



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektrických pohonů a trakce

## **Riadenie BLDC motora pomocou F28377M**

### **Microcontrollers F28377M control of BLDC motor**

Bakalárska práca

Študijný program: Elektrotechnika, energetika a management

Študijný obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedúci práce: Ing. Vít Hlinovský, CSc.

**Kristián Zelienska**

Praha 2017

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zelienka** Jméno: **Kristián** Osobní číslo: **434852**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Řízení BLDC motoru pomocí F28377M**

Název bakalářské práce anglicky:

**Microcontrollers F28377M control of BLDC motor**

Pokyny pro vypracování:

- 1) popište BLDC motor a jeho způsob řízení
- 2) programovací prostředí pro Microcontrollers F28377M Texas Instruments
- 3) algoritmus pro řízení BLDC motoru blokem 595-BOOSTXL-DRV8301
- 4) start, stop a nastavení požadované rychlosti BLDC motoru

Seznam doporučené literatury:

- [1] LAUNCHXL-F28069M Overview SPRUI11?January 2015 Copyright ? 2015, Texas Instruments Incorporated
- [2] BOOSTXL-DRV8301 Hardware User's Guide SLVU974?October 2013 e
- [3] <http://www.ti.com/lit/ug/slvu974/slvu974.pdf>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Vít Hlinovský CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.05.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.06.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

## **Prehlásenie**

Prehlasujem, že som predloženú prácu vykonal samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržaní etických princípov pri príprave vysokoškolský záverečných prác.

V Prahe dňa .....

Podpis .....

## **Pod'akovanie**

Rád by som na tomto mieste poďakoval pánu Ing. Vítu Hlinovskému, CSc. za vedenie a podporu pri písaní bakalárskej práce a pedagogickým pracovníkom Fakulty elektrotechnickej ČVUT v Prahe za poskytnuté znalosti počas môjho bakalárskeho štúdia.

## **Abstrakt**

Témou tejto bakalárskej práce je štúdium BLDC motora a rozličných spôsobov jeho riadenia. Ďalej sa tu budeme zaoberať mikrokontrolérmi spoločnosti Texas Instruments a ich možnosťami využitia pri návrhu pohonu s BLDC motorom. Nakoniec navrhne algoritmus pre ovládanie otáčok BLDC motora s použitím vývojovej dosky F28377 a výkonovej nadstavby 595-BOOSTXL-DRV8301.

## **Kľúčové slová**

BLDC motor, EC motor, PMSM, mikrokontrolér, vývojová doska, bezsenzorová regulácia, C28x, 595-BOOSTXL-DRV8301

## **Abstract**

The theme of this bachelor thesis is the study of BLDC motor and different BLDC motor control techniques. Further, we will discuss microcontrollers produced by the company Texas Instruments and their motor control possibilities. Finally, we will design an algorithm for the speed regulation of BLDC motor with the use of F28377 development board and 595-BOOSTXL-DRV8301.

## **Keywords**

BLDC motor, EC motor, PMSM, microcontrollers, development board, sensorless regulation, C28x, 595-BOOSTXL-DRV8301

## Obsah

1.	Úvod .....	10
2.	Elektronicky komutované motory .....	10
3.	Konštrukcia EC motorov .....	11
4.	Permanentné magnety používané v elektrických strojoch.....	12
5.	Porovnanie EC motorov s inými druhmi elektrických strojov .....	13
6.	Aplikácie EC motorov .....	13
7.	Rozdelenie EC motorov .....	13
8.	Fyzikálny princíp vzniku momentu v BLDC motore.....	14
9.	Princíp komutácie BLDC motora.....	16
10.	Trojfázový napäťový striedač.....	19
11.	Matematický model BLDC motora .....	20
12.	Momentová charakteristika BLDC motora .....	23
13.	Spôsoby riadenia BLDC motora .....	24
14.	Metódy založené na zmene parametrov motora vzhľadom na polohu rotora .....	25
15.	Metódy riadenia pomocou priameho merania indukovaného napätia.....	26
16.	Metóda riadenia pomocou integrácie indukovaného napätia .....	27
17.	Metóda riadenia založená na detekcii tretej harmonickej indukovaného napätia .....	28
18.	Spôsoby riadenia PMSM.....	28
19.	Field oriented control .....	28
20.	Metóda priameho riadenia momentu.....	31
21.	Vývojové dosky spoločnosti Texas Instruments .....	32
22.	LaunchXL – F28377 .....	33
23.	Mikrokontrolér F28377 a jeho periférie .....	33
24.	BOOSTXL-DRV8301 .....	38
25.	Meranie fázového a napájacieho napätia.....	39
26.	Meranie prúdu .....	40
27.	PSD regulátor .....	41

28.	Vývojové prostriedky pre mikrokontroléry.....	42
29.	Prístup k periférnym registrom v jazyku C .....	44
30.	Peripheral Driver Library .....	44
31.	Návrh algoritmu pre riadenie otáčok BLDC motora blokom 595-BOOSTXL-DRV8301 .....	45
32.	Záver.....	48
33.	Zoznam použitej literatúry .....	49

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1: EC motor malého výkonu.....	10
Obrázok 2: Ukážka vinutia EC motora s vonkajším rotorom .....	12
Obrázok 3: Moment vyvolaný fázou A v závislosti na uhle natočenia rotora.....	16
Obrázok 4: Moment vyvolaný fázou B v závislosti na uhle natočenia rotora.....	16
Obrázok 5: Moment vyvolaný fázou C v závislosti na uhle natočenia rotora.....	17
Obrázok 6: Priebeh prúdu fázou A.....	17
Obrázok 7: Priebeh prúdu fázou B .....	18
Obrázok 8: Priebeh prúdu fázou C .....	18
Obrázok 9: Priebeh indukovaného napätia, prúdu a momentu BLDC motora.....	18
Obrázok 10: Trojfázový napäťový striedač.....	19
Obrázok 11: Obvodové schéma BLDC obvodu.....	21
Obrázok 12: Porovnanie indukovaného napätia s polovicou napájacieho napätia .....	26
Obrázok 13: Porovnanie indukovaného napätia s virtuálnym neutrálnym bodom motora .....	27
Obrázok 14: Základné schéma FOC.....	30
Obrázok 15: Blokový diagram FOC.....	31
Obrázok 16: EK-TM4C123GXL Vývojová doska.....	32
Obrázok 17: Vývojová doska F28377S.....	33
Obrázok 18: Blokový diagram GPIO pinu.....	34
Obrázok 19: ePWM Modul .....	36
Obrázok 20: Disk rotačného inkrementálneho optického enkodéru.....	37
Obrázok 21: BOOSTXL-DRV8301 .....	39
Obrázok 22: Meranie napätia jednej fáze .....	39
Obrázok 23: Princíp merania statorového prúdu 1 .....	40
Obrázok 24: Princíp merania statorového prúdu 2.....	41
Obrázok 25: Code Composer Studio v edit móde .....	43
Obrázok 26: Code Composer Studio v debug móde .....	43
Obrázok 27: Blokované regulačné schéma BLDC motora .....	45
Obrázok 28: Zapojenie BLDC motora a bloku 595-BOOSTXL-DRV8301 .....	47
Obrázok 29: Fotografia pracoviska .....	47



## **Zoznam tabuliek**

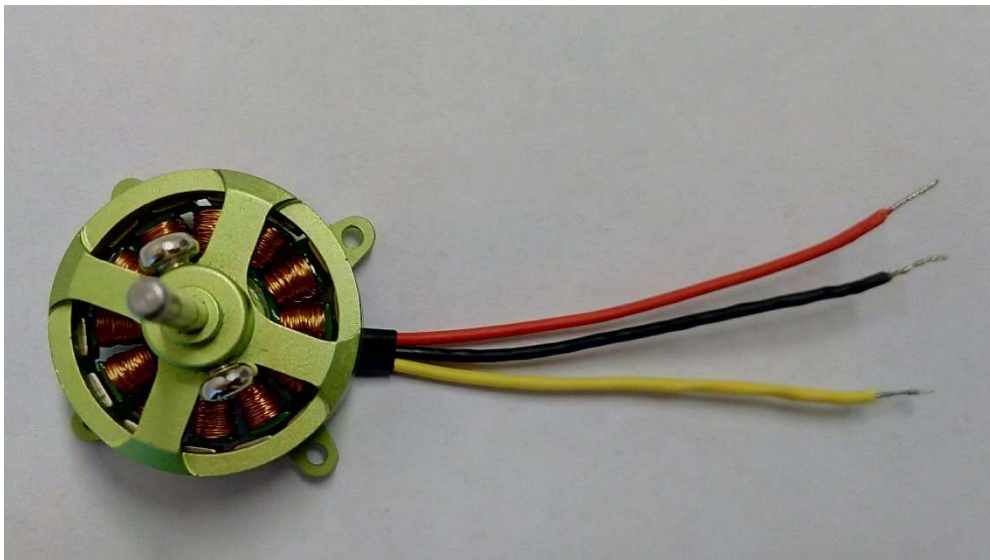
Tabuľka 1: Tabuľka spínania BLDC motora .....	19
Tabuľka 2: Tabuľka spínania výkonových súčiastok.....	20

# 1. Úvod

V súčasnej dobe sú na elektrické zariadenia kladené náročné ekonomické a legislatívne požiadavky z hľadiska elektromagnetickej kompatibility, spoľahlivosti, životnosti a náročnosti údržby. Dôležitými faktormi sú cena, vysoká účinnosť, čas vývoja zariadenia a schopnosť prispôbiť sa požiadavkám trhu. Tieto a ďalšie iné požiadavky sa stali motiváciou pre vývoj elektronicky komutovaných motorov a potrebnej elektroniky pre ich napájanie a ovládanie. Tieto motory sú vďaka svojim vlastnostiam schopné splniť tieto požiadavky v mnohých aplikáciách. K ich čoraz väčšej obľube prispieva aj fakt, že spoločnosti ako Texas Instruments a STMicroelectronics poskytujú vývojové sady spolu so softwarom a dokumentáciou potrebnou pre vývoj zariadení s elektronicky komutovanými motormi. Ich používanie je jednoduché, pohodlné a výrazne skracuje čas vývoja danej aplikácie.

## 2. Elektronicky komutované motory

Elektronicky komutovaný motor, označovaný aj ako EC motor z anglického názvu Electronically Commutated, je synchronný motor s permanentnými magnetmi umiestnenými na rotore. Vo väčšine aplikácií sa vyskytujú v trojfázovom prevedení. Ich názov vystihuje fakt, že sa jedná o bezkartáčové motory napájané z jednosmerného zdroja napätia.



Obrázok 1: EC motor malého výkonu

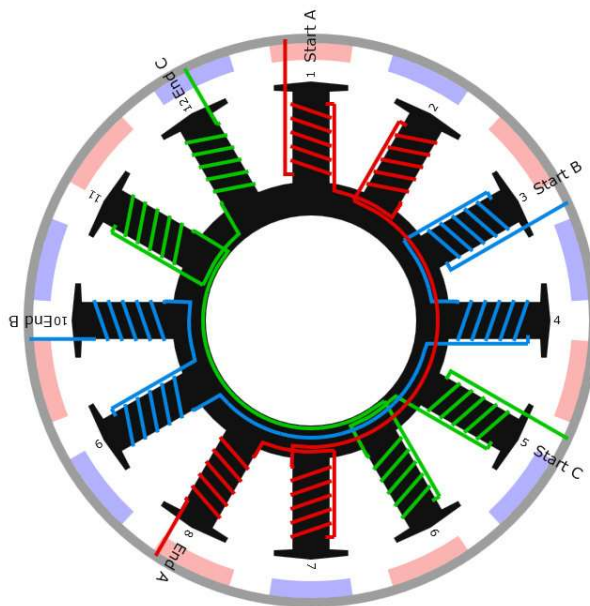
### 3. Konštrukcia EC motorov

Elektrický motor tvoria dve základné časti: rotor a stator. EC motor sa konštrukčne podobá synchronnému motoru. Stator tvorí trojfázové vinutie zapojené do hviezdy alebo do trojuholníka. Viacfázové motory sú menej časté. Najčastejšie sa vinutie vyskytuje v dvoch prevedeniach. Prvú skupinu tvoria motory s homogénnym vinutím. Môže byť umiestnené v drážkach alebo ako samonosné vinutie. V drážkových motoroch vznikajú pulzačné momenty spôsobené rôznou reluktanciou magnetického obvodu vo vzduchovej medzere. Túto nerovnomernosť zapríčiňujú samotné drážky. Dôsledkom toho je zvýšená hlučnosť a vibrácie motora. Výhodou je, že zuby v drážkach, okolo ktorých je vinutie, skracujú vzdialenosť medzi statorom a rotorovými magnetmi, čo znižuje magnetický odpor a zvyšuje moment motora. V motoroch s homogénnym statorovým vinutím má vinutie valcovitý tvar a je zaliate do epoxidovej živice. Výhodou je znížená hlučnosť a plynulejšie otáčanie motora. Nevýhodou je nižší moment. V druhej skupine sú motory s koncentricky usporiadanými statorovými pólovými nástavcami, na ktorých je umiestnené vinutie. Podobajú sa krokovým motorom. Ich maximálna rýchlosť je nižšia ako u motorov s homogénnym vinutím.

