

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROTECHNIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Implementace řízení BLDC motoru**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří OTRUBA**  
Osobní číslo: **E13N0043P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**  
Název tématu: **Implementace řízení BLDC motoru**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

Cílem práce je implementovat řízení BLDC motoru do signálového procesoru.

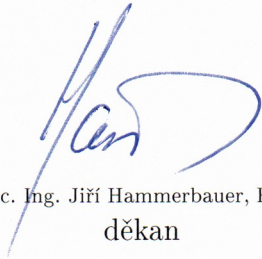
1. Popište vlastnosti a regulační možnosti pohonu s BLDC motorem.
2. Provedte základní simulační ověření navrženého způsobu řízení.
3. Implementujte řízení do DSP a ověřte vlastnosti řízení na laboratorním prototypu.
4. Dle pokynů vedoucího proveďte analýzu možností bezsenzorového řízení.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:

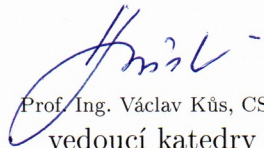
- 1. Databáze <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.**
- 2. Dokumentace výrobce Texas Instruments.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Vošmik, Ph.D.**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem, simulací a implementací algoritmů řízení elektronicky komutovaného BLDC motoru s 6-fázovou komutační strategií. Součástí této práce je rozbor BLDC motoru, možností jeho řízení, technik spínání a způsobů detekce polohy rotoru. V rámci simulace pohonu s BLDC motorem jsou implementovány komplementární a nezávislé techniky spínání měniče v bipolární a unipolární variantě. Pro bezsenzorovou detekci polohy rotoru byla implementována metoda sledování spřaženého magnetického toku permanentních magnetů vycházející z matematického modelu třífázového BLDC motoru. Nasimulované algoritmy řízení pro sensorový a bezsenzorový způsob detekce polohy rotoru motoru jsou následně implementovány do DSP procesoru a ověřeny na experimentálním laboratorním prototypu pohonu s BLDC motorem.

## Klíčová slova

BLDC motor, sensorová, bezsenzorová, detekce polohy rotoru, Hallovy sondy, 6-fázová komutace, komutační tabulka, komplementární spínání, nezávislé spínání, bipolární PWM, unipolární PWM, DSP, magnetický tok, indukované napětí, regulace proudu, regulace rychlosti, regulace momentu, dopředná vazba.

## **Abstract**

This thesis is concerned with design, simulation and implementation of electronically commutated BLDC motor control algorithms with 6-phase commutation strategy. Part of this thesis is the analysis of BLDC motor, its control options, switching techniques and methods of the rotor position detection. Within the simulation of BLDC motor drive are implemented complementary and independent switching techniques of inverter in bipolar and unipolar manner. For sensorless rotor position detection is implemented magnetic flux observing method based on a mathematical model of three phase BLDC motor. Simulated control algorithms with sensed and sensorless methods for the rotor position detection is then implemented into DSP processor and verified on experimental laboratory prototype of BLDC motor drive.

## **Key words**

BLDC motor, sensor, sensorless, rotor position detection, Hall sensor, 6-step commutation, commutation table, complementary switching, independent switching, bipolar PWM, unipolar PWM, DSP, magnetic flux, back electromotive force, current control, speed control, torque control, feed forward.

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

**V Plzni dne 10.5.2015**

**Jiří Otruba**

## Obsah

<b>ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>POHON S BLDC MOTOREM.....</b>	<b>11</b>
2.1 BLDC MOTOR.....	11
2.2 TŘÍFÁZOVÝ NAPĚŤOVÝ STRÍDAČ.....	14
2.3 ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	15
<b>DETEKCE POLOHY A KOMUTACE.....</b>	<b>16</b>
3.1 DETEKCE POLOHY ROTORU POMOCÍ HALLOVÝCH SENZORŮ.....	16
3.2 6-FÁZOVÁ KOMUTACE.....	17
3.2.1 Komutační tabulka.....	18
3.2.2 Komutační vektory.....	20
3.3 BEZSENZOROVÁ DETEKCE POLOHY ROTORU.....	21
3.3.1 Metody vycházející z indukovaného napětí.....	21
3.3.2 Metody vycházející z matematického modelu.....	22
<b>PWM MODULACE A ZPŮSOBY SPÍNÁNÍ.....</b>	<b>24</b>
4.1 KOMPLEMENTÁRNÍ SPÍNÁNÍ.....	25
4.2 NEZÁVISLÉ SPÍNÁNÍ.....	26
<b>IMPLEMENTACE ŘÍZENÍ DO SIMULACE.....</b>	<b>28</b>
5.1 SENZORICKÉ ŘÍZENÍ.....	28
5.1.1 Komplementární spínání.....	29
5.1.2 Nezávislé spínání.....	30
5.2 BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ – SLEDOVÁNÍ MAGNETICKÉHO TOKU.....	32
<b>IMPLEMENTACE ŘÍZENÍ DO DSP.....</b>	<b>36</b>
6.1 SENZORICKÉ ŘÍZENÍ.....	36
6.1.1 Regulační schéma.....	36
6.1.2 Vývojový diagram.....	37
6.1.3 Regulace rychlosti BLDC motoru.....	40
6.1.4 Regulace momentu BLDC motoru.....	42
6.1.5 Regulace proudu v meziobvodu.....	43
6.2 BEZSENZOROVÉ ŘÍZENÍ.....	45
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>49</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>51</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratk

<i>ADC</i>	analogově digitální převodník
<i>BLDC</i>	bezkartáčový stejnosměrný motor
<i>DAC</i>	digitálně analogový převodník
<i>DMA</i>	přímý přístup do paměti procesoru
<i>DSP</i>	digitální signálový procesor
<i>GPIO</i>	univerzální vstup/výstup
<i>ISR</i>	rutina obsluhy přerušení
<i>PMSM</i>	synchronní stroj s permanentními magnety
<i>PWM</i>	pulzní šířková modulace
$i_a, i_b, i_c$	okamžité hodnoty fázových proudů
$I_d$	střední hodnota stejnosměrného proudu střídače
$I^*$	požadavek na momentotvorný proud
$K_e$	konstanta indukovaného napětí
$L$	rozptylová indukčnost vinutí motoru
$M_a$	akcelerační moment
$M$	produkovaný elektromagnetický moment
$M_z$	zátěžný moment
$p$	počet pól-párů
$P$	činný výkon
$t$	čas
$U_d$	střední hodnota stejnosměrného napětí v meziobvodu střídače
$u_a, u_b, u_c$	okamžité hodnoty fázových napětí



---

$U_{comp}$	korekční zpětná vazba estimátoru magnetického toku
$u_{ia}, u_{ib}, u_{ic}$	okamžité hodnoty fázových indukovaných napětí
$U_i$	amplituda indukovaného napětí
$U_{FF}$	dopředná vazba
$z$	poměrné sepnutí
$\theta$	mechanický úhel natočení rotoru
$\Psi_s$	celkový magnetický tok
$\Psi_{PM}$	spřažený magnetický tok od permanentních magnetů
$\omega_m$	mechanická rychlost
$\omega^*$	požadavek na rychlost

## 1 Úvod

BLDC motory s permanentními magnety jsou v poslední době čím dál tím více používány v různých odvětvích a aplikacích. Hlavním důvodem je jejich vysoká účinnost, vysoký točivý moment, malé rozměry, spolehlivost a bezúdržbovost. Pro správné řízení BLDC motoru je nezbytné znát polohu rotoru. Konvenční pohony s BLDC bývají vybaveny diskrétními senzory polohy (Hallové senzory). Pohon vybavený těmito senzory je implementačně jednoduchý s malými nároky na výpočetní výkon řídicího DSP. Na druhou stranu tyto senzory snižují spolehlivost a přinášejí nároky na jejich mechanické umístění. Vysoké nároky na spolehlivost, úsporu místa a nákladů některých aplikací vyžaduje nasazení bezsenzorových metod detekce polohy rotoru.

U klasických stejnosměrných strojů je komutace proudů zajištěna mechanickým komutátorem, který je součástí stroje. Funkci komutátoru u BLDC motoru zastupuje třífázový napěťový střídač, který je nezbytný pro napájení a komutaci třífázového BLDC motoru. Použití MOSFET tranzistorů v nízko napěťových aplikacích navíc snižuje ztráty a umožňuje použití vyšších modulačních kmitočtů.

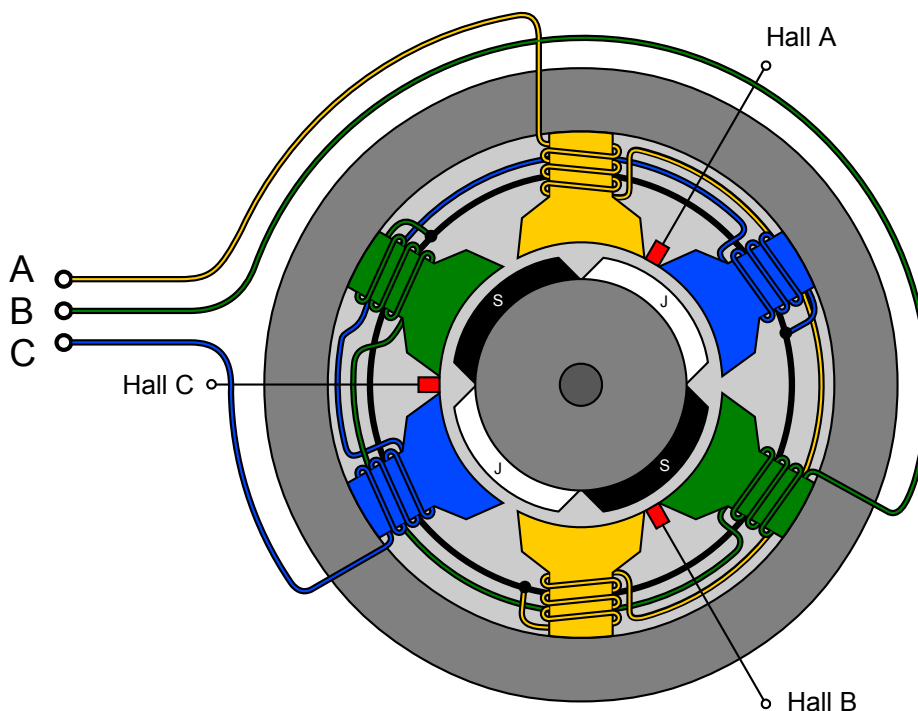
Práce je rozdělena do třech hlavních částí a při realizaci této práce bylo použito metodika, návrh – simulace – implementace. První část práce se zabývá rozborem BLDC motoru, možnostmi jeho řízení, způsoby detekce polohy rotoru a určením komutační tabulky pro 6-fázovou komutační strategii. V další části jsou navržené algoritmy ověřeny pomocí počítačové simulace pohonu s BLDC motorem. Poslední část této práce popisuje implementaci řídicích algoritmů sensorového a bezsenzorového způsobu detekce rotoru BLDC motoru do DSP procesoru experimentálního laboratorního prototypu.

## 2 Pohon s BLDC motorem

Brushless direct current (BLDC) motor je bezkartáčový elektronicky komutovaný synchronní stroj s permanentními magnety. BLDC motor využívá stejnosměrné napájení a mechanický komutátor nahrazuje napěťový střídač. Spínací impulzy pro řízení napěťového střídače obstarává řídicí jednotka s DSP procesorem.

### 2.1 BLDC motor

Stator BLDC motoru tvoří třífázové vinutí, které bývá běžně spojené do hvězdy viz Obrázek 1. Počet pólů rotoru může být různý, se zvyšujícím se počtem pólů roste moment a klesá maximální rychlost motoru. Rotor BLDC motoru tvoří hřídel s permanentními magnety, které vytváří konstantní magnetický tok a budí tak motor. Díky permanentním magnetům jsou motory kompaktnější, mají vysokou účinnost a disponují vysokou hustotou točivého momentu na jednotku hmotnosti. Dalším parametrem, který určuje točivý moment motoru je materiál, ze kterého jsou permanentní magnety rotoru vyrobeny. Čím vyšší je hustota magnetického toku permanentních magnetů, tím vyšší je i točivý moment motoru. Z tohoto důvodu se využívají permanentní magnety na bázi vzácných zemin, zejména Neodymu ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ). [1][2]

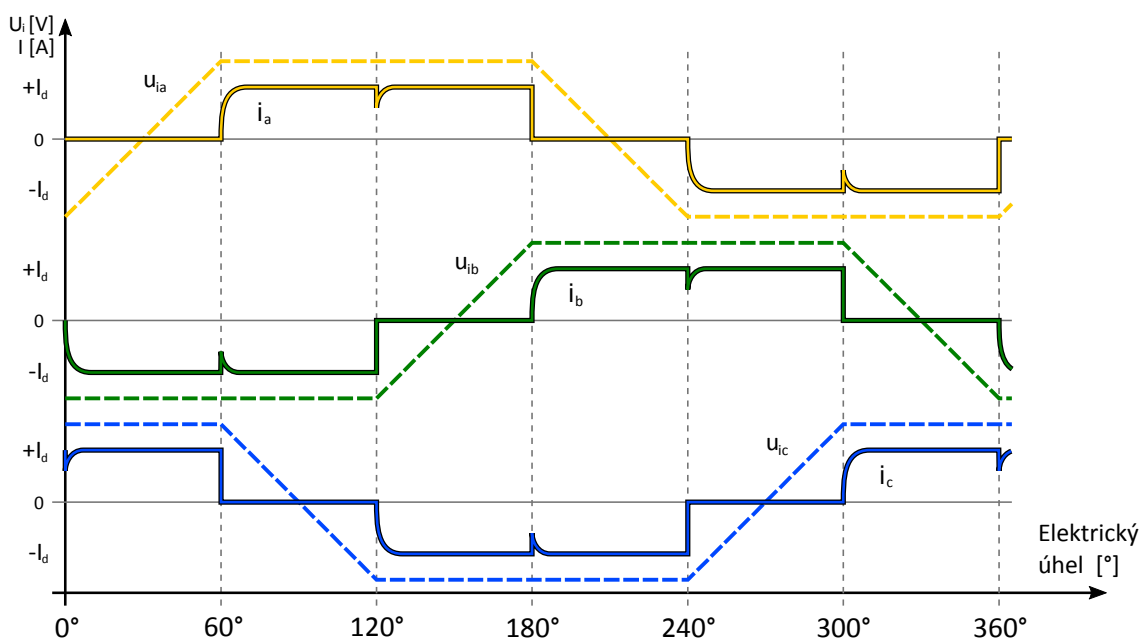


Obrázek 1: Vnitřní schéma BLDC motoru

Podle tvaru průběhu indukovaného napětí (Back-EMF), lze elektronicky komutované motory s permanentními magnety dělit na dva základní typy. Indukované napětí BLDC motoru je napětí, indukované do nezátíženého statorového vinutí vlivem otáčení permanentních magnetů rotoru. Průběh tohoto napětí může mít trapezoidní nebo sinusový průběh a dělí se následovně:

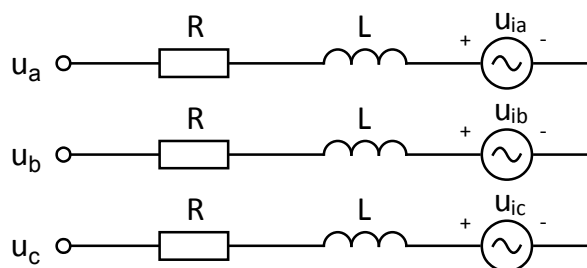
- trapezoidní – brushless direct current motor (BLDC);
- sinusové – permanent magnet synchronous machine (PMSM).

Amplituda indukovaného napětí je úměrná úhlové rychlosti otáčení rotoru. Tvar průběhu napětí se s rychlostí otáčení nemění, je závislý pouze na poloze rotoru, rozložení statorového vinutí a tvaru magnetického pole motoru. [3][4][5]



Obrázek 2: Trapezoidní tvar průběhu indukovaného napětí BLDC motoru

Matematický model vychází z náhradního schématu třífázového motoru viz Obrázek 3. Za předpokladu, že je motor plně symetrický lze pro zjednodušení uvažovat stejný odpor  $R$  a stejnou indukčnost vinutí  $L$  pro všechny fáze motoru. [6][7]



Obrázek 3: Náhradní schéma BLDC motoru

Napětí pro jednotlivé fáze třífázového BLDC motoru jsou dána rovnicemi:

$$\begin{aligned} u_a &= R \cdot i_a + L \frac{di_a}{dt} + u_{ia} \\ u_b &= R \cdot i_b + L \frac{di_b}{dt} + u_{ib} \\ u_c &= R \cdot i_c + L \frac{di_c}{dt} + u_{ic}, \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

kde  $u_a$ ,  $u_b$  a  $u_c$  jsou fázová napětí motoru,  $i_a$ ,  $i_b$  a  $i_c$  jsou fázové proudy motoru a  $u_{ia}$ ,  $u_{ib}$  a  $u_{ic}$  jsou indukovaná napětí v jednotlivých fázích motoru. Indukované napětí je funkcí polohy rotoru neboli úhlu natočení  $\theta$ :

$$\begin{aligned} u_{ia} &= U_i \cdot f_a(\theta) \\ u_{ib} &= U_i \cdot f_b(\theta) \\ u_{ic} &= U_i \cdot f_c(\theta), \end{aligned} \quad (2.1.2)$$

kde  $U_i$  je velikost amplitudy indukovaného napětí.

