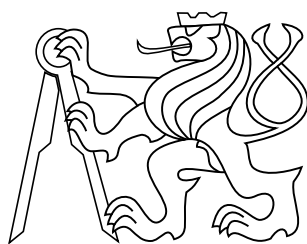


bakalářská práce

# Řízení soustavy bezkartáčových motorů

*Andrej Suslov*



Únor 2014

Vedoucí práce: Ing. Matouš Pokorný

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky



## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Matoušovi Pokornému za ochotu, trpělivost a cenné rady při její tvorbě.

Dále děkuji své rodině a své drahé přítelkyni za obrovskou podporu při tvorbě této práce a během celého studia.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem a implementací řízení soustavy čtyř bezkartáčových motorů, která má sloužit k řízení mobilní čtyřkolé robotické platformy. Jsou v ní popsány základní vlastnosti bezkartáčového stejnosměrného motoru, včetně jeho konstrukce a metod jeho řízení. Na to navazuje popis konstrukce a odvození rovnic platformy a dále návrh a implementace komunikace mezi jednotlivými uzly soustavy. Závěrečná část je věnována tvorbě výsledného softwaru.

## **Klíčová slova**

Motor, synchronní, stejnosměrný, bezkartáčový, soustava, platforma, řízení, sběrnice, vektorové, STM32

## **Abstract**

This thesis deals with a design and implementation of a control of a system consisting of four brushless motors, which are intended to steer a mobile four-wheeled robotic platform. It describes basic characteristics of a brushless DC motor, including its structure and methods of its driving. This is followed by a description of the structure and derivation of equations of the platform and next the design and implementation of communication between nodes of the system. The final section is dedicated to creation of resulting software.

## **Keywords**

Motor, synchronnous, direct, brushless, system, platform, control, bus, field oriented, STM32

# Obsah

<b>1. Úvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Konstrukce bezkartáčového motoru</b>	<b>2</b>
2.1. Stator . . . . .	2
2.2. Rotor . . . . .	3
2.3. Senzory polohy . . . . .	3
<b>3. Řízení třífázového BLDC motoru</b>	<b>5</b>
3.1. Výkonový můstek . . . . .	5
3.2. Komutace . . . . .	6
3.3. Snímání polohy rotoru . . . . .	7
3.4. Řídící algoritmy . . . . .	8
3.4.1. Skalární řízení . . . . .	8
3.4.2. Vektorové řízení . . . . .	9
<b>4. Srovnání BLDC motoru s jinými typy motorů</b>	<b>12</b>
<b>5. Soustava čtyř motorů</b>	<b>14</b>
5.1. Popis . . . . .	14
5.2. Řízení podvozku . . . . .	15
<b>6. Komunikace</b>	<b>18</b>
6.1. Topologie komunikace . . . . .	18
6.1.1. Komunikace PC-podvozek . . . . .	18
6.1.2. Komunikace mezi jednotkami soustavy . . . . .	19
6.2. Sběrnice CAN . . . . .	19
6.2.1. Fyzická vrstva . . . . .	19
6.2.2. Linková vrstva . . . . .	20
<b>7. Použité komponenty</b>	<b>21</b>
7.1. Bezkartáčový motor . . . . .	21
7.2. Výkonový můstek . . . . .	22
7.3. Řídící jednotka motoru a komunikace . . . . .	22
7.4. Převodník CAN . . . . .	23
7.5. Převodník RS-232 . . . . .	23
7.6. Napájení a propojení součástí . . . . .	23
<b>8. Software</b>	<b>26</b>
8.1. Knihovna STM32 FOC PMSM SDK v3.4 . . . . .	26
8.2. Potřebný software . . . . .	26
8.2.1. Konfigurační prostředí ST Motor Control Workbench . . . . .	26
8.2.2. Vývojové prostředí IAR Embedded Workbench . . . . .	27
8.2.3. Vývojové prostředí Keil $\mu$ Vision4 . . . . .	27
8.2.4. Programátor STM32 ST-LINK . . . . .	28
8.3. Firmware . . . . .	28
8.3.1. Hlavní řídicí jednotka . . . . .	28
8.3.2. Řídící jednotky motorů . . . . .	29

<b>9. Závěr</b>	<b>30</b>
9.1. Výsledky práce . . . . .	30
9.2. Práce do budoucna . . . . .	30
<b>Přílohy</b>	
<b>A. Přiložené soubory</b>	<b>32</b>
<b>B. Návod k firmwaru řízení soustavy BLDC motorů</b>	<b>33</b>
<b>Reference</b>	<b>34</b>

# Seznam obrázků

1.	Průřez BLDC motorem. Převezato z [1] . . . . .	2
2.	Schéma BLDC motoru podle typu rotoru . . . . .	3
3.	Schéma BLDC motoru s hallovými senzory. Převezato z [2] . . . . .	4
4.	Schéma H-můstku. . . . .	5
5.	Schéma spínačů fází motoru . . . . .	6
6.	Grafické znázornění spínání fází . . . . .	7
7.	Blokový diagram skalárního řízení rychlosti motoru . . . . .	9
8.	Schéma proudových vektorů . . . . .	9
9.	Schéma proudových vektorů . . . . .	10
10.	Blokový diagram vektorového řízení rychlosti motoru . . . . .	11
11.	Mobilní robotická platforma. Fotografie převezata z [5] . . . . .	14
12.	Vybrané možné konfigurace natočení kol platformy . . . . .	15
13.	Zobrazení možných středů otáčení . . . . .	15
14.	Schéma vyjadřující zvolené řídicí proměnné . . . . .	16
15.	Vyjádření rychlostí jednotlivých kol . . . . .	17
16.	Schéma komunikace motorů . . . . .	18
17.	Fyzická vrstva sběrnice CAN . . . . .	20
18.	Formát typického rámce CAN . . . . .	20
19.	Kompletní schéma součástí potřebných k vektorovému řízení BLDC motoru	21
20.	Prostředí ST Motor Control Workbench. . . . .	27



## Seznam tabulek

1.	Kombinace signálů z Hallových sond pro jednotlivé pozice . . . . .	8
2.	Porovnání BLDC a kartáčového motoru. Převzato z [4] . . . . .	12
3.	Porovnání BLDC a AC indukčního motoru. Převzato z [4] . . . . .	13
4.	Napájení MC a výkonového můstku . . . . .	24
5.	Propojení MC s výkonovým můstkem . . . . .	24
6.	Zapojení hallových senzorů . . . . .	24
7.	Propojení MC s převodníkem CAN . . . . .	24
8.	Propojení MC s převodníkem RS-232 . . . . .	25

## Zkratky

DC	direct current – stejnosměrný proud
BLDC	brushless DC – bezkartáčový stejnosměrný
EMF	electromotive force – elektromotorická síla
PWM	pulse-width modulation – pulzně-šířková modulace
FPGA	field programmable gate array – programovatelná hradlová pole
ADC	analog-to-digital converter – analogově-číslicový převodník
USART	universal synchronous/asynchronous receiver/transmitter – univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní
CAN	Controller Area Network – sběrnice CAN
PMSM	permanent magnet synchronous motors – synchronní motor s permanentními magnety
FOC	field oriented control – vektorové řízení
MCU	microcontroller unit – mikrokontrolér

# 1. Úvod

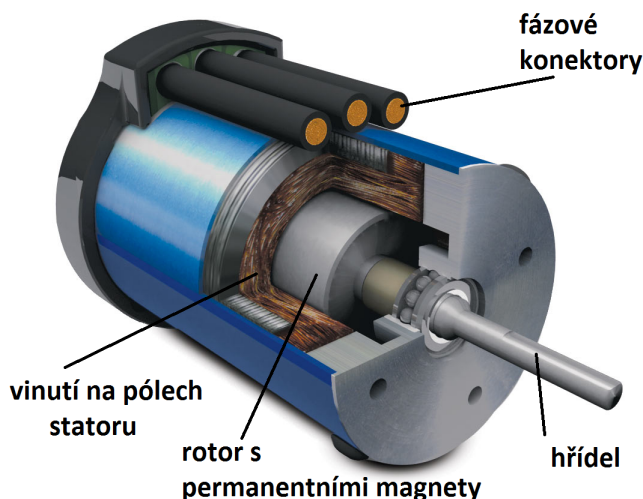
Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory patří mezi synchronní elektromotory. Na rozdíl od kartáčových motorů ke komutaci nevyužívají mechanické kartáče, ale komutace je prováděna elektronikou. Jsou napájeny stejnosměrným elektrickým zdrojem nejčastěji přes elektronicky řízený třífázový střídač, který přivádí napětí na statorová vinutí v závislosti na poloze rotoru. Fázový proud motoru má typicky obdélníkový tvar. Někdy bývají zahrnovány i mezi jednoduché krokové motory.

BLDC motory byly navrženy v padesátých letech dvacátého století, aby nahradily klasické kartáčové stejnosměrné motory hlavně v nízkovýkonových zařízeních, kde tyto stejnosměrné motory vykazují některé nedostatky a omezení. V těchto aplikacích je kladen důraz na co nejvyšší účinnost a spolehlivost a na co nejnižší generovanou hladinu hluku a elektromagnetického rušení. Nicméně vysoké nároky na řízení a vysoká cena permanentních magnetů dlouhou dobu znemožňovaly rozšíření této technologie. Teprve pokles výrobní ceny BLDC motorů a rozvoj mikrořadičů a FPGA integrovaných obvodů umožnil využití této technologie v širokém měřítku.

V budoucnu lze očekávat rozšíření BLDC motorů jak v zařízeních pro domácnost, tak i v automobilech a v průmyslových aplikacích. Ve srovnání s běžnými kartáčovými DC motory a střídavými indukčními motory přináší BLDC motory mnoho výhod a jen několik nevýhod. Mezi hlavní výhody patří vyšší výstupní výkon, vyšší účinnost, vyšší spolehlivost, nižší nároky na údržbu, vyšší životnost, nižší hmotnost a vyšší dynamika. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena motoru a vyšší nároky na řízení.

Výše uvedené výhody BLDC motorů jsou důvodem, proč jsou použity i v mobilní robotické platformě, kterou se zabývá i tato práce.

## 2. Konstrukce bezkartáčového motoru



**Obr. 1.** Průřez BLDC motorem. Převzato z [1]

Bezkartáčové motory patří mezi synchronní motory. Magnetické pole statoru a rotoru rotuje stejnou frekvencí. BLDC motory mohou být v jednofázové, dvoufázové a nejčastěji v třífázové variantě. Od kartáčových motorů se konstrukčně liší tím, že vinutí je na statoru a permanentní magnety se nachází na rotoru. Tato konstrukce odstraňuje nutnost přivádění napětí na rotující část, čímž je eliminováno mnoho nežádoucích vlastností kartáčových motorů, především opotředování kartáčů a s tím související generování tepla a hluku.

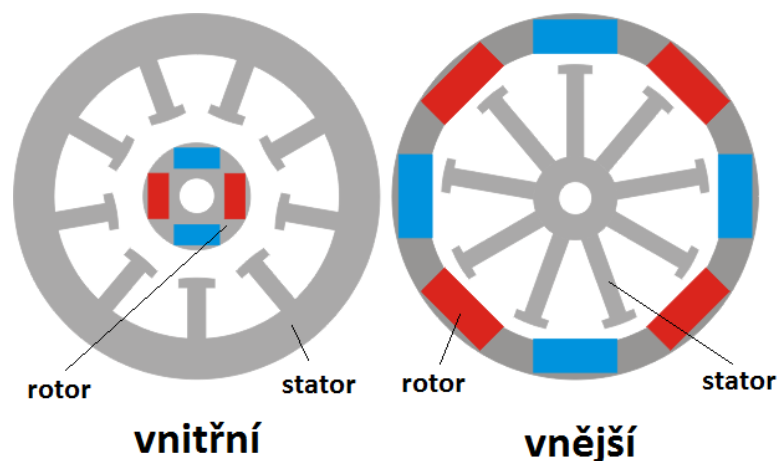
Podle typu rotoru se rozlišují dva základní druhy BLDC motorů: s vnitřním rotorem a s vnějším rotorem. Varianta s vnitřním rotorem má rotor umístěn unvitř statoru, zatímco vnější rotor se otáčí okolo statoru (viz obrázek 2)

BLDC motory se vyrábějí v různých výkonových třídách. Od malých 6–12 voltových motorů, využívaných v robotice a automobilech, po vysokovýkonové 100 V i více-voltové, které jsou uplatňovány v průmyslu.

