

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Rotační displej se stejnosměrným motorem

**vedoucí práce: Ing. Matouš Bartl
autor: Martin Švejda**

2011

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ŠVEJDA**
Osobní číslo: **E08B0172P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Rotační displej se stejnosměrným motorem**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Navrhněte celkovou koncepci, blokové schéma a mechanickou konstrukci zařízení.
2. Prostudujte potřebnou elektrotechnickou teorii.
3. Sestavte funkční vzorek.
4. Ověřte funkčnost, zjistěte a zhodnoťte důležité základní parametry.
5. Volitelný úkol: Vyřešte bezkontaktní napájení rotující části.


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Herout Pavel, Učebnice jazyka C
2. Hammerbauer Jiří, Elektronické napájecí zdroje a akumulátory

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Matouš Bartl**
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **18. října 2010**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2011**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 18. října 2010

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na návrh a konstrukci rotačního displeje. Rotační displej je zařízení, které dokáže pomocí stejnosměrného motoru, na němž je umístěno rameno s LED, zobrazovat text. To je způsobeno postupným rozsvěcováním a zhasínáním LED v závislosti na poloze ramena. Děj je velmi rychlý a vlivem reakční doby oka se LED jeví jako souvislý obrazec. Součástí práce je také návrh spínaného zdroje, který je použit pro napájení stejnosměrného motoru. Regulace otáček motoru je zajištěna programovatelným stejnosměrným napětím na výstupu spínaného zdroje v rozsahu 1 až 30 V.

Klíčová slova

Rotační displej, RGB LED, Hallův jev, spínaný zdroj, výpočet indukčnosti, návrh chladičů, mikrokontrolér PIC, PS regulátor

Abstract

DC motor driven rotating display

The Bachelor's thesis is focused on design and construction of rotating display. The rotating display is a device which is able to show us a text by the help of arm with LED positioned on DC motor. It is caused by switching on/off LEDs in dependence on position of arm. Displayed text is seen as continuous because of its very fast process and our eye reaction time view. In addition to the thesis is project of switch-mode power supply which is connected with DC motor. Motor speed regulation is provided by programmed DC voltage on switch-mode power supply output in the range of 1 up to 30 V.

Key words

Rotating display, RGB LED, Hall effect, switch-mode power supply, inductivity calculation, heat sinks design, PIC microcontroller, PS regulator

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

V Plzni dne 2.6.2011

Martin Švejda

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Matoušovi Bartlovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále také Františku Švejdovi za pomoc s konstrukcí mechanických částí systému.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1 ROTAČNÍ DISPLEJ	11
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP	11
1.2 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	11
1.3 NAPÁJENÍ.....	12
1.4 MĚŘENÍ OTÁČEK.....	13
2 ZOBRAZOVACÍ MODUL	13
2.1 NÁVRH HARDWARE	14
2.1.1 <i>Blokování napájení</i>	14
2.1.2 <i>Resetovací obvod</i>	15
2.2 NÁVRH SOFTWARE.....	16
2.2.1 <i>Zobrazování znaků a komunikace s posuvnými registry</i>	16
2.2.2 <i>Měření otáček</i>	17
3 SPÍNANÝ ZDROJ	18
3.1 PRINCIP ČINNOSTI JEDNOČINNÉHO PROPUSTNÉHO SNIŽUJÍCÍHO MĚNIČE	18
3.2 NÁVRH HARDWARE	20
3.2.1 <i>Měření výstupních veličin</i>	22
3.2.2 <i>Řízení spínače</i>	23
3.2.3 <i>Výpočet indukčnosti</i>	24
3.2.4 <i>Výpočet chladičů</i>	26
3.2.5 <i>Modul LCD displeje</i>	29
3.3 NÁVRH SOFTWARE.....	30
3.3.1 <i>A/Č Převodník</i>	31
3.3.2 <i>Přepočet napětí a proudu pro zobrazení na LCD displeji</i>	31
3.3.3 <i>PS Regulátor</i>	33
3.4 MĚŘENÍ PARAMETRŮ	34
ZÁVĚR	36
POUŽITÁ LITERATURA	37
PŘÍLOHY	1

Úvod

Náplní práce je návrh hardwaru rotačního displeje, sestavení mechanických komponent a naprogramování příslušných mikrokontrolérů.

Text je složen ze tří částí. V první kapitole je vysvětlena činnost hlavních bloků a popsán postup návrhu celého systému. Jsou zde vysvětleny základní principy použitého přenosu napájení a zvoleného způsobu měření otáček. Ve druhé části je pak objasněn postup návrhu samotného zobrazovacího modulu rotačního displeje. Pro pohon stejnosměrného motoru bylo nutné navrhnout zdroj napájecího napětí. Aby mohly být otáčky motoru regulovány a z důvodu využití zdroje napětí i pro jiné účely než je napájení rotačního displeje, bylo cílem navrhnout spínaný zdroj o proměnném výstupním napětí 1 až 30 V. O tomto návrhu pojednává část třetí.

Všechny schémata a desky plošného spoje jsou navrženy v programu *Eagle 5.6.0*. Program je napsán v jazyce C a vytvořen v editoru *MPLAB IDE 8.63* s kompilátorem *HI-TECH C PRO for the PIC10/12/16 MCU family (Lite) V9.60PL4*. Pomocí programátoru *Presto* od firmy *Asix* byl nahráván do mikrokontrolérů.

Seznam symbolů

<i>ASCII</i>	Americký standardní kód pro výměnu informací
<i>CCP</i>	Záchytná/porovnávací jednotka
<i>DPS</i>	Deska plošných spojů
<i>LCD</i>	Displej z tekutých krystalů
<i>LED</i>	Dioda emitující světlo
<i>MOSFET</i>	Polem řízený tranzistor
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
<i>PWM</i>	Pulzně šířková modulace
<i>SPI</i>	Sériové periferní rozhraní
<i>SSP</i>	Modul synchronního sériového portu

1 Rotační displej

1.1 Základní princip

Rotační displej je zařízení, které dokáže pomocí motoru, na němž je umístěno rameno s LED, zobrazovat text. To je způsobeno postupným rozsvěcováním a zhasínáním LED v závislosti na poloze ramena. Tento děj je velmi rychlý a vlivem reakční doby oka se LED jeví jako souvislý obrazec.

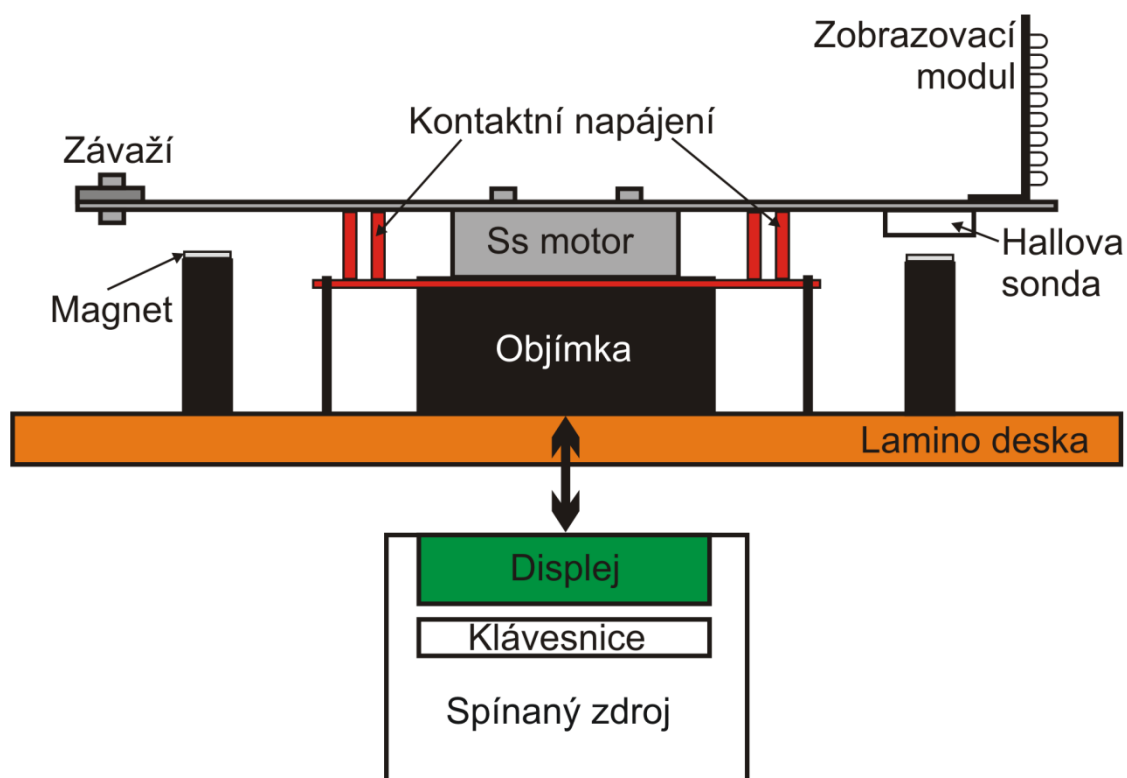
Lze ho sestavit v podstatě dvěma způsoby. První spočívá v umístění desky plošných spojů (DPS) s LED kolmo na hřídel motoru. Zde vzniká problém s rozdílem trajektorie, kterou opisuje bod u středu a na konci ramena. Při umístění LED blízko středu otáčení je rozsvícený sloupec zdeformovaný do podoby trojúhelníku. S touto skutečností se tedy už musí počítat a pro každou LED se definuje jiná doba svícení jednoho sloupce.

Druhý způsob, který bude v textu dále rozebrán, je umístění DPS s LED kolmo na konec ramena připevněného na hřídeli motoru. Délka ramena určuje počet sloupců, které jsme schopni v jeden okamžik zobrazit. Protože rychlost otáčení je pro všechny LED stejná, je u tohoto řešení jednodušší program. Naopak nevýhodou je větší prostorová náročnost.

1.2 Blokové schéma

Při návrhu celého systému bylo nejprve sestaveno blokové schéma, které je znázorněno v *Obr. 1.1*.

Pohon otočné části je realizován pomocí stejnosměrného motoru, původem z videopřehrávače, který je uložen v objímce z PVC a pro lepší stabilitu připevněn k lamino desce. Pohon motoru zajistí regulovatelný spínaný zdroj, díky němuž bude možno řídit otáčky zvyšováním, nebo snižováním napětí. Na otočnou část motoru je čtyřmi šrouby uchyceno rameno z 2 mm silného duralového plechu. Na konci ramena je připevněn zobrazovací modul, který je tvořen DPS s LED, mikrokontrolérem a ostatní elektronikou a jehož úlohou je rozsvěcování textu. Tento modul je podrobně rozebrán v druhé kapitole. Pro vyvážení ramena je na opačném konci umístěno ocelové závaží.



Obr. 1.1 Blokové schéma rotačního displeje

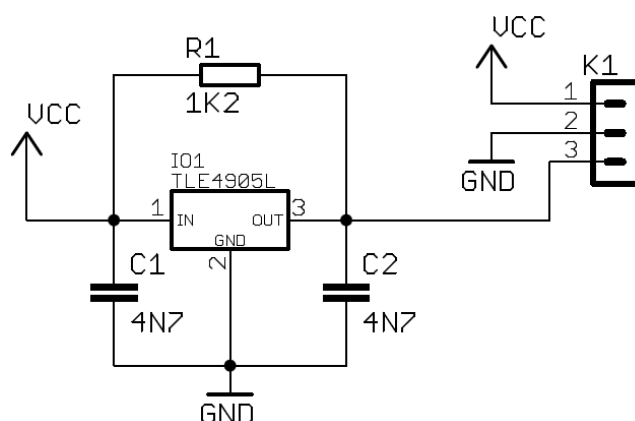
1.3 Napájení

Při výběru napájení byly zvažovány tři možnosti. První z nich bylo umístění baterie na otočnou část. Z důvodu poměrně velkého odběru DPS, který je při maximálním zatížení přibližně 200 mA, by se musela baterie často vyměňovat, a proto bylo toto řešení zavrhnuto. Druhá možnost spočívala v bezkontaktním napájení pomocí transformátoru, který by měl otočnou a pohyblivou část. Do pevné části by se PWM signálem o vysoké frekvenci indukovalo napětí a v pohyblivé části by se usměrnilo a stabilizovalo na 5V. Vzhledem ke složitosti a nedostatku času bylo toto řešení také zamítnuto.

