

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA EKONOMIKY, MANAŽERSTVÍ A HUMANITNÍCH VĚD



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení otáček BLDC motoru

Autor: Mark Gurevich

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Gurevich** Jméno: **Mark** Osobní číslo: **406187**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Elektrotechnika a management**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řízení otáček BLDC motoru

Název bakalářské práce anglicky:

Speed Control of BLDC Drive

Pokyny pro vypracování:

- 1) Proveďte rešerši BLDC motorů a způsobů jejich řízení
- 2) Navrhněte měnič pro řízení BLDC motoru
- 3) Navrhněte a implementujte části kódu pro řízení otáček motoru
- 4) Proveďte ověření funkčnosti navrženého měniče a řízení
- 5) Ekonomické porovnání aplikace BLDC motoru prot komutátorovému DC motoru

Seznam doporučené literatury:

- [1] LEONHARD, Werner. Control of electrical drives. 3rd ed. Berlin: Springer, 2001.
- [2] JAVŮREK, Jiří. Regulace moderních elektrických pohonů. Praha: Grada, 2003.
- [3] návody k SW Altium designer
- [4] MOHAN, Ned. Advanced electric drives: analysis, control, and modeling using MATLAB / Simulink. Hoboken: Wiley, 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Bauer, Ph.D., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **11.12.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **09.01.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Bauer, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
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

Anotace

V úvodu práce jsou krátce popsány různé druhy elektrických motorů, jejich konstrukce a princip činnosti. Dále se práce zaměřuje na oblast bezkartáčových stejnosměrných motorů (BLDC), jejich vlastnosti a princip činnosti jsou rozebrány detailněji. V navazující části se provádí rozsáhlejší porovnání BLDC motoru s kartáčovými motory vyšší třídy, a to z ekonomického pohledu jejich aplikace. Praktická část práce se věnuje postupu návrhu reálného prototypu měniče pro řízení BLDC motoru bez čidla otáček, jeho uvádění do provozu a programování řídicí elektroniky.

Klíčová slova

BLDC, elektrický motor, bezkartáčový, měnič, střídač, bezsensorové řízení, trapézové řízení, indukované napětí, průchod nulou, nákladové posouzení, přímé náklady, nepřímé náklady

Annotation

The introduction to this thesis lists different types of motors, as well as describes their design and theory of operation. Next, the research focuses on brushless direct current motors (BLDC) with their qualities and properties explained more closely. Following section contains a thorough cost comparison of BLDC and high-grade brush DC motors. Practical part of the thesis is devoted to a step-by-step process of a working prototype BLDC sensorless motor controller development, including an insight to control electronics programming.

Key words

BLDC, electrical motor, brushless, converter, inverter, sensorless control, trapezoidal control, Back-EMF, zero crossing, cost evaluation, direct cost, indirect cost

Prohlášení

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

.....

podpis autora práce

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat Ing. Janu Baueru, Ph.D. za trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat našemu týmu elektrické formule eForce, kde jsem měl možnost čerpat mnoho zajímavých zkušeností, Fakultě Elektrotechniky, za poskytnutí prostor a nástrojů pro výrobu a nakonec mé rodině, která se mně snažila podporovat celé mé studijní období.

Obsah

1	Elektrické motory	1
1.1	Úvodní slovo	1
1.2	Fyzikální procesy v elektrickém motoru a základní fyzikální vztahy. Obrys konstrukce.	2
1.2.1	Magnetické pole, magnetický obvod	2
1.2.2	Elektromagnetická indukce	4
1.2.3	Energie a ztráty	5
1.3	Druhy motoru	6
1.3.1	Stejnoseměrné motory	6
1.3.2	Střídavé motory	6
2	BLDC motor	10
2.1	Úvod, konstrukce	10
2.2	Vztahy a vzorce	12
2.2.1	Svorkové napětí	12
2.2.2	Okamžitá hodnota proudu	13
2.2.3	Indukované napětí	13
2.2.4	Moment	13
3	Řízení BLDC motoru	14
3.1	Důležité body řízení BLDC motorů	14
3.2	Senzorové řízení	15
3.2.1	Hallovy senzory	16
3.2.2	Enkodéry	16
3.2.3	Resolvery	16
3.3	Bezsenzorové řízení	16
4	Ekonomické hodnocení	20
5	Návrh měniče pro řízení BLDC motoru	26
5.1	Výkonový modul	26
5.2	Invertorová část měniče	29
5.3	Sledování průchodu nulou indukovaného napětí	31
5.4	Realizace DPS	32
6	Ověření funkcí navrženého měniče	35
6.1	Ověření funkčnosti měniče	35
6.2	Ověření funkčnosti obvodu sledování zpětného indukovaného napětí	38

7	Návrh a implementace algoritmu řízení komutace motoru	41
7.1	„Open-loop“ provoz	41
7.2	„Closed-loop“ provoz	44
8	Závěr	46

Seznam obrázků

1	Konstrukční rysy DC motoru	1
2	Vlevo – siločáry elektromagnetického pole samotného vodiče, kterým prochází proud; vpravo – cívka a siločáry elektromagnetického pole cívky. . .	2
3	Magnetický obvod se vzduchovou mezerou	3
4	„Evoluce“ magnetického jádra se vzduchovou mezerou tvaru „C“	4
5	Vlevo – změna magnetického toku; vpravo – vodič, pohybující se v magnetickém poli	4
6	Druhy stejnosměrných motoru	6
7	Rotor asynchronního motorů s trojfázovým vinutím	7
8	Klecový rotor asynchronního motoru	7
9	Asynchronní motor, demonstrační vzorek	8
10	Schematická konstrukce synchronního motoru	9
11	Stator BLDC motoru	11
12	Druhy provedení rotoru BLDC motoru	12
13	Zapojení měniče a fází BLDC motoru	14
14	Sekvence spínání jednotlivých fází a směr průchodu proudu vinutím . . .	15
15	Mechanická charakteristika BLDC motoru	18
16	Průběh indukovaného napětí na statoru, průběh proudu statorem	19
17	Vnitřní blokové schéma modulu FSBB15CH60C	27
18	Schéma HW části měniče	30
19	Schéma zapojení pro měření indukovaného napětí na fázích motoru	31
20	Výpočet napět'ového děliče	32
21	„Layout“ DPS	33
22	„Layout“ DPS (skryté polygony, reprezentující zem)	33
23	Osazena DPS	34
24	Pohled z boční strany	34
25	Měřicí pracoviště	35
26	Jev „deadtime“, průběhy napětí na GATE dvou ventilů jedné fáze	36
27	Průběh PWM signálu na vstupu do výkonového modulu	37
28	Průběh PWM signálu na vstupu do výkonového modulu	37
29	Průběh PWM signálu a napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru fáze U	38
30	Ověření funkčnosti obvodu sledování indukovaného napětí	39
31	Průběhy napětí na výstupu operačních zesilovačů	40
32	Programovací kód pro nastartování PWM	41
33	Programovací kód pro jeden krok komutace	41
34	Směr průchodu proudu	42
35	Rutina „open-loop“ provozu	43
36	Metoda, obsluhující přerušení	44

37	Vývojový diagram „closed loop“ řízení	45
----	---	----

Seznam tabulek

1	Porovnání BLDC motorů a motorů kartáčových	20
2	Podíl výrobních nákladů jednotlivých komponent BLDC motoru na celkové náklady.	23
3	Podíl výrobních nákladů jednotlivých komponent kartáčového DC motoru vyšší třídy na celkové náklady.	24
4	Popis pinů FSBB15CH60C	28

1 Elektrické motory

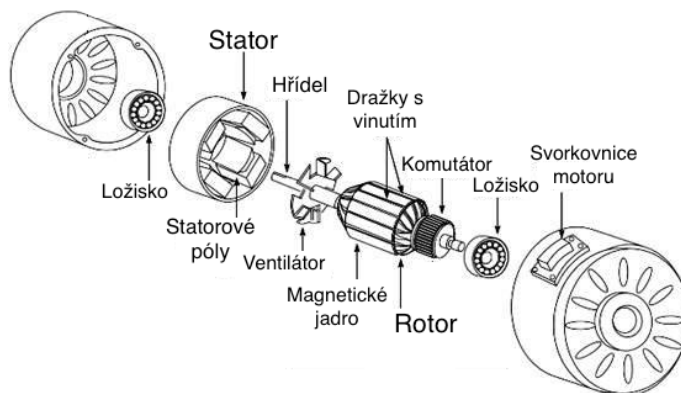
1.1 Úvodní slovo

Elektrický stroj točivý se stal už ode dne vynalezení velmi významným ve světě techniky a stejně tak v lidském životě. Principy přeměny elektrické energie na mechanickou a energie mechanické na elektrickou, na kterých jsou založené elektrický motor resp. generátor, jsou v dnešní době základem velice velkého podílu moderní techniky. Poměrně konstrukčně nekomplikovaná zařízení, jako například různé jednoduché nářadí, domácí spotřebiče a hračky, a také víc sofistikované systémy: auta, letadla, zdravotnická a „aerospace“ zařízení v sobě obsahují jeden nebo víc elektromotorů, případně generátorů.

Jako první je třeba definovat pojem elektrický stroj točivý: elektrickým strojem točivým je zařízení na přeměnu energie. Na tomto principu se točivé elektrické stroje dělí na:

- **Motory** – přeměňují energii elektrickou na mechanickou;
- **Generátory** – přeměňují energii mechanickou na elektrickou. [3]

V této práci bude pozornost věnována průzkumu elektrických motorů.



Obrázek 1: Konstrukční rysy DC motoru

Zdroj: 2013. *Electrical Knowhow*. Dostupný:

<http://www.electrical-knowhow.com/2012/05/electrical-motors-basic-components.html>

1.2 Fyzikální procesy v elektrickém motoru a základní fyzikální vztahy. Obrys konstrukce.

1.2.1 Magnetické pole, magnetický obvod

Činnost všech elektrických motorů je založena na jednoduchém principu. Podle Biotova-Savartova zákona platí, že když se vodič, kterým prochází elektrický proud umístí do magnetického pole, budou na něj působit síly, kterým se říká síly elektromagnetické. Velikost těchto sil závisí přímo na velikosti proudu, procházejícího vodičem, délce tohoto vodiče, velikosti magnetické indukce a úhlu natočení vodiče vůči siločarám magnetického pole. Podle Ampérova zákona je vztah pro sílu v magnetickém poli následující:

$$dF = I dl \times B$$

kde

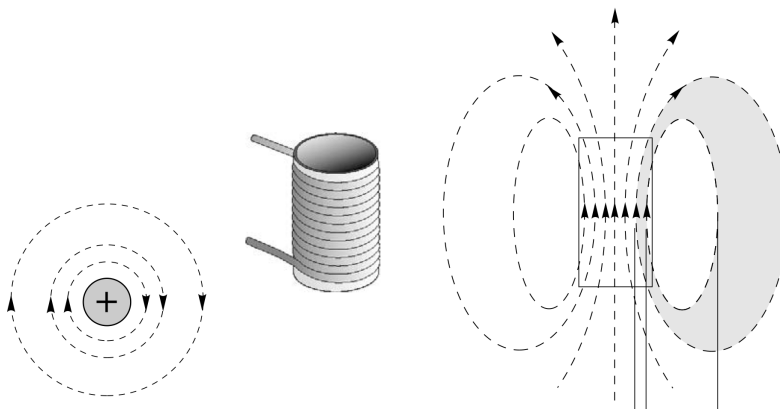
F – síla [N],

B – magnetická indukce [T],

I – elektrický proud [A],

l – délka [m],

Zdrojem magnetického pole může být jak permanentní magnet, tak i vodič, kterým prochází elektrický proud. Siločáry takového magnetického pole představují koncentrické kružnice, přičemž rovina, ve které se nachází, je kolmá k vektoru směru elektrického proudu.



Obrázek 2: Vlevo – siločáry elektromagnetického pole samotného vodiče, kterým prochází proud; vpravo – cívka a siločáry elektromagnetického pole cívky.

Zdroj: Austin Hughes. *Electric Motors Drives. Fundamentals, Types and Applications.* ([1])

Podobným způsobem se dá představit magnetické pole cívky, kde výsledkem superpozice pole jednotlivých závitů je její výsledné pole. Jak je znázorněno na obrázku, magnetické siločáry uvnitř cívky mají větší hustotu než vně. Ale v tomto případě, má magnetický tok za prvé stále poměrně malou hodnotu pro použití v motoru a za druhé se rozprostře ve vzduchu. Pro účely udržení magnetického toku a zvětšení jeho hustoty uvnitř cívky lze umístit magnetické jádro, tím pádem se uvnitř této cívky zmenší magnetický odpor (reluktance) a zvětší se celkový magnetický tok podle vzorce:

$$= \frac{NI}{R_m}$$

kde

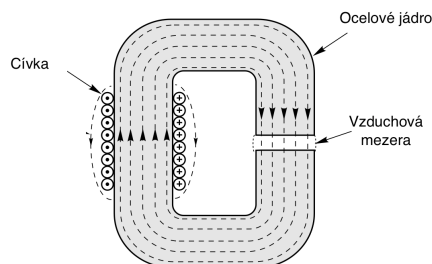
Φ – magnetický tok [Wb],

N – počet závitů [-],

I – elektrický proud[A],

R_m – magnetický odpor (reluktance) [H^{-1}]

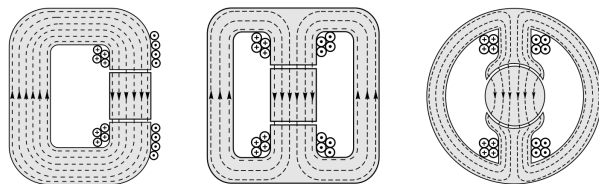
Dobrym materiálem pro magnetické jádro může být například křemíková ocel. Používá se zejména pro výrobu elektrických motorů. Přestože vzduch je slabé magnetické medium, vzduchová mezera je nezbytnou součástí elektrického motoru, jinak nebude kam umístit reakční část, na kterou bude působit magnetický obvod (rotor elektrického motoru). [1]



