



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODELOVÁNÍ BEZSENZOROVÉHO ŘÍZENÍ BLDC MOTORU

MODELING OF SENSORLESS BLDC MOTOR CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Reindl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2024



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jakub Reindl

ID: 240424

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Modelování bezsenzorového řízení BLDC motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudovat základní algoritmy bezsenzorového řízení BLDC.
2. V programu Matlab/Simulink vytvořit model BLDC pohonu.
3. Vybrané algoritmy nasimulovat v Programu MATLAB/Simulink.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Kundur, P. Power System Stability and Control. New York, NY: McGraw Hill, 1993.
- [2] Anderson, P. M. Analysis of Faulted Power Systems. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 1995.
- [3] Mellor, P.H., R. Wrobel, and D. Holliday. "A computationally efficient iron loss model for brushless AC machines that caters for rated flux and field weakened operation." IEEE Electric Machines and Drives Conference. May 2009.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce je zaměřená na vytvoření literární rešerše základních způsobů řízení, vytvoření modelu BLDC pohonu a simulace vybraných algoritmů bezkomutátorového stejnosměrného motoru. Z počátku je krátce popsána konstrukce EC motoru, poté jsou popsány jeho základní části a principy elektronické komutace. Práce se zabývá zejména metodami bezsensorového řízení EC motoru. V další části je popsán vytvořený model BLDC pohonu v Simulinku a v poslední části jsou nasimulovány tři vybrané algoritmy řízení BLDC motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

BLDC, EC motor, bezkartáčový stejnosměrný motor, elektronicky komutovaný motor, sensorové řízení, bezsensorové řízení, Simulink BLDC model, Simulink

ABSTRACT

The thesis is focused on the creation of a literature search of basic control methods, creation of a model of a BLDC drive and simulation of selected algorithms of a commutatorless DC motor. At the beginning, the construction of the EC motor is briefly described, then its basic parts and principles of electronic commutation are described. The work mainly deals with methods of sensorless EC motor control. In the next part, the created BLDC drive model in Simulink is described, and in the last part, three selected BLDC motor control algorithms are simulated.

KEYWORDS

BLDC, EC motor, brushless direct current motor, electronically commutated motor, sensed control, sensorless control, Simulink BLDC model, Simulink

REINDL, Jakub. *Modelování bezsenzorového řízení BLDC motoru*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jakub Reindl
VUT ID autora: 240424
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Modelování bezsenzorového řízení BLDC motoru

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

* Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Ivo Pazderovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	12
1 Úvod do elektromotorů	13
1.1 Základní části elektromotorů	13
2 BLDC motory	15
2.1 Rozdíl mezi BLDC a PMSM	16
2.2 Stator BLDC motoru	16
2.3 Rotor BLDC motoru	16
3 Elektronická komutace BLDC motoru	18
4 Způsoby řízení BLDC motoru	20
4.1 Otevřená regulační smyčka	20
4.2 Uzavřená regulační smyčka	20
4.3 Senzorové řízení BLDC motoru	21
4.3.1 Hallovy sondy	21
4.3.2 Resolvery	23
4.3.3 Optické enkodéry	24
4.3.4 Indukční senzory	25
4.4 Bezsenzorové řízení BLDC motoru	26
4.4.1 Přímá detekce průchodu nulou	27
4.4.2 Integrační metoda	29
4.4.3 Metoda třetí harmonické	30
4.4.4 Freewheeling diode metoda	31
4.5 Metody spouštění BLDC motoru	31
4.5.1 Vyrovnání (Align and Go)	32
4.5.2 Detekce počáteční polohy (IPD)	32
5 Model BLDC pohonu v programu	
MATLAB/Simulink	34
5.1 Model BLDC pohonu	34
5.2 Prostředí Simulink	35
5.3 Detekce průchodů nulou	35
5.4 Rozběh BLDC motoru	36
5.5 Realizace PWM	38
5.5.1 Bipolární PWM	39
5.5.2 Unipolární PWM	40

5.5.3	Regulátor proudu a otáček	41
5.5.4	Logika spínání tranzistorů třífázového měniče	43
6	Vybrané bezsenzorové algoritmy řízení BLDC motoru	45
6.0.1	Řízení BLDC přímou detekcí průchodu nulou	45
6.0.2	Integrační metoda řízení BLDC motoru	47
6.0.3	Řízení BLDC motoru metodou třetí harmonické	49
	Závěr	51
	Literatura	52
	Seznam symbolů a zkratk	56
	Obsah elektronické přílohy	57

Seznam obrázků

1.1	Struktura točivých elektrických strojů[1]	13
2.1	Třífázový EC motor a) s feritovými magnety b) s neodimovými magnety	15
2.2	Způsoby uložení magnetů v rotoru [7]	17
3.1	Průběh proudů jednotlivých fází v závislosti na poloze rotoru [10]	18
3.2	Schéma zapojení ESC [7]	19
3.3	Modelářský regulátor rychlosti pro bezsensorové motory	19
4.1	Lichoběžníkový průběh BEMF jednotlivých vinutí [5]	21
4.2	Hallové sondy [15]	21
4.3	Umístění hallových sond [3]	22
4.4	Průběhy z hallových snímačů a průběh fázového proudu (zelený)	23
4.5	Schéma resolveru [16]	23
4.6	Schéma resolveru [16]	24
4.7	Indukční snímač polohy [18]	25
4.8	Detekce průchodu nulou a BEMF motoru BLDC [19]	27
4.9	Blokové schéma bezsensorového řízení BLDC [7]	28
4.10	Diagram bezsensorového řízení BLDC [19]	28
4.11	metoda integrace BEMF při různých rychlostech [22]	29
4.12	Třetí harmonická složka indukovaného napětí EC motoru [23]	30
4.13	Vytvořené komutační signály na základě třetí harmonické [23]	30
4.14	Šest pulzů detekce počáteční polohy a průběh proudu[25]	33
5.1	Kompletní model BLDC pohonu v programu MATLAB/Simulink	34
5.2	Zapojení bloku měření napětí	35
5.3	indukované napětí a) před vzorkováním b) navzorkované	36
5.4	Vzorkování indukovaného napětí	36
5.5	Rozběh BLDC motoru v otevřené regulační smyčce	37
5.6	Průběh rozběhu BLDC motoru	38
5.7	Šest signálů pro spínání tranzistorů s bipolárním PWM	39
5.8	Průběh indukovaného napětí a proudu s bipolárním PWM	40
5.9	Šest signálů pro spínání tranzistorů s unipolárním PWM	40
5.10	Průběh indukovaného napětí a proudu s unipolárním PWM	41
5.11	Regulátor proudu a otáček	42
5.12	Blok regulátoru proudu a otáček	42
5.13	Blok <i>vzorkování proudu a ω</i>	43
5.14	Blok <i>spínání tranzistorů</i>	43
5.15	Blok <i>3f měnič</i>	44
5.16	Průběhy šesti signálů pro spínání třífázového měniče	44
6.1	Bloky vybraných bezsensorových algoritmů řízení BLDC motoru	45

6.2	Blok <i>Přímá detekce</i>	45
6.3	Blok <i>30° delay</i>	46
6.4	Průběh indukovaného napětí, virtual hall signálů a ZCD	46
6.5	Blok <i>Integrační m.</i>	47
6.6	Blok <i>Hall</i> z integrační metody	47
6.7	Průběh indukovaného napětí, virtual hall, integrace a bodů kdy integrace dosáhla definované hodnoty	48
6.8	Průběhy při 2000 ot/min a 500 ot/min	48
6.9	Blok <i>3. harm</i>	49
6.10	Blok <i>Hall</i> z metody třetí harmonické	49
6.11	Průběh indukovaného napětí, třetí harmonické a virtual hall signálů jedné fáze	50
6.12	Průběh indukovaného napětí, třetí harmonické	50

Seznam tabulek

5.1	Logická tabulka spínání třífázového měniče	44
-----	--	----

Úvod

Bezkomutátorové stejnosměrné motory se stávají v poslední době stále používanější, protože rozšířením mikroprocesorů již není potřeba nákladné řídicí elektroniky a EC motory se tak stávají dostupnější pro nejrůznější aplikace a využívají se v široké škále aplikací od průmyslu po domácí spotřebiče. Bezkomutátorové stejnosměrné motory představují moderní alternativu pro běžné stejnosměrné elektromotory s komutátorem ale i pro střídavé elektromotory, protože oproti běžným motorům nabízejí řadu přínosů, hlavními výhodami jsou účinnost, malá hmotnost, možnost vysokých otáček a lineární momentová charakteristika. Jsou to synchronní stroje s permanentními magnety, které v dnešní době dosahují vysokého poměru momentu k hmotnosti díky permanentním magnetům ze vzácných zemin, ty ale zase zvyšují cenu těchto motorů.

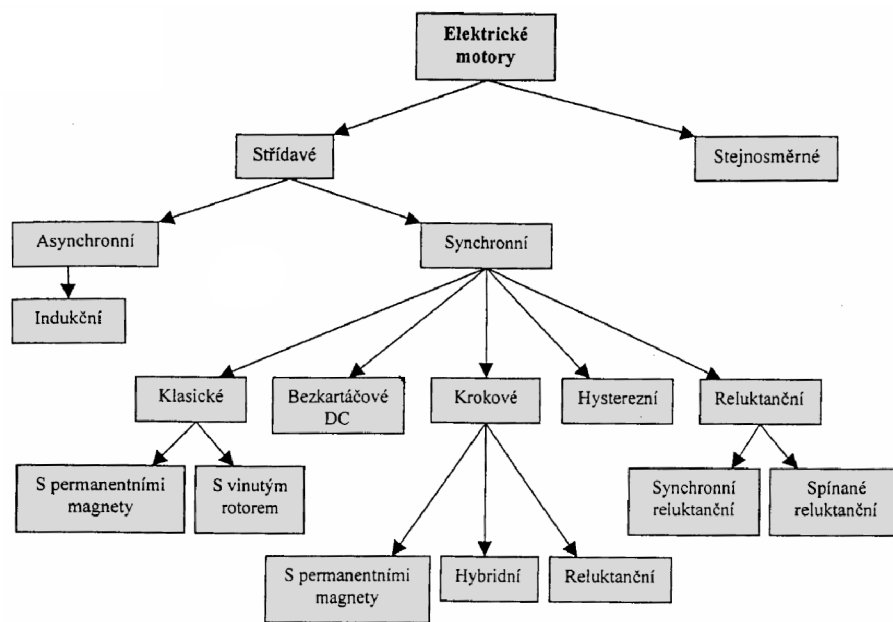
Tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře BLDC motoru je obdélníkový a pro jeho napájení tedy stačí napájet vždy jen dvě ze tří fází, třetí fázi můžeme měřit indukované napětí, které se využívá pro bezsenzorové řízení. U bezkomutátorového stejnosměrného motoru lze tedy rozlišit šest stavů napájení a díky tomu lze snímat polohu rotoru v pouze šesti stavech, například pomocí tří hallových sond nebo bezsenzorového řízení.

Pro řízení BLDC motoru se využívá senzorová a bezsenzorová řízení. Bezsenzorové řízení, které nepoužívá žádné snímací senzory na motoru pro snímání polohy rotoru, využívá zpětně generovaný signál, který se zpracovává a vyhodnocuje v řídicí elektronice. Bezsenzorové řízení může být složitější oproti senzorovému řízení, jelikož například pro rozběh motoru jsou potřebné další algoritmy, ale přinášejí výhody jako je například větší spolehlivost.

Cílem této práce bylo shromáždit odborné publikace týkající se řízení bezkomutátorových stejnosměrných elektromotorů a provést průzkum dostupné odborné literatury a vědeckých databází, tedy vytvořit přehled o metodách řízení BLDC motorů. Dalším krokem bylo důkladně prostudovat problematiku řízení bezkomutátorových stejnosměrných elektromotorů. Dále také vytvořit model BLDC pohonu v programu MATLAB/Simulink. Následně simulovat vybrané algoritmy řízení bezkomutátorového stejnosměrného motoru v tomto prostředí.

1 Úvod do elektromotorů

Elektrický motor je zařízení, které přeměňuje elektrickou energii na mechanickou energii pro vytváření točivého momentu na hřídeli motoru. Základní principy tvorby točivého momentu elektromotoru jsou dva a je to vzájemné působení magnetických polí rotoru a statoru a tvorba točivého momentu díky rozdílnému magnetickému odporu v různých osách rotoru. Základní rozdělení elektromotorů je podle napájecího napětí na střídavé a stejnosměrné motory, které můžeme dále dělit tak, jak je uvedeno na obr. 1.1



Obr. 1.1: Struktura točivých elektrických strojů[1]

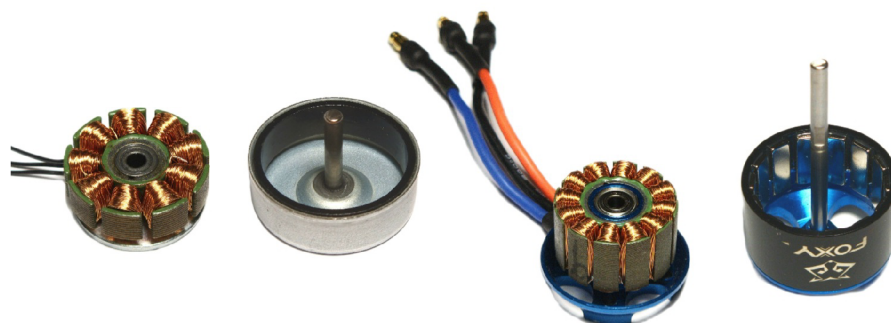
1.1 Základní části elektromotorů

K základní částem elektrických motorů patří magnetický obvod, rotorové a statorové vinutí, hřídel a její uložení, kryt a kontakty pro připojení k elektrickému proudu. Díky magnetickému obvodu a vinutí se přeměňuje elektrická energie na mechanickou a volba materiálu magnetického obvodu je důležitá z hlediska jakým proudem napájíme elektromotor, jakých mechanických vlastností chceme dosáhnout, minimalizace ztrát. Pro střídavé elektrické motory se většinou používají svazky vzájemně izolovaných plechů s přísadou křemíku. Vinutí motoru je rotorové a statorové. Rotorové vinutí může být tvořeno tlakovým litím - klecí na krátko, které se využívá u asynchronních motorů nebo cívkami z měděného drátu, které se vykládá do izolovaných

drážek rotoru nebo statoru. Rotorové nebo statorové vinutí je u některých elektrických motorů nahrazeno permanentními magnety, například stejnosměrný motor buzený permanentními magnety nemá statorové vinutí, ale budící magnetický tok je vytvářen permanentními magnety, a na proti tomu BLDC motory, které to mají naopak, mají nahrazené rotorové vinutí permanentními magnety a to jim umožňuje zjednodušit jejich konstrukci. [2]

2 BLDC motory

BLDC motor můžeme najít pod různým označením. Jsou to většinou zkratky vycházející z anglických termínů, nejčastější jsou označení EC motor jako *Electronically Comutated* nebo BLDC motor z anglického termínu *BrushLess DC* motor. Používají se i další označení jako například BL motor nebo ECM [3]. Označení EC motor se používá častěji pro zařízení s menším výkonem, třeba ventilátory nebo kompresory a aplikace pro vytápění, větrání a klimatizace a mají elektroniku integrovanou do těla motoru, označení BLDC motor se používá spíše pro výkonnější aplikace, a také mají většinou elektroniku oddělenou od motoru, obecně lze ale říci, že není přesně dáno jaké označení je to správné [4].