Amplituda indukovaného napětí je přímo úměrná rychlosti otáčení rotoru:

$$U_i = K_e \cdot \omega_m, \quad (2.1.3)$$

kde  $K_e$  je konstanta indukovaného napětí a  $\omega_m$  je mechanická úhlová rychlost rotoru. [6][7]

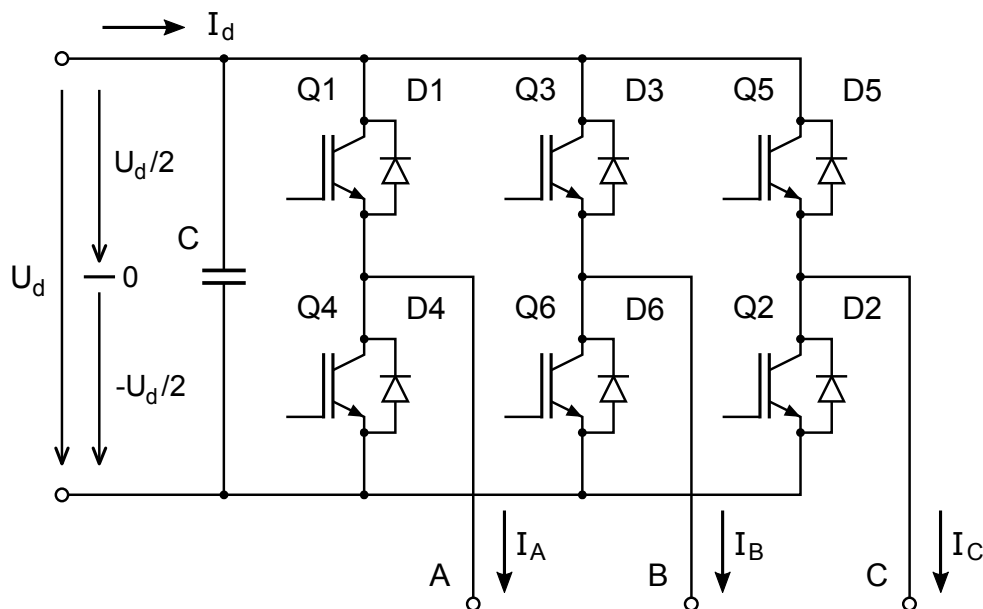
Konstantu  $K_e$  motoru lze určit změřením amplitudy a periody sdruženého napětí nezatíženého motoru, který se otáčí konstantní rychlostí. Určení konstanty indukovaného napětí je dán rovnicí:

$$K_e = \frac{U_{pk-pk}}{2\sqrt{3} \cdot \omega_{el}} = \frac{U_{pk-pk} \cdot T_{el}}{4\pi\sqrt{3}}. \quad (2.1.4)$$

## 2.2 Třífázový napěťový střídač

Třífázový napěťový střídač je měnič napětí, který slouží k napájení třífázové zátěže střídavým napětím s proměnnou amplitudou a frekvencí. Na vstupní stejnosměrnou stranu střídače je připojen zdroj napětí  $U_d$ , tím může být například usměrňovač nebo pulzní měnič s kondenzátorovou baterií. Napěťový střídač umožňuje přenos činného výkonu oběma směry při stejné polaritě napětí  $U_d$ . Z toho vyplývá, že smysl vstupního proudu střídače  $I_d$  se mění se smyslem přenášeného činného výkonu. Napěťový střídač tak může pracovat jak ve střídačovém tak i usměrňovačovém chodu. Pro řízení amplitudy a frekvence výstupního napětí střídače se nejčastěji používá pulzně šířková modulace (PWM), která je blíže popsána v kapitole 4. [6][8]

Třífázový střídač (Obrázek 4) tvoří šestice vypínatelných součástek například IGBT nebo MOSFET tranzistorů s antiparalelně připojenými zpětnými diodami, které zajišťují cestu pro rekuperaci a případné záporné induktivní proudy. Součástky tvoří tři nezávislé větve pro napájení jednotlivých fází zátěže. Každou větev střídače tvoří dva spínače nad sebou, které jsou řízeny řídicími obvody pro spínací součástky zajišťující bezpečné sepnutí součástek. Signály pro sepnutí jednotlivých spínačů střídače jsou přiváděny z řídicího procesoru. [6][8]



Obrázek 4: Třífázový napěťový střídač

Aby mohl obvodem střídače procházet proud, je nutné sepnout zároveň alespoň jeden

horní (Q1, Q3, Q5) a jeden spodní (Q4, Q2, Q6) spínač střídače, nikdy však nesmí dojít k současnému sepnutí obou součástí v jedné větvi střídače. V takovém případě by došlo k větrovému zkratu. Z tohoto důvodu je třeba mezi jednotlivé sepnutí vkládat mrtvé časy, krátké časové intervaly, kdy jsou obě součástky větve rozepnuté. [7][8]

## 2.3 Řídicí jednotka

Řídicí algoritmus může být implementován do DSP s vysokou vzorkovací a výpočetní frekvencí. Použití DSP umožňuje implementaci složitějších algoritmů řízení v reálném čase a využití periférií určených pro regulaci pohonů.

Řídicí systém pohonu v této práci byl vyvíjen na vývojovém kitu MLC interface, který je primárně určen pro řízení víceúrovňových měničů. MLC interface je vybaven FPGA hradlovým polem, DSP procesorem a řadou periférií. V této práci je využíván pouze DSP procesor TMS320F28335 a některé periferie jako jsou externí DAC a ADC převodníky. [9]

TMS320F28335 je 32-bitový DSP procesor s floating-point jednotkou z rodiny C2000™ od společnosti Texas Instruments. Procesor je určen pro výkonovou elektroniku, elektrické pohony, automotive, trakci, střídače a další náročné aplikace pracující v reálném čase. MLC interface je osazen třemi diferenciálními ADC převodníky typu AD7609 s rozlišením 18 bitů. Oproti interním ADC převodníkům DSP procesoru jsou pomalejší, ale nabízí větší rozlišení a jsou méně náchylné na rušení. Přenos dat mezi procesorem a perifériemi je realizován pomocí 16 bitů široké datové sběrnice, ADC převodníky jsou přímo mapovány do paměti procesoru přes DMA sběrnici. [9][10]

### 3 Detekce polohy a komutace

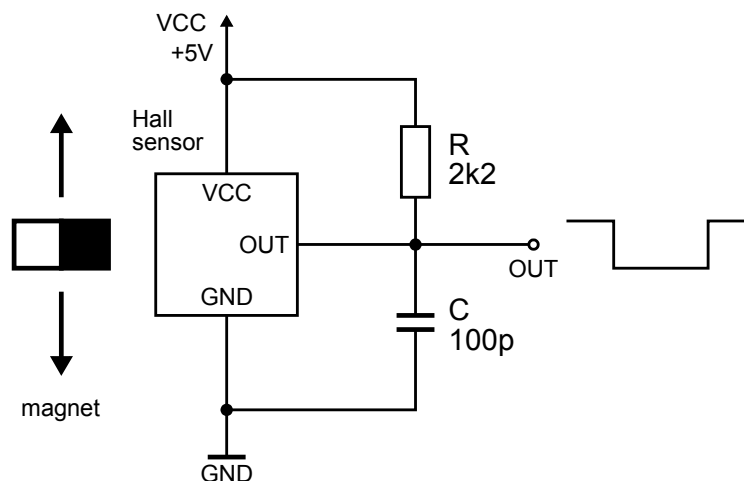
Detekce polohy rotoru elektricky komutovaných motorů je nezbytná pro správnou komutaci fází a regulaci proudu. Polohu lze získat v zásadě dvěma způsoby, sensoricky a bezsensoricky. V případě sensorického řízení BLDC motoru 6-fázovou komutací je postačující informace o poloze s přesností  $\pm 30^\circ$  elektrických, to znamená 6 komutačních kroků na jednu elektrickou otáčku viz kapitola 3.1. PMSM se sinusovým řízením vyžaduje přesnější informaci o poloze rotoru, pro přesnější určení polohy se využívají rotační enkodéry nebo resolvers. Vysoká cena, nároky na umístění a spolehlivost dodatečných mechanických senzorů polohy dává prostor bezsensorovým metodám detekce polohy, které bez mechanických senzorů určují polohu měřením, či výpočtem elektrických nebo magnetických veličin motoru (kapitola 3.3).

#### 3.1 Detekce polohy rotoru pomocí Hallovyh senzorů

V této kapitole je popsán nejčastější způsob zjišťování polohy rotoru pomocí trojice senzorů na principu Hallova jevu. Informace o poloze získaná z těchto senzorů je dostačující pro řízení motoru 6-fázovou komutací. Hallovy senzory bývají často součástí motoru a umísťují se dvěma způsoby, jednou z možností je umístění senzorů do statoru motoru tak, aby přímo snímaly magnetické pole permanentních magnetů rotoru. Druhou možností umístění je zadní strana motoru, kde jsou na hřídeli rotoru umístěny samostatné magnety určené pouze pro snímání polohy. [11]

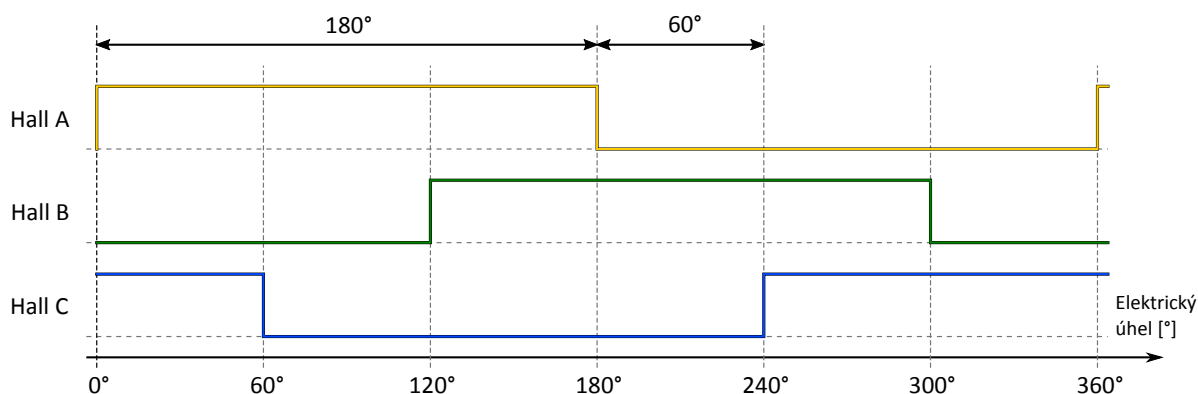
Hallův senzor je polovodičová součástka, snímající intenzitu blízkého magnetického pole. Hallovy senzory mohou být v 3-vodičovém provedení s otevřeným kolektorem, popřípadě v 4-vodičovém diferenčním provedení. U součástek s otevřeným kolektorem, které jsou běžnější, je výstup připojený přes pull-up rezistor k napájecímu napětí (Obrázek 5). Pak se součástka chová jako spínač, jehož výstupem je logická nula v případě detekce magnetického pole. Nepřesné umístění senzorů může mít vliv na správné určení polohy rotoru a vlastnosti pohonu.





Obrázek 5: Hallův senzor s otevřeným kolektorem

Výstupem senzorů jsou tři digitální signály fázově posunuty o  $120^\circ$  elektrických viz Obrázek 6. Při otáčení rotoru se signály mění po  $60^\circ$  elektrických, trvání každého logického stavu jednoho signálu je  $180^\circ$  elektrických. Analýzou a přiřazením těchto signálů do tabulky se určí aktuální poloha rotoru viz kapitola 3.2.1.

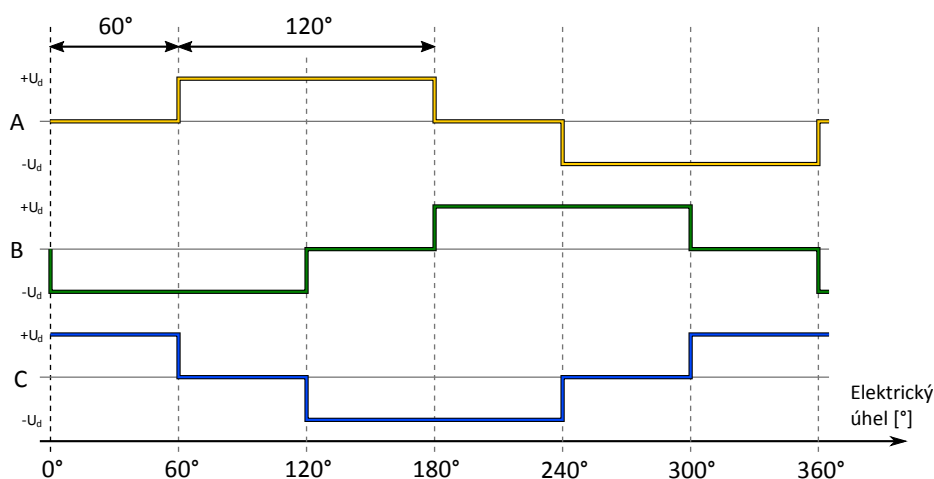


Obrázek 6: Výstupy Hallových senzorů

### 3.2 6-fázová komutace

6-fázová komutační strategie je nejjednodušší a nejčastější způsob řízení BLDC motoru. Komutační strategie rozděluje interval jedné elektrické otáčky do šesti sektorů po  $60^\circ$  elektrických, které jsou popsány v komutační tabulce v kapitole 3.2.1. Motor je napájen obdélníkovými pulzy napětí (Obrázek 7), jejichž polarita je závislá na poloze rotoru. Současně jsou napájeny pouze dvě fáze motoru, zatímco třetí fáze zůstává odpojená a lze jí využít pro měření indukovaného napětí. Cílem 6-fázové komutace je napájet dvojici fází, která vytvoří zátěžný úhel  $60^\circ$  až  $120^\circ$  elektrických.

Poměr mezi elektrickým a mechanickým úhlem motoru je dán počtem jeho pól-párů, udává kolik se uskuteční elektrických otáček za jednu otáčku mechanickou. Komutační proudů motoru ve sledu daném komutační tabulkou se vytvoří točivé magnetické pole ve statoru. Vzniklý elektromagnetický moment zapříčiní přitažení rotoru, který se následně točí společně s polem statoru. Sektor, ve kterém se rotor nachází, lze určit pomocí senzorů (kapitola 3.1) popřípadě bezsenzorově (kapitola 3.3). Pro oba způsoby detekce polohy rotoru lze použít 6-fázovou komutační strategii. [2][12][13]



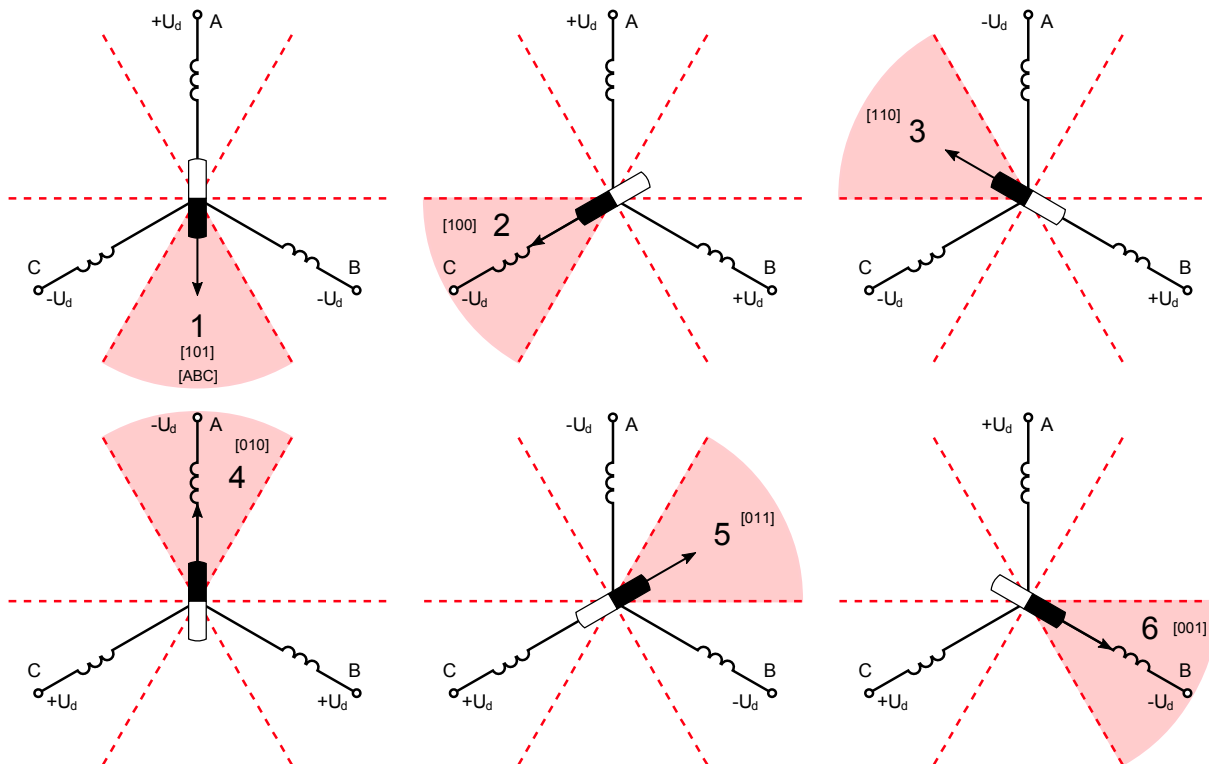
Obrázek 7: Napájecí třífázového pulzy BLDC motoru

Za předpokladu, že se jedná o BLDC motor s trapezoidním průběhem indukovaného napětí bude moment teoreticky konstantní. Ve skutečnosti průběh momentu závisí na zvlnění proudu, které je z velké části způsobeno i metodou spínání viz kapitola 4. Stejně jako BLDC lze 6-fázovou komutací řídit i motor se sinusovým indukovaným napětím, nicméně produkovaný elektromagnetický moment motoru bude vykazovat vyšší zvlnění, které je dáno právě sinusovým indukovaným napětím. Motory se sinusovým polem je vhodnější řídit pomocí sinusového řízení, kdy se řídí všechny tři fáze motoru současně a motor je napájen sinusovým proudem. [3]

### 3.2.1 Komutační tabulka

Hallový sondy v motoru snímají aktuální pozici rotoru, která je nezbytná pro aplikaci správného komutačního vektoru (3.2.2). Signál z Hallových sond se mění v určitém sledu po 60° elektrických v závislosti na směru otáčení. Pro každý z těchto sektorů platí jiná kombinace výstupů z Hallových senzorů. [12]

Pro určení komutační tabulky je třeba přiřadit správné kombinace výstupů z Hallových senzorů jednotlivým komutačním sektorům. To lze provést například připojením napětí na jednotlivé fáze motoru ve správném sledu viz Obrázek 8.



