



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

| | |
|---|----------|
| 1 Úvod | 1 |
| 2 Teoretický přehled o BLDC Motorech | 2 |
| 2.1 Vznik BLDC motorů | 2 |
| 2.2 charakteristika BLDC motorů . . . | 2 |
| 3 Konstrukce BLDC motoru | 3 |
| 3.1 Stator a rotor | 3 |
| 3.1.1 Radiální uspořádání | 3 |
| 3.1.2 Axiální uspořádání | 4 |
| 3.1.3 Konstrukční materiály | 4 |
| 3.1.4 Slot vs. Slotless konstrukce . . | 5 |
| 3.2 Vinutí fází | 5 |
| 3.3 Permanentní magnety | 5 |
| 3.4 Porovnání zmíněných konstrukcí . | 5 |
| 3.5 Komutátor | 5 |
| 3.6 Řídící elektronika | 5 |
| 3.7 Chlazení | 5 |
| Literatura | 6 |
| A Zadání práce | 7 |
| B Zkratky a symboly | 8 |
| B.1 Zkratky | 8 |
| B.2 Symboly | 8 |
| B.3 Soubory, které jsou součástí CTUstyle3 | 9 |

/ **Obrázky**

3.1 Popisek k obrázkům.....4

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

Než se pustíme do detailního popisu konstrukce a metod řízení BLDC motorů, bylo by vhodné se zmínit o okolnostech, které vedly k vzniku BLDC motorů a posléze i o charakteristických vlastnostech, kterými se odlišují od jiných typů motorů.

2.1 Vznik BLDC motorů

Stejnoseměrné motory s kartáči hrály klíčovou roli v elektrifikaci během druhé průmyslové revoluce v druhé polovině 19. století. Díky jejich schopnosti snadné regulaci otáček pomocí potenciometru se staly populární volbou pro různé 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 nastala 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) a otevřeli tak cestu pro vývoj moderních BLDC motorů. [1].

2.2 Charakteristika BLDC motorů

BLDC motory se řadí do kategorie synchronních¹ motorů. Charakteristickým znakem BLDC motorů je trapezoidní tvar zpětného indukovaného napětí², kterým se liší od klasických synchronních motorů se sinusoidním tvarem zpětného indukovaného napětí. Tento rozdíl je způsoben konstrukcí motoru, které se věnujeme v následujících kapitolách. Dále se BLDC motory vyznačují vysokou účinností

- zařazení (synchronní, DC,) - vysoký točivý moment - trapezoidní back-emf BLDC motory se vyznačují několika klíčovými vlastnostmi, které je činí vhodnými pro širokou škálu aplikací. Mezi ty největší patří - zařazení do kategorie synchronních motorů (obrázek, kam se řadí, takový to schéma)

¹ Rotor se otáčí synchronně s magnetickým polem statoru.

² Označovaný též jako *back-emf*

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.

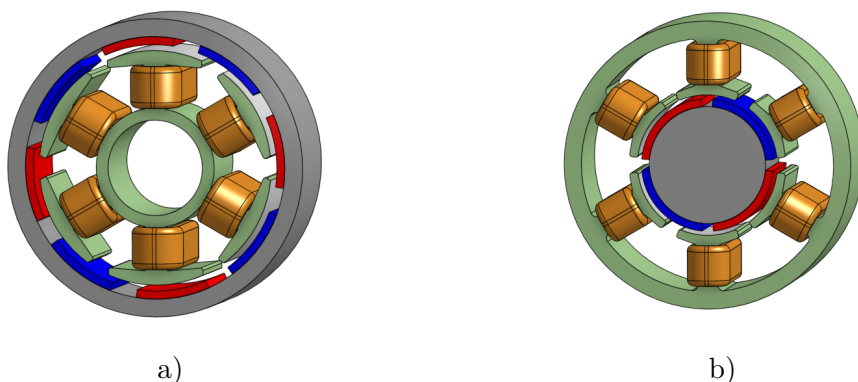
3.1 Stator a rotor

Stator a rotor jsou základním konstrukční 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.

