

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2020

Bc. Václav Štancl

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

ELEKTRONICKÁ ŘÍDICÍ JEDNOTKA BLDC MOTORU

Bc. Václav Štancl

Diplomová práce

2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav Štancí**
Osobní číslo: **I17198**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Řízení procesů**
Téma práce: **Elektronická řídicí jednotka BLDC motoru**
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

Zásady pro vypracování

Cílem práce bude návrh a realizace elektronické řídicí jednotky bezkartáčového BLDC motoru. V teoretické části bude provedena rešerše na dané téma – konstrukce bezkartáčových EC motorů a možnosti jejich řízení. Hlavní důraz bude kladen na popis konstrukce driverů určených k ovládní motorů tohoto typu. V praktické části bude proveden návrh a realizace funkčního prototypu řídicí jednotky BLDC motoru. Samostatnou kapitolu bude tvořit testování navržené konstrukce. Pro účely testování bude realizován testovací software osobního počítače s OS Windows, v jazyce C#. Výsledky testování budou patřičně zhodnoceny v závěru práce. Nedílnou součástí práce bude kompletní výrobní dokumentace, včetně zdrojového kódu firmware mikropočítače (případně mikropočítačů), zdrojového kódu testovací aplikace v podobě projektu Visual Studio a podrobný montážní návod realizované konstrukce.

Rozsah pracovní zprávy: **80**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4.
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4.
PETZOLD, Ch., Programování Microsoft Windows Forms v jazyce C#, Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1058-3.
Patočka M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. Brno: VUTUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003-6.
Patočka M., Vybrané stati z výkonové elektroniky, Svazek II., Vydání 3., skripta FEKT VUT Brno, 2004.
MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**
Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2018**
Termín odevzdání diplomové práce: **17. května 2019**



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Daniel Honc, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 6. listopadu 2018

Prohlášení

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne

podpis autora

Bc. Václav Štancl

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu panu Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, za ochotný přístup a za poskytnuté informace, které byly nezbytné pro tvorbu. Dále bych chtěl také poděkovat všem ostatním pedagogům, kteří mi předali cenné informace.

V Pardubicích dne

ANOTACE

Tato práce se zabývá návrhem a realizací třífázového měniče, který je potřeba pro komutaci BLDC motoru. Bez tohoto měniče není BLDC motor schopen funkce. Měnič slouží zároveň jako ochranný prvek a při přetížení nespálí motor.

KLÍČOVÁ SLOVA

BLDC, EC motor, třífázový měnič, pozice rotoru, PSD, měření

TITLE

ELECTRONIC CONTROL UNIT FOR BLDC MOTOR

ANNOTATION

This master's thesis elaborates with the design and implementation of a three-phase converter, which is suitable for BLDC motor commutation. Without this inverter, function BLDC is not possible. The inverter is protector as a protective element and does not burn the motor when overloaded.

KEYWORDS

BLDC, EC motor, Three-phase converter, Rotor position, PSD, Measure

OBSAH

Seznam zkratk a značek	10
Seznam ilustrací	11
Seznam tabulek	13
ÚVOD.....	14
1 TEORETICKÁ ČÁST	15
1.1 Komerčně dostupné třífázové měniče.....	15
1.1.1 Třífázový měnič BLD15	15
1.1.2 BLDC Shield s TLE9879	16
1.2 EC motory konstrukce.....	16
1.2.1 Mechanická konstrukce.....	17
1.2.2 Konstrukce statoru	17
1.2.3 Konstrukce rotoru.....	19
1.2.4 Rotorové permanentní magnety	20
1.3 Zapojení EC motoru.....	21
1.4 Komutace EC motoru.....	24
1.4.1 Komutace BLDC motoru	25
1.5 Získávání pozice rotoru.....	26
1.5.1 Bipolární Hallův senzor	27
1.5.2 Lineární Hallův senzor.....	27
1.5.3 Enkodér	28
1.5.4 Bezsenzorové snímání.....	30
1.6 Možnosti řízení bezkartáčových EC motorů.....	32
1.6.1 Lichoběžníkové řízení komutace	32
1.6.2 Sinusové řízení komutace	33
2 PRAKTICKÁ ČÁST.....	35