Obrázek 8: Komutační sektory, převzato z [12]

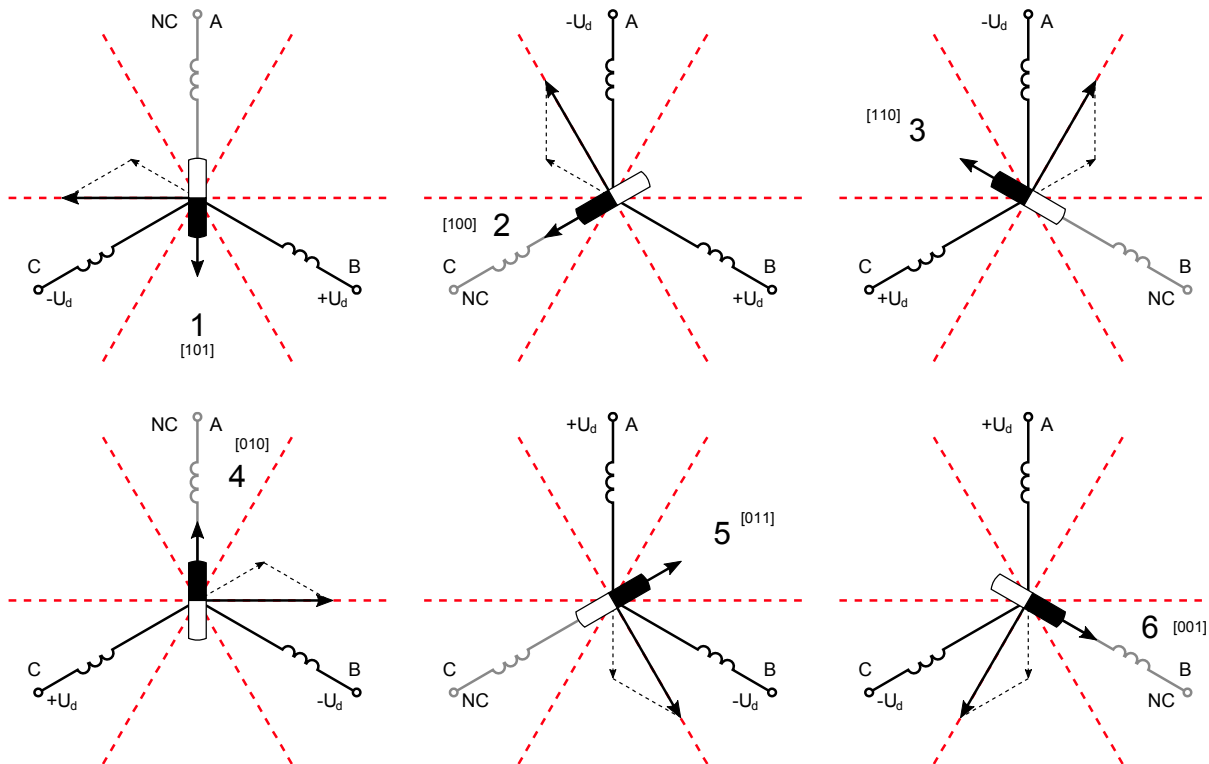
Po připojení napětí na svorky motoru dojde k natočení rotoru do středu komutačního sektoru, ve kterém platí jedna kombinace výstupů Hallových sond. Vystřídáním všech kombinací vznikne Tabulka 1, která popisuje sled signálů z Hallových sond v závislosti na sektoru. [12][13]

Tabulka 1: Přiřazení výstupů Hallových sond do komutačních sektorů

Sektor	Fáze motoru			Hallové sondy		
	A	B	C	A	B	C
1	+U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	1	0	1
2	+U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	1	0	0
3	-U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	1	1	0
4	-U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	0	1	0
5	-U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	0	1	1
6	+U <sub>d</sub>	-U <sub>d</sub>	+U <sub>d</sub>	0	0	1

### 3.2.2 Komutační vektory

Komutační vektory viz Obrázek 9 jsou definovány v pořadí pro dosažení maximálního momentu BLDC motoru. Maximálního momentu dosáhneme, když úhel mezi magnetickým tokem statoru a magnetickým tokem rotoru, který vytváří permanentní magnety bude  $90^\circ$ .



Obrázek 9: Sled komutačních vektorů pro směr otáčení hodinových ručiček, převzato z [12]

Sled komutačních vektorů pro otáčení rotoru motoru ve směru hodinových ručiček popisuje Tabulka 2, napájeny jsou vždy pouze dvě fáze zatímco třetí zůstává odpojená. Pro změnu směru otáčení je postačující změnit polaritu napětí jednotlivých fází motoru.

Tabulka 2: Komutační vektory

Vektor	Hallové sondy			Fáze motoru		
	A	B	C	A	B	C
1	1	0	1	NC	$-U_d$	$+U_d$
2	1	0	0	$+U_d$	$-U_d$	NC
3	1	1	0	$+U_d$	NC	$-U_d$
4	0	1	0	NC	$+U_d$	$-U_d$
5	0	1	1	$-U_d$	$+U_d$	NC
6	0	0	1	$-U_d$	NC	$+U_d$

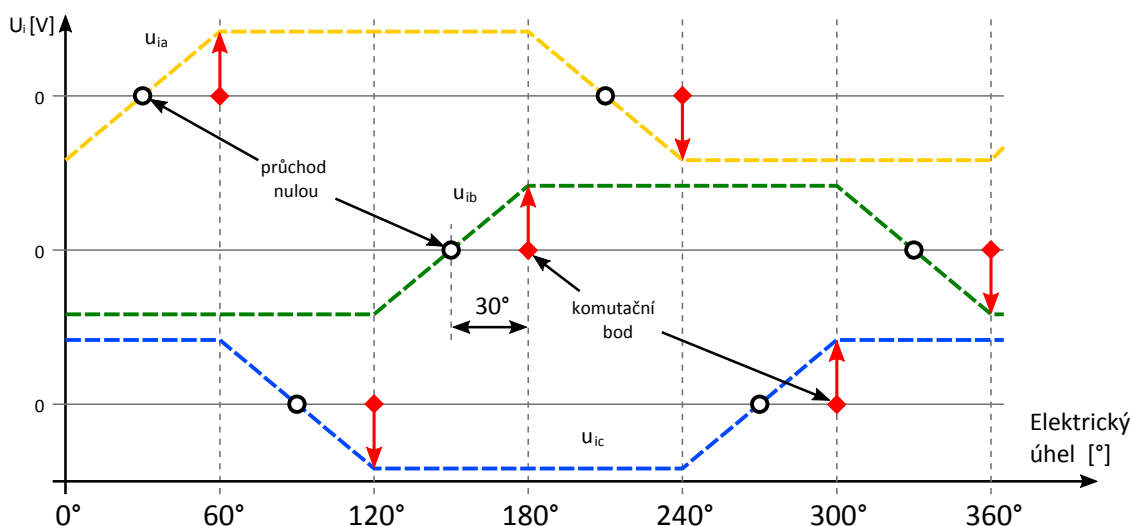
### 3.3 Bezsenzorová detekce polohy rotoru

Principy některých bezsenzorových metod detekce polohy jsou založené na měření elektrických nebo magnetických veličin, které obsahují informaci o poloze rotoru. Další z možností bezsenzorového určení polohy je využití matematického modelu BLDC motoru.

#### 3.3.1 Metody vycházející z indukovaného napětí

Metody estimace založené na měření indukovaného napětí jsou nejčastěji používané bezsenzorové techniky řízení BLDC motoru. Pozice rotoru je snímána nepřímým sledováním průběhu indukovaného napětí. Při řízení třífázového BLDC motoru 6-fázovou komutací prochází proud pouze dvěma ze tří fází motoru. Třetí fáze zůstává odpojená a je možné ji využít pro měření indukovaného napětí, které obsahuje informaci o poloze rotoru. Indukované napětí je funkcí polohy rotoru a jeho velikost je úměrná rychlosti otáčení rotoru. Nicméně před měřením je třeba indukované napětí filtrovat pomocí dolní propusti, protože měřený signál obsahuje velký podíl šumu vlivem PWM modulace a komutace. [14][15]

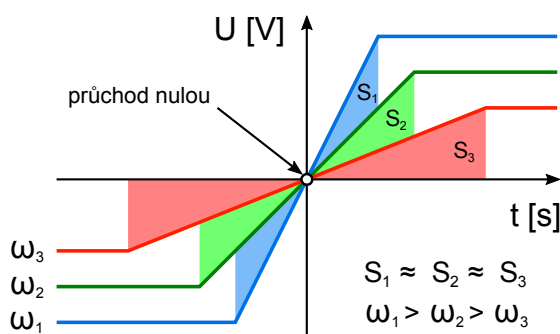
Jednou z přímých metod pro určení polohy z indukovaného napětí je detekce jeho průchodu nulou (zero-cross detection) v odpojené fázi. Okamžik, kdy měřené napětí mění svou polaritu se nachází ve středu komutačního sektoru, od průchodu nulou se následovně odměří další polovina šířky sektoru  $30^\circ$  elektrických, tím se získá vhodný okamžik pro komutaci viz Obrázek 10.



Obrázek 10: Detekce průchodu nulou indukovaného napětí

Bezsenzorové určení polohy je možné použít při minimální rychlosti motoru, kdy je indukované napětí měřitelné. Při nízké rychlosti otáčení obsahuje indukované napětí velký podíl šumu a je proto problematické správně určit průchod nulou. V případě stojícího motoru není do vinutí motoru indukováno žádné napětí, pro bezsenzorovou estimaci polohy je nutné motor nejprve roztočit. Pro rozběh motoru se proto používá otevřená regulační smyčka, kdy se postupně zvyšuje velikost a frekvence otáčení statorového pole. [11][14][15]

Další metoda bezsenzorové detekce polohy rotoru je integrace indukovaného napětí. Metoda estimace je založena na integraci měřeného napětí v odpojené fázi BLDC motoru. Výsledkem integrace je trojúhelníková plocha, která je souměrná kolem průchodu nulou indukovaného napětí. Velikost naintegrované plochy je přibližně stejná pro různé velikosti rychlosti viz Obrázek 11. [14][16]



Obrázek 11: Integrace indukovaného napětí, převzato z [16]

V okamžiku, kdy indukované napětí překročí nulu směrem nahoru, nebo dolů se odstartuje integrace napětí. Ke komutaci na další komutační sektor dochází, když naintegrovaná hodnota dosáhne předdefinované prahové hodnoty. V porovnání s předchozí metodou je metoda integrace indukovaného napětí méně náchylná na zarušení měřeného napětí a je tak více odolná při nižších otáčkách. [14][15][16]

### 3.3.2 Metody vycházející z matematického modelu

Určení polohy pomocí matematického modelu motoru je možné sledováním spráženého magnetického toku od permanentního magnetů, který zabírá s vinutím příslušné fáze motoru. Tento magnetický tok, stejně jako indukované napětí, obsahuje informaci o poloze rotoru. Oproti indukovanému napětí není velikost magnetického toku tolik závislá na rychlosti.

Určení spřaženého magnetického toku vyžaduje znalost fázových napětí na svorkách motoru a fázových proudů protékajících motorem. Výpočet magnetického toku pro každou fázi motoru vychází z obecné rovnice matematického modelu třífázového BLDC motoru pro výpočet fázového napětí (2.1.1):

$$u = R \cdot i + L \frac{di}{dt} + u_i , \quad (3.3.2.1)$$

$$L \frac{di}{dt} = u - R \cdot i - u_i . \quad (3.3.2.2)$$

Integrací fázového napětí a proudu lze určit magnetický tok, který se vypočte jako integrál fázového napětí sníženého o ztráty na odporu statorového vinutí fázovým proudem motoru:

$$L \cdot i = \int (U - R \cdot i - U_{comp}) dt - \int u_i dt , \quad (3.3.2.3)$$

$$\Psi_{PM} = \Psi_S - L \cdot i = \int u_i dt = \int (U - R \cdot i - U_{comp}) dt - L \cdot i , \quad (3.3.2.4)$$

$$U_{comp} = k_p \cdot \Psi_S + k_I \int \Psi_S dt , \quad (3.3.2.5)$$

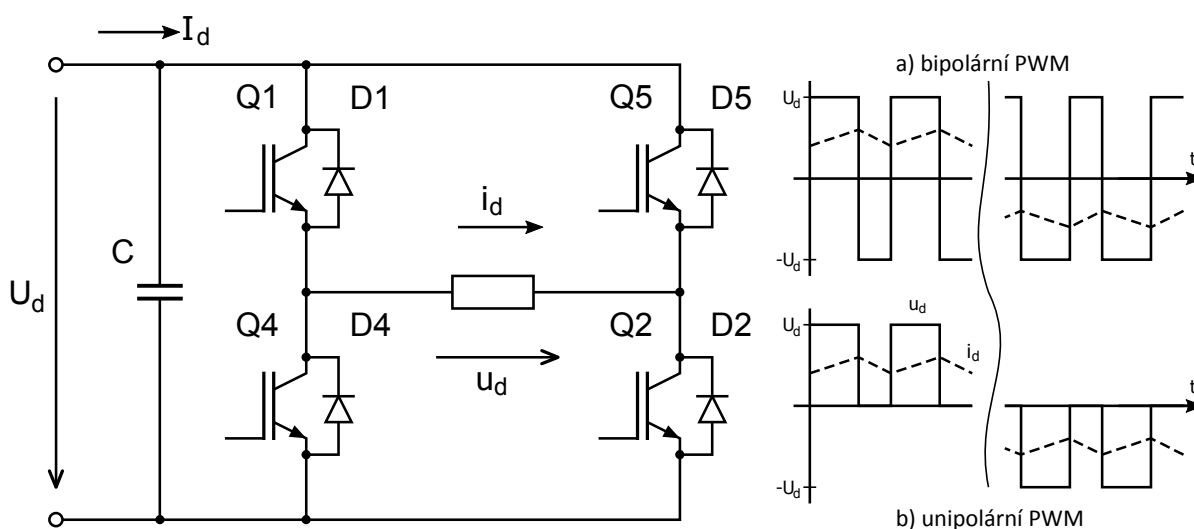
kde  $\Psi_S$  je celkový magnetický tok,  $\Psi_{PM}$  je spřažený magnetický tok permanentních magnetů a  $U_{comp}$  je korekční zpětná vazba tvořená PI regulátorem pro kompenzaci offsetu. [15][17][21]

Z magnetického toku lze určit poloha rotoru, popřípadě vhodný komutační okamžik. Stejně jako metody založené na sledování indukovaného napětí motoru i tato metoda vykazuje značnou chybu při nízkých rychlostech. Nesprávné určení parametrů motoru, úbytky na polovodičích střídače, nepřesnost měření napětí a proudu chybu při nízkých rychlostech zvětšují. [11][15][17][21]

## 4 PWM modulace a způsoby spínání

Výstupní fázové napětí střídače je regulováno pomocí PWM modulace, změnou poměrného sepnutí spínačů lze regulovat střední hodnotu amplitudy napětí. Princip PWM modulace je založen na komparaci nosného signálu s konstantní frekvencí a řídicího modulačního signálu. Při koincidenci modulačního signálu s nosným signálem dochází k sepnutí, nebo vypnutí spínače ve větvi střídače. Pro třífázový střídač je výhodnější modulace se symetrickou pilou a pulzy se zarovnáním na střed. [8]

V případě řízení BLDC motoru 6-fázovou komutační strategií, kdy zůstává vždy jedna ze tří fází motoru odpojená je třífázový střídač řízen jako čtyř-kvadrantový pulzní měnič. PWM modulace se rozlišuje z hlediska polarit výstupního napětí na bipolární a unipolární variantu. Výstupní fázové napětí střídače při bipolární podobě PWM modulace (Obrázek 12a) může nabývat v průběhu periody obou polarit napětí, oproti tomu výstupní fázové napětí unipolární varianty PWM modulace (Obrázek 12b) může nabývat v průběhu periody pouze jedné polarit napětí a nulového napětí. [6][8]

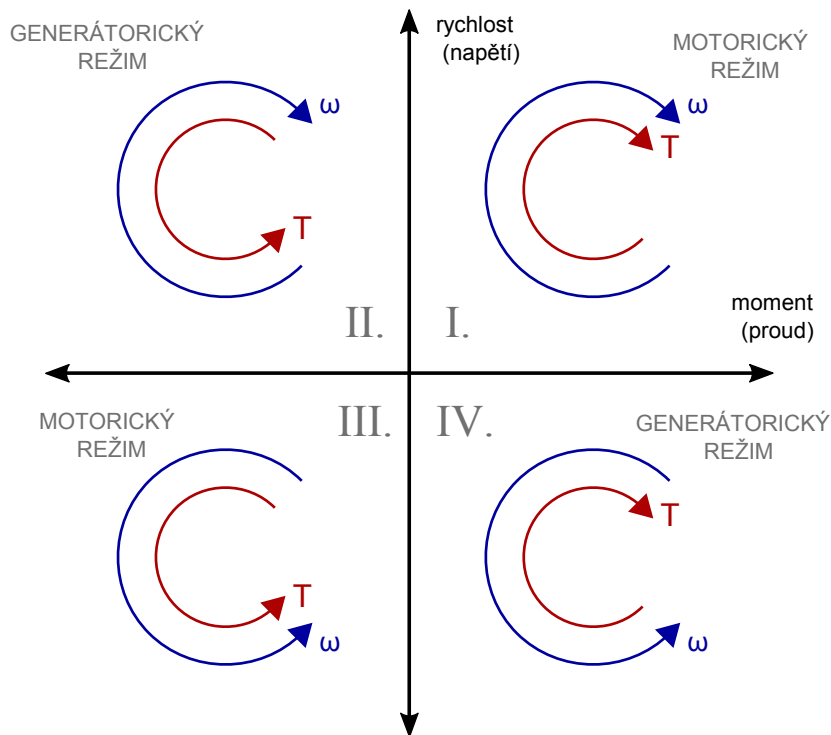


Obrázek 12: Čtyř-kvadrantový pulzní měnič, a) bipolární b) unipolární PWM modulace, převzato z [8]

Dalším dělením PWM modulace je způsob, jakým jsou spínány výkonové tranzistory v jedné větvi měniče. Spínače je možné spínat pomocí dvou základních technik, komplementárním nebo nezávislým spínáním. Od použitého způsobu spínání se pak odvíjí i pracovní prostor pohonu viz Obrázek 13. Při nezávislém spínání, v intervalu kdy jsou



všechny spínače vypnuty, pokračuje proud ve stejném směru a uzavírá se přes zpětné diody, dokud úplně neklesne k nule. Oproti tomu při komplementárním spínání, kdy jsou spínače v jedné větvi spínány komplementárně, může proud procházet oběma směry. [12]

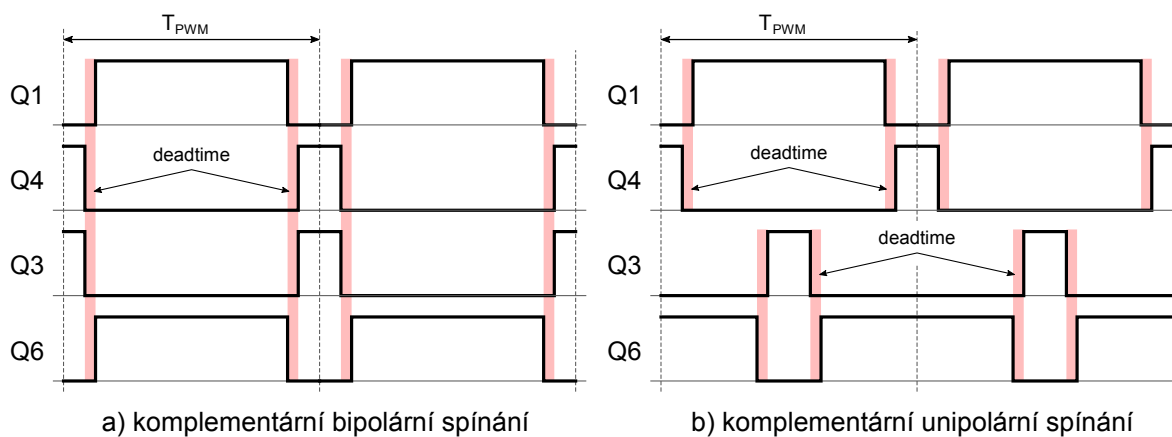


Obrázek 13: Pracovní prostor pohonu

#### 4.1 Komplementární spínání

Při této technice spínání jsou oba tranzistory jedné větve spínány komplementárně, intervaly jejich sepnutých a rozepnutých stavů jsou doplňkové. Komplementárním spínáním je možné měnit polaritu napětí i proudu, je proto vhodné pro provoz ve všech čtyřech kvadrantech. Aby nedošlo ke zkratu ve větvi střídače je nutné vkládání mrtvých časů mezi jednotlivé intervaly sepnutí. Komplementární spínání může být implementováno v bipolární nebo unipolární podobě.

