



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ SENZOROVÉHO A
BEZSENZOROVÉHO ŘÍZENÍ 3FÁZOVÉHO BLDC
MOTORU**

COMPARISON OF SENSOR AND SENSORLESS CONTROL OF 3-PHASE BLDC MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Michal Drápal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Roupec, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Ing. Michal Drápal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jan Roupec, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Porovnání vlastností sensorového a bezsensorového řízení 3 fázového BLDC motoru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se v této práci bude zabývat problematikou řízení BLDC motoru v sensorovém i bezsensorovém režimu. Ve vývojovém prostředí firmy NXP navrhne firmware k ověření vlastností regulátoru proudu, rychlosti a polohy. Vše bude řešeno pomocí C/C++.

Cíle diplomové práce:

Práce bude obsahovat teoretické seznámení s řízením BLDC motorů a uvedení schématu použitého NXP kitu. Ověření přesnosti měření relativní polohy otáček BLDC motoru s přesností uvedenou od výrobce. Implementace regulátorů a limitace vstupní regulační odchylky, proudu a momentu. Zhodnotit možnosti budoucí spolupráce s firmou NXP a jejich technickou podporu.

Seznam doporučené literatury:

SKALICKÝ, J.: Elektrické servopohony. Skriptum, VUT, Brno, 2001.

PAVELKA, J.: Elektrické pohony. Skriptum, ČVUT, Praha, 1996.

Microcontrollers Developer Resources. Firemní materiály NXP, 2019, dostupné z <https://www.nxp.com/design/microcontrollers-developer-resources:MCUDEV>.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na porovnání senzorového a bezsenzorového řízení 3fázového BLDC motoru. Tato práce byla sestavena a konzultována s odborníky z firmy Honeywell, spol. s r. o. a NXP Semiconductors Czech republic, s. r. o. Rešeršní část popisuje princip fungování BLDC motoru a také jednotlivé způsoby řízení. V praktické části je testována senzorová a bezsenzorová aplikace poskytnutá firmou NXP. Vzhledem k poskytnutým aplikacím je k práci navíc přiložen i stavový automat pro bezsenzorové řízení na základě původní bezsenzorové aplikace od firmy NXP. Závěr obsahuje zhodnocení spolupráce s firmou NXP a zamyšlení se nad možnou budoucí spoluprací.

KLÍČOVÁ SLOVA

BLDC motor, senzorové a bezsenzorové řízení, stavový automat

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on comparison of sensed and sensorless control of 3phase BLDC motor. This diploma thesis was compiled with engineers from Honeywell, spol. s r. o. and NXP Semiconductors comapny. Theoretical part of the diploma thesis is describing princip of function BLDC motor and different methods of control. The testing of NXP sensed and sensorless application is done in the practical part. Regarding to the fact, that applications were provided by NXP, furthemore the diploma thesis additionally contains a state machine using sensorless application from NXP. Finally, the author is evaluating a cooperation with NXP company and he thinks about next possible cooperation.

KEYWORDS

BLDC motor, sensed and sensorless control, state machine

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRÁPAL, Michal. *POROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ SENZOROVÉHO A BEZSENZOROVÉHO ŘÍZENÍ 3FÁZOVÉHO BLDC MOTORU*, Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl využít příležitosti k poděkování všem mým kolegům z firmy Honeywell, spol. s r. o. z oddělení Homes and Buildings Technology. Jmenovitě Petru Šenflukovi, který mi ochotně vysvětloval mé elektrotechnické dotazy, dále Sándoru Ruhasovi, který mi zapůjčil hysterezní brzdu a byl nápomocen s prací v SW LabView. V neposlední řadě Františku Křivánkovi, který strávil desítky hodin tím, že mi vysvětloval vše okolo BLDC motorů a jejich programování. Dále bych chtěl využít této příležitosti a poděkovat panu Pavlu Michlíčkovi z firmy NXP, který mi trpělivě odpovídal na mé dotazy a byl mi po celou dobu psaní diplomové práce nápomocný. Bylo by nevhodné, abych opomenul poděkovat všem těm, kteří mě svou podporou motivovali k včasnému dokončení této práce, ať už je to moje slečna Petra Koránová nebo moji rodiče, babička a sourozenci. V rámci akademické půdy bych chtěl poděkovat mému vedoucímu doc. Ing. Janu Roupcevi, Ph.D. a v neposlední řadě doc. Ing. Zdeňku Němcovi, CSc, který mi svými zkušenostmi a znalostmi byl nápomocný u psaní této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jan Roupec, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 26. června 2020



.....

Michal Drápal

OBSAH

ÚVOD.....	15
2 ELEKTRICKÉ MOTORY	16
2.1 Rozdělení elektromotorů	17
2.2 BLDC motor	18
2.2.1 Konstrukce motoru	18
2.2.2 Fyzikální a matematický princip BLDC motoru	22
2.2.3 Momentová charakteristika	25
2.2.4 Komutace BLDC motoru.....	26
2.2.5 Třífázový napěťový střídač.....	28
2.2.6 Řízení BLDC motoru.....	29
2.3 Snímání relativní polohy motoru	31
2.3.1 Senzorické snímání polohy	31
2.3.2 Bezsenzorvé snímání polohy	34
3 ŘÍZENÍ BLDC MOTORU.....	40
3.1 Vývojový kit	40
3.1.1 Použitý HW	40
3.1.2 Vývojový SW	42
3.2 Rozběh motoru	43
3.2.1 SDK example – mc_bldc	44
3.3 Srovnání bezsenzorového a senzorového řízení motoru	48
3.3.1 Rozdíly mezi bezsenzorovou a senzorovou aplikací.....	49
3.3.2 Požadavky na testování	51
3.3.3 Chování při skokové změně zátěže	54
3.3.4 Udržení otáček při spojitě změně zátěže	54
3.3.5 Chování při skokové změně otáček	57

3.3.6	Otočení motoru o přesný předem definovaný počet otáček.....	58
3.4	Úpravy firmwaru.....	60
3.4.1	Výsledky po úpravě konstant.....	61
3.4.2	Shrnutí výsledků po upravení konstant.....	63
3.5	Úprava SDK příkladu bezsensorového řízení.....	64
4	SPOLUPRÁCE S NXP SEMICONDUCTORS.....	67
	ZÁVĚR.....	68
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
	SEZNAM ZKRATEK.....	72
	SEZNAM SYMBOLŮ.....	73
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	74
	SEZNAM TABULEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH	77

ÚVOD

Diplomová práce vznikla ve spolupráci s firmou Honeywell, spol. s r. o., která mimo jiné vyvíjí pohony pro nejrůznější aplikace. Výzkumné centrum v Brně se podílí na vývoji celého aktuátoru od jeho mechanických částí až po embedded systém, který ovládá chování aktuátoru. Zdejší tým se skládá z mechaniků, kteří jsou zodpovědní za design plastových dílů, návrh a optimalizování převodovky. Další skupinu tvoří elektro-designéři, kteří vytváří schéma základní desky a funkční design. Elektro-designéři úzce spolupracují se softwarovými inženýry, kteří programují firmware pro mikročip v desce. Poslední skupinu vývojové části tvoří zkušební inženýři, kteří navržený design aktuátoru testují. Jednotlivé skupiny propojují projektová a procesní inženýři. Dohromady se tedy jedná o více jak 30 člennou skupinu pracovníků, kteří jsou navzájem na sobě závislí.

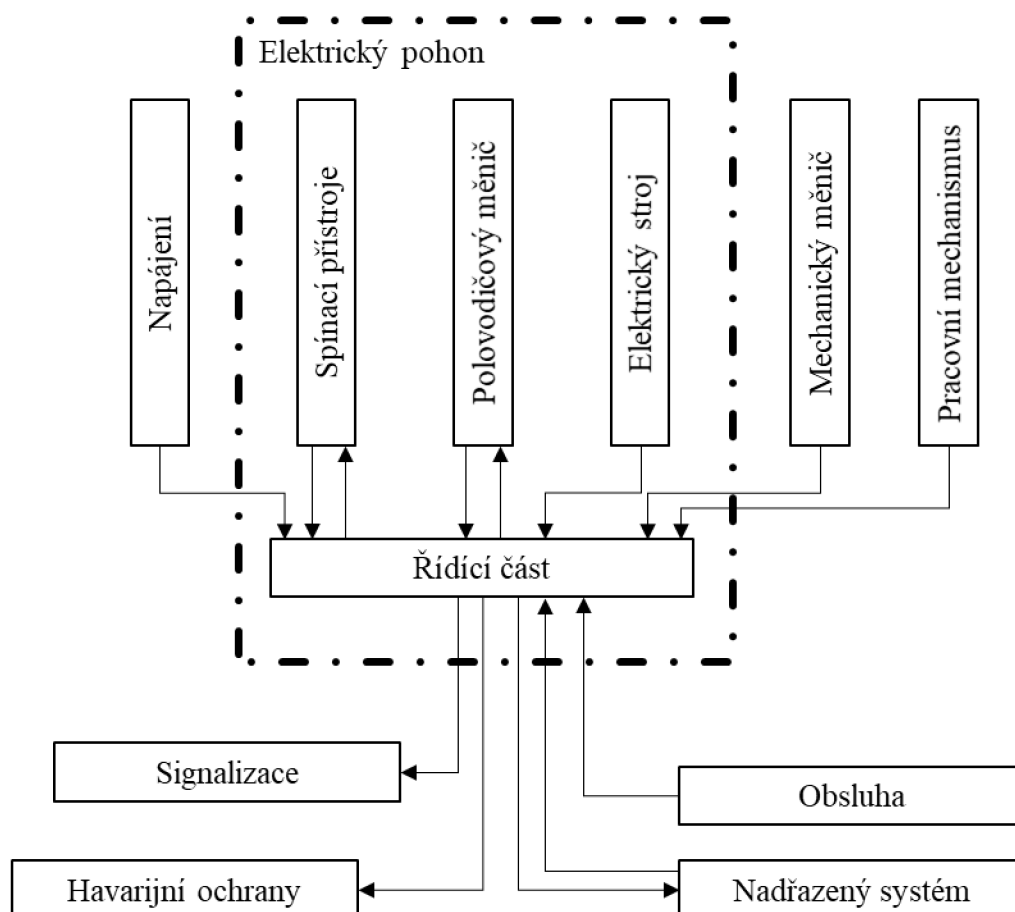
Stávající vývoj aktuátorů ve firmě Honeywell, spol. s r. o. je závislý na mikročipech od jednoho dodavatele. Vedle horší pozice při vyjednávání o ceně a dalších podmínkách dodávek je důsledkem tohoto stavu i nepřiměřená závislost na dodavateli a v případě výpadku dodávek z důvodů na straně dodavatele, nemožnost pokračovat v činnosti výzkumného centra v oblasti aktuátorů. Z výše uvedených důvodů se firma Honeywell, spol. s r. o. rozhodla prověřit možnou spolupráci s dalším možným dodavatelem v oblasti nákupu mikročipů a jejich podporu při vývoji firmwaru.

Práce obsahuje teoretický úvod do problematiky řízení BLDC motoru a seznámení s použitým zařízením. V praktické části následuje rozběh motoru a následné testování sensorového a bezsensorového řízení. Je ukázána aplikace jednotlivých knihoven ve vývojovém prostředí poskytnutém dodavatelem NXP Semiconductors Czech republic, s. r. o. Implementace regulátorů. Limitace proudu a momentu. Následuje zhodnocení řízení BLDC motoru v bezsensorovém režimu a porovnání s řízením s Hallovými senzory.

Cílem této diplomové práce je také zhodnocení možné spolupráce firmy Honeywell, spol. s r. o. s firmou NXP Semiconductors. Výsledné aplikace měly navíc v budoucnu sloužit jako základní modely pro řízení pohonů. Na základě těchto modelů by bylo možné pokračovat v dalším vývoji pohonů firmy Honeywell. Vzhledem k tomu, že Firma NXP Semiconductors tyto základní aplikace poskytla, bylo do zadání doplněno vytvoření stavového automatu z bezsensorové aplikace. Stavovým automatem je možné řídit rychlost a také požadovaný počet otáček. Řízení je navrženo tak, aby uživatel mohl požadované hodnoty nastavit pomocí dvou tlačítek na řídicí desce.

2 ELEKTRICKÉ MOTORY

Hlavní částí elektrického pohonu byl až do poloviny 20. století elektrický motor. Od druhé poloviny 20. století měl na rozvoj vědního oboru o elektrických pohonech zásadní vliv vývoj výkonové polovodičové techniky, řídicí techniky a mikroprocesorů. Na Obr. 1: můžeme vidět grafické znázornění strukturního schématu elektrického pohonu. [1] [2]



Obr. 1: Strukturní schéma elektrického pohonu. [1]

Elektrické motory využívají silových účinků magnetického pole a slouží k přeměně elektrické energie na mechanickou práci. Elektrický proud procházející vinutím statoru a magnety rotoru vytváří dvě magnetická pole, která způsobují otáčení rotoru za působení přitažlivých a odpuzivých sil. [1][2]

2.1 Rozdělení elektromotorů

V Tab. 1: je znázorněno základní rozdělení elektrických motorů.

Tab. 1: Základní rozdělení elektrických motorů. [3]

Typ	AC motor			Univerzální motor	
	1fázové	3fázové indukční	3fázové synchronní		
Typ napájení	AC			AC/DC	
Účinnost	40-60 %	60-70 %	70-80 %	50-60 %	
Velikost	Velká	Střední až velká		Velká	
Hluk	Malý			Velký	
Rychlostní rozsah	Nízký	Vysoký		Střední	
Odezva	Pomalá			Pomalá	
Životnost	Vysoká			Nižší	
Cena	Nízká	Nízká	Střední	Nízká	
Aplikace	Pračky, vysavače, čerpadla	Vzducho-technika, jeřáby, dopravníky	Kompresory, myčky, pračky	Vysavače, mixéry	
Zaměření motoru	Cena	Univerzálnost		Cena	
Typ	Kartáčové DC motory	Bezkartáčové DC motory	Krokový motor	Servo motory	
				AC servo	DC servo
Typ napájení	DC	DC (obsahující řízení) / řízené	Řízené	Řízené	Řízené
Účinnost	60-80 %	víc než 80 %	60-70 %	50-80 %	60-80 %
Velikost	Malá	Malá	Střední	Malá a střední	Malá
Hluk	Velký	Malý	Střední	Malý	Velký
Rychlostní rozsah	Vysoký	Vysoký	Vysoký	Střední	Nízký
Odezva	Střední	Střední	Střední	Rychlá	
Životnost	Nižší	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Nižší
Cena	Nízká	Střední až vysoká	Střední	Vysoká	
Aplikace	Elektrické hračky, elektrické nářadí	Vzducho-technika, myčky, pračky	Roboti, vzducho-technika	Roboti, dopravníky, obráběcí stroje	Tiskárny, souřadnicový zapisovač, pracovní stroje
Zaměření motoru	Cena	Účinnost a cena	Účinnost	Výkon	

2.2 BLDC motor

Brushless Direct Current motor je bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety. Označuje se také jako ECM (Electronically Commutated Motors), tato zkratka pochází z anglického jazyka a znamená elektricky komutované motory. Jedná se tedy o motor napájený stejnosměrným napětím, který je řízen elektronickou komutací. Pro chod motoru je nezbytná řídicí jednotka, která přepíná polaritu cívek v takovém pořadí, aby se na statoru vytvářelo rotační magnetické pole. Nejčastějším provedení EC motoru je třífázové, proto se tato práce nebude věnovat jednofázovému ani dvoufázovému provedení. [4]

Hlavní součásti řídicí jednotky:

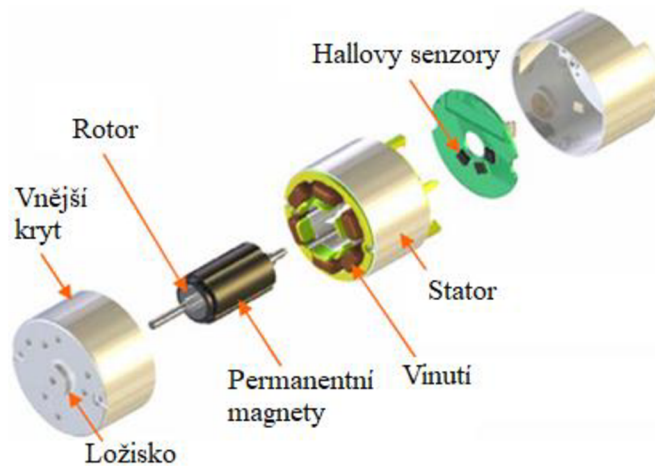
- mikroprocesor, který zpracovává informace ze zpětné vazby a řídí spínání třífázového měniče.
- Třífázový napěťový/ proudový střídač, jenž vytváří točivé magnetické pole na statoru a je součtem vektorů jednotlivých fází. Pro optimální chod motoru je nutné, aby vektor magnetického pole předcházel o 90° vektor magnetického pole rotoru. Podrobněji popsáno v kapitole 2.2.5.
- Systém k snímání polohy a rychlosti rotoru, buďto senzorový anebo bezsenzorový, dále popsáno v kapitole 2.3.
- Jednočipový počítač obsahující řídicí algoritmus.

V závislosti na aplikaci a požadavcích na BLDC motor, musí být upřesněny základní parametry jako například:

- počet fází,
- počet pólů rotoru,
- počet slotů statoru,
- zapojení a rozložení statorového vinutí,
- elektronická komutační metoda,
- způsob řízení. [4]

2.2.1 Konstrukce motoru

Například z mechanického hlediska se BLDC motory dělí dle uložení rotoru vůči statoru. V tomto případě se jedná o vnitřní a vnější uložení rotoru vůči statoru, tyto typy uložení jsou znázorněny na Obr. 2: a Obr. 3: :



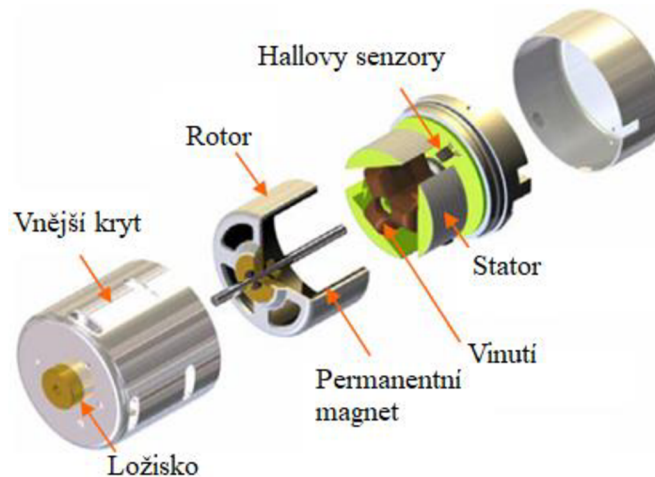
Obr. 2: Vnitřní uložení rotoru vůči statoru. [3]

Výhody:

- rychlá reakce díky malému rotoru,
- větší odchod tepla z motoru.

Nevýhody:

- obtížnější dosažení většího momentu,
- vysoká odstředivá síla působící na magnety.



Obr. 3: Vnější uložení rotoru vůči statoru. [3]

Výhody:

- snadné dosažení velkého momentu,
- rychlost je stabilní.

Nevýhody:

- velký rotor – nízká rychlost otáčení,
- nutná vhodná bezpečnostní opatření.

Konstrukce statoru

Pohyb rotujících magnetů rotoru okolo statorových cívek generuje zpětné elektromotorické napětí (BEMF – back ElectroMotive Force) ve vlnutí statoru. Tvar BEMF rozděluje motory na dvě skupiny:

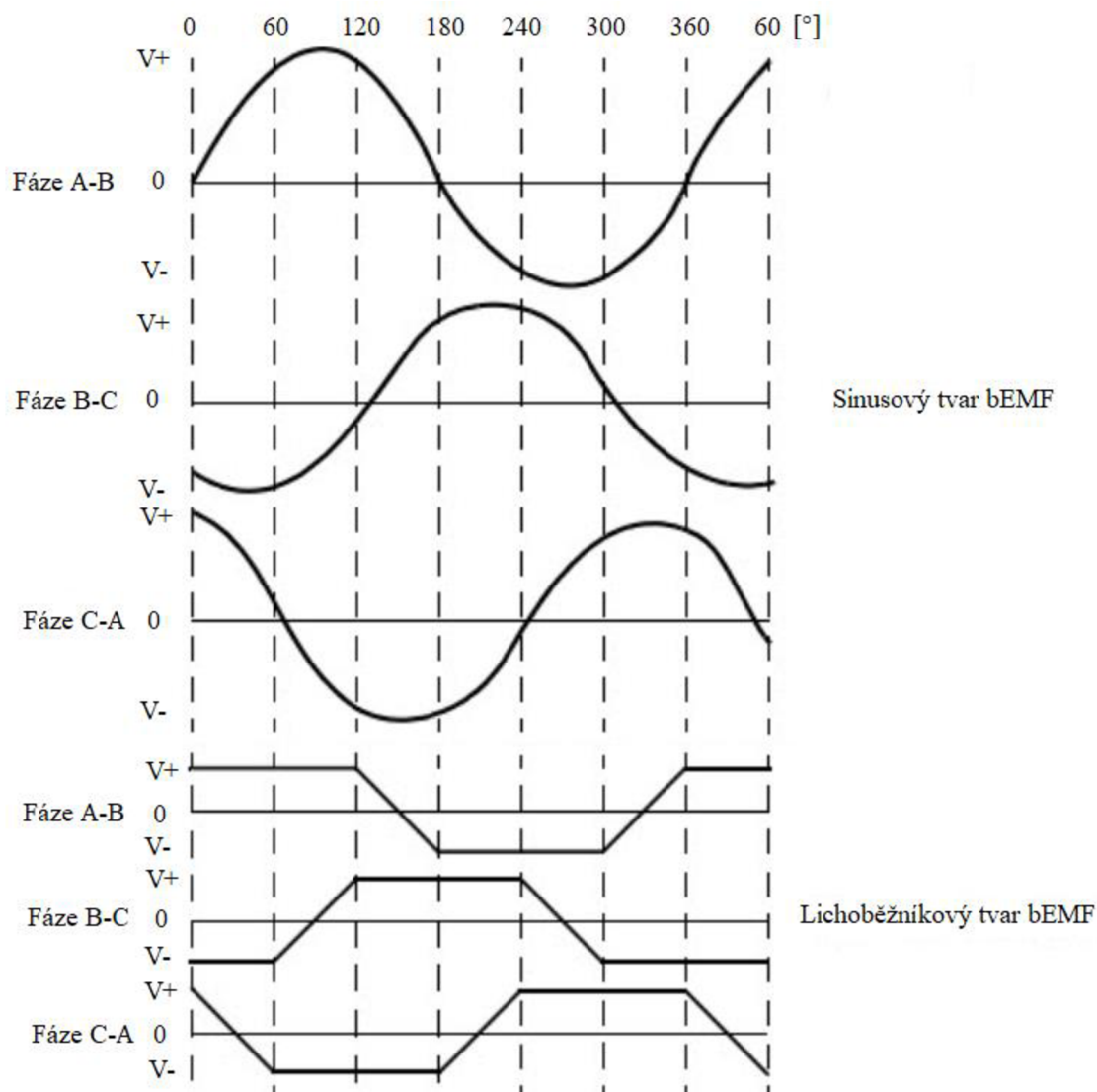
- BLDC – lichoběžníkový typ,
- PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) – sinusový typ.