Obr. 2.1: Třífázový EC motor a) s feritovými magnety b) s neodimovými magnety

V minulosti byl stejnosměrný pohon realizován hlavně pomocí komutátorových stejnosměrných motorů pro jejich jednoduchost ovládání ale vyžadují údržbu kartáčů, a proto byl vyvinut bezkomutátorový motor, který má podobné elektrické vlastnosti [6]. Rozvoj bezkomutátorových elektromotorů byl umožněn až v posledních desetiletích s rozvojem elektroniky, mikropočítačů a miniaturizací [2]. A současně jsou široce používány v automobilovém, leteckém průmyslu, v domácích spotřebičích a dalších [6].

EC motor je typ motoru, který rychle získal na popularitě a může nahrazovat komutátorové nebo asynchronní motory [2]. Jeho největší výhody EC motoru vysoká účinnost, dlouhá životnost, velký rozsah otáček a vysoký poměr kroutícího momentu k velikosti motoru [7]. EC motor je podobný střídavým elektromotorům v tom, že točivé magnetické pole způsobuje pohyb rotoru, ale je taky podobný stejnosměrnému motoru s komutátorem buzeným permanentními magnety v tom, že mají lineární momentovou charakteristiku [8]. Na rozdíl od stejnosměrného motoru s komutátorem buzeného permanentními magnety nemá komutátor a magnety nejsou na statoru, ale jsou na rotoru. Pro komutaci stejnosměrného proudu využívá tranzistorový měnič

a senzory, které detekují polohu rotoru a podle toho vybudí příslušné vinutí statoru, tak aby byl zajištěn plynulý pohyb [6].

2.1 Rozdíl mezi BLDC a PMSM

EC motory se konstrukčně nejvíce podobají synchronním motorům s permanentními magnety, tedy na statoru mají uložené vinutí a na rotoru mají magnety. Stejně jako synchronní motory mají EC motory stejnou frekvenci otáčení magnetického pole vytvářeného statorem a otáčení rotoru, tedy nevzniká žádný skluz jako u asynchronních motorů. EC motory mohou být jednofázové, dvoufázové nebo třífázové. Třífázové BLDC motory jsou nejpoužívanější. [7]

U EC motorů se používá takzvaná lichoběžníková komutace. To vychází ze tvaru BEMF, tedy ze tvaru průběhu zpětného indukovaného napětí, viz obr 4.1, které vyplývá z různých zapojení cívek statoru. Například motory PMSM mají BEMF sinusového tvaru. Řízení motoru se sinusovým průběhem je složitější, protože vytvořit plynule se měnící sinusový proud je obtížnější než skokově se měnící průběh proudu pro napájení motorů s lichoběžníkovým průběhem. A z důvodu jednoduchosti a snížení nákladu se některé motory se sinusovým průběhem řídí jako by měly lichoběžníkový průběh. [5]

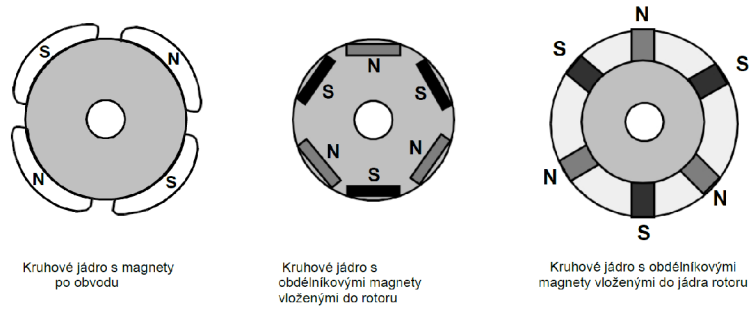
2.2 Stator BLDC motoru

Stator BLDC motoru se podobá statoru asynchronního nebo synchronního elektromotoru a je složen ze vzájemně izolovaných plechů s drážkami, ve kterých je uloženo vinutí. Většinou mají tři statorová vinutí zapojená do hvězdy. Každé vinutí je složeno z několika cívek, které jsou vzájemně spojeny do vinutí. [7]

2.3 Rotor BLDC motoru

Rotor BLDC motoru je vybaven permanentními magnety, které mohou být umístěny na povrchu nebo uvnitř rotoru, viz obr 2.2. Rotor může mít například dva až osm párů pólů. Magnety se používají feritové, které jsou levnější, ale mají malou hustotu toku při daném objemu magnetu, v dnešní době se používají magnety ze slitin vzácných zemin, například neodym, samarium-kobalt a další slitiny, které jsou dražší a mají velkou magnetickou hustotu, a to umožňuje zmenšení celého motoru a tedy zvýšení hustoty energie a vytvoření většího točivého momentu při zachování stejných rozměrů jako motor s feritovými magnety. [7]

BLDC motory můžeme rozdělit na dva typy, inrunner a outrunner, tedy na motory s vnitřním rotorem a motory s vnějším rotorem, který je uvedený na obr 2.1. Inrunery jsou motory klasické konstrukce, kde stator obklopuje rotor. Outrunnery jsou motory, u kterých obklopuje rotor stator, permanentní magnety jsou připevněny na vnitřní straně rotoru, outrunnery se například používají u dronů nebo elektrických koloběžek, kde může být motor přímo v kole bez jakýchkoli převodů.

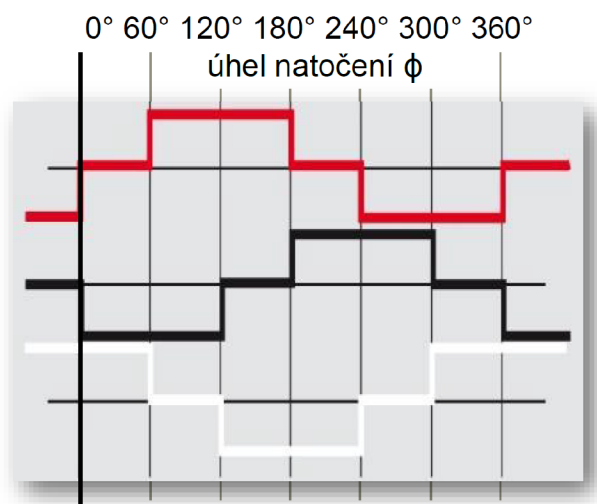


Obr. 2.2: Způsoby uložení magnetů v rotoru [7]

3 Elektronická komutace BLDC motoru

Už z názvu je jasné, že jde o elektronickou komutaci a tedy každého BLDC motoru je nedílnou součástí elektronická jednotka, třeba i integrovaná přímo do motoru, která řídí napájení jednotlivých vinutí statoru. Je to tedy mikroprocesor, který zpracovává informace ze zpětné vazby a generuje data pro spínání výkonových tranzistorů. Zpětná vazba tedy snímání úhlového natočení rotoru může být sensorové nebo bezsensorové a je realizované pomocí snímačů polohy, například pomocí hallových sond, enkodéru, nebo pomocí elektronického systému. [3]

Používá se takzvaná šestistupňová (six-step) komutace, která je uvedena na obr 3.1, kde je znázorněn průběh proudů na jednotlivých fázích. EC motory, které mají tři statorová vinutí zapojené do hvězdy, která jsou vůči sobě posunutá o 120° , a tak musíme změnit napájení vinutí šestkrát, aby se motoru otočil o 360° , a tedy dochází ke změně každých 60° a máme šest stupňů komutace. [9]

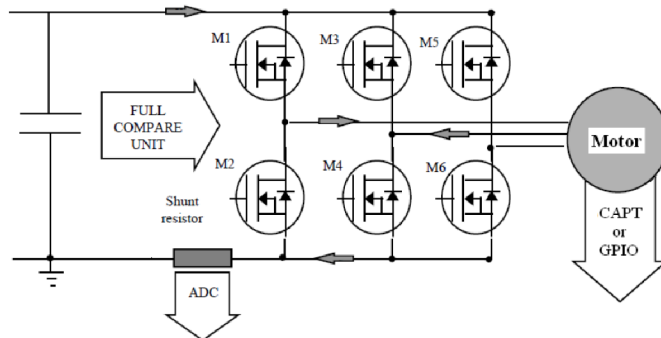


Obr. 3.1: Průběh proudů jednotlivých fází v závislosti na poloze rotoru [10]

Šestistupňová komutace definuje posloupnost napájení vinutí. Komutace probíhá tak, že v každé komutační sekvenci je jedno vinutí připojené na kladné napětí, další vinutí je připojené na záporné napětí a třetí vinutí není napájené. A tato vlastnost řízení BLDC motoru, při níž vždy jedno vinutí není napájené, je důležitá, protože ho využíváme pro snímání polohy rotoru při bezsensorovém řízení [11]. Aby se motor udržel v chodu, tak musíme nabudit příslušná vinutí statoru, a tedy měnit polohu magnetického pole statoru v závislosti na poloze rotoru tak, aby v ideálním případě předbíhal magnetické pole permanentních magnetů rotoru o 90° , čímž se docílí největšího točivého momentu. [7]

Elektronický komutátor je realizovaný pomocí mikroprocesoru a výkonového můstku vytvořeného z šesti tranzistorů pomocí, kterých řídíme pohyb a rychlost

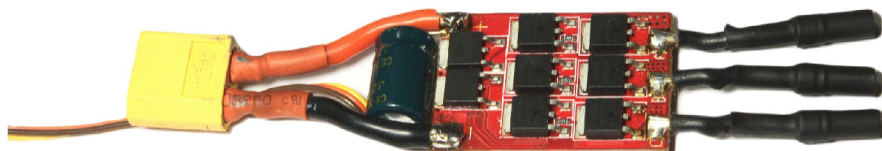
otáčení motoru, příklad je uvedený na obr 3.3. Tři tranzistory umožňují připojit vinutí ke kladnému napájecímu napětí a zbylé tři tranzistory slouží k připojení na záporné napájecí napětí.[10]



Obr. 3.2: Schéma zapojení ESC [7]

Dříve se pro řízení BLDC motorů používala sestava integrovaných obvodů, které měly větší rozměry. V dnešní době je součástí každého elektronického komutátoru mikroprocesor, na kterém běží software a zvládá všechno v jenom pouzdru, řídí motor zpracovává signály ze snímače polohy, pečlivě řídí časování a dobu trvání signálů pro spínání jednotlivých vinutí, dobu náběhu a doběhu motoru a přizpůsobuje se změnám zatížení motoru tak, aby dosáhl požadovaných otáček. U malých elektromotorů, které jsou napájeny proudem do jednoho ampéru, mohou být tranzistory integrované do jednoho pouzdra, čímž se docílí co nejmenších rozměrů. [12]

Pro řízení napětí na vinutí BLDC motoru se většinou používá PWM modulace, u které se změnou střídý řídí přes výkonové tranzistory otáčky a točivý moment motoru. Řízení napětí motoru by také mohlo být realizováno přímo pomocí výkonových tranzistorů, které by byly použity jako lineární regulátor napětí, ale to není moc praktické a u motorů s vysokým výkonem se nepoužívá. U výkonnějších BLDC motorů se tedy musí využít pulsně šířkové modulace, díky které nebudou vznikat takové ztráty při spínání tranzistorů. [13]



Obr. 3.3: Modelářský regulátor rychlosti pro bezsensorové motory

4 Způsoby řízení BLDC motoru

BLDC motor se skoro vždy řídí v uzavřené regulační smyčce protože řízení v otevřené regulační smyčce nám nedává takovou přesnost, spolehlivost, možnost regulace, ale je levnější a jednodušší. Pro většinu motorů se používá regulace v uzavřené regulační smyčce, která je složitější, nákladnější a potřebujeme zpětnou vazbu, tedy potřebujeme vědět, jak je rotor natočen, a tak používáme senzory nebo elektroniku ke sledování polohy rotoru, což zajišťuje větší spolehlivost a přesnost a to je ve většině aplikacích potřebné. [12]

4.1 Otevřená regulační smyčka

Řízení BLDC motoru s otevřenou regulační smyčkou se používá tam, kde potřebujeme jednoduchost a je dobře definován vztah mezi vstupem a výstupem a tedy zpětná vazba není potřeba. V otevřené regulační smyčce se řídí přímo rychlost motoru pomocí PWM, který můžeme samy nastavit například pomocí potenciometru a mikroprocesor pouze nastaví požadovanou střídu PWM, a tím změní napětí na vinutí statoru a otáčky rotoru. [14]

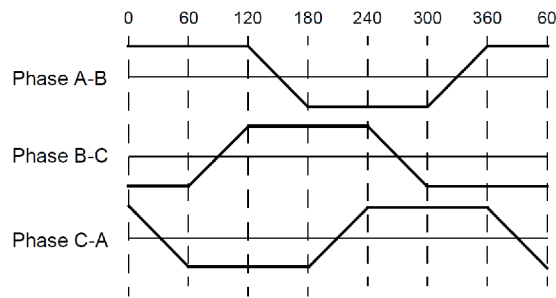
4.2 Uzavřená regulační smyčka

Řízení s uzavřenou smyčkou se používá tam, kde je potřeba větší stabilita a adaptivnější regulace. Používá se zpětná vazba, a tím se kompenzují poruchy v systému a zajišťuje se tím stabilita při dynamických změnách. Aktuální skutečná rychlost motoru je přiváděna zpět do regulátoru, kde je porovnávána s požadovanou rychlostí a na základě vyhodnocené chyby řídicí algoritmus zvyšuje nebo snižuje střídu PWM, kterou mění otáčky motoru.[14]

Když se motor otáčí, tak se v každém vinutí indukují napětí, a působí proti napájecímu napětí. Závisí na úhlové rychlosti, magnetickém poli magnetů, počtu závitů vinutí na statoru

Základní rozdělení řízení BLDC motoru je na:

- senzorové řízení otáček
- bezsenzorové řízení otáček



Obr. 4.1: Lichoběžníkový průběh BEMF jednotlivých vinutí [5]

4.3 Senzorové řízení BLDC motoru

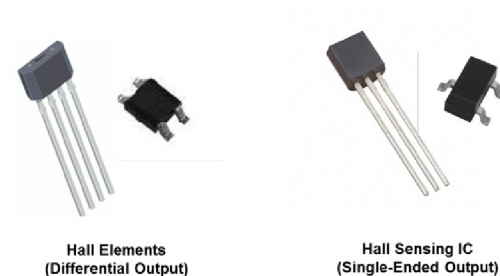
Jako první ke snímání otáček a polohy rotoru u BLDC motorů byly využity senzory, které mohou pracovat na různých principech.