Obrázek 3: Magnetický obvod se vzduchovou mezerou

Zdroj: Austin Hughes. *Electric Motors Drives. Fundamentals, Types and Applications.* ([1])

Ted' zbývá malý krok pro přechod od pozorovaného magnetického obvodu k elektrickému motoru, což je transformace jeho geometrie téměř bez žádných změn. Následující obrázek 4 znázorňuje tuto transformaci:



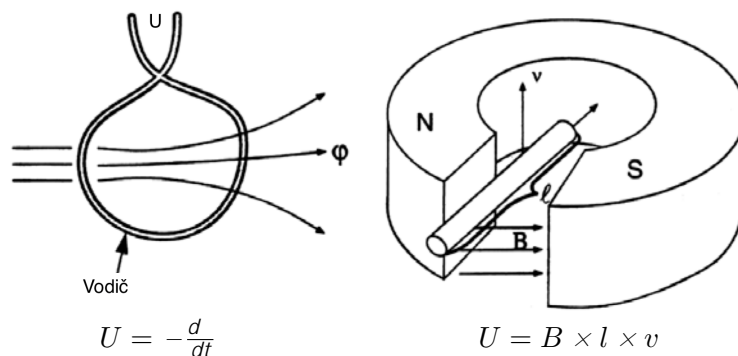
Obrázek 4: „Evoluce” magnetického jádra se vzduchovou mezerou tvaru „C”
 Zdroj: Austin Hughes. *Electric Motors Drives. Fundamentals, Types and Applications.* ([1])

1.2.2 Elektromagnetická indukce

Obrovskou roli v teorii elektrických strojů hraje zákon o elektromagnetické indukci, který formuloval britský vědec Michael Faraday, a jeví se ve dvou částech:

1. Ve vodiči, pohybujícím se ve stacionárním elektromagnetickém poli se bude indukovat napětí.
2. Změna magnetického toku uvnitř uzavřené vodivé smyčky má za důsledek indukování napětí v této smyčce

V obou případech má největší význam rychlost změny, a to na výsledném rozdílu potenciálu. Obrázky a vzorce níže znázorňují oba případy elektromagnetické indukce a poskytují představu o základních vztazích magnetického toku (měnícího se v čase) a napětí indukovaného ve smyčce, pro první případ, a vztahy mezi indukovaným napětím ve vodiči pohybujícím se ve stacionárním poli – pro případ druhý.



Obrázek 5: Vlevo – změna magnetického toku; vpravo – vodič, pohybující se v magnetickém poli

Zdroj: Geoff Klempner, Isidor Kerszenbaum. *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance, 2nd Edition.* ([2])

kde

U – napětí [V],

φ – magnetický tok [Wb],

t – čas [s],

B – magnetická indukce [T],

l – délka vodiče [m],

v – rychlost pohybu vodiče [m/s].

Faradayův zákon a zákon Amper-Biot-Savarta (již zmíněný dříve), se spojují v zákon, který vyjádřil estonský fyzik Heinrich Lenz. Lenzův zákon říká, že indukovaný proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.

Tím pádem, když je vodič nucen k pohybu přes siločáry magnetického pole, bude se v něm indukovat napětí (Faradayův zákon). Když v tom případě spojíme dva konce tohoto vodiče, začne přes něj procházet elektrický proud, který vyvolá působení síly na tento vodič. Podle Lenzova zákona bude tato síla působit proti pohybu vodiče v původním směru.

Tyto jevy jednoduše popisují motorické a generátorické režimy práce elektrického stroje. Je to například vysvětlením toho, proč se v elektrickém motoru zvětšuje spotřeba při nárůstu zátěže. [2]

1.2.3 Energie a ztráty

Elektrický stroj je stroj pro přeměnu energie. Tato přeměna probíhá se ztrátami. Rozdíl mezi vstupním výkonem a výstupním výkonem udává účinnost elektrického stroje, většinou procentově.

$$\eta = \frac{\text{Výstupní energie}}{\text{Vstupní energie}} = \frac{\text{Výstupní výkon}}{\text{Vstupní výkon}}, \quad (100\%)$$

kde η - účinnost.

Ztráty v motoru způsobují jeho oteplení. Ztráty lze rozdělit do pěti hlavních oblastí:

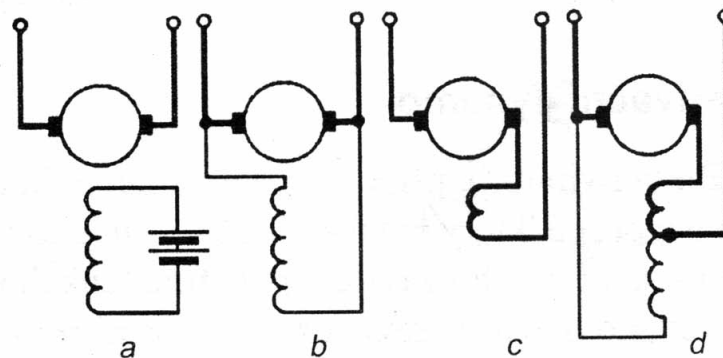
- mechanické (P_{mech}), způsobené třením v ložiskách, proporcionální rychlosti motoru
- v železe (P_{Fe}), dělí se na:
 - ztráty hysterezní,
 - ztráty vířivými proudy

- I^2R , nebo Ohmické ztráty: ve vinutích statoru ($P_{stator. vin.}$) a rotoru ($P_{rotor. vin.}$)
- přídatné ($P_{přid.}$), slouží jako bezpečnostní kvóta pro výpočty při návrhu.[5, 6]

1.3 Druhy motoru

1.3.1 Stejnosměrné motory

Konstrukční uspořádání stejnosměrného, nebo DC (angl. direct current) motoru je naznačeno na obr. 1. U klasického stejnosměrného motoru vinutími statoru a rotoru prochází stejnosměrný proud. Vinutí rotoru je umístěno na vnějším obvodu rotoru a je tvořeno cívkami, které jsou spojeny do série a jejichž konce jsou připojeny pomocí kartáčů na komutátor, který slouží jako mechanický měnič. Komutátor je největší nevýhodou stejnosměrných motorů a také jeho nejdražší a nejsložitější částí. Výhodou DC motoru je široká regulace otáček a dobré trakční vlastnosti. Používají se proto například ve vácovkách nebo ve tramvajích. Přesto v dnešní době stejnosměrné motory postupně ztrácí svůj význam a jsou nahrazované střídavými motory. Podle zapojení statoru a rotoru se stejnosměrné motory dělí se na různé druhy: motory s cizím buzením (a), motory s paralelním buzením (b), motory se sériovým buzením (c) a motory se smíšeným buzením (d), viz – obr. 6 níže. [3]



Obrázek 6: Druhy stejnosměrných motoru

Zdroj: 2009. *Elektrika.cz. Hlavní druhy stejnosměrných strojů.* Dostupný:
<http://elektrika.cz/data/clanky/hlavni-druhy-stejnosmernych-stroju/view>

1.3.2 Střídavé motory

Jak je zřejmé z názvu, daný druh elektrických motorů se budí střídavým elektrickým proudem. Pokud stator stroje obsahuje minimálně dvě prostorově natočená vinutí, napájená časově posunutými proudy, ve vzduchové mezeře střídavého stroje vzniká točivé

magnetické pole. V případě jednofázového vinutí ve stroji vzniká střídavé magnetické pole.

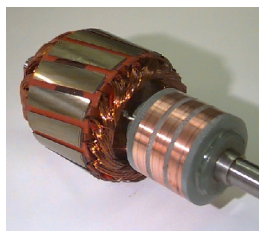
Mechanická rychlost točení pole rotoru je dána počtem pólu, resp. pólových dvojic p :

$$\omega = \frac{2}{p} f \text{ (rad/s)} \quad \text{nebo} \quad n = \frac{60 f}{p} \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

kde f – frekvence.

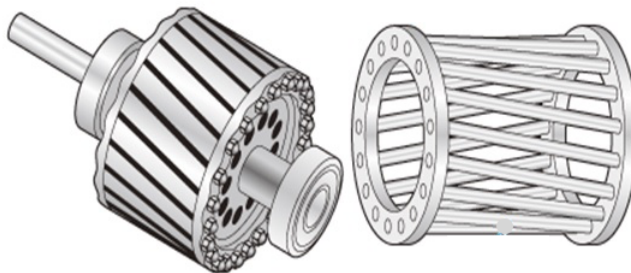
Asynchronní motor:

Asynchronní motory mají v moderní technice velký význam. Využívají se u čerpadel, ventilátorů, brusek, pohonů pojezdu a bran a mnoha dalších zařízení. Stator je složen z ocelových plechů, přičemž má v sobě drážky, ve kterých je uložené statorové vinutí. Rotor bývá složen z drážkovaných plechů buď s trojfázovým vinutím nebo je klecový (vyrobený z mědi, bronzu nebo hliníku). [3]



Obrázek 7: Rotor asynchronního motorů s trojfázovým vinutím

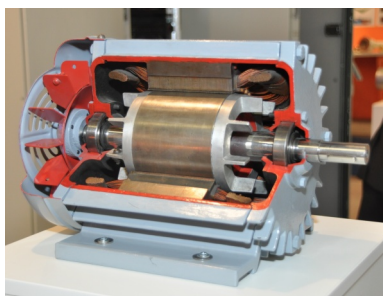
Zdroj: Sniram Balu. 2012. *Slip Ring Induction Motors Basics*. Bright Hub Engineering.
Dostupný: <http://www.brighthubengineering.com/diy-electronics-devices/43725-slip-ring-induction-motors-basics/>



Obrázek 8: Klecový rotor asynchronního motoru

Zdroj dostupný: <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-synchronous-motors-with-damper-winding-and-induction-motor>

Princip činnosti asynchronního motoru je založen na Lenzově zákonu. Statorové vinutí vytváří rotující trojfázové magnetické pole, které vyvolá ve stojícím rotoru indukované napětí a v jeho uzavřeném obvodu začne téct proud. Vzájemným působením tohoto proudu s magnetickým polem statoru se vytváří moment působící proti změně vzájemné polohy statorového pole a rotoru. Tím pádem se rotor bude točit spolu se statorovým polem. Točit se však bude v případě, pokud rozdíl rychlostí otáčení statorového pole a rotoru bude odlišný od nuly, tj. existuje nenulový *skluz*. V případě, když se rotor otáčí rychleji, než točivé pole statoru, stroj přechází do generátorického režimu.



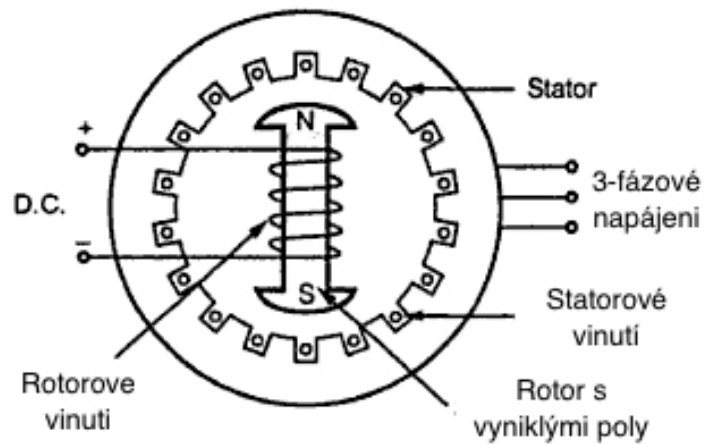
Obrázek 9: Asynchronní motor, demonstrační vzorek

Zdroj: Přehled a zapojení motorů. Dostupný:

<https://www.mylms.cz/text-prehled-a-zapojeni-motoru/>

Synchronní motor:

Synchronní motory se používají především v průmyslu buď pro kompenzaci jalového výkonu a zlepšování účinníku sítě, nebo pro pohon velkých čerpadel, kompresorů a ventilátoru, kde pracují většinou v nepřetržitém provozu s konstantním zatížením. Stator synchronního stroje bývá většinou složen z plechů pro elektrotechniku. Statorové vinutí tvoří cívky vzájemně posunutě o 120 stupňů elektrických, podobně jako u stroje asynchronního. Avšak rotor nemusí být složen z plechů, jelikož v něm nevznikají ztráty v železe, proto bývá vyroben ze zušlechtěné oceli. Na rotoru je budicí vinutí, které je napájené stejnosměrným proudem. Při běhu synchronního motoru se jeho rotor otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole statoru. Ve případě zvětšení mechanického zatížení hřídele rotor se bude zpožďovat za statorovým polem o konstantní úhel. [3]



Obrázek 10: Schematická konstrukce synchronního motoru

Zdroj: Venugopal Govindu. 2013. *Construction of Three Phase Synchronous Motor*. Dostupný: <http://kbreee.blogspot.cz/2013/07/construction-of-three-phase-synchronous.html>

Zvláštním případem synchronního motoru je tzv. BLDC motor, který bude podrobněji popsán dále.

2 BLDC motor

2.1 Úvod, konstrukce

Brushless Direct Current (BLDC) motor, aneb bezkartáčový stejnosměrný motor je jedním z druhů elektrických motorů, jejichž popularita dnes strmě roste. Používají se ve mnoha různých aplikacích, jako například automobilový průmysl, letectví, lékařství, průmyslová automatizace a tak dále. BLDC motory mají řadu výhod oproti klasickým stejnosměrným a asynchronním motorům. Mezi tyto výhody patří:

- lepší charakteristika rychlost/výkon;
- rychlá dynamická odezva;
- vysoká účinnost;
- dlouhá životnost;
- bezhlučný provoz;
- širší rychlostní pásmo.

