



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

F3

**Fakulta elektrotechnická
Katedra měření**

Bakalářská práce

Řízení BLDC motoru s Hallovými sondami pomocí six-step algoritmu v proudovém režimu

Matouš Kulich

Kybernetika a robotika

Květen 2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Stejskal

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kulich** Jméno: **Matouš** Osobní číslo: **498951**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řízení BLDC motoru s Hallovými sondami pomocí six-step algoritmu v proudovém režimu

Název bakalářské práce anglicky:

Control of BLDC Motor with Hall Sensors via Current Mode Six-step Algorithm

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište konstrukci a princip funkce BLDC motoru.
- 2) Uveďte základní algoritmy pro řízení BLDC motorů a proveďte diskuzi jejich hlavních myšlenek.
- 3) Vytvořte simulaci BLDC motoru řízeného pomocí six-step algoritmu v proudovém režimu.
- 4) Implementujte senzorový six-step algoritmus v proudovém režimu a ověřte jeho funkčnost.

Seznam doporučené literatury:

- [1] R. Krishnan, 'Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives,' 1st edition, CRC Press, 616 p., 2010, ISBN 978-0-8247-5384-9
- [2] J. Yiu, 'The Definitive Guide to ARM Cortex -M0 and Cortex-M0+ processors', Elsevier Science&Technology, 864 p., 2013, ISBN:978-0-12408-082-9.
- [3] STMicroelectronics, 'Getting started with the STEVAL-SPIN3202 evaluation board, advanced BLDC controller with embedded STM32 MCU,' UM2278 User manual [on-line]

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Stejskal katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **07.09.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce:

do konce letního semestru 2024/2025

Ing. Jan Stejskal
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování / Prohlášení

Rád bych poděkoval vedoucímu práce panu Ing. Janu Stejskalovi za odborné rady a čas, který mi věnoval při vypracování této práce.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. 5. 2024

.....

Abstrakt / Abstract

Tato bakalářská práce se zaměřuje na bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC) a implementaci řídicího algoritmu six-step v proudovém režimu. V úvodní části je popsána konstrukce BLDC motorů a vysvětleny základní principy jejich fungování. Následně jsou popsány používané řídicí algoritmy FOC (Field Oriented Control) a six-step.

Implementace algoritmu je provedena nejdříve na vytvořeném modelu BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink. Model je vytvořen za využití obvodových rovnic a parametrů motoru LINIX 45ZWN24-40. Na základě těchto simulací je následně implementován six-step řídicí algoritmus na evaluační desce STEVAL-SPIN3202.

Součástí práce je také vytvoření uživatelského rozhraní, které umožňuje monitorovat aktuální stav motoru a upravovat řídicí parametry v reálném čase.

Klíčová slova: BLDC, six-step, proudový režim, STEVAL-SPIN3202, MATLAB, Simulink

This bachelor's thesis focuses on brushless direct current (BLDC) motors and the implementation of a six-step control algorithm in current mode. The introductory section provides a description of BLDC motor construction and explains the fundamental principles of their operation. Subsequently, the Field Oriented Control (FOC) and six-step algorithms used for controlling BLDC motors are described.

The algorithm implementation is first carried out on a BLDC motor model created in the MATLAB/Simulink environment. The model is based on the circuit equations and parameters of the LINIX 45ZWN24-40 motor. Based on these simulations, the six-step control algorithm is then implemented on the STEVAL-SPIN3202 evaluation board.

The thesis also includes the development of a user interface that allows monitoring the current state of the motor and adjusting control parameters in real-time.

Keywords: BLDC, six-step, current mode, STEVAL-SPIN3202, MATLAB, Simulink

Title translation: Control of BLDC Motor with Hall Sensors via Current Mode Six-step Algorithm

Obsah /

1 Úvod	1	4.4 Porovnání metod řízení	15
2 Konstrukce a charakteristické vlastnosti BLDC motorů	2	4.5 Senzorové metody určení polohy rotoru	16
2.1 Charakteristika	2	4.5.1 Hallova sonda	16
2.1.1 Vznik BLDC motorů	2	4.6 Bezsenzorové metody určení polohy rotoru	17
2.2 Stator a rotor	2	4.6.1 Zero-crossing detection	17
2.2.1 Radiální uspořádání	3	5 Simulace BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink	18
2.2.2 Axiální uspořádání	3	5.1 Obvodové rovnice motoru	18
2.2.3 Konstrukční materiály statoru	4	5.1.1 Napěťová rovnice	18
2.2.4 Konstrukční materiály rotoru	4	5.1.2 Vztah pro zpětné indukované napětí	19
2.2.5 Statorové zuby X samonosná konstrukce	4	5.1.3 Momentová rovnice	20
2.3 Cívky BLDC motoru	5	5.1.4 Pohybová rovnice	20
2.3.1 Počet fází	5	5.2 Identifikace parametrů motoru	20
2.3.2 Zapojení vinutí do trojúhelníku	6	5.2.1 Identifikace back-emf a napěťové konstanty	21
2.3.3 Zapojení vinutí do hvězdy	6	5.3 Model motoru v prostředí MATLAB/Simulink	22
2.4 Permanentní magnety	7	5.4 Implementace six-stepového řízení v proudovém režimu	24
2.5 Zpětné indukované napětí	7	5.5 Časové průběhy	26
2.6 Rozdíl mezi BLDC a PM-SM motory	8	6 Implementace six-stepového řízení na evaluační desce STEVAL-SPIN3202	28
2.7 Vlastnosti	8	6.1 Popis evaluační desky STEVAL-SPIN3202 a použitého BLDC motoru LINIX 45ZWN24-4	28
3 Princip fungování BLDC motoru	9	6.1.1 Popis mikrokontroléru STM32F031 a využitých periférií pro implementaci six-stepového řízení	29
3.1 Fyzikální princip fungování BLDC motoru	9	6.2 Konfigurace vstupů a výstupů mikrokontroléru	30
3.1.1 Magnetické pole statoru	9	6.2.1 Snímání polohy a rychlosti rotoru	30
3.1.2 Interakce magnetického pole	10	6.2.2 Spínání tranzistorů	31
3.2 Řídící obvod	10	6.2.3 Regulace proudu motoru	31
3.3 Elektronický komutátor	11	6.3 Řídící algoritmus	32
4 Metody řízení BLDC motorů	12		
4.1 Základní myšlenka řízení BLDC motoru	12		
4.1.1 Prostorový vektor proudu	12		
4.2 Six-stepové řízení	13		
4.2.1 Napěťový režim	14		
4.2.2 Proudový režim	14		
4.3 Vektorové řízení	14		
4.3.1 Clarkové a Parkova transformace	14		
4.3.2 Inverzní Parkova a Clarkové transformace	15		

6.3.1 Spínací sekvence a nastavení parametrů PI regulátoru	33
6.3.2 Rozšíření implementace o další funkce	34
6.3.3 Uživatelské rozhraní	34
6.4 Naměřené průběhy chodu motoru	35
7 Závěr	38
Literatura	39

Tabulky / Obrázky

5.1 Parametry BLDC motoru použité pro simulaci.....	21
5.2 Koeficienty aproximované funkce back-emf	21
5.3 Hodnoty spínacích signálů v závislosti na úhlu natočení rotoru	24
5.4 Parametry PI regulátoru simulace	24
6.1 Přerušování a jejich priority.....	32
6.2 Stavby Hallových sond	33
6.3 Parametry PI regulátoru implementace.....	33
2.1 Radiální uspořádání BLDC motoru.....	3
2.2 Axiální uspořádání BLDC motoru.....	4
2.3 Konstrukce motoru se statorovými zuby	5
2.4 Zapojení vinutí do trojúhelníku ..	6
2.5 Zapojení vinutí do hvězdy	7
2.6 Trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí	8
2.7 Magnetický tok uvnitř permanentních magnetů BLDC motoru	8
3.1 Znázornění magnetického pole cívk [1].....	10
3.2 Znázornění vektorů magnetické indukce statoru a rotoru BLDC motoru [2]	10
3.3 Řídící můstek třífázového BLDC motoru	11
4.1 Prostorový vektor proudu v souřadnicovém systému abc ...	12
4.2 Jednotlivé kroky six-step algoritmu [3].....	13
4.3 Průběh proudu v čase na cívkce .	13
4.4 Grafické znázornění transformací souřadnicového systému .	15
4.5 Hallova sonda [4]	16
5.1 Obvodové schéma BLDC motoru	19
5.2 Aproximace naměřeného zpětného indukovaného napětí.....	22
5.3 Blokové schéma modelu BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink	23
5.4 Blokové schéma řídicího obvodu pro BLDC motor.....	25
5.5 Průběh rozběhu motoru na požadované otáčky	26
5.6 Průběh napětí na jednotlivých svorkách motoru.....	26
5.7 Průběh proudu na jednotlivých fázích motoru	27
5.8 Simulace napěťových průběhů na jedné fázi	27

6.1	Evaluační deska STEVAL-SPIN3202 [5]	28
6.2	Evaluační deska STEVAL-SPIN3202 a použitý BLDC motor LINIX 45ZWN24-4	29
6.3	Schéma propojení jumperů pro využití Hallových sond [5] .	30
6.4	Schéma zapojení výkonových tranzistorů [5]	31
6.5	Obvodové schéma regulace proudu motoru [5].....	32
6.6	Diagram úkonů při přerušení ..	33
6.7	Uživatelské rozhraní pro změnu parametrů řízení a vyčítání rychlosti motoru	35
6.8	Rozběh reálného motoru	36
6.9	Průběhy napětí a proudu při rozběhu motoru	36
6.10	Průběh napětí a proudu při ustáleném chodu motoru.....	37
6.11	Přiblížený průběh napětí a proudu při ustáleném chodu motoru.....	37

Kapitola 1

Úvod

V současném průmyslovém a technologickém prostředí hrají elektromotory klíčovou roli. Využívají se v široké škále zařízení od drobných domácích spotřebičů až po komplexní průmyslové systémy. Provoz těchto zařízení spotřebuje více než 50 % veškeré elektrické energie a s postupnou elektrifikací se předpokládá rostoucí trend tohoto podílu [6]. S tím souvisí i rostoucí důraz na energetickou efektivitu a udržitelnost, což vede k hledání nových technologií a inovací v oblasti elektrických pohonů. Přesně tyto vlastnosti nabízejí bezkartáčové stejnosměrné motory (BLDC) a stávají se tak preferovanou volbou v mnoha odvětvích. Mimo jiné nabízí i vysokou hustotu výkonu, přesnou regulaci otáček a účinnost patřící k nejvyšším mezi elektrickými motory.

S pokračujícím rozvojem technologií řízení a sensoriky bude možné ještě zvýšit jejich spolehlivost a přesnost v rámci složitých automatizovaných systémů. Tyto trendy naznačují, že BLDC motory mají před sebou slibnou budoucnost a budou hrát stále významnější roli v moderním průmyslu a technologickém prostředí.

Hlavním záměrem bakalářské práce je analyzovat a popsat konstrukci bezkartáčových stejnosměrných motorů včetně principu jejich fungování. Společně s tím jsou popsány nejpoužívanější řídicí metody a jejich charakteristické vlastnosti. Dalším cílem této práce bude vytvořit model BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink s implementací six-stepového řídicího algoritmu v proudovém režimu. Tento model bude vytvořen na základě fyzikálního principu a parametrů motoru od firmy LINIX.

V neposlední řadě bude vytvořený model sloužit jako referenční vzor pro implementaci six-stepového algoritmu pro evaluační desku STEVAL-SPIN3202 od firmy STMicroelectronics a motor 45ZWN24-40 od firmy LINIX. V rámci práce bude vytvořeno i uživatelské rozhraní, které umožní snadné ovládání motoru a nastavení parametrů regulátoru. Vznikne tak praktický nástroj pro využití v konkrétních aplikacích.

Tato práce přináší přínos prostřednictvím studia struktury a chování BLDC motoru, a to s důrazem na jejich praktické využití v různých aplikacích. Vytvoření modelu a knihovny pro evaluační desku může sloužit jako praktický nástroj pro vývojáře a studenty, kteří by chtěli navázat na tuto práci, či využít vytvořenou knihovnu pro své projekty.

Kapitola 2

Konstrukce a charakteristické vlastnosti BLDC motorů

Tato kapitola se zaměřuje na popis BLDC motorů z pohledu charakteristiky a konstrukčních prvků BLDC motorů. Je zde zmíněna i historie jejich vzniku a vysvětlen rozdíl mezi motorem typu BLDC a PMSM.

V rámci konstrukčních prvků jsou popsány jednotlivé části motoru jako je stator, rotor, typy vinutí statorových cívek a permanentních magnetů.

2.1 Charakteristika

BLDC¹, neboli bezkartáčový stejnosměrný motor, je moderní typ elektrického motoru, který je svými vlastnostmi a konstrukcí podobný klasickým stejnosměrným motorům s kartáči, též označovanými jako DC. Oproti DC motorům se však liší absencí mechanického komutátoru², který je nahrazen komutátorem elektronickým. Odtud pochází jeho název - bezkartáčový.

BLDC motory se řadí do kategorie synchronních motorů. Označení synchronní znamená, že pohyb rotoru motoru je synchronní s pohybem magnetického pole statoru a nedochází tak k tzv. kluzným otáčkám, které jsou typické pro asynchronní motory.

Ačkoliv se v jejich názvu objevuje označení stejnosměrný (DC), svým principem fungování a charakteristikou se řadí mezi střídavé motory označovanými jako AC.

2.1.1 Vznik BLDC motorů

Vznik BLDC motorů je úzce spojen s vývojem polovodičových technologií v 60. letech 20. století, které umožnily výrobu spolehlivých a výkonných elektronických komutátorů. V roce 1962 T.G. Wilson a P.H. Trickey publikovali ve své práci *D-C machine with solid-state commutation* první návrh a realizaci BLDC motoru s elektronickým komutátorem a jsou tak označováni za jeho vynálezce [7].

2.2 Stator a rotor

Stator a rotor jsou základním konstrukčním prvkem každého elektromotoru. Stator, často označovaný jako neměnná nebo nepohyblivá část, obsahuje vinuté cívky, kterými prochází elektrický proud generující magnetické pole. Naopak rotor představuje pohyblivou část motoru, která koná rotační pohyb kolem statoru a přenáší tak točivý moment na hřídel či na objekt, s kterým chceme pohybovat. Rotor může být vybaven permanentními magnety nebo vinutými cívkami. U BLDC motorů je nejběžnější použití permanentních magnetů, a proto jsou v práci popsána tato konstrukční řešení.

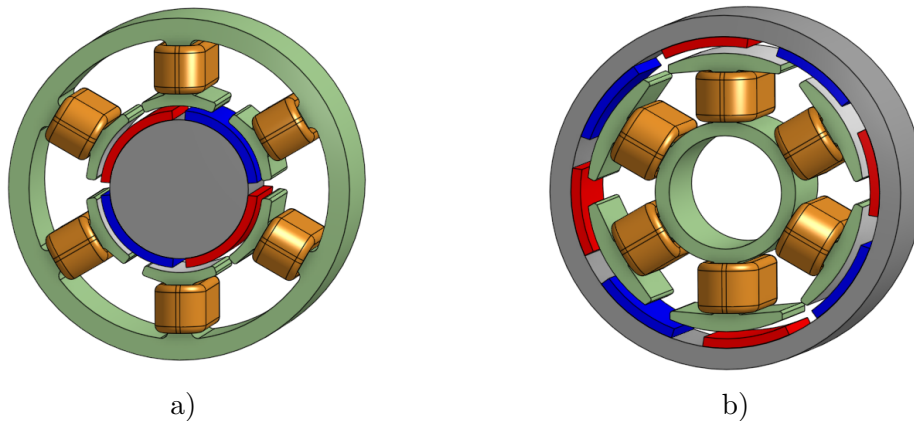
¹ Anglická zkratka pro *Brushless Direct Current*

² Součástka sloužící k přepínání polarit proudů v jednotlivých cívkách motoru. Obsahuje tzv. kartáče, které se třou o lamely. Tímto kontaktem prochází proud do motoru.

BLDC motory se v závislosti na umístění rotoru vůči statoru dělí na radiální a axiální uspořádání. Podle konstrukce statoru se dále rozlišují na motory se statorovými zuby a motory se samonosnou konstrukcí.