Používané senzory pro řízení BLDC motoru [12]:

- Hallové sondy
- Resolvery
- Optické enkodéry
- Indukční senzory

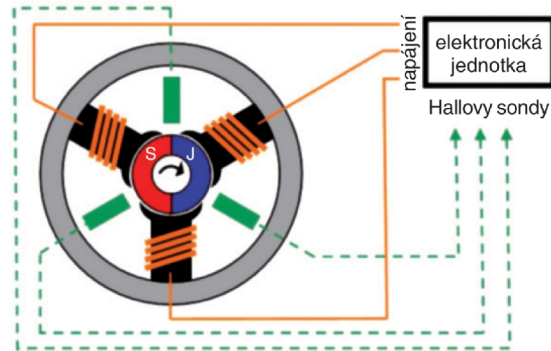
4.3.1 Hallové sondy

Pro měření magnetického pole používáme hallové sondy, které pracují na principu hallova jevu. Tedy když protéká vodičem elektrický proud a je v magnetickém poli, tak působí magnetické pole na pohybující se nosiče náboje silou, která je tlačí na jednu stranu vodiče a vytvoří se náboje na stranách vodiče, na jedné záporné, na druhé kladné. Nahromaděné náboje na stranách vodiče vyrovnávají magnetický vliv a vytvoří se napětí mezi oběma stranami vodiče. Vytvoření napětí, které můžeme měřit mezi stranami vodiče se nazývá Hallův jev. [7]



Obr. 4.2: Hallové sondy [15]

Hallovy sondy jsou nejběžnější snímače používané pro řízení BLDC motoru, snímají magnetické pole a můžou signalizovat změnu polarity. Používají se tam kde není potřeba taková přesnost, protože neposkytují nejvyšší rozlišení jakou nabízejí resolvery nebo optické snímače, a také jsou nákladově efektivnější. [15]

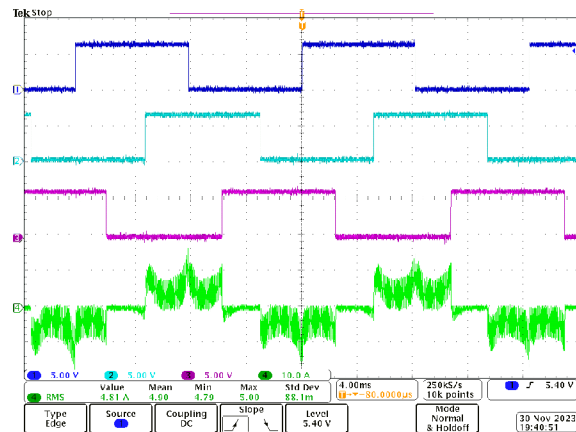


Obr. 4.3: Umístění hallových sond [3]

BLDC motory mají většinou tři hallovy sondy, které jsou připevněny na statoru a existují dvě možnosti jak hallovy sondy rozmístit. Snímače se rozmísťují na kružnici kolem osy hřídele motoru a to po 60° nebo 120° a podle toho se definuje sekvence komutace. Vždy když magnetické póly magnetu rotoru projdou v blízkosti kolem hallových sond, tak vyšlou signál a na základě těchto signálů se určí pořadí komutace. Někdy se mohou použít magnety Hallových snímačů, které jsou umístěny vedle hlavních magnetů. [7]

Hallovy sondy sledují magnetické póly permanentních magnetů na rotoru a generují signály v závislosti na směru magnetického pole. Nejjednodušší konstrukce je například, EC motor, který má rotor s jedním párem pólů a z něho dostáváme ze třech snímačů tři průběhy, viz obr 4.4, které jsou fázově posunuty o 120° a díky tomu můžeme určit polohu rotoru každých 60° , a právě to potřebujeme pro komutaci třífázového motoru, protože u něj existuje 6 různých variant jak napájet statorová vinutí. [10]

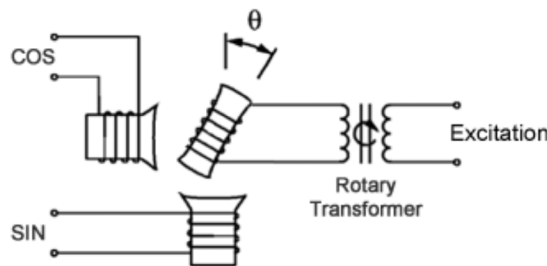
Pro více pólové BLDC motory se stále používá šestistupňová komutace s tím rozdílem, že po projití všech šesti komutačních intervalů se motor neotočí o 360° ale jen o část otočky, například pro motor se čtyřmi páry pólů na rotoru mají průběhy signálů hallových sond vzájemný fázový posun 15° a rotor se tedy otočí jen o 90° a tedy se komutační úhel rovná 60° děleno počtem párů pólů rotoru. [10]



Obr. 4.4: Průběhy z hallových snímačů a průběh fázového proudu (zelený)

4.3.2 Resolvery

Resolver je analogový snímač, který dává informace o úhlu rotace. Oproti jiným technologiím je odolnější, protože neobsahuje elektronické součástky a tedy se hodí do prostředí s extrémními teplotami, do prašných nebo do radioaktivních prostředí. [16]

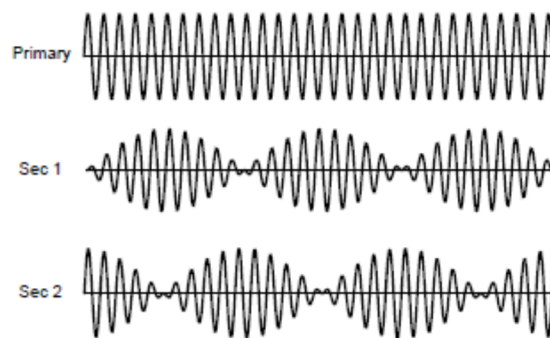


Obr. 4.5: Schéma resolveru [16]

Resolver je rotační transformátor, který se skládá ze statoru a rotoru připevněného ke hřídeli BLDC motoru a obsahuje primární vinutí, referenční vinutí a dvě sekundární vinutí - sinusové a kosinusové, která jsou vůči sobě posunuta o 90° . Referenční vinutí je na rotoru resolveru, sinusové a kosinusové vinutí je na statoru. V resolveru je energie přiváděna do referenčního vinutí přes rotační transformátor, což umožňuje vynechat kartáče a sběrací kroužky, a to zvyšuje spolehlivost a životnost. [16]

Indukovaná napětí v sinusovém a kosinusovém vinutí se rovnají referenčnímu napětí vynásobené SIN nebo COS úhlu vstupní hřídele od pevného nulového bodu. Výstup resolveru poskytuje dva střídavé průběhy - z sinusového a kosinusového vinutí, viz obr 4.6. Poměr hodnot z těchto dvou udává polohu rotoru, $\sin x / \cos x = \tan x$, kde x je úhel hřídele. Díky tomu, že je použit poměr dvou napětí a nepočítá se

s jejich absolutními hodnotami, tak není vnášena chyba vlivem změny teploty nebo stárnutím a další výhodou je, že je to absolutní snímač. [16]



Obr. 4.6: Schéma resolveru [16]

4.3.3 Optické enkodéry

Enkodéry jsou senzory, které můžeme použít pro měření délky, pozice, rychlosti, uhlu natočení nebo všechny veličiny najednou. Převádějí mechanický rotační pohyb na elektrické signály. Optické enkodéry můžeme rozdělit na dva základní typy. [17]

- inkrementální - generují sled pulsů
- absolutní - produkují sled unikátních kódů

Inkrementální enkodéry jsou jednodušší než absolutní enkodéry a v závislosti na natočení generují určitý počet pulsů a v závislosti na čase odpovídá určitý počet pulsů rychlosti. Výsledný signál získaný ze snímače nedává přesnou informaci o pozici ale jen informaci o pohybu nebo změně polohy, přesnou pozici musí vyhodnotit až externí jednotka. Složitější absolutní enkodéry poskytují přesnou informaci o úhlu natočení rotoru, a tedy pro určitou pozici generují konkrétní signál. Enkodér je tedy elektromechanický převodník a jeho základní části jsou disk s posloupností průhledných a neprůhledných otvorů nebo odrazných a neodrazných plošek, optický vysílač (například LED), přijímač (například fototranzistor, fotodioda). [17]

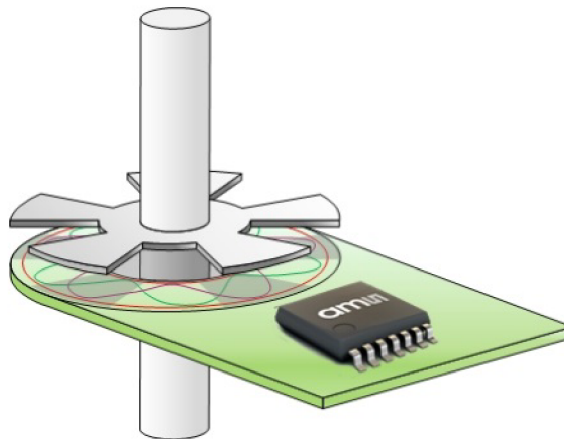
Základní princip funguje enkodéru je, že disk je připevněn ke hřídeli EC motoru a otáčí se současně s motorem. Světlo z optického vysílače dopadá na disk a prochází otvory nebo se odráží od odrazných ploch, neprůhledné a neodrazné plochy světlo pohlcují. Světelné impulsy, které se vytvářejí otáčením disku, dopadají na optický přijímač, jsou převedeny na elektrický signál, který může být zpracován v řídicí elektronice a využit pro správnou buzení statorových vinutí EC motoru. Na výstupu enkodéru je tedy obdélníkový signál, kde každý obdélník odpovídá jedné plošce

na disku a při jejich rovnoměrném rozmístění po obvodu se každý obdélník rovná určitému počtu stupňů. [17]

Absolutní enkodéry potřebují větší počet optických přijímačů, tak aby byly schopny poskytnout přesnou informaci o poloze. Počet optických přijímačů odpovídá požadovanému rozlišení. Příkladem může být provedení, kde disk obsahuje 8 paralelních drah a tedy má enkodér rozlišení 8 bitů. Pro detekci je tak potřeba jeden optický vysílač a 8 optických přijímačů, kde má každý vlastní dráhu. [17]

4.3.4 Indukční senzory

Indukční senzory polohy využívají elektromagnetickou indukci ke snímání polohy rotoru EC motoru. Indukční snímače jsou většinou realizované na desce plošných spojů, na které jsou tři cívky, jednu vysílací a dvě přijímací, deska má ve středu otvor, kterým prochází hřídel elektromotoru, na které je připevněný kovový terč nebo vícelistá lopatka, viz obr 4.7. [18]



Obr. 4.7: Indukční snímač polohy [18]

Indukční snímač díky oscilátoru vyzařuje elektromagnetické pole přes vysílací cívku a vyzařovaná energie je absorbována přijímacími cívkami na desce plošných spojů a měřena prostřednictvím přijímacích obvodů indukčního snímače. Jak se kovová část otáčí nad plošným spojem, tak ovlivňuje elektromagnetické pole z vysílací cívky. Poklesy magnetického pole jsou detekovány integrovaným obvodem indukčního snímače a na výstupu jsou dva střídavé průběhy, obvykle o 90 stupňů vzájemně fázově posunuté, tedy sinus a cosinus. [18]

Z výstupních průběhů můžeme vypočítat úhel natočení hřídele na základě fázového a amplitudového rozdílu mezi výstupy indukčního snímače a využít ho jako

zpětnou vazbu úhlové polohy, a tak řídicí elektronika může správně řídit statorová vinutí a udržovat EC motor v pohybu. [18]

4.4 Bezsenzorové řízení BLDC motoru

Pro ovládání BLDC motoru můžeme kromě senzorové techniky použít i řízení bez senzorů pomocí elektroniky, a tedy se oproti stejnosměrným motorům a senzorovému řízení BLDC motorů dojde k dalšímu zjednodušení, protože řízení například pomocí hallových sond nebo i dalších senzorů vyžaduje instalaci snímačů na motor, kabeláže od motoru k řídicí jednotce, díky tomu je náchylnější k rušení a například při zvýšené teplotě, tlaku nebo vlhkosti způsobuje problémy s citlivostí senzorů a snižuje se spolehlivost. Bezsenzorové řízení je dále levnější, odolnější a jednodušší na montáž. Bezsenzorové řízení BLDC motoru je u lichoběžníkového průběhu založeno na snímání indukovaného napětí (BEMF). [19]

Využívá se toho, že při six-step komutaci je jedna fáze motoru napájena kladně, druhá napájena záporně a třetí není napájena, a tedy na ní můžeme měřit indukované napětí, které je vytvářeno na statoru pomocí permanentních magnetů na rotoru a je závislé na počtu závitů statorového vinutí, síle magnetů a otáčkách motoru a z toho plyne nevýhoda využívání BEMF při nízkých otáčkách, že je na nich závislá, a tedy při nízkých rychlostech je velice těžké ho detekovat, protože má velmi malou amplitudu, a proto se musí motor uvést do pohybu jiným způsobem, tak aby bylo dosaženo dostatečných otáček a BEMF mělo dostatečnou amplitudu, například pomocí řízení v otevřené regulační smyčce. [7, 19]

Způsoby řízení BLDC využívající BEMF [19]:

- Přímá detekce průchodu nulou
- Integrační metoda
- Metoda třetí harmonické
- Freewheeling diode metoda

Používají se ale i jiné metody, například Field Oriented Control (FOC), řízení BLDC motoru, které jsou stále populárnější a nejsou založeny na BEMF protože, když se motor točí nízkou rychlostí nebo se netočí vůbec tak nejsou poskytovány žádné informace pro určení polohy motoru.

Dále jsou to metody, kde pomocí matematického modelu BLDC motoru, který bere naměřené vstupy skutečného systému a vytváří odhadované výstupy. Chyba mezi odhadovanými výstupy a měřenými je mezi sebou porovnána, aby se opravily odhadované hodnoty, jako je poloha rotoru a rychlost, jako by byly skutečně měřené

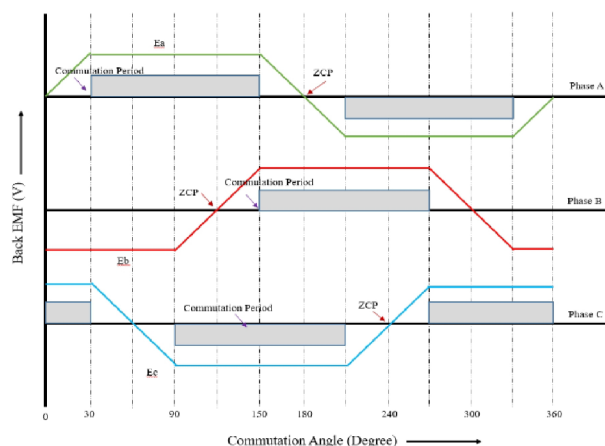
proměnné v řízení systému s uzavřenou smyčkou. Ačkoli se většina metod založených na pozorovateli používá pro motory PMAC, které mají sinusové BEMF a potřebují spojitou polohu rotoru, u motorů BLDC, které vyžadují pouze šest polohových bodů na jeden elektrický cyklus a nepřetržitá informace o poloze obvykle není nutná. Ale pro speciální účely jsou polohy mezi komutačními body vyžadovány. [20]

4.4.1 Přímá detekce průchodu nulou

Přímá detekce průchodu nulou je jeden z nejjednodušších způsobů bezsenzorového řízení EC motoru, který je založený na BEMF, tedy přímo měříme indukované napětí na výstupních kontaktech z řídicí jednotky motoru. Pomocí detektoru průchodu nulou se určí body, kdy indukované napětí změni svoji polaritu, tedy kdy projde nulou. Další obvody se používají pro generování signálů, které můžeme nazývat virtual hall signal, tyto signály se ale ještě musejí posunout o 30° od okamžiku kdy indukované napětí prošlo nulou, tak abychom získali skutečné komutační body jak je uvedeno na obr 4.8 a pak mohou být přivedeny do řídicího obvodu, aby generovaly impulsy pro komutaci BLDC motoru. [19]

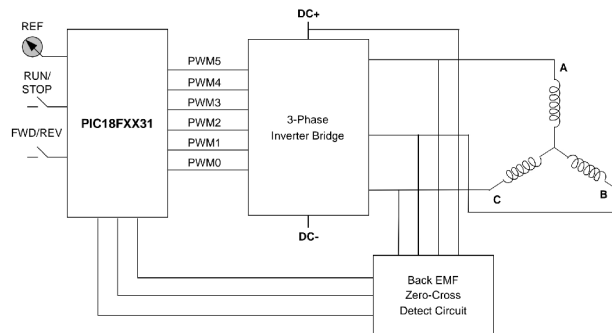
Zpoždění 30° je možné vytvořit pevně nastavenou hodnotou, ale to bude správně fungovat jen pro malý rozsah otáček, a to je další komplikace, protože v širokém spektru otáček nebude docházet ke komutaci ve správném okamžiku. Pro vytvoření správného zpoždění komutace o 30° za bodem, kdy indukované napětí prošlo nulou, je ještě třeba znát rychlost motoru, aby bylo možné toto zpoždění spočítat a upravovat ho v závislosti na otáčkách [10].

