

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Servopohon s DC motorem

Marek John

Bakalářská práce

2014

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Marek John**
Osobní číslo: **I11264**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Servopohon s DC motorem**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

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

Cílem práce je navrhnout servopohon využívající klasický kartáčový stejnosměrný motor. Základem návrhu bude regulátor pro motor s polohovou zpětnou vazbou. Regulátor bude umět řídit otáčky a polohu natočení hřídele. Zpětná vazba musí být navržena tak, aby umožňovala kontinuální otáčení hřídele. potřeba rozpracovat návrh pro řízení malých motorů pro U 5 až 6V a I do 1A a návrh pro řízení větších motorů. Obzvláště u malých motorů bude součástí práce rešerše dostupných integrovaných obvodů a možných řešení. V praktické části bude jeden s přístupů realizován prakticky. Regulátor bude obsahovat rozhraní pro připojení k vyššímu celku, ideálně vyvedeny I2C a UART sběrnice. Součástí bude funkční komunikace přes vyvedené periferie.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:


- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
- [2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMEL AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
- [3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
- [4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Rozsival**
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **20. prosince 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. května 2014**

prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan

L.S.


Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2013

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 9.5.2014

Marek John

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Pavlovi Rozsivalovi za odborné vedení práce, ochotu a cenné rady, které mi pomohli tuto práci zkompletovat.

Anotace

Tato práce se věnuje funkci, řízení a zkonstruování regulátoru kartáčových stejnosměrných motorů. Teoretická část obsahuje seznámení s funkcí kartáčových motorů, s jejich jednotlivými částmi a s dalšími periferiemi, potřebnými k sestavení regulačního obvodu. Praktická část obsahuje návrh a konstrukci regulačního obvodu.

Klíčová slova

KM, PWM, Grayův kód, regulátor, tranzistor, mikročip, magnetické pole.

Title

Actuator with DC motors

Annotation

This bachelor's thesis describes function, control and construction of regulator of brushed DC motors. The theoretical part consists of introduction to function of brushed DC motors, its parts and other peripherals needed for construction of the control circuit. The practical part contains design and construction of control circuit.

Keywords

BM, PWM, Graycode, regulator, transistor, mikrochip, magneticfield

Seznam zkratk

DC - Direct current

BLDC - Brushless DC electric motor

KM - kartáčový motor

PWM - pulzně-šířková modulace

Seznam rovnic

Rovnice 1 – Ampérův zákon pro jeden vodič.....	17
Rovnice 2 – Ampérův zákon pro dvou cívkový motor.....	17
Rovnice 3 - Vztah pro výpočet polohy rotoru.....	22
Rovnice 4 - Závislost mezi měřenou polohou a výstupním napětím.....	24
Rovnice 5 - Poloha jezdce.....	24
Rovnice 6 - Poměr odporů	24
Rovnice 7 – Rovnice pro primární proud.....	25
Rovnice 8 – Rovnice pro sekundární napětí při $M = M_1$	26
Rovnice 9 - Rovnice pro sekundární napětí při $M = M_2$	26
Rovnice 10 – Rovnice pro výstupní napětí na prázdko.....	26

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Schéma dvoupólového kartáčového motoru.....	15
Obrázek 2 – Schéma třípólového kartáčového motoru	16
Obrázek 3 – Působení sil na vodič protékaný proudem.....	18
Obrázek 4 – Působení sil, magnetické siločáry, směr proudů v jednotlivých závitech a směr působení výsledné síly rotačního pohybu	19
Obrázek 5 – Ideální průběh proudu v cívce při komutaci.....	19
Obrázek 6 – Skutečný průběh proudu v cívce při komutaci	19
Obrázek 7 – Řízení směru otáčení za pomoci H můstku	21
Obrázek 8 – Princip inkrementálního snímače polohy.....	22
Obrázek 9 – Poloprůsvitná ploška s Grayovým kódováním.....	23
Obrázek 10 – princip odporového snímače polohy.....	23
Obrázek 11 – Závislost polohy na výstupním napětí odporových snímačů polohy	24
Obrázek 12 – Princip transformátorového snímače polohy.....	25
Obrázek 13 – Závislost vzájemné indukčnosti na poloze motoru u transformátorového snímače polohy.....	25
Obrázek 14 – Zapojení I2C sběrnice.....	27
Obrázek 15 – Časový diagram vysílání a příjmu I2C sběrnice.....	27
Obrázek 16 – Připojení sběrnice UART k CPU.....	28
Obrázek 17 – Rozložení jednotlivých bitů sběrnice USART	29
Obrázek 18 – Celkový pohled na přenos dat včetně hodinových signálů na sběrnici USART.....	29
Obrázek 19 – Závislost efektivity mikročipu DRU8832DRCT na zatěžovacím proudu	31
Obrázek 20 – Závislost efektivity mikročipu DRU8832DRCT a lineárního regulátoru na výstupním napětí	31
Obrázek 21 – Použité pouzdro pro ATMEGA8.....	33
Obrázek 22 – Zapojení ATMEGA8 s pomocnými obvody	34
Obrázek 23 – Použité pouzdro pro DRU8832DRCT.....	35
Obrázek 24 – schéma zapojení DRU8832DRCT s pomocnými obvody.....	36
Obrázek 25 – Funkční blokové schéma čipu DRU8832DRCT	37
Obrázek 26 – H můstek.....	38
Obrázek 27 - Schéma zapojení napájení s omezovačem	39

Obrázek 28 – Člen ke snazšímu programování ATMEGA8	40
Obrázek 29 – Členy vyhodnocující výstup z vyhodnocovacích fotodiod pro Grayuv kod	41
Obrázek 30 – Výstup z ATMEGA8 pro sériovou komunikaci.....	41
Obrázek 31 - Navrhnutý plošný spoj	43

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Srovnání KM a BLCD motoru.....	20
Tabulka 2 – Logická tabulka řízení motoru.....	38
Tabulka 3- Seznam použitých součástek	44

Obsah

1	TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1	ČÁSTI KARTÁČOVÉHO MOTORU.....	15
1.2.1	STATOR	15
1.2.2	ROTOR	16
1.2.3	KOMUTÁTOR	16
1.2.4	KARTÁČE.....	16
1.2.5	SENZORY A POLOPRŮSVITNÁ DESTIČKA.....	17
1.2	PRINCIP FUNKCE KARTÁČOVÉHO MOTORU.....	17
1.2.1	PRŮCHOD ZMĚNY PROUDU CÍVKY V ZÁVISLOSTI NA ČASE ...	19
1.3	ROZDÍL MEZI KM A BEZKARTÁČOVÝMI MOTORY BLCD.....	20
1.4	ŘÍZENÍ SMĚRU OTÁČENÍ.....	20
1.5	SNÍMÁNÍ OTÁČEK.....	21
1.5.1	OPTICKÉ INKREMENTAČNÍ SNÍMAČE POLOHY	21
1.5.2	ODPOROVÉ SNÍMAČE POLOHY	23
1.5.3	TRANSFORMÁTOROVÉ SNÍMAČE POLOHY	25
1.6	DATOVÁ SBĚRNICE I ² C	26
1.7	DATOVÁ SBĚRNICE UART/USART.....	28
1.8	MIKROČIPY	29
1.9	KONSTRUKCE MALÝCH MOTORŮ DO 5-6V A 1A.....	31
1.10	KONSTRUKCE VELKÝCH MOTORŮ NAD 5-6V A 1A	32
2	PRAKTICKÁ ČÁST.....	33
2.1	ATMEGA8.....	33
2.2	DRU8832DRCT	35
2.3	NAPÁJENÍ.....	39
2.4	PROGRAMÁTOR	40

2.5	GRAYŮV KÓD	41
2.6	SBĚRNICE.....	41
2.7	TVORBA PLOŠNÉHO SPOJE	42
2.8	SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK	44
2.9	VÝVOJOVÝ DIAGRAM	45

0. ÚVOD

Takzvané DC, neboli stejnosměrné motory, se pyšní titulem, nejstarší druhu pohonu a v regulovaných obvodech jsou ještě stále nejpoužívanější. Tyto motory jsou řízeny stejnosměrným proudem, respektive napětím. Stejnosměrné motory byli prvními, komerčně využívanými aplikacemi, pro nejrůznější druhy mechanických prací v průmyslových budovách a pohonu dopravních prostředků po více než sto let. Dnes se používají například jako elektrický pohon u lokomotiv a u jeřábů, v elektrických válcovnách, nebo u papírenských strojů.

Výhody stejnosměrných motorů spočívají ve snadné otáčkové regulaci. Stačí zde pouze přivést napětí na kotvu a do motoru pustit budící proud. Další výhodou je velký krouticí moment i při malých otáčkách, dále snadná přizpůsobivost zatěžovacích charakteristik poháněnému zařízení, bezpečné napájení. Mezi výhody také patří poměrně velká výkonová zatížitelnost a poměrně velká účinnost, která se však nemůže rovnat s BLDC motorem.

Hlavní a zároveň velká nevýhoda KM je, že kartáče předávající proud se opotřebovávají a musejí se po určitém čase měnit, což je také jeden z hlavních důvodů, proč se od nich již v dnešní době upouští. Ale samozřejmě stále existují aplikace, kde jsou nenahraditelné.

Moje práce je rozdělena do dvou částí, do teoretické a praktické. V teoretické části se bude probírat vše okolo KM jako princip funkce, snímání otáček, nebo rozdíl mezi malým a velkým motorem. V praktické části pak bude sestaven regulátor pro malý KM pro napětí menší než 5-6V a proud menší než 1A.

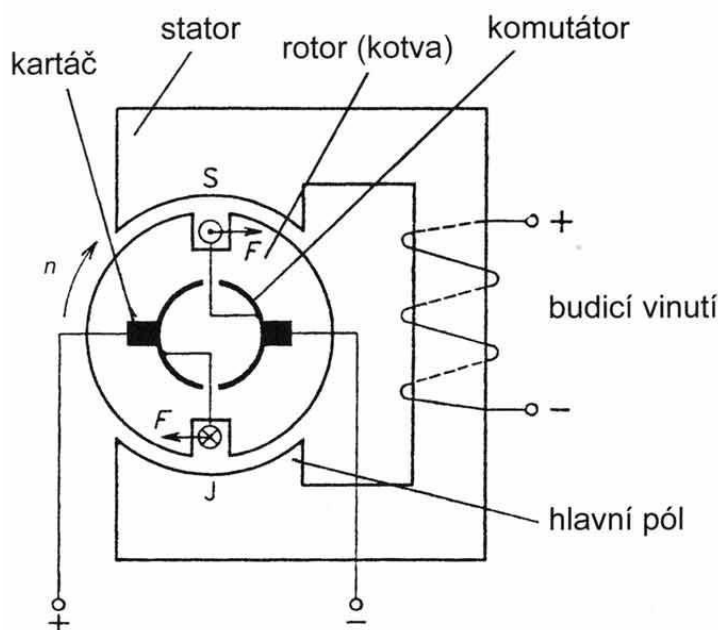
1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 ČÁSTI KARTÁČOVÉHO MOTORU

Nejdříve zde uvedu jednotlivé části KM, na které se dá motor rozdělit pro snadnější pochopení činnosti.