Bipolární varianta spínání je znázorněná na Obrázku 14a, tranzistory Q1 a Q6 jsou v sepnutém stavu, motor je připojený na kladné napětí  $U_d$  a proud motorem narůstá. V druhé fázi periody spínání je motor připojen na záporné napětí, proud vedou zpětné diody sepnutých tranzistorů Q4 a Q3. Pokud proud klesne k nule může pokračovat v opačném směru přes sepnuté tranzistory a motor může fungovat jako generátorická brzda. Poměrné sepnutí 50% dává na výstupu střídače nulovou střední hodnotu fázového napětí. [2]



Obrázek 14: Komplementární spínání a) bipolární b) unipolární [2]

Unipolární varianta spínání je znázorněna na Obrázku 14b, periodu spínání lze rozdělit do třech fází. V první fázi jsou sepnuty dolní tranzistory obou větví a na motoru je připojené nulového napětí, proud se uzavírá přes spodní tranzistory a jejich zpětné diody. V další fázi jsou sepnuty tranzistory Q1 a Q6, na motoru je připojené kladné napětí  $U_a$  a proud motorem narůstá. Ve třetí fázi jsou naopak sepnuty horní tranzistory Q1 a Q3, děj je stejný jako v první fázi. Unipolární varianta modulace vede k nižším spínacím ztrátám a zvlnění proudu. [2]

Tabulka 3: Komplementární spínání - porovnání variant [2]

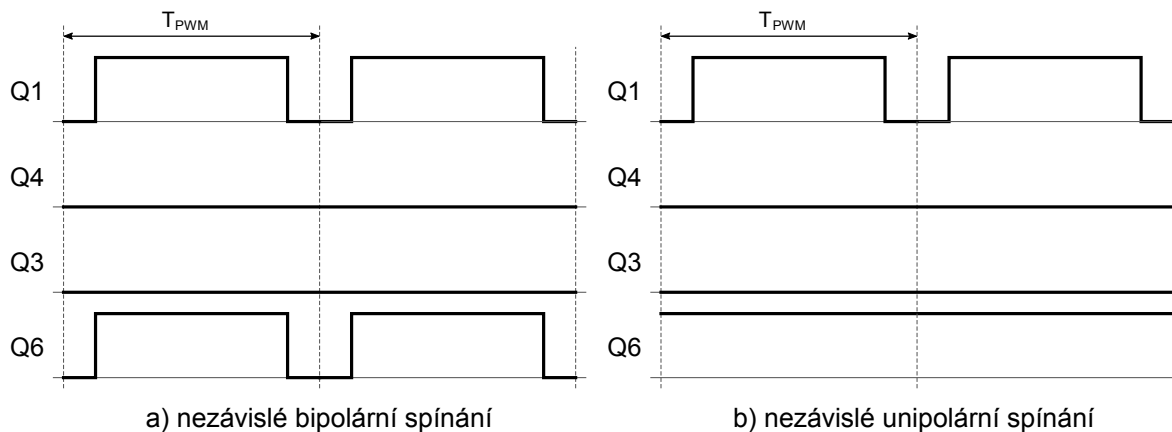
Komplementární spínání	výhody	nevýhody
bipolární	- dobrá dynamika motoru - vhodné pro měření indukovaného napětí	- nutné mrtvé časy - minimálně 6 PWM výstupů - vyšší spínací ztráty - vyšší zvlnění proudu
unipolární	- dobrá dynamika motoru - malé zvlnění proudu a momentu - menší zvlnění napětí zátěže	- nutné mrtvé časy - minimálně 6 PWM výstupů - vyšší spínací ztráty

## 4.2 Nezávislé spínání

Během nezávislého spínání jsou horní a dolní spínač jedné větve spínány nezávisle po dobu komutačního kroku. Pokud horní spínač jedné fáze vykonává spínání PWM modulace, je dolní spínač stejné fáze rozepnutý a naopak. Nezávislé spínání může být implementováno v bipolární nebo unipolární podobě.

Bipolární varianta spínání je znázorněna na Obrázku 15a, periodu spínání lze rozdělit do dvou fází. V první fázi, kdy jsou sepnuty tranzistory Q1 a Q6 je motor připojen na kladné

napětí  $U_a$  a proud motorem vzrůstá. V druhé fázi jsou všechny tranzistory rozepnuty a motor je připojený na záporné napětí, proud prochází zpětnými diodami tranzistorů Q3 a Q4. Nevýhodou nezávislého bipolárního spínání je možnost vzniku přerušovaných proudů. [2]



Obrázek 15: Nezávislé spínání a) bipolární b) unipolární [2]

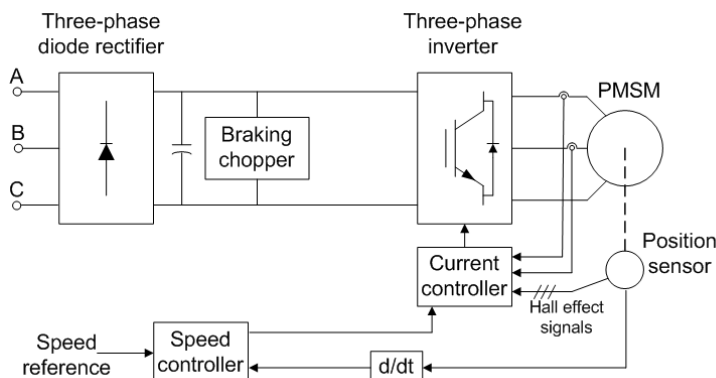
Unipolární varianta nezávislého spínání je znázorněna na Obrázku 15b. První fáze spínání je stejná jako u bipolární varianty, motor je připojený na kladné napětí a proud motorem vzrůstá. V druhé fázi je tranzistor Q1 vypnutý a Q6 zůstává sepnutý po celou periodu spínání, motor je připojený na nulové napětí. Proud prochází stejným směrem a uzavírá se přes tranzistor Q6 a zpětnou diodu tranzistoru Q4. Díky nepřerušovaným proudům motor vykazuje velký točivý moment a dobré chování. [2]

Tabulka 4: Nezávislé spínání - porovnání variant [2]

Nezávislé spínání	výhody	nevýhody
bipolární	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minimálně 3 PWM výstupy</li> <li>- nepotřebuje mrtvé časy</li> <li>- jednoduchá implementace</li> <li>- nižší spínací ztráty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- přerušované proudy</li> <li>- vyšší zvlnění proudu</li> <li>- nevhodné pro měření BEMF</li> </ul>
unipolární	<ul style="list-style-type: none"> <li>- minimálně 3 PWM výstupy</li> <li>- nepotřebuje mrtvé časy</li> <li>- jednoduchá implementace</li> <li>- nižší spínací ztráty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- nevhodné pro měření BEMF</li> <li>- nerovnoměrné rozložení spínacích ztrát</li> </ul>

## 5 Implementace řízení do simulace

Pro implementaci pohonu s BLDC motorem do simulace byl zvolen software MATLAB/Simulink s využitím již existující knihovny *Brushless DC Motor Drive* (Obrázek 16), která je součástí toolboxu *SimPower Systems*. [20]



Obrázek 16: Regulační schéma knihovny AC6, převzato z [20]

Cílem simulace pohonu je ověření funkčnosti uvažovaných způsobů řízení a získání referenčních průběhů pro porovnání se skutečnou implementací do DSP viz kapitola 6. Pro přiblížení simulace skutečnosti bylo třeba určit parametry BLDC motoru. Hodnoty odporu a indukčnosti vinutí motoru byly změřeny RLC metrem, pro určení konstanty indukovaného napětí  $K_e$  bylo provedeno měření sdruženého napětí naprázdno při konstantní rychlosti otáčení motoru. Získané parametry použitého motoru BLT-500 jsou uvedeny v příloze v kapitole 9.

### 5.1 Senzorické řízení

Základem simulace senzorického řízení BLDC motoru je 6-fázová komutační strategie (kapitola 3.2) s využitím výstupů Hallových senzorů pro detekci polohy rotoru. Bloky použité knihovny byly upraveny tak, aby se model co nejvíce přiblížil konfiguraci experimentálního laboratorního prototypu, na kterém byl následně implementován stejný algoritmus řízení.

Regulační obvod pohonu tvoří dvě regulační smyčky, proudová/momentová smyčka a nadřazená rychlostní smyčka. Jak proudová, tak i rychlostní smyčka obsahuje diskrétní PI (PS) regulátory s omezením výstupu. Pohon tak lze provozovat v momentové nebo rychlostní regulaci. V případě momentového řízení se rychlostní smyčka neuplatňuje

a vstupem je přímo požadavek na moment (požadavek na momentotvorný proud). Rychlostní smyčku tvoří regulátor rychlosti, jeho vstupem je regulační odchylka  $\varepsilon_\omega$  daná rozdílem požadované rychlosti  $\omega^*$  a skutečné mechanické rychlosti  $\omega_m$ . Výstupem rychlostního regulátoru je požadavek na momentotvorný proud  $I^*$ , který je úměrný požadovanému momentu podle vztahu:

$$P = u_{ia}i_a + u_{ib}i_b + u_{ic}i_c = M \cdot \omega_m, \quad (5.1.1)$$

$$M = \frac{P}{\omega_m} = \frac{2I_d \cdot U_i}{\omega_m} = \frac{2I_d \cdot K_e \cdot \omega_m}{\omega_m} = 2K_e \cdot I_d, \quad (5.1.2)$$

kde  $I_d$  je stejnosměrný proud procházející fázemi motoru. [6][7]

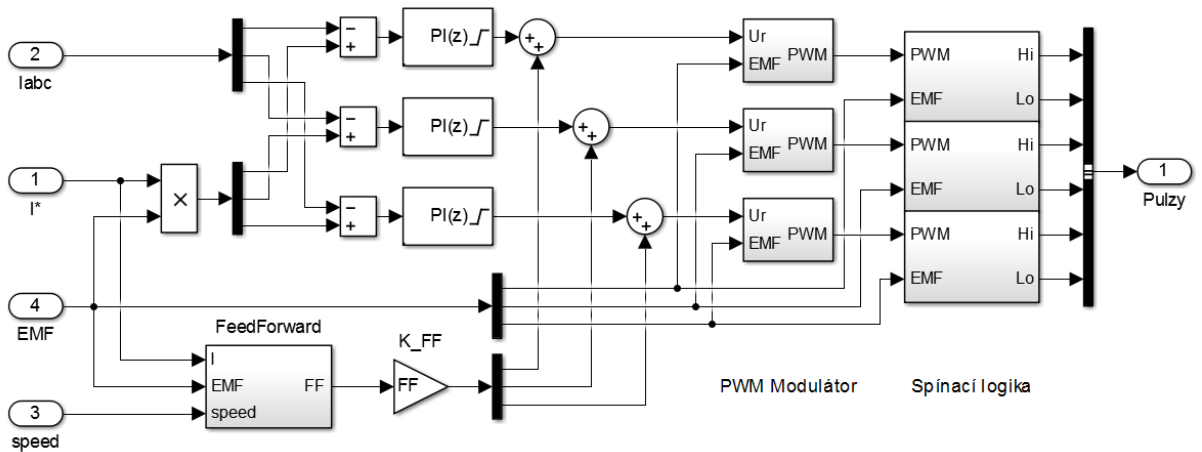
Požadavek na momentotvorný proud motoru je přiveden do proudové smyčky na vstup proudového regulátoru. Výstupem regulátoru proudu je požadované fázové napětí, ke kterému se přičítá dopředná vazba  $U_{FF}$  ve správné polaritě odpovídající aktuálnímu komutačnímu sektoru. Smysl dopředné vazby spočívá ve výpočtu předpokládané hodnoty fázového napětí, regulátor proudu pak plní korekční funkci a odstraňuje chybu výpočtu dopředné vazby. Vlivem dopředné vazby se zlepšuje dynamika proudové smyčky, její velikost je dána úbytkem na odporu vinutí motoru a indukovaným napětím:

$$U_{FF} = R \cdot I^* + K_e \cdot \omega_m. \quad (5.1.3)$$

Požadované fázové napětí zpracovává PWM modulátor, který ho porovnává se symetrickou pilou a generuje spínací impulzy. Spínací logika přivádí generované impulzy na tranzistory větví střídače dle zvolené varianty PWM modulace popsané v kapitole 4, zároveň zajišťuje i odpojení fáze s nulovým EMF signálem. Struktury regulátorů proudu pro komplementární a nezávislé spínání se liší a jsou popsány v následujících kapitolách.

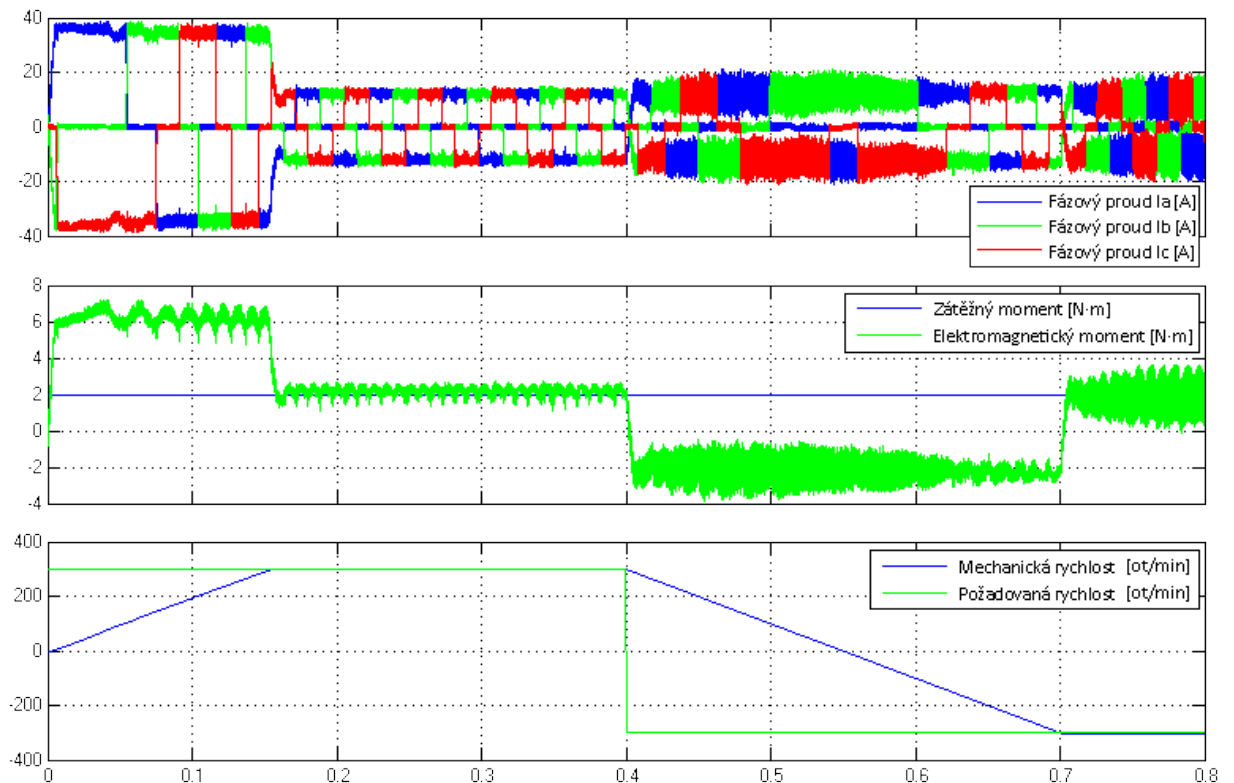
### 5.1.1 Komplementární spínání

Pro regulátor proudu komplementární techniky spínání, která je popsána v kapitole 4.1 byla zvolena topologie tří samostatných diskretních PI regulátorů pro jednotlivé fáze motoru viz Obrázek 17.



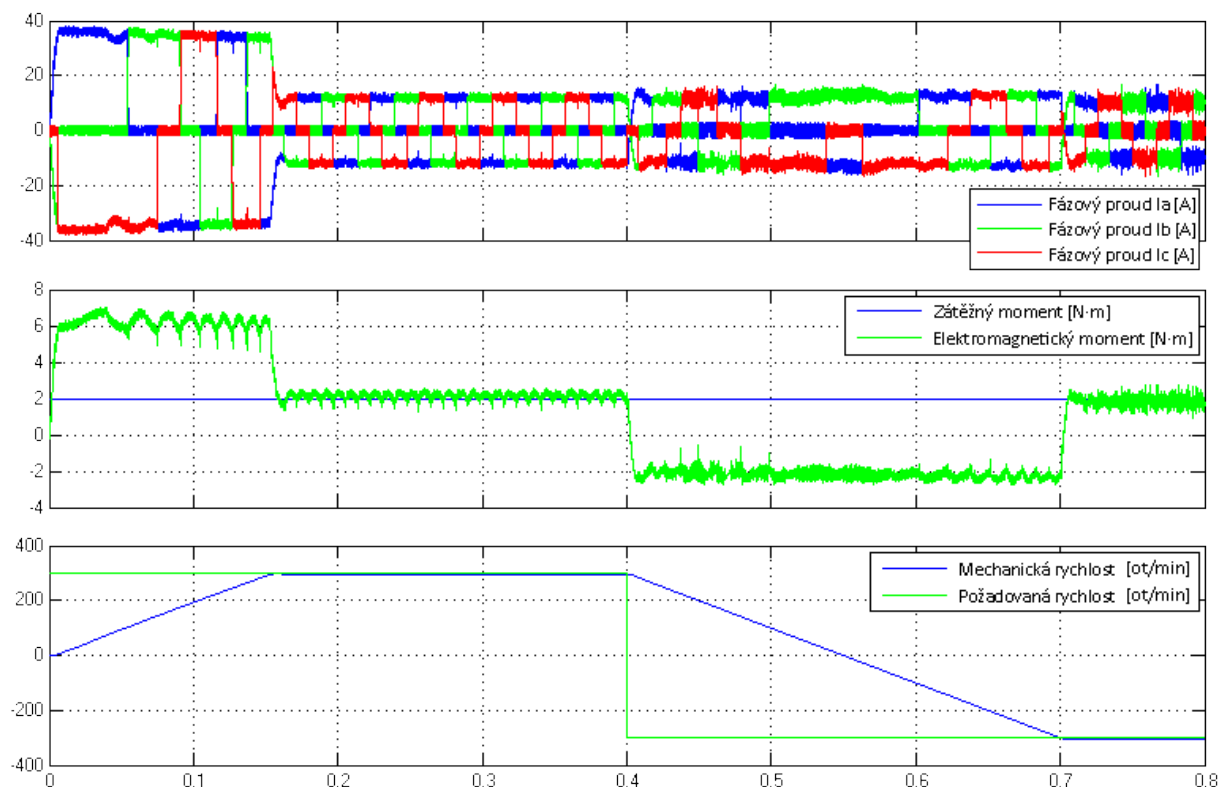
Obrázek 17: Regulátor proudu pro komplementární spínání

Následující obrázky 18 a 19 znázorňují simulaci BLDC motoru v režimu regulace rychlosti pro komplementární spínání v bipolární a unipolární podobě PWM modulace. Pro simulovaný přechodový děj je uvažován konstantní zátěžný moment  $M_z = 2 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Motor se roztáčí z nulových otáček na požadovanou rychlost  $\omega^* = 300 \text{ ot}/\text{min}$ , změna požadované rychlosti má předepsanou strmou lineární rampu  $2000 \text{ ot}/\text{min}$  za sekundu. V čase  $t = 0,4 \text{ s}$  se požadavek rychlosti změní na opačnou hodnotu  $\omega^* = -300 \text{ ot}/\text{min}$ .