2.2.1 Radiální uspořádání

Radiální uspořádání je nejběžnější konstrukční variantou BLDC motorů, kde je rotor a stator umístěn rovnoběžně s osou otáčení. Rotor motoru se tak nachází uvnitř, nebo vně statoru. V obou případech je stator a rotor oddělen vzduchovou mezerou a jediným místem kontaktu je ložiskové uložení rotoru. Příklad BLDC motoru s radiálním uspořádáním lze vidět na obrázku 2.1 níže.



Obrázek 2.1. Radiální BLDC motor a) s rotorem uvnitř statoru b) se státorem uvnitř rotoru

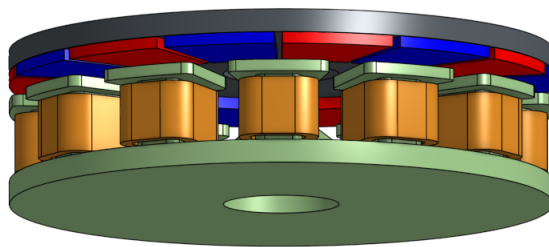
Každý typ má své specifické vlastnosti, které je třeba zvážit při výběru motoru pro konkrétní aplikaci.

V uspořádání s vnějším rotorem působí interakce mezi permanentními magnety a statorovými cívkami ve větší vzdálenosti od osy otáčení a disponují tak vyšším točivým momentem. Vzhledem k této vlastnosti jsou obvykle ve srovnání se svým průměrem kratší. Jsou tak ideální volbou pro aplikace vyžadující vysoký točivý moment s kompaktními rozměry v podélném směru. Nacházejí tak uplatnění například jako pohonné jednotky pro lehké dopravní prostředky, drony či ventilátory [8].

Naopak motory s uspořádáním rotoru uvnitř statoru disponují díky menšímu průměru rotoru nižším momentem setrvačnosti a menšími vibracemi. Dosahují tak lepšího dynamického chování a nižší hlučnosti. Dále díky uzavřené konstrukci jsou méně náchylné na vnější vlivy jako je prach, voda a jiné nečistoty. Jsou rovněž preferovány pro aplikace v blízkosti lidí, neboť obsahují méně volně rotujících součástí představujících riziko úrazu. Nacházejí tak uplatnění nejen jako pohony v robotice a průmyslové automatizaci, ale i v běžné spotřební elektronice jako jsou například vysavače a kuchyňské spotřebiče [8].

2.2.2 Axiální uspořádání

Při axiálním uspořádání jsou plochy rotoru a statoru umístěny rovnoběžně proti sobě. Osa rotace rotoru je pak kolmá k těmto plochám. Příklad jednoduchého BLDC motoru s axiálním uspořádáním je znázorněn na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2. Axiální uspořádání BLDC motoru

Axiální uspořádání nabízí možnost implementace složitějších konstrukčních variant zahrnujících použití více částí rotorů a statorů. Tyto konstrukce umožňují zvýšení výkonu motoru při minimálním nárůstu jeho rozměrů. Hlavní předností axiálního uspořádání je vysoký výkon s kompaktními rozměry, což je ideální pro aplikace s motory zabudovanými do rotujících částí. Typickými příklady jsou pohony pro jízdní kola nebo automobily, kde jsou motory umístěny uvnitř kol [9].

■ 2.2.3 Konstrukční materiály statoru

Statory BLDC motorů jsou obvykle vyrobeny z feromagnetických materiálů jako je například ocel a další kovové slitiny, které poskytují dostatečnou magnetickou propustnost a stabilitu pro správnou funkci motoru [10].

Při rychlé změně magnetického pole uvnitř statoru dochází k zahřívání a ztrátám výkonu v důsledku hystereze a vířivých proudů. Pro potlačení tohoto jevu bývají statory vyrobeny z několika plátů, které jsou následně spojeny nevodivým materiálem dohromady. Čím tenčí tyto pláty jsou, tím menší ztráty vznikají v důsledku vířivých proudů. Dalším řešením je použití slitin s příměsí silikonu nebo kobaltu, které zvyšují elektrický odpor materiálu, a tím snižují velikost vířivých proudů [11].

■ 2.2.4 Konstrukční materiály rotoru

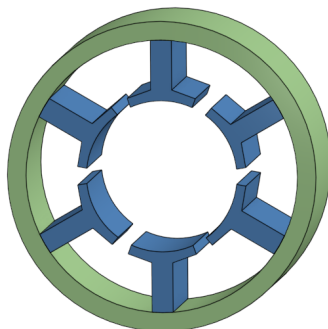
Rotor motoru díky stálému magnetickému poli permanentních magnetů netrpí při nízkých otáčkách výraznými vířivými proudy. Proto se konstrukční materiály nezaměřují na potlačení tohoto jevu, ale na zajištění dostatečné pevnosti a odolnosti rotoru pro přenos točivého momentu na hřídel motoru. Z tohoto důvodu jsou rotory obvykle vyrobeny z ocelových slitin. Pro náročné aplikace s nároky na nízkou hmotnost mohou být použity hliníkové slitiny a kompozitní materiály např. uhlíková vlákna [12].

Ve vysokorychlostních motorech jsou však vířivé proudy značné a mohou se vyskytovat jak v rotoru tak i v samotných permanentních magnetech. Pro eliminaci tohoto jevu mohou být permanentní magnety i rotory složeny z odizolovaných tenkých plátů, podobně jako je tomu u statorů [11].

■ 2.2.5 Statorové zuby X samonosná konstrukce

Statorové zuby slouží k snadnému upevnění statorového vinutí a minimalizují jejich riziko pohybu nebo poškození během provozu motoru. Další výhodou těchto zubů je přispění k rovnoměrnému rozložení magnetického toku generovaného vinutými cívkami.

V neposlední řadě přispívají k efektivnějšímu odvodu tepla z cívek a zlepšují tak tepelné vlastnosti motoru [13].



Obrázek 2.3. Konstrukce motoru se statorovými zuby

Hlavní nevýhodou statorových zubů je nežádoucí interakce mezi zuby a permanentními magnety rotoru. Tato interakce způsobuje tzv. *cogging torque*, což je nežádoucí točivý moment motoru způsobující horší plynulost chodu motoru [10]. Právě tato negativní vlastnost statorových zubů je u samonosné konstrukce eliminována. Cívky samonosné konstrukce jsou umístěny přímo na povrchu statoru a pro jejich fixaci se využívají speciální lepidla [14].

Samonosné konstrukce jsou využívány v lékařských přístrojích vyžadujících vysokou přesnost a plynulost chodu. Pro stejné účely jsou využívány i ve vojenském a leteckém průmyslu [13].

2.3 Cívky BLDC motoru

Cívky do elektromotů jsou nejčastěji vyrobeny z mědi nebo hliníku a jsou vždy opatřeny povrchovou izolací, která zabraňuje vzniku zkratu mezi jednotlivými vinutími. Tato izolace je obvykle zajištěná pomocí speciálních izolačních laků a jejich složení je závislé na konkrétní aplikaci motoru. Základní složkou jsou organické pryskyřice, které zajišťují izolační vlastnosti a odolnost proti vysokým teplotám. Další přidané složky mohou zvyšovat mechanickou pružnost, odolnost proti chemickým látkám i ochraně proti UV záření [15].

Cívky jsou navinuté na stator motoru do tzv. koncentrovaného vinutí. Tedy takovým způsobem, že se jednotlivé fáze nepřekrývají.

BLDC motory se vyznačují několika typy vinutí, které se liší počtem fází a způsobem jejich zapojení. Za předpokladu třífázového motoru se fáze zapojují do tzv. hvězdy nebo do trojúhelníku.

2.3.1 Počet fází

BLDC motory mohou mít 1-fázové, 2-fázové, 3-fázové a multifázové vinutí. Počet fází ovlivňuje nejen jeho účinnost, ale také cenu a složitost řízení. Proto je důležité zvolit takový počet fází, který bude vyhovovat požadavkům konkrétní aplikace.

Jednofázové motory jsou nejjednodušším typem BLDC motoru jak z pohledu konstrukce tak i z pohledu řízení. Disponují však účinností pouze okolo 50 % a nízkým točivým momentem. Další nevýhodou je velké kolísání točivého momentu a možnost rotace pouze v jednom směru. Tyto vlastnosti jsou ale dostačující pro aplikace jako pohony pro jednoduché ventilátory a čerpadla [16].

Dvoufázové motory disponují vyšším točivým momentem a možností rotace v obou směrech. Nabízí i pokročilejší a efektivnější řídicí metody. Při použití jednoduchých řídicích metod však stále trpí značným kolísáním točivého momentu. Své uplatnění nacházejí v kuchyňských spotřebičích, ventilátorech a čerpadlech [17].

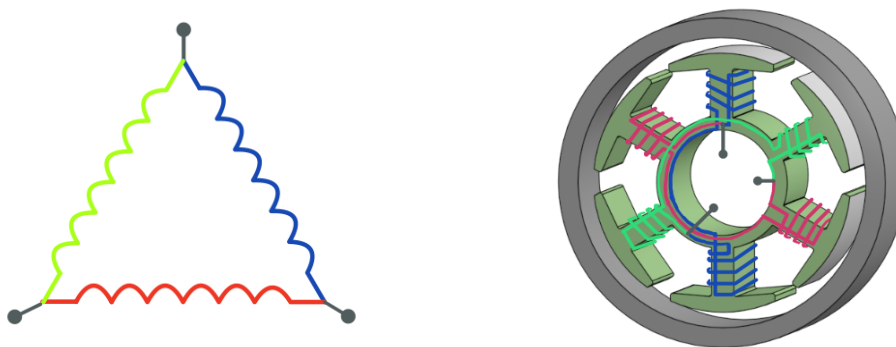
Třífázové motory jsou nejběžnějším typem BLDC motorů. Z tohoto důvodu se práce v této i dalších částech zaměřuje na tento typ motorů. Oproti předchozím typům nabízejí efektivnější řízení a to jak pro jednoduché tak i pokročilejší metody. Třífázové motory se hojně využívají v průmyslové automatizaci, letectví, robotice a v elektromobilních aplikacích.

Multifázové motory jsou nejvýkonnější volbou a oproti předchozím typům nabízí vyšší spolehlivost. Právě díky více fázím jsou schopny pracovat s dostatečnou účinností i při poškození jedné či více fází. Tento typ motoru se využívá například v letectví, kosmonautice či ve vojenském průmyslu [7].

2.3.2 Zapojení vinutí do trojúhelníku

Zapojení vinutí do trojúhelníkové konfigurace je dosaženo propojením všech fází, přičemž tyto fázové spoje slouží jako vstupy motoru. Kvůli uzavřenému obvodu může docházet ke vzniku tzv. oběhového proudu. Ten vzniká při změně magnetického toku v cívkách v důsledku pohybu rotoru, což indukuje napětí a způsobuje tak proud mezi fázemi motoru. Tento jev může způsobit zahřívání a ztráty výkonu, které negativně ovlivňují jeho účinnost a životnost [10].

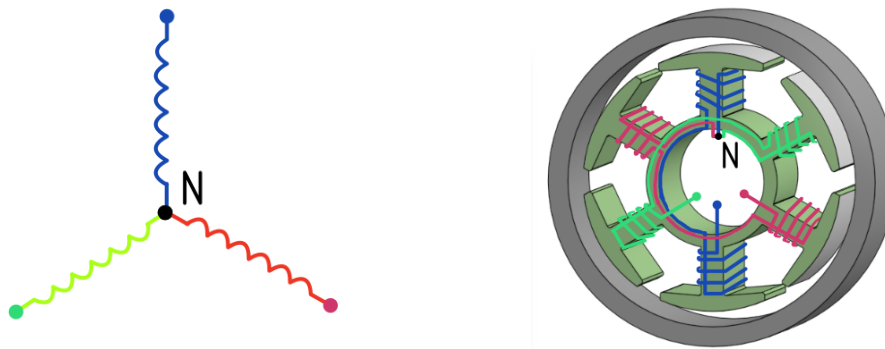
Výhodou tohoto zapojení je vyšší počáteční proud při rozběhu motoru. Důsledkem toho motor disponuje vyšším počátečním točivým momentem. Další výhodou je nižší zpětně indukované napětí, díky čemuž lze dosahovat vyšších maximálních otáček. Vinutí do trojúhelníku nabízí i snadnější výrobní procesy a nižší náklady na výrobu. I tento faktor přispívá k tomu, že je vinutí do trojúhelníku upřednostňováno v malých BLDC motorech pro běžné spotřebitelské aplikace [18].



Obrázek 2.4. Vinutí cívek do trojúhelníku ve schématu a při realizaci

2.3.3 Zapojení vinutí do hvězdy

Zapojení vinutí do hvězdy je realizováno spojením jednotlivých fází do jednoho tzv. neutrálního bodu. Oproti trojúhelníkovému zapojení jsou počáteční proudové špičky menší a motor je tak méně zatěžován.



Obrázek 2.5. Vinutí cívek do hvězdy ve schématu a při realizaci

Obvod je oproti trojúhelníkovému zapojení otevřený a nevzniká tak oběhový proud. To má za následek přesnější a efektivnější řízení. Tyto vlastnosti umožňují motoru dosahovat vyšší účinnosti a delší životnosti [18].

2.4 Permanentní magnety

Permanentní magnety jsou umístěny na/v rotoru motoru a generují magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem statoru. Dle počtu magnetů v motoru se určí počet tzv. pól párů. Každý pól pár je tvořen dvojicí permanentních magnetů v opačné polaritě.

Pro BLDC motory se využívají především neodymové, feritové a samario-kobaltové magnety. Každý z uvedených typů magnetů disponuje odlišnými vlastnostmi. Proto je důležité zvolit takový typ magnetu, který bude vyhovovat požadavkům konkrétní aplikace.

Pro velmi výkonné a účinné motory se používají neodymové magnety, které disponují nejvyšší energií na jednotku objemu (1,2 - 1,4 T). Jejich nevýhodou je však náchylnost k odmagnetování a ke korozi, kvůli které musí být opatřeny povrchovou izolací. Jsou také stabilní pouze při teplotách do 80 - 230 °C v závislosti na třídě. Jsou tak využívány např. v průmyslovém odvětví, kde lze zajistit ideální prostředí pro jejich provoz [14].

Pro aplikace vyžadující větší odolnost vůči vyšším teplotám, odmagnetování a korozi se používají samario-kobaltové magnety. Tyto magnety dokáží pracovat v teplotách až 300 °C a dosahují magnetické indukce až 0,9 - 1,1 T [14].

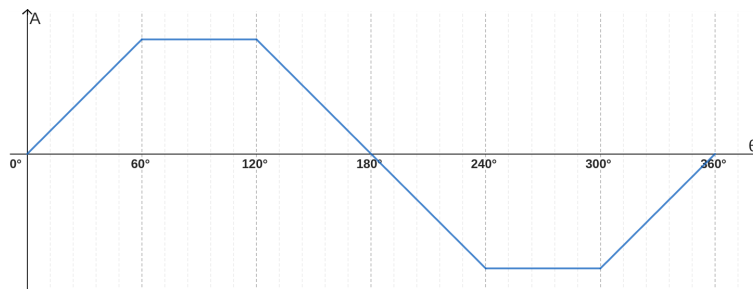
Feritové magnety jsou ekonomicky nejvýhodnější a jsou tak využívány v levných BLDC motorech pro běžné spotřebitelské aplikace. Dokáží pracovat v teplotách až 250 °C a jsou odolné vůči korozi a odmagnetování. Nevýhodou oproti výše zmíněným typům je nižší energie na jednotku objemu (0,4 - 0,5 T) [14].

Obecně nelze magnety pravidelně vystavovat jejich maximálním teplotám, neboť by docházelo k jejich degradaci a ztrátě magnetických vlastností. Z tohoto důvodu je nezbytné zajistit dostatečné chlazení motoru, aby nedocházelo k přehřívání a poškození magnetů.

2.5 Zpětné indukované napětí

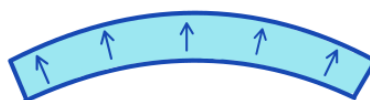
Při pohybu rotoru s permanentními magnety v blízkosti vodivých cívek statoru dochází k indukci napětí na cívkách. Toto napětí bývá označováno jako zpětné indukované

napětí, nebo zkráceně back-emf³. Tento jev je přítomný u všech synchronních motorů. Typickým znakem BLDC motorů je trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí [7].



Obrázek 2.6. Trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí

Tento tvar je způsoben použitím koncentrovaného vinutí statorových cívek a permanentních magnetů s vnitřním magnetickým tokem kolmým k povrchu rotoru [10].



