

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů

Luděk Zaplatílek

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektrotechniky  
Akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Luděk ZAPLATÍLEK**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**  
  
Název tématu: **Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů**

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

Teoretická část bude obsahovat co to jsou BLDC (bezkartáčové stejnosměrné motory), výhody elektronické komutace, dále metody řízení těchto motorů (senzorové/bezsenzorové atd...). Jejich omezení atd. Součástí práce bude návrh a realizace jednotky pro řízení motoru, nejlépe za pomoci mikroprocesoru Atmel, s možností komunikace pomocí sériového portu (USB) s PC.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

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

Seznam odborné literatury:

[http://en.wikipedia.org/Brushless\\_motor](http://en.wikipedia.org/Brushless_motor)

<http://automatizace.hw.cz//motory-jejich-rizeni-s-mcu-3-cast-ridici-algoritmy-regulace-s-mcu>

[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc2596.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2596.pdf)

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Rozsival**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2009

Luděk Zaplatílek

## **Poděkování**

Děkuji všem lidem, kteří přispěli k realizaci této práce, především pak vedoucímu projektu, panu Pavlu Rozsivalovi za pomoc při řešení dílčích úkolů, za pomoc s vyrobením desky plošného spoje a za čas, který mi věnoval v rámci odborných konzultací.

## **Anotace**

Tato práce ukazuje možné hardwarové a softwarové řešení pro senzorovou a bezsenzorovou komutaci bezkartáčového DC motoru, založenou na mikroprocesoru ATMEL. Podrobněji se budeme zabývat konstrukčními principy, charakteristikami a typickými aplikacemi pro BLDC motory.

## **Klíčová slova**

ASD	rychlostně nastavitelný řízení
AT90PWM3	8 bitový mikroprocesor od výrobce ATMEL
BEMF	zpětná elektromotorická síla
BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor
DSP	digitální signálový procesor
EMD	elektronický ovladač motoru
FTDI	firma specializující se na řešení pro připojení USB
HVAC	vytápěcí, ventilační, klimatizační provozy a zařízení

## **Abstract**

This paper provides a hardware and software solution for Sensorless and Sensor Brushless DC motors, based on microcontroller ATMEGA. We consider in detail the construction, working principle, characteristics and typical applications of BLDC motors.

## **Keywords**

ASD	Adjustable Speed Drive
AT90PWM3B	microcontroller
BEMF	Back ElectroMotive Force
BLDC	brushless DC motor
DSP	Digital signal processor
EMD	electronic motor drivers
FTDI	Future Technology Devices International
HVAC	heating, ventilating, and air conditioning

## Obsah

Úvod .....	14
1. Bezkartáčový DC (BLDC) motor .....	16
1.1. Konstrukční principy .....	17
1.1.1. Stator .....	17
1.1.2. Rotor .....	18
1.1.3. Hallovy sondy .....	18
1.2. Provozní principy .....	21
1.2.1. Charakteristika točivého momentu/rychlosti .....	21
1.2.2. Porovnání BLDC motoru k jiným typům motorů .....	21
2. Řízení BLDC motoru .....	23
2.1. Fázová komutace .....	23
2.2. Technika pro detekci rotoru .....	25
2.3. Řízení rychlosti .....	26
2.4. Zpětná vazba motoru .....	27
2.4.1. Proudové snímání .....	27
2.4.2. Měření RPM .....	27
2.4.3. BEMF .....	28
3. Bezsenzorová komutace .....	29
3.1. Přímá detekce zpětné EMF pro bezsenzorové řízení BLDC .....	30
3.1.1. Konvenční detekční schéma zpětné EMF .....	30
3.1.2. Návrh schéma přímé detekce zpětné EMF .....	33
3.2. Experimentální průběh .....	39
4. Návrh hardwaru .....	44
5. Návrh softwaru .....	46
5.1. Konfigurace a inicializace mikroprocesoru .....	46



5.2.	Softwarová implementace .....	46
5.3.	Komutační funkce.....	46
5.4.	Konfigurace vzorkovacího časování .....	47
5.5.	Odhad rychlosti .....	47
5.6.	Nadproudová detekce .....	47
5.7.	PID regulátor.....	47
5.8.	Regulační smyčka .....	48
6.	Popis výsledného zařízení .....	49
6.1.	Přehled .....	49
6.2.	Klíčové vlastnosti .....	49
6.3.	Mikroprocesor AT90PWM3B.....	50
6.3.1.	klíčové vlastnosti pro řízení motoru.....	50
6.4.	Blokový diagram .....	51
6.5.	Konektor k připojení motoru.....	51
6.6.	Napájení.....	52
6.7.	ISP konektor.....	53
6.7.1.	In-System Programing.....	53
6.8.	USB konektor .....	53
6.8.1.	FTDI čip.....	53
6.8.2.	Podporované příkazy .....	54
6.9.	Přepínač sensorový, bezsensorový mód .....	55
6.10.	Schéma.....	56
6.11.	Výpis součástek.....	58
	Závěr.....	60
	Použitá literatura.....	61
	Přílohy .....	63

Obrazová část .....	63
Obsah příloženého DVD-ROM disku .....	63

## Seznam obrázků

Obrázek 1.1	BLDC motor v 3D řezu (4) .....	17
Obrázek 1.2	Rozložený BLDC motor (5) .....	17
Obrázek 1.3	Elektronická konfigurace statoru (tři vinutí, třífázový) (3) .....	18
Obrázek 1.4	Rotor BLDC motoru (3) .....	18
Obrázek 1.5	Příčný řez BLDC motoru (5) .....	19
Obrázek 1.6	(A) Typický řídicí systém Berkartáčového dc motoru. (B) Typické tři fáze proudové vlny pro BLDC motor .....	20
Obrázek 1.7	Charakteristika točivého momentu na rychlosti (5).....	21
Obrázek 2.1	Třífázový můstek a spínací tabulka podle sensorových vstupů (4) ..	23
Obrázek 2.2	Rotace motoru od spínací sekvence Q1 do Q6 (4).....	24
Obrázek 2.3	Rotační oblasti třífázového BLDC motor .....	24
Obrázek 2.4	Změna rychlosti otáčení pomocí střídavy PWM (4).....	27
Obrázek 2.5	Blokový diagram zpětné vazby motoru .....	28
Obrázek 3.1	Fázový proud je ve fázi s e zpětnou EMF v bezkartáčové dc motoru (11)	31
Obrázek 3.2	(A) Detekční schéma křížené nulou s neutrálním bodem motoru, (B) Detekční schéma křížení nulou s virtuálním neutrálním bodem (11).....	31
Obrázek 3.3	Snímání zpětné EMF založené na virtuálním neutrálním bodě (11)	32
Obrázek 3.4	Návrh schéma detekce křížení nulou BEMF (11).....	34
Obrázek 3.5	Návrh PWM strategie, pro schéma přímé detekce zpětné EMF (11)	34
Obrázek 3.6	Model obvodu zpětné EMF detekce při neaktivní PWM (11).....	35
Obrázek 3.7	Základní vlna a třetí harmonická pro zpětnou EMF motoru A (11) .	37
Obrázek 3.8	Roztažená vlna základní vlny a třetí harmonické pro zpětnou EMF motoru A (11)	37
Obrázek 3.9	Základní vlna a třetí harmonické zpětné EMF motoru B (11) .....	38
Obrázek 3.10	Roztažená vlna základní vlny a třetí harmonické zpětné EMF motoru B (11)	38
Obrázek 3.11	Fázové terminálové napětí a zpětná EMF vlna (11) .....	39
Obrázek 3.12	Fázové terminálové napětí a průběh BEMF (11).....	40

Obrázek 3.13	Tří fáze zpětné EMF a průchod nulou na zpětné EMF (11) .....	40
Obrázek 3.14	Sekvence nulového křížení BEMF a fázový proud (11) .....	41
Obrázek 3.15	BEMF a křížení nuly pro provoz o nízkých otáčkách (11) .....	41
Obrázek 3.16	Signály Hallových sond vs. fázový proud (11) .....	42
Obrázek 3.17	Charakteristika pro vysokorychlostní provoz (11).....	43
Obrázek 4.1	Hardwarová implementace (3).....	44
Obrázek 4.2	PSCn0 & PSCn1 základní průběh Center Aligned Mode (3) .....	45
Obrázek 5.1	PID diagram (3) .....	48
Obrázek 5.2	Regulační smyčka (3) .....	48
Obrázek 6.1	Výsledné zařízení s připojeným BLDC motorem .....	49
Obrázek 6.2	Blokový diagram DPS.....	51
Obrázek 6.3	Konektor motoru J4.....	51
Obrázek 6.4	Napájecí konektor .....	52
Obrázek 6.5	Pozice diody D6 „VCC-ON“ .....	53
Obrázek 6.6	Pozice ISP konektoru J2 a USB konektoru J3 .....	54
Obrázek 6.7	Přepínač nastavený pro senzorový mód .....	55
Obrázek 6.8	Přepínač nastavený pro bezsenzorový mód.....	55
Obrázek 6.9	Rozmístění součástek na Top .....	56
Obrázek 6.10	Rozmístění součástek na Bottom .....	56
Obrázek 6.11	Routing_Top .....	57
Obrázek 6.12	Routing_Botton .....	57
Obrázek 6.13	Externí DPS, pro zjednodušení detekce průchodu nulou (2) .....	58

## Seznam tabulek

Tabulka 1.1	Porovnání BLDC motoru s kartáčovým DC motorem.....	22
Tabulka 1.2	Porovnání BLDC motoru s indukčním motorem .....	22
Tabulka 2.1	Souhrn typických výkonnostních charakteristik systému (9) .....	26
Tabulka 6.1	Parametry AT90PWM3B (6) .....	50
Tabulka 6.2	Konfigurace konektoru J4, číslo pinu, signálový vodič.....	52
Tabulka 6.3	Příkazy podporované softwarem .....	54
Tabulka 6.4	Rozpis součástí.....	58

## Úvod

Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory jsou navrženy pro nízko výkonové řízení, vzhledem k jejich vysoké účinnosti, tichému chodu, spolehlivosti a nízkým požadavkům na údržbu. Nicméně složitost ovládání proměnné rychlosti chodu a vysoká cena elektronického střídače, udržuje obecně rozšířený kartáčový stejnosměrný motor. Poslední desetiletí pokračující vývoj technologií výkonových polovodičů, mikroprocesorů, schémat nastavitelných rychlostních řidičů (ASD) a bezkartáčových motorů s permanentními magnety. Kombinace těchto inovací umožnilo výrobu spolehlivých, cenově efektivních řešení pro aplikace na širokém rozsahu nastavitelné rychlosti.

Pro domácí aplikace se očekává, že během následujících pěti let nastane strmý růst prodeje elektronických řidičů motoru (EMD). Objem trhu je predikován ročním nárůstem o 26% během následujících pěti let. Hlavními aplikacemi jsou pokojová klimatizace, ledničky, vysavače, mrazničky, radiátorová čerpadla, elektrické nářadí, otvírání garážových vrat a jiné komerční aplikace. Spotřebiče pro domácnosti se tradičně spoléhaly na historicky klasickou technologii jednofázového AC indukčního motoru. Tyto klasické motory jsou typicky provozovány na konstantní rychlosti otáčení napájeného přímo ze střídavého zdroje. Spotřebitelé nyní žádají spotřebiče s nízkou spotřebou elektrické energie, vysokým výkonem, redukováným akustickým hlukem a mnoho dalších konformních funkcí. Tato tradiční technologie motorů už neposkytuje řešení.

Na druhé straně, v poslední době jsou v US a EU přijímány nové standardy vyšší energetické účinnosti průmyslových aplikací. Tyto návrhy představují nové výzvy a příležitosti pro výrobce zařízení.

V automobilovém průmyslu a HVAC průmyslu, vidíme prudký růst elektronicky komutovaných motorových systémů. Většina z nich bude BLDC typu. Např. moderní benzínová čerpadla v automobilech jsou řízena BLDC motorem. Kartáčový typ benzínového čerpadla je navržen na 6000 hodin, přičemž limitem je životnost kartáče. U některých vozidel nastává opotřebení v době kratší než 1 rok. Životnost BLDC motorů je typicky okolo 15000 hodin, čímž prodlužuje životnost

motoru téměř 3 krát. Podobná situace je i u klimatizačních ventilátorů a chladících ventilátorů motoru.

Očekává se, že vyšší nároky na efektivitu a lepší vlastnosti budou tlačit průmysl k rychlejšímu přijetí ASD. Velkým přínosem pro přechod budou nákladově efektivní a vysoce výkonné řídicí systémy BLDC motorů.

## 1. Bezkartáčový DC (BLDC) motor

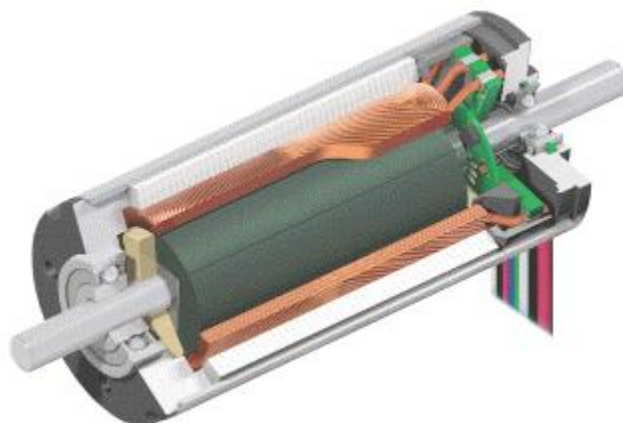
Bezkartáčový DC motor je jedním z druhů synchronních motorů. To znamená, že magnetické pole generované statorem a magnetické pole generované rotací magnetů jsou na stejné frekvenci. Bezkartáčový DC motor se skládá z permanentních magnetů, zabudovaných na rotoru s lichoběžníkovým tvarem BEMF a statorovým vynutím (obrázek 1.1 a 1.2). U bezkartáčových DC se elektromagnety nepohybují. Místo toho rotují permanentní magnety a vinutí statoru je statické. Jak už název naznačuje, BLDC motory nevyužívají pro komutaci kartáčů, ale místo toho jsou komutovány elektronicky. Díky tomu dosahují vyšší spolehlivosti než klasické DC motory. Bezkartáčové motory obvykle využívají k řízení třífázový střídač. BLDC motory jsou napájeny spínaným zdrojem napětí na statorová vinutí motoru výkonovým zařízením, spínací sekvence je získána z pozice rotoru. Fázový proud BLDC motoru má typicky obdélníkový tvar. Proud je synchronizovaný zpětnou EMF k získání konstantního točivého momentu a konstantní rychlosti. Typicky v sensorovém módu jsou použity tři Hallové sondy pro detekci pozice rotoru a komutace je založena na těchto impulsích. BLDC motory jsou na jednofázové, dvoufázové a třífázové konfiguraci. To odpovídá typu statoru, který má stejný počet vinutí. Třífázové motory jsou nejvíce oblíbené a hojně využívané. Tato práce se zaměřuje pouze na třífázové motory. BLDC motory mají mnoho výhod oproti kartáčovým DC motorům a indukčním motorům. Některé z nich jsou:

- lepší charakteristika točivého momentu k rychlosti
- vysoká dynamická reakce
- vysoká účinnost
- dlouhá životnost
- provoz bez rušení
- vyšší rozsah rychlosti

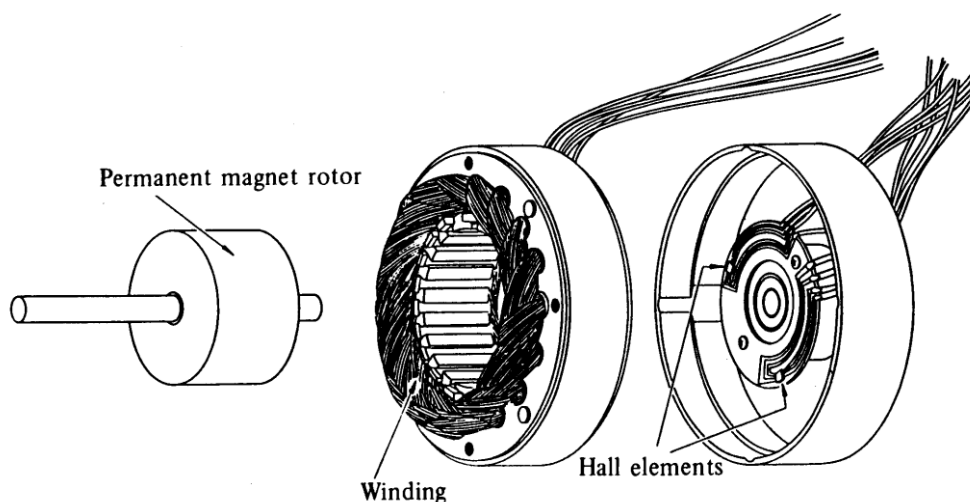
Navíc poměr točivého momentu k velikosti motoru je vyšší, což je užitečné v aplikacích, kde jsou velikost a hmotnost rozhodujícími faktory. Rychlost a točivý moment motoru je závislý na síle magnetického pole generovaného buzeným



vinutím motoru, který závisí na protékajícím proudu. BLDC motory jsou vhodnější k řízení a regulaci.



Obrázek 1.1 BLDC motor v 3D řezu (4)



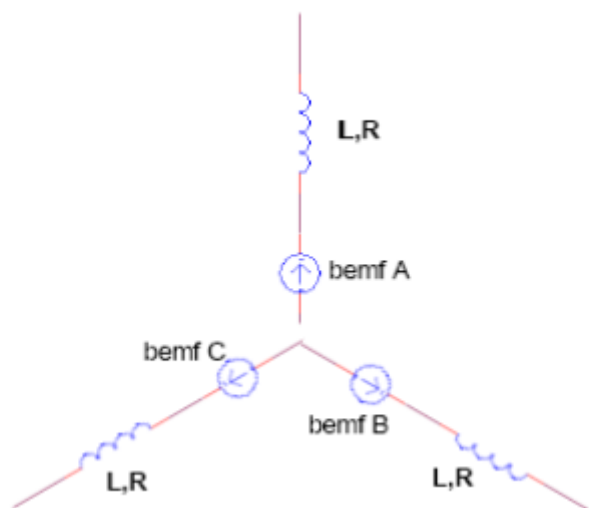
Obrázek 1.2 Rozložený BLDC motor (5)

## 1.1. Konstrukční principy

### 1.1.1. Stator

Základ třífázového BLDC motoru jsou tři statorová vinutí. U většiny motorů je počet vinutí replikován. Mají menší zvlnění momentu. Vinutí motoru může být zapojeno do hvězdy (Y zapojení) nebo do trojúhelníku ( $\Delta$  zapojení). Ať už je zapojení jakékoli, je ideální mít přístup k nulovému bodu N, abychom byli schopni měřit BEMF. Některé motory umožňují přístup pomocí přidaného vodiče.