Rychlost otáček magnetického pole statoru:

$$n = 60 \times \frac{f}{pp}, \quad (2.1)$$

kde n je rychlost otáčení magnetického pole statoru, f frekvence kmitočtu sítě, p je počet pólových párů.

Lichoběžníkový a sinusový průběh BEMF zobrazuje Obr. 4:



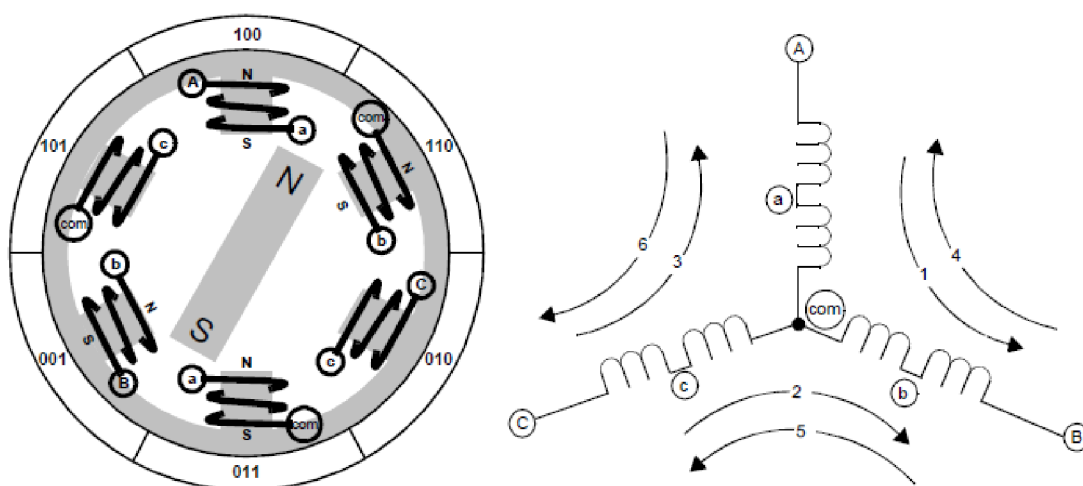
Obr. 4: Průběh zpětného elektromotorického napětí. [5]

Póly rotoru a sloty statoru

Důležitým ukazatelem motoru je faktor vinutí, který dosahuje rozmezí 0 až 1 a představuje schopnost motoru převést proud na kotvě na výstupní moment na hřídeli. Do výpočtu faktoru vinutí vstupuje počet pólů, slotů, které se nachází na statoru, ale také počet fází motoru. [4]

Detailnější konstrukce rotoru a statoru BLDC motoru je znázorněna níže na obr. 5 vlevo. Rotor se skládá z permanentních magnetů. Ve specifikacích motoru se uvádí, buďto počet pólů anebo častěji počet pólových párů. Zvyšující počet pólových párů vytváří větší moment, ale snižuje maximální otáčky motoru. Na statoru jsou z měděného drátu navinuty cívky, které procházejícím elektrickým proudem vytváří magnetický tok. Elektrická energie je přeměněna na mechanickou energii pomocí přitažlivých magnetických sil mezi rotorem a státorem.

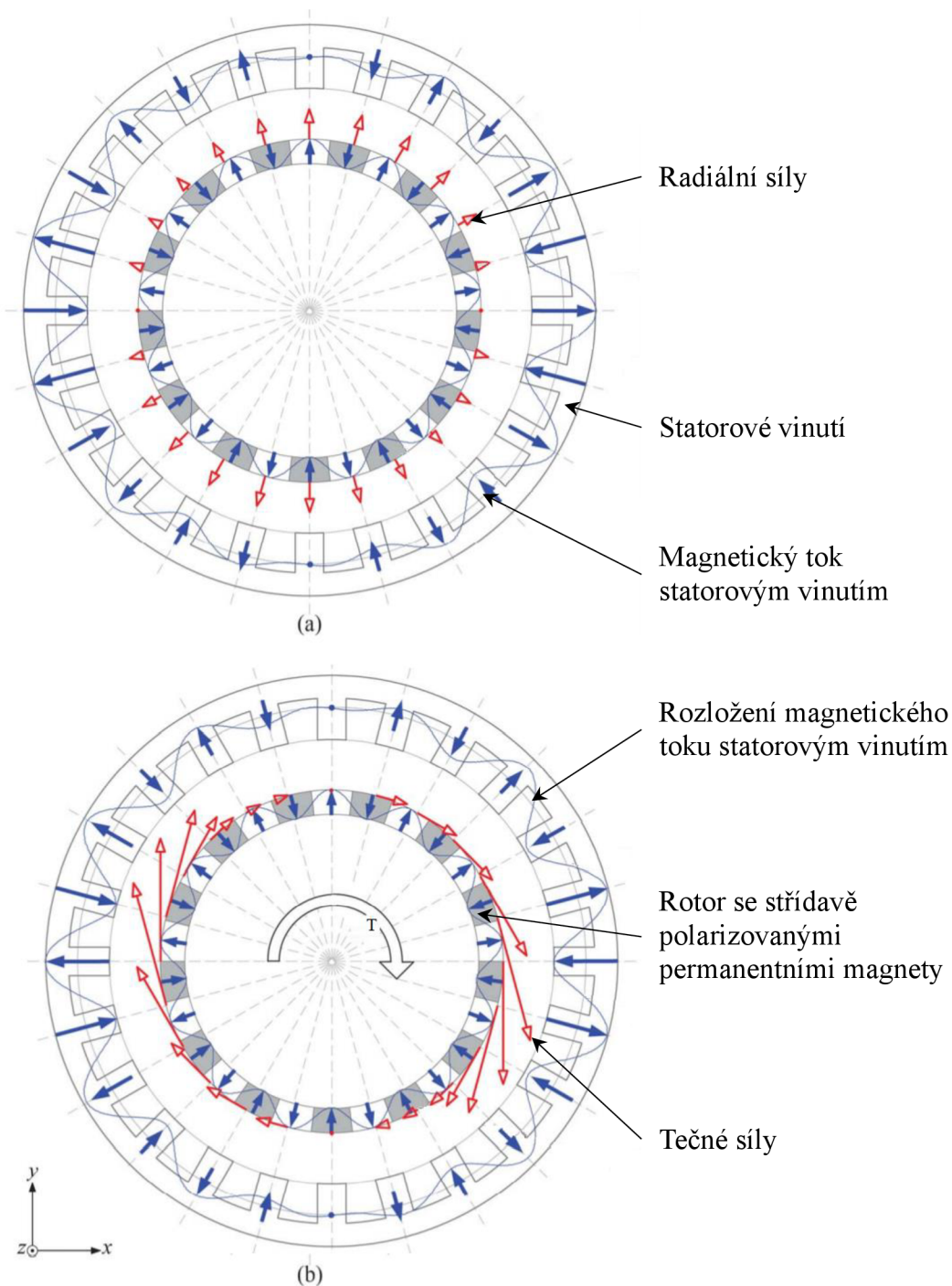
Statorové vinutí na Obr. 5: vpravo je uspořádáno do hvězdy a vyvedeno do jednoho společného bodu. Toto zapojení se používá za předpokladu, kdy se upřednostňuje větší moment na úkor otáček. Další možné zapojení do trojúhelníku umožňuje dosažení vyšších otáček na úkor momentu. Elektromagnetické obvody jsou fyzicky rozděleny, proto se v jednom okamžiku napájí pouze jedno vinutí statoru. Nicméně v případě šesti kroké komutace, se s výhodou napájí dvě vinutí statoru, tak aby jedno vinutí vždy pól rotoru odpuzovalo a druhé přitahovalo. Třetí vinutí zůstává nepřípojeno. Komutaci BLDC motoru popisuje detailněji kapitola 2.2.6. [1][2][5]



Obr. 5: Vnější konstrukce BLDC motoru se zapojením do hvězdy. [6]

2.2.2 Fyzikální a matematický princip BLDC motoru

Rozložení působících sil v motoru zobrazuje na obr. 6. Obr. 6a ukazuje působení radiálních sil v klidovém stavu. Zatímco obr. 6b ukazuje vznik výsledného momentu na hřídeli motoru.

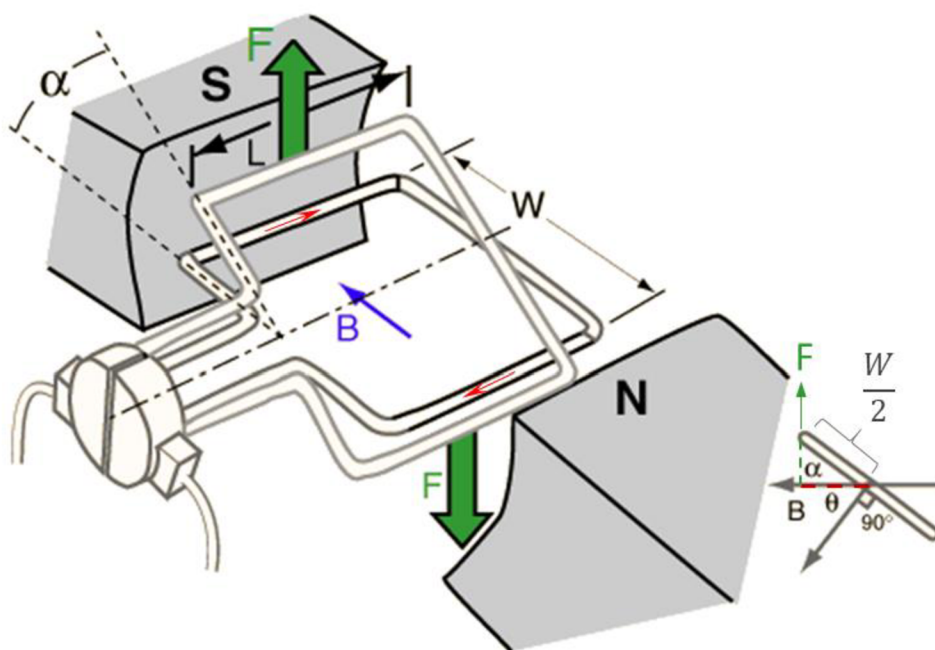


Obr. 6: Rozložení sil mezi rotorem a statorom motoru. [7]

Červené siločáry na Obr. 6: vznikají v důsledku nestacionárního magnetického pole. V tomto případě se vektory magnetické indukce v čase mění díky pohybujícím permanentním magnetům rotoru a řízeném napájení statorového vedení. Napájení fáze statorového vinutí vytváří stacionární magnetické pole, které působí na magnety silou definovanou tzv. Flemingovým pravidlem levé ruky. Tato síla je popsána rovnicí (2.2):

$$F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \beta, \quad (2.2)$$

kde B [T] je magnetická indukce, I [A] velikost protékajícího proudu vodičem, l [m] délka vodiče a β [°] představuje úhel vodiče s indukčními čarami magnetu. Pro grafickou demonstraci rozložení sil na obr. 7 je β kolmým úhlem a sinusová goniometrická funkce nabývá hodnoty 1.

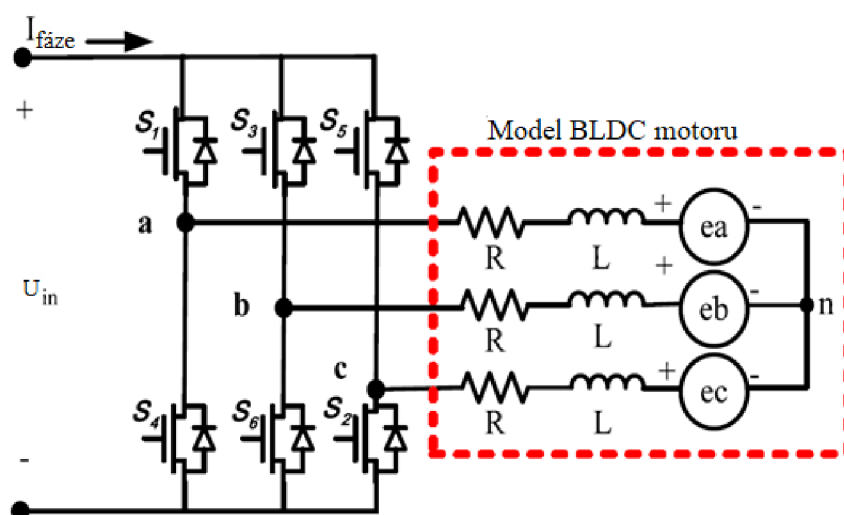


Obr. 7: Vznik elektromagnetické síly. [8]

Moment síly je definován jako vektorová fyzikální veličina o velikosti součinu síly a kolmé vzdálenosti od osy. Vzdálenost od osy otáčení nabývá hodnoty $\frac{W}{2}$. Pro výpočet kolmé vzdálenosti od osy otáčení a tím i ramena síly, je použita goniometrická funkce cosinus. Na Obr. 7: je tato vzdálenost vyznačena čerchovanou červenou barvou v pravém spodním rohu. Výpočet momentu popisuje rovnice (2.3):

$$M_k = 2(F_m \cdot \frac{W}{2} \cdot \cos \alpha) = F_m \cdot W \cdot \cos \alpha. \quad (2.3)$$

BLDC motor je napájen stejnosměrným proudem pomocí třífázového napět'ového střídače, který připojuje statorové vinutí v závislosti na pozici rotoru. Obr. 8: představuje náhradní schéma třífázového motoru, ze kterého vychází základní matematický model v rovnicích (2.4), (2.5) a (2.6). Uvažuje se předpoklad, že motor je plně symetrický, a tedy pro zjednodušení mají všechny fáze stejný odpor a stejnou indukčnost.



Obr. 8: Model BLDC motoru. [9]

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a, \quad (2.4)$$

$$u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b, \quad (2.5)$$

$$u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c, \quad (2.6)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L, \quad (2.7)$$

kde u_a, u_b, u_c [V] jsou fázová napětí motoru, i_a, i_b, i_c [A] jsou fázové proudy motoru a e_a, e_b, e_c [V] je indukované napětí na statorovém vinutí motoru, které je funkcí polohy rotoru, tedy úhlu natočení θ [°]. Indukované napětí je dále rozepsáno v rovnicích (2.8), (2.9), (2.11). Rovnice (2.11) představuje elektrický moment na motoru (T_e) a výstupní moment na hřídeli (T_L). Setrvačnost motoru je reprezentována symbolem J , tření motoru konstantou k_f a proměnná ω_m [rad·s⁻¹] představuje úhlovou rychlost. [10]

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e), \quad (2.8)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2.9)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F \left(\theta_e - \frac{4\pi}{3} \right), \quad (2.10)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) i_b + F \left(\theta_e - \frac{4\pi}{3} \right) i_c \right], \quad (2.11)$$

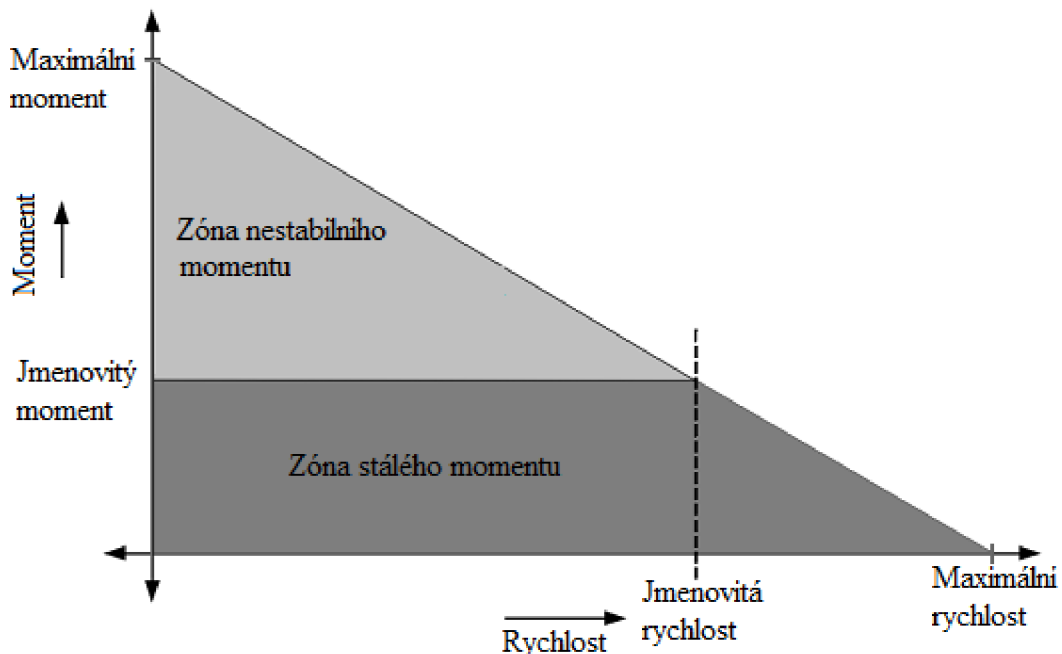
kde k_e je BEMF konstanta a k_t momentová konstanta. Elektrický úhel vyjadřuje θ_e , a rovná se součinu pólových párů a natočení rotoru. [10]

2.2.3 Momentová charakteristika

Obr. 9: zobrazuje momentovou charakteristiku v závislosti na rychlosti. U BLDC motorů jsou dva momentové parametry:

- špičkový moment,
- jmenovitý moment. [11]

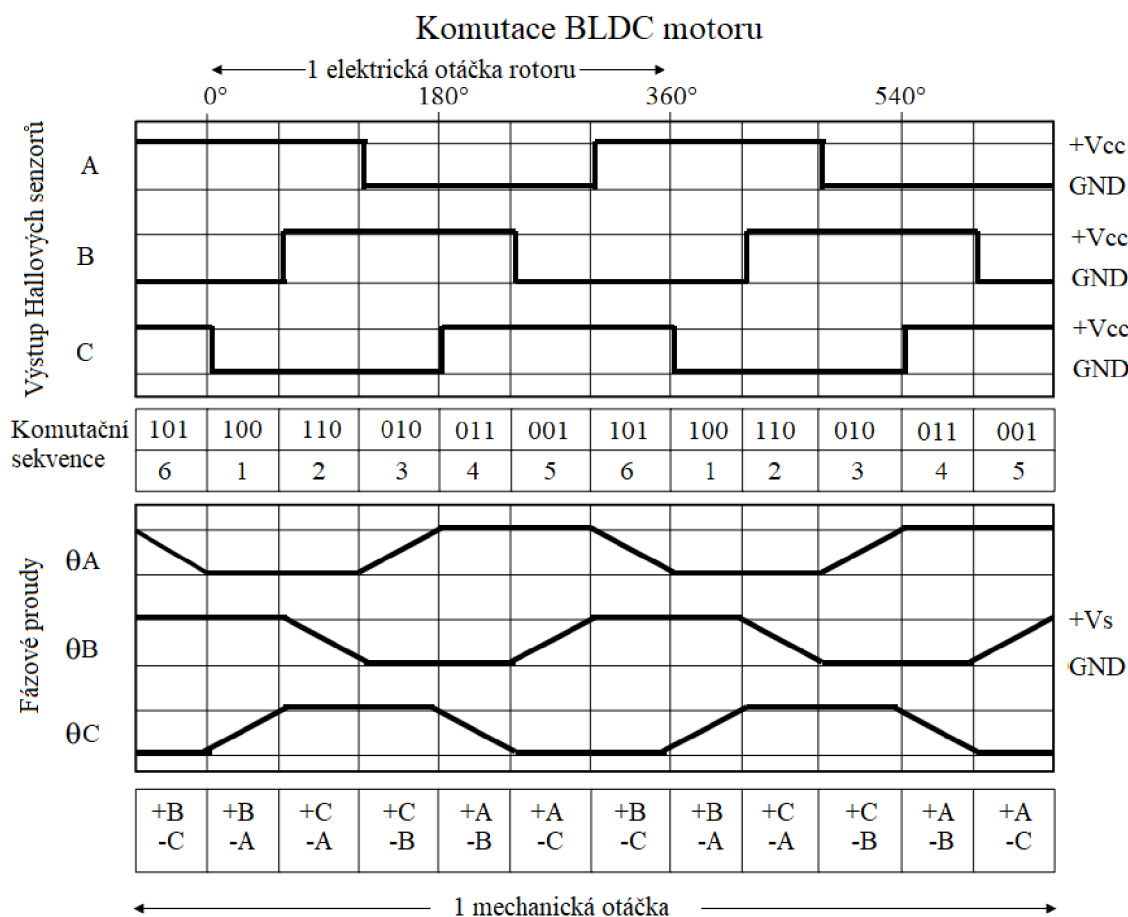
Motor může dosáhnout maximální rychlosti, která je rovna až 150 % jmenovité rychlosti, nicméně při zvyšování rychlosti úměrně klesá moment. Pro různé aplikace, ve kterých se často mění směr otáčení motoru anebo zátěž, je naopak žádoucí dosáhnouti chvilkového špičkového momentu při rozběhu. [11]