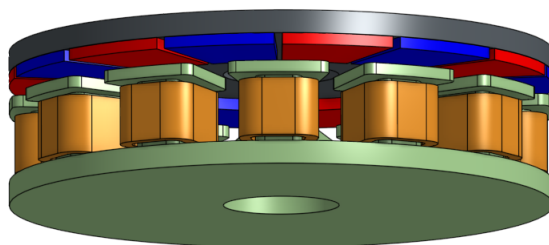


Obrázek 3.1. Radiální BLDC motor a) se statorem uvnitř rotoru b) s rotorem uvnitř statoru.

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.

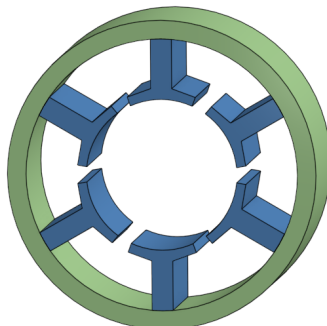
Axiální uspořádání nabízí i několik složitějších konstrukčních variant, kdy je rotor resp. stator zastoupen dvěma kusy. Dvojitý rotor nebo stator zvyšuje výkon motoru s minimálním nárokem na zvětšení jeho rozměrů. Avšak s rostoucí komplexností konstrukce ztrácí motor na své jednoduchosti, kterou se BLDC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

- materiál (izolace) - zapojení (trojúhelníkové, hvězdicové) - počet cívek - cogling torque

3.3 Permanentní magnety

- 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



Literatura

[1]

[2]

[3]

[4]

[5]

[6]

Příloha A

Zadání práce

Tento dokument specifikuje šablony pro \LaTeX a MS Word, které jsou doporučeny pro psaní bakalářských, diplomových nebo disertačních prací na ČVUT FEL. Specifikace se opírá o dokumenty [2–4].

Šablony mají splňovat následující požadavky:

- Písmo Latin Modern (v \LaTeX instalacích je standardně obsaženo, pro MS Word bude OTF verze s podporou matematiky přiložená k šabloně). Velikost základního písma 11 bodů.
- Implicitní kódování šablon UTF-8.
- Formátování na papír A4, vnitřní okraj 30 mm pro pevnou vazbu, délka řádky přizpůsobena velikosti písma.
- Implicitně se předpokládá oboustranná sazba.
- Strukturní elementy: titulní list, poděkování, prohlášení, abstrakt + klíčová slova (cz/en), obsah, seznam symbolů/zkratek, přílohy, bibliografie, tabulky a obrázky s popisky.
- Číslování stránek od 1. strany textu (úvodu); úvodní stránky číslovány římsky. Důvodem je snadno rozpoznatelný rozsah práce.
- V záhlaví stránky číslo a název hlavní kapitoly. V patičce u vnějšího okraje číslo stránky.
- Součástí šablony bude styl pro bibliografie s číselnými odkazy; v seznamu literatury, řazení dle pořadí citování.
- Šablona umožní následující varianty výsledného dokumentu:
 - bakalářská/diplomová/disertační práce (předpokládá se stejná základní struktura, jen změna podtitulků),
 - anglický nebo český jazyk textu (vzory dělení, nadpisy, číslování kapitol),
 - pracovní verze (draft) s textem „Draft + datum“ v patičce.

Příloha B

Zkratky a symboly

Tento text je až na výjimky převzat z [5].