KM se skládá z:

- Stator
- Rotor
- Komutátor
- Kartáče (většinou uhlíkové)
- Senzor (za předpokladu řešení zpětné vazby pomocí senzorů)
- Poloprůhledný kotouček (Grayův kód)



Obrázek 1 – Schéma dvoupólového kartáčového motoru

KM je tvořen ze dvou hlavních částí a to jsou stator a rotor. Přičemž tyto dvě části nejsou vodivě spojeny. To znamená, že mezi nimi je pouze takzvaná vzduchová mezera, ve které působí proti sobě magnetická pole.

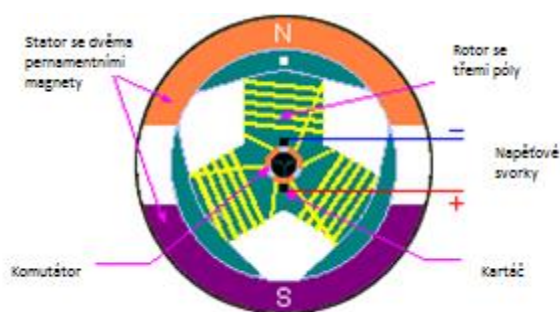
1.2.1 STATOR

Stator je pevná, neotočná část motoru. Je realizována jako permanentní magnet, nebo jako materiál z magneticky měkké oceli s cívkou (nepoužívá se tak často jako permanentní magnet), který je tvarově shodný se státorem nakresleným na obrázku č. 1.

Stator tedy vytváří konstantní magnetické pole, které pak interaguje s magnetickými poli vyvolanými cívkami kotvy a způsobuje tak otáčivý pohyb, viz kapitola 1.3 *PRINCIP FUNKCE KM*

1.2.2 ROTOR

Rotor, respektive kotva je otočná část motoru. Je válcovitého tvaru a obsahuje komutátor a cívkami. Čím více cívek motor obsahuje, tím lepší, výkonnější a zároveň dražší je. Nejlevnější a zároveň nejlehčí na výrobu je motor se dvěma cívkami proti sobě, jak je to naznačeno na obrázku číslo 1. Na tomto jednoduchém motoru se dvěma cívkami vysvětlím také později princip funkce. Pokud chci přidávat další cívkami, zajistím, aby od sebe byly otočeny o stejný úhel. Například tři cívkami by tedy byly otočeny o 120° . Tento příklad je uveden na obrázku číslo 2.



Obrázek 2 – Schéma třípólového kartáčového motoru

1.2.3 KOMUTÁTOR

Komutátor je vhodně konstruován tak, že i když do něj pouštíme pouze stejnosměrné napětí, respektive proud, otáčí fázi na cívkách kotvy, které díky kartáčům nabíjí tak, aby se odpuzovali s magnetickými póly statoru a to automaticky, bez dalších řídicích členů. Například u dvoupólového motoru komutátor otáčí fázi v obou cívkách inverzně proti sobě každé půl otočky rotoru. Také tímto se budu přesněji zabývat v kapitole 1.3 *PRINCIP KARTÁČOVÉHO MOTORU*.

1.2.4 KARTÁČE

Kartáče, většinou vyrobené z uhlíku zaručují převod proudu mezi vnějším obvodem a cívkami kotvy, přes již zmíněný komutátor. V KM jsou dva tyto kartáče nabitě na opačnou polaritu stejnosměrného proudu.

Existují tři druhy zasazení těchto kartáčů a to radiální, reakční a vlečné. Radiální provedení má kartáč ve směru osy komutátoru. S motorem s tímto provedením uchycení kartáčů bude ve své práci nejspíše operovat, protože je to jediné provedení, u kterého mohou motorem otáčet v obou směrech, aniž by se kartáče nadměrně opotřebovávaly. Ostatní dvě zasazení mají kartáče natočené ve směru otáčení rotoru a to o 60° u

reakčního provedení a 8° u vlečného provedení. Tím se zajistí, že se samozřejmě kartáče v jednom směru opotřebovávají méně, a však druhý směr otáčení není možný.

1.2.5 SENZORY A POLOPRŮSVITNÁ DESTIČKA

V mojí práci používám inkrementační optický snímač, který využívá k vyhodnocení polohy poloprůsvitnou destičku, uloženou na rotoru, která na sobě má průsvitné a neprůsvitné části, neboli zhotovení tzv. Grayova kódu. Dále 6 fotodiod, tedy Grayův kód je v tomto případě 6 - bitový. Ostatní senzory včetně tohoto druhu senzoru rozeberu podrobněji i s probráním Grayova kódu v kapitole 1.4 SNÍMÁNÍ OTÁČEK, která bude celá věnována právě snímání otáček.

1.2 PRINCIP FUNKCE KARTÁČOVÉHO MOTORU

KM je stejně jako každý elektrický motor založen na principu působení magnetických sil magnetického pole na vodič, kterým protéká elektrický proud. U tohoto KM se na komutátor přivádí stejnosměrný proud, respektive napětí.

Tento proud následně začne protékat cívkami kotvy, přičemž cívky jsou oproti sobě otočené o 180° (u nejjednoduššího motoru se dvěma cívkami), čímž se uskuteční to, že na sobě naindukují opačná magnetická pole a tedy fungují jako opačně otočené magnety.

Následkem toho začnou tyto cívky interagovat s magnetickým polem statoru v podobě síly, jejíž směr se dá určit podle Flemingova pravidla levé ruky a velikost síly se dá určit ze vzorce Amperovy síly. Tato síla odpuzuje jeden pól statoru od souhlasně nabitě cívky na kotvě a dochází k rotačnímu pohybu rotoru. Následující vztah pro Amperovu sílu lze použít pouze za předpokladu, že magnetické pole je homogenní a je použit přímkový vodič.

$$F = B \times I \times l \times \sin\alpha$$

Rovnice 1 – Ampérův zákon pro jeden vodič

Po úpravě, která je nezbytná pro náš případ dvou cívek o stejném počtu závitů, dostaneme následující.

$$F = 2 \times B \times I \times l \times N \times \sin\alpha$$

Rovnice 2 – Ampérův zákon pro dvou cívkový motor

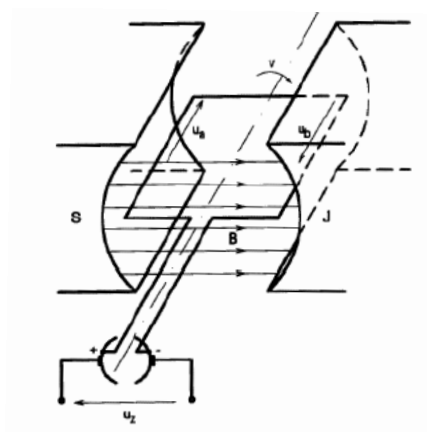
Kde:

- F – výsledná síla
- B – magnetická indukce pole
- l – aktivní délka vodiče
- I – proud, který teče cívkami kotvy
- N – počet závitů cívek (všechny cívky mají stejně závitů)
- α – úhel, který svírá směr toku proudu vodičů v cívkách, se směrem působení magnetických indukčních čar

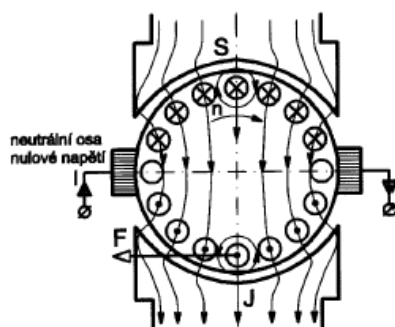
Komutátor pak otočí polaritu napětí, respektive proudu na cívkách vždy, když se kotva dostane do svislé polohy, tedy když by byla souhlasně nabitá cívka na opačné straně rotoru a u obou pólů by byla cívka druhá, která by byla polarizována opačně oproti těmto blízkým pólům a výsledná síla by začala působit proti směru otáčení.

Tento popis však platí pouze pro motor se dvěma cívkami, ale příklad je dostačující k pochopení principu funkce KM.

Na následujícím obrázku uvedu pro jednoduchost cívku kotvy pouze s jedním závitěm, tedy působení sil na vodič, kterým protéká proud. Na druhém obrázku je uvedeno působení síly, magnetické křivky a směr proudu v jednotlivých závitěch. V tomto případě by bylo možné použít vzorec 1, protože cívky kotvy jsou zde pro jednoduchost zastoupeny pouze jedním vodičem.



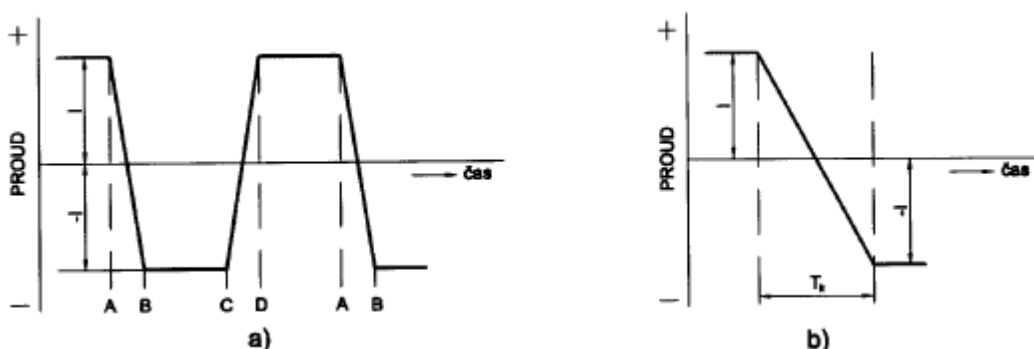
Obrázek 3 – Působení sil na vodič protékaný proudem



Obrázek 4 – Působení sil, magnetické siločáry, směr proudů v jednotlivých závitěch a směr působení výsledné síly rotačního pohybu

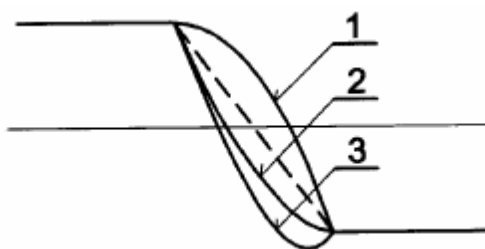
1.2.1 PRŮCHOD ZMĚNY PROUDU CÍVKY V ZÁVISLOSTI NA ČASE

Ještě pro úplnost uvedu, jak vypadá průběh proudu v cívkce při komutaci, tedy při otočení polarity cívkky. V místě AB a CD dochází ke změně polarity proudu a cívkka je zkratována přes kartáče. Tento přímkový graf platí pouze pro malé rychlosti, u kterých můžeme zanedbat indukčnost cívek.