Třetí, použitá konstrukce napájení spočívá ve dvou drahách napájení o šířce 5 mm na plošném spoji. DPS je připevněna 2 cm od otočné části na distanční sloupky (Obr. 1.1) a na obou stranách ramena je připevněné lanko, které je přitlačováno na plošné spoje a opisuje jejich dráhu. Na lanka jsou připájeny izolované vodiče, které jsou připojeny přes konektor PSH02 do zobrazovacího modulu. DPS s dráhami napájení je v příloze A.

1.4 Měření otáček

Aby rozsvěcování textu bylo synchronizováno do jednoho místa při různých rychlostech otáčení, je nutné měřit otáčky ramena. K tomu byl použit integrovaný obvod s Hallovou sondou TLE 4905 L. Na výstupu obvodu je v klidovém stavu napájecí napětí a při detekci magnetického pole je výstup uzemněn. Podle katalogu výrobce [w1] bylo sestaveno schéma zapojení (*Obr. 1.2*) a následně vytvořena DPS, která je k nahlédnutí v souboru „Hall_IC.brd“ na přiloženém CD.



Obr. 1.2 Zapojení integrovaného obvodu s Hallovou sondou

Na lamino desce byli rovnoměrně rozmístěny 4 magnety v plastových podstavcích, viz *Obr. 1.1*. DPS s integrovaným obvodem byla umístěna zespodu ramena, takže pokaždé když se otáčející rameno přiblíží k magnetu, je vygenerován impulz pro mikrokontrolér, který na základě doby mezi jednotlivými impulzy vyhodnotí rychlost otáčení.

2 Zobrazovací modul

Na jedné DPS s mikrokontrolérem, LED a ostatní elektronikou se řídí zobrazování textu. Schéma zapojení modulu je v příloze B, DPS pak v příloze C. U vstupních svorek napájení je paralelně k třísvorkovému stabilizátoru napětí L7805 zapojen propojovací rezistor R1. Toto řešení umožňuje použít napájecí zdroj 5 až 35 V. Protože je použit zdroj napětí 5 V, propojovací rezistor je zapojen a stabilizátor L7805 nikoliv.

2.1 Návrh hardware

Srdcem zobrazovacího modulu je 8-bitový mikrokontrolér PIC16F819 od firmy Microchip, ke kterému je připojen externí krystalový oscilátor 20 MHz. Jeho činnost spočívá ve vyhodnocování otáček a rozsvěcování osmi 5 mm RGB LED se společnou anodou. Protože se každá barva musí ovládat zvlášť, je potřeba řídit celkem 24 výstupů s odběrem 20 mA. To by šlo vyřešit mikrokontrolérem se stejným počtem I/O portů a přidáním externích výkonových spínačů. Z ekonomického hlediska je ale výhodnější, když se použije mikrokontrolér s menším počtem výstupů a tři výkonové osmibitové posuvné registry TPIC6C595. Registry lze kaskádně zařadit za sebe a mají výstupy schopné spínat proudy 100 mA, což pro ovládání LED stačí. Jediný požadavek na mikrokontrolér je nyní pouze podpora komunikace SPI, což problém není, protože tuto aplikaci zvládá většina mikrokontrolérů na trhu.

2.1.1 Blokování napájení

V literatuře [1] je uvedeno: Blokování napájení pomocí kondenzátorů patří spolu se zemněním k nejdůležitějším pravidlům, kterým je třeba věnovat pozornost u všech desek plošných spojů. Podle funkce rozlišujeme tři druhy blokovacích kondenzátorů:

Filtrační (*bypassing*) – slouží jako širokopásmový filtr pro napájení celé desky nebo její části, eliminuje vliv indukčností přívodů od napájecího zdroje, kontaktních přechodových odporů napájecích konektorů atd.

Lokální (*decoupling*) – slouží jako lokální zdroj energie pro součástky a redukuje impulzní proudy, které by jinak protékaly celou deskou.

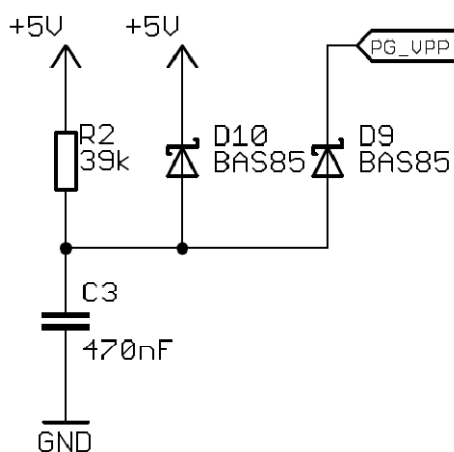
Skupinový (*bulk*) – slouží jako zdroj energie pro současné nabíjení několika kapacitních zátěží.

Protože k napájení celé DPS slouží kovová lanka pohybující se po drahách DPS, je zde poměrně velká pravděpodobnost výpadku proudu. Jelikož ale mechanické časové konstanty bývají dlouhé (řádu milisekund), vycházel by filtrační kondenzátor u vstupního konektoru příliš velký. Z hlediska funkce zobrazování je nepřijatelné, aby vypadlo napájení mikrokontroléru, protože by byla ztracena veškerá data v paměti RAM a zobrazování by se zhroutilo. Zato výpadek posuvných registrů nebo LED by způsobil nanejvýše nezobrazení několika sloupců displeje v jedné otáčce. Ke vstupnímu konektoru se tedy umístil pouze

filtrační elektrolytický kondenzátor 330 uF. Do cesty napájení mikrokontroléru a posuvných registrů byla zapojena schottkyho dioda a za ní skupinový kondenzátor 330 uF. Tak se zajistilo to, že se kondenzátor může vybíjet pouze přes příslušný integrovaný obvod. Ke skupinovým elektrolytickým kondenzátorům jsou ještě paralelně zapojeny lokální blokovací kondenzátory, které jsou umístěny co nejbližší vývodům napájení jednotlivých čipů a kryjí impulzní spotřebu hradel.

2.1.2 Resetovací obvod

Po náběhu napájení nebo po některých abnormálních stavech počítače je nutné nastavit do definovaného stavu jeho řídicí registry a sekvenční logiku [2]. K nulování mikrokontroléru PIC slouží jeho vstup $\overline{\text{MCLR}}$, do něhož je externě zapojen resetovací obvod (Obr. 1.3).



Obr. 1.3 Resetovací obvod

Po připojení napájení se začne přes rezistor nabíjet kondenzátor. To trvá nějaký čas, kterým je zajištěno, že reset bude odblokován s dostatečným odstupem od náběhu napájecího napětí, kdy je zajištěna jeho stabilita. Účelem diody je umožnit rychlé vybití kondenzátoru i při krátkodobém výpadku napájení [2]. Vstupní obvod signálu reset má vždy hysteretní charakter, aby se zabránilo případnému rozkmitání obvodu při pomalých změnách na vstupu [2].

2.2 Návrh software

Kompletní program v jazyce C včetně komentářů je k nahlédnutí v souboru „*Rotacni_displej.c*“ na přiloženém CD. Při psaní kódu bylo nejprve nutné správně nastavit konfigurační slovo a řídicí registry mikrokontroléru. K tomu byl použit katalog mikrokontroléru [w3]. Nejdůležitější nastavení v konfiguračním slově bylo určení oscilátoru jako HS (pro použitý krystal 20 MHz), vypnutí diagnostického časovače Watchdog a přiřazení pinu RB3 k CCP jednotce (viz dále). Pro nastavení všech řídicích registrů byla vytvořena v kódu funkce *setup_mcu*, která je volána na úplném začátku hlavní funkce *main*. Ke komunikaci s posuvnými registry TPIC6C595 je použita SSP jednotka a pro měření otáček jednotka CCP. Postup programování jednotlivých periférií je popsán v následujících podkapitolách.

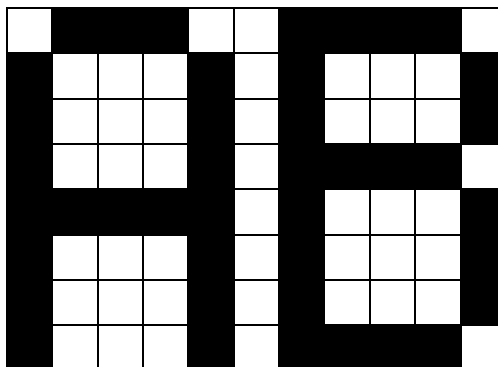
2.2.1 Zobrazování znaků a komunikace s posuvnými registry

Periferie SSP je v mikrokontroléru nastavena do módu komunikace SPI, kterou podporují i použité posuvné registry. SPI se používá pro přenos informace na malou vzdálenost, většinou na jedné desce plošného spoje. Po třech společných vodičích se rozvádějí: synchronizační impulzy SCK, sériová výstupní data SDO, a sériová vstupní data SDI [2]. Podle [w3] umožňuje mikrokontrolér přepínat mezi módem Master a Slave. K tomu slouží pin SS (*slave select*). Ale protože mikrokontrolér v obvodu pracuje výhradně v módu master, není tento pin použit.

V katalogu součástky [w9] je uvedeno, že posuvný registr TPIC6C595 obsahuje dva registry. První z nich je 8-bitový posuvný a posílají se do něho po SPI data. Druhý registr je 8-bitový paměťový a data se do něho uloží náběžnou hranou signálu na pinu RCK. Oba registry jsou dále připojeny na pin CLR, který nízkou úrovní způsobuje nulování obsahu. Kromě vstupů SDI, SCK a výstupu SDO obsahuje registr ještě řídicí vstup G. Pokud je tento pin ve vysoké úrovni, jsou všechny výstupy paměťového registru maskovány a všechny výstupní výkonové tranzistory jsou vypnuté.

Aby bylo možné na rotačním displeji zobrazovat znaky ASCII tabulky, bylo nejprve nutné uložit jednotlivé znaky jako pole bitů. Postup vytvoření dvou znaků abecedy ilustruje *Obr. 1.4*. Protože má rotační displej 8 LED, byl každý znak rozdělen po osmi bitech a na pět sloupců. Ve sloupci byly bity, které znak překrývají, označeny jako log. „0“ a nepoužité bity

jako log. „1“. Takto navzorkovaný sloupec byl uložen do 8-bitové proměnné typu *unsigned char*, spodním bitem jako MSB. Po navzorkování celého znaku byly sloupce uloženy do pole. V programu jsou v poli *ASCII* uloženy znaky ASCII tabulky od adresy 20 do 5F (hexadecimálně).



Obr. 1.4 Navzorkované znaky

Naprogramovaný postup ovládání je tedy následující: Po uvedení pinu CLR do stavu log. „1“ je do vyrovnávacího registru SSPBUF pro vysílání SPI uložen jeden sloupec, který je následně odeslán do prvního posuvného registru. Tento postup se opakuje ještě dvakrát, aby se naplnily všechny posuvné registry, přičemž do dvou libovolných posuvných registrů se pošlou nulové sloupce, aby vždy svítila jen jedna barva. Impulzem RCK se přesunou data s posuvných do paměťových registrů a uvedením pinu G do log. „0“ se výstup paměťových registrů přeneše na hradla výstupních tranzistorů, které se při log. „1“ otevrou. Následuje čekací smyčka vypočtená z rychlosti otáčení a postup se opakuje.

2.2.2 Měření otáček

Hardware použitý pro měření otáček byl již popsán v kapitole 1.4. Výstup z Hallova modulu byl přiveden k pinu RB3, který je nakonfigurován jako vstup CCP jednotky. Ta obsahuje 16-bitový registr a může pracovat ve třech módech: záchytný, porovnávací a PWM. Pro účel měření otáček je použit záchytný mód, reagující na každou sestupnou hranu. Po spuštění činnosti začne 16-bitový čítač TMR1 každý instrukční cyklus (0,2 μ s) inkrementovat svou hodnotu. Při detekování každé sestupné hrany na pinu RB3 se obsah registru čítače přesune do záchytného registru jednotky CCP a vyvolá se přerušení. Ve funkci volané při přerušení *capture* je TMR1 vynulován a obsah registru CCP jednotky je uložen do proměnné *speed*, která je typu *unsigned int*. Z této proměnné je v čekací funkci *wait*

vypočtena délka jednoho sloupce rotačního displeje. Při roztáčení ramena je doba mezi událostmi velice dlouhá a hrozí, že čítač TMR1 přeteče a začne čítat od začátku. Aby se do proměnné *speed* neuložila špatná hodnota, je těsně před zápisem do proměnné kontrolován příznak přetečení TMR1. Pokud přetečení nastane, je do *speed* uložena největší možná hodnota 0xFFFF a příznak je vynulován. I přes toto ošetření ale nelze rotační displej ve velice nízkých otáčkách synchronizovat.