Rotor sa skladá z párneho počtu permanentných magnetov so striedajúcim sa severným a južným pólom. Počet pólov môže byť rôzny zvyčajne od dvoch do štrnásť. S ich zvyšujúcim počtom rastie moment a cena EC motora. Podľa vzájomnej polohy rotora a statora môžeme EC motory rozdeliť do dvoch skupín:

- motory s vnútorným rotorom
- motory s vonkajším rotorom

V motoroch s vnútorným rotorom sa rotor nachádza vo vnútri statora. Toto usporiadanie má lepšie dynamické vlastnosti oproti motoru s vonkajším rotorom. Dôvodom je menší moment zotrvačnosti. Nevýhodou je, že veľkosť použitých magnetov je obmedzená, z čoho vyplýva, že pri dosiahnutí väčšieho výkonu sa musia použiť drahšie magnety. Motory s vonkajším motorom majú magnety rotora usporiadané po svojom obvode. Môžu byť použité väčšie a lacnejšie magnety. Nevýhodou je väčší moment zotrvačnosti. Pri motoroch veľkých výkonov s vysokými otáčkami by mohlo dôjsť k poškodeniu rotora. Ďalšou nevýhodou je aj znížený odvod tepla, pretože magnety tvoria v tomto prípade tepelný izolátor.[1]



Obrázok 2: Ukážka vinutia EC motora s vonkajším rotorom

Zdroj: <http://www.bavaria-direct.co.za/scheme/common/>

## 4. Permanentné magnety používané v elektrických strojoch

V elektrických strojoch sa stretne s týmito druhmi permanentných magnetov: materiály zo vzácnych zemín, materiály na báze zliatin a feritové materiály. Materiály na báze zliatin zastupuje veľmi dôležitá skupina s názvom AlNiCo. Ako už samotný názov naznačuje, sú v nich zastúpené prvky hliník, nikel a kobalt. Vyznačujú sa nízkou koercitivitou, vysokou remanentnou indukciou a malým energetickým súčinom. Nevýhodou zliatin AlNiCo sú ich mechanické vlastnosti. Výroba feritových materiálov sa uskutočňuje práškovou metalúrgiou a sú vyrobené z keramických oxidov. V porovnaní s AlNiCo materiálmi majú nižšiu remanentnú indukciu a energetický súčin, ale vyššiu koercitivitu a lepšiu schopnosť odolávať demagnetizačným poliam. Do skupiny materiálov zo vzácnych zemín patria magnety samárium – kobalt (Sm-Co) a neodýmové magnety (NdFeB). Veľmi veľkou výhodou je ich vysoká koercitivita a remanencia v porovnaní s ostatnými komerčne vyrábanými magnetmi. Nevýhoda je ich cena, ktorá obmedzuje ich použitie väčšinou len na magnety malých rozmerov s veľmi dobrými magnetickými vlastnosťami. Najvyšší energetický súčin majú práve neodýmové magnety. Zároveň sú aj lacnejšie ako magnety Sm-Co, avšak ich nevýhoda spočíva vo vysokej citlivosti na teplotu, čo limituje ich použitie.[4]

## **5. Porovnanie EC motorov s inými druhmi elektrických strojov**

Hlavnou výhodou EC motorov je odstránenie mechanického komutátora, vyskytujúceho sa v starších jednosmerných kartáčových strojoch. Mechanický komutátor je zdrojom iskrenia a elektromagnetického rušenia. Navyše vyžaduje pravidelnú údržbu, obmedzuje životnosť zariadenia a spôsobuje dosť značné straty, pretože na ňom vzniká úbytok napätia. Ďalšie výhody sú dosiahnuteľnosť rádovo vyšších otáčok, vysoká efektívnosť, vysoký pomer výkon a objemu, tichá prevádzka, výborné dynamické vlastnosti. Nevýhodou je potreba elektroniky, zložitejšie ovládanie pohonu s EC motorom a možnosť demagnetizácie permanentných magnetov. Tieto nevýhody limitujú použitie EC motorov v niektorých aplikáciách. V porovnaní s asynchrónnymi motormi dosahujú EC motory rovnakej veľkosti vyšší výkon. Vďaka montáži permanentných magnetov zaniká potreba krúžkov a ďalšieho zdroja jednosmerného napätia na rozdiel od tradičných synchronných motorov.

## **6. Aplikácie EC motorov**

Vlastnosti EC motorov spĺňajú požiadavky mnohých aplikácií. K tým najčastejším patrí robotika, pohon pevných diskov a CD-ROM, letecké prístroje, kamery, automobilová technika, pohony spätných zrkadiel, sedačiek, navíjacie a textilné stroje, lekárske prístroje, krvné čerpadlá, zariadenia v zubných ambulanciách, elektrokardiografy, pohony modelov lietadiel, automobilov, pohony kolobežiek, bicyklov a malých skútrov.[1]

## **7. Rozdelenie EC motorov**

Najdôležitejšie delenie EC motorov z pohľadu riadenia motora je podľa priebehu magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere. Podľa tohto kritéria sa EC motory delia na:

- BLDC
- PMSM

BLDC (z anglického názvu brushless DC) motory sú motory s lichobežníkovým priebehom magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere a s lichobežníkovým tvarom spätného indukovaného napätia. Lichobežníkový tvar magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere je v praxi pri návrhu motora ťažké docieľiť. Pre dosiahnutie konštantného momentu musíme vinutie statora napájať prúdom obdĺžnikového tvaru. Pri komutácii dochádza k miernemu zvlneniu momentu.

PMSM (z anglického permanent magnet synchronous motor) sú motory so sínusovým rozložením vinutia, so sínusovým priebehom magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere a spätného indukovaného napätia. Pre dosiahnutie konštantného momentu je statorové vinutie napájané sínusovým tvarom statorového prúdu.[3]

V odbornej literatúre sa niekedy EC motory (BLDC aj PMSM) označujú pod spoločným názvom ako BLDC motory, keďže jediný rozdiel je v spôsobe vinutia statorového vinutia. V praxi platí, že väčšina motorov malých výkonov je BLDC a väčšina motorov veľkých výkonov je PMSM. Aby sa zachovala jednota terminológie používanej v technických dokumentáciách, pojmom BLDC motor budeme mať na mysli motor s lichobežníkovým priebehom magnetickej indukcie ovládaným pomocou skalárneho riadenia šesťkrokovej komutácie a pojmom PMSM budeme referovať na motor so sínusovým priebehom magnetickej indukcie ovládaný vektorovou reguláciou.

## 8. Fyzikálny princíp vzniku momentu v BLDC motore

Na vodič pretekajúci prúdom, ktorý je vložený do magnetického poľa, pôsobí sila podľa rovnice:

$$\mathbf{F} = I \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$$

$\mathbf{F}$  - sila pôsobiaca na vodič

$d\mathbf{l}$  – elementárny element dĺžky vodiča

$\mathbf{B}$  – magnetická indukcia

Smer sily pôsobiacej na vodič je daný vektorovým súčinom  $d\mathbf{l} \times \mathbf{B}$ . Môžeme ho určiť pomocou pravidla ľavej ruky: „Ak položíme ľavú ruku na vodič pohybujúci sa v magnetickom poli tak, aby siločiar vstúpili do dlane a prsty ukazovali smer prúdu, potom palec ukazuje smer sily pôsobiacej na vodič.“[5]

Pre odvedenie rovnice momentu a indukovaného napätia BLDC motora predpokladajme, že uvažovaný stroj je trojfázový s vinutím zapojeným do hviezdy, napájaný prúdmi obdĺžnikového tvaru. Použitá komutácia je obdĺžniková (v danom momente sú aktívne iba dve fázy) a nastáva okamžite. Priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere uvažujeme tiež za obdĺžnikový. Za týchto predpokladov môžeme odvodiť veľkosť sily pôsobiacej na rotor:

$$F = 4NILB$$

$F$  – sila pôsobiaca na rotor

$N$  – počet vinutí jednej fáze

$I$  – prúd pretekajúci dvoma fázami

$l$  – dĺžka rotora

$B$  – magnetická indukcia

Pre moment platí obecný vzorec:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F}$$

$\mathbf{M}$  – moment stroja

$\mathbf{r}$  – vnútorný polomer rotora

Dosadením dostaneme vzorec pre BLDC motor  $M = 4NIlBr$ , ktorý môžeme prepísať do tvaru  $M = kI$ .  $k$  je konštanta stroja, ktorá závisí iba na konštrukcii daného motora. Z uvedeného vyplýva, že moment BLDC motora je priamo úmerný prúdu, ktorý preteká dvoma fázami.

Vzorec pre indukované napätie sa dá odvodiť z časovej zmeny magnetického indukčného toku.

Pre BLDC motor platí:

$$U_i = 2NlrB\Omega$$

$U_i$  – indukované napätie

$N$  – počet vinutí jednej fáze

$l$  – dĺžka rotora

$r$  – vnútorný polomer rotora

$B$  – magnetická indukcia

$\Omega$  – mechanická uhlová rýchlosť

Z vzorca vyplýva, že indukované napätie je priamo úmerné mechanickým otáčkam stroja  $U_i = k_e\Omega$ .

Medzi mechanickou uhlovou a elektrickou uhlovou rýchlosťou platí vzťah:

$$\omega = p \cdot \Omega$$

$\omega$  – elektrická uhlová rýchlosť

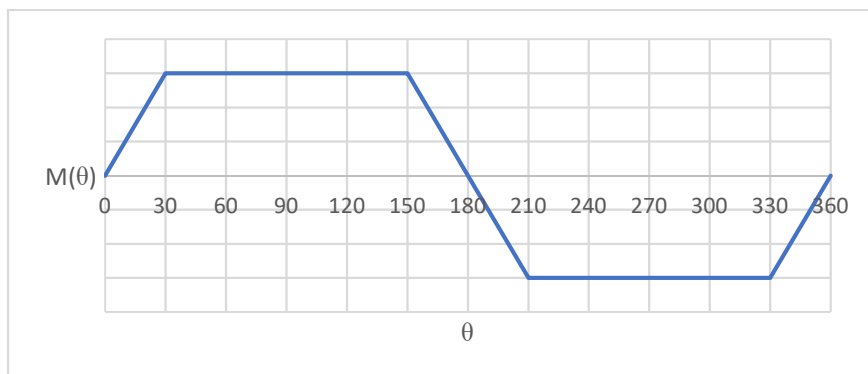
$p$  – počet polpárov na rotore

$\Omega$  - mechanická uhlová rýchlosť

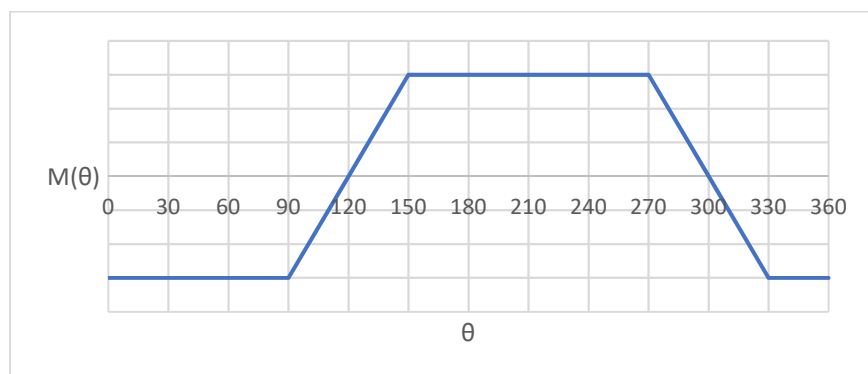
## 9. Princíp komutácie BLDC motora

Komutáciou v tomto prípade sa rozumie zmena smeru prúdu z jedného vinutia statoru na druhé. Princíp komutácie je jednoduché pochopiť nasledujúcou úvahou. Uvažujme stroj s takými istými parametrami ako v predchádzajúcej časti textu. V tomto prípade však s rozpojeným statorovým vinutím. Jednotlivé vinutia budeme napájať jednosmerným prúdom rovnakej veľkosti a smeru. Moment vyvolaný jednou fázou v závislosti na uhle natočenia rotora bude mať lichobežníkový tvar a krivky budú vzájomne posunuté o  $120^\circ$ . Priebehy momentov vyvolaných jednotlivými fázami sú na obrázkoch 3, 4, 5. Jednotky osi sú v stupňoch elektrických.

Obrázok 3: Moment vyvolaný fázou A v závislosti na uhle natočenia rotora

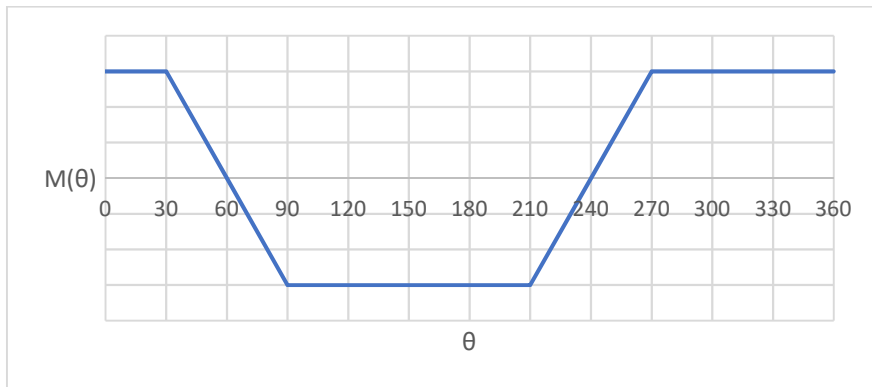


Obrázok 4: Moment vyvolaný fázou B v závislosti na uhle natočenia rotora



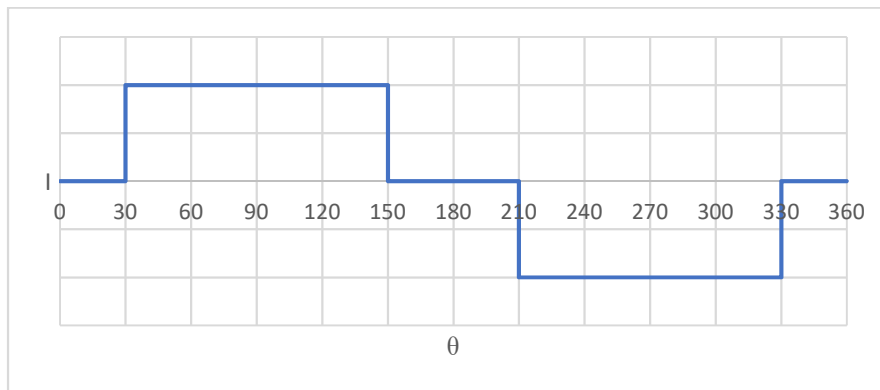


Obrázok 5: Moment vyvolaný fázou C v závislosti na uhle natočenia rotora

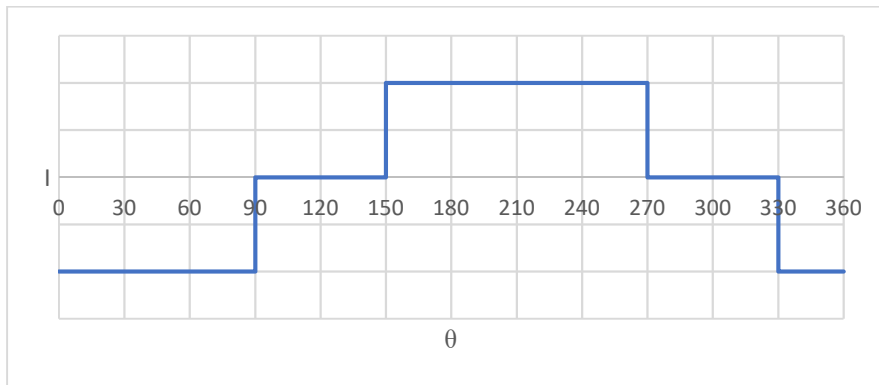


Pre dosiahnutie konštantného momentu sa vykoná nasledovné. Ak v danej polohe rotora kladný prúd danej fázy vyvoláva kladný moment, zachováme polaritu prúdu vo vinutí fáze. Ak v danej polohe rotora kladný prúd danej fázy vyvoláva záporný moment, zmeníme polaritu prúdu vo vinutí fáze. Ako výsledok dostávame šesťkrokovú komutáciu, ktorá sa podobá komutácii krokového motora, pretože rotor má preferované pozície. Z predošlého vyplýva, že pre plynulý chod rotora musíme poznať jeho polohu. Akonáhle sa rotor priblíži k preferovanej pozícii, nastáva komutácia. Priebehy prúdov jednotlivých fáz sú uvedené na obrázkoch 6, 7, 8. Jednotky na ose x sú v stupňoch elektrických.