### 2.1. Stator

Stator BLDC motoru je podobný statoru indukčního motoru, ale vinutí je uspořádané odlišným způsobem. Nejčastěji používaná třífázová varianta má trojici vinutí zapojenou do hvězdy. Vinutí je rozprostřeno po statoru tak, aby byl vytvořen vždy sudý počet pólů.

Podle typu fázových proudů a generované zpětné elektromotorické síly (EMF) rozlišujeme dva druhy bezkartáčových motorů. Prvním z nich je klasický BLDC motor,



Obr. 2. Schéma BLDC motoru podle typu rotoru

jehož fázové proudy a generovaná zpětná EMF mají lichoběžníkový tvar. Zpětná EMF a fázové proudy druhého typu motoru mají sinusový průběh. Tyto motory se také někdy označují jako PMSM motory. Tato odlišnost je způsobena malým rozdílem v propojení fází. PMSM motory mají díky sinusovým průběhům plynulejší chod, ale mají vyšší nároky na řízení.

## 2.2. Rotor

Na rotoru je umístěn sudý počet permanentních magnetů, kdy se vždy střídá severní a jižní pól. Počet pólových páru je typicky 2 až 8. Počet pólů a tedy i pólových párů určuje krok motoru.

Materiál, ze kterého jsou tvořeny magnety, závisí na požadované hustotě magnetického pole. Nejčastěji se používají feritové magnety, které jsou výhodné hlavně svojí cenou. Postupem času se ale začínají objevovat další magnety ze vzácných slitin. Ty mají vyšší magnetickou hustotu, což umožňuje zmenšit velikost i hmotnost motoru při zachování stejných vlastností. Nejběžněji používané jsou feritové, boronové a neodymové permanentní magnety.

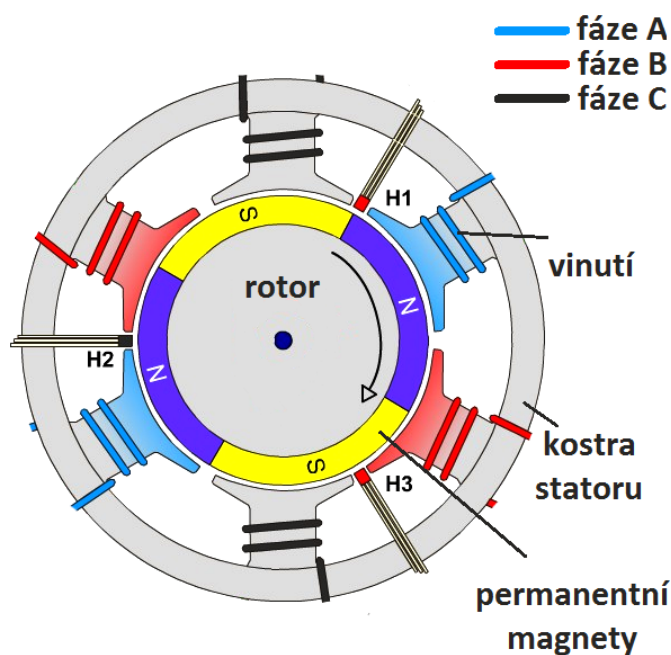
## 2.3. Senzory polohy

Pro řízení bezkartáčového motoru je nezbytné znát v daný okamžik polohu rotoru. Z tohoto důvodu výrobci BLDC motorů navrhují některé motory již s vestavěnými snímači polohy.

Nejčastěji jsou používány snímače, které využívají hallova jevu. Jedná se o trojici hallových sond umístěných na statoru po  $60^\circ$  nebo  $120^\circ$ . Sondy generují napětí v závislosti na tom, jaká je jejich vzájemná poloha vůči permanentním magnetům na hřídeli. Je-li v blízkosti senzoru pól, generuje senzor kladné nebo záporné napětí, v závislosti na polaritě magnetu.

## 2. Konstrukce bezkartáčového motoru

Druhou variantou polohových senzorů jsou inkrementální enkodéry. Ty jsou založeny na čítání pulzů při otáčení motoru, přičemž je nutné znát, kolik pulzů odpovídá jedné otáčce. Jsou instalovány do motorů, u kterých je požadavek na velice přesné určení polohy.



**Obr. 3.** Schéma BLDC motoru s hallovými senzory. Převzato z [2]

Podrobnější informace k metodám snímání polohy a jejich implementaci jsou uvedeny v sekci 3.3.

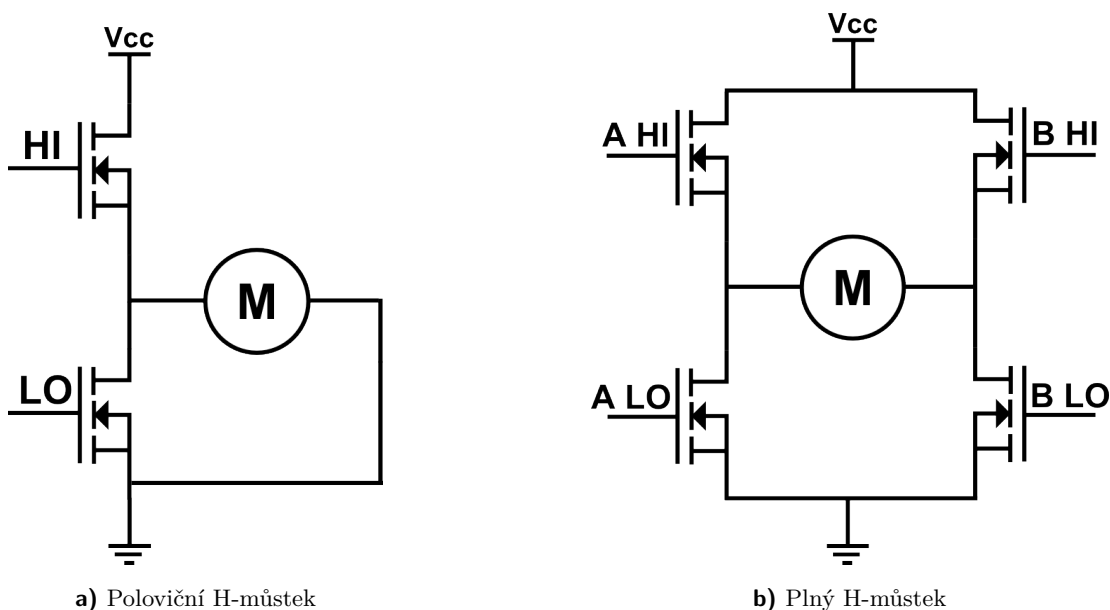
## 3. Řízení třífázového BLDC motoru

### 3.1. Výkonový můstek

Aby bylo možné efektivně BLDC motor řídit, je nezbytné převádět řídicí signály na výkonové. K tomuto účelu slouží spínací výkonové můstky.

Běžnému stejnosměrnému motoru postačuje pro řízení otáček v jednom směru poloviční H-můstek (viz obr. 4a). Po sepnutí tranzistoru HI (LO musí být zavřený) začne vinutím motoru protékat proud, který vyvolává točivý moment motoru. V závislosti na jeho směru se motor začne otáčet. Sepnutím tranzistoru LO dojde ke zkratování motoru a k jeho brždění.

Aby bylo možné motorem točit na obě strany, je potřeba mít možnost měnit směr proudu. K tomu lze použít úplný H-můstek. Jeho schéma je zobrazeno na obrázku č. 4b. V tomto případě jsou pro chod motoru spínány vždy dva protilehlé tranzistory. Zbylé dva jsou uzavřeny. Pro jeden směr otáčení v jednom směru jsou spínány tranzistory A HI a B LO a pro druhý směr jsou spínány tranzistory B HI a A LO (viz obr. 4). Zároveň musí být zajištěno, aby nemohly být ve stejný okamžik sepnuty oba tranzistory na stejné straně (A HI a A LO nebo B HI a B LO). Tím by došlo ke zkratu a poškození můstku. Antiparalelně ke spínacím tranzistorů bývá připojena ochranná dioda, chráníci tranzistor v případě jeho uzavření za běhu motoru. Úplný H-můstek je možné použít i v případě jednofázového nebo dvoufázového bezkartáčového motoru.



Obr. 4. Schéma H-můstků.

### 3. Řízení třífázového BLDC motoru

3-fázové bezkartáčové motory obsahují, jak již název napovídá, trojici fází. K tomu, aby bylo možné spínat trojici fází v obou směrech, je potřeba použít můstek tvořenými třemi polovičními H-můstkami, kdy na každou fázi připadá právě jeden (viz obr. 5). Tento můstek umožňuje sepnout libovolnou dvojici fází v obou směrech.

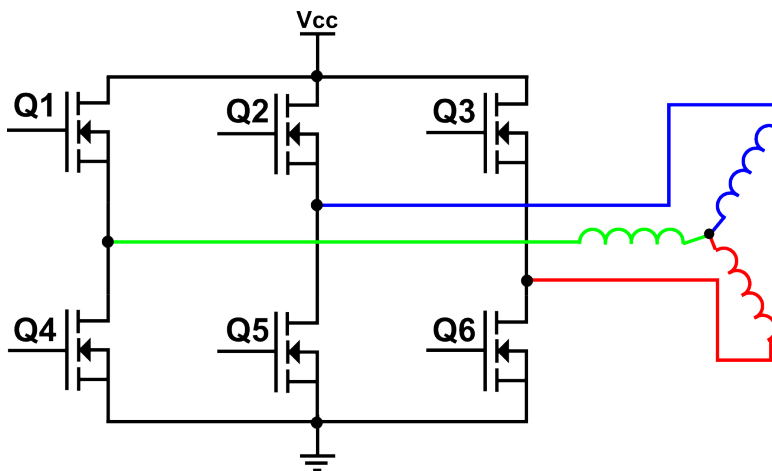
## 3.2. Komutace

Komutace je proces, při kterém dochází přepínáním fází ke změně směru toku proudu. Je nezbytná pro běh všech stejnosměrných motorů. U kartáčových motorů je komutace prováděna mechanickými kartáči. Jejich správné umístění zaručuje správný okamžik komutace v závislosti na poloze motoru. Vykonávají tak funkci přepínačů fází i polohových senzorů. U bezkartáčových motorů je mechanický způsob komutace, díky jejich konstrukci, nemožný. Je také nežádoucí, protože BLDC motory byly vinuty právě proto, aby eliminovaly nevýhody s tím spojené.

Komutace v BLDC motorech je prováděna elektronicky. To znamená, že je potřeba mít řídicí jednotku, která bude ovládat spínání jednotlivých fází. Nejčastěji se k tomuto účelu využívá mikrořadič nebo FPGA obvod.

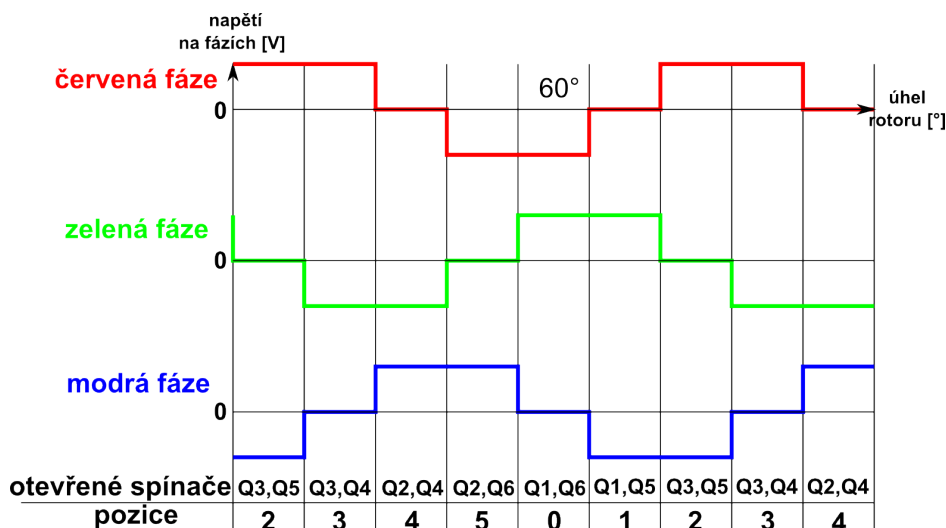
Aby bylo možné motorem točit, je potřeba vytvořit točivé magnetické pole. K tomu, aby byl chod motoru optimální, musí být vektor magnetického pole statoru vždy o  $90^\circ$  před vektorem magnetického pole rotoru. Vektor udávající směr i velikost magnetického pole generovaného vinutím statoru je součtem vektorů magnetických polí jednotlivých fází. Ty závisí na velikosti a směru proudu, který jimi protéká. Proto aby bylo možné otáčet vektorem mag. pole statoru, je nezbytné řídit směr i velikost proudu v jednotlivých fázích.

