním zesilovačem je potřeba `q` podělit jeho zesílením OZ, a to číslem 12. Funkce je napsána pro jednotky napětí v milivoltech a je potřeba ji vynásobit číslem 1000. Dále je zde nastavení kanálu, zesílení a shutdown. Kanál je vybrán první, zesílení 2x a shutdown je vypnut.

3.5 Smyčka `while(1)`

V `main()` funkci se nachází základní nastavení registrů, inicializace LCD, nastavení output compare módu, inicializace A/D převodníku a funkce na odesílání dat na D/A převodník. Tato část popíše smyčku `while`, která je rozdělena na 3 části. První je softwarová proudová pojistka, která je popsána v poslední kapitole části 3. Druhá část obsahuje dvě podmínky `if` dle toho, zdali je proměnná `counter` větší nebo rovna nule. Poslední část čte, zdali proběhla změna na tlačítku, které ovládá změnu rozsahu měření napětí.

Při změně tlačítka, které mění rozsah měření je třeba změnit měřicí rozsah z 0-20 V na 0-2 V a je třeba ošetřit případ, že by bylo nastaveno napětí 20 V a byl přepnut měřicí rozsah. V tomto případě by zůstalo nastaveno 20 V ale rozsah maximálně 2 V a proto je potřeba snížit napětí na 2 V. Pokud ale dojde ke změně tlačítka ve stavu, kdy je napětí menší než 2 V, dojde ke změně měřicího rozsahu, ale nastavené napětí zůstane stejné.

Další část má dva stavy. V prvním případě je `counter` větší jak nula, jelikož v obsluze přerušení enkodéru byla přepsána na hodnotu 50. V tomto případě se pro uživatele na LCD displeji zobrazí „CILOVA HODNOTA: “ a na druhém řádku si uživatel nastavuje požadovanou výstupní hodnotu. Hodnota je poté pomocí funkce `setMCPDAC` posílána na D/A převodník.

Nastavování hodnoty je potřeba zobrazit na určitou dobu, což bylo realizováno způsobem odečtu hodnoty proměnné `counter` o jedna a vložení funkce `_delay_ms(10)`. To zapříčiní, že funkce je provedena 50-krát a jednotlivé projití funkce je zpožděno o 10 ms.

Dohromady by měla být zobrazena nastavovaná hodnota 500 ms. Jelikož ale další úkony ve funkci, obzvlášť tisk hodnot na displej, způsobí další zdržení, je zobrazení delší, a to přibližně 2,25 až 2,5 vteřiny. Takový čas je dostatečně pomalý pro reakci člověka a zároveň dostatečně rychlý, aby nezdržoval užívání zdroje. Po 2,5 vteřinách se přepne zpět na měření výstupních hodnot, které jsou již nastaveny dle požadavku. Pro zobrazení na LCD displej byly využity knihovny „Liquid Crystal I2C library for AVR“ [26] a též byly využity knihovny pro komunikaci přes I²C s názvem „I2C AVR.“ [27]

```
if(counter > 0)
{
    radek0; sprintf(text, "CILOVA HODNOTA: ");
    lq_print(&device, text);
    radek1; sprintf(text, "%6.3f V          ", q);
    lq_print(&device, text);
    counter--;
    _delay_ms(10);
    setMCPDAC(&PORTB, PINB4, 12, ((q/12)*1000), 1, 2, 0); //odeslání dat na DAC
}

```

Mezi těmito dvěma if funkcemi je vložena funkce cti_tlacitka, aby při každé změně stavu tlačítka byl změněn rozsah měření. `cti_tlacitka()`;

Druhá část je pro situaci, kdy nebylo otočeno enkodérem, a tedy proměnná „counter“ je rovna nule. If je rozdělen na dalších 5 případy, kde podmínky jsou dle polohy tlačítek rozsahů. V tomto případě funkce vypisuje změřené hodnoty pomocí A/D převodníků na mikrokontroléru. K tomu byla využita funkce bit10_bit12 na daném A/D převodníku. Tyto hodnoty jsou násobeny, popřípadě vyděleny koeficienty tak, aby výsledné hodnoty odpovídaly hodnotám měření.

V případě napětí jsou vzorky vynásobeny číslem $6,25 \cdot 10^{-4}$ a číslem 8,5 z důvodu, že měření probíhá na děliči o dělení napětí 8,5, a je tedy potřeba zobrazit číslo o 8,5krát vyšší hodnotě. Druhé měření dělič na vstupu nemá a je zde pouze koeficient $6,25 \cdot 10^{-4}$ a musíme násobit číslem 1000, jelikož je rozsah v milivoltech.

```
if(counter == 0)
{
    if(y == 1)
    {radek0; sprintf(text, "NAPETI: %5.2f V ", bit10_bit12(0)*0.000625*8.5*1.028);
    lq_print(&device, text);}
    if(y == 0)
    {radek0; sprintf(text, "NAPETI: %4.0f mV ", bit10_bit12(1)*0.000625*1000*1.023);
    lq_print(&device, text);}
    if(x == 1)
    {radek1; sprintf(text, "PROUD: %3.0f mA ", bit10_bit12(2)/40);
    lq_print(&device, text);}
    if((bit10_bit12(3)/3.984) > 1000 && x == 0)
    {radek1; sprintf(text, "PROUD: MAX ");
    lq_print(&device, text);}
    else if((bit10_bit12(3)/3.984) <= 1000 && x == 0)
    {radek1; sprintf(text, "PROUD: %4.0f uA ", bit10_bit12(3)/3.984);
    lq_print(&device, text);}
    _delay_ms(100);
}

```

Měření proudu v rozsahu 0-1 mA v jednotkách mikro ampér je zde řešeno podmínkou if a else if, jelikož je potřeba ošetřit případ, že proud bude mimo měřící rozsah. V tom případě že se vypíše MAX a uživatel tak dostane informaci k přepnutí na vyšší rozsah proudu.

Výpočet koeficientu $6,25 \cdot 10^{-4}$:

$$K = \frac{V_{REF}}{4096} = \frac{2,56}{4096} = 6,25 \cdot 10^{-4} \quad (17)$$

Pro proud jsou použity koeficienty 40 a 3,984. Mají stejný důvod jako u napětí, a to zobrazit příslušné hodnoty na displeji ve správných jednotkách.

$$K_2 = \left[\frac{\frac{V_{IN} \cdot 4096}{V_{REF}}}{I_Z} \right] = \left[\frac{\frac{2,5 \cdot 4096}{2,56}}{100} \right] = \frac{4000}{100} = 40 \quad (18)$$

$$K_1 = \left[\frac{\frac{V_{IN} \cdot 4096}{V_{REF}}}{I_Z} \right] = \left[\frac{\frac{2,49 \cdot 4096}{2,56}}{1000} \right] = \frac{3984}{1000} = 3,984 \quad (19)$$

kde K – koeficient

V_{REF} – referenční napětí mikrokontroléru 2,56 V

4096 – počet vzorků 12-ti bitového měření

V_{IN} – měřené (příchozí) napětí

I_Z – měřený proud [mA nebo μ A]

Koeficient 40 a 3,984 je číslo, které dělí výsledek 12-ti bitového měření, a výsledek celého příkladu je počet mA, popř. μ A, které tečou do zátěže. Koeficienty jsou spočítány tak, aby se vyhnulo dalším násobením a dělením. Další příklady (výpočtu) proudů obsahuje následující tabulka:

Tabulka 10 Výpočet koeficientů pro různý proud pro měření proudu

R[Ω]	I[A]	Zesílení snímače	U_{out} [V]	Vzorky	Koeficient	Výsledný proud
0,05	0,1	500	2,5	4000	40	100 mA
0,05	0,01	500	0,25	400	40	10 mA
0,05	0,001	500	0,025	40	40	1 mA
2,49	0,1	1000	24,3	max	-	-
2,49	0,01	1000	24,3	max	-	-
2,49	0,001	1000	2,49	3984	3,984	1000 μ A

2,49	0,0001	1000	0,249	398,4	3,984	100 μ A
2,49	0,00001	1000	0,0249	39,84	3,984	10 μ A

Z důvodu nepřesnosti měření na napěťových děličích, které mají výrobní toleranci a z důvodu jiného referenčního napětí bylo výstupní napětí změřeno velmi přesným stolním multimetrem AX-8455 od firmy AXIOMET a byla vypočítaná chyba měření. Ta se pohybovala v nízkých jednotkách procent. Ze všech změřených chyb byl vytvořen průměr chyby měření a tento průměr byl vložen do kódu pro zpřesnění měření. Pro zdroj 1 to je 1.028 (rozsah 0-20V) a 1.023 (rozsah 0-2 V). Pro druhý zdroj to je 0.97 pro oba rozsahy.