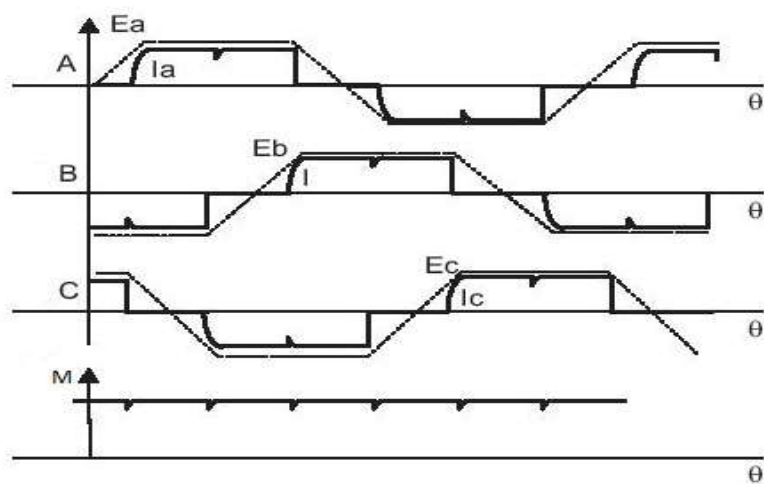
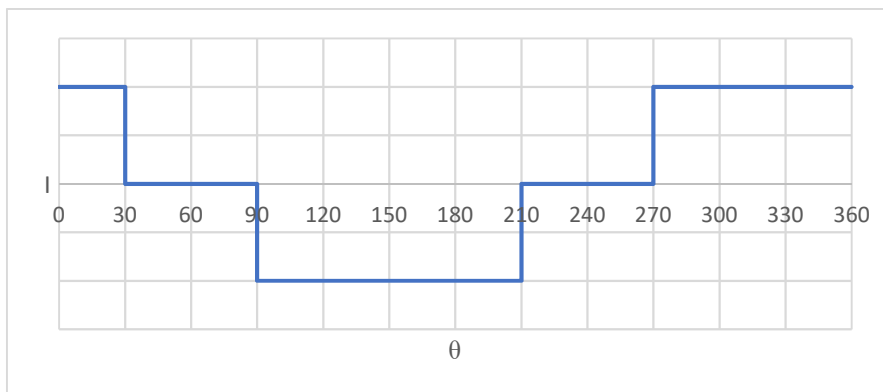
Obrázok 6: Priebeh prúdu fázou A



Obrázok 7: Priebeh prúdu fázou B



Obrázok 8: Priebeh prúdu fázou C

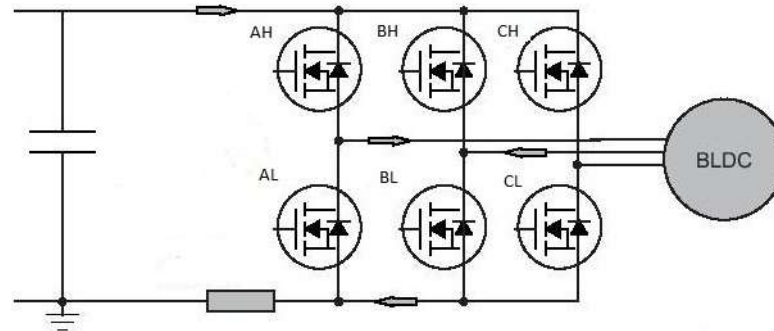


Obrázok 9: Priebeh indukovaného napätia, prúdu a momentu BLDC motora

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>

## 10. Trojfázový napät'ový striedač

Komutáciu BLDC motora zabezpečuje trojfázový napät'ový striedač. Svojím usporiadaním sa podobá na trojfázový mostíkový usmerňovač. Ako súčiastky sú najčastejšie používané MOSFET, IGBT, GTO alebo IGCT.



Obrázok 10: Trojfázový napät'ový striedač

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>

Tabuľka 1: Tabuľka spínania BLDC motora

Fáza A	Fáza B	Fáza C
+	-	OFF
+	OFF	-
OFF	+	-
-	+	OFF
-	OFF	+
OFF	-	+

Tabuľka 2: Tabuľka spínania výkonových súčiastok

AH	AL	BH	BL	CH	CL
ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF

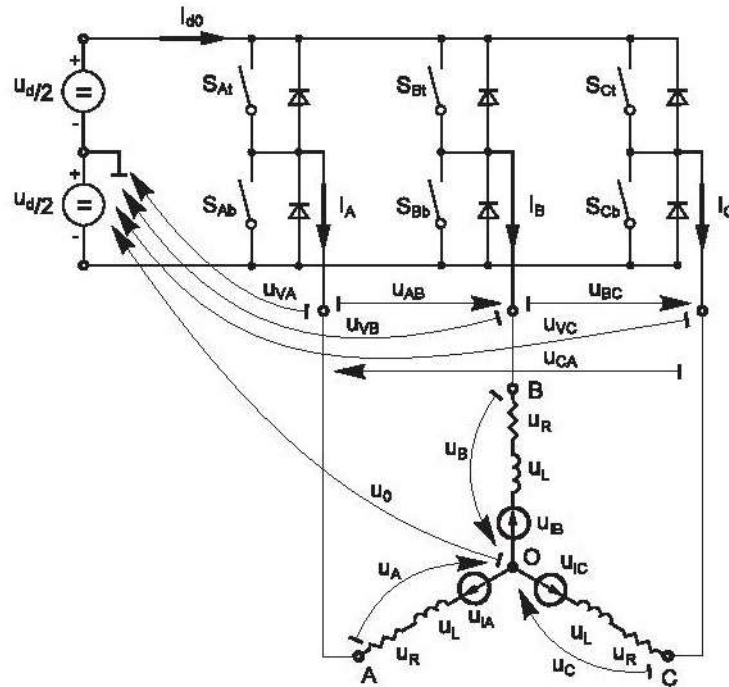
Pre dosiahnutie účinnej prevádzky striedača a minimalizovanie strát, sú výkonové súčiastky používame v oblasti uzavretia a úplného nasýtenia. Na ich ovládanie používame metódu, ktorú nazývame pulzne šírková modulácie (PWM – z angl. pulse width modulation). Mikrokontrolér generuje diskretný signál obdĺžnikového tvaru s periódou  $T$ . Doby trvania impulzu označíme  $t$ . Potom môžeme definovať striedu  $z$  ako pomer doby trvania impulzu a periódy. Pre strednú hodnotu výstupného napätia  $U_V$  vzhľadom ku vstupnému napätiu  $U$  dostávame vzťah:

$$U_V = zU$$

Ak pri riadení otáčok použijeme PWM signál s dostatočnou frekvenciou, vďaka indukčnosti vinutia a mechanickej zotrvačnosti rotora sa motor bude chovať tak, ako keby na jeho svorkách bolo pripojené napätie veľkosti  $U_V$ . [10]

## 11. Matematický model BLDC motora

Pri odvodzovaní matematického modelu BLDC vychádzame z nasledujúceho náhradného obvodového schéma:



Obrázok 11: Obvodové schéma BLDC obvodu

Zdroj: <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1914.pdf>

Matematická analýza je založená na nasledujúcich predpokladoch:

- vinutie je trojfázové, symetrické
- motor sa nenachádza v stave magnetickej saturácie
- všetky tri vinutia motora majú rovnaký a konštantný odpor R
- tvar indukovaného napätia je rovnaký pre všetky tri fázy
- polovodičové súčiastky a napäťový striedač považujeme za ideálny
- straty v železe, straty vírivými prúdmi a hysterézne straty sú zanedbateľné
- vlastná indukčnosť  $L_v$  všetkých troch fázy je rovnaká a konštantná
- vzájomná indukčnosť  $M$  všetkých troch fázy je rovnaká a konštantná

Za týchto predpokladov dostávame pre napätia jednotlivých fázy sústavu rovníc:

$$u_A = Ri_A + L_v \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + u_{iA}$$

$$u_B = Ri_B + L_v \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + u_{iB}$$

$$u_C = Ri_C + L_v \frac{di_C}{dt} + M \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + u_{iC}$$

$u_x$  – napätie jednej fázy medzi napájaním a virtuálnou nulou

$i_X$  – fázový prúd

$u_{iX}$  – indukované napätie v statorovom vinutí

$X$  – označenie jednej fázy A, B a C

Pre fázové prúdy platí podľa Kirchoffovho zákona rovnica:

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

Po úpravách rovnice prepíšeme do nasledujúceho tvaru:

$$u_A = Ri_A + (L_V - M) \frac{di_A}{dt} + u_{iA}$$

$$u_B = Ri_B + (L_V - M) \frac{di_B}{dt} + u_{iB}$$

$$u_C = Ri_C + (L_V - M) \frac{di_C}{dt} + u_{iC}$$

Výraz  $(L_V - M)$  nahradíme indukčnosťou  $L$  zahrňujúcu vlastnú aj vzájomnú indukčnosť:

$$u_X = Ri_X + L \frac{di_X}{dt} + u_{iX}$$

Pre indukované napätia jednotlivých fázy platí:

$$u_{iA} = k_e \cdot f(\theta) \cdot \Omega$$

$$u_{iB} = k_e \cdot f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \Omega$$

$$u_{iC} = k_e \cdot f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \cdot \Omega$$

$\Omega$  – mechanické otáčky rotora

$f(\theta)$  – je periodická funkcia lichobežníkového tvaru v závislosti na stupňoch elektrických s periódou  $2\pi$  a nadobúda hodnoty od -1 do 1.

Pre mechanickú časť BLDC motora platí rovnica:

$$M = \frac{d}{dt} J\Omega + B\Omega + M_Z$$

$M$  – hnací moment motora

$\frac{d}{dt} J\Omega$  – dynamický moment

$J$  – moment zotrvačnosti

$\Omega$  - mechanické otáčky motora

$B$  – konštanta viskózneho trenia

$M_Z$  – moment záťaže

Ako už bolo uvedené, hnací moment motora je priamo úmerný prúdu v statorovom vinutí. Pre každú fázu potom môžeme písať všeobecnú rovnicu:

$$M_A = k_A \cdot i_A \cdot f(\theta)$$

$$M_B = k_B \cdot i_B \cdot f\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$M_C = k_C \cdot i_C \cdot f\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Okamžitý výsledný moment je daný súčtom momentov všetkých fáz v danom čase.

Energia dodávaná do elektrického stroja sa premieňa na teplo príčinou odporu vinutia, na energiu uloženú v magnetickom poli a na energiu odpovedajúcej elektromagnetickému momentu. Výkon následne dostávame súčtom výkonov všetkých fáz:

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$

## 12. Momentová charakteristika BLDC motora

Po doznení elektromagnetických a elektromechanických prechodných dejov platí rovnica:

$$U = U_i + RI$$

$U$  – svorkové napätie zdroja

$U_i$  – indukované napätie dvoch fáz

$R$  – elektrický odpor vinutia dvoch fáz

$I$  – prúd

Po dosadení vzorca pre indukované napätie a upravení, dostávame vzťah pre uhlovú rýchlosť stroja:

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\psi}$$

$k$  – konštanta úmernosti daná konštrukciou stroja

$\psi$  – magnetický tok daný konštrukciou stroja

Pričom pre uhlovú rýchlosť naprázdno platí vzťah:

$$\Omega_0 = \frac{U}{k\psi}$$

Pre elektromagnetický moment platí vzťah:

$$M = k\psi I$$

Stav nakrátko nazývame stav pri nulovej mechanickej rýchlosti a teda pre prúd nakrátko  $I_k$  a pre záberný moment  $M_k$  budú platiť nasledujúce rovnice:

$$I_k = \frac{U}{R}$$

$$M_k = k\psi I_k$$

Po viacerých úpravách môžeme z týchto predchádzajúcich rovníc odvodiť vzťah pre momentovú charakteristiku:

$$\Omega = \Omega_0 \left(1 - \frac{M}{M_k}\right)$$

### 13. Spôsobý riadenia BLDC motora

Z fyzikálneho princípu BLDC motora vyplýva, že pre efektívne riadenie je nutné poznať polohu rotora v každom čase. Na základe tejto informácie určujeme čas komutácie. Túto informáciu môžeme získať s použitím alebo bez použitia senzora. Hovorím o senzorovej alebo bezsenzorovej metóde riadenia BLDC motora.

Najčastejšie sa ako senzory používajú Hallove sondy. Hallove sondy sú polovodičové elektronické súčiastky, ktorých princíp funkcie je založený na Hallovom jave. Hallov jav v kovoch nie je výrazný. Ak pôsobí na polovodič súčasne elektrické a magnetické pole môžeme pozorovať hromadenie kladné a záporného náboja na opačných stranách súčiastky. Dôvodom je Lerenzova sila. Elektrické pole urýchľuje častice s nábojom a magnetické pole zakrivuje ich trajektóriu. Vzniká rozdiel potenciálu, ktorý sa nazýva Hallove napätie. Hallove napätie je priamo úmerné prúdu prechádzajúcim polovodičovou súčiastkou, magnetickej indukcie a nepriamo úmerné dĺžke polovodiča. Hallove sondy sú namontované na hriadelí motora navzájom posunuté o 120°, niekedy o 60°. Z nich dostaneme tri digitálne výstupy. Z týchto výstupov sa vytvorí šesť kombinácií pre každú komutáciu motora.

Ako senzory snímání polohy rotora môžeme ďalej použiť optické enkodéry alebo resolvery. Optický enkodér tvorí zdroj svetla, rotačný disk s otvormi a fotodetektor. Princíp spočíva v prechode



svetla otvormi rotačného disku, ktoré je následne detekované fotodetektorom. Zdrojom svetla je zvyčajne LED dióda a ako fotodetektor sa používa fotodióda alebo fototranzistor. Optické enkodéry poznáme absolútne a inkrementálne. Funkcia inkrementálnych enkodérov bude bližšie priblížená v kapitole venujúcej sa perifériám mikrokontroléru. Resolver je rotačný transformátor, ktorý slúži na získavanie informácií o polohe a rýchlosti otáčania rotora. Tieto informácie sú získavané z výstupu dvoch sekundárnych statorových vinutí resolvera, ktoré navzájom zvierajú pravý uhol. Primárne vinutie je umiestnené na rotore a je napájané sínusovým napätím. Súčasťou mikrokontroléra F28377 je aj periféria Sigma Delta Filter Module (SDFM), ktorá je navrhnutá pre dekodovanie informácií získaných z resolvera v aplikáciách pre pohony.

Medzi nevýhody použitia senzorov patrí ich vlastná spotreba, náročnejšia údržba, nespoľahlivosť a zložitejšia konštrukcia motora z dôvodu zabudovania a montáže senzora. Navyše značne zvyšujú cenu zariadenia. Limitujúcim faktorom Hallových senzorov je aj teplota. Tieto nevýhody sa stali motiváciou pre vývoj bezsenzorových metód riadenia BLDC motorov. Pri pozorovaní šesťkrokovej komutácie si môžeme všimnúť, že v každom čase je jedna fáza neaktívna. Tieto metódy sú teda obecné založené na pozorovaní indukovaného napätia v neaktívnej fáze. Ich nevýhoda spočíva v obmedzenej možnosti rozsahu riadenia. Indukované napätie musí byť dostatočne veľké, čo sa pri malých otáčkach nedá splniť. Ďalšia možnosť ako získať polohu rotora v danom čase je založená na základe meniacich sa parametrov motora ako napríklad zmena indukčnosti. Bezsenzorové metódy sú podrobnejšie opísané v nasledujúcich kapitolách.