3 Spínaný zdroj

V [3] je uvedeno, že zdroje se spojitou regulací a spínané zdroje mají stejnou funkci, pouze výkonový člen zdrojů spínaných je zatěžován impulzně. Výhodou tohoto režimu je, že můžeme odebírat impulzní výkon výrazně větší, než je trvalý výkon se stejným výkonovým členem v lineárním režimu. Spínané zdroje mají také větší účinnost a jsou výhodné v aplikacích, u kterých je velký rozdíl napětí na vstupu a výstupu. Další výhodou je nízká hmotnost a stabilní výstupní napětí i při velkých změnách vstupního napětí. I přes větší obvodovou složitost jsou ekonomicky výhodnější, protože významně šetří elektrickou energii. Dalšími výhodami je úspora hmotnosti a rozměrů, např. vůči 50 Hz transformátoru u síťových aplikací. Naopak velkou nevýhodou spínaných zdrojů je hlavně problém průniku rušení od spínací frekvence na výstup.

Základní dělení spínaných zdrojů je na izolující a neizolující měniče. Izolující měniče mohou být buď propustné, nebo blokující a propustné se dělí na jednočinné a dvojčinné.

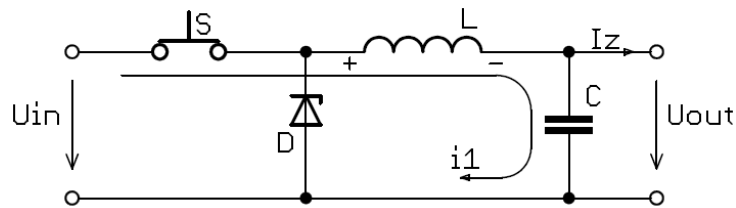
3.1 Princip činnosti jednočinného propustného snižujícího měniče

Pro navrhovaný spínaný zdroj byl použit princip jednočinného propustného snižujícího měniče (*step-down converter*). Na vstupu se předpokládá stejnosměrné napětí, jehož hodnota je pulzním spínáním na výstupu zmenšena.

Základní schéma je znázorněno na *Obr. 3.1*. Pokud sepneme spínač S, začne cívkou L protékat elektrický proud i_1 a naakumuluje v ní energii, která lze určit ze známého vztahu:

$$E = \frac{1}{2}Li^2 \quad (3.1)$$

Dioda D je polarizována závěrně, takže nevede a kondenzátor je nabit. Předpokládáme-li bezztrátový měnič, je na cívce L napětí $U_{IN} - U_{OUT}$ a změna proudu má lineární průběh.

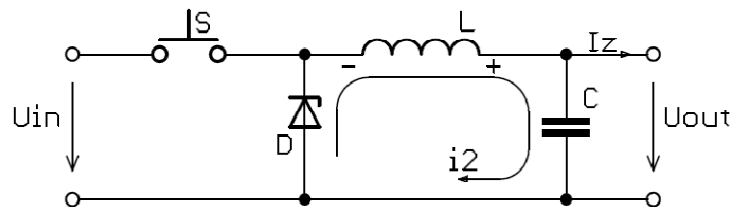


Obr. 3.1 Propustný snižující měnič – interval T_1

Pokud bude výstupní proud I_Z konstantní a nazveme-li tento interval T_1 , změnu proudu lze vypočítat z rovnice:

$$\Delta i_1 = \frac{U_{IN} - U_{OUT}}{L} T_1 \quad (3.2)$$

Je-li v intervalu T_2 spínač S rozepnut (Obr. 3.2), na cívce L se změnila polarita napětí, otevře se rekuperační dioda D a začne skrze ní protékat proud i_2 . Výstup obvodu nyní čerpá naakumulovanou energii z intervalu T_1 .



Obr. 3.2 Propustný snižující měnič – interval T_2

Budeme-li opět předpokládat lineární průběh proudu i_2 , lze napsat:

$$\Delta i_2 = \frac{U_{OUT}}{L} T_2 \quad (3.3)$$

Na hranici režimu nepřerušovaných proudů lze výstupní napětí definovat z rovnosti $\Delta i_1 = \Delta i_2$ vztahem:

$$U_{OUT} = U_{IN} \frac{T_1}{T}, \quad \text{kde } T = T_1 + T_2 \quad (3.4)$$

Závisí tedy na velikosti vstupního napětí a na velikosti aktivního intervalu T_1 . Oproti jednocestnému blokujícímu měniči má toto uspořádání výhodu v tom, že výstupní napětí měniče má stejnou polaritu jako vstupní.

3.2 Návrh hardware

Základní technické parametry navrhovaného spínaného zdroje jsou sepsány v *Tab. 3.1* a schéma s DPS pak v přílohách D a E. Na vstup propustního měniče byl umístěn transformátor 90 VA, který transformuje vstupní střídavé napětí 230 V/50 Hz na 30 V/50 Hz a 15 V/50 Hz. Obě odbočky jsou přivedeny do jedné DPS, na které jsou usměrněny. Propustný měnič má na vstupu usměrněné napětí 42,4 V ($30\sqrt{2}$) a maximální možný odběr této odbočky činí 3 A. Kapacita filtračního kondenzátoru je při požadovaném zvlnění 11,23 V a při $\Delta t = 10 \text{ ms}$ (50Hz) $C = I \cdot \Delta t / \Delta U = 2671,4 \mu\text{F}$. Do výpočtu zvlnění byl započítán i úbytek 1,17 V na odporu pro měření výstupního proudu (viz kapitola 3.2.1). První vyšší dostupný elektrolytický kondenzátor v řadě má hodnotu 4700 μF . Ten je v obvodu ještě doplněn keramickým kondenzátorem 470 nF. Elektrolytický kondenzátor má vysokou kapacitu, ale špatné vysokofrekvenční vlastnosti takže se s keramickým vhodně doplňují [1]. Odbočka napětí 15 V/50 Hz je použita na napájení digitální části DPS, proto je po usměrnění a filtraci přivedena na třísvorkový integrovaný stabilizátor napětí L7805.

<i>Výstupní napětí</i>	<i>1– 30 V</i>
<i>Maximální výstupní proud</i>	<i>3 A</i>
<i>Maximální výstupní výkon</i>	<i>90 W</i>
<i>Vstupní napětí</i>	<i>230 V/50 Hz</i>
<i>Pracovní frekvence</i>	<i>39,06 kHz</i>
<i>Použitý mikrokontrolér</i>	<i>PIC16F73</i>

Tab. 3.1 Základní technické parametry

Řízení činnosti spínaného zdroje zajišťuje mikrokontrolér PIC16F73, ke kterému je připojen krystalový oscilátor 20 MHz. Jeho hlavní pracovní náplní je na základě naměřených hodnot napětí a proudu na výstupu zdroje, regulovat signálem PWM výkonový spínač MOSFET. Vedlejší činností mikrokontroléru je pak zobrazování aktuálních hodnot výstupních veličin na LCD displeji, který je umístěn na samostatnou DPS. Zadání požadované hodnoty výstupního napětí probíhá pomocí klávesnice tvořené čtyřmi tlačítky, umístěnými na téže DPS.

Frekvence PWM signálu 39,06 kHz je odvozena od schopností použitého mikrokontroléru a od požadavku na co nejmenší indukčnost. Podle katalogu výrobce [w4] se doba jedné periody signálu PWM vypočítá dle rovnice (3.5), kde hlavními parametry jsou hodnota registru PR2 a doba jedné periody oscilátoru T_{OSC} . Dělicí poměr předděličky čítače TMR2 je nastaven na 1:1, takže ho při výpočtu nemusíme uvažovat.

$$perioda\ PWM = [(PR2) + 1] \cdot 4 \cdot T_{OSC} \cdot (poměr\ předděličky\ TMR2) \quad (3.5)$$

Pokud se hodnoty v registru TMR2 a PR2 rovnají, je TMR2 vynulován, PWM výstup je nastaven do logické „1“ (není-li střída nastavena na nulu) a do řídicího registru jednotky se zapíše naprogramovaná střída.

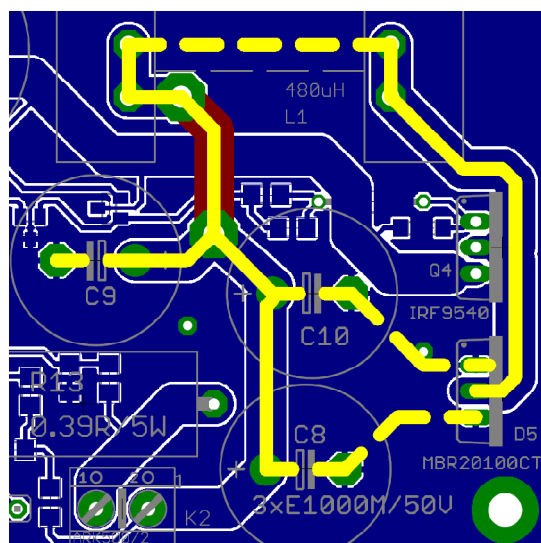
Maximální dostupné rozlišení PWM signálu je 10 bitů. Tato hodnota je ale dostupná pouze do frekvence 19,53 kHz. Při požadavku na vyšší frekvenci se musí počítat s menším rozlišením, které lze vypočítat s pomocí rovnice uvedené ve [w4]:

$$Rozlišení = \frac{\log\left(\frac{F_{OSC}}{F_{PWM}}\right)}{\log(2)} \text{ bitů} \quad (3.6)$$

Maximální frekvence PWM, při níž je rozlišení signálu ještě 9 bitů je:

$$F_{PWM} = \frac{F_{OSC}}{10^{rozlišení} \cdot \log(2)} = \frac{20 \cdot 10^6}{512} = 39,06 \text{ kHz} \quad (3.7)$$

Úpravou rovnice (3.5) a dosazením vypočtené F_{PWM} zjistíme, že do registru PR2 je nutné zapsat hodnotu 127, což je hexadecimálně 7F.



Obr. 3.3 Detail DPS s proudovou smyčkou i_2

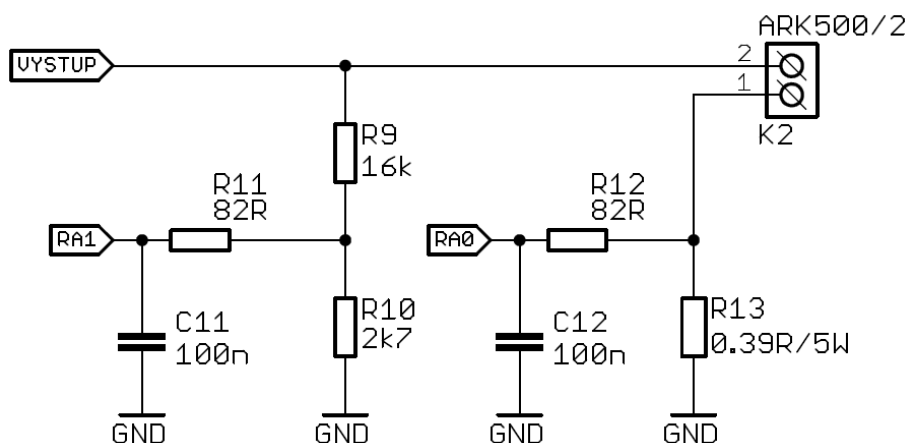
DPS spínaného zdroje byla navrhována s důrazem na dodržení zásad elektromagnetické kompatibility. To zahrnuje minimalizaci proudové plochy proudu i_2 z Obr. 3.2 správným rozmístěním součástek a vedením spojů [1]. Detail DPS s touto proudovou smyčkou je vyneseno v Obr. 3.3 (žlutá barva). Výstupní napětí má být vyvedeno z bodů, které se nacházejí bezprostředně u vývodů výstupních kondenzátoru [1]. Spoje nesoucí signál měření výstupních veličin musí být co nejkratší, proto by měl být i mikrokontrolér co nejbližší u výstupních svorek.