Obrázek 18: Simulace regulace rychlosti s komplementárním bipolárním spínáním

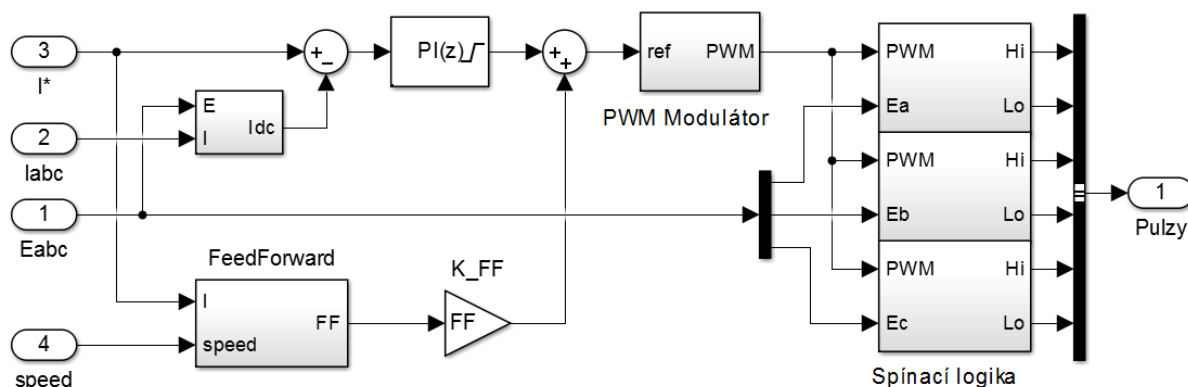
Komplementární technika spínání je univerzální technika spínání, která umožňuje bezproblémový provoz pohonu ve všech čtyřech kvadrantech a přechod mezi nimi pro obě varianty PWM modulace. Při porovnání bipolární a unipolární varianty vykazují obě stejnou dynamiku chování pohonu. Unipolární varianta PWM modulace (Obrázek 19) vykazuje oproti bipolární variantě nižší zvlnění proudu a hladší průběh momentu.



Obrázek 19: Simulace regulace rychlosti s komplementárním unipolárním spínáním

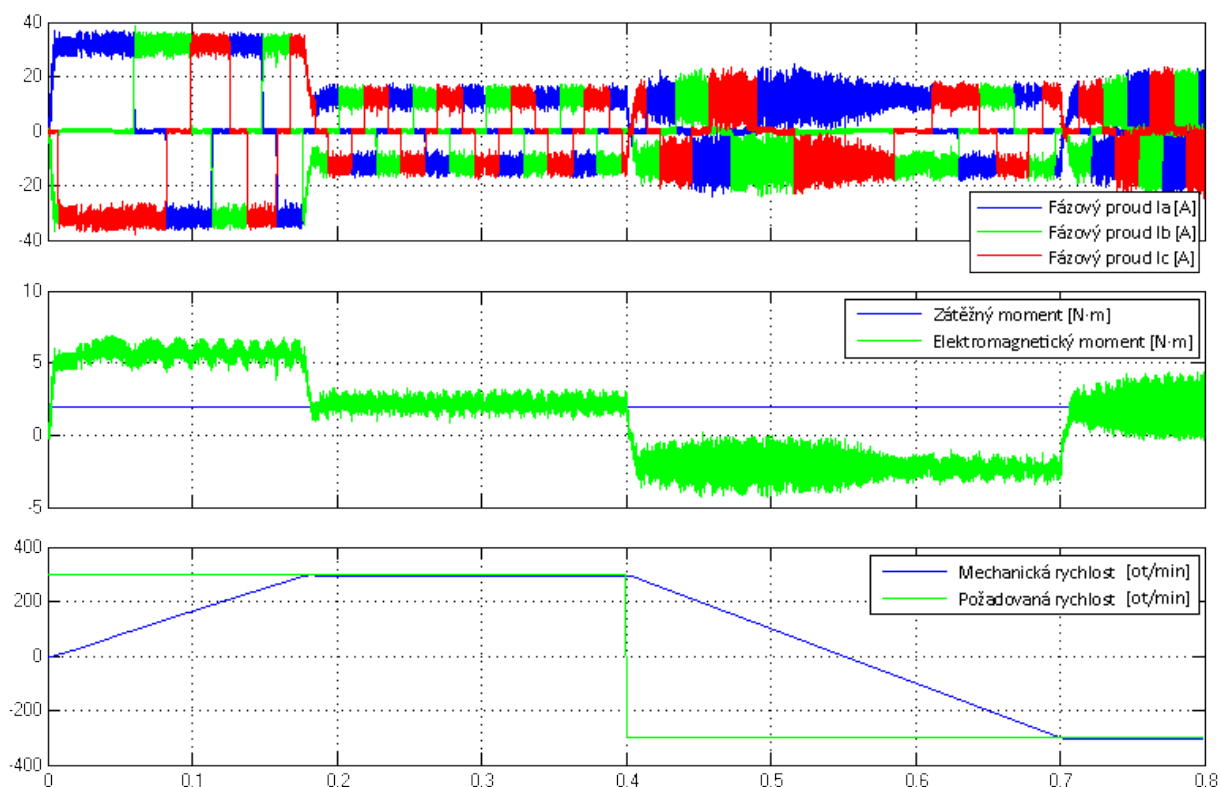
### 5.1.2 Nezávislé spínání

Nezávislé spínání bylo popsáno v kapitole 4.2. Oproti komplementární technice spínání je struktura regulátoru proudu odlišná, místo tří regulátorů fázových proudů je regulován pouze jeden proud ve stejnosměrném meziobvodu střídače viz Obrázek 23. Hlavní výhodou této topologie je pouze jedno čidlo proudu. Z důvodu absence proudového čidla v meziobvodu experimentálním laboratorním prototypu je regulovaný proud vybírán z fázových proudů motoru podle aktuálního komutačního sektoru, neboť stejný proud protéká i stejnosměrným meziobvodem.



Obrázek 20: Regulátor proudu pro nezávislé spínání

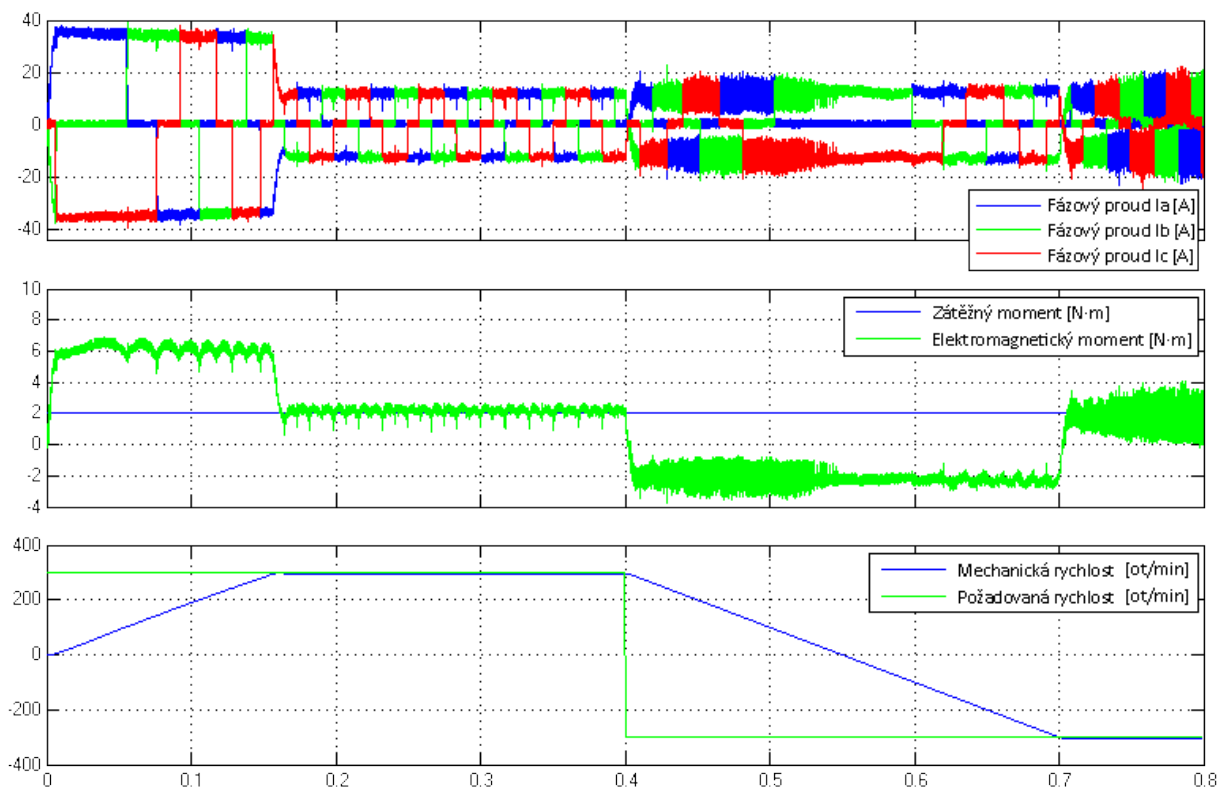
Následující Obrázky 21 a 22 znázorňují simulaci BLDC motoru v režimu regulace rychlosti pro nezávislé spínání v bipolární a unipolární podobě. Stejně jako v předchozím případě je BLDC motor zatěžován konstantním momentem  $M_z$ . V čase  $t = 0,4\text{ s}$  dojde ke změně požadavku rychlosti na opačnou hodnotu.



Obrázek 21: Simulace regulace rychlosti s nezávislým bipolárním spínáním

Stejně jako u komplementárního spínání vykazuje unipolární varianta PWM modulace oproti bipolární menší zvlnění proudu a momentu.





Obrázek 22: Simulace regulace rychlosti s nezávislým unipolárním spínáním

## 5.2 Bezsenzorové řízení – sledování magnetického toku

Důvodem implementace bezsenzorové metody detekce polohy rotoru založené na principu sledování magnetického toku motoru byl použitý hardware. Experimentální laboratorní prototyp, na kterém byl algoritmus implementován nebyl vybaven obvody pro měření fázových napětí BLDC motoru, disponuje pouze LEM čidly fázových proudů a napětí v meziobvodu střídače. Bezsenzorová metoda estimace magnetického toku byla popsána v kapitole 3.3.2, určení magnetického toku permanentních magnetů vychází z napěťové rovnice matematického modelu třífázového BLDC motoru (2.1.1). Estimátor magnetického toku permanentních magnetů (Obrázek 23) je popsán následující rovnicí:

$$\psi_{PM} = \int (U - R \cdot i - U_{comp}) dt - L \cdot i, \quad (5.2.1)$$

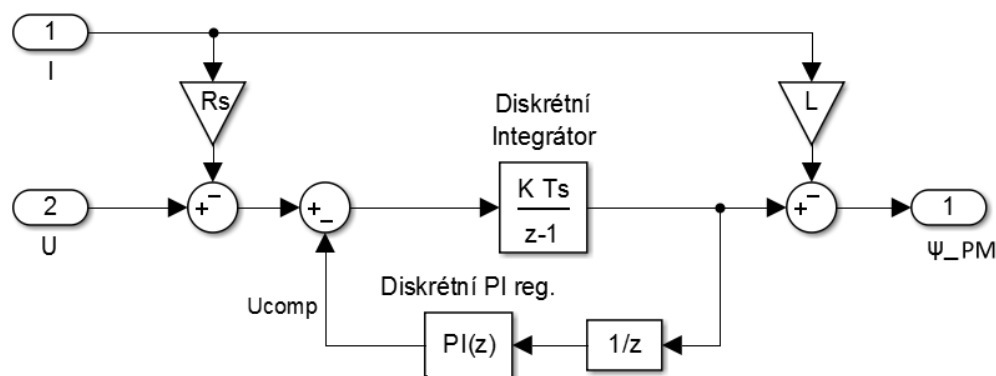
vstupem estimátoru toku je fázové napětí a fázový proud BLDC motoru. Pro usnadnění lze fázová napětí motoru určit z napětí v meziobvodu a známého poměrného sepnutí pro příslušnou fázi motoru:

$$U = z \cdot U_d, \quad (5.2.2)$$

kde  $U$  je fázové napětí aplikované střídačem a  $z$  je poměrné sepnutí příslušné fáze. Následná realizace si tak vystačí pouze s jedním měřením napětí ve stejnosměrném meziobvodu střídače. [19][21]

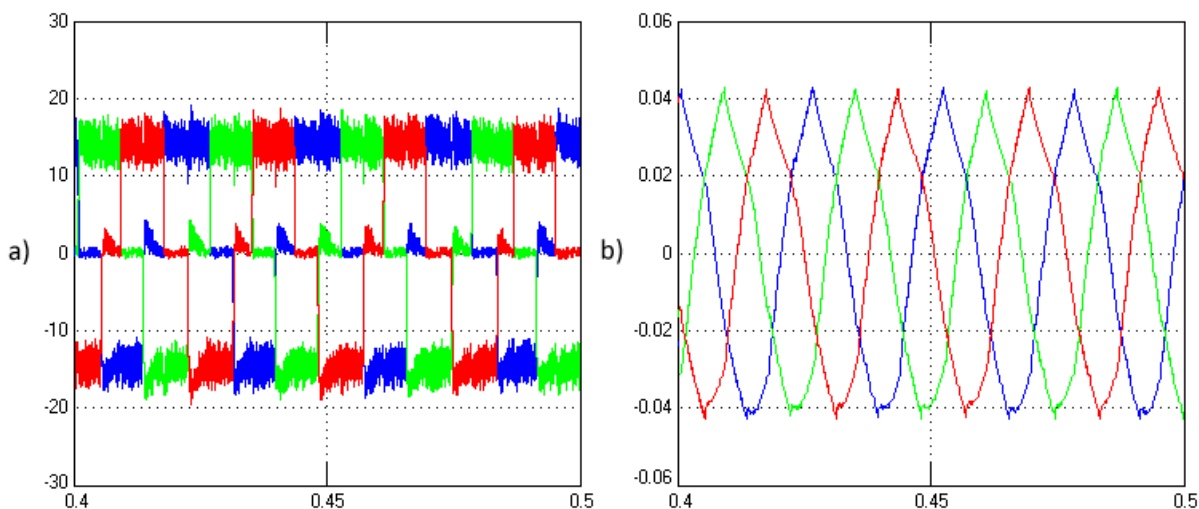
Dva ze tří fázových proudů motoru jsou měřeny proudovými LEM čidly na výstupu střídače, proud třetí fáze lze určit pomocí prvního Kirchhoffova zákona:

$$i_a + i_b + i_c = 0 . \quad (5.2.2)$$



Obrázek 23: Estimátor magnetického toku  $\Psi_{PM}$

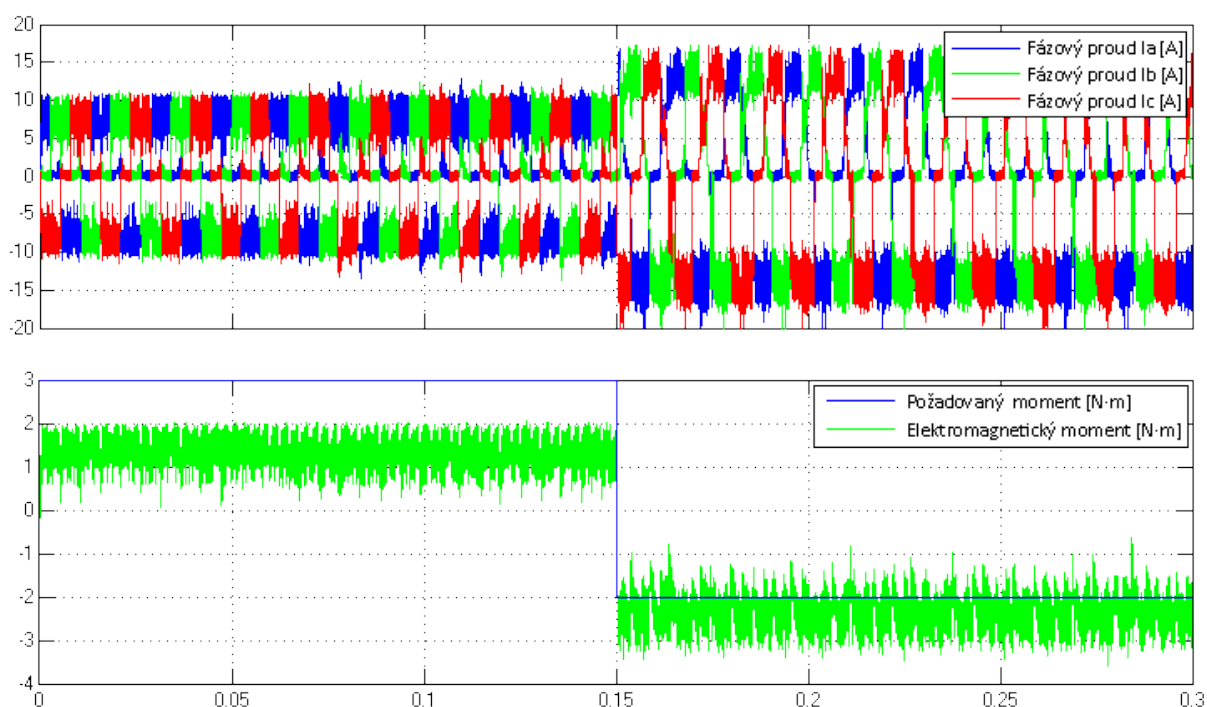
Magnetický tok je určován pro každou fázi motoru zvlášť. Výstupem estimátorů toku jsou tři signály viz Obrázek 24b. V okamžiku, kdy velikost magnetického toku dosáhne kladné nebo záporné prahové hodnoty, je vyvolána komutace. Komutační sektor, na který se má komutace uskutečnit lze určit podle magnetického toku, jenž dosáhl prahové hodnoty.