## **14. Metódy založené na zmene parametrov motora vzhľadom na polohu rotora**

Základom týchto metód je predpoklad zmeny parametrov motora, ktoré závisia na polohe rotora. Tieto metódy sa používajú u motor s vyniklými pólmi. Rozsah regulácie je zhruba od 0% do 20% menovitých otáčok. Rozdeľujú sa do dvoch skupín a to techniky založené na meraní prechodového deja prúdu a pokročilé techniky založené na injektovaní prúdu. Tieto metódy vyžadujú výkonný mikrokontrolér.[6]

## 15. Metódy riadenia pomocou priameho merania indukovaného napätia

Uvažujme trojfázový BLDC motor so symetrickými parametrami vinutia. Jeho obvodomé schéma je obrázku 10. Predpokladajme, že v danom momente je fáza C neaktívna, netečie ňou žiaden prúd. Potom budú platiť nasledujúce rovnice:

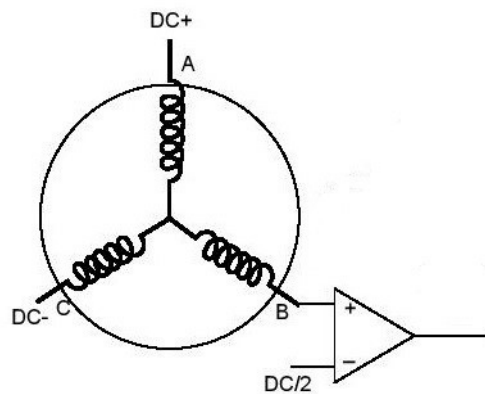
$$u_{VA} = -u_{VB} = +\frac{1}{2}u_d$$

$$i_A = -i_B$$

$$i_C = 0$$

$$u_{VC} = \frac{3}{2}u_{iC}$$

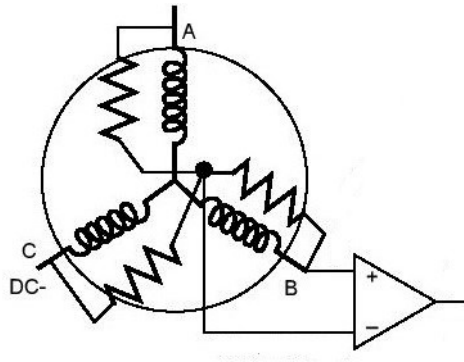
Z predchádzajúcich úvah sa ponúka možnosť porovnávania indukovaného napätia s polovicou napájacieho napätia. Ak sa indukované napätie merané vzhľadom k zápornej svorke napájacieho zdroja rovná polovici napájacieho napätia, nastáva prechod indukovaného napätia nulou. Potom čas zaznamenania prechodu indukovaného napätia nulou bude od času komutácie posunutý o  $30^\circ$  elektrických. Tento čas môžeme vypočítať na základe predchádzajúcej komutácie. Situáciu znázorňuje obrázok 11.



Obrázok 12: Porovnanie indukovaného napätia s polovicou napájacieho napätia

Zdroj: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf>

Ďalšou z možností je porovnávanie indukovaného napätia vzhľadom k neutrálnemu bodu motora. Ten môžeme vytvoriť s použitím troch rezistorov. Vytvorenie neutrálneho bodu je zobrazené na obrázku 12.[7][8]



Obrázok 13: Porovnávanie indukovaného napätia s virtuálnym neutrálnym bodom motora

Zdroj: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf>

## 16. Metóda riadenia pomocou integrácie indukovaného napätia

Táto metóda je založená na rovnakom princípe ako predošlá metóda. Líši sa v spôsobe výpočtu času trvajúceho od prechodu indukovaného napätia nulou až po bod samotnej komutácie. Tento čas zodpovedá  $30^\circ$  elektrickým. V metóde riadenia pomocou priameho merania indukovaného napätia predpokladáme dĺžku trvania doby zodpovedajúcej  $30^\circ$  elektrickým na základe informácie o predošlej komutácii. V tomto spočíva nevýhoda tejto metódy, pretože vypočítaný čas nemusí zodpovedať skutočnosti, hlavne pri zvyšovaní alebo znižovaní otáčok. Hoci existujú algoritmy, ktoré dokážu sledovať zmeny v uhlovej rýchlosti rotora a na základe týchto informácií spresniť výpočet, ponúka sa jednoduchšie riešenie a tým je metóda riadenia pomocou integrácie indukovaného napätia. Tu sa čas komutácie určuje na základe súčasnej informácie o stave motora. Integrácia indukovaného napätia začne po jeho prechode nulou a končí pri dosiahnutí nastavenej hodnoty. Vtedy nastáva komutácia. Nastavená hodnota sa nemusí meniť spolu so zmenou uhlovej rýchlosti motora, pretože hodnota integrálu indukovaného napätia je približne rovnaká pri rôznych otáčkach. [7][8]

## **17. Metóda riadenia založená na detekcii tretej harmonickej indukovaného napätia**

U BLDC motorov zapojených do hviezdy, ktoré majú pólovú rozteč väčšiu ako  $2/3$  je možné pozorovať tretiu harmonickú indukovaného napätia. Indukované napätia sa dajú rozpísať vo forme Fourierovej rady. Súčtom Fourierových rád indukovaných napätí dostávame iba súčty tretích harmonických a ich násobky, pretože tvoria netočivú zložku prúdu a sú vo fáze. Následne algoritmus prevedie integráciu tretej harmonickej napätí podľa času. Výsledkom je tretia harmonická spriahnutého magnetického toku, ktorá sa za tret'ou harmonicou indukovaného napätia omeškáva o  $30^\circ$  elektrických. Z toho vyplýva, že čas komutácie odpovedá prechodu tretej harmonickej spriahnutého magnetického toku nulou.[6]

Okrem týchto uvedených metód existujú aj iné metódy ako napríklad metóda riadenia pomocou rozšíreného Kalmanovho filtra, metóda detekcie prúdu nulovou diódou, ktoré však nie sú až tak rozšírené v komerčných pohonoch s BLDC motormi.

## **18. Spôsobu riadenia PMSM**

K výhodám skalárneho riadenia BLDC motora patrí jednoznačne jeho jednoduchosť, efektívnosť a predovšetkým nízka cena. Z týchto dôvodov sa toto riadenie používa u komerčných elektronických regulátoroch otáčok. Medzi nevýhody patrí skutočnosť, že v danom čase sú aktívne len dve fázy, čo znižuje celkový moment motora. Veľké zvlnenie momentu z dôvodu rýchlej komutácie a indukcie motora prispieva k vibráciám a zvýšenej hlučnosti. V mnohých aplikáciách to môže mať za následok zníženie životnosti motora. Docieľiť to, aby motor mal ideálny lichobežníkový priebeh magnetickej indukcie vo vzduchovej medzere je v praxi často nemožné. Z týchto dôvodov sa v rôznych aplikáciách používajú PMSM. V nasledujúcich kapitolách budú uvedené najbežnejšie metódy riadenia synchronných motorov s permanentnými magnetmi a ich základné princípy.

## **19. Field oriented control**

Field oriented control (skratka FOC) je vektorovo orientovaná metóda regulácie asynchronných a synchronných motorov. Jej podstatu tvorí rozklad vektoru statorového prúdu do dvoch navzájom na seba kolmých zložiek. Tieto zložky sa následne otáčajú synchronne s točivým magnetickým poľom statora. V jednosmernom motore s cudzím budením môžeme kontrolovať veľkosť magnetického toku

zmenou budiaceho prúdu a moment motora zmenu prúdu kotvy. Pre dosiahnutie maximálneho momentu v motore pri čo najväčšej účinnosti musí byť magnetická indukcia vyvolaná prúdom statora a magnetická indukcia vyvolaná prúdom rotora v pravom uhle. U klasických jednosmerných strojov naplnenie tejto požiadavky zabezpečuje komutátor. Field oriented control nám dovoľuje od seba oddeliť momentotvornú a tokotvornú zložku statorového prúdu u striedavých motorov s trojfázovým vinutím. Už zo samotnej podstaty tejto metódy vyplýva, že je výpočtovo náročná, čo však pri súčasnom výkone mikrokontrolérov už nie je problém.

Ak pretekajú statorovým trojfázovým vinutím prúdy  $i_A$ ,  $i_B$  a  $i_C$ , vznikajú vo vzduchovej medzere magnetomotorické napätia produkované týmito prúdmi. Vektorovým súčtom jednotlivých magnetomotorických napätí dostávame vektor výsledného magnetomotorického napätia. Ďalší krok spočíva v transformácii trojfázového systému vinutia na dvojfázový. Na tento krok použijeme Clarkovu transformáciu. Pre jednotlivé prúdy  $i_\alpha$  a  $i_\beta$  dvojfázového systému budú platiť nasledujúce rovnice:

$$i_\alpha = \frac{3}{2} K i_A$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2} K (-i_B + i_C)$$

Konštantu  $K$  je možné zvoliť. Týmto vzťahmi sme teda dosiahli transformáciu trojfázového systému na dvojfázový, ktorý je však pevne zviazaný so statorom. Vektory tohoto súradnicového systému sa dajú prepísať do iného systému, ktorý sa bude vzhľadom k prvému točiť ľubovoľnou rýchlosťou. Súradnice rotujúceho systému nazveme  $d$ ,  $q$  pričom súradnicu  $d$  zviažeme pevne s vektorom magnetickej indukcie rotora. Pre prúdy  $i_d$  a  $i_q$  v tomto súradnicovom systéme dostávame rovnice:

$$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta)$$

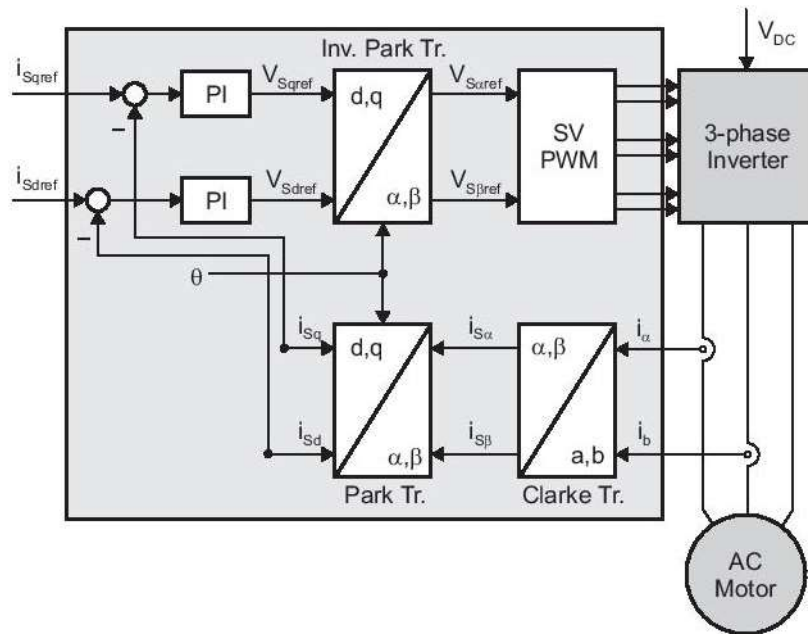
Uhol  $\theta$  je uhol medzi osou  $d$  rotujúceho súradnicového systému a osou  $\alpha$  súradnicovej sústavy pevne zviazanej so statorom. Prúd  $i_d$  tvorí tokotvornú zložku statorového prúdu. V synchronných motoroch s permanentnými magnetmi nám dovoľuje upraviť veľkosť magnetickeho toku vo vzduchovej medzere. Pri menovitých rýchlostiach sa väčšinou nastavuje na nulovú hodnotu, pretože chceme dosiahnuť, aby vektor výsledného magnetomotorického napätia statorových prúdov bol kolmý na vektor magnetickej indukcie permanentných magnetov. Týmto dosiahneme maximálny moment motora pri čo najnižšom prúde. Ak však chceme naďalej zvyšovať otáčky stroja, musím stroj odbudiť. Toho dosiahneme zvyšovaním tokotvornej zložky statorového prúdu  $i_d$  v zápornom smere osi  $d$ .

Samotnú veľkosť momentu regulujeme zmenou veľkosti momentotvornej zložky  $i_q$ . Situáciu schematicky znázorňuje obrázok 13. Prúdy dvoch fáz sa merajú, tretia sa dopočítava. Následne sa vykoná Clarkova a Parkova transformácia. Prúdové zložky sú porovnávané z referenčnými hodnotami,

ktorých rozdiel je vstupom do PI regulátora. Výstupom z PI regulátora dostávame referenčné hodnoty napätia  $u_d$  a  $u_q$ . Vykoná sa inverzná Parkova transformácia a dostávame hodnoty pre  $u_\alpha$  a  $u_\beta$ :

$$u_\alpha = u_d \cos(\theta) - u_q \sin(\theta)$$

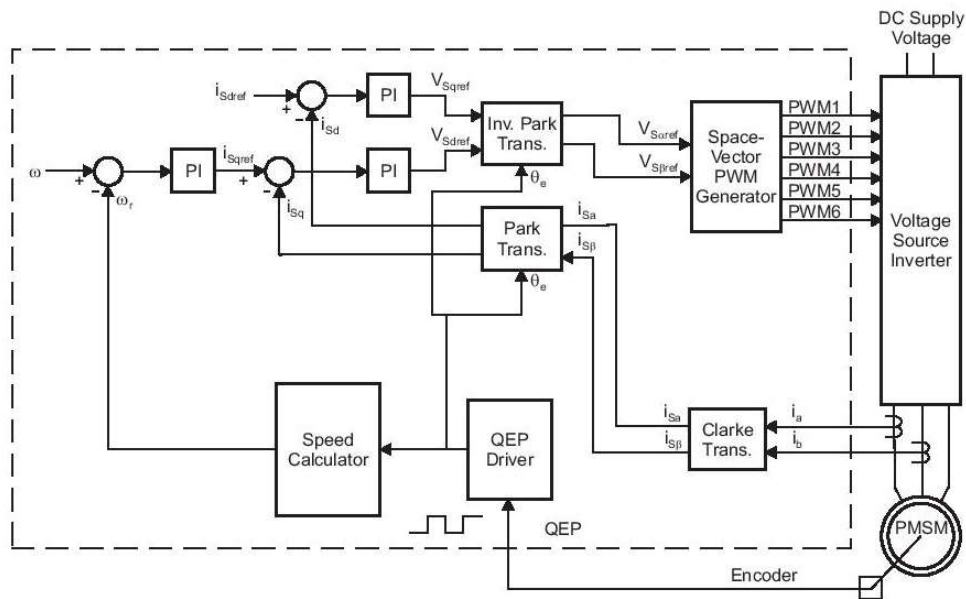
$$u_\beta = u_d \sin(\theta) + u_q \cos(\theta)$$



Obrázok 14: Základné schéma FOC

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq2/sprabq2.pdf>

Ako z Parkovej aj z inverznej Parkovej transformácie vyplýva, k výpočtu potrebujeme informáciu o polohe rotora. Ak táto informácia nebude presná, bude to mať za následok zlú reguláciu motora. Na jej získanie môžeme použiť enkodér ako znázorňuje obrázok 14 alebo bezsenzorovú technológiu, kde sa určenie pozície rotora deje pomocou softvéru.[10] [11]