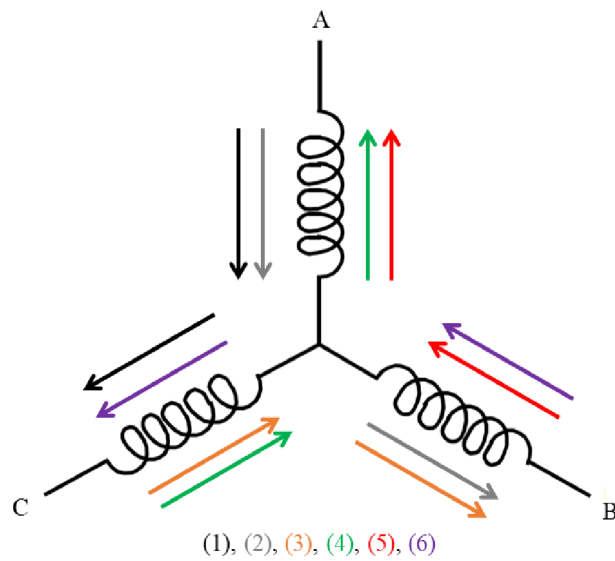
Obr. 9: Momentová charakteristika BLDC motoru v závislosti na rychlosti. [11]

2.2.4 Komutace BLDC motoru

Moderní BLDC motory používají elektronickou komutaci, díky níž se snižují nároky na jejich údržbu, proto jsou často nazývány jako bezúdržbové. Další výhodou je možnost použití motorů ve výbušném prostředí, protože při komutaci, na rozdíl od kartáčových motorů, nehrozí jiskření. Průběh komutačních sekvencí je zobrazen níže na Obr. 10: a jednotlivé spínání statorových cívek na Obr. 11: . [12]



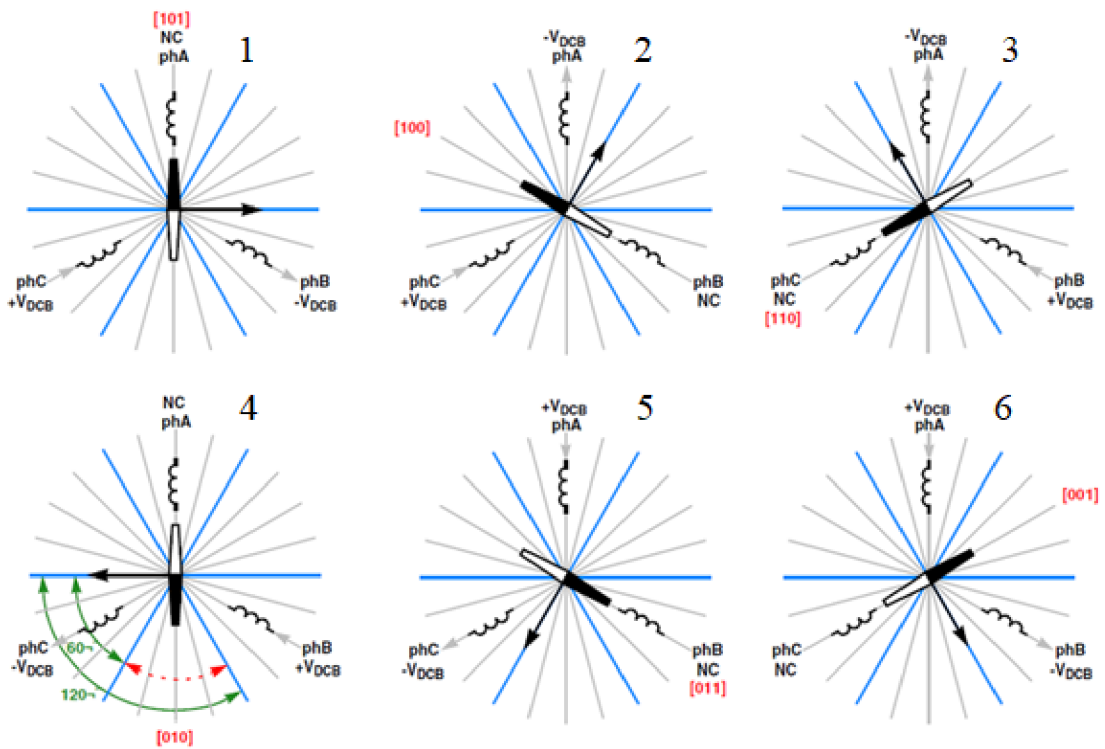
Obr. 10: Zobrazení průběhu 1 mechanického cyklu. [9]



Obr. 11: Spínání fází statoru odpovídající jednotlivým sekvencím na Obr. 10: . [11]

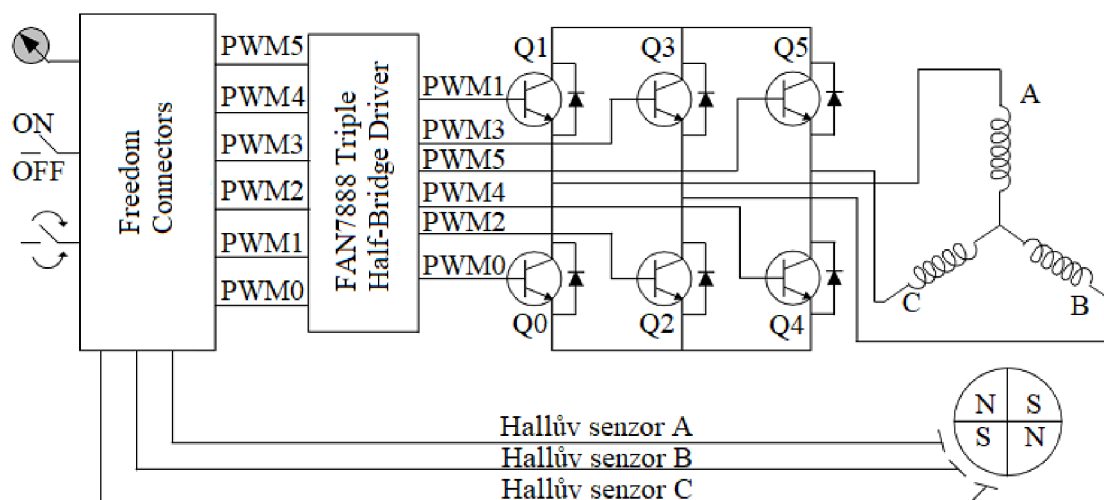
Komutační vektory

Pro řízení a dosažení maximálního momentu BLDC motoru musí být přesně definované komutační vektory pro jednotlivé sekvence. Sled komutačních vektorů zobrazuje Obr. 12:



Obr. 12: Vektory sekvencí pro řízení motoru odpovídající Obr. 10: a Obr. 11: . [12][13]

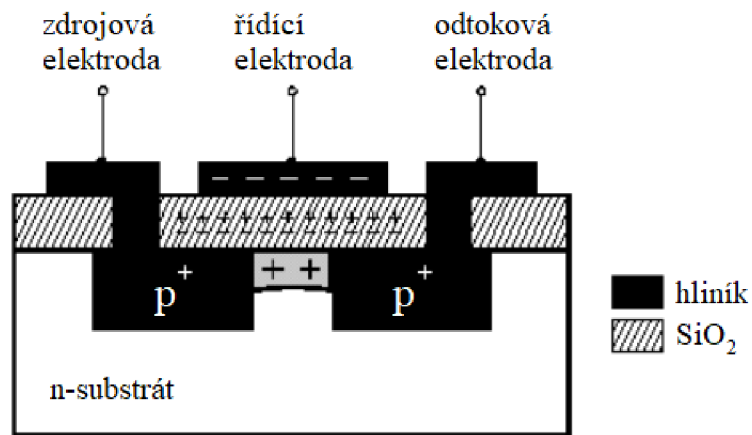
2.2.5 Třífázový napěťový střídač



Obr. 13: Schéma řídicí jednotky a zapojení napěťového střídače. [11][14]

Na Obr. 13: je znázorněna řídicí jednotka rozdělená na výpočetní a výkonovou spínací část. Signály ze sensorové zpětné vazby vstupují do výpočetní jednotky, která informace zpracovává a generuje řídicí signály. Výpočetní jednotka reguluje výkon a umožňuje vlastní komutaci motoru pomocí pulsně šířkové modulace (PWM). Výkonová část je ve schématu zobrazena zapojenými MOSFET tranzistory, jejichž součástí jsou zapojené diody v závěrném směru na paralelní větvi. Třífázový střídač musí mít alespoň šest tranzistorů, u kterých hraje důležitou roli proudová zatížitelnost, odpor při otevřeném kanálu ($R_{DS(ON)}$), maximální velikost napětí (V_{DS}) a celková vstupní kapacita. Při otevřeném tranzistoru, kterým protéká proud, dochází k tepelným ztrátám na odporech $R_{DS(ON)}$, je tedy vhodné, aby odpor byl co nejmenší, v řádech $m\Omega$. V průběhu řízení motoru dochází k častému spínání a vypínání tranzistorů, proto je vhodné, aby celková vstupní kapacita byla nízká. [15]

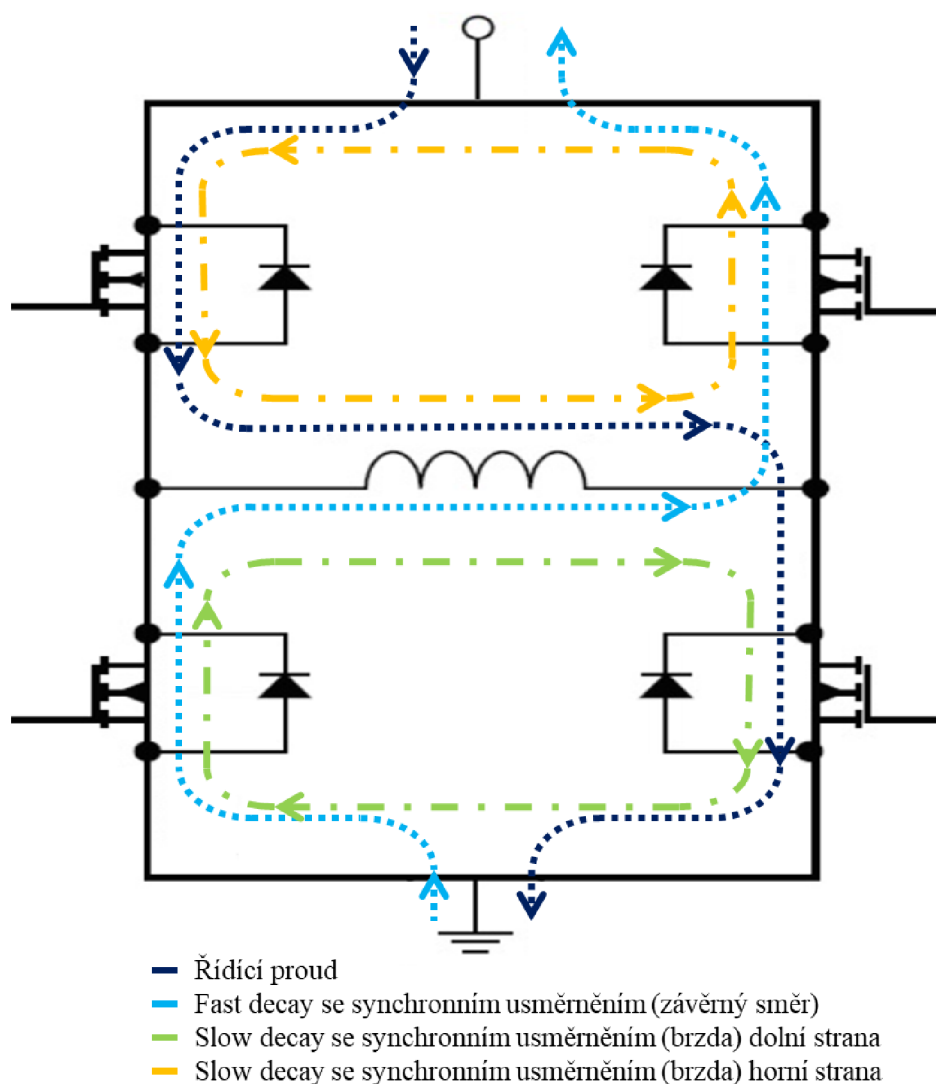
MOSFET transistor graficky zobrazuje Obr. 14: , kde tenká vrstva oxidu křemičitého izoluje řídicí elektrodu. Při přivedení kladného napětí řídicí elektrodou, se vytvoří inverzní vrstva, která propojí oblasti typu N a P. Proud poté může procházet kanálem mezi zdrojovou a odtokovou elektrodou. Velikost proudu závisí na velikosti záporného potenciálu na řídicí elektrodě, jenž zužuje efektivní plochu mezi zdrojovou a odtokovou elektrodou. [16]



Obr. 14: Typická struktura MOSFET tranzistoru. [16]

2.2.6 Řízení BLDC motoru

Pro pochopení problematiky řízení BLDC motoru jsou důležitými pojmy slow decay, fast decay a H-bridge. Při sepnutí tranzistorů prochází statorovým vinutím proud přes tzv. H-bridge, který je zobrazený na Obr. 15: . K přepnutí tranzistorů dochází v okamžiku dosažení zvoleného proudu ve statorovém vinutí a vinutí není dále napájeno. V cívkách motoru se i přes odpojení napájení udržuje proud, jenž se musí vybit, aby se předešlo zničení tranzistorů zapojených v H-bridge. Zničení tranzistorů se dá předcházet např. zapojením diod v paralelním závěrném směru, jak zobrazuje Obr. 13: a Obr. 15: . Každý MOSFET tranzistor již obsahuje substrátovou diodu, která má antiparalelně zapojené k tranzistoru. Další možností je sepnutí tranzistorů tak, abychom zaručili bezpečnou cestu degradujícímu proudu. Různé sepnutí tranzistorů demonstruje Obr. 15: se 4 tranzistory. [17][18][19]



Obr. 15: Nabíjení a vybíjení jednotlivých statorových cívek. [20]

Jednotlivé spínání tranzistorů je prováděno pomocí pulsně šířkové modulace (PWM) a bylo zobrazeno na Obr. 13: . Jedná se o změnu střídy obdélníkového signálu, kdy střída je poměrem doby trvání vysoké úrovně signálu vůči celé periodě. Střída může teoreticky nabývat hodnot 0–100 %. Díky mechanické setrvačnosti a indukčnosti motoru se, při dostatečné frekvenci PWM, motor chová tak, jako kdyby bylo vstupní napětí spojitě. [19]

Fast decay nachází uplatnění v dražších dynamických systémech, kde je důležitá rychlost změn zaplacená vyšší cenou za odrušovací systémy zdroje. Fast decay má následující vlastnosti:

- + rychlé vybití proudu vinutí,
- + rychlejší možnost reverzace motoru,
- větší zvlnění na V_{BUS} – způsobené průchodem většího zpětného proudu,

- větší možné rušení pro ECM. [21]

Slow decay je vhodná pro aplikace, u kterých nehrozí prudké změny směru otáčení a není vyžadováno příliš mnoho odrušovacích prvků v napájení. Základní vlastnosti slow decay:

- + nižší rušení pro ECM,
- nutná delší zpomalovací rampa pro otočení směru otáčení. [21]

2.3 Snímání relativní polohy motoru

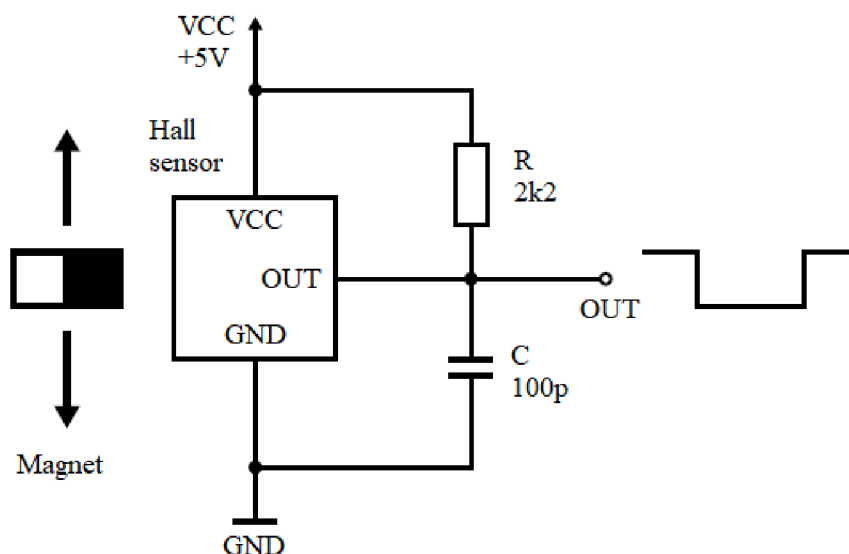
Pro řízení třífázového napěťového střídače, který byl popsán v kapitole 2.2.5, je nutnou znalostí aktuální poloha rotoru. Zjištění okamžité polohy rotoru se zajišťuje senzoricky anebo bezsenzorově.

2.3.1 Senzorické snímání polohy

Snímání polohy je prováděno pomocí Hallových senzorů, které jsou zabudované do statoru motoru, enkodéru anebo resolversu.

Hallové senzory

Menší motory používají nejčastěji Hallové sondy, které posílají informace o úhlovém natočení rotoru ke zpracování do mikroprocesoru. Hallové senzory využívají tzv. Hallova jevu, kdy na polovodičové desce umístěné v magnetickém poli, protéká proud a je na ní generováno tzv. Hallovo napětí. Výstupy z Hallových senzorů jsou zobrazeny na Obr. 10: , ze kterého je patrné, že každý ze senzorů se právě polovinu elektrického cyklu nachází ve vysoké a druhou polovinu v nízké úrovni. Elektrické schéma Hallova senzoru je zobrazeno na Obr. 16: . [6]



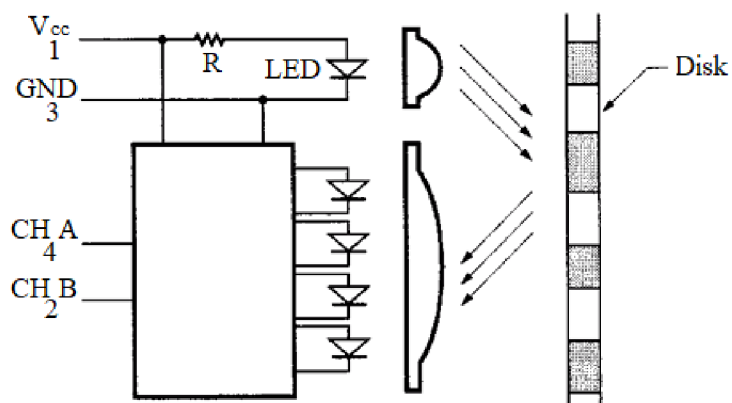
Obr. 16: Hallův senzor s otevřeným kolektorem. [22]

Enkodéry

Enkodéry jsou elektromechanické převodníky, kterými se měří délka, pozice, úhel natočení nebo rychlost. V závislosti na mechanickém pohybu generují elektrické signály. Tyto rotační senzory se dělí na dvě hlavní skupiny:

- absolutní – produkují sled unikátních kódů,
- inkrementální – generují sled kódů. [23]

Absolutní provedení generuje konkrétní číselnou hodnotu pro každou pozici. Zatímco generovaný signál inkrementálních enkodéru je relativní, tedy informuje pouze o pohybu, a nikoliv o pozici. Princip funkce je patrný z Obr. 17: , kde je zobrazen funkční model enkodéru obsahující rotující disk s odraznými a neodraznými ploškami, optický vysílač, optický přijímač a vyhodnocovací elektroniku. [20]



Obr. 17: Princip rotačního optického enkodéru. [23]

Použití absolutního enkodéru klade vyšší nároky na výkon výpočetní jednotky. Využívá dvou typů kódování:

- standardní binární kódování,
- Grayův kód. [23]

Použití standardního binárního kódování je s enkodéry nevhodné kvůli tzv. hazardním stavům, jenž vznikají změnou více bitů současně. Tedy při přechodu ze stavu 01 na stav 10 je hazardem stav 00. Jemnější dělení kotouče, tedy vyšší přesnost enkodéru, zvyšuje pravděpodobnost vzniků hazardních stavů. [23]

Charakteristické pro Grayův kód je změna pouze jedné hodnoty, jednoho bitu, při přechodu z jednotlivých stavů. Demonstraci rozdílného kódování zobrazuje Tab. 2:

Tab. 2: Srovnání kódování

Desítkové číslo	Binární kód	Grayův kód
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

2.3.2 Bezsenzorvé snímání polohy

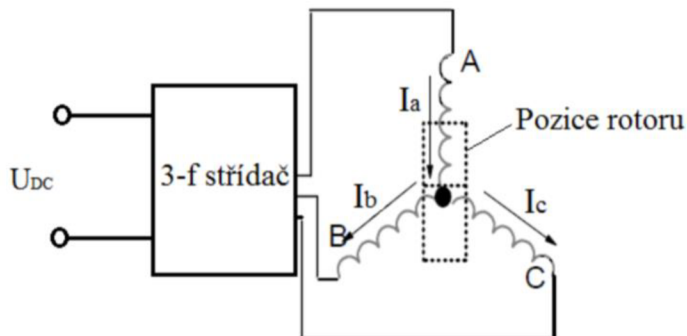
Bezsenzorové řízení BLDC motoru představuje regulaci rychlosti otáčení bez použití snímačů polohy nebo rychlosti. Používá se u motorů menších výkonů a vzhledem k vyšším nárokům na řízení se preferují spíše jednoduchá řešení. K řízení využívá generované BEMF na statorových cívkách. [19]

Hlavní vlastnosti bezsenzorového řízení:

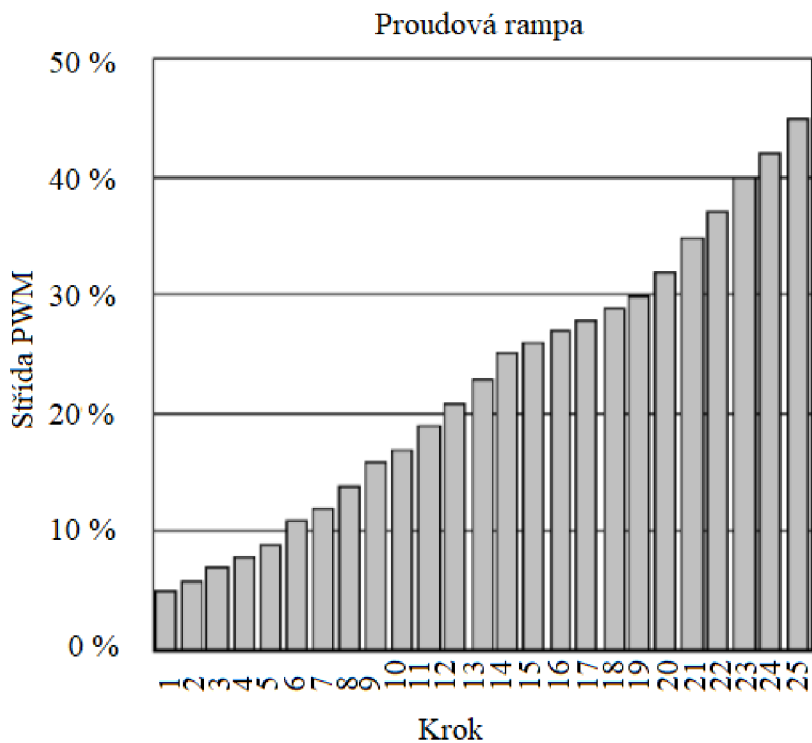
- + redukce ceny a použitého hardwaru,
- + nárůst mechanické robustnosti – použití v agresivním prostředí,
- + vyšší spolehlivost,
- + snížené požadavky na údržbu,
- + zvýšení šumové imunity,
- + neovlivněný moment setrvačnosti stroje,
- vyšší nároky na řídicí algoritmus,
- složitější řídicí elektronika,
- při startu motoru není známá přesná poloha rotoru – rozběh motoru nemusí být plynulý,
- nevhodné pro časté rozběhy. [24] [25]

Pro rozběh motoru bez použití senzorů musí motor udělat několik kroků. První z nich zajistí natočení rotoru do známé pozice a to tak, že jsou buzena všechna tři vinutí motoru. Toto buzení znázorňuje Obr. 18: , kdy při kladném proudu I_a jsou zbylé proudy I_b a I_c

záporné. Rotor se s určitou setrvačností posune do znázorněné polohy. Budicí proud je postupně zesilován tak, aby nedocházelo k mechanickým oscilacím rotoru. Zesilování budicího proudu se nazývá proudová rampa, jejíž průběh popisuje Obr. 19:



Obr. 18: Rozběh motoru – první část. [6]



Obr. 19: Proudová rampa. [6]

Proudová rampa je pro každý motor jiná a odpovídá parametrům motoru, zátěži a požadavkům na rozběh motoru. Jednotlivé kroky jsou stejné časové délky a součet těchto kroků definuje délku trvání první části rozběhu motoru. V následující části dochází k synchronizaci otáčení rotoru a to tak, že je motor buzen stejným způsobem jako při klasickém běhu motoru. Řízení se stále nachází v otevřené smyčce a nedá se spolehlivě určit poloha rotoru v závislosti na BEMF. Tato část se definuje jako rozběhová rampa,

která má opět přesně definované kroky. Po doběhnutí rozběhové rampy dochází k ověření, že z indukovaného napětí se dá spolehlivě určit poloha rotoru a řízení přechází do autokomutačního módu. [6]

Metody vycházející z nepřímého měření indukovaného napětí

- Metoda integrace:
 - ke komutaci dochází na základě integrace indukovaného napětí, když velikost integrované plochy dosáhne danou velikost.
 - + Méně citlivá na spínací rušení – dobré řízení při nízkých otáčkách,
 - malý počet signálu PWM – horší řízení při vysokých rychlostech.
- Detekování třetí harmonické pracovní frekvence:
 - harmonická frekvence spřaženého toku je posunuta vůči napětí třetí harmonické o 30 °. Okamžik komutace je v okamžiku průchodu nulou.
 - + Velký rozsah řízení s malým zpožděním,
 - + menší nároky na filtraci.
- Detekce proudu nulovou diodou:
 - proud teče nulovou diodou v odpojené fázi přibližně ve chvíli, kdy indukované napětí na odpojené fázi prochází nulou.
 - Nutnost šesti oddělených napěťových zdrojů.
- Přímé měření:
 - na fázi, která není napájena, se měří indukované napětí, jenž musí být filtrovaná kvůli PWM spínání.
 - Citlivé na chybu – např. omezená přesnost AD převodníku apod.
- Měření průchodu nulou:
 - používáno tehdy, když střed statorové hvězdy není vyveden. Je hned několik způsobů, jak měřit průchod nulou. Z nich byl pro demonstraci vybrán způsob měření v okamžiku sepnutí obou tranzistorů na diagonále. V případě, že jsou napájena statorová vinutí fáze A a C, platí následující vztah:

$$u_B = \frac{3}{2} u_{iB} + \frac{U_{DC}}{2}, \quad (2.12)$$

kde u_{iB} indikuje napětí indukované na fázi B a U_{DC} napájecí napětí. [18]

- + Vhodné pro unipolární i bipolární řízení,
- obtížné měření v nízkých rychlostech – krátká doba měření.

Metody řízení BLDC motoru vycházející z matematického modelu

Řízení motoru je možné díky určení polohy pomocí spřaženého magnetického toku mezi rotorem a vinutím příslušné fáze statoru. Velikost magnetického toku není závislá na rychlosti motoru a dává informaci o poloze rotoru.

Výpočet spřaženého magnetického toku popisují rovnice (2.13) a (2.14). Do výpočtu vstupuje integrace fázového napětí sníženého o ztráty na odporu statorového vinutí fázovým proudem motoru a integrace fázového proudu. Rovnice (2.15) ukazuje výpočet kompenzace offsetu korekční vazby tvořené PI regulátorem.

$$L \cdot i = \int (U - R \cdot i - U_{comp}) dt - \int u_i dt, \quad (2.13)$$

$$\psi_{PM} = \psi_S - L \cdot i = \int u_i dt = \int (U - R \cdot i - U_{comp}) dt - L \cdot i, \quad (2.14)$$

$$U_{comp} = k_p \cdot \psi_S + k_I \int \psi_S dt, \quad (2.15)$$

kde ψ_S je celkový magnetický tok, ψ_{PM} spřažený magnetický tok a U_{comp} korekční zpětná vazba. [21]

Z magnetického toku se určuje poloha rotoru nebo okamžik komutace. Nízká rychlost způsobuje větší citlivost na možné chyby, jakožto špatné určení parametrů motoru anebo nepřesná měření napětí a proudu apod. Určování polohy rotoru pomocí Clarkovy a Parkovy transformace, dává informaci o odhadu úhlového natočení rotoru θ . Jednotlivé transformace popisují rovnice (2.16) - (2.25) a Obr. 20: , Obr. 21: . [21]

Clarkova transformace

Pro zjednodušení matematického modelu motoru se využívá Clarkova transformace, která transformuje 3 fázový systém a, b, c do 2 fázového systému α , β . Nutným předpokladem pro použití Clarkovy transformace je fázový posun 120° mezi osami a, b, c. Transformace je popsána v rovnicích (2.16), (2.17), (2.18) a na Obr. 20: .

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (2.16)$$

$$i_\alpha = i_a, \quad (2.17)$$

$$i_\beta = \frac{i_a + 2i_b}{\sqrt{3}}, \quad (2.18)$$

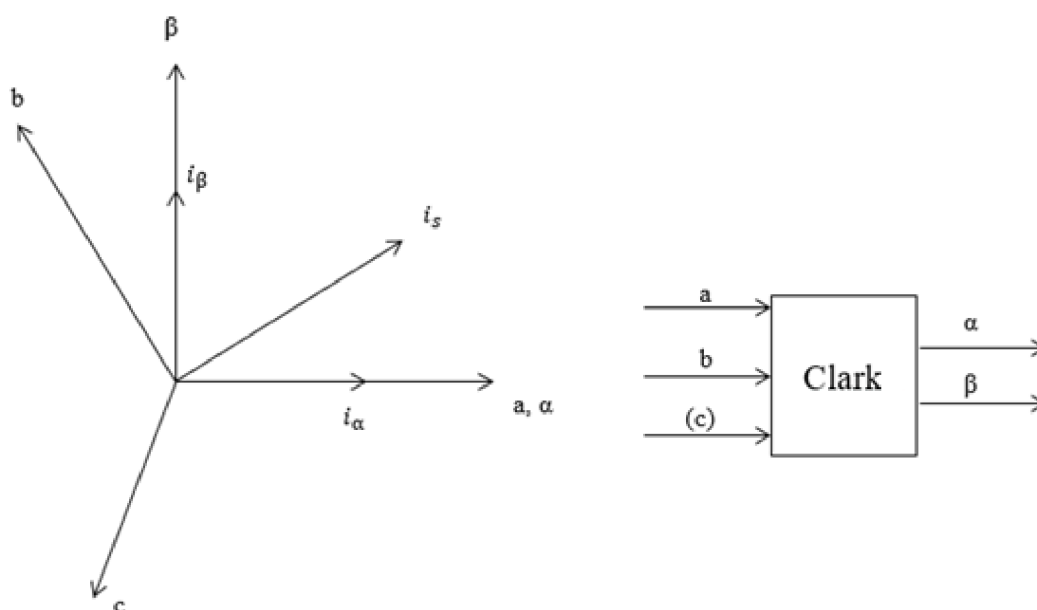
Její inverzní tvar popisují následující rovnice (2.19), (2.20), (2.21):

$$i_a = i_\alpha, \quad (2.19)$$

$$i_b = -\frac{1}{2}i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, \quad (2.20)$$

$$i_c = -\frac{1}{2}i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}i_\beta, \quad (2.21)$$

kde koeficienty α a β představují dvoufázový systém spřažený se statorem motoru.



Obr. 20: Přechod pomocí Clarkovy transformace z 3 fázového do 2 fázového systému. [26]

Parkova transformace

Přes Clarkovu transformaci jsou získané fázové proudy spřažené se statorem ve dvoufázovém systému. Nyní je provedena Parkova transformace hodnot do soustavy d, q spřažené s rotorem. Transformace je uskutečněna pomocí rovnic (2.22) a (2.23):

$$i_d = i_\alpha \cdot \cos(\omega) + i_\beta \cdot \sin(\omega), \quad (2.22)$$

$$i_q = i_\beta \cdot \cos(\omega) - i_\alpha \cdot \sin(\omega). \quad (2.23)$$

Inverzní transformace má poté tvar popsáný v rovnicích (2.24) a (2.25):

$$i_\alpha = i_d \cdot \cos(\omega) - i_q \cdot \sin(\omega), \quad (2.24)$$

$$i_{\beta} = i_d \cdot \cos(\omega) + i_q \cdot \sin(\omega), \quad (2.25)$$

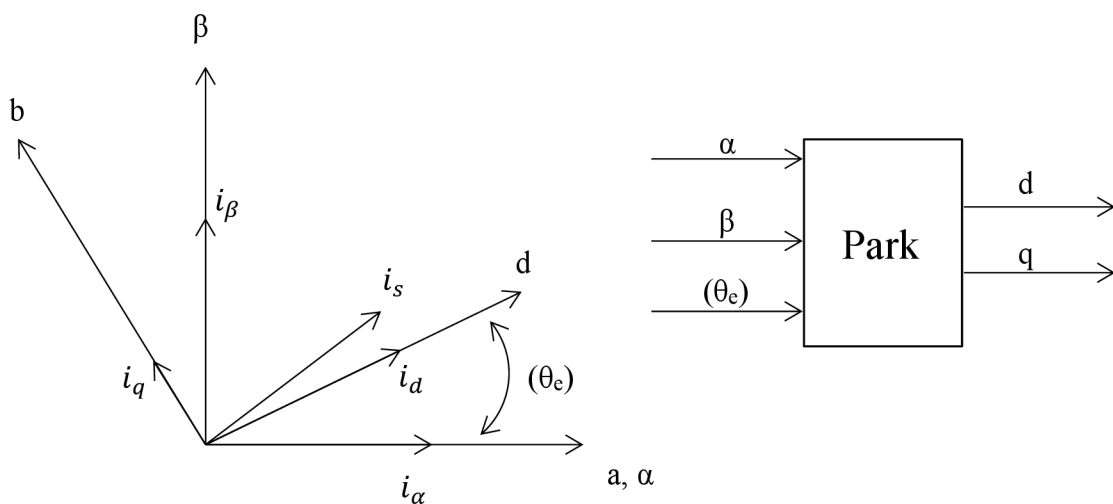
kde koeficienty d a q představují dvoufázový systém spřažený s rotorem. Osa d nejčastěji představuje reálnou osu a q osu imaginární. [26]

Úhlové natočení rotoru θ v diskrétním čase je poté následující:

$$\theta(kT) = \theta[(k-1)T] + \omega \cdot T, \quad (2.26)$$

kde T je vzorkovací čas a k je sekvence.

Při řízení ve vysokých otáčkách dochází k nedostatečné vzorkovací frekvenci a vzniká θ_{err} , jenž představuje teoretický výpočet polohy rotoru popsany v literatuře. [27]



Obr. 21: Přechod mezi soustavami pomocí Parkovy transformace. [26]

3 ŘÍZENÍ BLDC MOTORU

3.1 Vývojový kit

Pro účely této diplomové práce byla vybrána společnost NXP Semiconductors, která se specializuje na vývoj a výrobu analogových komponent a řízení a regulaci motorů. Na základě doporučení firmy NXP Semiconductors byl vybrán integrovaný obvod, vývojová deska s mikroprocesorem a BLDC motor. Cílem bylo použití jednoho hardwaru pro sensorové i bezsensorové řízení.



Obr. 22: FRDM-MC-LVBLDC sestava od firmy NXP. [28]

3.1.1 Použitý HW

Motor

Vývojová sestava se skládá z BLDC motoru Linix 45ZWN24-40, jenž umožňuje řízení v sensorovém i bezsensorovém režimu. Má dva typy kabelů, kde tři kabely slouží k napájení jednotlivých vinutí motoru a zbylých pět kabelů slouží k napájení a komunikaci s Hallovými senzory. Specifikace motoru je popsána v Tab. 3: .

Tab. 3: Vlastnosti BLDC motoru Linix 45ZWN24-40. [28]

Informace o motoru	Hodnota	Jednotky
Jmenovité napětí	24	V
Jmenovitá rychlost při jmenovitém napětí	4000	RPM
Jmenovitý moment	0,0924	Nm
Jmenovitý výkon	40	W
Nepřetržitý proud	2,34	A
Počet pólových párů	2	-

IO - H-můstek

BLDC motor je napájený z nízkonapěťového 3fázového můstku se šesti MOSFET tranzistory a vyžaduje napájecí napětí o velikosti 10-15 V stejnosměrně. Můstek má proudovou ochranu, kdy výstupní proud může dosahovat až 5 A. Analogově snímá výstupní napětí, proud a také BEMF.

Řídicí deska

Řídicí deska s mikrokontrolérem z produktové řady Kinetis V Family KV1x a architekturou ARM Cortex-M0+. Můstek napájí řídicí desku napětím 5,5 V stejnosměrně. Procesor je napájen stabilizovaným napětím 3,3 V. Blíže informace o mikrokontroléru jsou uvedeny v Tab. 4: .

Tab. 4: Informace o použitém mikrokontroléru – MKV11Z128VLF7. [29]

Informace o mikrokontroléru	Hodnota	Jednotky
Počet bitů	32	Bit
Rychlost CPU	75	MHz
Velikost FLASH paměti	128	kB
Velikost RAM paměti	16	kB

Zdroj

Stolní napájecí zdroj od firmy AIM-TTI Instruments a s označením EX354RD:

- dva nastavitelné výstupy napájení v rozsahu od 0 do 35 V a 0 až 4 A,
- výstupní parametr napěťové a zátěžové regulace < 0,01 %,
- výstupní šum < 2 mV rms,
- přesnost napětí 0,3 % ± 0,01 V a proudu 0,6 % ± 0,001 A.

Osciloskop

Osciloskop od firmy Agilent Technologies s označením DSO6034A:

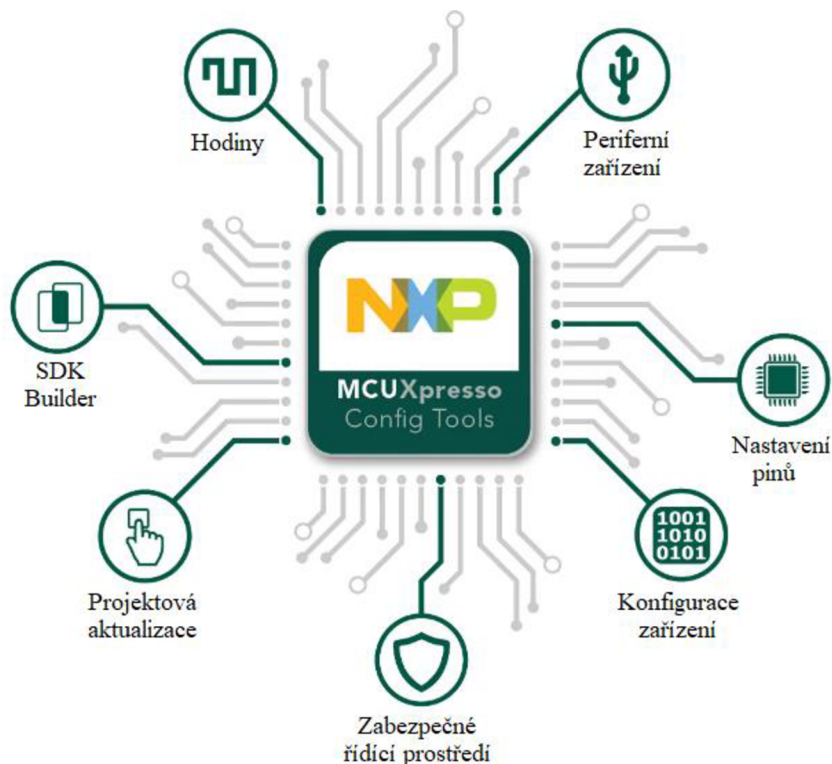
- šířka pásma 300 MHz,
- 4 vstupní kanály,
- vzorkovací frekvence 2 GSa/ s,
- volitelná citlivost vertikální (napěťové) osy 1 mV až 20 V,
- volitelná citlivost horizontální (časové) osy 5 ns až 50 s.

Další použitý HW:

- multimetr: FLUKE 175 True – RMS,
- hysterezní brzda: MAGTROL HB – 140M – 2,
- mechanické počítadlo otáček.

3.1.2 Vývojový SW

MCUXpresso Config Tool je soubor nástrojů od firmy NXP, který slouží k tvorbě firmwaru pro mikrokontroléry. Umožňuje vývojářům rychlé vygenerování inicializačního kódu v jazyce C. Skládá se z několika nástrojů, které jsou plně integrovány do MCUXpresso IDE. Jednotlivé nástroje jsou vidět na Obr. 23: [30]



Obr. 23: MCUXpresso Config Tools od firmy NXP. [30]

Pro zvolený procesor lze v MCUXpresso IDE použít z MCUXpresso Config Tools tyto nástroje:

- nastavení pinů,
- hodin,
- SDK builder.

Firma NXP nabízí SW FreeMASTER. Tento SW umožňuje sledování zvolených proměnných v reálném čase a v individuálních vzorkovacích frekvencích. Dále je možné zobrazení těchto proměnných v grafech. V neposlední řadě SW umožňuje řídit proměnné a posílat příkazy hardwaru.

FreeMASTER zejména nabízí:

- čtení a zapisování do paměti hardwaru,
- zabezpečení dat v paměti hardwaru,
- sledování informací v reálném čase,
- zobrazení jednotlivých proměnných v závislosti na jiné proměnné (nástroj scope), pro získání častějšího vzorkování se používá nástroj recorder (využívá místo v paměti mikroprocesoru).

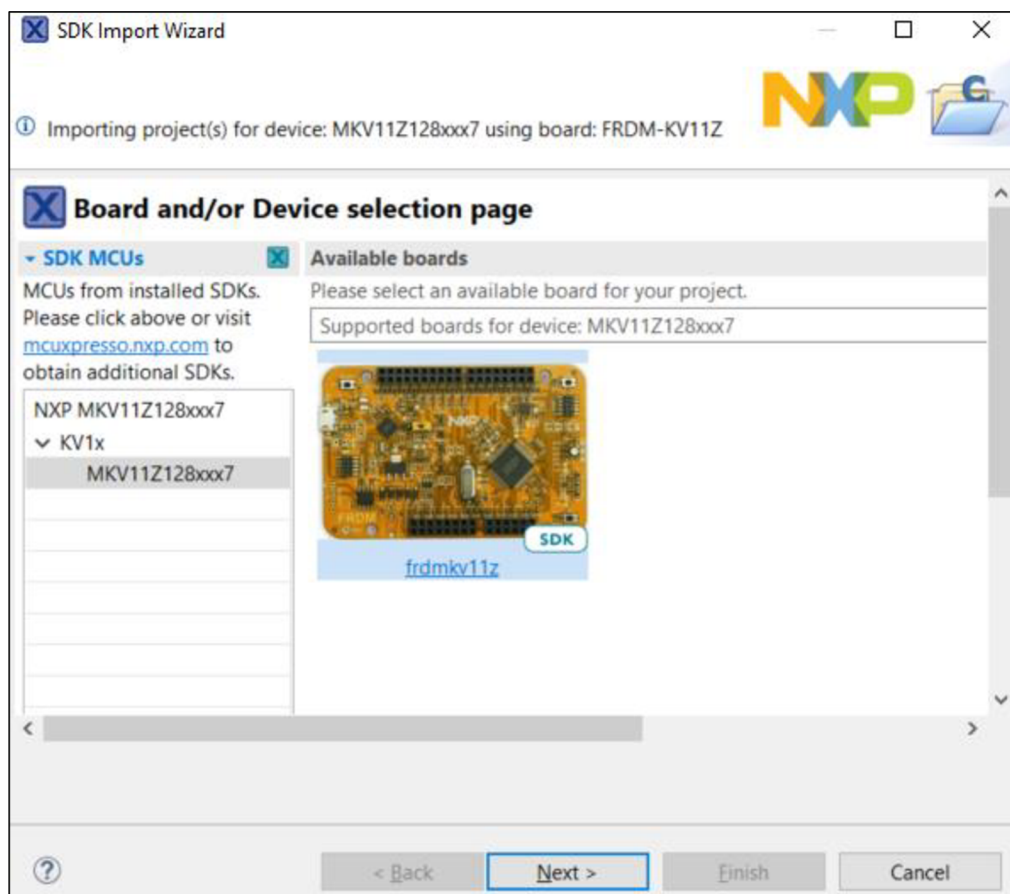
3.2 Rozběh motoru

Rozhraní MCUXpresso IDE nabízí celou řadu příkladů pro jednotlivé mikrokontrolérové desky. Pro řízení motoru jsou použity knihovny z balíčku RTCESL tedy „Real Time Control Embedded Software Motor Control and Power Conversion Libraries“. Jedná se o komplexní balíček algoritmů od nejjednodušších matematických operací až po složitější transformace a pozorovatele. Cílem použití knihoven je urychlení vývoje, zjednodušení kódů k dosažení efektivního řízení motoru a proudovou limitací. Základní knihovny jsou uvedeny níže:

- Math Library – mlib.h,
- General Function Library – gflib.h,
- General Motor Control Library – gmclib.h,
- General Digital Filter Library – gdflib.h,
- Advanced Motor Control Library – amclib.h,
- Power Control Library – pclib.h. [31]

3.2.1 SDK example – mc_blcdc

Nejdříve uživatel musí vygenerovat na stránkách výrobce balíček pro předem zvolenou desku. Tento balíček se vloží do MCUXpresso IDE. Rozhraní pro výběr různých příkladů od výrobce následuje po odkliknutí tlačítka „Next“ na Obr. 24:



Obr. 24: Rozhraní pro načtení jednotlivých příkladů.