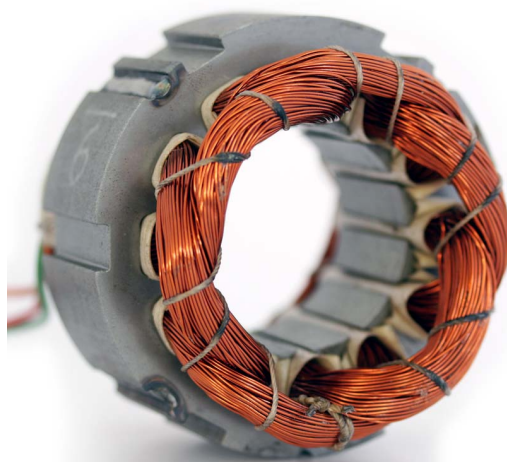
Kromě toho, poměr výkonu dodávaného motorem ku rozměrům motoru je lepší, což je vhodné pro aplikace, kde kritickými faktory jsou zástavbový prostor a váha. [7]

Konstrukce:

BLDC motor se považuje za druh synchronního motoru díky tomu, že magnetické pole statoru se otáčí se stejnou rychlostí jako magnetické pole rotoru. A proto v případě bezkartáčových stejnosměrných motorů pojem „skluz“ nemá význam, na rozdíl od motorů asynchronních.

BLDC motory bývají jednofázové, dvoufázové a trojfázové. Stejným způsobem, se liší počet statorových vinutí. Mezi nimi má nejrozšířenější využití má trojfázový motor, na který se soustředí tato práce.

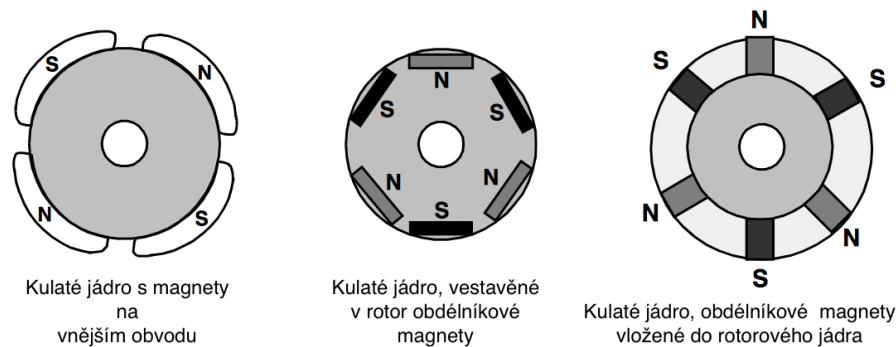
Stator BLDC motoru je složen z ocelových plechů s drážkami, ve kterých je uloženo vinutí. Konstrukce je podobná statoru asynchronního motoru, akorát je jinak rozložení vinutí. Většina BLDC motorů má tři statorová vinutí, zapojená do hvězdy. Každé z nich je tvořeno několika spojenými cívkami, které jsou rovnoměrně rozloženy po obvodu statoru a uloženy do drážek takovým způsobem, aby tvořily sudý počet pólů. [7]



Obrázek 11: Stator BLDC motoru

Zdroj dostupný: <http://oyoun-alarab.ps/a/news.php?action=view&id=196>

Rotor BLDC motoru je vyroben z permanentních magnetu. Počet střídajících se pól-páru může být od dvou do osmi. Volba vhodného magnetického materiálu závisí na požadavku hustoty magnetického pole uvnitř rotoru. V klasickém provedení BLDC motorů se rotor vyrábí z ferritových magnetů. Ferritové magnety jsou levné ale mají nevýhodu v poměrně malé hodnotě hustoty magnetického toku pro daný objem. S pokrokem techniky popularitu získávají magnety z kovů vzácných zemin a slitinové magnety. Použití takových magnetů zlepšuje poměr magnetické hustoty k objemu motoru a dovoluje zmenšit rozměr rotoru při zachování stejné hodnoty jmenovitého momentu. Použitím magnetů z kovů vzácných zemin a slitinových magnetů se získává lepší poměr objemu k váze. Mezi takové magnety patří neodymové (Nd, NdFeB) a Samarium-kobaltové (SmCo). [7]



Obrázek 12: Druhy provedení rotoru BLDC motoru

Zdroj: Padmaraja Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. AN885 Microchip Technology Inc. ([7])

2.2 Vztahy a vzorce

2.2.1 Svorkové napětí

Z Kirchhoffova zákona o napětí ve smyčce vyplývá vztah pro okamžitou hodnotu svorkového napětí na jedné fázi motoru:

$$u_1 = u_i + R_1 i_a + L_s \frac{di_a}{dt}$$

kde

u_i – okamžitá hodnota indukovaného napětí na vinutí jedné fáze;

i_a – okamžitý proud vinutím;

R_1 – odpor vinutí;

L_s – indukčnost vinutí.

Daný vzorec se vztahuje na motor s vinutím zapojeným „do hvězdy”. Pro systém, v němž jsou třífázový šestiventilový můstkový střídač a motor s vinutím, zapojeným „do hvězdy” platí, že během jedné komutační periody jsou vždy zapojeny dvě fáze do série. Resp. pro fáze A a B platí:

$$u_1 = (u_{iA} - u_{iB}) + 2R_1 i_a + 2L_s \frac{di_a}{dt}$$

kde $(u_{iA} - u_{iB}) = u_{iAB}$ (nebo U_{iL-L}) je indukované napětí na dvou zkoumaných fázích, spojených do série. [4]

2.2.2 Okamžitá hodnota proudu

Za předpokladu ideálních bezimpedančních spínačů, $u_1 = U_{dc}$ kde U_{dc} – stejnosměrné napětí na vstupu střídače a $L_s \approx 0$, je okamžitá hodnota proudu vinutím: $i_a(t) = \frac{U_{dc} - U_{iL-L}}{2R_1}$.

Když se bude brát v úvahu indukčnost L_s a za předpokladu $u_{iL-L} = U_{iL-L} = const$, dostaneme:

$$i_a(t) = \frac{U_{dc} - U_{iL-L}}{2R_1} (1 - e^{-(R_1/L_s)t}) + I_{amin} e^{-(R_1/L_s)t}$$

kde I_{amin} je proud vinutím v okamžiku $t = 0$. Stroj je podbuzen, jelikož $U_{dc} > U_{iL-L}$ pro danou náběžnou hranu. [4]

2.2.3 Indukované napětí

Indukované napětí ve vinutí je přímo úměrné rychlosti rotoru:

$$U_i = k_e \Phi_i n,$$

kde k_e – konstanta vinutí stroje, Φ_i - magnetický tok (pro nabuzený stroj a zanedbatelnou reakci vinutí $i = const.$), n – rychlost otáčení rotoru. [4]

2.2.4 Moment

Vztah pro hnací moment motoru zní následovně:

$$M = k_t \Phi_i I_a,$$

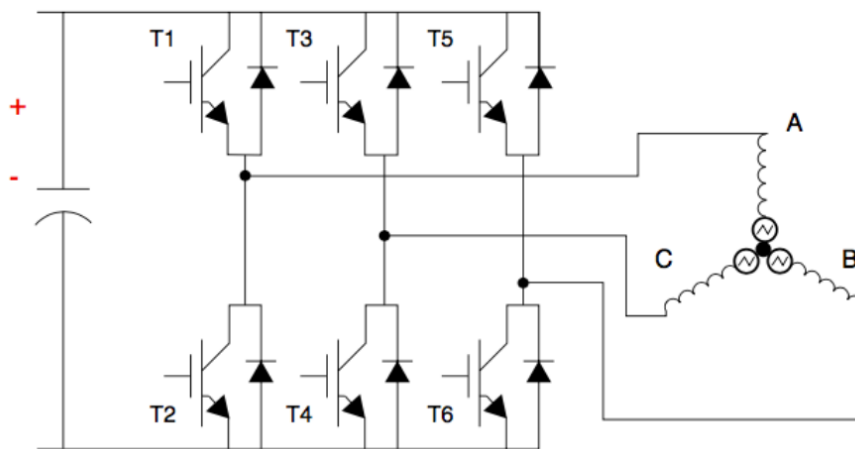
kde k_t – momentová konstanta stroje, I_a – statorový proud. [4]

3 Řízení BLDC motoru

3.1 Důležité body řízení BLDC motorů

Velmi důležitým pojmem v teorii elektrických strojů je pojem komutace. Komutací se nazývá zkrátka, proces buzení jednotlivých fází elektrického motoru a jejich následného přepínání. Ve třífázovém BLDC motoru je v každém okamžiku jedno ze statorových vinutí připojeno na kladný pól napájení, druhé vinutí je připojené na záporný pól a třetí vinutí zůstává nenapájené. Mechanický moment se vytváří vzájemným působením magnetického pole vytvořeného statorovými vinutími a poli permanentních magnetů rotoru. V ideálním případě se největší moment dosahuje, když jsou tato pole jsou navzájem natočená o 90° a zmenšuje se při jejich přiblížení k sobě. Aby se motor točil nepřetržitě, magnetické pole statorových vinutí se musí posouvat, jakmile rotor toto pole dohání. Metoda, pojmenovaná šesti-kroková komutace (angl. Six-Step Commutation), popisuje sekvenci komutací mezi fázemi pro správné řízení BLDC motoru. [7]

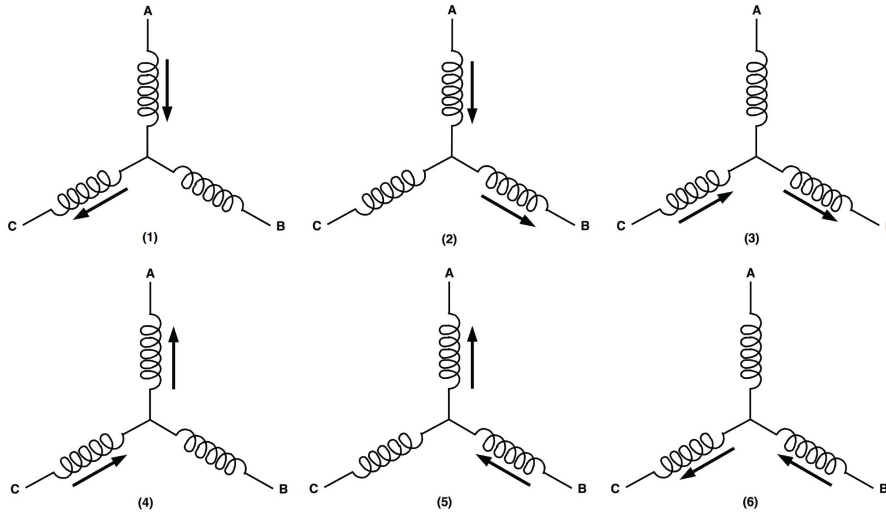
Jak bylo uvedené výše, daná práce se soustředí na uspořádání BLDC motoru, kde jsou statorová vinutí zapojená do hvězdy. Pro řízení takového motoru se používá klasický šestiventilový trojfázový můstkový střídač, kde je každý z můstků připojen na jednotlivou fázi BLDC motoru. Níže na obrázku 13 je toto zapojení znázorněné (A, B, C jsou jednotlivé fáze motoru).



Obrázek 13: Zapojení měniče a fází BLDC motoru

Zdroj: Dennis Nolan. *Sensorless six-step BLDC commutation*. ST microelectronics AN4220.

Jak je zřejmé ze schématu, pro správné pořadí napájení jednotlivých fází motoru je nutné dodržovat určitou sekvenci sepnutí příslušných ventilů. Následující obrázek představí šest kroků spínání jednotlivých fází a směr průchodu proudu přes příslušné statorové vinutí.



Obrázek 14: Sekvence spínání jednotlivých fází a směr průchodu proudu vinutím
 Zdroj: Padmaraja Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. AN885 Microchip Technology Inc. ([7])

Kroky vedení:

1. Otevřené T1 a T4, proud teče přes vinutí A a C.
2. Otevřené T1 a T6, proud teče přes vinutí A a B.
3. Otevřené T3 a T6, proud teče přes vinutí C a B.
4. Otevřené T3 a T2, proud teče přes vinutí C a A.
5. Otevřené T5 a T2, proud teče přes vinutí B a A.
6. Otevřené T5 a T4, proud teče přes vinutí B a C.

V závislosti na proudových a napěťových požadavcích motoru, jako ventily, mohou sloužit MOSFET, IGBT, nebo jednoduché bipolární tranzistory. Použití techniky pulzně šířkové modulace (PWM) při spínání tranzistorů v měniči dovoluje střídat napájení jednotlivých vinutí v rozmezí napětí zdroje s vysokou spínací frekvencí, přičemž na statorovém vinutí je střední hodnota spínaného napětí. Tímto lze dosáhnout zvolené hodnoty napětí na napájeném vinutí. [7]

3.2 Senzorové řízení

Jak bylo zmíněno dříve, pro plynulý a nepřetržitý provoz BLDC motorů je nutné dodržovat správné a včasné sekvence přepínání jednotlivých fází. Proto, aby motor pracoval

efektivně, je potřeba znát v každém okamžiku pozici rotoru. Na rozdíl od kartáčových stejnosměrných motorů, u BLDC motoru neexistuje mechanická vazba mezi rotorem a statorem. Důsledkem toho je nutné řešit komutaci jinak, a to elektronicky, např. pomocí *snímačů polohy*, tj. *Hallových čidel*, *enkodéru*, nebo *resolveru*. Ve strojích točivých snímače polohy poskytují zpětnovazební signál úměrný úhlu natočení rotoru. [4]

3.2.1 Hallovy senzory

Hallová sonda je snímačem magnetického pole. Když se bude napájet stejnosměrným proudem a bude umístěna do stacionárního magnetického pole, na výstupu se vygeneruje napětí podle vzorce:

$$U_H = k_H \frac{1}{\delta} I_c B \sin \beta$$

kde k_H – Hallova konstanta, δ – tloušťka polovodiče, I_c – napájecí proud, B – hustota magnetického pole, β – úhel mezi vektorem B a rovinou povrchu Hallovy sondy. Polarita odpovídá tomu, jaký pól projíždí čidlem - Severní nebo Jižní. Pro zjištění polohy rotoru třífázového BLDC motoru se požadují 3 Hallovy snímače. Většinou jsou vestavěny ve statoru stroje a umístěny u vnějšího okraje se rozestupem 120°. [4]

3.2.2 Enkodéry

Existují dva druhy *optických enkodérů*: absolutní a inkrementální. U optických enkodérů se generuje paprsek světla, který prochází průsvitnými částmi otáčejícími se spolu s rotorem stroje. Paprsek je pak snímán fotosnímačem. V *inkrementálním enkodéru* jsou generovány pulzy závislé na změně natočení hřídele. Dvoukanálový enkodér je schopen poskytovat informaci o směru točení stroje. V tomto případě výstupní obdélníkové signály kanálu jsou navzájem posunuté o 90°. [4]

3.2.3 Resolvery

Resolver je v podstatě elektromechanický transformátor, který poskytuje na výstupu trigonometrickou funkci svého vstupu. Primární vinutí je umístěné na rotoru resolveru, sekundární vinutí jsou umístěná na statoru soustavy, přičemž jsou natočená navzájem o 90°. Tím pádem výstupními signály jsou sinusová a kosinusová funkce úhlu natočení rotoru. [4]

3.3 Bezsenzorové řízení

Existuje řada důvodů pro eliminaci elektromechanických snímačů polohy u BLDC motoru:

- snížení ceny elektrického pohonu;
- zvýšení spolehlivosti systému;
- teplotní omezení Hallových senzorů;
- u motorů malých výkonů (do 1W) energetická spotřeba snímačů polohy značně snižuje účinnost pohonu;
- problém umístění snímačů polohy ve kompaktních aplikacích, spojených se omezením zástavbového prostoru (např. pohon pevného disku počítače).