Obrázek 2.7. Magnetický tok uvnitř permanentních magnetů BLDC motoru

2.6 Rozdíl mezi BLDC a PMSM motory

PMSM⁴ motory jsou dalším typem synchronních motorů. S BLDC motory sdílejí mnoho společných vlastností a konstrukčních podobností. PMSM motory však využívají vinutí distribuované a jsou osazeny permanentními magnety s paralelní magnetizací. Tato rozdílnost má za následek odlišný tvar zpětného indukovaného napětí, který je u PMSM motorů sinusoidní [10, 19].

2.7 Vlastnosti

Díky výše uvedeným konstrukčním prvkům dosahují BLDC motory vysoké účinnosti a dlouhé provozní životnosti. Vyznačují se také schopností generovat vysoký točivý moment, což společně s lehkou a kompaktní konstrukcí vede k vysoké hustotě výkonu⁵ [7, 19].

Dále s využitím optimalizovaných řídicích metod disponují přesnou a dynamickou regulací otáček a jsou schopny dosáhnout vysokých otáček přesahujících 100 000 ot/min [14].

Absence mechanického komutátoru eliminuje hluk a problémy spojené s nežádoucím jiskřením, což rozšiřuje možnosti využití BLDC motorů i v prostředích, kde klasické DC motory použít nelze.

³ Zkratka anglického výrazu *Back Electromotive Force*

⁴ Zkratka anglického výrazu *Permanent Magnet Synchronous Motor*

⁵ Výkon v poměru s hmotností a objemem motoru

Kapitola 3

Princip fungování BLDC motoru

Tato kapitola se zaměřuje na popis fyzikálního principu fungování BLDC motoru. Dále je představen řídicí obvod motoru a podmínky pro dosažení efektivního řízení.

3.1 Fyzikální princip fungování BLDC motoru

Vytváření točivého momentu v BLDC motoru je založeno na interakci magnetického pole generovaného statorovými cívkami s magnetickým polem rotoru.

3.1.1 Magnetické pole statoru

Generování magnetického pole statoru je možné na základě Ampérova zákona, dle kterého proud procházející vodičem vyvolává magnetické pole, jehož směr je kolmý na směr proudu. Velikost magnetického toku¹ tohoto pole lze vyjádřit pomocí Hopkinsova zákona jako [20]:

$$\phi = G_m U_m \quad (4.1)$$

kde G_m je magnetická vodivost a U_m je magnetomotorické napětí. Magnetická vodivost vyjadřuje schopnost materiálu vést magnetický tok a platí pro ni vztah $G_m = \frac{\mu S}{l}$, kde μ je permeabilita prostředí, S průřez cívky a l je její délka. V případě cívky platí, že magnetomotorické napětí je rovno součinu proudu procházejícího cívkou s počtem závitů dané cívky. Tedy $U_m = NI$. Při vynásobení rovnice počtem závitů cívky se vyjádří vztah pro její celkový spřažený tok se všemi závity [20].

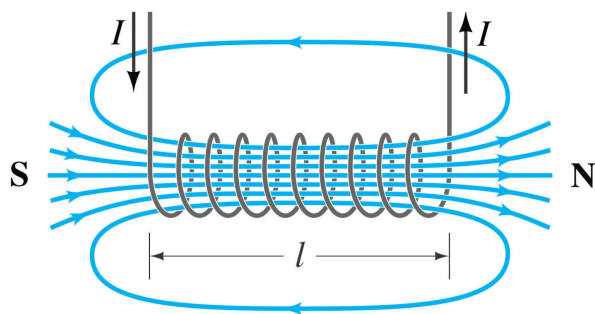
$$\psi = N\phi = G_m N^2 I \quad (4.2)$$

Výraz $N^2 G_m$ vyjadřuje vlastní indukčnost cívky. Tato veličina se značí jako L a vyjadřuje schopnost cívky vytvářet magnetické pole. Celkový magnetický tok cívky tak lze vyjádřit jako [20]:

$$\psi = LI \quad (4.3)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že magnetický tok ovlivňuje nejen velikost a směr proudu, ale i vlastní indukčnost cívky a prostředí, ve kterém se cívka nachází. V případě, že je v prostředí feromagnetické jádro, je magnetické pole vytvářené cívkou výrazně zesíleno, čehož se využívá u drážkových BLDC motorů.

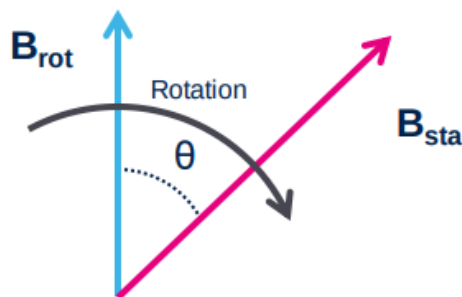
¹ Magnetický tok je vektorová veličina vyjadřující množství magnetického pole procházejícího danou plochou.



Obrázek 3.1. Znázornění magnetického pole cívky [1]

3.1.2 Interakce magnetického pole

Statorové cívky vytvářejí magnetické pole, které následně interaguje s polem permanentních magnetů. V případě rozdílných směrů magnetické indukce² těchto polí dochází k vytvoření točivého momentu, který se tato pole snaží srovnat.



Obrázek 3.2. Znázornění vektorů magnetické indukce statoru a rotoru BLDC motoru [2]

Hodnotu točivého momentu mezi statorem a rotorem lze v takovém případě vyjádřit jako [2]:

$$T_q = |\mathbf{B}_{sta}| |\mathbf{B}_{rot}| \sin(\theta) \quad (4.4)$$

kde θ je úhel mezi těmito vektory.

Z rovnice 4.3 a 4.4 je zřejmé, že množství a směr procházejícího proudu cívkou ovlivňuje statorové magnetické pole a tím i směr a velikost točivého momentu motoru. Tento směr a velikost je možné regulovat pomocí řídicího obvodu.

3.2 Řídicí obvod

Řídicí obvod se skládá z výkonové a řídicí části. Výkonová část zajišťuje tok elektrické energie do motoru a řídicí část tento tok řídí. Obě tyto části jsou navrženy dle požadavků aplikace a mohou se lišit v závislosti na typu zdroje napětí a použitých metod řízení [19].

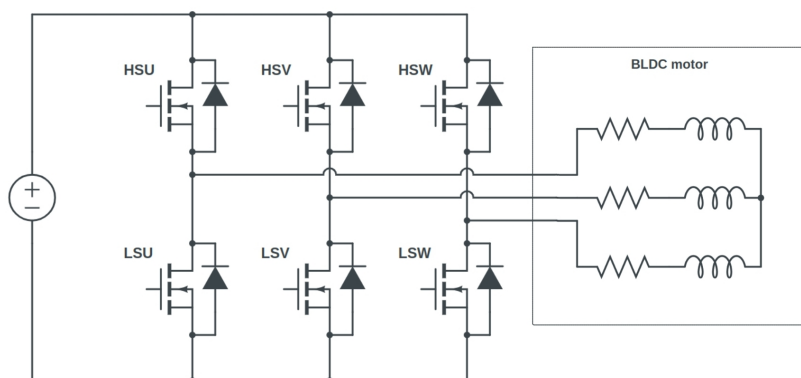
Pro BLDC motory je typické použití stejnosměrného zdroje napětí. Hlavními komponentami řídicího obvodu je elektronický komutátor a mikrokontrolér. Elektronický komutátor zajišťuje tok elektrického proudu do motoru a mikrokontrolér toto množství reguluje. Takto sestrojený řídicí obvod bývá označován jako invertor či měnič [14].

² Magnetická indukce je veličina vyjadřující magnetické pole v daném bodě prostoru a je definována jako $\mathbf{B} = \frac{\Phi}{S}$.

3.3 Elektronický komutátor

Elektronický komutátor je sestaven z tzv. půlmůsteků, přičemž každý půlmůstek se skládá ze dvou spínačů. Pro tyto účely spínání se dle potřeb nejčastěji využívají tranzistory typu MOSFET nebo IGBT. Každý půlmůstek je připojen k jedné fázi motoru, což umožňuje buď přivedení napětí zdroje na danou fázi, nebo její uzemnění. Tímto způsobem lze řídit tok proudu a směr otáčení motoru [19].

Tranzistory spínající napětí zdroje jsou označeny HS (high side) a tranzistory spínající zem jsou označeny jako LS (low side). Jednotlivé fáze motoru jsou označeny U, V a W. Kombinace těchto dvou označení pak tvoří označení pro jednotlivé tranzistory. Toto označení není standardizované, ale bude použito i v následujících částech práce.



Obrázek 3.3. Řídící můstek třífázového BLDC motoru

Při průchodu proudem cívkou a náhlém rozpojení obvodu spínači je vytvořeno na cívce velmi vysoké napětí, což představuje destruktivní riziko pro tranzistory. Pro ochranu tranzistorů před tímto jevem jsou přítomny zpětné diody, které umožňují bezpečné vyvedení proudu z cívek.

Kapitola 4

Metody řízení BLDC motorů

Tato kapitola se zabývá popisem základních algoritmů pro řízení BLDC motorů. Jsou popsány metody six-step a vektorové řízení (FOC). Dále jsou zmíněny i základní senzorové a bezsenzorové metody pro určení úhlu natočení rotoru.

4.1 Základní myšlenka řízení BLDC motoru

Z rovnice 3.2 je zřejmé, že maximální točivý moment lze získat právě tehdy, když magnetické pole rotoru a statoru svírá pravý úhel. Této vlastnosti se využívá při řízení BLDC motoru a je základem pro všechny řídicí algoritmy za účelem dosažení maximální účinnosti.

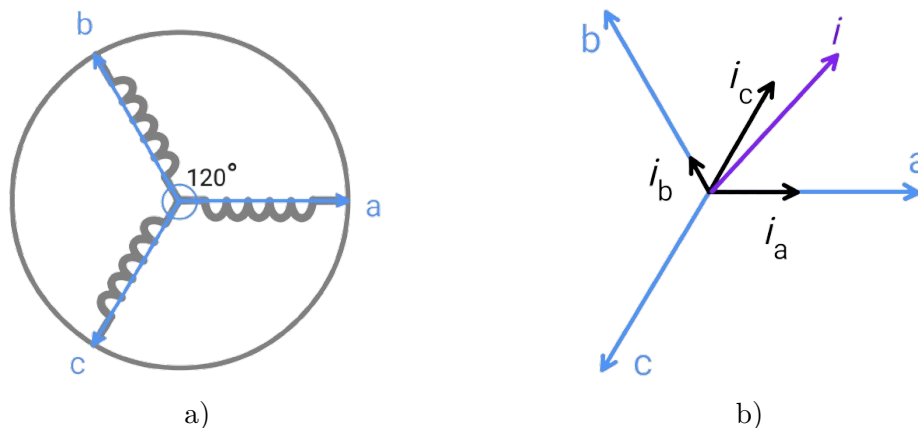
Orientaci magnetického pole lze regulovat pomocí směru a velikosti procházejícího proudu fázemi motoru. Na obrázku 3.1 je znázorněno, že polarita magnetického pole odpovídá směru proudu cívkou. Tato charakteristika umožňuje nahlížet na magnetické pole statoru z pohledu prostorového vektoru proudu.

4.1.1 Prostorový vektor proudu

Za předpokladu třífázového motoru lze prostorový vektor graficky znázornit v abc souřadnicovém systému, kde jednotlivé osy představují cívky motoru a vektory na těchto osách odpovídají směru a množství proudu procházejícího jednotlivými cívkami.

Prostorový vektor proudu i pak odpovídá vektorovému součtu vektorů (i_a, i_b, i_c) a představuje orientaci a intenzitu magnetického pole statoru. Souřadnicový systém abc a význam prostorového vektoru proudu je znázorněn na obrázku 4.1.

Řídicí metody se tak snaží regulovat orientaci a velikost tohoto vektoru tak, aby bylo dosaženo maximálního točivého momentu motoru.

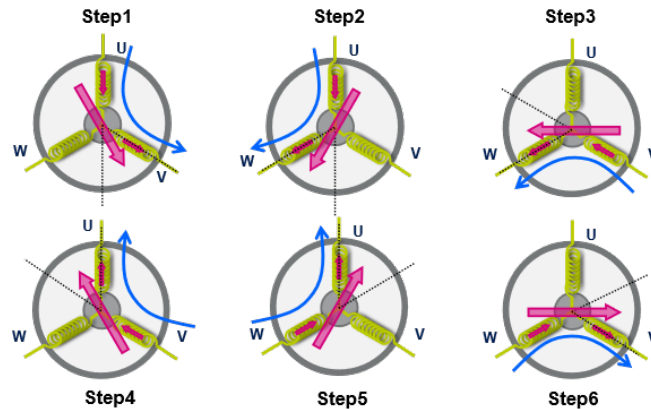


Obrázek 4.1. a) Souřadnicový systém abc b) Prostorový vektor proudu

4.2 Six-stepové řízení

V rámci algoritmu six-step je na jednu fázi motoru přivedeno kladné napětí zdroje a jedna fáze je uzemněna. Během jedné rotace motoru tak dochází k šesti možným kombinacím spínání, které tvoří šestistupňový cyklus. Orientace magnetického pole statoru tak nabývá pouze šesti možných směrů vychýlených o 60° [3].

Možné kombinace spínání fází motoru jsou znázorněny na obrázku 4.2. Jednotlivé spínací sekvence jsou voleny tak, aby vytvořené statorové magnetické pole svíralo s magnetickým polem rotoru nejkolmější možný úhel.

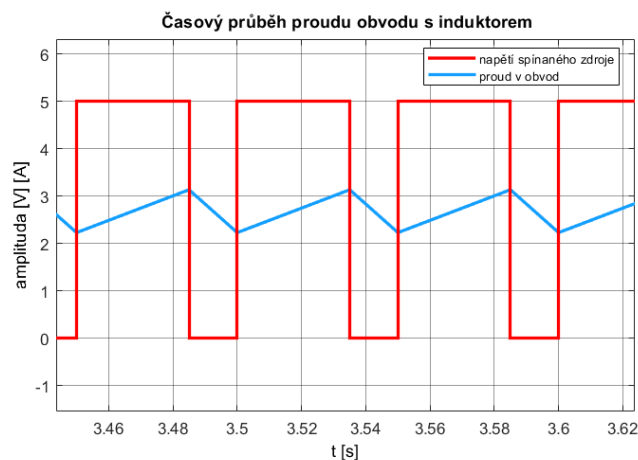


Obrázek 4.2. Jednotlivé kroky six-step algoritmu [3]

Kolmost statorových a rotorových polí nastává pouze v jedné poloze během dané sekvence. Z tohoto důvodu je u six-stepu přítomný tzv. *torque ripple*, tedy kolísání točivého momentu motoru [7].

Přepnutí jednotlivých spínacích sekvencí je řízeno na základě informace o poloze rotoru. V momentě, kdy je statorové a magnetické pole vychýleno o méně jak 60° , je ideální provést přepnutí na další spínací sekvenci.

Pro řízení točivého momentu je nezbytné regulovat množství proudu procházejícího motorem. Tato regulace se provádí například spínáním a rozpínáním přívodu napětí na dané fáze a indukčnost cívky poskytuje postupné vyhlazení proudu procházejícího motorem. Při dostatečně rychlém spínání lze snadno regulovat intenzitu magnetického pole statoru a tím i točivý moment motoru. Metody regulace proudu se dělí na proudový a napěťový režim.



Obrázek 4.3. Průběh proudu v čase na cívce s dostatečně rychlým spínáním

4.2.1 Napěťový režim

Napěťový režim umožňuje nepřímé řízení proudu do motoru pomocí regulace střední hodnoty napětí přivedeného na motor. To lze implementovat pomocí pulzně šířkové modulace (PWM¹), která spíná tranzistory elektronického komutátoru. Při požadavku na zvýšení točivého momentu se zvýší střída PWM a tím i střední hodnota napětí na motoru. To má poté za následek zvýšení proudu a točivého momentu motoru [3].

4.2.2 Proudový režim

Proudový režim je založen na porovnávání referenční a skutečné hodnoty proudu procházejícího motorem. Pokud je referenční hodnota nižší než skutečná hodnota proudu, HS tranzistory odpojí motor po dostatečnou dobu od zdroje napětí. Množství proudu procházejícího motorem se zjišťuje měřením úbytku napětí na známém rezistoru, který může být umístěn např. za LS tranzistory [3].