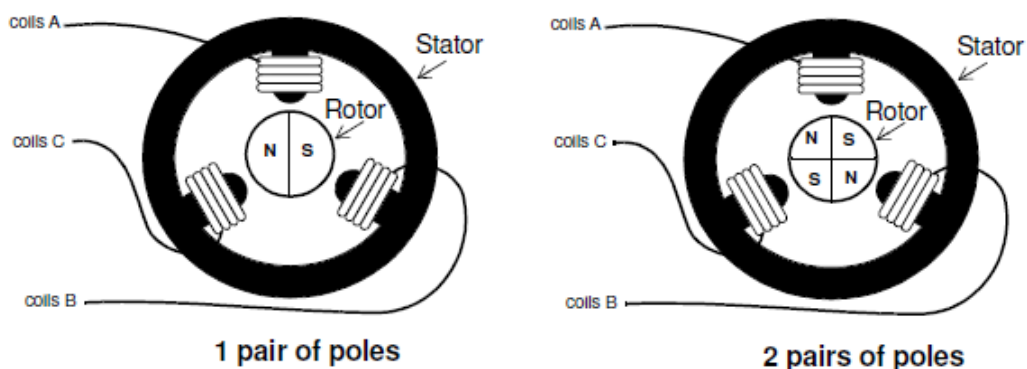
Obrázek 1.3 ukazuje náhradní schéma statoru. Skládá se ze tří vinutí. Každé obsahuje tři prvky v sérii indukci, odpor a zpětnou elektromotorickou sílu.



Obrázek 1.3 Elektronická konfigurace satoru (tři vinutí, třífázový) (3)

### 1.1.2. Rotor

Rotor BLDC motoru obsahuje sudý počet silných permanentních magnetů (obrázek 1.4). V posledním desetiletí došlo k pozoruhodnému posunu ve vývoji vysoce kvalitních magnetů. Momentálně u BLDC motorů jsou široce používány vysoce výkonové NdFeB (neodymin-iron –boron) magnety. Počet magnetických pólů v rotoru ovlivňuje velikost kroku a zvlnění točivého momentu motoru. Vyšším počtem pólů zmenšuje krok a snižuje zvlnění momentu. Permanentní magnety jsou od 1 do 5 párů pólů. V některých případech je počet pólů až 8.



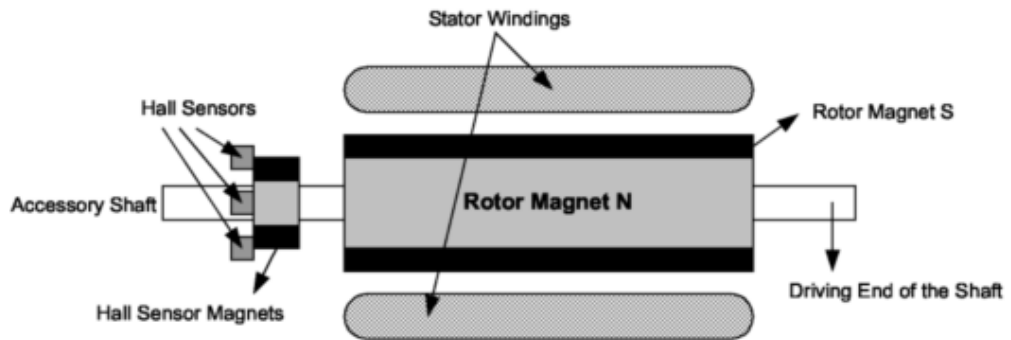
Obrázek 1.4 Rotor BLDC motoru (3)

### 1.1.3. Hallový sondy

BLDC motor je běžně ovládán třífázovým střídačem, který vyžaduje poziční senzory rotoru pro správnou komutační sekvenci k řízení střídače. Typický řídicí

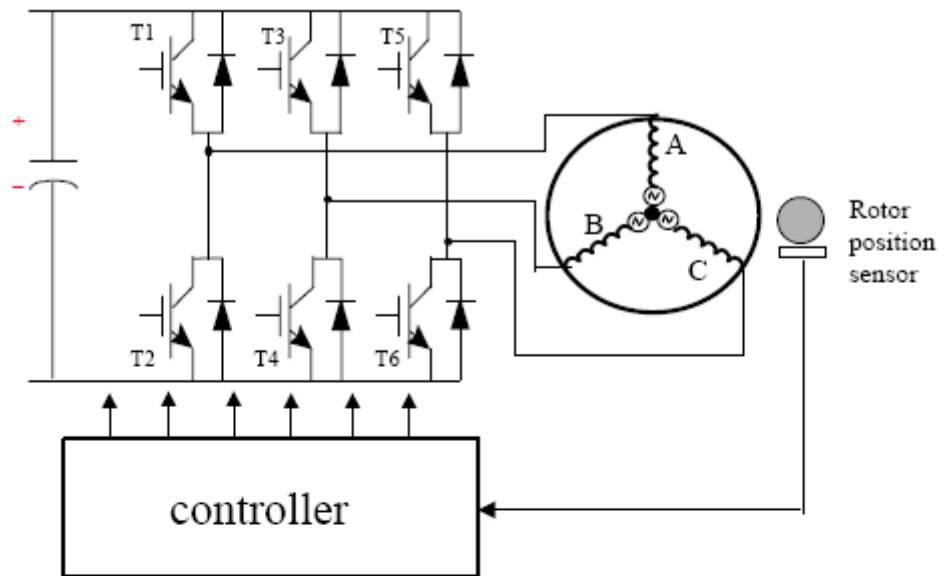
systém je ukázán na obrázku 1.6. Většina BLDC motoru obsahuje tři Hallové sondy, které jsou zabudované na statoru.

Kdykoliv magnetický pól rotoru projde blízko Hallových sond, získáme signál o nízké nebo vysoké napěťové úrovni, což indikuje S nebo J magnetický pól prošlý blízko sond. Kombinací tří signálů Hallových sond lze určit přesný sled sekvencí.

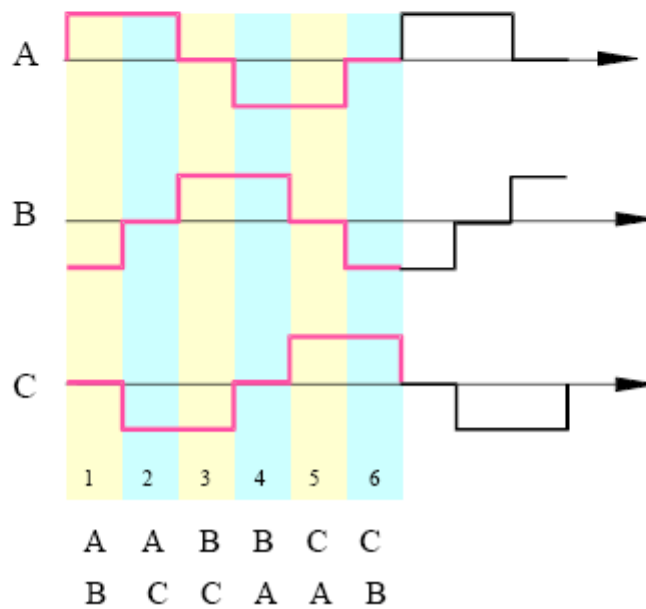


Obrázek 1.5 Příční řez BLDC motoru (5)

Uložení Hallových sond do statoru je složitý proces, neboť každá nesouosost s ohledem na magnety rotoru bude vytvářet chybu v určení polohy rotoru. Pro zjednodušení procesu umístění Hallových senzorů na stator mají některé motory kromě hlavních magnetů rotoru přidané magnety Hallových sond (obrázek 1.5). Jedná se o zmenšenou repliku rotoru. Proto, když se rotor otáčí, přidané magnety poskytují stejný účinek jako hlavní magnety. To umožňuje uživateli nastavit kompletní montáž Hallových senzorů, aby se dosáhlo nejlepších výsledků.



(A)



(B)

Obrázek 1.6 (A) Typický řídicí systém Berkartáčového dc motoru. (B) Typické tři fáze proudové vlny pro BLDC motor

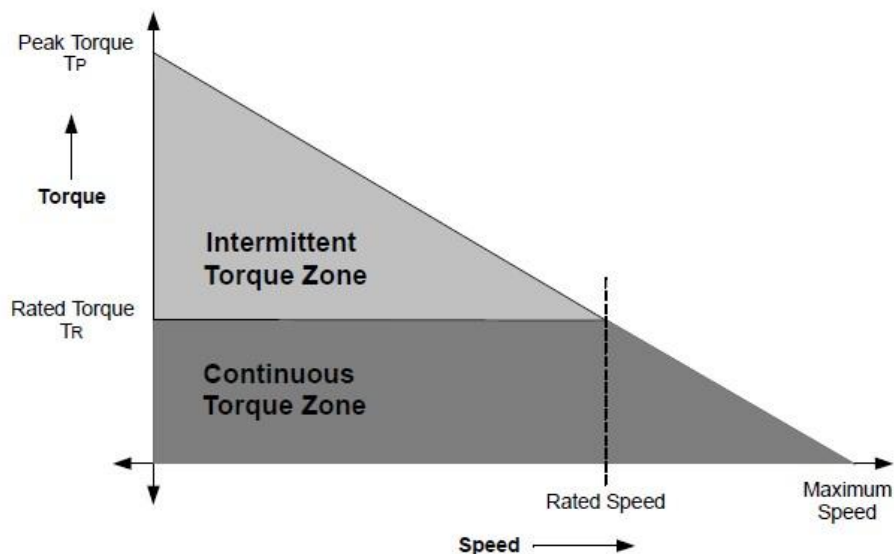
Poznámka:

Hallové sondy vyžadují napájení. Napěťový rozsah mají v rozsahu od 4 do 24 V. Proud v rozsahu od 5 do 15 mA.

## 1.2. Provozní principy

### 1.2.1. Charakteristika točivého momentu/rychlosti

Obrázek 1.7 ukazuje příklad charakteristiky točivého momentu / rychlosti. Existují dva parametry točivého momentu používané k definování BLDC motoru. Vrchol točivého momentu TP a jmenovitý točivý moment TR. Při trvalém provozu může být motor zatížen v závislosti na jmenovitém momentu. U BLDC motoru točivý moment zůstává konstantní do jmenovitých otáček. Tento motor může být provozován až do maximální rychlosti, která může být až 150% jmenovitých otáček, ale točivý moment začíná klesat. Aplikace, kde často nastává spouštění, vypínání a časté zvraty rotace, požadují větší točivý moment než jmenovitý. Tento požadavek přichází na krátký čas, zejména v případech, kdy motor startuje z klidu a během akcelerace. Během tohoto času je požadován vysoký točivý moment k překonání setrvačnosti samotného rotoru. Tento motor může podávat vyšší točivý moment až k vrcholu, jak vyplývá z rychlostní charakteristiky točivého momentu (obrázek 1.7).



Obrázek 1.7 Charakteristika točivého momentu na rychlosti (5)

### 1.2.2. Porovnání BLDC motoru k jiným typům motorů

Ve srovnání s kartáčovým DC motorem a indukčním motorem, BLDC motory mají mnoho výhod a několik nevýhod. Bezkartáčové motory vyžadují méně údržby a mají delší životnost v porovnání s kartáčovými motory. BLDC motory produkují vyšší výstupní výkon oproti kartáčovým a indukčním motorům. Protože rotor je vytvořen

z permanentních magnetů, setrvačnost motoru je nižší v porovnání s jinými typy motorů. To zlepšuje akcelerační charakteristiku a zkrácení provozního cyklu. Lineární charakteristika rychlosti/točivého momentu, vytváří předvídatelnou regulaci rychlosti. Bezkartáčové motory jsou ideální pro aplikace s omezeným přístupem, kde je servis obtížný. BLDC motory pracují mnohem tišeji než kartáčové DC motory, snižují elektromagnetické rušení (EMI). Nízkonapěťové modely jsou ideální pro bateriový provoz, přenosné zařízení nebo lékařské aplikace.

Tabulka 1.1 porovnává BLDC motor s kartáčovým DC motorem. Tabulka 1.2 BLDC s indukčním motorem.

Tabulka 1.1 Porovnání BLDC motoru s kartáčovým DC motorem

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

Tabulka 1.2 Porovnání BLDC motoru s indukčním motorem

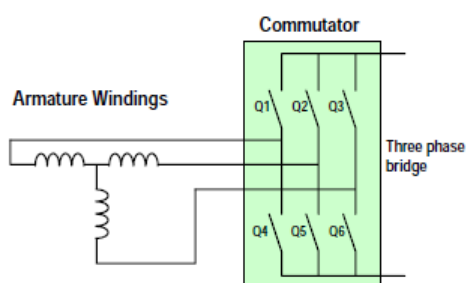
Funkce	BLDC motor	AC indukční motor
<b>Rychlost/Točivý moment charakteristika</b>	Plochá, umožňuje provoz na všech rychlostech při jmenovité zátěži	Nelineární, nižší točivý moment při nižších rychlostech
<b>Výstupní výkon/velikosti</b>	Vysoká, vzhledem k permanentním magnetům rotoru, dosaženo menších rozměrů pro daný výstupní výkon	Střední, vzhledem k tomu, že rotor i stator mají vinutí. Výstupní výkon k rozměrům je menší než v případě BLDC
<b>Setrvačnost rotoru</b>	Nízká, lepší dynamická charakteristika	Vysoká, špatná dynamická charakteristika
<b>Startovací proud</b>	Není potřebný žádný speciální startér	Běžně používá hvězda, trojúhelník startér

<b>Požadavky řízení</b>	Vyžaduje mikroprocesor	Mikroprocesor pro konstantní rychlost není požadován, je potřebný jen tehdy, pokud žádáme proměnou rychlost.
-------------------------	------------------------	--

## 2. Řízení BLDC motoru

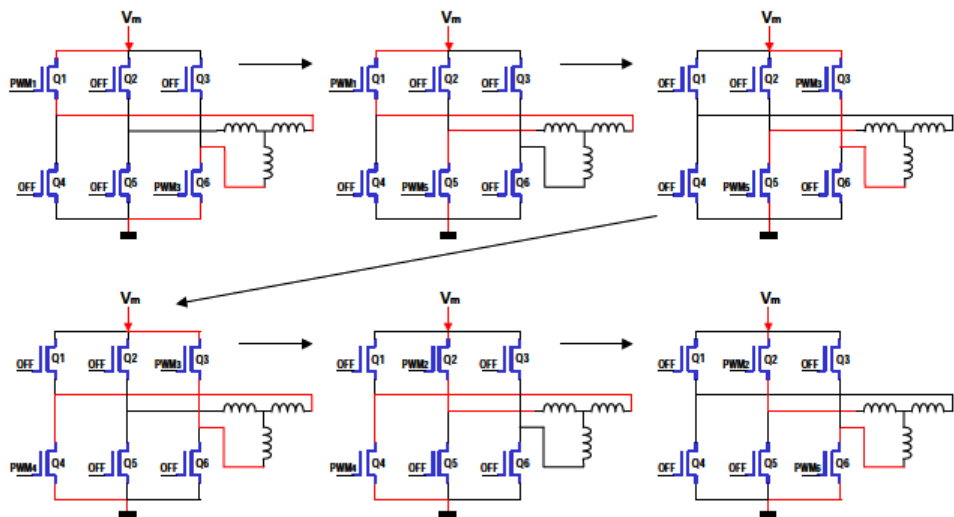
### 2.1. Fázová komutace

Komutace je stěžejní funkce všech DC motorů. U běžných DC motorů komutační funkce je vykonávána komutačními kartáči. Ty fungují jako poziční senzory i spínače. Mechanický komutátor má jasné nevýhody. Překonat tyto nevýhody byl hlavní důvod vývoje BLDC motoru. BLDC motor je poháněn napěťovými tahy spojenými s danou pozicí rotoru. Tyto napěťové tahy musí být správně aplikovány na aktivní fáze třífázového systému. Typický bezkartáčový motor je řízen třífázovým střídačem, který je nazýván šesti kroková komutace. Vodivý interval pro každou fázi je 120 elektronických stupňů. Komutační fázová sekvence je  $Q_1Q_6-Q_1Q_5-Q_3Q_5-Q_3Q_4-Q_2Q_4-Q_2Q_6$ , následně se kroky periodicky opakují. Každý komutační stav je nazýván jeden komutační krok. Proto pouze dvěma fázemi protéká proud v kterýkoliv okamžik. Zbývá fáze je plovoucí. Za účelem získání maximálního točivého momentu dochází ke komutaci každých  $60^\circ$  tak, aby proud byl ve fázi se zpětnou EMF. Komutační časování je získáno z pozice rotoru, které může být detekováno Hallovými sondami nebo odhadnuto z parametrů motoru. Např. zpětné EMF na plovoucím vinutí motoru pro bezsenzorový systém. Obrázky 2.1 a 2.2 ukazují vztah mezi vstupy z Hallových sond a požadovanými aktivními vinutími.