3.6 Přerušování ISR

Pro obsluhu rotačního enkodéru a jeho středového tlačítka je využito přerušování. Pro rotaci (signály S1 a S2) je využito přerušování INT1 a pro středové tlačítko (KEY) INT0.

Obsluha přerušování pro INT1 obsahuje podmínky if, které čtou pořadí a směr otáčení rotačního enkodéru. Po zjištění směru je zde vložen příklad pro přičítání, popř. odčítání hodnoty q. Pro minimální a maximální hranice zmenšení a zvětšení napětí jsou zde funkce if. První zajišťuje, aby nastavovaná hodnota nešla pod hodnotu nula a druhá je pro omezení ze shora na úrovni 20 V.

```
if(q>20)q=20; popř.: if(q<0)q=0;
```

Též se zde nachází if podmínka, která způsobí to, že pokud je přepnuto tlačítko napěťového rozsahu na 0-2 V tak nelze nastavit vyšší hodnota než 2 V. Působí zde jako ochrana, aby nešlo nastavit vyšší napětí, než je napěťový rozsah.

Důležitý je také řádek, který přepisuje hodnotu proměnné counter na 50. To způsobí splnění podmínky if v hlavní smyčce a na 500 ms (resp. 2,25 s) bude zobrazeno požadované výstupní napětí.

```
counter = 50;
```

Druhá obsluha přerušování INT0 čte středové tlačítko a umožňuje nastavit uživateli rychlost snižování/zvyšování hodnoty q, která je odesílána na D/A převodník a nastavuje výstupní napětí celého zdroje. To je řešeno pomocí příkazu switch, který má tři možnosti(case) 0, 1 a 2. Každý case má v sobě definici proměnné z. Ta se následně přičítá nebo odčítá k hodnotě q v předchozím přerušování (INT1). Kroky jsou dle zadání 5, 50 a 500 mV.

```
krok++;
if(krok>2)krok=0;
switch(krok)
{
    case 0:    z = 0.005;    break;
    case 1:    z = 0.05;    break;
    case 2:    z = 0.5;     break;
}
```

3.7 Proudová pojistka

Napájecí zdroj má omezený výstupní proud na 100 mA. Omezení lze vyřešit mnoha způsoby jako např. pomocí funkce nebo ochranných komponent ve fyzickém zapojení na DPS. Zde byl vybrán způsob omezení pomocí funkce ve smyčce `while(1)` z důvodu jednoduchosti, rychlosti ochrany a úspore materiálu.

Funkce pracuje na jednoduchém principu. Je použit cyklus `while()`, kdy podmínka je, zdali je měřený proud na snímačích větší než 100 mA. Při splnění podmínky je hodnota `q` zmenšena o 0,5 V. Dále je zde podmínka `if`, aby `q` nenabývalo záporné hodnoty. Poté je zmenšená hodnota `q` odeslána na D/A převodník. Pokud bude proud stále překračovat hodnotu proudu 100 mA, tak bude cyklus opakován, dokud zmenšené napětí nebude dostatečně sníženo pro nesplnění podmínky a opuštění cyklu.

Pro varování uživatele o vysokém proudu je zde řádek pro nastavení pinu PD5 jako výstup, a to zapříčiní varovné blikání červené LED diody. Světelné varování nesmí zdržovat provoz proudové pojistky, a proto je provedeno pomocí `output compare` výstupu čítače/časovače OC1A. Vypnutí LED diody je provedeno po vyskočení ze smyčky a to tak, že vývod PD5 nastavíme jako vstup.

```
while(((bit10_bit12(2)/40)) > 100)
{
    DDRD = (1<<PD5);
    q = q - 0.5; //odečtení 0.5V
    if(q<0)q=0;
    setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
}
DDRD = (0<<PD5);
```

Měření probíhá na pinu PA2 s ADC2 převodníkem. Měření je prováděno funkcí `bit10_bit12()` a výsledek je dělen koeficientem 40. Výpočet koeficientu je v kapitole popisující smyčku `while`.

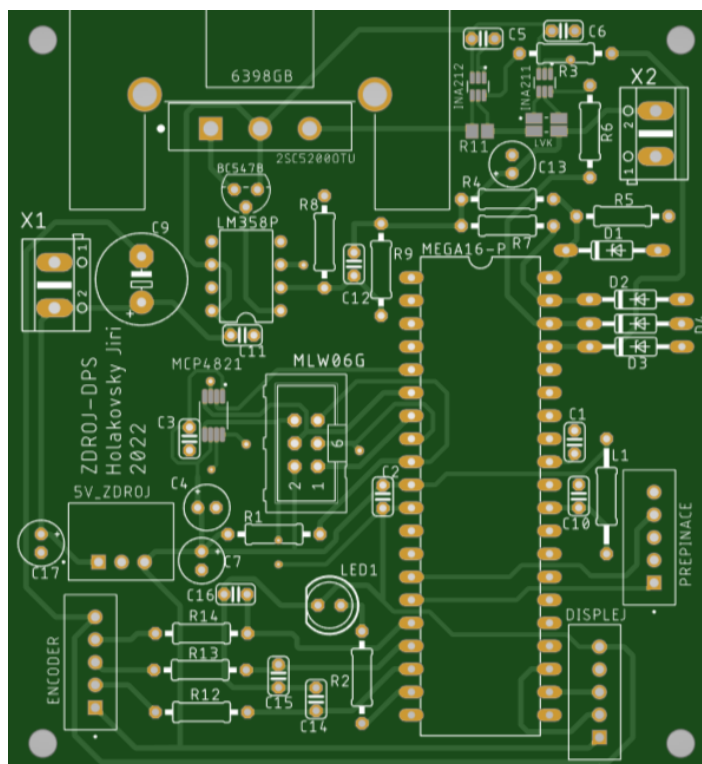
4 DPS a konstrukce zdroje

Schéma celého zdroje bylo kresleno v programu EAGLE vydávané společností CadSoft Computer. Software umožňuje nakreslit schéma a poté ho přepnout na kreslení DPS. Výsledná podoba desky byla vyrobena firmou JLCPCB. Výhodou je rychlé doručení a možnost výroby až 6ti vrstevých desek. V tomto návrhu byla použita pouze horní a spodní vrstva.