4.3 Vektorové řízení

Vektorové řízení (FOC²) představuje velmi účinnou a efektivní metodu řízení využívanou pro synchronní i asynchronní motory, díky které lze kontrolovaně rotovat magnetickým polem statoru a zachovat tak kontinuální ortogonalitu³ mezi magnetickým polem statoru a rotoru.

Základním prvkem vektorového řízení je transformace proudů motoru z trojfázového stacionárního systému do dvoufázového rotačního systému. Tato transformace umožňuje snadné regulování jednotlivých složek proudového vektoru a tím dosáhnout optimálního točivého momentu motoru. Jsou známé jako Clarkové a Parkova transformace a v následujících částech budou popsány základní principy těchto transformací.

4.3.1 Clarkové a Parkova transformace

Clarkové transformace převádí trojfázový souřadnicový systém abc na dvoufázový souřadnicový systém $\alpha\beta$, kde lze sestavit prostorový vektor proudu součtem vektorů i_α a i_β . Matematicky lze transformaci vyjádřit dle následující rovnice [21]:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Parkova transformace převádí stacionární souřadnicový systém $\alpha\beta$ na rotační souřadnicový systém dq, kde úhel rotace θ odpovídá úhlu natočení magnetického pole rotoru vůči ose α . Transformační vztah lze vyjádřit následovně [21]:

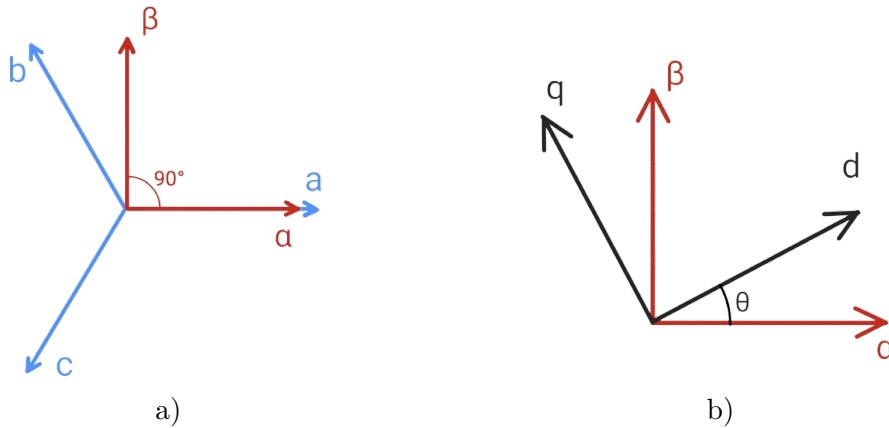
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Vizuálně jsou transformace znázorněny na obrázku 4.4.

¹ Pulse Width Modulation

² Field Oriented Control

³ Jiné označení pro kolmost



Obrázek 4.4. Grafické znázornění a) Clarkové transformace b) Parkova transformace

Zavedení rotačního souřadnicového systému zjednodušuje pohled na složky proudu i_d a i_q , neboť jednotlivé složky jsou položeny do souřadnicového systému otáčejícího se stejnou rychlostí jako rotor. Díky této vlastnosti se pro ustálené stavové podmínky hodnoty proudu i_d a i_q s úhlem natočení rotoru nemění, což umožňuje řídit jednotlivé složky proudu obdobně jako v případě stejnosměrného motoru např. pomocí regulátoru PI [22].

BLDC motory disponují permanentními magnety, které vytváří konstantní magnetické pole rotoru. Z tohoto důvodu se složka proudu i_d reguluje na nulovou hodnotu a točivý moment motoru je pak regulován složkou proudu i_q [10].

Výstupní hodnoty PI regulátoru odpovídají napěťovým složkám v_d a v_q . Tyto složky vytváří napěťový prostorový vektor statoru, který je třeba převést do trojfázového souřadnicového systému abc.

4.3.2 Inverzní Parkova a Clarkové transformace

Inverzní Parkova a Clarkové transformace převádí napěťové složky v_d a v_q do trojfázového souřadnicového systému abc, kde složky v_a , v_b a v_c slouží jako vstupní hodnoty pro modulační techniky napětí.

Následující vztahy popisují Parkovu a Clarkové inverzní transformace [22]:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Nejpoužívanějšími modulacemi napětí v rámci FOC se v průmyslových aplikacích využívají SVPWM⁴ a SPWM⁵ [23].

4.4 Porovnání metod řízení

Při porovnání vektorového řízení a metody six-step je zřejmé, že vektorové řízení umožňuje pokročilejší a přesnější řízení motoru. Zvláště FOC nabízí precizní řízení motoru i při nízkých rychlostech. Nicméně tato metoda vyžaduje značně vyšší výpočetní výkon

⁴ Space Vector Pulse Width Modulation

⁵ Sinusoidal Pulse Width Modulation

kvůli složitým výpočtům transformací. Kromě toho je nutné použít přesnější bezsenzorové metody nebo senzory ke zjištění polohy rotoru, což zvyšuje náročnost implementace algoritmu.

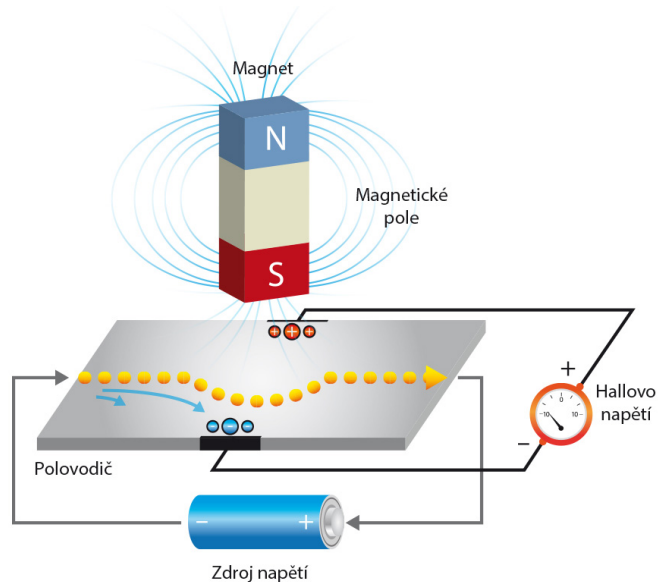
Naopak six-step řízení nabízí snadnou implementaci s minimálními nároky na výpočetní výkon a přesnost informace o úhlu natočení rotoru. Tyto výhody činí six-step řízení atraktivním pro aplikace, které nevyžadují tak vysokou úroveň přesnosti a kde je důležitější jednoduchost implementace a nízké nároky na výpočetní výkon. Je však třeba poznamenat, že menší přesnost informace o úhlu natočení rotoru může vést k omezené použitelnosti metody při nízkých otáčkách motoru.

4.5 Senzorové metody určení polohy rotoru

Senzorové metody pro určení polohy rotoru využívají fyzikální jevy k získání informací o poloze. Nejpoužívanějšími senzory jsou Hallovy sondy, enkodéry a resolvers, z nichž každý má své specifické výhody a oblasti použití. Tyto senzory se vyznačují spolehlivostí a přesností, které si zachovávají i při nízkých otáčkách. Z pohledu řízení motoru algoritmem typu six-step je však výhodné použití Hallových sond.

4.5.1 Hallova sonda

Hallova sonda je senzor využívající Hallova jevu k detekci magnetického pole. Základním prvkem této sondy je polovodičová destička, jíž prochází proud elektronů. Magnetické pole tyto elektrony vychyluje z přímé trajektorie a lze tak naměřit rozdíl potenciálu na stranách této destičky. Výstupní napětí je však velmi malé a musí být zesíleno zesilovačem [14].



Obrázek 4.5. Hallova sonda [4]

Pro detekci polohy v BLDC motorech jsou vhodné Hallovy sondy s digitálním výstupem. Tedy sondy, které mají výstupní hodnotu 0 V, nebo hodnotu VCC⁶. Za tímto účelem mají Hallovy sondy zabudovaný Schmittův klopný obvod, který zajišťuje přepínání výstupní hodnoty dle magnetického pole působícího na Hallovu sondu.

⁶ Voltage Common Collector je označení pro hodnotu napájecího napětí

Tyto sondy bývají umístěny na statoru motoru a sledují pohyb rotoru. V závislosti na počtu fází motoru je třeba použít jednu, nebo více Hallových sond. Pro třífázový motor se používají tři Hallovy sondy, které jsou umístěny ve 120° úhlu.

Hallovy sondy nedokáží určit přesnou polohu rotoru, ale při použití metody six-step poskytují informaci k přepnutí komutace.

4.6 Bezsenzorové metody určení polohy rotoru

Určení polohy rotoru bez použití senzorů využívá měření zpětného indukovaného napětí na fázích motoru. Pro určení polohy na základě tohoto napětí existuje několik metod, které se liší přesností a náročností na výpočetní výkon.

Nejjednodušším a nejpoužívanějším způsobem pro určení polohy rotoru je metoda zero-crossing detection, která je bezsenzorovou alternativou Hallových sond.

Další metody využívají kromě naměřeného zpětného indukovaného napětí i znalosti parametrů motoru. Na základě těchto znalostí je možné určit polohu rotoru s větší přesností. Mezi tyto metody patří např. analýza fázových proudů, Luenbergerův pozorovatel, Kalmanův filtr a odhady polohy pomocí strojového učení.

4.6.1 Zero-crossing detection

Tato metoda patří mezi nejjednodušší a nejběžnější bezsenzorové metody pro určení polohy v řídicí metodě six-step. Dále je také ideální alternativou k Hallovým sondám, neboť detekuje polohu rotoru pouze při průchodu známým úhlem. Metoda je založena na měření napětí na plovoucí fázi motoru, které vzniká v důsledku zpětného indukovaného napětí. Při detekci průchodu napětí nulovou hodnotou se motor nachází ve známé poloze a lze s touto informací dále pracovat. V závislosti na typu vinutí motoru a výpočetním výkonu mikrokontroléru může být implementována několika způsoby.

Základní metoda spočívá v měření napětí plovoucí fáze motoru vůči zemi. V takovém případě nastavá průchod nulovou hodnotou 30° před bodem komutace. Je tedy nezbytné z informace o aktuální rychlosti motoru odhadnout, kdy bod komutace nastane [24].

Další metoda spočívá ve vytvoření virtuálního neutrálního bodu. Ten lze realizovat propojením fází motoru přes shodné odpory do jednoho společného bodu. Poté není nutné měřit napětí na plovoucích fázích, ale stačí měřit napětí na virtuálním neutrálním bodě. Při hodnotě napětí odpovídající polovičnímu napětí zdroje se rotor nachází v bodě komutace. Z tohoto důvodu se napětí virtuálního bodu nejčastěji měří vůči poloviční hodnotě napětí zdroje a průchod nulovou hodnotou tak přímo detekuje bod komutace [25].

V případě BLDC motoru s vinutím typu hvězda lze při vyvedeném neutrálním bodě měřit napětí mezi plovoucí fází a neutrálním bodem. Průchod napětí nulovou hodnotou pak odpovídá bodu komutace [7].

Avšak při nízkých otáčkách je zpětné indukované napětí velmi slabé a metody jsou nepřesné. Pro zvýšení přesnosti je možné měřené napětí filtrovat či integrovat a zvýšit tak citlivost detekce. To však zvyšuje nároky na výpočetní výkon mikrokontroléru.

Kapitola 5

Simulace BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink

Tato kapitola se zabývá simulací BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink. Jsou zde uvedeny obvodové rovnice BLDC motoru a parametry motoru použité pro simulaci. Dále jsou popsány jednotlivé bloky motoru a řídicího obvodu pro algoritmus six-step v proudovém režimu a v neposlední řadě jsou uvedeny výsledné průběhy simulace.

5.1 Obvodové rovnice motoru

Analytický popis BLDC motoru vede k velmi komplexním úvahám založeným na analýze Fourierových řad jednotlivých veličin. Pro účely simulací však postačí zjednodušený popis pomocí obvodových rovnic, které jsou platné za těchto předpokladů [26]:

- rovnoměrné rozložení vzduchové mezery
- symetrické vinutí statoru zapojené do hvězdy
- stejné, časově nezávislé odpory a indukčnosti všech vinutí
- zanedbání hysteretických ztrát a ztrát způsobených vířivými proudy
- radiální uspořádání rotoru a statoru

V následujících podkapitolách budou popsány čtyři klíčové obvodové rovnice a vysvětlen jejich význam při modelování fyzikálního chování BLDC motoru.

5.1.1 Napěťová rovnice

Napěťová rovnice představuje klíčovou komponentu pro modelování BLDC motoru. Z pohledu jedné fáze lze napěťovou rovnici vyjádřit jako:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (5.1)$$

kde u je fázové napětí, R je odpor vinutí, i je proud procházející fází, L je vlastní indukčnost cívky a e je zpětné indukované napětí.

V případě třífázového motoru se jednotlivé fáze navzájem ovlivňují, neboť v důsledku proudu procházejícího jednou fází dochází k indukování napětí ve fázích ostatních a napěťové rovnice jsou tak rozšířeny o vzájemné indukčnosti M mezi fázemi [26]. Za předpokladu výše uvedených předpokladů lze napěťové rovnice vyjádřit následovně:

$$u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + M \left(\frac{di_b}{dt} + \frac{di_c}{dt} \right) + e_a \quad (5.2)$$

$$u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + M \left(\frac{di_c}{dt} + \frac{di_a}{dt} \right) + e_b \quad (5.3)$$

$$u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + M \left(\frac{di_a}{dt} + \frac{di_b}{dt} \right) + e_c \quad (5.4)$$

Z Kirchhoffova zákona plyne, že součet jednotlivých proudů je roven nule, tedy $i_a + i_b + i_c = 0$. Pomocí tohoto zákona lze napěťové rovnice zjednodušit a eliminovat výskyt všech proudů v jednotlivých rovnicích [7]:

$$u_a = Ri_a + \frac{di_a}{dt}(L - M) + e_a \quad (5.5)$$

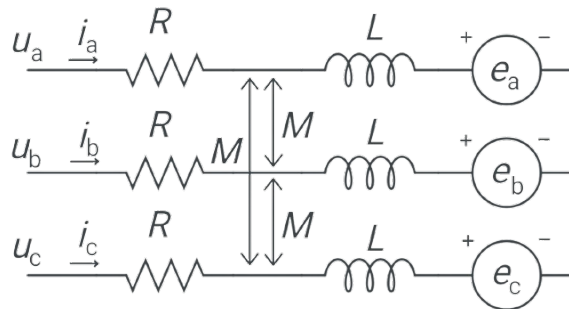
$$u_b = Ri_b + \frac{di_b}{dt}(L - M) + e_b \quad (5.6)$$

$$u_c = Ri_c + \frac{di_c}{dt}(L - M) + e_c \quad (5.7)$$

Popřípadě v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} (L - M) & 0 & 0 \\ 0 & (L - M) & 0 \\ 0 & 0 & (L - M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

Na obrázku 5.1 je znázorněno obvodové schéma motoru s vyznačenými veličinami napěťových rovnic.



Obrázek 5.1. Obvodové schéma BLDC motoru

5.1.2 Vztah pro zpětné indukované napětí

Z kapitoly 2.5 je známo, že zpětné indukované napětí vzniká v důsledku elektromagnetické indukce a jeho tvar je závislý na typu vinutí a rozložení magnetického pole v motoru. Amplituda back-emf je závislá na úhlu natočení rotoru θ a elektrické úhlové rychlosti rotoru¹ ω_e . Vztah pro zpětné indukované napětí tak lze vyjádřit jako [10]:

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = k_e \omega_e \begin{bmatrix} f(\theta) \\ f(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ f(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

kde k_e je napěťová konstanta a funkce $f(\theta)$ je funkce vyjadřující tvar zpětného indukovaného napětí v závislosti na úhlu natočení rotoru θ . Součin napěťové konstanty a funkce $f(\theta)$ vyjadřuje amplitudu zpětného indukovaného napětí při elektrické úhlové rychlosti rotoru $\omega_e = 1$. Napěťová konstanta k_e tak není univerzální hodnotou, ale závisí na konkrétním motoru.

¹ Elektrická úhlová rychlost lze vypočítat z mechanické úhlové rychlosti jako $\omega_e = p\omega_m$, kde p je počet pól párů motoru a ω_m je mechanická úhlová rychlost.