3.2.1 Měření výstupních veličin

Na výstupních svorkách spínaného zdroje se měří dvě veličiny (Obr. 3.4). Měření napětí je zavedeno do vstupu mikrokontroléru RA1 a měření proudu do RA0. Na těchto pinech je připojen 8-bitový analogově/číslíkový převodník s referenčním napájecím napětím 4,7 V (mikrokontrolér je ke stabilizátoru připojen přes Schottkyho diodu, na které je úbytek 0,3 V). Z celkového počtu pěti kanálů jsou použity pouze dva. Jelikož při spínání vznikají vysokofrekvenční zákmitý napětí, je u obou měření zapojen do cesty signálu RC filtr.

$$U_M = U_{OUT} \frac{R_{10}}{R_9 + R_{10}} \quad (3.8)$$

Při maximálním výstupním proudu 3 A je na odporu R_{13} napětí 1,17 V (viz dále), celkové naměřené maximální výstupní napětí proti zemi je tedy 31,17 V, namísto 30 V. Snímané napětí je určeno poměrem děliče tvořeného odpory R_9 a R_{10} . Za těchto okolností se výstup děliče podle rovnice (3.8) rovná 4,5 V.

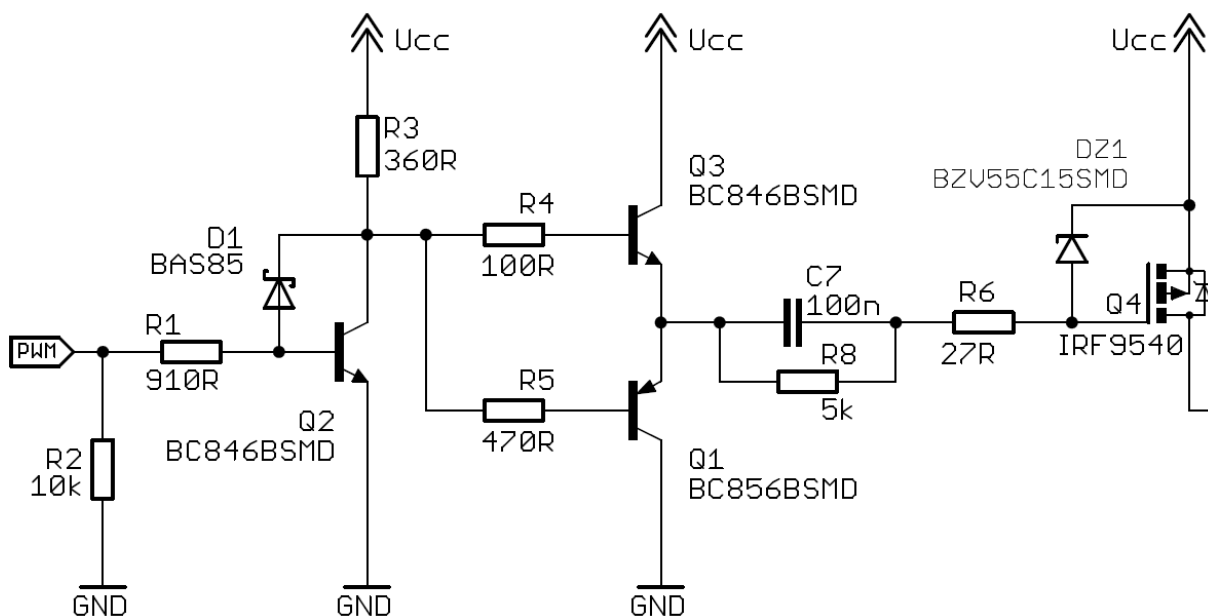


Obr. 3.4 Měření výstupních veličin

Elektrický proud je určen výkonovým odporem R_{13} , na kterém se bude s rostoucím proudem zvyšovat napětí. Hodnotě 3 A odpovídá dle Ohmova zákona napětí 1,17 V. To neodpovídá rozsahu A/Č převodníku, ale protože měření slouží pouze pro jednoduché omezení proudu při dosažení hodnoty 3 A, je toto řešení energeticky úspornější. Výkonová ztráta na odporu při maximálním proudu je i tak nezanedbatelných 3,51 W.

3.2.2 Řízení spínače

Použitým spínacím prvkem je unipolární tranzistor MOSFET IRF9540 s kanálem typu P. K jeho ovládání je v mikrokontroléru použita CCP jednotka v režimu generace impulzů PWM, která je nakonfigurovaná na pin RC2. Jelikož potřebujeme, aby se tranzistor MOSFET co nejvíce otevíral, je nutné vyšší ovládací napětí než na výstupu mikrokontroléru. Proto byly sestaveny obvody řízení spínače, jak je uvedeno v *Obr. 3.5*.



Obr. 3.5 Schéma řízení spínače

Signálem PWM z výstupu mikrokontroléru je ovládán bipolární tranzistor Q_2 , který má v obvodu báze-kolektor zapojenou antisaturační diodu. Ta slouží k tomu, aby se tranzistor nedostal do oblasti hluboké saturace, čímž by se prodloužila jeho doba vypínání. Tranzistory Q_1 a Q_3 jsou komplementární. Mají podobné vlastnosti, ale různé typy vodivosti. To znamená, že k jejich otevření je zapotřebí různých polarit napětí U_{BE} . Při nulovém napětí na výstupu mikrokontroléru je tranzistor Q_1 zavřen. To způsobí kladné napětí U_{BE} na tranzistoru Q_3 a

následně jeho otevření. Na gate tranzistoru MOSFET je přivedeno napájecí napětí U_{cc} a Zenerova dioda D_{Z1} je polarizována v propustném směru. Napětí U_{GS} je tedy nulové a tranzistor MOSFET je zavřen.

Pokud je PWM signál ve stavu logické „1“, tranzistor Q_2 se otevře. Na tranzistoru Q_1 je nyní záporné napětí U_{BE} a tudíž se také otevře. Naopak tranzistor Q_3 je nyní zavřen. Gate tranzistoru MOSFET je přizemněn a v důsledku závěrně polarizované Zenerovy diody D_{Z1} bude napětí $U_{GS} = -15$ V. Kdyby Zenerova dioda chyběla, byla by dle katalogu výrobce [w2] překročena hodnota maximálního napětí $U_{GS} = \pm 20$ V. Tranzistor je otevřen. Gate je kapacita, skrze kterou dokážou protéct zkratové proudy a proud rezistorem R_6 tyto špičkové proudy hradlem MOSFET omezuje. Kondenzátor C_7 přemostňuje velký odpor R_8 pro střídavý signál. Při spínací frekvenci se tedy chová jako zkrat a pro případné nežádoucí stejnosměrné signály jako rozpojený obvod, čímž zapojuje do Gatu značnou impedanci R_8 a proud Zenerovo diodu je omezen.

3.2.3 Výpočet indukčnosti

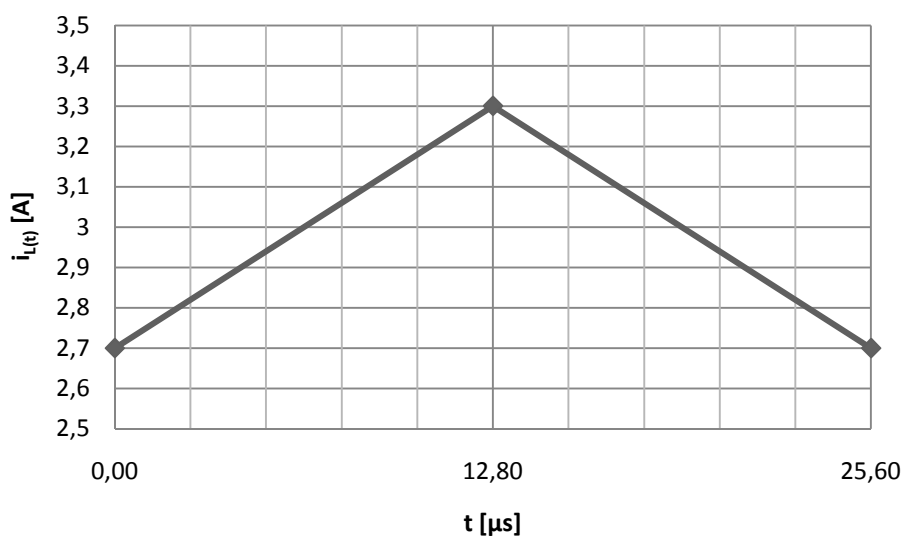
Indukčnost je spínána tranzistorem MOSFET, který je řízen signálem PWM. Frekvence spínání je klíčovým parametrem určujícím velikost indukčnosti. Byla vypočtena na hodnotu $f_{PWM} = 39,06$ kHz, takže doba jedné periody je $T_{PWM} = 25,6$ μ s.

$$U_L = L \frac{di_{L(t)}}{dt} \quad (3.9)$$

Napětí na indukčnosti lze vypočíst ze známého vztahu (3.9). Po úpravě a zjednodušení na lineární průběh proudu lze psát rovnici pro výpočet indukčnosti (3.10). Proud indukčností je stavová veličina a mění se spojitě. Protože největší zvlnění proudu způsobí poloviční střída signálu PWM, při které je tranzistor půl periody zapnut a půl periody vypnut, jsou hodnoty napětí $U_{MAX} = 30\sqrt{2}$ V a doby periody T_{PWM} poděleny dvěma. Zvolené maximální přípustné zvlnění proudu je $\Delta I = 20$ %, takže při proudu $I_{STR} = 3$ A je to 0,6 A.

$$L = \frac{(U_{MAX} \cdot T_S)/2}{\Delta I} = \frac{(30\sqrt{2} \cdot 25,6 \cdot 10^{-6})/2}{0,6} = 480 \mu H \quad (3.10)$$

Průběh proudu indukčností v jedné periodě T_{PWM} za uvedených skutečností ilustruje Obr. 3.6.

Obr. 3.6 Proudů indukčnosti v průběhu jedné periody T_{PWM}

K sestavení indukčnosti bylo použito jádro ETD34 z materiálu 3F3. V katalogovém listu jádra [w5] je uvedena efektivní plocha podílející se na vedení magnetického indukčního toku $S_{EF} = 97,1 \text{ mm}^2$. Z grafu katalogového listu materiálu 3F3 [w6] je zjištěno, že při frekvenci $f_{PWM} = 39,06 \text{ kHz}$ je maximální přípustná magnetická indukce (z hlediska ztrát v jádře a vlastností materiálu) přibližně $B = 200 \text{ mT}$. Ze vztahu (3.11) lze tedy vypočítat indukční tok jádrem φ :

$$\varphi = \int B \, dS \quad (3.11)$$

$$\varphi = B \cdot S_{EF} = 200 \cdot 10^{-3} \cdot 97,1 \cdot 10^{-6} = 19,42 \, \mu\text{Wb} \quad (3.12)$$

Po zjištění této veličiny můžeme vypočítat počet závitů, které je nutné na cívku navinout:

$$N = L \cdot \frac{di}{d\varphi} \quad (3.13)$$

$$N = L \cdot \frac{I_{MAX}}{\varphi} = 480 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3,3}{19,42 \cdot 10^{-6}} = 81,6 \cong 82 \text{ závitů} \quad (3.14)$$

Průměr drátu byl vypočten na 0,6 mm při bifilárním vinutí. Tyto hodnoty byly určeny s ohledem na vliv skin efektu na dané frekvenci. Proudová hustota $J \text{ [A/mm}^2\text{]}$ je vypočtena v rovnicích (3.15) a (3.16).

$$S_D = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,6^2}{4} = 0,28 \text{ mm}^2 \quad (3.15)$$

$$J = \frac{I_{\text{STR}}}{2 \cdot S_D} = \frac{3}{2 \cdot 0,28} = 5,36 \text{ A/mm}^2 \quad (3.16)$$

Výpočet vzduchové mezery δ [mm] ve středovém sloupku jádra ETD34 se provede z rovnice 3.17, která vychází z Hopkinsonova zákona.

$$\delta = \frac{N^2 \cdot S_{\text{EF}} \cdot \mu_0}{L} = \frac{82^2 \cdot 97,1 \cdot 10^{-6} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{480 \cdot 10^{-6}} = 1,71 \text{ mm} \quad (3.17)$$

Výsledná mezera 1,71 mm byla vyfrézována ruční frézou s diamantovým kotoučem. Měděný drát byl nejprve navinut na kostru, do které byly následně vloženy a sponkou sepnuty dvě jádra ETD34. Hotová kostra byla zapájena do DPS.