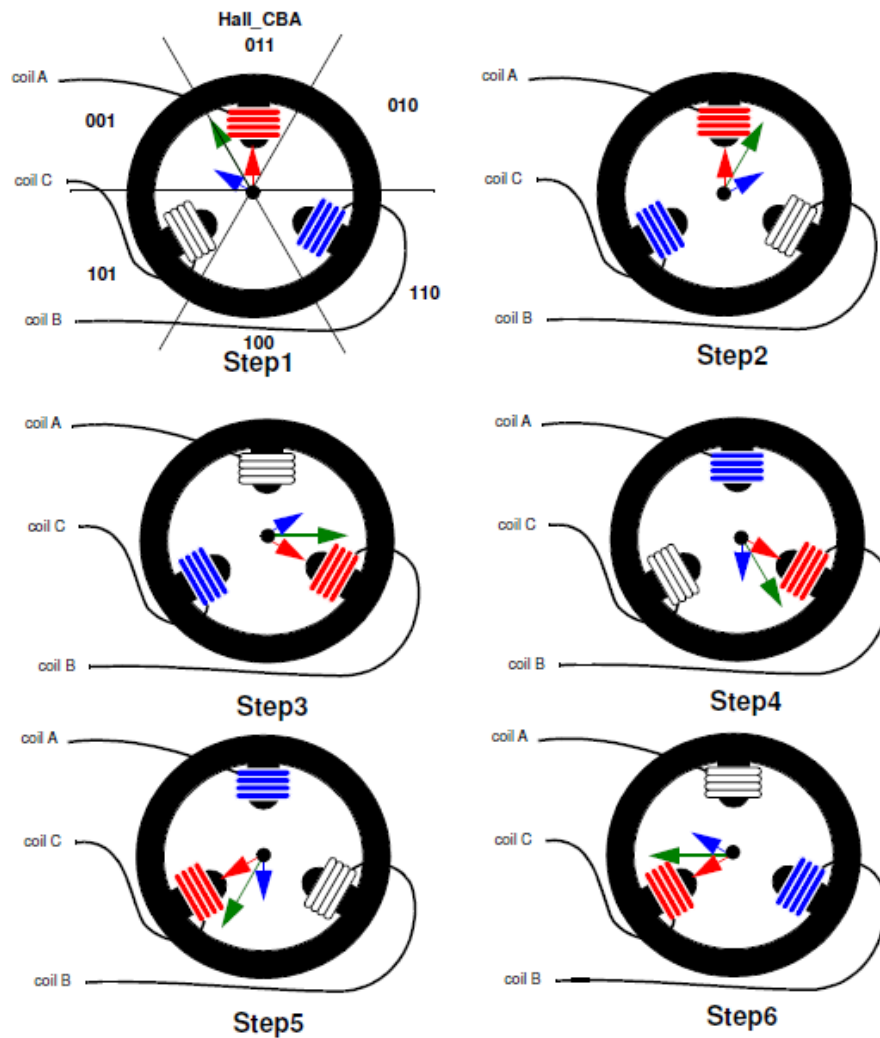


Hall Sensor code	Phase #	Active drive
101	1	Q1 (PWM1) Q6 (PWM6)
100	2	Q1 (PWM1) Q5 (PWM5)
110	3	Q3 (PWM3) Q5 (PWM5)
010	4	Q3 (PWM3) Q4 (PWM4)
011	5	Q2 (PWM2) Q4 (PWM4)
001	6	Q2 (PWM2) Q6 (PWM6)

Obrázek 2.1 Třífázový můstek a spínací tabulka podle senzorových vstupů (4)



Obrázek 2.2 Rotace motoru od spínací sekvence Q1 do Q6 (4)



Obrázek 2.3 Rotační oblasti třífázového BLDC motoru



## 2.2. Technika pro detekci rotoru

Technika pro detekci rotoru je pečlivě vybírána s přihlédnutím k faktorům, jako jsou výkonové požadavky, cena, dostupné místo na plášti a fyzikální prostředí.

Výkonnost BLDC motorů, obzvláště při spuštění, kriticky závisí na povaze dostupné poziční informaci. Tabulka 2.1 poskytuje souhrn typických výkonnostních charakteristik systému, které jsou komerčně dostupné.

Vysoce rozlišovací hřídelový enkodér nabízí nejlepší výkon v celém rozsahu rychlosti. Stěžejní důvod je, že enkodér dává absolutní pozici rotoru pro jakoukoli rychlost a jeho rozlišení je dostatečně vysoké. Enkodér s vysokým rozlišením však významně zvyšuje cenu celého systému a je použit jen v případech, kdy pro to existuje významný důvod.

Nízko rozlišovací snímače polohy, jako jsou Hallovy sondy, poskytují přijatelný kompromis mezi výkonem a cenou. Signály z těchto senzorů poskytují přesné komutační okamžiky pro střídač o jakékoliv rychlosti. Toto není možné pro přesný odhad nízké rychlosti, kvůli nadměrnému času mezi následujícími změnami stavů sensorových výstupů. Z tohoto důvodu closed smyčka regulace rychlosti je obvykle potlačena pro nízké rychlosti. U mnoha aplikací toto není problém, protože přesná regulace pro nízké rychlosti není vyžadována.

Tyto senzory zvětšují cenu, velikost motoru a vyžadují mechanickou úpravu k uložení senzorů. Senzory, zvláště pak Hallovy sondy jsou teplotně citlivé, omezují provoz motoru okolo 75°C. Tím mohou snížit spolehlivost systému. U některých aplikací nemusí být možné zabudovat všechny senzory motoru. Proto v posledních letech získává velký význam bezsensorové řízení BLDC motoru. Velice populární bezsensorová metoda je založena na detekci průchodu nulou zpětných EMF signálů. Je to obvykle jednoduchý vztah mezi okamžikem průchodu nulou BEMF a následujícím vhodným komutačním okamžikem. Okamžiky průchodu nulou zpětných EMF signálů jsou také použity pro odhad rychlosti. Nicméně, na rozdíl od Hallovyh senzorů, které poskytují poziční informaci o jakékoliv rychlosti, zpětná EMF technika je nepoužitelná pro nízké rychlosti. Zpětné EMF signály mají příliš nízkou amplitudu. Pro nízké rychlosti BLDC motor se zpětnou EMF technikou, musí pracovat v rámci open smyčky regulace rychlosti a bez požadavku na poziční

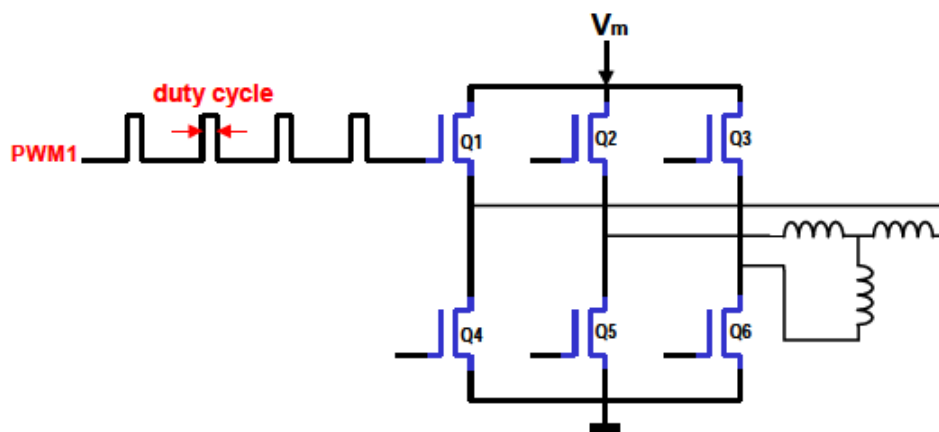
informaci. Výkon během spuštění, s použitím Halloových sond, je z tohoto důvodu vyšší v porovnání s výkonem zpětné EMF techniky.

Tabulka 2.1 Souhrn typických výkonnostních charakteristik systému (9)

Zdroj informace o pozici	Výkonnost rychlostní regulace	Spouštěcí výkon	Relativní cena
<b>Vysoko rozlišovací hřídelový enkodér</b>	Výborný v celém rozsahu, z klidové do jmenovité rychlosti	Zarovnaný stav není nutný; Zaručená absence zpětné rotace při spuštění; Klidný start;	Vysoká; Vyžaduje přídavné místo a vodiče;
<b>Nízko rozlišovací senzor; např. Hallva sonda</b>	Dobrá výkonnost closed smyčka typicky od 5% jmenovité hodnoty; Provoz Closed smyčky není možný pod touto rychlostí;	Zarovnaný stav není nutný; Zaručená absence zpětní rotace při spuštění; Klidný start;	Střední; Vyžaduje vodiče pro připojení se senzory;
<b>Bezsenzorová</b>	Dobrá výkonnost closed smyčky typicky od 5% jmenovité hodnoty;  Provoz Closed smyčky není možný pod touto rychlostí;	Vyžaduje zarovnaný stav před spuštěním; Nemůže garantovat absenci spouštěcí zpětné rotace Obtížně zajistitelné hladké spuštění	Nízká;

### 2.3.Řízení rychlosti

Zjednodušeně. Různým napájecím napětím lze ovládat rychlost motoru. Pokud použijeme PWM výstupy k řízení šesti spínačů třífázového můstku, změny napětí na motoru lze jednoduše dosáhnout změnou střídý PWM signálu (obrázek 2.4).



Obrázek 2.4 Změna rychlosti otáčení pomocí střidy PWM (4)

## 2.4. Zpětná vazba motoru

### 2.4.1. Proudové snímání

Měření proudu na BLDC motoru může být provedeno pomocí proudového snímání na odporu mezi MOSFETy a zemí (ukázaný na blokovém diagramu, obrázek 2.5). Nízké napětí na proudovém snímacím odporu je filtrováno, zesíleno a přivedeno na vstup ADC mikroprocesoru.

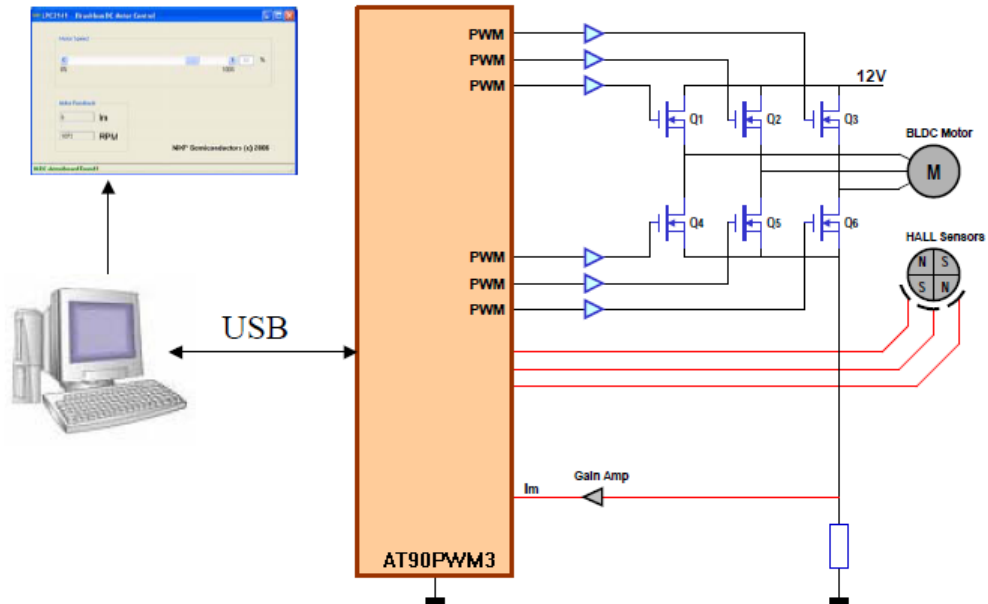
Měření proudu motorem se často používá jako ochrana. Jestliže motor je v zablokované pozici, proud se výrazně zvýší. Vzhledem k mimořádnému zvýšení proudu, hodnota ADC dosáhne úrovně proudového omezení, která způsobí vypnutí systému, čímž se zabrání poškození.

### 2.4.2. Měření RPM

Pro řízení rychlosti na closed smyčce, musí být známá skutečná rychlost. Signály z Hallových sond jsou vhodné k zapojení na vstupní piny mikroprocesoru, které lze snadno použít pro přesné měření rychlosti motoru (RPM).

Jedním možným způsobem je připojit signály Hallových sond na piny externího přerušování mikroprocesoru. To má za následek přerušování po každém otočení o úhel  $60^\circ$  elektronické komutace. Pouhým počítáním počtu přerušování v určitém přesném čase (například v 1 sekundě), lze snadno vypočítat přesnou rychlost motoru.

Další možností je připojit signály sond na vstup Timer Capture přerušení mikroprocesoru. V tomto případě přesný čas je měřen mezi každou změnou rotační fáze.



Obrázek 2.5 Blokový diagram zpětné vazby motoru

### 2.4.3. BEMF

Na každém vinutí rotací permanentního magnetu se indukuje střídavé napětí o amplitudě úměrné úhlové rychlosti. Předpokládaným tvarem tohoto napětí je lichoběžníkový průběh.

BEMF konstanta  $k_e$  je udávána na plášti motoru v jednotkách [RPM/V]. Velikost této konstanty je běžné v rozmezích od 200 do 4000 [RPM/V].

$$v_{RPM} = V_C * k_e \quad [RPM]$$

Rovnice 2.1

Kde  $V_C$  je napájecí napětí a  $v_{RPM}$  počet otáček za minutu.

### 3. Bezsenzorová komutace

V zásadě lze nelézt v literatuře dva typy bezsenzorové řídicí techniky. První typ je poziční snímání s použitím zpětné EMF na motoru a druhý poziční odhad s pomocí parametru motoru, terminálového napětí a proudu. Druhý typ schématu obvykle potřebuje DSP (digitální signálový procesor) k složitým výpočtům, přičemž cena systému je relativně vyšší. Snímaný typ BEMF bezsenzorového schématu je často využívaná metoda, kterou se budeme zabývat.

Erdman (12) originálně navrhl metodu snímací BEMF, postavené na virtuálním neutrálním bodu, která je teoreticky na stejném potenciálu jako střed motoru zapojeného do hvězdy. Snímá rozdíl mezi virtuálním neutrálním napětím a napětím na plovoucím terminálu. Nicméně pokud používáme spínané řízení, neutrální bod není ustálený. Neutrální potenciál se pohybuje z nuly k blízkosti napájecího napětí, vytváří velké společné napětí, protože neutrální potenciál je referenční. PWM signál je superponovaný na neutrální napětí, indukuje se velké množství elektrického rušení na snímaný signál. Pro správné snímání zpětné EMF je vyžadován malý útlum a filtrace. Útlum je vyžadován k úpravě signálu na dovolený rozsah napětí pro snímací obvod. A dolnopropustný filtr slouží k zeslabení vysokofrekvenčního šumu. Nežádoucí následek filtrování je zpoždění signálu. Výsledkem je špatný poměr signálu k šumu na velmi nízkém signálu. Zvláště při spouštění. Následkem toho, metoda má úzký rozsah rychlosti a špatné spouštěcí vlastnosti. K redukci šumu, způsobeného spínáním, BEMF je zavedeno třetí harmonické napětí. Integrační přístup má výhodu, že redukuje citlivost na šum způsobený spínáním. Ovšem stále máme problém s vysokým společným napětím na neutrálním bodu. Implementace této metody je komplikovaná a drahá, chod při nízkých otáčkách je stále problém.

Jen-Marie Bourgeois (13) navrhl novou myšlenku detekční metody zpětné EMF, která nevyžaduje neutrální napětí motoru. Skutečné zpětné EMF může být detekována přímo z terminálových napětí při vhodném výběru PWM a snímací strategie. PWM signály jsou použity pouze na horní straně spínačů a zpětná EMF je detekována při nečinném PWM. Výsledný zpětný signál není oslaben ani filtrován, poskytuje signál s velmi dobrým poměrem signálu k šumu. Proto tato bezsenzorová

technika řízení BLDC poskytuje mnohem širší rozsah rychlosti než je tomu u tradičních přístupů.

### **3.1. Přímá detekce zpětné EMF pro bezsenzorové řízení BLDC**

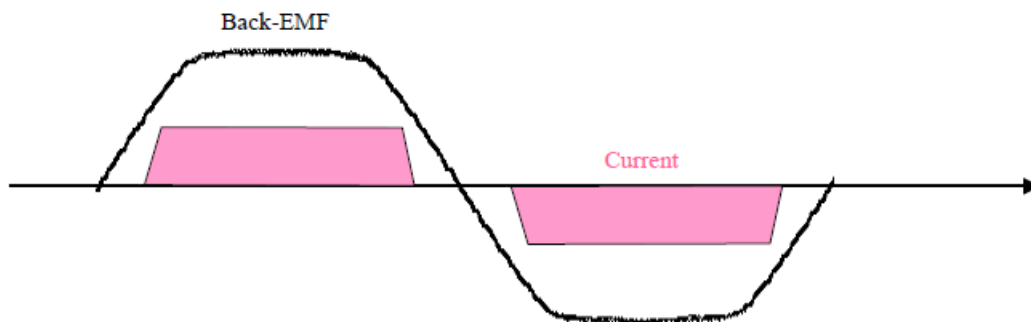
#### **3.1.1. Konvenční detekční schéma zpětné EMF**

Třífázový BLDC motor je typicky ovládán šesti kroky se  $120^\circ$  vodivým módem. V jeden okamžik pouze dvě fáze vedou proud, třetí vinutí je plovoucí. Příkladem může být, pokud fáze A a fáze B protéká proud, fáze C je plovoucí. V tomto časovém oknu je detekováno na plovoucí vinutí zpětné EMF. Koncepční detekční schéma je ukázané na obrázku 3.2(A).

