

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Referenční návrh řízení 3fázového BLDC motoru

Sebastian Veselý

2017

zadání

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá návrhem elektronického zařízení pro řízení 3fázového BLDC motoru. Cílem práce je vytvořit dvě desky tištěného spoje zajišťující všechny potřebné signály pro řízení motoru a komunikaci s využitím několika rozhraní. K takto navrženému zařízení bude zhotoven algoritmus umožňující řízení motoru a komunikaci s vytvořenou aplikací na počítači. V práci jsou představeny vhodné metody řízení pro BLDC motor a dále je realizován návrh obou desek tištěného spoje. Výsledky této práce tedy umožní realizovat zařízení, na kterém bude využita jedna z metod řízení.

Klíčová slova

automotive, BLCD motor , EC motor, Hallovy senzory, indukované napětí, komutace, magnetický tok, mikrokontrolér, ovladač, permanentní magnety, PMSM motor, rotor, stator

Abstract

This master thesis deals with a design of an electrical device for 3-phase BLDC motor control. The primary focus of the master thesis is to create two circuit boards that provides all the essential signals for the motor control and communication using several interfaces. Once the device design and production is completed, the main goal is to create an algorithm for the motor control and communication with created computer application. The master thesis further focuses on several suitable methods for BLDC motor control and the design of both printed circuit boards. The results of this master thesis therefore allow the production of the device for which one of the motor control method can be used.

Key words

automotive, BLDC motor, commutation, driver, EC motor, Hall sensors, induced voltage, magnetic flux, microcontroller, permanent magnets, PMSM motor, rotor, stator

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální

V Plzni dne 19.5.2017

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	6
SEZNAM SYMBOLŮ	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	10
1 ÚVOD	11
2 AUTOMOBILOVÝ PRŮMYSL	12
2.1 VYUŽÍVANÉ ELEKTROMOTORY V OBLASTI AUTOMOTIVE.....	13
2.2 ELEKTRICKY KOMUTOVANÉ MOTORY A SOUČASNÉ METODY ŘÍZENÍ.....	15
2.2.1 <i>6fázová komutace</i>	18
2.2.2 <i>Sinusové řízení</i>	19
2.2.3 <i>Vektorové řízení</i>	20
2.3 VYUŽÍVANÉ METODY SNÍMÁNÍ	23
2.3.1 <i>Hallovy senzory</i>	24
2.3.2 <i>Enkodér polohy</i>	25
2.3.3 <i>Snímání indukovaného napětí</i>	26
3 OBVODOVÉ ŘEŠENÍ A ŘÍDÍCÍ APLIKACE	28
3.1 SPECIFIKACE ZAŘÍZENÍ	28
3.2 POPIS VYUŽITÝCH SIGNÁLŮ	29
3.2.1 <i>Řídicí část</i>	29
3.2.2 <i>Výkonová část</i>	30
3.3 BLOKOVÉ SCHÉMA.....	32
3.3.1 <i>Řídicí část</i>	32
3.3.2 <i>Výkonová část</i>	33
3.4 POPIS JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ZAPOJENÍ.....	34
3.4.1 <i>Mikrokontrolér SPC570S50 – Velvety</i>	34
3.4.2 <i>Obvody napájení</i>	35
3.4.3 <i>Převodník UART</i>	36
3.4.4 <i>Převodník CAN</i>	37
3.4.5 <i>Automotive MOSFET driver pro 3fázový BLDC motor – L9907</i>	38
4 REALIZACE OBVODOVÉHO ŘEŠENÍ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ	39
4.1 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	39
4.1.1 <i>DPS Řídicí část</i>	39
4.1.2 <i>DPS Výkonového koncového stupně</i>	39
5 ZÁVĚR	40
6 POUŽITÁ LITERATURA	1
7 PŘÍLOHY	2

Seznam symbolů

ADC	- analogově digitální převodník
BEMF	- Back Electromotive Force
BLDC	- bezkartáčový stejnosměrný motor (Brushless DC)
CAN	- Komunikační rozhraní (Controller Area Network)
CMOS	- Technologie integrovaných obvodů (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)
d, q	- osy souřadného systému rotoru
EC	- Elektricky komutované motory (Electronically Commutated)
EEPROM	- Elektronicky vymazaelná pamět (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
EMC	- Elektromagnetická kompatibilita (Eletromagnetic compatibility)
FIFO	- Druh bufferu (First In First Out)
i_u, i_v, i_w	- Proudů jednotlivými vinutími [A]
JTAG	- Testovací rozhaní (Joint Test Action Group)
K	- Konstanta zahrnující mechanické vlivy motoru [-]
L	- Vlastní indukčnost [H]
M_e	- Elektromagnetický moment [Nm/T]
MOSFET	- Výkonové tranzistory (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
PMSM	- Pernamentní magnetické synchronní motory
PWM	- Pulzně šířková modulace (Pulse Width Modulation)
PID	- Product ID
R	- Odpor fáze statoru [Ω]
SPI	- Komunikační rozhraní (Seriál Peripheral Interface)
UART	- Komunikační rozhraní (Universal Asynchronous Receiver Transmitter)

USB	- univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
U_{α}, U_{β}	- Napětí v osách statorového souřadného systému[V]
U_d, U_q	- Napětí v podélné a příčné ose [V]
u_u, u_v, u_w	- Napětí na jednotlivých vinutích [V]
u_{iu}, u_{iv}, u_{iw}	- Indukovaná napětí na jednotlivých vinutích [V]
U, V, W	- Označení fází motoru
VID	- Vendor ID
Ψ_R	- Spřažený magnetický tok rotoru [Wb]
Ψ_S	- Spřažený magnetický tok statoru [Wb]
θ	- Úhel mezi polem vektorem pole rototu a statoru [°]

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1.1: VYUŽITÍ ELEKTROMOTORŮ V AUTOMOBILU	14
OBRÁZEK 1.2: NÁHRADNÍ SCHÉMA BLDC MOTORU	15
OBRÁZEK 1.3: KONSTRUKCE BLDC MOTORU	17
OBRÁZEK 1.4: PRŮBĚH PROUDŮ NA JEDNOTLIVÝCH FÁZÍCH.....	18
OBRÁZEK 1.5: PRŮBĚHY JEDNOTLIVÝMI FÁZEMI VINUTÍ.....	19
OBRÁZEK 1.6: VYJÁDŘENÍ SLOŽEK D, Q	20
OBRÁZEK 1.7: BLOKOVÝ DIAGRAM VEKTOROVÉHO ŘÍZENÍ	22
OBRÁZEK 1.8: SNÍMANÉ SIGNÁLY Z HALLOVÝCH SENZORŮ	24
OBRÁZEK 1.9: VÝSTUPNÍ SIGNÁLY Z INKREMENTÁLNÍHO ENKODÉRU	25
OBRÁZEK 1.10: DETEKCE PRŮCHODU NULOU INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	27
OBRÁZEK 2.1: BLOKOVÉ SCHÉMA ŘÍDICÍ ČÁSTI.....	32
OBRÁZEK 2.2: BLOKOVÉ SCHÉMA VÝKONOVÉ ČÁSTI	33
OBRÁZEK 2.3: BLOKOVÉ SCHÉMA PŘEVODNÍKU	36
OBRÁZEK 2.4: BLOKOVÉ SCHÉMA DRIVERU	38

Seznam tabulek

TABULKA 2.1: PARAMETRY ZAŘÍZENÍ	28
TABULKA 2.2: MIKROKONTROLÉR	28
TABULKA 2.3: PARAMETRY MOTORU	28
TABULKA 2.4: CAN ROZHRANÍ	28
TABULKA 2.7: CAN ROZHRANÍ	29
TABULKA 2.8: UART ROZHRANÍ.....	29
TABULKA 2.9: JTAG ROZHRANÍ.....	29
TABULKA 2.10: ROZHRANÍ HALLOVÝCH SENSORŮ.....	30
TABULKA 2.11: ROZHRANÍ ENKODÉRU	30
TABULKA 2.12: SDÍLENÉ SIGNÁLY NA PROPOJOVACÍM KONEKTORU	31

1 Úvod

Předkládaná práce se zabývá využitím BLDC motoru v oblasti automobilového průmyslu¹. Cílem je zhodnotit využívané principy řízení a druhy BLDC motorů. Porovnat dostupné a využívané metody řízení a zkonstruovat referenční model pro řízení BLDC motoru. Hlavním záměrem práce je vyvinout zařízení vhodné pro testování a prezentaci, z tohoto důvodu je kladen důraz na univerzálnost a jednoduché ovládání.

Celý projekt je zaměřen na uplatnění BLDC motorů v automotive odvětví, kde jsou právě tyto motory často využívány pro jejich vyhovující rozměry a vlastnosti. Při realizaci projektu jsou využívány výhradně součástky vyhovující automotive standardům. Projekt je koncipován jako zařízení skládající se ze dvou desek tištěného spoje. První z nich zajišťuje především řízení motoru pomocí mikrokontroléru využívající časovač, který je určený právě pro tuto aplikaci. Mikrokontrolér dále zprostředkovává potřebnou komunikaci pro využitá rozhraní a zpracování získaných signálů vstupních veličin. Druhá deska tištěného spoje představuje koncový stupeň pro BLDC motor, kde hlavní komponentou je ovladač motoru spínající výkonové tranzistory MOSFET s využitím Pulzně šířkové modulace². Pro propojení desek je využit 48pinový konektor, zajišťující dostatek prostoru pro všechny potřebné signály.

Práce se skládá z teoretické a praktické části. V teoretické části jsou představeny běžně používané varianty motoru v automotive odvětví a popsány tři vhodné metody pro řízení BLDC motoru. Dále jsou zde popsány běžně využívané metody snímání polohy rotoru. Praktická část se zabývá popisem dvou desek tištěného spoje. Je zde popsán komplexní návrh celého elektronického zařízení od sestavení blokového schématu až po detailní popis jednotlivých částí. Schéma zapojení i motiv desky plošného spoje je navržen ve speciálním softwarovém nástroji Altium PCB Designer.

¹ Vzhledem k četnému výskytu slova je v práci využíváno označení automotive

² Dále jen PWM, z anglického názvu Pulse Width Modulation

2 Automobilový průmysl

Automobilový průmysl je poměrně široké odvětví společností a organizací zabývajících se vývojem, výrobou, a marketingem motorových vozidel. Tento průmysl úzce souvisí se strojírenským, elektrotechnickým a chemickým průmyslem, stává se uplatněním pro mnoho oblastí, a v současné době představuje jeden z nejvýznamnějších ekonomických sektorů. V současnosti dochází k rozšíření elektroniky a nástupu elektromobilů a tím přibývá dalšího uplatnění v této oblasti.