Obrázek 5 – Ideální průběh proudu v cívkce při komutaci

Ve skutečnosti to pak vypadá následovně, přičemž čím větší indukčnost či rychlost změn, tím vyšší číslo.



Obrázek 6 – Skutečný průběh proudu v cívkce při komutaci

1.3 ROZDÍL MEZI KM A BEZKÁRTÁČOVÝMI MOTORY BLCD

	BLDC motor	Kartáčový DC motor
Komutace	Nutnost elektronické komutace	Kluzný kontakt
Údržba	Minimální	Výměna kluzných kontaktů
Využitelný rozsah otáček	V celém rozsahu otáček	Ve vyšších rychlostech kluzný kontakt zvyšuje své tření, takže odebírá velké množství výkonu
Setrvačnost rotoru	V rotoru jsou permanentní magnety, tudíž minimální setrvačnost	Cívky mají větší hmotnost s větší setrvačností
Elektrické rušení okolí	Téměř žádné	Na kluzných kontaktech dochází k jiskření a ke vzniku rušení
Regulace	Složitá, zapotřebí mikroprocesor	Jednoduchá
Efektivita	Přibližně 90%	Přibližně 50%
Hlučnost	Nižší	Vyšší
Pořizovací cena	Vyšší	Nižší

Tabulka 1 – Srovnání KM a BLCD motoru

1.4 ŘÍZENÍ SMĚRU OTÁČENÍ

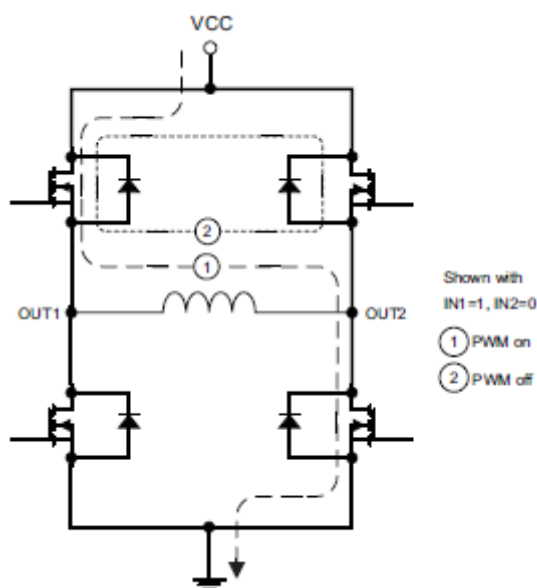
Směr otáčení zajišťuje H můstek, který je tvořen čtyřmi tranzistory. Tyto tranzistory se otevírají do kříže, čímž do motoru mohou posílat opačně orientovaný stejnosměrný proud, aniž by se měnil smysl, respektive polarita na zdroji, což by například u baterií samozřejmě nebylo možné. Tím zajistíme, že se motor začne otáčet na druhou stranu.

H můstek můžeme buď udělat fyzicky, jako 4 tranzistory, ale pak by bylo trochu komplikovanější řízení, čili otevírání správné dvojice tranzistorů.

V mém projektu jsem si zvolil výkonový mikročip DRU8832, který jako mnohé další čipy v této problematice H můstek obsahuje a díky logickým vstupům IN1 a IN2 si zvolím směr otáčení.

Pouze pro zajímavost další mikročipy jsou například A3950SLP, A3953SB-T-IC a A3901SEJTR, z toho první dva jsou pro větší motory a ty poslední jsou pro motory menší. I když DRU8832, tudíž mnou zvolený čip, se dá použít i pro větší motory.

Všechny tyto čipy budou dále zmíněny v kapitole, věnované vlastnostem mikročipů. DRU8832DRCT bude později v praktické části této bakalářské práce použit v regulátoru pro KM. Zde ještě uvedu, jak vypadá H můstek, v tomto případě obsažený právě v mikročipu DRU8832.



Obrázek 7 – Řízení směru otáčení za pomoci H můstku

Na tomto obrázku jsou uvedeny dva stavy, přičemž stav 1 odpovídá otáčení motoru na jednu stranu a stav 2, který odpovídá vypnutému motoru. Třetí stav, který zde není naznačen, by vedl přes druhou dvojici unipolárních tranzistorů a odpovídal by reversnímu směru otáčení motoru.

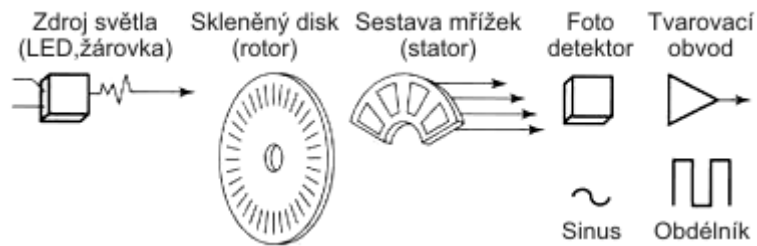
1.5 SNÍMÁNÍ OTÁČEK

Snímání otáček motoru je důležité z mnoha hledisek. Například k vyhodnocení rychlosti otáčení motoru či k pootáčení motoru o určitý úhel. Obě tyto hlediska využijí ve své práci. Existuje mnoho různých snímačů polohy. Uvedu zde pouze některé z nich.

1.5.1 OPTICKÉ INKREMENTAČNÍ SNÍMAČE POLOHY

Optické inkrementační snímače polohy se dělí do tří základních skupin. Na inkrementační, kde je poloha měřena vůči předchozímu bodu, dále absolutní, kde je poloha měřena vůči referenčnímu bodu a za třetí limitní, kde je poloha vyhodnocována dvouhodnotově.

Ke zhotovení tohoto snímače potřebujeme minimálně jeden světelný zdroj, dále rotující disk s průhlednými a neprůhlednými dílkami, minimálně dvě snímací jednotky, které jsou fázově posunuté o 90° z důvodu vyhodnocení směru otáčení, a v neposlední řadě také vyhodnocovací logický obvod.



Obrázek 8 – Princip inkrementačního snímače polohy

Kódování je většinou provedeno díky Grayovému kódu, který je vlastně upravený binární kód, jelikož chceme, aby nedocházelo ke změně více než jednoho bitu najednou. Přičemž čím více bitové kódování použijeme, tím více umí rozlišovat poloh pootočení.

Na výstupu dostaneme digitální slovo, jehož šířka je rovna počtu slov, a který je ekvivalentem úhlové hodnoty, vtažené k referenčnímu bodu.

Rozlišovací schopnost se dá určit ze vztahu:

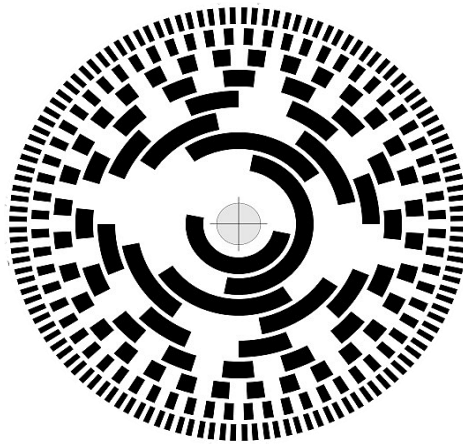
$$\Delta\alpha = \frac{360}{2^p} [^\circ]$$

Rovnice 3 - Vztah pro výpočet polohy rotoru

Kde:

- α – úhel natočení
- p – počet stop

Na následujícím obrázku uvedu, jak může Grayovo kódování vypadat na již zmíněné poloprůsvitné plošce.

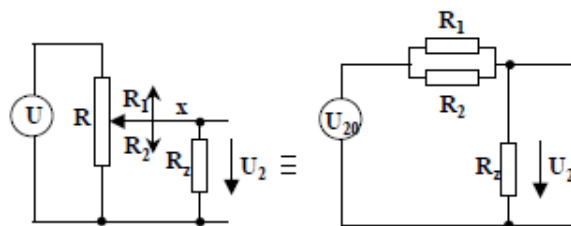


Obrázek 9 – Poloprůsvitná ploška s Grayovým kódováním

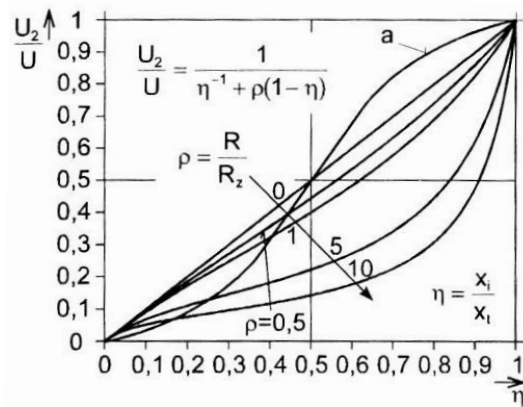
1.5.2 ODPOROVÉ SNÍMAČE POLOHY

Odporové snímače polohy mohou být velice přesné. Jsou rozděleny podle různých kritérií. Například podle tvaru odporové dráhy, podle materiálu, ze kterého je odporová dráha sestavena a podle pohybu běžce. Nepřesnosti zde vznikají posouváním jezdce po odporové dráze, například u drátových potenciometrů, nebo také odskakováním jezdce.

Z jednoduchého vztahu, ze kterého je zřejmé, jak souvisí výstupní napětí s polohou rotoru, vyhodnotíme úhlovou hodnotu, neboli jak je rotor natočen.



