

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řídící jednotka BLDC motorů s rozhraním CAN

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub NOVOTNÝ**

Osobní číslo: **E15B0164P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Řídící jednotka BLDC motorů s rozhraním CAN**

Zadávací 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 :

Navrhněte řídicí jednotku schopnou ovládat 2 BLDC motory. Jednotka je určena pro kolového robota a má nahradit stávající řešení postavené na stejnosměrných motorech. Tato jednotka musí komunikovat po sběrnici CAN a využívat stávající komunikační protokol.

1. Popište stručně princip fungování BLDC motorů a sběrnice CAN bus.
2. Navrhněte obvodové zapojení.
3. Zrealizujte dle návrhu prototypovou řídicí jednotku.
4. Naprogramujte příslušný firmware. V práci velmi podrobně popište komunikační protokol s řídicí jednotkou.



Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

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

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Žahour

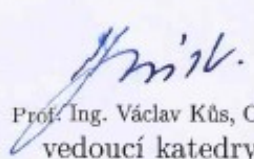
Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci řídicí jednotky pro dva BLDC motory ovládané pomocí CAN sběrnice. V práci je popsán stručný princip fungování BLDC motorů a sběrnice CAN. Tyto motory mají nahradit stávající řešení se stejnosměrnými motory na čtyřkolovém robotu Crawler. Tato jednotka bude komunikovat s nadřazeným systémem a bude využívat stávající komunikační protokol. Dále je zde řešen návrh řídicího firmwaru pro mikrokontrolér MC9SO8DZ96 od společnosti NXP.

Klíčová slova

BLDC, CAN, MC9SO8DZ96, SPI, DRV8308, motory, senzory

Abstract

The submitted bachelor thesis is focused on the design and the realization of the controlling unit for two BLDC motor operated with the help of CAN bus. The thesis describes the precise principle of the functioning of BLDC motor and CAN bus. These engines are supposed to substitute the current situation of DC motor on the four-wheeled robot Crawler. This unit will communicate with the superordinate system and use the current communication protocol. Further, the design of the controlling firmware for microcontroller MC9SO8DZ96 from the company NXP is discussed.

Key words

BLDC, CAN, MC9SO8DZ96, SPI, DRV8308, motors, sensors

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2018

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Žahourovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 POPIS BLDC MOTORU	11
1.1 KONSTRUKCE MOTORU	11
1.1.1 Konstrukce statoru.....	12
1.1.2 Konstrukce rotoru.....	13
1.2 PRINCIP BLDC MOTORU	13
1.3 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ.....	14
1.4 SENZORY POLOHY	17
1.4.1 Hallovo sonda.....	17
1.4.2 Optický enkodér.....	19
1.4.3 Resolver.....	20
1.5 MOMENTOVÁ CHARAKTERISTIKA BLDC MOTORU.....	21
1.6 POROVNÁNÍ S OSTATNÍMI TOČIVÝMI STROJI.....	21
2 POPIS CAN SBĚRNICE	23
2.1 FYZICKÁ VRSTVA	24
2.2 LINKOVÁ VRSTVA	26
2.3 ZPŮSOB KOMUNIKACE.....	27
3 HARDWAROVÁ ČÁST	30
3.1 POPIS A ZÁKLADNÍ PARAMETRY POUŽITÝCH BLDC MOTORŮ	30
3.2 SCHÉMA A POPIS ŘÍDICÍ JEDNOTKY	31
3.2.1 Napájení	32
3.2.2 Mikrokontrolér	33
3.2.3 CAN budič	34
3.2.4 BLDC driver a výkonový můstek	35
3.3 REALIZACE DPS.....	39
4 POPIS PROGRAMU A KOMUNIKACE	40
4.1 HLAVNÍ PROGRAM.....	40
4.2 SPI KOMUNIKACE.....	42
4.3 CAN KOMUNIKACE	43
ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	48
PŘÍLOHY	49

Seznam symbolů a zkratek

B	Značka indukce [T]
BLDC	Brush less direct current. Bezkartáčový stejnosměrný motor
CAN.....	Controller area network. Sběrnice pro komunikační síť v automobilech
CAN_H.....	CAN high. Název vodiče CAN sběrnice
CAN_L	CAN low. Název vodiče CAN sběrnice
DC.....	zkratka pro stejnosměrnou veličinu
DPS.....	Deska plošných spojů
EC.....	Electronically commutated motor. Elektronicky komutovaný motor
EMI.....	Electromagnetic interference. Elektromagnetické rušení
GTO.....	Gate turn off. Vypínatelný tyristor
IGBT.....	Insulated gate bipolar tranzistor. Tranzistor s izolovaným hradlem
IGCT.....	Integrated gate commutated thyristor. Tyristor s integrovaným hradlem
Li-pol	Lithium polymerový akumulátor
MOSFET	Metal oxide semiconductor field effect tranzistor. Tranzistor řízený elektrickým polem

Úvod

Tématem této bakalářské práce je návrh řídicí jednotky pro čtyřkolového robota Crawler, která bude schopna ovládat dva BLDC motory a komunikovat po sběrnici CAN. Tento robot je určen především pro výukové účely a k prezentaci Katedry aplikované elektrotechniky a telekomunikací.

Hlavním důvodem pro návrh a realizaci nové řídicí jednotky je výměna stávajících stejnosměrných motorů za nové BLDC motory. Nová řídicí jednotka musí komunikovat po sběrnici CAN, kterou je robot vybaven a je kladen velký důraz na zachování stávajícího komunikačního protokolu.

Práce je strukturovaná do čtyř hlavních kapitol. První kapitola je zaměřena na problematiku BLDC motorů, na jejich konstrukční provedení, výhody a nevýhody oproti jiným točivým strojům, možnosti řízení a snímání polohy. Druhá kapitola čtenáře seznamuje se sběrnici CAN. Ve třetí kapitole ukazujeme vlastní hardwarové řešení řídicí jednotky. Je zde popsán postup při vývoji: návrh a popis jednotlivých dílčích částí, popis samotné DPS. Čtvrtá, a tedy poslední kapitola, se zabývá hlavním programem, komunikací mezi mikrokontrolérem a obvody, které řídí motory. Jako poslední popisujeme princip a komunikační protokol sběrnice CAN.

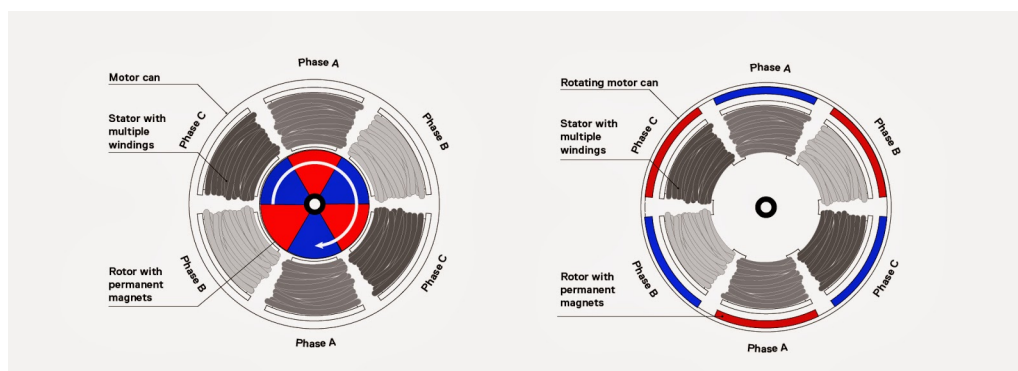
1 Popis BLDC motoru

BrushLess Direct Current motor (bezkartáčový stejnosměrný motor) může být znám i pod zkratkou ECM, pocházející z anglického Electronically Commutated Motor (elektronicky komutovaný motor), nebo jen EC motor. BLDC motory se řadí do kategorie synchronních strojů. Ze samotného názvu motoru „bezkartáčový“ vyplývá absence mechanického komutátoru a komutace motoru je prováděna elektronicky za pomoci výkonových polovodičových součástek a vhodného řízení. Díky absenci mechanického komutátoru mají motory zvýšenou životnost, která byla dříve omezoována zanášením kluzných kontaktů a opotřebováváním uhlíků. Dnešní životnost BLDC motorů je limitována životností ložisek. [1] [2] Mezi další výhody BLDC motorů patří: [3]

- vysoká účinnost,
- lineární momentová charakteristika,
- vysoká dynamická odezva,
- tichý provoz,
- vysoký rozsah řízení otáček,
- vysoký poměr výkon k velikosti

1.1 Konstrukce motoru

Každý BLDC motor má dvě základní části. Rotor, který tvoří rotační část stroje a stator, který tvoří pevnou část. BLDC motory se dělí na dva základní typy podle umístění rotoru. S vnitřním rotorem (inner rotor) nebo s vnějším rotorem (outer rotor). Oba tyto typy mají své výhody a nevýhody.



Obr. 1.1 Umístění rotoru: uvnitř vlevo "inner rotor", vnější vpravo "outer rotor" [4]

Motor s rotorem uvnitř je znázorněn na *Obr. 1.1 vlevo*. Z obrázku je patrné, že stator obklopuje rotor. Výhodou této konstrukce je lepší odvod tepla než u motoru s vnějším rotorem. Celková konstrukce motoru je menší, z tohoto faktu vyplývá, že hmotnost rotoru bude nižší a motor má lepší dynamické vlastnosti. Nevýhoda je nutnost použití dražších a silnějších permanentních magnetů, kvůli požadavku na vysokou indukci ve vzduchové mezeře mezi rotorem a státorem. Většina BLDC motorů má tento typ konstrukce. [5]

Motor vnějším rotorem je znázorněn na *Obr. 1.1 vpravo*. Hlavní nevýhoda je špatný odvod tepla, jelikož magnety v rotoru se chovají jako izolátory. Další nevýhoda, která plyne z konstrukce, jsou špatné dynamické vlastnosti. Jelikož rotor je v tomto případě větší lze zde použít větší magnety, které nemusí být tak silné. Tento typ má menší pulzační moment. BLDC motory s vnějším rotorem se používají jako pohony v pevném disku nebo například u ventilátorů. [5]

1.1.1 Konstrukce statoru

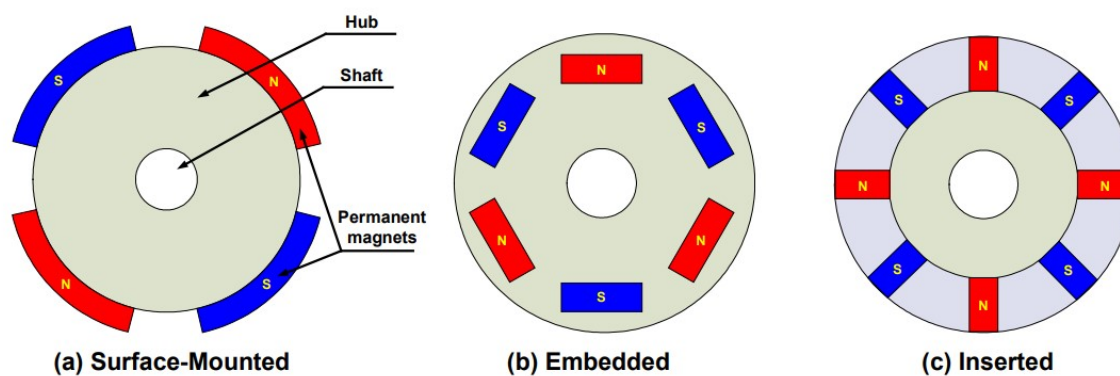
Stator u BLDC motoru je tvořen z transformátorových plechů, které jsou od sebe navzájem elektricky izolovány. Transformátorové plechy jsou ze slitiny železa a křemíku a jejich šířka bývá 0,1mm až 0,6mm. Důvodem použití těchto plechů je snížení ztrát vířivými proudy. Ve statorových drážkách je uloženo vinutí stroje. Nejčastější vinutí bývá třífázové, ale existují i varianty s dvoufázovým nebo jednofázovým. U třífázového vinutí existují dvě varianty zapojení - do trojúhelníka (Δ) nebo do hvězdy (Y). Zapojení do hvězdy (Y) je nejčastěji používané. Počet statorových zubů udává plynulost při nízkých otáčkách. Různé typy statorů jsou zobrazeny na *Obr. 1.2*. [6]



Obr. 1.2 Typy statorů [7], upraveno

1.1.2 Konstrukce rotoru

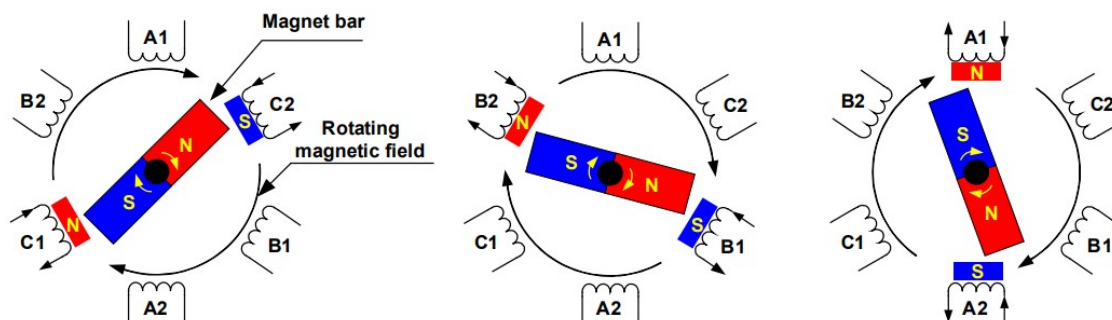
Rotor motoru je umístěn na hřídeli, která se otáčí v ložiskách upevněných v ložiskových štítech, vymezujících polohu uvnitř statoru. Konstantní magnetické pole rotoru je tvořeno párem silných permanentních magnetů. Počet a uspořádání magnetů může být různý, záleží na daném využití. Obvykle je rotor vyráběn od 1 až do 5 pól párů. Tyto pól páry mohou být připevněny na povrchu rotoru, obvykle přilepeny, nebo mohou být vestavěné jak je vidět na *Obr. 1.3*. Čím je vyšší počet pól párů magnetů, tím je menší krok, ale snižuje se zvlnění točivého momentu a krouticí moment narůstá. Magnety jsou na bázi vzácných zemin jako neodym, směs samaria a cobaltu nebo směs boru, feritu a neodymu.[4]