Sledované indukované napětí je ještě nutné vyfiltrovat. Pro získání průběhu indukovaného napětí se používají dolní propusti k eliminaci vyšších harmonických v napětí fázových svorek způsobených spínáním měniče. [20]



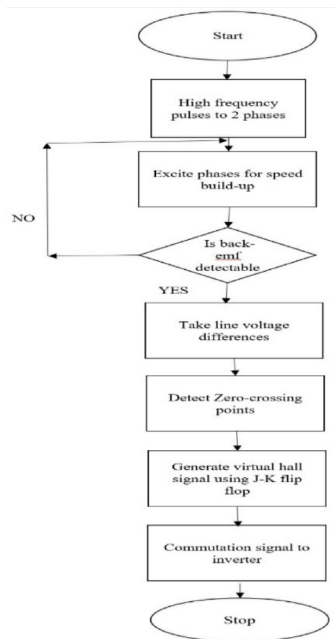
Obr. 4.8: Detekce průchodu nulou a BEMF motoru BLDC [19]

Na obr 4.8 je průběh zpětného elektromotorického napětí ve třech fázích (zelený, a modrý průběh) a body kdy pochází BEMF nulou (ZCP), a tedy i body kdy dochází ke komutaci, které jsou zpožděny o 30° za ZCP.



Obr. 4.9: Blokové schéma bezsenzorového řízení BLDC [7]

Když se motor netočí, tak musíme nejprve rotor motoru vyrovnat do známé polohy například vybuzením libovolných dvou fází motoru vysokofrekvenčními impulsy, a poté provést zrychlení v otevřené smyčce, tedy napájíme vinutí podle pořadí stejné komutační sekvence, ale bez ohledu na BEMF a postupně zvyšujeme frekvenci, tak abychom dosáhli minimálních otáček a BEMF bylo dostatečně vysoké, a aby se stalo detekovatelným. Po zrychlení v otevřené smyčce je jeho řízení převedeno do bezsenzorového provozního režimu, který je založen na přímém BEMF snímání, jak je uvedeno výše. [10, 19]

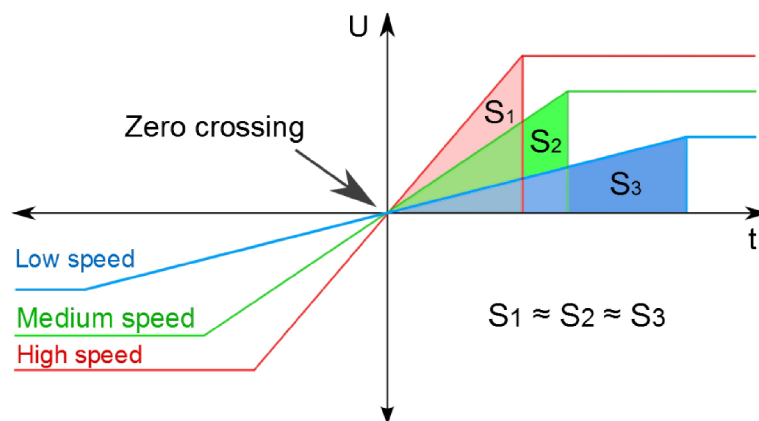


Obr. 4.10: Diagram bezsenzorového řízení BLDC [19]

Na obr 4.10 je uveden příklad jak může být řešen algoritmus pro bezsenzorové řízení EC motoru s přímou detekcí průchodu nulou. Algoritmus začíná vyrovnáním rotoru do známé polohy pomocí vysokofrekvenčních pulzů, když je poloha rotoru známá, tak dojde k roztočení motoru tak, že se motor řídí v otevřené smyčce abychom dosáhli takovou amplitudu indukovaného napětí, kterou lze detekovat, a poté dojde k detekci průchodu nulou z toho se generuje signál podobný signálu jako z hallových sond a vytvoření signálu pro komutaci tedy pro spínání měniče.

4.4.2 Integrační metoda

V integrační metodě se okamžik komutace určuje pomocí integrace indukovaného napětí fáze, která není zrovna napájena. Hlavní výhodou této metody, je že integrovaná plocha je přibližně stejná při různých otáčkách motoru, tak jak je uvedeno na obr 4.11 a tato metoda není tedy závislá na otáčkách. Když indukované napětí projde nulou, tak začne integrace, a když dosáhne předem definované prahové hodnoty integrálu, která odpovídá bodu, kdy se má změnit napájení rotorových vnutí, tak dochází ke komutaci fázového proudu. Integrační metoda je méně citlivá na šum způsobený spínáním měniče, a protože je nezávislá na otáčkách, tak se automaticky přizpůsobuje změnám otáček. Za předpokladu, že má indukované napětí lichoběžníkový průběh, tak dochází k problémům při nízkých rychlostech kvůli akumulaci chyb. [20]

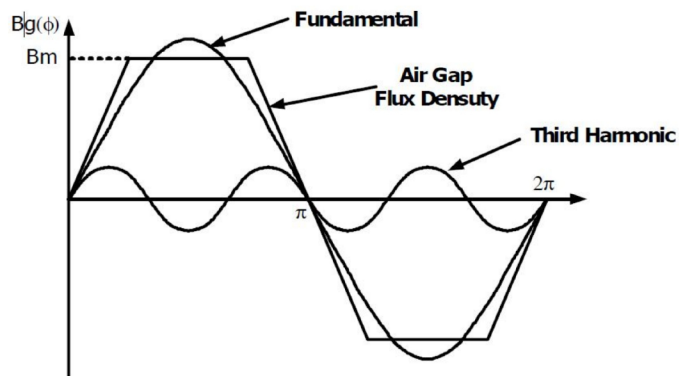


Obr. 4.11: metoda integrace BEMF při různých rychlostech [22]

Ve chvíli, kdy integrál dosáhne prahové hodnoty a dojde ke komutaci fází, tak se integrál vynuluje a toto vynulování se udržuje dostatečně dlouho, aby integrátor začal znovu integrovat až proud v nenapájené fázi projde nulou, a pak dochází znovu k další integraci. [20]

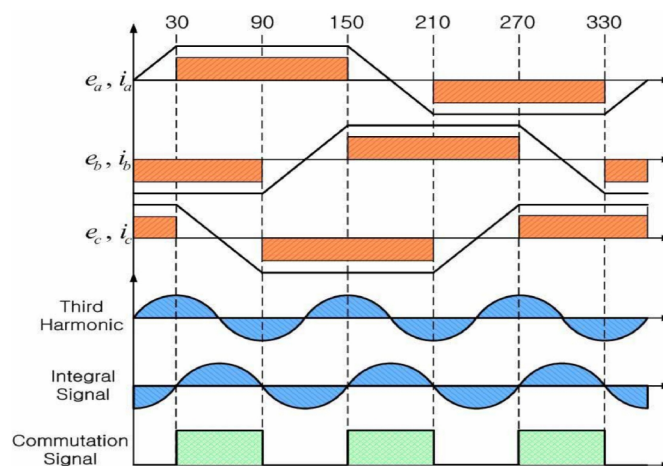
4.4.3 Metoda třetí harmonické

Metoda třetí harmonické využívá třetí harmonickou BEMF, která je extrahována přímo z fázových napětí, k určení okamžiků komutace EC motoru. Využívá se toho, že v třífázovém motoru se zapojením do Y s lichoběžníkovým průběhem toku ve vzduchové mezeře má součet tří fázových napětí statoru za následek eliminaci základních a dalších harmonických složek, jako je 5. 7. atd. Výslednému součtu dominuje třetí harmonická složka, která udržuje konstantní fázový posun se základním napětím vzduchové mezery pro jakékoli zatížení a rychlost. [20, 23]



Obr. 4.12: Třetí harmonická složka indukovaného napětí EC motoru [23]

Na obr 4.12 je ideální rozložení hustoty toku ve vzduchové mezeře pro BLDC motor. Výsledný tok vzduchové mezery má dominantní třetí harmonickou složku spojenou s vinutím statoru, indukující se třetí harmonická složka v každé z fází. Výsledkem součtu tří statorových fázových napětí je pouze třetí harmonická plus další vysokofrekvenční složky.[20, 23]



Obr. 4.13: Vytvořené komutační signály na základě třetí harmonické [23]

Třetí harmonická složka prochází nulou každých 60° . Požadované okamžiky komutace jsou získány pomocí integrátoru třetí harmonické složky, který způsobuje fázový posun 30° od průchodů nulou třetí harmonické. Požadované komutační signály jsou tedy zjištěny z průchodů nulou tohoto integrovaného signálu, tak jak je znázorněno na obr 4.13. [23]

Vhodné zpracování signálu třetí harmonické umožňuje odhad polohy rotoru a správné řízení proudu měniče. Na rozdíl od nepřímých metod snímání polohy založených na signálu BEMF vyžaduje třetí harmonická jen malou filtraci. Výsledkem je, že tato metoda není citlivá na zpoždění filtrování a je použitelná pro velký rozsah rychlostí a také dosaženo vynikajícího výkonu při spouštění motoru, protože třetí harmonická může být detekována při nízkých otáčkách, ale pro spouštění se stále využívá řízení v otevřené regulační smyčce. [20]

4.4.4 Freewheeling diode metoda

V freewheeling diode metodě jsou informace o poloze motoru detekovány na základě stavu vodivosti nulových diod spojených antiparalelně s výkonovými tranzistory třífázového měniče. Proud tekoucí zpětnými diodami třífázového měniče je výsledkem BEMF indukovaného ve vinutí motoru a není tedy možné detekovat polohu rotoru v klidu a proto je nutný vhodný postup spouštění bezsensorového motoru například rozběh v otevřené regulační smyčce. [20]

V BLDC motoru protéká proud pouze dvěma fázovými vinutími a jedno fázové vinutí zůstává v klitu nenapájené. Tato metoda využívá proud protékající volnoběžnou diodu ve fázi, která zrovna není napájená. Krátkou dobu po dosažení průchodu nulou BEMF v nenapájené fázi, protéká volnoběžnou diodou malý proud. Tato proud v nenapájené fázi začíná téct uprostřed komutace, což odpovídá bodu, kdy BEMF překročí nulu a díky tomu je možné detekovat polohu motoru každých 60° . [21]

V této metodě je chyba polohy komutačních bodů v přechodném stavu jako i jiných metodách založených na BEMF. Ale nejzávažnější nevýhodou této metody je použití šesti izolovaných napájecích zdrojů pro obvod komparátoru pro detekci proudu protékajícího každou diodou. Tato technika však překonává předchozí metody založených na snímání indukovaného napětí motoru při nízkých rychlostech. [20]

4.5 Metody spouštění BLDC motoru

Postup spouštění BLDC motoru využívající bezsensorového řízení pomocí detekce průchodu nulou BEMF můžeme rozdělit do dvou základních kroků. První je vyrov-

nání nebo detekce počáteční polohy rotoru BLDC motoru a druhý krok je spuštění v otevřené regulační smyčce, motor je tedy vyrovnán napájením statorového vinutí tak, aby se rotor otočil do známé polohy nebo je poloha rotoru určena pomocí metody IPD. Jakmile je poloha rotoru známa, rotor se roztočí v otevřené smyčce tak, že se frekvence napájení postupně zvyšuje, aby motor dosáhl dostatečných otáček a BEMF měla dostatečnou amplitudu a mohla být detekována a řízení BLDC motoru mohlo být přepnuto do bezsenzorového režimu. [24]

Základní metody spuštění BLDC motoru

- Vyrovnání (Align and Go)
- Detekce počáteční polohy (IPD)

4.5.1 Vyrovnání (Align and Go)

Tato metoda spuštění BLDC motoru je nejjednodušší způsob. Rotor BLDC motoru je vyrovnán do známé polohy napájením dvou statorových vinutí dostatečně velkým stejnosměrným proudem, po dostatečně dlouhou dobu tak, aby se rotor otočil a vyrovnal se se statorovými cívkami. [24, 25]

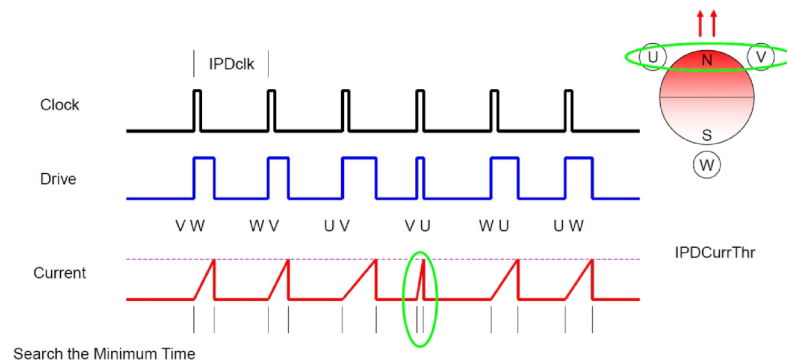
Proud a doba trvání je závislá na použitém motoru a parametry musí být vyladěny podle použitého motoru, Největší nevýhodou této metody je možnost pohybu v obou směrech a u motorů zatížených větším momentem je rozběh motoru pomalejší. Zpětná rotace je však v některých aplikacích problematická, a proto se tento způsob používá tam, kde možnost pohybu v opačném směru nevádí a doba spuštění není kritická. [24, 25]

4.5.2 Detekce počáteční polohy (IPD)

Tato metoda jenom detekuje polohu rotoru bez jakéhokoli jeho pohybu, a doba spuštění je tedy rychlejší než u metody align and go a je použitelná pro aplikace, kde je zpětný pohyb problematický například ventilátory nebo čerpadla. [24]

Tato metoda využívá toho, že se indukčnost motoru mění v závislosti na poloze rotoru. Do statorového vinutí se pustí šest vysokofrekvenčních pulzů, to ale nestačí k překonání setrvačnosti motoru, takže nedojde k pohybu rotoru. Pomocí šesti pulzů jsou postupně vybudena všechna vinutí, tedy UV, VU, VW, WV, UW, UW, proud je monitorován a buzení se zastaví, jakmile dosáhne předem nastavené prahové hodnoty a v tu chvíli se i zaznamená doba vybudění příslušných fází, a tak se projde všech šest pulsů. Když je tok permanentního magnetu rotoru ve stejném směru jako je magnetický tok vybuděného vinutí, tak dojde k saturaci dříve a doba dosažení

prahové hodnoty proudu je kratší, a tak je detekována poloha rotoru, viz obr 4.14. [24]



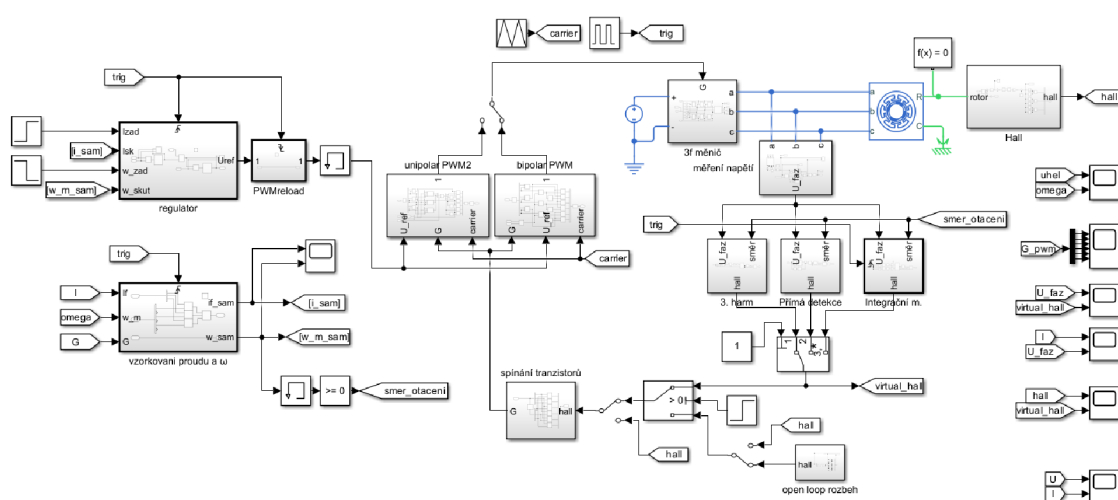
Obr. 4.14: Šest pulzů detekce počáteční polohy a průběh proudu[25]

Na obr 4.14 je průběh časovacího signálu určující periodu jednotlivých impulzů, průběh napětí impulzů a průběh proudu, který zvyšuje tak rychle jak je natočený rotor vůči napájenému vinutí, impuls s nejkratší dobou trvání je čtvrtý, a rotor je tedy natočen ke čtvrté kombinaci napájených fází.

