



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

Leden 2024

Vedoucí práce: Ing. Jan Stejskal

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat své manželce Ludmile za podporu nejen finanční. Díky tomu mohu na svém pracovišti dělat, co mě baví, a nejsem stresován výplatní páskou.

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 13. 13. 2013

.....

Abstrakt / Abstract

Tato bakalářská práce se zabývá popisem, modelováním a realizací řízení BLDC motoru.

Klíčová slova: BLDC, motor, řízení, hallova sonda, STEVAL-SPIN3202, STM32

This document shows and tests an usage of the plain \TeX officially (may be) recommended design style **CTUstyle** for bachelor (Bsc.), master (Ing.), or doctoral (Ph.D.) theses at the Czech Technical University in Prague. The template defines all thesis mandatory structural elements and typesets their content to fulfil the university formal rules.

This is version 3 of this template which is derived from previous version 2 (for plain \TeX), but the version 3 supports Op \TeX format. It implements the Technika font recommended by CTU graphics identity reference since 2016.

Keywords: document design template; bachelor, master, Ph.D. thesis; \TeX .

Title translation: CTUstyle – the user manual (the Op \TeX template for theses at CTU)

/ Obsah



Kapitola 1

Úvod

V současném průmyslovém a technologickém prostředí hrají elektromotory klíčovou roli, poskytující pohon pro širokou škálu zařízení a aplikací od domácích spotřebičů po průmyslová zařízení. V kontextu elektrických pohonů se významným krokem vpřed stává využití synchroních bezkartáčových stejnosměrných motorů (BLDC). Jejich význam spočívá v jedinečných vlastnostech, které se staly důvodem, proč jsou preferovanou volbou v mnoha odvětvích. Mezi tyto vlastnosti patří vysoká účinnost, což představuje efektivní využití dodávané elektrické energie, a to je zvláště důležité v období rostoucího důrazu na energetickou efektivitu a udržitelnost. Dále se vyznačují dlouhou životností, díky které se tak snižují náklady na údržbu, a nízkou hlučností, která je klíčová v aplikacích, kde je potřeba minimalizovat akustický dopad. Kromě toho je jejich schopnost přesné říditelnosti důležitým faktorem, zejména v průmyslových aplikacích, kde je nezbytné dosáhnout přesných otáček a také excelují v možnosti dosahovat vysokých otáček. Tyto vlastnosti činí BLDC motory klíčovými aktéry v elektrických pohonech, a to nejen v průmyslu, ale i v oblasti elektromobility, spotřebičů, robotiky a dalších odvětvích, kde je kladen důraz na výkonnost, spolehlivost a účinnost.

Hlavním záměrem bakalářské práce je detailně analyzovat konstrukci bezkartáčových stejnosměrných motorů a porozumět jim z fyzikálního hlediska. Následně bude podrobně rozebrána škála možných řídicích algoritmů a jejich charakteristické vlastnosti. Dalším cílem této práce bude vytvořit model BLDC motoru v prostředí MATLAB/Simulink s implementací six-stepového řídicího algoritmu v proudové režimu. Tento model bude vytvořen s využitím fyzikálních principů a parametrů motoru od firmy LINIX.

V neposlední řadě, vytvořený model bude sloužit jako referenční vzor pro vytvoření implementace six-stepového algoritmu pro evaluční 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 hloubkového studia struktury a chování BLDC motorů, a to s důrazem na jejich praktické využití v různých aplikacích. Vytvoření modelu a knihovny pro evaluční desku může sloužit jako praktický nástroj pro vývojáře a studenty, kteří by chtěli navázat na tuto práci, či využít vytvořenou knihovnu pro konkrétní aplikaci. Tímto způsobem se práce snaží přispět k rozvoji a optimalizaci elektrických pohonů, které mají stále rostoucí význam v elektrifikovaném světě.

Kapitola 2

Teoretický přehled o BLDC Motorech

BLDC¹, neboli bezkartáčové stejnosměrné motory, jsou typem synchronního² motoru, který se vyznačuje vysokým točivým momentem, vysokou účinností a vynikající regulací otáček. To jsou jen některé z vlastností, které dělají BLDC motory vhodnými pro širokou škálu aplikací, od průmyslových pohonů, přes elektromobilitu, až po domácí spotřebiče.