Jedním z příkladů, které jsou dostupné v MCUXpresso IDE, je program na ovládání BLDC motoru. Tento příklad je použit jako výchozí bod pro budoucí úpravy. Jedná se o typ bezsenzorového řízení, jehož algoritmus vhodně demonstruje práci s některými z výše uvedených knihoven. Algoritmus řízení motoru se dělí do třech základních částí:

- MCS_BLDCAlignment,
- MCS_BLDCCommutation,
- MCS_BLDCControl.

Při zadání požadované hodnoty rychlosti v SW FreeMASTER anebo při stisknutí tlačítka SW2, nejdříve dochází k natočení rotoru do výchozí pozice. Výchozí pozice odpovídá kombinaci 0 a 1 sektoru komutace. Jednotlivé sektory jsou nadefinované ve zdrojovém

souboru desky `mcdrv_frdmkv11z.c`. Zde jsou také funkcí `void InitClock(void)` nadefinovány systémové hodiny.

Funkce `void MCS_BLDCAignment(mcs_bldc_ctrl_t *psCtrlBLDC)` určuje požadovanou střidu PWM signálu během rozběhu motoru. Pro zjištění proudové odchylky `f16IDcBusPiErr` používá knihovni funkci `MLIB_SubSat_F16`. Její funkci popisuje rovnice (3.1).

$$MLIB_SubSat(a, b) = \begin{cases} 1 & a - b > 1 \\ -1 & a - b < -1 \\ a - b, & \text{else.} \end{cases} \quad (3.1)$$

Výsledek se poté nachází vždy v rozmezí -1 až 1. Toho využívají knihovni funkce jako ochranu před přetečením. Do této funkce vstupuje napájecí proud `f16IDcBusAlign` a od něj se odečítá nefiltrovaný proud `f16IDcBusNoFilt`.

Proudová odchylka následně vstupuje do PI kontroléru zastoupeného knihovni funkcí `GFLIB_CtrlPIpAW_F16`, jejímž výsledkem je požadovaná střida PWM signálu `f16DutyCycle`. Funkce používá paralelní formu PI regulátoru s Anti-Windup funkcí. PI regulátor zajišťuje opravu chyby mezi měřenou a požadovanou veličinou. Paralelní forma znamená, že se jedná o nezávislý regulátor, který umožňuje uživateli nastavení P a I parametrů nezávisle. Výstup regulátorů limituje nastavením uživatel. Anti-Windup v tomto případě funguje tak, že pokud je výstupní hodnota regulátoru limitní, dosahuje funkce hodnoty 0 nebo 1. Všeobecné limity regulátoru jsou popsány v rovnici (3.5).

PI regulátor funkcí času popisuje rovnice (3.2):

$$u(t) = e(t) \cdot K_p + K_i \int e(t) dt \quad (3.2)$$

kde proměnná $e(t)$ vyjadřuje odchylku mezi měřenou a požadovanou hodnotou. Hodnoty K_p a K_i jsou uživatelem definované koeficienty proporcionálního a integračního členu PI regulátoru.

Proporcionální a integrační člen musí být transformován z analogového formátu použitého v rovnici (3.2). Tato rovnice popisuje PI regulátor ve spojitém čase. Rovnice (3.3) vyjadřuje proporcionální člen u_p a rovnice (3.4) integrační člen u_i v diskrétním čase a aktuální krok je popsán koeficientem k .

$$u_p(k) = K_p \cdot e(k) \quad (3.3)$$

$$u_I(k) = u_I(k-1) + e(k) \cdot \frac{K_I T_s}{2} + e(k-1) \cdot \frac{K_I T_s}{2} \quad (3.4)$$

kde T_s [s] představuje velikost vzorkovacího období.

Obvod, který „vypne“ integrální akci v případě saturace se nazývá anti-windup. V případě nasycení akční veličiny dochází k rozpojení regulační smyčky a k neustálé integraci odchylky. Regulátor v takovou chvíli pracuje v otevřené smyčce. Zvětšený akční zásah je nutné po změně znaménka regulační odchylky „odintegrovat“, což způsobuje prodloužení regulačního děje. Nasycení akční veličiny může způsobit až nestabilitu regulační smyčky. [32] [33]

Regulátor může být řešen digitálně, tedy „if $|u| \geq u_{max}$, $K_I = 0$ “. V tomto případě je ale použito analogové řešení v rovnici (3.5) a výstupní signál z rovnic (3.3) a (3.4) je limitován, tak aby nedošlo k nasycení akční veličiny.

$$u(k) = \begin{cases} Upper\ Limit & u(k) \geq Upper\ Limit \\ Lower\ Limit & u(k) \leq Lower\ Limit \\ u(k) & else \end{cases} \quad (3.5)$$

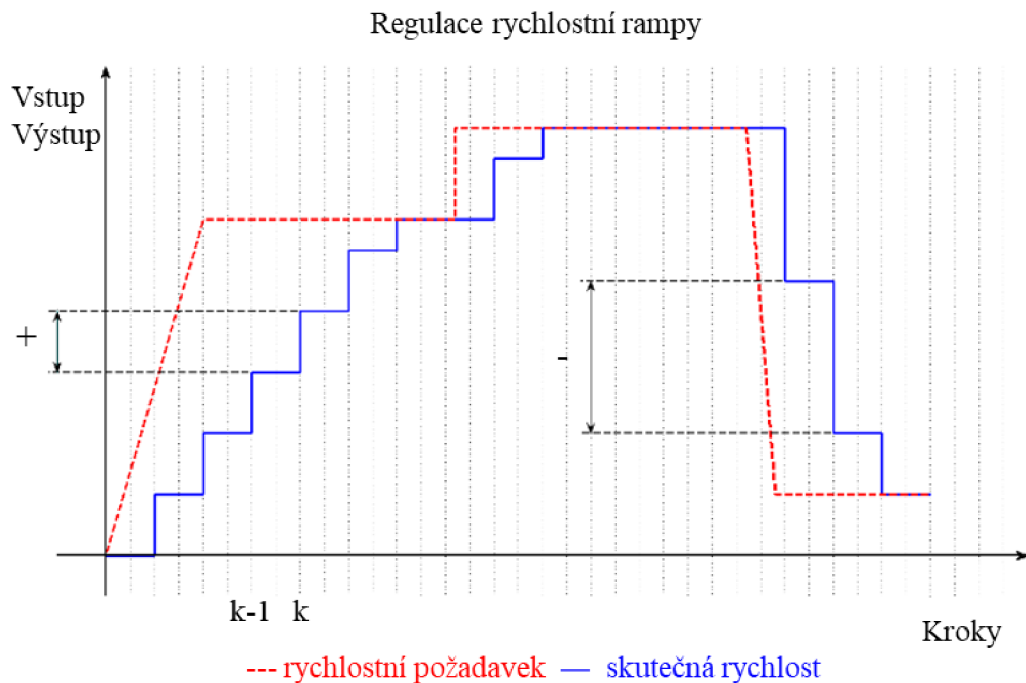
Funkce `void MCS_BLDCCommutation(mcs_bldc_ctrl_t *psCtrlBLDC)` mění kroky komutační sekvence na základě směru otáčení rotoru. Jedna mechanická otáčka je rozdělena na dvě elektrické otáčky, které jsou rozděleny do 6 komutačních sektorů, stejně tak tomu bylo na Obr. 10: .

Funkce `void MCS_BLDCControl(mcs_bldc_ctrl_t *psCtrlBLDC)` řídí BLDC motor, a to proudovým a rychlostním PI regulátorem. Nejdříve dochází k výpočtu absolutní rychlosti pomocí knihovní funkce `MLIB_DivSat_F16`, do které vstupuje na straně čitatele rychlostní konstanta a ve jmenovateli je součet provedených komutací za jednu periodu. Funkci popisuje rovnice (3.6).

$$MLIB_DivSat(a, b) = \begin{cases} max & \frac{a}{b} > max \\ min & \frac{a}{b} < min \\ \frac{a}{b} & else \end{cases} \quad (3.6)$$

K regulaci rychlosti je nutné znát její odchylku od požadované a skutečné hodnoty. Požadovaná rychlost se nastavuje pomocí rychlostní rampy, jenž má přesně definované vzestupné a sestupné kroky. Tyto kroky definuje uživatel. Rychlostní rampa je vypočítána pomocí knihovní funkce `GFLIB_Ramp_F32`. Pokud přijde požadavek na zvýšení rychlosti, funkce postupně zvyšuje rychlostní rampu. V případě požadavku na snížení rychlosti

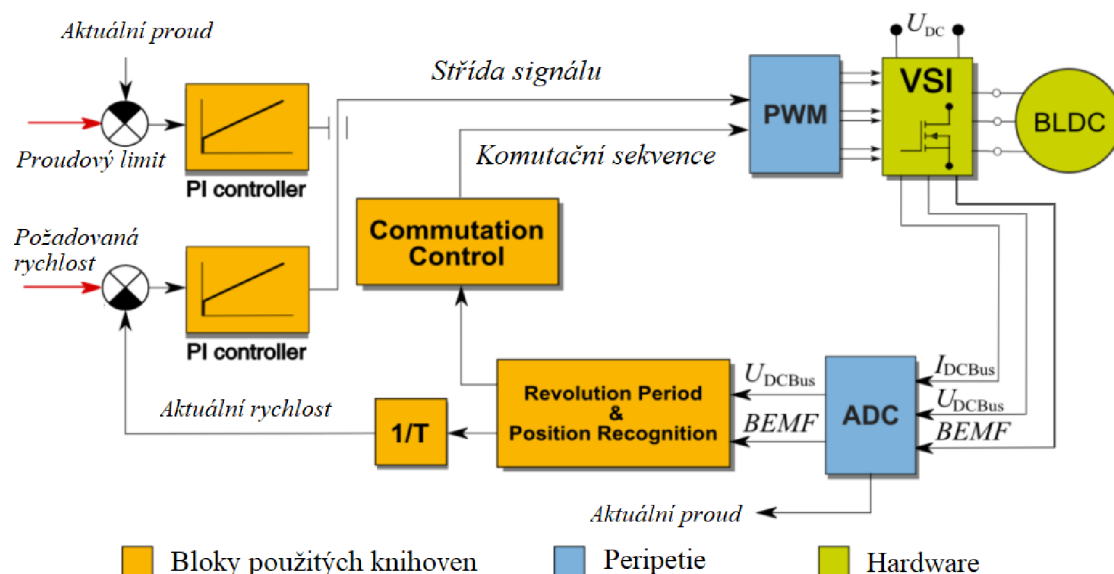
dochází k postupnému snižování rychlostní rampy. Demonstrativní průběh funkce `GFLIB_Ramp_F32` znázorňuje Obr. 25:



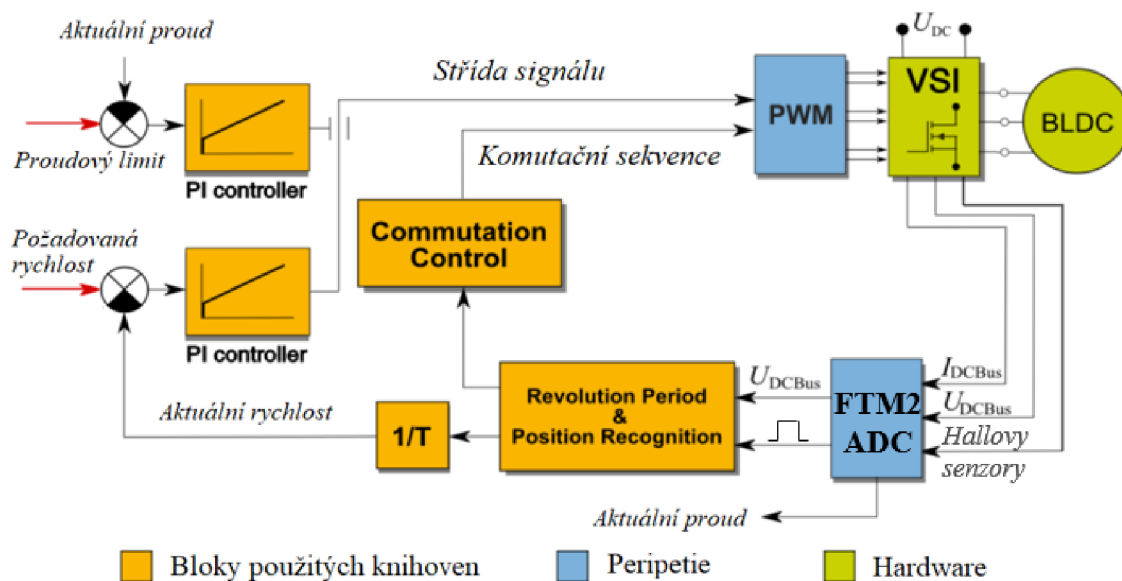
Obr. 25: Regulace rychlostní rampy. [34]

Z grafu vychází, že postupným zvyšováním nebo snižováním rychlostní rampy se docílí žádané hodnoty. Rozdíl z rychlostní rampy a žádané rychlosti vstupuje do rychlostního PI regulátoru, pro nějž je použita stejná knihovní funkce `GFLIB_Ctr1PIpAW_F16`. Výsledkem je opět požadovaná střída signálu. Ještě předtím se volá proudová kontrola `f16IdcBusPiErr`, která vstupuje do momentového PI regulátoru. Pokud není nutná proudová limitace, střidu signálu určuje rychlostní PI regulátor. Když je proudová limitace zapnutá, střidu signálu udává proudový PI regulátor.

Zjednodušené blokové schéma řízení a použité regulátory jsou znázorněny na Obr. 26: , jenž popisuje bezsenzorové řízení. Pro srovnání se nachází zjednodušené blokové schéma senzorového řízení na Obr. 27: .



Obr. 26: Schéma bezsenzorového řízení BLDC motoru v příkladě mc_bldc. [35]



Obr. 27: Schéma upraveného senzorového řízení BLDC motoru.

3.3 Srovnání bezsenzorového a senzorového řízení motoru

Firma NXP poskytla upravený firmwarový kód na senzorové řízení BLDC motoru. V kódu jsou použity stejné knihovní funkce jako pro bezsenzorové řízení. V tomto případě dochází ale ke zpracování signálu z Hallových snímačů, které udávají polohu natočení rotoru vůči statoru. Firma NXP upozornila na skutečnost, že k senzorové aplikaci neexistuje žádná dokumentace a stejně tak i komentáře v kódu jsou nedostatečné.

Existující dokumentace a komentáře v kódu u bezsenzorové aplikace také nejsou dostatečné, proto se dá na oba řídicí systémy nahlížet jako na tzv. „Gray Box“.

3.3.1 Rozdíly mezi bezsenzorovou a senzorovou aplikací

Jak již bylo zmíněno výše, základním rozdílem mezi senzorovou a bezsenzorovou aplikací je způsob získávání aktuální polohy rotoru vůči statoru. Přehled výsledků testování, které proběhly na senzorové a bezsenzorové aplikaci, je obsažen v excelovém souboru. Tento soubor je připojen jako příloha 1 k této diplomové práci. Příloha 2 obsahuje senzorovou aplikaci, kterou poskytla firma NXP. Bezsenzorová aplikace není k této diplomové práci přiložena, protože firma NXP ji zdarma nabízí ke stažení. Návod ke stažení nastiňuje kapitola 3.2.1. Navíc stavový automat přiložený k této práci (Příloha 3) vychází z původní bezsenzorové aplikace.

Senzorové řízení

Senzorové řízení používá časovač `void FTM2_IRQHandler(void)`, který funguje principem input capture, což v překladu znamená zachytávání vstupního signálu. Vstupní signál je dán Hallovými senzory. Signál z Hallových senzorů zpracovává hradlo XOR, které znázorňuje Tab. 5: Sloupce A, B, C představují signál z Hallových senzorů. Hodnota stavu je zaznamenána pomocí Grayova kódu, jehož srovnání s binárním kódem bylo uvedeno v Tab. 2: .

Tab. 5: Hradlo XOR

A	B	C	Stav	XOR
0	0	1	1	1
0	1	1	2	0
0	1	0	3	1
1	1	0	4	0
1	0	0	5	1
1	0	1	6	0

Změna stavu Hallových senzorů způsobí přerušení, ve kterém funkce `void FTM2_IRQHandler(void)` načte aktuální stav senzorů a dle nich řídí napájení jednotlivých vinutí. V této kapitole je řízení motoru testováno při rychlosti 1 000 rpm. Každá elektrická otáčka má 6 stavů a 1 mechanická otáčka je rovna 2 elektrickým. Výpočet frekvence snímání polohy Hallových senzorů při rychlosti 1 000 rpm znázorňuje rovnice (3.7):

$$f_{FTM2} = \frac{1}{T} = \frac{1}{60} = \frac{1}{2 \cdot n \cdot \text{počet_stavů}} = \frac{1}{2 \cdot 1000 \cdot 6} = 200 \text{ Hz}, \quad (3.7)$$

Výpočet rychlosti u sensorového řízení se provádí pomocí knihovní funkce `MLIB_Div1Q_F16(pui32PeriodToSpeed, ui16FtmCounterFilt)`, kde v čitateli konstanta `pui32PeriodToSpeed` nabývá hodnoty 666 a ve jmenovateli je proměnná `ui16FtmCounterFilt`. Výpočet konstanty `pui32PeriodToSpeed` znázorňuje rovnice (3.8) a představuje počet měřených časových okamžiků na jeden komutační sektor za sekundu.

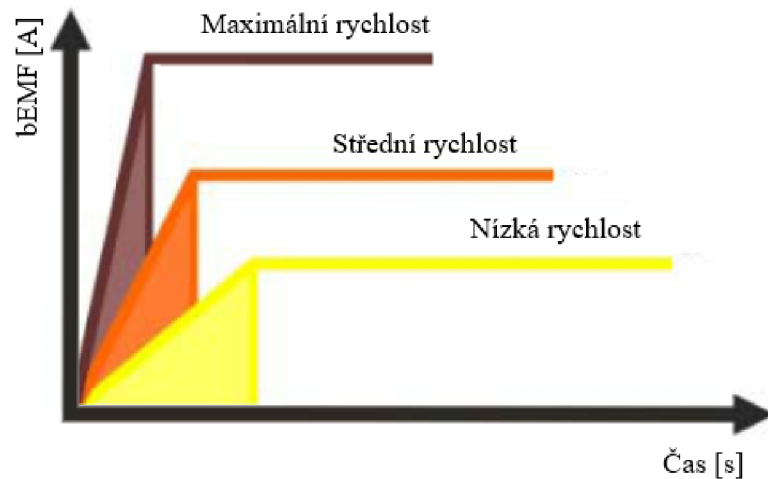
$$pui32PeriodToSpeed = \frac{f_{\text{časovače}}}{\frac{n_{\text{max}}}{\frac{\text{pocet_sektoru} \cdot pp}{60}}} = \frac{585\,930}{\frac{4400}{\frac{6 \cdot 2}{60}}} \cong 666. \quad (3.8)$$

Proměnná `ui16FtmCounterFilt` vychází z nefiltrovaného časovače `ui16FtmCounter`, jenž nabývá hodnoty vypočtené v rovnici (3.9). Ve jmenovateli této rovnice se vyskytuje hodnota 1,7 μs , jenž odpovídá nastavení časovače. Hodnota `ui16FtmCounter` tedy nabývá počtu časových úseků o velikosti 1,7 μs , které obsahují přechod mezi jednotlivými stavy.

$$ui16FtmCounter = \frac{\text{změna_stavu}_k - \text{změna_stavu}_{k-1}}{0,0000017} \quad (3.9)$$

Bezsensorové řízení

Aplikace bezsensorového řízení používá metodu založenou na detekci průchodu indukovaného napětí nulou. Pro určení okamžiku komutace je použita integrace BEMF. Generované napětí BEMF představuje v kódu proměnná `frac16_t f16UPhaseBEMF`. Generované napětí je snímáno každých 100 μs , pomocí ADC převodníku `void ADC0_IRQHandler(void)`, jejíž součástí je funkce `static void M1_StateRunSpinFast(void)`. V této funkci dochází nejdříve k ozrcadlení záporné hodnoty BEMF, pomocí knihovní funkce `MLIB_Neg_F16`. Následně dochází ke sčítání integrací BEMF dokud hodnota součtu nepřekročí stanovenou konstantu `frac32_t f32UBEMFIntegThreshold`. Po překročení dochází ke komutaci dalšího sektoru. Sčítání integrací BEMF znázorňuje Obr. 28: . Velikost právě snímaného BEMF závisí na rychlosti, nicméně velikost plochy pod křivkou `frac32_t f32UBEMFIntegThreshold` je vždy stejná.



Obr. 28: Rozdílná velikost BEMF pro různé rychlosti. [37]

Výpočet rychlosti probíhá ve funkci `void MCS_BLDCControl(mcs_bldc_ctrl_t *psCtrlBLDC)` a popisuje jej rovnice (3.10):

$$\omega = \frac{Speed_Scale_Constant}{PeriodSixCmtSum}, \quad (3.10)$$

kde *Speed_Scale_Constant* se rovná konstantně 3 995 a *PeriodSixCmtSum* se rovná periodě provedení šesti komutací. Výpočet konstanty znázorňuje rovnice (3.11):

$$\begin{aligned} Speed_Scale_Constant &= pui32PeriodToSpeed \cdot SixCmt \\ &= 665,8 \cdot 6 \cong 3995, \end{aligned} \quad (3.11)$$

kde *SixCmt* představuje počet šesti komutačních sektorů.