5 Model BLDC pohonu v programu MATLAB/Simulink

5.1 Model BLDC pohonu

Tato kapitola rozebírá proces tvorby a následný popis BLDC pohonu v prostředí Simulink. Zaměřuje se na implementaci vybraných bezsenzorových metod řízení, které umožňují efektivní regulaci pohonu. Kromě toho poskytuje detailní popis jednotlivých prvků modelu a jejich vzájemné interakce v simulačním prostředí. Tato kapitola přináší ucelený pohled na tvorbu a fungování BLDC pohonu v Simulinku.



Obr. 5.1: Kompletní model BLDC pohonu v programu MATLAB/Simulink

Na obr 5.1 je uveden vytvořený model BLDC pohonu ze Simulinku, ve kterém jsou vytvořeny tři vybrané způsoby bezsenzorového řízení BLDC motoru, vybrána byla tedy Přímá detekce průchodu nulou, Integroační metoda a Metoda třetí harmonické, dále je v modelu realizován rozběh pro bezsenzorový způsob řízení, regulátor proudu

a otáček a třífázový měnič napětí. V modelu je také vytvořeno senzorové řízení pomocí halových sond, které bylo použito v počátku pro testování modelu BLDC motoru ze simulinku pro svou jednoduchost, a také pro kontrolu simulací bezsenzorových způsobů řízení a porovnání signálů, které generují tyto způsoby řízení (virtual hall signal) se signály generující reálné hallovy sondy. Také je možné ho využít pro rozběh motoru pro bezsenzorové řízení BLDC motoru. Kromě bloků a knihoven ze standardního prostředí Simulink byl použit model samotného BLDC motoru ze Simulinku z knihovny Simscape Electrical.

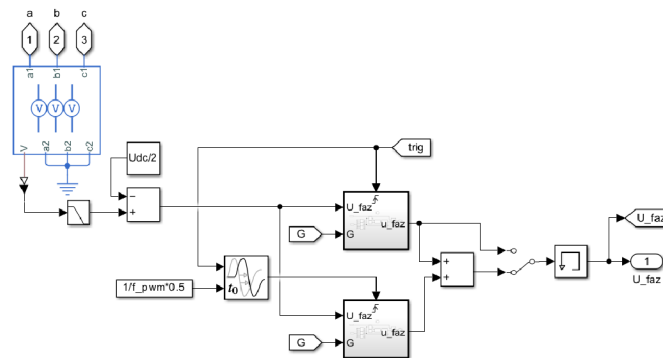
5.2 Prostředí Simulink

Simulink je nadstavba MATLABu pro Model-Based Design. Podporuje návrh, simulaci, automatické generování kódu a průběžné testování a ověřování vestavěných systémů. Simulink poskytuje grafický editor, přizpůsobitelné knihovny bloků a řešiče pro modelování a simulaci dynamických systémů. Je integrován do MATLABu, což umožňuje začlenit algoritmy MATLABu do modelů a exportovat výsledky simulace pro další analýzu. [26]

Simscape umožňuje vytvářet modely fyzických systémů v prostředí Simulink. Pomocí Simscape lze vytvářet modely fyzických součástí, jako jsou elektromotory, můstkové usměrňovače, hydraulické pohony a chladicí systémy, které lze sestavením základních součástí do schématu. Přídavné produkty Simscape poskytují komplexnější komponenty a možnosti analýzy. Modely lze parametrizovat pomocí proměnných a výrazů MATLABu a navrhovat řídicí systémy pro fyzický systém v Simulinku. [27]

5.3 Detekce průchodů nulou

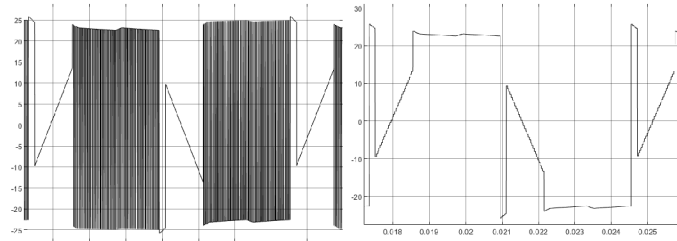
Pro bezsenzorové způsoby řízení BLDC motoru využívající indukované napětí je zásadní správně detekovat body, kdy indukované napětí překročí nulou, aby motor správně fungoval a docházelo ke komutaci ve správné okamžiky.



Obr. 5.2: Zapojení bloku měření napětí

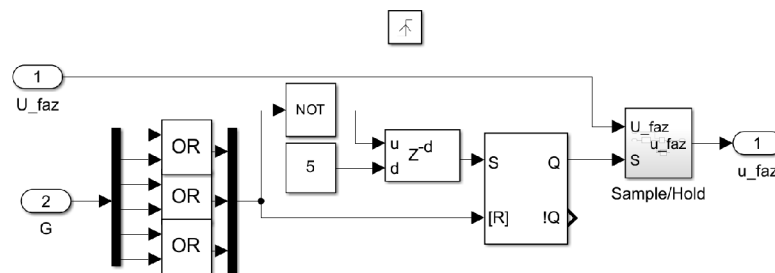
Proto je nejprve nutné měřit indukované napětí ze všech tří fází. Jelikož ale u většiny motorů není vyveden střední vodič, tak není možné jednoduše měřit fázové napětí. V tomto modelu to bylo provedeno způsobem tak, že se napětí měří proti zemi napájecího zdroje, tím získáme fázové napětí, které má ale stejnosměrnou složku rovnou polovině napájecího napětí, a tedy ho je ještě nutné posunout dolů tak, aby byla stejnosměrná složka nulová, viz obr 5.2.

Toto změřené napětí je ale modulované, protože pro regulaci je použita PWM a není příliš vhodné pro detekci průchodů nulou, viz obr 5.3. Je proto nutné toto napětí vzorkovat tak, abychom dostali aspoň přibližně lichoběžníkový průběh indukovaného napětí, viz obr 5.3, a mohli tak detekovat průchody nulou. Zde bylo použito vzorkování o stejné frekvenci, jako je frekvence PWM, tedy je vzorkováno s frekvencí 30kHz.



Obr. 5.3: indukované napětí a) před vzorkováním b) navzorkované

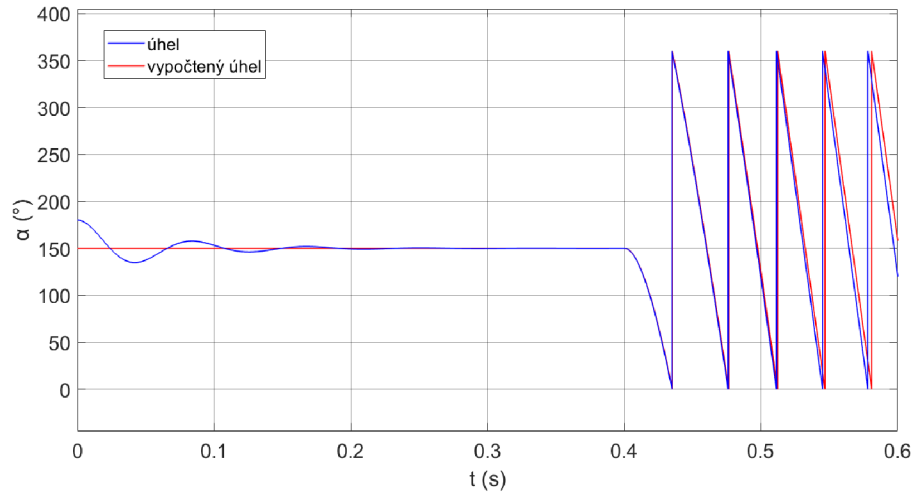
V zapojení na obr 5.2 je nejprve změřeno napětí proti zemi napájecího zdroje, pak prochází přes dolní propust, aby se vyfiltrovalo vysokofrekvenční rušení a je posunutě aby byla stejnosměrná složka nulová, poté je vzorkováno s frekvencí PWM a jsou odstraněny pulsy, které jsou způsobené proudem protékající zpětnými diodami třífázového měniče a způsobovaly by nechtěné průchody nulou v následujících blocích, jsou vidět na obr 5.3b, tak že je vždy vynecháno 5 vzorků podle šesti signálů pro spínání 3f měniče, kdy tam zůstává poslední hodnota pomocí bloku Sample/Hold, viz obr 5.4.



Obr. 5.4: Vzorkování indukovaného napětí

5.4 Rozběh BLDC motoru

BLDC motor s bezsenzorovým řízením není schopen se sám rozběhnout z nulových otáček. Vybrané bezsenzorové způsoby řízení jsou založeny na měření indukovaného



Obr. 5.6: Průběh rozběhu BLDC motoru

Na obr 5.6 je průběh úhlu motoru při rozběhu v otevřené regulační smyčce, který je vypočtený v bloku na obr 5.5 (červený průběh), a je porovnaný s reálným úhlem motoru (modrý průběh).

5.5 Realizace PWM

Jednou z možností, jak řídit napětí, je proměnný stejnosměrný zdroj. Výhodou takového řešení je absence vysokofrekvenčního proudu, a tedy snížení ztrát, ale má poměrně složitou topologii a nepoužívá se. Pro výkonové aplikace to není kritické a používá se zdroj s konstantním napětím a PWM modulace. Trojfázové napájení je realizováno třífázovým výkonovým stupněm se šesti výkonovými spínači řízenými pomocí PWM, kterým se řídí střední hodnota napětí přiváděného na fáze motoru. Frekvence PWM bývá obvykle konstantní a větší 10 kHz. PWM spínání může být provedeno dvěma různými způsoby a to je: [28]

- Bipolární spínání PWM
- Unipolární spínání PWM

PWM spínání můžeme také rozdělit na: [29]

- nezávislé spínání
- komplementární spínání

Spínání PWM nezávislé nebo komplementární souvisí s tím, jaký je stav jednotlivých tranzistorů v jedné větvi střídače během jedné periody sepnutí [29].

U komplementárního spínání jsou ovládány oba tranzistory pomocí PWM v jedné

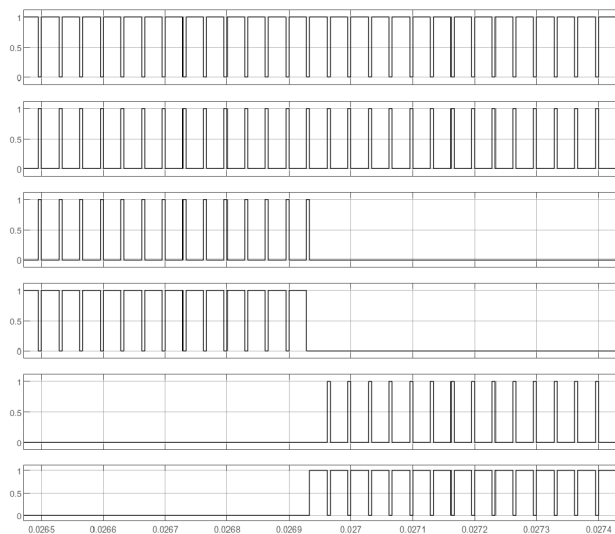
větvi invertoru komplementárním způsobem, což znamená, že pokud je jeden tranzistor sepnutý, druhý je vypnutý a naopak, tedy spodní spínač (tranzistor) je řízen signálem inverzním k hornímu tranzistoru stejné fáze a využívá doplňkové PWM pro spínání spodního spínače. Pomocí komplementárního spínání PWM je možné řízení ve všech čtyřech kvadrantech. [29][28]

U nezávislého spínání PWM je vždy jeden z tranzistorů po celou periodu sepnut a druhý je spínán PWM signálem tak, aby bylo dosaženo žádané střední hodnoty napětí přiváděného do motoru. Nezávislé spínání PWM je pouze pro dvoukvadrantové řízení a nevyžaduje doplňkové PWM. [29][28]

Při tvorbě modelu BLDC motoru byla využita a porovnána bipolární a unipolární PWM s komplementárním spínáním, protože jsou vhodnější ve srovnání s PWM s nezávislým spínáním pro měření indukovaného napětí.

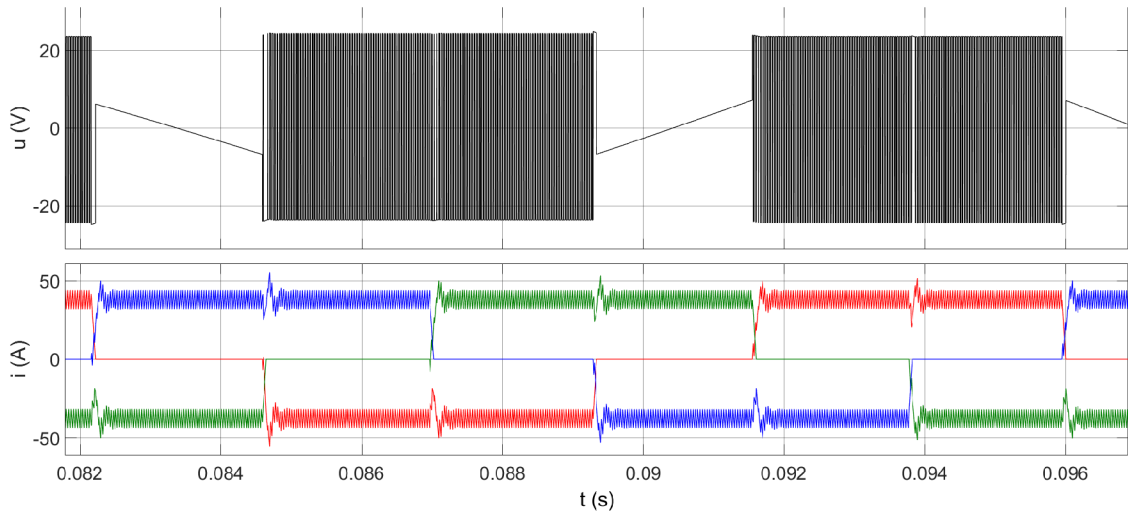
5.5.1 Bipolární PWM

U BLDC motoru jsou spínány vždy jen dvě dvojice tranzistorů a jedna dvojice je vypnuta, a tak v případě bipolárního PWM dochází během jedné půlperrody k postupnému spínání tranzistorů například Q1 a Q4, Q2 a Q3 jsou vypnuty a poté Q2 a Q3, Q1 a Q4 jsou vypnuty, Q5 a Q6 jsou po celou dobu vypnuty.



Obr. 5.7: Šest signálů pro spínání tranzistorů s bipolárním PWM

Na obr 5.7 je průběh šesti signálů s bipolárním spínáním PWM se střídou 50% pro řízení třífázového měniče z šesti tranzistorů, odshora Q1 až Q6. A na obr 5.8 jsou uvedeny dva grafy, v prvním horním grafu je průběh indukovaného napětí první fáze a v druhém grafu jsou tři průběhy fázových proudů s proudovou regulací na 40A.