Obr. 1.3 Rozložení magnetů v rotoru [4]

1.2 Princip BLDC motoru

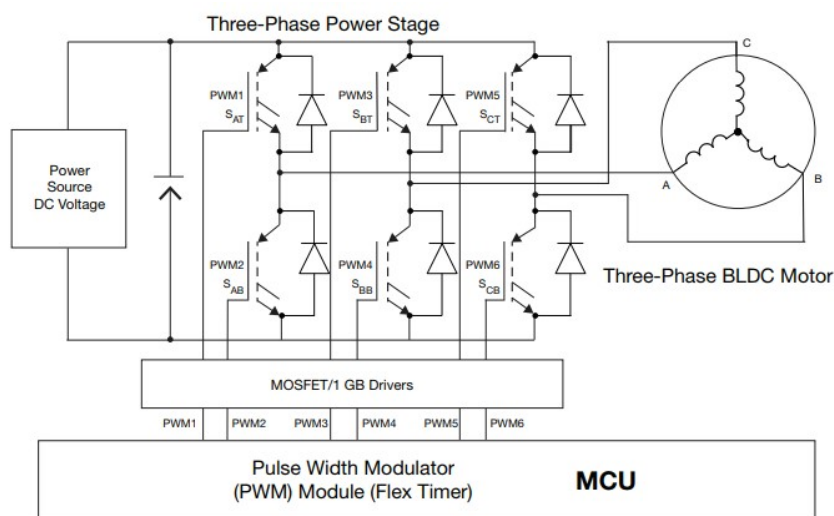
Pohyb motoru je založen na vzájemném přitahování a odpuzování magnetických polí rotoru a statoru. Princip si vysvětlíme na třífázové variantě motoru znázorněné na *Obr. 1.4*. Konstantní magnetické pole rotoru je tvořeno permanentním magnetem, a bez působení cizího pole setrvává v klidu. V okamžiku průchodu proudu vinutím C1 a C2, vznikne u tohoto vynutí vlastní magnetické pole. Severní pól rotoru je přitahován jižním statorovým a jižní pól je přitahován severním statorovým pólem. Vhodným řízením je třeba sepnout vinutí B1 a B2 kde se děj opakuje a rotor je nucen k pohybu. Další je vinutí A1 a A2. Postupným spínáním a vypínáním proudu do jednotlivých vinutí vzniká otáčivý pohyb rotoru. Moment v tomto případě závisí na aktuální amplitudě, počtu závitů na vinutí statoru, pevnosti a velikosti permanentních magnetů a velikost vzduchové mezeře.



Obr. 1.4 Princip vzniku rotačního pohybu [4]

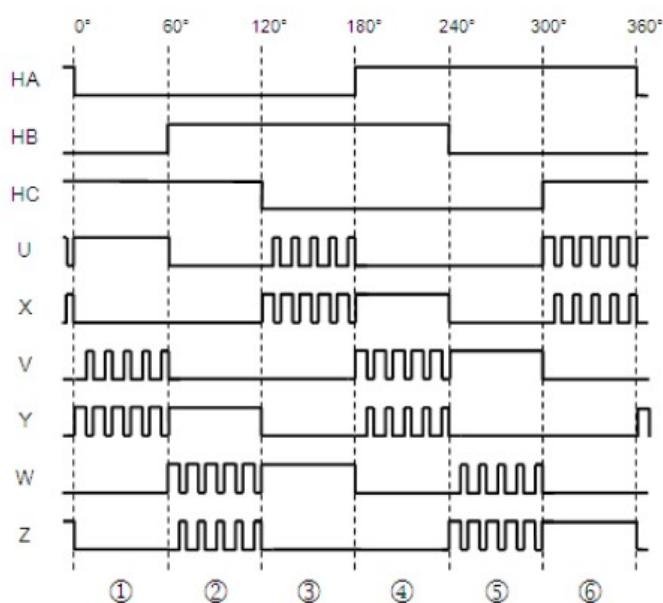
1.3 Možnosti řízení

K řízení BLDC motoru je třeba výkonový obvod a jeho vhodné spínání. Nejčastější výkonový obvod, který se používá, je střídač. Střídače jsou měniče, které přeměňují stejnosměrnou elektrickou energii na střídavou. Je možné dělit střídače na **napět'ové** a **proudové**. Pro řízení BLDC motorů se používá napět'ový střídač. Střídač je elektrický obvod, který obsahuje n -větví podle počtu spínaných fází. U třífázové varianty, která je na *Obr. 1.5* je vidět, že obsahuje tři větve. V každé větvi jsou dvě plně říditelné spínací součástky opatřené antiparalelně zapojenými nulovými diodami. Jako vypínatelné součástky pro velké výkony se většinou používají GTO, IGBT, nebo IGCT naopak pro malé výkony se využívají MOSFETy. Zátěž je připojena mezi dvě spínané součástky. Mezi řídicí částí a samotným střídačem se většinou nachází driver (budič), který zajišťuje, aby spínané součástky pracovaly ve spínacím režimu, a jejich vnitřní logika nedovolí sepnutí v jedné větvi a způsobit tak „invertorový zkrat“ [8].



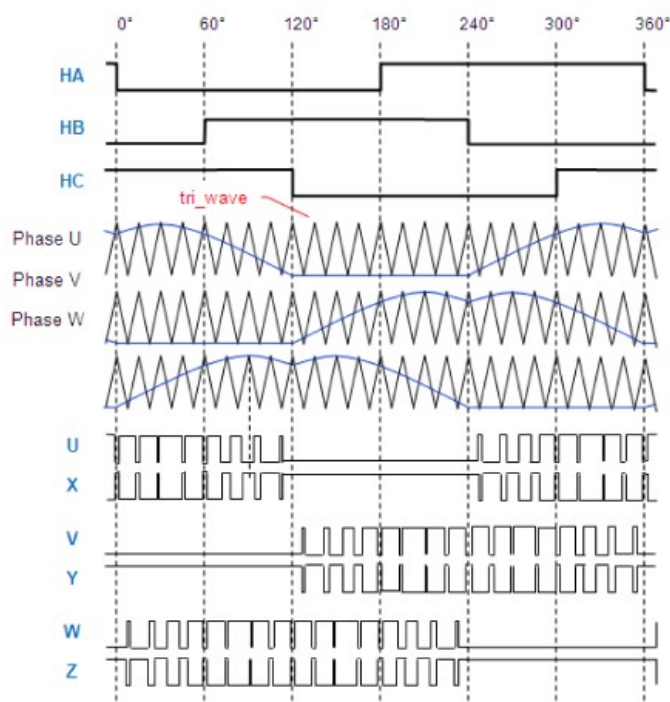
Obr. 1.5 Třífázový střídač s budičem [8]

Možností jak řídit motor, respektive spínat výkonové součástky je několik. Driver, který budeme používat umožňuje řízení „obdélníkové“ nebo „sinusové“. První jmenované je jednoduché, avšak díky své jednoduchosti má nevýhody. Hlavní předpoklad je detekce polohy pomocí tří hallovo sond, které fyzicky jsou posunuty o 120° . Díky Hallovým sondám jsme schopni určit šest různých úhlů natočení rotoru s posunem o 60° . Tranzistory jsou tedy spínány podle aktuální polohy rotoru jak je vidět na *Obr. 1.6*. Hlavní nevýhoda u toho druhu řízení je skokové spínání tranzistorů, které má za následek nekonstantní krouticí moment. [9] [4]



Obr. 1.6 Obdélníkové řízení BLDC motoru [9]

Druhý způsob řízení je zaměřen na plynulou změnu napětí na jednotlivých vinutí. To zajistí konstantní moment otáčení. U tohoto řízení je třeba znát polohu mnohem přesněji než u „obdélníkového“. Tento údaj se obvykle dopočítává od poslední změny signálu z hallovo sond. Pro tento způsob řízení je předpoklad konstantních otáček. Většina driverů i DRV8308 používá pro rozběh obdélníkové a po dosažení konstantních otáček se přepne na sinusové. Na *Obr. 1.7* je znázorněno sinusové řízení. Je patrné, že v každém okamžiku, na rozdíl od obdélníkového řízení, protéká proud všemi fázemi, proto má motor i větší proudový odběr.[9]



Obr. 1.7 Sinusové řízení BLDC motoru [9]

Pro úplnost je třeba uvést poslední z nepoužívanějších typů řízení. Jak obdélníkové tak sinusové řízení měly společně to, že byla nutnost detekovat polohu pomocí hallových sond. Pojem bezsenzorové řízení je obecně chápán tak, že se předpokládá řízení motoru bez použití snímače polohy rotoru, případně rychlosti. Konfigurace systému bez měření polohy rotoru výrazně zlevňuje hardwarové řešení celého systému, jelikož nepoužijeme snímač polohy, což vede k dalším zjednodušením a zlevněním. Toho řízení se používá u motorů, kde by spotřeba hallovo sond nepříznivě ovlivnila účinnost, jedná se o motory s výkonem do 1W. Dále se toto řízení používá např. u pohonů pevných disků kde je technicky obtížné někdy až nemožné senzory umístit. Mezi výhody patří nižší cena, jednoduchost a spolehlivost, která se řídí heslem „co v systému není, nemůže se pokazit“. Možností jak detekovat polohu bez senzorů u toho řízení je několik. Jedná se o metody měření průchodu indukovaného napětí nulou, přímé měření indukovaného napětí, detekce průchodu proudu nulovou diodou a detekce třetí harmonické.

1.4 Senzory polohy

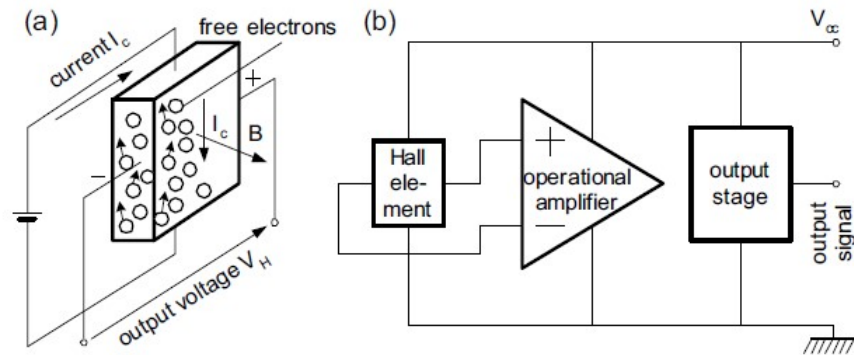
Na rozdíl od klasických kartáčových DC motorů, je komutace BLDC motoru prováděna elektronicky. Aby bylo možné takovéto řízení použít, je nutné znát aktuální polohu natočení rotoru. Existuje celá řada způsobů jak snímat polohu rotoru. Obecně tyto způsoby dělíme na snímání polohy pomocí senzorů a tzv. bezsenzorové snímání polohy. K prvnímu způsobu patří snímání pomocí Hallových sond, optického enkodéru nebo revolveru. Druhý způsob je založen především na měření elektrických nebo magnetických veličin.

1.4.1 Hallova sonda

Nejpoužívanějším typem senzorů polohy, především u BLDC motorů jsou Hallovy senzory. Tyto senzory využívají Hallova jevu, kdy je měřeno tzv. Hallovo napětí, které lze vyjádřit pomocí vzorce 1.1.

$$V_H = k_H \frac{1}{\delta} I_C B \sin \beta \quad (1.1)$$

Když vložíme Hallův senzor do stacionárního magnetického pole, kde zdrojem tohoto pole je vodiče protékaný stejnosměrným proudem, tak je generováno napětí V_H . Velikost tohoto napětí je závislé na k_H tzv. Hallova konstanta, δ zde udává tloušťku polovodičové destičky ze které je senzor tvořen, I_c je velikost protékaného proudu polovodičové destičky, B je magnetická indukce a $\sin \beta$ je úhel mezi vektorem B a povrchem polovodičové destičky. Z principu tohoto senzoru vyplývá nutnost externího napájení. Řez senzorem a jeho blokové schéma je naznačeno na *Obr. 1.8*. Polarita napětí je závislá na směru magnetického pole tedy, zda je senzor u severního (S) nebo jižního (J) pólu magnetu. Tento senzor se také používá jako detektor magnetické indukce.