5.1.3 Momentová rovnice

Momentová rovnice vyjadřuje vztah pro výstupní elektromagnetický točivý moment motoru T_m generovaný elektromagnetickým polem. Tento moment lze vyjádřit přes výkon ve vzduchové mezeře P_m a mechanickou úhlovou rychlost motoru ω_m jako:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (5.10)$$

V případě BLDC motoru lze zjednodušeně výkon ve vzduchové mezeře vyjádřit jako součet výkonů na jednotlivých fázích. Hodnoty těchto výkonů lze stanovit pomocí součinu zpětného indukovaného napětí a proudu na dané fázi [10, 26]. Momentová rovnice tak lze formulovat jako:

$$T_m = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (5.11)$$

5.1.4 Pohybová rovnice

Pohybová rovnice vyjadřuje vztah pro dynamiku motoru a popisuje tak vazbu mezi generovaným elektromagnetickým točivým momentem ústrojí T_m , zátěžným momentem T_1 , momentem setrvačnosti J a ztrátami způsobenými třecími silami na ložiscích rotoru. Pohybovou rovnicí je možné vyjádřit jako [26]:

$$T_m - T_1 = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_t \omega_m \quad (5.12)$$

kde B_t je koeficient určující třecí moment.

5.2 Identifikace parametrů motoru

Pro vytvoření modelu BLDC motoru odpovídajícího reálnému chování motoru 45ZWN24-40 od firmy LINIX je nezbytné využít jeho parametrů. Takovými parametry jsou fázový odpor R , indukčnost L , moment setrvačnosti J , třecí moment B_t , zátěžný moment T_1 , napěťová konstanta k_e , počet pól párů p a funkci pro tvar zpětného indukovaného napětí $f(\theta)$. Daný motor bohužel nedisponuje technickou dokumentací s potřebnými údaji a proto byly dané parametry identifikovány pomocí měření a aproximace.

Počet pól párů motoru byl určen fyzickou inspekcí motoru, kdy byla jedna svorka motoru připojena do zdroje proudu a jedna svorka motoru byla uzemněna. Generátorem byl do obvodu přiveden proud o hodnotě 1 A, který vytvořil stabilní magnetické pole ve statoru. Manuálním otáčením rotoru byl následně identifikován počet stabilních pozic rotoru během jedné otáčky. Tento počet stabilních pozic rotoru odpovídá počtu pól párů v motoru.

Odpor vinutí byl změřen pomocí multimetru s funkcí měření odporu a indukčnost vinutí byla změřena pomocí RLC metru při frekvenci 1 kHz. Moment setrvačnosti a koeficient tření byly z důvodu absence technické dokumentace a obtížného měření odhadnuty na základě parametrů podobného motoru. Hodnota zátěžného momentu byla zvolena tak, aby odpovídala proudové zatížitelnosti motoru. Naměřené a odhadnuté hodnoty parametrů motoru jsou uvedeny v tabulce 5.1. Postup identifikace napěťové konstanty k_e a aproximace back-emf je z důvodu většího rozsahu popsán v následující podkapitole.

Veličina	Hodnota	Jednotka
R	0,75	Ω
p	2	-
L	0,44	mH
B_t	$4 \cdot 10^{-4}$	$\text{Nm} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$
J	$5 \cdot 10^{-6}$	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
T_l	0,1	Nm
k_e	$2,719 \cdot 10^{-2}$	$\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$

Tabulka 5.1. Parametry BLDC motoru použité pro simulaci

5.2.1 Identifikace back-emf a napěťové konstanty

BLDC motory obecně generují zpětné indukované napětí trapezoidního charakteru, avšak v důsledku konstrukčních nedokonalostí a nerovnoměrného rozložení magnetického pole může být trapezoidní tvar deformován. Z tohoto důvodu bylo zpětné indukované napětí naměřeno pomocí osciloskopu a následně aproximováno matematickou funkcí za účelem vytvoření přesnějšího modelu motoru.

S ohledem na charakter zpětného indukovaného napětí je možné provést jeho aproximaci pomocí Fourierovy řady. Pro tento účel byla z naměřených dat využita jedna perioda back-emf a následně byl tento průběh aproximován metodou nejmenších čtverců funkcí $f(\theta)$:

$$f(\theta) = A \sin(\theta) + B \sin(3 \cdot \theta) + C \sin(5 \cdot \theta) + D \sin(7 \cdot \theta) \quad (5.13)$$

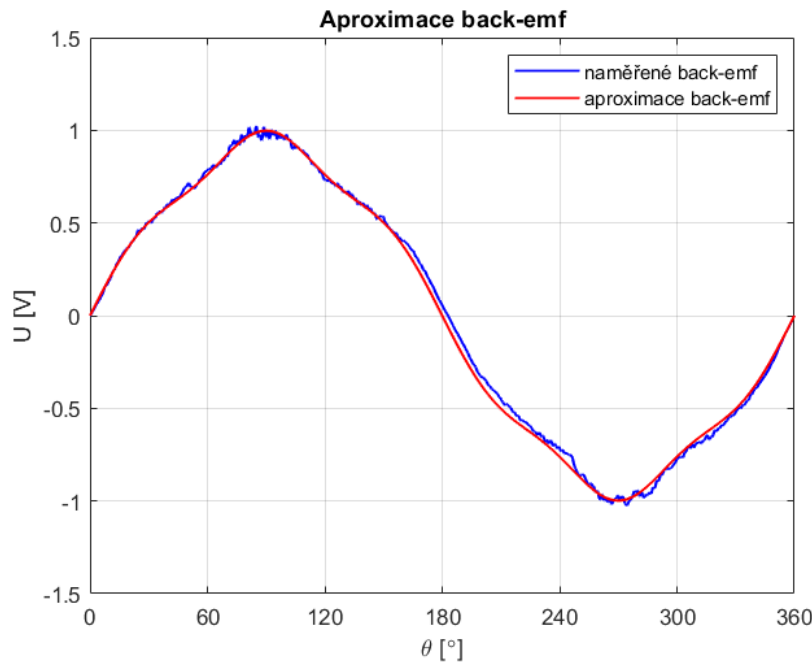
Touto metodou bylo dosaženo aproximace s odchylkou menší než 1 % a výsledné koeficienty aproximace jsou následující:

Koeficient	Hodnota
A	0,9394
B	0,0022
C	0,0564
D	-0,0042

Tabulka 5.2. Koeficienty aproximované funkce back-emf

Z důvodu malého vlivu třetí harmonické byla tato složka zanedbána a výsledný předpis funkce $f(\theta)$ je:

$$f(\theta) = 0,9394 \sin(\theta) + 0,0564 \sin(5 \cdot \theta) - 0,0042 \sin(7 \cdot \theta) \quad (5.14)$$



Obrázek 5.2. Aproximace naměřeného zpětného indukovaného napětí funkcí $f(\theta)$

Napěťová konstanta k_e byla vypočtena pomocí funkce $f(\theta)$ a rychlosti otáčení zaznamenaného průběhu back-emf. Pro výpočet napěťové konstanty byl využit vztah:

$$k_e = \frac{U_p}{\omega_e} \quad (5.15)$$

kde U_p je maximální hodnota napětí v zaznamenaném průběhu a ω_e je elektrická úhlová rychlost motoru, při které bylo napětí naměřeno. Z naměřeného průběhu back-emf byla zjištěna maximální hodnota napětí $U_p = 1,02 \text{ V}$ při rychlosti otáčení $\omega_e = 37,51 \text{ rad}^{-1}$. Hodnota napěťové konstanty tak nabývá hodnoty $k_e = 2,719 \cdot 10^{-2} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1}$.

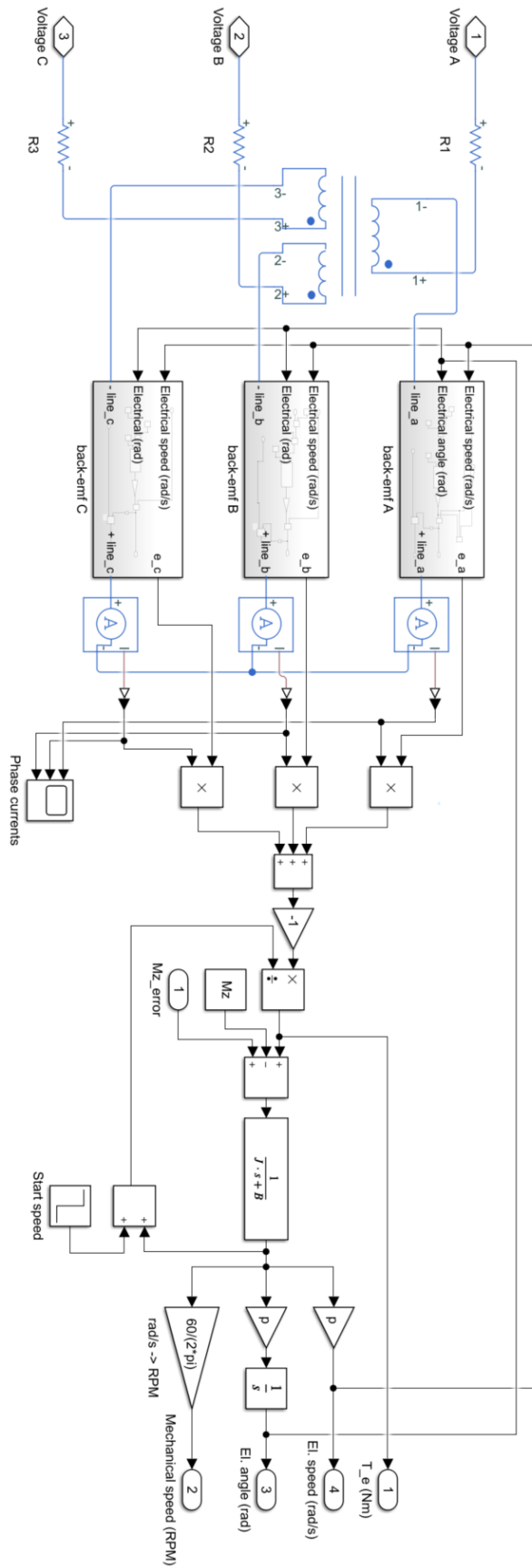
5.3 Model motoru v prostředí MATLAB/Simulink

Model motoru byl vytvořen za využití obvodových rovnic BLDC motoru a parametrů motoru uvedených v tabulce 5.1. Blokové schéma modelu motoru je zobrazeno na obrázku 5.3.

Pro implementaci napěťové rovnice byly využity komponenty rozšíření Simscape Electrical, které umožňují modelování elektronických a elektromechanických systémů. Z tohoto rozšíření byly využity rezistory a blok s názvem *Three-Winding Mutual Inductor* reprezentující chování indukčnosti vinutí.

Pohybová rovnice byla převedena pomocí Laplaceovy transformace na funkci přenosu a následně byla implementována pomocí bloku *Transfer Function*.

Z důvodu dělení v momentové rovnici byla počáteční rychlost motoru nastavena na nenulovou hodnotu, aby nedošlo k dělení nulou.



Obrázek 5.3. Blokové schéma modelu BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink

5.4 Implementace six-stepového řízení v proudovém režimu

Fáze BLDC motoru byly připojeny do pólůmístků elektronického komutátoru, který byl dále propojen se zdrojem stejnosměrného napětí o hodnotě² 24 V.

Výstup *El. angle*³ modelu motoru poskytuje informaci o úhlu natočení rotoru a není tak třeba dalšího senzoru polohy. Hodnota úhlu je dále zpracována funkcí modulo⁴, aby byla zajištěna hodnota úhlu v rozsahu $< 0, 2\pi$ rad. Blok *Sector evaluation* na základě hodnoty úhlu natočení rotoru vyhodnocuje, ve kterém sektoru se rotor nachází a tuto informaci předává bloku *Six-step commutation*, kde dochází k vyhodnocení a nastavení signálů pro spínače elektronického komutátoru. Jednotlivé sektory a jim odpovídající signály jsou uvedeny v tabulce 5.3.

El. angle [°]	sektor	HSU	LSU	HSV	LSV	HSW	LSW
$< 0, 60$)	1	1	0	0	0	0	1
$< 60, 120$)	2	0	0	1	0	0	1
$< 120, 180$)	3	0	1	1	0	0	0
$< 180, 240$)	4	0	1	0	0	1	0
$< 240, 300$)	5	0	0	0	1	1	0
$< 300, 360$)	6	1	0	0	1	0	0

Tabulka 5.3. Hodnoty spínacích signálů v závislosti na úhlu natočení rotoru

Řídící část se skládá z PI regulátoru a komparátoru v kaskádovém zapojení. Vstupní hodnotou PI regulátoru je odchylka mezi požadovanými a skutečnými otáčkami motoru. Výstupem je pak požadovaná hodnota proudu dodaného do motoru od zdroje napětí. Komparátor porovnává požadovanou a skutečnou hodnotu proudu dodaného do motoru od zdroje napětí. Na základě tohoto porovnání je generován signál *Control signal* nabývající hodnoty 0 při stavu $I_{ref} < I$ a hodnoty 1 při stavu $I_{ref} > I$. Signál je následně přiveden na vstup bloku *Six-step commutation*, kde při hodnotě 1 dochází k sepnutí spínačů typu HS dle sektoru rotoru a při hodnotě 0 k jejich vypnutí. Přechod výstupní hodnoty *Control signal* z 0 na 1 je záměrně pro přiblížení se reálnému průběhu motoru zpožděn o 50 μ s. Následkem toho jsou v uvedených průbězích proudu a napětí patrné zásahy regulace.

Volba využití PI regulátoru namísto jiného typu regulátoru byla provedena na základě jeho jednoduché implementace a schopnosti zajištění ideální řídicí charakteristiky. Parametry regulátoru byly zvoleny na základě experimentálního ladění a dosažení stabilního chování motoru. Výsledné parametry PI regulátoru jsou uvedeny v tabulce 5.4.

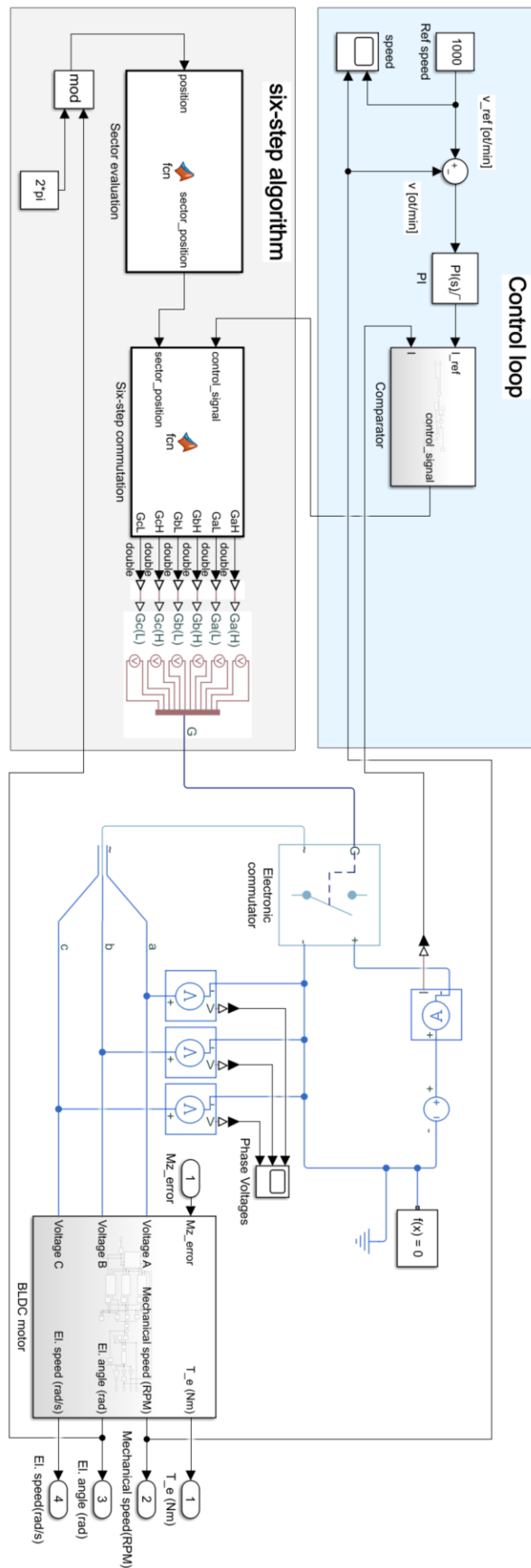
P	0,01
I	0,8

Tabulka 5.4. Parametry PI regulátoru simulace

² Nominální napětí motoru 45ZWN24-40

³ Elektrický úhel rotoru

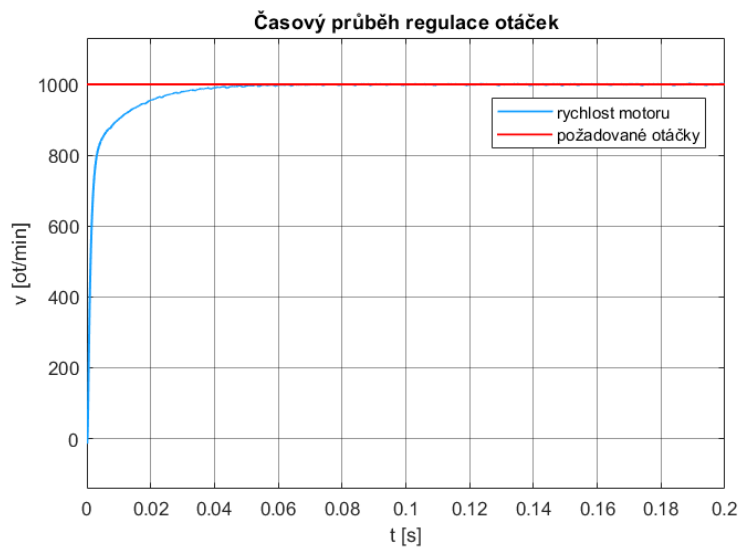
⁴ Signál *El. angle* nese informaci o úhlu natočení od počátku simulace a nabývá tak hodnot větších jak 2π rad.