Automobilový průmysl je z pohledu běžných aplikací využívaných v elektronice, odvětvím dosti odlišným. Z hlediska funkčnosti, zde není k nalezení nic revolučního, jde spíše o aplikační provedení a náročné pracovní podmínky. Veškeré součástky a komponenty musí vyhovovat širokým teplotním rozsahům v takové míře, že se automotive prostředí blíží pracovním limitům polovodičových součástek a stává se tak výzvou pro jejich vývojáře. Dalším komplikujícím faktorem je vysoká míra integrace, která nepřispívá teplotním podmínkám ani jednoduchosti návrhu. Přesto požadavky na integraci neustále narůstají společně s narůstající funkcionalitou a komplexností celé elektronické sítě automobilu. Všechny tyto skutečnosti se navíc musejí vypořádat s přísnými automotive standardy. Například elektromagnetická kompatibilita je vzhledem k vysoké míře integrace a možnosti pohybu vozidla kdekoliv po světě, komplikujícím faktorem. Bezpečnost je dalším důležitým faktorem, protože v případě vypovězení funkcionality některých z komponent automobilu, může jít o lidské životy. Z tohoto důvodu jsou v automobilu redundantní obvody ve vyšší míře, aby byla zajištěna správná funkce nebo podstoupeny patřičné kroky pro uvedení do bezpečného stavu. V poslední době je nejaktuálnějším tématem zabezpečení. Pojem zabezpečení neodkazuje pouze na ochranu majetku, ale s přibývajícím konektivitou automobilů, se automobily stávají terčem počítačových útoků hackerů, čímž může být narušena jejich funkcionalita a dojít k ohrožení života. S narůstající funkcionalitou je automobilová síť komplexnější a společně s tlakem o co nejnižší ceny, je automobilový průmysl nucen k neustálému vývoji.

2.1 Využívané elektromotory v oblasti automotive

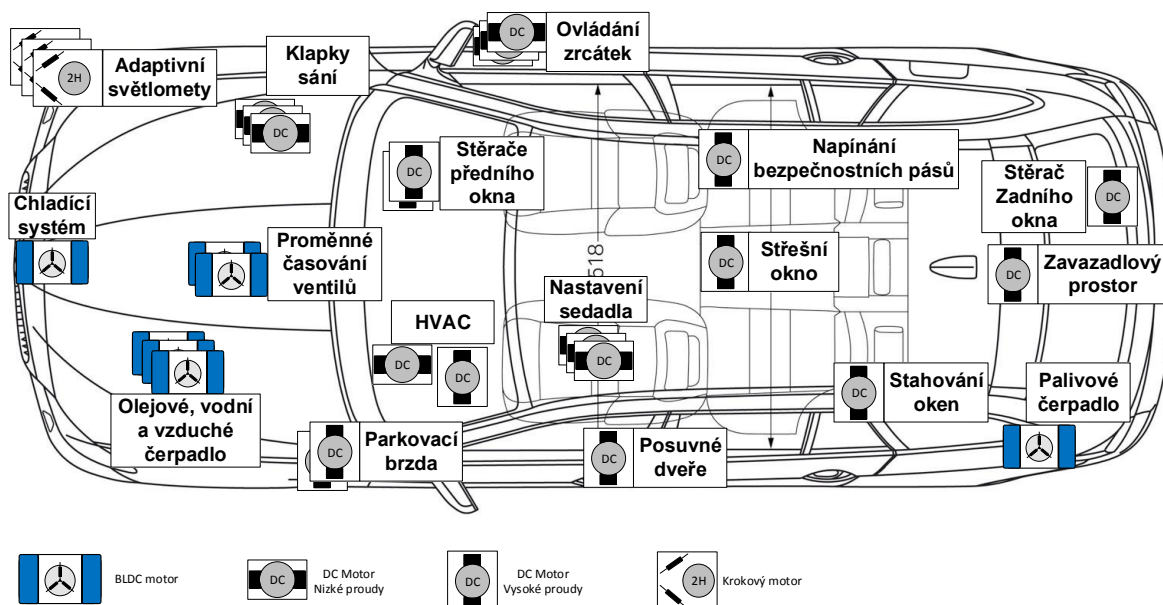
V posledních deseti letech využití elektromotorů v oblasti automotive zaznamenalo obrovský nárůst. S příchodem pokročilých procesních architektur, s přibývajícím systémy umožňujícími napájení z baterií, a současně se snižující cenou systémů, elektromotory představují vhodný nástroj pro mnoho aplikací. Také samotná technologie motorů za poslední desetiletí značně postoupila, takže s pokročilými řídicími strategiemi, lze dosáhnout dobrého výsledku a díky odlišným typům a konstrukčním řešením elektromotorů, našly široké uplatnění v automotive aplikacích všeho druhu.

Nejjednodušší používanou variantou je stejnosměrný motor s kartáčovými kontakty. Rotor motoru představuje pouze kovová armatura s navinutým drátem. Pomocí kartáčových kontaktů je realizována komutace a rotor je řízen elektrickým polem opačné polaroty vůči poli statoru. Komutace je prováděna mechanicky, pokud není třeba měnit otáčky motoru, není zapotřebí žádné řídicí logiky. Omezení motoru vyplývají z jeho mechanické konstrukce a v případě, že není nutné menič rychlost otáčení a přizpůsobit moment úměrně k zátěži, stačí pouze vybrat vhodný typ motoru. Stejnosměrné motory jsou například využívány pro lineární posun sedadel, zamykání nebo pro otáčivé části jako jsou pumpy, ventilátory nebo pohon stěračů. Nejčastěji se využívají v kombinaci s H-můstkem, aby byla zajištěna možnost pohybu oběma směry. Další využívanou skupinou elektromotorů jsou Elektronicky komutované motory³, které využívají permanentních magnetů umístěných na rotoru. Ty vytváří magnetické pole rotoru bez napájení a není zapotřebí kartáčových nebo uhlíkových kontaktů. Z toho pak vychází i název BLDC motoru neboli z anglického Brushless Direct Current motor. Elektronicky komutované motory nabízejí větší kroutící moment a vyšší efektivitu. Absence kartáčových kontaktů navíc přináší redukci šumu a jiskření vznikajícího při mechanické komutaci. Motor disponuje delší životností a menší elektromagnetickou interferencí. Díky tomu se EC motory staly velmi populárními v mnoha aplikacích. Konstrukce motoru může být kompletně zapouzdřena, což je výhodou pro aplikace jako jsou průtokové pumpy pro palivo, vodu a další kapaliny nebo agresivní prostředí, které by mohlo vést k problému se spolehlivostí motoru. Naproti tomu EC motory vyžadují složitější logiku řízení momentu a rychlosti, z důvodu zajištění bezpečnosti pro

³ Dále jen EC, z anglického názvu Electronically Commutated

jakoukoliv zátěž. Navíc absence mechanických kontaktů zajišťující komutaci, vyžaduje komutaci realizovat elektronicky.

Další alternativou EC motoru je Krokový motor. Jedná se o speciální formu motoru využívající stabilních pozic jednotlivých pól párů. Řízení je prováděno pomocí proudových pulzů, kdy dochází k otočení o konkrétní úhel podle rozložení pólových dvojic. Přesnost krokového motoru je tedy dána počtem pól párů. Krokový motor je především využíván v aplikacích, kde je zapotřebí nespojitého pohybu, jako může být například nastavení výšky a směru světlometů. To vedlo k tomu, že mnoho spojitě řízených aplikací bylo digitalizováno, a proto využití nalezl i v aplikacích se spojitým řízením. Příklad využití jednotlivých druhů elektromotorů v automobilu ukazuje obrázek Obrázek 2.1.

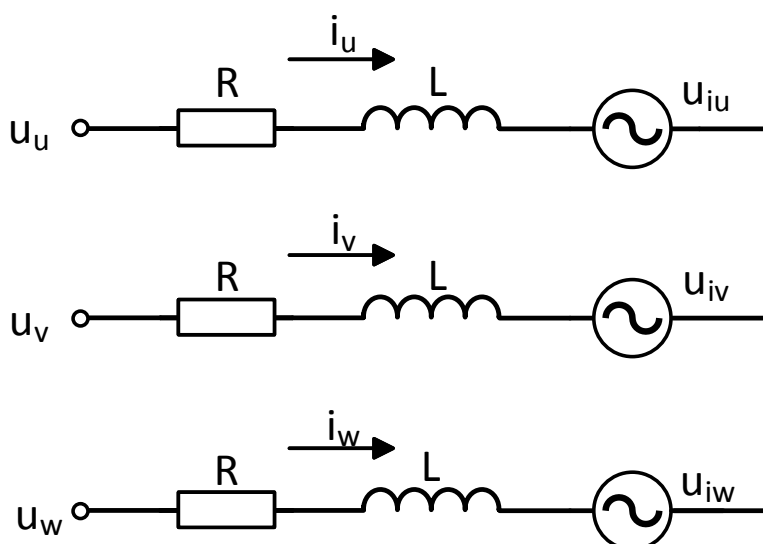


Obrázek 2.1: Využití elektromotorů v automobilu

Zdroj [1] upraveno autorem

2.2 Elektricky komutované motory a současné metody řízení

EC motory existují v několika provedeních s odlišným počtem vinutí. Motory s nižším počtem vinutí se používají zřídka a jen v aplikacích, kde není potřeba velkého momentu síly a větší zvlnění není příliš na závadu. Běžně využívaným typem je BLDC motor skládající se ze tří vinutí vzájemně posunutých o 120° . Vinutí je na jednom konci spojené, tvořící zapojení do hvězdy. Tímto způsobem uspořádané vinutí motoru tvoří stator. Každé vinutí motoru se skládá z rezistivní a induktivní složky tvořící fázovou impedanci. Indukované napětí⁴ do vinutí představuje v náhradním schématu zdroj střídavého napětí. Na obrázku Obrázek 2.2 je zobrazeno náhradní schéma BLDC motoru.



Obrázek 2.2: Náhradní schéma BLDC motoru

Jednotlivé průběhy indukovaného napětí fázemi jsou popsány rovnicemi (2.1). Podle tvaru napětí indukovaného do vinutí lze rozdělit motory do dvou skupin.