Obrázek 24: Bezsenzorová komutace a) fázové proudy b) magnetické toky

Obrázek 25 zachycuje průběh simulace regulace momentu s bezsenzorovou metodou

detekce polohy rotoru a komplementární bipolární variantou spínání. Rozběh motoru zprostředkován pomocí Hallových senzorů, přechod na bezsenzorovou detekci polohy rotoru je spuštěné v čase  $t = 0,05\text{ s}$ . BLDC motor se otáčí konstantní mechanickou rychlostí  $\omega_m = 100\text{ rad/s}$  a výchozí požadovaný točivý moment motoru je  $M = 3\text{ N}\cdot\text{m}$ . V čase  $t = 0,15\text{ s}$  dojde ke skokové změně požadovaného točivého momentu BLDC motoru na hodnotu  $M = -2\text{ N}\cdot\text{m}$ , motor tak přejde do generátorického režimu.



Obrázek 25: Regulace momentu BLDC motoru s bezsenzorovou detekcí polohy rotoru

## 6 Implementace řízení do DSP

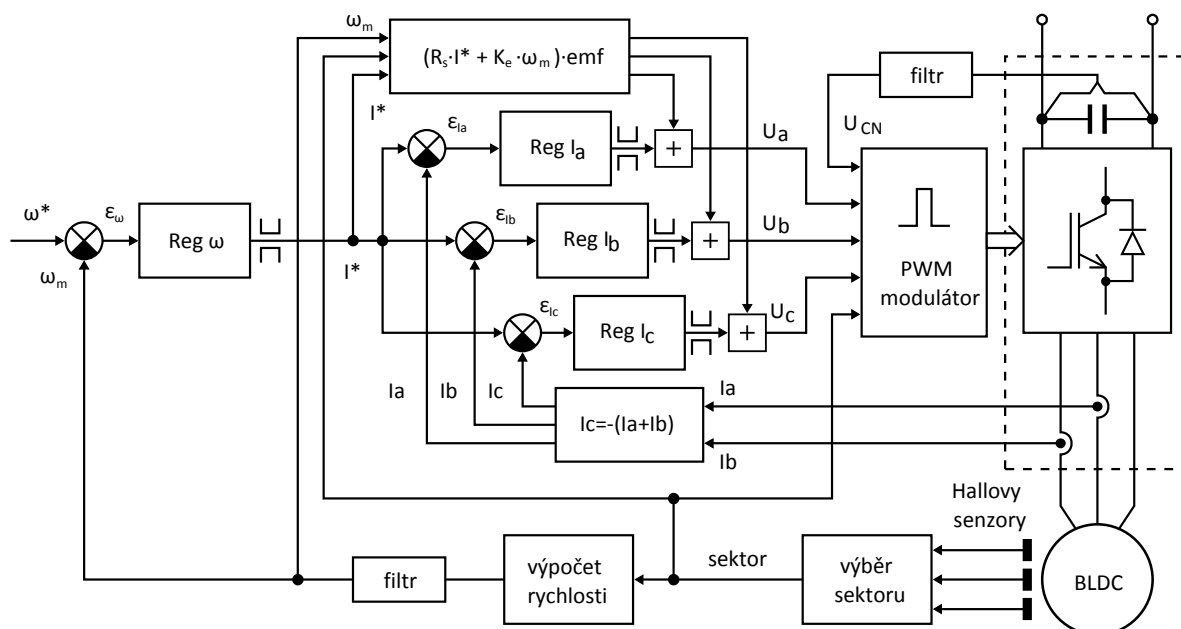
Motor je napájený z napětového střídače s IGBT tranzistory, tento střídač je vybavený měřicími LEM čidly pro měření dvou fázových proudů a napětí v meziobvodu. Řídící impulsy pro napětový střídač přicházejí z DSP procesoru, ve kterém je implementován algoritmus řízení pohonu s BLDC motorem.

### 6.1 Senzorické řízení

Použitý BLDC motor BLT-500 je vybaven trojicí Hallových senzorů, princip detekce polohy pomocí těchto senzorů byl popsán v kapitole 3.1. Algoritmus pro senzorické řízení vychází ze simulace v kapitole 5.1, jejíž výsledky slouží zároveň jako reference pro ověření správné funkce implementovaného řízení.

#### 6.1.1 Regulační schéma

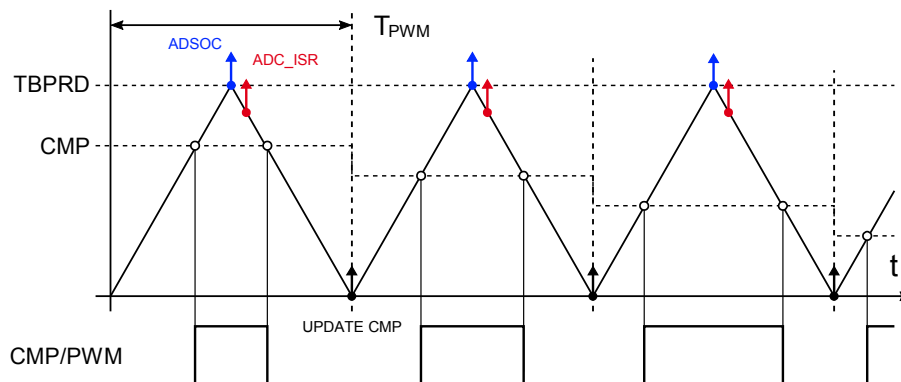
Regulační schéma pro senzorické řízení BLDC motoru je znázorněno na Obrázku 26. Algoritmus řízení je založen na základní 6-fázové komutaci, která byla popsána v kapitole 3.2. Stejně jako v simulaci tvoří algoritmus dvě regulační smyčky, proudová smyčka a nadřazená smyčka rychlostní.



Obrázek 26: Regulační schéma senzorkého řízení pohonu s BLDC motorem

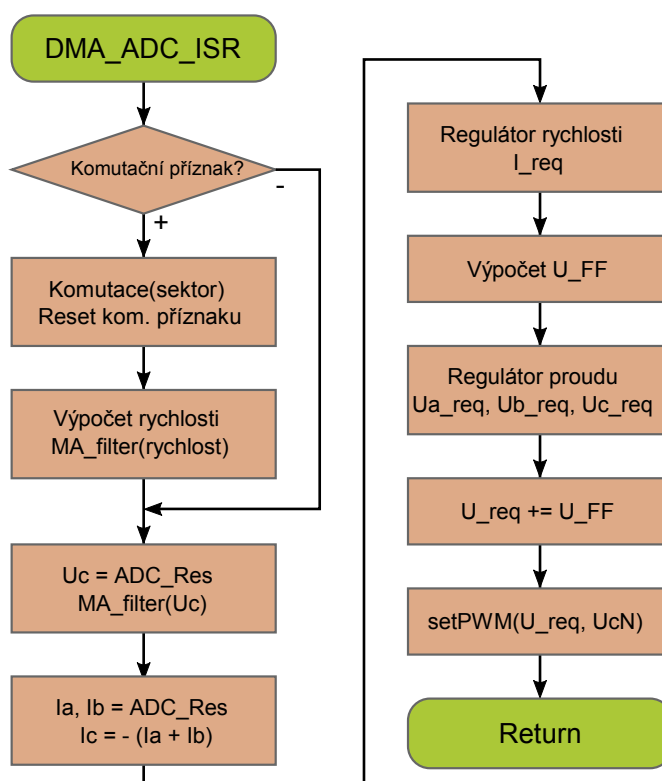
Fázové proudy jsou regulovány třemi samostatnými regulátory na požadovanou





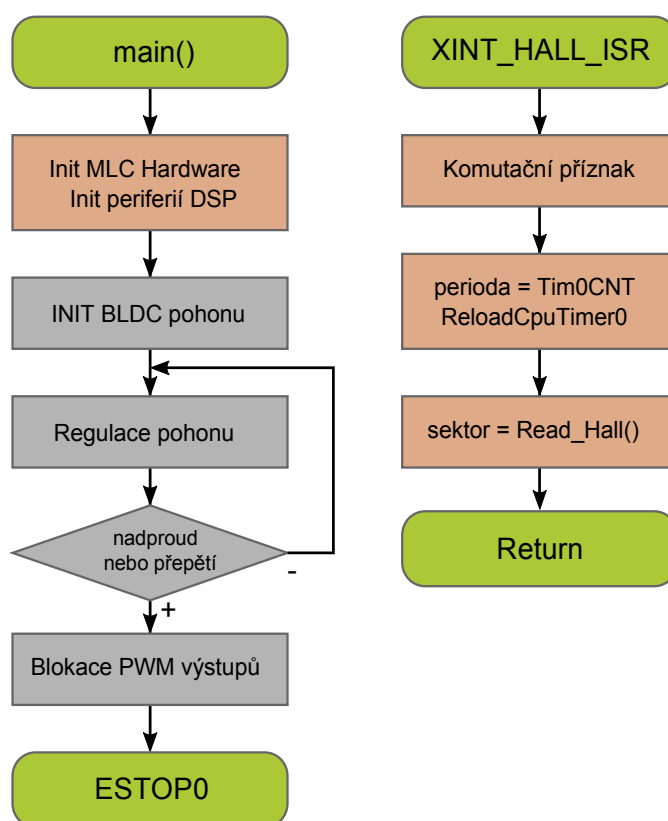
Obrázek 28: Synchronizace programu s hardwarem

Vývojový diagram hlavní regulační smyčky je na Obrázku 29. V případě rychlostní regulace pohonu se nejprve vyhodnotí nadřazená rychlostní smyčka, pokud před vstupem do přerušení od *DMA\_ADC\_ISR* došlo ke změně výstupů Hallových sond, provede se komutace na aktuální komutační vektor. Následuje výpočet rychlosti otáčení rotoru, vypočtená hodnota rychlosti se dodatečně filtruje algoritmem plovoucího průměru s délkou slova 8 bitů.



Obrázek 29: Hlavní regulační smyčka

Po komutaci dojde k načtení dat z ADC převodníků, změřené hodnoty se sníží o offset a převedou do správného měřítka. Změřené napětí v meziobvodu  $U_{CN}$  je pro odstranění šumu filtrováno plovoucím průměrem. Následuje vyhodnocení regulátoru rychlosti, dopředné vazby a regulátorů fázových proudů. Vypočtená hodnota  $U_{FF}$  je přičtena k výstupu regulátoru proudu v polaritě odpovídající komutačnímu vektoru. Funkce *setPWM* vypočte z požadovaného fázového napětí a napětí změřeného v meziobvodu hodnotu poměrného sepnutí, odpovídající hodnotu zapíše do compare registru ePWM modulu.



Obrázek 30: a) funkce main, b) přerušení od Hallových senzorů

Původním záměrem bylo připojení Hallových senzorů na CAP modul procesoru pro snadné měření rychlosti otáčení. Z důvodu implementace na MLC interface nebylo možné CAP modul využít. Alternativním řešením bylo připojení senzorů na GPIO vstupy s využitím externích přerušení. Rutina *XINT\_HALL\_ISR* (Obrázek 30b) obsluhuje přerušení od Hallových senzorů, toto externí přerušení je vyvoláno při náběžné i sestupné hraně všech tří signálů. Na začátku této rutiny je nastaven příznak, zda došlo ke změně vstupů a je požadována komutace. Následně je přečtena a vynulována hodnota counter registru

čítače Tim0, tato hodnota udává dobu od předchozího přerušení a slouží pro výpočet rychlosti otáčení rotoru. Na závěr se načtou stavy GPIO vstupů a podle komutační tabulky se dekóduje aktuální komutační sektor, ve kterém se rotor nachází.

Rychlosti otáčení motoru lze spočítat z doby trvání jednoho komutačního kroku, to je doba, která uběhla mezi jednotlivými přerušeními od Hallových sond. Mechanická frekvence otáčení se vypočte následovně:

$$f_m = \frac{f_{TIM}}{CNT \cdot N \cdot p}, \quad (6.1.2.1)$$

kde  $f_{TIM}$  je hodinová frekvence čítače,  $CNT$  je hodnota registru čítače,  $N$  je počet komutačních kroků a  $p$  je počet pól-párů BLDC motoru. Směr otáčení rotoru je určen ze sledu po sobě jdoucích sektorů. Takto vypočtená rychlost je nepřesná obzvláště v nízkých otáčkách.

V hlavní funkci main proběhne po spuštění programu inicializace periferií MLC interface, inicializace vlastního DSP procesoru a jeho modulů. Po nakonfigurování procesoru dojde k povolení přerušení a odblokování PWM modulu, tím se spustí převod ADC a motor se začne roztáčet. V nekonečné smyčce programu probíhá kontrola přepětí, nadproudu a dalších poruchových stavů. V případě detekce poruchy dojde k blokaci PWM výstupů a odstavení motoru.

### 6.1.3 Regulace rychlosti BLDC motoru

BLDC motor v režimu regulace rychlosti je mechanicky spojen s asynchronním motorem v režimu regulace momentu, asynchronní motor tak tvoří zátěžný moment BLDC motoru, který je popsán pohybovou rovnicí:

$$M = M_a + M_z,$$

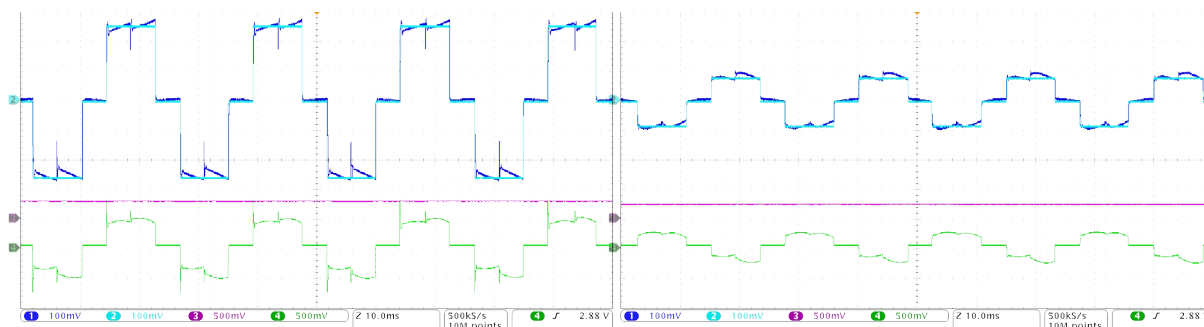
kde  $M$  je produkovaný moment,  $M_a$  je akcelerační moment a  $M_z$  je moment zátěže.

Stejnoseměrné meziobvody střídačů obou motorů jsou vzájemně propojeny a napájeny společným stejnosměrným napětím 40 V, spojením meziobvodů je zajištěna možnost výměny energie mezi motory při rekuperaci. Pro regulaci rychlosti BLDC motoru s proměnnou zátěží je použita komplementární bipolární technika spínání, neboť umožňuje využití všech čtyř kvadrantů.

Na Obrázku 31 vlevo je BLDC regulován na mechanickou rychlost  $\omega_m = 31,5 \text{ rad/s}$

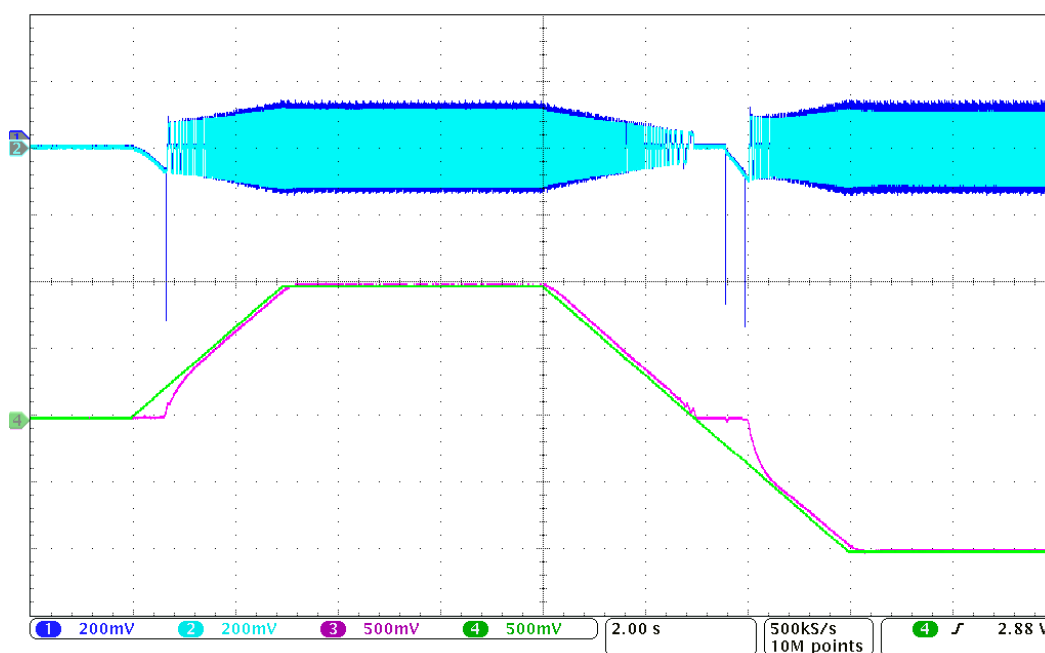


a je zatěžován asynchronním motorem momentem  $M_z = 1 N \cdot m$ . BLDC motor má kladný směr otáčení a produkuje kladný točivý moment, pracuje tedy v motorickém režimu prvního kvadrantu. Obrázek 31 vpravo zachycuje průběhy motoru, který je regulován na mechanickou rychlost  $\omega_m = 31,5 \text{ rad/s}$ . Změnou momentu zátěže na hodnotu  $M_z = -1 N \cdot m$  začne BLDC motor produkovat záporný moment a přechází do režimu generátorické brzdy. Proud  $I_a$  je s napětím  $U_a$  v protifázi, motor tím pádem pracuje v druhém kvadrantu.