3.3.2 Požadavky na testování

Pro srovnání sensorového a bezsensorového řízení byly vybrány zjednodušené, ale reálné požadavky, které jsou kladeny na aktuátory firmy Honeywell od zákazníků.

- Udržení konstantních otáček při spojitě změně zatížení,
- chování při skokové změně zátěže,
- chování při skokové změně rychlosti,
- otočení motoru o přesný předem definovaný počet otáček.

Udržení konstantních otáček při zvyšující se zátěži je důležitým faktorem pro tzv. „Spring return actuators“. Tyto aktuátory při otevírání nebo zavírání např. ventilu namotávají pružinu, která slouží pro bezpečnostní otevření nebo uzavření ventilu v případě havárie. Aktuátory musí být schopné pružinu navinout a ventil nastavit v předem stanoveném

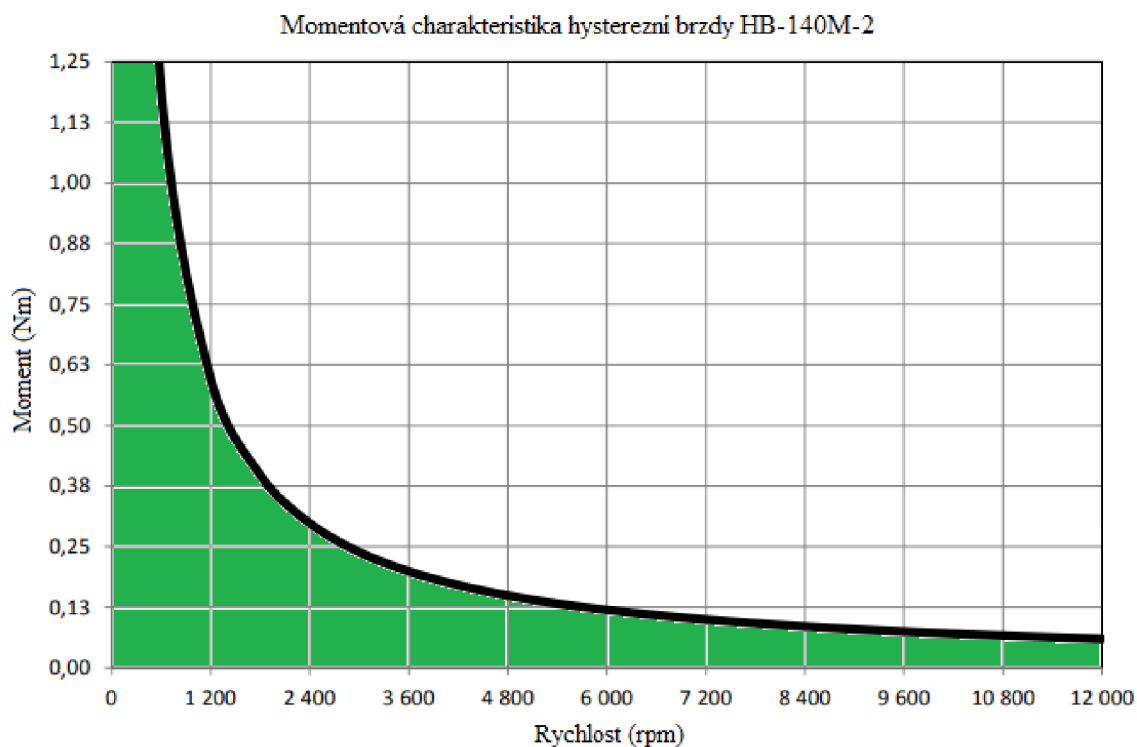
čase. Vztah rychlosti k momentu byl popsán v kapitole 2.2.3 pomocí momentové charakteristiky. Pro testování je použita hysterezní brzda a velikost otáček stanovena na 1 000 rpm.

Skoková změna zátěže může nastat z hned několika důvodů. Tento případ se dá představit jako otevírání zaneseného ventilu, kde dochází k okamžitému nárůstu kroutícího momentu. V případě, že aktuátor vyvine dostatečný kroutící moment, dochází k odtržení a následuje zlom. Pracovní velikost momentu je poté na úrovni 50 až 100 % hodnoty potřebné k odtržení.

Požadavek na rychlost otáček motoru bývá obvykle v těchto aplikacích konstantní. Nicméně skoková změna otáček nabízí vhodné srovnání chování, které by bylo požadováno u dynamičtějších systémů.

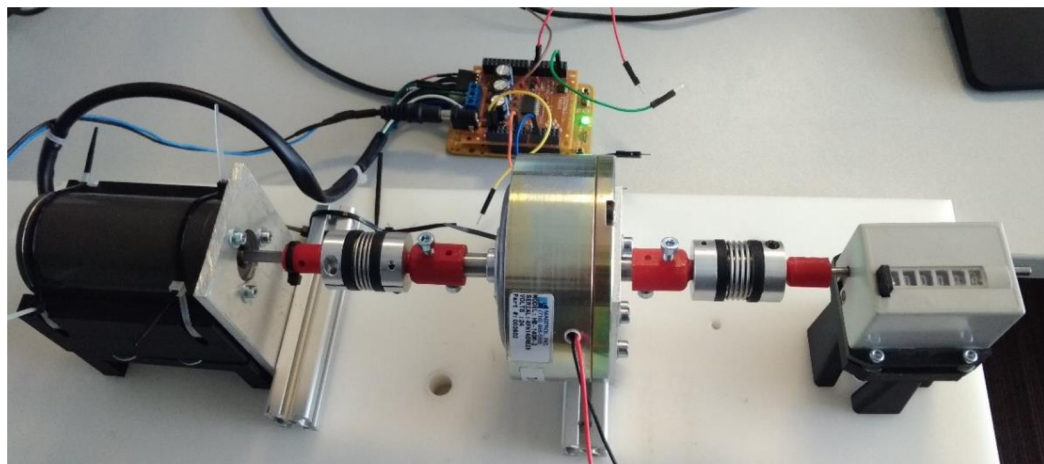
Počet otáček, který motor udělá, je důležitým aspektem pro zákazníka a funkčnost produktu. Určuje například regulaci průtoku u ventilů anebo natočení klapky HVAC jednotky. V této práci se testuje přesnost na 1 000 mechanických otáček. Původní aplikace poskytnuté od firmy NXP neobsahovali polohový regulátor. Implementace polohového regulátoru je nastíněna v kapitole 3.3.6.

Vzhledem k charakteru jednotlivých testů je nutné nejdříve uvést chování hysterezní brzdy MAGTROL HB-140M-2, jenž slouží k zatěžování motoru. Její momentovou charakteristiku znázorňuje Obr. 29: .



Obr. 29: Momentová charakteristika hysterezní brzdy. [36]

Jak je patrné z grafu, s rostoucí rychlostí se snižuje odpor hysterezní brzdy. Pracovní bod hysterezní brzdy se v průběhu všech měření pohybuje v zelené oblasti. Hraniční křivka zde představuje maximální kinetickou energii pro stabilní zátěž a při napájení stejnosměrným napětím 24 V. Zapojení motoru, hysterezní brzdy a mechanického počítadla znázorňuje Obr. 30: . Pro zapojení jsou použity dvě pružné spojky, které ale průměrově nevyhovovaly, proto bylo nutné dotisknout čtyři červené mezikusy na 3D tiskárně od firmy Ultimaker.



Obr. 30: Zapojení motoru, hysterezní brzdy a mechanického počítadla.

3.3.3 Chování při skokové změně zátěže

Toto testování se zaměřuje na rychlost reakce systému na náhlou změnu zátěže. Z momentové charakteristiky hysterezní brzdy je patrné, že odpor, který brzda klade se se zvyšující rychlostí otáčení snižuje. V tomto případě se nejdříve rychlost otáčení ustálí na 1 000 rpm, následně v ustáleném stavu dojde k aplikování zátěže. Zátěž je aplikována napětím na brzdě 8 V, 8,5 V, 9 V a 9,1 V. Po ustálení v zatíženém stavu je napájení brzdy vždy vypnuto. Po opětovném ustálení otáček se zátěž zvýší a znovu aplikuje. Výsledky z měření jsou popsány v Tab. 6: .

Tab. 6: Srovnání senzorového a bezsenzorového řízení motoru při skokové změně zátěže.

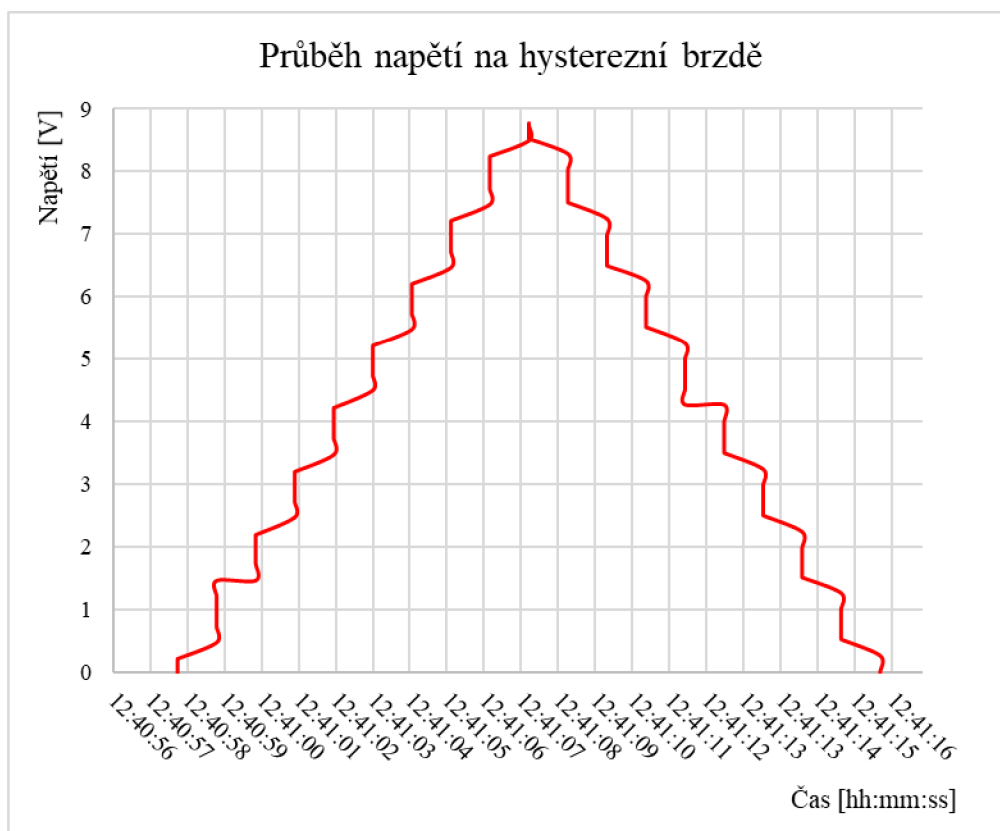
Chování při skokové změně zátěže							
Senzorově řízená aplikace	Test	Napětí na brzdě [V]	Střída signálu [-]	Otáčky po ustálení [rpm]	Rychlost reakce systému na zatížení [s]	Max. otáčky po uvolnění zátěže [rpm]	Rychlost reakce systému na uvolnění [s]
	#						
Senzorově řízená aplikace	1	8	0,84	1000	0,9	1250	0,43
	2	8,5	0,95	700	2,4	1335	0,51
	3	9	0,95	185	2,8	1438	0,88
	4	9,1	0	0	0,64	1030	0,28
Bezsenzorově řízená aplikace	Test	Napětí na brzdě [V]	Střída signálu [-]	Otáčky po ustálení [rpm]	Rychlost reakce systému na zatížení [s]	Max. otáčky po uvolnění zátěže [rpm]	Rychlost reakce systému na uvolnění [s]
	#						
Bezsenzorově řízená aplikace	1	8	0,83	1000	3,9	1575	2,80
	2	8,5	0,9	950	2,6	1690	3,00
	3	9	0	0	2,1	1300	0,88
	4	9,1	0	0	1,4	1300	0,28

3.3.4 Udržení otáček při spojitě změně zátěže

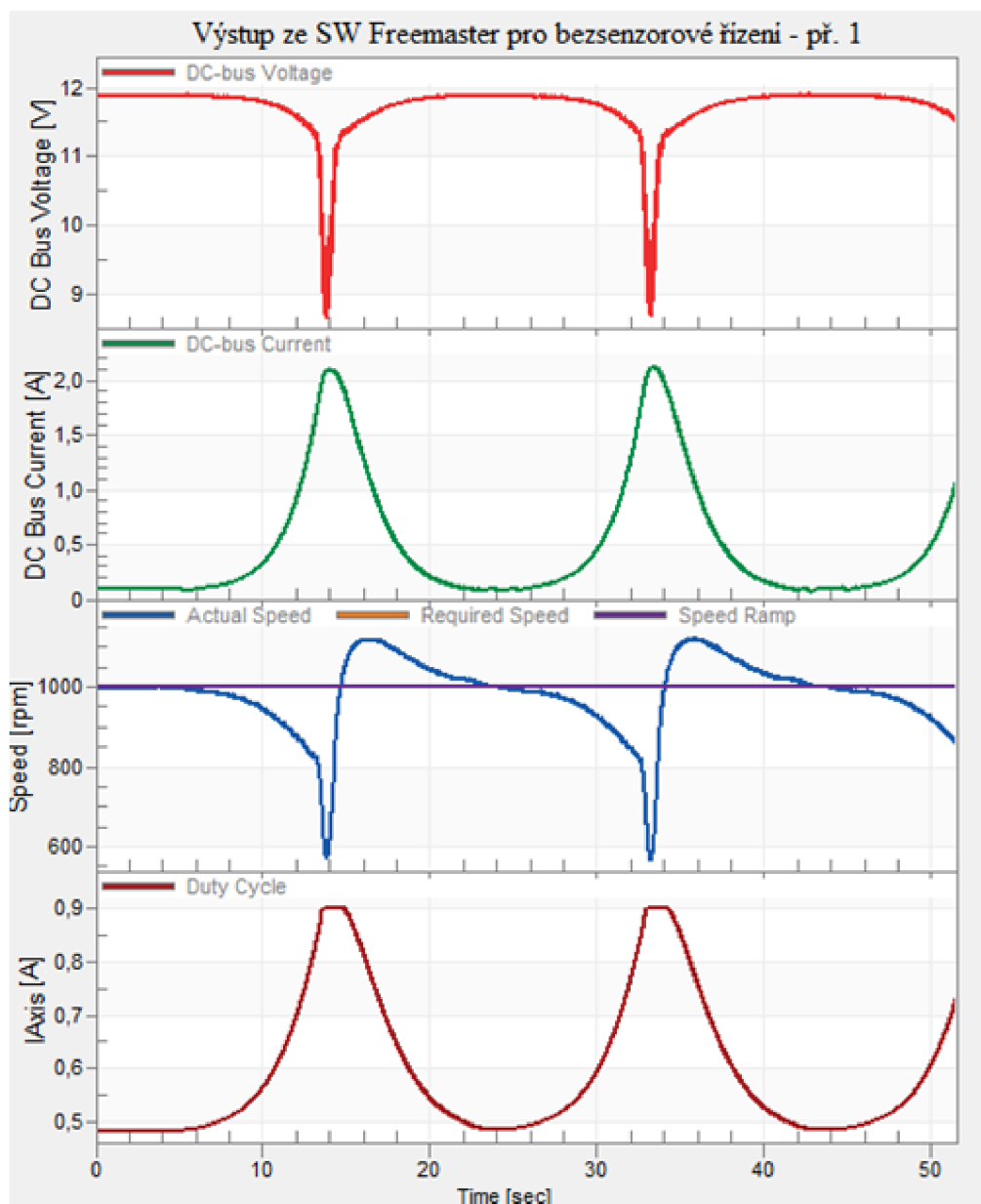
Pro získání spojitě změny zátěže, která by byla opakovatelná pro senzorově i bezsenzorově řízenou aplikaci, byla vytvořena rampa na ovládání napájení na hysterezní brzdě. Pro tyto účely bylo použito již stávající testovací zařízení, jež firma Honeywell využívá k testování jejich aktuátorů. Při velmi pozvolné změně zátěže docházelo k udržení otáček u obou testovaných systémů. Proto byl experimentálně zvolen krok 0,1 V a to každou 0,1 s. Počet kroků byl stanoven na 90 a výsledné napětí je tedy 9 V na magnetické brzdě. Následně dochází ke klesání napětí stejným způsobem až na 0 V.

Při maximálním zatížení již dochází k limitaci proudu na zdroji. Při napájení 12 V je maximální proud 4,045 A ze zdroje. Ukázka z měření je znázorněna na Obr. 32: a její

výsledky v Tab. 7: . Na Obr. 32: je vidět strmý pád rychlosti a napětí, a to ve chvíli, kdy dochází k limitaci proudu na zdroji. Tato limitace trvá pouze posledních pár kroků a následně z maximální hodnoty 9 V na hysterezní brzdě začíná napětí klesat až na 0 V. Jak již bylo výše zmíněno, hodnota zatížení byla experimentálně zjištěna tak, aby se motor při rychlosti 1 000 rpm pohyboval na mezní hranici. Obr. 32: ukazuje, že napětí klesá ještě před začátkem limitace proudu na zdroji. Klesání je způsobeno parazitní impedancí kabelů. Testován je i případ, kdy nedocházelo ke snižování zátěže při dosažení 9 V na hysterezní brzdě. Sensorově řízená aplikace v takovém případě sníží rychlost otáčení až na hodnotu okolo 270 rpm, zatímco bezsensorová aplikace se ustálí na rychlosti okolo 320 rpm. Předchozí testování ukázalo, že skoková zátěž by byla pro bezsensorové řízení již kritická a motor by se zastavil. Obr. 31: ukazuje průběh napětí na hysterezní brzdě v reálném čase.



Obr. 31: Průběh napětí na hysterezní brzdě.



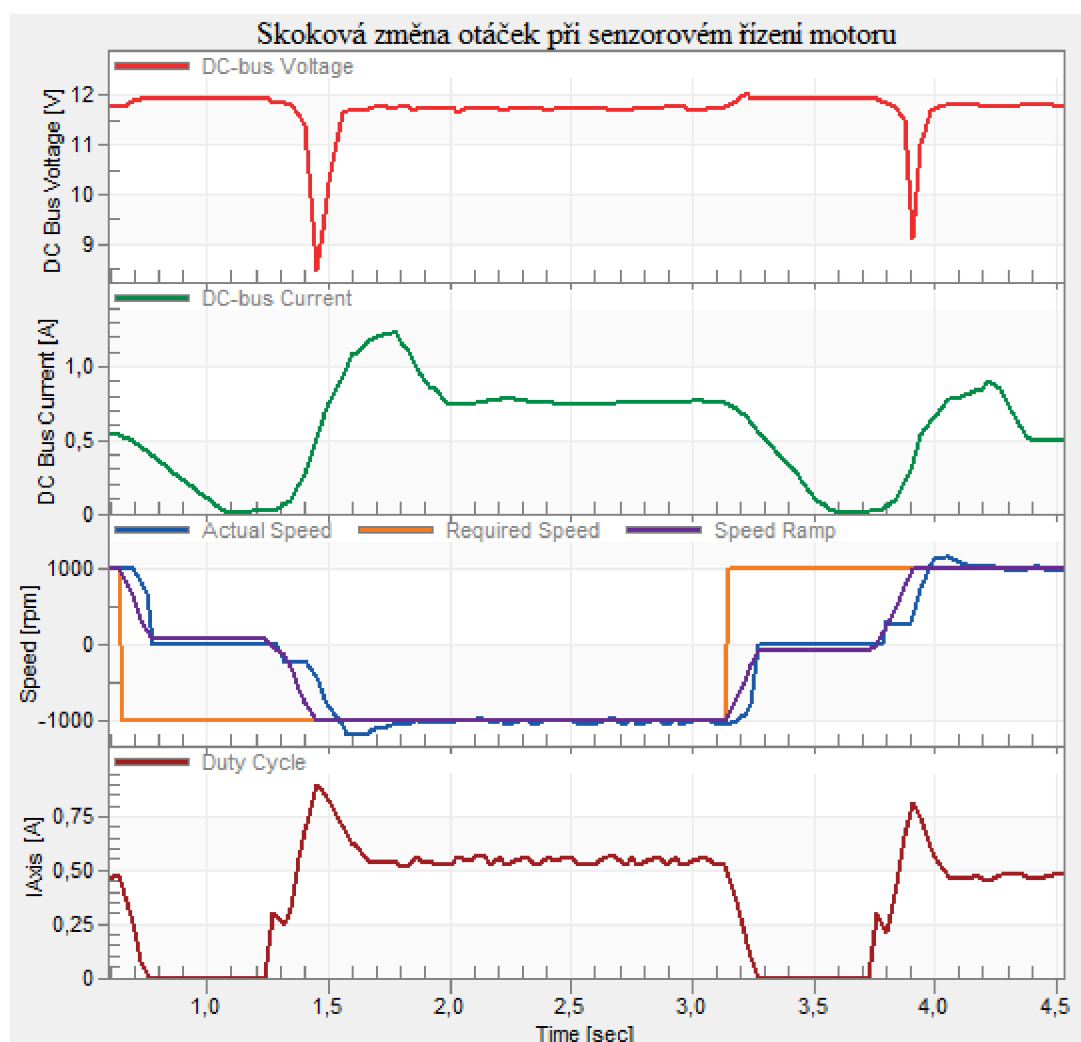
Obr. 32: Bezsensorové měření při spojitě změně zátěže.

Tab. 7: Srovnání sensorového a bezsensorového řízení motoru při spojitě změně zátěže.