2.1	Konstrukce třífázového měniče.....	35
2.2	Blokové schéma třífázového měniče	35
2.2.1	Vstupy, výstupy a signalizace třífázového měniče	36
2.2.2	Mikropočítač ATmega32u4	37
2.2.3	Napěťový zdroj Step-Down	38
2.2.4	Koncový výkonový stupeň.....	39
2.2.5	Přizpůsobovací obvod.....	41
2.3	Elektro schéma třífázového měniče	42
2.4	Design DPS třífázového měniče	43
2.5	Vizualizace třífázového měniče.....	43
2.6	Řídicí algoritmus třífázového měniče	44
2.7	Dosažené parametry	46
2.8	Využití třífázového měniče	46
2.8.1	Konkrétní využití třífázového měniče.....	47
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	49
3.1	Testování navržené konstrukce třífázového měniče	49
3.2	Blokové schéma zapojení pro testování.....	49
3.3	Měření základních elektrických veličin a průběhů	51
3.4	Implementace PSD regulátoru	53
3.4.1	PSD regulátor otáček.....	54
3.5	Testovací aplikace třífázového měniče pro systém Windows	55
3.5.1	Vizualizace testovací aplikace	55
3.5.2	Sledovaná data	56
4	ZÁVĚR	58
	POUŽITÁ LITERATURA.....	59
	PŘÍLOHY	60

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

AVR	alf and vegard's RISC
bEMF	back electromotive force
BLDC	brushless direct current
DPS	deska plošných spojů
EC	electronically commutated
EEPROM	electrically erasable programmable read-only memory
HS	high side
I2C	two wire interface
LED	light-emitting diode
LS	low side
PMSM	permanent magnet synchronous motor
PSD	proporce, sumace, diference
PWM	pulse width modulation
RGB	red, green, blue
SPI	seriál peripheral interface
UART	universal asynchronous receiver-transmitter
URO	uzavřený regulační obvod
USART	universal synchronous / asynchronous receiver-transmitter
USB	universal seriál bus

SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1.1 Třífázový měnič BLD15	15
Obrázek 1.2 BLDC Shield s TLE9879	16
Obrázek 1.3 Model jádra statoru EC motoru typu outrunner	18
Obrázek 1.4 Druhy vnutí EC motoru	19
Obrázek 1.5 Model rotoru EC motoru typu outrunner	20
Obrázek 1.6 Náhradní schéma statorového vinutí EC motoru	22
Obrázek 1.7 Šestikroková komutace BLDC motoru	25
Obrázek 1.8 Schéma výkonové části třífázového střídače	26
Obrázek 1.9 Vnitřní konstrukce bipolárního Hallova senzoru	27
Obrázek 1.10 Průběh tří Hallových senzorů BLDC motoru (120°)	28
Obrázek 1.11 Lineární Hallův senzor DRV5055 (odezva na magnetické pole)	28
Obrázek 1.12 Inkrementální enkodér	29
Obrázek 1.13 Absolutní enkodér	30
Obrázek 1.14 Průběh napětí bEMF motorů typu BLDC a PMSM	31
Obrázek 1.15 Generování lichoběžníkové funkce	33
Obrázek 1.16 Generování modifikované funkce Sinus	34
Obrázek 2.1 Blokové schéma třífázového měniče	36
Obrázek 2.2 Schéma přizpůsobovacího obvodu pro Hallovy senzory	37
Obrázek 2.3 Schéma zapojení Step-Down měniče MP1584	39
Obrázek 2.4 Blokový diagram polovičního H můstku RTN8982TA	40
Obrázek 2.5 Schéma přizpůsobovacího obvodu s logickými hradly	41
Obrázek 2.6 Vizualizace třífázového měniče (TOP)	44
Obrázek 2.7 Vizualizace třífázového měniče (BOTTOM)	44
Obrázek 2.8 Fotografie reálné konstrukce třífázového měniče	44