Obrázek 10 – Princip odporového snímače polohy



Obrázek 11 – Závislost polohy na výstupním napětí odporových snímačů polohy

$$\frac{U_2}{U} = \frac{1}{a^{-1} + p * (1 - a)}$$

Rovnice 4 - Závislost mezi měřenou polohou a výstupním napětím

Z této rovnice se dále musejí vyjádřit ještě dvě neznámé, a to následovně:

$$a = \frac{x_2}{x}$$

Rovnice 5 - Poloha jezdce

$$p = \frac{R}{R_Z}$$

Rovnice 6 - Poměr odporů

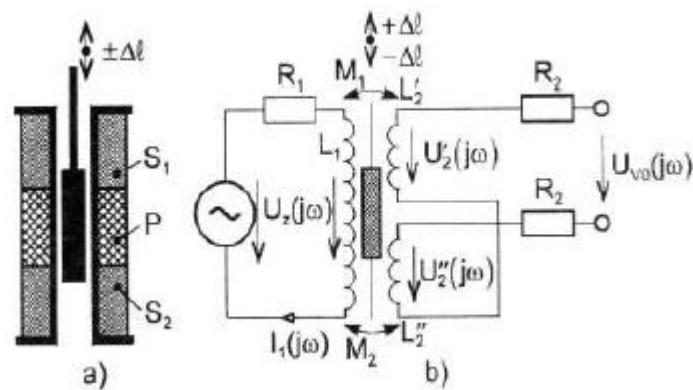
Kde:

- U – vstupní napětí na odporový dělič
- U_2 – napětí na odporu R_Z
- a – koeficient polohy jezdce
- x – celková délka odporové dráhy
- x_2 – vzdálenost jezdce od počátku odporové dráhy

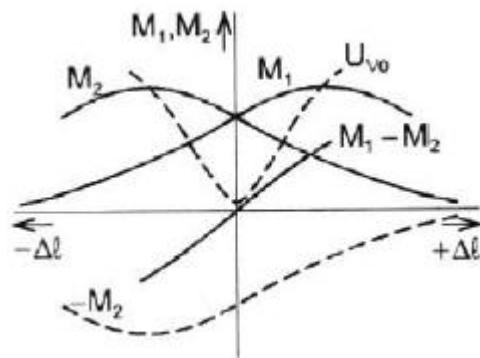
- p – poměr odporů
- R – paralelní kombinace odporu R_1 a R_2
- R_Z – výstupní odpor

1.5.3 TRANSFORMÁTOROVÉ SNÍMAČE POLOHY

Transformátorové snímače polohy fungují na principu vzájemné indukčnosti mezi primárním a sekundárním vinutím transformátoru. Na primární cívku je přivedeno střídavé napětí, takže na sekundárním vinutí je napětí úměrné měřené veličině, což je v našem případě poloha motoru.



Obrázek 12 – Princip transformátorového snímače polohy



Obrázek 13 – Závislost vzájemné indukčnosti na poloze motoru u transformátorového snímače polohy

$$I_1(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{R_1 + j * \omega * L_1}$$

Rovnice 7 – Rovnice pro primární proud

$$U_{21}(j\omega) = j * \omega * M_1 * I_1(j\omega)$$

Rovnice 8 – Rovnice pro sekundární napětí při $M = M_1$

$$U_{21}(j\omega) = j * \omega * M_2 * I_2(j\omega)$$

Rovnice 9 - Rovnice pro sekundární napětí při $M = M_2$

$$U_{V0} = j * \omega * (M_1 - M_2) * \frac{U_Z(j\omega)}{R_1 + j * \omega * L_1} = \frac{U_Z(j\omega)}{R_1} * \frac{j * \omega * (M_1 - M_2)}{1 + j * \omega * \tau}$$

Rovnice 10 – Rovnice pro výstupní napětí na prázdko

Kde:

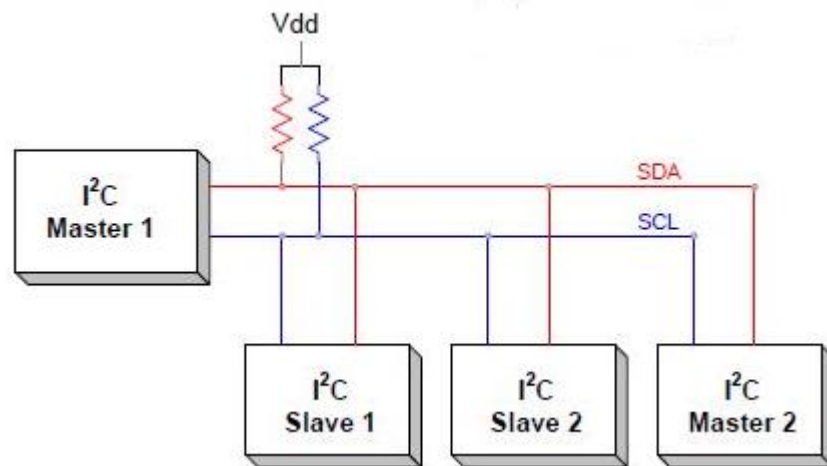
- I_1 – proud primárním vinutím
- I_2 – proud sekundárním vinutím
- U_Z – vstupní napětí na transformátorový snímač
- U_{V0} – napětí na výstupu sekundárního vinutí
- U_{21} – napětí mezi primárním a sekundárním vinutím
- R_1 – odpor před primárním vinutím
- L_1 – indukčnost primárního vinutí
- M_1, M_2 – vzájemná indukčnost mezi primárním vinutím a první a druhou cívkou sekundárního vinutí
- j – imaginární část komplexního čísla
- τ – časová konstanta
- ω – úhlová rychlost spjatá s kmitočtem napětí, respektive proudu

1.6 DATOVÁ SBĚRNICE I²C

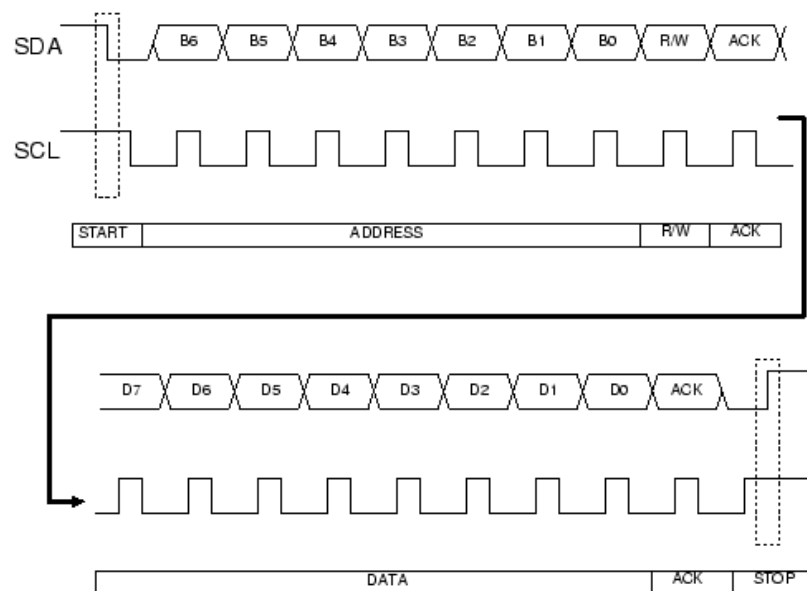
Zkratka vychází z anglického Inter-Integrated Circuit a je to počítačová sériová sběrnice pro jedno, či více řídicích zařízení (procesorů), která slouží k připojování nízko rychlostních periférií u různých zařízení, jako je například mobilní telefon, základní deska, atd.

Sběrnice rozděljuje pomocí adres připojené zařízení na řídicí a řízené, nazývané jako Master a Slave. Tyto části jsou společně na jedné sběrnici. Master zahajuje a ukončuje komunikaci a generuje hodinový signál SCL a Slave je adresovaný masterem. Signál je plně duplexní, neboť může přijímat i odesílat data v jednom čase.

Na následujících obrázkách je uvedeno jednak klasické zapojení I²C sběrnice, tak i časový diagram vysílání nebo příjmu dat.



Obrázek 14 – Zapojení I²C sběrnice



Obrázek 15 – Časový diagram vysílání a příjmu I²C sběrnice

Vysvětlení jednotlivých zkratek

- SDA – sériová data
- SCL – sériový hodinový signál
- R/W – čtení/zápis
- ACK – synchronizace
- B_n, D_n – adresy
- START – startovací bit
- STOP – stopovací bit

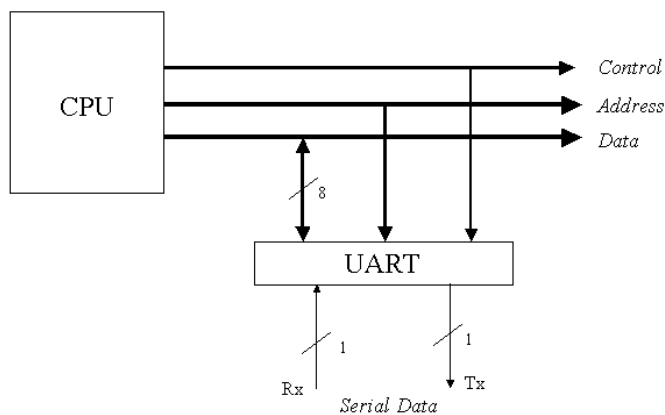
1.7 DATOVÁ SBĚRNICE UART/USART

Zkratka vychází z anglického Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter a je to asynchronní / synchronní sériové rozhraní. Máme zde dvě možnosti nastavení, buď jako asynchronní režim SCI, nebo synchronní režim SPI

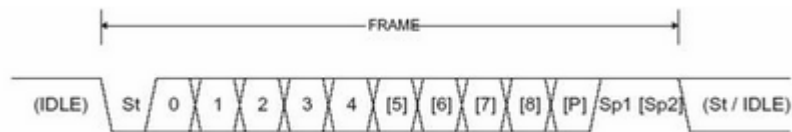
USART může být nakonfigurován ve dvou módech a to asynchronní, kdy může komunikovat například s PC, či CRT terminály a jako druhý synchronní, který může komunikovat s D/A, A/D převodníky, se sériovou EEPROM (elektricky mazatelná nonvolativní paměť (po odpojení napětí se data neztratí)), atd.

O asynchronním módu mluvíme jako o plně duplexním, protože může také přijímat i vysílat najednou. Tento režim, na rozdíl od synchronního režimu, nepoužívá hodinový signál.

Na následujících obrázcích uvedu, jak se připojí UART/USART k CPU, dále také pro úplnost dva časové diagramy USART. Na prvním je vysvětlené rozložení jednotlivých bitů a na druhém je celkový pohled i s hodinovými signály.



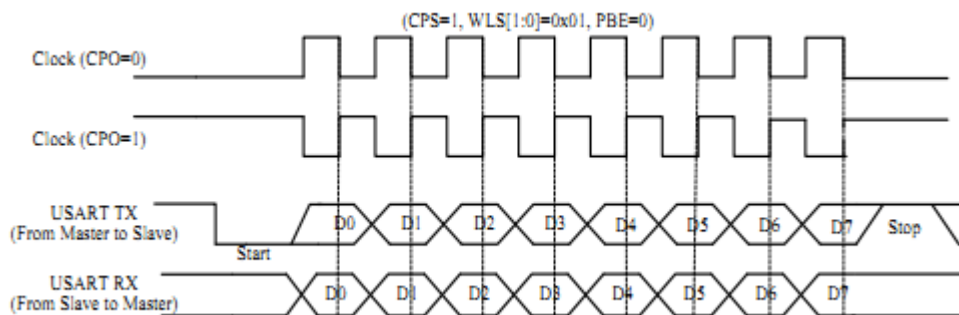
Obrázek 16 – Připojení sběrnice UART k CPU



Obrázek 17 – Rozložení jednotlivých bitů sběrnice USART

Vysvětlení jednotlivých zkratk

- St – startovací bit, vždy nízký
- Sp – stopovací bit, vždy vysoký
- 0-8 – jednotlivé bity dat
- P – paritní bit, buď sudý, nebo lichý
- IDLE – žádný přenos na komunikační lince



Obrázek 18 – Celkový pohled na přenos dat včetně hodinových signálů na sběrnici USART

1.8 MIKROČIPY

Pro náš účel, neboli pro regulaci a řízení stejnosměrného KM, je na výběr mnoho různých mikročipů. Mezi těmito mikročipy bychom si mohli vybírat na základě různých kritérií. Při vybírání se musíme zaměřit na to, jak chceme daný regulátor sestavit. To znamená, co by měl obsahovat, pro jak silný motor je, jaké má parametry a spousta dalších hledisek.