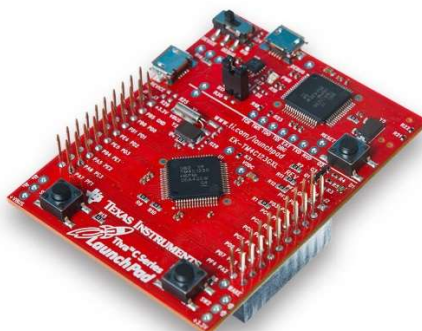
Obrázok 15: Blokový diagram FOC

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq2/sprabq2.pdf>

## 20. Metóda priameho riadenia momentu

Metóda priameho riadenia momentu patrí k moderným spôsobom regulácie striedavých motorov. Založená je však na odlišnom princípe ako vektorová regulácia. Namiesto riadenia tokotvornej a momentotvornej zložky vektoru statorového prúdu sa reguluje moment v danom tolerančnom pásme a pohyb priestorového vektoru statorového magnetického toku po danej trajektórii. Táto regulácia je menej výpočtovo náročná ako vektorovo orientovaná metóda. Jej ďalšou výhodou je, že nepotrebuje informáciu o polohe rotora. Medzi nevýhody patrí značné zvlnienie momentu a prúdu.[10]

## 21. Vývojové dosky spoločnosti Texas Instruments



Obrázok 16: EK-TM4C123GXL Vývojová doska

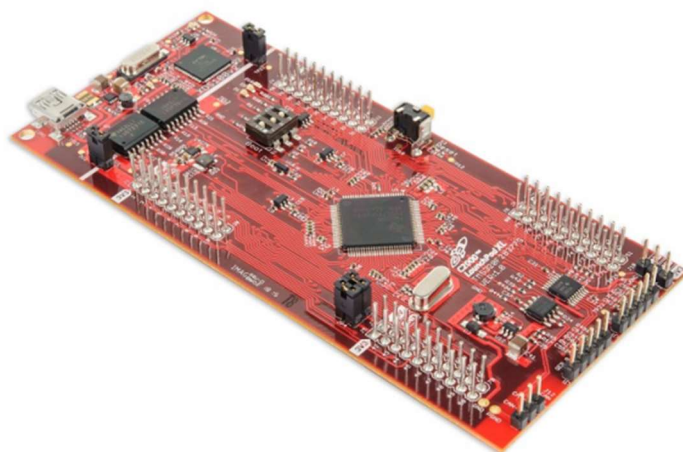
Zdroj: [www.ti.com](http://www.ti.com)

Vývojová doska je zariadenie, ktoré umožňuje rýchly vývoj softwaru a hardwaru daného zariadenia. Obsahuje cieľový mikrokontrolér, vstupné, výstupné piny a USB rozhranie medzi mikrokontrolérom a hosťujúcim PC. Súčasťou vývojovej dosky môžu byť aj iné zariadenia ako napríklad tlačidlo reset, senzory, LED indikujúce stav zariadenia a užívateľom programovateľné tlačidlá, LEDky. K vývoju softwaru je potrebné vývojové prostredie, compiler, linker, debugger, simulator a programmer. Spoločnosť Texas Instruments má v súčasnosti na trhu vývojové dosky vhodné pre rôzne aplikácie. Môžeme ich rozdeliť do piatich skupín. Prvú skupinu tvoria Connected MCU LaunchPad kits. Sú určené predovšetkým pre bezdrôtovú komunikáciu, internet vecí, osobnú elektroniku. Ich súčasťou je Bluetooth, Wifi, ZigBee. Ďalšia skupina sa nazýva TM4C123G LaunchPad Evaluation Kit. Je určená predovšetkým pre vývoj nízko nákladových aplikácií s ARM Cortex-M4 procesormi. O niečo menej výkonné mikrokontroléry zastupuje rodina MSP430™ low power MCU LaunchPad kits. Pre IEC 61508 a ISO 26262 štandardy sú navrhnuté Hercules™ Safety MCU LaunchPad kits. Sú určené pre kritické aplikácie v doprave a priemysle. Skupinu s najväčším výkonom až do 200Mhz zastupujú C2000™ Performance MCU LaunchPad kits. Svojimi vlastnosťami sú vhodné pre návrh pohonov elektrických strojov a v automatizácii. Tu máme na výber z dvoch rodín mikrokontrolérov Piccolo a Delfino. Navyše Texas Instruments má v ponuke aj množstvo BoosterPackov. BoosterPack je označenie pre nadstavbu vývojovej dosky, ktorá rozširuje jej funkcie. Často prichádzajú už aj so softwarovou podporou v podobe knižníc napísaných v jazyku C.[12]



## 22. LaunchXL – F28377

LaunchXL – F28377 je vývojová doska spoločnosti Texas Instruments. Jej jadro tvorí F28377 mikroprocesor. Poskytuje JTAG XDS100v2 emulátor, ktorý umožňuje programovanie a odladenie danej aplikácie. USB rozhranie zabezpečuje UART sériové pripojenie mikroprocesoru s hosťujúcim počítačom. Ďalšou súčasťou sú vstupno-výstupné piny, reset tlačidlo, tri prepínače, ktorých poloha určuje boot mode mikrokontroléru, LED D1 signalizujúca napájanie vývojovej dosky a dve užívateľom programovateľné LED.[13]



Obrázok 17: Vývojová doska F28377

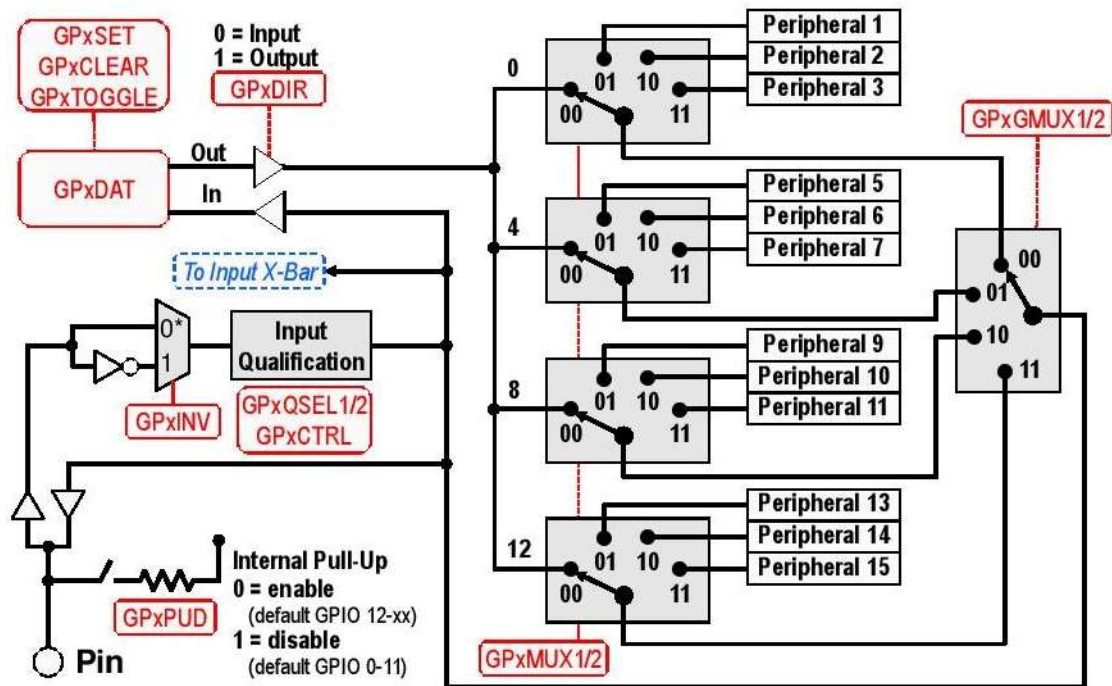
Zdroj: [www.ti.com](http://www.ti.com)

## 23. Mikrokontrolér F28377 a jeho periférie

Jadro mikrokontroléra tvorí C28x 32-bitová centrálna procesorová jednotka s modifikovanou harvardskou architektúrou, ktorá umožňuje paralelne vykonávať čítanie inštrukcií a dát súčasne so zápisom dát. Rozšírenie inštrukčnej sady poskytujú Floating-Point Unit (FPU), Trigonometric Math Unit (TMU), Veterbi, Complex Math a CRC Unit (VCU). Navyše CPU má k dispozícii Control Law Accelerator (CLA) navrhnutý pre vykonávanie matematických výpočtov. Algoritmy vykonáva paralelne a nezávisle od CPU. Výhodou je aj súvislá pamäťová mapa, ktorá vyhovuje vyšším programovacím jazykom. K dispozícii máme 1 MB Flash a 164 kB RAM. Direct Memory Access (DMA) umožňuje prenos dát medzi perifériami a pamäťou bez potreby zásahu CPU. Pamäťová štruktúra pozostáva z blokov pamäte RAM, Flash a pamäte označenej ako OTP (z angl. one-time programmable). V nasledujúcej časti budú rozobrané periférie potrebné k regulácii BLDC motora.[14]

## General-Purpose Input/Output (GPIO)

Vstupno-výstupné (GPIO) piny sú na zariadení rozdelené do šiestich portov A až F. Jednotlivé piny sú značené GPIO0 – GPIO168. Logika jedného pinu je zobrazená na obrázku 17. „x“ v tomto obrázku značí port A, B, C, D, E alebo F a znak „\*“ znamená vopred nastavenú hodnotu.



Obrázok 18: Blokový diagram GPIO pinu

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprt720/sprt720.pdf>

Každý zo vstupno-výstupných pinov môže slúžiť ako GPIO pin alebo ako jeden z niekoľkých vstupno-výstupných periférnych signálov napríklad ako vstupných signál analógovo-digitálneho prevodníka. Možnosť konfigurácie pinu pre rôzne periférie je veľkou výhodou týchto mikrokontrolérov.

Pri návrhu aplikácie pre daný mikrokontrolér začíname s konfiguráciou periférií. Konfigurácia vstupno-výstupných pinov pozostáva z nasledujúcich krokov. V prvom kroku sa vytvorí zoznam periférií potrebných pre danú aplikáciu. Piny sa nastavujú podľa potreby ako buď ako periférne signály, vstupný alebo ako výstupný pin. Ďalšou možnosťou je povoliť alebo zakázať vnútorný pullup rezistor. Vnútorné pullup rezistory nám umožňujú udržať vstupný pin v známom stave v prípade, ak na ňom nie je pripojený vonkajší signál. Ďalší krok spočíva v nastavení Input Qualification. Jedná sa v podstate o synchronizáciu nastavenia vstupnej hodnoty. V prípade vstupného GPIO pinu môže byť zvolená synchronizácia so vstupnými hodinami alebo použijeme vzorkovacie okno. Vzorkovacie okno slúži na elimináciu nežiadúceho rušenia. Jedným z jeho možných využití je eliminácia mechanických kmitov

tlačidla. Vstupný periférny signál môže byť nastavený ako asynchrónny, synchronný so systémovými hodinami alebo upravený pomocou vzorkovacieho okna. Asynchrónny vstup používame vtedy, ak synchronizáciu uskutočňuje samotný blok danej periférie.[15][16]

### **Analógové periférie**

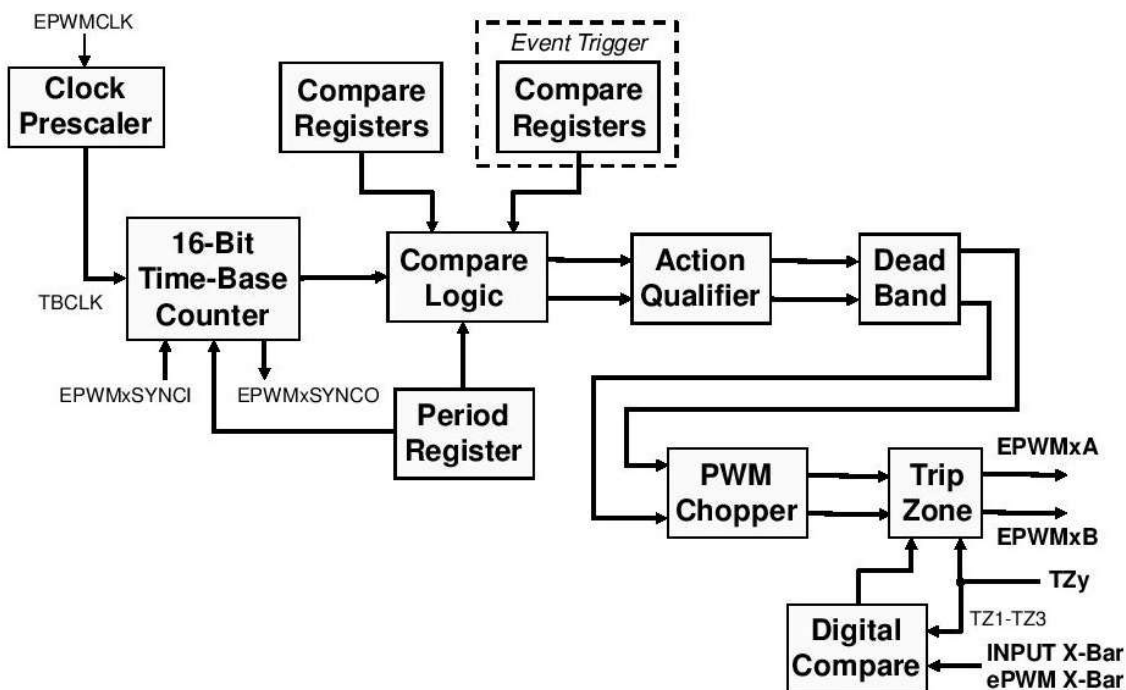
Pre návrh aplikácie máme k dispozícii analógovo-digitálny prevodník (ADC), senzor teploty, digitálno-analógový prevodník (DAC) a komparátorový podsystem (CMPSS).

Analógovo-digitálny prevodník na danom zariadení funguje na princípe postupnej aproximácie. Rozlíšenie môže byť zvolené a to buď 16 alebo 12 bitové. Hlavné časti analógovo-digitálneho prevodníka sú obvody sample-and-hold a obvody postupnej aproximácie. ADC podporuje dve možnosti získavania vstupného analógového signálu. Prvá možnosť je získavanie vstupného signálu na základe referencie k uzemnenému referenčnému pinu VREFLO. Pri druhej možnosti sa použijú dva piny, jeden ako kladný a druhý ako záporný vstup. Žiadaná hodnota napätia bude teda daná rozdielom týchto dvoch napätí. Výhoda tejto druhej možnosti spočíva vo vyrušení rušivého signálu. Výber z týchto dvoch možností ako aj nastavenie rozlíšenia prevodníka sa v kóde vykonáva pomocou funkcie *ADC\_setMode()*, ktorá musí byť zavolaná minimálne jedenkrát po reštartovaní zariadenia. Spúšťanie a postup prevodu analógovo-digitálneho prevodníka sa konfiguruje v module s názvom start-of-conversion (SOC). Pozostáva z troch krokov. Prvým je nastavenie spúšťača prevodu. Spúšťačom prevodu môže byť software, čítač, GPIO alebo ePWM. Ďalej sa nastaví vstupný kanál a doba nabíjania vzorkovacieho kondenzátoru. Doba nabíjania vzorkovacieho kondenzátora sa udáva v celočíselných násobkoch systémových hodín.[14][15][16]

Komparátorový podsystem (CMPSS) sa skladá z viacerých modulov, každý však pozostáva z dvoch analógových komparátorov. Komparátory sa používajú napríklad na detekciu prechodu indukovaného napätia nulou v BLDC motore alebo na kontrolu prúdovej špičky. Komparátor generuje logickú jednotku, ak napätie na kladnom vstupe je väčšie ako na zápornom vstupe a naopak. Pozitívny vstup je vždy pripojený na externý pin. Negatívny vstup je buď pripojený na vonkajší pin alebo k internému digitálno-analógovému prevodníku.[15][16]

### **Enhanced Pulse Width Modulator (ePWM) Modul**

Na zariadení máme k dispozícii 12 ePWM modulov. Každý z nich pozostáva z 2 PWM výstupov EPWMxA a EPWMxB. ePWM modul tvorí 8 podmodulov. Situáciu znázorňuje nasledujúci obrázok.