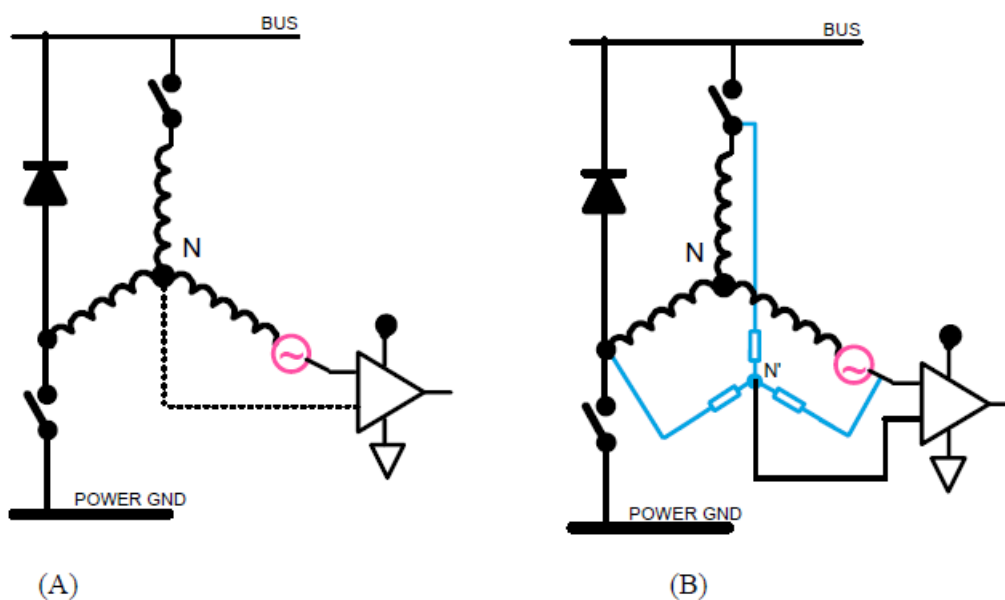
Obvykle proud je komutován tak, aby byl ve fázi se BEMF (obrázek 3.1), tím získáme optimální řízení a maximální poměr točivého momentu/ampér. Komutační časování je určováno od pozice rotoru. Vzhledem k tomu, že tvar BEMF je závislý na poloze rotoru, je možné určit komutační časování. Pokud lze měřit průchod nulou BEMF, budeme vědět, kdy komutovat proud.

Schéma na obrázku 3.2(A) vyžaduje neutrální napětí motoru k detekci průchodu nulou zpětné EMF. Terminálové napětí je porovnáno s neutrálním bodem. Tak získáme průchod nulou zpětné EMF.

V mnoha případech neutrální bod motoru není dostupný. V praxi se velmi používá metoda, postavená na virtuálním neutrálním bodě. Teoreticky získáme stejný potenciál se středem motoru zapojeného do hvězdy a pak snímáme napětí mezi virtuálním neutrálním bodem a plovoucím terminálem. Virtuální neutrální bod je zhotoven z odporů, které jsou ukázány na obrázku 3.2(B). Toto schéma je poměrně jednoduché a už dlouhou dobu používané. Nicméně, má své nevýhody.



Obrázek 3.1 Fázový proud je ve fázi se zpětnou EMF v bezkartáčové dc motoru (11)

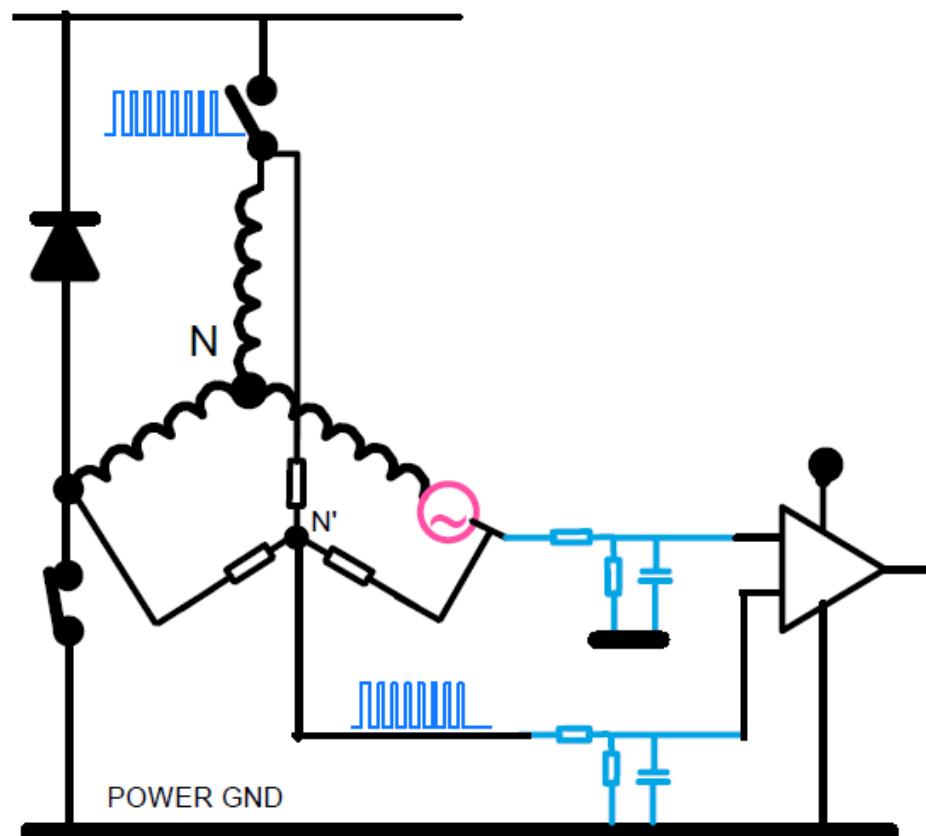


Obrázek 3.2 (A) Detekční schéma křížené nulou s neutrálním bodem motoru, (B) Detekční schéma křížení nulou s virtuálním neutrálním bodem (11)

Vzhledem k PWM řízení, neutrální bod není klidným. Je generováno velmi vysoké společné napětí a vysokofrekvenční rušení. Takže potřebujeme dělič napětí a dolnoproputný filtr k redukci společného napětí a potlačení vysokofrekvenčního šumu (obrázek 3.3). Například, pokud stejnosměrné napájecí napětí je 300V, potenciál neutrálního bodu může být od 0 až do 300 V. Přípustné společné napětí pro komparátor je typicky pár voltů, např. 5 V. Budeme znát, jak velký má být útlum. Obvykle napěťový dělič redukuje citlivost při nízkých otáčkách, speciálně při spouštění, kde je to nejvíce zapotřebí.

Na druhé straně vyžaduje dolnoproustný filtr, který způsobí fixní zpoždění nezávislé na rychlosti motoru. Zvyšováním rychlosti motoru, vzrůstá procentuální podíl zpoždění na celkovou periodu. Proto tato metoda směřuje na úzký rozsah rychlosti.

V minulosti vzniklo několik integrovaných obvodů, které umožňovali provoz BLDC založeném na schématu výše popsaném. Patří k nim Unitrode UC3646, Microlinear ML4425 a Silicom Systems 32M595. Všechny tyto čipy mají uvedené nevýhody. Jsou analogová a nejsou dostatečně flexibilní pro aplikace.



Obrázek 3.3 Snímání zpětné EMF založené na virtuálním neutrálním bodě (11)

Integrační postup BEMF má výhodu v redukování citlivosti na spínací rušení a automatické nastavení komutačních okamžiků pro změnu rychlosti rotoru. BEMF integrace stále neřeší problém s přesností na nízkých rychlostech.



Určení pozice rotoru může být založeno na statorové složce třetího harmonického napětí. Hlavní nevýhodou je relativně nízká velikost třetího harmonického napětí pro nízké rychlosti.

### 3.1.2. Návrh schéma přímé detekce zpětné EMF

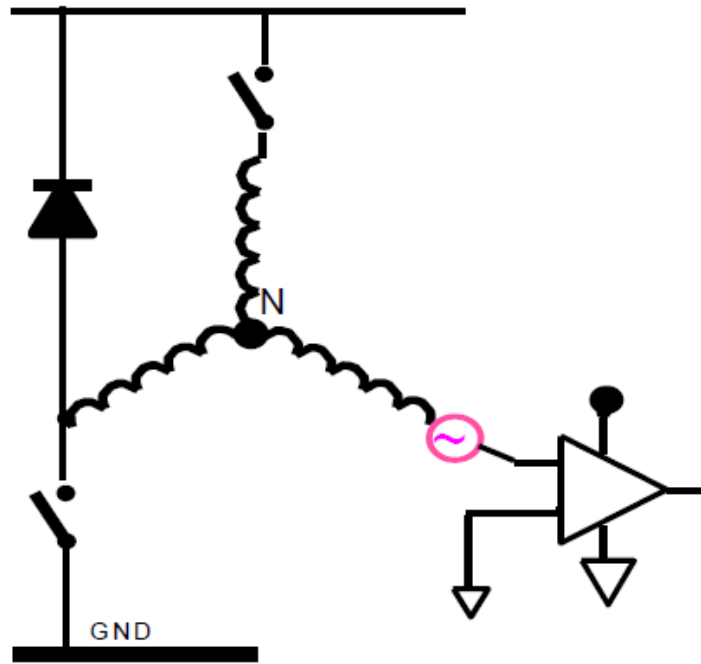
Jak bylo popsáno dříve, rušení na neutrálním bodu motoru způsobuje problém pro bezsenzorový systém. Návrh detekce zpětné EMF se snaží vyhnout potřebě napětí neutrálního bodu. Pokud zvolíme vhodnou PWM strategii, BEMF s referencí k zemi, může být přímo extrahovaná z napětí terminálu motoru.

Řídící PWM signály může být provedeny třemi způsoby:

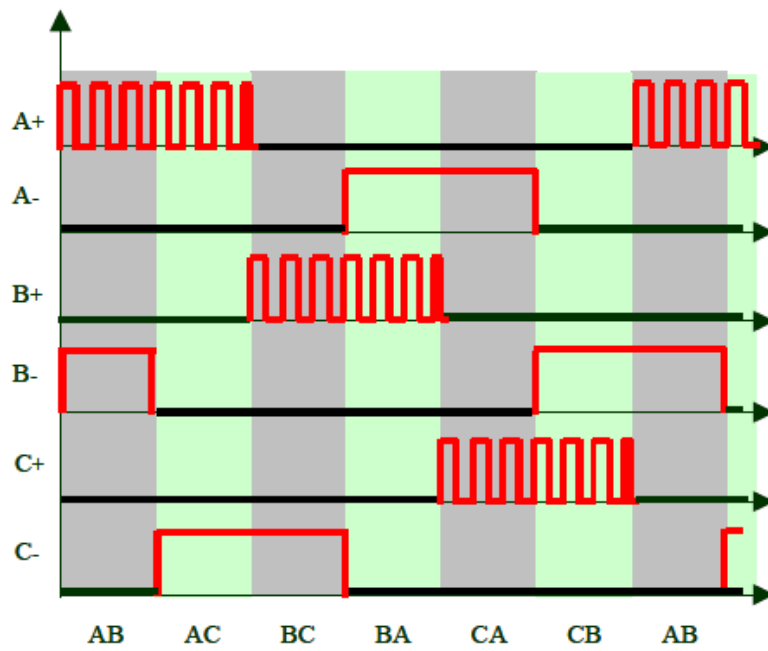
- Na horní straně: PWM je aplikována pouze na horní stranu spínačů, dolní strana je sepnutá po dobu kroku.
- Na dolní straně: PWM je aplikována pouze na dolní stranu spínačů, horní strana je sepnutá po dobu kroku.
- Na obou stranách: horní a dolní strana jsou současně sepnuty/rozepnuty.

Na navrhnutém schématu jsou aplikovány PWM signály pouze na horní řadu spínačů a zpětné EMF signály jsou detekovány při nečinném PWM. Obrázek 3.4 ukazuje koncept detekčního obvodu. Rozdíl mezi obrázkem 3.4 a 3.2 je, že napětí neutrálního bodu motoru není potřebný k vyhodnocení signálu na obrázku 3.4.

Fáze A a B vedou proud a fáze C je plovoucí. Horní spínač fáze A je řízen PWM a spodní spínač fáze B je sepnutý v celém kroku. Napětí  $V_c$  je měřeno na terminálu C. Obrázek 3.5 ukazuje strategii PWM signálu.

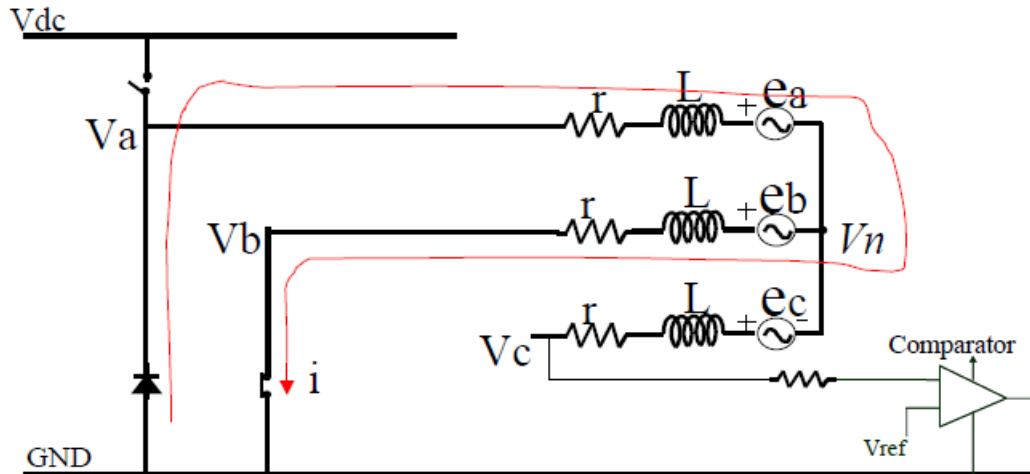


Obrázek 3.4 Návrh schéma detekce křížení nulou BEMF (11)



Obrázek 3.5 Návrh PWM strategie, pro schéma přímé detekce zpětné EMF (11)

Obrázek 3.6 ukazuje model obvodu k provedení analýzy.



Obrázek 3.6 Model obvodu zpětné EMF detekce při neaktivní PWM (11)

Pokud horní spínač fáze A je sepnutý, proud protéká přes spínač do vinutí A a B. Pokud horní tranzistor, půl můstku je rozepnutý, proud volnoběžně protéká diodou paralelně se spodním spínačem fáze A. Během této neformální doby terminálové napětí  $V_c$  je snímáno na BEMF fázi C.

Z obvodu je lehce odvoditelné  $v_c = e_c + v_N$ , kde  $V_c$  je terminálové napětí na plovoucí fázi C,  $e_c$  je fáze BEMF a  $V_N$  je neutrální napětí motoru.

Pro fáze A, pokud pokles napětí na propustné diodě ignorujeme, dostáváme

$$v_N = 0 - ri - L \frac{di}{dt} - e_a$$

Rovnice 3.1

Pro fázi B, pokud pokles napětí na spínači je ignorováno, dostáváme

$$v_N = ri + L \frac{di}{dt} - e_b$$

Rovnice 3.2

Složením (2.1) a (2.2), dostáváme

$$v_N = -\frac{e_a + e_b}{2}$$

Rovnice 3.3

Předpokládán je vyrovnaný třífázový systém, pokud zanedbáme třetí harmonickou, dostaneme

$$e_a + e_b + e_c = 0$$

Rovnice 3.4

Nebo pokud zohledníme třetí harmonickou, dostaneme

$$e_a + e_b + e_c = e_3$$

Rovnice 3.5

Kde  $e_3$  je třetí harmonická.

Z (3.3) a (3.4),

$$v_N = \frac{e_c}{2}$$

Rovnice 3.6

Takže, terminálové napětí  $v_C$ ,

$$v_C = e_C + v_N = \frac{3}{2}e_C$$

Rovnice 3.7

Z předcházející rovnice je možné vidět, že během nečinnosti PWM, terminálové napětí na plovoucí fázi je přímo závislé na napětí zpětné EMF bez jakékoliv rušení způsobené spínáním. To je také důležité brát na vědomí, že terminálové napětí je bráno k zemi, namísto nestálého neutrálního bodu. Informace o napětí v neutrálním bodě není nutná k detekci průchodu nulou zpětné EMF a nemusíme se starat o společné napětí. Vzhledem k tomu, že BEMF je extrahované z terminálového napětí motoru, průchod nulou BEMF fáze lze detekovat velmi precizně.