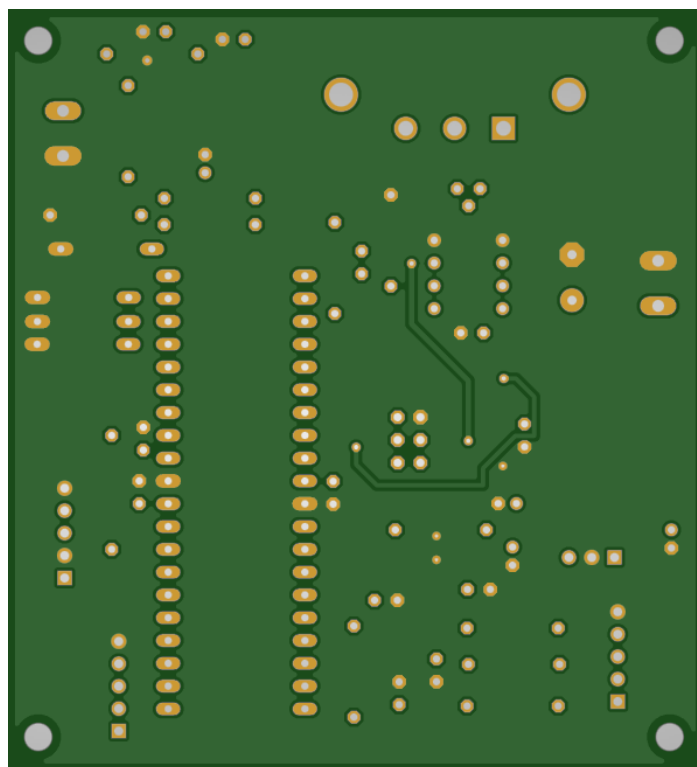
4.1 DPS

V tomto případě je důležité při návrhu DPS oddělené vedení digitální a analogové země z důvodu vzájemného ovlivňování. Toto bylo vyřešeno tak, že pro návrh byly přejmenovány jednotlivé GND signály součástek dle potřeby na AGND nebo DGND. Signál AGND byl „rozlit“ na spodní straně desky plošného spoje pomocí funkce polygon. To zapříčiní, že deska bude odstíněná/odrušená proti vyšším frekvencím. Signál DGND je veden odděleně na horní straně. Signály GND je nutné spojit v jednom bodě, který bude blízko vstupních svorek a zároveň zde bude připojený filtrační kondenzátor. Takový bod je na záporném vývodu kondenzátoru C9 o kapacitě 220 μF . Poměrně vysoká kapacita zapříčiní dostatečnou filtraci a potlačí možné nežádoucí jevy.

Signál DGND byl před spojením na C9 přejmenován na AGND, aby program dovolil vzájemné propojení. A proto na DPS v konečné fázi je pouze jeden zemnicí signál – AGND. Rozměry DPS jsou 78x85 mm a v rozích byly vytvořeny díry o průměru 3 mm pro přimontování ke konstrukci.



Obrázek 33 Deska plošných spojů – horní vrstva



Obrázek 34 Deska plošných spojů – spodní vrstva



Obrázek 35 Osazená deska plošných spojů (bez připojených vodičů)

Kondenzátor C12 o velikosti 10 pF je zde pro případ, že by operační zesilovač kmital. Po oživení ale OZ nekmitá, a tedy nebude nutné ho připojovat. Tři konektory a LED jsou vyvedeny pomocí vodičů k perifériím přimontované na přední stěně zdroje.

4.2 Konstrukce zdroje

Konstrukce samotného zdroje je tvořena ze dvou „u“ profilů a dále přední a zadní stěnou. Celá konstrukce je spojena pomocí čtyř vrutů. Podstava musí být dostatečně velká, jelikož do ní přijdou dva měniče napětí a dvě nakreslené desky. Dostatečné parametry splňuje plastová konstrukce KP14. Její rozměry jsou 237x92x218 mm. Další její výhody jsou dostupnost a cena.



Obrázek 36 Rozložená konstrukce zdroje

Na obrázku lze vidět plastovou konstrukci rozloženou na díly. Výhodou jsou již vytvořené větrací otvory, které pomáhají lepšímu chlazení zdroje. Dle potřeby byly vytvořeny otvory pro periferie, kterými je zdroj ovládán. Jmenovitě to jsou dva enkodéry, dva displeje, 4 tlačítka pro změny rozsahů měřících hodnot, výstupní svorky a červená LED pro varování uživatele v případě nadproudu. Ze zadní strany je připojen síťový vypínač obsahující konektor IEC C14, kterého součástí je i pojistka. Do pojistkového spodka byla vložena pojistka 250 V/ 630 mA s T označením, což značí tzv. pomalou pojistku, která je zde z důvodu možných nadproudů při zapnutí zdroje. Při pohledu na čelní panel se vlevo nachází ZDROJ 1 a napravo je ZDROJ 2.



Obrázek 37 Finální vzhled dvojitého regulovatelného zdroje

5 Měření jednotlivých částí a celku

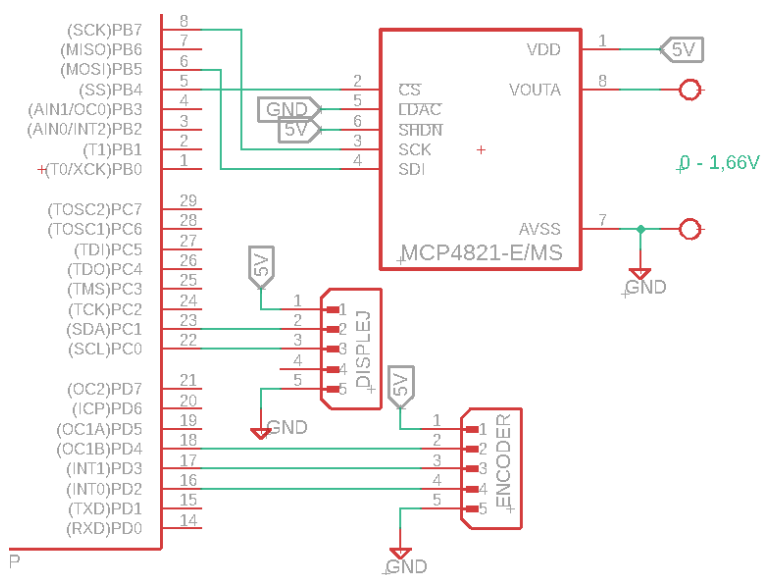
Tato část popisuje měření jednotlivých částí zdroje a poté zdrojů samotných. Měření byla prováděna ve školní laboratoři a k měření byly použity zařízení vyráběné firmou ELABO. Celá měřicí stanice má mnoho funkcí, ale použity byly jen některé. Konkrétně DC zdroje stabilizované č. A3-5S.3. a multimetry č. A3-6N.3. Dále USB konektory jako napájení kontaktních nepájivých polí.

5.1 Měření DAC 4821

Pro ověření správného výběru a zapojení D/A převodníku MCP4821 bylo navrženo částečné zapojení na nepájivém kontaktním poli a proměřeno v laboratoři. Použity byly všechny součástky na obrázku. Pomocí enkodéru bylo nastavováno napětí, které bylo zobrazováno na displeji. Mikrokontrolér odesílal zadanou hodnotu na D/A převodník a na jeho výstupu bylo měřeno napětí pomocí voltmetru. Převodník je v provedení SMD, a proto byly použity adaptéry „SMD to DIP“ od firmy Proto Advantage.