Točivé magnetické pole pro pohyb motoru, je poté vytvořeno správnou sekvencí spínání fází. Vodivý interval je pro každou fázi  $120^\circ$ . Schéma fází a jednotlivých spínačů, včetně jejich značení, je znázorněno na obrázku č. 5. Diagram popisující posloupnost spínání jednotlivých fází pro chod motoru je pak na obr. 6. Typická sekvence spínání fází je pro jeden směr otáčení Q3Q5-Q3Q4-Q2Q4-Q2Q6-Q1Q6-Q1Q5. Pro otáčení na druhou stranu je posloupnost opačná.



Obr. 5. Schéma spínačů fází motoru





Obr. 6. Grafické znázornění spínání fází

Proud je možné regulovat několika způsoby. Prvním z nich je použití řízeného zdroje napětí nebo proudu. Tato varianta je nevýhodná z hlediska ceny a neumožňuje napájení motoru z jednoduchého zdroje napětí, jako je například baterie.

Z tohoto důvodu se nejčastěji používá regulace proudu pomocí pulzně šířkově modulovaných (PWM) signálů. Jedná se o signál který střídavě otevírá a zavírá výkonové tranzistory. Proud je poté integrálem funkce takového signálu přes celou jeho periodu a je tedy přímo úměrný jeho střídě.

Tato metoda řízení je cenově výhodná a navíc velmi snadno implementovatelná, protože PWM signál může snadno být generován řídicí jednotkou a motor může být napájen jednoduchým stejnosměrným zdrojem. Její nevýhodou je generování vysokého rušení do okolí.

### 3.3. Snímání polohy rotoru

Po správný chod motoru musí být vektor magnetického pole statoru o  $90^\circ$  před vektorem magnetického pole rotoru ve směru otáčení. Z toho vyplývá požadavek na znalost polohy rotoru vůči statoru. K její zjištění lze použít některou z následujících metod.

První z nich je tzv. bezsenzorová metoda. Jak již název napovídá, tato metoda nevyžaduje přítomnost polohových senzorů. Je založena na detekci průchodu nulou zpětných elektromotorických (EMF) napětí, které jsou generovány při chodu motoru. Aby bylo možné tyto průchody zaznamenat, je nutné, aby byl výkonový můstek opatřen snímačem, který bude měřit napájecí napětí motoru snímáním napětí na jednotlivých fázích. Výhodou bezsenzorové metody je snížení pořizovací ceny BLDC motoru i výkonového. Je ale špatně použitelná pro nízké rychlosti otáčení. Tato práce se jí nebude hlouběji zabývat.

Druhou metodou je snímání polohy pomocí senzorů. K tomu je potřeba do motoru zabudovat snímač polohy.

### 3. Řízení třífázového BLDC motoru

Jednou z možností je použití inkrementálního enkodéru, umístěného přímo na hřídel motoru, udávajícího přesnou absolutní polohu při jakýchkoli rychlostech. Tato varianta je ale cenově nákladná a vyžaduje složitější instalaci snímače na hřídel. Používá se pouze v případech, kdy je nutné velice přesně znát absolutní polohu hřídele např. při použití BLDC motoru jako krokového motoru.

Nejběžnější variantou je zjišťování pozice pomocí Hallových sond. Ty jsou často integrovány výrobcem přímo do motoru a jsou jeho nedílnou součástí. Používá se trojice Hallových sond rozmístěných na statoru po  $60^\circ$  nebo  $120^\circ$ . Jak se permanentní magnety na rotoru nacházejí v blízkosti Hallových senzorů, generují tyto senzory napětí závislá na polaritě permanentních magnetů a odpovídající logické 0 nebo 1. Kombinace trojice těchto binárních hodnot určuje pozici rotoru. Pozice odpovídající jednotlivým kombinacím jsou odlišné pro  $60^\circ$  i  $120^\circ$  varianty rozmístění senzorů (viz tabulka 1).

Varianta	$120^\circ$			$60^\circ$		
Pozice	Hall A	Hall B	Hall C	Hall A	Hall B	Hall C
0	1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	1	1	0
2	0	1	0	1	1	1
3	0	1	1	0	1	1
4	0	0	1	0	0	1
5	1	0	1	0	0	0
Chyba	1	1	1	1	0	1
Chyba	0	0	0	0	1	0

**Tab. 1.** Kombinace signálů z Hallových sond pro jednotlivé pozice

Varianta snímání polohy za použití Hallových sond je výhodná z hlediska ceny, spolehlivosti i implementace a je dostatečná pro většinu aplikací.

## 3.4. Řídicí algoritmy

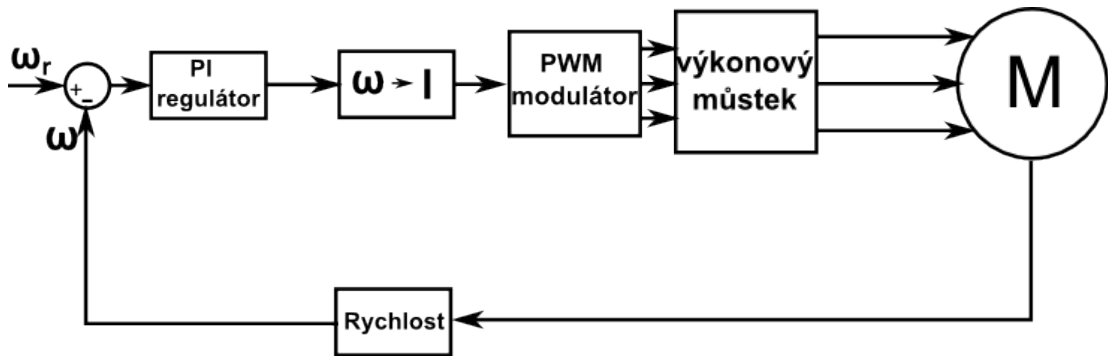
### 3.4.1. Skalární řízení

Pro řízení bezkartáčových stejnosměrných motorů existují dva základní druhy řídicích algoritmů. Prvním z nich je tzv. skalární řízení.

Skalární řízení (nebo také 6ti krokové) pracuje na podobném principu jako zpětnovazební řízení běžného kartáčového motoru. V uzavřené smyčce je jako negaticní zpětná vazba použita okamžitá rychlost motoru. Schéma takové smyčky je na obrázku 7.

Vstupním signálem je požadovaná referenční rychlost. Od ní je poté odečtena okamžitá rychlost motoru a rozdíl těchto hodnot poté převeden na referenční točivý moment, který vstupuje do PI nebo PID regulátoru. Následně je signál pulzně šířkové (PWM) modulován a vstupuje do výkonového můstku napájecího motor. V daný okamžik jsou aktivní právě dvě fáze. Třetí fáze je plovoucí.

Skalární řízení je výhodné kvůli své nízké výpočetní i hardwarové náročnosti. Mezi



Obr. 7. Blokový diagram skalárního řízení rychlosti motoru

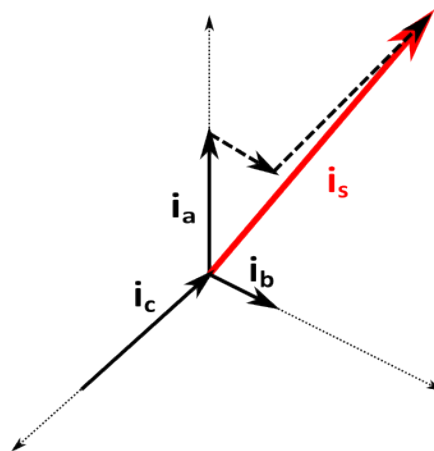
požadavky patří jen snímání rychlosti motoru (senzorově nebo bezsenzorově). Stačí k tomu jednoduchý 8-bitový mikroprocesor. Dnes je pro tyto účely možné levně sehnat již kompletní integrovaný obvod.

Na druhou stranu tato jednoduchost řízení s sebou přináší i jisté nežádoucí vlastnosti. Třífázový bezkartáčový motor totiž není lineárním systémem. Protože jsou vždy aktivní právě dvě fáze, nerotuje statorové magnetické pole zcela plynule. Nejvíce je to patrné při nízkých a vysokých rychlostech otáčení, kdy motor začíná vydávat akustický šum a vibrace.

### 3.4.2. Vektorové řízení

Vektorové řízení (angl. FOC) využívá k vytvoření modelu motoru vektory. Ty znázorňují velikost i směr magnetických toků statoru i rotoru.

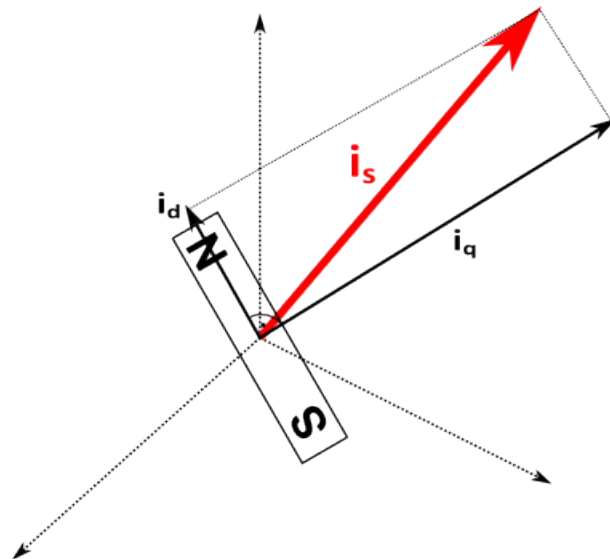
Jak již bylo napsáno v sekci 3.2, generovaný točivý moment je maximální právě tehdy, když je vektor statorového magnetického pole kolmý na vektor magnetického pole rotoru. Magnetický indukční tok je přímo úměrný proudu protékajícímu vodičem. Z tohoto důvodu je možné pro popis použít tzv. prostorové vektory proudu. Ty mají směr magnetického toku, který generují a velikost úměrnou velikosti proudu. Vektor statorového magnetického pole je poté součtem všech tří prostorových proudových vektorů (viz obrázek 8).



Obr. 8. Schéma proudových vektorů

### 3. Řízení třífázového BLDC motoru

Tento rotující vektor proudu je poté možné rozložit na dvě složky. První z nich se označuje jako  $I_q$  (angl. quadrature) a je kolmá na vektor rotoru. Tato složka je zodpovědná za generování točivého momentu. Druhá složka označovaná jako  $I_d$  (angl. direct) je rovnoběžná s vektorem mag. pole rotoru a způsobuje pouze sílu působící na osu hřídele a žádný točivý moment (viz obrázek 9).



Obr. 9. Schéma proudových vektorů

Vektorové řízení je založeno právě na eliminování této nežádoucí rovnoběžné  $I_d$  složky.

K tomu, aby bylo možné takto statorové pole generovat, je nezbytné znát kromě polohy rotoru také proud protékající jednotlivými fázemi. Rotující magnetické pole tedy není generováno jen dvojicí aktivních fází jako u skalárního řízení, ale aktivní jsou všechny tři fáze.