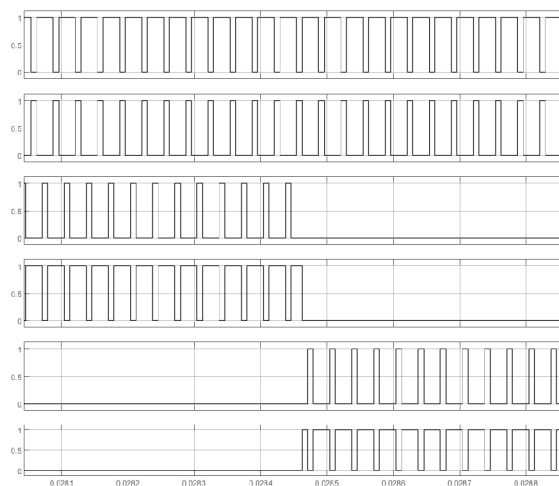


Obr. 5.8: Průběh indukovaného napětí a proudu s bipolárním PWM

U bipolárního spínání PWM je vidět na rozdíl od unipolárního větší zvlnění proudu, ale zase průběh napětí je u bipolárního spínání vhodnější pro měření indukovaného napětí a detekci bodů průchodu nulou.

5.5.2 Unipolární PWM

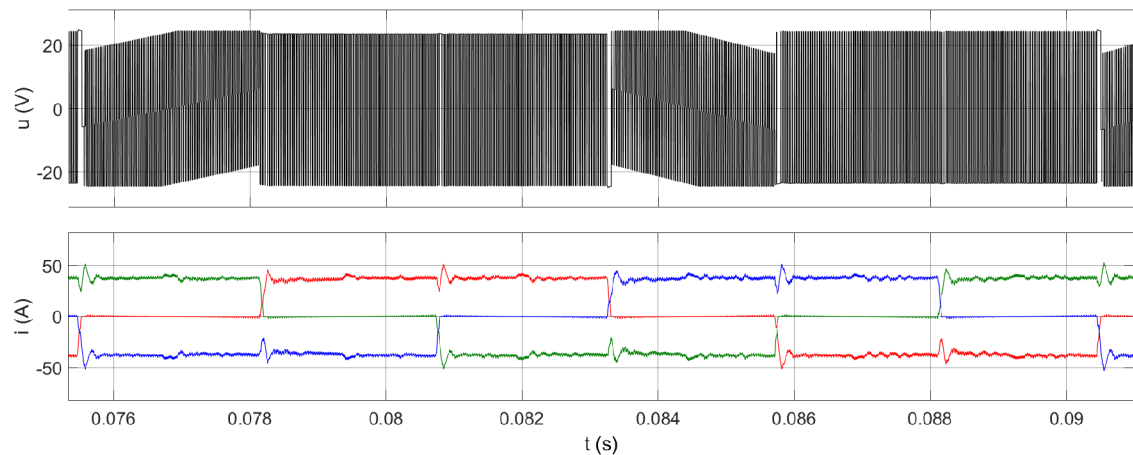
U unipolárního PWM se nespínají všechny tranzistory stejně s nosnou frekvencí, ale jsou o 180° vzájemně posunuty na rozdíl od bipolárního spínání PWM, kde jsou vždy tranzistory spínány vždy ve stejný čas.



Obr. 5.9: Šest signálů pro spínání tranzistorů s unipolárním PWM

Na obr 5.9 je průběh šesti signálů s unipolárním spínáním PWM se střídou 50% pro řízení třífázového měniče z šesti tranzistorů, odshora Q1 až Q6. A na obr 5.10

jsou uvedeny dva grafy, v prvním horním grafu je průběh indukovaného napětí první fáze a v druhém grafu jsou tři průběhy fázových proudů s proudovou regulací na 40A.



Obr. 5.10: Průběh indukovaného napětí a proudu s unipolárním PWM

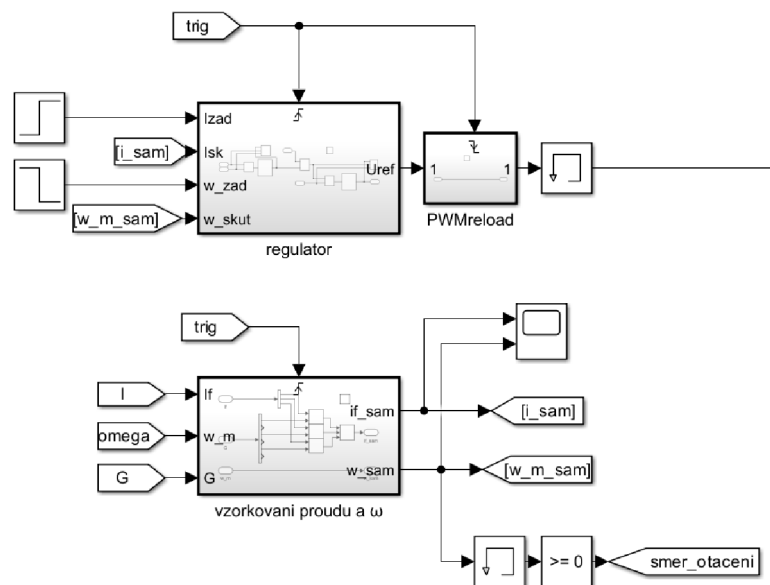
Spínaný měnič s unipolárním PWM nezpůsobuje tak velké ztráty a zahřívání motoru díky nižšímu obsahu vyšších harmonických, viz obr 5.9, kde je na druhém průběhu patrné menší zvlnění proudu na rozdíl od bipolárního PWM.

5.5.3 Regulátor proudu a otáček

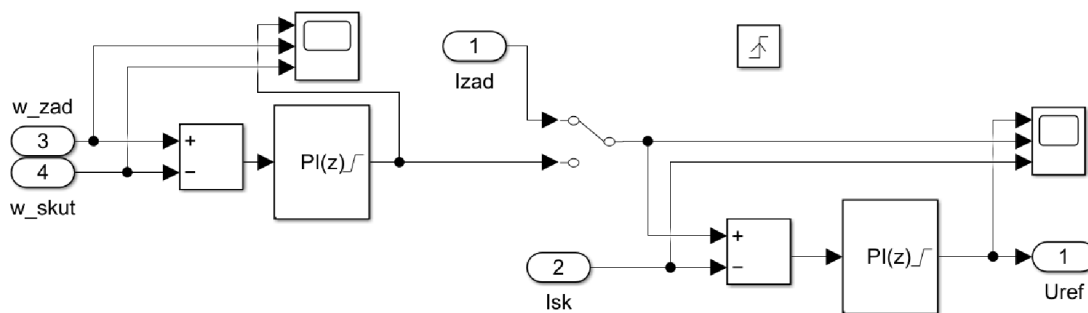
Pro regulaci proudu a otáček byl použit standardní PI regulátor.

Regulátor otáček

Pro regulátor otáček je nejprve důležité do regulátoru přivést úhlovou rychlost motoru, která se vzorkuje v bloku *vzorkování proudu a ω* , viz obr 5.13. V tomto případě je do regulátoru přivedena úhlová rychlost ze senzoru *Ideal Anguar Sensor* z knihovny Simscape, toto řešení bylo zvoleno pro svoji jednoduchost a přesnost, pro bezsenzorový provoz BLDC motoru by to muselo být provedeno nějakým výpočtem úhlové rychlosti, například měřit dobu mezi dvěma body průchodu nulou a z toho dopočítávat úhlovou rychlost BLDC motoru. Úhlová rychlost ze senzoru *Ideal Anguar Sensor* je přivedena do bloku, kde se vzorkuje s nosnou frekvencí 30kHz, stejně jako se vzorkuje indukované napětí nebo měřený proud pro proudový regulátor, a je porovnávána s žádanou hodnotou úhlové rychlosti, a poté je přivedena do PI regulátoru. Výstup regulátoru je připojen do regulátoru proudu.



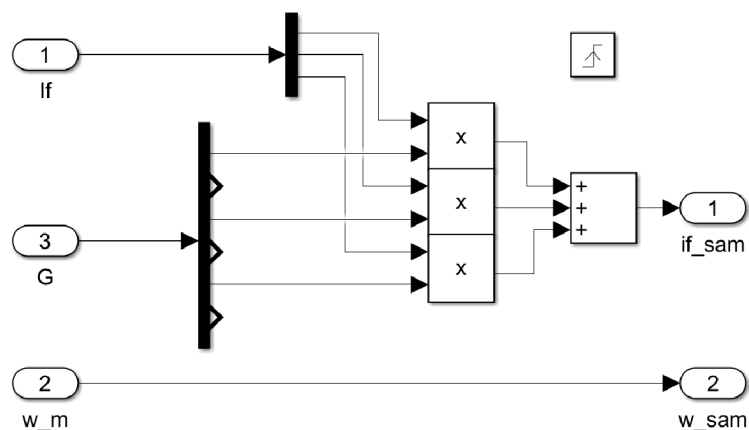
Obr. 5.11: Regulátor proudu a otáček



Obr. 5.12: Blok regulátoru proudu a otáček

Regulátor proudu

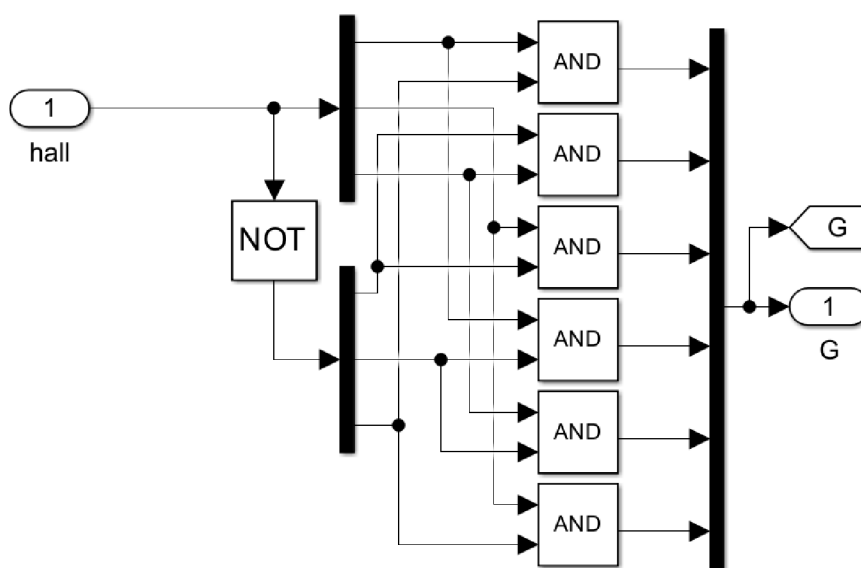
Do regulátoru proudu je přivedena měřená hodnota proudu, která je měřena na každé fázi zvlášť na vstupu do motoru a prochází blokem *vzorkování proudu a ω* , viz obr 5.13, ve kterém dochází k výběru proudu ze správné fáze, jelikož je proud měřený v každé fázi a do regulátoru je potřeba přivést proud jen z aktuálně sepnuté fáze, v tomto bloku také dochází ke jeho vzorkování s frekvencí PWM 30kHz. Následně je měřený proud porovnáván s žádanou hodnotou proudu a výsledná odchylka je přivedena do PI regulátoru. V PI regulátoru je také nastavena saturace tak, aby se hodnota U_{ref} pohybovala mezi 1 a -1 a motor mohl být tak řízen v obou směrech.



Obr. 5.13: Blok *vzorkování proudu a ω*

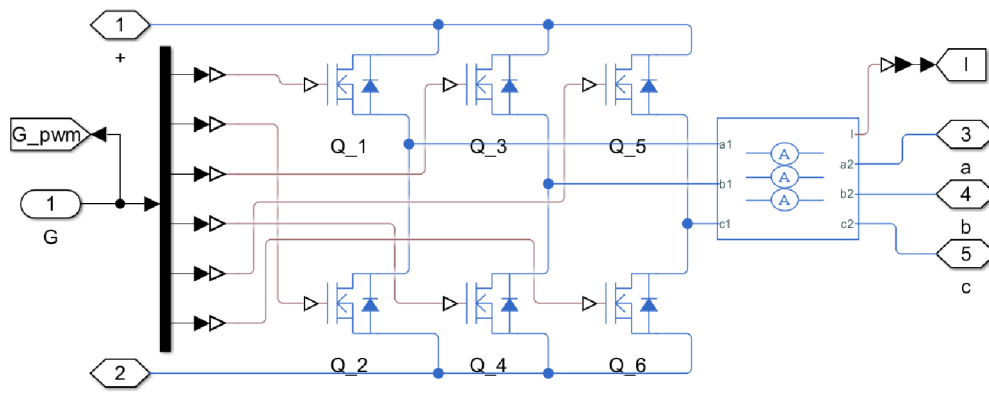
5.5.4 Logika spínání tranzistorů třífázového měniče

Ze sensorů nebo bezsensorového řízení jsou vytvořeny tři signály, které jsou vůči sobě posunuty o 120° a lze z nich zjistit polohu motoru v šesti stavech, tedy po 60° .



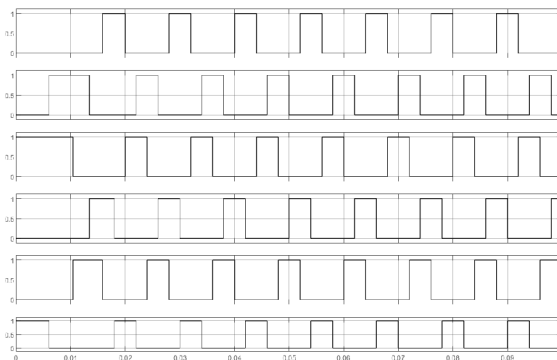
Obr. 5.14: Blok *spínání tranzistorů*

V bloku na obr 5.14 dohází ke generování šesti signálů pomocí logických obvodů z hall signálů přímo z hallových sond, tak jak je uvedeno v tab. 5.1, v případě sensorového řízení, tak i z virtual hall signálu u bezsensorových způsobů řízení. Těchto šest signálů, viz obr 5.16, je přivedeno do bloku PWM regulace, ze kterého jsou přivedeny do třífázového měniče.