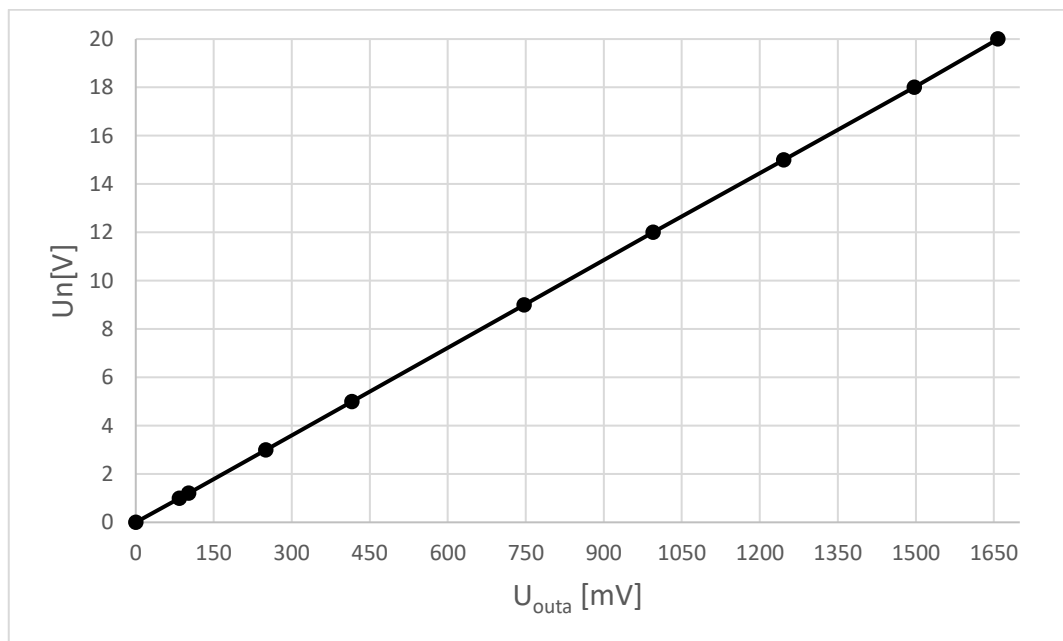
Obrázek 38 Adaptér pro MCP4821



Obrázek 39 Schéma zapojení pro měření D/A převodníku MCP4821

Tabulka 11 Výsledky měření D/A převodníku MCP4821

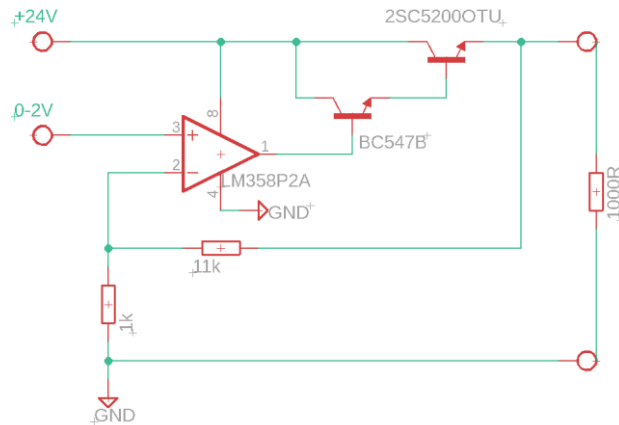
U_N [V]	Koeficient dělení	U_{OUTA} [mV]
0	12	0
1	12	84
1,2	12	102
3	12	250
5	12	416
9	12	747
12	12	995
15	12	1246
18	12	1497
20	12	1658



Graf 1 Závislost výstupního napětí D/A převodníku na nastavovaném vstupním napětí

5.2 Měření tranzistoru a OZ

Hlavní část celého zdroje tvoří dva tranzistory v darlingtonově zapojení a operační zesilovač. Tyto součástky byly pro důvod měření zapojeny na nepájivém kontaktním poli. Měření simulovalo reálný stav a provedeny byly dvě měření. Naprázdno a při zatížení rezistorem o velikosti 1000 Ω .



Obrázek 40 Schéma zapojení pro měření tranzistoru a OZ se zátěží

Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce:

Tabulka 12 Výsledky měření tranzistoru se zátěží a naprázdno

Měření se zátěží			Měření naprázdno	
U_{IN} [V]	U_Z [V]	I_Z [mA]	U_{IN} [V]	U_Z [V]
0	0	0	0	0
0,1	1,23	1	0,05	0,63
0,3	3,64	3	0,1	1,24
0,5	6,04	5	0,5	6,05
1	12,06	10,08	1	12,08
1,5	18,08	15,12	1,25	15
1,66	20	16,74	1,66	20,03

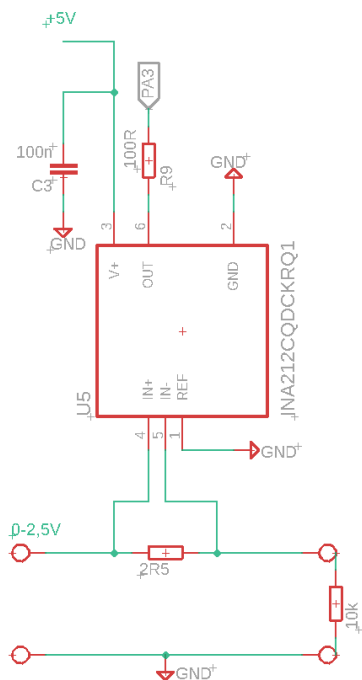
Díky poměru rezistorů je koeficient zesílení 12. Toto zesílení lze vyčíst z výsledků měření. Drobné nepřesnosti jsou způsobeny tolerancí samotných rezistorů. Dále možné rušivé napětí, popř. nepřesnosti, jelikož bylo pro zapojení použito kontaktní nepájivé pole.

5.3 Měření proudových snímačů

Pro ověření správnosti zapojení měřících snímačů proudu bylo též navrženo jednoduché schéma, které bylo realizováno na nepájivém kontaktním poli a proměřeno v laboratoři. Zde byly také použity adaptéry, které SMD komponentu převedou na DIP. Snímače jsou ve zdroji napájeni 24 V, ale pro toto měření byly napájeny pouze 5 V. Toto napětí je stále v napájecím rozpětí, které je 2,7 až 26 V.



Obrázek 41 Adaptér pro INA21x



Obrázek 42 Schéma zapojení pro měření proudového snímače INA212

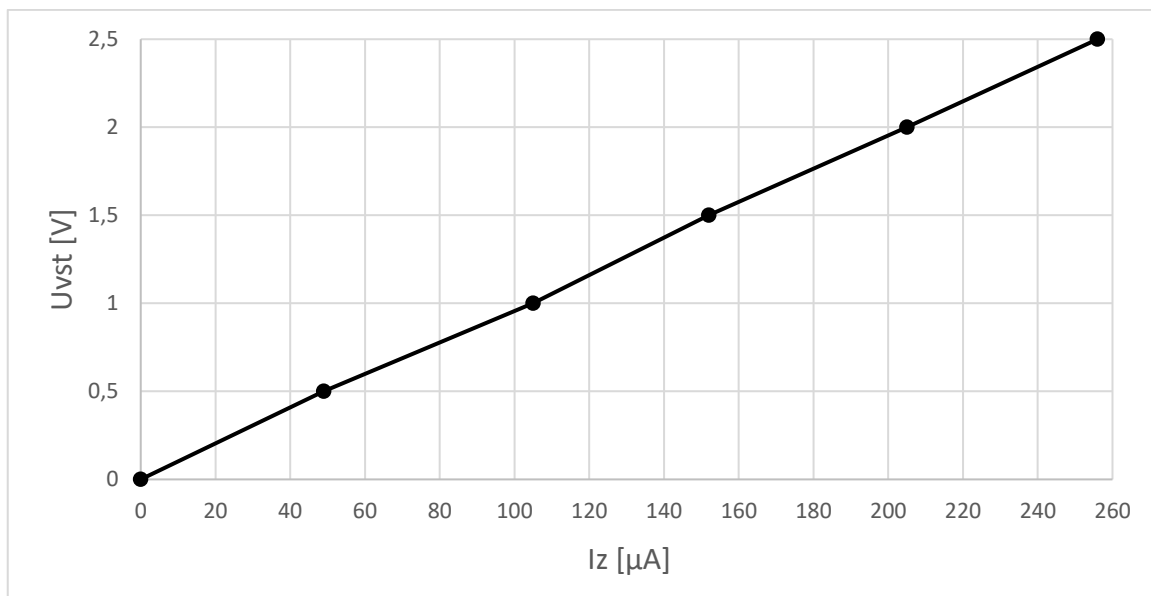
Výstupní svorky snímačů byly připojeny na mikrokontrolér a proud zobrazován na displeji. Tabulka a graf zobrazují naměřený proud tekoucí zátěží vůči napětí na vstupu. V ideálním případě bude proud tekoucí zátěží vypočten následovně:

$$I_Z = \frac{U_Z}{R_Z} = \frac{1}{10\,000} = 100\ \mu\text{A} \quad (20)$$

kde I_Z – je proud tekoucí zátěží
 R_Z – je odpor zátěže
 U_Z – je napětí na zátěží

Tabulka 13 Výsledky měření proudového snímače INA212

U_{VST} [V]	I_Z [μA]
0	0
0,5	49
1	105
1,5	152
2	205
2,5	256



Graf 2 Měřený proud pomocí snímače INA212 na zátěži R_z

Výsledky byly naměřeny dle očekávání s malými odchylkami z důvodu tolerancí na měřeném rezistoru a zátěži. Dalším možným faktorem jsou rušivé elementy, které mohly vzniknout na nepájivém kontaktním poli.