Pořizovací cena enkodéru pro motory s permanentními magnety s výkonem do 10 kW nabývá 10% výrobních nákladů samotného stroje a záleží na typu motoru a druhu enkodéru. Navíc eliminace elektromechanických senzorů a jejich vodičů nejen zvýší spolehlivost, ale i zjednoduší instalaci systému.

Implementováním bezsenzorového řízení výrobci pevných disků dokáží posunout hranici rozměru, ceny a účinnosti. Díky bezsenzorovému motoru s permanentními magnety 2,5-palcový pevný disk spotřebovává méně než 1W.

Teplotní omezení Hallových senzorů může být překážkou pro použití BLDC motoru v kompresorech chlazených freonem. Bezsenzorové motory jsou pak použitelné v lednicích a klimatizacích.

Informace o pozici rotoru bezkartáčových motorů s permanentními magnety je možné získat pomocí jedné z následujících metod:

- sledování zpětného indukovaného napětí;
- sledování třetí harmonické napětí statoru;
- sledování doby vedení nulových diod zapojených antiparalelně k tranzistorům měniče;
- měření změny indukčností v různých osách pomocí svorkových napětí a proudu. [4]

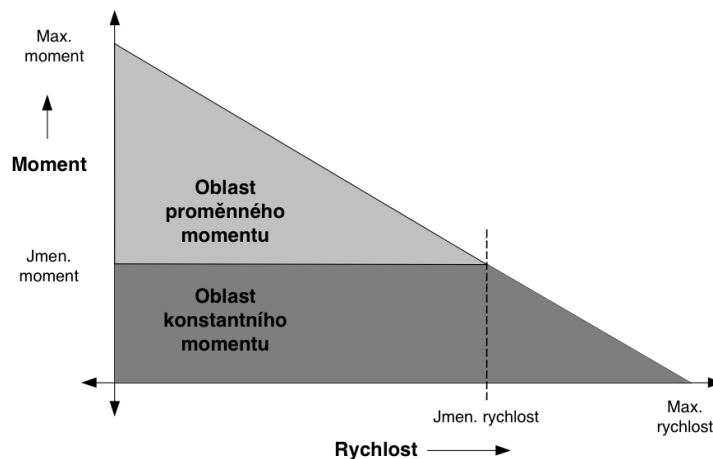
Pro tuto práci byla zvolena metoda sledování indukovaného napětí. Pro pochopení principu bezsenzorového řízení BLDC motorů pomocí této metody je potřeba popsat jev „zpětné“ indukce, angl. back-EMF.

Když se BLDC motor otáčí, tak se důsledkem rotace magnetického pole rotoru ve statorovém vinutí indukuje napětí. Podle Lenzova zákona, toto napětí působí proti napájecímu napětí a má opačnou polaritu. Podle vzorce ve kap. 2.2.2 „zpětné“ indukované napětí záleží na:

- úhlové rychlosti rotoru;
- hustotě magnetické indukce rotorových permanentních magnetů;

- počtu závitů statorového vinutí.

Když je motor vyroben, hustota magnetického pole jeho rotoru a počet závitů statorového vinutí zůstává konstantní. Tím pádem je jedinou proměnnou úhlová rychlost rotoru. Když úhlová rychlost roste, stoupá i hodnota „zpětného“ indukovaného napětí. Výrobce motoru poskytuje konstantu „zpětného“ indukovaného napětí pro danou rychlost. Odečtením indukovaného napětí od napětí napájecího lze zjistit napětí na jednotlivých fázových vinutích. BLDC motory jsou navrženy tak, že se bere v úvahu konstanta zpětného indukovaného napětí a při otáčení určitou rychlostí je určitý rozdíl mezi napájecím a indukovaným napětím, motor odebírá ze zdroje daný proud a má daný moment. Při zvětšení rychlosti může indukované napětí podstatně vzrůst, což má za následek zmenšení napětí na vinutí, což vede ke snížení spotřeby motoru a poklesu momentové křivky. V posledním bodě rychlostní křivky napájecí napětí se rovná součtu indukovaného napětí a ztrát v motoru, odebíraný proud a moment se blíží k nule. [7]



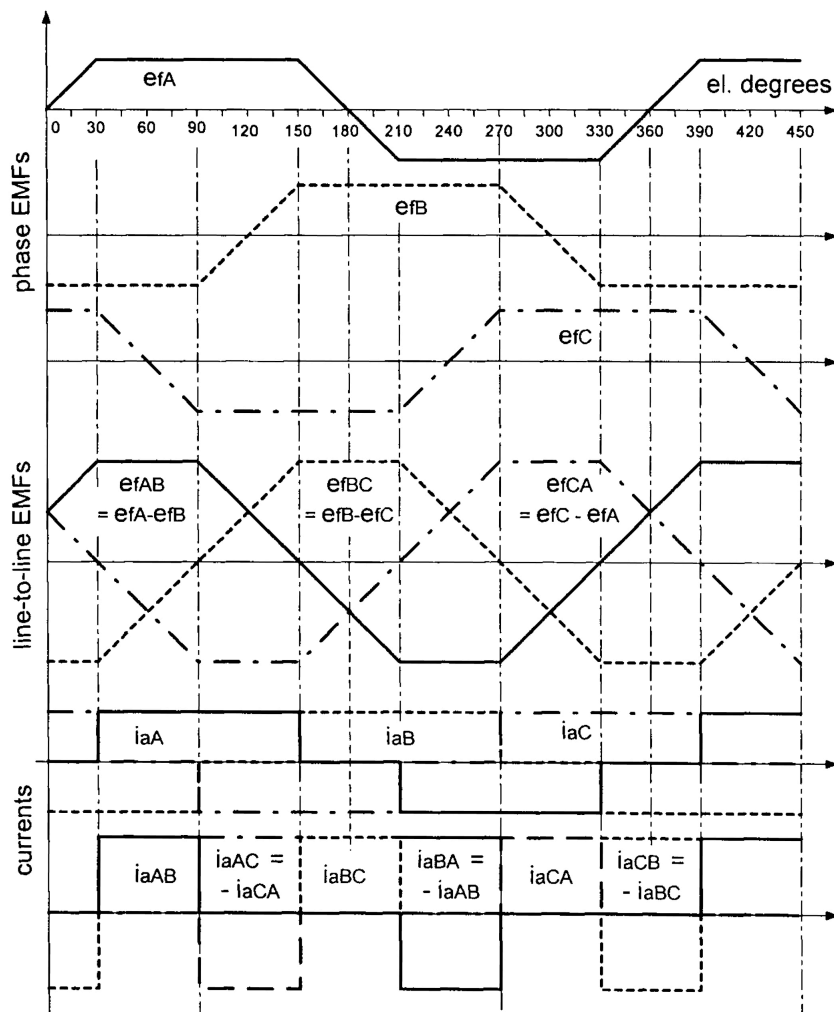
Obrázek 15: Mechanická charakteristika BLDC motoru

Zdroj: Padmaraja Yedamale. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. AN885 Microchip Technology Inc. ([7])

Jak bylo zmíněno dříve, v průběhu 6-ti krokového řízení trojfázového BLDC motoru jsou vždycky dvě ze tří jeho fází napájené stejným napětím s opačnou polaritou. Bezsenzorové řízení motoru je založeno na měření vlivu „zpětné“ indukce na třetí, nenapájené fázi, napětí které zcela představuje „zpětné“ indukované napětí a tím pádem dává informaci o poloze a rychlosti rotoru.

Určité provedení statorového vinutí a rotoru motoru dovoluje *trapézové řízení BLDC motoru*. V tomto případě tvar průběhu indukovaného napětí na vinutích statoru připomíná lichoběžník, což má za důsledek zvýšení střední hodnoty výkonu a jeho stability.

Při takovém průběhu indukovaného napětí má průběh proudu statorem obdélníkový tvar.
 [4] Následující graf (obr. 16) znázorňuje daný případ:



Obrázek 16: Průběh indukovaného napětí na statoru, průběh proudu statorem
 Zdroj: Jacek F. Gieras, Mitchell Wing. *Permanent Magnet Motor Technology.* ([4])

4 Ekonomické hodnocení

Ve dnešní době existuje populární názor, že bezkartáčové motory mají velké množství výhod oproti běžným kartáčovým motorům, ale jsou významně dražší. Díky rozvoji technologií návrhu a výroby, dokáží BLDC stroje být konkurenceschopné se špičkovými kartáčovými stroji.

Ovšem porovnání velmi často BLDC motorů s kartáčovými motory není objektivní. Běžné motory s kartáči jsou značně levnější než BLDC motory, nicméně mají podstatně kratší životnost. A proto se BLDC motory musí porovnávat s kartáčovými motory vyšších tříd. Následující tabulka (tab. 1) uvádí porovnání těchto dvou druhů elektrických motorů:

Tabulka 1: Porovnání BLDC motorů a motorů kartáčových

	BLDC motor	Kartáčový motor
Životnost	20 000 – 40 000 hodin	1 000 – 2 000 hodin
Účinnost	> 95 %	75 – 85 %
Rozměr/Výkon	o 10 – 20 % menší	-
EMC (Elektromagnetická kompatibilita)	Minimální filtrace nebo není nutná	Potřebuje se filtrace kvůli výbojům na kartačích
Nebezpečí výbuchu	Ne	Ano
Potřeba kontroleru	Ano	Ne
Velký hnací moment při nízké rychlosti	Možné u motoru s vnějším rotorem	Obtížné

Zdroj: *E-DRIVE. Michael Bloom. Think Your Project Can't Afford A BLDC Motor? Think Again! ([8])*

Životnost:

Příčiny vzniku poruchy u obou druhů motoru jsou odlišné. Hlavním zdrojem poruchy u motoru s kartáči je porucha kartáčů a komutátoru jako výsledek mechanického opotřebení a elektrických výbojů. Běžné kartáčové motory s kovovými nebo jednoduchými uhlíkovými kartáči nevydrží víc než 500 hodin provozu. Použití pokročilých kartáčů s přísadkou drahých kovů jako stříbro, dovoluje posunout hranici životnosti stroje až na

2 000 hodin, což je typické pro kartáčové motory vyšší třídy.

Hlavní příčinou poruchy BLDC motoru je selhání ložisek. Při správném výběru ložisek a minimálním axiálním zatížení tyto motory vydrží v provozu až 20 000 hodin. Ve některých aplikacích, jako například šicí stroje, obsahující poměrně velké množství motorů, jsou poruchy za provozu drahé. Použití keramických ložisek může zvýšit životnost stroje nad 40 000 hodin.

Účinnost, rozměr vs. výkon:

Ztráty vyvolané vířivými proudy v magnetickém obvodu tvoří převážnou část ztrát kartáčového motoru. Jejich zmenšení je těžké, avšak použití tenčích a dražších plechů pomáhá. Kromě toho jsou komutační ztráty a ztráty způsobené jiskřením.

U BLDC motoru je proud precizně ovládán, což zmenšuje ztráty vířivými proudy a následně zvětšuje účinnost až na 97 %. Řídící elektronika přispívá svými poměrně malými ztrátami a tím snižuje celkovou účinnost na 95 %

Kartáčový motor s výkonem 200 W a účinností 75 % bude mít ztráty 50 W, zatímco ekvivalentní BLDC motor s výkonem 200W a účinností 95% ztratí jenom 10W. Jsou to oteplovací ztráty a musí být odvedené ze stroje, aby nedošlo k jeho poškození. Odvod tepla je značně snadnější u BLDC motorů. S menším objemem produkovaného tepla se dá snadno dosáhnout krytí vyšší třídy IP utěsněním motoru proti prachu a vlhkosti. BLDC motory jsou tedy menší i v případě stejného výkonu a není potřeba je tolik chladit.

Elektromagnetická kompatibilita:

Elektrické motory musí splňovat určité požadavky po stránce elektromagnetického rušení. Kartáčové motory vyzařují široké spektrum rušení, včetně harmonických primárních kmitočtů. Zdrojem rušení je samotný motor a taky vedení, připojené k motoru. Pro filtraci se často používají kondenzátory a tlumivky.

U pohonných soustav s bezkartáčovými motory je jediným komponentem vyzařujícím elektromagnetické rušení měnič, přičemž vyzařuje řádově menší rušení, než jiskřící kartáče. Navíc, když je měnič vestaven do těla motoru, kryt motoru poskytuje stínění pro měnič.

Nebezpečí výbuchu:

Aby nedošlo k výbuchu kvůli jiskření na kartáčích, se musí kartáčový motor zcela utěsnit. BLDC motor nemá jiskřící části a je obecně odolný proti výbuchu.