Obrázek 5.4. Blokové schéma řídicího obvodu pro BLDC motor

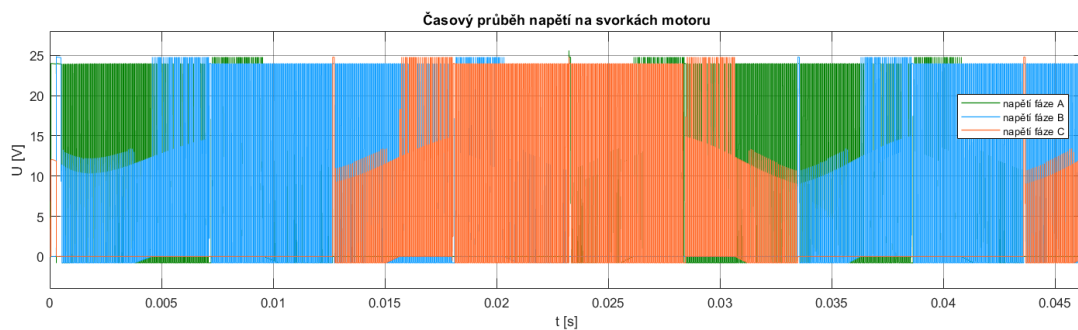
5.5 Časové průběhy

Na následujících časových průbězích jsou zobrazeny výsledky simulace běhu motoru. Průběh 5.5 znázorňuje rozběh motoru při požadované rychlosti 1 000 ot/min. Zbylé průběhy jsou zaznamenány během stejné simulace a znázorňují průběh napětí a proudu na uvedených částech obvodu. Z průběhu je patrné, že doba ustálení motoru na požadované otáčky je zhruba 50 ms a řízení nedisponuje výraznými oscilacemi či překmitem.

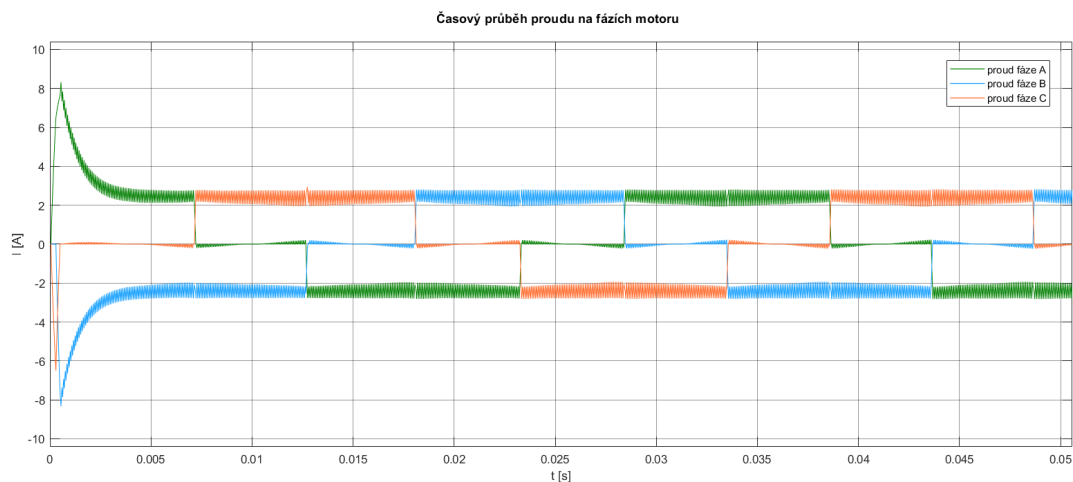


Obrázek 5.5. Průběh rozběhu motoru na požadované otáčky

Průběh 5.6 zachycuje napětí na svorkách motoru vůči zemi. Jsou na něm zřetelné přechody mezi jednotlivými komutacemi a řídicí zásahy do běhu motoru. Tyto zásahy způsobují rychlé přechody mezi maximálními a minimálními hodnotami napětí na svorkách motoru.

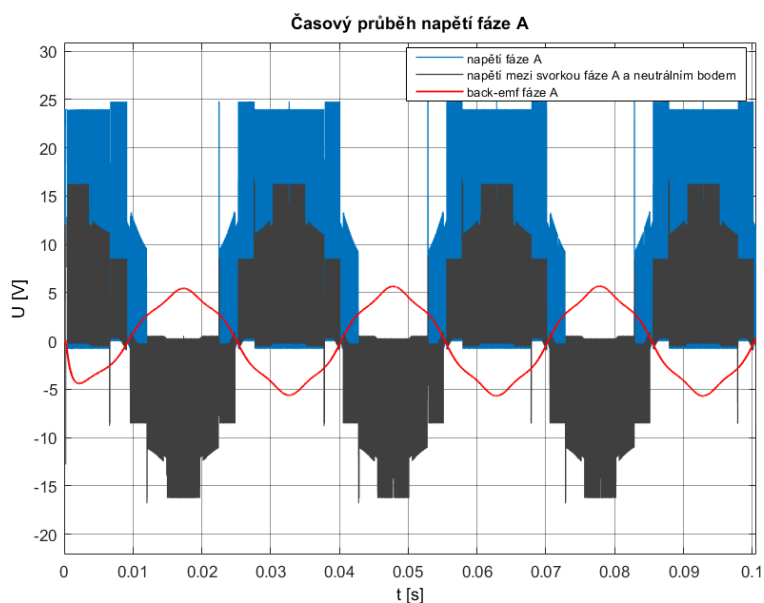


Obrázek 5.6. Průběh napětí na jednotlivých svorkách motoru



Obrázek 5.7. Průběh proudu na jednotlivých fázích motoru

Na záznamu 5.7 je znázorněn průběh proudu na jednotlivých fázích motoru. Obdobně jako u průběhu napětí 5.6 jsou i na tomto průběhu patrné jednotlivé komutace fází a zásahy do regulace proudu v rámci regulace otáček motoru.



Obrázek 5.8. Simulace napěťových průběhů na jedné fázi

Na průběhu 5.8, znázorňující průběh napětí na fázi A, lze také pozorovat závislost mezi napětím dané fáze a bodem komutace, jehož praktické využití je uplatněno v bezsenzorových metodách popsaných v kapitole 4.6.1.

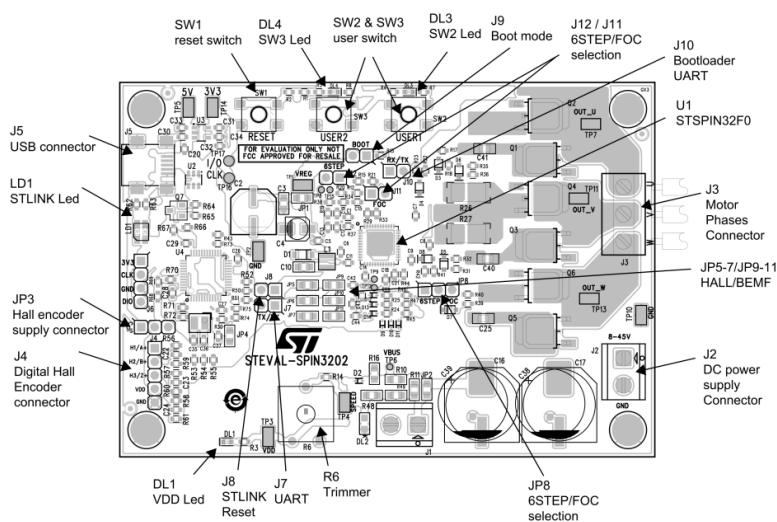
Kapitola 6

Implementace six-stepového řízení na evaluační desce STEVAL-SPIN3202

Tato kapitola popisuje implementaci senzorového six-stepového řízení v proudovém režimu za využití evaluační desky STEVAL-SPIN3202. Je zde popsán použitý hardware a následná implementace six-stepového řízení společně se zaznamenanými průběhy chodu motoru.

6.1 Popis evaluační desky STEVAL-SPIN3202 a použitého BLDC motoru LINIX 45ZWN24-4

STEVAL-SPIN3202 od firmy STMicroelectronics je třífázový invertor uzpůsobený pro řízení BLDC motorů s napětím od 6,7 V do 45 V a maximálního fázového proudu 15 A_{RMS}. Deska je navržena tak, aby byla možná implementace jak six-stepového, tak i vektorového řízení. Hlavní komponentou desky je čip STSPIN32F0A, který disponuje mikrokontrolérem STM32F031 a řídicí logikou pro spínání výkonových tranzistorů typu NMOS. Dále deska obsahuje hardwarové komponenty umožňující měření proudů a napětí či komunikaci s dalšími periferiemi. Tyto hardwarové komponenty je možné využívat dle typu a potřeb jednotlivých metod řízení a pro jejich využití je nutná konfigurace desky pomocí jumperů¹ označenými jako *JP* na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1. Evaluační deska STEVAL-SPIN3202 [5]

Motor LINIX 45ZWN24-4 je třífázový radiální BLDC motor, na jehož parametrech byla vytvořena simulace v programu MATLAB/Simulink. Tento konkrétní typ motoru

¹ propojka

je vybaven integrovanými Hallovými sondami a nebylo tak nutné provádět jejich externí instalaci. Pro napájení motoru byl použit stabilizovaný zdroj napětí o hodnotě 15 V.



Obrázek 6.2. Evaluační deska STEVAL-SPIN3202 a použitý BLDC motor LINIX 45ZWN24-4

6.1.1 Popis mikrokontroléru STM32F031 a využitých periférií pro implementaci six-stepového řízení

Mikrokontrolér STM32F031 je založen na jádře ARM Cortex-M0 a disponuje maximální taktovací frekvencí 48 MHz. Hlavní předností tohoto mikrokontroléru je jeho nízká cena a spotřeba energie [27].

Ačkoliv jeho výpočetní výkon není tak vysoký jako u jiných mikrokontrolérů typu STM32, disponuje perifériemi, které jsou pro implementaci six-stepového řízení velmi užitečné. Mezi tyto periferie patří např. GPIO (General Purpose Input/Output), Timer, NVIC (Nested Vectored Interrupt Controller), UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) a DMA (Direct Memory Access). Všechny tyto periferie byly pro účely implementace six-stepového řízení využity a proto se zde nachází jejich stručný popis.

- GPIO je označení pro programovatelné piny mikrokontroléru, které slouží jako základní periferie pro interakci s okolím. Lze je softwarově nastavit buď jako vstup (čtení signálu) nebo výstup (generování signálu). Kromě toho mohou být piny konfigurovány pro alternativní funkce² a mohou být řízeny jinými perifériemi, jako je např. Timer.
- Timer (časovač) je periferie, která umožňuje samostatně vykonávat jednoduché úkony bez zatížení hlavní smyčky programu. V rámci implementace six-stepového řízení byl časovač využit pro měření času mezi komutacemi, generování PWM signálu pro regulaci proudu motoru a pro vyvolání přerušení při změně signálu na Hallových sondách.
- NVIC slouží jako správce přerušení. Pokud dojde k vyvolání přerušení, hlavní smyčka programu je pozastavena a vykoná se funkce, která je přiřazena k danému přerušení. Po vykonání dané funkce se obnoví hlavní smyčka programu. Pokud nastane více

² Alternativní funkce GPIO pinů umožňují jejich využití pro specializované úkoly, jako je komunikace přes UART nebo generování PWM signálů, namísto běžného vstupního nebo výstupního režimu.

přerušeni současně, NVIC upřednostní to s nejvyšší prioritou. V případě Cortex-M0 je možné nastavit až 32 přerušeni a 4 úrovně priorit [27].

- UART je periferie sloužící k přenosu dat mezi mikrokontrolérem a jinými zařízeními. K těmto účelům jsou využity dva piny, kde jeden pracuje jako přijímač a druhý jako vysílač. V případě desky STEVAL-SPIN3202 jsou tyto piny propojeny s USB konektorem a komunikace je tak realizována prostřednictvím COM portu PC [5].
- DMA slouží k přímému přístupu do paměti a umožňuje přenášet data mezi periferiemi a pamětí bez nutnosti zásahu do hlavní smyčky programu. V rámci implementace byla tato periferie využita pro realizaci komunikace s uživatelským rozhraním. Díky této vlastnosti bylo možné přenášet data z mikrokontroléru do UART periferie bez nutnosti zásahu do hlavní smyčky programu a omezení six-stepového algoritmu [5, 27].

6.2 Konfigurace vstupů a výstupů mikrokontroléru

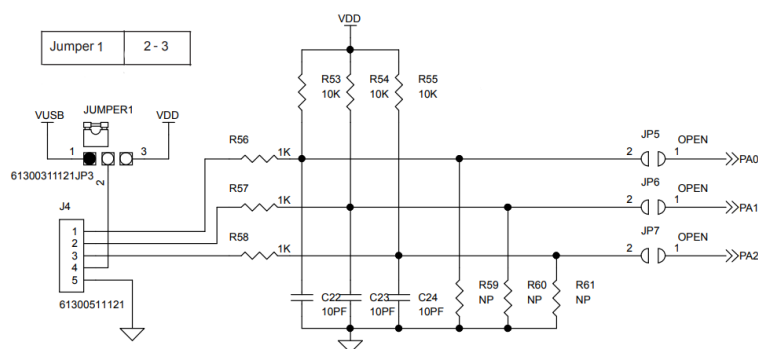
Za účelem dosažení maximálního výpočetního výkonu mikroprocesoru STM32F031 byla jeho taktovací frekvence nastavena na maximální hodnotu konkrétně 48 MHz.

Následující podkapitoly popisují hardwarovou konfiguraci desky a nastavení vstupů a výstupů mikrokontroléru, které jsou nezbytné pro správný chod six-stepového řízení.

6.2.1 Snímání polohy a rychlosti rotoru

Výstupní a vstupní konektory Hallových sond byly připojeny na J_4 , kde do pinů 1-3 byly připojeny výstupní signály sond a do pinů 4-5 napájení a GND³. Napájení sond bylo zajištěno propojením částí 2 a 3 na JP_3 .

Dále byly propojeny části na JP_5 , JP_6 , JP_7 , díky kterým byly přivedeny výstupní signály z Hallových sond na vstupy mikrokontroléru.