- BLDC (Brushless Direct Current)
- PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor)

Motory se od sebe liší konstrukčně rozdílným uložením statorového vinutí a způsobem řízení. Pro motory BLDC se běžně využívá soustředěného statorového vinutí, zatímco u motorů PMSM se používá rozloženého uložení vinutí. Tyto dva způsoby uložení korespondují s vlastnostmi motorů, pro které jsou použity. Soustředěné vinutí je

⁴ Ekvivalentní označení BEMF, z anglického Back Electro-Motive Force

jednodušší, levnější při výrobě a vykazuje větší zvlnění momentu. Uložení rozloženého vinutí je náročnější na výrobu, dražší a má menší zvlnění momentu, proto je vhodnější pro plynulé sinusové průběhy PMSM motorů. BLDC motor je běžně řízen pomocí metody 6fázové komutace a jeho indukované napětí vykazuje lichoběžníkový tvar. PMSM motory vyžadují sofistikovanější způsoby řízení jako je sinusové nebo vektorové. Jejich indukované napětí vykazuje sinusový tvar.

$$\begin{aligned} u_u &= R \cdot i_u + L \frac{di_u}{dt} + u_{iu} \\ u_v &= R \cdot i_v + L \frac{di_v}{dt} + u_{iv} \\ u_w &= R \cdot i_w + L \frac{di_w}{dt} + u_{iw} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Zdroj [2] upraveno autorem

u_u, u_v, u_w	[V]	- napětí na jednotlivých fázích
u_{iu}, u_{iv}, u_{iw}	[V]	- indukovaná napětí zpět do vinutí
i_u, i_v, i_w	[A]	- proudy procházející jednotlivými fázemi motoru
R	[Ω]	- odpor fází
L	[H]	- indukčnost fází

Indukované napětí je přímo úměrné rychlosti otáčení, z jeho průběhu tedy lze získat údaj o rychlosti otáčení. Rotor představují silné výkonové permanentní magnety, které vytváří magnetické pole rotoru. Počet magnetických pól párů rotoru má vliv na zvlnění točivého momentu. Vyšším počtem pólů se zmenšuje krok a snižuje zvlnění momentu. Permanentní magnety běžně bývají od 1 do 5 pól párů. Působením magnetického pole rotoru na elektromagnetické pole statoru vzniká moment motoru. Velikost momentu závisí na úhlu θ mezi polem rotoru a statoru, jak je zobrazeno na obrázku Obrázek 2.3. Tuto situaci také popisuje rovnice (2.2., kde je velikost momentu vyjádřena pomocí vektorového součinu spřaženého magnetického toku rotoru, statoru a úhlu mezi nimi. Důležité je tedy zajistit správně spínání, aby bylo dosaženo co největšího a stálého momentu. Spínáním jednotlivých vinutí ve správnou dobu je zajištěna elektronická komutace, obdobně jako u kartáčových motorů. Komutace je tedy nejkritičtější částí řídicí aplikace motoru. Nepřesnost při komutaci způsobuje proudové a momentové

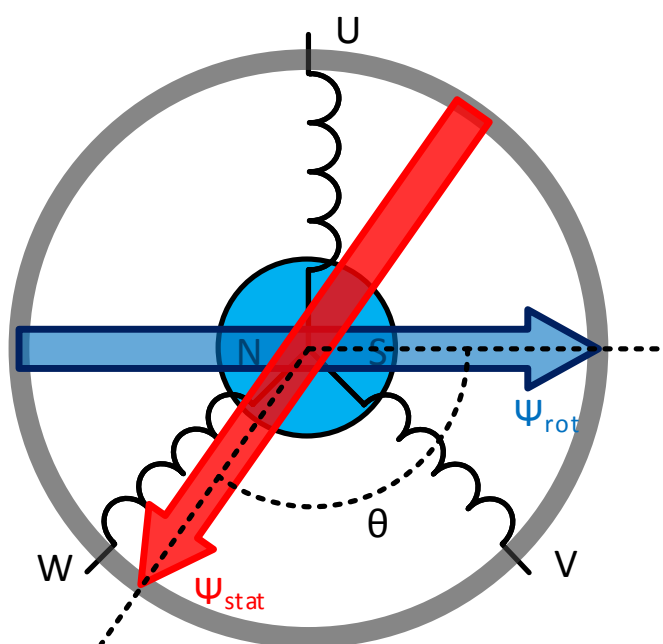
kolísání a zvyšuje šum. Z tohoto důvodu správná pozice při komutaci má vliv na účinnost motoru.

$$M_e = K \cdot |\Psi_R| \times |\Psi_S| \cdot \sin \theta \quad (2.2)$$

Zdroj [3] upraveno autorem

M_e [Nm/T]	- Elektromagnetický moment
K [-]	- Konstanta zahrnující mechanické vlivy motoru
Ψ_R [Wb]	- Spřažený magnetický tok rotoru
Ψ_S [Wb]	- Spřažený magnetický tok statoru
θ [°]	- Úhel mezi polem vektoru rototu a statoru

Nejlépeších výsledků je dosaženo v případě, kdy je pozice komutace řízena v závislosti na rychlosti motoru. Existuje několik způsobů, jak lze řídit motor. Volbu konkrétního řízení je třeba uvážit podle aplikace, pro kterou motor použijeme.

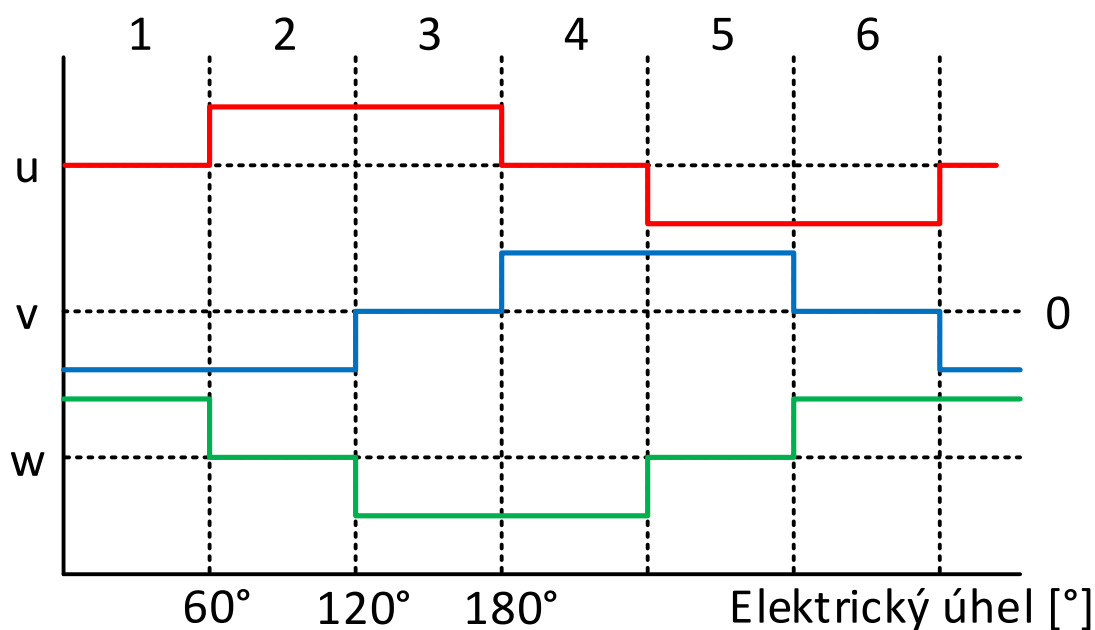


Obrázek 2.3: Konstrukce BLDC motoru

Zdroj [3] upraveno autorem

2.2.1 6fázová komutace

Tato metoda je často využívanou metodou řízení BLDC motoru. Napájeny jsou vždy dvě fáze motoru, kterými protéká proud, zatímco třetí fáze je volná. Podle pozice rotoru jsou jednotlivé fáze střídány. Při uvážení tří fází vinutí a možnosti protékání proudu dvěma směry, získáváme šest jednotlivých kroků spínání a také šest možných pozic magnetického pole statoru. V těchto jednotlivých pozicích je motor spínán, proto se někdy tato metoda také nazývá šesti stavová. Na obrázku Obrázek 2.4 jsou zobrazeny napěťové pulzy na vinutí. Výhodou této metody je její jednoduchost, protože informaci o pozici není třeba znát příliš přesně. Je zapotřebí pouze informace o pozici každých 60° pro správný okamžik komutace. K tomuto účelu se využívá tří Hallových senzorů, které bývají někdy součástí motoru. Navíc s využitím indukovaných napětí do vinutí na volné fázi je získávána dostatečná informace o poloze, k realizaci komutace ve správný okamžik. Naproti tomu při přechodech mezi jednotlivými stavy, vykazuje tato metoda zvlnění momentu. To je způsobeno tím, že ve skutečnosti přechody mezi jednotlivými kroky nemají obdélníkový tvar, jak je zobrazeno na obrázku. Z důvodu impedance vedení jsou impulzy spíše lichoběžníkového tvaru a přechod mezi stavy trvá určitou dobu. Zvlnění momentu při komutaci přináší neplynulost otáčení motoru a zanáší do obvodu určitý šum. Z tohoto důvodu je tento způsob řízení využíván v aplikacích, kde zvlnění momentu není příliš na závadu, jako jsou různé ventilátory nebo čerpadla. [3],[4]

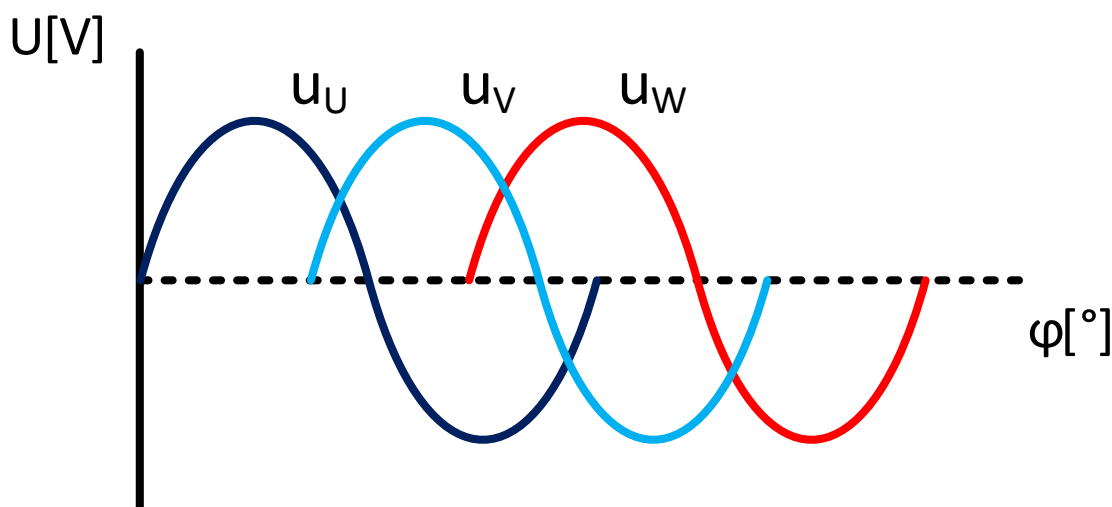


Obrázek 2.4: Průběh proudů na jednotlivých fázích

2.2.2 Sinusové řízení

Tento způsob řízení využívá sinusového signálu posunutého pro jednotlivá vinutí o 120° . Průběhy napětí na vinutích jsou zobrazeny na obrázku Obrázek 2.5. Tímto způsobem se vytvoří rotující magnetické pole stejné jako u střídavých motorů. Metoda sinusového řízení se nejčastěji využívá u PMSM motorů, ale tento druh řízení může být i použit pro BLDC motory.