Obrázek 2.9 Vývojový diagram firmwaru třífázového měniče	45
Obrázek 2.10 Vizualizace elektrického zahradního kolečka	47
Obrázek 2.11 Vizualizace elektrického longboardu	48
Obrázek 3.1 BLDC motor BL070.240	49
Obrázek 3.2 Blokové schéma zapojení pro testování	50
Obrázek 3.3 Fotografie reálného zapojení pro testování	50
Obrázek 3.4 Zpětné indukované napětí bEMF fáze B a C	51
Obrázek 3.5 Průběhy signálu Hallových senzorů fáze B a C	52
Obrázek 3.6 Lichoběžníkový průběh spínaného napětí fáze B a C	53
Obrázek 3.7 Blokové schéma URO regulátoru otáček s PSD regulátorem	54
Obrázek 3.8 Nastavení parametrů regulátoru pomocí Ziegler-Nichols	54
Obrázek 3.9 Vizual testovací aplikace pro třífázový měnič	56
Obrázek 3.10 Průběhy veličin obvodu s regulátorem PSD	57

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1.1 Srovnání typů komutace EC motoru	32
Tabulka 2.1 Pravdivostní tabulka polovičního H můstku RTN8982TA	40
Tabulka 2.2 Pravdivostní tabulka přizpůsobovacího obvodu s logickými hradly	42
Tabulka 2.3 Srovnání s dosaženými parametry	46
Tabulka 3.1 Výsledné parametry PSD regulátoru	55

ÚVOD

Vývoj elektromotoru udělal za poslední dobu velký krok kupředu. Vznikají nové typy elektromotorů a s rostoucím výpočetním výkonem mikropočítačů i nové možnosti řízení těchto elektromotorů. Jedním z posledních typů elektromotorů jsou takzvané EC motory zastupující třídu stejnosměrných motorů s elektronickou komutací. Tento typ elektromotorů je odpovědí na náročné požadavky nynějšího trhu, který vyžaduje výkonnější, dynamičtější, tišší a účinnější elektromotory v co nejmenších rozměrech. Všechny zmíněné výhody s sebou však nesou jednu nezanedbatelnou nevýhodu spočívající v nutnosti předřadné elektroniky zprostředkovávající elektronickou komutaci. Tuto elektroniku je možné realizovat až v poslední době, kdy se výpočetní výkon mikropočítačů zvýšil a jejich cena snížila, stejně tak tomu je i u výkonových komponent, které mají velký výkon a malé rozměry. Všechny tyto možnosti dělají nově vzniklé aplikace výkonnější, kompaktnější a především menší.

Jelikož komerční řídicí jednotky BLDC motorů jsou málo výkonné a rozměrově nevyhovující, rozhodl jsem se pro vývoj a konstrukci vlastní řídicí jednotky BLDC motorů. Důležitými parametry pro konstrukci vlastní řídicí jednotky jsou kompaktní rozměry nepřevyšující 120 mm délky, 30 mm šířky a 30 mm hloubky. Dalším nezbytným parametrem je maximální velikost napájecího napětí, které musí být minimálně 30 VDC. Vzhledem k předpokládanému příkonu použitého BLDC motoru, musí řídicí jednotka dlouhodobě zvládat minimálně 25 A kontinuálního proudu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 KOMERČNĚ DOSTUPNÉ TŘÍFÁZOVÉ MĚNIČE

Na základě informací o komerčně dostupných třífázových měničích je možné zvolit směr, kterým se bude práce ubírat, a to ať už se jedná o převýšení parametrů komerčně dostupných třífázových měničů nebo individuálnost v konstrukčním provedení.