Pokud vezmeme v úvahu třetí harmonickou, z (2.3) a (2.5)

$$v_N = \frac{e_C}{2} - \frac{e_3}{2}$$

Rovnice 3.8

Terminálové napětí  $v_C$ ,

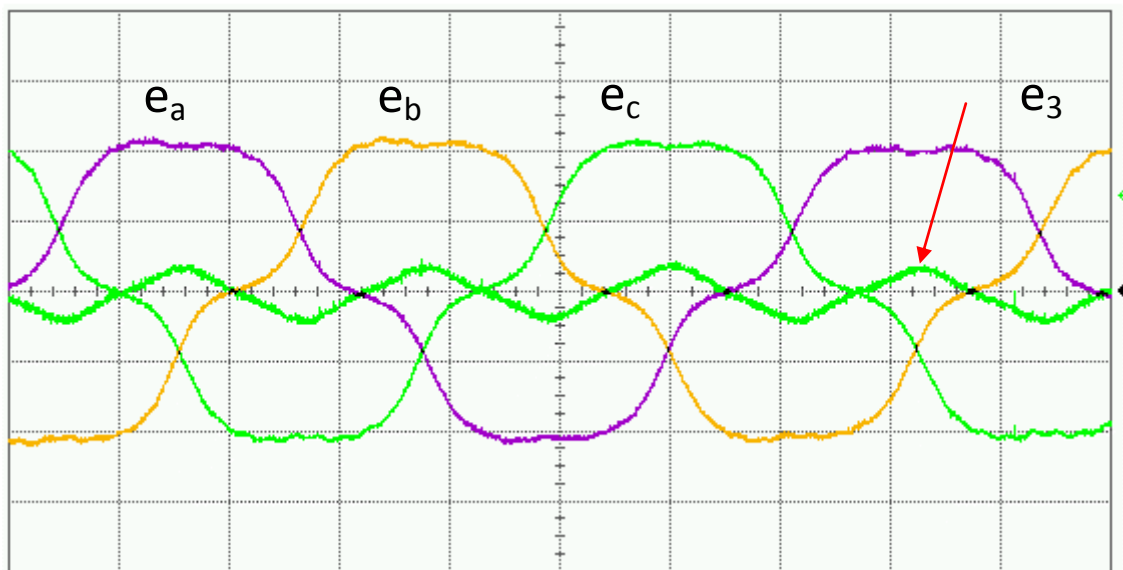
$$v_C = e_C + v_n = \frac{3}{2}e_C - \frac{e_3}{2}$$

Rovnice 3.9

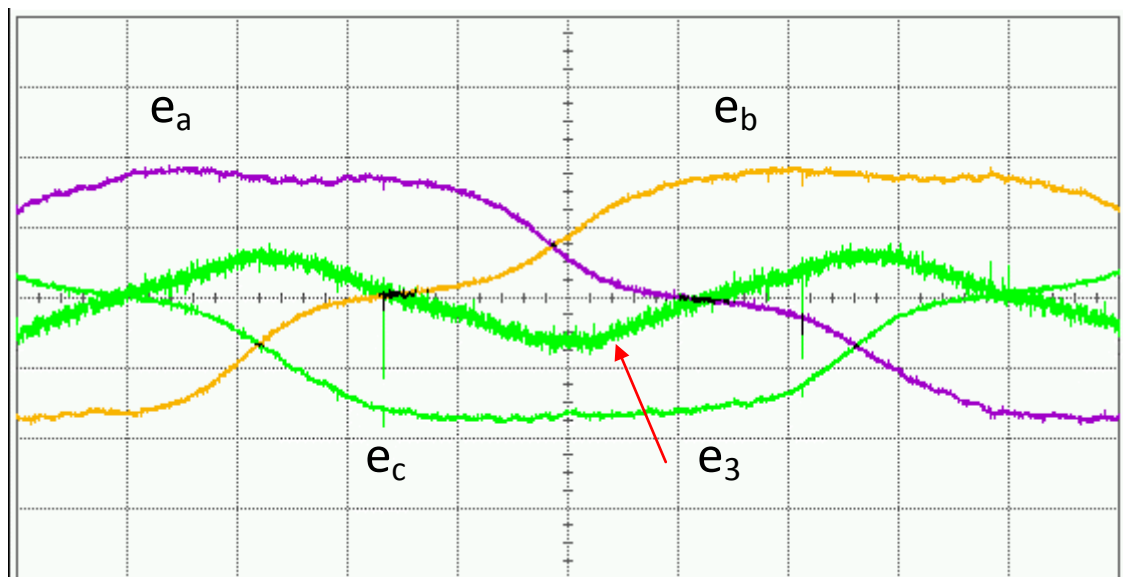
Proto na terminálovém napětí vidíme třetí harmonickou. Křížení nulou základní vlny se shoduje s křížením nulou třetí harmonické. Třetí harmonická neovlivní křížení nulou základní vlny.

Na následujících obrázcích je ukázáno několik testů k prokázání vztahu mezi základní a třetí harmonickou.

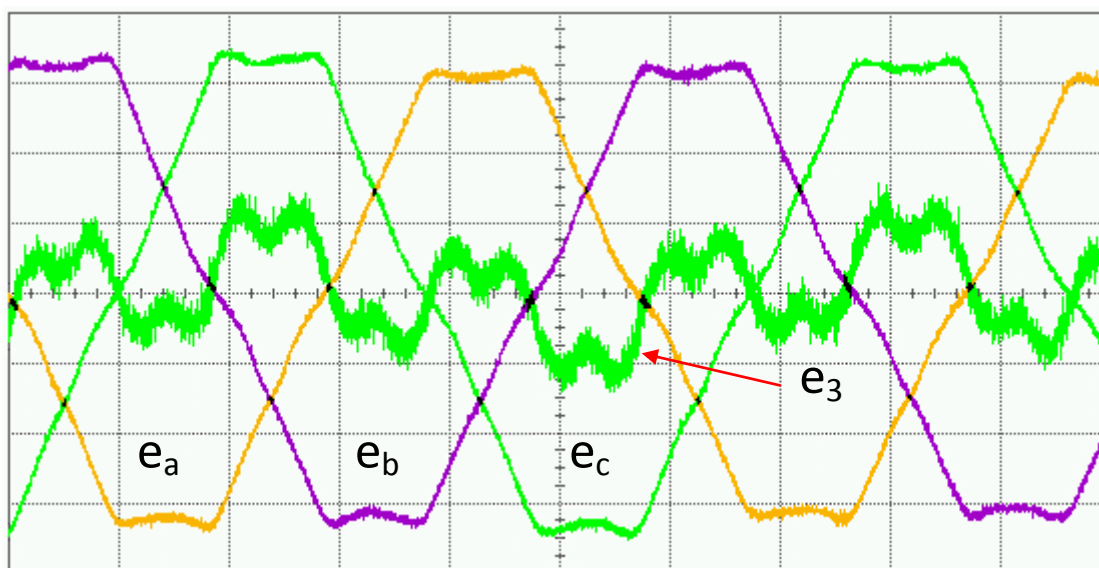
Obrázky 2.7 a 2.8 ukazují výsledky testu motoru A. Obrázky 2.9 a 2.10 ukazují výsledky testu motoru B. Tyto motory mají rozdílné charakteristiky BEMF. Křížení nulou třetí harmonické se překrývá se základní u obou motorů. Což znamená, že třetí harmonická neovlivní křížení nulou základní vlny. Motor B má mírně vychýlenou třetí fázi. I za této situace křížení nulou základní vlny a třetí harmonické se stále ještě dobře překrývají.



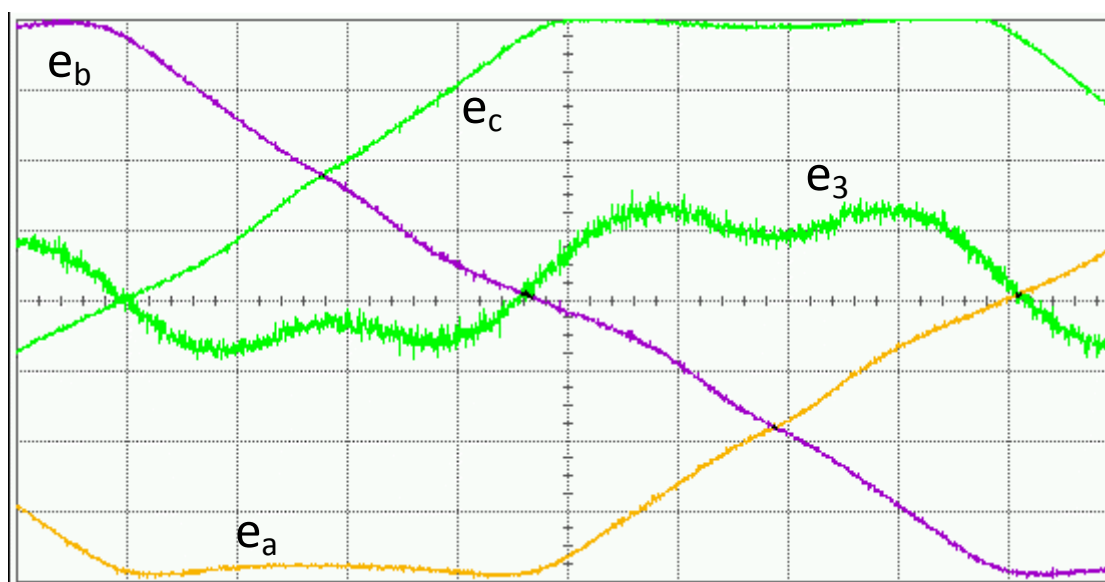
Obrázek 3.7 Základní vlna a třetí harmonická pro zpětnou EMF motoru A (11)



Obrázek 3.8 Roztažená vlna základní vlny a třetí harmonické pro zpětnou EMF motoru A (11)



Obrázek 3.9 Základní vlna a třetí harmonické zpětné EMF motoru B (11)

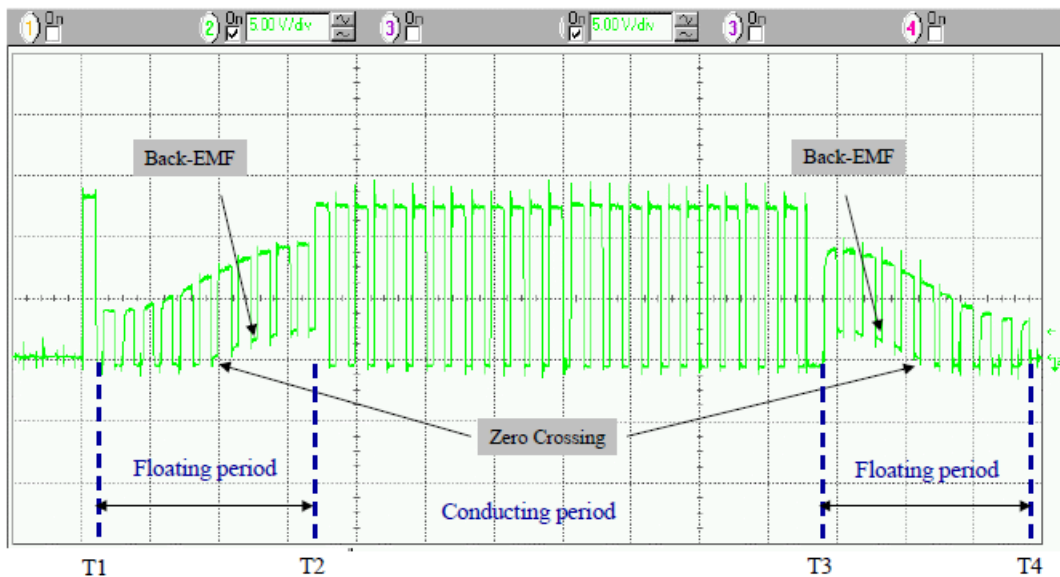


Obrázek 3.10 Roztažená vlna základní vlny a třetí harmonické zpětné EMF motoru B (11)

Proto můžeme zanedbat třetí harmonickou složku u křížení nulou na terminálovém napětí. Rovnice 3.7 je právoplatná pro detekci křížení nulou.

Obrázek 3.11 ukazuje průběh terminálového napětí. Z tohoto průběhu je zřejmé, že zpětný EMF signál může být extrahován z terminálového napětí v době plovoucí fáze. V časovém okně od  $T_1$  do  $T_2$  je vinutí plovoucí, pro čas  $T_2$  do  $T_3$  je vinutí vodivé, od času  $T_3$  do  $T_4$  vinutí je znovu plovoucí. Zpětný EMF signál lze detekovat pokud PWM je neaktivní. Pokud zpětná EMF je záporná, je přimknutá k mínus 0,7 V, způsobené diodou paralelně zapojené se spínačem invertoru. Pokud zpětná EMF je kladná, ukazuje se zvýšení terminálového napětí.

Mezi časy T1 a T2 je detekována náběžná hrana křížení nulou a mezi T3 a T4 je detekována sestupná hrana křížení nulou.



Obrázek 3.11 Fázové terminálové napětí a zpětná EMF vlna (11)

Shrnutí, několik výhod navrhovaného snímání EMF technologie oproti běžným schéma jsou následující:

1. Vysoká citlivost. Zaprvé, protože jsme nepoužili napěťový dělič, nevyskytuje se útlum. Má dobré rozlišení při nízkých rychlostech provozu. Zadruhé, vysokofrekvenční spínací šum lze zanedbat, protože BEMF je vzorkováno v neaktivním času PWM. Synchronizací vzorkování se můžeme snadno zbavit spínacího šumu. Zatřetí, protože BEMF je bráno k zemnímu potenciálu, společné napětí je minimální.
2. Aktuální hodnota, protože neobsahuje filtrační obvod. Je vhodný i pro vysokorychlostní provoz.
3. Tato snímací technika může být lehce použita pro vysokonapěťový i nízkonapěťový systém.
4. Rychlé spouštění motoru, protože je docílená precizní detekce křížení nulou BEMF bez útlumu.
5. Snadná implementace

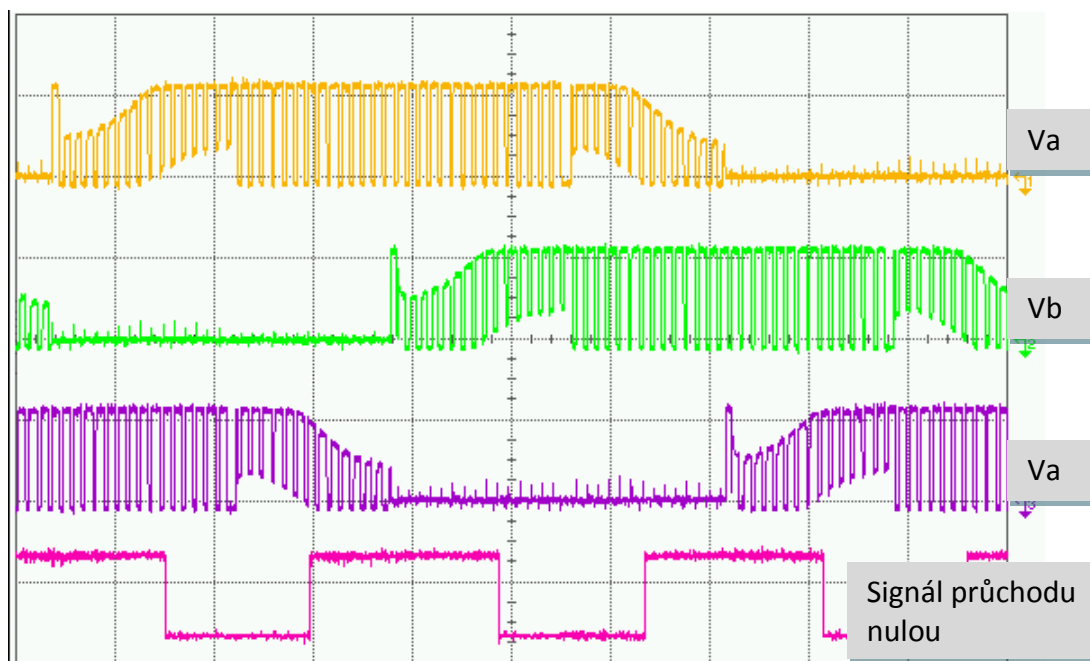
### 3.2. Experimentální průběh

Na následujících obrázcích jsou zakresleny klíčové body BEMF průběhu pro bezsenzorový řídicí systém. Obrázek 2.15 ukazuje průběh terminálové napětí zpětné EMF. Fáze zpětné EMF na plovoucím vinutí je vyjmuta z terminálového vinutí při neaktivním PWM.



Obrázek 3.12 Fázové terminálové napětí a průběh BEMF (11)

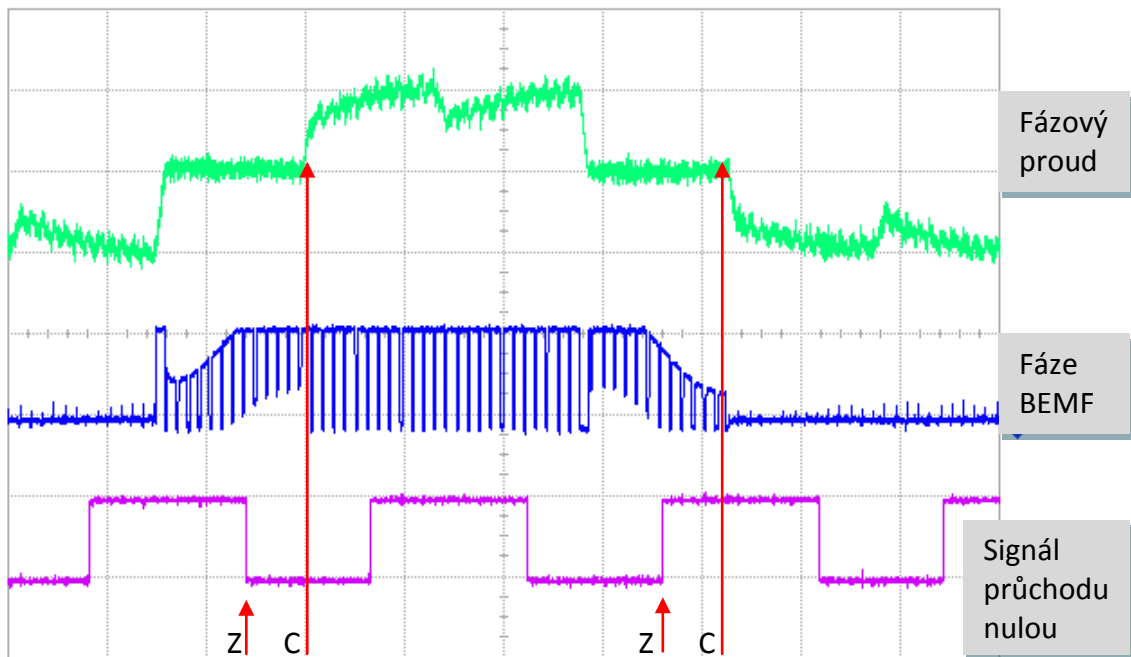
Obrázek 3.13 ukazuje tři fáze terminálového napětí zpětné EMF a signál detekce průchodu nulou. Každá přepínací hrana signálu průchodu nulou koresponduje s průchodem nuly BEMF průběhu.



Obrázek 3.13 Tři fáze zpětné EMF a průchod nulou na zpětné EMF (11)

Obrázek 3.14 ukazuje fázi BEMF a fázový proud. Demonstruje komutační sekvenci od průchodu nulou BEMF. 30 elektronických stupňů po průchodu nulou BEMF dochází ke komutaci.