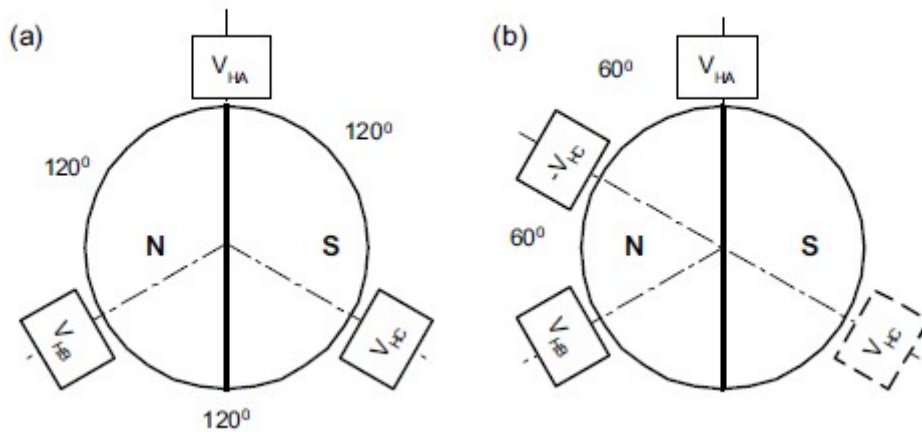


Obr. 1.8 Hallův snímač a) princip funkce b) blokové schéma integrovaného snímače [10]

K určení polohy rotoru u třífázového DC motoru je nutnost použití alespoň 3 snímače, které musí být posunuty o úhel 60° elektrických nebo 120° elektrických jak je znázorněno na Obr. 1.9. Hodnota toho úhlu je závislá počtu pól-párů a počtu fází motoru, jak je vidět ze vzorce 1.2. Tento vzorec říká, že úhel α_H tedy úhel, který třeba pro přesné sejmutí polohy je roven tehdy, když vezmeme úhel 360° a vydělíme ho počtem fází ($m_1 = 3$) a počtem pólových dvojic ($p = 1$). Pro motor, který byl použit v praktickém řešení vyšel úhel 120° .

$$\alpha_H = \frac{360^\circ}{m_1 p} \quad (1.2)$$

Na rotoru se pravidelně střídají póly magnetů. Hallové senzory jsou vestavěny do nerotující části motoru, ve většině případů na zadní část statoru. Jsou osazeny na desce plošných spojů, což umožňuje dosažení přesnější polohy. Je kladen velký důraz na jejich přesné umístění, neboť jakákoliv odchylka např. nesouosost by vedla k nepřesnému vyhodnocování polohy.[10]

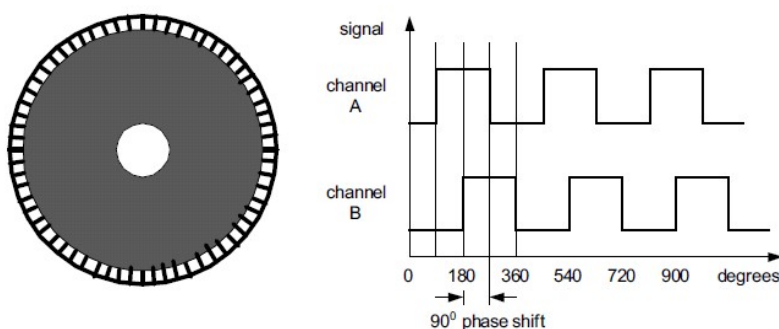


Obr. 1.9 Umístění senzorů pro 60° a 120° [10]

1.4.2 Optický enkodér

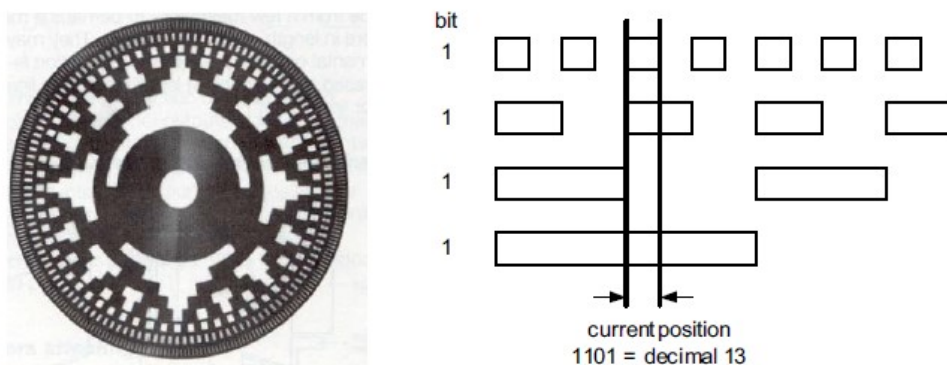
Tento druh snímačů dělíme do dvou základních skupin – absolutní a inkrementální enkodéry. Jedná se o optický snímač, obsahující zdroj světla většinou UV led dioda, a fotocitlivý prvek. Mezi zdroj a přijímač je vložen disk s otvory, které jsou rozmístěny po obvodu a pootočením tohoto disku který je připevněn na hřídeli motoru určujeme, zda paprsek světla dopadne na přijímač nebo ne.

Inkrementální enkodér generuje data o poloze prostřednictvím elektrických impulzů. Tento impulz je generován vždy při pootočení disku o daný úhel. Poloha rotoru je pak určena čítáním výstupních pulzů enkodérů. Existuje víc variant těchto snímačů, které liší pouze v počtu kanálů. Díky druhému kanálu, který je posunut o 90° jsme schopni rozlišit směr otáčení jak je patrné na Obr. 1.10. Některá čidla se vyrábí 3-kanálové kde třetí kanál generuje pulz jednou za otáčku a nazýváme ho „nulovým pulsem“



Obr. 1.10 Inkrementální enkodér [10]

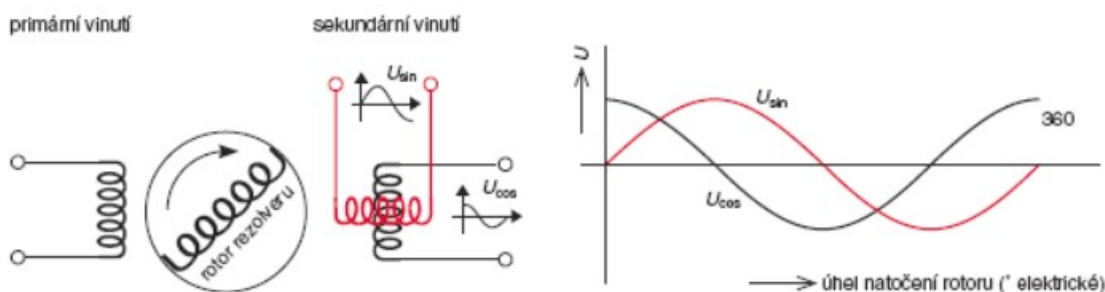
Absolutní enkodér je snímač, který poskytuje vždy přesnou polohu o natočení hřídele. Tento enkodér má více snímacích kanálů, jejich počet určuje rozlišení a přesnost enkodéru. Disk je vybaven několika otvory různé šířky lépe je vidět na *Obr. 1.11*. Každá poloha je definována unikátní kombinací těchto otvorů, které jsou většinou reprezentovány pomocí binární kombinace. Velká výhoda oproti inkrementálním enkodérům je, že při výpadku napájení nedojde ke ztrátě informace o poloze hřídele.[11]



Obr. 1.11 Absolutní enkodér [10]

1.4.3 Resolver

Resolver používáme pro měření úhlové rychlosti, ale může být použit i jako čidlo absolutní polohy. Resolver jak ho vidíme na *Obr. 1.12* se skládá z primárního pohyblivého vinutí a dvou sekundárních vinutí svírajících pravý úhel. Primární vinutí je buzeno střídavým napětím, a v závislosti na jeho poloze je indukováno do sekundárních cívek. Tato napětí jsou funkcemi sinus a cosinus a z vyhodnocení jejich amplitud lze získat aktuální polohu hřídele.



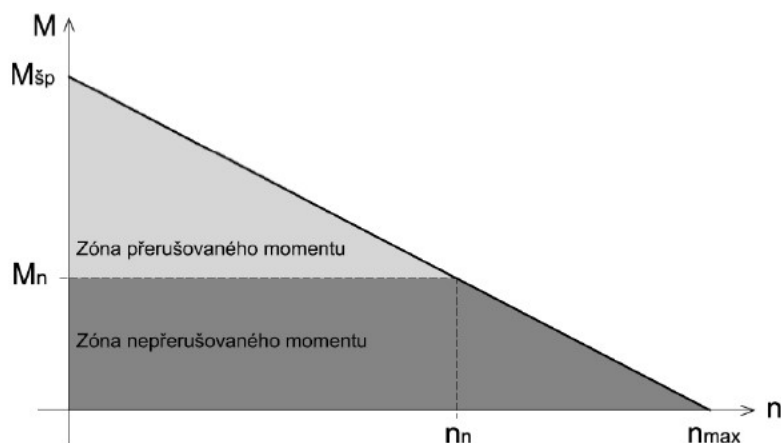
Obr. 1.12 Resolver a řídicí průběhy harmonických signálů [10]

Rychlost otáčení je dána frekvencí těchto napětí a směr otáčení lze určit z fázového posunu mezi nimi. Přesnost revolveru je definována jako rozdíl mezi elektrickým úhlem

indukovaných napětí na sekundárních cívkách a mechanickým úhlem nebo úhlovou pozicí rotoru.[11], [12]

1.5 Momentová charakteristika BLDC motoru

Křivka představující závislost otáček motoru na kroutící momentu se nazývá momentová charakteristika, zobrazena na *Obr. 1.13*. Momentová charakteristika má několik zajímavých bodů. Prvním z nich je špičkový moment ($M_{šp}$), který udává velikost maximálního momentu jaký je motor schopný vyvinout, ale také velikost momentu při rozběhu. V případě překročení tohoto momentu se motor zastaví. Další zajímavý bod je jmenovitý moment (M_n), který motor vyvine při jmenovitých otáčkách. Motor je schopen až o 50% větších otáček, avšak na úkor snížení momentu. Pracovní prostor motoru se nachází pod křivkou, kde rozdělujeme trvalý provoz a krátkodobý. Za krátkodobý provoz považujeme dobu, která je nutná pro rozběh motoru. V tuto chvíli nastane momentová špička a s momentem je svázána napěťová, čímž dochází k oteplení motoru.



Obr. 1.13 Momentová charakteristika BLDC motoru, upraveno z [4]

1.6 Porovnání s ostatními točivými stroji

Při porovnání BLDC motoru oproti klasickému DC a asynchronnímu motoru se BLDC jeví jednoznačně jako lepší. BLDC motory mají menší požadavky na údržbu a mají mnohem větší životnost než klasické DC motory. Jejich poměr výkon oproti velikosti je mnohem větší než u DC a asynchronních strojů. Jsou mnohem tišší a díky absenci kartáčů produkují mnohem méně elektromagnetického rušení (EMI). Nízko napěťový model je ideální pro bateriové aplikace. Mezi hlavní nevýhody patří nutnost elektronického řízení a

vyšší cena kvůli použití kvalitních permanentních magnetů. V příložené tabulce *Tab. 1.1* je srovnání bezkartáčového motoru oproti klasickému DC motoru s komutátorem a v tabulce *Tab. 1.2* je srovnání s asynchronním motorem.

Tab. 1.1 Srovnání bezkartáčového a kartáčového motoru [4], upraveno

	Bezkartáčový motor	Kartáčový motor
Komutace	Elektronická komutace	Mechanická (kartáče)
Údržba	Bezúdržbový	Vyžadována periodická
Životnost	Dlouhá	Kratší
Rychlost/točivý moment charakteristika	Umožňuje provoz na všech rychlostech	Při vyšších rychlostech, kartáč zvyšuje tření, čímž se snižuje užitečný moment
Setrvačnost rotoru	Nízká, protože má permanentní magnety na rotoru. To snižuje dynamické zpoždění.	Vyšší setrvačnost rotoru, která limituje dynamickou charakteristiku
Rychlostní rozsah	Vyšší	Nižší, mechanické omezení kartáči
Rušení	Nízké	Oblouky na kartáčích generují rušení, způsobují EMI v blízkosti zařízení
Náklady	Vyšší, permanentní magnety zvyšují cenu	Nízká
Řízení	Složitě a nákladné	Jednoduché a levné
Požadavky na řízení	Vyžaduje mikroprocesor	Pro konstantní rychlost mikroprocesor není vyžadován. Pouze pokud žádáme proměnou rychlost
Efektivita	Vysoká	Střední

Tab. 1.2 Srovnání bezkartáčového a asynchronního motoru [4], upraveno

	Bezkartáčový motor	Asynchronní motor
Momentová charakteristika	Plochá – provoz se jmenovitou zátěží v celém rozsahu rychlosti	Nelineární – nižší moment při nízkých rychlostech
Poměr výkon/ rozměry	Vysoký – rozměr šasi redukován díky výbornému odvodu tepla z vinutí umístěného na statoru	Střední – rotor zabírá více místa
Moment setrvačnosti rotoru	Nízký díky permanentním magnetům, dobré dynamické vlastnosti pohonu	Vysoký, špatná dynamika

Rozběhový proud	Není potřeba zvláštní obvod pro rozběh	Až sedminásobek jmenovitého proudu, vhodné doplnit obvodem pro rozběh (přepínání hvězda-trojúhelník)
Požadavky na řízení	Nelze provozovat bez elektronické regulace	Pro provoz s pevnou rychlostí není potřeba regulátor
Skluz	Žádný skluz, rotor se otáčí synchronně se statorovým polem	Skluz rostoucí se zátěžným momentem