Obrázok 19: ePWM Modul

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprt720/sprt720.pdf>

Podmodul s názvom Time-Base tvorí 16-bitový čítač (counter). V tomto bloku nastavujeme deličku hodinového signálu, následne periódu generovaného PWM signálu. Čítač môže pracovať v troch režimoch a to počítanie smerom nahor, počítanie smerom nadol alebo počítanie smerom nahor a nadol. Počítanie smerom nahor alebo nadol je vhodné pre generovanie signálu obdĺžnikového tvaru, počítanie smerom nahor a nadol je vhodné pre generovanie signálu so sínusovým tvarom.[14]

Podmodul s názvom Counter-Compare porovnáva okamžitú hodnotu čítača s nulou, periódou a s ďalšími dvoma hodnotami nastavenými programátorom. Pri zhode podmodul Action-Qualifier generuje udalosť. Udalosťou môže byť žiadna akcia, nastavenie logickej nuly na výstupe, nastavenie logickej jednotky na výstupe alebo zmena logickej hodnoty. Ďalej je možné nastaviť, či sa udalosť udeje pri zhode komparátora s čítačom pri počítaní čítača smerom nahor alebo nadol. Registre s názvom shadow slúžia na synchronizáciu zápisu nových hodnôt do ostatných registrov s čítačom.[14][15]

Podmodul Dead-Band umožňuje nastaviť oneskorenie udalosti na výstupnom pine. Čas otvorenia výkonovej súčiastky je väčšinou kratší ako čas jej vypnutia. Tento podmodul môže zabezpečiť potrebnú korekciu a zabránuje tak možným krátkodobým skratom.[15]

PWM chopper môžeme použiť na modulovanie nosného signálu o vysokej frekvencii s generovaným PWM signálom.[15]

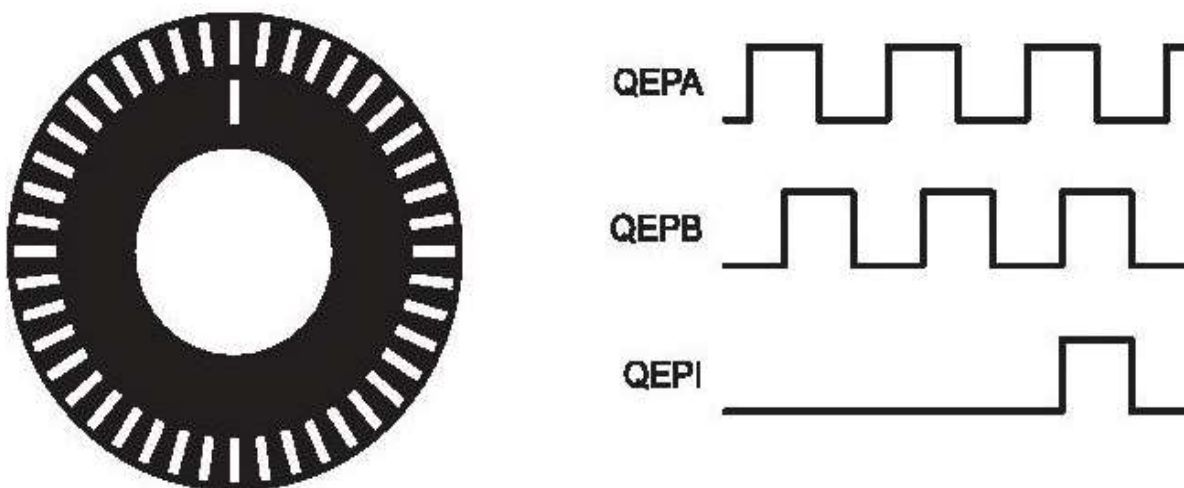
Podmodul Trip-Zone slúži ako ochrana pri nadprúde alebo skrate tým, že prevedie výstupy EPWMxA a EPWMxB do bezpečného stavu. Bezpečný stav môže byť logická nula, logická jednotka alebo vysoká impedancia.[15]

### Enhanced Capture (eCAP)

Uplatnenie tohto modulu nájdeme tam, kde je dôležité presné meranie času vonkajších udalostí. Používa sa na meranie uhlovej rýchlosti motorov, meranie uplynutej doby medzi dvoma pulzmi senzora a na meranie periódy a striedy obdĺžnikového signálu zo senzora. eCAP zachytí zmenu signálu na určenom vstupnom píně a uloží hodnotu čítača v jednom zo štyroch záchytných registrov. Nastavením polaroty sa nastavuje citlivosť na zostupnú alebo vzostupnú hranu.[15][14]

### Enhanced Quadrature Encoder Pulse (eQEP) Modul

Tento modul je navrhnutý na spracovanie signálov lineárneho alebo rotačného inkrementálneho enkodéru k získaniu informácií o uhlovej rýchlosti, pozícii a smeru rotácie rotora.



Obrázok 20: Disk rotačného inkrementálneho optického enkodéru

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhx5d/spruhx5d.pdf>

Zdroj svetla inkrementálneho optického enkodéru je namierený na rotačný disk a ďalej preniká štrbinami tohto disku, kde je zachycované dvoma fotodetektormi. Ich pozície sú určené tak, aby fotodetektory generovali dva obdĺžnikové signály QEPA a QEPB navzájom posunuté o 90°. Smer rotácie rotora určíme teda zo znamienka fázového posunu týchto signálov. QEPI signál je generovaný jedenkrát za otáčku a preto môže slúžiť ako indikátor absolútnej pozície.[15]

### Serial Peripheral Interface (SPI)

SPI je sériové periférne rozhranie, ktoré sa používa na komunikácie medzi riadiacim mikrokontrolérom a ostatnými integrovanými obvodmi, v našom prípade medzi kontrolérom F28377 a DRV8301 umiestneným na výkonovej nadstavbe. Riadiaci mikrokontrolér sa nazýva Master. Master

je vždy jeden. Ostatný integrované obvody sa nazývajú Slave. Môže ich byť viacero. Master určuje, s ktorým zariadením bude komunikovať pomocou nastavenia logickej nuly na pine SPISTE (z angl. SPI slave transmit-enable pin). Iné označenia pre tento pin sú SS (z angl. slave select) alebo CS (chip select). Master takisto poskytuje aj hodinový signál SPICLK (z angl. SPI serial-clock pin), s ktorým sa komunikácia synchronizuje. Súčasťou spoločnej zbernice sú piny SPISOMI (z angl. SPI slave-output/master-input) a SPISIMO (SPI slave-input/master-output), pomocou ktorých sa samotná komunikácia uskutočňuje.[15]

### **Periférne prerušenia**

Prerušenie je signál, ktorý spôsobí, že CPU dokončí vykonávanie práve prebiehajúcej inštrukcie, pozastaví vykonávanie nasledujúcich inštrukcií hlavného kódu a začne vykonávať iný blok kódu známy pod názvom interrupt service routine (ISR). Tento proces sa nazýva obsluha prerušenia. Obsluha prerušenia je zvyčajne krátky blok kódu a po jej skončení nastáva návrat do hlavného kódu. C28x CPU má k dispozícii štrnásť línii prerušenia (INT1 až INT14), z ktorých INT13 je spojené s CPU časovačom 1 a INT14 je spojené s CPU časovačom 2. Periférne prerušenia sú následne rozdelené do dvanástich skupín a rozdelené podľa priority. V každej skupine je šestnásť periférnych prerušení, ktoré sú v rámci danej skupiny takisto rozdelené podľa priority.[15][16]

Pre povolenie a konfiguráciu periférnych registrov musíme globálne zakázať prerušenia, povoliť modul prerušení, inicializovať vektorovú tabuľku prerušení. Následne priradíme každému prerušeniu jeho obsluhu prerušenia. Posledným krokom je povoliť jednotlivé prerušenia a povoliť prerušenia globálne.[15][16]

Pre obsluhu prerušení je potrebné uložiť stav určitých registrov CPU. Nasleduje samotná obsluha prerušenia. Po jej skončení sa musí vynulovať príznak prerušenia, aby sa daná obsluha nezavolať ešte raz. Vynulovať sa musí aj príznak prerušenia celej skupiny prerušení. Bez uskutočnenia tohto kroku by nebolo možné zavolať obsluhu prerušenia žiadnemu prerušeniu danej skupiny. Nasleduje návrat z ISR. Prvý a posledný krok je vykonávaný automaticky, ak danú obsluhu prerušenia definujeme použitím kľúčového slova `__interrupt`. [15]

## **24. BOOSTXL-DRV8301**

BOOSTXL-DRV8301 je výkonová nadstavba pre vývojové dosky Texas Instruments. Je určená pre bezsenzorové riadenie trojfázových motorov malých výkonov. Jej súčasťou je trojfázový pre-driver DRV8301, šesť tranzistorov typu N NextFET™ MOSFET, tri LED signalizácie indikujúce stav napájania riadiaceho mikrokontroléra, stav poruchy zariadenia a stav nadprúdu.

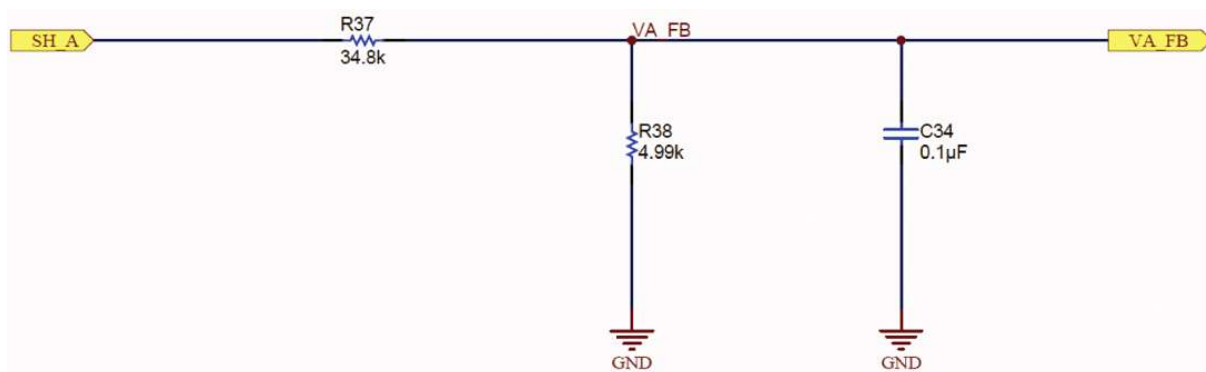


Obrázok 21: BOOSTXL-DRV8301

Zdroj: <http://www.ti.com/tool/BOOSTXL-DRV8301>

## 25. Meranie fázového a napájacieho napätia

Meranie napätia sa realizuje pomocou napäťového deliča a filtračného kondenzátora, ktorý slúži na redukciu vysokých frekvencií pred vstupom do analógovo-digitálneho prevodníka. Situáciu znázorňuje nasledujúci obrázok.



Obrázok 22: Meranie napätia jednej fázy

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/slvu974/slvu974.pdf>

Piny s označením  $VA\_FB$ ,  $VB\_FB$ ,  $VC\_FC$  a  $DC\_V\_FB$  tvoria vstupy do analógovo-digitálneho prevodníka. Zapojenie napäťového deliča pre všetky tri fázy aj pre napájacie napätie je identické. Pre merané napätie bude platiť nasledujúci vzťah:

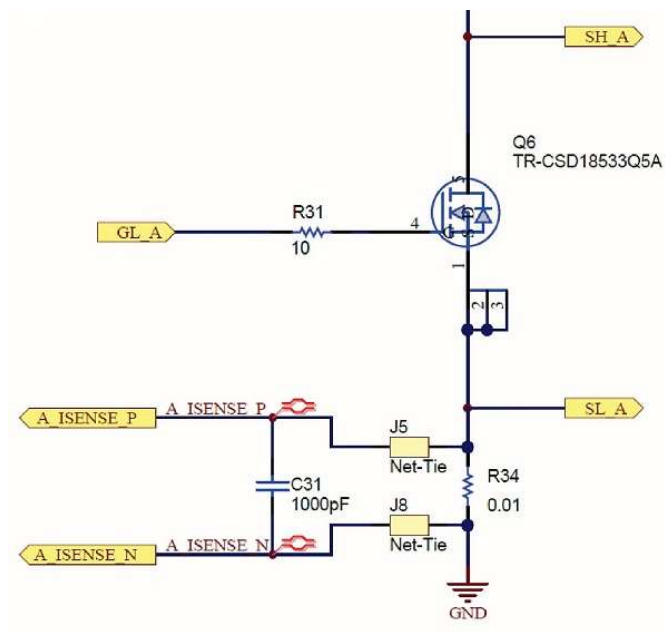
$$U = U_{ADC} \frac{4,99k\Omega + 34,8k\Omega}{4,99k\Omega}$$

$U$  – merané napätie

$U_{ADC}$  – hodnota nameraná AD prevodníkom

## 26. Meranie prúdu

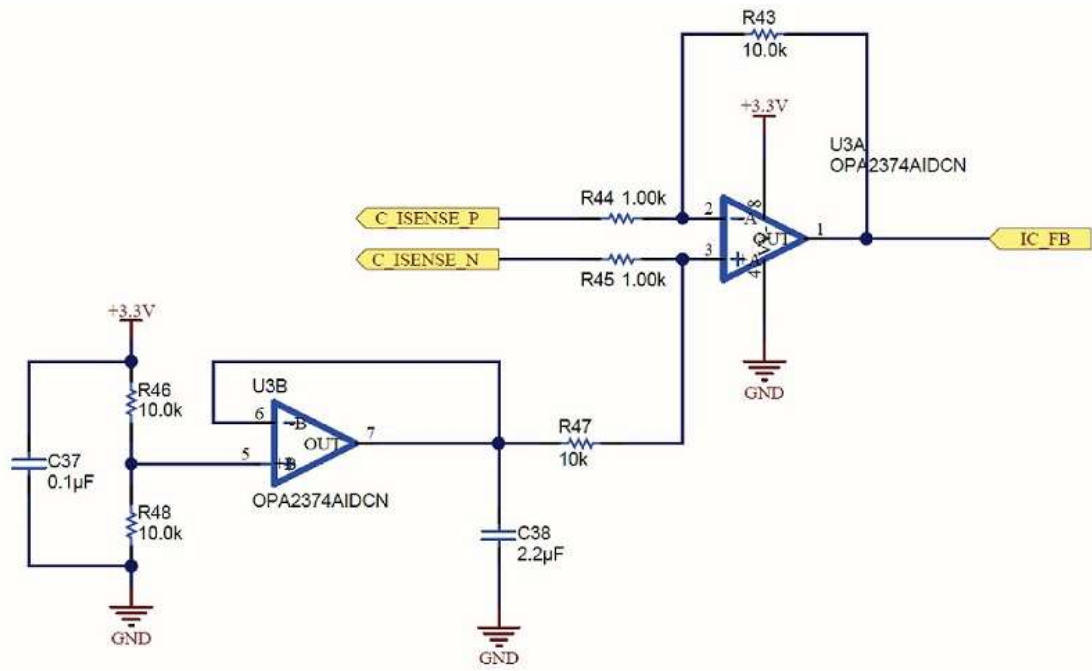
Princíp merania prúdu statorového vinutia na výkonovej nadstavbe vývojovej dosky je zobrazený na nasledujúcich schémach.