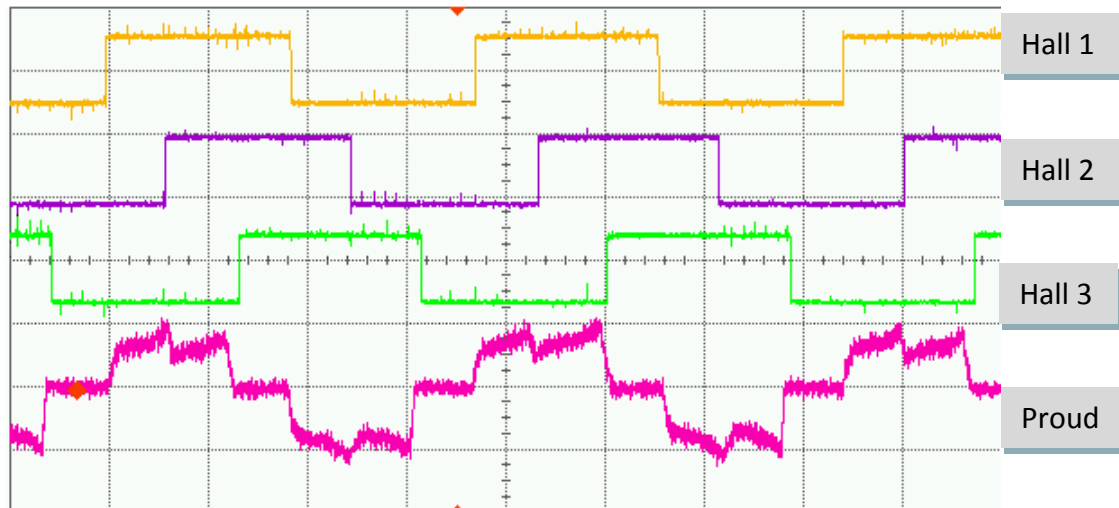
Obrázek 3.14 Sekvence nulového křížení BEMF a fázový proud (11)

Jak již bylo zmíněno, tato detekce průchodu nulou má velmi dobré rozlišení i pro nízké rychlosti, kdy amplituda BEMF je nízká. Obrázek 3.15 ukazuje průběh BEMF a signálu průchodu nulou pro nízké otáčky motoru. Systém funguje velmi dobře i když vrchol BEMF je menší než 1V.



Obrázek 3.15 BEMF a křížení nuly pro provoz o nízkých otáčkách (11)

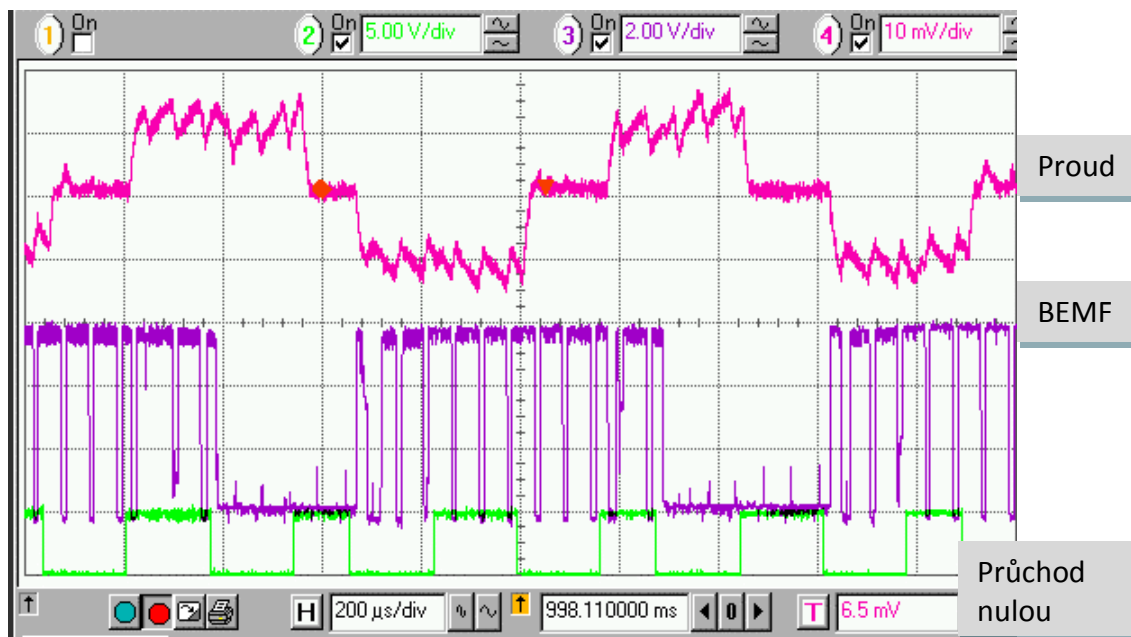
Vyhodnocení preciznosti průchodu nulou a komutační časování. Motor je řízen bezsensorovým schématem. Obrázek 3.16 ukazuje signály Hallových sond a komutační časování proudu. Komutační okamžiky proudu jsou velmi dobře zarovnány se signály Hallových sond. Dá se usoudit, že detekce průchodu nulou je precizní.



Obrázek 3.16 Signály Hallových sond vs. fázový proud (11)

Pro konvenční metody je obtížné přejít na provoz o vysokých rychlostech. Důvodem je zpoždění vznikající na dolnoproustném filtru.

Pro navrhnoutou přímou EMF detekční metodu, rychlostní omezením je vzorkovací frekvence BEMF signálů. Počet vzorků BEMF by měla být alespoň 3 na komutační krok k získání dobrého rozlišení. Takže maximální frekvence je  $1/3$  spínací frekvence  $F_S$ . Jak víme, 6 kroků je v jednom cyklu. Z toho vyplývá, že základní frekvence je  $F_S / 18$ . Pokud spínací frekvence je 16 kHz, základní frekvence je 16/18 kHz. Obrázek 3.17 ukazuje 4 pólový motor, který se otáčí rychlostí 30.000 ot./min.

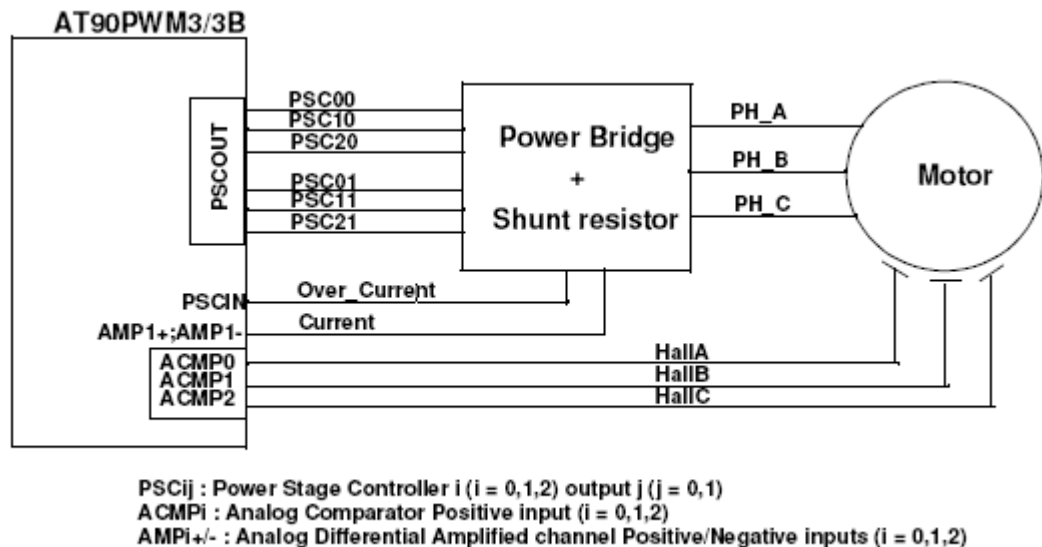


Obrázek 3.17 Charakteristika pro vysokorychlostní provoz (11)

## 4. Návrh hardwaru

Na obrázku 4.1 vidíme, že mikroprocesor obsahuje 3 PSC. Každý PSC lze chápat jako pulzně šířkový modulátor se dvěma výstupními signály.

Signál Over\_Current je výstup z externího komparátoru. Reference komparátoru je nastavitelná interním DAC. Over\_Current je zapojen na PSCIN, tento vstup umožňuje mikroprocesoru zakázat všechny PSC výstupy.



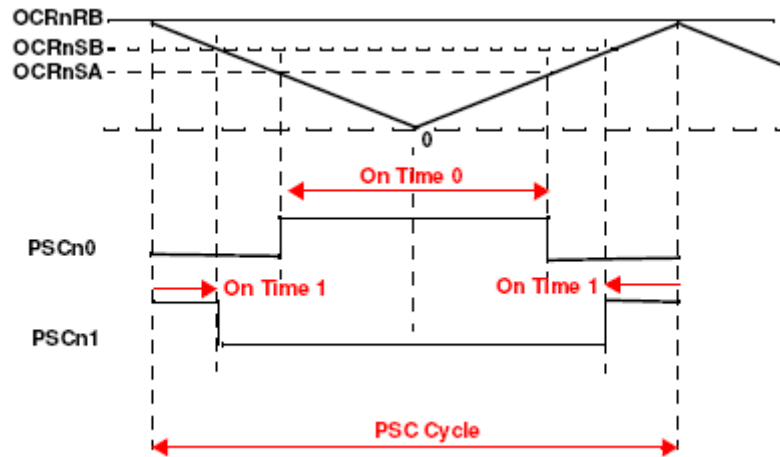
Obrázek 4.1 Hardwarová implementace (3)

Je možné měřit proud na dvou rozdílových zesilovacích kanálech s programovatelným zesílením 5,10,20 a 40.

Fázová komutace je prováděna podle velikosti Halloových sond. HallA, HallB a HallC jsou zapojeny na zdroj externího přerušení nebo tři interní komparátory. Komparátory generují stejný typ přerušení jako externí přerušení.

VMOT a VMOT\_Half jsou implementovány, ale nejsou použity. Lze je využít k získání velikosti napájecího napětí.

Výstupy H\_x a L\_x jsou použity k řízení výkonovému můstku. Jak již jsme viděli, závisí na PSC, který vytváří PWM signály. Pro tyto aplikace je doporučen režim Center Aligned Mode (obrázek 4.2), registr OCRORA je použit k nastavení synchronizace ADC pro měření proudu.



Obrázek 4.2 PSCn0 & PSCn1 základní průběh Center Aligned Mode (3)

$$V \text{ čase } 0 = 2 * \frac{OCRnSA}{F_{clkpsc}}$$

Rovnice 4.1

$$V \text{ čase } 1 = 2 * \frac{OCRnRB - OCRnSB + 1}{F_{clkpsc}}$$

Rovnice 4.2

$$PSC \text{ cyklus} = 2 * \frac{OCRnRB + 1}{F_{clkpsc}}$$

Rovnice 4.3

Velikost prodlevy mezi PSCn0 a PSCn1 je:

$$\frac{|OCRnSB - OCRnSA|}{F_{clkpsc}}$$

Rovnice 4.4

## 5. Návrh softwaru

Ke zjednodušení návrhu softwaru, Atmel poskytuje knihovnu pro řízení bezkartáčového DC motoru a html dokumentaci.

### 5.1. Konfigurace a inicializace mikroprocesoru

Použitá funkce se jmenuje `mc_init()`. Je volána hardwarovými a softwarovými inicializačními funkcemi a inicializuje všechny parametry motoru (směr otáčení, rychlost motoru a zastavení motoru).

### 5.2. Softwarová implementace

Po konfiguraci a inicializaci mikroprocesoru může být motor spuštěn. Pouze některé funkce jsou nezbytné pro řízení motoru. Všechny uživatelské funkce jsou definovány v `mc_interface.h`:

*`void mci_run(void)`* - slouží k startu motoru.

*`Bool mc_motor_is_running(void)`* - pokud „TRUE“ motor běží, jinak „FALSE“ motor je zastaven.

*`void mci_stop(void)`*; - slouží k zastavení motoru.

*`void mci_set_motor_speed(U8 speed)`*; – nastavení žádané rychlosti.

*`U8 mc_get_motor_speed(void)`*; – vrací žádanou rychlost.

*`void mci_forward()`*; – nastavit směr otáčení ‚CW‘.

*`void mci_backward()`*; – nastavit směr otáčení ‚CCW‘

*`U8 mc_get_motor_direction(void)`*; – vrací směr rotace motoru.

*`U8 mci_set_motor_measured_speed(U8 measured_speed)`*; – ukládá měřenou rychlost v proměnné `measured_speed`.

*`U8 mci_get_measured_speed(void)`*; – poskytuje změřenou rychlost.

### 5.3. Komutační funkce

*`U8 mc_get_hall(void)`*; - dává hodnotu Hallových sond korespondujících s šesti komutačními kroky.

*`_interrupt void mc_hall_a(void)`*;

*`_interrupt void mc_hall_b(void)`*;

*\_interrupt void mc\_hall\_c(void);* - tyto funkce jsou provedeny, pokud je detekováno externí přerušení od Halloových sond a umožňují fázovou komutaci a výpočet rychlosti.

*void mc\_duty\_cycle(U8 level);* - funkce k nastavení PSC střídy.

*void mc\_switch\_commutation(U8 position);* fázová komutace je provedena podle signálů Halloových sond a pouze pokud je motor spuštěný.

#### 5.4. Konfigurace vzorkovacího časování

*void mc\_init\_timer1(void);* – inicializace časovače1 ke generování přerušení každých 250µs.

*\_interrupt void lunch\_sampling\_period(void);* - pokud je aktivní přerušení po 250µs a příznak je nastaven. Tak lze použít pro řízení vzorkovacího časování.

#### 5.5. Odhad rychlosti

*void mc\_init\_timer0(void);* - konfigurace časovače0 pro výpočet rychlosti.

*\_interrupt void ovfl\_timer(void);* - pokud nastane přetečení na časovači0 8-bit proměnná je inkrementována. K získání 16-bit časovače z 8-bit časovače.

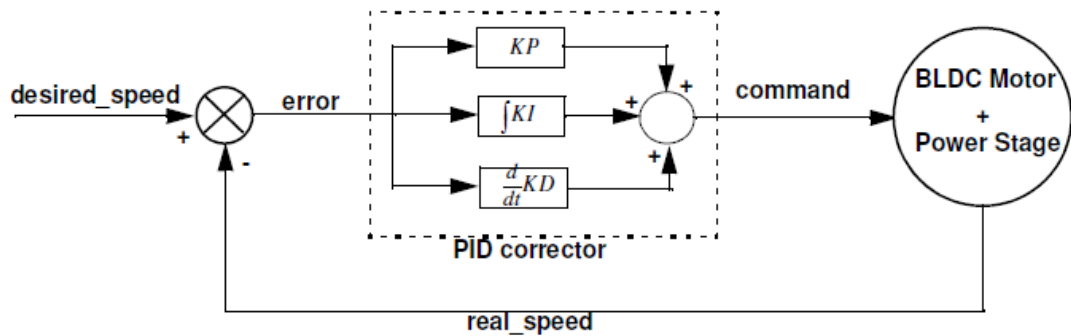
#### 5.6. Nadproudová detekce

*void mc\_set\_Over\_Current(U8 Level);* - nastaví úroveň detekce pro nadproud. Tato úroveň je výstupem z DAC přivedená jako referenční napětí pro externí komparátor.

#### 5.7. PID regulátor

Software obsahuje řízení rychlosti pomocí PID regulátor. Regulátor se skládá ze tří hlavních koeficientů: KP, KI a KD.

KP je proporcionální zesilovací činitel, KI je integrační zesilovací činitel a KD je derivační zesilovací činitel. Chyba mezi žádanou rychlostí a skutečnou rychlostí je vynásobena těmito zesíleními. Pak, součtem těchto tří zisků získáme příkaz k dosažení správné rychlosti motoru.



Obrázek 5.1 PID diagram (3)

$$přikaz(t) = KP * chyba(t) + KI \int chyba(t)dt + KD \frac{d}{dt} chyba(t) [-]$$

Rovnice 5.1

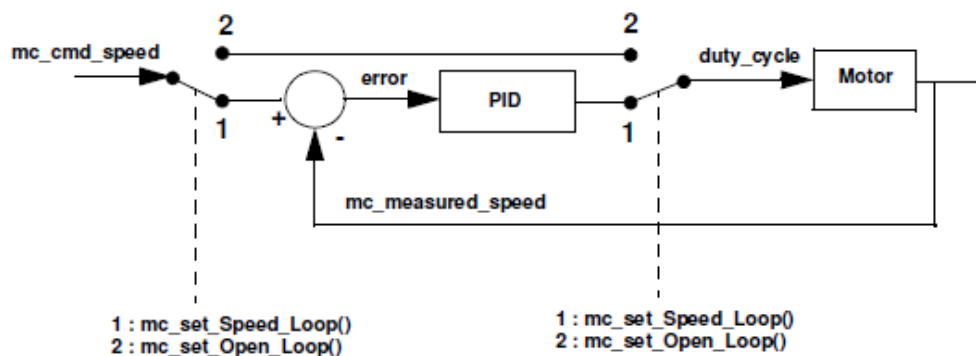
$$chyba(t) = rychlost_{žádána}(t) - rychlost_{skutečná}(t)$$

Rovnice 5.2

KP koeficient fixní doby odezvy motoru, KI koeficient je užít k odstranění statické chyby a KD slouží zejména pro poziční regulaci.

## 5.8.Regulační smyčka

Na výběr jsou dvě regulační smyčky. Otevřená smyčka a rychlostní smyčka. Obrázek 5.2 ukazuje regulační smyčku implementovanou v softwaru.



Obrázek 5.2 Regulační smyčka (3)

Rychlostní regulace obsahuje rychlostní regulační smyčku s PID korektorem.