5.4 Měření proudové pojistky

Pro bezpečnost zdroje a též pro splnění zadání je potřeba proměřit funkčnost proudové pojistky. Bylo nastaveno konstantní výstupní napětí 20 V a postupně snižovaný odpor zátěže (reostat). To způsobí zvyšování proudu tekoucího zátěží. Při překročení 100 mA zafunguje softwarová pojistka a sníží nastavované napětí o 0,5 V.

Tabulka 14 Výsledky měření proudové pojistky

ZDROJ 1		ZDROJ 2	
U_{vyst} [V]	I_z [mA]	U_{vyst} [V]	I_z [mA]
20,16	0	19,96	0
20,13	20	19,93	20
20,08	50	19,9	50
20,08	60	19,89	60
20,04	90	19,85	90
20,02	100	19,83	100
15	100	15	100
10	100	10	100
5	100	5	100

Z tabulky je vidět, že při překročení 100 mA softwarová pojistka zafunguje a sníží napětí tak, aby byl snížen proud tekoucí do zátěže. Pokud bude odpor zátěže dále snižován, pojistka bude znovu reagovat a postupně se napětí sníží až na hodnotu nula voltů (a ochrání tím zdroj a obvod připojený na výstupní svorky)

5.5 Výstupní měření celého zdroje

Po složení celého zdroje dohromady je nutné změřit zatěžovací charakteristiku, vypočítat vnitřní odpor zdroje a jak přesné je nastavené napětí vůči napětí požadovanému.

5.5.1 Zatěžovací charakteristiky zdrojů

Zatěžovací charakteristika je graf, který vyobrazuje závislost výstupního napětí na (stoupajícím) odebíraném proudu na výstupních svorkách zdroje. Napájecí zdroj má tzv. vnitřní odpor, který zapříčiní pokles napětí při zvyšujícím se odebíraném proudu. Vnitřní odpor zdroje R_i lze vypočítat pomocí vzorce:

$$R_i = \frac{\Delta U}{I} = \frac{U_0 - U_z}{I} = \frac{10,005 - 9,98}{0,02} = 1,25 \quad (21)$$

Tabulka 15 Výsledky měření vnitřního odporu zdrojů při 10 V

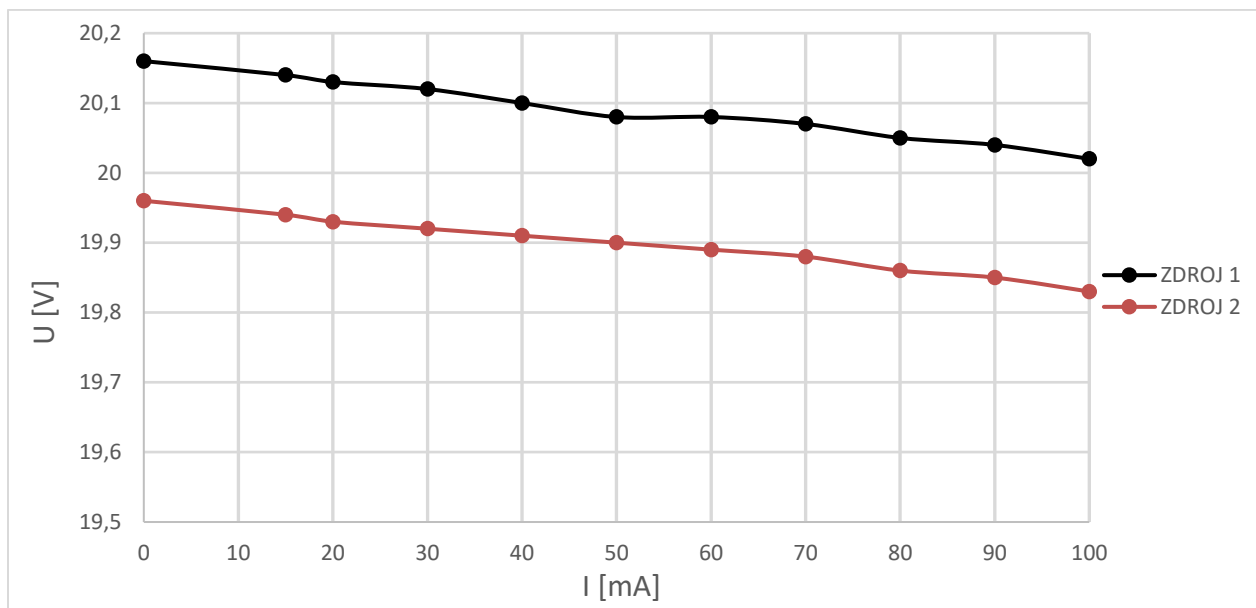
ZDROJ 1			ZDROJ 2		
$U_{\text{výst}} [\text{V}]$	$I_z [\text{mA}]$	$R_i [\Omega]$	$U_{\text{výst}} [\text{V}]$	$I_z [\text{mA}]$	$R_i [\Omega]$
10,005	0	-	10,005	0	-
9,98	20	1,25	9,98	20	1,25
9,956	40	1,225	9,955	40	1,25
9,93	60	1,25	9,92	60	1,25
9,907	80	1,225	9,906	80	1,2375
9,881	100	1,24	9,878	100	1,27

Na výstupu zdroje bylo naprázdno nastaveno 10,005 V a následně připojena zátěž v podobě reostatu. Poté byly změřeny výstupní napětí na různém proudovém zatížení.

Pro měření zatěžovací charakteristiky byly použity dva multimetry. Jeden, který je součástí měřicí stanice s označením č. A3-6N.3. Ten byl využit pro měření proudu. Pro měření napětí byl použit stolní multimetr AX-8455 vyráběný firmou AXIOMET. Oba se vyznačují vysokou přesností měření. Jako zátěž byl využit reostat o velikosti 1450 Ω .

Tabulka 16 Výsledky měření zatěžovacích charakteristik

ZDROJ 1			ZDROJ 2		
$U_{\text{nast}} [\text{V}]$	$U_{\text{výst}} [\text{V}]$	$I_z [\text{mA}]$	$U_{\text{nast}} [\text{V}]$	$U_{\text{výst}} [\text{V}]$	$I_z [\text{mA}]$
20	20,16	0	20	19,96	0
20	20,14	15	20	19,94	15
20	20,13	20	20	19,93	20
20	20,12	30	20	19,92	30
20	20,1	40	20	19,91	40
20	20,08	50	20	19,9	50
20	20,08	60	20	19,89	60
20	20,07	70	20	19,88	70
20	20,05	80	20	19,86	80
20	20,04	90	20	19,85	90
20	20,02	100	20	19,83	100



Graf 3 Zatěžovací charakteristika obou zdrojů

Zatěžovací charakteristika ukazuje, že oba zdroje jsou tzv. tvrdé. Tedy s narůstajícím proudem dokáží dobře udržet nastavené napětí. Hlavním důvodem je poměrně malé proudové zatížení.

5.5.2 Měření výstupních hodnot napětí

Na výstupních svorkách byl změřen rozdíl, mezi požadovaným napětím (U_{nast}), které se nastaví rotačním enkodérem a reálným napětím ($U_{\text{výst}}$), které je naměřeno voltmetrem na výstupních svorkách. Zde byl též využit stolní multimetr AX-8455.