Obr. 5.15: Blok 3f měnič

Na obr 5.15 je třífázový měnič, pomocí kterého je napájen BLDC motoru. Je vytvořeny pomocí knihovny *Simscape*

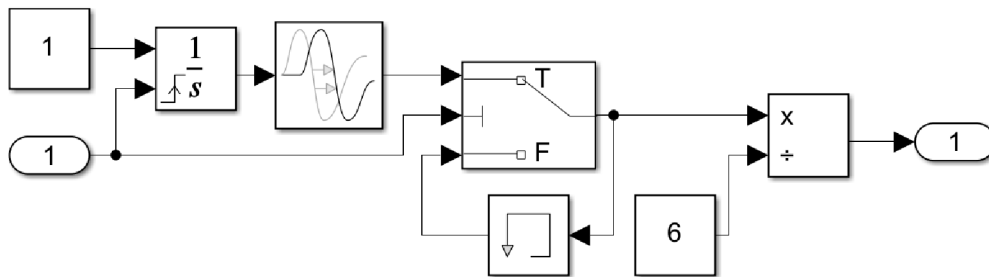


Obr. 5.16: Průběhy šesti signálů pro spínání třífázového měniče

Tab. 5.1: Logická tabulka spínání třífázového měniče

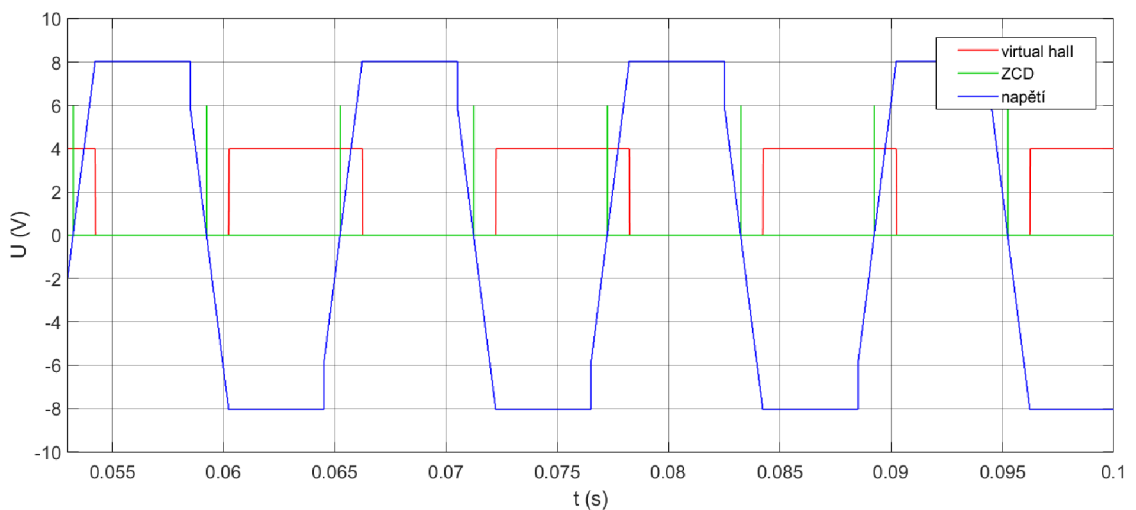
H1	H2	H3	G1	G2	G3	G4	G5	G6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1	0	0	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0
1	1	0	1	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0

směru otáčení motoru předbíhá nebo se zpožďuje za fázovým napětím, a proto je na konci blok *Selector*, pomocí kterého je možné změnit pořadí hall signálů, tak aby bylo možné BLDC motor řídit v obou směrech.



Obr. 6.3: Blok 30° delay

V tomto bloku je měřen čas mezi dvěma průchody indukovaného napětí nulou, což odpovídá jedné púlperiodě, a tak je nutné ho ještě vydělit šesti abychom dostali čas, která odpovídá 30° . Výsledná hodnota je přivedena do bloku *Variable Transport Delay*, kde dochází ke zpoždění virtual hall signálu.

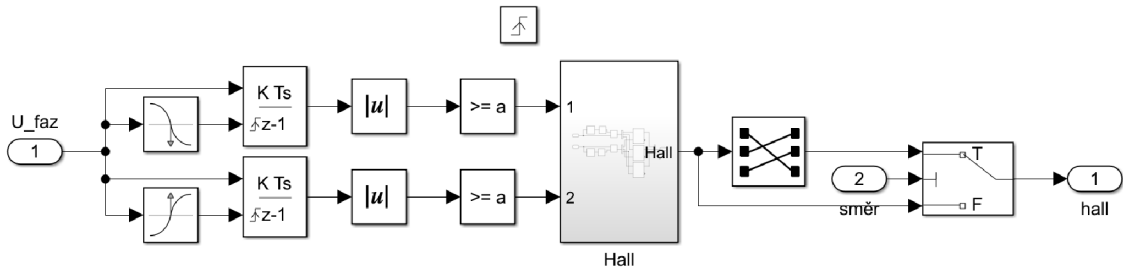


Obr. 6.4: Průběh indukovaného napětí, virtual hall signálů a ZCD

Na obr 6.4 je zobrazen lichoběžníkový průběh indukovaného napětí pro rychlost motoru 1000 ot/min. Modrá křivka reprezentuje toto indukované napětí v závislosti na čase. Zelená křivka znázorňuje body průchodu nulou. Červená křivka pak reprezentuje virtual hall signál, který slouží k detekci polohy rotoru v motoru.

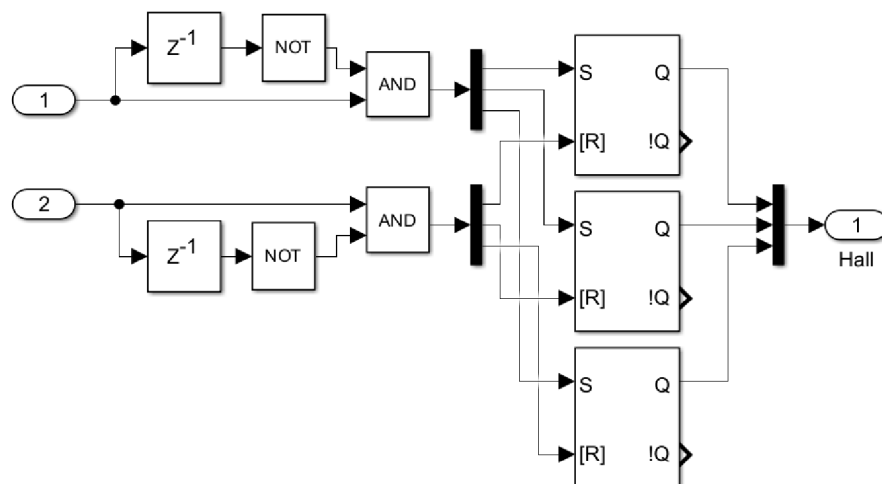
6.0.2 Integrační metoda řízení BLDC motoru

V bloku na obr 6.5 je uvedeno zapojení řízení BLDC motoru pomocí Integrační metody.



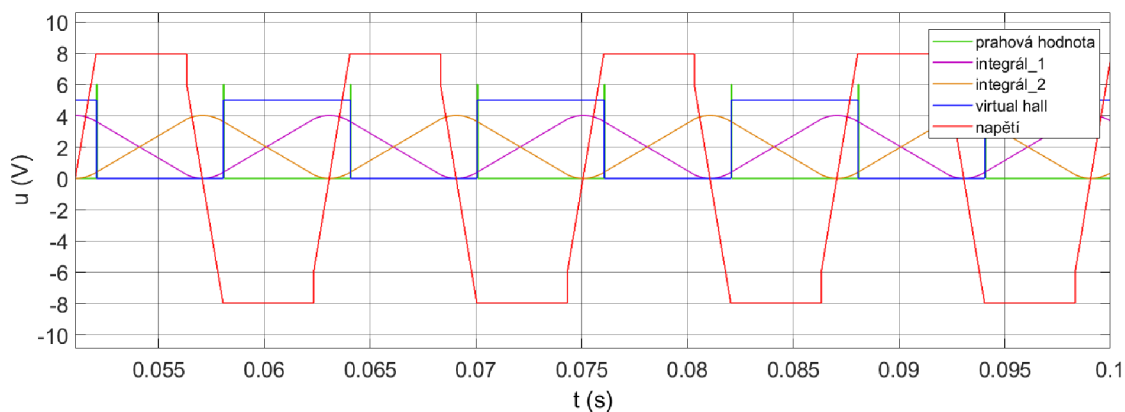
Obr. 6.5: Blok *Integrační m.*

Na vstupu je přivedeno lichoběžníkové indukované napětí, které je integrováno v blocích *Discrete-Time Integrator* a pomocí detekce průchodu nulou jsou tyto integrátory resetovány tak, aby po každém průchodu nulou začínala integrace od nuly. Pak je signál veden přes absolutní hodnotu a porovnáván s předem definovanou prahovou hodnotou integrálu, jak již bylo popsáno v kapitole 4.4.2. Prahová hodnota byla určena z grafu na obr 6.8. Integrace probíhá dvakrát, jednou je resetováno průchody nulou z kladné do záporné hodnoty a podruhé naopak tak, aby bylo možné rozlišit signály pro RS obvody pro generování virtual hall signálu, viz obr 6.6.



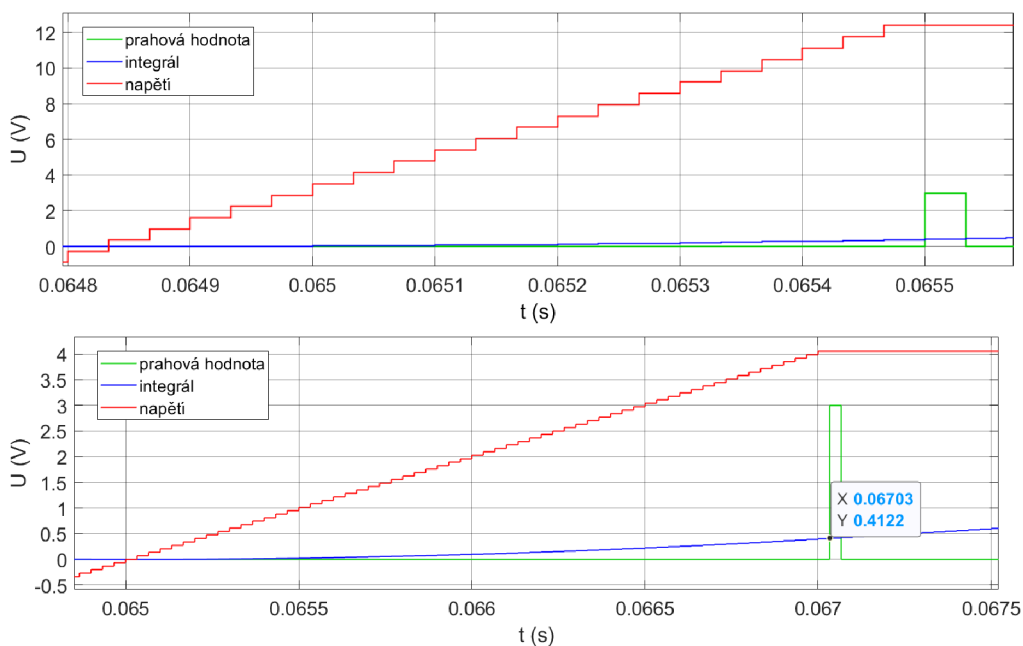
Obr. 6.6: Blok *Hall* z integrační metody

Na obr 6.6 je blok, který generuje virtual hall signal pomocí tří RS obvodů, pro každou fázi zvlášť. Na začátku jsou bloky *Delay*, *NOT* a *AND*, která vytvářejí krátké pulzy pro RS obvody, který je zobrazen jako zelený průběh na obr 6.7.



Obr. 6.7: Průběh indukovaného napětí, virtual hall, integrace a bodů kdy integrace dosáhla definované hodnoty

Na obr 6.7 je graf znázorňující průběhy jedné fáze při otáčkách 1000 ot/min. V grafu je indukovaného napětí zobrazené jako červený průběh, dále oranžový a fialový průběh zobrazuje průběh absolutní hodnoty integrálu indukovaného napětí, zelený průběh představuje body, kdy integrál dosáhl předem definované prahové hodnoty a modrý průběh je virtual hall signal.

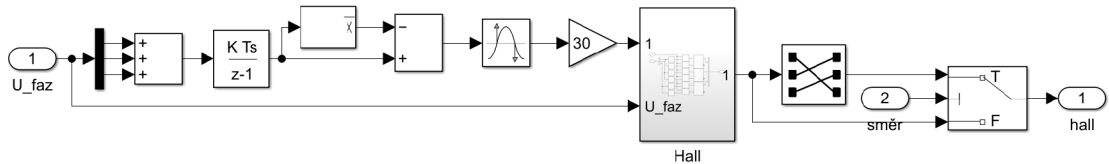


Obr. 6.8: Průběhy při 2000 ot/min a 500 ot/min

Na předešlých grafech na obr 6.8 jsou porovnány dva průběhy při různých otáčkách tak, aby bylo patrné, že hodnota integrálu je vždy stejná, viz obr 4.11 a díky tomu je zpoždění vždy stejné.

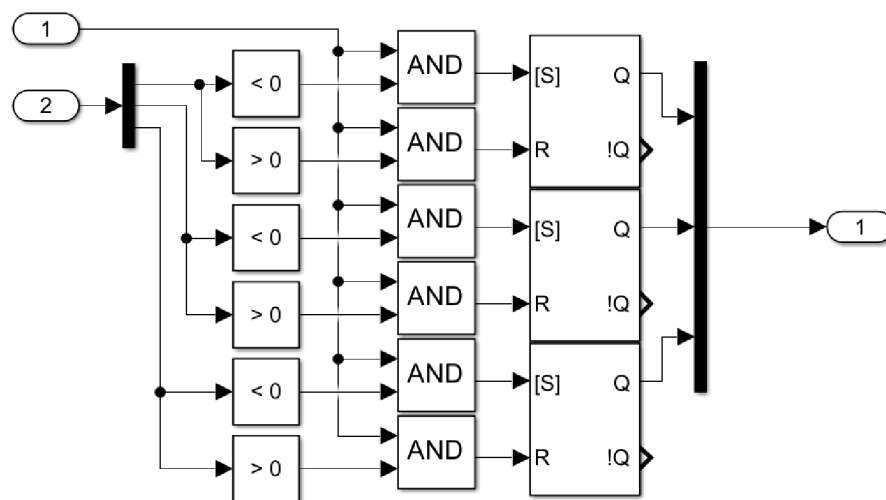
6.0.3 Řízení BLDC motoru metodou třetí harmonické

V bloku na obr 6.9 je uvedeno zapojení řízení BLDC motoru pomocí metody Třetí harmonické, která byla popsána již v kapitole 4.4.3.