Obrázek 6.3. Schéma propojení jumperů pro využití Hallových sond [5]

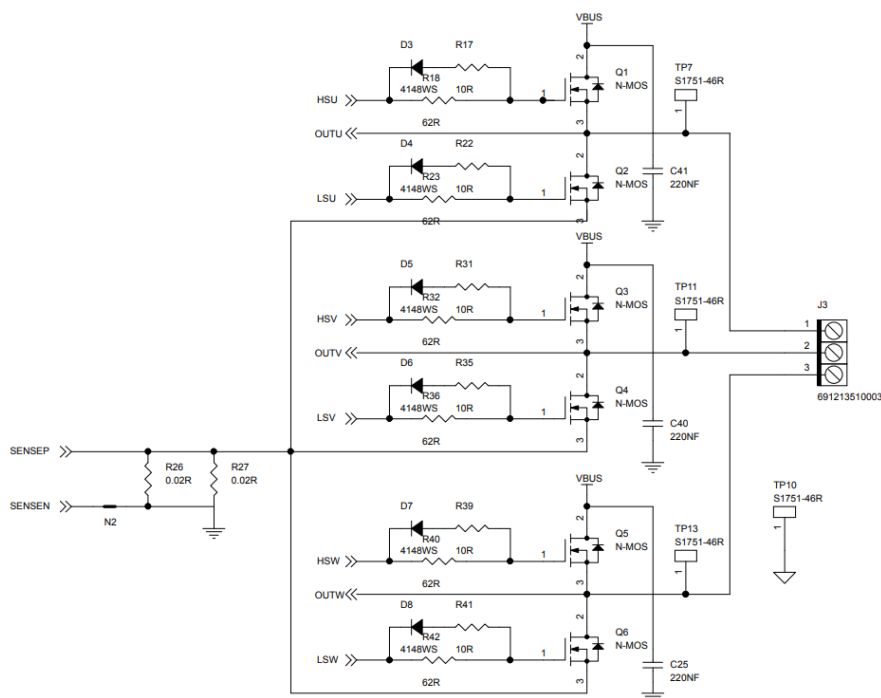
Experimentálním měřením bylo zjištěno, že se na pinech PA0, PA1 a PA2 mikrokontroléru vyskutují pouze dvě možné úrovně napětí - buď VDD (3,3 V) nebo 0 V. Na základě této skutečnosti byl pro čtení dat z pinů využit časovač s funkcí zachycení signálu (Input Capture), který detekoval přechod mezi těmito úrovněmi. Jakmile došlo ke změně signálu na těchto pinech, automaticky bylo vyvoláno přerušeni, které spustilo změnu komutace.

Získání informace o rychlosti motoru bylo realizováno prostřednictvím časovače v režimu čítač (counter), který zaznamenává dobu mezi jednotlivými přerušeni v důsledku změny signálu na Hallových sondách.

³ Ground - uzemnění

6.2.2 Spínání tranzistorů

Jednotlivé tranzistory elektronického komutátoru lze ovládat pomocí pinů PA8, PA9, PA10, PB13, PB14 a PB15 na mikrokontroléru. S ohledem na častou změnu komutace a nepravidelné zásahy do spínání HS tranzistorů kvůli regulaci proudu byly tyto piny nastaveny jako GPIO výstupy.

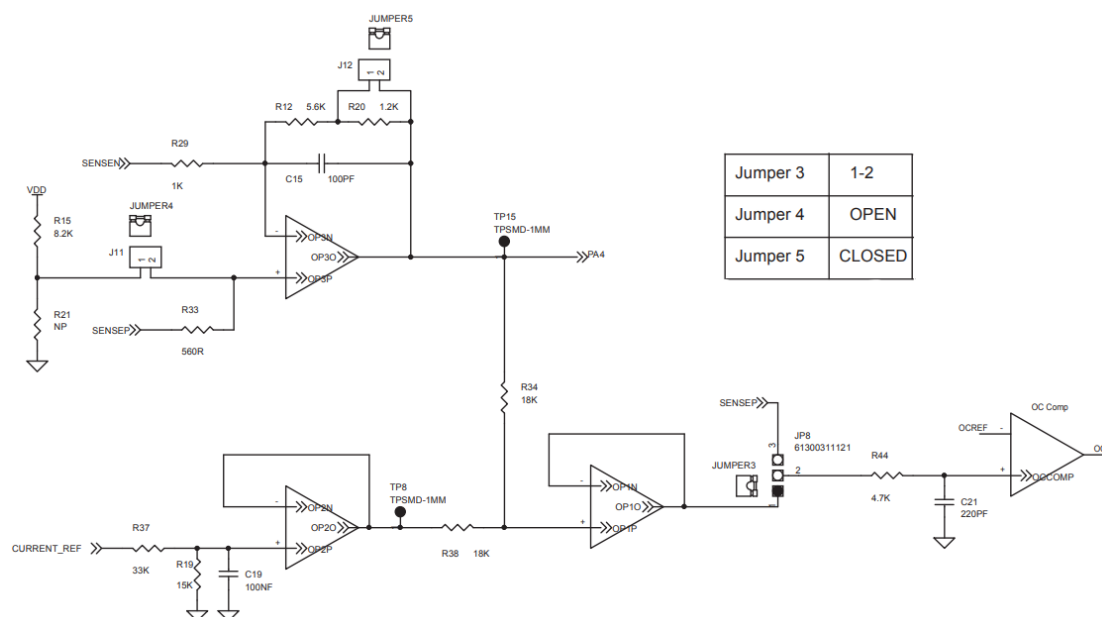


Obrázek 6.4. Schéma zapojení výkonových tranzistorů [5]

Na schématu 6.4 je mimo jiné zobrazen odpor $R27 \parallel R29$, jehož úbytek napětí dále slouží k regulaci proudu motoru.

6.2.3 Regulace proudu motoru

Regulace proudu motoru byla realizována pomocí komparátoru, který porovnává referenční konstantní napětí se zesíleným a posunutým úbytkem napětí na odporu $R27 \parallel R29$. Právě tímto nastavitelným posunem dochází k řízené regulaci proudu motoru a jeho překročení má za následek vypnutí tranzistorů. Tento děj je nezávislý na nastavené sekvenci spínání, neboť čip STSPIN32F0A kromě samotného mikrokontroléru obsahuje i tzv. *Control logic driver*, který slouží jako mezičlánek mezi výstupními piny ovládajícími tranzistory a samotnými tranzistory. Právě do tohoto driveru je přiveden výstup komparátoru a při jeho logické úrovni 1 tento driver nastaví na vstupy tranzistorů logickou úroveň 0 navzdory tomu, co je nastaveno na výstupních pinech. Po snížení proudu pod nastavenou mez je komparátor opět nastaven do logické úrovně 0 a pro opětovné spínání tranzistorů pomocí pinů mikrokontroléru musí být nejdříve nastaveny HS tranzistory do logické úrovně 0 a teprve poté je možné jejich opětovné spínání. Pokud by tato operace nebyla provedena, *Control logic driver* by nedovolil HS tranzistory ovládat piny mikrokontroléru. K provedení této operace dochází díky přerušení vyvolaného sestupnou hranou na výstupu komparátoru, jehož výstup je připojen k pinu PB12 [5, 28].



Obrázek 6.5. Obvodové schéma regulace proudu motoru [5]

Signál *CURRENT_REF*, umožňující nastavení zmíněného posunu, lze nastavit pomocí pinu PA6. Pro řízení tohoto posunu byl využit časovač, který obsluhuje pin PA6 jako PWM výstup s frekvencí 10 kHz⁴ a jehož střída je řízena výstupní hodnotou PI regulátoru.

6.3 Řídící algoritmus

Pro programování mikrokontroléru bylo využito vývojového prostředí STM32CubeIDE spolu s nástrojem STM32CubeMX. STM32CubeMX poskytuje jednoduché nastavení periférií a taktovacích frekvencí mikrokontroléru a následné vygenerování projektu pro STM32CubeIDE. Vývojové prostředí STM32CubeIDE pak umožňuje snadnou implementaci programu v jazycích C/C++ a jeho nahrání do mikrokontroléru.

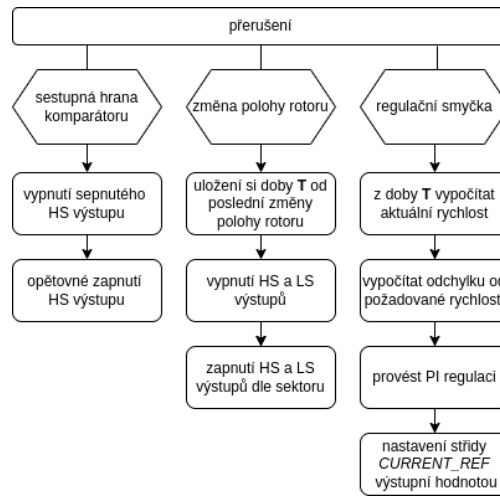
V rámci implementace programu bylo nahlíženo na výpočetní výkon mikroprocesoru a jeho možnosti. Z tohoto důvodu byly všechny klíčové části algoritmu implementovány pomocí přerušení, které nastávají v pravidelných intervalech nebo při změně pozice rotoru či překročení požadovaného proudu. Priorita těchto přerušení pak byla nastavena dle důležitosti pro chod motoru a v případě více současných přerušení tak bylo zajištěno optimální pořadí provedení. Implementace algoritmu pomocí přerušení umožňuje minimalizaci výpočetní zátěže mikroprocesoru a zároveň optimální vykonávání jednotlivých částí algoritmu. Použité přerušení a jejich priority jsou popsány v následující tabulce:

Priorita	příčina přerušení	akce
1	sestupná hrana komparátoru	vypínání a zapínání tranzistorů
2	změna polohy rotoru	přepnutí spínací sekvence
3	regulační smyčka (po 1 ms)	změna střídavy signálu <i>CURRENT_REF</i>

Tabulka 6.1. Přerušení a jejich priority

⁴ Ačkoliv vyšší frekvence by měla mít za následek stabilnější hodnotu na kapacitoru C19, na řízení motoru vyšší frekvence měla zanedbatelný vliv.

kde 1 je priorita nejvyšší a 3 nejnižší.



Obrázek 6.6. Diagram úkonů při přerušení

Mikrokontrolér STM32F031 nedisponuje FPU (Floating Point Unit), která by umožňovala rychlejší výpočty s desetinnými čísly [27]. Proto byly pro implementaci využity pouze celočíselné datové typy a pro urychlení výpočtu regulátoru byl v případě operace dělení použit bitový posun.

6.3.1 Spínací sekvence a nastavení parametrů PI regulátoru

Pořadí spínání tranzistorů bylo prováděno dle stejných sekvencí uvedených v tabulce 5.3. Jednotlivým sektorům odpovídají následující stavy Hallových sond:

Sektor	H1	H2	H3
1	0	1	1
2	0	0	1
3	1	0	1
4	1	0	0
5	1	1	0
6	0	1	0

Tabulka 6.2. Stavy Hallových sond

Naladění parametrů PI regulátoru bylo provedeno experimentálním způsobem za využití uživatelského rozhraní 6.7, které umožňovalo nastavování parametrů během chodu motoru a zobrazovalo průměrnou odchylku mezi požadovanými a skutečnými hodnotami rychlosti motoru. Postupným zvyšováním hodnoty složky P bylo dosaženo stabilního chodu motoru a následně byla zvolena hodnota složky I tak, aby byla minimalizována průměrná odchylka. Laděním byly zvoleny následující parametry:

P	$\frac{25}{256}$
I	$\frac{1}{128}$

Tabulka 6.3. Parametry PI regulátoru implementace

6.3.2 Rozšíření implementace o další funkce

Pro praktické využití implementovaného řízení bylo nutné rozšířit algoritmus o další funkce, které by umožnily jednoduché ovládání motoru. Řídící algoritmus tak byl rozšířen o stavy RUN a STOP, kdy v případě RUN se provádí řízení motoru a v případě STOP je motor vypnut. Dále byla přidána možnost změny požadovaných otáček a parametrů regulátoru. V neposlední řadě byla implementována možnost změny směru otáčení motoru. Z těchto funkcí a samotného six-stepového algoritmu byla vytvořena knihovna, jejíž funkce pak lze volat z hlavního programu. Funkce jsou následující:

```
void StevikInit();
void StevikCommunicationLoop();
void StevikSetSpeed(uint16_t speed);
void StevikSetPI(uint8_t P_n, uint8_t P_d, uint8_t I_n, uint8_t I_d);
void StevikSetDirectionCounterClockwise();
void StevikSetDirectionClockwise();
void StevikStop();
void StevikRun();
```

kde *StevikInit()* inicializuje všechny potřebné periferie a nastaví počáteční hodnoty, *StevikCommunicationLoop()* je funkce, která se volá v hlavní smyčce programu a zajišťuje správné spojení s uživatelským rozhraním, *StevikSetSpeed()* nastaví požadované otáčky motoru, *StevikSetPI()* nastaví parametry⁵ PI regulátoru, *StevikSetDirectionCounterClockwise()* a *StevikSetDirectionClockwise()* nastaví směr otáčení motoru, *StevikStop()* zastaví motor a *StevikRun()* motor spustí.

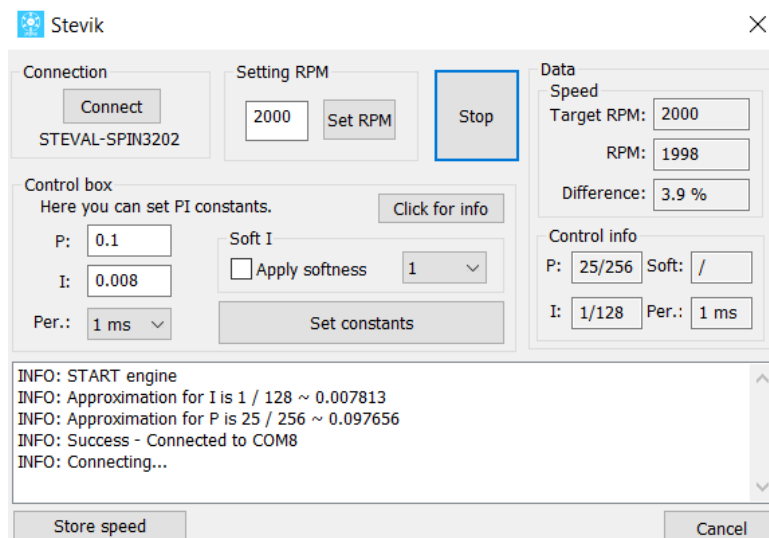
Pro možnost základního spouštění a zastavování motoru byly využity tlačítka USER1 a USER2 na desce STEVAL-SPIN3202, kde tlačítkem USER1 lze motor spustit/vypnout a tlačítkem USER2 změnit směr otáčení motoru.

6.3.3 Uživatelské rozhraní

Pro snadné ovládání motoru byla vyvinuta aplikace 6.7, která umožňuje nastavení požadovaných otáček motoru a parametrů PI regulátoru. Kromě toho zobrazuje aktuální rychlost motoru s průměrnou odchylkou mezi požadovanými a skutečnými hodnotami. Aplikace byla vytvořena ve vývojovém prostředí Visual Studio 2022 s využitím knihovny MFC (Microsoft Foundation Class Library), což umožňuje její snadnou přenositelnost na PC zařízení s operačním systémem Windows.

Komunikace mezi uživatelským rozhraním a evaluační deskou lze navázat pravidelným voláním funkce *StevikCommunicationLoop()* v hlavní smyčce programu evaluační desky. Poté kliknutím na tlačítko *Connect* v uživatelském rozhraní se spustí automatické vyhledávání a při úspěšném navázání komunikace se zobrazí hláška *Success - Connected to COM X*. V opačném případě se zobrazí chybová hláška signalizující neúspěšné navázání komunikace. Pro úspěšné navázání komunikace je nutné mít vypnutý provoz motoru. Po navázání komunikace lze motor ovládat bez jakýchkoli omezení.

⁵ X_n hodnotou se odchylka násobí a hodnota X_d značí bitový posun » o X_d pozic



Obrázek 6.7. Uživatelské rozhraní pro změnu parametrů řízení a vyčítání rychlosti motoru

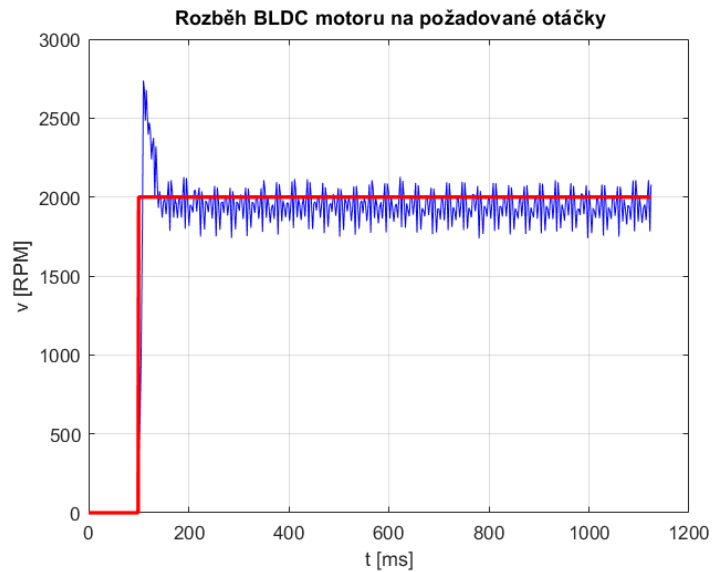
Uživatelské rozhraní umožňuje nastavovat parametry PI regulátoru hodnotami s desetinnou čárkou. Následně dojde k aproximaci dané hodnoty číslem racionálním se jmenovatelem ve tvaru 2^n . Díky této funkci je možné dosáhnout snadnějšího nastavení parametrů, neboť není nutné měnit hodnoty ve zlomku. Kromě parametrů PI regulátoru lze měnit i periodu řídicí smyčky. Dále zobrazuje data o aktuální rychlosti motoru společně s průměrnou odchylkou mezi požadovanými a skutečnými hodnotami.