Tabulka 17 Výsledky měření rozdílu mezi požadovanou a reálnou hodnotou napětí

ZDROJ 1		ZDROJ 2	
U_{nast} [V]	$U_{\text{výst}}$ [V]	U_{nast} [V]	$U_{\text{výst}}$ [V]
0	0,019	0	0,022
0,5	0,477	0,5	0,437
1	0,97	1	0,954
1,5	1,442	1,5	1,48
2	1,97	2	1,95
4	4	4	3,94
6	6,02	6	5,95
8	8,04	8	7,93
10	10,09	10	9,9
12	12,08	12	11,93
14	14,07	14	13,93
16	16,12	16	15,92
18	18,14	18	17,94
20	20,15	20	19,96

Závěr

Cílem bakalářské práce bylo sestavení dvojitého napájecího zdroje s výstupními hodnotami 0 až 20 V a s volitelnými kroky 5, 50 a 500 mV. Každý zdroj je řízen jedním mikrokontrolérem. Maximální proud je omezen na 100 mA. Tyto parametry byly splněny.

Splněno bylo také ovládání zdrojů pomocí rotačních enkodérů a zobrazování nastavovaných hodnot na displeji. Po dokončení nastavení se displej sám přepne do stavu, kdy zobrazuje výstupní hodnoty, a tedy i zde je zadání splněno. Pro změny měřených rozsahů proudu a napětí jsou zde tlačítka.

Nastavování napětí na výstupních svorkách vykazuje v počátečních hodnotách vyšší nepřesnost než 1%. To může být dáno více faktory, např. rozlišením a referenčním napětím D/A převodníku nebo děličem operačního zesilovače. Při zvyšování požadovaného napětí se ale přesnost dostane pod 1% a zadání je v téměř celém rozsahu splněno. Případné nepřesnosti jdou eliminovat tak, že mikrokontrolér bude porovnávat požadované napětí s naměřenými hodnotami na výstupu. V případě rozdílu by mikrokontrolér poslal vyšší nebo nižší hodnotu na D/A převodník a tím by se dorovnal rozdíl. Odchylka ale byla zjištěna až ve finální fázi, a proto řešení nebylo z časových důvodů realizováno.

Měření výstupních hodnot vykazuje nepřesnost měření a je zde prostor pro zlepšení. Vzhledem k zapojení proudových snímačů je měření proudu zkresleno o napěťové děliče. Měření napětí má nepřesnost měření kvůli výrobním tolerancím rezistorů, které se nachází v děliči a také kvůli rozdílnému referenčnímu napětí mikrokontroléru. Po provedení kalibrace je ale chyba $\pm 2\%$ přičemž největší chyba měření napětí je v počátečních hodnotách.

Možnost zlepšení je také v podobě chlazení. Pro vhodnější odvod tepla by bylo možné použít aktivní prvek – ventilátor. Ten by byl přimontován k chladícím otvorům plastové konstrukce. Mikroprocesor by pomocí teplotního čidla měřil teplotu uvnitř konstrukce a dle potřeby spínal aktivní prvek chlazení. Proudový odběr ale není tak vysoký a použitý chladič je dostatečně dimenzován, a proto aktivní chlazení není nutnost.

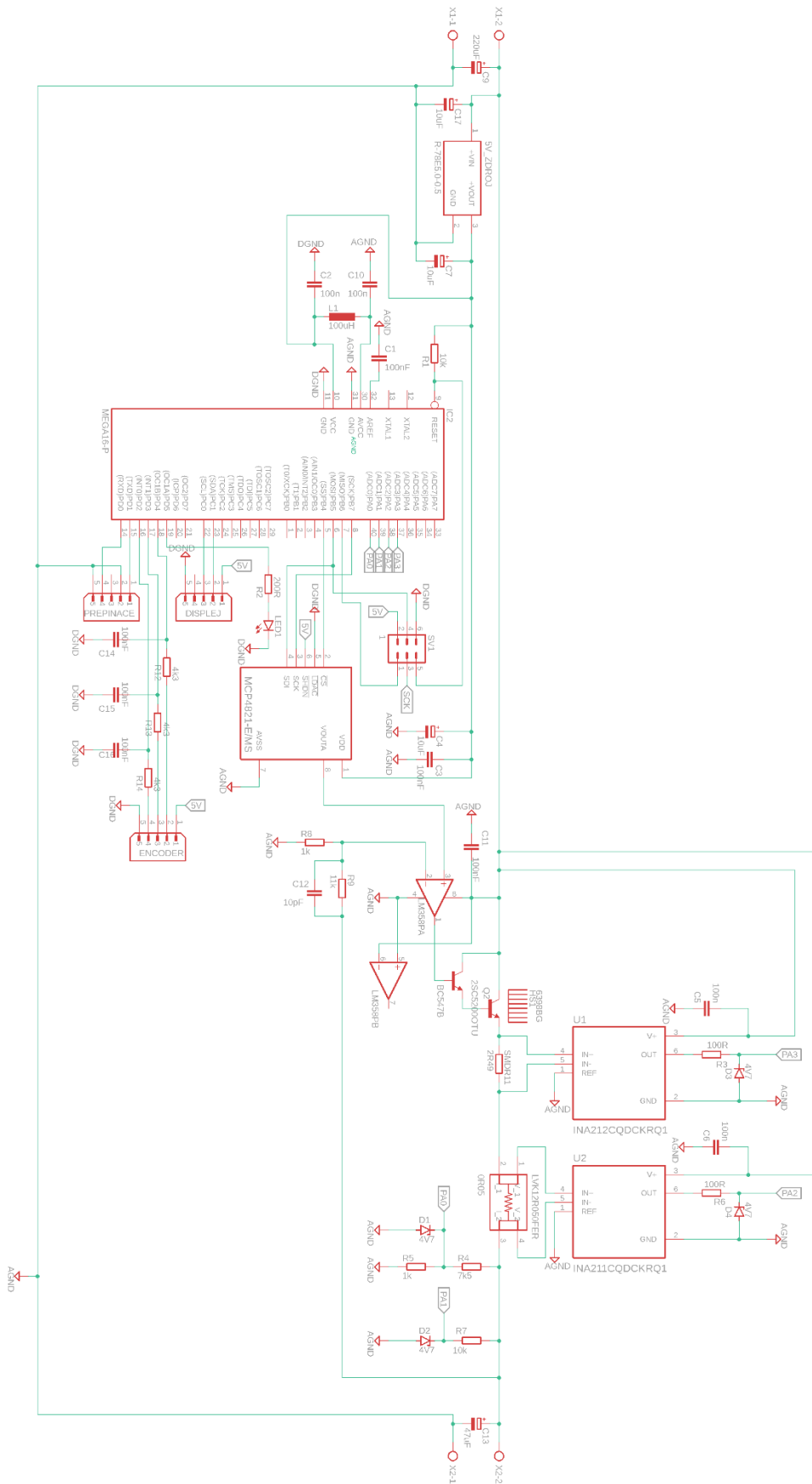
Literatura

- [1] *ELEKTRO: recenzovaný odborný časopis pro elektrotechniku* [online]. 2002, [cit. 2022-09-30]. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/zdroje-zdroje-a-zase-zdroje--14729>
- [2] HUSÁK, Miroslav. *Návrh napájecích zdrojů pro elektroniku: přednášky*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03398-8.
- [3] DAVID, Matoušek. *Základy Elektrotechniky: Základní metody řešení elektronických obvodů [přednáška]*. Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, 2019.
- [4] KESL, Jan. *Elektronika: učebnice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-074-1.
- [5] MATOUŠEK, David. *Elektronické obvody: Obvody napájecích zdrojů [přednáška]*. Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, 2019.
- [6] ŠIMÍČEK, Vladimír. *Spojovací technika* [online]. [cit. 2022-10-17]. ISBN 978-80-88058-14-4.
- [7] Frekvence. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Frekvence>
- [8] DOMINEC, F. Voltage graph. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-10-17]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1921799>
- [9] MATOUŠEK, David. *Práce s mikrokontroléry ATMEL AT89C2051: [měření, řízení a regulace pomocí několika jednoduchých přípravků]*. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2002-2006. ISBN 80-730-0174-8.
- [10] *ATmega16A: 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash* [online]. In: . s. 335 [cit. 2022-10-02]. Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-8154-8-bit-avr-atmega16a_datasheet.pdf
- [11] Microchip: ATmega16. In: *MicroChip* [online]. [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega16>