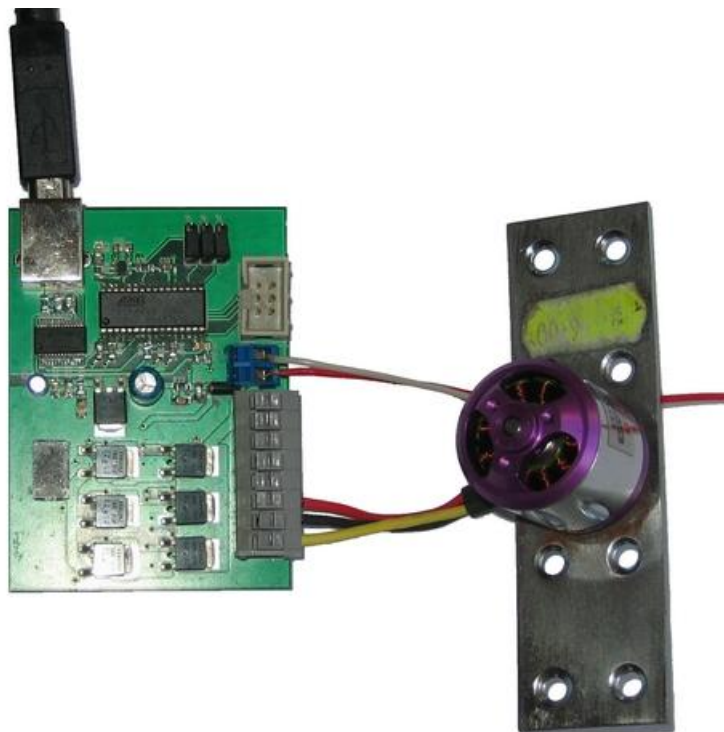
## 6. Popis výsledného zařízení

### 6.1.Přehled

DPS je navržena pro řízení bezkartáčového BLDC motoru, jednak pro senzorový mód, založený na signálech Hallových sond, ale i pro bezsenzorový mód.

### 6.2.Klíčové vlastnosti

- AT90PWM3-16SQ SO32 (2,7 – 5,5V)
- Výkonový můstek pro BLDC motor
- Hallové sondy, nebo bezsenzorová konfigurace
- Detekce křížení nulového napětí
- ISP konektor pro on-chip In-System-Programming
- FTDI čip pro komunikaci s PC
- Interní RC oscilátor
- Doporučené provozní napětí od 12V do 16V
- Provozní teplotní rozsah od 0°C do 70°C
- Rozměry 75 mm × 55 mm



Obrázek 6.1 Výsledné zařízení s připojeným BLDC motorem

### 6.3. Mikroprocesor AT90PWM3B

AT90PWM3B je CMOS 8-bitový mikroprocesor od výrobce ATMEL, založený na rozšířené AVR RISC architektuře. Je speciálně navržen pro aplikace k řízení motoru.

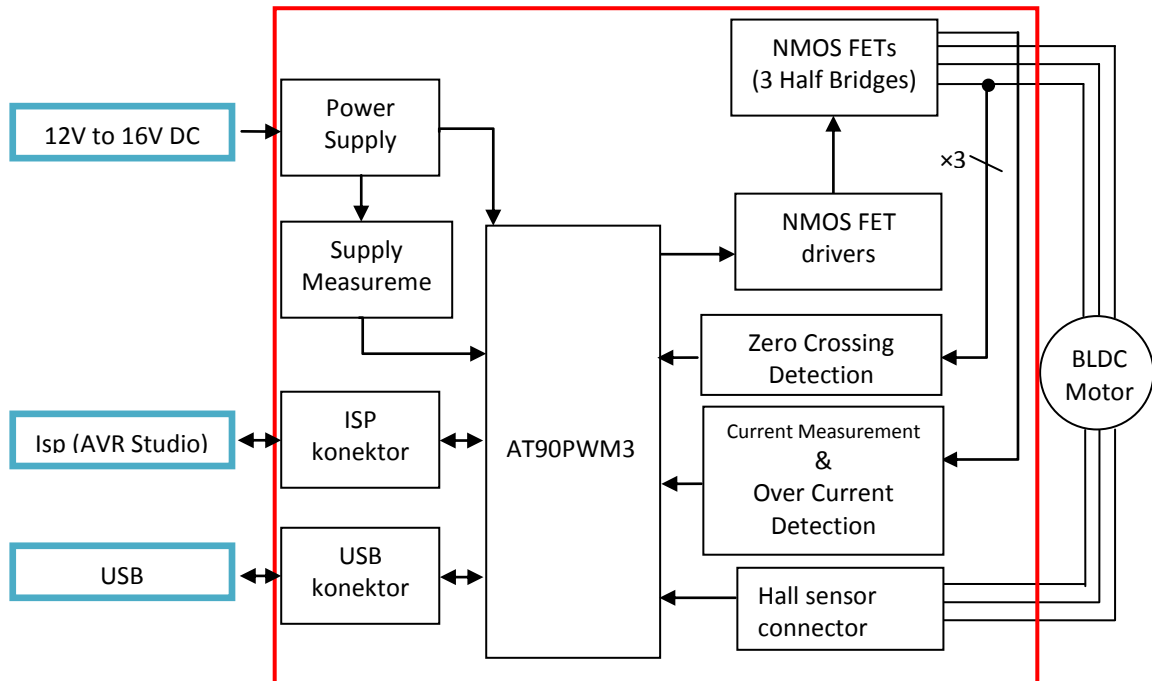
Tabulka 6.1 Parametry AT90PWM3B (6)

AT90PWM3B	
Pinů	32
I/O	27
Flash	8 KB
SRAM	512 B
EEPROM	512 B
ADC	11 k, 10-bitový
Zesilovač	Dva
Analogové komparátory	3
D/A	10-bitový
8-bitový časovač	1
16-bitový časovač	1
PWM kanály (časovač)	4
12 bitový: PSC	3
PWM kanály (PSC)	6

#### 6.3.1. klíčové vlastnosti pro řízení motoru

- PSC
  - 6 synchronizovaných PWM kanálů
  - 64 MHz PLL poskytuje 12bit PWM přesnost až 16 kHz
  - ADC zesilovač
- ADC a zesilovač
  - Zpětnovazební řízení a proudová&výkonová regulace
  - Možné synchronizované měření proudu
- Tři komparátory pro zpětnou EMF při bezsensorové motor
- DAC pro proměnný práh komparátoru (10bit rozlišení)
- Výkonnost pro 3fázový BLDC motor s Hallovými sondami
  - CPU 18% s 8 Mhz oscilátorem, 14 K RPM
  - Kód 3175 bytů (38%)
  - RAM 285 (55%)

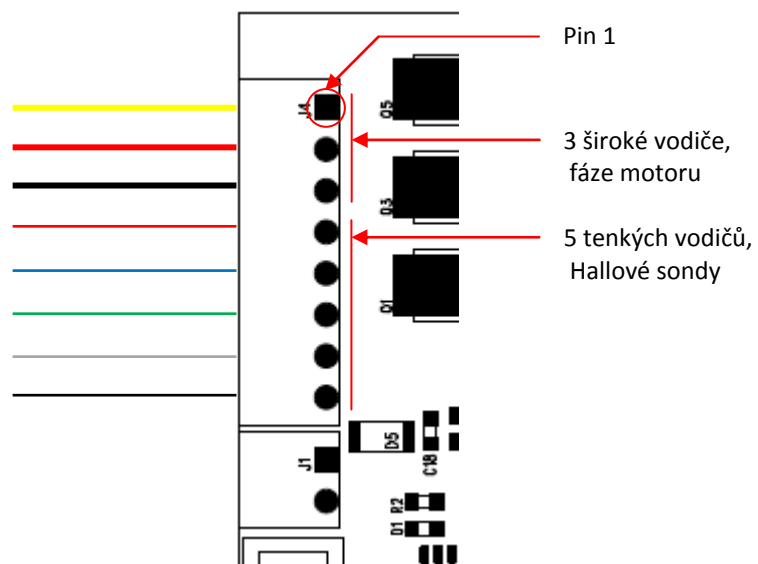
## 6.4. Blokový diagram



Obrázek 6.2 Blokový diagram DPS

## 6.5. Konektor k připojení motoru

Rozhraní mezi motorem a DPS tvoří konektor J4. Konfigurace a popis je dostupný na obrázku 6.2 a tabulce 6.2.



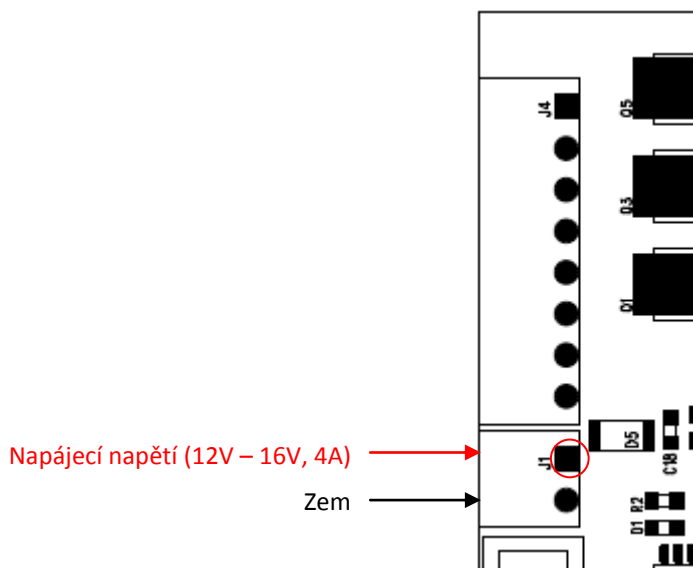
Obrázek 6.3 Konektor motoru J4

Tabulka 6.2 Konfigurace konektoru J4, číslo pinu, signálový vodič

Číslo pinu	Motor vodič	Poznámka	Signálový vodič na schématu
1	Žlutá	Široký vodič	PH_A
2	Červená	Široký vodič	PH_B
3	Černá	Široký vodič	PH_C
4	Červená	Tenký vodič	VCC5V
5	Modrá	Tenký vodič	HALL_A
6	Zelená	Tenký vodič	HALL_B
7	Šedivá	Tenký vodič	HALL_C
8	Černá	Tenký vodič	GND

## 6.6. Napájení

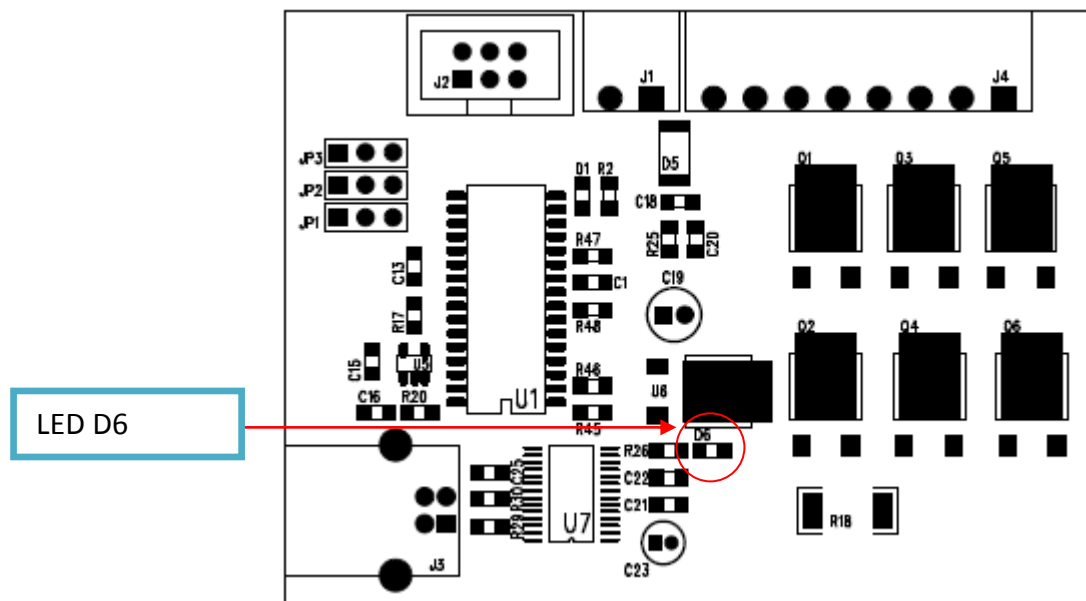
Napájecí stejnosměrný zdroj musí dodávat v rozsahu 12V až 16V s proudem 4A. Konfigurace konektoru J1 je ukázána na obrázku 6.3.



Obrázek 6.4 Napájecí konektor J1

### Pozvánka

Upozornění: neexistuje žádná ochrana proti přepólování polarity vstupního napětí. LED D6 slouží k detekci vstupního napětí VCC na DPS, pokud napájení je připojeno, dioda D6 svítí.



Obrázek 6.5 Pozice diody D6 „VCC-ON“

## 6.7. ISP konektor

Na DPS je umístěn šesti pinový ISP konektor (J2) umožňující přeprogramovat novým kódem s použitím standardních AVR ISP nástrojů.

### 6.7.1. In-System Programming

Mikroprocesor AT90PWM3 lze programovat s použitím specifické SPI sériové linky. Flash, EEPROM paměť (a všechny pojistky, zamykací bity jsou ISP programovatelné) mohou být programovatelné individuálně nebo s automatickou sekvenční programovací volbou. AVR ISP programovací rozhraní je integrováno v AVR Studiu.

Mikroprocesor je možné naprogramovat AVR ISP programátorem.

## 6.8. USB konektor

Rozhraní mezi DSP a PC je realizována pomocí USB konektoru (J3).

### 6.8.1. FTDI čip

Společnost Future Technology Devices International Ltd. (FTDI), specializující se na řešení pro připojení USB, nabízí mnoho různých USB převodníků založených na vlastní čipové sadě. Výhodou těchto řešení je vynikající kvalita, perfektní kompatibilita a spolehlivé ovladače s certifikací WHQL. Přitom k dispozici jsou ovladače jak pro Windows, tak i pro Linux, MacOS apod.

## Klíčové vlastnosti čipu FT232RL

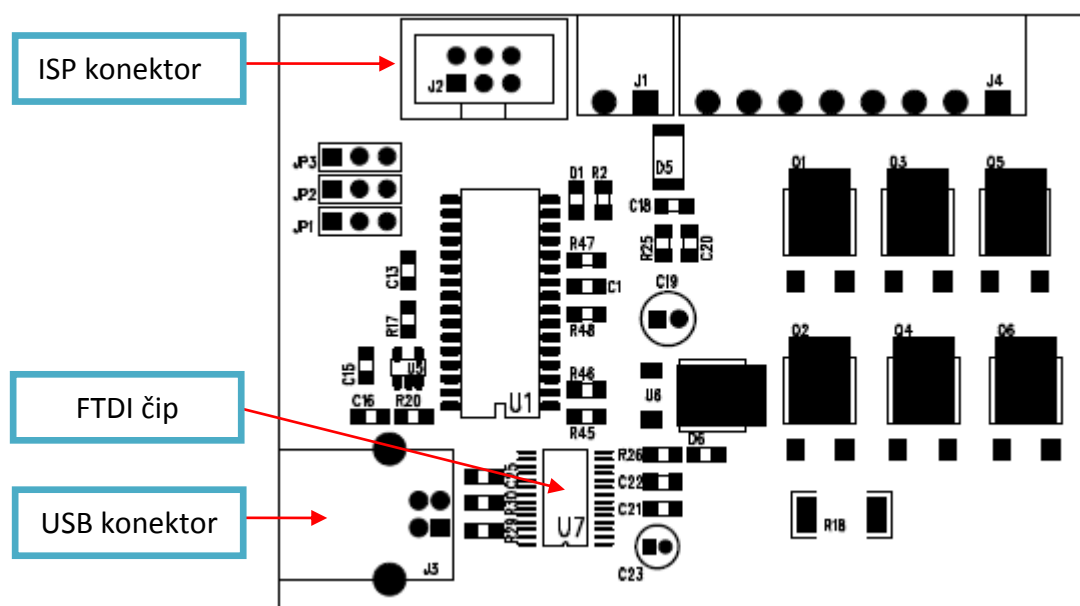
- Nejsou potřeba žádné znalosti ani programování USB
- Poskytuje rozhraní mezi USB a asynchronní sériovou linkou
- Plně kompatibilní s existujícím softwarem pro COM port
- Plně kompatibilní s USB 2.0 Full Speed
- Provozní teplota -40 až +85 stupňů Celsia

### 6.8.2. Podporované příkazy

V tabulce 6.3 jsou vypsané příkazy, které jsou podporovány softwarem pro řízení BLDC motoru. Obrázek 6.5 ukazuje rozmístění rozhraní a FTDI čipu na navržené desce plošného spoje.

Tabulka 6.3 Příkazy podporované softwarem

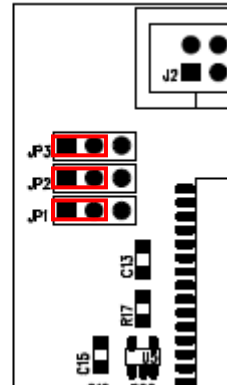
Příkaz	Akce
<b>ru</b>	Běh motoru
<b>st</b>	Stop motoru
<b>help</b>	Poskytne nápovědu
<b>fw</b>	Nastavení dopřenného směru otáčení
<b>bw</b>	Nastavení zpětného směru otáčení
<b>ss</b>	Nastavit rychlost
<b>gi</b>	Poskytne ID



Obrázek 6.6 Pozice ISP konektoru J2 a USB konektoru J3

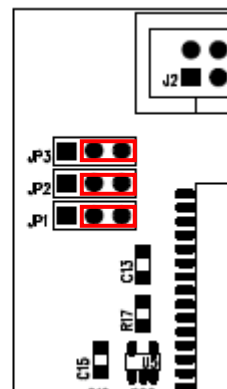
## 6.9. Přepínač sensorový, bezsensorový mód

Pokud používáme signály z Hallových sond, zkratovací svorka je umístěna napravo.