3.2.4 Výpočet chladičů

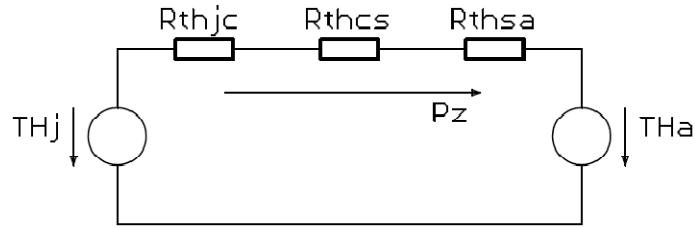
V obvodu spínaného zdroje jsou celkem 3 výkonové prvky, které je třeba chladit. Proto je nezbytné vypočítat celkové ztráty na každém z nich a určit velikosti chladičů.

3.2.4.1 Stabilizátor napětí L7805

Zpětnovazební stabilizátor napětí L7805 pracuje v lineárním režimu, takže i při malých proudech je na něm poměrně velký ztrátový výkon, díky kterému vzniká na pouzdře součástky teplo, které je potřeba odvést. Vstupní napětí připojené ke stabilizátoru je $U_{\text{IN}} = 15\sqrt{2}$ V, výstupní napětí $U_{\text{OUT}} = 5$ V a maximální odběr zařízení byl určen na $I_Z = 0,3$ A. Pomocí těchto parametrů lze vypočítat ztrátový výkon P_Z :

$$P_Z = (U_{\text{IN}} - U_{\text{OUT}}) \cdot I_Z = (15\sqrt{2} - 5) \cdot 0,3 = 4,87 \text{ W} \quad (3.18)$$

Podle [4] byl sestaven náhradní obvod tepelných přechodů (Obr. 3.7). Tepelné přechody jsou místa s rozdílnou teplotou, které jsou charakterizovány tepelným odporem [4]. Pro řešení chladičového obvodu je nutné lokalizovat tepelné přechody a stanovit jejich tepelný odpor [4].



Obr. 3.7 Náhradní obvod tepelných přechodů pro L7505

Z katalogu součástky [w7] byly zjištěny následující parametry: tepelný odpor přechodu pouzdro $R_{\theta_{jc}} = 5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ a maximální provozní teplota $\vartheta_j = 150 \text{ } ^\circ\text{C}$. Tepelný odpor chladiče je značen $R_{\theta_{sa}}$. Mezi pouzdem a chladičem je z izolačních důvodů umístěna slídová podložka, která má tepelný odpor $R_{\theta_{cs}} = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Protože součástka pracuje v uzavřené skříni, kde je minimální proudění vzduchu, je předpokládána teplota okolí $\vartheta_a = 45 \text{ } ^\circ\text{C}$. Celkový tepelný odpor se potom spočítá následovně:

$$R_{\theta} = \frac{(\vartheta_j - \vartheta_a)}{P_z} = \frac{(150 - 45)}{4,87} = 21,56 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (3.19)$$

Nyní jsou známy všechny veličiny pro určení hodnoty tepelného odporu chladiče $R_{\theta_{sa}}$:

$$R_{\theta_{sa}} = R_{\theta} - R_{\theta_{jc}} - R_{\theta_{cs}} = 21,56 - 5 - 1,2 = 15,36 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (3.20)$$

Této hodnotě by odpovídal chladič V4330N s tepelným odporem $15 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Protože je ale nutné z konstrukčních důvodů zmenšit jeho tloušťku o 1 mm, je k součástce připojena vyšší varianta tohoto chladiče: V4330K, která má tepelný odpor $10 \text{ } ^\circ\text{C/W}$. Tím je zajištěno, že po zmenšení tloušťky chladiče hodnota tepelného odporu nepřesáhne $R_{\theta_{sa}}$.

3.2.4.2 MOSFET tranzistor IRF9540

Literatura [5] uvádí, že výkon přeměněný v tranzistoru na teplo je dán velikostí napětí U_{DS} mezi Drainem a Sourcem a proudem kanálu I_D . Napětí U_{DS} na otevřeném kanálu je úměrné velikosti odporu kanálu $r_{DS(ON)}$ a proudu I_D .

Po dosažení maximální střední hodnoty proudu $I_D = 3\text{ A}$ a odporu kanálu $r_{DS(ON)} = 0,20 \text{ } \Omega$ (zjištěného z katalogu [w2]) do rovnice (3.21) obsažené v [5], zjistíme propustné ztráty. Je to ale maximální hodnota platná pro případ trvalého sepnutí prvku. Poměr střídavý signálu bude uvažován až při výpočtu chladiče.

$$P_D = I_D^2 \cdot r_{DS(ON)} = 3^2 \cdot 0,20 = 1,8 \text{ W} \quad (3.21)$$

V [5] je psáno: Uvedenou hodnotu kolektorové ztráty je nutné zvětšit o výkon spotřebovaný při spínání. Tento výkon je způsoben skutečností, že spínání netrvá nekonečně krátkou dobu, takže v jeho průběhu může být protékající proud poměrně velký a zároveň může být značná i velikost napětí U_{DS} .

Podle [5] se výkon způsobený spínacími ztrátami P_S vypočte dle vztahu (3.22). Ve vztahu je zahrnut předpoklad, že uprostřed intervalu spínání i rozpínání je velikost napětí $U_{DSstř} = \frac{1}{2} U_{CC}$ a velikost proudu $I_{Dstř} = \frac{1}{2} I_D$.

$$P_S = U_{DSstř} \cdot I_{Dstř} \cdot \frac{\text{čas sepnutí (rozepnutí)}}{\text{čas mezi sepnutím a rozeptnutím}} \quad (3.22)$$

Použitý kmitočet spínání je $F_{PWM} = 39,06\text{kHz}$, což odpovídá periodě $T_{PWM} = 25,6 \mu\text{s}$, takže k sepnutí a rozeptnutí dojde při poloviční střídě po $12,8 \mu\text{s}$. Tím dostáváme čas mezi sepnutím a rozeptnutím $T_{ON/OFF} = 12,8 \mu\text{s}$. Z katalogu tranzistoru [w2] byli zjištěny hodnoty: času zpoždění při zapnutí $t_{d(ON)} = 16 \text{ ns}$, času zpoždění při vypnutí $t_{d(OFF)} = 34 \text{ ns}$, doby náběhu $t_r = 73 \text{ ns}$ a doby doběhu $t_f = 57 \text{ ns}$. Celkový čas sepnutí je pak $t_{ON} = t_{d(ON)} + t_r = 89 \text{ ns}$ a rozeptnutí $t_{OFF} = t_{d(OFF)} + t_f = 91 \text{ ns}$. Aritmetickým zprůměrováním pak dostáváme čas sepnutí i rozeptnutí $t_{ON/OFF} = 90 \text{ ns}$. Ztrátový výkon P_D při spínání tedy je:

$$P_S = U_{DSstř} \cdot I_{Dstř} \cdot \frac{t_{ON/OFF}}{T_{ON/OFF}} = \frac{30\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{90 \cdot 10^{-9}}{12,8 \cdot 10^{-6}} = 0,22 \text{ W} \quad (3.23)$$

Celkový ztrátový výkon je součtem obou předchozích:

$$P = P_D + P_S = 1,8 + 0,22 = 2,02 \text{ W} \quad (3.24)$$

V literatuře [6] je uvedeno: Pokud je tranzistor spínán, vznikají jen krátkodobé špičky tepelné zátěže. Ty se mohou, protože křemík je dobrým vodičem tepla, v polovodičovém krystalu dobře rozptýlit a být odvedeny. To ale znamená, že tranzistor je možné v impulzním provozu zatěžovat poněkud více než v statickém. Přesnější informace v tomto smyslu nám poskytuje graf přechodové impedance $Z_{\theta jc}$. V závislosti na střídě zatěžování, velikosti čipu, montáži a vlastnostech pouzdra dostaneme pro tepelný odpor $R_{\theta jc}$ více nebo méně příznivější hodnotu a to právě $Z_{\theta jc}$. Pomocí této veličiny lze vypočítat dynamické zatížení.

Přechodová impedance $Z_{\theta jc}$ je největší při střídě $D = 0,5$. Jelikož bude tranzistor v tomto režimu pracovat, je tato největší hodnota respektována v odečítání z grafu závislosti přechodové impedance na kmitočtu v katalogu výrobce tranzistoru [w2]. Na kmitočet

$F_{\text{PWM}} = 39,06 \text{ kHz}$ připadá přechodová impedance $Z_{\theta_{jc}} = 5 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Z katalogu [w2] byla také zjištěna maximální pracovní teplota přechodu $\theta_j = 175^\circ\text{C}$ a opět je uvažována slídová podložka mezi pouzdrem a chladičem s přechodovým odporem $R_{\theta_{cs}} = 1,2 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Přechodový odpor chladiče $R_{\theta_{sa}}$ se pak spočítá:

$$R_{\theta_{sa}} = \frac{\theta_j - \theta_a}{P} - Z_{\theta_{jc}} - R_{\theta_{cs}} = \frac{175 - 45}{2,02} - 5 - 1,2 = 58,16 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (3.25)$$

Na základě výsledku výpočtu (3.25) byl k součástce připojen malý chladič DO2A, který má přechodový odpor $22 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

3.2.4.3 Schottkyho dvojitá dioda MBR20100CT

Součástka MBR20100CT je sice zatěžována impulzně, ale protože výrobce v katalogu [w8] neuvádí žádné dynamické parametry, budou uvažovány pouze propustné ztráty.

Součástkou teče maximální proud $I_D = 3\text{A}$, který na ní vytváří úbytek $U_F = 0,85 \text{ V}$, takže ztrátový výkon je $P_Z = I_D \cdot U_F = 2,55 \text{ W}$. Z katalogu [w8] byli získány hodnoty: maximální teplota přechodu $\theta_j = 150^\circ\text{C}$, tepelný odpor přechod-pouzdro $R_{\theta_{jc}} = 2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ a tepelný odpor přechod-okolí (bez chladiče) $R_{\theta_{ja}} = 60 \text{ }^\circ\text{C/W}$. Celkový tepelný odpor tedy je:

$$R_{\theta} = \frac{(\theta_j - \theta_a)}{P_Z} = \frac{(150 - 45)}{2,55} = 41,18 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (3.26)$$

S použitím slídové podložky je tepelný odpor chladiče:

$$R_{\theta_{sa}} = R_{\theta} - R_{\theta_{jc}} - R_{\theta_{cs}} = 41,18 - 2 - 1,2 = 37,98 \text{ }^\circ\text{C/W} \quad (3.27)$$

Při takovémto výsledku by nebylo nutné použít chladič, protože tepelný odpor $R_{\theta_{ja}}$ je dostatečně velký, avšak pro jistotu byla součástka opatřena malým chladičem DO2A.

3.2.5 Modul LCD displeje

Aby bylo možné vestavět spínaný zdroj do konstrukční krabičky, bylo nutné umístit LCD displej s klávesnicí na oddělenou DPS od spínaného zdroje. Navržené schéma je v příloze F a DPS pak v příloze G. Použitý LCD displej MC1602E-TVR má standardní řadič HD44780 a slouží k zobrazování aktuálního výstupního napětí a proudu. Signál R/W je uzemněn, takže

do displeje je možné pouze zapisovat, nikoliv z něho číst. Čtyři tlačítka P-B1715 slouží ke změně hodnoty výstupního napětí spínaného zdroje. Na displeji se zobrazuje navolená hodnota a stisknutím tlačítka „CHANGE“ je možné pomocí tlačítek „UP“ a „DOWN“ změnit hodnotu výstupního napětí. Při stisknutí tlačítka „UP“ se hodnota inkrementuje a při stisku „DOWN“ se naopak dekrementuje. Po potvrzení hodnoty tlačítkem „ENTER“ začne spínaný zdroj regulovat napětí na zadanou hodnotu.

3.3 Návrh software

V souboru „*Spinany_zdroj.c*“ na přiloženém CD je kompletní okomentovaný zdrojový kód. Mikrokontrolér PIC16F73 je velmi podobný tomu, co byl použit v modulu zobrazování (kapitola 2.), proto i začátek programu je analogický. Nejprve bylo nutné nastavit za pomoci katalogu [w4] konfigurační slovo programu, což zahrnovalo nastavit oscilátor jako HS (20 MHz) a vypnout časovač Watchdog. Následné nastavení řídicích registrů je obsaženo ve funkci *setup_mcu*, volané na začátku hlavní funkce *main*.