2 Popis CAN sběrnice

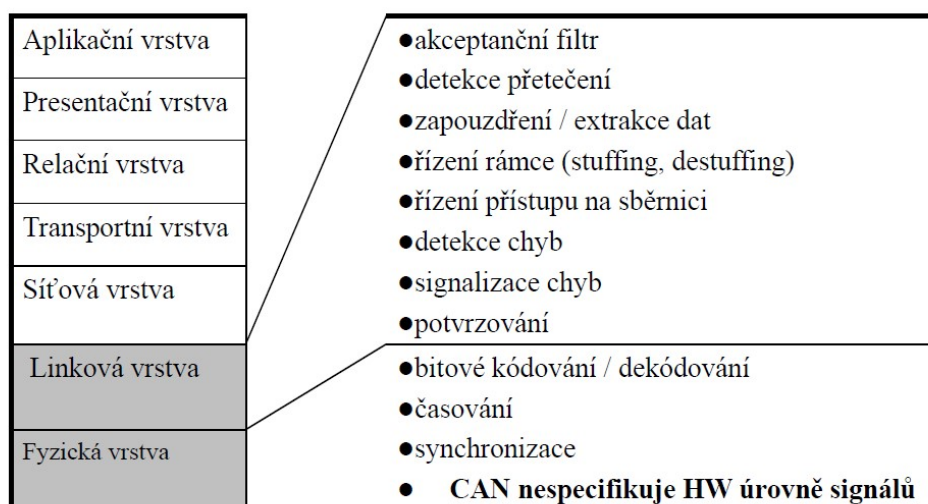
Controller Area Network (CAN) je sériová komunikační sběrnice, která byla vyvinuta firmou Robert Bosch GmbH. Poprvé byla uvedena do provozu v 80. letech dvacátého století. Dnes patří k nejvíce používaným sběrnicím v automobilovém průmyslu, ale i například v automatizaci. Mezi hlavní důvody proč je CAN sběrnice používaná tak hojně, patří:

- Zaručená doba odezvy
- Podpora režimu „multimaster“, (každý uzel může vysílat bez potřeby řídicího uzlu)
- Má možnost jednoduše přidat další účastníky (na robotu Crawler velice žádaná vlastnost, při návrhu nové jednotky se pouze rozšíří o nový identifikátor a jednotka se připojí do stávajícího systému)
- Velikost rámce až 8 bytů
- Hardwarová detekce chyb
- Přenosová rychlost až 1Mb/s, v závislosti na délce vedení viz *Tab. 2.1*
- Autonomní odpojení poškozených jednotek [13]

Tab. 2.1 Závislost přenosové rychlosti na délce sběrnice, upraveno [13]

Přenosová rychlost	Maximální délka sběrnice
5 kBit/s	10km
100 kBit/s	620m
500 kBit/s	130m
1 MBit/s	40m

Díky vlastnostem a podpoře výrobců hardwaru se tento systém rozšířil a získal mezinárodní normou ISO 11898. Tato norma popisuje fyzickou a linkovou vrstvu referenčního modelu ISO / OSI, který je vidět na *Obr. 2.1* a specifikuje model CAN 2.0A. O pár let později vznikla specifikace CAN2.0B, která se liší v počtu bitů v identifikátoru zprávy, kde CAN2.0A má 11 bitů a CAN2.0B ho rozšiřuje na 29 bitů. Existuje i několik jiných standardů, které představují aplikační vrstvu podle referenčního modelu ISO/ OSI, ale nespádají do specifikace sběrnice CAN. Mezi tyto standardy patří např. CAN Open, CAL, CAN Kingdom, DeviceNet a OSEK, který se používá jako operační systém v automobilech.[13]



Obr. 2.1 Referenční model ISO/OSI sběrnice CAN [13]

2.1 Fyzická vrstva

Přenosové medium používané CAN sběrnici je nejčastěji kroucená měděná dvojlinka, může být ale obecně použito jakékoliv medium které je schopno přenášet dva stavy. Důvod proč se používá kroucená dvojlinka kvůli odolnosti vůči rušení. Rušení se naindukují do obou vodičů stejně, CAN sběrnice však pracuje na principu diferenčního napětí mezi vodiči, které se po naindukování napětí nezmění. Vodiče použité na sběrnici označujeme CAN_H a CAN_L. Na sběrnici CAN rozlišujeme dva stavy *dominant* a *recessive*, které jsou obdobou logických hodnot „1“ a „0“. Připojení jednotlivých uzlů je realizováno pomocí logického součinu, jelikož jednotlivé uzly jsou připojeny pomocí budičů s otevřeným kolektorem. Aby byl na sběrnici stav *recessive*, tak musí všechny uzly vysílat

recessive, pokud alespoň jeden uzel vyšle stav dominant tak je celá sběrnice ve stavu dominant. Tato vlastnost je způsobena vnitřním zapojení budičů, které odpovídá otevřenému kolektoru.

Maximální počet uzlů je omezen vlastnostmi sběrnice, při větším počtu uzlů nad několik desítek, se komunikace po CAN sběrnici stává neefektivní. Přenosová rychlost závisí na délce celé sběrnice, jak jsme si už ukázali v *Tab. 2.1*. Obecně rozlišujeme dvě varianty CAN sběrnice s označením *low-speed* a *high-speed*. Obě varianty se liší v napěťových úrovních viz *Tab. 2.2* a *Tab. 2.3*

Tab. 2.2 Napěťové úrovně sběrnice low-speed CAN

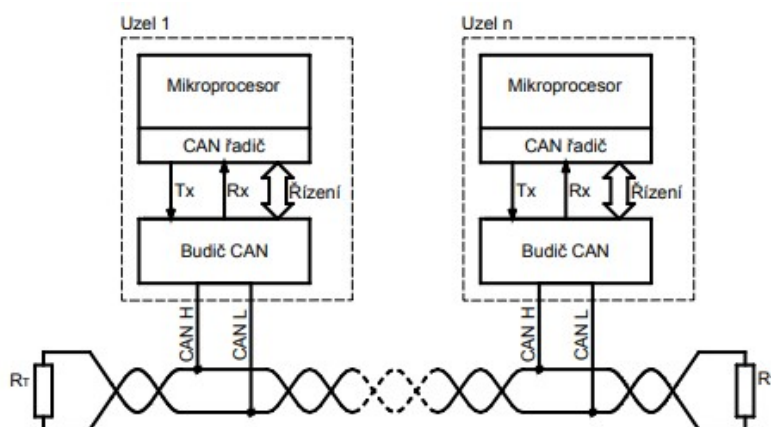
Napětí	Stav recessive	Stav dominant
$U_{CAN\ H}$	$> 4,8\ V$	$> 3,6V$
$U_{CAN\ L}$	$< 0,2\ V$	$< 1,4\ V$
U_{diff}	$< -4,6V$	$> 2,2V$

Tab. 2.3 Napěťové úrovně sběrnice high-speed CAN

Napětí	Stav recessive	Stav dominant
$U_{CAN\ H}$	$\cong 2,5\ V$	$< 4,5V$
$U_{CAN\ L}$	$\cong 2,5\ V$	$> 0,5\ V$
U_{diff}	$> -0,5V; < 50\ mV$	$> 1,5V; < 3\ V$

Možné zapojení sběrnice CAN je znázorněno na *Obr. 2.2*. Na tomto obrázku je znázorněno zapojení, kde se komunikační uzel skládá z mikroprocesoru, který obsahuje řadič CAN a k němu je připojen externí budič sběrnice CAN. Spojení mezi řadičem a budičem je většinou pomocí sériové komunikace. Tento obrázek odpovídá přibližně zapojení, které je použito na čtyřkolovém robotu Crawler. Ten obsahuje několik řídicích jednotek, kde každá má své dílčí úkoly např. ovládání motorů, battery management atd. U CAN sběrnice je důležité, aby na obou koncích sběrnice byl 120Ω odpor. Tato hodnota

odporu odpovídá přibližně vlnové impedanci krouceného páru z UTP vodiče při rychlosti 1Mbit/s. Fyzická vrstva má starosti také synchronizaci a časování bitů.

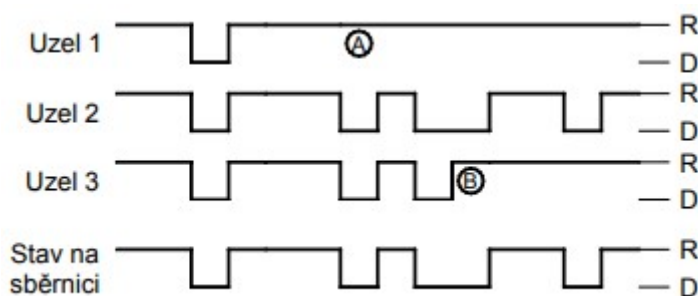


Obr. 2.2 Zapojení CAN sběrnice [14]

2.2 Linková vrstva

Seznam všech funkcí linkové vrstvy je vypsán na *Obr. 2.1*. Linková vrstva se u sběrnice CAN dělí na podvrstvu řízení přístupu na sběrnici (*MAC – Medium Access Control*) na podvrstvu řízení datového spojení (*LCC – Logical Link Control*).

Podvrstva řízení na sběrnici zabezpečuje přenos dat a řídí přístup na sběrnici. Řízení přístupu na sběrnici probíhá náhodně s řešením kolizí podle priority zprávy. Pokud je sběrnice volná tak může každý uzel vyslat svou zprávu. Úkon, který se nazývá arbitráž, nastává v případě, že několik uzlů chce najednou vyslat zprávu. Tento stav je naznačen na *Obr. 2.3*. Na začátku každé zprávy je vysílán identifikátor, který určuje význam zprávy ale také její prioritu. Když uzel vysílá postupně identifikátor zprávy vysílá bit s hodnotou recessive a zjistí, že na sběrnici je stav dominant, tak okamžitě ukončí vysílání. O další vyslání zprávy se pokusí, až bude sběrnice volná, neboť detekoval, že současně sním, chtěl vysílat uzel s větší prioritou. Na *Obr. 2.3* je vidět, že arbitráž vyhrál uzel 2, jelikož má nejvyšší prioritu. Z toho vyplývá, že čím nižší hodnota identifikátoru, tím vyšší priorita při vysílání zpráv.



Obr. 2.3 Příklad arbitráže [14]

Podvrstva řízení přístupu na sběrnici sestavuje rámce a vkládá doplňkové bity (*bit stuffing*). Jedná se o vložení bitu s opačnou hodnotou v případě, že bylo odesláno pět po sobě jdoucích bitů se stejnou hodnotou. Díky tomuto procesu můžeme synchronizovat všechny uzly na sběrnici. Tato podvrstva má dále na starost i zabezpečení dat, které provádí několika způsoby.

- Monitorování – vysílač stále porovnává vysílanou hodnotu s hodnotou na sběrnici. Pokud jsou tyto hodnoty různé je hlášena chyba. Jediný případ kdy není hlášena chyba je při arbitráži.
- Kontrola vložení doplňkového bitu – při porušení vkládání doplňkových bitů je hlášena chyba
- CRC – každý rámec obsahuje blok s názvem CRC kde je uložen kontrolní cyklický kód. Když se tento kód nerovná je hlášena chyba.
- Potvrzení – každá zpráva obsahuje bit ACK, který musí být při správném přijetí přepsán příjemcem. Pokud se tak nestane je hlášena chyba.
- Kontrola zprávy – kontroluje správný tvar zprávy (kontrola charakteristických bitů) při poruše je hlášena chyba

Jestliže kterýkoliv uzel na sběrnici detekuje některou z chyb, tak vyšle chybový rámec (viz kapitola 2.3).

2.3 Způsob komunikace

Komunikace po sběrnici CAN probíhá pomocí zpráv, které jsou specifikovány ve čtyřech typech zpráv: *datová zpráva*, *žádost o data*, *zpráva o chybě* a *zpráva o přetížení*. První dva uvedené typy zpráv slouží pro přenos dat mezi jednotlivými uzly. Zatímco zbývající dva typy slouží pro řízení provozu na sběrnici.

Datová zpráva slouží k výměně dat mezi jednotlivými uzly. Tuto zprávu může vysílat každý uzel, je-li sběrnice volná. V případě, že několik uzlů chce vyslat zprávu ve stejný okamžik zprávu, následuje arbitráž, kterou vyhraje uzel s nejvyšší prioritou. Délka odeslaných dat může být až 8 bytů. Struktura datového rámce je zobrazena na *Obr. 2.4*.



Obr. 2.4 Struktura datové zprávy [15]

Začátek zprávy se liší podle použité specifikace. V případě CAN 2.0A, který je zobrazen na *Obr. 2.4* má pouze 11bitový identifikátor. Specifikace CAN 2.0B má stejnou podobu jako CAN 2.0A liší se pouze v tom, že rozšířený formát má navíc bity SSR a IDE, kterým se vyznačuje rozšířený formát, na tyto bity je brán zřetel při arbitráži. Po těchto dvou bitech následuje druhé 18 bitové pole identifikátoru.