Pro vytvoření sinusového signálu je využito PWM s vyšší modulační frekvencí než u 6fázové komutace, jejíž střední hodnota napětí by měla vykazovat sinusový průběh. Při generaci přesného sinusového průběhu lze zvlnění momentu značně minimalizovat a motor je schopen dosáhnout plynulejšího chodu. Ovšem spojitost signálu vyžaduje mnohem větší požadavky na údaje o poloze rotoru. V tomto případě lze získat podrobnější informaci z pozičního enkodéru, který poskytuje přesnější informaci o pozici rotoru. Toto řízení tedy zajistí hladší běh motoru díky plynulým přechodům v jednotlivých vinutích v porovnání s 6fázovnou komutací. Tato metoda je ovšem náročnější na řízení i na potřebný hardware.



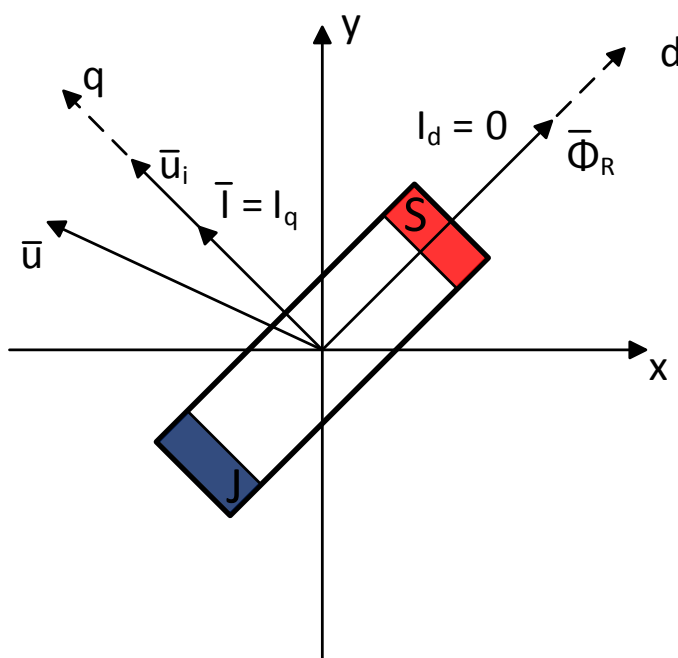
Obrázek 2.5: Průběhy jednotlivými fázemi vinutí

Zdroj [3] upraveno autorem

2.2.3 Vektorové řízení

Jak už napovídá název metody, tento způsob řízení pracuje přímo s vektory magnetických toků. V předešlé kapitole již bylo naznačeno, že maximální moment motoru je závislý na úhlu mezi vektory magnetických toků. Pracovat tedy přímo s vektory jednotlivých toků zajistí vysokou účinnost, široké provozní rozsahy motoru a poskytne precizní dynamické řízení otáček včetně momentu motoru.

Vzhledem k tomu že magnetický indukční tok je přímo úměrný proudu protékajícímu vodičem, lze pro snazší zobrazení použít vyjádření prostorových vektorů proudu. V případě statoru je výsledný vektor magnetického pole dán vektorovým součtem všech tří vektorů proudu jednotlivých vinutí. Pro převod jednotlivých statorových proudů se používají transformace mezi souřadnými systémy. Clarkova transformace převádí 3fázový sinusový systém na 2fázový časově proměnný systém označovaný jako systém α, β . Druhou používanou transformací je Parkova, která převádí stacionární souřadný systém vzniklý použitím Clarkovy transformace do 2souřadnicového časově nezávislého souřadného systému d, q . Složka d^5 se podílí na vzniku toku a složka q^6 na vzniku momentu motoru. Na obrázku Obrázek 2.6 je naznačeno, jaký mají složky směr vůči poloze rotoru.



Obrázek 2.6: Vyjádření složek d, q

⁵ Z anglického direct, neboli přímá složka

⁶ Z anglického quadrature, neboli kvadraturní

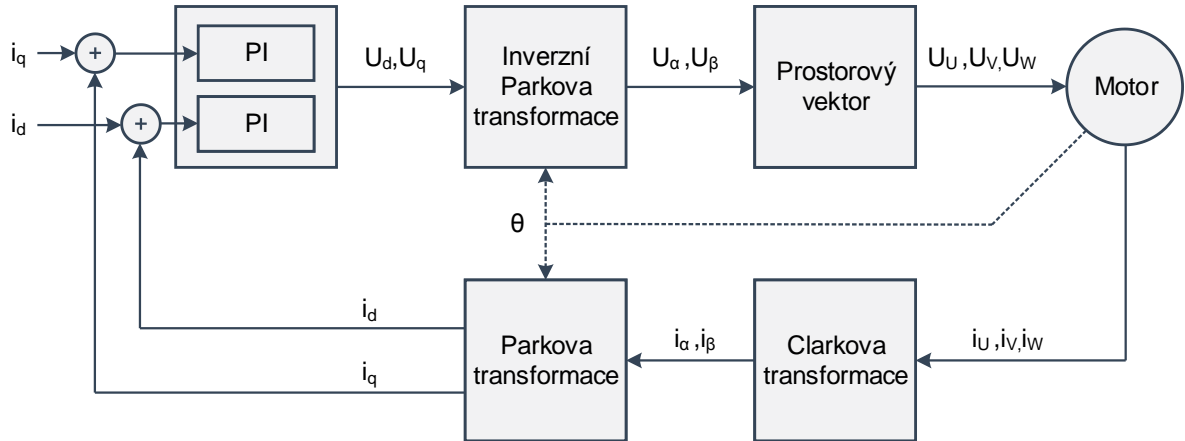
Vektor U je výsledný vektor napětí ve fázích a U_i představuje výsledný vektor napětí indukovaného zpět do vinutí. Obrázek vyjadřuje situaci, kde je motor v režimu odbuzování, takže složka I_d je nulová. Na rotor působí pouze složka vytvářející moment tedy I_q . Pro transformaci do d, q systému je použita hodnota úhlu natočení rotoru, čímž je tento systém pevně svázán s budícím magnetickým tokem rotoru v ose d a statorový tok je vytvářen proudem v ose q kolmé na osu d . Tyto transformace existují i pro zpětný převod, tedy v inverzním provedení. Obrázek 2.7 ukazuje pomocí blokového diagramu, jak jsou transformace využity pro jednotlivé převody v rámci řízení. Motor je řízen statorovými proudy reprezentovanými prostorovým vektorem. Tyto proudy se transformují do dvou složek řízených odděleně. Velikost složky i_q a i_d je stanovena podle požadavku z nadřazené regulační smyčky a okamžité hodnoty. Pro převod složek i_q a i_d na napětí může být využit běžný PI regulátor. Výstupní napětí z PI regulátoru je převedeno pomocí inverzní Parkovy transformace na ortogonální systém.

$$\begin{aligned} U_\alpha &= U_d \cos \theta - U_q \sin \theta \\ U_\beta &= U_d \sin \theta + U_q \cos \theta \end{aligned} \quad (2.3)$$

Zdroj [3] upraveno autorem

- U_α [V] - Napětí v souřadných osách statoru s úhlem α
- U_β [V] - Napětí v souřadných osách statoru s úhlem β
- U_d [V] - Napětí složky d
- U_q [V] - Napětí složky q
- θ [°] - Úhel pozice rotoru

Tyto napětí jsou dále převedeny na napětí U_U , U_V a U_W . Vzhledem k velkému počtu transformací v regulační smyčce je tato metoda značně výpočetně náročná oproti předchozím metodám. [5]



Obrázek 2.7: Blokový diagram Vektorového řízení

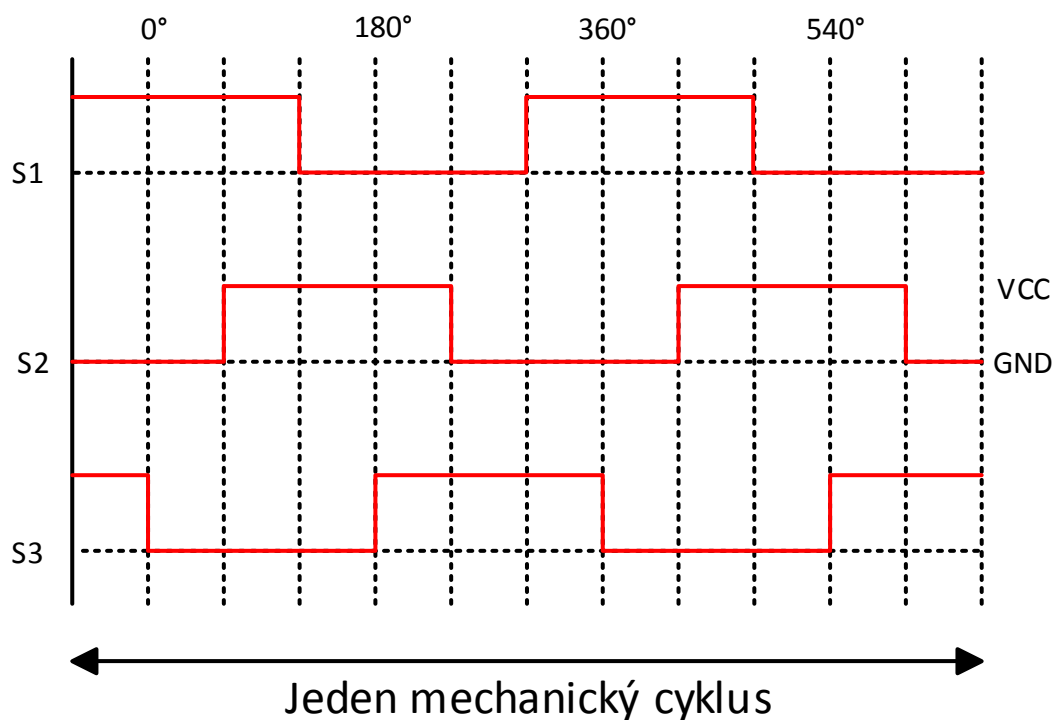
Zdroj [3] upraveno autorem

2.3 Využívané metody snímání

Při řízení EC motoru je důležité znát polohu rotoru, aby komutace byla zajištěna ve správnou chvíli. Požadavky na polohu se liší podle způsobu řízení a podle aplikace, pro kterou motor bude využit. U jednodušší konstrukce BLDC motoru s pulzním řízením stačí k dostatečné informaci o poloze využít jednoho druhu snímače. U sofistikovanějších způsobů řízení, kde nestačí vědět, že bylo dosaženo určitého bodu, ale je potřeba znát přesněji polohu rotoru, mohou být použity kombinace několika senzorů. Výsledná poloha je pak vypočtena na základě informací z více senzorů.