- [12] OSIIXY. Top view of a 6 & 10 pins ISP headers. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-11-30]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Isp_headers.svg
- [13] *AC/DC Converter: LO10-13B24* [online]. In: . s. 4 [cit. 2022-11-02]. Dostupné z: <https://www.mornsun-power.com/public/uploads/pdf/LO10-13Bxx.pdf>
- [14] *RECOM DC/DC Converter: R-78E-0.5* [online]. In: . s. 5 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/468/R_78E_0_5-1711129.pdf
- [15] *MCP4821-E: 12-Bit Voltage Output Digital-to-Analog Converter* [online]. In: . s. 49 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/268/22244B-54643.pdf>
- [16] *Operační zesilovač: LM358P* [online]. In: . s. 64 [cit. 2022-11-08]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm158.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&ts=1667838133591&ref>
- [17] MATOUŠEK, David. *Základy elektrotechniky: Bipolární tranzistory [přednáška]*. Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, 2019.
- [18] *Bipolární tranzistor 2SC5200OTU* [online]. In: . s. 7 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/308/1/FJL4315_D-1809120.pdf
- [19] *Bipolární tranzistor BC547B: NPN, THT, 45V, 0,1A, 0,625W* [online]. In: . s. 2 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: https://img.gme.cz/files/eshop_data/eshop_data/2/210-026/dsh.210-026.1.pdf
- [20] Bipolární tranzistory: ONSEMI: 2SC5200OTU. In: *MOUSER* [online]. [cit. 2022-11-15]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/512-2SC5200OTU>
- [21] *INA212/INA211 current-sense amplifier* [online]. In: . s. 33 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina212-q1.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-wwe&ts=1664793514334>
- [22] ULRICH, Daniel. *Výpočet chladiče* [online]. In: . s. 4 [cit. 2022-11-11]. Dostupné z: https://vyuka.hradebni.cz/file.php/110/Ostatni/Vypocet_chladice.pdf
- [23] MATOUŠEK, David. *Mikroprocesorová technika: Obsluha digitálních vstupů [přednáška]*. Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Univerzita Pardubice, 2020.
- [24] *Rotační encoder s tlačítkem a RC s filtrem* [online]. In: . [cit. 2022-11-17]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/rotacni-encoder-s-tlacitkem-a-rc-s-filtrem/>

- [25] KÖHLER, Michael. Microchip-MCP4822-Library: Library for MCP4822 at AVR Mikrocontroller. In: *GitHub* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://github.com/Sylaina/Microchip-MCP4822-Library>
- [26] GORIACHEV, Denis. Liquid Crystal I2C library for AVR: Port of Arduino Liquid Crystal I2C library for generic ATmega Controller. In: *GitHub* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: https://github.com/denisgoriachev/liquid_crystal_i2c_avr
- [27] GORIACHEV, Denis. I2C AVR Library: I2C Master device implementation for ATmega controllers. In: *GitHub* [online]. [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: https://github.com/denisgoriachev/i2c_avr

Příloha A – Schéma zapojení

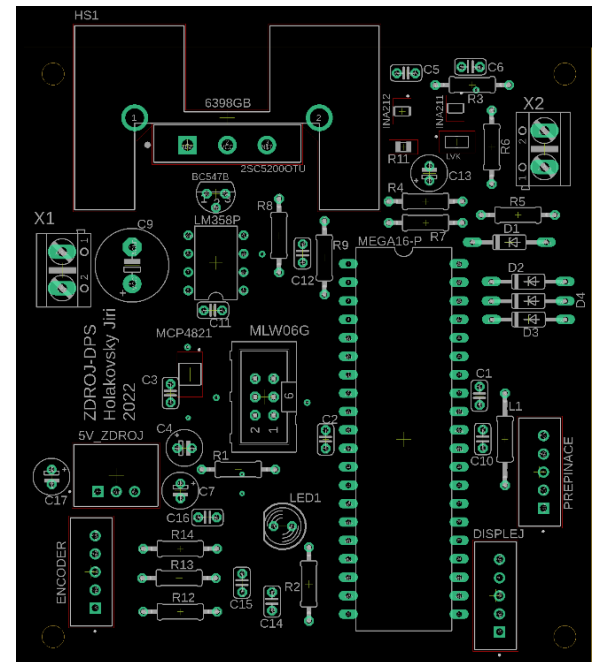
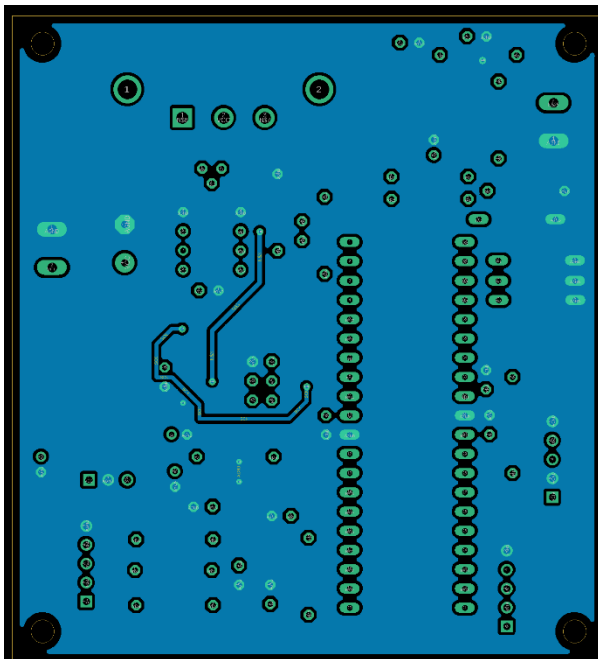
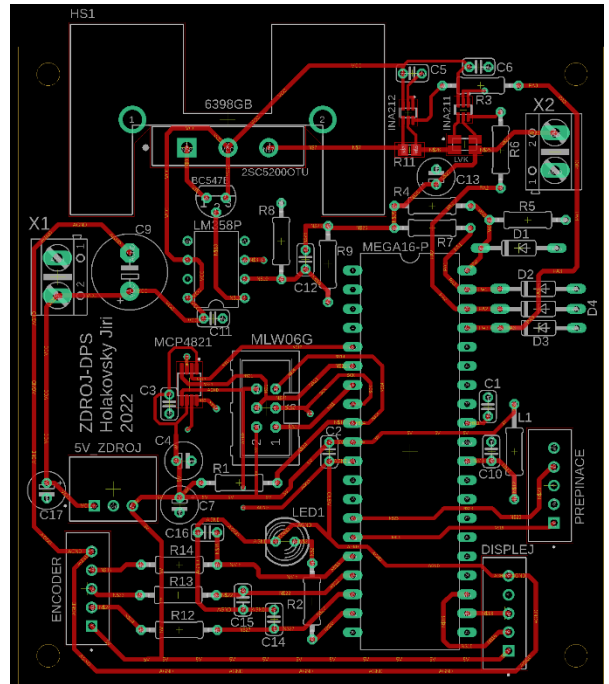
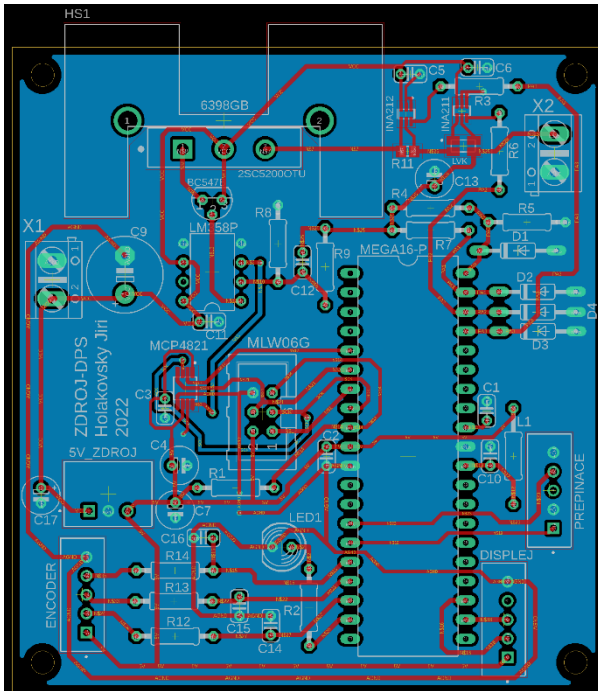


Příloha B – Seznam součástek

Tabulka udává součástky pro vyrobení jednoho zdroje.