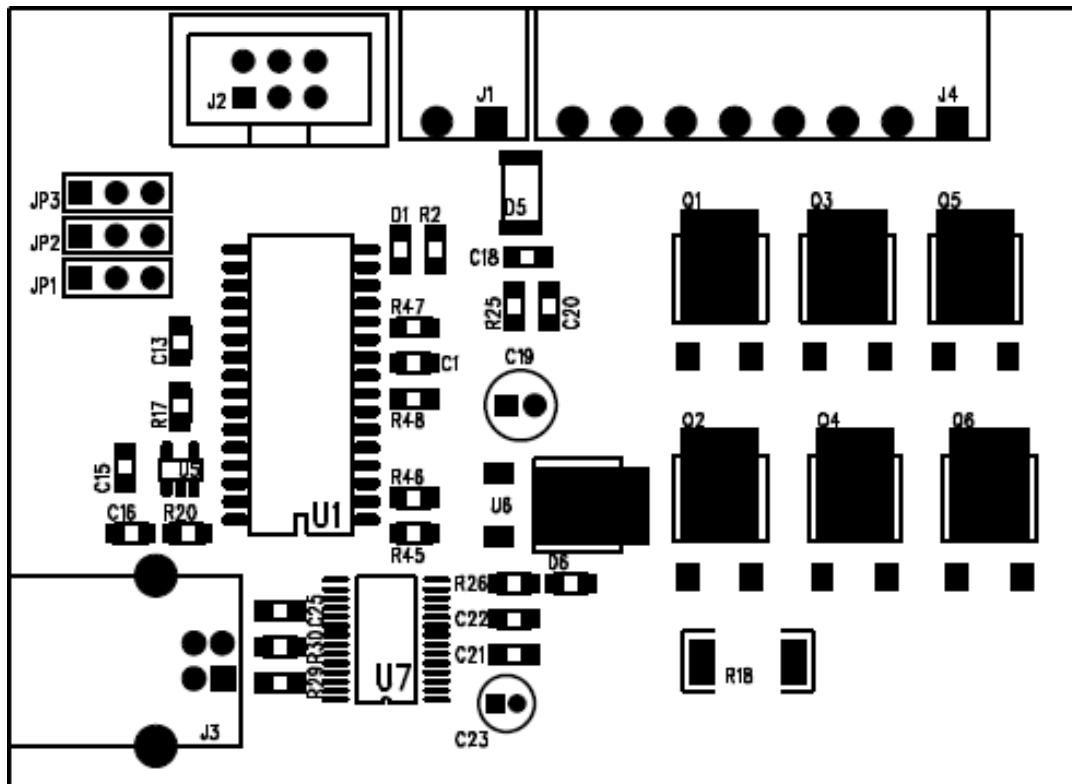
Obrázek 6.7 Přepínač nastavený na sensorový mód

Pro bezsensorový mód je zkratovací svorka umístěná nalevo.

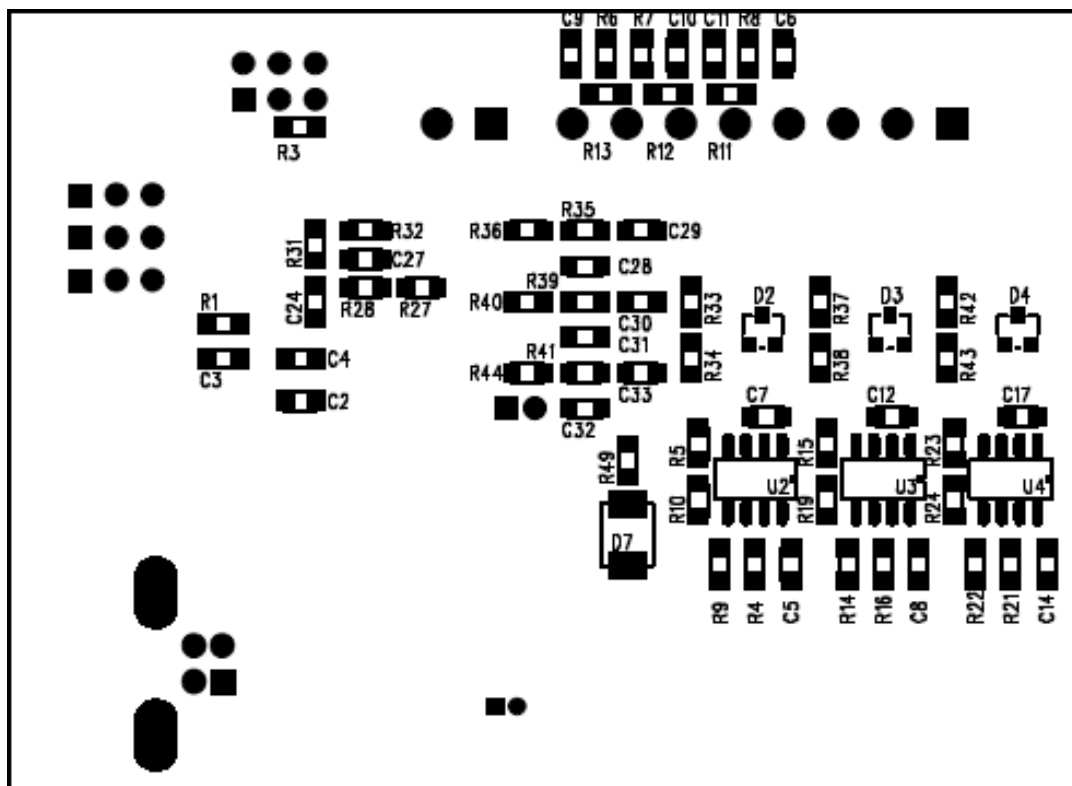


Obrázek 6.8 Přepínač nastavený na bezsensorový mód

## 6.10. Schéma

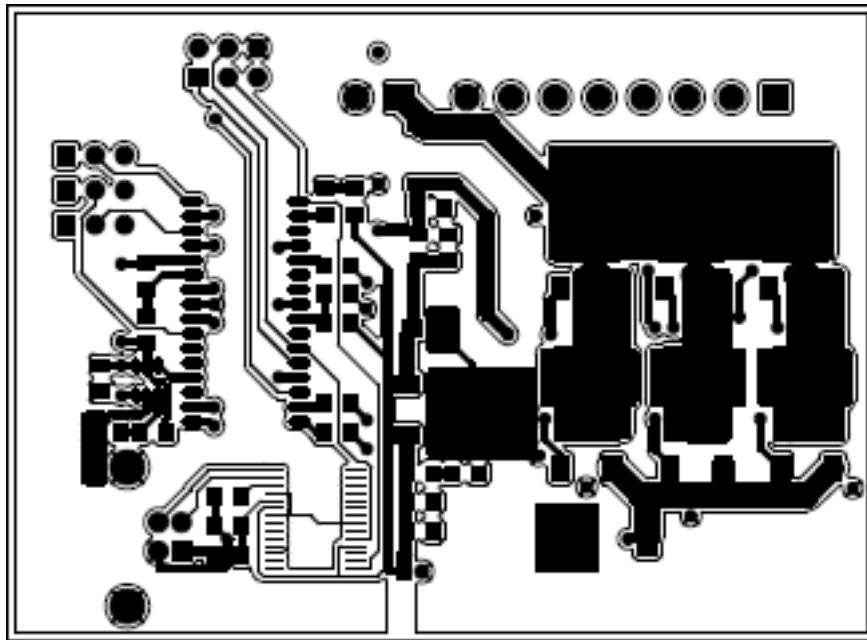


Obrázek 6.9 Rozmístění součástek na Top

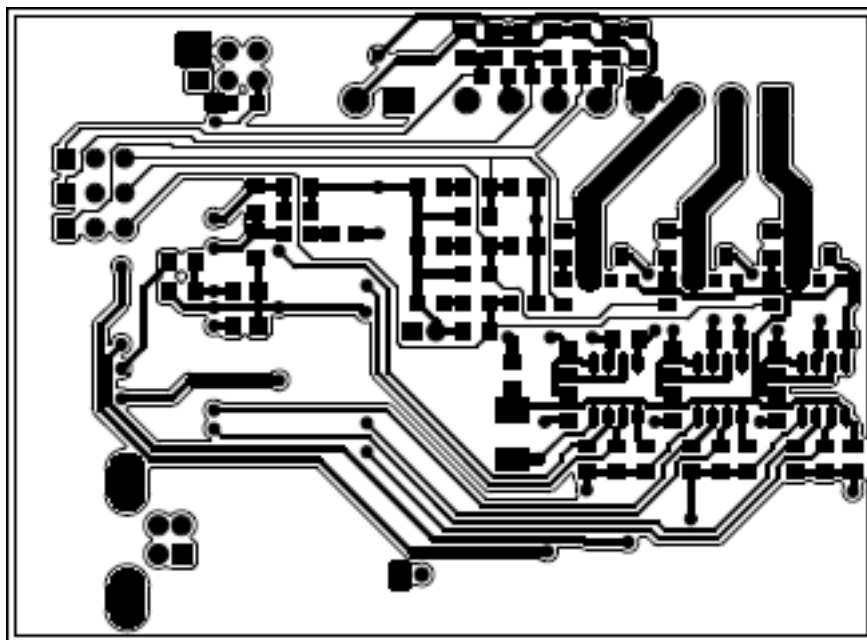


Obrázek 6.10 Rozmístění součástek na Bottom

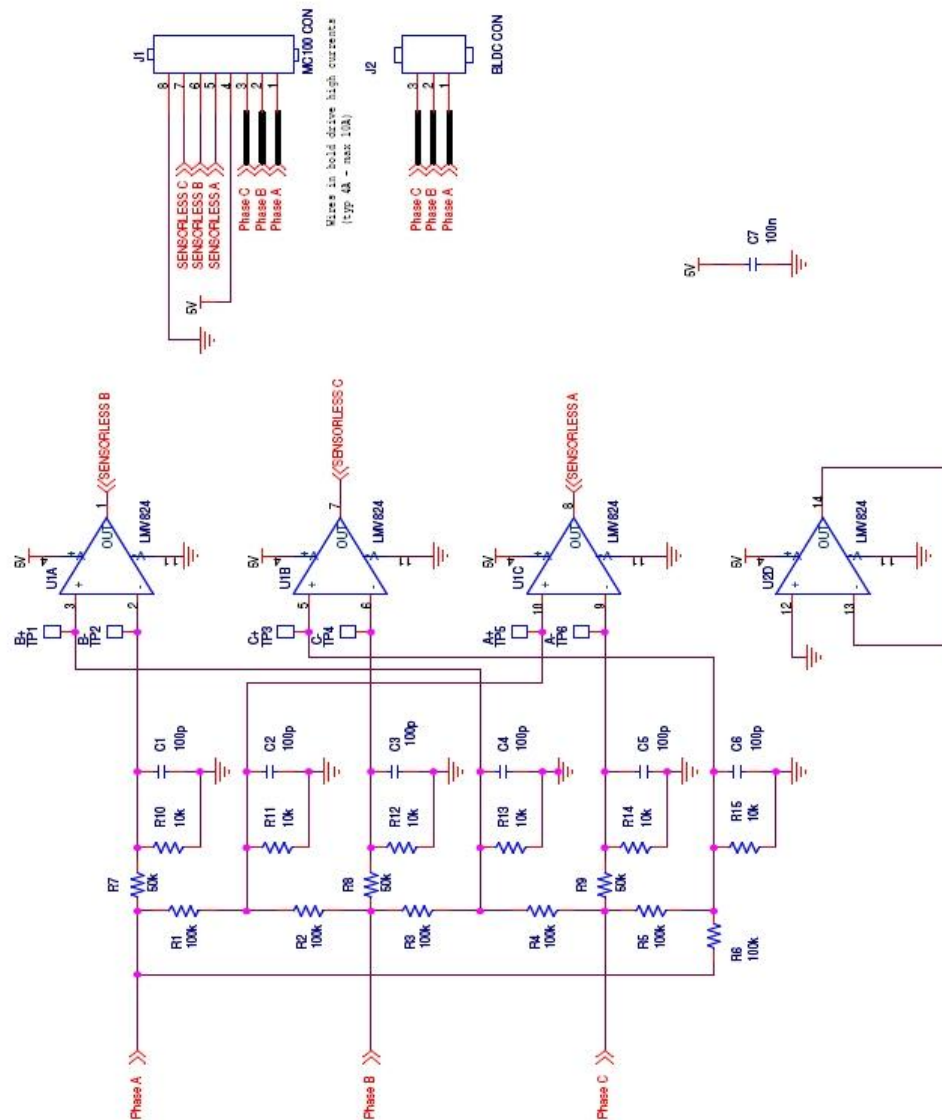




Obrázek 6.11 Routing\_Top



Obrázek 6.12 Routing\_Botton



Obrázek 6.13 Externí DPS, pro zjednodušení detekce průchodu nulou (2)

## 6.11. Výpis součástek

Tabulka 6.4 Rozpis součástek

Reference	Parametr	Popis součástky	Balení
<b>C1, C3, C28, C30, C32</b>	100pF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C2, C5-8, C12, C14, C15, C17, C18, C20, C2, C25, C27</b>	100nF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C4</b>	1uF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C9-11, C13</b>	1nF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C16, C21</b>	10nF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C19</b>	47uF	25V	
<b>C23</b>	10uF	6,3V	
<b>C24</b>	2,2nF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>C29, C31, C33</b>	470pF	50V 5% keramický kondenzátor	0805
<b>D1, D6</b>	Zelená LED		0805

D2-4	BAS21	Usměřňovací dioda	SOT23
D5	LL4001	Usměřňovací dioda	MELF
D7	SMBJ18		
JP1			SIP3
JP2			SIP3
JP3			SIP3
J1			
J2			HEADER 6
J3			USB B
J4			
Q1-6	FR4105Z	Výkonové MOSFET CMS	TO-252(D-pak)
R1, R25, R48	10Ω		0805
R2, R6-8, R17, R26, R29	4,7k		0805
R3,R28, R34, R38, R43	100k		0805
R4, R9, R14, R15, R21, R22, R30	10k		0805
R5, R10,R15, R19, R23, R24	22		0805
R11-13	100		0805
R18	R_Shult		2512
R20, R27, R33, R37, R42	15k		0805
R31, R32, R35, R36, R39-41, R44	22k		0805
R45-47	1k		0805
R48	10		1206
U1	AT90PWM3	Mikroprocesor ATMEL	SO32
U2-4	IR2101S	Řízení MOSFET/IGBT	
U5	LMV7219M5	Komparátor 7ns rail to rail	SOIC8
U6	MC78M05CDT		

## Závěr

Hlavním cílem této práce bylo navrhnout a vyrobit desku plošného spoje, která bude vhodná k ovládání BLDC motoru. Abychom tohoto dosáhli, museli jsme se seznámit s konstrukcí a možnostmi komutace BLDC motoru. Navrhnutá deska umí zpracovávat jednak signály z Hallových sond, ale stejně dobře umí zpracovávat i signály z BEMF. Technika založená na Hallových sondách je poměrně jednoduchá, protože Hallovy sondy na statoru motoru jsou umístěny tak, aby ke změně úrovně signálů docházelo ve vhodný komutační okamžik. Navíc signály generované Hallovými sondami mají obdélníkový tvar, jsou více imunní šumu a nejsou závislé na rychlosti motoru. Druhý typ detekce pozice rotoru je založen na bezsenzorové technice. Tato technika je poměrně složitá. Důvodem je malá amplituda BEMF pro nízké otáčky motoru, tedy i při spouštění, šum vznikající spínáním PWM. Bylo publikováno mnoho výzkumných prací zabývajících se bezsenzorovou detekční technikou pro BLDC motor, které popisují různé snímací schémata. Nejčastěji použité schéma je založeno na snímání BEMF napětí. Průchod nulou BEMF nastává 30 elektronických stupňů před správným komutačním okamžikem, proto musí být komutační časování vypočítáno. Přímé detekční schéma popsané v kapitole 3 je imunní spínacímu rušení, nevyžaduje neutrální napětí motoru, dosahuje vysoké účinnosti a provoz motoru je možný na širokém rozsahu rychlostí. Přesto je ještě možné zjednodušení a to za pomoci externí DSP, jejíž schéma je ukázáno na obrázku 6.12. Tuto externí DSP je možné připojit k navrhnuté desce plošného spoje pro ovládání motoru. Signály vzniklé na externí DPS jsou podobné Halovým signálům s tím rozdílem, že je předbíhají o 30 elektronických stupňů.

Bezsenzorová technika řízení BLDC motoru může být stejně výkonná jako technika založená na nízko rozlišovacích čidlech.

## Použitá literatura

- (1) ATAVRMC100 Hardware User Guide [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7551.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7551.pdf)>
- (2) AVR493: Sensorless Commutation of Brushless DC Motor (BLDC) using AT90PWM3 and ATAVRMC100 [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7658.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7658.pdf)>
- (3) AVR492: Brushless DC Motor control using AT90PWM3 [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7518.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7518.pdf)>
- (4) AN10661 Brushless DC motor control using the LPC2141 [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.nxp.com/acrobat\\_download/applicationnotes/AN10661\\_1.pdf](http://www.nxp.com/acrobat_download/applicationnotes/AN10661_1.pdf)>
- (5) AN885, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>
- (6) Datasheed - AT90PWM2, AT90PWM3, AT90PWM2B, AT90PWM3B [online]. Dostupný z WWW: <  
[http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc4317.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4317.pdf)>
- (7) Datasheed - Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Documents/DataSheets/DS_FT232R.pdf)>
- (8) Datasheed - AUTOMOTIVE MOSFET IRFR4105ZPbF [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfr4105zpb.pdf>>
- (9) Sensorless Technique for BLDC Motors, Daniele Gambetta [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://eprints.usq.edu.au/1427/1/Gambetta\\_2006\\_front.pdf](http://eprints.usq.edu.au/1427/1/Gambetta_2006_front.pdf)>
- (10) Datasheed - MC78MXX/LM78MXX [online]. Dostupný z WWW:  
<[http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/456150\\_DS.pdf](http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/90/456150_DS.pdf)>

- (11) Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>>
- (12) US Patent 4654566 - Control system, method of operating an electronically commutated motor, and laundering apparatus [online]. Dostupný z WWW:  
<<http://www.patentstorm.us/patents/4654566/fulltext.html>>
- (13) US Patent 5859520 - Control of a brushless motor [online]. Dostupný z WWW: <<http://www.patentstorm.us/patents/5859520/fulltext.html>>

## **Přílohy**

### **Obrazová část**

Schéma zařízení.

### **Obsah přiloženého DVD-ROM disku**

Na DVD disku jsou obsaženy čtyři složky. První „Bakalářská práce“, obsahuje vypracovanou bakalářskou práci v elektronické podobě, ve formátu Adobe Acrobat PDF. Druhá „Zdrojový kód“, obsahuje vzorový projekt se zdrojovými kódy. Třetí „Dokumentace“, obsahuje schémata. Poslední „Použitá literatura“, obsahuje použité literární zdroje.