Dále zde popíšu čtyři již jmenované mikročipy, které jsem si vybral. A to A3950SLP-T, A3953SB, DRU8832DRCT a A3901SEJTR, které všechny obsahují

úplný most neboli H můstek, který, jak již bylo dříve zmíněno, umožňuje otáčení motoru na obě strany. Z důvodu ušetření místa zde uvedu obrázky pouze k mikročipu DRU8832DRCT, tedy mnou zvolenému.

Jako řídicí mikročip, jsem zvolil ATMEGA8, která bohatě postačí jak pro řízení celého regulátoru, pro vyhodnocení polohy, tak i pro vstup a výstup dat.

Typy Mikročipů (příklady) :

A3950SLP-T

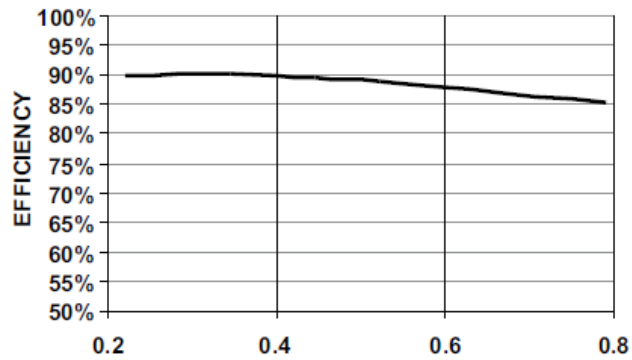
- přepěťová ochrana
- řízení PWM signálem, což je pulsně-šířková modulace
- pro velké motory (výstup 2,8A, 36V)
- H můstek je tvořen unipolárními tranzistory

A3953SB-T-IC

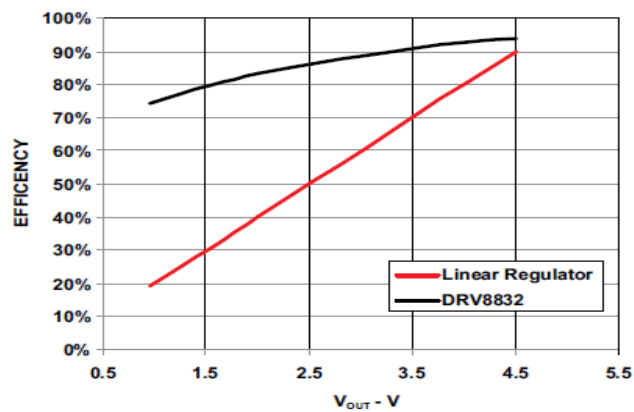
- řízení PWM signálem
- pro velké motory (výstup 1,3A, 50V)

DRU8832DRCT

- mnou vybraný čip
- pro malé až střední motory (výstup 1A)
- pro řízení jednoho motoru, nebo pro řízení vinutí
krokového motoru
- H můstek je tvořen unipolárními tranzistory (MOSFETy)
- nejlepší účinnost na 4,5V
- 85% – 90% účinnost při zatěžovacím proudu 0,2A - 0,8A
- obsahuje kontrolu proudu



Obrázek 19 – Závislost efektivity mikročipu DRU8832DRCT na zatěžovacím proudu



Obrázek 20–Závislost efektivity mikročipu DRU8832DRCT a lineárního regulátoru na výstupním napětí

A3901SEJTR

- pro malé motory (výstup 0,4A)
- schopnost ovládat jeden KM (0,8A, přičemž dvojice výstupů je spojena paralelně), dva KM, nebo jeden krokový motor
- H můstek je tvořen bipolárními tranzistory

1.9 KONSTRUKCE MALÝCH MOTORŮ DO 5-6V A 1A

Tento motor můžeme vidět například v autíčkách na dálkové ovládání, ručním větráčku, atd.

Konstrukci malého motoru se věnuje celá tato práce, takže zde uvedu pouze základní kritéria.

Motor musí být napájen malým napětím, respektive proudem, abych mohl použít jako zdroj stejnosměrného napětí například klasické alkalické baterie. Z čehož vyplývá, že vstupní napětí by nemělo překročit malé napětí, které je ideálně násobkem hodnoty nějakého akumulátoru. Například tedy 6V (5 x 1,2V).

Z kapitoly 1.8 *MIKROČIPY* si lze vybrat dva mikročipy. DRU8832DRCT a A3901SEJTR, které jsou navrženy pro malé výkony. Z těchto dvou je pro moji práci více vyhovující čip DRU8832DRCT a ten také využiji při konstrukci regulátoru KM.

1.10 KONSTRUKCE VELKÝCH MOTORŮ NAD 5-6V A 1A

Velké kartáčové motory můžeme vidět i dnes v lokomotivách či v tiskařských strojích, ale zde se budu věnovat trochu větším motorům než v předchozí kapitole a to motorům s výstupním proudem do 3A a výstupním napětím do 50V.

Opět si z kapitoly 1.6 *MIKROČIPY* vyberu dva čipy A3950SLP-T a A3953SB, které jsou stavěny pro větší výkony a tedy i pro větší zátěž.

Konstrukce regulátoru pro větší motor se nebude příliš lišit od konstrukce regulátoru pro motor malý, pouze zde budeme pracovat s většími výkony. To znamená, že výkonové členy budou muset být spojeny silnějšími vodivými cestami a bude zde nejspíše potřeba použít i aktivní chlazení. Samozřejmě by to už také nešlo řešit pomocí SMD součástek, tedy v malém měřítku, ale v měřítku větším, s většími hodnotami rezistorů, kondenzátorů, tudíž i s většími mírami těchto součástek.

Pro opravdu velké výkony, řádově MW, a při napětích až 1200V se motory používají pouze při malých otáčkách, jinak by ani nebylo možné tak velkých výkonů dosáhnout.

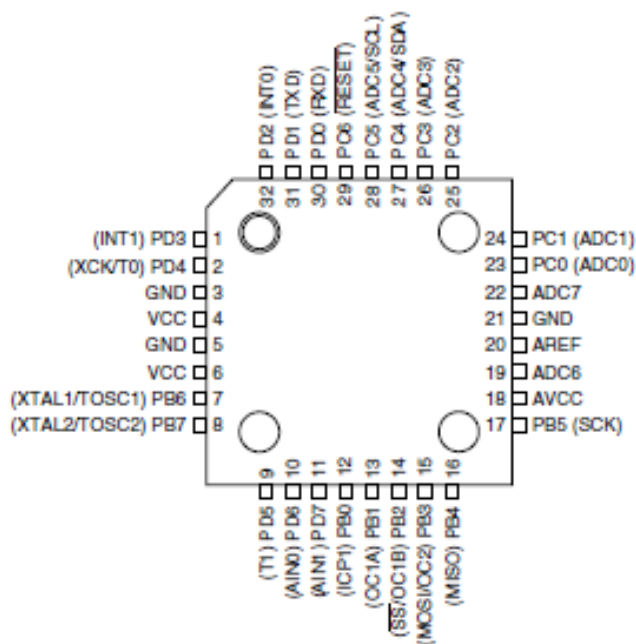
2 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části jsem pro návrh regulačního obvodu použil řídicí mikročip ATMEGA8 a jako výkonový čip jsem použil DRU8832DRCT, který, jak jsem již uvedl v kapitole 1.6 *MIKROČIPY* je vhodný pro malé i střední motory a obsahuje H můstek.

Schéma mám z důvodu přehlednosti rozděleno do několika částí, které postupně uvedu a popíši jednotlivé vývody a funkci v regulátoru.

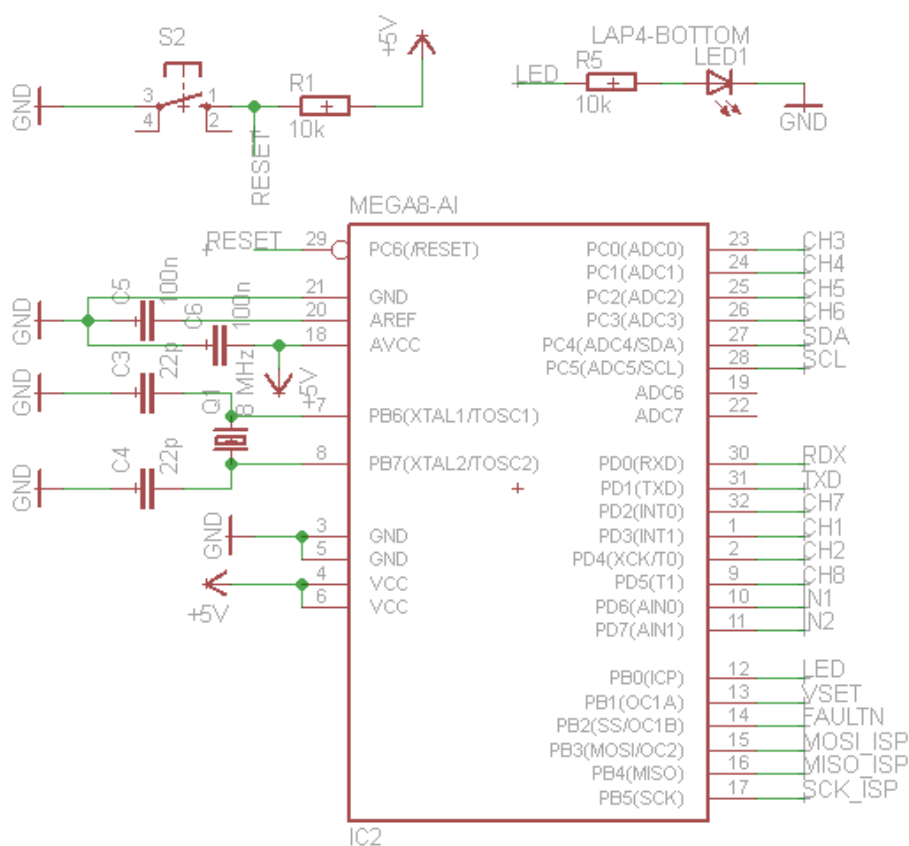
2.1 ATMEGA8

Pro tento čip jsem se rozhodl, protože zvládne řízení regulátoru, výstup dat i vyhodnocování otáček. ATMEGA16 by teď byla už zbytečná, protože nepotřebuji více výpočetních operací. Toto SMD pouzdro má 32 vývodů, které jsem skoro všechny (kromě dvou) obsadil. Rozměr tohoto čipu je maximálně 9,5x9,5mm.