Potřeba kontroléru:

Kartáčový motor nemusí být vybaven kontrolérem, ale některé systémy kontroler obsahují s cílem ovládnutí rychlosti a směru otáčení motoru. Pro aplikace, ve kterých se požaduje informace o skutečné rychlosti, resp. poloze rotoru, bývají kartáčové motory doplněné optickým enkodérem. BLDC motor musí být vybaven kontrolérem, ale zároveň kontrolér BLDC motoru poskytuje data o rychlosti a poloze rotoru v každém okamžiku.

Velký hnací moment při nízké rychlosti:

Jedním z hlavních zdrojů ztrát v mechanických systémech jsou převodové mechanismy. Vhodné provedení BLDC motoru poskytuje vysoký hnací moment při nízkých rychlostech, což eliminuje potřebu převodovky. U libovolného motoru platí, že pro generování vysokého momentu při nízké rychlosti otáčení rotor motoru musí mít velký průměr a těžiště co nejvíc vzdálené od hřídele. V takových aplikacích vyniká BLDC motor s vnějším rotorem. Ve většině BLDC motorů póly statoru se statorovým vinutím ční dovnitř směrem k rotoru s permanentními magnety. U motoru s vnějším rotorem póly a vinutí statoru ční směrem ven, rotor má tvar prstenu nasazeného na stator, přičemž rotorové magnety ční dovnitř. Takové uspořádání BLDC motorů se často používá pro pohony elektrických vozidel a výkonnějšího ručního nářadí.

Nákladové posouzení:

Náklady na používání BLDC motoru s vestavěným měničem mohou být menší než náklady na používání stejnosměrného kartáčového motoru, když se berou v úvahu náklady přímé a nepřímé. Přímé náklady obou motorů jsou zhruba srovnatelné. Následující tabulka uvádí rozbor podílu výrobních nákladů jednotlivých komponentů na celkové náklady pro oba druhy motorů. Je důležité zmínit, že přímé náklady u BLDC motorů jsou zhruba o 20 % vyšší než u kartáčového stejnosměrného motoru vyšší třídy.

Tabulka 2: Podíl výrobních nákladů jednotlivých komponent BLDC motoru na celkové náklady.

Část stroje	Komponent	Procento nákladu	Celkem
Stator	Tělo	2,0 %	26,5 %
	Složení statoru	6,5%	
	Statorové vinutí	5,5 %	
	Izolace	2,5 %	
	Ložiska	10,0 %	
Rotor	NdFeB Magnet	12,0 %	19 %
	Držák magnetu	2,5 %	
	Hřídel	3,5 %	
	Rozpěrky	0,85 %	
	Podložky	0,15 %	
Kryt	Kovový kryt	0,5 %	10,5 %
	Ložiska	10,0 %	
Elektronická jednotka	Kontroler	42,0 %	42,0 %
Ostatní		2,0 %	2,0 %
Celkem		100 %	

Zdroj: *E-DRIVE. Michael Bloom. Think Your Project Can't Afford A BLDC Motor? Think Again! ([8])*

Tabulka 3: Podíl výrobních nákladů jednotlivých komponent kartáčového DC motoru vyšší třídy na celkové náklady.

Část stroje	Komponent	Procento nákladu	Celkem
Stator	Tělo	2 %	24 %
	Ferritový magnet	3,7 %	
	Ložiska	15,4 %	
	Držák ložisek	2,9 %	
Rotor	Složení rotoru	7,1 %	26 %
	Hřídel	4,7 %	
	Komutátor	1,9 %	
	Křemíkový varistor	3,8 %	
	Izolace	0,9 %	
	Vinutí	6,6 %	
	Rozpěrky	0,9 %	
	Podložky	0,1 %	
Kryt	Kryt	2,4 %	26,4 %
	Ložiska	15,2 %	
	Uhlíkové kartáče	2,4 %	
	Držák kartáčů	3,8 %	
	Kartáčové pružiny	0,7 %	
	Svorkovnice	1,2 %	
	Držák svorkovnice	0,7 %	
Elektronická jednotka	Filtr PCBA	21,3 %	21,3 %
Ostatní		2,4 %	2,4 %
Celkem		100 %	

Zdroj: E-DRIVE. Michael Bloom. *Think Your Project Can't Afford A BLDC Motor? Think Again!* ([8])

Obě tabulky (tab. 2, tab. 3) však uvádějí kartáčové motory o 20% výhodnější než

BLDC, porovnání se zatím týkalo jenom přímých nákladů. Ted' budou popsány náklady nepřímé.

- **Převodový mechanismus.** Použití BLDC motoru vylučuje potřebu převodového mechanismu, jehož pořizovací náklady jsou skoro stejně velké jako u samotného motoru. Zvětšuje se tím současně celková účinnost a spolehlivost pohonné soustavy, přičemž se eliminuje hluk od převodovky.
- **Kontrolér.** Když už je kartáčový DC motor v pohonu vybaven kontrolérem, při porovnání s cenou BLDC motoru s kontrolerem, cena samotného BLDC kontroléru je srovnatelná s rozdílem ceny dvou kontrolerů. Ve výše uvedené tabulce náklady na kontrolér činí značný podíl z celkových nákladů (42%). Avšak když rozdíl činí jen 10 %, BLDC motory se stávají daleko víc konkurenceschopné.
- **Enkodér.** Pro aplikace, ve kterých se požaduje informace o skutečné rychlosti elektrického motoru, se kartáčové motory musí doplnit drahým enkodérem. Zatímco bezkartáčové motory jsou vždy vybavené z výroby buď hallovými sondami nebo systémem pro bezsenzorové řízení, které poskytují data zahrnující rychlost, respektive polohu rotoru v každém okamžiku.

Závěr:

Když se vezmou v úvahu jak přímé náklady, tak náklady spojené se příslušenstvím a údržbou, BLDC motor je schopen konkurence stejnosměrným motorům vyšší třídy. Za malý příplatek, nebo vůbec bez něho, se 10x zvyšuje životnost motoru, zlepšuje se účinnost, motor se méně hřeje a nejsou třeba převodovky a enkodéry. [8]

5 Návrh měniče pro řízení BLDC motoru

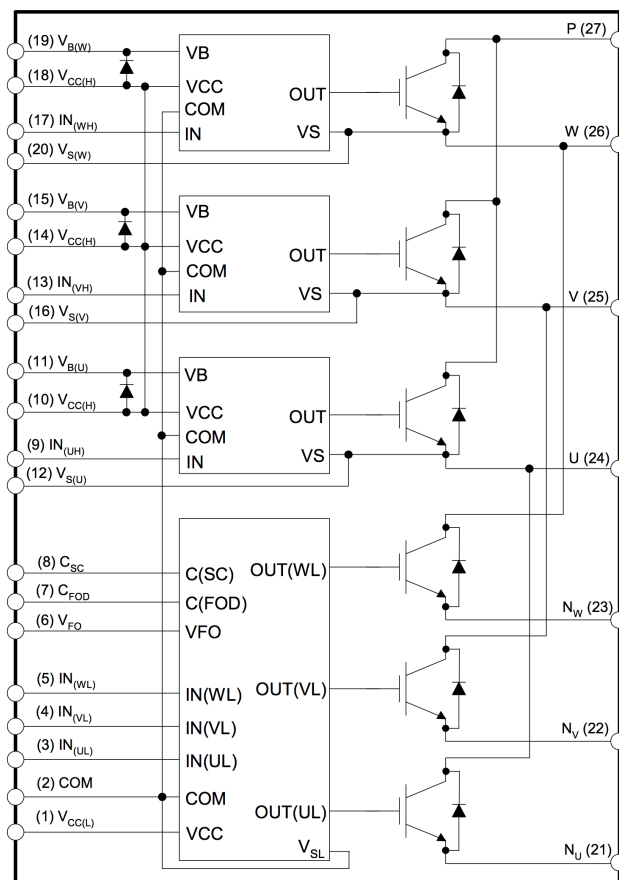
Jedním z cílů této práce je návrh měniče pro řízení BLDC motoru bezsenzorovým způsobem, a to pomocí sledování průchodů nulou indukovaného napětí na fázích motoru. Bylo rozhodnuto navrhnout a vyrobit desku plošného spoje, obsahující inverterovou část a obvod pro sledování průchodu nulou společně s konektory pro příslušné vstupy a výstupy.

5.1 Výkonový modul

Za „jádro“ měniče byl vybrán výkonový čip FSBB15CH60C od firmy Fairchild Semiconductor s následujícími vlastnostmi:

- 600V – 15A 3-fázový IGBT inverter s vestavěným GATE-budičem a ochranami;
- Napájecí napětí integrovaného obvodu – 15V, odebíraný proud ze zdroje – přibližně 28mA;
- Rozměry IO: 22x44x6 mm. Váha: 15g;
- Odolné proti zkratu IGBT;
- Snížený tepelný odpor a klidové proudy díky použití Al_2O_3 DBC (Direct Bonding Copper) substrátu;
- Vestavěný obvod budičů Gate, vysokonapěťová vysokorychlostní ochrana proti podbuzení Gate a ochrana proti zkratu pro horní a dolní řady tranzistoru;
- Signalizace poruchy;
- Oddělené „Open-Emitter“ piny spodní řady IGBT pro sledování proudu na všech třech fázích pomocí bočnicků;
- Společná zem;
- Díky obvodu „bootstrap“ nábojové pumpy se energie pro buzení Gate horní řady může získávat ze stejného 15V zdroje, což vylučuje potřebu třech navzájem izolovaných zdrojů napětí pro budiče Gate horní řady IGBT, jako u střidačů s běžnými výkonovými moduly;
- $U_{iso} = 2500 V_{rms} / \text{min}$;
- Schmittův klopný obvod na vstupu, podpora 3.3V / 5V vstupní logiky – možnost přímého připojení na piny mikrokontroleru. [9]

Pro buzení a zesílení vstupního signálu je základní obvod doplněn budičem 74HCT245 (Octal bus transceiver).



Obrázek 17: Vnitřní blokové schéma modulu FSBB15CH60C

Zdroj: FSBB15CH60C Motion SPM® 3 Series. Rev. 1.6. Datasheet by Fairchild Semiconductor Corp. ([9])

Následující tabulka uvádí popis jednotlivých pinů IO:

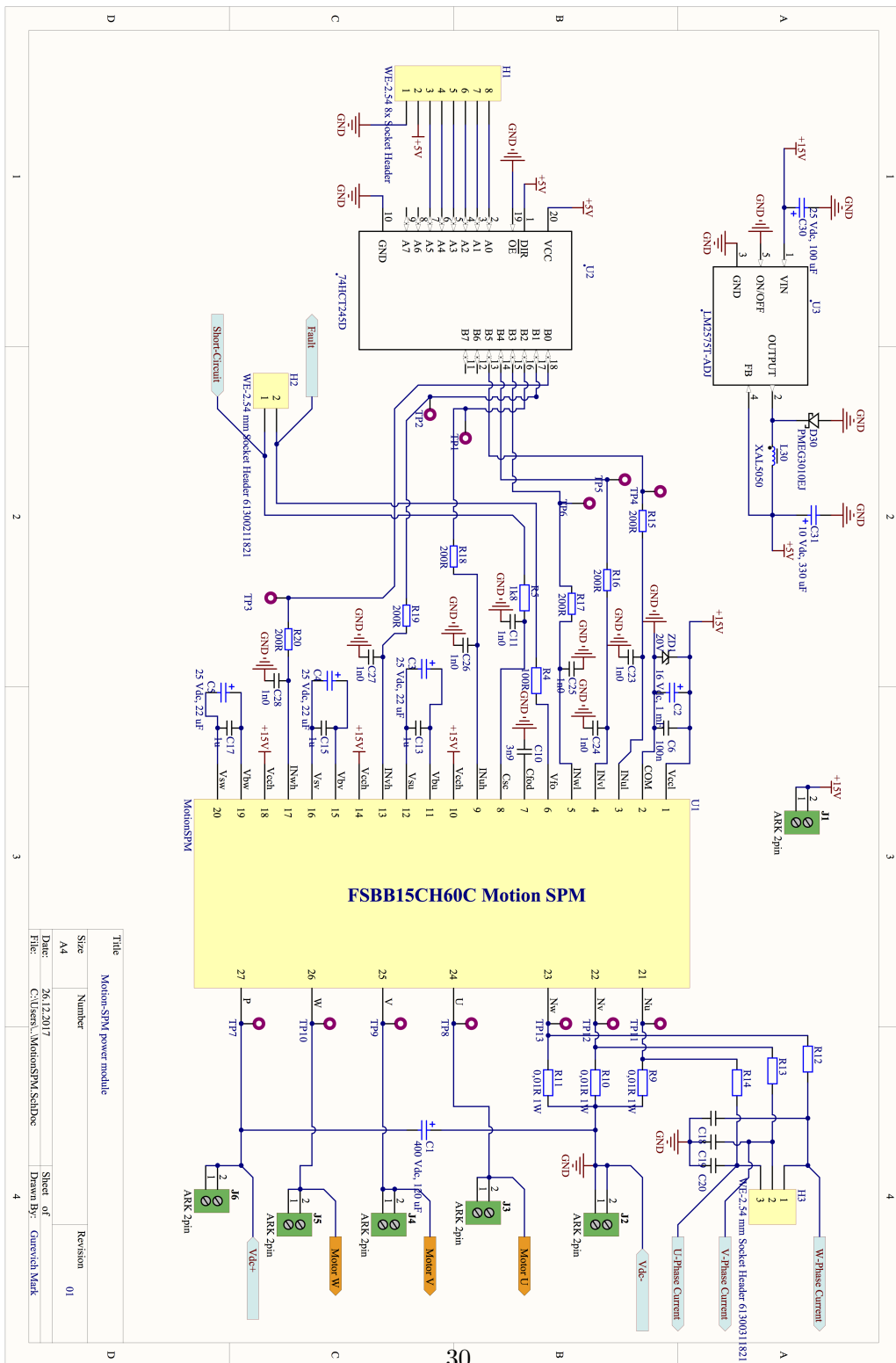
Tabulka 4: Popis pinů FSBB15CH60C

Číslo pinu	Označení	Popis pinu
1	$V_{CC(L)}$	Napájecí napětí pro IO a buzení IGBT dolní řady
2	COM	Společná zem
3	$IN_{(UL)}$	Vstupní signál pro dolní tranzistor, fáze U
4	$IN_{(VL)}$	Vstupní signál pro dolní tranzistor, fáze V
5	$IN_{(WL)}$	Vstupní signál pro dolní tranzistor, fáze W
6	V_{FO}	Výstupní signál poruchy
7	C_{FOD}	Kondenzátor pro nastavení času výstupního poruchového signálu
8	C_{SC}	Kondenzátor (dolní propust) pro vstup detekci zkratu
9	$IN_{(UH)}$	Vstupní signál pro horní tranzistor, fáze U
10	$V_{CC(H)}$	Společné napájecí napětí pro IO a buzení IGBT horní řady
11	$V_{B(U)}$	Budící napětí IGBT horní řady, fáze U
12	$V_{S(U)}$	Zem budícího napětí IGBT horní řady, fáze U
13	$IN_{(VH)}$	Vstupní signál pro horní tranzistor, fáze V
14	$V_{CC(H)}$	Společné napájecí napětí pro IO a buzení IGBT horní řady
15	$V_{B(V)}$	Budící napětí IGBT horní řady, fáze V
16	$V_{S(V)}$	Zem budícího napětí IGBT horní řady, fáze V
17	$IN_{(WH)}$	Vstupní signál pro horní tranzistor, fáze W
18	$V_{CC(H)}$	Společné napájecí napětí pro IO a buzení IGBT horní řady
19	$V_{B(W)}$	Budící napětí IGBT horní řady, fáze W
20	$V_{S(W)}$	Zem budícího napětí IGBT horní řady, fáze W
21	N_U	Záporný pól DC napětí, fáze U
22	N_V	Záporný pól DC napětí, fáze V
23	N_W	Záporný pól DC napětí, fáze W
24	U	Výstup, fáze U
25	V	Výstup, fáze V
26	W	Výstup, fáze W
27	P	Kladný pól DC napětí