Svémi vlastnostmi, možnostmi řízení i konstrukcí se BLDC motory velmi podobají klasickým synchronním motorům s permanentními magnety (PMSM). Než se tedy pustíme do detailního popisu konstrukce a metod řízení BLDC motorů, bylo by vhodné si vysvětlit rozdíl mezi těmito dvěma typy motorů. Dále si zdůvodníme, proč se BLDC motory řadí mezi stejnosměrné motory, ačkoli fungují na střídavém principu jako PMSM. Pro tyto účely musíme nejprve zmínit historický kontext vývoje BLDC motorů, který jejich označení vysvětlí.

2.1 Historický kontext vývoje BLDC motorů

Stejnosemnné motory s kartáči hrály významnou roli v elektrifikaci během druhé průmyslové revoluce v druhé polovině 19. století. Oproti střídavým motorům, včetně PMSM, měli možnost snadné regulace otáček pomocí potenciometru a díky tomu se staly populární volbou pro průmyslové aplikace, kde byla vyžadována variabilita a přesnost rychlosti.

Nicméně, tato technologie má své nevýhody. Mechanická změna komutace prostřednictvím kartáčů snižuje účinnost a omezuje životnost motoru na 1000-3000 hodin provozu. Odstraněním kartáčů by tak bylo možné vytvořit motor s výrazně delší životností a vyšší účinností. Avšak technologicky nebylo možné takový motor vytvořit. Významný zlom nastal až v 60. letech 20. století s objevem křemíkových polovodičových součástek. Tyto součástky umožnily vývoj elektronických komutátorů, které představovaly klíčový krok směrem k nové éře.

V roce 1962 představili T.G. Wilson a P.H. Trickey v článku *D-C machine with solid-state commutation* první funkční řešení bezkartáčového stejnosměrného motoru (BLDC). Název tak vznikl pouze na základě vývojové evoluce DC motorů. [??]

2.2 Charakteristika BLDC motorů

Ačkoli se řadí do kategorie stejnosměrných motorů, fungují na principu motoru střídavých. A právě z tohoto důvodu se BLDC motory mohou vyskytovat v některých prame-
nech pod označením AC a nikoliv DC (<https://www.ti.com/lit/an/sprabz4/sprabz4.pdf>). ■

Konstrukčně se BLDC motory podobají synchronním motorům typu PMSM, ale odlišují se tvarem zpětného indukovaného napětí³. Zatímco BLDC motory mají trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí, PMSM motory mají sinusoidní. Tento tvar

¹ Anglická zkratka pro brushless direct current motor

² Rotor se otáčí synchronně s magnetickým polem statoru.

³ Označovaný též jako *back-emf*

zpětného indukovaného napětí je důsledkem charakteristiky použitých permanentních magnetů a způsobu vinutí cívek v motoru.

Charakteristickým znakem BLDC motorů je trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí⁴, kterým se liší od konstrukčně téměř identických PMSM klasických synchronních motorů se sinusoidním tvarem zpětného indukovaného napětí. Trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí je důsledkem charakteristiky použitých permanentních magnetů a způsobu vinutí cívek v motoru.

BLDC motory jsou konstrukčně téměř identické s moty typu PMSM⁵.

2.3 Rozdíl mezi BLDC a PMSM motory

Hlavní výhodou BLDC motorů oproti ostatním typům motorů je jednoduchá konstrukce, která BLDC motory nabízí hned několik konstrukčních variant, které se liší v počtu fází i způsobu řízení. Nejběžnějšími konstrukčními variantami jsou 1-fázové, 2-fázové, 3-fázové a multi-fázové motory. Tím se liší od klasických synchronních motorů, které mají většinou 3 fáze. - trapezoidní back-emf - BLDC podobné PMSM - proud teče jen jednou fází - vysoký točivý moment - snadné řízení - účinnost až 90%

⁴ Označovaný též jako *back-emf*

⁵ permanent magnet synchronous motor

Kapitola 3

Konstrukce BLDC motoru

BLDC motory nabízí širokou škálu konstrukčních variant a právě proto jsou populární volbou v mnoha aplikacích. V této kapitole se budeme věnovat detailnímu popisu konstrukčních prvků BLDC motorů, jejich variantám a elektronickým komponentám pro správný chod motoru. Začneme popisem statoru a rotoru, které jsou základními konstrukčními prvky motoru. Dále se zaměříme na vinutí fází a využití permanentních magnetů. Následně se seznámíme s technikami chlazení a nakonec se zaměříme na řídicí elektroniku, která umožňuje efektivní řízení otáček a točivého momentu motoru.