2.3.1 Hallové senzory

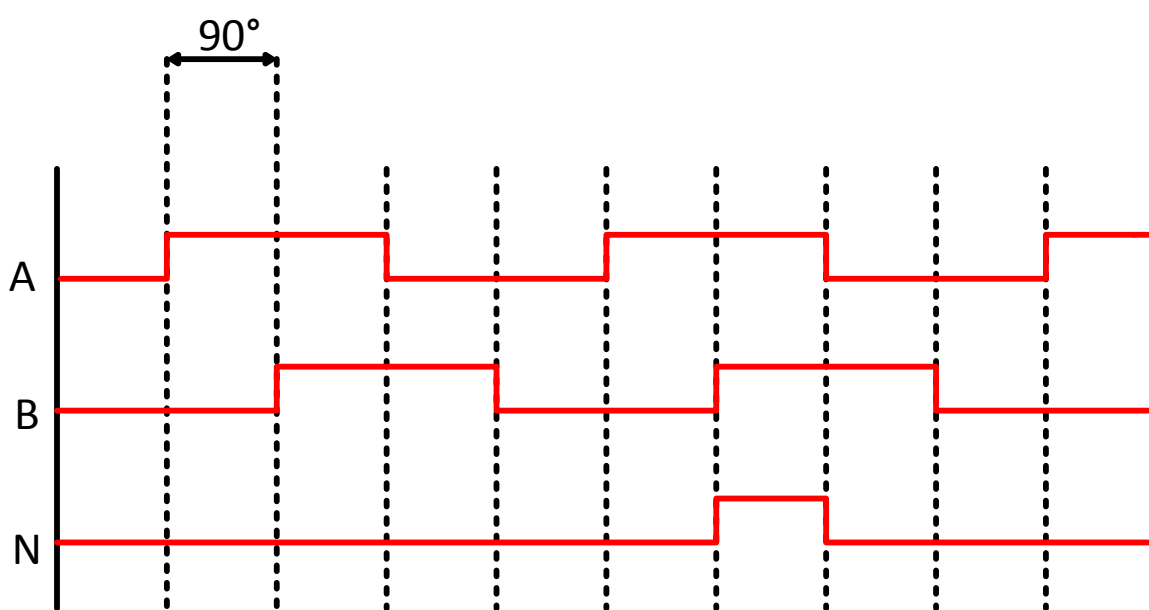
Jak už bylo zmíněno v předešlých kapitolách, jedním ze způsobů zjišťování polohy jsou Hallové senzory. Tyto senzory pracují s magnetickým polem rotoru obou pólů. Využívají Hallova jevu, kde je měřeno napětí vznikající na tenké polovodičové destičce, kterou protéká proud a vložené do magnetického pole. Citlivost senzorů je závislá na vzdálenosti uložení senzorů od rotoru a na síle využitých magnetů v rotoru. Z principu tohoto snímače vyplývá nutnost použití externího zdroje napájení. Při snímání polohy rotoru 3fázového motoru je běžně využito tří snímačů posunutých o 120° . Takto umístěné senzory snímají magnetické pole rotoru. Průchodem severního (S) nebo jižního (J) pólu magnetu se na výstupu senzorů objevují dvoustavové signály logických úrovní. Tyto signály jsou zobrazeny na obrázku Obrázek 2.8. Výsledná řídicí sekvence pro komutaci je určena z kombinací všech tří signálů vycházejících z Hallových senzorů. Velké nároky jsou tedy kladeny na umístění senzorů. Důležité je, aby vzájemná pozice jednotlivých senzorů i vzdálenost od osy byla stejná a nezanášela do měření nepřesnosti. Z důvodu komplikované implementace senzorů do statoru se někdy využívá zjednodušené konstrukce. Na vyvedené hřídeli je snímán magnet určený pro Hallové senzory, který se otáčí společně s rotorem. Takto je snímán stejný otáčivý pohyb a jeho implementace není příliš komplikovaná. [4],[5]



Obrázek 2.8: Snímané signály z Hallových senzorů

2.3.2 Enkodér polohy

Rotační enkodér je dalším často využívaným způsobem určení polohy natočení rotoru. Informace o úhlu natočení je zjišťována pomocí kotouče, který je pevně spojen s otáčivou hřídelí. Snímání otáčejícího kotouče může být prováděno například magneticky, kapacitně a opticky, pomocí fotocitlivých prvků. Enkodéry lze rozdělit na absolutní a relativní. Absolutní enkodér obsahuje několik prstenců s otvory tvořícími kódové slovo o absolutní poloze rotoru. Výhodou je, že po zapnutí napájení není zapotřebí provádět kalibraci pro nastavení správné pozice. Na rozdíl od předchozího, relativní enkodér je nutné kalibrovat, protože získává informaci o pozici na základě inkrementu, proto se také někdy nazývá inkrementální. Inkrementální enkodér je konstrukčně jednodušší a nabízí vyšší rozlišení, kdy na jednu otáčku může obsahovat až 10 000 kroků i více. Z tohoto důvodu je nejčastěji využíván při snímání větších rychlostí otáčení s co nejvyšším rozlišením. Inkrementální enkodér pracuje rozdílově s dvěma signály A a B. Signály jsou mezi sebou posunuty o 90° a takto tvoří kvadrurní výstupní signál. To poskytuje užitečnou informaci o směru otáčení. Charakter signálů ze snímače je zobrazen na obrázku Obrázek 2.9. Tyto průběhy signálu jsou často snímány zvlášť a výsledná informace o poloze je vyhodnocována externí elektronikou. Počátek počítání pulzů je závislý na čítači v externí elektronice. Absolutní pozici vzhledem k měřenému zařízení je možné získat pomocí dalšího signálu Index pulzu v obrázku označeném jako N. [4],[5]



Obrázek 2.9: Výstupní signály z inkrementálního enkodéru

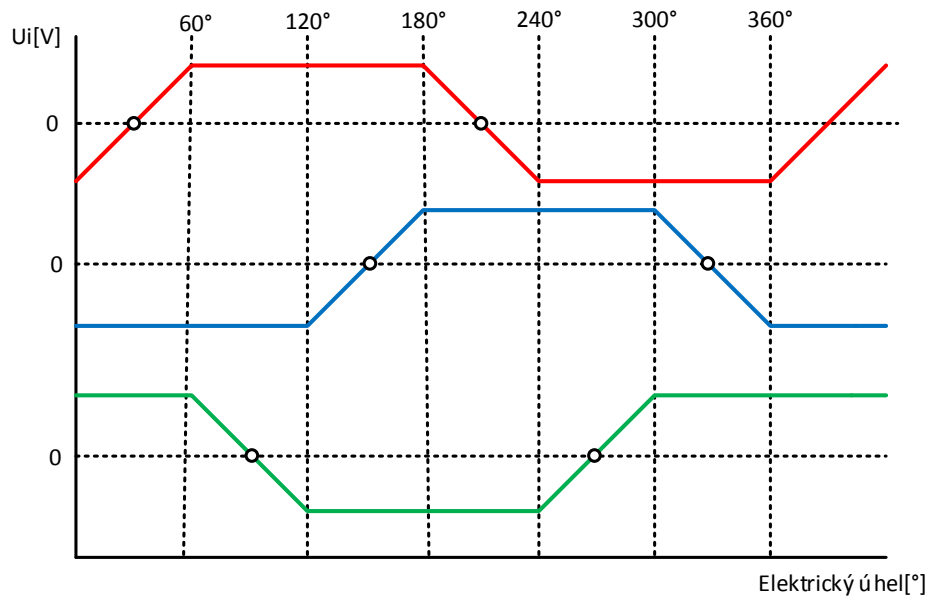
2.3.3 Snímání indukovaného napětí

Při použití této metody snímání není třeba žádných dalších senzorů. Základním principem metody je vyhodnocení napětí indukovaného zpět do statorového vinutí. Vzhledem k tomu, že způsob řízení a druh motoru ovlivňuje charakter napětí indukovaného zpět do vinutí, metody pro vyhodnocení polohy využívají odlišných principů. Podle tvaru indukovaného napětí se metody dají rozdělit na:

1. Detekce průchodu BEMF signálu nulou
2. Detekce třetí harmonické složky statorového napětí
3. Snímání změn indukance v osách d, q

Metoda 1. je častou variantou pro menší BLDC motory, kde pro využití této metody není zapotřebí žádných dalších senzorů, a tak se stává ekonomicky výhodnou variantou. Volná fáze při 6stavovém řízení je využita k měření indukovaného napětí. Na volné fázi je snímán průchod nulou signálu BEMF lichoběžníkového tvaru. Pro BLDC motory se také využívá metoda 2., detekce třetí harmonické složky. Vzhledem k tomu, že PMSM motory používají sofistikovanější metody řízení, vyžadují i složitější metody snímání jakými jsou 2. a 3. metoda. Dalším rozhodujícím faktorem kromě druhů motorů a způsobů řízení, je možnost měřit polohu rotoru při nulových otáčkách. Amplituda indukovaného napětí je přímo úměrná otáčkám, takže při nulových nebo velmi malých otáčkách není možné získat dostatečnou informaci o pozici rotoru. To platí pro první dvě metody, zatímco 3. metoda je vhodná pro všechny provozní stavy motoru. S ohledem na to, že se tato práce zabývá řízením BLDC motoru, bude dále naznačen princip vyhodnocení polohy s využitím 1. metody, detekce průchodu BEMF signálu nulou.

Na obrázku Obrázek 2.10 jsou zobrazeny průběhy indukovaného napětí ve volné fázi. Body, kde průběhy prochází nulou, se nachází ve středu komutačního sektoru, takže pro určení bodu komutace se odměří druhá polovina šířky sektoru 30° elektrického cyklu a takto se získá správný okamžik pro komutaci. S využitím všech fází lze tímto způsobem určit okamžik pro komutaci i bez použití senzorů. [6],[7]



Obrázek 2.10: Detekce průchodu nulou indukovaného napětí

Zdroj [7] upraveno autorem

3 Obvodové řešení a řídicí aplikace

3.1 Specifikace zařízení

ID	Parametr	Požadavky	Poznámka
1	Rozsah napájecího napětí	12 - 48 V	
2	Rozsah výstupních proudů	0 - 10 A	
3	Dodávaný výkon	0 – 100 W	
4	Snímané proudy	výstupní, zemnicí	
5	Využívaný interface	SPI, CAN, JTAG, UART	
6	Podporované metody snímání rotoru	HS, Enkodér, BEMF	
7	Využívaný motor	BLDC (3441S001-R3)	
8	Využitý mikrokontrolér	SPC57S50 Velvety 64 pinů	
9	MOSFET Driver	L9907	

Tabulka 3.1: Parametry zařízení

ID	Parametr	Požadavky	Poznámka
1	Vysoké napájecí napětí	5.0 V	
2	Nízké napájecí napětí	1,2 V	
3	Frekvence	80 MHz	
4	Využitá analogové periférie	3xADC	
5	Využitá komunikační rozhraní	CAN, UART, SPI, JTAG	
6	Využitá časovače	eTimer, PIT	

Tabulka 3.2: Mikrokontrolér

ID	Parametr	Požadavky	Poznámka
1	Typ motoru	BLDC	
2	Napájecí napětí	12 V	
3	Rezistivita vinutí	1,98 Ω	
4	Indukčnost vinutí	0,18 mH	
5	Váha motoru	255 g	
6	Počet pólu rotoru	4	
7	Využívané magnety rotoru	Neodymové	
8	Způsob uložení statorového vinutí	Bezdrážkové uložení	