Obrázok 23: Princíp merania statorového prúdu 1

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1g/spruhj1g.pdf>





Obrázok 24: Princíp merania statorového prúdu 2

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1g/spruhj1g.pdf>

## 27. PSD regulátor

Pre reguláciu otáčok BLDC motora sa najčastejšie používa proporcionálne sumáčne diferenčný algoritmus, ktorý vychádza z rovnice PID regulátora:

$$y(t) = K \cdot [e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}]$$

Po nahradení integrálu sumou a derivácie diferenciou dostávame vzťah pre PSD regulátor:

$$y_n = K \cdot [e_n + \frac{1}{T_I} \sum_{i=1}^n \frac{e_i + e_{i-1}}{2} \Delta T + \frac{T_d \cdot (e_n - e_{n-1})}{\Delta T}]$$

Následne upravíme tento vzťah do prírastkového tvaru:

$$y_n = y_{n-1} + [K \cdot (1 + \frac{\Delta T}{2T_I} + \frac{T_d}{\Delta T}) \cdot e_n - K \cdot (1 - \frac{\Delta T}{2T_I} + \frac{2T_d}{\Delta T}) \cdot e_{n-1} + K \cdot (\frac{T_d}{\Delta T}) \cdot e_{n-2}]$$

Pre reguláciu otáčok sa často používajú PS regulátory, pre ktoré platí nasledujúci vzorec v prírastkovom tvare:

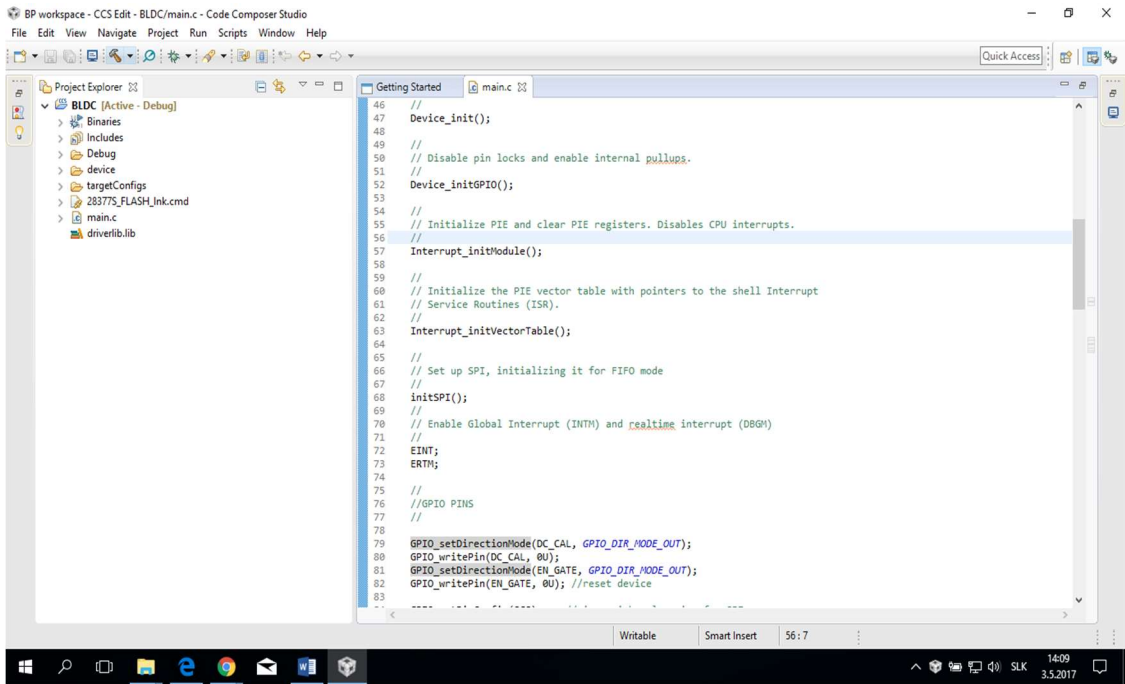
$$y_n = y_{n-1} + [K \cdot (1 + \frac{\Delta T}{2T_I}) \cdot e_n - K \cdot (1 - \frac{\Delta T}{2T_I}) \cdot e_{n-1}]$$

## 28. Vývojové prostriedky pre mikrokontroléry

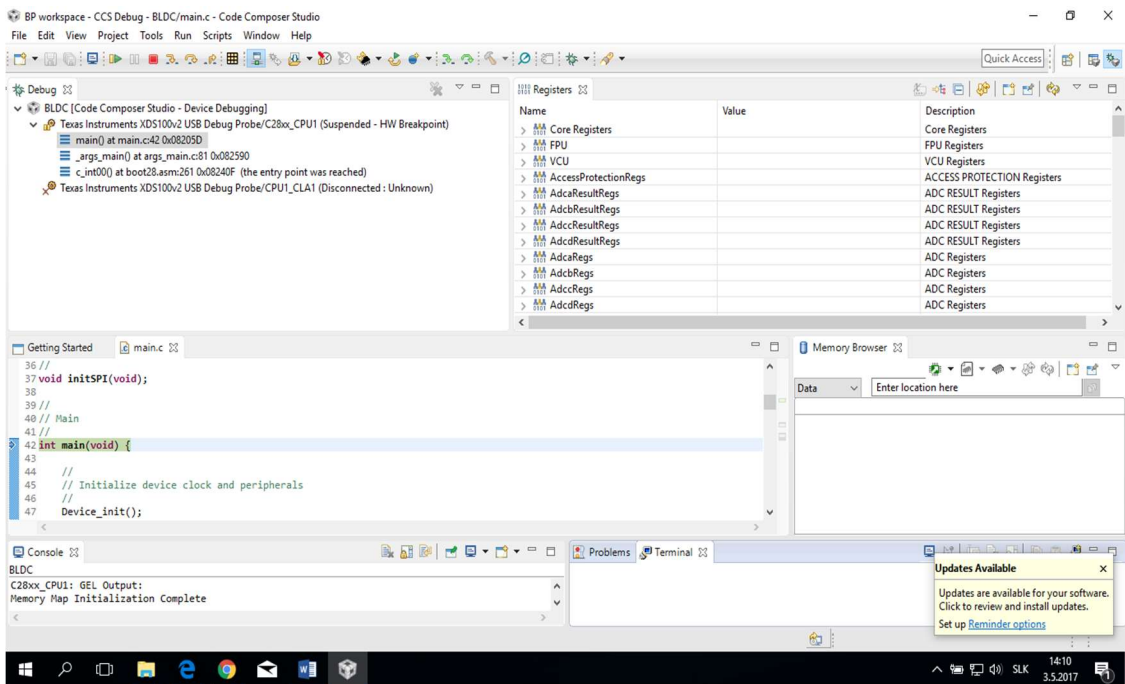
Pre vývoj aplikácií mikrokontrolérov spoločnosti Texas Instruments máme k dispozícii viacero programátorských prostredí ako Code Composer Studio, Matlab, Keil, IAR Embedded Workbench a Energia. Súhrn informácií, dát potrebných pre vývoj zariadení môžeme nájsť v TI Resource Explorer, ktorý je dostupný na webových stránkach Texas Instruments alebo ako súčasť Code Composer Studio. Súčasťou webových stránok spoločnosti Texas Instruments umiestnených na adrese *dev.ti.com* je aj Code Composer Studio Cloud so základnými funkciami, TI PinMux, UniFlash, GUI Composer, BoosterPack Checker a mnoho ďalších softwarov uľahčujúcich prácu s mikrokontrolérmi a vývojovými doskami. TI PinMux poskytuje užívateľské grafické rozhranie pre návrh a konfiguráciu periférií a ich prepojenie s vstupno výstupnými pinmi zariadenia. GUI Composer je nástroj pre tvorbu grafického užívateľského rozhrania, ktoré interaguje s danou aplikáciou. BoosterPack Checker slúži na získanie informácií o kompatibilitate vývojovej dosky s potrebnou nadstavbou.

Energia je otvorená vývojová platforma založená na jazyku Wiring naprogramovaná v Jave. Poskytuje podporu pre väčšinu vývojových dosiek. Základ návrhu programu v Energii tvoria dve funkcie *void setup(void)* a *void loop(void)*. Vo funkcii *void setup(void)* sa uskutočňuje inicializácia potrebných periférií, deklarácia konštánt a premenných. Samotný program tvorí funkcia *void loop(void)*. Pri návrhu softwaru si užívateľ vystačí so základnými znalosťami hardwaru, pretože ďalšie funkcie poskytujú vyšší stupeň jeho abstrakcie. Funkcie sú napísané v jazyku C/C++ a programátor si ich môže upraviť podľa svojich potrieb. Energia je aj súčasťou Code Composer Studio.

Code Composer Studio je navrhnuté pre podporu TI mikrokontrolérov. Obsahuje C/C++ compiler, linker, editor a debugger. Posledné verzie sú založené na Eclipse IDE. Užívateľské rozhranie tvoria dva módy Edit mód a Debug mód. Edit mód slúži na úpravu a vývoj zdrojového kódu a Debug mód slúži na odladenie danej aplikácie na zariadení. V debug móde máme možnosť nahrat' zdrojový kód do zariadenia, spustiť a pozastaviť program. Takisto môžeme vidieť a zmeniť hodnoty premenných, hodnoty uložené v registroch a v pamäti zariadenia a mnoho iných funkcií potrebných pre vývoj danej aplikácie. Priečink daného projektu obsahuje zdrojové súbory, knižnice, súbory obsahujúce nastavenia špecifické pre daný projekt. Súbor v priečinku s názvom *targetConfigs* (xxx.ccxml) obsahuje informácie potrebné pre nadviazanie spojenia s mikrokontrolérom. Linker command file (.cmd) špecifikuje, akým spôsobom sú dáta a kód nahrané do pamäte zariadenia. Po skompilovaní programu dostaneme vygenerovaný súbor s koncovkou .out. Tento súbor je nahraný do pamäte mikrokontroléru. Priečink s označením ako *workspace* slúži na zoskupenie navzájom súvisiacich projektov.



Obrázok 25: Code Composer Studio v edit móde



Obrázok 26: Code Composer Studio v debug móde

## 29. Prístup k periférnym registrom v jazyku C

Zápis špecifickej hodnoty do daného registra sa v jazyku C uskutočňuje pomocou ukazovateľov (pointer). Pointer slúži na uloženie adresy dátovej štruktúry. Zápis následnej vykonáme tak, že na adresu registra v pamäti zapíšeme žiadanú hodnotu. V tradičnom prístupe používame direktívu *#define*. Ukazovateľ na daný register následne definujeme nasledovne:

```
#define meno_registra (volatile unsigned int *)0xadresa_registra
```

Následne vykonáme zápis hodnoty nasledujúcim spôsobom:

```
*meno_registra = 0xhodnota
```

V praxi sa stretáme s rôznou obmenou tohto prístupu. Tento prístup má výhodu v jeho jednoduchosti. Nevýhoda je v mnohých prípadoch generácia menej efektívneho kódu. V štruktúrnom prístupe využívame štruktúry jazyka C. Ich princíp spočíva v tom, že najprv definujeme perifériu ako štruktúru a následne register danej periférie ako člen tejto štruktúry. Napríklad zápis logickej jednotky na výstupný GPIO pin sa vykoná nasledujúcim spôsobom:

```
GpioDataRegs.GPADAT.bit.GPIO1 = 1
```

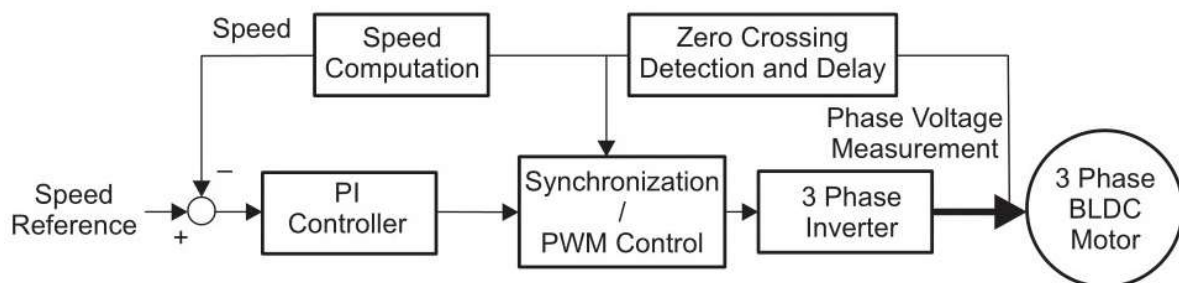
V praxi sa stretáme s rôznou implementáciou tohto prístupu. Výhody sú generácia efektívnejšieho kódu a jednoduchšia manipulácia jednotlivých bitov.

## 30. Peripheral Driver Library

Pri programovaní mikrokontroléra F28377 máme k dispozícii Peripheral Driver Library. Táto knižnica slúži pre prístup k periférnym registrom. Je dostupná v dvoch modeloch, ktoré sa môžu kombinovať. V modeli priameho prístupu k registrom sa hodnoty vpisujú priamo do periférnych registrov. Tento prístup generuje efektívnejší a menší kód. Programátor však musí mať detailné znalosti o každom registre a bitovom poli. Software Driver Model tieto podrobné znalosti nevyžaduje. Programátor má k dispozícii funkcie, ktoré vo svojej aplikácii používa. Ďalšou výhodou je čitateľnosť a prehľadnosť daného kódu. Vývoj aplikácie použitím tohto modelu je menej časovo náročný. Nevýhoda je generácia menej efektívneho kódu.[17]

## 31. Návrh algoritmu pre riadenie otáčok BLDC motora blokom 595-BOOSTXL-DRV8301

Výkonová nadstavba 595-BOOSTXL-DRV9301 je určená pre pohon BLDC motorčekov malých výkonov. Takisto motory daných výkonov sa využívajú väčšinou vo vysokootáčkových aplikáciách. Z týchto dôvodov je pre návrh algoritmu regulácie otáčok BLDC motora vhodná metóda integrácie indukovaného napätia. Keďže zadaním danej úlohy bolo riadenie otáčok motorčeka malého výkonu s nízkym momentom, bolo vybrané regulačné schéma, kde vstup tvorí žiadaná hodnota uhlovej rýchlosti. Ide o reguláciu so zápornou spätnou väzbou, pri ktorej od hodnoty žiadanej uhlovej rýchlosti je odčítavaná hodnota skutočnej uhlovej rýchlosti rotora. Žiadaná uhlová rýchlosť môže byť zadávaná potenciometrom alebo priamym zápisom hodnoty globálnej premennej prostredníctvom vývojového prostredia Code Composer Studio alebo využitím grafického rozhrania GUI Composer. Vstup do PS regulátora je vypočítaná regulačná odchýlka a výstupom strieda pulzne šírkového modulátora, pomocou ktorej ovládame veľkosť napätia na svorkách BLDC motora. Regulačné schéma je zobrazené na nasledujúcom obrázku.