B.1 Zkratky

Jako příklad pro popis zkratek poslouží pojmy ze světa \TeX u.

| | |
|-------------------------|--|
| \TeX | Program na přípravu elektronické sazby vysoké kvality vytvořený Donaldem Knuthem. Program zahrnuje interpret makrojazyka. Název programu se vyslovuje „tech“. |
| $\text{Lua}\text{\TeX}$ | Rozšířený program \TeX o možnost užití Unicode fontů a programovacího jazyka Lua. |
| METAFONT | Program a makro jazyk pro generování fontů z vektorového do bitmapového formátu vytvořený Donaldem Knuthem. |
| METAPOST | Program generující vektorovou grafiku založený na METAFONTu vytvořený Johnem Hobby. |
| plain \TeX | Originální \TeX ový formát (rošíření na úrovni makrojazyka). Je součástí každé distribuce \TeX u a je vytvořen Donaldem Knuthem. |
| Op \TeX | \TeX ový formát rozšiřující plain \TeX s využitím maker OPmac pro $\text{Lua}\text{\TeX}$. |
| \mathcal{C} splain | \TeX ový formát rozšiřující plain \TeX o možnosti sazby v českém a slovenském jazyce vytvořený Petrem Olšákem. |
| \LaTeX | Nejznámější \TeX ový formát (rošíření na úrovni makrojazyka) vytvořený Leslie Lamportem. Existuje obudné množství různých balíčků, které pomocí makrojazyka \TeX u dále rozšiřují výchozí možnosti \LaTeX u. Rozličné uživatelské požadavky jsou nejčastěji řešeny použitím vhodného balíčku. |
| OPmac | Olšákova Plain \TeX ová makra nabízející uživatelům plain \TeX u podobné možnosti, jako \LaTeX , ovšem přímočařeji a jednodušeji. |
| Con \TeX t | Typografický systém vystavěný na $\text{Lua}\text{\TeX}$ u a na předpřipravených makro souborech vytvořený týmem v čele s Hansem Hagenem. Rozličné uživatelské požadavky jsou nastavovány pomocí přiřazení hodnot klíčovým slovům společně s možností \TeX ového, METAPOSTího a Lua programování. |

B.2 Symboly

- π Konečná verze \TeX u zmíněna v Knuthově \TeX tamentu.
- e Konečná verze METAFONTu.
- 2ε Současná verze \LaTeX u používaná od roku 1994. Počítá se s ní jako s přechodnou verzí mezi původní Lamportovou verzí \LaTeX 2.09 a cílovou verzí \LaTeX 3. Tento přechodný stav už trvá 27 let.

B.3 Soubory, které jsou součástí CTUstyle3

| | |
|--|--|
| <code>ctustyle3.tex</code> | TeXová makra implementující šablonu ve verzi 3 (pro OpTeX). |
| <code>ctulogo-new.pdf</code> , <code>ctulogo-bw-new.pdf</code> | Logo ČVUT podle[6] v modré a černé variantě. |
| <code>Technika-Regular.otf</code> | Metrika a kresby písma Technika-Regular . |
| <code>Technika-Italic.otf</code> | Metrika a kresby písma <i>Technika-Italic</i> . |
| <code>Technika-Book.otf</code> | Metrika a kresby písma Technika-Book . |
| <code>Technika-BookItalic.otf</code> | Metrika a kresby písma <i>Technika-BookItalic</i> . |
| <code>Technika-Bold.otf</code> | Metrika a kresby písma Technika-Bold . |
| <code>Technika-BoldItalic.otf</code> | Metrika a kresby písma <i>Technika-BoldItalic</i> . |
| <code>ctustyle-doc.tex</code> | Hlavní zdrojový soubor tohoto dokumentu. |
| <code>uvod.tex</code> , <code>popis.tex</code> , <code>prilohy.tex</code> | Zdrojové soubory čtené z <code>ctustyle-doc.tex</code> s jednotlivými kapitolami tohoto dokumentu. |
| <code>cmelak1.jpg</code> | Obrázek použitý v ukázce, jak vložit obrázek. |
| <code>mybase.bib</code> | Údaje použité pro generování seznamu literatury. |
| <code>ctustyle-doc.pdf</code> | Tento dokument. |
| <code>slides.tex</code> | Zdrojový text ilustrující použití CTUslides. |
| <code>slides.pdf</code> | Výstupní ukázka ilustrující použití CTUslides včetně návodu k použití. |