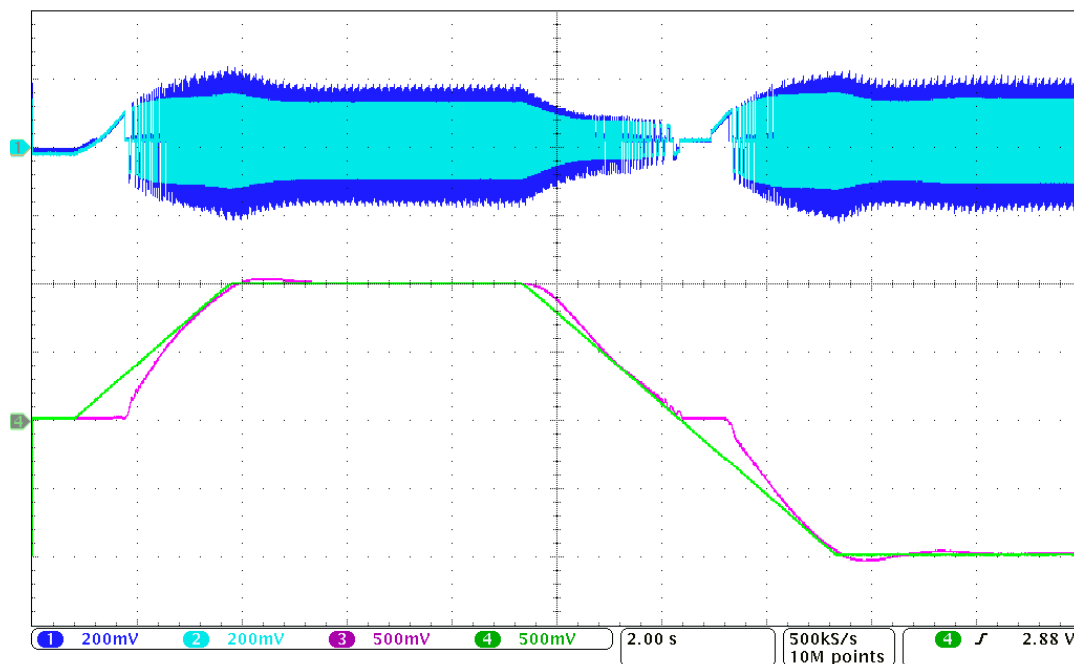
Obrázek 31: Regulace rychlosti, vlevo) první kvadrant, vpravo) druhý kvadrant  
1)  $I_a$  [1A/d] 2)  $I^*$  [1A/d] 3)  $U_{FF}$  [6V/d] 4)  $U_a$  [6V/d]

Dynamika změny rychlosti nezatíženého BLDC motoru s komplementárním bipolárním spínáním je zachycena na Obrázku 32. Na začátku přechodového děje rychlost  $\omega_m$  stoupá po lineární rampě na hodnotu  $\omega^* = 47 \text{ rad/s}$ . Po ustálení rychlosti dojde k další změně požadavku, rychlost klesá po rampě na opačnou hodnotu rychlosti  $\omega^* = -47 \text{ rad/s}$ .



Obrázek 32: Regulace rychlosti BLDC motoru – komplementární bipolární spínání  
1)  $I_a$  [1A/d] 2)  $I^*$  [1A/d] 3)  $\omega_m$  [23,5rad·s<sup>-1</sup>/d] 4)  $\omega^*$  [23,5rad·s<sup>-1</sup>/d]

V případě regulace rychlosti BLDC motoru s nezávislým spínáním, která je znázorněna na Obrázku 33, dojde při stejné změně rychlosti k malým překmitům rychlosti oproti komplementárnímu spínání. Důvodem těchto překmitů je stejné nastavení regulátorů rychlosti a proudu pro komplementární i nezávislé spínání.

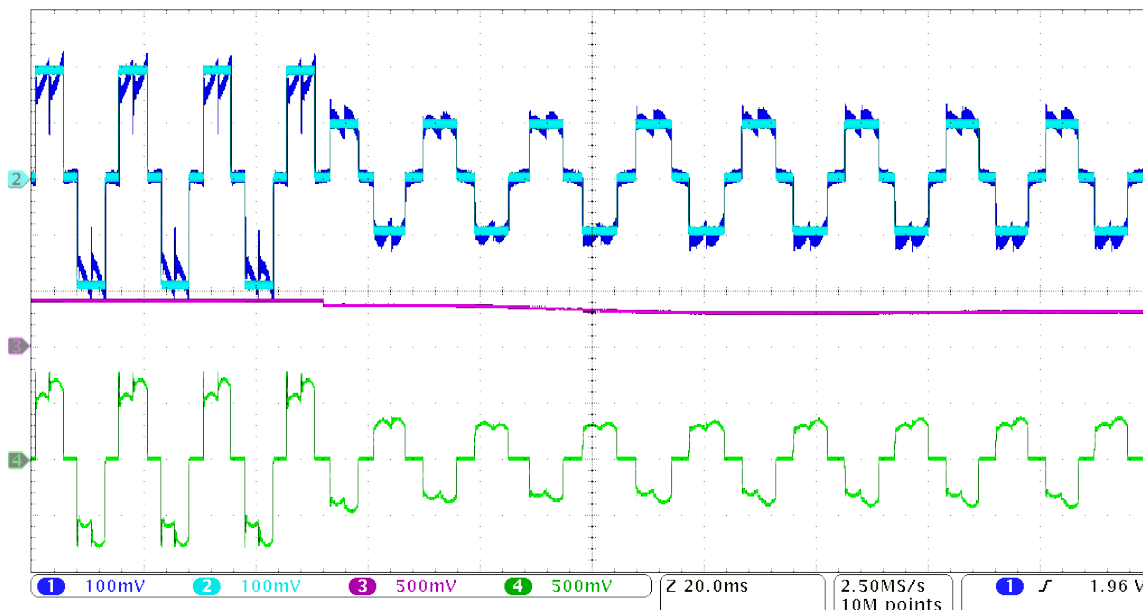


Obrázek 33: Regulace rychlosti BLDC motoru – nezávislé bipolární spínání

1)  $I_a$  [1A/d] 2)  $I^*$  [1A/d] 3)  $\omega_m$  [23,5rad·s<sup>-1</sup>/d] 4)  $\omega^*$  [23,5rad·s<sup>-1</sup>/d]

#### 6.1.4 Regulace momentu BLDC motoru

BLDC motor v režimu regulace momentu je spojen s asynchronním motorem v režimu regulace rychlosti. Na Obrázku 34 je zachycen přechod z motorického do brzděného režimu BLDC motoru s komplementárním bipolárním spínáním. Soustrojí je roztočeno asynchronním motorem na výchozí mechanickou rychlost  $\omega_m = 52 \text{ rad/s}$ . Na začátku přechodového děje je požadavek na momentotvorný proud BLDC motoru  $I^* = 2 \text{ A}$ , následně dojde ke skokové změně požadavku na hodnotu  $I^* = -1 \text{ A}$ . V tu chvíli začne BLDC motor produkovat záporný moment, přejde do režimu brzdy v druhém kvadrantu a mechanická rychlost soustrojí klesne na hodnotu  $\omega_m = 48 \text{ rad/s}$ . Obě varianty komplementárního spínání vykazují stejné dynamické chování motoru.



Obrázek 34: Regulace momentu BLDC motoru s komplementárním spínáním - brzdění  
 1)  $I_a$  [1A/d] 2)  $I^*$  [1A/d] 3)  $U_{FF}$  [6V/d] 4)  $U_a$  [6V/d]

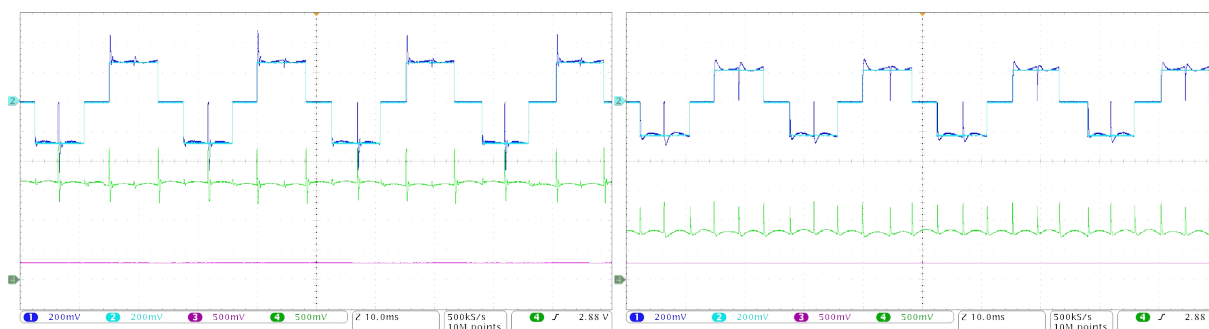
### 6.1.5 Regulace proudu v meziobvodu

Regulační schéma s čidlem proudu v meziobvodu střídače a jedním regulátorem proudu je znázorněna na Obrázku 27. Tato topologie je jednoduchá na implementaci a má řadu výhod oproti topologii se třemi regulátory proudu:

- napájeny jsou pouze dvě fáze proto je možné regulovat jen jeden fázový proud,
- stačí jednou čidlo proudu ve stejnosměrném obvodu,
- umístění čidla umožňuje použít méně přesné čidlo. [3]

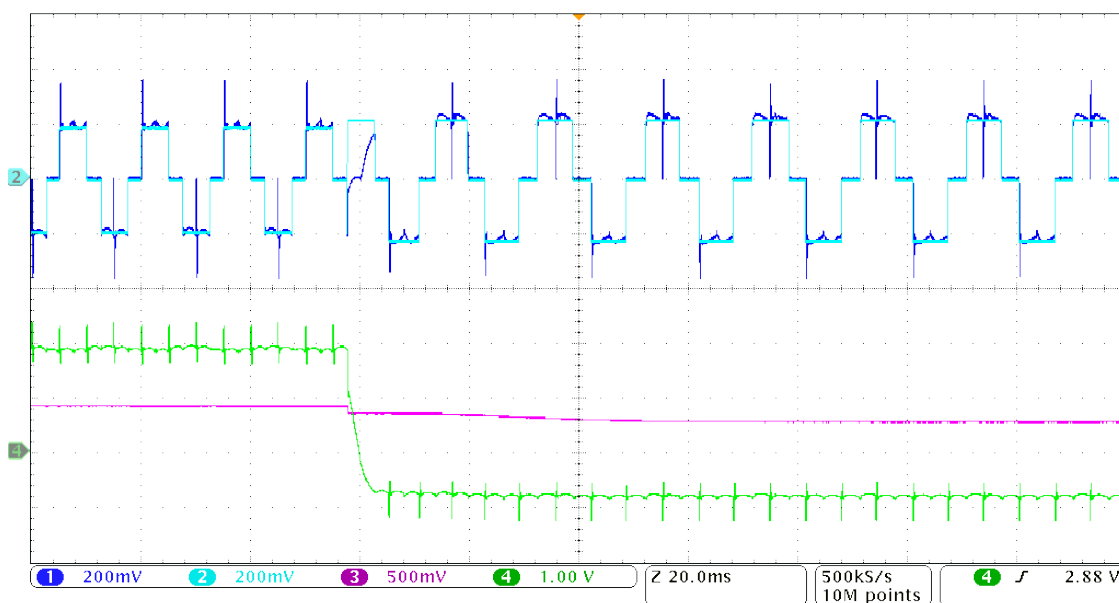
Pokud napěťový střídač nedisponuje čidlem proudu ve stejnosměrném meziobvodu jako v případě použitého laboratorního prototypu, je možné proud meziobvodu určit jsou-li známy fázové proudy motoru a komutační sektor, ve kterém se aktuálně nachází rotor motoru. Neboť stejný proud, který prochází stejnosměrným obvodem střídače prochází i dvěma fázemi motoru. Pro tuto topologii byla zvolena technika nezávislého spínání tranzistorů měniče.

Na Obrázku 35 jsou pro porovnání zachyceny průběhy BLDC motoru v režimu regulace rychlosti s nezávislým spínáním pro bipolární a unipolární variantu PWM modulace. BLDC motor je regulován na mechanickou rychlost  $\omega_m = 31,5 \text{ rad/s}$  a je zatěžován konstantním momentem  $M_z = 0,7 \text{ N}\cdot\text{m}$ .



Obrázek 35: Nezávislé spínání - motorický režim, vlevo) bipolární, vpravo) unipolární  
 1)  $I_a$  [2A/d] 2)  $I^*$  [2A/d] 3)  $U_{FF}$  [6V/d] 4)  $U_r$  [6V/d]

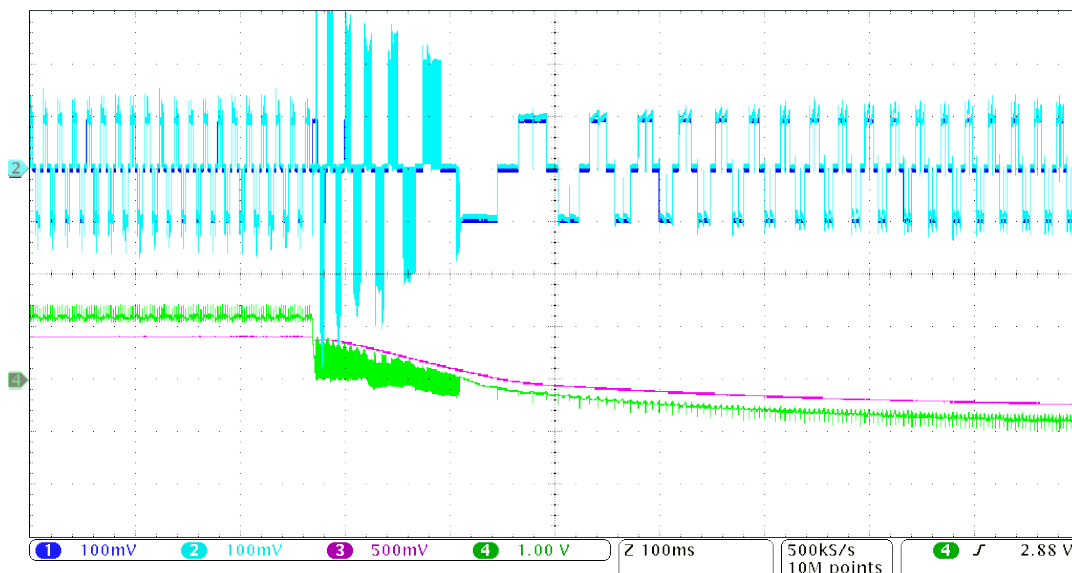
Na dalším Obrázku 36 je znázorněn přechod z motorického do brzdného režimu BLDC motoru s momentovou regulací pohonu. Výchozí mechanická rychlost soustrojí je  $\omega_m = 52 \text{ rad/s}$  s požadavkem na momentotvorný proud BLDC motoru  $I^* = 2 \text{ A}$ . Po změně požadavku proudu na hodnotu  $I^* = -2,3 \text{ A}$  přejde motor do brzdného režimu v druhém kvadrantu a sníží tak mechanickou rychlost soustrojí na hodnotu  $\omega_m = 36,5 \text{ rad/s}$ .



Obrázek 36: Regulace momentu s nezávislým bipolárním spínáním - brzdění  
 1)  $I_a$  [2A/d] 2)  $I^*$  [2A/d] 3)  $U_{FF}$  [6V/d] 4)  $U_a$  [12V/d]

Unipolární varianta PWM modulace nezávislého spínání je často využívanou technikou spínání v jednoduchých a levných pohonech. Jednou z nejběžnějších aplikací je provoz pohonu s pasivní zátěží v I. a III. kvadrantu. Obrázek 37 zachycuje přechod z prvního do třetího kvadrantu nezátíženého BLDC motoru v režimu regulace momentu. Výchozí

požadavek je kladný momentotvorný proud  $I^* = 1 A$ , který roztáčí motor na mechanickou rychlost  $\omega_m = 56 \text{ rad/s}$ . Následně dojde ke změně požadavku proudu na opačnou hodnotu  $I^* = -1 A$ , motor postupně přejde do třetího kvadrantu a otáčí se rychlostí  $\omega_m = -56 \text{ rad/s}$ .

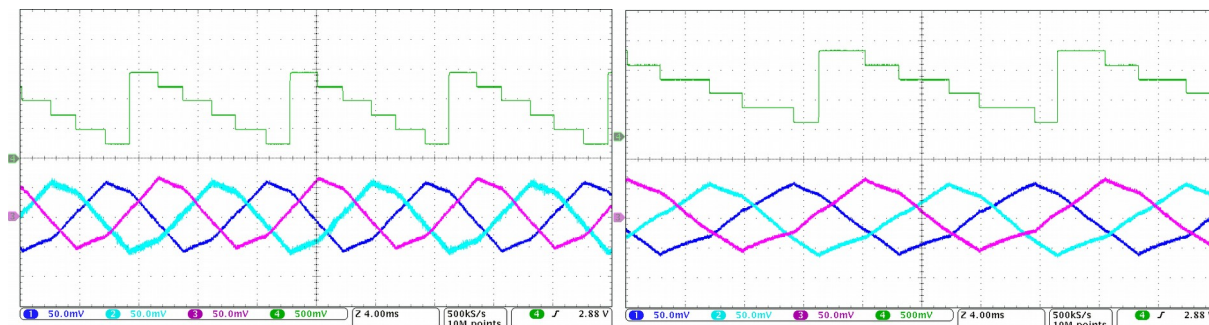


Obrázek 37: Regulace momentu s nezávislým unipolárním spínáním - změna směru  
1)  $I_a$  [1A/d] 2)  $I^*$  [1A/d] 3)  $U_{FF}$  [6V/d] 4)  $U_a$  [12V/d]

## 6.2 Bezsenzorové řízení

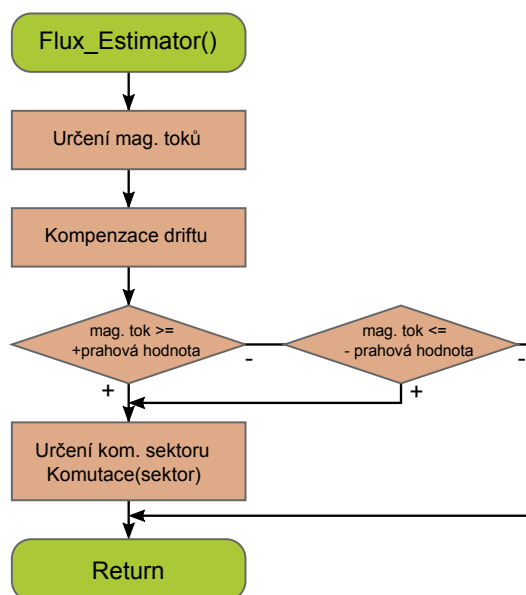
Střídač laboratorního prototypu pohonu s BLDC motorem nebyl vybaven měřením fázových napětí motoru, která jsou nezbytná pro implementaci bezsenzorových metod sledující indukované napětí motoru. Z toho důvodu byla implementována pouze bezsenzorová metoda sledování magnetického toku motoru. Pro určení magnetického toku bylo místo velikosti fázového napětí, dosažené napětí aplikované střídačem na svorky motoru, které lze určit z poměrného sepnutí příslušné fáze motoru a napětí v meziobvodu střídače podle vztahu (5.2.2.2).

Princip bezsenzorové komutace byl popsán v kapitolách 3.3.2 a 5.2. Výstupní signály z estimátorů toku jednotlivých fází motoru slouží jako komutační signály a výběr komutačního sektoru. Obrázek 38 zobrazuje vypočtené magnetické toky jednotlivých fází motoru a určení komutačního sektoru pro motorický a brzdový režim BLDC motoru. Vývojový diagram bezsenzorové komutace je na Obrázku 39.