Tlačítkem *Store speed* je možné vyčíst prvních 400 záznamů⁶ o rychlosti motoru od startu či změny požadované rychlosti motoru. Tato data se po vyčtení uloží do textového souboru v adresáři, kde je uživatelské rozhraní spuštěno. Pomocí této funkcionality byly naměřeny průběhy rozběh motoru 6.8.

6.4 Naměřené průběhy chodu motoru

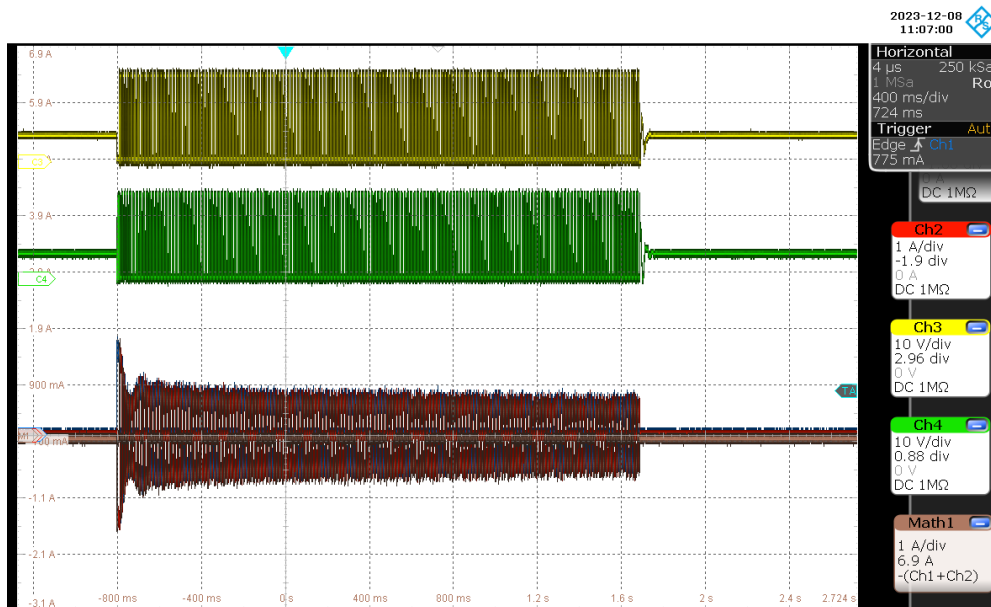
Na záznamu 6.8 je zobrazen průběh rozběhu nezatíženého motoru. Jelikož je motor nezatížený, jeho počáteční proud způsobí tak velké zrychlení otáčení mezi jednotlivými komutacemi, že řídicí smyčka nedisponuje aktuální hodnotou rychlosti a nedokáže tak zabránit překmitu. Možným řešením tohoto problému by byla implementace rozběhového algoritmu, který by zajišťoval postupné zvyšování rychlosti motoru. Nevýhodou tohoto řešení by bylo zvýšení složitosti řídicí smyčky a zpoždění rozběhu motoru.

⁶ Každý záznam obsahuje informaci o rychlosti a času zaznamenání rychlosti.



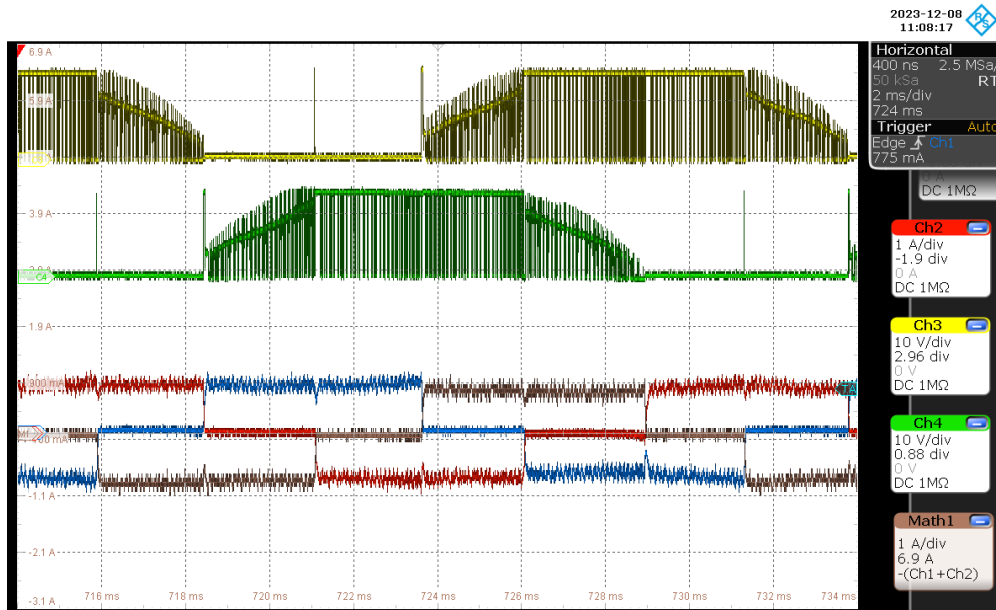
Obrázek 6.8. Rozběh reálného motoru

Průběh 6.9 zobrazuje hodnoty napětí a proudu při rozběhu zatíženého motoru. Je zde patrný velký počáteční proud, který způsobil značné zrychlení motoru, což vedlo k překmitu navzdory přidané zátěži. Po zásahu regulace byl proud stabilizován a motor se dostal do ustáleného stavu.



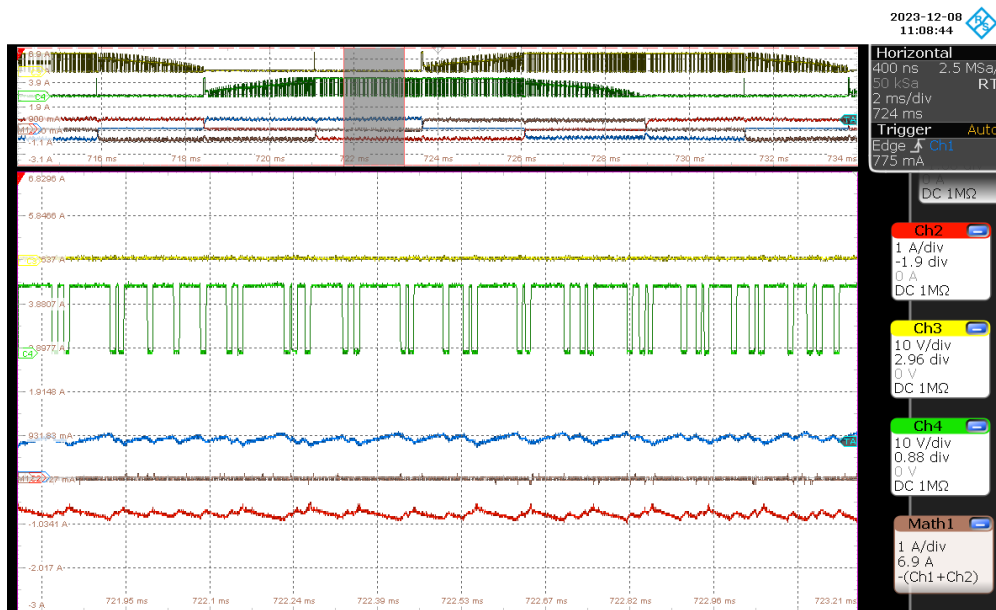
Obrázek 6.9. Průběhy napětí a proudu při rozběhu motoru

Na záznamu 6.10 a 6.11 je zobrazen průběh napětí a proudu při ustáleném chodu motoru. V obou případech je patrný zásah regulace proudu v podobě vypnutí tranzistorů. Těmito naměřeným průběhům odpovídají průběhy simulace na obrázku 5.6 a 5.7. Na základě jejich podobnosti lze usoudit, že implementace six-stepového řízení na evaluační desce STEVAL-SPIN3202 byla úspěšná a chování modelu motoru odpovídá chování reálného motoru. Funkčnost algoritmu tak byla ověřena.



Obrázek 6.10. Průběh napětí a proudu při ustáleném chodu motoru

Na průběhu 6.10 jsou dobře patrné řídicí zásahy regulace proudu v podobě spínání a vypínání tranzistorů. Z průběhu je zřejmé, že spínací frekvence při six-stepovém algoritmu v proudovém režimu není konstantní.



Obrázek 6.11. Přibližný průběh napětí a proudu při ustáleném chodu motoru

Kapitola 7

Závěr

Tato bakalářská práce se zaměřovala na zkoumání bezkartáčových stejnosměrných motorů s důrazem na jejich konstrukci a nejčastěji používané řídicí metody. Úvodní části poskytly teoretický popis BLDC motorů, zdůrazňující možné konstrukční varianty a jejich praktické využití. Následně byly popsány jejich klíčové vlastnosti a rozdíly oproti tradičním motorům s kartáči. Dále se diskutovaly základní principy řídicích metod typu six-step a FOC.

V praktické části byl na základě obvodových rovnic a parametrů reálného motoru vytvořen model BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink, kde se následně implementoval six-step algoritmus v proudovém režimu. Simulace potvrdily správnost navrženého modelu a funkčnost zvoleného řídicího algoritmu.

Po úspěšné simulaci se tento řídicí algoritmus implementoval na evaluační desce STEVAL-SPIN3202 s BLDC motorem LINIX 45ZWN24-4. Naměřené průběhy reálného motoru odpovídaly výsledkům simulací, čímž se ověřila funkčnost návrhu a implementace řídicího algoritmu.

V rámci této práce bylo také vytvořeno uživatelské rozhraní, jehož cílem bylo umožnit snadnou změnu řídicích parametrů a sledování stavu motoru v reálném čase. Tento praktický nástroj poskytl nejen možnost snadného ladění regulátoru, ale také přesná data o průběhu otáček motoru, což umožnilo lepší analýzu a zhodnocení efektivity řídicího algoritmu.

Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že všechny vytyčené cíle práce byly splněny. Tato práce poskytuje přínos prostřednictvím studia struktury a chování BLDC motorů, s důrazem na praktické využití v různých aplikacích. Navržené praktické nástroje nejen poskytují užitečné informace pro další studium, ale také mají potenciál být využity v reálných aplikacích či projektech.

Literatura

- [1] miniphysics.com [online]. *Magnetic Field Due To Current In A Solenoid*. Přístup získán 2. duben 2024.
<https://www.miniphysics.com/ss-magnetic-field-due-to-current-in-a-solenoid.html>.
- [2] st.com [online]. *Fundamentals of motor control*. Přístup získán 4. duben 2024.
https://www.st.com/resource/en/product_training/Fundamentals_of_Motor_Control_2020.pdf.
- [3] wiki.st.com [online]. *6-step Firmware Algorithm*. Přístup získán 17. duben 2024.
https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/STM32MotorControl:6-step_Firmware_Algorithm.
- [4] wikiskripta.eu [online] CeSt. *Halluv jev*. Přístup získán 23. duben 2024.
https://www.wikiskripta.eu/w/Soubor:Hall%C5%AFv_jev_b.jpg.
- [5] STMicroelectronics [online]. *Getting started with the STEVAL-SPIN3202 evaluation board, advanced BLDC controller with embedded STM32 MCU*. UM2278 User manual.
https://www.st.com/resource/en/user_manual/um2278-getting-started-with-the-stevalspin3202-evaluation-board-advanced-bldc-controller-with-embedded-stm32-mcu-stmicroelectronics.pdf.
- [6] International Energy Agency. *World Energy Outlook 2016*. France: IEA, 2016. ISBN 978-92-64-26495-3.
- [7] Kim Sang-Hong. *Electric Motor Control: DC, AC, and BLDC Motors*. 1 vyd.. Amsterdam: Elsevier Science and Technology, 2017. ISBN 9780128123195.
- [8] Deepak Mohanraj, Ranjeev Aruldavid, Rajesh Verma a další. A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications. *IEEE Access*. 2022, 10 54833-54869.
- [9] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang a Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. 2 vyd.. Dordrecht: Springer, 2008. ISBN 978-1-4020-8227-6.
- [10] Ramu Krishnan. *Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives*. 1 vyd.. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-0-8247-5384-9.
- [11] Xu Deng a Barrie Mecrow. *Integrated motor drives*. 1 vyd.. London: The Institution of Engineering and Technology, 2022. ISBN 978-1-83953-186-6.
- [12] Simon-F Koch, Manuel Peter a Jürgen Fleischer. Lightweight Design and Manufacturing of Composites for High-performance Electric Motors. *Procedia CIRP*. 2017, 283-288.
- [13] Bart [online] Pichola. *The Advantages of Slotless Motors over Standard BLDC Motors*. 2020.
<https://www.machinedesign.com/automation-iiot/article/21147445/the-advantages-of-slotless-motors-over-standard-bldc-motors>.

- [14] Jacek F. Gieras a Mitchell Wing. *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. 2 vyd.. New York: Dekker, 2002. ISBN 0-8247-0739-7.
- [15] Heinrich Sequenz. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: Nakladatelství techn. lit, 1980.
- [16] Jeong-hyun Song, Dae-kyong Kim, Yul-jae Lee a další. *Analysis and efficiency optimization of a single-phase BLDC motor using magnetic equivalent circuit and response surface methodology*. In: *2010 International Conference on Electrical Machines and Systems*. 2010. 1153-1158.
- [17] onsemi.com [online]. *DC Motor Driver Fundamentals*. Přístup získán 3. květen 2024.
<https://www.onsemi.com/pub/Collateral/TND6041-D.PDF>.
- [18] Felix Rehm, Patrick Breining, Simon Decker a další. *Loss Comparison of Small Delta- and Star-Connected Permanent Magnet Synchronous Machines*. In: *IECON 2019 - 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2019. 1171-1176.
- [19] Austin Hughes. *Electric Motors and Drives*. 3 vyd.. Oxford: Newnes, 2006. ISBN 0-7506-4718-3.
- [20] Antonín Blahovec. *Elektrotechnika I*. 5 vyd.. Praha 4: INFORMATORIUM, spol. s.r.o., 2005. ISBN 80-7333-043-1.
- [21] Rofiq C. Prayogo, Aris Triwiyatno a Agus R. Munawar. *Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6*. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, 2622
- [22] David Arbelaez Morales, Kyran Findlater a Vinod Chandran. *A motor controller using field oriented control and Hall effect rotor position sensors: Simulation and implementation*. In: *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*. 2014. 235-239.
- [23] Meghana N Gujjar a Pradeep Kumar. *Comparative analysis of field oriented control of BLDC motor using SPWM and SVPWM techniques*. In: *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*. 2017. 924-929.
- [24] Marcello Bonfe a Michele Bergo. *A brushless motor drive with sensorless control for commercial vehicle hydraulic pumps*. In: *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2008. 612-617.
- [25] Jianwen Shao, D. Nolan a T. Hopkins. *A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives*. In: *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335)*. 2002. 33-37.
- [26] Dileep Kumar, R. A. Gupta a Nitin Gupta. *Modeling and simulation of four switch three-phase BLDC motor using anti-windup PI controller*. In: *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2017. 1-6.
- [27] Joseph Yiu. *The Definitive Guide to ARM Cortex -M0 and Cortex-M0+ processors*. Elsevier Science&Technology, 2013. ISBN 978-0-12408-082-9.
- [28] st.com [online]. *Advanced BLDC controller with embedded STM32 MCU*. Přístup získán 28. duben 2024.
<https://www.st.com/en/motor-drivers/stspin32f0a.html>.