Po nastavení všech registrů je funkcí *display_initialization* inicializován LCD displej, konkrétně jde o smazání displeje, nastavení kurzoru na začátek, vypnutí blikání, zapnutí posunu vpravo, nastavení 8-bitového režimu přenosu a fontu 5x10. Po těchto nastaveních následuje funkce *display_introduction*, která vypíše na displej úvodní texty oddělené čekací funkcí *wait20*. Ta používá ke své práci kombinaci cyklu *for* a čítače TMR1. Po nastavení kanálu A/Č převodníku (viz dále) a povolení globálního přerušení následuje nekonečná smyčka, v níž se testuje smáčknutí tlačítka „CHANGE“ a na LCD displej se vypisují aktuální hodnoty veličin. Po stisku tlačítka „CHANGE“ je umožněno nastavovat tlačítky „UP“ a „DOWN“ požadovanou hodnotu napětí. Nastavování je ukončeno stiskem tlačítka „ENTER“. Tlačítka jsou softwarově ošetřena proti zákmitu příslušnou proměnnou, která je inkrementována v přerušení a dokud po vynulování tlačítkem nedosáhne hodnoty 200, jsou změny napětí na tlačítku ignorovány. Přerušení je vyvoláno přetečením čítače TMR0 každou 1 ms a provádí se v něm všechny úkony spojené s regulací. Což je měření proudu a napětí, regulace napětí a případné odstavení zdroje při přesáhnutí maximálního proudu.

3.3.1 A/Č Převodník

Mikrokontrolér PIC16F73 má 8-bitový A/Č převodník s pěti kanály na bráně RA. Aby mohl být spuštěn převod, je nejprve nutné podle katalogu [w4] nastavit v registrech ADCON0 a ADCON1 příslušné bity, mezi kterými je zahrnuto určení rychlosti konverze, nastavení použitých pinů jako analogových vstupů a vybrání aktivního kanálu. Po přepnutí kanálu je nutné počkat, než se nabije „sample and hold“ obvod na vstupu převodníku na hodnotu měřeného napětí a poté se nastavením bitu GO/DONE spustí konverze. Ta je ukončena, když je bit GO/DONE vynulován a v registru ADRES jsou poté připravena naměřená data. Aby nebyli zbytečně ve funkci přerušeni čekací cykly, je čekání na nabití „sample and hold“ obvodu a též na konec konverze realizováno vhodným rozmístěním jednotlivých příkazů po bloku funkce přerušení.

3.3.2 Přepočítání napětí a proudu pro zobrazení na LCD displeji

Znaky, které se vypisují na displej, jsou uloženy v globálním poli proměnných typu *char* s názvem *DATA* o velikosti $2 \cdot 16$, a protože jde o textový řetězec, tak plus jedna proměnná pro znak „\0“, který značí konec řetězce. Výpis na displeji lze změnit přepsáním znaků v tomto poli. Při zobrazování aktuálních veličin v reálných jednotkách ([V], [A]) je tedy nutné, převést je na jednotlivé znaky a ty teprve uložit do pole *DATA*. To je realizováno funkcí:

```
void display_fill(unsigned char adr, unsigned int value, unsigned int multiple)
{
    unsigned int data_disp,tens1,tens100,ones,decimals;

    data_disp = (multiple * value);
    data_disp = (data_disp / 100);
    tens1 = (data_disp / 100);           // výpočet počtu desítek
    tens100 = (tens1 * 100);
    ones = ( (data_disp - tens100) / 10 ); // výpočet počtu jednotek
    decimals = ( (data_disp - tens100) - (tens*10) ); // výpočet počtu desetin
    DATA[adr] = (unsigned char)( tens1 + 0x30); // umístění hodnot do pole DATA
    DATA[adr+1] = (unsigned char)(ones + 0x30);
    DATA[adr+3] = (unsigned char)(decimals + 0x30);
}
```

Prog. 3.1 Přepočítání veličin pro zobrazení na LCD displej

Funkce *display_fill* má tři vstupní parametry, kterými jsou: adresa (*adr*), hodnota veličiny (*value*) a násobitel (*multiple*). Nejprve se do proměnné *data_disp* uloží hodnota *value* vynásobená násobitelem *multiple*. Ten byl předem vypočítán a pro každou veličinu je jiný.

Například násobitel pro změřené výstupní napětí je vypočten takto: referenční napětí 4,7 V, snižené z 5 V o úbytek na Schottkyho diodě D_2 (příloha D), odpovídá maximální hodnotě 255 změřené A/Č převodníkem. Maximální výstupní napětí děliče je 4,5 V (viz kapitola 3.2.1), což odpovídá hodnotě 244 a výstupnímu napětí na svorkách zdroje 30 V. Nejmenší hodnota, kterou lze naměřit, je dána podílem těchto čísel a bez požití čísla s plovoucí desetinou čárkou, musí být tato hodnota vynásobena 1000 (přesnost na jedno desetinné číslo):

$$multiple = \frac{30 \text{ V}}{244} \cdot 1000 = 123 \quad (3.28)$$

V proměnné *value* je aktuální hodnota výstupní veličiny z převodníku, která je po vynásobení konstantou *multiple* přepočtena na jednotky [V]. Desetinná čárka je posunuta o tři hodnoty vpravo, ale protože nejmenší hodnotou zobrazovanou na displej je desetina, je následně vydělena 100. Do proměnné *tens1* je na dalším řádku uložen počet desítek, do proměnné *ones* počet jednotek a do *decimals* počet desetin. Desetinná čárka je v *DATA* trvale uložena na adrese *adr+2* a obnovují se pouze tři vypočtená čísla. V posledních třech řádcích jsou proměnné přidáním hodnoty 30h převedeny na znaky ASCII tabulky, přetypovány na *unsigned char* a uloženy do pole *DATA* na adresu *adr*, *adr+1* a *adr+3*.

```
long filter (int in, long memory, int shift)
{
    long difference, out_f;

    difference = (((unsigned long)(in)) << 16) - memory;
    if(difference > 0)
        memory = memory + ((unsigned long)difference >> shift);
    else
        memory = memory - ((unsigned long)(0 - difference) >> shift);
    out_f = memory;
    return(out_f);
}
```

Prog. 3.2 Číslicový filtr

Aby znaky na displeji nekmítaly, byl naprogramován číslicový filtr typu dolní propust, který je realizován funkcí *filter* (Prog. 3.2). Ta na základě vstupní proměnné *in*, paměťové proměnné *memory* a posunu *shift*, určí rozdíl *difference*. Prostřednictvím *difference* sleduje paměťová hodnota *memory* vstupní hodnotu *in*, která je 2^{16} krát větší. K této hodnotě se ale nepohybuje pouhým přičtením hodnoty *difference* v jednom kroku, nýbrž v 2^{shift} krocích.

3.3.3 PS Regulátor

Regulátor typu P (proporcionální) dokáže rychle reagovat na změny požadované hodnoty výstupního napětí, ale sám o sobě nedokáže vytvořit nulovou regulační odchylku. To není problém pro S regulátor (sumační), který ale naopak reaguje velmi pomalu. Paralelním zapojením obou jmenovaných vznikne PS regulátor, který dokáže poměrně rychle reagovat na změny požadované hodnoty a zároveň umí vytvořit nulovou odchylku. Softwarová realizace takovéto regulace je napsána ve funkci *regulation*, která je volána při každém přerušení od čítače TMR0 (*Prog. 3.3*).

```

void regulation (void)
{
int Ue, PROP, SUM, PWM;

    if(!STOP_I)
    {
        Ue = Uw - Uout;    // výpočet regulační odchylky
        PROP = Ue * Kp;    // proporcionální regulace
        SUM = Ue * Ks;    // sumační regulace
        if (!STOP_U)
            SUM_MEM = SUM_MEM + SUM; // přičtení do paměťové proměnné S reg.
        OUT = PROP + SUM_MEM;    // součet P a S regulace

        if( ((OUT>32704)&&(Ue>0)) || ((OUT<0)&&(Ue<=0)) ) // ošetření saturace
            STOP_U = 1;
        else
            STOP_U = 0;
        if(OUT<0) // hlídání přetečení čísla PWM
            OUT = 0;
        if(OUT > 32704)
            OUT = 32704;
        PWM = OUT >> 6; // vydělení na 9-bitové rozlišení PWM modulace
    }
    else
    {
        SUM_MEM = 0;
        PWM = 0;
    }
    CCP1L = (PWM >> 2) & 0xFF; // naplnění registru střídy
    CCP1CON &= 0xCF;
    CCP1CON |= (PWM << 4) & 0x30;
}

```

Prog. 3.3 PS regulátor

Regulace je spuštěna, pokud výstupní proud nepřesáhl maximální dovolenou mez. Tato skutečnost je signalizována bitovou proměnnou *STOP_I*, která je při přetížení nastavena na jedničku ve funkci *overload*. Pokud je *STOP_I* = 1, je nastavena nulová střída signálu a regulace je do následujícího volání funkce vypnuta. Při *STOP_I* = 0 se nejprve provede výpočet regulační odchylky *Ue* odečtením skutečné hodnoty *Uout* od požadované *Uw*. Následně je odchylka vynásobena proporcionální konstantou $K_p = 65$ a sumační konstantou $K_s = 2$. Hodnoty konstant byly voleny experimentálně. Pokud není regulátor v saturaci, což je

signalizováno bitovou proměnnou *STOP_U*, je do paměťové proměnné *SUM_MEM* přičten výsledek *S* regulace. Do proměnné *OUT* je poté uložen součet obou regulací. V druhé části funkce je ohlídána saturace regulátoru a ošetřeno přetečení proměnné *PWM*. Rozlišení signálu PWM je 9-bitové a na tento rozsah je nutné posunout bity v proměnné *OUT* před uložením do proměnné *PWM*. Na konci funkce se obsah proměnné PWM přesune do řídicích registrů střídavy mikrokontroléru.

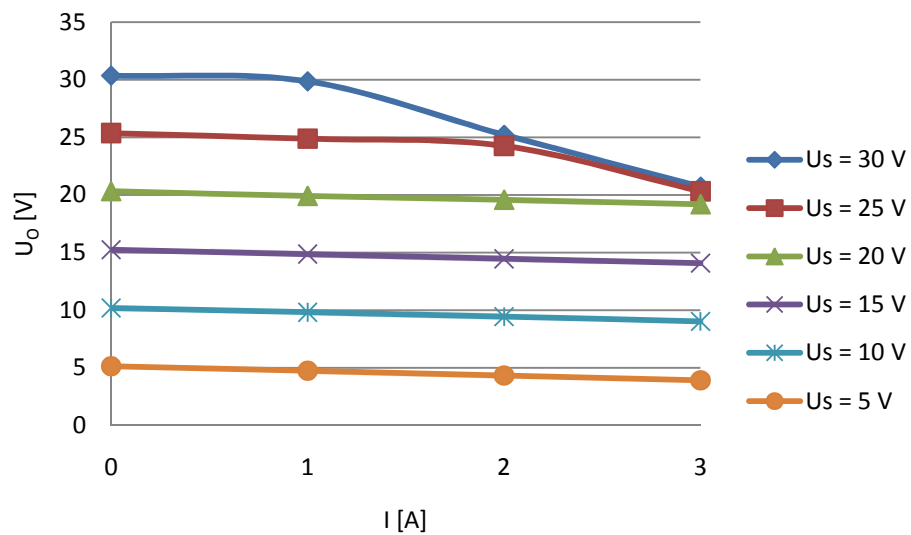
3.4 Měření parametrů

Po zapájení obou DPS, konstrukčním sestavení a odladění programu byla změřena zatěžovací charakteristika. Postup byl takový, že se po určitém kroku (5 V) nastavovalo požadované napětí U_S a poté se odečítala hodnota skutečného napětí U_O při výstupních proudech 0 A (naprázdno), 1 A, 2 A a 3 A. Zátěž představoval laboratorní drátový rezistor s jezdcem. Naměřené hodnoty jsou v *Tab. 3.2*.

$I [A]$	0	1	2	3
$U_S [V]$	$U_O [V]$			
30	30,35	29,95	25,21	20,71
25	25,36	24,88	24,25	20,31
20	20,31	19,9	19,57	19,18
15	15,23	14,84	14,45	14,08
10	10,18	9,81	9,43	9,01
5	5,12	4,73	4,32	3,9

Tab. 3.2 Naměřené hodnoty

Z naměřených hodnot byla sestavena zatěžovací charakteristika (*Obr. 3.8*), ze které je vidět, že zdroj neodpovídá předpokládaným parametrům. Při bližším prozkoumání příčiny problému bylo zjištěno, že na výstupních svorkách transformátoru při zvyšování výkonu nad určitou mez výrazně klesalo napětí. Použitý transformátor tedy nedostačuje svým výkonem a je nutné ho vyměnit za výkonnější. Dalším faktorem, který deformuje zatěžovací charakteristiku, je rezistor pro měření proudu. Při maximální zátěži 3 A se na něm vytváří úbytek 1,17 V, o který je zmenšena výstupní hodnota napětí na svorkách zdroje. Chyba by šla odstranit tím způsobem, že by se v programu dle protékajícího proudu určil úbytek na odporu a ten by se přičetl k regulační odchylce.