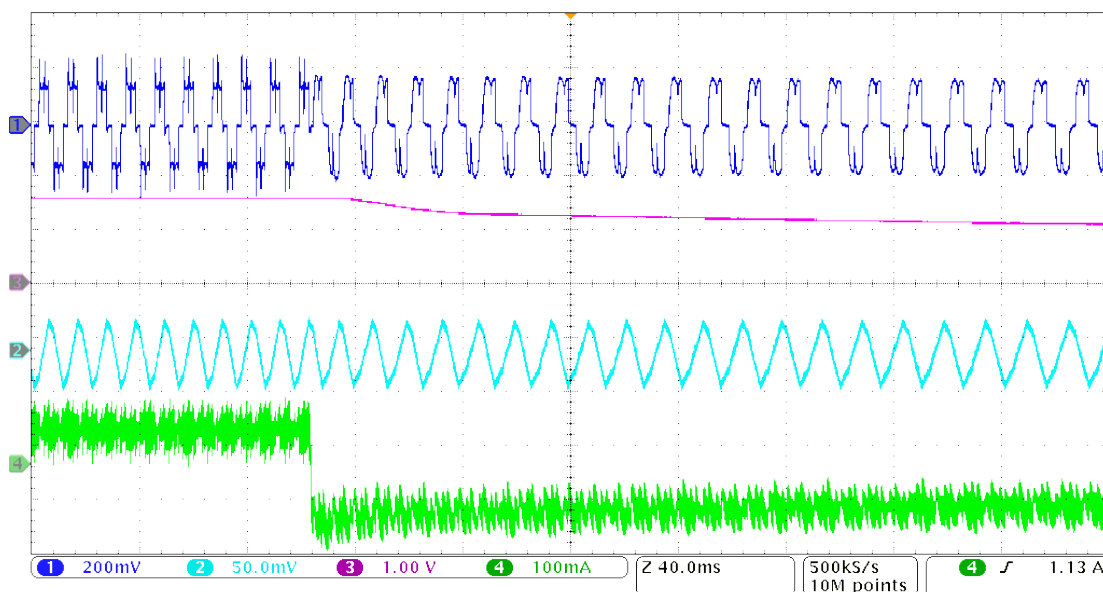
Obrázek 38: Bezsensorová komutace – určení sektoru, vlevo) motor, vpravo) brzda  
 1)  $\Psi_{PMa}$  [0,0175Wb/d] 2)  $\Psi_{PMb}$  [0,0175Wb/d] 3)  $\Psi_{PMc}$  [0,0175Wb/d] 4) sektor [-]

Rozběh motoru z nulových otáček je možný pouze otevřenou regulační smyčkou, kdy se postupně zkracuje doba periody komutace a zvyšuje momentotvorný proud BLDC motoru.



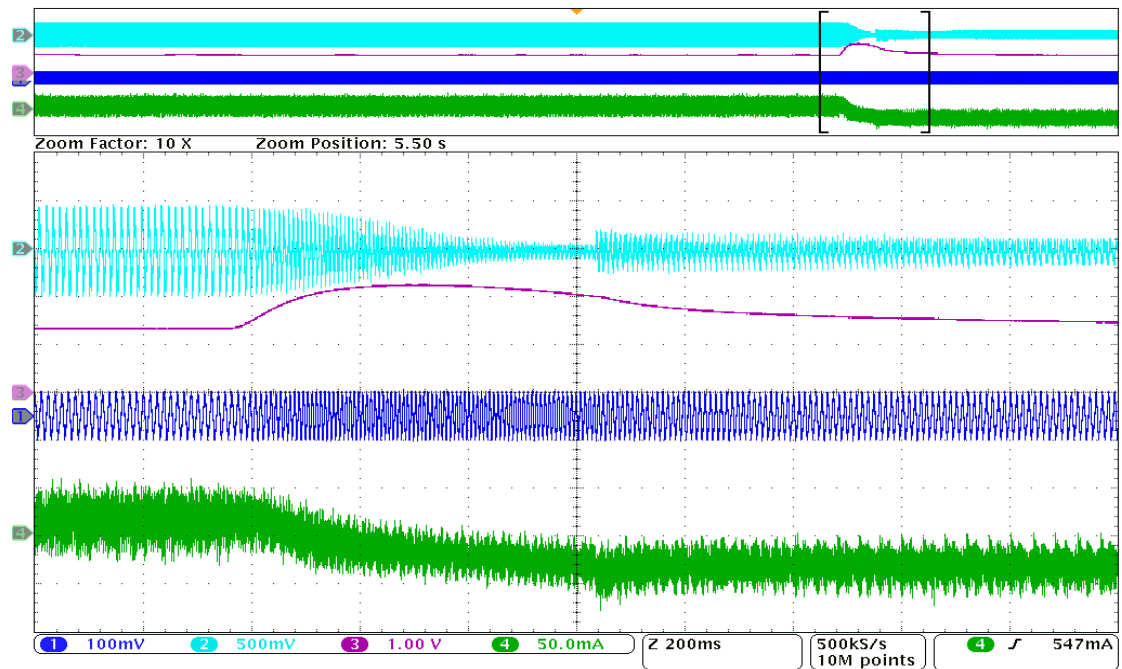
Obrázek 39: Bezsensorové komutace

Momentová regulace BLDC motoru s bezsensorovým způsobem detekce rotoru motoru využívající estimátoru magnetického toku byla implementována s komplementární bipolární variantou spínání. Následující Obrázek 40 zachycuje přechodový děj BLDC motoru s regulací momentu z motorického do brzdného režimu. Výchozí mechanická rychlost soustrojí je s požadavkem na momentotvorný proud BLDC motoru  $I^* = 2\text{ A}$ . Změnou požadovaného momentotvorného proudu na zápornou hodnotu  $I^* = -1,5\text{ A}$  začne BLDC motor produkovat záporný moment a přejde do brzdného režimu. Zároveň se začne snižovat mechanická rychlost soustrojí a generovaný proud protéká zpět do meziobvodů spojených střídačů.



Obrázek 40: Bezsensorová komutace s komplementárním bip. spínáním – brzdění  
 1)  $I_a$  [2A/d] 2)  $\Psi_{PMa}$  [0,035Wb/d] 3)  $\omega_m$  [46rad·s<sup>-1</sup>/d] 4)  $I_d$  [100mA/d]

Následující experiment zachycuje regulaci rychlosti BLDC motoru s implementovanou bezsensorovou komutací. Na Obrázku 41 je zobrazen přechodový děj, kdy BLDC motor v režimu regulace rychlosti je regulován na požadovanou mechanickou rychlost soustrojí  $\omega^* = 63 \text{ rad/s}$ . Na začátku přechodového děje je BLDC motor zatěžován momentem  $M_z = 0,7 \text{ N}\cdot\text{m}$ . Následně dojde ke skokové změně zátěžného momentu na zápornou hodnotu  $M_z = -1,4 \text{ N}\cdot\text{m}$ , to má za následek urychlení soustrojí. Regulátor rychlosti zareaguje na nárůst mechanické rychlosti a snížením požadavku na momentotvorný proud až na zápornou hodnotu, BLDC motor tak přejde do brzděného režimu v druhém kvadrantu.



Obrázek 41: Bezsensorová komutace s komplementárním bip. spínáním – regulace rychlosti  
1)  $\Psi_{PMa}$  [0,04Wb/d] 2)  $I_a$  [5A/d] 3)  $\omega_m$  [46rad·s<sup>-1</sup>/d] 4)  $I_a$  [50mA/d]



## 7 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navržení systému řízení pohonu s BLDC motorem. Pro řešení diplomové práce byla zvolena následující metodika postupu:

Prvotní návrh algoritmů řízení BLDC motoru, ověření vlastností algoritmů pomocí počítačové simulace, implementace algoritmů řízení do DSP procesoru a na závěr testování na experimentálním laboratorním prototypu.

Pro senzorický způsob detekce polohy rotoru BLDC motoru byl navržen řídicí systém pohonu s šesti fázovou komutační strategií v různých variantách PWM generace požadovaného výstupního napětí. PWM spínání lze dělit z pohledu způsobu spínání prvků jedné větve střídače na nezávislé a komplementární spínání a z pohledu polarit výstupního napětí v rámci jedné periody PWM na bipolární a unipolární, celkem tedy čtyři různé varianty. Strukturu řízení pohonu, tvoří proudová regulační smyčka a nadřazená rychlostní smyčka s diskrétními PI regulátory. Proudová regulační smyčka může mít dvě odlišné topologie viz kapitola 6.1.1:

- i. Topologie s jedním čidlem proudu ve stejnosměrném meziobvodu střídače klade společně s nezávislou technikou spínání, pro kterou postačují pouze 3 PWM výstupy bez generace mrtvých časů menší nároky na hardware řídicího systému.
- ii. Druhá topologie využívá měření fázových proudů BLDC motoru, je univerzálnější a robustnější. Pro zlepšení dynamiky proudové smyčky byla navržena dopředná vazba, která umožňuje použití menšího zesílení proudových regulátorů a tím i snížení kmitů regulovaných proudů.

Pro bezsenzorový způsob detekce polohy rotoru byla použita metoda založená na sledování spřaženého magnetického toku od permanentních magnetů rotoru BLDC motoru. Pro tuto metodu není nutné měření indukovaného napětí na volné fázi motoru, jak je tomu u klasických bezsenzorových komutací založených na snímání průchodu indukovaného napětí nulou. Tato metoda byla oproti původním předpokladům zvolena z důvodu dostupnosti střídače, který nebyl vybaven měřením fázových napětí.

Algoritmy řízení se senzorovým a bezsenzorovým způsobem detekce polohy rotoru byly nejprve simulačně (kapitola 5) a poté i experimentálně ověřovány na laboratorním

prototypu. Z provedených experimentů vyplývá, že komplementární metody spínání jsou univerzálnější a umožňují bezproblémový provoz ve všech čtyřech kvadrantech s proměnnou zátěží viz kapitola 6.1. Funkčnost estimátoru spřaženého magnetického toku dokládají experimenty, při kterých byl pohon provozován v motorickém a brzděném režimu pro rychlostní i momentovou regulaci viz kapitola 6.2. Nevýhodou této bezsenzorové metody detekce polohy rotoru je problematická oblast nízkých otáček, kdy nelze polohu přesně určit a rozběh motoru z nulových otáček musí být prováděn pomocí otevřené regulační smyčky.

Hlavním přínosy této práce:

- Návrh a tvorba řídicích algoritmů pro BLDC motor se senzorovým a bezsenzorovým způsobem detekce polohy rotoru.
- Simulační ověření vybraných vlastností navržených algoritmů.
- Implementace do digitálního signálového procesoru TMS320f28335.
- Experimentální ověření vlastností navržených algoritmů na postaveném experimentálním laboratorním prototypu.

V návaznosti na tuto práci by mohly být dále řešeny zejména další algoritmy bezsenzorové detekce polohy rotoru BLDC motoru. S patřičně vybaveným měničem by bylo možné implementovat metody založené na měření indukovaného napětí motoru. Druhou možností je vylepšení současné metody založené na matematickém modelu motoru a estimaci magnetického toku. Stávající algoritmus by bylo možné doplnit o moderní techniky jako je například EKF, fázový závěs, injektážní metody atd.

## 8 Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] AMBETTA, D.; AHFOCK, A. New sensorless commutation technique for brushless DC motors. *IET Electric Power Applications*, 2009, 3.1: 40-49.
- [2] LEPKA, Jaroslav a Pavel GRASBLUM. *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory* [online]. 2011 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura\\_09\\_1111.pdf](http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf)
- [3] AKIN, Bilal a Manish BHARDWAJ. *Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors: Application Report* [online]. Texas Instruments, 2013 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq6/sprabq6.pdf>
- [4] TABARRAEE, Kamran, et al. Comparison of brushless DC motors with trapezoidal and sinusoidal back-EMF. In: *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference on*. IEEE, 2011.
- [5] COLTON, Shane William. *Design and prototyping methods for brushless motors and motor control*. 2010. PhD Thesis. Massachusetts Institute of Technology.
- [6] KRAUSE, Paul C, Oleg WASYNCZUK, Scott D SUDHOFF a Steven PEKAREK. *Analysis of electric machinery and drive systems*. Third edition. IEEE Press, 2013, xiv, 659 pages:. ISBN 978-111-8024-294.
- [7] BOSE, Bimal K. *Modern power electronics and AC drives*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, c2002, xxi, 711 p. ISBN 01-301-6743-6.
- [8] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika-svazek III. Skriptum ZČU Plzeň*, 2003.
- [9] KOŠAN, Tomáš. *MLC interface - vývojový kit pro víceúrovňové měniče s procesorem a FPGA: Výzkumná zpráva č.: 22190 - 010 – 2012*. Plzeň: RICE/KEV Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2015-02-21].
- [10] TMS320F28335 | Delfino F2833x/F2837x | Real-time Control | Description & parametrics. [online]. Texas Instruments [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/TMS320F28335/description>
- [11] GAMAZO-REAL, José Carlos; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Ernesto; GÓMEZ-GIL, Jaime. Position and speed control of brushless DC motors using sensorless techniques and application trends. *Sensors*, 2010, 10.7: 6901-6947.
- [12] CHOLASTA, Petr. *3-Phase BLDC Hall Sensor Application Using S12ZVM: Application Note* [online]. Freescale Semiconductor, 2013 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: [http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app\\_note/AN4718.pdf](http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN4718.pdf)
- [13] ELEVICH, Leonard N. *3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers: Application Note* [online]. Freescale Semiconductor, 2005 [cit. 2015-02-16]. Dostupné z: <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1916.pdf>
- [14] KIM, Tae-Hyung; EHSANI, Mehrdad. Sensorless control of the BLDC motors from near-zero to high speeds. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2004, 19.6: 1635-1645.

- [15] KIM, Tae-Hyung; LEE, Hyung-Woo; EHSANI, Mehrdad. State of the art and future trends in position sensorless brushless DC motor/generator drives. In: *Industrial Electronics Society, 2005. IECON 2005. 31st Annual Conference of IEEE*. IEEE, 2005. p. 8 pp.
- [16] InstaSPIN™-BLDC Solution. *Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com* [online]. [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/instaspin-blDC>
- [17] SREEPRIYA, R. a R. RAJAGOPAL. Sensorless Control of Three Phase BLDC Motor Drive with Improved Flux Observer. In: *2013 International Conference on Control Communication and Computing (ICCC) on. IEEE, 2013*.
- [18] Golden Motor Technology. *BLDC motors: Electric Tricycle Motors* [online]. [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: <http://www.goldenmotor.com/frame-blDCmotor.htm>
- [19] COLTON, Shane. *Flux Observer-Based Sensorless Field-Oriented Control of Surface Permanent Magnet Synchronous Motors (Gen. 1)*. 2014 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [https://b94be14129454da9cf7f056f5f8b89a9b17da0be.googleusercontent.com/host/0B0ZbiLZrqVa6Y2d3UjFVWDhNZms/motordrive/sensorless\\_gen1\\_Rev1.pdf](https://b94be14129454da9cf7f056f5f8b89a9b17da0be.googleusercontent.com/host/0B0ZbiLZrqVa6Y2d3UjFVWDhNZms/motordrive/sensorless_gen1_Rev1.pdf)
- [20] Implement Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) vector control drive. MATHWORKS. *MATLAB Documentation* [online]. [cit. 2015-04-09]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/pmsynchronousmotordrive.html>
- [21] Iepure, L.I.; Boldea, I.; Blaabjerg, F., Hybrid I-f Starting and Observer-Based Sensorless Control of Single-Phase BLDC-PM Motor Drives, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.59, no.9, pp.3436,3444, Sept. 2012
- [22] Han Kong; Jinglin Liu; Guangzhao Cui, Study on Field-Weakening Theory of Brushless DC Motor Based on Phase Advance Method, *Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2010 International Conference on* , vol.3, no., pp.583,586, 13-14 March 2010

## 9 Přílohy

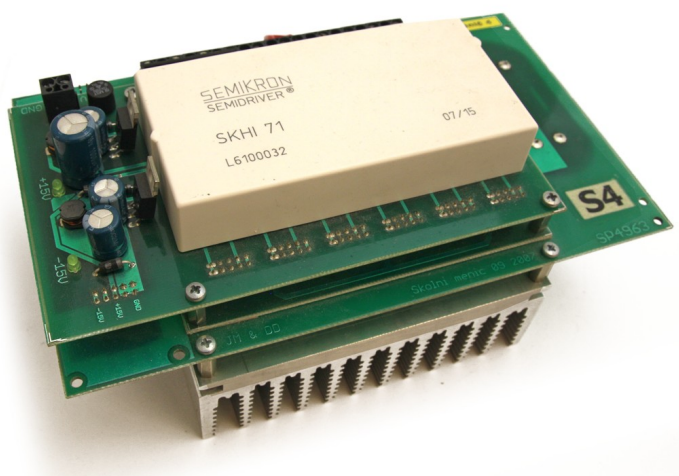
*Příloha A: Parametry BLDC motoru BLT-500 [18]*

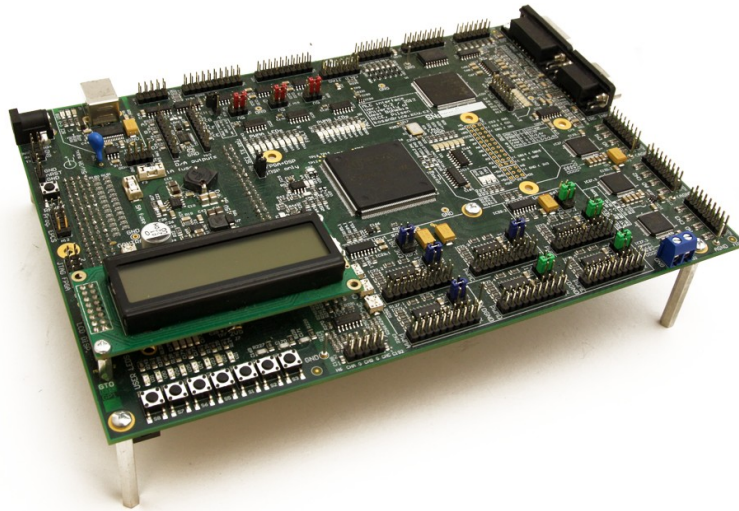
štítkové	jmenovité napětí - $U_N$	48 V
	jmenovitý výkon - $W_N$	500 W
	počet pól-párů - $p$	4
	jmenovité otáčky - $n_n$	1000 ot/min
změřené / vypočtené	odpor vinutí - $R_s$	0,12 $\Omega$
	indukčnost vinutí - $L$	0,223 mH
	konstanta EMF - $K_e$	0,02715 V·s/rad

*Příloha B: BLDC motor BLT-500*



*Příloha C: Třífázový napěťový střídač s IGBT*



*Příloha D: MLC Interface s DSP procesorem**Příloha E: Soustrojí s BLDC motorem a asynchronním motorem*