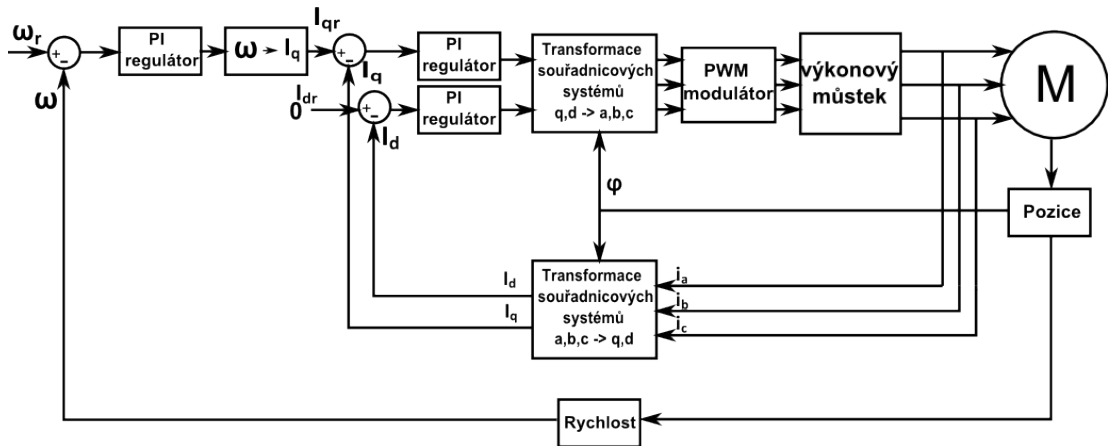
Jelikož je statorové vinutí zapojeno do hvězdy, musí být součet proudů v jednotlivých fázích roven nule. Díky tomu stačí měřit proud pouze ve dvou fázích. Dále fáze a tedy i proudové vektory jsou od sebe posunuty o  $120^\circ$ . Pro zjednodušení výpočtů je proto možné tento souřadnicový systém o třech osách transformovat do souřadnicového systému o dvou kolmých osách. Lze k tomu použít například Clarkovu transformaci [3].

Protože při otáčení rotoru se mění magnetická vazba mezi statorovým a rotorovým vinutím, je vhodné převést statický statorový souřadnicový systém do rotujícího souřadnicového systému rotoru. K tomu se používá Parkova transformace [3]. Díky tomu lze v ustáleném stavu považovat proudy za konstanty a vyjádření střídavých veličin je převedeno na stejnosměrné.

Blokový diagram vektorového řízení je zobrazen na obrázku. 10.

Kvůli výpočetní náročnosti transformací a přesnému snímání proudu jsou pro vektorové řízení potřeba výkonější, např. 32-bitové mikroprocesory.

Složitosť řízení je ale kompenzována lepšími dynamickými vlastnostmi řízení, vyšší efektivitou a také tišším a plynulejším chodem motoru než je tomu u skalárního řízení.



**Obr. 10.** Blokový diagram vektorového řízení rychlosti motoru

## 4. Srovnání BLDC motoru s jinými typy motorů

Na trhu je dnes několik různých typů motorů. Každý z nich má svá specifika a oblasti využití. Nejrozšířenější výkonové motory jsou běžné kartáčové stejnosměrné motory a indukční asynchronní motory. Díky svojí rozšířenosti a jednoduché konstrukci jsou tyto motory snadno dostupné a levné. Nicméně uvedené motory mají i svá omezení a nevýhody.

Ve srovnání s kartáčovými motory jsou BLDC motory, díky absenci kartáčů, mnohem méně náročné na údržbu a vykazují delší životnost. Mezi další výhody oproti indukčním a kartáčovým motorům patří nižší setrvačnost rotoru a s tím související lepší dynamické vlastnosti. BLDC motory mají také mnohem vyšší poměr výstupní výkon/velikost a díky své konstrukci mají tišší chod a nižší úroveň generovaného elektromagnetického rušení.

Mezi hlavní nevýhody bezkartáčových motorů patří mnohem vyšší nároky na řízení a s tím související jejich cena. S rozvojem této technologie se ale očekává, že se jejich cena bude postupně snižovat.

Následující tabulky zobrazují porovnání hlavních parametrů BLDC motorů s parametry stejnosměrných i indukčních motorů.

<b>Funkce</b>	<b>BLDC motor</b>	<b>Kartáčový motor</b>
komutace	elektronická	mechanická
údržba	méně častá	pravidelná
životnost	dlouhá	kratší
charakteristika točivý moment / rychlost	lineární	nelineární při vyšších rychlostech
rychlostní rozsah	vyšší	nižší, omezen konstrukcí motoru
účinnost	vysoká	střední
poměr výkon / velikost	vysoký	nižší
cena	vyšší	nižší
řízení	složitější	jednoduché
rušení	nízké	vyšší

**Tab. 2.** Porovnání BLDC a kartáčového motoru. Převzato z [4]

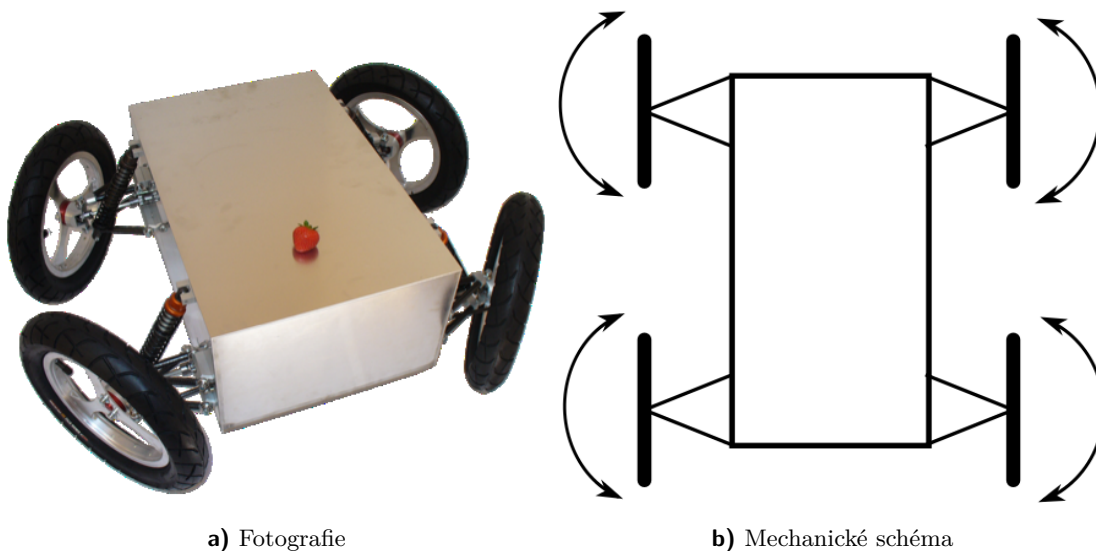
<b>Funkce</b>	<b>BLDC motor</b>	<b>AC indukční motor</b>
charakteristika točivý moment / rychlost	lineární	nelineární při nižších rychlostech
poměr výkon / velikost	vysoký	střední
dynamické vlastnosti	vysoké	střední
řízení	složitější	složitější pro proměnlivou rychlost

**Tab. 3.** Porovnání BLDC a AC indukčního motoru. Převzato z [4]

## 5. Soustava čtyř motorů

### 5.1. Popis

Soustava čtyř řízených bezkartáčových motorů by měla sloužit k řízení mobilní robotické platformy zkonstruované Ing. Jaroslavem Jahodou v rámci jeho diplomové práce [5]. Jedná se o čtyřkolovou robotickou platformu, podobnou automobilovému podvozku (obr. 11a). Je navržena tak, že u každého kola lze nezávisle na ostatních řídit rychlost jeho otáčení i úhel jeho natočení (obr. 11b).



**Obr. 11.** Mobilní robotická platforma. Fotografie převzata z [5]

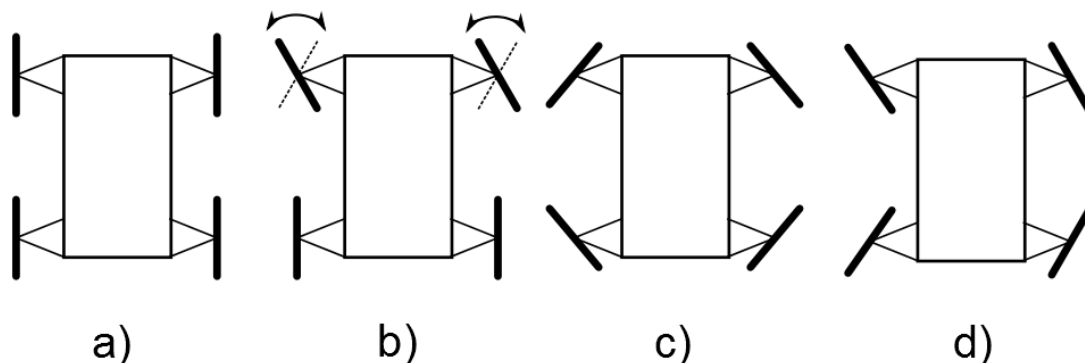
Platforma byla vytvořena pro použití ve venkovním prostředí. Hlavními požadavky bylo, aby platforma byla spolehlivá, rychlá, odolná, dobře ovladatelná a schopná operovat v nejrůznějších terénech.

V dnešní době existuje více možností jak podobnou platformu realizovat. Pohyb po zemi může být umožněn za použití kol, lyží, robotických nohou, housenkového pohybu nebo šroubovic. Kola byla vybrána z důvodu jednoduché konstrukce a snížené energetické náročnosti pro konání pohybu. Čtyřkolová konfigurace s nezávislými pohony navíc poskytuje velmi dobrou stabilitu a manévrovatelnost i v obtížnějších podmínkách. Pro lepší adhezi pneumatik podvozku a redukci otřesů jsou kola zavěšena na odpružených osách.



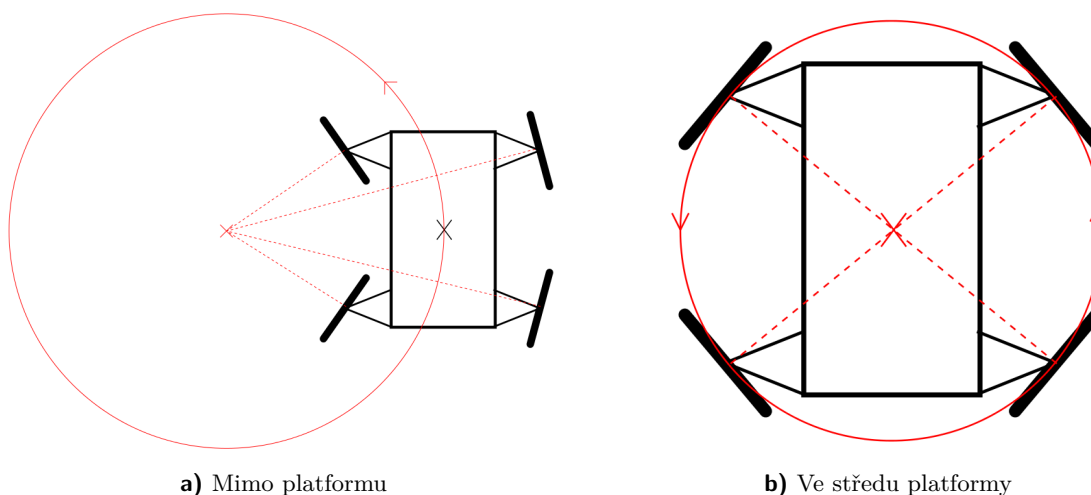
## 5.2. Řízení podvozku

Takový podvozek umožňuje operovat v mnoha různých konfiguracích natočení kol. Lze s ním popojíždět například klasickým v dopředném pohybu (obr. 12a), kdy všechna kola mají stejný úhel natočení i rychlost. Pro zatáčení je možné použít konfiguraci se zafixovanou dvojicí protilehlých kol (obr. 12b). Tato varianta je výhodná z hlediska zjednodušení řízení, protože je tímto eliminována nutnost řízení dvou kol. Typickým příkladem jejího použití je ackermanův podvozek (podvozek běžného automobilu). Nevýhodou této varianty je horší manévrovatelnost a větší poloměr otáčení.