Udržení konstantních otáček při spojitě změně zátěže					
Sensorově řízená aplikace	Test	Max	Min. rychlost	Max. rychlost	Reakce systému z max. na
	#	proud [A]	[rpm]	[rpm]	požadované otáčky [s]
	1	2.126	316	1084	0.24
	2	2.125	322	1096	0.42
	3	2.134	327	1104	0.28
	4	2.165	334	1104	0.33
Průměr	2.138	325	1097	0.32	
Bezsensornově řízená aplikace	Test	Max	Min. rychlost	Max. rychlost	Reakce systému z max. na
	#	proud [A]	[rpm]	[rpm]	požadované otáčky [s]
	1	2.11	571	1122	5.10
	2	2.12	568	1113	5.15
	3	2.12	581	1122	5.35
	4	2.13	571	1124	5.20
Průměr	2.120	573	1120	5.20	

3.3.5 Chování při skokové změně otáček

Motory v aktuátorech se nejčastěji otáčejí konstantní předem nadefinovanou rychlostí. Pro simulování takového chování je motor otáčen provozní rychlostí 1 000 rpm a následně zastaven na 0 rpm. Z nulové rychlosti dochází k roztočení motoru na rychlost -1 000 rpm. Jedná se tedy o náhlou změnu směru. Experimentálně bylo zjištěno maximální zatížení hysterezní brzdou, a to o velikosti 5,2 V pro rozjezd motoru. U sensorového řízení dochází, v závislosti na směru otáčení, k různým průběhům. Při otáčení jedním směrem krátkodobě limituje proud na zdroji. Besensornové řízení se takto nechová, proto se dá vyloučit mechanická příčina, např. tření brzdy nebo motoru jedním směrem. Problém tedy bude v řídicím algoritmu, který nejspíš není optimalizovaný pro otáčení oběma směry.



Obr. 33: Sensorové měření při skokové změně otáček.

3.3.6 Otočení motoru o přesný předem definovaný počet otáček

Motor je opět zatížen hysterezní brzdou s napětím 5,2 V a cílem tohoto testování je otočit motor o 1 000 otáček s rychlostí 1 000 rpm. Regulátor je implementován takovým způsobem, aby před cílem začal lineárně zpomalovat a do cílové polohy dojel rychlostí 500 rpm. U bezsenzorového řízení je počet otáček měřen dle počtu provedených komutací. Testovanému motoru odpovídá průběh komutace, jenž je znázorněn na Obr. 10: . Z toho je patrné, že jedna provedená komutační sekvence odpovídá jedné elektrické otáčce. Mechanická otáčka je potom rovna dvěma elektrickým otáčkám. U senzorového měření byl použit výstup ze senzoru C. Kód již obsahoval funkci `bool_t MCDRV_FtmGetHsStatus(mcdrv_ftm_hs_t *this)`, která dává logický výstup z jednotlivých senzorů. Pro aplikování polohového regulátoru byl použit senzor C. Zde je ukázka z kódu:

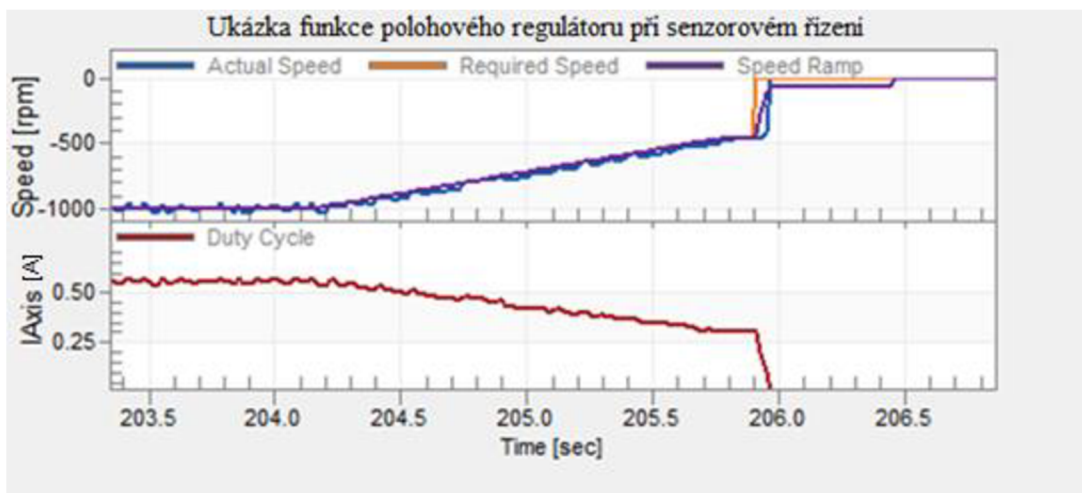
```

/* Sensor C */
if(this->pui32HS3Port->PDIR & (this->ui32HS3PinShift))
{
    *this->pui8HallState |= (1 << 2);
    if(a == b)
    {
        pocet_otacek++;
        a++;
    }
}
else
{
    *this->pui8HallState &= ~(1 << 2);
    if((a-1) == b)
        b++;
}

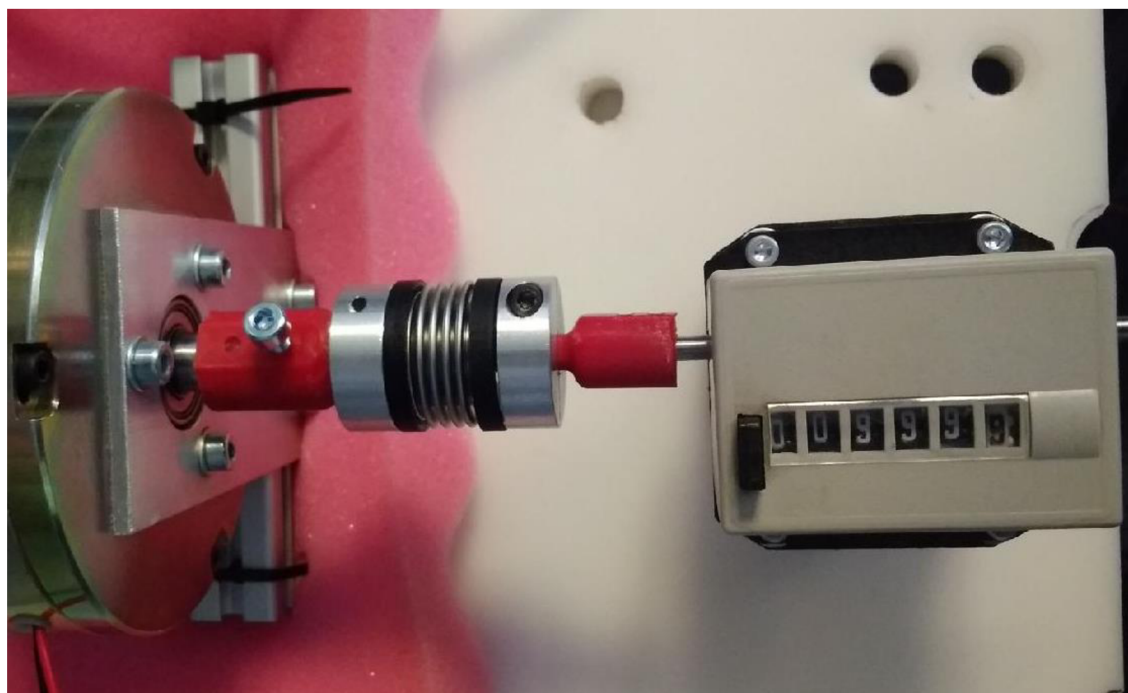
```

Z kódu je patrný princip, kdy signál ze senzoru C se ukládá do `pui8HallState`, jenž má datovou strukturu `uint8_t`, 1 nebo 0. V závislosti na tom, jestli senzor C má signál či nikoliv. U senzoru C se jeho hodnota ukládá do 3 bitu zleva. Počítání otáček je řešeno tak, že se při každé náběžné hraně senzoru inkrementuje proměnná `uint8_t` `pocet_otacek`. Výsledek proměnné `pocet_otacek` se rovná počtu elektrických otáček.

Výstup ze SW FreeMaster je vidět na Obr. 34: . Motor začíná lineárně snižovat rychlost až k rychlosti 500 rpm. Obr. 35: ukazuje výsledek z bezsenzorového měření regulátoru otáček.



Obr. 34: Regulace otáček pro bezsenzorové řízení těsně před dojezdem.



Obr. 35: Ukázka z měření regulátoru otáček. Dojezd s přesností 0,1 požadovaných otáček u bezsenzorového řízení.

3.4 Úpravy firmwaru

Výsledky testování ukazují rozdílné chování sensorového a bezsenzorového řízení. Ačkoliv byly implementované údajně stejné regulátory z knihoven firmy NXP, z výsledků je patrné, že reagují různě na zátěž, změnu otáček apod. Bezsenzorové řízení reaguje na změny po menších krocích, nicméně průběh je velmi plynulý. Sensorové řízení, není schopné držet přesnou rychlost a kolísá o ± 30 rpm při rychlosti 1000 rpm. Toto kolísání je dáno nízkou frekvencí snímání Hallových sensorů, jenž bylo popsáno v rovnici (3.7). Pro většinu aplikací se dá považovat tento rychlostní rozptyl za přijatelný. Analýza obou kódů ukázala, že regulátory mají rozdílně nastavené konstanty a to např. konstanty K_p a K_I . Rovnice PI regulátoru byla uvedena v rovnici (3.2). Nastavení konstant bylo poskytnuto firmou NXP.

Aby mohlo být srovnání validní, bylo nutné upravit konstanty na stejné hodnoty. Nejdříve byla snížena maximální střída signálu na 0,9. Tato hodnota byla použita u bezsenzorového řízení. Následně bylo zkoumáno různé nastavení konstant a změny vlastnosti řízení. Některé z původních konstant jsou uvedeny v Tab. 8: .

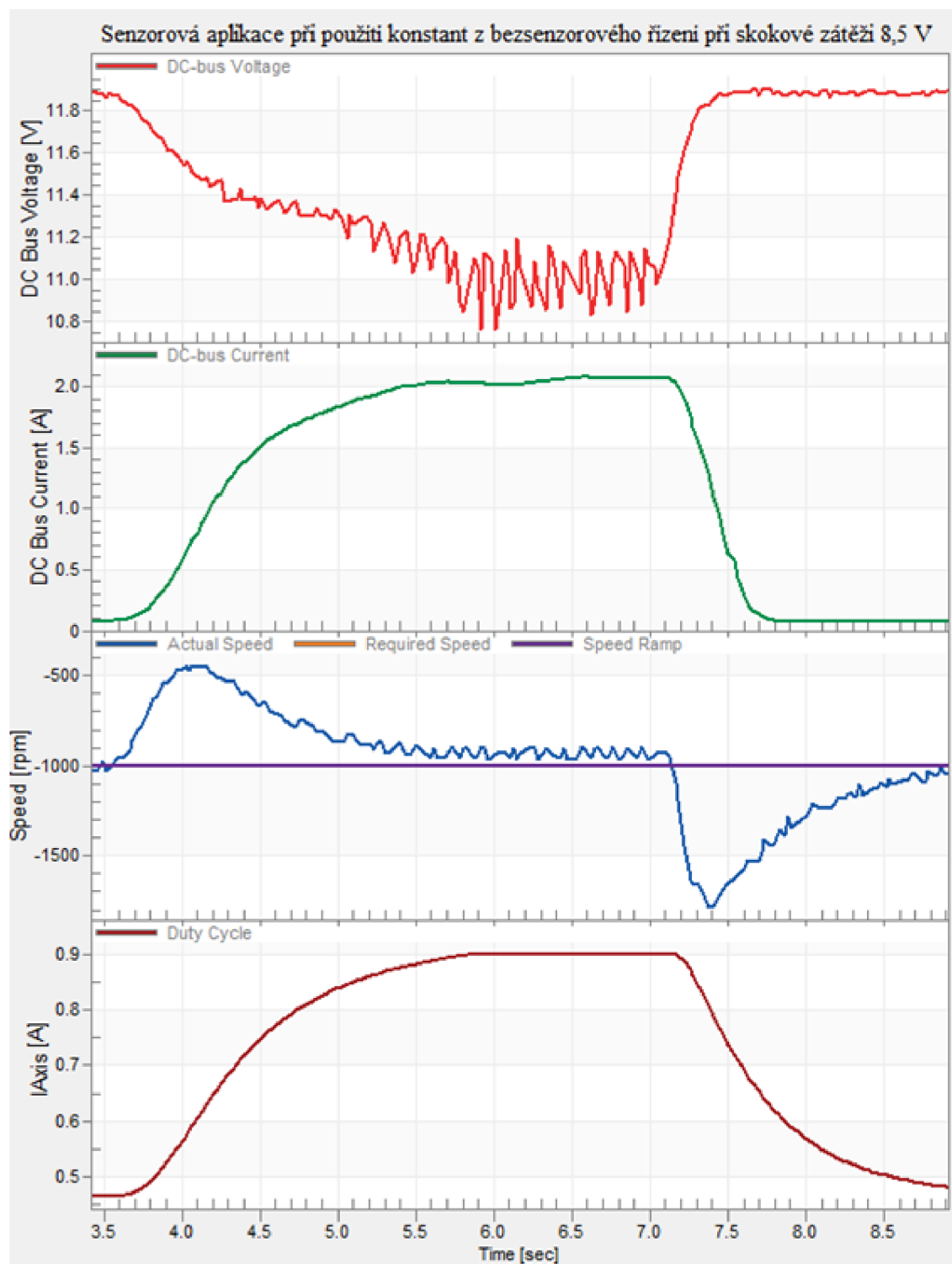
Tab. 8: Nastavené hodnoty konstant v PI regulátorech od firmy NXP.

Parametry		Bezsenzorové řízení	Senzorové řízení
SPEED	KP_GAIN	ACC32(0.21178822474700334)	ACC32(2.2697877956970593)
	KI_GAIN	ACC32(0.006516560761446258)	ACC32(0.02837234744621324)
	RAMP_UP	FRAC32(0.00041322314)	FRAC32(0.001818181818)
	RAMP_DOWN	FRAC32(0.00041322314)	FRAC32(0.001818181818)
TORQUE	KP_GAIN	ACC32(0.007291666666666668)	ACC32(0.20462399999999997)
	KI_GAIN	ACC32(0.005191666666666665)	ACC32(0.009635733333333333)

3.4.1 Výsledky po úpravě konstant

Po upravení konstant bylo u bezsenzorového řízení dosaženo výrazně rychlejší reakce na změnu zátěže. U konstant pro bezsenzorové řízení trvala reakce na skokové odlehčení zátěže 8,5 V na hysterezní brzdě 3 s. Při použití konstant ze sensorového řízení je systém schopný reagovat za 0,9 s. Na druhou stranu se snížila při zátěži rychlost a ustálila se na 917 rpm oproti původním 950 rpm. U rychlosti 917 rpm začíná proudová limitace na zdroji, tedy při této rychlosti potřebuje řídicí algoritmus napájet cívkou s vyšším proudem, než mu dovoluje zdroj. Rychlejší reakce na změnu má v tomto případě za následek nižší dosaženou rychlost po ustálení.

Senzorová aplikace řízená konstantami z bezsenzorového řízení dosahuje při zatížení 8,5 V podobných hodnot jako bezsenzorová aplikace. Původně nastavená sensorová aplikace se při zatížení 8,5 V ustálila na 700 rpm a její reakce na zatížení trvala 2,4 s. Následný překmit rychlosti při uvolnění dosáhl 1335 rpm, jenž aplikace byla schopná regulovat zpět na 1000 rpm za 0,51 s. Sensorová aplikace s konstantami z bezsenzorového řízení se ustálila na 930 rpm. Reakce na tuto změnu trvala 2,2 s a následný překmit byl 1700 rpm, které systém reguloval 2,9 s. Toto zatížení je ukázáno na následujícím Obr. 36: . V čase 3,6 s dochází k aplikování zátěže a v čase 7,2 s k jejímu uvolnění.



Obr. 36: Senzorová aplikace při použití konstant z bezsenzorového řízení.

3.4.2 Shrnutí výsledků po upravení konstant

Úprava konstant a jejich vhodná hodnota záleží na způsobu použití motoru. V aplikacích, které potřebují rychleji reagovat na skokovou změnu zátěže, je vhodnější použití konstant ze sensorového řízení. Pro regulaci s nižší zátěží, kde není požadováno okamžité reakce, je vhodnějším řešením použití konstant z bezsensorového řízení. Testování navíc dokázalo, že ideální nastavení konstant pro sensorové i bezsensorové řízení je rozdílné. Pro plynulé řízení a dosažení největšího výkonu nebyly původně použité hodnoty sensorového řízení nejvhodnější. Stejně tak i použití bezsensorových hodnot není optimální, protože reakce na změny je často až příliš dlouhá. Experimentálně bylo zjištěno, že optimální nastavení hodnot pro sensorové i bezsensorové řízení se pohybuje mezi hodnotami uvedenými v Tab. 8: a záleží zejména na požadavcích zákazníka.

Srovnání názorně ukazuje výsledek rozdílného způsobu řízení rychlosti. Sensorové řízení určuje komutační sekvenci z externího signálu Hallových sensorů, které mají nízkou frekvenci 200 Hz při rychlosti 1 000 rpm. Kvůli nedostatečné frekvenci snímání Hallových sensorů se poté rychlost pohybuje ± 30 rpm. Zatímco bezsensorové řízení pro výpočet rychlosti používá počet provedených komutací, které algoritmus sám řídí pomocí BEMF. Díky tomu dosahuje bezsensorové řízení přesnějšího snímání rychlosti než sensorové řízení. Pro většinu aplikací je snímání rychlosti otáčení s touto přesností přijatelné. Vztahy popisující rozdílné chování sensorové a bezsensorové aplikace byly popsány v kapitole 3.3.1.

Výsledky ukazují, že se motory řízené sensorově, mohou použít při nižší rychlosti. Navíc při srovnání našich dvou aplikací, sensorové řízení je schopné řídit motor při vyšší zátěži. Nezávisle na konstantách, které byly experimentálně měněny, srovnání dokazuje, že sensorové řízení je vhodnější do aplikací, které jsou vystavovány častým změnám rychlosti a zátěže. Bezsensorové řízení se vhodně používá v jednoduchých aplikacích, které nekladou požadavky na častou změnu rychlosti a zátěže. Tuto skutečnost dokazují také průběhy testování, kde bezsensorové řízení nereagovalo s takovou rychlostí než řízení sensorové.

Bezsensorové řízení se navíc upřednostňuje pro motory menších výkonů. U těchto aplikací většinou nedochází k prudkým zatížením motorů nebo rychlé změně rychlosti. Většinou je motor řízen konstantní rychlostí jedním směrem a nebo druhým směrem. Bezsensorové řízení poté dává smysl pro velké série, kdy ušetření za Hallovy senzory na každém motoru může částečně zaplatit vysokou cenu vývoje.

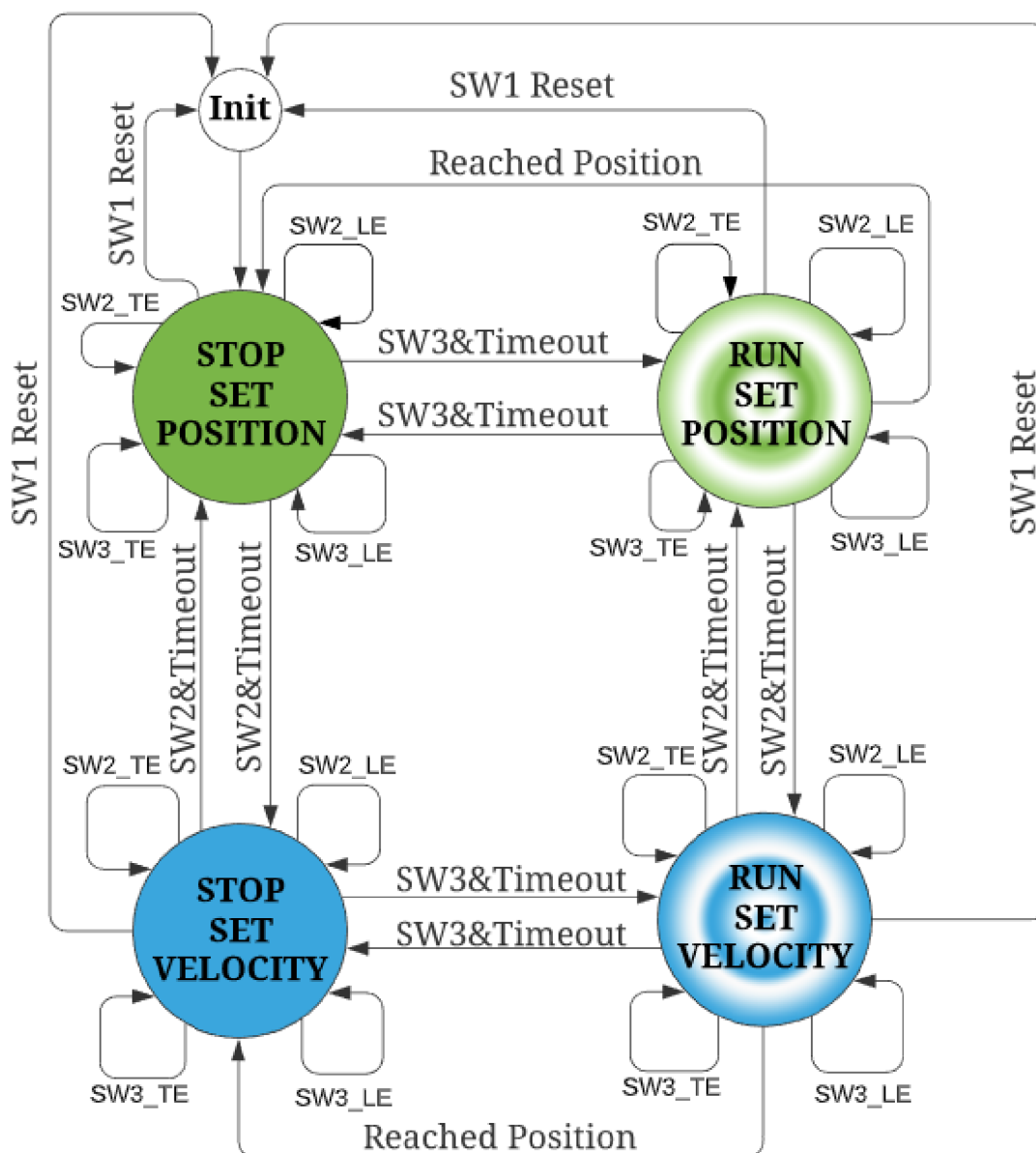
Sensorové řízení bude preferováno pro aplikace, které používají velké elektrické motory a nebývají vyráběné v tak velkých sériích jako aplikace s menšími motory. Navíc velké elektrické motory bývají více zatěžovány. Vyššího kroutícího momentu se u menších

motorů dosahuje pomocí velkého mechanického převodu. Díky tomu nejsou tolik zatěžované jako velké elektrické motory. Sensorové řízení, proto bude v těchto aplikacích preferováno, protože případné vyšší náklady na vývoj řídicího firmwaru by se nevyplatily.