Zdroj: FSBB15CH60C Motion SPM® 3 Series. Rev. 1.6. Datasheet by Fairchild Semiconductor Corp. ([9])

5.2 Invertorová část měniče

Přestože součástí výkonového modulu je značná část potřebných obvodů střídače, pro správnou funkci, je ho potřeba doplnit vnějšími součástkami, včetně RC filtru, elektrolytických a keramických kondenzátorů pro budící obvody tranzistorů, potřebnými měřicími body. Následující schéma zapojení bylo vytvořené ve souladu s katalogovým listem modulu FSBB15CH60C.



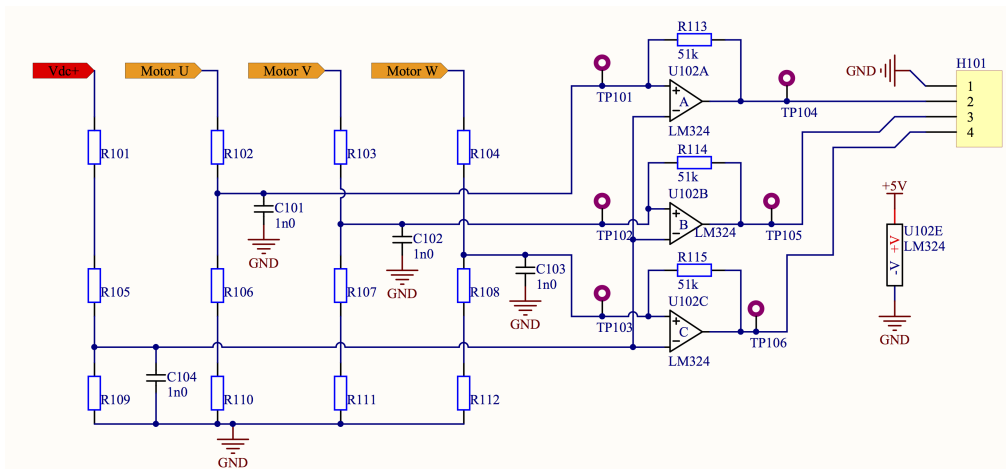
Obrázek 18: Schéma HW části měniče

Zdroj: vlastní tvorba pomocí počítačového nástroje Altium Designer a při použití FSBB15CH60C Datasheet.

Jak bylo zmíněno dříve, pro zesílení vstupních signálů je obvod výkonového modulu doplněn budičem signálu. Daný budič potřebuje napájení 5V, pro tyto účely schéma obsahuje obvod spínaného regulátoru napětí LM2575, poskytujícího konstantní napětí 5V na výstupu. Komponenty obvodu regulátoru byly vybrány v souladu s katalogovým listem součástky.

5.3 Sledování průchodu nulou indukovaného napětí

Bylo navrženo následující schéma zapojení pro sledování průchodu nulou indukovaného napětí:

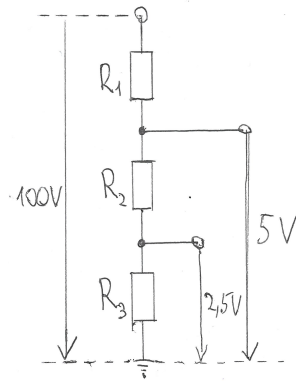


Obrázek 19: Schéma zapojení pro měření indukovaného napětí na fázích motoru
Zdroj: vlastní tvorba pomocí počítačového nástroje Altium Designer.

Při daném zapojení, je napětí na každé fázi motoru zmenšeno odporovou sítí, fungující na principu děliče napětí, a je přivedeno na neinvertující vstup operačního zesilovače. Na invertující vstup je přivedeno napětí odpovídající polovině rozsahu napájecího napětí Vdc. Výstup operačního zesilovače je připojen přes odpor $51k\Omega$ na jeho neinvertující vstup – tak zvané „zapojení s kladnou zpětnou vazbou“, funguje na principu *hystereze*. Tím pádem se v tomto schématu provádí porovnání fázového napětí motoru s polovinou DC zdroje – dá se říct, neutrálním bodem aneb „nulou“. Jakmile fázové napětí překročí úroveň reference, čili „nulu“, napětí na výstupu operačního zesilovače hned naběhne na úroveň „High“, odpovídající maximu napájecího napětí zesilovače. Výstup se bude držet v úrovni „High“, dokud fázové napětí neklesne pod hodnotu referenčního napětí, což překlápí výstup na úroveň „Low“, tj. minimum napájecího napětí zesilovače. Tím pádem sledováním hran průběhu napětí na výstupu zesilovače se dá zjistit okamžik pro správnou a přesnou komutaci motoru. Obvod je doplněn filtračními kondenzátory, měřicími body

a výstupním konektorem.

Příklad výpočtu odporové sítě pro napětí 100V:



$$5 = 100 \cdot \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = 20R_2 + 20R_3$$

$$\boxed{R_1 = 19(R_2 + R_3)}$$

$$2.5 = 100 \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 = 40R_3$$

$$R_1 + R_2 = 39R_3$$

$$19R_2 + 19R_3 + R_2 = 39R_3$$

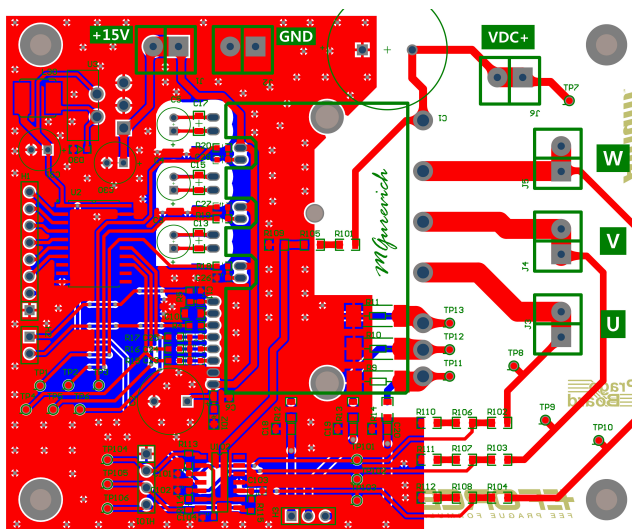
$$\boxed{R_2 = R_3}$$

Obrázek 20: Výpočet napět'ového děliče

Zdroj: vlastní tvorba.

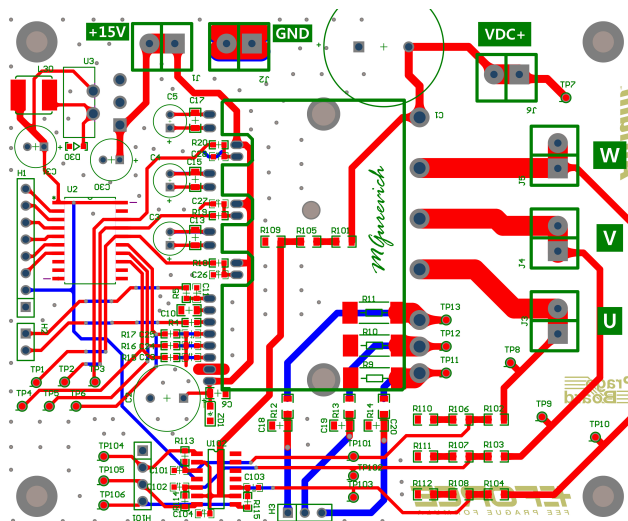
5.4 Realizace DPS

Podle výše uvedených schémat a pomocí počítačového programu Altium Designer jsem navrhnul dvouvrstvou desku plošného spoje pro řízení BLDC motoru bezsenzorovým způsobem. Následující obrázky představí rozložení součástek na desce a cesty jejich propojení. Společná zem je rozlitá v obou vrstvách, pro přehlednost je na druhém obrázku skryta.



Obrázek 21: „Layout” DPS

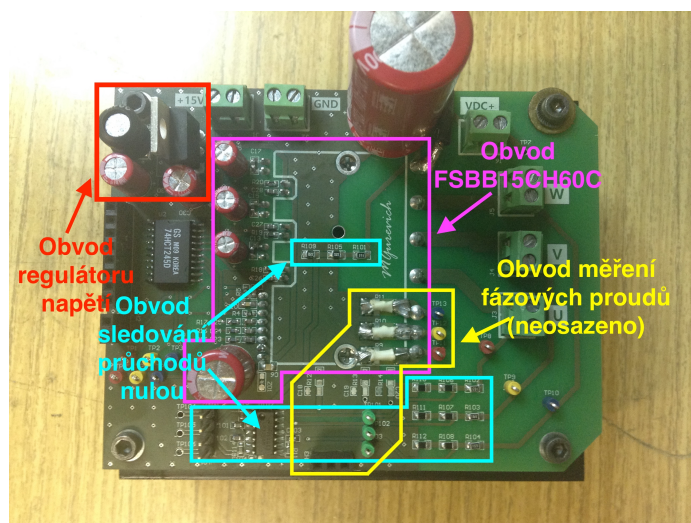
Zdroj: vlastní tvorba pomocí počítačového nástroje Altium Designer.



Obrázek 22: „Layout” DPS (skryté polygony, reprezentující zem)

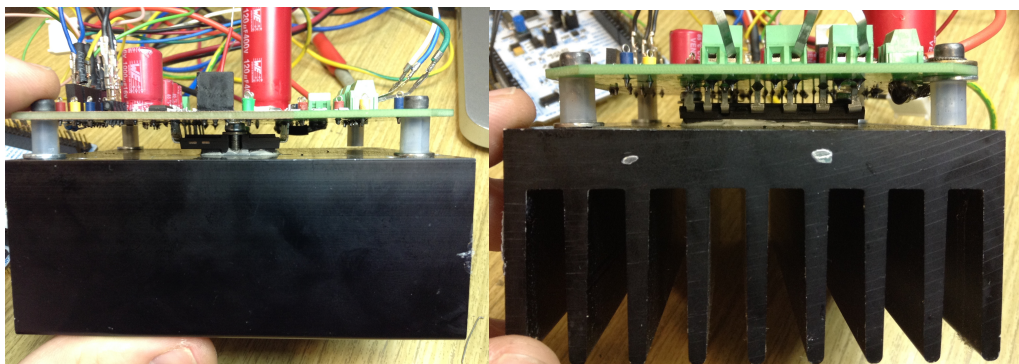
Zdroj: vlastní tvorba pomocí počítačového nástroje Altium Designer.

Osazená deska plošného spoje:



Obrázek 23: Osazená DPS
Zdroj: vlastní tvorba.

Výkonový modul je připevněn k chladiči pomocí šroubu a speciální pasty. Deska plošného spoje je za účelem mechanické pevnosti taky přišroubovaná ke stejnému chladiči. Následující obrázek znázorňuje spojení modulu, desky plošného spoje a chladiče.

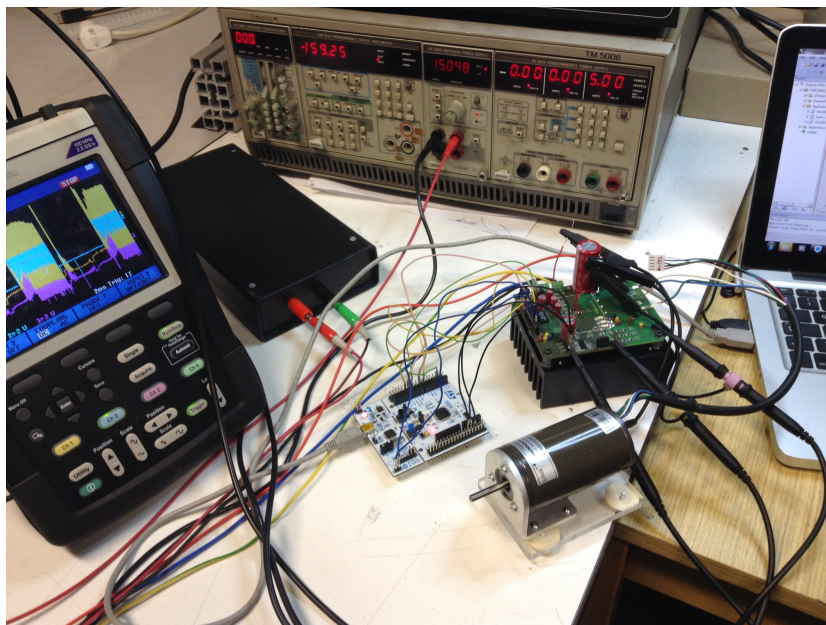


Obrázek 24: Pohled z boční strany
Zdroj: vlastní tvorba.