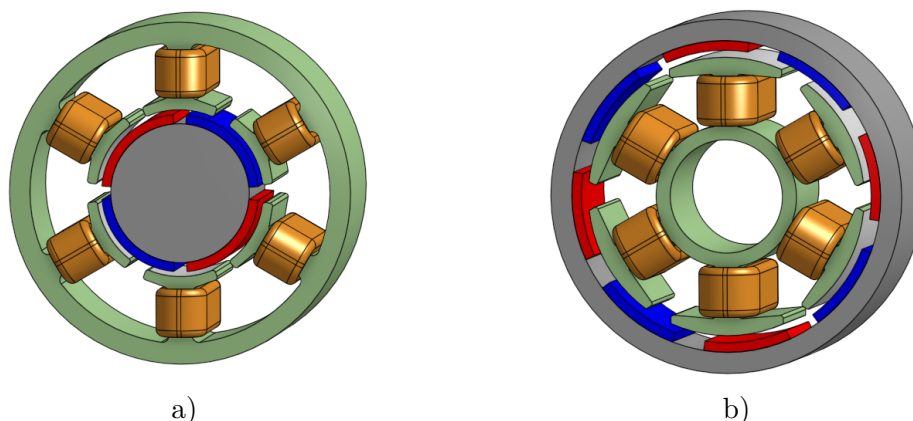
3.1 Stator a rotor

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 osazen permanentními magnety nebo vinutými cívkami. V takovém případě hovoříme o cize buzeném motoru. V případě BLDC motorů je nejběžnější použití permanentních magnetů a proto se zaměříme právě na tyto konstrukční řešení.

Setkáváme se s několika konstrukčními variantami, které se liší umístěním rotoru vůči statoru. Můžeme je rozdělit na radiální a axiální uspořádání. Dále dále můžeme stator rozdělit na tzv. slot a slotless variantu. Pojďme si nyní tyto konstrukční varianty detailněji představit.

3.1.1 Radiální uspořádání

S radiálním uspořádáním se BLDC motorů setkáváme nejčastěji. V tomto uspořádání je rotor umístěn buď uvnitř, nebo vně statoru. V obou případech je stator a rotor oddělen vzduchovou mezerou, která zajišťuje minimální mechanický kontakt mezi oběma částmi. Takové uspořádání si můžeme představit jako dvě koncentrické trubice, kde jedna trubice představuje stator a druhá rotor. Příklad BLDC motoru s radiálním uspořádáním můžeme vidět na obrázku 3.1 níže.

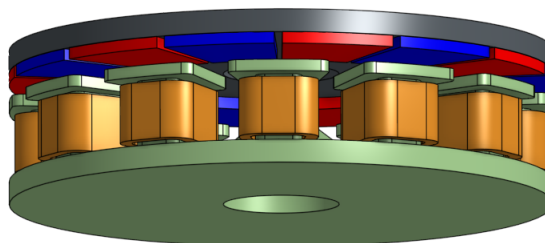


Obrázek 3.1. Radiální BLDC motor a) se státorem uvnitř rotoru b) s rotorem uvnitř statoru.

Ačkoli jde o stejný typ motoru, jejich klíčové vlastnosti jsou rozdílné a každý z nich je tak vhodný pro jiné aplikace. Tyto rozdíly a typické vlastnosti si popíšeme v kapitole

■ 3.1.2 Axiální uspořádání

Při axiálním uspořádání je rotor a stator umístěn proti sobě. Osa rotace rotoru a statoru je pak kolmá k těmto plochám. Příklad jednoduchého BLDC motoru s axiálním uspořádáním můžeme vidět na obrázku 3.2 níže.



c)

Obrázek 3.2. Ukázka vložení obrázku na střed, což je asi nejobvyklejší.