Obrázek 21 – Použité pouzdro pro ATMEGA8

Na následujícím obrázku je schéma ATMEGA8 s popisy, kam který vývod vede. Zároveň je zde ještě přikresleno tlačítko pro vývod RESET a signalizační dioda.



Obrázek 22 – Zapojení ATMEGA8 s pomocnými obvody

Jednotlivé vývody

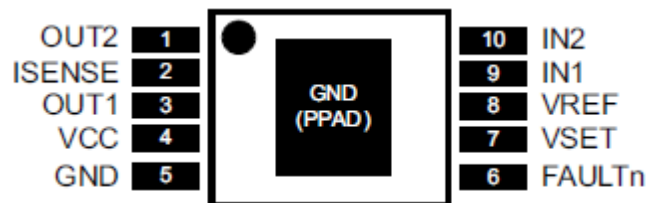
- PC6 – připojen na obvod, jež je na obrázku s ATMEGA8 vlevo nahoře a takto propojen slouží k restartu
- GND – připojeno na zem
- AVCC, VCC, AREF – napájení čipu, připojeno k napájení logiky (5V)
- PB6, PB7 – řízení mikročipu krystalem
- PC0-3, PD2-5 – slouží k vyhodnocení Grayova kódu
- SDA, SCL – vyvedení pro sériovou komunikaci I2C
- RDX, TDX – vyvedení pro sériovou komunikaci UART
- PD6, PD7 – vyvedení logického signálu na výkonový čip
- PB0 – vývod pro signalizační diodu
- PB1 – vývod PWM signálu přes filtr na výkonový čip

- PB2 – vývod na výkonový čip pro kontrolu proudu
- PB3-5 – napojení programátoru

2.2 DRU8832DRCT

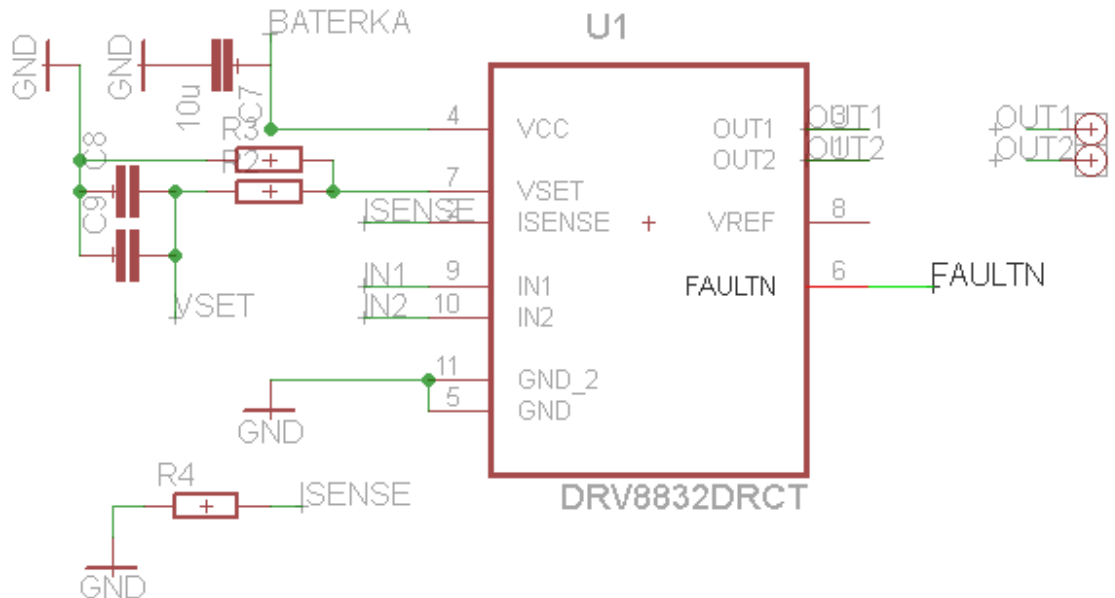
Toto je velice dobrý výkonový čip pro konstrukci regulátoru pro malé motory. Je sestrojen pro napětí 2,75 – 6V. Má v sobě obsažen H můstek tvořený Mosfety, kontrolu proudu a dokonce i možnost nastavení referenčního napětí, což v mé práci ale nevyužívám. Jeho rozměry jsou maximálně 30x37,5mm. Má 11 vývodů a kromě jednoho vývodu jsem obsadil všechny.

K řízení otáček používáme PWM modulaci, namísto lineárního nárůstu proudu, čímž se omezí spotřeba proudu a maximalizuje životnost baterií. Tento čip také poskytuje schopnost regulovat napětí, působící na vinutí motoru, což umožní, že zůstanou konstantní otáčky motoru, i když napájecí napětí kolísá. Například při vybíjení baterie.



Obrázek 23 – Použité pouzdro pro DRU8832DRCT

Následující obrázek popisuje schéma DRU8832DRCT a hlavně to, kam který vývod vede.

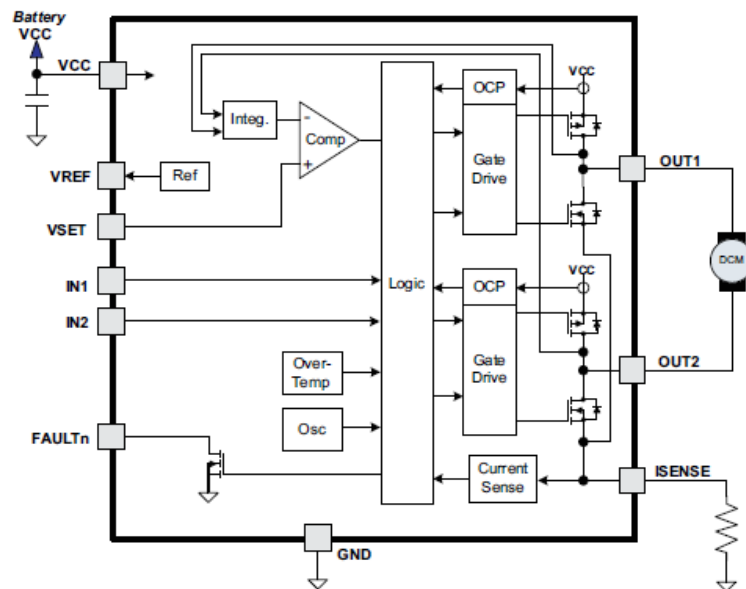


Obrázek 24 – schéma zapojení DRU8832DRCT s pomocnými obvody

Jednotlivé vývody

- VCC - napájení čipu, připojeno k napájení logiky (5V)
- VSET – přes filtr připojen na zdroj PWM signálu (ATMEGA8-PB1)
- ISENSE – přes odpor $0,2\Omega$ připojen na zem
- IN1, IN2 – řízení čipu logickým signálem (ATMEGA8 - PD6 a PD7)
- GND, GND_2 – spojeno se zemí
- OUT1, OUT2 – vyvedeno na svorkovnici a na vstup motoru
- VREF – tento výstup není obsazen
- FAULTN – kontrola proudu (ATMEGA8 – PB2)

Na následujícím obrázku ještě pro úplnost uvedu funkční blokové schéma tohoto čipu, které jsem z důvodu šetření místa neuváděl u každého z mikročipů v kapitole 1.6 MIKROČIPY.



Obrázek 25 – Funkční blokové schéma čipu DRV8832DRCT

Na vstup IN1, IN2 přivedu logický signál, u kterého rozhodnu, co motor bude dělat (otáčení motoru, inverzní otáčení motoru, pohotovostní stav, nebo brzdicí stav). Když na oba vstupy přivedu nulu, přístroj bude v klidovém stavu šetření energie. A když je použit pin FAULTN (kontrola proudu) a na vstupech jsou nuly, tak je FAULTN smazán.

Při přechodu z brzdicího stavu, nebo stavu pohotovostního (Standby stavu) do stavu otáčení začíná ovládací napětí PWM s nulovou střídou. Střída se pomalu zvětší na kontrolní napětí na vstupu VSET. Až 12ms může trvat přechod z pohotovostního stavu do stavu stoprocentního zatížení. Z tohoto důvodu nelze použít rychlé signály PWM na vstupech IN1 a IN2. Proto na kontrolu otáček použijeme přídatný pin VSET.

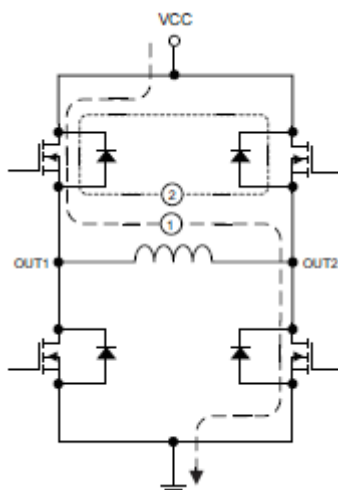
Na tomto obrázku jsou uvedeny jednotlivé stavy motoru v závislosti na vstupech.

IN1	IN2	OUT1	OUT2	Function
0	0	Z	Z	Standby/coast
0	1	L	H	Reverse
1	0	H	L	Forward
1	1	H	H	Brake

Tabulka 2 – Logická tabulka řízení motoru

Obvod mimo jiné sleduje napětí mezi výstupními piny a integruje je, aby dostal průměrnou stejnosměrnou hodnotu napětí. Toto napětí se vydělí čtyřmi a je srovnáno s napětím na pinu VSET. Když je průměrná hodnota výstupního napětí vydělená čtyřmi nižší, než napětí na pinu VSET, tak se střída výstupního PWM signálu zvýší. Když je průměrná hodnota výstupního napětí vydělená čtyřmi vyšší, než napětí na pinu VSET, tak se střída PWM signálu sníží a takto funguje již zmíněná stabilizace napětí, použitelná například při vybíjení baterie, kdy se mění hodnota vstupního napětí a měnilo by se také napětí výstupní.

Během PWM regulace H můstek propouští řídicí proud skrz vinutí motoru ve tvaru PWM modulace. A tento stav odpovídá logickému stavu, kdy je IN1 vysoké a IN2 nízké a motor se otáčí. Toto znázorňuje případ 1 na následujícím obrázku. Tento obrázek byl již použit, ale aby čtenář nemusel obrázek hledat v textu, uvedu ho zde znovu.