Obr. 3.8 Zatěžovací charakteristika

Závěr

Po navržení celkové koncepce a blokového schématu byla prostudována literatura [1], [7] a [8]. Na základě této literatury byly s ohledem na uvedená návrhová pravidla sestaveny všechny DPS. Dle blokového schématu byly sestrojeny konstrukční prvky a po sestavení celého systému naprogramovány dva mikrokontroléry. Programování v jazyce C bylo studováno z literatury [9].

Výsledný efekt rotačního displeje je vyobrazen na fotografii v příloze H. Text je viditelný i za špatných světelných podmínek (ostré světlo), ale nejlépe je pozorovatelný v šeru či tmě. Do budoucna by bylo dobré dodat silnější motor a vyřešit přesnější měření otáček. Text se totiž i přes synchronizaci pomocí čtyř magnetů pomalu pohybuje v závislosti na otáčkách vlevo, nebo vpravo.

Spínaný zdroj sestavený pro účely řízení otáček stejnosměrného motoru rotačního displeje plní svou funkci dobře, protože jmenovité napětí použitého motoru je 12 V. V případě potřeby většího výstupního výkonu by bylo nutné dodat silnější transformátor.

Možnost využití rotačního displeje je dle mého názoru především v reklamě. Zařízení není v široké veřejnosti příliš známé, a proto má tu vlastnost, že na sebe dokáže poutat pozornost. Zobrazovaný text lze v programu jednoduše změnit a tak by se na displeji mohlo zobrazovat např. logo společnosti.

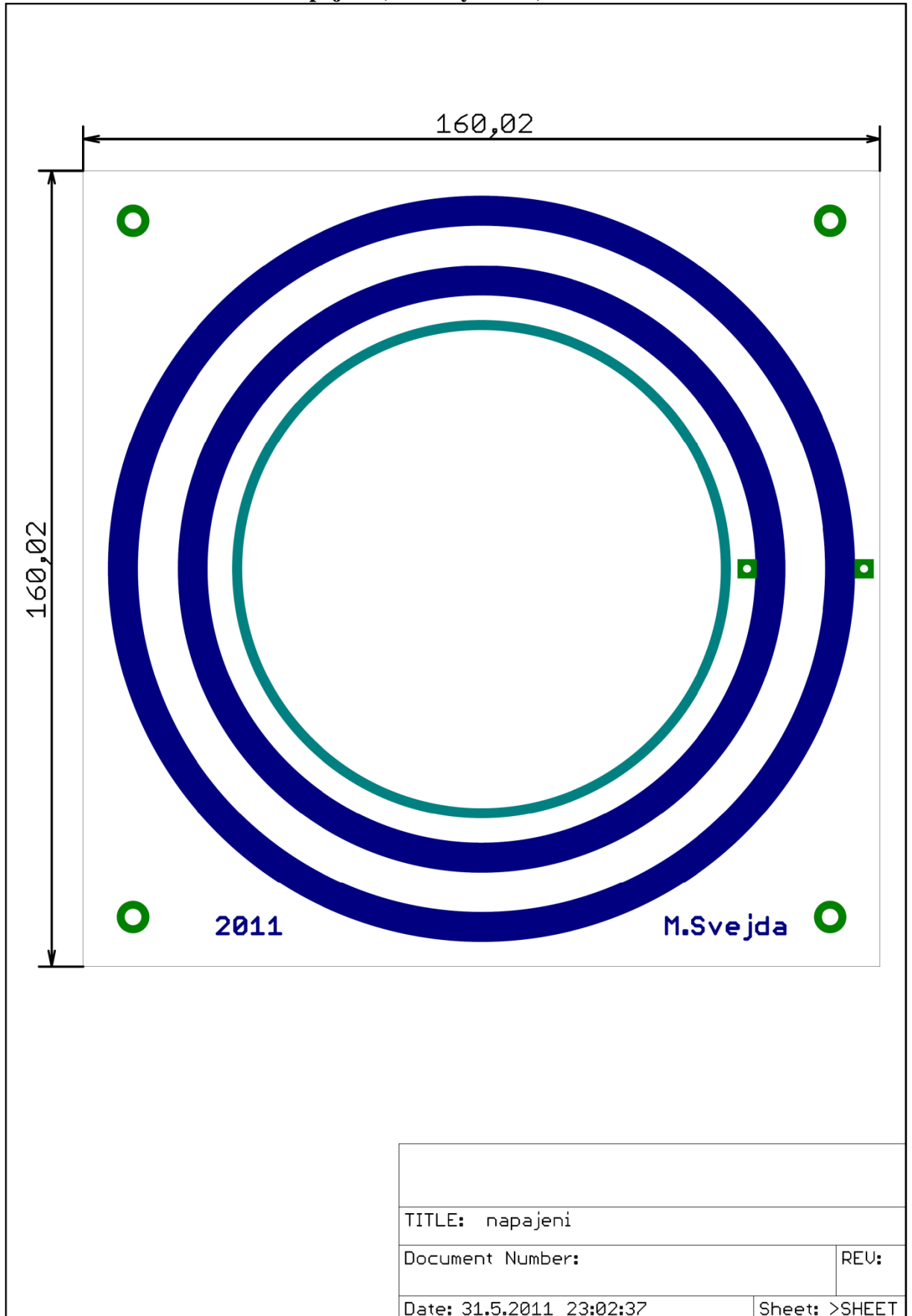
Použitá literatura

- [1] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce DPS : Principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2010. 128 s.
- [2] PINKER, Jiří. *Mikroprocesory a mikropočítače : Obecné principy konstrukce současných mikroprocesorů a mikropočítačů*. 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 160 s.
- [3] HAMMERBAUER, Jiří. *Elektronické napájecí zdroje a akumulátory*. vydání 2. Plzeň : Vydavatelství Západočeské univerzity, 1998. 181 s.
- [4] FUKÁTKO, Tomáš; FUKÁTKO, Jaroslav. *Teplo a chlazení v elektronice II.* 1. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2006. 120 s.
- [5] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky - 2. díl : Polovodičové prvky a elektronky*. Praha : BEN, 2005. 208 s.
- [6] STENGL, Jens Peer; TIHANYI, Jenö. *Výkonové tranzistory MOSFET*. 1. české vydání. Praha : BEN - technická literatura, 1999. 192 s.
- [7] JURÁNEK, Antonín; HRABOVSKÝ, Miroslav. *EAGLE pro začátečníky : uživatelská a referenční příručka*. 2. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2007. 192 s.
- [8] PLÍVA, Zdeněk. *EAGLE prakticky : Řešení problémů při běžné práci*. 2. vydání. Praha : BEN - technická literatura, 2010. 192 s.
- [9] HEROUT, Pavel. *Učebnice jazyka C - 1. díl*. Páté vydání. České Budějovice : KOPP, 2008. 281 s.
- [w1] *Uni- and Bipolar Hall IC Switches for Magnetic Field Applications* [online]. [s.l.] : Siemens Semiconductor Group, 1997-09-01 [cit. 2011-05-11]. Dostupné z WWW: <http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/270/318493_DS.pdf>.
- [w2] *IRF9540, SiHF9540 Power MOSFET* [online]. [s.l.] : Vishay Siliconix, 2011-5-11 [cit. 2011-05-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.vishay.com/docs/91078/91078.pdf>>.
- [w3] *PIC16F818/819 Data Sheet* [online]. [U.S.A.] : Microchip Technology Inc., 2004 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39598e.pdf>>.
- [w4] *PIC16F7X Data Sheet* [online]. [U.S.A.] : Microchip Technology Inc., 2002 [cit. 2011-05-20]. Dostupné z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/30325b.pdf>>.
- [w5] *ETD34/17/11 : ETD cores and accessories* [online]. [s.l.] : Ferroxcube, 2008 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.ferroxcube.com/prod/assets/etd34.pdf>>.

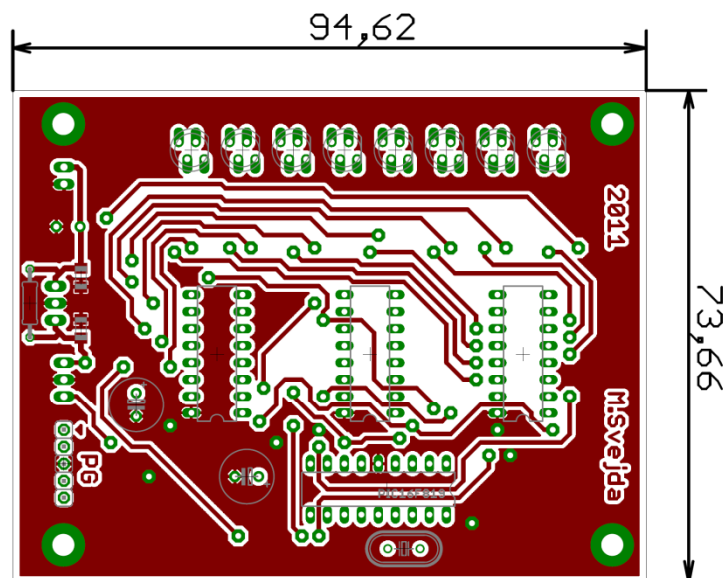
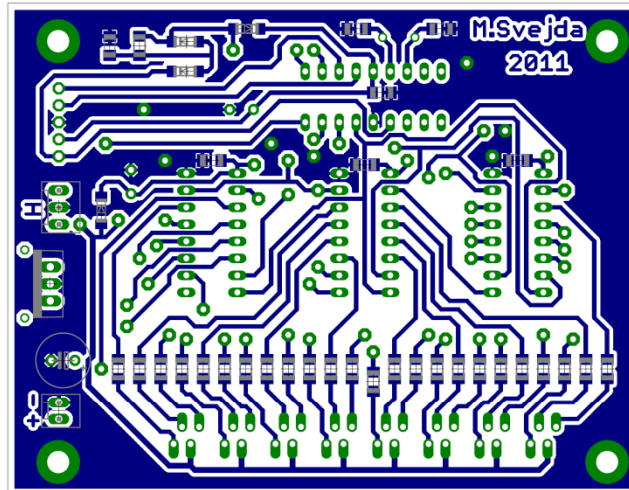
- [w6] *3F3 : Material specification* [online]. [s.l.] : Ferroxcube, 2008 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.ferroxcube.com/prod/assets/3f3.pdf>>.
- [w7] *L78xx, L78xxC, L78xxAB, L78xxAC : Positive voltage regulators* [online]. [s.l.] : STMicroelectronics, 2010 [cit. 2011-05-21]. Dostupné z WWW: <http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00000444.pdf>.
- [w8] *SwitchmodeTM Power Rectifiers* [online]. [s.l.] : Motorola, Inc., 1996 [cit. 2011-05-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/motorola/MBR2070CT.pdf>>.
- [w9] *TPIC6C595 : Power logic 8-bit shift register* [online]. Dallas : Texas Instrument Incorporated, 2005 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <<http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/tpic6c595.pdf>>.