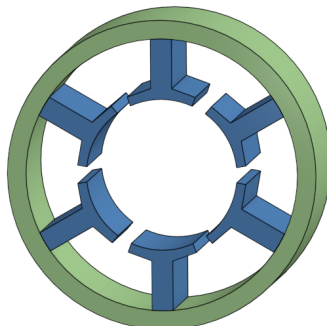
Axiální uspořádání nabízí i několik složitějších konstrukčních variant, kdy je rotor resp. stator zastoupen dvěma kusy. Dvojitý rotor nebo stator zvyšuje výkon motoru s minimálním nárokem na zvětšení jeho rozměrů. Avšak s rostoucí komplexností konstrukce ztrácí motor na své jednoduchosti, kterou se BLDC motory vyznačují a pro které jsou tak oblíbené.

■ 3.1.3 Konstrukční materiály

BLDC motory 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.

3.1.4 Slot vs. Slotless konstrukce

Pojmem slot se označují drážky statoru, kolem kterých jsou umístěné vinuté cívky. Tyto drážky jsou zvýrazněny modrou barvou na obrázku 3.3 níže.



Obrázek 3.3. Sloty BLDC motoru.

Drážky umožňují snadné upevnění cívek a minimalizují riziko jejich pohybu nebo poškození během provozu motoru. Další výhodou drážek je zvýšení a usměrnění magnetického toku generovaný vinutými cívkami. Hlavní nevýhodou slot konstrukce je interakce mezi drážkami a permanentními magnety, které jsou umístěny na rotoru. Tato interakce způsobuje tzv. *cogging torque*, což je nežádoucí točivý moment motoru, který se negativně projeví v plynulosti chodu motoru. Právě tato negativní vlastnost drážkových statorů vedla k vývoji slotless konstrukce, která minimalizuje vliv drážek na chování motoru. Cívky jsou u slotless motorů umístěny přímo na povrchu statoru a pro jejich fixaci se využívají speciální lepidla. Vinutí cívek obou typů motorů je zobrazeno v kapitole Vinutí fází.

3.2 Cívky BLDC motoru

Cívky do elektromotů jsou nejčastěji vyrobeny z mědi, nebo hliníku a jsou vždy opatřeny povrchovou izolací, které zabraňují vzniku zkratu mezi jednotlivými vinutými cívkami. 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.

Tyto cívky jsou pak nejčastěji navinuté na stator motoru do tzv. koncentrovaného uspořádání. Toto uspořádání nabízí snazší výrobní proces motoru a zároveň

Konfigurace fází BLDC motoru není standardizována a existuje několik variant. V případě třífázového motoru lze cívky zapojit do trojúhelníkového nebo hvězdného uspořádání. Pojďme si nyní tyto způsoby představit detailněji.

3.2.1 počet cívek

BLDC motory mohou mít 1-fázové, 2-fázové, 3-fázové a multi-fázové vinutí. S přibýjícím počtem fází se zlepšují jeho vlastnosti, ale také jeho cena a složitost řízení otáček. Proto je důležité zvolit správný počet fází, který bude vyhovovat požadavkům konkrétní aplikace.

Jednofázové motory jsou nejjednodušší a nabízí jednoduché řízení otáček. Mají však nízký točivý moment a bez použití přidaného kondenzátoru nejsou schopny samorozběhu. Další nevýhodou je velké kolísání točivého momentu a možnost rotace pouze v jednom směru. Tyto vlastnosti jsou ale dostačující pro aplikace jako pohony pro ventilátory a čerpadla.

Dvoufázové motory nabízí vyšší točivý moment, možnost rotace v obou směrech i schopnost samorozběhu. Stále však trpí značným kolísáním točivého momentu. Řízení dvoufázových motorů je složitější než u jednofázových motorů, ale stále je možné použít jednoduché řídicí metody. Aplikace, kde se dvoufázové motory nejčastěji využívají jsou například kuchyňské spotřebiče, nářadí, ventilátory a čerpadla.