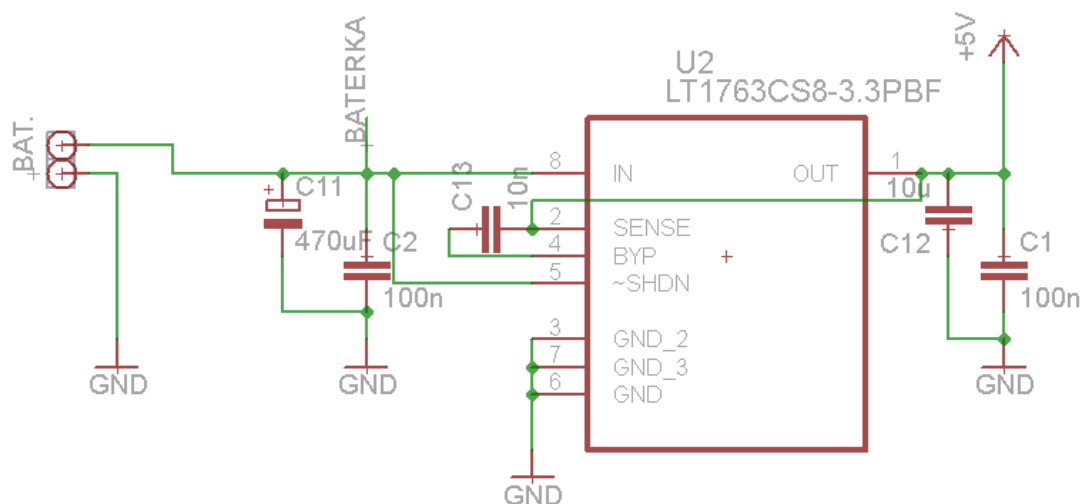
Obrázek 26 – H můstek

Když je naprogramované výstupní napětí vyšší než vstupní, tak obvod použít do motoru proud se stoprocentní střídou a funkce regulace bude vypnuta. V tomto režimu se tento čip chová jako běžné ovládání H můstku.

V době, kdy je PWN vypnuto teče vinutím proud, díky dvěma vrchním tranzistorům, které jsou otevřené. To odpovídá stavu 2 z obrázku 26.

2.3 NAPÁJENÍ

Úplně vlevo na schématu je svorkovnice označená jako BAT. Zde pochopitelně připojíme zdroj stejnosměrného napětí, respektive proudu, například baterie. Výstup, vedoucí nahoru, označený jako baterka, vede napětí, které není snižované regulátorem na 5V rovnou na výkonový čip. Výstup 5V za regulátorem již napájí logické členy.



Obrázek 27 - Schéma zapojení napájení s omezovačem

Důležité je zde použít regulátor napětí, v tomto případě LT1763CS8-3.3, který stabilizuje hodnotu vstupního napětí z baterií na 5V. Tímto napětím se pak ovládají již zmíněná logika (čipy, vyhodnocovací obvody, atd.) .

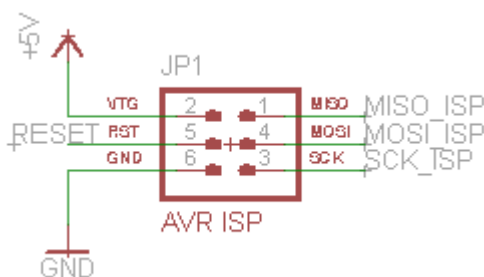
Něco málo k charakteristice tohoto čipu. Velikost tohoto výstupního proudu činí okolo 500mA a také má nízký šum. Zbytkový proud je též velice malý, řádově desítky μA . Umí pracovat pro více hodnot výstupních napětí, a to pro 1,5V, 1,8V, 2,5V, 3V,

3,3V, 5V. Další výhodou je, že zde neteče žádný zpětný proud, čímž tento regulátor chrání baterie. Má v sobě také ochranu proti velkému proudu a přehřátí. Největší výhodou je nízká úroveň šumu, která se docílí i s pomocí kondenzátoru, který je v tomto schématu označen jako C13.

Nemůžu zde použít klasický regulátor napětí 7805TV, protože ten potřebuje na vstupu větší napětí než 5V a na takové napětí není výkonový čip DRV8832DRCT stavěn.

2.4 PROGRAMÁTOR

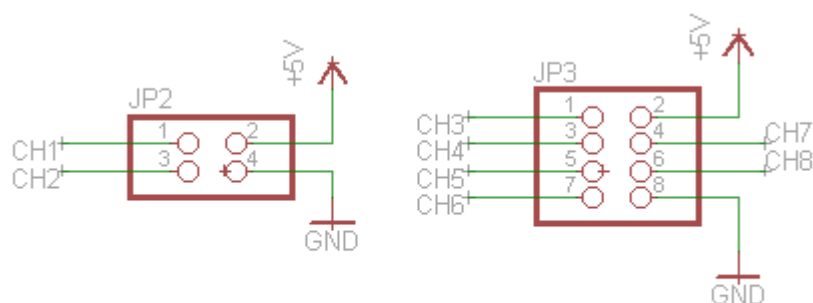
Díky tomuto prvku je možné programovat řídicí čip ATMEGA8, bez zbytečného připojování jednotlivých potřebných vývodů nějakými malými svorkami.



Obrázek 28 – Člen ke snazšímu programování ATMEGA8

2.5 GRAYŮV KÓD

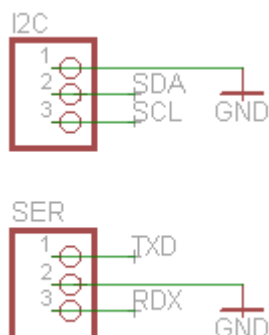
Tyto prvky jsou CH1-8 připojeny na řídicí čip ATMEGA8, na 5V a na zem. Tyto prvky složí k vyhodnocování Grayova kódu. Takto to musí být řešeno, protože kdyby byl výstup z fotodiod rovnou přiveden na vyhodnocovací čip (ATMEGA8), tak by stavy nul a jedniček nemusely být jednoznačné. Je to z důvodu, že by například snímací ústrojí muselo být úplně zatměno, atd.



Obrázek 29 – Členy vyhodnocující výstup z vyhodnocovacích fotodiod pro Grayuv kod

2.6 SBĚRNICE

Zde budou dvě sběrnice a to UART/USART a I2C. Toto je pouze výstup z řídicího čipu ATMEGA8, posunutý z důvodu lepší manipulace na okraj plošného spoje. Obvod pro převod z 5V logiky zde není obsažen.



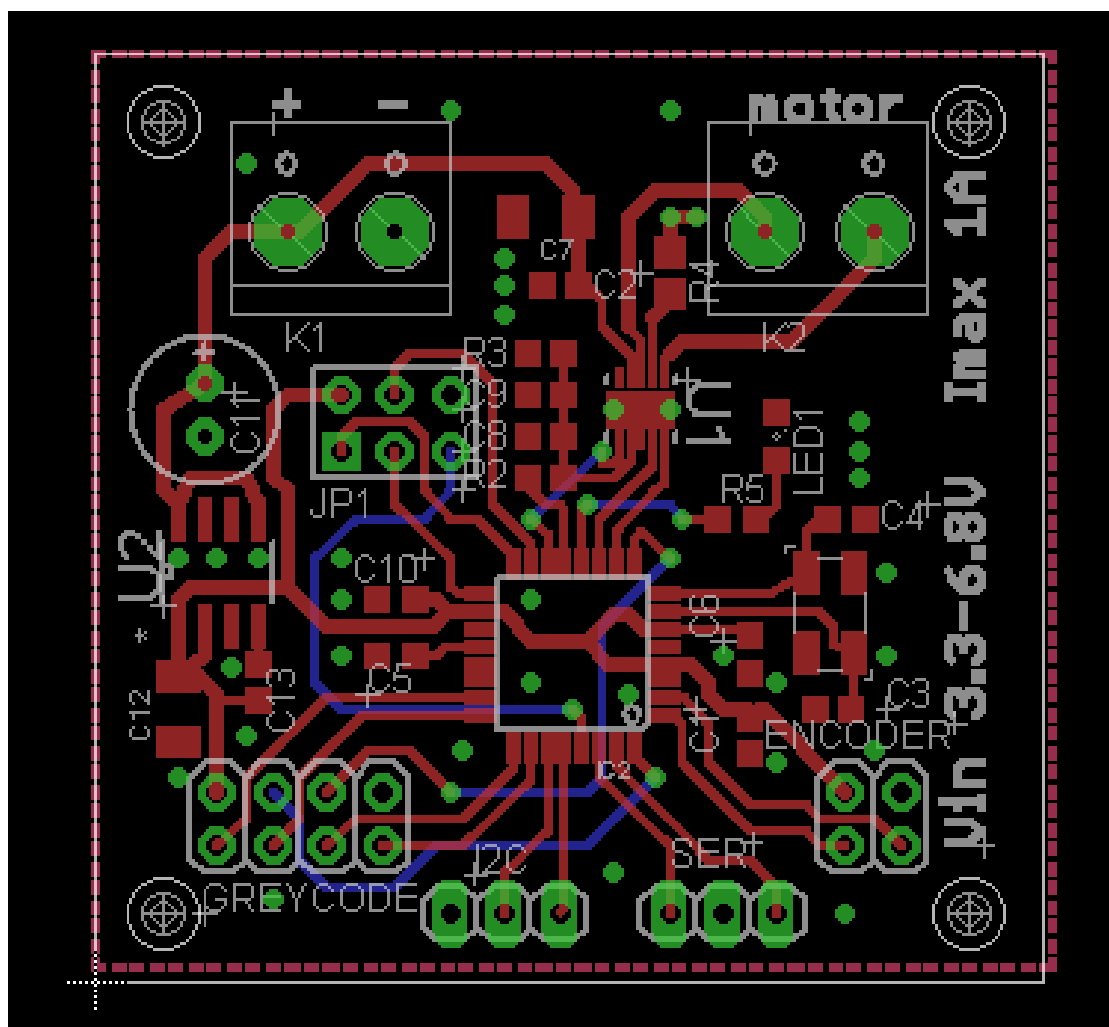
Obrázek 30 – Výstup z ATMEGA8 pro sériovou komunikaci

2.7 TVORBA PLOŠNÉHO SPOJE

Při konstrukci plošného spoje musíme dávat pozor na spoustu věcí. Vyjmenuji zde pouze některé z nich.

- Součástky patřící k čipům - jako jsou kondenzátory, krystaly a podobně, by měli být co nejbližší u nich z důvodu parazitních kapacit a indukčností vodivých spojů, které pak mohou překročit kapacitu, či indukčnost jednotlivých součástek.
- Když čekáme větší zátěž, měla by být zem rozvedena hvězdicově, jinak by se mohl potenciál změnit z hodnoty 0V na například 2V
- Cesty s PWM signálem by měli být co nejkratší, aby nedocházelo ke zkreslení signálu.
- Když obvod obsahuje krystal pro ovládání řídicího čipu, tak by měl být, jak již bylo zmíněno, co nejbližší u něho.