Obr. 12. Vybrané možné konfigurace natočení kol platformy

Pro dosažení maximální variability je nutné nezávislé řízení jednotlivých kol. To přináší minimalizaci poloměru otáčení (obr. 12d). Poloměr otáčení je dán rozsahem možného úhlu natočení kol. Jelikož se kola mohou natáčet jen v rámci omezeného úhlu, nelze mít poloměr otáčení libovolný. Tento nedostatek je však možné částečně kompenzovat možností nastavení středu otáčení do středu platformy (obr. 12c). Díky tomu je platforma schopna se otáčet na místě kolem vlastního středu.



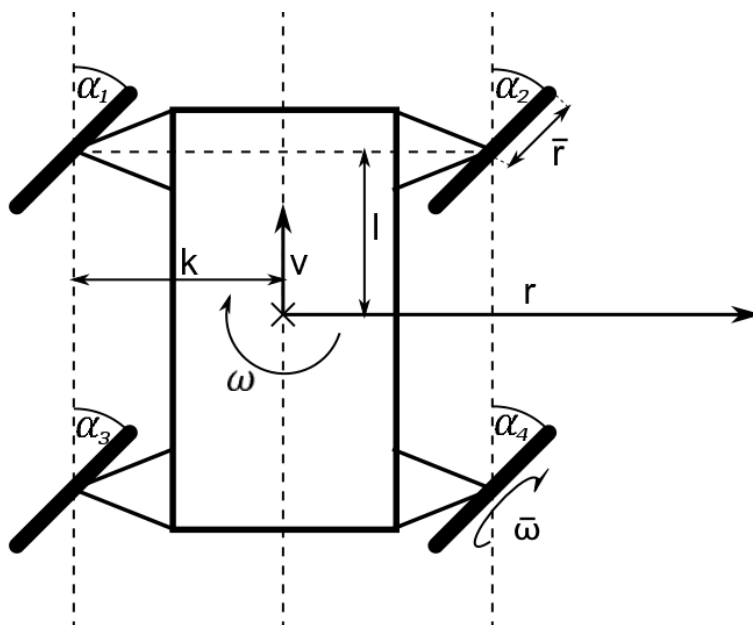
Obr. 13. Zobrazení možných středů otáčení

Aby bylo možné takto platformu řídit, je nutné přepočítávat vstupní hodnoty na úhly natočení a rychlost otáčení jednotlivých kol. K tomu je zapotřebí mít rovnice pro jejich výpočet. Ty lze odvodit z následujícího nákresu (obr. 14).

## 5. Soustava čtyř motorů

Na obrázku je schéma platformy s vyznačenými potřebnými parametry. Rozměry platformy jsou určeny parametrem  $k$ , vyjadřujícím vzdálenost mezi osou natáčení kol od podélné osy souměrnosti platformy, a parametrem  $l$ , který vyjadřuje vzdálenost osy natáčení kol od příčné osy souměrnosti platformy. Parametr  $\bar{r}$  udává poloměr kol.

Vstupními proměnnými jsou dopředná rychlost  $v$  vyjadřující dopřednou rychlost pohybu středu platformy a úhlová rychlost  $\omega$ , která vyjadřuje rychlost otáčení platformy kolem vlastního středu. Výstupní hodnoty jsou zde úhly  $\alpha$ , udávající natočení kol a  $\bar{\omega}$  s pruhem značící úhlovou rychlost rotace kol.



**Obr. 14.** Schéma vyjadřující zvolené řídicí proměnné

Z těchto hodnot lze spočítat požadovaný poloměr otáčení podle vzorce  $R = \frac{v}{\omega}$ . Podle obr. 13a je patrné, že aby bylo možné zatáčet naprosto přesně a nedocházelo k namáhání podvozku, musí osy rotace kol směřovat do společného středu otáčení. Výsledné rovnice pro úhly jednotlivých kol potom vypadají následovně

$$\alpha_1 = \arctg \frac{l}{r+k} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = \arctg \frac{l}{r-k} \quad (2)$$

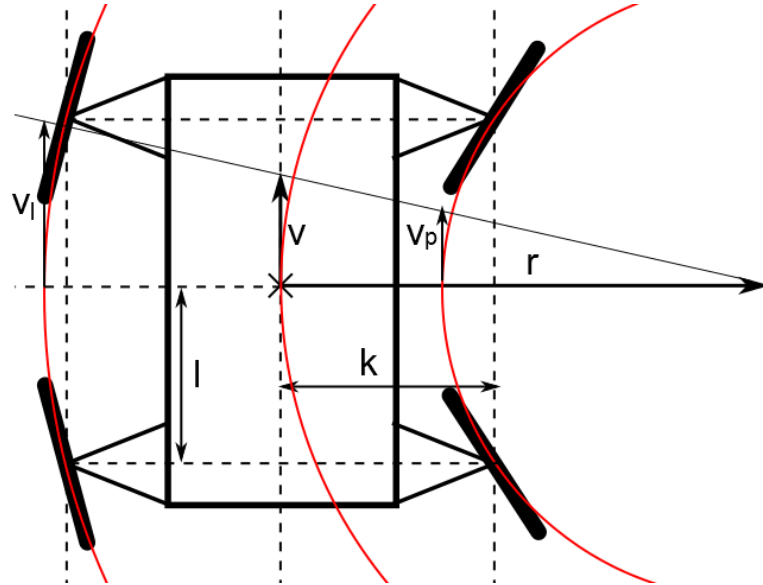
$$\alpha_3 = \arctg \frac{-l}{r+k} \quad (3)$$

$$\alpha_4 = \arctg \frac{-l}{r-k} \quad (4)$$

Pro výpočet rychlosti otáčení kol je potřeba si ovědomit fakt, že kola vzdálenější od středu otáčení musí urazit delší dráhu a tedy musí mít větší rychlost otáčení. Pro obvodovou rychlost kol musí platit následující rovnice.

$$v_1 = v_3 = v_l = \omega \sqrt{(r+k)^2 + l^2} \quad (5)$$

$$v_2 = v_4 = v_p = \omega \sqrt{(r-k)^2 + l^2} \quad (6)$$



**Obr. 15.** Vyjádření rychlostí jednotlivých kol

Z obvodové rychlosti již poté lze spočítat úhlovou rychlost jednotlivých kol vydělením obvodové rychlosti poloměrem kol.

$$\omega_1 = \omega_3 = \frac{v_1}{r_1} = \frac{v_3}{r_3} \quad (7)$$

$$\omega_2 = \omega_4 = \frac{v_2}{r_2} = \frac{v_4}{r_4} \quad (8)$$

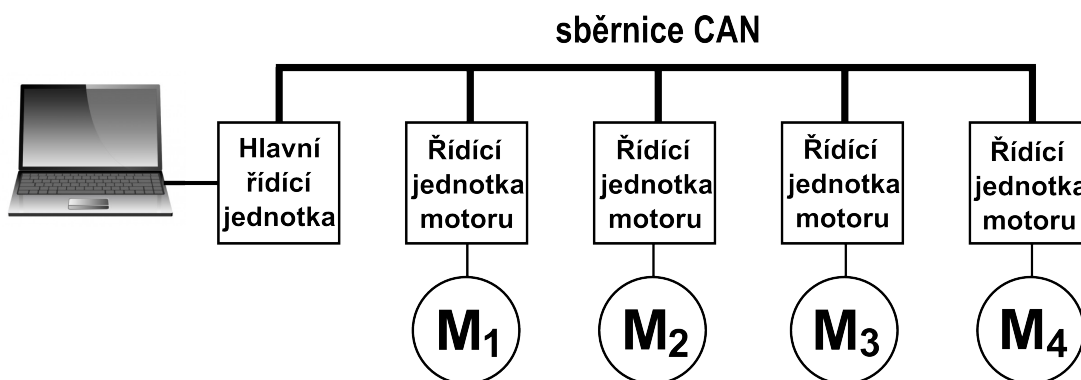
## 6. Komunikace

### 6.1. Topologie komunikace

Aby řízení soustavy bezkartáčových motorů bylo možné, je potřeba zajistit komunikaci mezi jednotlivými motory a centrální řídicí jednotkou. Ta bude obsahovat funkce pro výpočet potřebných rychlostí všech motorů soustavy. Vstupními parametry funkcí jsou dopředná a úhlová rychlost platformy zadávané uživatelem. Navržená topologie soustavy je zobrazena na obrázku 16. Tato topologie byla zvolena proto, aby v případě některých změn (např. změna parametrů platformy, změna rovnic, přidání dalších motorů apod.), stačilo modifikovat pouze hlavní jednotku a nebylo třeba upravovat ostatní jednotky nebo topologii sítě.

V této práci je komunikace mezi jednotlivými jednotkami implementována s využitím sběrnice CAN (Controller Area Network). Standard CAN byl navržen a vyvinut firmou Robert Bosch GmbH pro použití v automobilech pro komunikaci mezi jednotlivými senzory, řídicími jednotkami a aktuátory. Dnes CAN nachází uplatnění i v průmyslových aplikacích a robotice. Řadič sběrnice CAN bývá často integrován v pouzdech mikrokontrolérů jako jejich periferie.

Sběrnice CAN byla vybrána z pro svou robustnost, spolehlivost a jednoduchou softwarovou obsluhu. Pro komunikaci mezi aktuátory, jako jsou např. motory, je naprosto dostačující.



Obr. 16. Schéma komunikace motorů

#### 6.1.1. Komunikace PC-podvozek

Hlavní řídicí jednotka bude komunikovat s uživatelem a s motory. Spojení s uživatelem je možné uskutečnit více způsoby. První možností je použít kabelové spojení například pomocí sběrnice USB, Ethernetu nebo RS-232. Druhou variantou je bezdrátová komu-

nikace prostřednictvím Wi-Fi nebo Bluetooth. V této práci je použito rozhraní RS-232. Toto rozhraní je obsaženo ve většině současných osobních a průmyslových počítačích. Navíc je k takovému zařízení snadné se připojit např. pomocí terminálu.

Vstupní parametry, tedy požadovaná dopředná a úhlová rychlost, se zadávají dekadicky v jednotkách  $\text{m s}^{-1}$  a  $\text{rad s}^{-1}$ . Po jejich zadání se tyto parametry přepočítají pomocí rovnic na úhly a rychlosti otáčení všech motorů v jednotkách stupňů a otáček za minutu. Nakonec se tyto hodnoty odešlou pomocí sběrnice CAN.

### 6.1.2. Komunikace mezi jednotkami soustavy

Úkolem řídicích jednotek motorů je kromě samotného řízení motoru, také komunikace s hlavní řídicí jednotkou. Na rozdíl od centrální jednotky informace pouze přijímají a to ve formátu požadovaných otáček za minutu. Protože centrální jednotka vysílá požadavky postupně všem čtyřem motorům, musí kontroléry motorů být schopny přijmout pouze informace určené pro ně a ostatní ignorovat. K tomu slouží identifikační pole ID rámce vysílané na začátku každé zprávy.

Po přijetí požadované rychlosti motoru tuto rychlost nastaví a spustí motor. Tuto rychlost budou udržovat až do okamžiku přijetí nového požadavku. V případě výskytu nějaké chyby se motory zastaví a počkají na další příkaz.

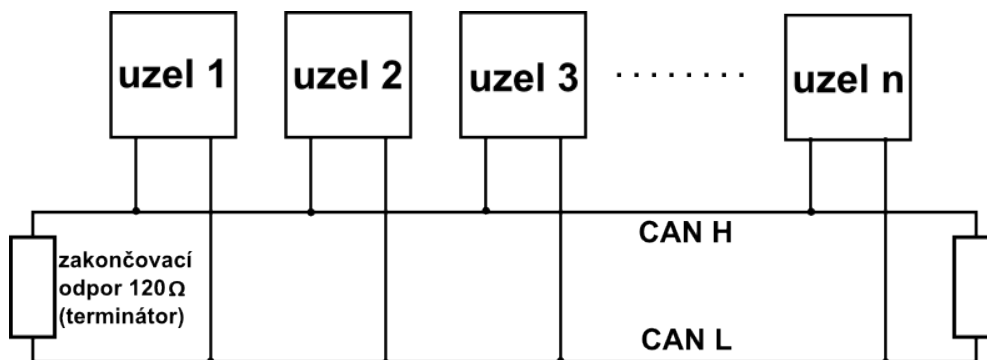
Zpětná vazba ve v této práci implementována není, protože by v terminálu bylo její zobrazení komplikované a nepřehledné. Mohla by se však použít v případě další práce za použití například grafického uživatelského rozhraní.