3.5 Úprava SDK příkladu bezsensorového řízení

Vzhledem k tomu, že poskytnuté programy od firmy NXP již obsahovaly proudový a rychlostní regulátor. V minulé kapitole byl tedy implementován pouze polohový regulátor, jehož fungování demonstroval Obr. 34: . V průběhu práce byl tedy do zadání od firmy Honeywell přidán stavový automat, který pomocí dvou spínačů SW2 a SW3 umí nastavovat rychlost a polohu.

Stavový automat na Obr. 37: obsahuje pět stavů. Uživatel pozná dle barvy LED na desce, ve kterém stavu se právě nachází. Do inicializačního stavu je možné se dostat pouze při první inicializaci programu případně pomocí tlačítka SW1, které slouží jako reset. Krátké stisknutí tlačítka SW2 znamená vždy inkrementování nastavované hodnoty. Dlouhé stlačení tlačítka SW2 slouží k přesouvání mezi nastavováním rychlosti a pozice. Krátké stisknutí tlačítka SW3 vždy snižuje právě nastavovanou hodnotu a podržení přepíná mezi stavy STOP a RUN. Pokud motor udělá požadovaný počet otáček, vrátí se zpátky do STOP pozice.



Obr. 37: Stavový automat na ovládání pozice a rychlosti.

V inicializačním stavu dochází k automatickému přechodu do stavu „stop set position“. V tomto stavu je nastavován požadovaný počet otáček v krocích po 50 otáčkách. Pro spuštění motoru je ještě nutné se přepnout do stavu „stop set velocity“ pomocí podržení SW2. V tomto stavu je nastavována požadovaná rychlost v krocích po 50 rpm. Zbývající dva stavy znamenají rozjezd motoru. V těchto stavech je možné dále modifikovat požadovanou rychlost anebo požadovaný počet otáček po stejných krocích.

Implementace stavového automatu

Projekt stavového automatu je přiložen k práci. Jedná se o rozšíření původního programu pro bezsenzorové řízení od firmy NXP. Původní program používal pouze SW1 a SW2. Zelenou a červenou LED. Bylo tedy nutné nadefinovat SW3 a modrou LED. Dále byl vytvořen vlastní časovač nazvaný „TimeBase“, jehož funkce byla ověřena externě na osciloskopu. Pro ověření časovače byl využit nepoužívaný port PTE16. Výstup na tomto portu zobrazuje `bool_t DEBUG_PIN`, jenž je použit v projektu.

Stavový automat se nachází v projektu pod názvem *SetPointStateMachine.c.*, kde je i popsána původní myšlenka, jak by měl stavový automat fungovat. Původní zpracování bylo navrženo softwarovým inženýrem firmy Honeywell. Požadavky na ovládání byly následně upravovány až do finální podoby, která byla zobrazena na Obr. 37: .

4 SPOLUPRÁCE S NXP SEMICONDUCTORS

Při sestavování zadání této diplomové práce byla jako dodavatel vybrána firma NXP Semiconductors, (dále pouze NXP), která nabízí hardwarové i softwarové řešení pro řízení BLDC motorů. Výběr hardwaru byl následně konzultován s odborníky z pobočky firmy NXP v Rožnově pod Radhoštěm. Firma NXP poskytla příslušný hardware k této diplomové práci a to zcela zdarma. Doba dodání celého kitu trvala 5 týdnů. Obchodní zástupce firmy NXP přijel osobně do firmy Honeywell a chybějící můstek předal. Ostatní komponenty jakožto motor a řídicí deska byly obdrženy v průběhu 1 týdne.

Následná komunikace byla vedena výhradně s obchodním zástupcem firmy NXP. V průběhu psaní diplomové práce proběhla telefonní konference, ve které byly probrány požadavky ze strany firmy Honeywell pro tuto diplomovou práci a zároveň i pro možnou budoucí spolupráci s firmou NXP. Firma NXP nabídla poskytnutí sensorové aplikace pro řízení BLDC motoru, jenž dodala v rámci jednoho měsíce. Dále provedla krátké zaškolení k SW FreeMASTER.

Tato práce dokazuje, že firma NXP poskytuje kompletní řešení od kvalitního hardwaru až po promyšlené SW aplikace. Bohužel, softwarové aplikace nejsou příliš intuitivní a chybí k nim detailnější dokumentace. Na druhou stranu firma NXP pořádá semináře, kde ukazuje práci s těmito SW a také implementaci pro jednotlivá řešení. Velkou výhodou jsou zdarma dostupné příklady fungujících aplikací v MCUXpresso IDE. Další výhodou práce s NXP produkty je SW FreeMASTER, jenž umožňuje vlastní konfiguraci pro používaný motor přímo v jeho aplikaci. Díky tomu je docíleno snadného porovnání vlastností dvou rozdílných motorů při použití stejného algoritmu řízení. Umožňuje dále řízení rychlosti a sledování proudu, napětí, střídý signálu apod. Ve firmě Honeywell by mohl být FreeMASTER využíván k testování motorů od různých výrobců. Zejména pro bezsensorové řízení a případně také jako kontrola prototypů. Zavedení tohoto SW by urychlilo prvotní testování.

V průběhu práce poskytli odborníci z firmy NXP mnoho cenných rad a doporučení. Vzhledem k tomu, že s firmou Honeywell nebyla podepsána žádná smlouva o podpoře pro tuto diplomovou práci, tak je pochopitelné, že jejich odpovědi nebyly tak promptní, jak by u vývoje firmwaru pro aktuátory bylo požadováno. Tento problém by byl vyřešen uzavřením smlouvy o spolupráci a podpoře. Na druhou stranu doba doručení celé sestavy, jež byla konzultována s firmou NXP, byla nepříjemně dlouhá a několikrát odkládána. Pobočka NXP v Rožnově pod Radhoštěm se specializuje právě na podporu vývoje aplikací pro řízení stejnosměrných motorů. Tato podpora by mohla urychlit stávající vývoj nových firmwarů v řádech týdnů.

ZÁVĚR

Rešeršní část této diplomové práce se věnovala uvedení do problematiky řízení stejnosměrných motorů. Dílčím cílem bylo popsat základní problémy a pojmy na takové úrovni, aby i laik byl schopný pochopit, jakým způsobem funguje BLDC motor.

Praktická část byla věnována srovnání sensorového a bezsensorového řízení BLDC motoru. Seznámení s použitým hardwarem a také softwarem od firmy NXP Semiconductors. Následně bylo zkoumáno chování sensorového a bezsensorového řízení při různých podmínkách. Typy testů byly vybrány po konzultaci s odborníky firmy Honeywell, spol. s r. o., tak aby co nejvíce odpovídaly reálným požadavkům, které jsou kladeny na jejich pohony. Firma NXP Semiconductors poskytla funkční sensorovou a bezsensorovou aplikaci pro zvolený procesor. Tyto aplikace byly upraveny tak, aby bylo možné provést požadované testování.

Výsledky testování v kapitole (3.3) ukázaly, že pro obě aplikace, je rozdílné optimální nastavení konstant u regulátorů. Navíc optimální nastavení konstant záleží také na typu zatížení. Algoritmus sensorového řízení je vhodné použít pro dynamické systémy, kde požadujeme okamžitou reakci na náhlou změnu a také ve složitějších aplikacích. Bezsensorové řízení by mělo být upřednostněno u motoru menších výkonů s požadavkem na jednoduché řízení. Bezsensorové řízení se v této práci vyznačovalo zejména přesnějším snímáním rychlosti. U sensorového řízení se snímaná rychlost pohybovala ± 30 rpm při požadavku na rychlost otáčení 1 000 rpm. Vysvětlení tohoto rozdílu a srovnání principu fungování obou aplikací je popsáno v kapitole 3.3.1.

Využití BLDC motorů má s klesající cenou hardwaru stále větší využití. V dnešní době se malé BLDC motorky nachází všude okolo nás. Problematika řízení BLDC motorů vyžaduje pochopení základních principů fungování stejnosměrných elektrických motorů a elektrických součástek, nastudování technických specifikací a následné zpracování v integrovaném vývojovém prostředí.

Ze závěrů práce vyplývá, že firmě Honeywell, spol. s r. o. lze doporučit obrátit se na pobočku firmy NXP Semiconductors v Rožnově pod Radhoštěm v případě vývoje aplikace pro BLDC motory. Výzkum a vývoj rodiny aktuátorů ve firmě Honeywell trvá několik let, proto je vhodné se zamyslet nad možností zadání celého vývoje softwarového řešení externí firmě. Vzhledem k jejich specializaci na tuto oblast se dá předpokládat, že realizace projektu bude rychlejší, a to v řádech měsíců.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SKALICKÝ, J.: Elektrické servopohony. Skriptum, VUT, Brno, 2001.
- [2] PAVELKA, J.: Elektrické pohony. Skriptum, ČVUT, Praha, 1996.
- [3] *Brushless Motors*. Nidec Corporation [online]. ©2019 [cit. 2019-12-13]. Dostupné z: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless/>
- [4] HENDERSHOT, James R. Brushless DC motor phase poles slot configurations [online]. Ohio: Magna Physics Corporation, 3. 8. 2010, 1 - 17 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: http://www.jimhendshot.com/Jim_Hendshot/Articles_files/brushlessdcmotorphasepoleslotconfigurations.pdf
- [5] RAVI. Introduction to Brushless DC Motors (BLDC Motor). Electronics hub [online]. 27. 9. 2019 [cit. 2020-01-06]. Dostupné z: <https://www.electronicshub.org/brushless-dc-motor-bldc-motor/>
- [6] KREJČÍ, Ondřej. ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRO BLDC MOTOR. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT BRNO. Vedoucí práce Ing. PETR PROCHÁZKA, Ph.D.
- [7] ZÜRCHER, Franz, Thomas NUSSBAUMER a Johann W. KOLAR. Motor Torque and Magnetic Levitation Force Generation in Bearingless Brushless Multipole Motors. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2012, 17(6), 1088-1097. DOI: 10.1109/TMECH.2011.2159511. ISSN 1083-4435. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5942172/>
- [8] NAVE, R. Torque Variation in DC Motor [online]. ©2020 [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/motdct.html>
- [9] MOZAFFARI NIAPOUR, S.A.KH., S. DANYALI, M.B.B. SHARIFIAN a M.R. FEYZI. Brushless DC motor drives supplied by PV power system based on Z-source inverter and FL-IC MPPT controller. In: Energy Conversion and Management [online]. 2011, s. 3043-3059 [cit. 2020-01-06]. ISSN 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.04.016. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890411001464>
- [10] BALDURSSON, Stefán. BLDC Motor Modelling and Control. Göteborg, 2005. Diplomová práce. CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA. Vedoucí práce Torbjörn Thiringer.
- [11] YEDAMALE, Padmaraja. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. 2003 [cit. 2020-01-07]. DS00885A. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
- [12] CHOLASTA, Petr. 3-Phase BLDC Hall Sensor Application Using S12ZVM: Based on the MTRCKTSBNZVM128 Development Kit [online]. 2013 [cit. 2020-02-05]. Dostupné z: http://cache.freescale.com/files/microcontrollers/doc/app_note/AN4718.pdf
- [13] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu [online]. 2011, 10/2011, 13-14 [cit. 2020-01-08]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44507.pdf>
- [14] FORCE, M., FREEDOM BLDC MOTOR DRIVER SHIELD. In: . 2015. Dostupné také z: https://static5.arrow.com/pdfs/2016/4/28/10/30/22/489/phi_/manual/59frdm-mc-lvbldc-sch.pdf

- [15] ČERNÝ, Jan. MIKROKONTROLÉREM ŘÍZENÝ REGULÁTOR TŘÍFÁZOVÉHO BLDC. Praha, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [16] TICHÝ, Milan. Princip funkce unipolárního tranzistoru [online]. 1998 [cit. 2020-01-16]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/elektronika/kap2/2_3_2.html
- [17] COLLINS, Daniel. What is current decay (aka recirculating current) in a stepper drive? [online]. In: . 2018 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/what-is-current-decay-in-a-stepper-drive/>
- [18] ZUO, Wilson. The art of stopping a motor [online]. In: . 2013 [cit. 2020-01-10]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/archive/2013/10/18/the-art-of-stopping-a-motor
- [19] LIPČÁK, Ondřej. ŘÍZENÍ OTACEK BLDC MOTORU POMOCI KITU ARDUINO. Praha, 2016. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [20] DAVIS, Nick. The Difference Between Slow Decay Mode and Fast Decay Mode in H-Bridge DC Motor Applications [online]. 10. 8. 2017 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/difference-slow-decay-mode-fast-decay-mode-h-bridge-dc-motor-applications/>
- [21] Křivánek, František. Osobní sdělení FW Design Engineer (Honeywell HTS s r. o v Brně, Tuřanka 100, Brno) dne 21. února 2020.
- [22] OTRUBA, Jiří. Implementace řízení BLDC motoru. Plzeň, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ.
- [23] VOJÁČEK, Antonín. Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu [online]. [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-řízení-pohonu-a-pohybu.html>
- [24] KUCHAR, Martin. Výzkum a vývoj moderních metod řízení v oblasti elektrických regulovaných pohonů [online]. In: . ©2020 [cit. 2020-02-21]. SP2019/113. Dostupné z: <https://www.fe.i.vsb.cz/430/cs/veda-a-vyzkum/projekty/?fromPage=%2F430%2Fcs%2Fveda-a-vyzkum%2Fprojekty%2Findex.html&projectDetailId=44967>
- [25] HUBÍK, Vladimír, István SZABÓ a Martin ŠVÉDA. ANALÝZA BEZSENZOROVÉHO ŘÍZENÍ BLDC MOTORŮ V LETECKÝCH APLIKACÍCH [online]. 2008 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB07/prispevky/hubik_sveda/hubik_sveda.pdf
- [26] MISÁK, Daniel. Řízení malých synchronních motorů. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Petr Prouza.
- [27] GUAN-REN, Chen. Position and Speed Estimation of Permanent Magnet Machine Sensorless Drive at High Speed Using an Improved Phase-Locked Loop. Energies [online]. 2017, 2017, 1-17 [cit. 2020-03-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/10/1571/pdf>
- [28] FRDM-MC-LVMTR: Low-Voltage, 3-Phase Motor for FRDM platform: NXP Semiconductors [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/design/development-boards/freedom-development-boards/mcu-boards/low-voltage-3-phase-motor-for-frdm-platform:FRDM-MC-LVMTR>

- [29] MKV11Z128VLF7 - ARM MCU, Kinetis V Family KV1x Series Microcontrollers, ARM Cortex-M0+, 32bitů, 75 MHz, 128 KB [online]. ©2020 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://cz.farnell.com/nxp/mkv11z128vlf7/mcu-arm-cortex-m0-75mhz-lqfp-48/dp/2890231>
- [30] DUBOVSKÝ, Tomáš. : Framework pro automatizované testování MCUXpresso Config Tools. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce Adam Crha.
- [31] RTCESL: Real Time Control Embedded Software Motor Control and Power Conversion Libraries [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/products/processors-and-microcontrollers/arm-microcontrollers/general-purpose-mcus/kv-series-cortex-m4-m0-plus-m7/real-time-control-embedded-software-motor-control-and-power-conversion-libraries:RTCESL>
- [32] GFLIB User's Guide [online]. In: . 2016 [cit. 2020-04-16]. CM7GFLIBUG. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/CM7GFLIBUG.pdf>
- [33] KOZUBÍK, Michal. METODY ANTI-WINDUP PŘI ŘÍZENÍ LINEÁRNÍCH DYNAMICKÝCH SYSTÉMŮ. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [34] GFLIB User's Guide [online]. In: . 2016 [cit. 2020-04-16]. CM4GFLIBUG. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/CM4GFLIBUG.pdf>
- [35] MC TEAMS / ROZNOV CSC. Application Description: FreeMaster Motor Control Application Tuning Tool [online]. In: . NXP Semiconductors [cit. 2020-05-19]. Dostupné z: www.nxp.com/motorcontrol_bldc
- [36] MAGTROL. HYSTERESIS BRAKES/MATCHED HYSTERESIS BRAKES: HB/MHB SERIES [online]. In: . ©2018 [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/hb-mhb.pdf>
- [37] GAMAZO-REAL, José Carlos, Ernesto VÁZQUEZ-SÁNCHEZ a Jaime GÓMEZ-GIL. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends [online]. In: . 2010 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: <http://europepmc.org/article/PMC/3231115>

SEZNAM ZKRATEK

AC – Alternative Current

AD (ADC) – Analog Digital Converter

DC – Direct Current

BLDC – Brushless Direct Current Motor

ECM – Ellectronically Commutated Motors

HVAC – Heating Ventilation Air Conditioning

BEMF – Back ElectroMotive Force

PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor

phA,B,C – Phase A, B, C Obr. 12:

PWM – Pulse Width Modulation

SW1,2,3 – Switch

MOSFET – Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

RTCESL – Real Time Control Embedded Software Motor Control and Power Conversion Libraries

SEZNAM SYMBOLŮ

- F_m – Elektromagnetická síla [N]
 B – Magnetická indukce [T]
 I – Velikost protékajícího proudu vodičem [A]
 l – Délka vodiče [m]
 β – Úhel vodiče a indukčních čar [°]
 M_k – Moment síly [Nm]
 w – Vzdálenost vodiče [m],
 $u_{a,b,c}$ – Fázové napětí, index značí fázi [V]
 $i_{a,b,c}$ – Fázový proud, index značí fázi [A]
 R – Odpor fáze [Ω]
 L – Indukčnost fáze [H]
 $e_{a,b,c}$ – Indukované napětí na statorovém vinutí [V]
 T_e – Elektrický moment na motoru [Nm]
 T_L – Výstupní moment na hřídeli [Nm]
 J – Setrvačnost motoru
 ψ_S – Celkový magnetický tok [Wb]
 ψ_{PM} – Spřažený magnetický tok [Wb]
 T – Vzorkovací čas [s]
 θ_{err} – Teoretický výpočet úhlu natočení rotoru [°]
 k_f – Tření motoru
 ω_m – Úhlová rychlost [rad·s⁻¹]
 k_e – BEMF konstanta
 k_t – Momentová konstanta
 θ_e – Úhel natočení rotoru [°]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Strukturní schéma elektrického pohonu.....	16
Obr. 2:	Vnitřní uložení rotoru vůči statoru.....	19
Obr. 3:	Vnější uložení rotoru vůči statoru.....	19
Obr. 4:	Průběh zpětného elektromotorického napětí.....	20
Obr. 5:	Vnější konstrukce BLDC motoru se zapojením do hvězdy.....	21
Obr. 6:	Rozložení sil mezi rotorem a státorem motoru.....	22
Obr. 7:	Vznik elektromagnetické síly.....	23
Obr. 8:	Model BLDC motoru.....	24
Obr. 9:	Momentová charakteristika BLDC motoru v závislosti na rychlosti.....	25
Obr. 10:	Zobrazení průběhu 1 mechanického cyklu.....	26
Obr. 11:	Spínání fází statoru odpovídající jednotlivým sekvencím na obr. 10.....	27
Obr. 12:	Vektory sekvencí pro řízení motoru odpovídající obr. 10 a obr. 11.....	27
Obr. 13:	Schéma řídicí jednotky a zapojení napěťového střídače.....	28
Obr. 14:	Typická struktura MOSFET tranzistoru.....	29
Obr. 15:	Nabíjení a vybíjení jednotlivých statorových cívek.....	30
Obr. 16:	Hallův senzor s otevřeným kolektorem.....	32
Obr. 17:	Princip rotačního optického enkodéru.....	33
Obr. 18:	Rozběh motoru – první část.....	35
Obr. 19:	Proudová rampa.....	35
Obr. 20:	Přechod pomocí Clarkovy transformace z 3fáz. do 2fáz. systému.....	38
Obr. 21:	Přechod mezi soustavami pomocí Parkovy transformace.....	39
Obr. 22:	FRDM-MC-LVBLDC sestava od firmy NXP.....	40

Obr. 23:	MCUXpresso Config Tools od firmy NXP.....	42
Obr. 24:	Rozhraní pro načtení jednotlivých příkladů.	44
Obr. 25:	Regulace rychlostní rampy.	47
Obr. 26:	Schéma bezsenzorového řízení BLDC motoru v příkladě mc_bldc.	48
Obr. 27:	Schéma upraveného senzorového řízení BLDC motoru.	48
Obr. 28:	Rozdílná velikost BEMF pro různé rychlosti.	51
Obr. 29:	Momentová charakteristika hysterezní brzdy.....	53
Obr. 30:	Zapojení motoru, hysterezní brzdy a mechanického počítadla.	53
Obr. 31:	Průběh napětí na hysterezní brzdě.	55
Obr. 32:	Bezsenzorové měření při spojité změně zátěže.	56
Obr. 33:	Senzorové měření při skokové změně otáček.	58
Obr. 34:	Regulace otáček pro bezsenzorové řízení těsně před dojezdem.	59
Obr. 35:	Měření regulátoru otáček. Dojezd s přesností 0,1 otáček.....	60
Obr. 36:	Senzorová aplikace při použití konstant z bezsenzorového řízení.	62
Obr. 37:	Stavový automat na ovládání pozice a rychlosti.	65

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Základní rozdělení elektrických motorů.	17
Tab. 2:	Srovnání kódování	34
Tab. 3:	Vlastnosti BLDC motoru Linix 45ZWN24-40.	41
Tab. 4:	Informace o použitém mikrokontroléru – MKV11Z128VLF7.....	41
Tab. 5:	Hradlo XOR	49
Tab. 6:	Srovnání sensorového a bezsensorového řízení při skokové změně zátěže.	54
Tab. 7:	Srovnání sensorového a bezsensorového řízení při spojitě změně zátěže.	57
Tab. 8:	Nastavené hodnoty konstant v PI regulátorech od firmy NXP.....	61

SEZNAM PŘÍLOH

Výsledky_testování.xlsx

HALL_SENSORED_FINAL.zip

STAVOVY_AUTOMAT_FINAL.zip