Význam jednotlivých částí datového rámce CAN2.0A

- SOF (Start Of Frame) – synchronizační bit
- ID (IDentifier) – 11 bitů dlouhé identifikační pole a zároveň priorita zprávy
- RTR (Remote Transmission Request) – bit určující typ zprávy („0“ – data, „1“ – požadavek na data)
- IDE (ID Extension) – bit který určuje, zda se jedná o 11bit ID nebo 29 bit ID
- Rezerva – bit rezervovaný pro budoucí využití
- Délka – 4 bity dlouhé pole, které udává délku pole DATA
- DATA – pole dlouhé až 8 bytů, obsahuje přenášenou informaci
- CRC15 (Cyclic Redundancy Code) – 15 bitů dlouhý cyklický redundantní kód pro kontrolu správnosti přenesených dat
- ERC (End CRC) – bit informující o konci CRC
- AKC0 a ACK1 (ACKnowledge) – dva bity pro potvrzení přijetí zprávy
- EOF (End Of Frame) – 7 bitů dlouhé ukončovací pole
- INT (INTermission) 3 bity dlouhá prodleva mezi dvěma rámci

Specifikace CAN2.0B má navíc bit SSR, 18 bitový identifikátor jejich princip je popsán výš.

Žádost o data je další typ zprávy. Tento typ zprávy vyšle uzel, který požaduje data od jiného uzlu. Jako datové zprávy zde platí, že sběrnice musí být volná, v případě současného vysílání několika uzlů následuje arbitráž. Žádost o data má velmi podobnou strukturu jako datová zpráva, jediný rozdíl je v bitu RTR a není zde datové pole. Bit RTR má v hodnotu recessive, v datové zprávě má hodnotu dominant. Z toho vyplývá, že při současném odeslání datové zprávy a žádosti o data vyhraje uzel, který vysílá data.

Třetím typem zprávy je zpráva o chybě, která slouží k signalizaci chyb na sběrnici CAN. Vyslat tuto zprávu může jakýkoliv uzel, který detekovat některou z chyb na sběrnici. Mezi tyto chyby patří chyba CRC, chyba rámce a chyba bit stuffingu. Zpráva se skládá z chybového příznaku a z oddělovače zprávy o chybě. Chybový příznak je dvojího typu, aktivní se skládá ze šesti dominant bitů a jeho vyslání dojde k poškození právě vysílané zprávy a k vyvolání chyby vkládání bitů. Pasivní příznak se skládá ze šesti recessive bitů, čímž nedojde k ovlivnění právě vysílané zprávy. Oddělovač chybové zprávy obsahuje osm recessive bitů.

Posledním typem zprávy je zpráva o přetížení, kterou vyšle uzel v případě vlastního přetížení kdy není schopen zpracovávat další data. Přetížený uzel pošle tento typ zprávy, aby získal čas pro zpracování dat. Struktura zprávy je podobná zprávě o chybě, Příznak má šest dominantní bitů (jako aktivní příznak), a oddělovač zprávy má osm recesivních bitů. Zprávu o přetížení uzel vyšle po ukončení vysílané datové zprávy nebo zprávě o chybě.

Informace popsané v této kapitole jsou základní, více informací o CAN sběrnici lze nalézt v [13], [14] a [15] odkud jsem čerpal informace pro tuto kapitolu.

3 Hardwarová část

V této části práce se zaměřím na návrh a realizaci řídicí jednotky pro dva BLDC motory s rozhraním CAN. Budou zde stručně popsány použité BLDC motory, schéma zapojení celé řídicí jednotky, použité součástky a postup při realizace DPS. Jak zaznělo již v úvodu tato řídicí jednotka a motory nahradí stávající řešení ve čtyřkolovém robotu typu Crawler, který se nachází na Katedře aplikované elektroniky a telekomunikací kde slouží především pro výukové účely a k prezentaci katedry na akcích jako jsou např. Den otevřených dveří.

3.1 Popis a základní parametry použitých BLDC motorů

Princip, konstrukci a možnost řízení BLDC motorů jsme si vysvětlili v kapitole 0. Na *Obr. 3.1* je vidět motor, který má nahradit stávající stejnosměrný. Tyto motory jsou od firmy TRACKSTAR s označením 21,5T. V *Tab. 3.1* jsou vypsány základní parametry motoru. Z označení 21.5T lze vyčíst, že na jednom vinutí statoru je 21,5 závitů. Motor je typu inrunner, tedy rotor je uvnitř statoru a má snímání polohy, které je zajištěno pomocí tří hallových sond, jejich výstupní a napájecí piny jsou vyvedeny na 6-pinový konektor, který je vidět na *Obr. 3.1* vpravo. Tento motor se může pochlubit silnými neodymovými magnety na rotoru a možností tzv. „časování“ tedy doladit natočení senzorů na statoru, lépe je vidět na *Obr. 3.1* vpravo dole. Tento motor nachází velké využití v RC modelech.



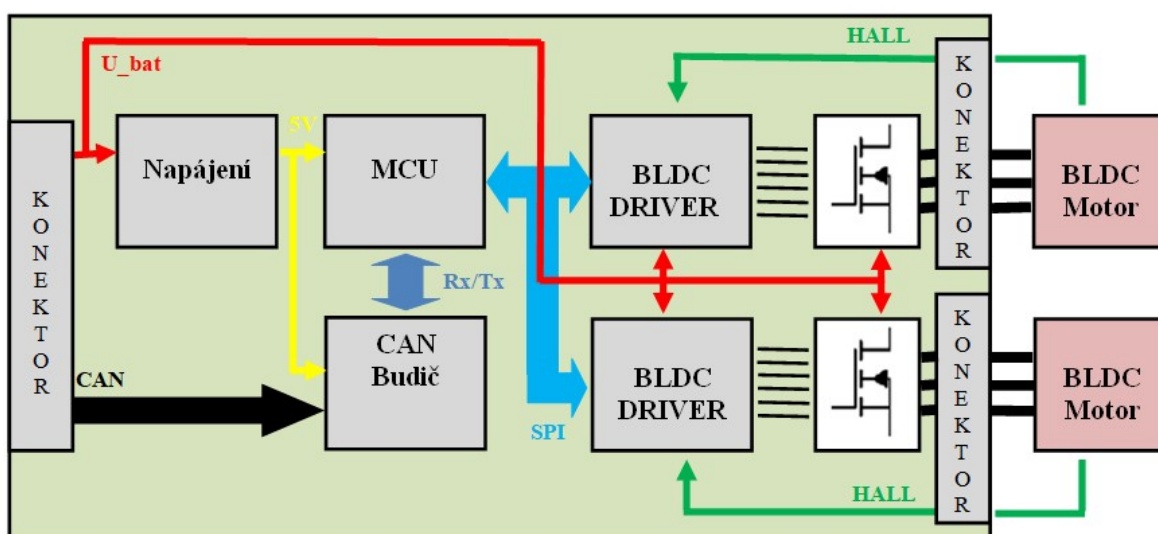
Obr. 3.1 Motor TrackStar 21.5T [16]

Tab. 3.1 Základní parametry motoru TrackStar 21.5T, převzato z [16]

Rychlost	1855 ot./V
Max. napětí	7,4 V
Max. proud	22 A
Max. výkon	150 W
Počet pól-páru	1
Průměr motoru	36mm
Délka	53mm
Váha	177g

3.2 Schéma a popis řídicí jednotky

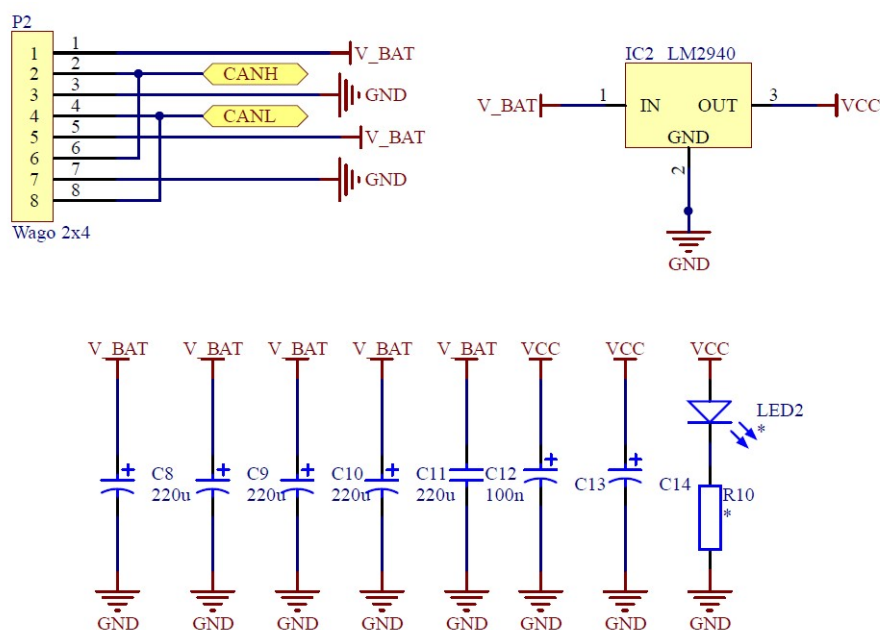
Schéma řídicí jednotky je pro lepší pochopení a přehlednost rozděleno do bloků, které jsou vidět na Obr. 3.2. K návrhu schéma a desky plošných spojů byl použit návrhový software Altium Designer. Červená čára na blokovém schématu značí přívod z baterie, oranžová je 5V větev, a zelená čára značí signály od Hallových sond. Silné barevné šipky značí přenos dat pomocí sběrnice. Černá barva značí CAN sběrnici, modrá SPI, přes kterou komunikuje mikrokontrolér s BLDC drivery a tmavě modrá barva značí sériovou linku, která se stará o přenos dat mezi mikrokontrolérem a budičem CAN sběrnice. V příloze A je umístěno celé schéma.



Obr. 3.2 Blokové schéma řídicí jednotky BLDC motorů s rozhraním CAN

3.2.1 Napájení

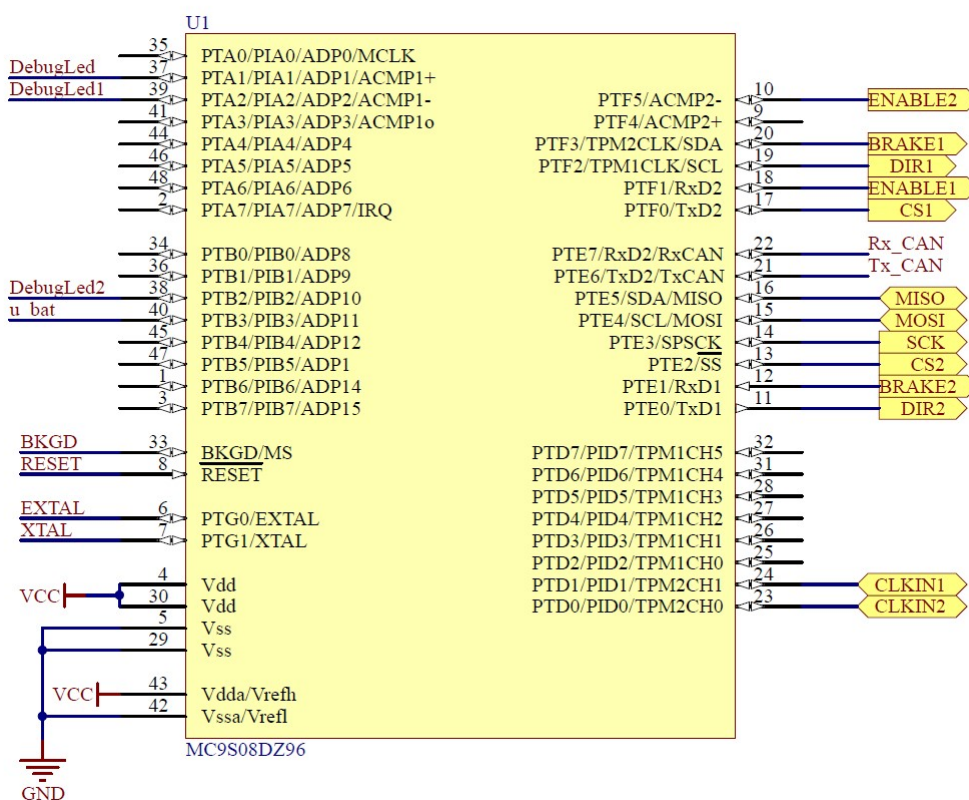
Napájení celé jednotky a celého robota bylo zajištěno pomocí dvoučlánkové Lithium Polymerové baterie, s nominální hodnotou napětí 7,4V. V mém původním návrhu byl pro napájení BLDC Driveru, který funguje od 8,5V přidán DC-DC měnič LT1930 od firmy LINEAR TECHNOLOGY v zapojení STEP-UP. Ten zvládl z 5V zvýšit napětí na 12V a dodávat proud o velikosti 250mA. Tím bylo zajištěno napájení pro BLDC drivery, výkonový můstek a motory byly napájeny přímo z baterie. Bohužel BLDC Driver, který kontroluje velikost napětí na třífázovém můstku, vyhodnotil chybu „VM undervoltage“ (podpětí na motoru). Proto vznikl požadavek na zvýšení napěťové úrovně v celém systému. Byla zakoupena nová tříčlánková Li-Pol baterie s nominální hodnotou napětí 11,7V. Obvodové schéma v bloku napájení se zjednodušilo o DC-DC měnič, který nebyl již třeba. Aktuální schéma bloku napájení je vidět na *Obr. 3.3*, které obsahuje lineární napěťový regulátor LM29405 od firmy Texas Instruments, který je schopen dodávat až 1A. Je zde umístěno několik blokovacích kondenzátorů a led dioda, která signalizuje správnou funkci 5V napájecí větve. V bloku napájení je umístěn přívodní konektor od značky WAGO, který má 2x4 vstupních pinů. Na tyto piny je přivedeno napájení z baterie a je jím zajištěno připojení na CAN sběrnici. Tento konektor je v celém robotu standardizován.