## 6.2. Sběrnice CAN

Sběrnice CAN je sériová datová sběrnice pracující na principu multi-master. Ten spočívá v tom, že každý uzel připojený na sběrnici může za splnění určitých podmínek libovolně přistupovat k médium. Díky tomu odpadá nutnost použití nějakého centrálního uzlu (master), který by umožňoval přístup k médium ostatním uzlům.

### 6.2.1. Fyzická vrstva

Na fyzické vrstvě se jedná o symetrickou diferenciální sběrnici. Jedná se o dvojici vodičů označovanou jako CAN H a CAN L. Komunikační rychlost může být zvolena libovolná a to až do 1 Mbit/s. Vzdálenost mezi komunikujícími uzly se může pohybovat až do stovek metrů, nicméně vzdálenost mezi uzly je nepřímě úměrná přenosové rychlosti. Existuje několik druhů modelů sběrnice CAN, lišící se zejména v přenosových rychlostech a napěťových úrovních mezi vodiči. Maximální počet uzlů na sběrnici je teoreticky omezen pouze velikostí CAN ID, v praxi se však pohybuje maximálně v rámci desítek.



Obr. 17. Fyzická vrstva sběrnice CAN

### 6.2.2. Linková vrstva

Přenos dat funguje na modelu broadcastu (producent-konzument). To znamená, že vysílaná data jsou přijímána všemi uzly v síti. Na začátku vysílání je vysíláno pole arbitráže, které obsahuje identifikátor rámce, podle kterého přijímající uzly mohou poznat, jaká data jsou právě vysílána. Identifikátor také může určovat prioritu vysílání daného uzlu. Po skončení přenosu čeká vysílající uzel na potvrzovací signál ACK (acknowledge) alespoň od jednoho uzlu. V případě, že tento potvrzovací signál neobdrží, nebo dojde-li při přenosu k chybě, je vysílání opakováno.

Kolize, neboli současný přístup více uzlů k médiu, jsou možné, nejsou však destruktivní. Toho je docíleno dvěma možnými stavy na sběrnici, dominantním a recesivním. Je-li alespoň jedním uzlem vysílán dominantní stav, pak je dominantní stav i na sběrnici. A naopak, vysílají-li všechny uzly recesivní stav, je i na sběrnici recesivní stav. Tomuto principu se také říká "drátový součin". Začne-li vysílat současně několik uzlů, potom uzly vysílající recesivní stav, ale na sběrnici detekující dominantní stav, přestávají vysílat. Je to dáno rozdílem CAN ID současně vysílaných zpráv. Uzly mohou opět začít vysílat až po detekování klidového stavu na sběrnici.

Kvůli nepřítomnosti speciálního vodiče přenášejícího hodinové impulzy slouží k synchronizaci mezi vysílajícím a přijímacími uzly tzv. bit-stuffing. Jeho funkce spočívá ve vkládání opačného bitu v případě, je-li po sobě vysláno 5 bitů stejné úrovně. Při čtení je tento vložený bit automaticky vynechán.

Zabezpečení rámce je zajištěno hned několika způsoby. Prvním z nich je zpětný odposlech sběrnice vysílajícím uzlem, dále je to kontrola bit-stuffingu, dodatečné vysílání rámce CRC a potvrzování přenosu přijímajícími uzly dat. Na obrázku 18 je zobrazen typický rámec zprávy protokolu CAN.

Díky těmto vlastnostem se jedná o velmi robustní a spolehlivý způsob komunikace.

začátek rámce							potvrzení					
		pole arbitráže		řídící pole			datová pole	pole CRC				
název rámce	SOF	ID rámce	RTR	R1	R0	délka dat	data	CRC	ERC	ACK	ACD	konec rámce
počet bitů	1	11	1	1	1	4	8-64	15	1	1	1	7

Obr. 18. Formát typického rámce CAN

## 7. Použité komponenty



Obr. 19. Kompletní schéma součástí potřebných k vektorovému řízení BLDC motoru

Na obrázku 19 jsou zobrazeny potřebné komponenty pro řízení bezkartáčového motoru. Základem je třífázový BLDC motor, který se bude řídit. Jeho fáze jsou připojeny k výkonovému můstku, který převádí řídicí signály z mikrořadiče na výkonové pomocí výkonových tranzistorů. Musí také obsahovat proudový snímač pro měření proudu protékajícího vinutím motoru (případně napěťový senzor pro bezsenzorové řízení). Samotné řízení zajišťuje mikrořadič generující řídicí signály pro výkonový můstek a zpracovávající údaje o poloze rotoru a proudu ve vinutí. Mikrořadič komunikuje s okolím pomocí rozhraní RS-232 nebo CAN.

### 7.1. Bezkartáčový motor

V tomto projektu je použit BLDC motor BG 42 od firmy Dunkermotoren [6]. Jedná se o třífázový bezkartáčový DC motor se 4-mi polovými páry neodymových permanentních magnetů. Při napájecím napětí 12 V je jmenovitý kroutící moment motoru 17,3 N cm při 3330 ot./min. Maximální točivý moment je 102 N cm. Motor je schopen vyvinout výkon až 102 W. Díky vysoké výkonové hustotě a malým rozměrům je vhodný pro mnohé aplikace. Pro snímání polohy využívá Hallovy senzory rozmístěné po 120° a napájené napětím 5 V. Podrobné technické informace a parametry motoru jsou uvedeny v katalogovém listu [6].

## 7.2. Výkonový můstek

Jako výkonový můstek je použita deska EVAL6230QR [7] od firmy STMicroelectronics. Deska je osazena DMOS čipem L6230 [8], který byl speciálně vyvinut k vektorovému řízení třífázových bezkartáčových motorů. Jeho součástí je kromě výkonových spínačů také vestavěný snímač napětí pro bezsenzorové řízení. Dále je v něm integrován proudový senzor umožňující nezávislé snímání proudu na jednotlivých fázích.

Desku je možné napájet vstupním stejnosměrným napětím 8 až 52 V. Maximální výstupní proud je 1,4 A<sub>RMS</sub> a 2,8 A ve špičkách. Její součástí je také tepelná a proudová ochrana a vestavěný napěťový komparátor.

Deska je řízena signály na pinech IN (input) a EN (enable) pro každou fázi zvlášť. Je-li na vstupu EN logická 0, potom je celá fáze plovoucí. Vstup IN určuje, zda se sepnou horní nebo dolní spínač.

Jejími výstupy jsou konektory pro připojení fází motoru a výstupy SENSE 1-3 na nichž je generováno napětí úměrné fázovému proudu. Posledním výstupem je výstup DIAG signalizující překročení maximálního proudu nebo teploty.

Svým výkonem je deska určena spíše pro menší bezkartáčové motory, ale pro vývojové účely ji lze použít i pro motor BG 42.

## 7.3. Řídící jednotka motoru a komunikace

Pro prototyp je použita deska STM32-H103 [9] od firmy Olimex. Základem této desky je mikrokontrolér STM32F103RBT6 [10] vyvíjený firmou STMicroelectronics. Jeho součástí je 32-bitový procesor ARM Cortex-M3 pracující na maximální frekvenci 72 MHz, dále 128 kB interní paměti flash a 20 kB paměti RAM.

Tento mikrořadič poskytuje dostatečný výpočetní výkon a dostatečný počet potřebných periférií pro vektorové řízení BLDC motorů. Mezi tyto periferie patří 12-bitový ADC převodníky a časovače TIM. Pro komunikaci je podporováno standardní sériové rozhraní USART, USB nebo CAN.

Deska je dále osazena externím 8 MHz krystalovým oscilátorem, napěťovým stabilizátorem 3,3 V, USB konektorem typu B, signalizačními LED diodami a tlačítkami RESET a uživatelským tlačítkem USER. Pro programování mikrokontroléru je zde ještě přítomen 20-pinový JTAG konektor pro připojení ST-Link V2 debuggeru.

Mikrokontrolér STM32F103RBT6 patří mezi nejrozšířenější a nejvíce používané a podporované řadiče. Díky tomu má nízkou pořizovací cenu a lze k němu najít mnoho literatury a bezplatných vzorových kódů.



## 7.4. Převodník CAN

Aby bylo možné komunikovat pomocí rozhraní CAN, je potřeba mezi komunikující uzly implementovat jeho fyzickou vrstvu. K tomuto účelu slouží CAN transceivery, které převádí CMOS úroveň generované mikrokontrolérem na signály používané na sběrnici CAN.

V této práci jsou použity desky SN65HVD230 CAN Board [11] vyráběné firmou WaveShare. Jsou osazené čipem SN65HVD230 [12] od firmy Texas Instrument. Tento transceiver umožňuje komunikaci až do rychlosti 1 Mbps a to až se 120 uzly. Je napájen typicky napětím 3,3 V, díky čemuž může být napájen přímo z desky mikrokontroléru.

Pro komunikaci s mikrořadičem jsou zde piny D (vstup) a R (výstup). Na straně CANu jsou to typicky piny CAN H a CAN L.

CAN Board je osazen navíc i paralelním odporem  $120\ \Omega$ , který slouží jako sběrníkový terminátor.

## 7.5. Převodník RS-232

Ke komunikaci mezi uživatelským počítačem a hlavní řídicí jednotkou je použit převodník TTL úrovní na standartní sériovou linku RS-232. Jedná se o desku osezenou čipem MAX232 [13]. Tento čip patří mezi nejrozšířenější TTL/RS-232 převodníky na trhu. Maximální přenosová rychlost je až 1 Mbit za sekundu.

Převodník na rozhraní RS-232 byl použit proto, že toto rozhraní stále podporuje většina osobních i průmyslových počítačů. Navíc je snadné se k takovýmto zařízením připojovat pomocí terminálu. Alternativou by mohlo být použití převodníku TTL/USB. K němu je ale nutné nainstalovat příslušný ovladač.

## 7.6. Napájení a propojení součástí

Pro správnou funkci výše uvedených součástí je nejprve nutné zajistit jejich správné napájení. V tomto případě jsou potřeba dva zdroje stejnosměrného napětí. Prvním z nich je 12 V DC zdroj pro napájení motoru. Použitý BLDC motor je poměrně výkonný a při vyšší zátěži může vyžadovat proud až 10 A. Proto je při takovýchto aplikacích potřebný zdroj o výkonu alespoň 120 W. V této práci byl použit slabší 24 W nastavitelný laboratorní zdroj.

Druhým potřebným zdrojem je zdroj stejnosměrného napětí 5 V pro napájení elektroniky. 5 V je potřeba pro napájení desky s mikrokontrolérem a hallových senzorů motoru. Výstupy hallových sond jsou zapojeny s otevřeným kolektorem. K tomu jsou použity pull up rezistory o odporu 12 k $\Omega$ . Deska mikrokontroléru obsahuje 3,3 V zdroj napětí, kterým je možné napájet zbylé elektronické součásti, jako jsou převodníky CAN a USART. Důležité ale je, aby měly všechny elektronické moduly galvanicky propojené zemnicí vodiče.

## 7. Použité komponenty

Pro zjednodušení vzájemného propojení jednotlivých pinů součástek bylo použito nepájivé propojovací pole EIC-104-3 a sada propojovacích drátků. Aby vše správně fungovalo, je důležité je správně propojit všechny potřebné piny mikrořadiče s odpovídajícími piny na ostatních součástkách. Pro přehlednost jsou všechny zapojené piny uvedeny v následujících tabulkách.