Třífázové motory jsou nejběžnější volbou pro BLDC motory. Oproti předchozím typům motorů je řízení třífázových motorů složitější a vyžaduje použití speciálních řídicích metod. Tyto metody však umožňují efektivní řízení otáček a točivého momentu motoru. Třífázové motory se hojně využívají v průmyslové automatizaci, letectví, robotice a v elektromobilních aplikacích.

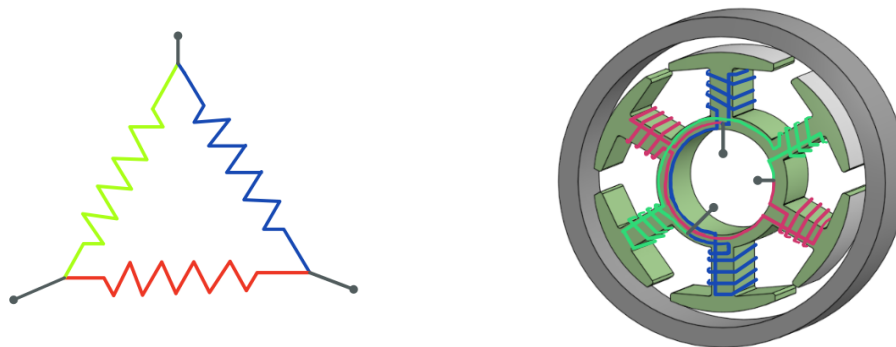
Multi-fázové motory jsou nejvýkonnější volbou a oproti předchozím typům nabízí multi-fázové motory vyšší spolehlivost. Právě díky více fázím je schopen pracovat i při výpadku jedné nebo více fází. Tento typ motoru se využívá v aplikacích, kde je vyžadována vysoká spolehlivost a výkon, jako je například v letectví, kosmonautice a vojenském průmyslu.

■ 3.2.2 vinutí trojúhelník

- méně časté (circulating current -> Při pohybu rotoru BLDC motoru se mění magnetický tok v cívkách a indukují se napětí. Pokud není tento jev správně kontrolován, může indukované napětí způsobit proudění proudu mezi fázemi motoru. Tento oběhový proud může způsobit ztráty výkonu a zahřívání motoru, což může vést k poklesu účinnosti a životnosti motoru. Aby byl oběhový proud minimalizován nebo eliminován, je důležité provést vhodný návrh motoru a řídicího systému. To zahrnuje optimalizaci geometrie motoru, volbu správného typu cívek a magnetického obvodu, a implementaci pokročilých řídicích algoritmů, které minimalizují indukované napětí a řídí proudy motoru tak, aby byly co nejefektivnější. Takové opatření pomáhají snižovat ztráty výkonu a zvyšovat účinnost BLDC motorů.) - vyšší počáteční proud (vyšší počáteční točivý moment) - obtížnější detekce polohy rotoru

Vinutí do trojúhelníku se u BLDC motorů využívá jen zřídka. Důvodem jsou jeho vlastnosti, které nejsou pro BLDC motory vhodné. Zapojení do trojúhelníku má vždy uzavřený obvod a vyskytuje se tak tak oběhový proud. Oběhový proud v BLDC motoru vzniká při změně magnetického toku v cívkách v důsledku pohybu rotoru, což indukují napětí a způsobuje tak proud mezi fázemi motoru. Tento jev může způsobit ztráty výkonu a zahřívání motoru, což negativně ovlivňuje jeho účinnost a životnost. Pro potlačení tohoto jevu je nutné provést optimalizovaný návrh motoru a řídicího systému. Dalším důsledkem uzavřeného obvodu je obtížnější detekce polohy rotoru. V trojúhelníkové zapojení nastává 30° fázový posun mezi svorkovým a fázovým napětím. Je tedy nezbytné při detekci polohy rotoru s touto informací pracovat. Opět tak dochází k vyšším nárokům na návrh motoru. Další vlastností tohoto zapojení je vyšší počáteční proud při rozběhu motoru. Důsledkem toho motor disponuje vyšším počátečním točivým momentem, který může být v některých aplikacích žádaný.