Obr. 3.3 Schéma napájecí části

3.2.2 Mikrokontrolér

Řídicí jednotka pro BLDC motory je založena na 8-bitovém jednočipovém mikroprocesoru MC90S08DZ96 od firmy NXP. Při výběru tohoto mikroprocesoru byl kladen důraz především na periférii se sběrnicí MSCAN, která podporuje normu CAN2.0A a CAN2.0B, ale také na kompatibilitu HW a SW používaných na katedře KAE. Jedná se o mikroprocesor, který disponuje pamětí typu FLASH o velikosti 96kB, pamětí typu EEPROM o velikosti 2kB a pamětí typu RAM o velikosti 6kB. Z periférií, kterými je mikroprocesor vybaven, byl využit A/D převodník, který je připojený přes odporový dělič k baterii a kontroluje stav akumulátoru, CAN sběrnice, která obstarává komunikaci s ostatními řídicími jednotkami, SPI sběrnice, přes kterou komunikuje s BLDC Drivery a několik TIMERŮ. Dále je zde využito několik I/O pinů, např. pro RGB led diodu, která může být použita jako signalizace stavů. K mikroprocesoru je připojen krystalový oscilátor o frekvenci 8MHZ, od této frekvence je odvozeno časování pro všechny periferie. Nezbytnou součástí je 6-pinový programovací konektor, který je připojen na piny BKGD/MS a RESET. Zapojení mikroprocesoru je viděl na *Obr. 3.4* a v *Tab. 3.2* je přehled všech pinů. Při návrhu zapojení jsem se řídil katalogovým listem, který je k nalezení na [17].



Obr. 3.4 Zapojení mikrokontroléru MC90S08DZ96

Tab. 3.2 Přehled pinů MC9S08DZ96

pin	Název pinu	Funkce	pin	Název pinu	Funkce
1	PTB6	*	25	PTD2	*
2	PTA7	*	26	PTD3	*
3	PTB7	*	27	PTD4	*
4	VDD	5V	28	PTD5	*
5	VSS	GND	29	VSS	GND
6	PTG0	Oscilátor 8MHz	30	VDD	5V
7	PTG1	Oscilátor 8MHz	31	PTD6	*
8	RESET	Reset MCU	32	PTD7	*
9	PTF4		33	BKGD	BKGD
10	PTF5	Zapnutí M2	34	PTB0	*
11	PTE0	Změna směru M2	35	PTA0	*
12	PTE1	Brzda M2	36	PTB1	*
13	PTE2	SPI->CS2	37	PTA1	RGB dioda (RED)
14	PTE3	SPI->SCK	38	PTB2	RGB dioda (BLUE)
15	PTE4	SPI->MOSI	39	PTA2	RGB dioda (GREEN)
16	PTE5	SPI-> MISO	40	PTB3	A/D měření baterie
17	PTF0	SPI-> CS1	41	PTA3	*
18	PTF1	Zapnutí M1	42	VSSA	5V
19	PTF2	Změna směru M1	43	VDDA	GND
20	PTF3	Brzda M1	44	PTA4	*
21	PTE6	Tx_CAN	45	PTB4	*
22	PTE7	Rx_CAN	46	PTA5	*
23	PTD0	Změna rychlosti M1	47	PTB5	*
24	PTD1	Změna rychlosti M2	48	PTA6	*

„*“ = nezapojený pin

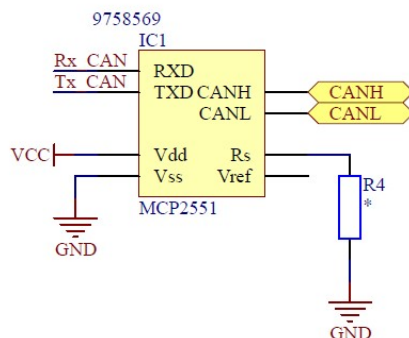
„M1“ = motor 1

„M2“ = motor 2

3.2.3 CAN budič

Jako budič CAN sběrnice byl vybrán MCP2551 od firmy Microchip. Tento budič podporuje tři operační módy, *high-speed*, *slope control* a *standby*. Výběr těchto módů lze uskutečnit připojením odporu na pin RS, např. připojení odporu mezi RS a VSS vybereme mód *high-speed*, a velikostí odporu můžeme ladit přenosovou rychlost, která může být až 1Mb/s. Budič na svých výstupních pinech CAN_L a CAN_H může nabývat dvou stavů, dominantní stav a recesivní. V případě tohoto konkrétního budiče udává katalogový list, že nastane dominantní stav v případě, že mezi CAN_L a CAN_H je větší diferenční napětí než 1,2V. Recesivní stav nastane tehdy, když je diferenční napětí menší než 1,2V obvykle bývá 0V. Obvod má i několik ochran, mezi ně patří ochrana proti zkratu, tepelná ochrana

do 165°C. Zapojení budiče je vidět na *Obr. 3.5*. Více informací k tomuto budiči lze najít v katalogovém listu [18].

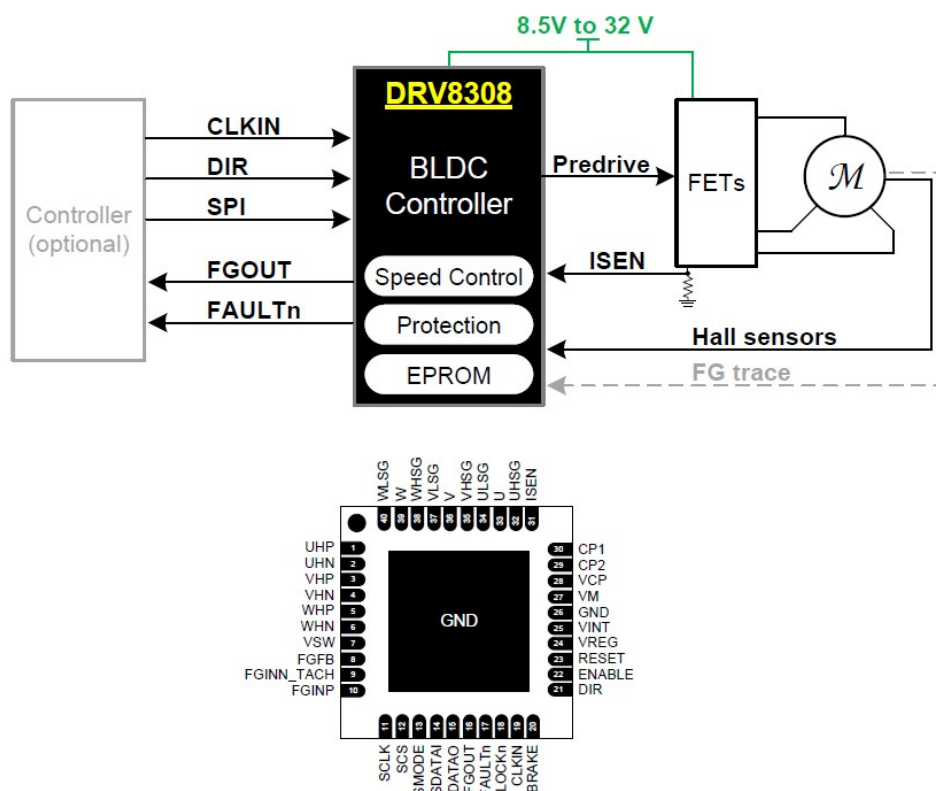


Obr. 3.5 Zapojení CAN budiče

3.2.4 BLDC driver a výkonový můstek

Pro řídicí jednotku byl vybrán BLDC driver DRV8308 od firmy Texas Instruments. BLDC driverů je na trhu nepřehledné množství, ne každý však odpovídá našim potřebám. Mezi hlavní důvody proč byl vybrán tento BLDC driver lze zařadit, řízení pomocí SPI rozhraní, podpora snímání polohy pomocí Hallových sond, budiče 3-fázového můstku. Některé drivery obsahují integrovaný 3-fázový můstek, ale jejich výkon je dostačující pouze pro bateriové aplikace typu holicí strojek. Všem těmto požadavkům odpovídaly pouze dva obvody. Obvod FCM8201, který se bohužel přestal vyrábět a námi použitý DRV8308. Zjednodušené schéma a přehled vývodu je vidět na *Obr. 3.6*. Tento obvod má několik zajímavých funkcí.

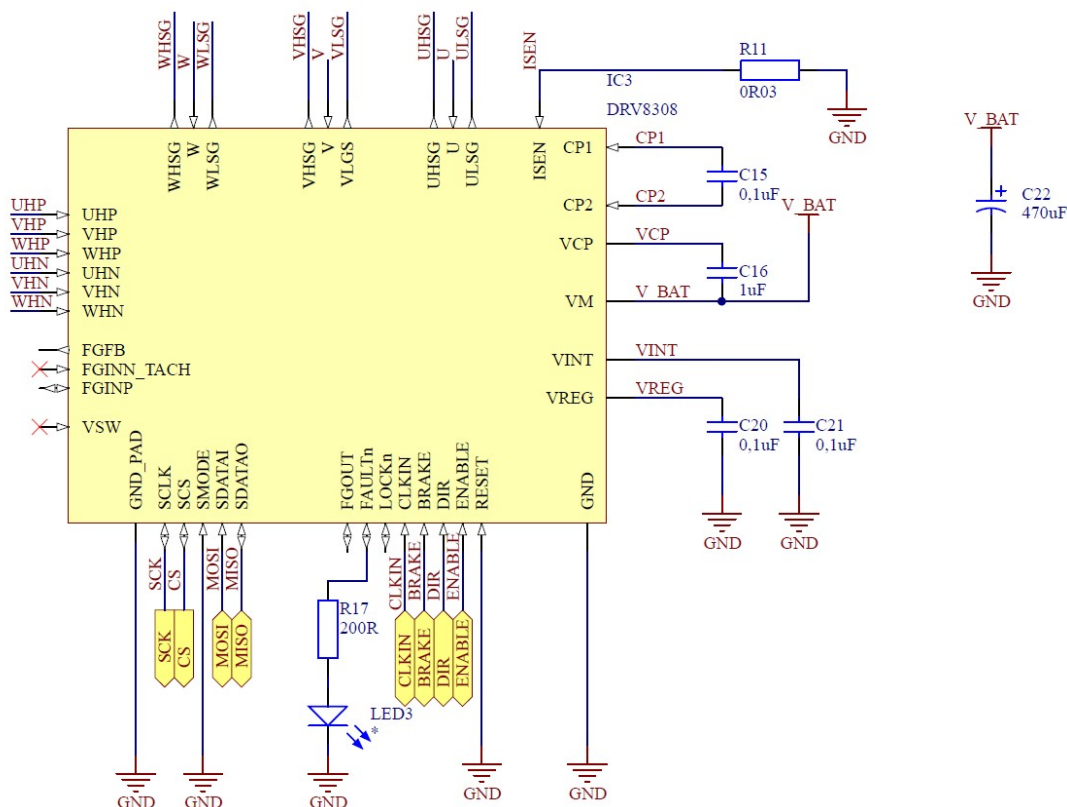
- Podporuje 120° a 180° sinusovou komutaci
- Podporuje připojení několika druhů snímačů polohy
- Umožňuje nastavit časování hallových sond
- 5V regulátor pro napájení snímačů polohy
- Integrované ochrany (podpětí, přepětí, přehřátí)
- Nízko příkonový režim
- Několik možností konfigurace (SPI, externí EEPROM, zápis do vnitřní paměti)
- Několik možností řízení (SPI, PWM, frekvencí)



Obr. 3.6 Blokové zapojení a přehled I/O pinů obvodu DRV8308

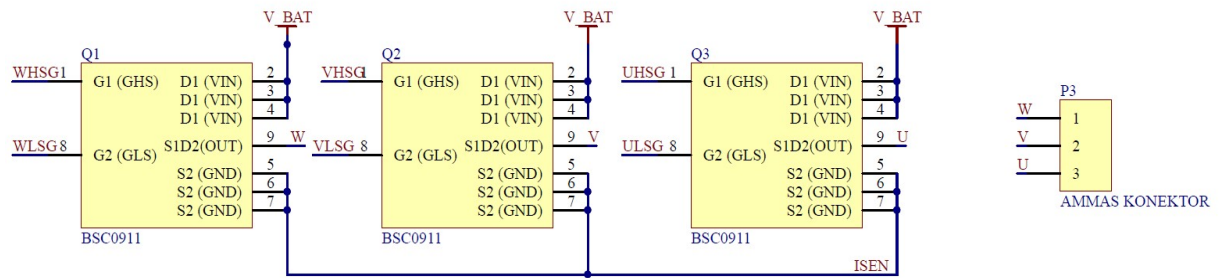
Možností jak tento obvod zapojit je několik, liší se ve způsobu, jakým chceme obvod řídit, konfigurovat a jaký motor chceme řídit. Zapojení, které je použito v řídicí jednotce, je zobrazeno na Obr. 3.7. Ve spodní části obrázku jsou vidět piny určené pro konfiguraci a řízení obvodu. Pin SCK, který slouží, jako zdroj hodin pro SPI komunikaci, pinem SCS vybereme obvod, s kterým bude chtít MCU komunikovat detailněji se budeme zabývat v následující kapitole. Pin SMODE určuje jakým způsobem budeme konfigurovat obvod, např. uzemněný pin znamená pomocí SPI, připojený k vysoké úrovni pomocí EEPROM. SDATAI a SDATAO jsou piny určené pro vstup a výstup dat z obvodu. Piny CLKIN, ENABLE, RESET, DIR a BRAKE slouží pro ovládání obvodu jejich zapojení není nutné zle k těmto pinům přistupovat pomocí SPI. Pravá část obrázku zobrazuje piny určené pro napájení obvodu a jeho externích částí. Za zmínku stojí piny CP1 a CP2 na které je nutné připojit kondenzátor, který bude dělat nábojovou pumpu. Na pinu VREG je 5V, tato větev je určena pro napájení Hallových sond. V horní části máme výstupní signály pro 3-fázový střídač, který je vidět na Obr. 3.8. Důležitou funkci plní pin ISEN, který tvoří snímač proudu pro motor a obvod podle jeho vstupu může vyhodnotit např. přetížení motoru. Levá

strana obsahuje piny, které se používají jako vstup ze snímače polohy. V našem případě jsou použity 3 Hallovy sondy a jejich zapojení včetně vstupního konektoru, který má svůj protikus na zadní straně motoru lze vidět na *Obr. 3.9*.