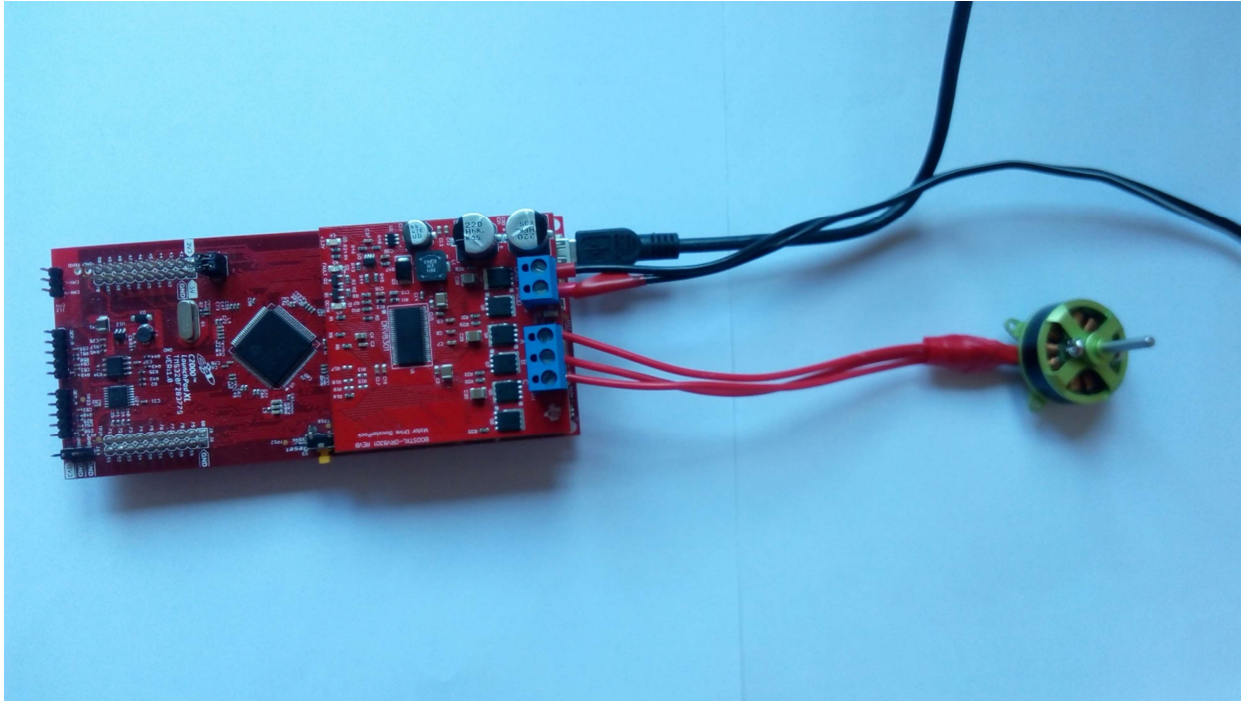
Obrázok 27: Blokové regulačné schéma BLDC motora

Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>

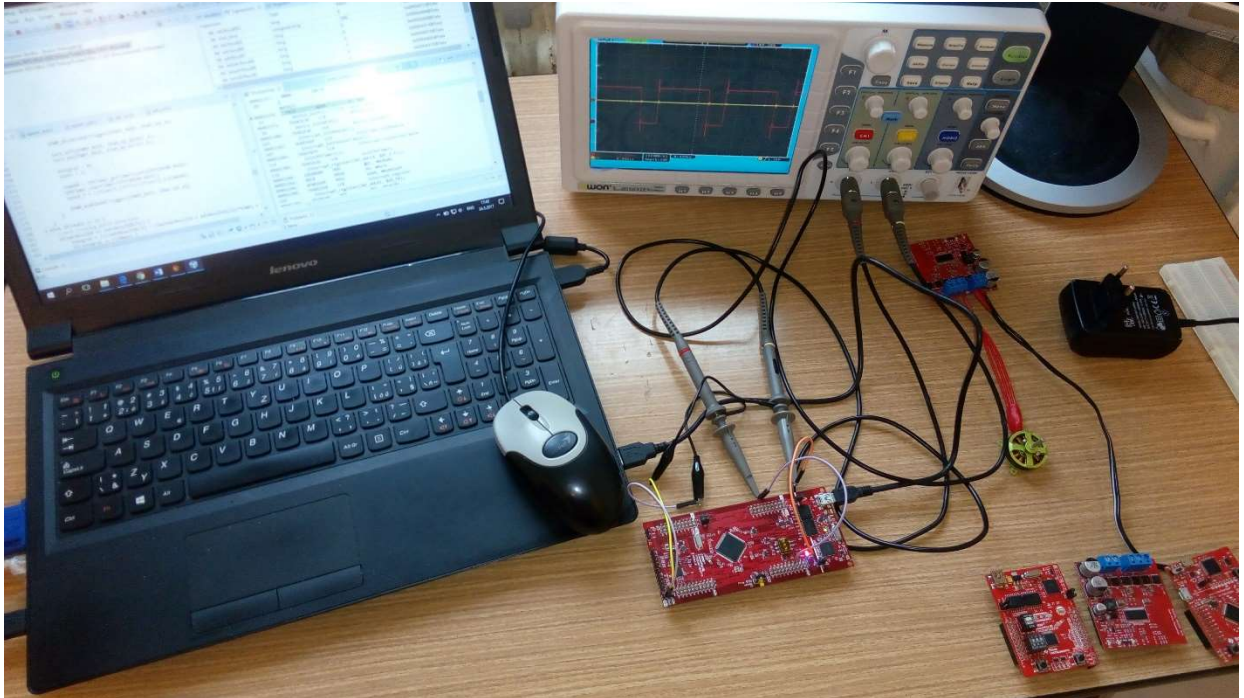
Metóda integrácie indukovaného napätia je určená pre reguláciu pri vysokých otáčkach. Pri nízkych otáčkach je veľkosť indukovaného napätia nízka, je ťažké ho zaznamenať a daný algoritmus nefunguje správne. Z týchto dôvodov sa rozbeh motora uskutočňuje v otvorenej regulačnej slučke. Takisto je dôležité dostať motor z neznámej do známej pozície. Pre prekonanie počiatočného dynamického a záťažového momentu sa fáze exitujú napätím s konštantnou striedou a rotoru sú vnucované otáčky, ktorých frekvencia sa postupne zvyšuje. Nastáva rozbeh a po dosiahnutí rýchlosti, pri ktorej je možné detekovať indukované napätie, opustí sa slučka štartujúceho algoritmu. Na detekciu prechodu indukovaného napätia nulou prichádza do úvahy použiť komparátor alebo analógovo-digitálny

prevodník. Z dôvodu zapojenia vývodov svoriek motora k vstupným pinom analógovo-digitálneho prevodníka sa použila druhá možnosť. Vstupný signál indukovaného napätia je vzorkovaný v čase a následne kvantovaný v amplitúde a porovnávaný s polovicou napájacieho napätia. Modul EPWM1, EPWM2, EPWM3 a EPWM4 je nakonfigurovaný tak, aby spúšťal prevod analógovo-digitálneho prevodníka teda modul SOC. Po skončení prevodu sa nastaví príznak prerušenia a program prejde k obsluhu prerušenia. Indukované napätie sa porovná s polovicou napájacieho napätia a ak je zaznamenaný jeho prechod nulou, začína sa jeho integrácia podľa času. Pre integráciu sa používa obdĺžniková metóda. Po dosiahnutí nastavenej hodnoty nastáva komutácia a vzorkovanie signálu ďalšej fázy. Nastavená hodnota bola najprv určená výpočtom z parametrov daného motora, v aplikácii potom však upravená experimentálne. Výpočet uhlovej rýchlosti sa takisto uskutočňuje bezsenzorovo pomocou merania doby medzi dvoma komutáciami. Blok PS regulátora je navrhnutý podľa rovnice odvodené pre PS regulátor. Jeho hodnoty sa vo väčšine prípadov určujú experimentálne a podľa potreby danej aplikácie. Navrhnutý kód je flexibilný, pretože je ho možné použiť pre viacero aplikácií a rôzne druhy BLDC motorov malých výkonov. Nastavenie parametrov pre daný typ motora a pre danú aplikáciu uskutočňujeme pomocou zmeny globálnych premenných a *#define* direktív v súbore *main.c*.





Obrázok 28: Zapojenie BLDC motora a bloku 595-BOOSTXL-DRV8301



Obrázok 29: Fotografia pracoviska

## 32. Záver

Prvá časť bakalárskej práce je venovaná popisu BLDC motora, jeho konštrukcie a vysvetleniu princípu jeho funkcie. Ďalšiu časť tvorí štúdium odbornej literatúry týkajúcej sa jeho riadenia. Tieto znalosti boli následne využité pri výbere a návrhu vhodného algoritmu pre bezsenzorovú reguláciu otáčok BLDC motora malého výkonu. Navrhnutá metóda sa nazýva metóda pomocou integrácie indukovaného napätia a algoritmus bol napísaný pre mikrokontrolér F28377 v jazyku C s využitím driverlib knižnice poskytovanej spoločnosťou Texas Instruments. Súčasťou práce je aj popis vývojových programovacích prostredí a nástrojov pre tvorbu programu pre mikrokontroléry spoločnosti Texas Instruments. Pre realizáciu zadania tejto práce bolo zvolené prostredie s názvom Code Composer Studio. Podstatná časť je venovaná vývojovým doskám a mikrokontrolérom spoločnosti Texas Instruments a preskúmaní možností, ktoré poskytujú pre návrh aplikácií pre pohony BLDC motorov. Vývojové dosky a ich nadstavby poskytujú zjednodušenie práce pri návrhu danej aplikácie. Sú veľmi vhodnou pomôckou pri výuke a štúdiu odborných predmetov v elektrotechnike. Táto bakalárska práca môže poslúžiť aj ako rýchly návod pre tých, ktorí by chceli začať vývoj aplikácií pre vývojové dosky spoločnosti Texas Instruments.



### 33. Zoznam použitej literatúry

- [1] Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc. *Motory s elektronickou komutáciou pre mechatronické aplikácie* [online]. © 2007 [cit. 2016-12-6]. Zdroj: [http://www.uzimex.cz/soubory/20080910\\_tat\\_2008-09.pdf](http://www.uzimex.cz/soubory/20080910_tat_2008-09.pdf)
- [2] Bilal Akin and Manish Bhardwaj *Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors* [online]. © 2013 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq6/sprabq6.pdf>
- [3] Bilal Akin and Manish Bhardwaj *Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors* [online]. © 2013 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>
- [4] Doc. Ing. Valéria Hrabovcová, PhD., Ing. Ladislav Janoušek, Ing. Pavol Rafajdus, Ing. Miroslav Ličko, PhD. *Moderné elektrické stroje*. Vydala Žilinská univerzita v Žiline/EDIS – vydavateľstvo ŽU, 2001. ISBN 80-7100-809-5
- [5] Doc. Ing. Petr Voženílek, CSc., doc. Ing. Vladimír Novotný, CSc., doc. Ing. Pavel Mindl, CSc. *Elektromechanické měniče*. Vydalo České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04875-7
- [6] Ing. Jaroslav Lepka, Ing. Pavel Grasblum, Phd *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory* [online]. © 2011 [cit. 2017-02-27]. Zdroj: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_09\\_1111.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf)
- [7] Daniel Torres *Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function* 2008 [online]. © 2008 [cit. 2017-03-3]. Zdroj: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf>
- [8] Libor Prokop, Leos Chalupa *3/Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x* [online]. © 2005 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1914.pdf>
- [9] Ing. Vít Hlinovský, CSc. *Elektrické pohony pro automatizaci a robotiku – Elektricky komutovaný motor – IV*. Prednáška predmetu A3B14EPR, ČVUT FEL, Praha, 2015
- [10] Ing. Pavel Koblík, Ph.D., prof. Ing. Jirí Pavelka, DrSc. *Elektrické pohony a jejich řízení* Vydalo České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0
- [11] Bilal Akin and Manish Bhardwaj *Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor* [online]. © 2013 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq3/sprabq3.pdf>
- [12] *TI LaunchPad development kits* [online]. © 2016 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://www.ti.com/lstds/ti/tools-software/launchpads/launchpads.page#performance>

- [13] *LAUNCHXL/F28377S overview* [online]. © 2016 [cit. 2017-03-2]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/sprui25c/sprui25c.pdf>
- [14] *The TMS320F2837xD Architecture: Achieving a New Level of High Performance* [online]. © 2016 [cit. 2017-03-28]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprt720/sprt720.pdf>
- [15] *TMS320F2837xS Delfino Microcontrollers Technical Reference Manual* [online]. © 2014 [cit. 2017-03-28]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhx5d/spruhx5d.pdf>
- [16] *TMS320F2837xS Delfino Microcontrollers* [online]. © 2014 [cit. 2017-03-28]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28377s.pdf>
- [17] *F2837xS Peripheral Driver Library 1.01.00.00* [online]. © 2018 [cit. 2017-03-28]. Zdroj: [http://dev.ti.com/tirex/content/tirex-product-tree/C2000Ware\\_1\\_00\\_01\\_00\\_Device/device\\_support/f2837xs/docs/F2837xS\\_DriverLib\\_Users\\_Guide.pdf](http://dev.ti.com/tirex/content/tirex-product-tree/C2000Ware_1_00_01_00_Device/device_support/f2837xs/docs/F2837xS_DriverLib_Users_Guide.pdf)
- [17] *F2837xS Firmware Development Package* [online]. © 2017 [cit. 2017-03-28]. Zdroj: [http://dev.ti.com/tirex/content/tirex-product-tree/C2000Ware\\_1\\_00\\_01\\_00\\_Device/device\\_support/f2837xs/docs/F2837xS\\_DEV\\_USER\\_GUIDE.pdf](http://dev.ti.com/tirex/content/tirex-product-tree/C2000Ware_1_00_01_00_Device/device_support/f2837xs/docs/F2837xS_DEV_USER_GUIDE.pdf)
- [18] *DRV8301 Three-Phase Gate Driver With Dual Current Shunt Amplifiers and Buck Regulator* [online]. © 2016 [cit. 2017-04-22]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8301.pdf>
- [19] *BOOSTXL/DRV8301 Hardware User's Guide* [online]. © 2013 [cit. 2017-04-22]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/slvu974/slvu974.pdf>
- [20] *InstaSPIN-FOC<sup>TM</sup> and InstaSPIN-MOTION<sup>TM</sup>* [online]. © 2017 [cit. 2017-04-22]. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/ug/spruhj1g/spruhj1g.pdf>