Tabulka 3.3: Parametry motoru

ID	Parametr	Požadavky	Poznámka
1	CAN protokol	Verze 2.0A	
2	Propustnost dat	až 1Mbit/s	
3	Typ rámce dat	standardní	
4	Maximální počet ukládaných zpráv	až 32	

Tabulka 3.4: CAN rozhraní

3.2 Popis využitých signálů

3.2.1 Řídící část

Signál	Popis	Poznámka
M_CAN_ERR	Indikace chyby a POR	
M_CAN_STB	Standby řídicí vstup	
M_CAN_TX	Vstup přenášených dat	
M_CAN_RX	Vstup čtených dat ze sběrnice	
M_CAN_EN	Povolení řídicího vstupu	
M_CAN_L	LOW-level CAN	
M_CAN_H	HIGH-level CAN	
CAN_WK	Vstup pro signál probuzení	
5.0V_SR_CB	Napájení 5 V z regulátoru	
VS_PERM	Napájení 12 V	

Tabulka 3.5: CAN rozhraní

Signál	Popis	Poznámka
5.0V_USB	Napájení 5V z USB portu	
GND_USB	GND z USB portu	
5.0V_SR_CB	Napájení 5V z regulátoru	
COM_UART_TX	Vysílaná data	
COM_UART_RX	Přijímaná data	
PWR_EN	Indikace napájení	
TX_LED	Indikace vysílání zprávy	
RX_LED	Indikace přijímání zprávy	

Tabulka 3.6: UART rozhraní

Signál	Popis	Poznámka
TDI	Vstup pro testovaná data	
TDO	Výstup pro testovaná data	
TCK	Vstup hodin pro testovací signál	
TMS	Výběr testovací operace	
PORST	Reset po zapnutí	

Tabulka 3.7: JTAG rozhraní

3.2.2 Výkonová část

Signál	Popis
GND	Zem
5 V	Napájecí napětí
INA	Vstup pro senzor A
INB	Vstup pro senzor B
INC	Vstup pro senzor C

Tabulka 3.8: Rozhraní Hallových sensorů

Signál	Popis
GND	Zem
5 V	Napájecí napětí
INA	Vstup pro senzor A
INB	Vstup pro senzor B
INDEX	Vstup pro senzor C

Tabulka 3.9: Rozhraní Enkodéru

Název signálu	Popis	Poznámka
PWMA-top SM_CTRL0	Řídicí signál pro spínání horní větve tranzistorů fáze A	
PWMA-bottom SM_CTRL1	Řídicí signál pro spínání spodní větve tranzistorů fáze A	
PWMB-top SM_CTRL2	Řídicí signál pro spínání horní větve tranzistorů fáze B	
PWMB-bottom SM_CTRL3	Řídicí signál pro spínání spodní větve tranzistorů fáze B	
PWMC-top SM_IO0	Řídicí signál pro spínání horní větve tranzistorů fáze C	
PWMC-bottom SM_IO1	Řídicí signál pro spínání spodní větve tranzistorů fáze C	
PWMD-top SM_IO2	Řídicí signál pro spínání horní větve tranzistorů fáze D	Standardně nezapojen, volitelné pro krokový motor
PWMD-bottom SM_IO3	Řídicí signál pro spínání spodní větve tranzistorů fáze D	Standardně nezapojen, volitelné pro krokový motor
EN1	Povolení výstupu ovladače (L9907)	
EN2	Povolení výstupu ovladače (L9907)	
BEMF_A RESOLVER_SIN	BEMF snímání fáze A	
BEMF_B RESOLVER_COS	BEMF snímání fáze B	
BEMF_C RESOLVER_PWR	BEMF snímání fáze C	
DCBV	Snímání napájecího napětí ovladače	
IA	Snímání proudu fáze A	

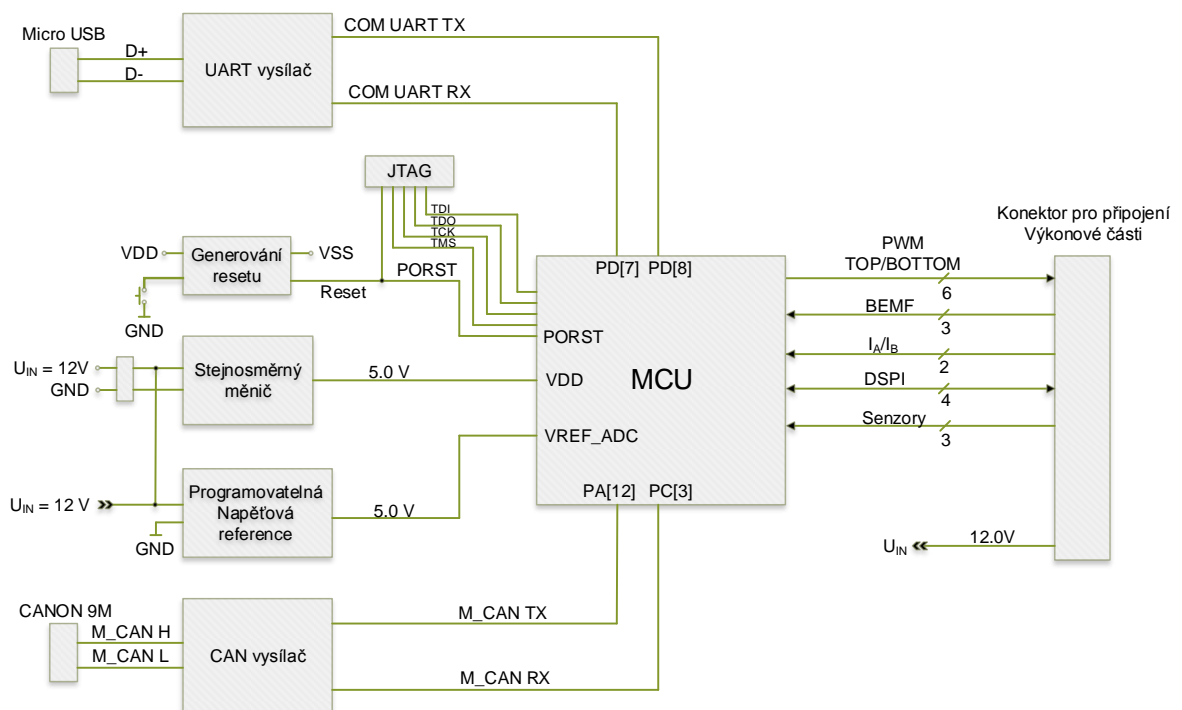
IB	Snímání proudu fáze B	
DCBI	Snímání proudu napájení ovladače	Standardně nevyužito
TEMP	Snímání teploty	Standardně nevyužito
MISO	SPI vstup	
MOSI	SPI výstup	
SCLK	SPI hodiny	
CS	Výběr zařízení	
IRC_A HS_A ZC_A	Signál A z inkrementálního senzoru Hallův senzor A BEMF fáze A detekce průchodu nulou	
IRC_B HS_B ZC_B	signál B z inkrementálního senzoru Hallův senzor B BEMF fáze B detekce průchodu nulou	
IRC_N HS_C ZC_C	signál Index z inkrementálního senzoru Hallův senzor C BEMF fáze C detekce průchodu nulou	
OC FS Flag	Nadproud (z komparátoru) Indikace chybného stavu (L9907)	
BST_DIS	Zakázání funkce boost	
TM	Povolení testu módu	
TO3	Testovací výstup	
12.0V_SR	Napájecí napětí 12 V	

Tabulka 3.10: Sdílené signály na propojovacím konektoru

3.3 Blokové schéma

3.3.1 Řídicí část

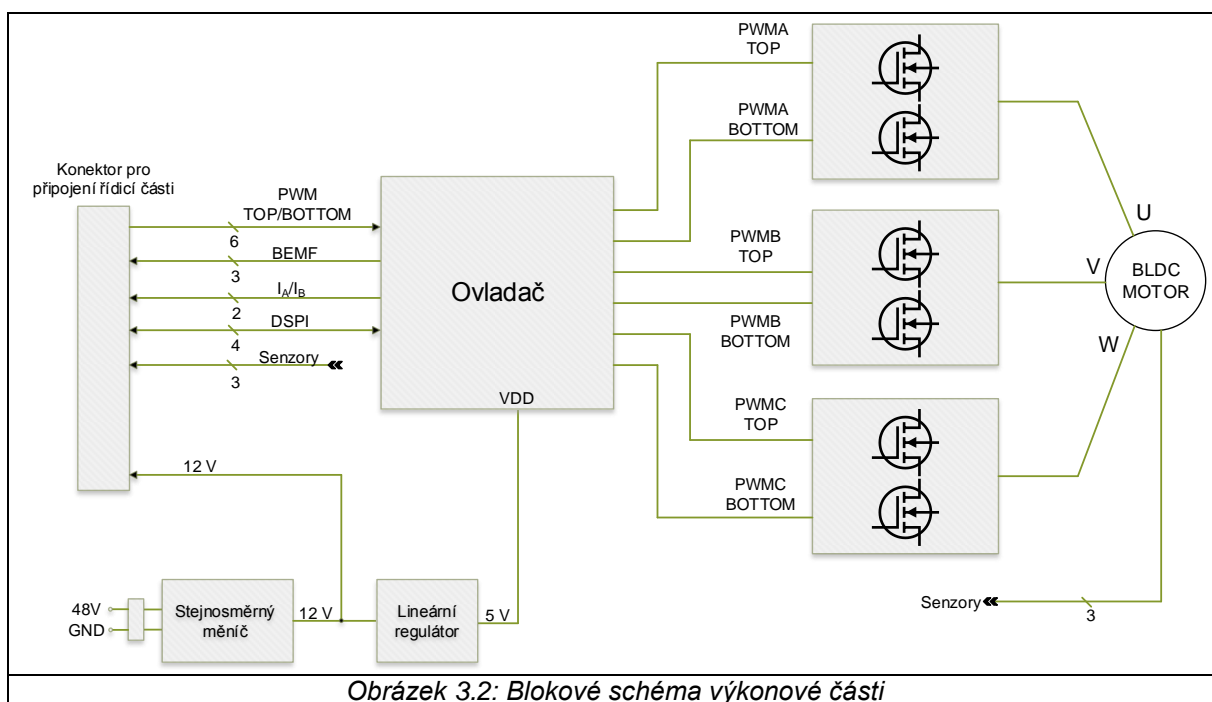
Na obrázku Obrázek 3.1 je zobrazeno blokové schéma řídicí části. Napájecí napětí 12V je přiváděno buď pomocí propojovacího konektoru z výkonové části nebo z externího konektoru. Dále je využito programovatelné napěťové reference pro vytvoření stabilního referenčního napětí pro ADC převodník. Hlavní komponentou je řídicí mikrokontrolér. Mikrokontrolér využívá aktivního resetu generovaného pomocí obvodu nebo pomocí JTAG rozhraní z debuggeru. Hlavní úlohou mikrokontroléru je zajistit generaci signálů PWM pro výkonovou část a zpracovat signály přicházející ze senzorů. Dále zprostředkovává potřebnou komunikaci. Pomocí UART rozhraní je zajištěna komunikace s paralelně běžící aplikací na PC. Rozhraní CAN umožňuje případnou komunikaci s ostatními automotive zařízeními. Na propojovacím konektoru jsou naznačeny nejdůležitější signály, které jsou sdíleny s výkonovou částí.