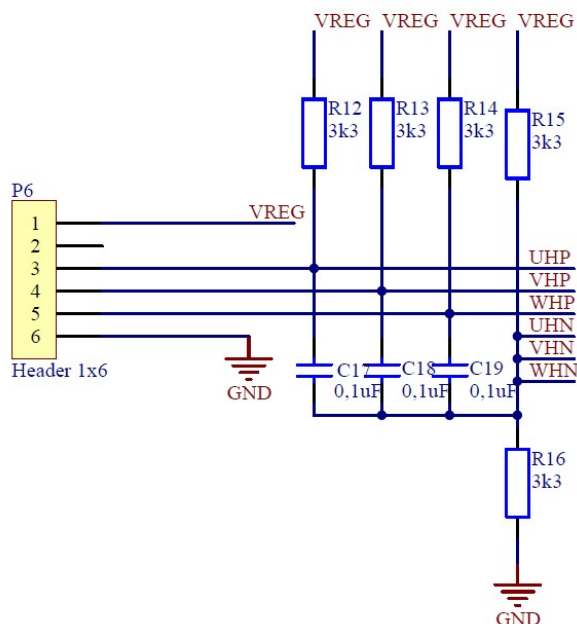
Obr. 3.7 Zapojení obvodu DRV8308

Na *Obr. 3.8* je vidět zapojení výkonového 3-fázového můstku. Tento můstek je složený z unipolárních MOS-FET tranzistorů BSC0911ND od firmy Infineon. Jedná se o dva tranzistory v pouzdře PG-TISON-8. Tyto tranzistory se vyznačují především nízkým odporem kanálu v sepnutém stavu. Výrobce udává $3,2\text{m}\Omega$ pro spodní tranzistor a $1,2\text{m}\Omega$ pro horní tranzistor. Nízký odpor kanálu způsobí minimální tepelné ztráty na tranzistorech. Všechny tranzistory jsou umístěny na vrchní straně desky, kde bude možnost pasivního chlazení. Konektor od firmy Amass, který je používán často, jako napájecí konektor pro vysoko proudové aplikace byl použit pro připojení motoru. Výrobce udává, že tento konektor zvládne až 30A.



Obr. 3.8 Zapojení 3-fázového můstku

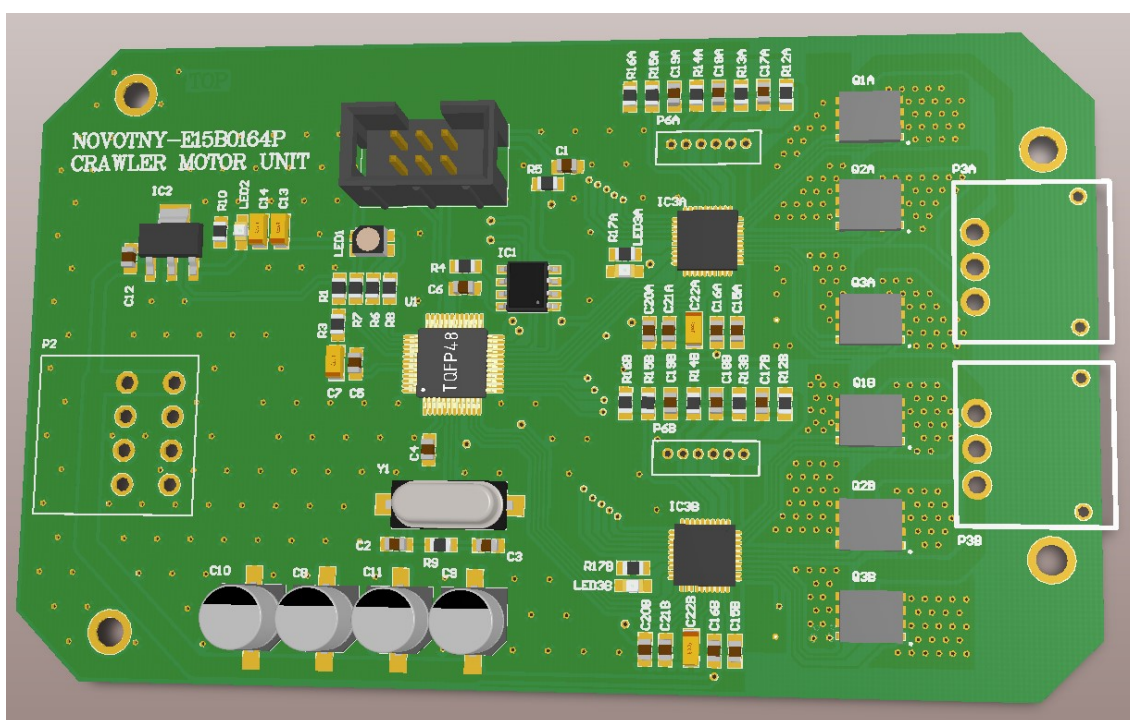
Zapojení Hallových sond je znázorněno na Obr. 3.9. Tento obvod umožňuje zapojení několika typů těchto snímačů polohy. Náš motor je osazen Hallovými sondami, které na výstupu mohou dosáhnout pouze „0“ nebo „1“. Existují i varianty kde snímač na výstupu dosáhne kladné ale i záporné hodnoty napětí. Zapojení, které jsem zvolil je pro typ, kde se na výstupu snímače objeví pouze „1“ a „0“. Napájení Hallových sond je pomocí 5V regulátoru, který je integrován v obvodu DRV8308. Výstup hallových sond je v zapojení otevřený kolektor proto nutnost pull-up odporů. Zapojení tohoto obvodu jsem prováděl podle katalogového listu, který je k nalezení zde [19], a tento katalogový list obsahuje veškeré podrobné informace o tomto obvodu.



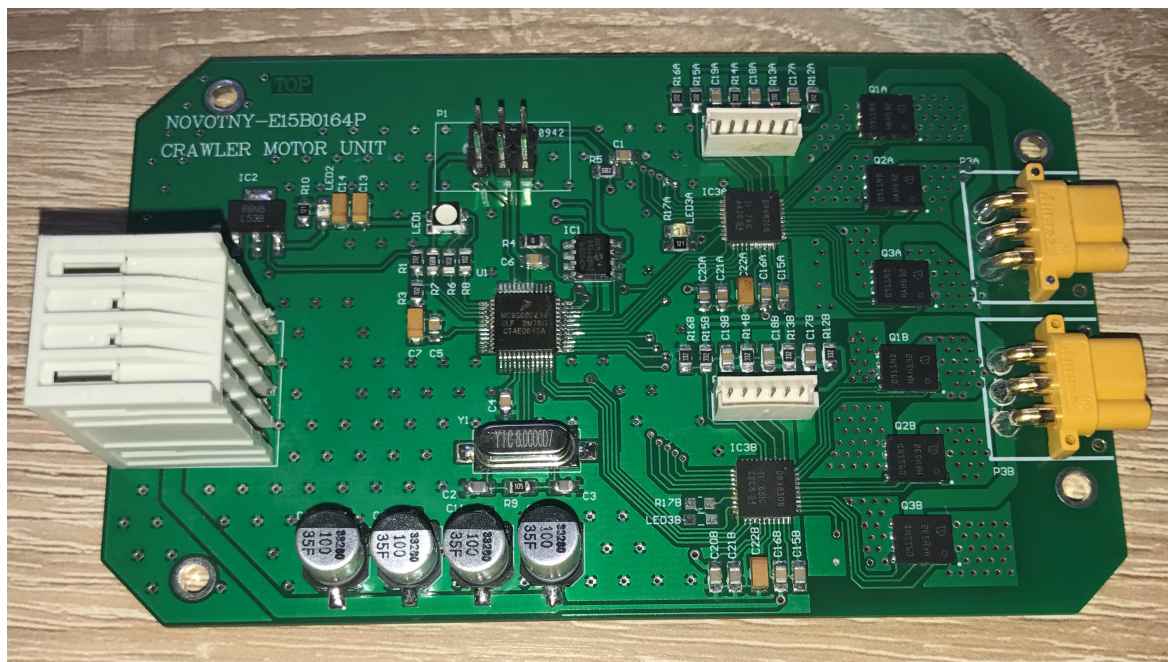
Obr. 3.9 Zapojení vstupu pro snímač polohy

3.3 Realizace DPS

Návrh desky plošných spojů jsem prováděl v již zmiňovaném návrhovém software Altium Designer. Většinu symbolických značek a pouzder součástek jsem si kreslil sám. V celém projektu je použito kolem 75 součástek. Velkou část zabírají pasivní součástky, tyto součástky jsou umístěny v pouzdře 0805. Pouze dva odpory R11A a R11B, které slouží pro snímání proudu v motoru, mají pouzdro 2515 s dovolenou výkonovou ztrátou až 1W. Deska obsahuje několik elektrolytických kondenzátorů v pouzdře SMD_6.3M a několik tantalových kondenzátorů v pouzdře SMD A. Mikroprocesor se dodává ve standardním pouzdře LQFP-48 a BLDC drivery jsou umístěny v pouzdře VQFN-40, jedná se o bez vývodové 40 pinové pouzdro s rozměry 6,8mm x 6,8mm. Desku plošných spojů se mi povedlo navrhnout jako dvouvrstvou, a *Obr. 3.10* je vidět vygenerovaný 3D model navržené desky, a na *Obr. 3.11* je vidět skutečný hotový a osazený výrobek. Výrobek jsem osazoval sám v domácích podmínkách. V příloze B je kompletní tištěný spoj.



Obr. 3.10 3D model DPS



3.11 Skutečná osazená řídicí jednotka

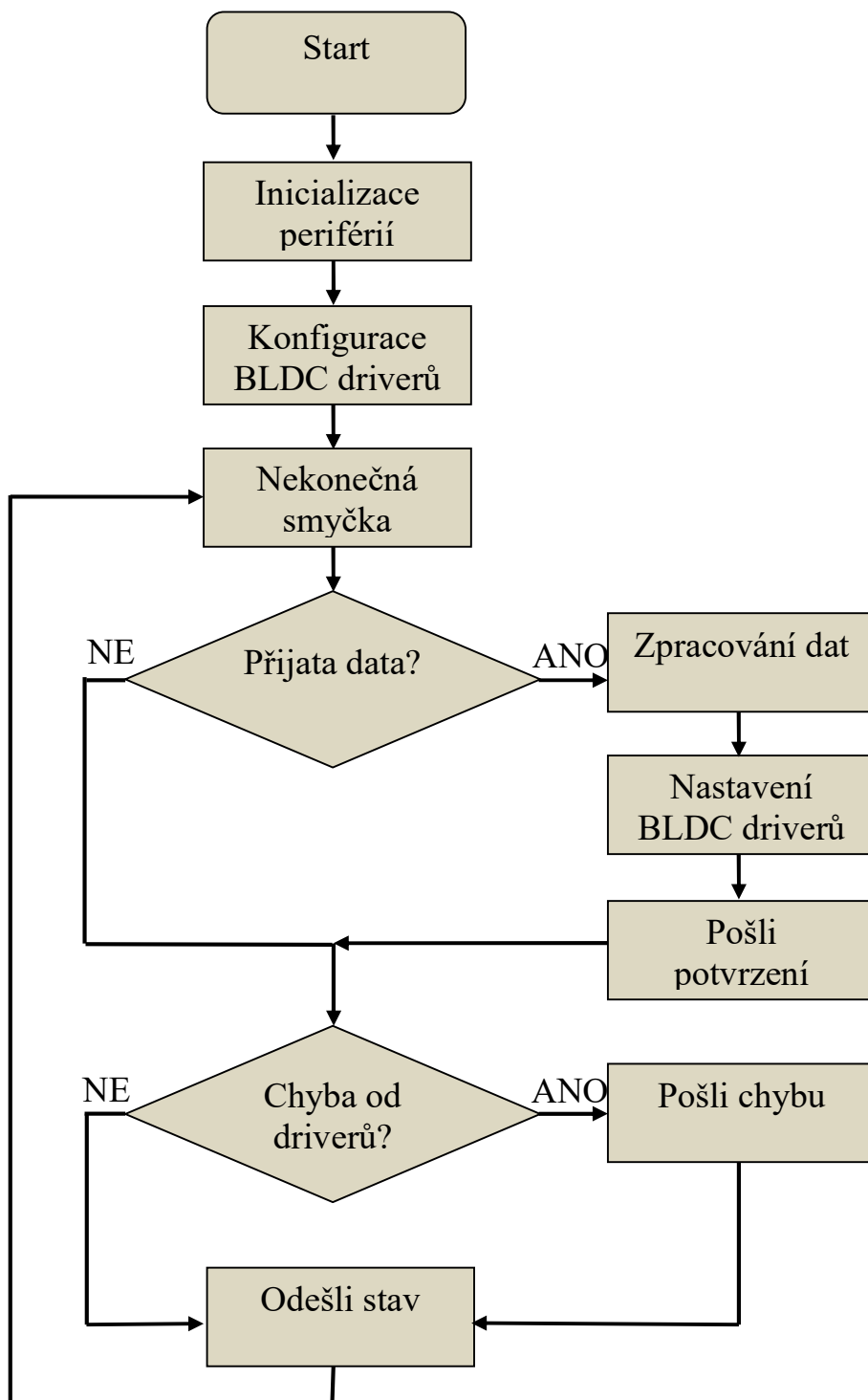
4 Popis programu a komunikace

Firmware pro řídicí jednotku byl psán ve vývojovém prostředí programu CodeWarrior, od firmy NXP. Při programování mikrokontroléru byla využita funkce Processor Expert, která pomocí grafického rozhraní pomůže nastavit jednotlivé periferie, a základní vlastnosti. K programování byl využit programátor USBDM s otevřeným zdrojovým kódem.