Funkce	Pin na čipu	Pin na desce	Popis
Vstup +5 V	VDDA	VDDA	+5 V napájení MCU
Vstup GND	GNDA	VSSA	Zem MC
Vstup +12 V	VSA	VSP	Napájení výkonového můstku
Vstup GND	GND	GND	Zem výkonového můstku
Vstup ENABLE	EN	EN	Aktivování můstku
Výstup OUT1	OUT1	OUT1	Konektor fáze A motoru (modrá)
Výstup OUT2	OUT2	OUT2	Konektor fáze B motoru (bílá)
Výstup OUT3	OUT3	OUT3	Konektor fáze C motoru (šedá)

**Tab. 4.** Napájení MC a výkonového můstku

Funkce	Pin na MC	Číslo pinu na desce	Popis	Pin na můstku
CH1	A8	EXT1 2	Spínání AH/AL	IN1
CH2	A9	EXT1 4	Spínání BH/BL	IN2
CH3	A10	EXT1 7	Spínání CH/CL	IN3
CH1E	B13	EXT2 16	Povolení fáze A	EN1
CH2E	B14	EXT2 18	Povolení fáze B	EN2
CH3E	B15	EXT2 19	Povolení fáze C	EN3
BKIN	B12	EXT2 17	Zastavení motoru	DIAG
ADC12_IN0	A0	EXT2 4	Proud na fázi A	SNS1
ADC12_IN1	A1	EXT2 8	Proud na fázi B	SNS2
ADC12_IN4	A4	EXT2 11	Proud na fázi C	SNS3

**Tab. 5.** Propojení MC s výkonovým můstkem

Funkce	Pin na MC	Číslo pinu na desce	Popis	Pin na motoru
CH1	A6	EXT1 14	Výstup hallova senzoru 1	HS1 (žlutá)
CH2	A7	EXT1 22	Výstup hallova senzoru 2	HS2 (zelená)
CH3	B0	EXT1 21	Výstup hallova senzoru 3	HS3 (hnědá)

**Tab. 6.** Zapojení hallových senzorů

Funkce	Pin na MC	Číslo pinu na desce	Popis	Pin na převodníku
3,3 V	A8	EXT2 5	Napájení převodníku	3,3 V
CANRX	B8	EXT1 16	Přijímací pin	R
CANTX	B9	EXT1 17	Vysílací pin	D
GND	B13	EXT2 6	Zem převodníku	GND

**Tab. 7.** Propojení MC s převodníkem CAN

Funkce	Pin na MC	Číslo pinu na desce	Popis	Pin na převodníku
+3,3 V out	A8	EXT1 5	Napájení převodníku	3,3 V
CANRX	A10	EXT1 7	Přijímací pin	RX
CANTX	A9	EXT1 4	Vysílací pin	TX
GND	B13	EXT1 6	Zem převodníku	GND

**Tab. 8.** Propojení MC s převodníkem RS-232

## 8. Software

### 8.1. Knihovna STM32 FOC PMSM SDK v3.4

K řízení bezkartáčového motoru byla použita knihovna STM32 FOC PMSM SDK v3.4 [14] zdarma poskytována firmou STMicroelectronics. Knihovna implementuje vektorový řídicí algoritmus pro optimální řízení 3-fázových bezkartáčových motorů. Z důvodu vysoké výpočetní náročnosti vektorového řízení je určena pouze pro 32-bitové mikroprocesory z rodiny STM32.

Knihovna je napsána v programovacím jazyce C a jsou v ní implementovány všechny potřebné funkce pro řízení bezkartáčového motoru. Patří mezi ně například řízení rychlosti, řízení točivého momentu, snímání rychlosti, snímání proudu i napětí apod. Samotné řídicí algoritmy jsou již předkompilovány jako knihovna a její zdrojové kódy nejsou běžně dostupné. Knihovna navíc umožňuje nezávislé řízení dvou různých BLDC motorů pomocí jednoho mikrořadiče.

Podrobné informace ke knihovně i k použitému vektorovému (FOC) algoritmu lze nalézt v manuálu [14].

### 8.2. Potřebný software

#### 8.2.1. Konfigurační prostředí ST Motor Control Workbench

K nakonfigurování knihovny STM32 FOC PMSM SDK v3.4 je bezplatně poskytován konfigurační a testovací program ST Motor Control Workbench [15]. Program umožňuje přesně nakonfigurovat a nadefinovat téměř libovolnou soustavu pro řízení třífázových bezkartáčových motorů. Umožňuje nastavit podrobné nastavení potřebných parametrů motoru, výkonového můstku i mikrořadiče.

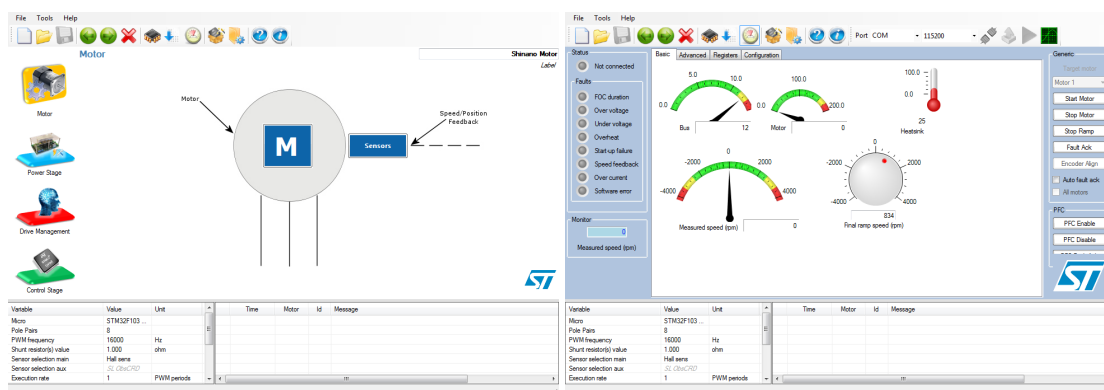
Při konfiguraci je nutné zadávat co nejpřesnější parametry podle katalogových listů a datasheetů jednotlivých použitých součástí.

Po dokončení nastavení se vygenerují hlavičkové soubory v jazyce C s příponou .h. Ty je následně potřeba importovat do projektu používajícího předkompilovanou knihovnu a projekt překompilovat.

Program ST MC Workbench navíc umožňuje vygenerovaný firmware testovat. Lze se přes něj připojit k naprogramovanému mikrořadiči a motor řídit. Zároveň je možné sledovat nastavenou a skutečnou rychlost otáčení, napětí na motoru, procházející proud, výkon motoru apod.

Užitečnou funkcí je možnost nastavení doby náběhu motoru a grafické vykreslování referenční a okamžité rychlosti. Tím je usnadněno nastavení PI regulátoru. Je také možné přistupovat k některým vnitřním proměnným a registrům mikrokontroléru. Ukázka grafického uživatelského prostředí programu je na obrázku 20.

Při práci s tímto prostředím je nutné dávat pozor, aby jeho verze byla kompatibilní s verzí použité knihovny.



a) Konfigurace

b) Testování

Obr. 20. Prostředí ST Motor Control Workbench.

### 8.2.2. Vývojové prostředí IAR Embedded Workbench

Knihovna STM32 FOC PMSM SDK v3.4 je vytvořena v projektu pro integrované vývojové prostředí IAR Embedded Workbench v minimální verzi 6.40.2 [16]. V tomto prostředí lze v knihovně provádět některé úpravy nebo případně přidávat vlastní kód. Je rovněž potřebné pro její kompilaci. Po zkompilování dojde k vytvoření souboru ve formátu Intel-Hex s příponou .hex.

Úplný program IAR Embedded Workbench je placený. Je však možné po zaregistrování použít zdarma používat limitovanou verzi pro studijní účely.

### 8.2.3. Vývojové prostředí Keil $\mu$ Vision4

K vytvoření programu pro hlavní řídicí jednotku bylo použito vývojové prostředí Keil  $\mu$ Vision4 [17]. Firma Keil Software k tomuto vývojovému prostředí zdarma poskytuje mnoho příkladových kódů pro rodinu mikrokontroléru STM32. Tyto kódy obsahují základní inicializační funkce jako například nastavení hodin, portů, periférií, registrů apod. Tím je usnadněna tvorba samotného firmwaru. Pro tyto účely lze však použít i libovolné jiné vývojové prostředí.

Stejně jako IAR Embedded Workbench je i Keil  $\mu$ Vision4 placeným softwarem. Po splnění určitých podmínek lze však bezplatně využívat studentskou verzi programu.

### 8.2.4. Programátor STM32 ST-LINK

Pro samotné nahrání kódu do paměti mikrořadiče byla použita bezplatná utilita STM32 ST-LINK [18]. Tato utilita umožňuje, za použití ST-LINK debuggeru nebo v případě, že deska mikrořadiče obsahuje příslušný čip, nahrání zkompilevaného programu do FLASH paměti mikrořadiče přes rozhraní USB.

Kromě nahrávání programu do paměti je možné paměť mazat, kontrolovat chyby nebo ukládat program z paměti do počítače.

Alternativou ST-LINKu je utilita ST Flash Loader Demonstrator [19]. Ta je schopna naprogramovat mikrořadič přes univerzální sériovou asynchronní linku USART.

## 8.3. Firmware

Aby řízení soustavy motorů bylo možné uskutečnit podle návrhu popsaném v kapitole 6.1, je potřeba vytvořit vlastní software a provést některé úpravy v použité knihovně.

Veškerý software i s úpravami a komentáři je obsažen v příloze. Komentáře jsou psané anglicky, aby mohl být software použit i zahraničními studenty.

### 8.3.1. Hlavní řídicí jednotka

Hlavní řídicí jednotka byla naprogramována tak, aby umožňovala komunikaci s uživatelem přes sériovou linku, počítala řídicí rovnice a výsledky odesílala sběrnici CAN.

Pro zjednodušení programování centrální jednotky byl použit vzorový program pro komunikaci přes sériovou linku. Tento program již obsahuje inicializační funkce `stm32_Init(void)` a `buffer_Init(void)` pro počáteční nastavení hodin, časovačů, portů, pinů a ostatních periférií. Kromě toho jsou v něm implementovány funkce potřebné pro komunikaci po sériové lince jako například přijímání (`GetKey(void)`) a odesílání (`SendChar(int c)`) zpráv.

Přijímání zpráv bylo upraveno pro potřeby zadávání hodnot jako desetinných čísel. Čísla se zadávají v dekadické formě, kdy se desetinná část odděluje tečkou nebo čárkou a potvrzují stisknutím tlačítka ENTER.

Po zadání obou vstupních parametrů se pomocí funkcí (`omega_motors_left(double velocity, double omega)` a `omega_motors_right(double velocity, double omega)`) obsahujících rovnice 7 a 8 vypočítají rychlosti pro všechny čtyři motory. Následně se tyto rychlosti převedou na jednotky otáček za minutu a uloží v celočíselném 32-bitovém formátu (`int`) do proměnných. Protože protokol CAN umožňuje posílat data pouze 8-bitové délky, jsou jednotlivé proměnné rozděleny na čtyři 8-bitová čísla. Tato čísla jsou poté uložena do polí typu `char`.

Následuje jejich sekvenční odeslání po sběrnici CAN. Protože se musí odeslat čtyři 8-bitová čísla, nastavila se délka zprávy jako 4. Aby motory byly schopny rozlišit ty zprávy, které jsou určeny právě jim, bylo nutné každé ze čtyř odesílaných zpráv při-

dělit unikátní číslo ID pole arbitráže. Tato čísla byla zvolena tak, aby se jednalo o bitový posun a byla co nejnižší šance jejich záměny. Dekadicky jsou to čísla 2, 4, 8 a 16. Funkce pro inicializaci (`can_Init(void)`), zasílání (`CAN_wrMsg (CAN_msg *msg)`) a přijímání (`CAN_rdMsg (CAN_msg *msg)`) zpráv po sběrnici CAN byly importovány z jiného volně přístupného vzorového programu. Přenosová rychlost odesílaných zpráv je zvolena 100 kbit/s.

Oba typy komunikace, tedy sériová linka i CAN, fungují na principu přerušení, aby se mikroprocesor co nejméně zatěžoval a měl co nejnižší spotřebu.

### 8.3.2. Řídící jednotky motorů

U řídicích jednotek motorů bylo nutné přidat do řídicího firmwaru část kódu umožňující nastavení komunikace pomocí sběrnice CAN. Pro tyto účely jsou potřebné funkce pro nastavení pinů, inicializace CAN periférií, nastavení parametrů komunikace, konfigurace filtrů, nastavení vektoru přerušení a nakonec přijímání zpráv. Patří sem funkce `SysTick_Configuration(void)`, `GPIO_Configuration(void)`, `NVIC_Configuration(void)` a `CAN_Receive(CAN1,CAN_FIFO0, &RxMessage)`.