Obrázek 3.1: Blokové schéma řídicí části

3.3.2 Výkonová část

Na obrázku Obrázek 3.2 je zobrazeno blokové schéma řídicí části. Hlavní komponentou je ovladač, který zajišťuje spínání tranzistorů na základě signálu z mikrokontroléru. Tranzistory jsou napájeny napětím 48V a s pomocí PWM z mikrokontroléru vytvářejí napěťové průběhy pro jednotlivé fáze motoru. Z použitých senzorů na motoru jsou vyvedeny signály, které vedou zpět k mikrokontroléru, kde jsou s využitím časovače a analogově digitálního převodníku zpracovány pro vyhodnocení polohy.



Obrázek 3.2: Blokové schéma výkonové části

3.4 Popis jednotlivých částí zapojení

3.4.1 Mikrokontrolér SPC570S50 – Velvety

Implementovaný mikrokontrolér využívá 32bitové architektury jader Power PC navrženou pro emmbeded automotive aplikace. Mikrokontrolér byl přímo vyvinut pro tento typ aplikací společnostmi ST Microelectronics a Freescale. Vzhledem k tomu, že byl navržen pro automotive, pro běžný typ aplikací není příliš rozšířen.

Využívá harwardskou architekturu stejně jako dnešní více rozšířená jádra. Číslo 57 označuje, že se jedná o 55nm technologii a název Velvety je označením rodiny, do které mikrokontrolér spadá. Jednotlivé rodiny jsou v tomto případě navrženy pro odpovídající oblasti. Rodina Velvety je navržena pro šasi a bezpečnostní komponenty jako jsou systémy ABS a airbagy. Z toho důvodu mikrokontrolér disponuje nejvyšší úrovní integrity bezpečnosti, ASIL D. Jedním z těchto bezpečnostních opatření je architektura obsahující dvě výpočetní jádra. Druhé jádro je zde umístěno k podchycení možného selhání prvního jádra, a proto jsou jeho instrukce jsou posunuty o několik taktů⁷. Jádra pracují na maximální frekvenci 80 MHz a podporují VLE⁸ instrukční sadu umožňující kódovou redukci. Mikrokontrolér obsahuje systémové paměti RAM a FLASH, podporující ECC⁹. Mikrokontrolér disponuje jednotkou FCCU¹⁰ pro sběr chyb a vykonávání následných reakcí na chybové notifikace a dále jednotkou MEMU¹¹, která obstarává ukládání chybných událostí v paměti. Dále disponuje dvěma „peripheral bridge“ pro přístup k výstupním a vstupním periferiím a dvěma řadiči přerušení, pracující také v lock-step smyčce stejně jako výpočetní jádra z důvodu zvýšené bezpečnosti. Mikrokontrolér je k dispozici ve 100 nebo 64pinovém pouzdře. V obou verzích se jedná o stejnou verzi křemíku pouze 64pinová verze má zredukovaný počet připojených pinů.

V této diplomové práci je využita 64pinová varianta z důvodu požadavku na co nejmenší rozměry zařízení, a vzhledem k dostatečnému pokrytí periférií je pro tuto aplikaci dostačující. Mikrokontrolér je vhodný pro tuto aplikaci díky časovači eTimer určeného pro řízení motoru a podpoře všech potřebných komunikačních rozhraní. Časovač disponuje 6 kanály s 16bitovými čítači umožňujícími čítat vzestupně i sestupně.

⁷ Označení zdvojených struktur z důvodu bezpečnosti se nazývá lock-step

⁸ Zkratka VLE vychází z anglického Variable Length Encoding

⁹ Zkratka ECC vychází z anglického výrazu Error Code Correction, podpora opravy chyb v paměti

¹⁰ Zkratka FCCU vychází z anglického výrazu Fault Collection and Control Unit

¹¹ Zkratka MEMU vychází z anglického výrazu Memory Error Management Unit

Každý kanál může být použit jako vstup nebo výstup. To umožňuje využít časovač pro snímání signálů ze sensorů a nebo pro generování průběhů na výstupu.

Kompletní schéma zapojení v Příloha č. 1 : Schéma zapojení mikrokontroléru SPC570S.

3.4.2 Obvody napájení

Vzhledem k automotive specifikaci zařízení a z důvodu zajištění kompatibility s 48V architekturami automobilů, byl rozsah napájecího napětí zvolen až do rozsahu 48V. Zařízení dále disponuje napěťovými úrovněmi 12V a 5V, takže je nutné využívat několika regulátorů napětí.

Stejnoseměrný měnič 48V/12V – L7987

Stejnoseměrný měnič 12V/5V – A7985

Lineární regulátor 12V/5V – L5150BN

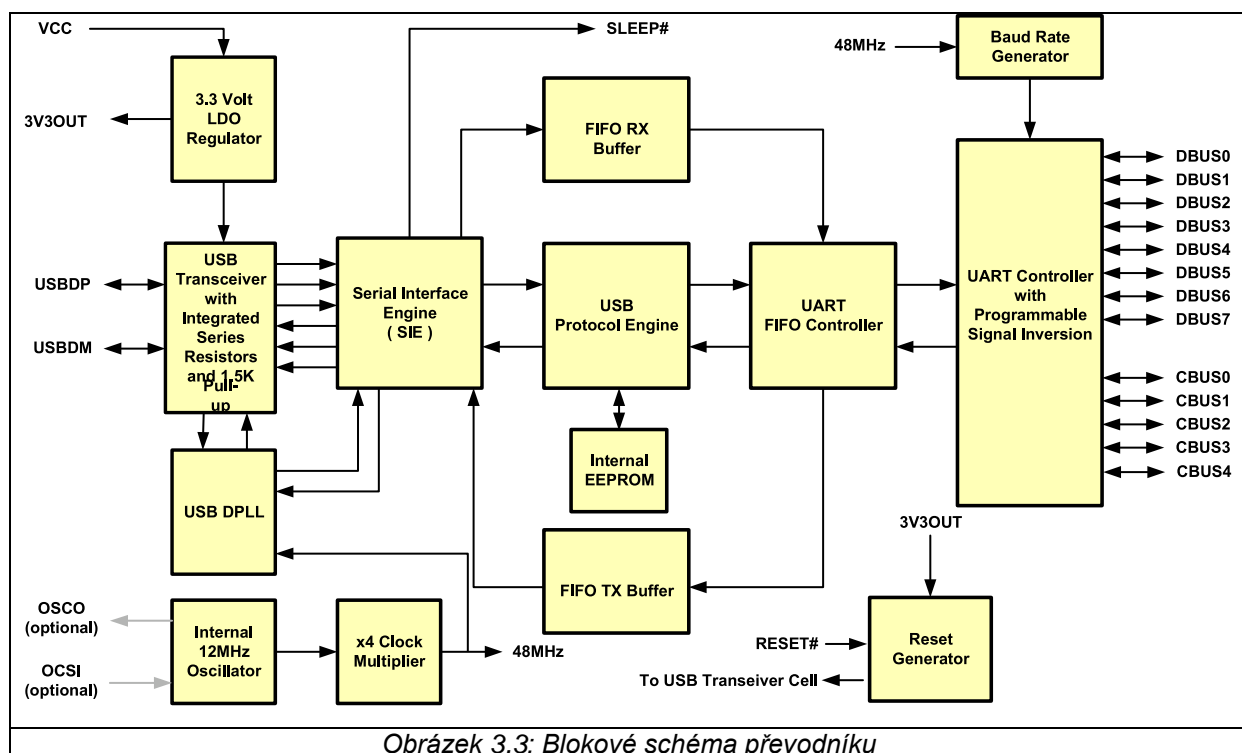
Úroveň 48V je přivedena pomocí konektoru na výkonovou desku, kde je za použití stejnosměrného měniče úroveň napětí snížena na 12V a dále rozvedena na řídicí desku. Pro tyto účely byl vybrán stejnosměrný měnič L7987. Tento měnič byl zvolen, protože jeho vstupní napěťový rozsah 4,5V až 61V vyhovuje požadavkům na napájecí napětí a s výstupním proudem až 3A představuje vhodný regulátor pro napájení celého zařízení. Výkonová část dále disponuje úrovní 5V, která je vytvářena pomocí lineárního regulátoru L5150BN pro napájení ovladače L9907 a Hallových sensorů. Z důvodu, že úroveň 5V napájí jen logické obvody ovladače motoru a Hallovy senzory, byl zvolen menší lineární regulátor. Kompletní schéma zapojení je k dispozici v Příloha č. 7: Schéma zapojení napájecích obvodů výkonové části.

Řídicí deska využívá vlastního stejnosměrného měniče snižujícího 12V přivedených z výkonové části na 5V pro napájení mikrokontroléru a dalších interface obvodů. Pro tyto účely byl zvolen stejnosměrný měnič A7985. Řídicí deska disponuje vlastním regulátorem z důvodu požadavku, aby obě části mohly být použity i s případnou jinou výkonovou nebo řídicí částí. V případě, že by byla řídicí deska využita pro jinou výkonovou část, je možné ji externě napájet z konektrem 12V. Zároveň zařízení disponuje ochranou diodou pro případ, že by bylo připojeno napájecí napětí oběma

způsoby. Kompletní schéma zapojení je k dispozici v Příloha č. 3: Schéma zapojení napájecích obvodů řídicí části.

3.4.3 Převodník UART

Tato část zapojení umožňuje převod mezi rozhraním USB a sériovým UART rozhraním. Součástka je navržena pro redukování počtu externích komponent potřebných pro převod, takže disponuje interní EEPROM pamětí, USB terminačními rezistory a obvodem pro generaci hodin bez externího krystalového oscilátoru. Na obrázku Obrázek 3.3 je zobrazeno blokové schéma součástky. Interní EEPROM paměť slouží k ukládání USB Vendor ID(VID), Product ID(PID), seriového čísla zařízení a dalších popisů USB konfigurací. Vlastní LDO regulátor vytváří referenci 3,3V pro řízení USB převodníku. Ten podporuje protokoly USB 1.1/USB 2.0 a obsahuje integrované pull-up rezistory. Dále je zde interní oscilátor generující signál 12 MHz a FIFO buffer pro příjem a odesílání dat. Kompletní schéma zapojení USB převodníků naleznete v Příloha č. 2: Schéma zapojení komunikačního rozhraní.