1.1.1 Třífázový měnič BLD15

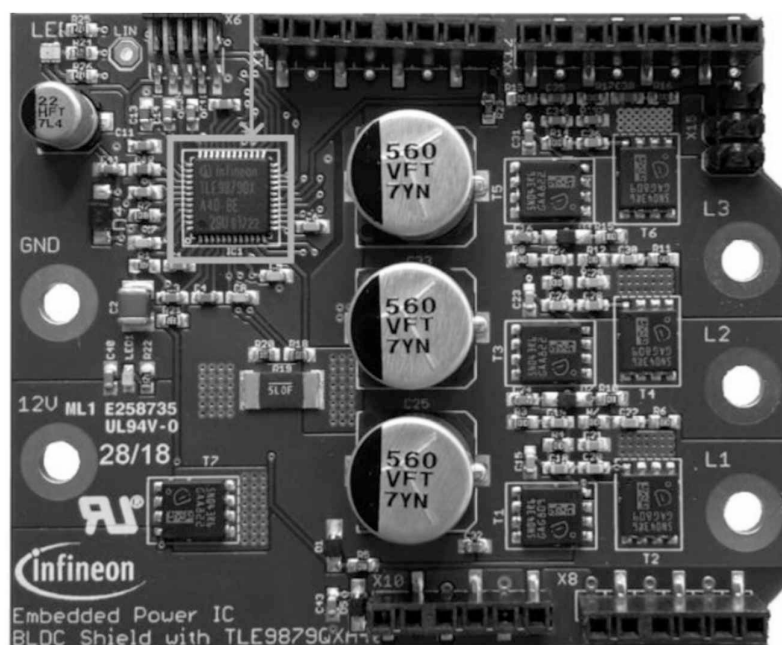
Třífázový měnič s označením BLD15 vyobrazený na obrázku 1.1 od výrobce Intecno je průmyslový třífázový měnič určený pro řízení EC motorů typu BLDC. Spadá do středně výkonné třídy třífázových měničů s Hallovým snímáním polohy rotoru motoru. Jeho provozní napájecí napětí je v rozsahu 20–60 VDC, jmenovitý proud 15 A se špičkovým přetížením do 30 A, nosný kmitočet 20 kHz, disponuje jedním analogovým vstupem a dvěma digitálními pro řízení. Konstrukce tohoto měniče dosahuje rozměrů 157 mm šířky, 34 mm výšky, 121 mm hloubky a je určena k montáži do suchého prostředí s omezeným přístupem.



Obrázek 1.1 Třífázový měnič BLD15

1.1.2 BLDC Shield s TLE9879

Třífázový měnič navržený jako shield vyobrazený na obrázku 1.2 pro platformu Arduino, kompatibilní s Arduino deskou Uno R3 od firmy Infineon je ideálním řešením pro měřicí účely a jednoduchou robotiku. Konstrukce umožňuje propojit až čtyři tyto shieldy, a to za pomoci SPI sběrnice. O celé řízení výkonových prvků se stará obvod s názvem TLE9879. Provozní napájecí napětí shieldu je v rozsahu 5,5–28 VDC, jmenovitý proud 10 A se špičkovým přetížením do 30 A. Konstrukce tohoto měniče dosahuje rozměrů 70 mm šířky a 55 mm výšky.



Obrázek 1.2 BLDC Shield s TLE9879

1.2 EC MOTORY KONSTRUKCE

EC (Electronically Commutated) motory jsou jednou z nejmladších skupin elektromotorů, u které v poslední době velice stoupá popularita. Jedná se o synchronní elektromotor, který je obdobou kartáčového stejnosměrného elektromotoru. Rozdíl je však ve způsobu komutace, která zde není prováděna mechanickými kartáči, ale je zajištěna, jak už název napovídá, elektronicky.

EC motory nacházejí své místo nejen v aplikacích, kde jsou nyní použity kartáčové stejnosměrné elektromotory, ale i v nových aplikacích, které nebylo dosud možné bez této technologie realizovat.

V porovnání EC motoru s kartáčovým stejnosměrným elektromotorem ve stejné konstrukční velikosti je EC motor

- Výkonnější,
- dosahuje vyšší účinnosti,
- dosahuje vyšších maximálních otáček,
- disponuje tišším chodem,
- dosahuje delší životnosti z důvodu absence kartáčů.

Pro svůj chod však nutně potřebuje řídicí výkonovou elektroniku, která bude popsána v kapitole 2.

1.2.1 Konstrukce statoru

Stator je nepohyblivá část EC motoru vytvářející točivé magnetické pole. Skládá se z těla EC motoru, statorového vinutí a jádra. Stejně jako u všech konstrukcí synchronních i asynchronních elektro motorů je i zde statorové jádro tvořeno skládáním transformátorových plechů vzájemně elektricky izolovaných, proto aby při vytváření magnetického pole nevznikaly takzvané vířivé proudy způsobující ztráty v podobě tepla. Tvar těchto plechů je navržen tak, aby při složení vytvořil tělo statoru a v něm drážky v ose otáčení rotoru potřebné pro umístění statorového vinutí.