Obr. 6.9: Blok 3. harm

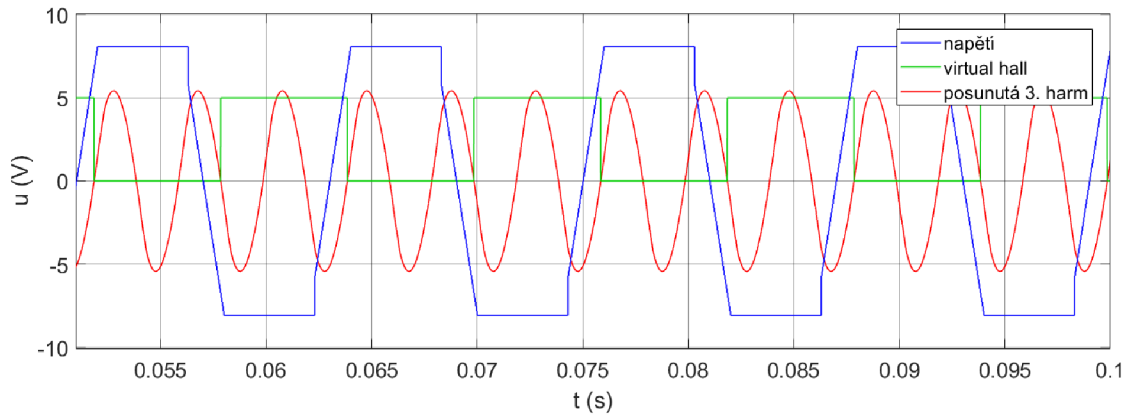
Na vstup je přivedeno indukované napětí BLDC motoru. Pak jsou indukované napětí ze všech tří fází sečtena a z toho vznikne průběh, který má přibližně trojúhelníkový průběh a frekvenci třetí harmonické složky, viz fialový průběh na obr 6.12. Dále je tento průběh integrován, což způsobí 30° zpoždění, viz oranžový průběh na obr 6.12 tak, aby bylo možné pomocí toho průběhu generovat virtual hall signal, zpožděný průběh je tedy veden do bloku *Hit Crossing* a dále do bloku *Hall*, který je na obr 6.10, kde je vytvářen virtual hall signal pro každou fázi. Na konci jsou ještě bloky *Selector* a *Switch*, pomocí kterých lze změnit směr otáčení motoru



Obr. 6.10: Blok Hall z metody třetí harmonické

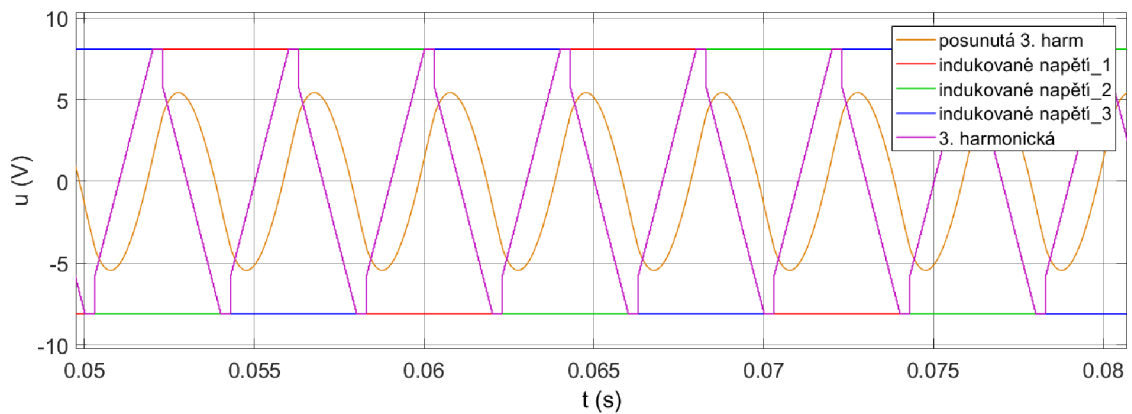
V bloku *Hall* na obr 6.10 je vytvářen virtual hall signal. Na vstupu jsou přivedeny průchody nulou 3. harmonické z bloku obr 6.10 a indukované napětí motoru. Virtual hall signal je generovaný podle indukovaného napětí motoru, které je také porovnáváno s nulou, kdy je větší a kdy menší než nula, tak aby byl správně generován pro každou fázi. Virtual hall signal je tedy vytvářen pomocí RS obvodů tak,

že je sepnut vždy prvním průchodem nulou třetí harmonické, kdy je indukované napětí dané fáze menší než nula a resetován vždy prvním průchodem nulou třetí harmonické, kdy je indukované napětí dané fáze větší než nula, viz zelený průběh na obr 6.11.



Obr. 6.11: Průběh indukovaného napětí, třetí harmonické a virtual hall signálů jedné fáze

Na obr 6.11 je uveden graf, který byl vytvořen při otáčkách 1000 ot/min, na kterém je zobrazen průběh indukovaného napětí BLDC motoru jako modrý průběh. Červený průběh zobrazuje průběh třetí harmonické složky posunuté o 30° . A zelený průběh znázorňuje virtual hall signal.



Obr. 6.12: Průběh indukovaného napětí, třetí harmonické

Na obr 6.11 je uveden graf, který byl vytvořen při otáčkách 1000 ot/min, na kterém jsou zobrazeny průběh všech tří fázových indukovaných napětí jako červený, zelený a modrý průběh. dále je zobrazen fialový průběh, který představuje průběh s frekvencí 3. harmonické složky a oranžový integrovaný průběh, který je o 30° posunutý.

Závěr

Tato práce se zabývá hlavně bezsenzorovým řízením bezkomutátorového stejnosměrného motoru. Zpočátku bylo provedeno seznámení se základními principy BLDC motoru, jeho konstrukcí a jeho řízení. Poté podle prostudované literatury byl vytvořen přehled a popis základních způsobů řízení bezkomutátorového stejnosměrného motoru. V další části je popsán vytvořený model BLDC pohonu a v poslední části jsou nasimulovány tři vybrané algoritmy řízení BLDC motoru.

Ze začátku jsou krátce zmíněny senzorové způsoby řízení EC motoru. Dále jsou uvedeny bezsenzorové způsoby řízení bezkomutátorového stejnosměrného motoru, které mají oproti senzorovému řízení řadu výhod, jako je třeba zjednodušení konstrukce motoru, protože na něm nejsou umístěny žádné senzory, které nemusejí správně fungovat ve zhoršených podmínkách jako například při zvýšené teplotě, vlhkosti a jsou náchylnější k rušení. To vede k dalším výhodám jako je nižší cena a větší spolehlivost a menší rozměry. Mají ale i nevýhody jako například problematický rozjezd a provoz v nízkých otáčkách.

Dále byl vytvořen model BLDC pohonu, ve kterém bylo realizováno řízení BLDC motoru pomocí hallových sond, které je nejjednodušší a fungovalo spolehlivě, ale hlavně byly vytvořeny bezsenzorové metody řízení pomocí přímé detekce průchodu nulou, integrace indukovaného napětí a třetí harmonické. Tyto metody ale neumí rozběhnout motor, a tak byl vytvořen rozběh pomocí hallových sond a pomocí otevřené regulační smyčky. Pro regulaci proudu nebo otáček byl implementován PI regulátor a bipolární a unipolární PWM s komplementárním spínáním. Nevýhodou unipolárního spínání je, že je složitější než bipolární a indukované napětí má horší průběh, a tak i vzorkování napětí je složitější, ale způsobuje menší zvlnění proudu, což bude způsobovat menší zahřívání motoru, a tedy ztráty budou oproti bipolárnímu spínání menší.

V poslední části práce byly simulovány bezsenzorové metody řízení pomocí přímé detekce průchodu nulou, integrace indukovaného napětí a třetí harmonické. Ze simulací byly zobrazeny průběhy znázorňující indukované napětí, detekované body průchodů nulou, integrálů, třetí harmonické a virtual hall signal, který bylo možné porovnat s reálnými signály z hallových sond ze senzorového řízení pro ověření správné funkce bezsenzorových způsobů řízení BLDC motoru. A jak je vidět na naměřených průbězích, tak se podařilo rozběhnout bezkomutátorový motor pomocí všech tří algoritmů, všechny fungovaly s bipolárním i unipolárním řízením.

Literatura

- [1] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické pohony*. Skripta. Brno: Vysoké učení technické v Brně.
- [2] ŠIMON, Josef. Jak se dělá elektromotor. Online PDF. *Časopis Elektro*. 2011, roč. 2011, č. 2, s. 36-43. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42921.pdf>. [cit. 2023-11-01].
- [3] ŠIMON, Josef. BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu. Online PDF. *Časopis Elektro*. 2011, roč. 2011, č. 10, s. 13-14. ISSN 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/44507.pdf>. [cit. 2023-10-10].
- [4] COLLINS, Danielle. *What-s the difference between an EC motor and a BLDC motor?* Online. Motion control tips. 2018. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/whats-the-difference-between-an-ec-motor-and-a-blDC-motor/>. [cit. 2023-10-11].
- [5] AKIN, Bilal; BHARDWAJ, Manish a WARRINER, Jon. *Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors*. Online PDF. In: Texas Instruments. © 2015. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/an/sprabz4/sprabz4.pdf>. [cit. 2023-11-25].
- [6] SANG-HOON, Kim. *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors*. Online. Elsevier, 2017. ISBN 9780128121382. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=ewKqDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=BLDC+motor&ots=oxtw_26LL_&sig=SGF1ymdZuslwny-4m6I8472dMwI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [cit. 2023-11-15].
- [7] YEDAMALE, Padmaraja. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Online PDF. In: MICROCHIP TECHNOLOGY INC. 2003. Dostupné z: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf). [cit. 2023-11-15].
- [8] GLUECK, Edmund. *Introduction to Brushless DC (EC) Motor and Gearmotor Technology*. Online. Bodine electric. 2013. Dostupné z: <https://www.bodine-electric.com/blog/brushless-dc-gearmotors/>. [cit. 2023-11-15].
- [9] DEJAN. *How Brushless DC Motor Works? BLDC and ESC Explained*. Online. How To Mechatronics. © 2023. Dostupné z: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/how-brushless-motor-and-esc-work/>. [cit. 2023-11-22].

- [10] MAXON. *Maxon EC motor / BLDC motor*. Online PDF. In: MAXON GROUP. ©2019. Dostupné z: https://www.maxongroup.fr/medias/sys_master/root/8837129142302/maxonECmotor-Notes.pdf?attachment=true. [cit. 2023-11-15].
- [11] TORRES, Daniel. *Sensorless Control of a Brushless DC Motor*. Online. Control engineering europe. 2010. Dostupné z: <https://www.controlengurope.com/article/33030/Sensorless-Control-of-a-Brushless-DC-Motor.aspx>. [cit. 2023-10-11].
- [12] SCHWEBER, Bill. *Jak rychle spustit návrh řízení bezkartáčového stejnosměrného motoru pomocí vysoce integrovaných obvodů*. Online. DigiKey. 2021. Dostupné z: <https://www.digikey.cz/en/articles/how-to-quickly-start-a-brushless-dc-motor-control-design-using-highly-integrated-ics>. [cit. 2023-11-22].
- [13] RENESAS ELECTRONICS CORPORATION. *BLDC Motor Control Algorithms*. Online. Renesas. © 2023. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/key-technologies/motor-control-robotics/bldc-motor-control-algorithms>. [cit. 2023-11-22].
- [14] NISARGA, Bhargavi a TORRES, Daniel. *Sensored 3-Phase BLDC Motor Control Using MSP430*. Online PDF. In: Texas Instruments. 2011. Dostupné z: https://www.ti.com/lit/an/slaa503/slaa503.pdf?ts=1700869930065&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [cit. 2023-11-25].
- [15] TANG, Zhao. *Simple BLDC motor spinning 101, part 2: Sensored v. sensorless motor control*. Online. Texas Instruments. 2015. Dostupné z: https://e2e.ti.com/blogs_/b/industrial_strength/posts/simple-bldc-motor-spinning-101-part-2-sensored-v-sensorless-motor-control?keyMatch=BLDC#. [cit. 2023-11-25].
- [16] NIDEC MOTOR CORPORATION. *How Resolvers Work*. Online. Roboteq. © 2020. Dostupné z: <https://www.roboteq.com/applications/all-blogs/14-how-resolvers-work>. [cit. 2023-11-26].
- [17] VOJÁČEK, Antonín. *Rotační enkodéry pro řízení pohonů a pohybu*. Online. Automatizace.hw.cz. 2017. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/rotacni-ekodery-pro-rizeni-pohonu-a-pohybu.html>. [cit. 2023-11-27].
- [18] DONOVEN, Mark. *How RF Inductive Sensors Offer an Alternative for Mobile Robot Design*. Online. Robotics business review. 2018. Dostupné

- z: <https://www.roboticsbusinessreview.com/sponsored-content/rf-inductive-position-sensors-alternative-mobile-robot-design/>. [cit. 2023-11-27].
- [19] AHMAD, Farhan; ZAID, Mohammad a PANDEY, Mukul. *Sensorless Control of Brushless DC Motor by ZeroCrossing Detection Pulse Generation with Adaptive Power Factor Control Technique*. Online. In: IEEE. © 2018. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8493648/citations#citations>. [cit. 2023-12-20].
- [20] GAMAZO-REAL, José Carlos; VÁZQUEZ-SÁNCHEZ, Ernesto a G-MEZ-GIL, Jaime. *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. Online. MDPI. 2010. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/7/6901>. [cit. 2023-12-21].
- [21] LEE, Hyung-Woo; TAE-HYUNG, Kim a EHSANI, Mehrdad. *State of the art and future trends in position sensorless brushless DC motor/generator drives*. Online. In: IEEE. 2005. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1569164/authors#authors>. [cit. 2024-05-15].
- [22] *BLDC Sensorless Algorithm Tuning*. Online. In: NXP SEMICONDUCTORS. NXP. 2012. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN4597.pdf&ved=2ahUKEwjG4IT1xKGDaxVlzAIHHVfEB1cQFnoECDEQAQ&usg=A0vVaw0QVF6Cjb_Mq4Kc2NRQdc9n. [cit. 2023-12-21].
- [23] ASHISH P.R. a VINCENT G. Sensorless Control Of BLDC Motor Using Third Harmonic Back EMF. Online. *International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering*. 2014, roč. 2, č. 1, article 6, s. 35-38. ISSN 2347-6982. Dostupné z: http://ijiee.org.in/paper_detail.php?paper_id=855&name=Sensorless_Control_Of_BLDC_Motor_Using_Third_Harmonic_Back_EMF. [cit. 2023-12-22].
- [24] BIST, Vashist a WEKHANDE, Shashank. *ACCURATE STARTUP TECHNIQUES IN A SENSORLESS FIELD-ORIENTED-CONTROL BLDC (SINUSOIDAL) MOTOR DRIVER*. Online PDF. In: Allegro MicroSystems. © 2022. Dostupné z: [https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296259-amt49406-accurate-startup-techniques.pdf%3Fsc_lang%](https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.allegromicro.com/-/media/files/application-notes/an296259-amt49406-accurate-startup-techniques.pdf%3Fsc_lang%3D)

3Den&ved=2ahUKEwiwsdv076uDAxV59AIHHaJ6BW4QFnoECBYQAQ&usg=A0vVaw0XjBFDvLfMrxQ-XiQ8YUCh. [cit. 2023-12-26].

- [25] TEXAS INSTRUMENTS. *Initial position detection for sensorless three phase brushless DC motors*. Online. Texas Instruments. 2017. Dostupné z: <https://www.ti.com/video/5398697443001#transcript-tab>. [cit. 2023-12-26].
- [26] MATHWORKS, INC. *Simulink*. Online. MATHWORKS, INC. MathWorks. © 1994-2024. Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/simulink/index.html?s_tid=srchtitle_site_search_1_simulink. [cit. 2024-04-24].
- [27] MATHWORKS, INC. *Simscape*. Online. MATHWORKS, INC. MathWorks. © 1994-2024. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>. [cit. 2024-04-24].
- [28] NXP. *BLDC Motor Control: Trapezoidal back EMF BLDC motor control techniques*. Online PDF. In: NXP SEMICONDUCTORS. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/brochure/BBCNTRLBLDCART.pdf>. [cit. 2024-04-08].
- [29] LEPKA, Jaroslav a GRASBLUM, Pavel. *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory*. Online, Učební texty ke kurzu. Brno: VUT v Brně, 2011. Dostupné také z: http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_09_1111.PDF.

Seznam symbolů a zkratek

BEMF	Zpětná elektromotorická síla – Back ElectroMotive Force	
BL	bezkartáčový – BrushLess	
BLDC	bezkartáčový stejnosměrný motor – BrushLess DC	
EC	elektronicky komutovaný – Electronically Comutated	
ECM	elektronicky komutovaný motor – Electronically Comutated Motor	
ESC	elektronický regulátor rychlost – Electronic Speed Controller	
FOC	Vektorová regulce – Field Oriented Control	
IPD	Detekce počáteční polohy – Initial position detection	
PMAC	Střídavý motor s permanentními magnety – Permanent Magnet Alternating Current	
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety – Permanent Magnet Synchronous Motor	
PWM	Pulsně šířková modulace – Pulse Width Modulation	
ZCP	Bod průchodu nulou – Zero Crossing Point	
Mm	Moment motoru	(Nm)
Mz	Zátěžný moment	(Nm)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
J	Moment setrvačnosti	(kg/m ²)
Bm	Tlumení motoru	(Nm/(rad/s))
ω_m	mechanická úhlová rychlost	(rad/s)
α	poloha motoru	(°)

Obsah elektronické přílohy

V elektronické příloze jsou přiloženy soubory z Matlabu a Simulinku. V souboru *bldc_par.m* z Matlabu je nastavení modelu ze Simulinku v souboru *bldc_2023b.slx*. Byla použita verze MATLAB R2023b.