- uzavřený obvod (oběhový proud) - vyšší počáteční proud - obtížnější detekce polohy rotoru

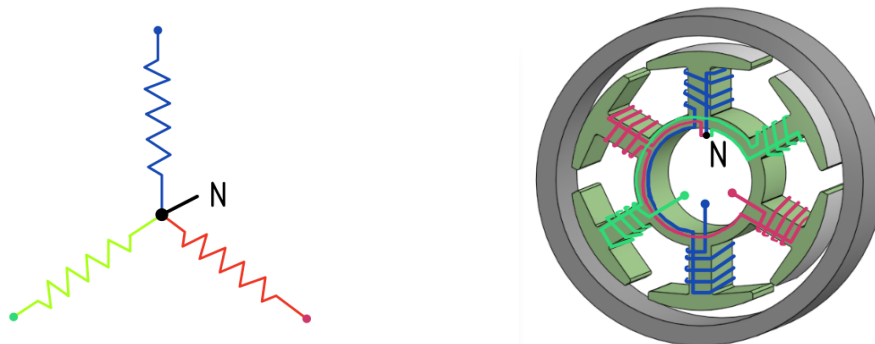


Obrázek 3.4. Vinutí cívek do hvězdy ve schématu a při realizaci .

3.2.3 vinutí hvězda

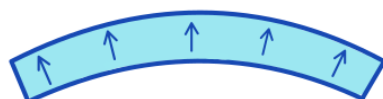
Vinutí do hvězdy představuje průmyslový standard pro BLDC motory, a to z několika důvodů. Obvod vinutí do hvězdy je otevřený a nevytváří tak oběhový proud. Zadruhé, toto uspořádání netrpí posunem fázového a svorkového napětí, což usnadňuje detekci polohy rotoru. Za druhé, vinutí do hvězdy výrazně snižuje počáteční proudové špičky během startu, což zlepšuje spolehlivost a životnost motoru a zároveň má pozitivní vliv na energetickou účinnost. Tyto vlastnosti z tohoto důvodu činí vinutí do hvězdy preferovanou volbou pro široké spektrum průmyslových a komerčních aplikací, kde je kladen důraz na výkon, spolehlivost a účinnost.

- nejčastější vinutí (standart) - menší počáteční proud (menší počáteční točivý moment) - snazší detekování polohy rotoru Cívky při zapojení do hvězdy jsou spojeny do jednoho tzv. neutrálního bodu. Tento bod je v případě vyvedení na konektoru motoru označen jako N.

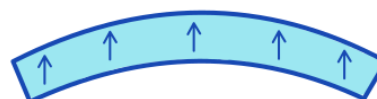


Obrázek 3.5. Vinutí cívek do hvězdy ve schématu a při realizaci .

3.3 Permanentní magnety



a) BLDC



b) PMSM

Obrázek 3.6. Porovnání magnetů BLDC a PMSM motorů.

- strana 391 BLDC knihy ->
- materiál - tvar - umístění

3.4 Porovnání zmíněných konstrukcí

3.5 Komutátor

3.6 Řídící elektronika

- ESC (Electronic Speed Control)

3.7 Chlazení

Kapitola 4

Metody řízení BLDC motorů

- v závislosti na požadavcích aplikace (cena, výkon, účinnost, hlučnost, otáčky, atd.) - sensor/sensorless řízení - základ je vždy v určení polohy rotoru

4.1 Určení polohy rotoru

- bezsenzorové Metody - Zero-Crossing Detection - Structural Methods - Estimation Methods - Luenberger Observer - Kalman Filter - analýza fázových proudů / napětí
- senzorové Metody - Hall Sensors - Encoder - Resolver - Akcelerometry

4.2 Six-step řízení

- also known as trapezoidal control - princip - výhody - nevýhody - proudový režim - napěťový režim

4.3 Sinusoidální řízení

- princip (sinusové napětí na všech fázích -> menší torque ripple, stejné jak u FOC) - výhody - nevýhody - FOC - DTC - SVPWM - Space Vector Modulation - Direct Torque Control - Field Oriented

4.4 trapezoidální řízení

- princip - výhody - nevýhody

4.5 FOC

- princip - clarkova transformace - výhody - nevýhody



Literatura

- [1] Kim Sang-Hong. *Electric Motor Control T_EX*. Edition 1 vyd.. Amsterdam: Elsevier Science and Technology, 2017. ISBN 9780128123195.
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=4857262>.