Přílohy

Příloha A – DPS s dráhami napájení (rozměry v mm)

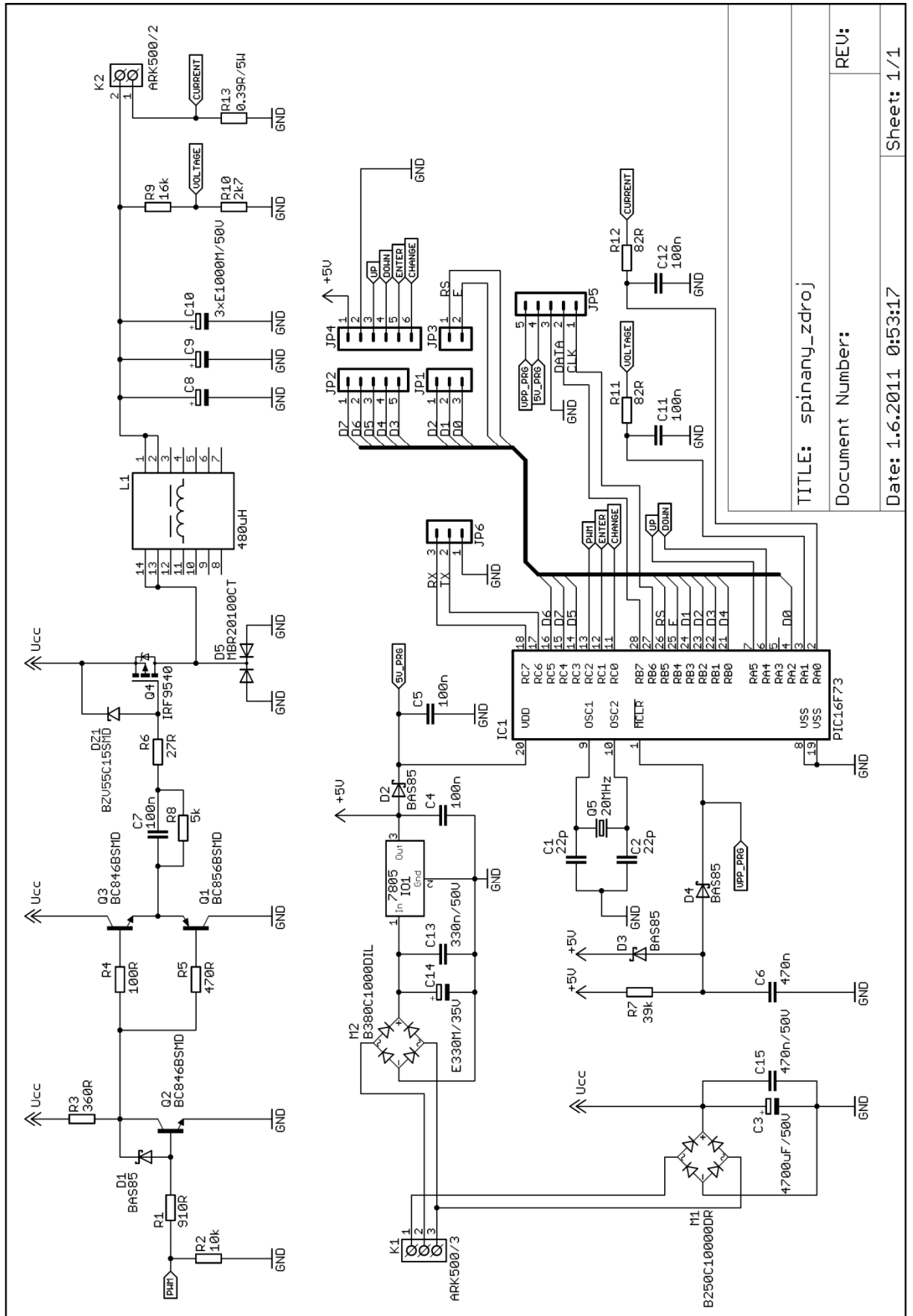


Příloha C – DPS zobrazovacího modulu (rozměry v mm)



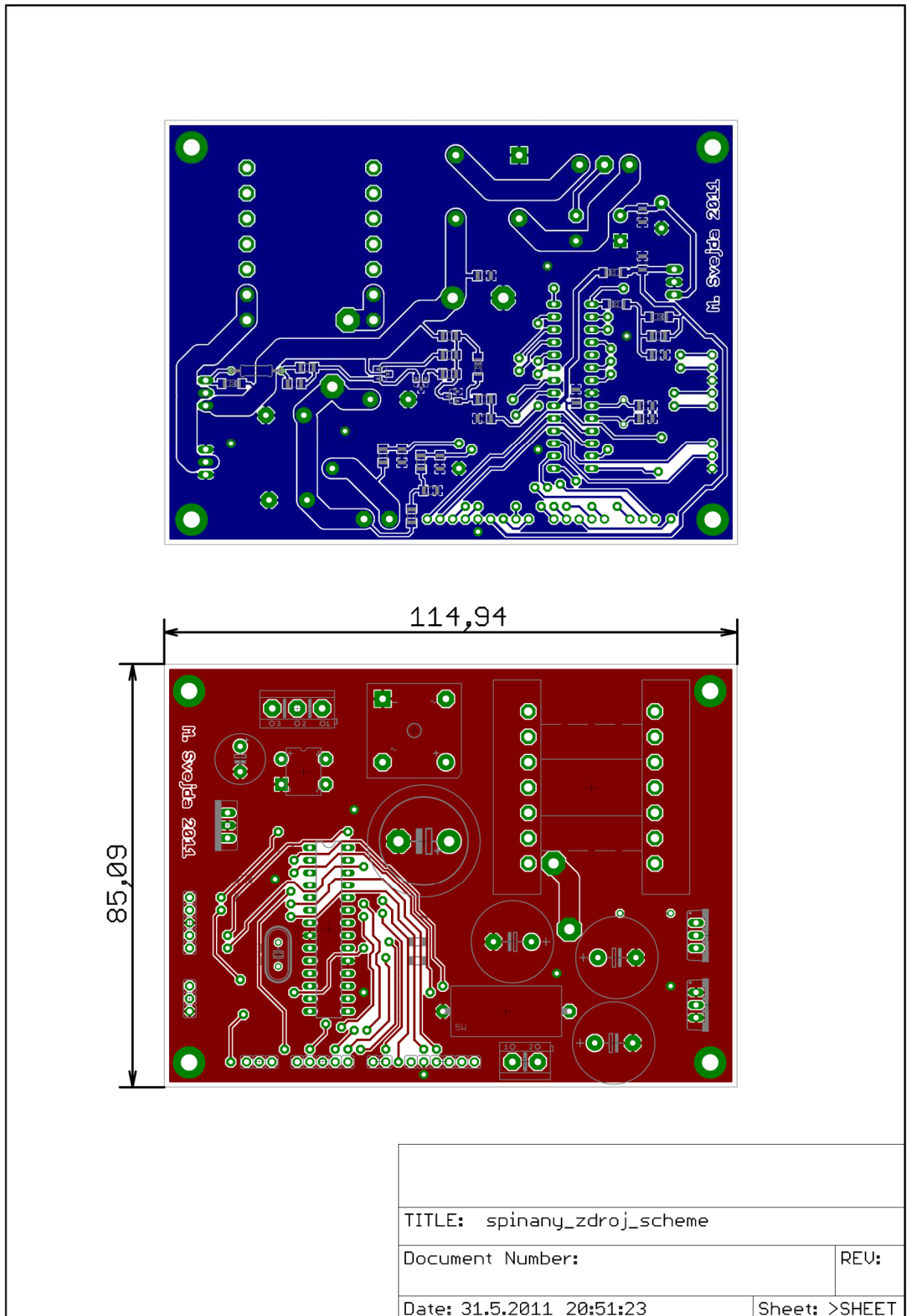
TITLE: rotacni_display_scheme	
Document Number:	REV:
Date: 31.5.2011 21:26:22	Sheet: >SHEET

Příloha D – Schéma spínaného zdroje

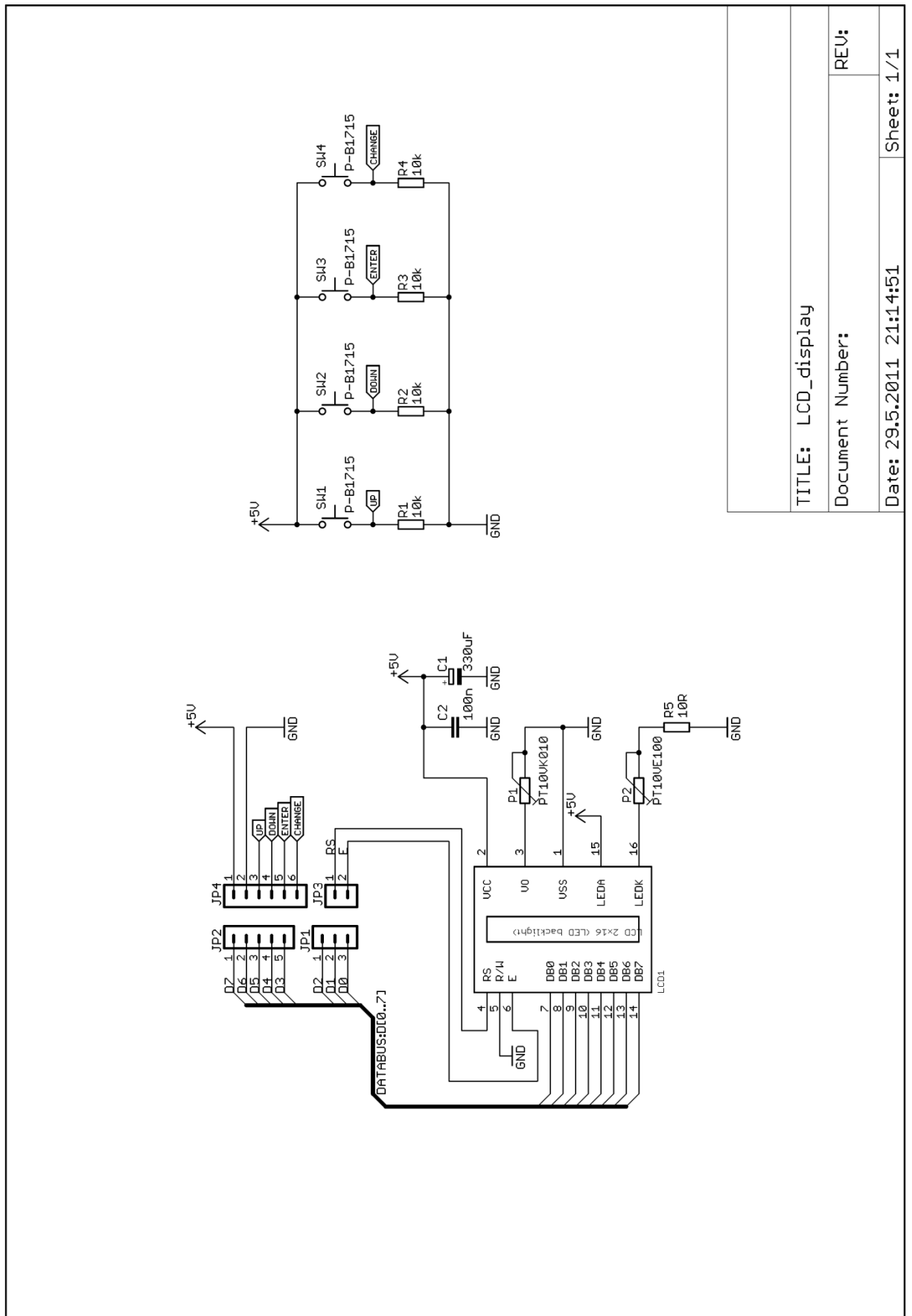


TITLE: spinany_zdroj
 Document Number:
 Date: 1.6.2011 0:53:17
 REV:
 Sheet: 1/1

Příloha E – DPS spínaného zdroje (rozměry v mm)



Příloha F – schéma modulu LCD displeje



TITLE: LCD_display

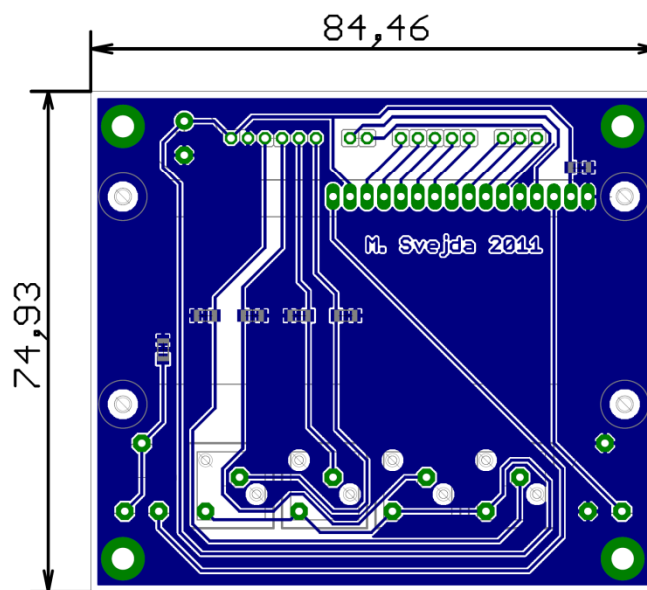
Document Number:

REV:

Date: 29.5.2011 21:14:51

Sheet: 1/1

Příloha G – DPS modulu LCD displeje (rozměry v mm)



TITLE: LCD_display_scheme	
Document Number:	REV:
Date: 31.5.2011 22:43:44	Sheet: >SHEET

Příloha H – Fotografie výsledku práce