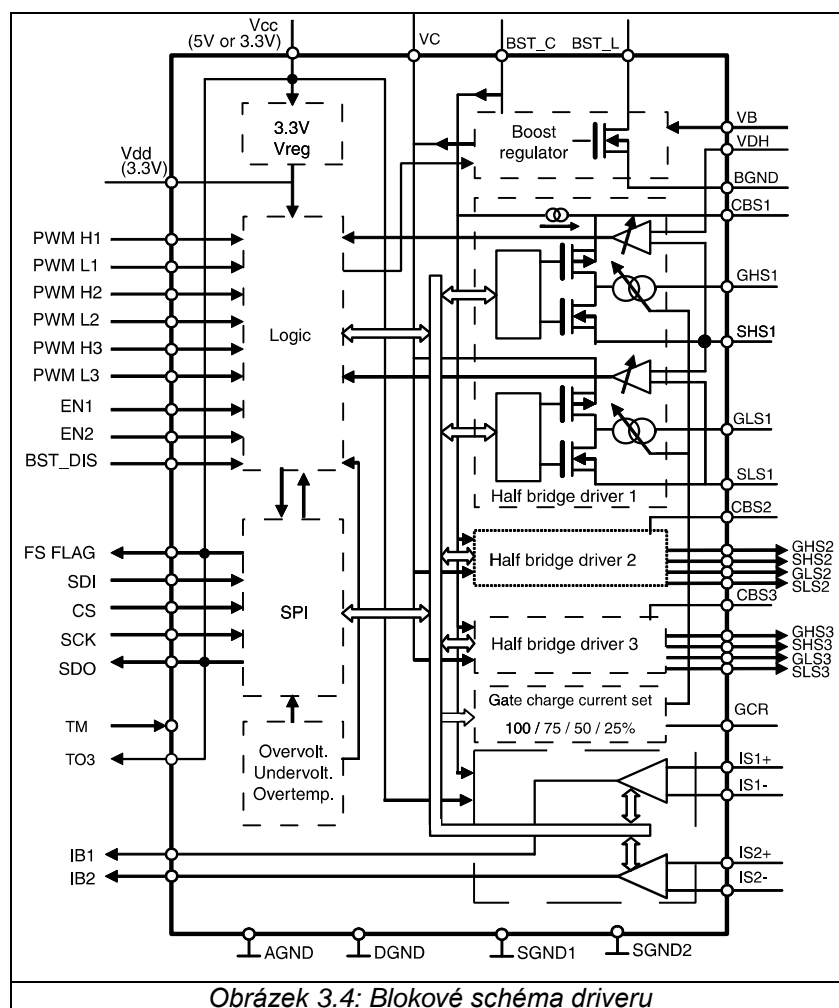
3.4.4 Převodník CAN

Tento obvod implementuje fyzickou vrstvu pro CAN rozhraní. Úkolem převodníku je tedy převádět CMOS úrovně generované mikrokontrolérem na signály používané na sběrnici CAN. Pro tyto účely byla pro zařízení vybrána součástka TJA1041A. Jedná se o automotive vysokorychlostní komunikační převodník. Umožňuje rozdílový přenos na sběrnici CAN a příjem CAN řadičem. Součástka vyhovuje ISO 11898 standardu a disponuje výbornými EMC¹² vlastnostmi a malou spotřebou. Kompletní schéma zapojení je k nalezení v Příloha č. 2: Schéma zapojení komunikačního rozhraní.

¹² Z anglického Electromagnetic compatibility

3.4.5 Automotive MOSFET driver pro 3fázový BLDC motor – L9907

Motor driver je navržen pro řízení Power MOS tranzistorů v aplikacích pro 3fázové BLDC motory. Jeho obvody umožňují použití pro pracovní prostředí s vysokým napětím až do úrovně napětí dvou autobaterií a napájecí piny jsou schopny odolat až 90V. Součástka umožňuje nezávislé řízení všech 6 kanálů, takže je možné implementovat jakoukoliv strategii řízení. Všechny kanály jsou chráněny proti příčným proudům. Ochrana proti příčným proudům zamezí stavu, kdy by na stejné fázi došlo k sepnutí obou tranzistorů a skrze ně by procházel velký proud. Za běhu zařízení umožňuje nastavení a diagnostiku pomocí SPI rozhraní. Komponenta je vybavena dvěma proudovými snímači zesilovači s nastavitelným zesílením a napěťovým offsetem, které umožňují přesné snímání výstupních proudů. Zesilovače je možné rovněž nastavovat pomocí SPI rozhraní, to umožňuje maximální flexibilitu při snímání. Vnitřní struktura je zobrazena na obrázku Obrázek 3.4. Součástka se vyrábí v 64pinové verzi pouzdra, stejně jako využitý mikrokontrolér. Kompletní schéma zapojení je k nalezení v Příloha č. 6: Schéma zapojení ovladače L9907.



Obrázek 3.4: Blokové schéma driveru

4 Realizace obvodového řešení konstrukce zařízení

4.1 Desky plošných spojů

Motivy desek plošných spojů a osazovací výkres jsou obsaženy v přílohách 9, 10, 12 a 13. Návrh desek je koncipován převážně jako SMD montážní technologie s výjimkou konektorů a pinů. Vodivé motivy jsou realizovány ve dvou vrstvách TOP a BOTTOM. Realizace desky tištěného spoje je navržena pro cuprexitové desky s tloušťkou mědi 35 a materiálem substrátu FR4, tloušťka substrátu 1,5mm.

4.1.1 DPS Řídící část

Na desce se nachází schématický blok řídicí části, který byl zobrazen na obrázku 2.1. Pomocí programu Altium designer byl vygenerován 3D model umožňující reálný náhled na reálnou desku tištěného spoje, který je k nalezení v příloze č. 11.

4.1.2 DPS Výkonového koncového stupně

Na této desce je zpracováno blokové schéma výkonové části z obrázku 2.2. Konektor pro napájení je dvou pinový a disponuje ochranou proti otočení polarity. Ochrana je realizována pomocí tranzistoru MOSFET, aby bylo možné případně realizovat i rekuperaci. Výkonové spínané MOSFET tranzistory, nejsou připevněny na chladič, ale z důvodu rozsahu špičkových proudů do 10A bylo zvoleno chlazení do desky plošného spoje. Pro takto zhotovenou desku byl rovněž byl vytvořen 3D model, který je k nalezení v příloze č.14.

5 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a realizovat zařízení umožňující řízení 3fázového BLDC motoru. Práce se tedy zabývá seznámením s využívanými typy elektromotorů. Dále jsou zde vybrány vhodné metody řízení a snímání pro BLDC motor a tyto metody jsou v práci popsány. V druhé kapitole je představena konstrukce motoru skládajícího se ze statoru a rotoru s permanentními magnety a jeho princip činnosti. Následně jsou zde prezentovány hlavní rozdíly, výhody a nevýhody jednotlivých druhů motorů a vybraných metod řízení. Pro jednotlivé metody řízení byly popsány vhodné způsoby snímání polohy. Pro navrhované zařízení byly zvoleny Hallovy senzory, enkodéry a v dnešní době stále populárnější softwarové metody pro bezsenzorové snímání polohy rotoru. Třetí kapitola se zabývá konkrétní specifikací elektronického zařízení pro řízení BLDC motoru. Jsou zde definovány použité signály s odpovídajícími vstupy a výstupy potřebnými pro řízení motoru. Pro komunikační rozhraní byla zvolena patřičná hardwarová realizace a komunikační rychlosti, tak aby byla zajištěna jejich správná funkcionality. Vzhledem k tomu, že cílem bylo realizovat referenční zařízení pro řízení BLDC motoru, je návrh vytvořen tak, aby zařízení umožňovalo využívat všechny popsané metody řízení i snímání, pro zajištění co nejuniverzálnějšího použití.

Práce nebyla bohužel dokončena v předpokládaném rozsahu z důvodu časové náročnosti při seznamování s problematikou projektu a jeho následné komplexní realizaci. Navíc v pokročilém průběhu práce došlo ke změně specifikace napájecího napětí a tudíž muselo dojít k přepracování napájecí části výkonové desky a to včetně desky tištěného spoje. Nicméně projekt nadále pokračuje a bude následně realizován, protože je vytvářen na základě poptávky pro firmu ST Microelectronics. Výsledkem diplomové práce je tedy návrh desek tištěného spoje s jejíž realizací bude dané zařízení zhotoveno a následně dokončeny zbylé části práce.

6 Použitá literatura

- [1] Motor Control Drivers [Internal Power Point Presentation]. ST Microelectronics, 2008 [cit. 2017-02-05].
- [2] Automotive Motor Control introduction [Internal Power Point Presentation]. ST Microelectronics, 2008 [cit. 2017-02-05].
- [3] Electric motor basics [online]. ST Microelectronics, 2016 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://www.st.com/content/ccc/resource/sales_and_marketing/presentation/application_presentation/group0/23/a1/94/a3/39/cf/4c/37/introduction_to_electric_motors_pres.pdf/files/introduction_to_electric_motors_pres.pdf/jcr:content/translations/en.introduction_to_electric_motors_pres.pdf
- [4] MICROCHIP. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. 2003. Dostupné z: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf)
- [5] GIERAS, Jacek F. a Mitchell WING. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002. ISBN 0-8247-0739-7.
- [6] ALAHAKOON, Sanath. Digital control techniques for sensorless electrical drives: a handbook on digital motion control techniques for sensorless control of electrical drives. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag Dr. Müller, 2009. ISBN 9783639150339.
- [7] HANSELMAN, Duane C. Brushless permanent magnet motor design. 2nd ed. Cranston, R.I.: The Writers' Collective, c2003. ISBN 1-932133-63-1.
- [8] VALENTINE, Richard. Motor control electronics handbook. New York: McGraw-Hill, c1998. ISBN 978-0070668102.

7 Přílohy

Příloha č. 1 : Schéma zapojení mikrokontroléru SPC570S

Příloha č. 2: Schéma zapojení komunikačního rozhraní

Příloha č. 3: Schéma zapojení napájecích obvodů řídicí části

Příloha č. 4: Schéma zapojení konektoru pro připojení výkonové části

Příloha č. 5: Schéma zapojení konektoru pro připojení řídicí části

Příloha č. 6: Schéma zapojení ovladače L9907

Příloha č. 7: Schéma zapojení napájecích obvodů výkonové části

Příloha č. 8: Schéma zapojení výstupních spínaných tranzistorů

Příloha č. 9: Vodivý obrazec řídicí části horní (top) a spodní (bot) strany DPS

Příloha č. 10: Osazovací plán řídicí části horní (top) a spodní strany DPS

Příloha č. 11: 3D model řídicí části horní (top) a spodní (bot) strany DPS

Příloha č. 12: Vodivý obrazec výkonové části horní (top) a spodní (bot) strany DPS

Příloha č. 13: Osazovací plán výkonové části horní (top) a spodní strany DPS

Příloha č. 14: 3D model výkonové části horní (top) a spodní (bot) strany DPS