6 Ověření funkcí navrženého měniče

6.1 Ověření funkčnosti měniče

Pro ověření funkci navrženého měniče bylo připravené následující pracoviště:

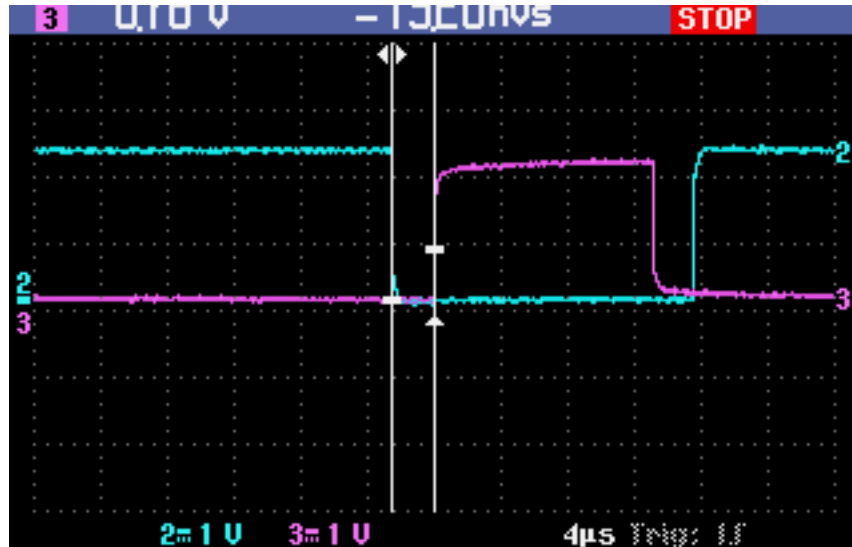


Obrázek 25: Měřicí pracoviště
Zdroj: vlastní tvorba.

Přístroje na pracovišti (zleva doprava):

- Osciloskop Tektronix THS3014, 4-kanálový;
- Zdroj konstantního stejnosměrného napětí 24V;
- Regulovaný zdroj napětí/proudu Tektronix PS5004;
- Vývojový kit STM32 NUCLEO-F302R8;
- BLDC motor LINIX 45ZWN24-40 24V;
- Zkoumaný invertorový modul;
- Počítač s IDE Keil uVision V5 MDK pro programování mikrokontroléru a ladění programu.

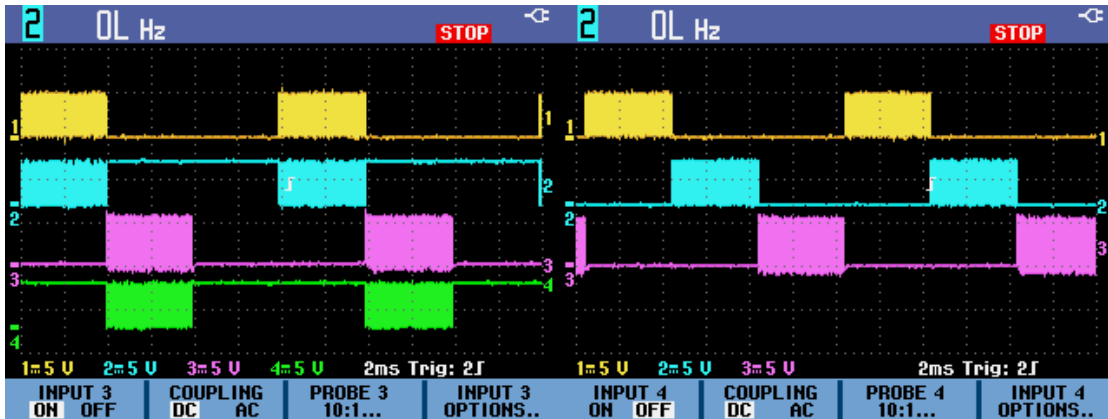
Pro řízení navrženého měniče bylo rozhodnuto použít vývojovou desku STM32 řady Nucleo obsahující mikrokontrolér STM32F302R8. Daný mikrokontroler poskytuje 16bitový 6-kanálový časovač schopný generování 6 PWM signálů a generaci „deadtime“, což je použitelné pro řízení invertoru. „Deadtime“ v dané aplikaci je jev, při kterém existuje časová prodleva mezi zapnutím a vypnutím horního a dolního tranzistoru při generaci PWM signálu za účelem vyhnout se zkratu na fázi invertoru. Následný snímek z osciloskopu při měření na navrženém modulu znázorňuje průběh řídicích signálů při nastavení „deadtime“ u PWM.



Obrázek 26: Jeve „deadtime“, průběhy napětí na GATE dvou ventilů jedné fáze
Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

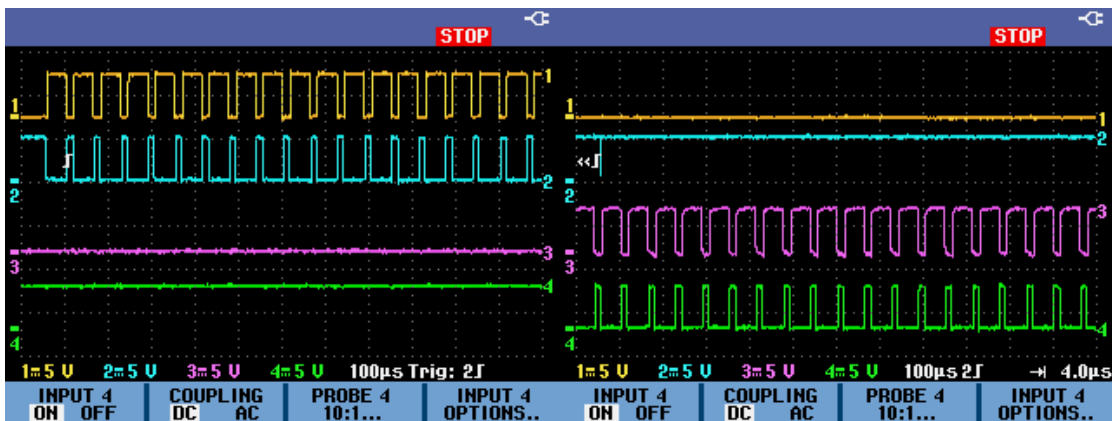
Pro řízení měniče byly vybrány a nakonfigurované 3 kanály časovače pro horní řadu IGBT tranzistoru, přičemž každý je doplněn komplementárním kanálem časovače pro odpovídající IGBT tranzistory dolní řady. Katalogový list výkonového integrovaného obvodu FSBB15CH60C uvádí doporučené hodnoty maximálního kmitočtu PWM – 20kHz a minimálního „deadtime“ – $2\mu s$. Bylo rozhodnuto pro výběr kmitočtu PWM – 15kHz a „deadtime“ času – $2,6\mu s$.

Následující snímky z osciloskopu znázorňují průběhy řídicích signálů s nastaveným PWM. Vlevo jsou průběhy signálu na Gate obou tranzistorů na fázích U a V. Vpravo jsou průběhy signálů na Gate třech tranzistorů horní řady.



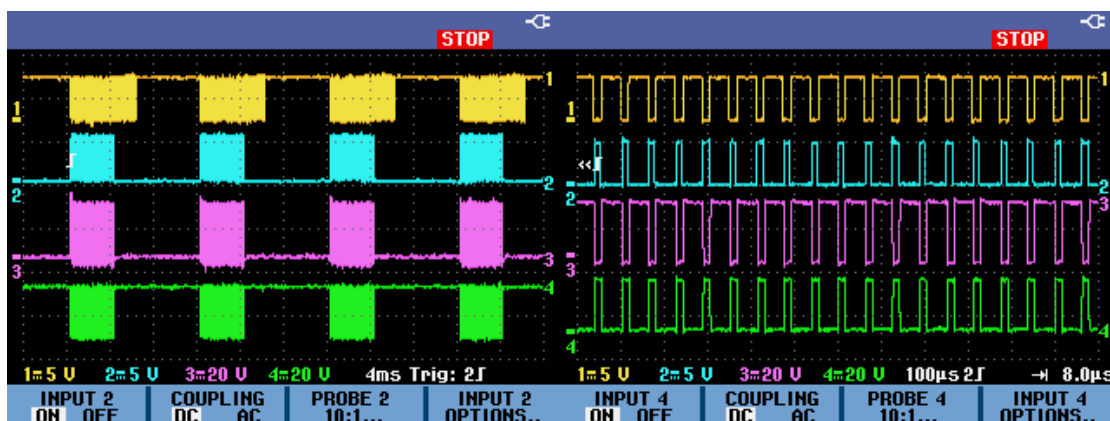
Obrázek 27: Průběh PWM signálu na vstupu do výkonového modulu
Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

Zvětšené průběhy signálu na Gate obou tranzistorů na fázích U a V:



Obrázek 28: Průběh PWM signálu na vstupu do výkonového modulu
Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

Po připojení hlavního napětí 24V, bylo možné sejmout následující průběhy napětí mezi kolektorem a emitorem obou tranzistorů fáze U jako odezvy na řídicí PWM signály.



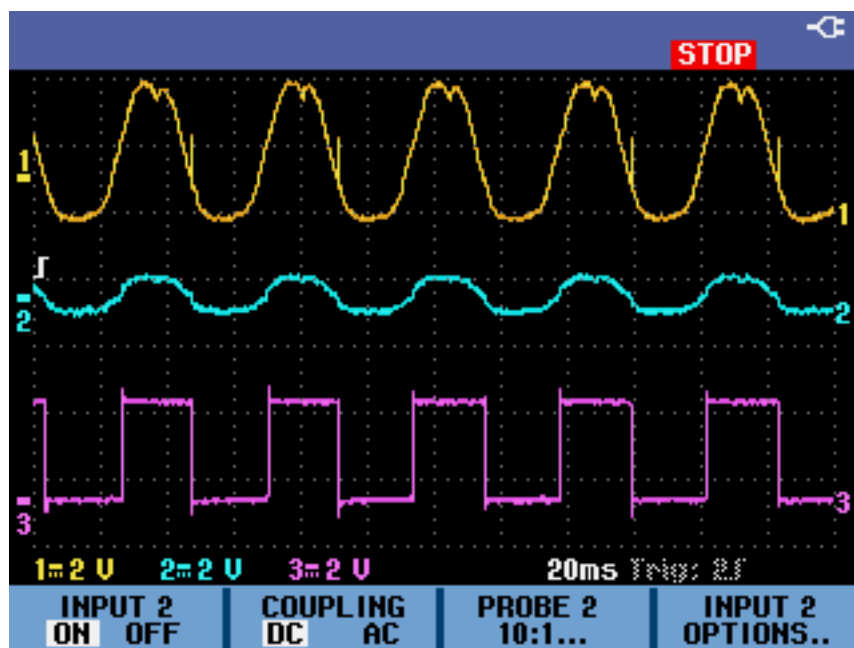
Obrázek 29: Průběh PWM signálu a napětí mezi kolektorem a emitorem tranzistoru fáze U

Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

6.2 Ověření funkčnosti obvodu sledování zpětného indukovaného napětí

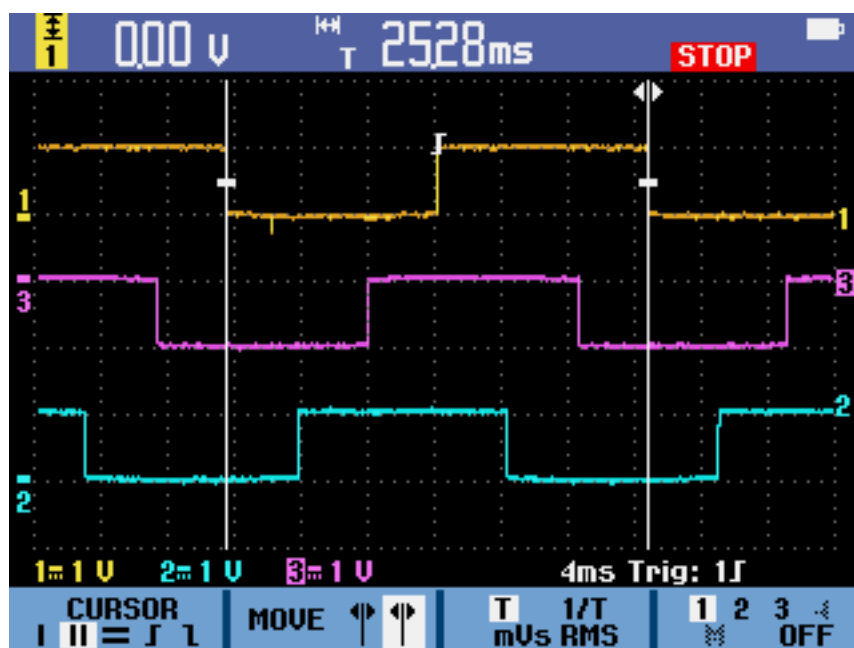
Pro ověření funkčnosti obvodu sledování zpětného indukovaného napětí byla hřídel motoru roztočena. Tím pádem se na fázích statoru se indukují napětí. Na následujícím snímku z osciloskopu jsou vidět, (směrem dolů):

- průběh indukovaného napětí na fázi W, kanál 1;
- průběh indukovaného napětí za napět'ovým děličem – na neinvertujícím vstupu operačního zesilovače (s referencí v „neutrálním bodě“ - na invertujícím vstupu operačního zesilovače), kanál 2;
- průběh napětí na výstupu operačního zesilovače s referencí na společné zemi modulu, kanál 3.



Obrázek 30: Ověření funkčnosti obvodu sledování indukovaného napětí
Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

Následující snímek z osciloskopu znázorňuje rozložení průběhu napětí na všech třech výstupech operačních zesilovačů reprezentujících průběhy zpětného indukovaného napětí všech třech fází.