4.1 Hlavní program

Po zapnutí napájení celé řídicí jednotky a naběhnutí programu, se provede inicializace periferií, které jsou používány. V tomto kroku se nastaví jednotlivé piny jako vstupy nebo výstupy podle jejich funkce a využití, nastaví se SPI a MSCAN. Na *Obr4.1* je vývojový diagram celého programu. Po inicializaci následuje krok konfigurace BLDC driveru. V tomto kroku jsou nakonfigurovány oba dva drivery. Poté program skočí do nekonečné smyčky, kde se opakují stále dokola ty samé úkony. Pokud jsou přijata data po CAN sběrnici, program skočí do přerušení, kde se data uloží do pole, jsou dále zpracována a blikne, zelená led dioda. Detailní popis komunikace po CAN sběrnici je v kapitole 4.3. Obvody, které řídí oba motory, mají vlastní diagnostiku a dokážou detekovat základní chyby. Pokud obvod detekuje některou z chyb, mikrokontrolér tuto chybu přečte z příslušného registru obvodu, pošle ji po CAN sběrnici hlavní řídicí jednotce celého

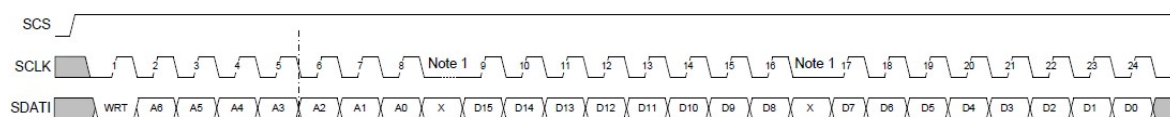
robota a rozsvítí červenou led diodou. Každé dvě vteřiny jednotka pošle zprávu o aktuálním nastavení rychlosti obou motoru a blikne modrou led diodou.



Obr.4.1 Vývojový diagram

4.2 SPI komunikace

V této kapitole se budeme věnovat detailnímu popisu komunikace mezi mikrokontrolérem a BLDC drivery. Tato komunikace probíhá, pomocí SPI sběrnice, kde je mikrokontrolér v režimu master a oba obvody v režimu slave. Konfigurace této sběrnice je provedena v bloku inicializace periférií. K této komunikaci je použito 5 pinů, jedná se o pin SCK, který udává hodinovou frekvenci, piny MISO a MOSI slouží pro přenos dat a pomocí pinů CS1 a CS2, vybereme obvod, se kterým chceme komunikovat. Na *Obr4.2* je vidět způsob komunikace mezi mikrokontrolérem a jedním z obvodů.



Obr. 4.2 SPI komunikace

Prvním odeslaným bytem je adresa registru, ke kterému chceme přistoupit. Přehled všech registrů a jejich popis je v katalogovém listu [18]. Pokud chceme zapisovat do registru tak bit s nejvyšší hodnotou nastavíme na „0“, pokud chceme číst, nastavíme tento bit na „1“. Další dva byty jsou data, které chceme zapsat do příslušného 16-bitového registru. Zdrojový kód funkce, která je níže zajišťuje komunikaci s obvody.

```
void spiTransmit(char address, char data1, char data2, char *
data_received, int motor_id)
{
    if (motor_id == 1){
        CS1 = 1;
    }
    else if(motor_id == 2){
        CS2= 1;
    }
    while(!SPI1S_SPTEF);
    SPI1D = address;
    while(!SPI1S_SPRF);
    data_received[0] = SPI1D;
    while(!SPI1S_SPTEF);
    SPI1D = data1;
    while(!SPI1S_SPRF);
    data_received[1] = SPI1D;
    while(!SPI1S_SPTEF);
    SPI1D = data2;
    while(!SPI1S_SPRF);
    data_received[2] = SPI1D;
    for(i=0;i<210;i++);
    CS1 = 0;
    CS2 = 0;
}
```

Použití funkce ke konfiguraci obvodů a k nastavení rychlosti po přijetí dat z hlavní řídicí jednotky vypadá následovně.

```
spiTransmit(0x05, 0x00, 0x33, datax, 1);
```

Tento kus kódu říká, že do registru prvního obvodu, který je na adrese 0x05 chceme zapsat data 0x00 a 0x33.

4.3 CAN komunikace

Komunikace mezi hlavní řídicí jednotkou a řídicí jednotkou pro motory je pomocí CAN sběrnice. Výhody a důvody nasazení této sběrnice byly vysvětleny v kapitole 2. Aby byla tato komunikace možná, je třeba nastavit periférii MSCAN. Důležitým parametrem je rychlost přenosu, která je v tomto případě nastavena na 500kbit/s. Další důležitý údaj je nastavení vstupního identifikačního filtru. Tento filtr se stará o to, aby jednotka přijímala data pouze s předem stanoveným ID. V této jednotce je filtr nastaven, aby přijímal data s ID od 0x03 do 0x0F. Na *Obr.4.3* je vidět datový paket, který posílá hlavní řídicí jednotka, jednotce motorů.

DATA1	0x00	DATA2	0x00
--------------	-------------	--------------	-------------

Obr. 4.3 Datový paket

Jedná se o paket, který se skládá 4 bytů. Byty DATA1 a DATA2 jsou typu signed char, což znamená, že mohou nabývat hodnot od -128 do 127. Tento rozsah dává velký prostor pro řízení motorů. Po přijetí paketu jsou data zpracována podle následující tabulky.

Tab. 4.1 Přehled příkazů

Hodnota	Povel
-128	100% vzad
-64	50% vzad
0	Brzda
64	50% dopředu
127	100% dopředu

BLDC driver obsahuje dvou bytový registr SPEED na adrese 0x0B, který udává poměr otáček motoru. Pokud do registru dosadíme hodnotu 4096, motor se bude otáčet na 100% možných otáček. Po přijetí datového paketu, program přepočítá hodnoty na poměr požadovaných otáček a ty po SPI sběrnici, pošle příslušnému BLDC driveru. Pokud je přijatá hodnota záporná, mikrokontrolér nastaví pin kde je připojen signál DIRx na „1“, čímž změní směr otáčení motoru. Pokud je hodnota rovna 0 mikrokontrolér osadí signál BRAKEx na „1“, a tím je aktivována brzda. BLDC driver má možnost ovládní těchto řídicích pinů i pomocí SPI, kde pouze zapíšeme do příslušného registru. Zdrojový kód obsluhy přerušení, má starosti příjem dat po CAN sběrnici.

```
ISR(CAN_RX)
{
    uint8_t lenght, i;
    lenght = (CANRDLR & 0x0F);
    if (CANRFLG_RXF)

    for (i = 0; i < lenght; i++) {
        data_rx[i] = *(&CANRDSR0 + i);
    }
    LED_G = 0;
    CANRFLG_RXF = 1;
}
```

Po přijetí dat je vyvoláno přerušení od periférie MSCAN. Proměnná *i* je pouze pomocná a složí jako čítač v cyklu. Do proměnné *lenght* se ukládá délka přijaté zprávy, která je uložena v registru *CANRDLR*. V cyklu **for** se do pole *data_rx[i]* uloží přijatá data a po provedení cyklu se rozsvítí zelená dioda. Po každém přijetí dat je nutné potvrdit příznak *CANRFLG_RXF*. Celý zdrojový kód programu je na příloženém CD.

Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval návrhem řídicí jednotky, která bude schopná ovládat dva BLDC motory a komunikovat po CAN sběrnici. Velký důraz byl kladen na zachování stávajícího komunikačního protokolu. Všechny body zadání této bakalářské práce se povedlo splnit a na přiloženém CD je několik videí, jak jednotka funguje a několik fotografií hotové a osazené dps. Na CD se dále nachází průběhy fázového napětí motoru při běhu na cca 50% a na 100%.

Aktuální jednotka umožňuje řízení dvou BLDC motorů, na základě přijatých dat po CAN sběrnici od hlavní řídicí jednotky. V případě potřeby lze v budoucnu upravit firmware pro odesílání dat od motorů bez nutnosti úpravy HW. Jednotka je schopná ochránit motory proti přetížení, ale i měřit napětí na baterii a v případě vybití baterie motory odpojit. Toto měření je pomocí odporového děliče, který je připojen na A/D převodník, ale díky své jednoduchosti slouží pouze k orientačnímu měření. Při regulování nezatížených motorů se zdá, že chlazení výkonových prvků nebude potřeba. V první verzi byly tranzistory v pouzdře D-PAK, který má větší dovolenou výkonovou ztrátu na úkor místa.

V případné další verzi by bylo vhodné implementovat následující změny. Led diody, které jsou vedle řídicích obvodů motorů mají signalizovat chybu. Bohužel výstupní pin na, který jsou připojeny má vnitřní zapojení otevřený kolektor a v této verzi jsou diody připojeny k zemi. V příští verzi budou připojeny k 5V větvi a tím se zajistí, že v případě když detekují chybu tak se rozsvítí. Tuto funkci zatím vykonává mikrokontrolér, který kontroluje chybový registr. V další verzi bych přidal elektrolytické kondenzátory k střídačům, kde budou tvořit stejnosměrný obvod. Toto zapojení je v dnešních jednotkách standardní. A jako poslední bych doporučil připojit piny FG_OUT z řídicích obvodů do mikrokontroléru. Na pinu FG_OUT je vyvedena zpětná vazba ze senzorů polohy a díky této úpravě by bylo možné zpětnovazební řízení. Díky tomu by byla regulace přesná a nemohlo by dojít k poklesu otáček při větším zatížení. Především v oblasti nízkých otáček by to bylo žádoucí.

Tato bakalářská práce pro mě byla velikým přínosem, hodně věcí jsem si mohl ověřit v praxi. Především nasazení mikrokontroléru od firmy NXP pro mě bylo přínosné. Do teď jsem měl zkušenosti pouze s firmou Atmel.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MINEBEA. *The BLDC Motor – Introduction to Brushless DC Motors* [online]. 2014. Dostupné z: http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering/
- [2] [4] *BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu - Časopis Elektro - Odborné časopisy*
- [3] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. a P. YEDAMALE. *AN885 - Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals* [online]. 2003. ISSN 0047-1852. Dostupné z: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21770626>
- [4] GIOVANNI. *The basics of electric power: Brushless motors* [online]. Dostupné z: <http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>
- [5] [5] *2-2-2 Structure And Application Of-br-Brushless DC Motors - Nidec Corporation*
- [6] MADAAN, Pushek. *Brushless DC Motors – Part I : Construction and Operating Principles*. 2013
- [7] [7] *How to manufacturer 0*
- [8] [8] *BLDC Motor Control*
- [9] [9] *AN-8201 FCM8201 Three-Phase Sine-Wave BLDC Motor Controller*
- [10] GROUP, Francis. *No Title*. 2010. ISBN 9781420064407.
- [11] ELEKTROTECHNICK, Praze Fakulta, Katedra ELEKTRICK a C H POHON. *Zpětnovazební řízení BLDC servopohonu soft procesorem* Diplomová práce. nedatováno.
- [12] OF, Faculty a Civil ENGINEERING. *Vysoké učení technické v brně*. 2016.
- [13] PAZUL, K. *Controller Area Network (CAN) Basics. Microchip Technology Inc. Preliminary DS00713A-page*. 1999, 1.
- [14] MASARYKOVY, Fakulta a Univerzity STUDIJN. *Bakalářská práce*. 2015.
- [15] STAVEBN, Praze Fakulta a Lucie KL. *Diplomová práce* 2017. 2017.
- [16] *Turnigy TrackStar 21*
- [17] SHEET, Data. *Mc9S08Dz60 Mc9S08Dz32 Mc9S08Dz16*. 2008.
- [18] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *MCP2551 CAN Transceiver. Communication*. 2010, 1–24.
- [19] INFORMATION, Device. *DRV8308 Brushless DC Motor Controller*. 2014.

Přílohy

Příloha A – Schéma deska (CD)

Příloha B – Motiv desky plošných spojů (CD)

Příloha C--Zdrojový kód programu (CD)

Příloha D--Fotografie osazené řídicí jednotky (CD)

Příloha E--Video provozu řídicí jednotky (CD)