Součástka	Hodnota	Součástka	Hodnota
5V_ZDROJ	R-78E5.0-0.5	LED1	RED 5 mm
C1	100 nF	OZ	LM358P
C2	100 nF	LVK12R050FER	SMD 0.05 Ω
C3	100 nF	Tranzistor	BC547B
C4	10 μF	Výkonový tranzistor	2SC5200OTU
C5	100 nF	R1	10000 Ω
C6	100 nF	R2	200 Ω
C7	10 μF	R3	100 Ω
C9	220 μF	R4	7500 Ω
C10	100 nF	R5	1000 Ω
C11	100 nF	R6	100 Ω
C12	10 pF	R7	10000 Ω
C13	47 μF	R8	1000 Ω
C14	100 nF	R9	11 000 Ω
C15	100 nF	R12	4300 Ω
C16	100 nF	R13	4300 Ω
C17	10 μF	R14	4300 Ω
D1 Zener	4,7 V	SMDR11	2,49 Ω
D2 Zener	4,7 V	Konektor pro MCU	MLW06G
D3 Zener	4,7 V	D/A převodník	MCP4821
D4 Zener	4,7 V	Snímač proudu	INA212CQDCKRQ1
Konektor displej	B5B-XH-A(LF)(SN)	Snímač proudu	INA211CQDCKRQ1
Konektor enkodér	B5B-XH-A(LF)(SN)	Svorkovnice vstupní	AK500/2
Konektor tlačítek (přepínače rozsahu)	B5B-XH-A(LF)(SN)	Svorkovnice výstupní	AK500/2
Chladič	6398BG	Patice pro MCU	DIP40; 2,54mm
Mikrokontrolér	MEGA16-P	Patice pro OZ	DIP8; 2,54mm
L1	100 μH		

Příloha C – DPS



Příloha D – Firmware

```
//Bakalářská_práce_FEI_UPCE_2022_JiriHolakovsky
#include <avr/io.h>
#define F_CPU 8000000UL
#include <util/delay.h>
#include <stdio.h>
#include "liquid_crystal_i2c.h"
#include "i2c_master.h"
#include "mcpDAC.h"
#include <avr/interrupt.h>
#define radek0 lq_setCursor(&device, 0,0);
#define radek1 lq_setCursor(&device, 1,0);
volatile uint8_t y, x, counter = 0, zmena = 0;
static char text[17];
volatile float z = 0.005, q = 0;
volatile char encpinvalue=0;
volatile char enctlacitko=0;
volatile char krok;

int ADC_read(uint8_t ADCx) {
    ADMUX &= ~(1<<MUX1)|(1<<MUX0);
    if (ADCx == 0) {
        ADMUX &= (~1<<MUX0);}
    else if(ADCx == 1){
        ADMUX |= (1<<MUX0);}
    else if(ADCx == 2){
        ADMUX |= (1<<MUX1);}
    else if(ADCx == 3){
        ADMUX |= (1<<MUX1)|(1<<MUX0);}

    ADCSRA|=(1<<ADSC);
    while(!(ADCSRA & (1<<ADIF)));
    ADCSRA|=(1<<ADIF);
    return(ADC);
}
float bit10_bit12(uint8_t ADCx)
{
    uint16_t l = 0;
    for(uint8_t n = 0; n < 16; n++)
    {
        l += (ADC_read(ADCx));
    }
    return(l/4.0);
}
void cti_tlacitka()
{
    if((PIND&(1<<DDD0)) == 0){
        y = 0;}
    else
    {y = 1;}
    if((PIND&(1<<DDD1)) == 0){
        x = 0;}
    else
    {x = 1;}
}
int main(void)
{
    i2c_master_init(400000);
    LiquidCrystalDevice_t device = lq_init(0x27, 16, 2, LCD_5x8DOTS);
    lq_turnOnBacklight(&device);
```

```

mcpDACInit(&PORTB,&DDRB,PINB4);
setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
PORTD = (1<<PD0)|(1<<PD1);
ADCSRA = (1<<ADEN)|(0<<ADPS0)|(1<<ADPS1)|(1<<ADPS2);
ADMUX = (1<<REFS0)|(1<<REFS1);
MCUCR = (1<<ISC00)|(0<<ISC01)|(1<<ISC10)|(0<<ISC11);
GICR = (1<<INT0)|(1<<INT1);
TCCR1A = (1 << COM1A0);
TCCR1B = (1 << WGM12)|(1 << CS11)|(1 << CS10);
OCR1A = 15000;
sei();
while(1)
{
    while((bit10_bit12(2)/40) > 100)
    {
        DDRD = (1<<PD5);
        q = q - 0.5;
        if(q<0)q=0;
        setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
    }
    DDRD = (0<<PD5);
    if(counter > 0)
    {
        radek0;sprintf(text,"CILOVA HODNOTA: ");
        lq_print(&device,text);
        radek1;sprintf(text,"%6.3f V          ", q);
        lq_print(&device,text);
        counter--;
        _delay_ms(10);
        setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
    }
    cti_tlacitka();
    if(counter == 0)
    {
        if(y == 1)
        {
            radek0;sprintf(text,"NAPETI: %5.2f V   ",
            bit10_bit12(0)*0.000625*8.5*0.97);
            lq_print(&device,text);
        }
        if(y == 0)
        {
            radek0;sprintf(text,"NAPETI: %4.0f mV ",
            bit10_bit12(1)*0.000625*1000*0.99);
            lq_print(&device,text);
        }
        if(x == 1)
        {
            radek1;sprintf(text,"PROUD:  %3.0f mA   ",bit10_bit12(2)/40);
            lq_print(&device,text);
        }

        if((bit10_bit12(3)/3.984) > 1000 && x == 0)
        {
            radek1;sprintf(text,"PROUD:  MAX   ");
            lq_print(&device,text);
        }
        else if((bit10_bit12(3)/3.984) <= 1000 && x == 0)
        {
            radek1;sprintf(text,"PROUD: %4.0f uA   ",bit10_bit12(3)/3.984);
            lq_print(&device,text);
        }
    }
}

```

```

        }
        _delay_ms(100);
    }
    if (y != zmena)
    {
        if(q>2)q=2;
        setMCPDAC(&PORTB,PINB4,12,((q/12)*1000),1,2,0);
        zmena = y;
    }
}

ISR(INT1_vect) //S2 - PD3; S1 - PD4
{
    uint8_t e1 = (PIND&(1<<PIND3));
    if(encpinvalue != e1)
    {
        counter = 50;
        if(!e1)
        {
            if(PIND&(1<<PIND4))
            {
                q = q + z;
                cti_tlacitka();
                if(y == 0)
                {
                    if(q>2)q=2;
                }
                if(q>20)q=20;
            }
            else
            {
                q = q - z;
                if(q<0)q=0;
            }
        }
    }
    encpinvalue=e1;
}

ISR(INT0_vect) //KEY - PD2
{
    uint8_t e2 = (PIND&(1<<PIND2));
    if(enctlacitko != e2)
    {
        if(!e2)
        {
            krok++;
            if(krok>2)krok=0;
            switch(krok)
            {
                case 0:    z = 0.005;    break;
                case 1:    z = 0.05;     break;
                case 2:    z = 0.5;      break;
            }
        }
    }
    enctlacitko=e2;
}

```