Obrázek 31: Průběhy napětí na výstupu operačních zesilovačů
 Zdroj: vlastní tvorba pomocí osciloskopu Tektronix THS3014.

Kurzory na uvedeném snímku je označena jedna perioda indukovaného napětí na statoru, což reprezentuje periodu otáčení magnetického pole rotoru. Motor je čtyřpólový, protože lze pomocí vzorce z kapitoly 1.3.2 vypočítat mechanickou rychlost otáčení rotoru:

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{60}{2} = \frac{60}{26 \cdot 10^{-3}} = 1200 \text{ min}^{-1}$$

7 Návrh a implementace algoritmu řízení komutace motoru

7.1 „Open-loop“ provoz

Pro ověření správné funkce měniče bylo prvním krokem programování komutace motoru v režimu otevřené smyčky – tzn. „open-loop“. To znamená, že fáze se budou postupně přepínat se zadanou časovou prodlevou. Používá se metoda šestikrokové komutace. Následující obrázek znázorňuje inicializaci PWM a registry mikrokontrolerů, přiřazené nastavením rychlosti PWM:

```
162         case 0: //UH->VL
163             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE;    //faze U
164             TIM1->CCR1 = pwm;
165
166             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE;    //faze V
167             TIM1->CCR2 = 0;
168
169             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC3NE;  //faze W
170             TIM1->CCR3 = 0;
171             break;
```

Obrázek 32: Programovací kód pro nastartování PWM

Zdroj: vlastní tvorba pomocí IDE Keil uVision V5 MDK.

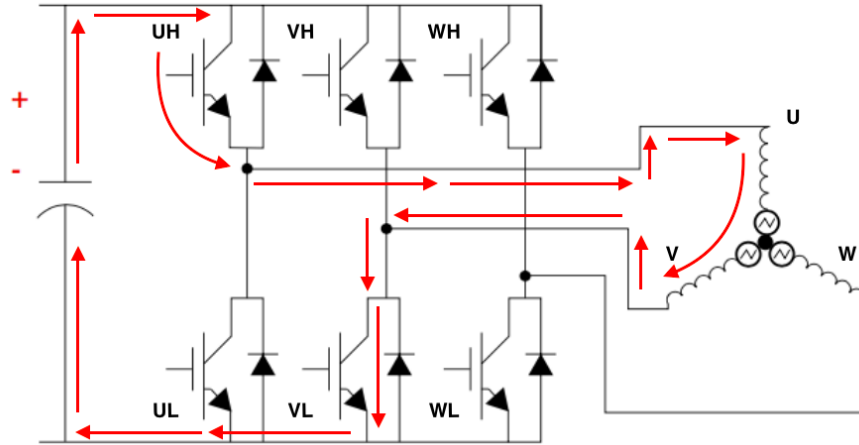
Na následujícím obrázku je příklad programovacího kódu, který řeší jeden ze šesti kroků komutací:

```
162         case 0: //UH->VL
163             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE;    //faze U
164             TIM1->CCR1 = pwm;
165
166             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE;    //faze V
167             TIM1->CCR2 = 0;
168
169             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC3NE;  //faze W
170             TIM1->CCR3 = 0;
171             break;
```

Obrázek 33: Programovací kód pro jeden krok komutace

Zdroj: vlastní tvorba pomocí IDE Keil uVision V5 MDK.

V daném kroku komutace proud vede přes horní tranzistor fáze U a dolní tranzistor fáze V u invertoru, a přes vinutí fáze U a V u motoru. Tranzistory fáze U jsou spínané pomocí PWM, tranzistory fáze V jsou sepnuté stále (100% „duty cycle“), tranzistory fáze W jsou stále vypnuté. Obrázek dole znázorňuje směr průchodu proudu v tomto případě.



Obrázek 34: Směr průchodu proudu

Zdroj: Dennis Nolan. *Sensorless six-step BLDC commutation. ST microelectronics AN4220.*

Celá rutina „open-loop“ provozu představuje cyklus, ve kterém pomocná proměnná postupně mění svoji hodnotu od 0 do 5 a každému číslu je přiřazen jeden krok komutace. Po dosažení hodnoty 5 se pomocná proměnná překlápí zase na hodnotu 0:

```

161 while (1) {
162     switch (i) {
163         case 0: //UH->VL
164             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE; //faze U
165             TIM1->CCR1 = pwm;
166             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE; //faze V
167             TIM1->CCR2 = 0;
168             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC3NE; //faze W
169             TIM1->CCR3 = 0;
170             break;
171         case 1: //UH->WL
172             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE; //faze U
173             TIM1->CCR1 = pwm;
174             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC2NE; //faze V
175             TIM1->CCR2 = 0;
176             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC3NE; //faze W
177             TIM1->CCR3 = 0;
178             break;
179         case 2: //VH->WL
180             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC1NE; //faze U
181             TIM1->CCR1 = 0;
182             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE; //faze V
183             TIM1->CCR2 = pwm;
184             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC3NE; //faze W
185             TIM1->CCR3 = 0;
186             break;
187         case 3: //VH->UL
188             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE; //faze U
189             TIM1->CCR1 = 0;
190             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE; //faze V
191             TIM1->CCR2 = pwm;
192             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC3NE; //faze W
193             TIM1->CCR3 = 0;
194             break;
195         case 4: //WH->UL
196             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC1NE; //faze U
197             TIM1->CCR1 = 0;
198             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC2NE; //faze V
199             TIM1->CCR2 = 0;
200             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC3NE; //faze W
201             TIM1->CCR3 = pwm;
202             break;
203         case 5: //WH->VL
204             TIM1->CCER &= ~TIM_CCER_CC1NE; //faze U
205             TIM1->CCR1 = 0;
206             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC2NE; //faze V
207             TIM1->CCR2 = 0;
208             TIM1->CCER |= TIM_CCER_CC3NE; //faze W
209             TIM1->CCR3 = pwm;
210             break;
211     }
212     HAL_Delay(delay);
213     i++;
214     if (i>5) i=0;}

```

Obrázek 35: Rutina „open-loop“ provozu

Zdroj: vlastní tvorba pomocí IDE Keil uVision V5 MDK.

7.2 „Closed-loop“ provoz

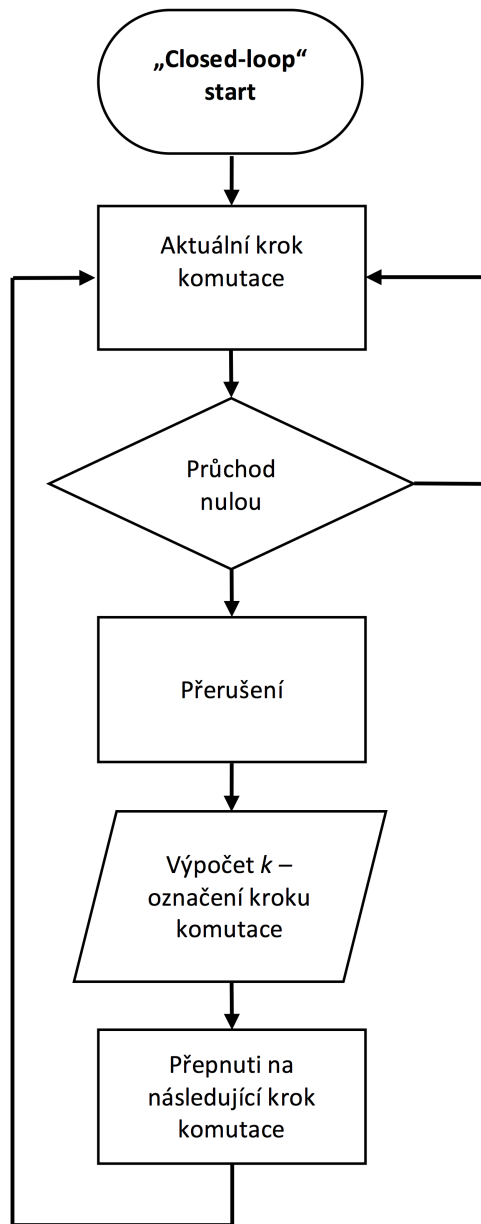
„Closed-loop“ řízení motoru, neboli řízení v režimu zavřené smyčky spočívá v tom, že přepínání mezi jednotlivé kroky komutace se řídí na základě sledování zpětného indukovaného napětí, tj. stavu výstupu operačních zesilovačů. Tedy propojit výstupy operačních zesilovačů na vstupy mikrokontrolérů. Na těchto pinech mikrokontroler sleduje náběžné a sestupné hrany a jakmile bude detekována náběžná nebo sestupná hrana, spustí se přerušení. V metodě, obsluhující přerušení jsou snímány stavy všech třech výstupů operačních zesilovačů, buď 1 (High) nebo 0 (Low), přičemž každému z výstupů je přiřazena jeho proměnná, do které se ukládá tento stav. Jsou to proměnné a , b a c , resp. pro fáze U, V a W. Nasledně pomocí vzorce $k = 4a + 2b + c$ se z těch třech hodnot vypočítává výsledná hodnota, která představuje jeden ze šesti unikátních kroků komutace, ukládá se do proměnné k . Na následujícím obrázku je představena metoda, obsluhující přerušení:

```
493 void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin)
494 {
495     switch (GPIO_Pin) {
496
497         case GPIO_PIN_0:
498             { a=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_0);
499               b=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_1);
500               c=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_4);
501               k=4*a+2*b+c; }
502         break;
503
504         case GPIO_PIN_1:
505             { a=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_0);
506               b=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_1);
507               c=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_4);
508               k=4*a+2*b+c;}
509         break;
510
511         case GPIO_PIN_4:
512             { a=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_0);
513               b=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_1);
514               c=HAL_GPIO_ReadPin(GPIOA,GPIO_PIN_4);
515               k=4*a+2*b+c;}
516         break;
517     }
518 }
```

Obrázek 36: Metoda, obsluhující přerušení

Zdroj: vlastní tvorba pomocí IDE Keil uVision V5 MDK.

Pokaždé, když se změní hodnota reprezentující komutační krok, uložená v proměnné k , změní se, program přepne invertor na další kombinaci sepnutí. Celý proces „closed-loop“ řízení je naznačen následujícím vývojovým diagramem:



Obrázek 37: Vývojový diagram „closed loop“ řízení
 Zdroj: vlastní tvorba.

8 Závěr

Cílem práce bylo popsat konstrukci BLDC motorů, provést rešerši metod řízení jejich otáček, vybrat si jednu z možných metod řízení, následně navrhnout obvody pro propojení s kitem STM Nucleo a navrhnout řídicí program. Konstrukce BLDC motorů je popsána v kapitole 2. Kapitola uzavírá stručný rozbor elektromechanických vlastností BLDC motorů a vysvětlení principu činnosti. Kapitola 3 se zabývá prostředky pro řízení BLDC motorů a různými metodami řízení. Následně jsou uvedeny některé používané senzory polohy a otáček pro senzorové řízení a vysvětlena nejpoužívanější tzv. šestikroková komutace. Nakonec je nastíněn přehled bezsenzorových metod řízení včetně různých metod rozběhu. Jako metodu pro praktickou realizaci jsem zvolil bezsenzorovou metodu založenou na znalosti indukovaného napětí. Pro řízení běhu motoru jsem vybral desku NUCLEO od firmy ST Microelectronics, která pro tento účel disponuje dostatečným výkonem a dostatečným množstvím vstupů a výstupů. Kapitola 4 stručně porovnává stejnosměrné motory a BLDC motory z pohledu spolehlivosti a ekonomičnosti aplikace v elektrickém pohonu. Kapitola 5 popisuje postup návrhu HW části měniče a obvodu pro detekci polohy rotoru z indukovaného napětí. V kapitole 6 je popsán způsob testování navrženého HW a stručně nastíněny důležité části SW pro realizaci samotného bezsenzorového řízení otáček. V průběhu testů se ukázalo, že navržený obvod detekce indukovaného napětí je závislý na napájecím napětí motoru, tedy hodnoty rezistorů musí být upraveny pro konkrétní aplikaci. Návrh propojení mezi mikrokontrolérem a inteligentním modulem se po testech ukázal jako bezchybný a plně funkční. Vytvořený systém nabízí do budoucna možnosti rozšíření, zejména zdokonalení obvodu pro měření proudu, implementaci proudové regulační smyčky a realizaci zobrazovacího a ovládacího programu např. pro PC. Nicméně závěrem lze konstatovat, že hlavní cíle této bakalářské práce se podařilo naplnit.

Reference

- [1] Hughes A. 2006. *Electric Motors and Drives. Fundamentals, Types and Applications. 3rd Edition*. UK: Elsevier Ltd. ISBN-13: 978-0-7506-4718-2
- [2] Klempner G. and Kerszenbaum I. 2008. *Handbook of Large Turbo-Generator Operation and Maintenance. 2nd Edition*. US: John Wiley and Sons Ltd. ISBN-13: 978-0-4701-6767-0
- [3] Voženílek P. et al. 2011. *Elektromechanické měniče*. Praha: Nakladatelství ČVUT. ISBN: 978-80-01-04875-7.
- [4] Gieras J. F. and Wing M. 2002. *Permanent Magnet Motor Technology. 2nd Edition*. US: Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-0739-7
- [5] Pavelkova N. 2008. *Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie*. Časopis Elektro, číslo 10. Dostupny: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/ucinnost-elektrickych-motoru-a-snizovani-spotreby-elektricke-energie--12053>
- [6] 2015. *Understanding Electric Motor Efficiency Losses*. Groschopp Inc. Dostupny: <https://www.groschopp.com/blog/efficiency-and-losses-in-electric-motors/>
- [7] Yedamale P. 2003. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. AN885 by Microchip Technology Inc. Dostupny: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [8] Bloom M. 2014. *Think Your Project Can't Afford A BLDC Motor? Think Again!* eDrive Online. Dostupny: <http://www.e-driveonline.com/main/blogs/think-your-project-cant-afford-a-bldc-motor-think-again/>
- [9] 2016. *FSBB15CH60C Motion SPM® 3 Series. Rev. 1.6*. Datasheet by Fairchild Semiconductor Corp. Dostupny: <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/FSBB15CH60C-D.pdf>