Přijímání zpráv musí pracovat na principu přerušení, aby nebyl zabírán výpočetní výkon potřebný pro ovládání motoru. Přenosová rychlost komunikace je shodná s rychlostí nastavenou u centrální jednotky a to 100 kbit/s.

Důležité je nastavit pro každou jednotku filtry CAN tak, aby povolovaly příjem zpráv jen s určitým polem ID. Motor č.1 smí přijímat pouze zprávy s ID 2, motor č.2 zprávy s ID 4, motor č.3 pouze ID 8 a nakonec motor č.4 jen ID 16. Ostatní zprávy prochází filtrem bez povšimnutí. Povolené ID se zadává do konstanty `ID_FILTER` v hexadecimálním tvaru.

Program během běhu motoru v cyklu testuje kontrolní proměnnou označovanou jako `CAN_Flag`, která má počáteční hodnotu nastavenou jako 0. Detekuje-li mikroprocesor, že je na sběrnici vysílána zpráva a zpráva projde filtrem, data obsažená ve zprávě uloží a nastaví proměnnou `CAN_Flag` jako 1.

V následujícím cyklu se tato proměnná zkontroluje a je-li kladná, zpětně sestaví ze 4 přijatých 8-bitových dat jedno 32-bitové celočíselné číslo a uloží do proměnné `int speed`. Tato proměnná poté slouží jako argument pro funkci nastavení referenční rychlosti `MCI_ExecSpeedRamp(oMCI[0], speed/6, 1000)`. Po jejím nastavení se spustí řízení motoru zavoláním funkce `MCI_StartMotor(oMCI[0])`. Kontrolní proměnná `CAN_Flag` se znovu nastaví na 0.

## 9. Závěr

Cílem práce bylo navrhnout, implementovat a ověřit řízení soustavy čtyř bezkartáčových stejnosměrných motorů. Soustava by měla sloužit pro řízení čtyřkolové robotické platformy s nezávislým řízením jednotlivých kol.

### 9.1. Výsledky práce

Prvním úkolem bylo implementovat a ověřit funkčnost volně dostupného řídicího firmwaru od firmy STMicroelectronics pro mikrokontroléry z rodiny STM32.

Firmware byl testován na komponentech uvedených v kapitole 7. Na této sestavě nebyly s jeho funkčností zaznamenány žádné problémy. Knihovnu je navíc možné nakonfigurovat pro mnoho různých sestav. Díky tomu není problém používat firmware i s jinými komponenty. Při nastavování parametrů komponent je ale nutné udávat přesné údaje podle katalogových listů.

Komunikace mezi motory probíhá za použití sběrnice CAN. Jednotlivé uzly se podařilo naprogramovat tak, že správně přijímají data jím určená. Toho bylo docíleno díky přidělení unikátního čísla ID každému uzlu a nastavení filtrů pro jejich rozpoznávání. Díky vysoké přenosové rychlosti sběrnice jsou prodlevy mezi vysílanými zprávami v jednotkách milisekund a proto nemají vliv na řízení soustavy.

Nakonec byla naprogramována hlavní řídicí jednotka, která řídí rychlosti jednotlivých motorů v závislosti na zadaných parametrech platformy a její požadované dopředné a úhlové rychlosti. Menším nedostatkem se ukázalo textové uživatelské rozhraní. Toto rozhraní neumožňuje přehledně zobrazovat zpětnou vazbu z motorů. Okamžitou rychlost motorů je ale možné zobrazit za použití ST MC Workbenche a připojením přímo k řídicí jednotce motoru.

Výsledkem této práce je řídicí firmware motorů i hlavní řídicí jednotky, který je možné použít pro soustavu čtyř téměř libovolných bezkartáčových stejnosměrných motorů. Bohužel nebylo možné ověřit soustavu všech čtyř motorů z důvodu nedostatku výkonových můstek. Pro ověření byl použit jeden výkonový můstek, který byl postupně připojován k jednotlivým řídicím jednotkám. Motory v soustavě se točily rychlostí vypočítanou pomocí odvozených rovnic pro platformu.

### 9.2. Práce do budoucna

Do budoucna by bylo potřeba otestovat funkčnost navrženého řízení na reálné fyzické platformě. Díky variabilitě řídicího firmwaru motorů je možné použít motory různých



parametrů. Ke správné funkci je nutné zajistit vhodné napájení pro všechny komponenty soustavy.

Textové uživatelské rozhraní bylo použito jen pro testovací účely. V budoucnu by měla být platforma řízena programem. Dalším úkolem by mělo proto být vytvoření právě takového řídicího programu. Platforma by tak mohla být řízena na dálku například pomocí počítače nebo ručního ovladače. Druhou možností by mohlo být použití inteligentních algoritmů pro samostatné řízení platformy. Příkladem je třeba navigace pomocí systému GPS nebo snímání okolního prostředí kamerami.

# Příloha A.

## Přiložené soubory

Na CD jsou přiložené následující soubory:

- BP\_Suslov\_2014.pdf – *Text bakalářské práce ve formátu PDF*
- STM32\_PMSM\_FOC\_LIBv3.4\_WEB.zip – *Zkomprimovaný firmware pro řídicí jednotku BLDC motoru*
- STM32\_CAN.zip – *Zkomprimovaný firmware pro hlavní řídicí jednotku*
- STM32F103+\_EVAL6230QR.stmc – *Soubor s nastavením parametrů použitých komponent pro ST MC Workbench*

## Příloha B.

# Návod k firmwaru řízení soustavy BLDC motorů

Dále je popsán postup a návod jak používat firmware vytvoření v této bakalářské práci.

Parametry platformy jsou určeny konstantami `RADIUS` (poloměr kol), `HALF_AXIS_LENGTH` (parametr  $l$  z obr. 14) a `HALF_AXIS_WIDTH` (parametr  $k$  z obr. 14) v souboru `CanDemo.c` firmwaru hlavní řídicí jednotky.

1. Zkontrolujte, že jsou všechny komponenty správně propojené a napájené (svítí napájecí LED).
2. Zapojte hlavní řídicí jednotku do sériového portu vašeho počítače.
3. Otevřete počítačový terminál (Terminal, PuTTY, HyperTerminal,...) a nastavte komunikaci podle následující tabulky:

Seriový port	číslo připojeného sériového portu (COMx)
Rychlost přenosu (bps)	115200
Datových bitů	8
Stop bitů	1
Parita	žádná (none)
Řízení toku (flow control)	žádné (none)

4. Resetujte řídicí jednotku stisknutím tlačítka `RESET` na desce.
5. Zobrazí se úvodní uvítací text a požadavek na zadání dopředné rychlosti platformy
6. Zadejte požadovanou rychlost. Desetinná část se odděluje tečkou. Zadanou rychlost potvrďte stisknutím tlačítka `ENTER`.
7. Zobrazí se požadavek na zadání úhlové rychlosti platformy. Postupujte stejně jako v předchozím bodu.
8. Po zadání obou rychlostí se vypíše vypočítané rychlosti jednotlivých motorů a motory se spustí.
9. Znovu se zobrazí požadavek na zadání dopředné úhlové rychlosti. Pro změnu požadovaných rychlostí pokračujte podle bodu 6.

Pozn. Pro zastavení všech motorů zadejte nulu pro dopřednou i úhlovou rychlost platformy.

# Reference

- [1] *robotsforroboticists.com*. URL: <http://robotsforroboticists.com/wordpress/wp-content/uploads/2013/12/brushlessMotor.jpg> (cit. 11.03.2014).
- [2] *Avdweb.nl*. URL: [http://www.avdweb.nl/Article\\_files/Solarbike/Motor-controller/4-Pole-brushless-DC-motor-animation.jpg](http://www.avdweb.nl/Article_files/Solarbike/Motor-controller/4-Pole-brushless-DC-motor-animation.jpg) (cit. 11.03.2014).
- [3] Analog Devices Inc. *Reference Frame Conversions*. 2002. URL: [http://www.analog.com/static/imported-files/application\\_notes/Refframe.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/application_notes/Refframe.pdf) (cit. 10.12.2014).
- [4] Microchip Technology Inc. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. 2003. URL: <http://www.mouser.com/pdfdocs/BrushlessDCBLDCMotorFundamentals.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [5] Ing. Jaroslav Jahoda. *Diploma thesis - A Mobile Robot For Outdoor Environment*. 2011. URL: [http://labe.felk.cvut.cz/~tkrajnik/theses/dp\\_jahoda.pdf](http://labe.felk.cvut.cz/~tkrajnik/theses/dp_jahoda.pdf) (cit. 10.12.2014).
- [6] Dunkermotoren. *Brushless - DC Motor BG 42x15 /x30 Datasheet*. 2011. URL: [http://www.dunkermotoren.com/data/technical\\_data/motors/pdf/121005\\_BG42\\_BG42KI.pdf#page=1](http://www.dunkermotoren.com/data/technical_data/motors/pdf/121005_BG42_BG42KI.pdf#page=1) (cit. 13.02.2014).
- [7] ST Microelectronics. *EVAL6230QR - Datasheet*. 2013. URL: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00048923.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00048923.pdf) (cit. 19.02.2014).
- [8] ST Microelectronics. *L6230 - Datasheet*. 2011. URL: <http://www.mouser.com/ds/2/389/CD00287681-470803.pdf> (cit. 19.02.2014).
- [9] Olimex Ltd. *Olimex STM32-H103 - Datasheet*. 2014. URL: <https://www.olimex.com/Products/ARM/ST/STM32-H103/resources/STM32-H103.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [10] ST Microelectronics. *STM32F103RB - Datasheet*. 2013. URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00161566.pdf> (cit. 20.02.2014).
- [11] Waveshare Electronics. *CAN Board - Dokumentace*. 2014. URL: <http://www.waveshare.com/product/SN65HVD230-CAN-Board.htm> (cit. 10.12.2014).
- [12] Texas Instruments. *SN65HVD230 - Datasheet*. 2011. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn65hvd230.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [13] Texas Instruments. *MAX232 - Datasheet*. 2014. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/max232.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [14] ST Microelectronics. *STM32 FOC PMSM SDK v3.4 - Dokumentace*. 2014. URL: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/CD00298474.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00298474.pdf) (cit. 20.02.2014).
- [15] ST Microelectronics. *ST Motor Control Workbench - Dokumentace*. 2014. URL: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00105211.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00105211.pdf) (cit. 20.02.2014).

- [16] IAR Systems. *IAR Embedded Workbench - Manual*. 2009. URL: [http://supp.iar.com/FilesPublic/UPDINFO/004916/arm/doc/EWARM\\_UserGuide.ENU.pdf](http://supp.iar.com/FilesPublic/UPDINFO/004916/arm/doc/EWARM_UserGuide.ENU.pdf) (cit. 20.02.2014).
- [17] ARM Ltd. *Keil uVision4 - Manual*. 2009. URL: <http://www.keil.com/product/brochures/uv4.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [18] ST Microelectronics. *STM32 ST-LINK Utility - Manual*. 2014. URL: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/CD00262073.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00262073.pdf) (cit. 10.12.2014).
- [19] ST Microelectronics. *ST Flash Loader Demonstrator - Manual*. 2009. URL: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user\\_manual/CD00171488.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/user_manual/CD00171488.pdf) (cit. 20.02.2014).
- [20] Texas Instruments. *Sensored Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motors*. 2013. URL: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq2/sprabq2.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [21] Microchip Technology Inc. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. 2002. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857a.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [22] Texas Instruments. *Controller Area Network Physical Layer Requirements*. 2008. URL: <http://www.ti.com/lit/an/s11a270/s11a270.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [23] Texas Instruments. *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. 2008. URL: <http://www.ti.com/lit/an/s10a101a/s10a101a.pdf> (cit. 10.12.2014).
- [24] Microchip Technology Inc. *Controller Area Network (CAN) Basics*. 2002. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00713a.pdf> (cit. 10.12.2014).