Většina použitých součástek má SMD pouzdra, aby byly co nejmenší rozměry plošného spoje a tedy i celého výrobku. Při tvorbě se mi podařilo minimalizovat vodivé spoje na druhé straně desky na minimum, přičemž tyto cesty jsou na návrhu plošného spoje označeny modře. Vodivé cesty na opačné straně jsou označeny červeně.



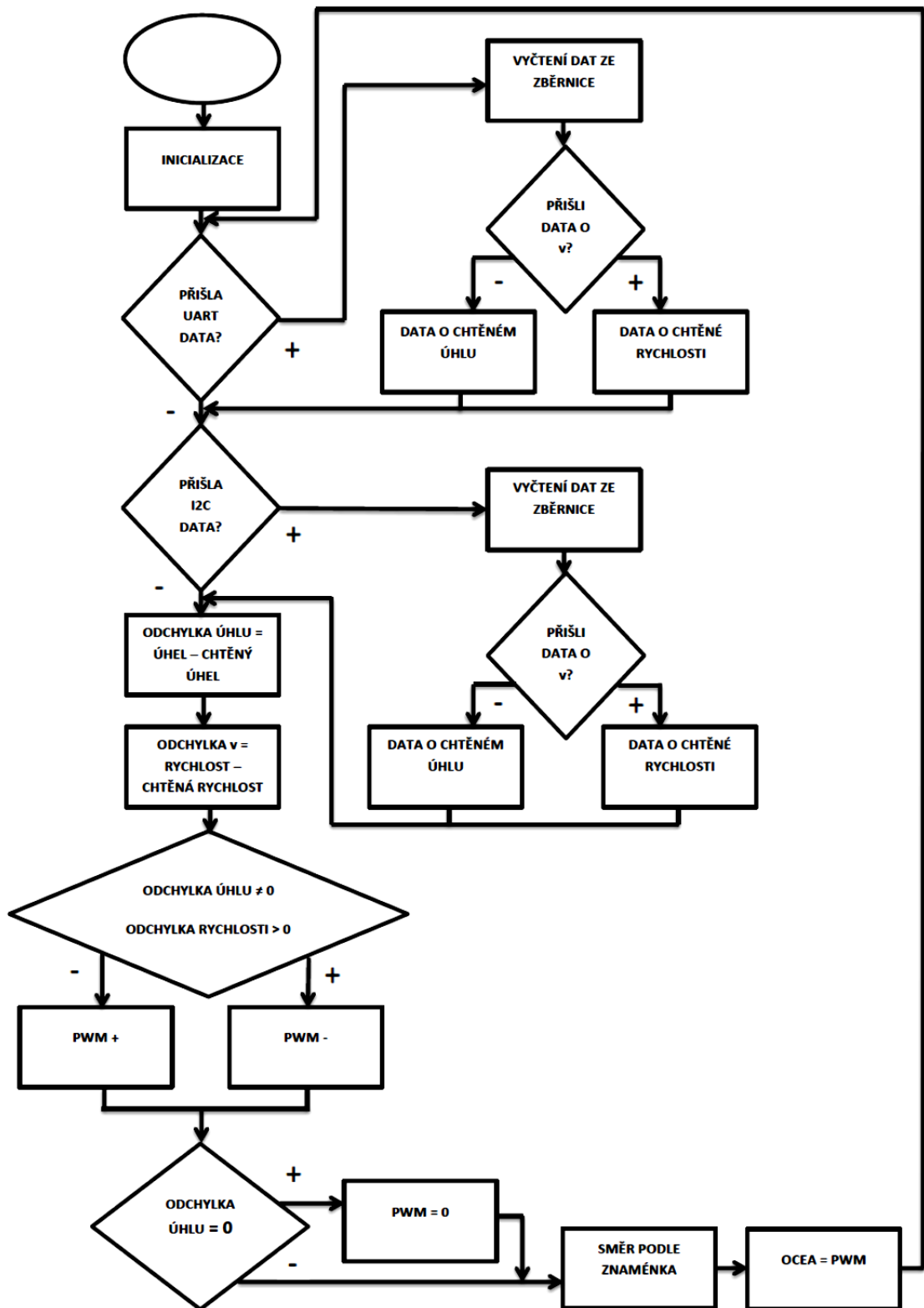
Obrázek 31 - Navrhnutý plošný spoj

2.8 SEZNAM POUŽITÝCH SOUČÁSTEK

C1 100n	C2 100n	C3 22p
C4 22p	C5 100n	C6 100n
C7 10u	C8	C9
C10 100n	C11 470uF	C12 10u
C13 10n	LED1	R2
R3	R4 0R2	R5 10k
U\$1 CRYSTAL_SMD16MHZ		

Tabulka 3- Seznam použitých součástek

2.9 VÝVOJOVÝ DIAGRAM



Závěr

Při psaní a konstruování této práce jsem se dozvěděl mnoho věcí o stejnosměrných kartáčových motorech. Například to, že i když mají velké opotřebenění a menší účinnost (nejzásadnější nedostatky), než jejich střídaví nástupci, jsou stále místa a aplikace, které se bez těchto motorů neobejdou. Dále se v dnešní době, jak jsem již uvedl v úvodu, stejnosměrné kartáčové motory používají například v elektrických válcovnách, u stejnosměrných lokomotiv (při 2. Světové válce byla zhruba více než polovina železničních sítí České republiky napájena stejnosměrným napětím, respektive proudem a druhá půlka sítí střídavým napětím, respektive proudem, kvůli ztížení dopravy nepřátel), u jeřábů, atd.

První kartáčové motory vznikly již před více než sto lety a od té doby se zdokonalily nejrůznější periferie těchto motorů. Například kartáče se dnes dělají z uhlíku, čímž se přispívá k lepší odolnosti motoru. Dále, jak jsem popsal ve své práci, jsou i nejrůznější natočení kartáčů vhodná pro ještě menší opotřebenění, ale to se používá pouze u motorů, které se točí jedním směrem. Před sto lety samozřejmě neexistovaly žádné čipy na regulaci otáček a pro komunikaci s počítačem, či monitorem, atd.

Plošný spoj jsem si z důvodu větší kvality nechal zhotovit od firmy Pragoboard. Kreslení schématu a návrh plošného spoje jsem dělal pochopitelně sám a to v programu EAGLE. Při návrhu plošného spoje jsem potkal spousty problémů, které se může člověk naučit pouze praxí. Některé z těchto problémů jsem popsal v kapitole *2.7 TVORBY PLOŠNÉHO SPOJE*. Mimo jiné, kvůli těmto úskalím jsem musel plošný spoj navrhovat vícekrát. Právě při děláních chyb a předělávání desky jsem pochopil, jak se musí správně postupovat a jaké jsou zásady pro správnou funkčnost.

Seznam použitých pramenů a literatury

- [1] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty - pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. 248s. ISBN 80-7300-141-1
- [2] CHMELÍK, Karel, POSPIŠILÍK, Jiří. *Elektrické stroje v energetice-stejnosměrné stroje*. [online]. [cit. 2014-04-10]. Regionální centrum celoživotního vzdělání, VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2003. ISBN 80-248-0314-3. Dostupné z WWW: http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/studijni_materialy/stroje/skripta/ss_stroje.pdf.
- [3] KOŠTÁL, Jan. *Řízení BLDC motorů*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2013. 47 s.
- [4] VYČÍTAL, Jaroslav. *Řízení rychlosti otáček motorů*. [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. Dostupné z WWW: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/27148/bakalarka_Vy%C4%8D%C3%ADtal_Jaroslav.pdf?sequence=1
- [5] RAVEO S.R.O. *Raveo* [online]. [cit. 2014-04-18]. Dostupné z WWW: raveo.cz/en/node/200
- [6] Brushed DC electric motor. In: Wikipedia: The free encyclopedia [online]. [cit. 2014-04-13]. Dostupné z WWW: http://en.wikipedia.org/wiki/Brushed_DC_electric_motor
- [7] Electric motors. In: Model Aircraft/Beginners' Guide/Electric Motors [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z WWW: <http://adamone.rchomepage.com/guide5.htm>
- [8] Snímače mechanických veličin. [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z WWW: <http://skriptum.wz.cz/autom/poloha.htm>
- [9] Servomotor. In: Wikipedie: The free encyclopedia [online]. [cit. 2014-04-12]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Servomotor>
- [10] Cypress Perform. [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z WWW: <http://www.cypress.com/?rID=34486>
- [11] Best-Microcontroller-projekts. [online]. [cit. 2014-04-20]. Dostupné z WWW: <http://www.best-microcontroller-projects.com/i2c-tutorial.html>
- [12] UART zapojení. In: UART Design and Programming [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z WWW: <http://babbage.cs.qc.edu/courses/cs343/UART/>

- [13] USART. A little bit about software [online]. [cit. 2014-04-19]. Dostupné z WWW:
<http://software-bits.blogspot.cz/2011/10/using-software-serial-library-arduino.html>
- [14] Datasheet. *A3901SEJTR-T-IC*. Motor driver .AllegroMicroSystems. 11 s. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/allegro-microsystems/a3901sejtr-t/ic-motor-driver/dp/1651947>
- [15] Datasheet. *A3950*. AllegroMicroSystems. 12 s. Dostupné z :
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/172936/ALLEGRO/A3950.html>
- [16] Datasheet. *A3953SB-T-IC*. Motor driver PWM. AllegroMicroSystems. 15 s. Dostupné z: <http://cz.farnell.com/allegro-microsystems/a3953sb-t/ic-motor-driver-pwm-3953-dip16/dp/1193497>
- [17] Datasheet. *Atmel-2486-8bit*. AVR Microcontroller AT Mega 8L. 331 s. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/sang2792/atmel-24868bitavrmicrocontrolleratmega8-1datasheet>
- [18] Datasheet. *DRV8832*. Low-Voltage Motor Driver IC. 19 s. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/457244/TI/DRV8832.html>
- [19] Datasheet. *LT1763CS8*. Linear Technology. 16 s. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/87801/LINER/LT1763CS8.html>
- [20] Sběrnice I2C. Programming AVR I2C INTERFACE. Dostupné z: <http://www.embedds.com/programming-avr-i2c-interface/>
- [21] TAUFER, Ivan; KOTYK, Josef; JAVŮREK, Milan. *Jak psát a obhajovat závěrečnou práci*. Pardubice: Univerzita Pardubice. Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009. 40 s. ISBN 978-80-7395-157-3.

Příloha A – zdrojový kód

Zdrojový kód je uložen na CD.