Ztráty způsobené vířivými proudy lze vyjádřit vztahem

$$P_v \sim f^2 B^2, \quad (1.1)$$

kde P_v – ztrátový výkon, W

f – frekvence, Hz

B – indukce, T.



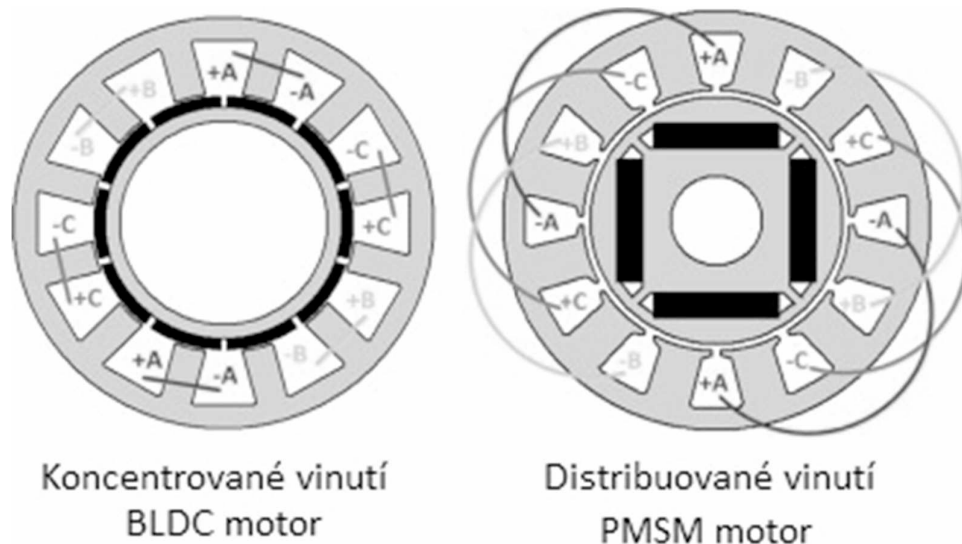
Obrázek 1.3 Model jádra statoru EC motoru typu outrunner

Statorové vinutí

Způsob, jakým je statorové vinutí navinuto, určuje, o jaký typ EC motoru se bude jednat. Existují dva základní typy

- Koncentrované vinutí
 - EC motory s označením BLDC (brushless direct current)
 - Lichoběžníkový průběh zpětného indukovaného napětí bEMF (back electromotive force).
- Distribuované vinutí
 - EC motory s označením PMSM (permanent magnet synchronous motor)
 - Sinusový průběh zpětného indukovaného napětí bEMF (back electromotive force).

Tato práce je zaměřená na BLDC typ EC motoru. Pro tento typ motoru se využívá komutace v šesti krocích, tvořící lichoběžníkový průběh napětí, též označovaná jako lichoběžníková komutace (Moanes, 2017).

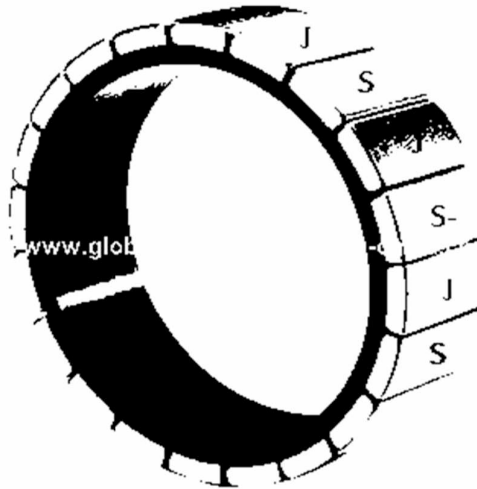


Obrázek 1.4 Druhy vynutí EC motoru (Moanes, 2017)

1.2.2 Konstrukce rotoru

Rotor u EC motoru se skládá z mechanické točivé části osazené permanentními magnety. Způsob, jakým jsou permanentní magnety upevňovány na mechanickou točivou část je závislý na dané technologii. Permanentní magnety jsou osazovány v párech, tvořící dva póly opačné magnetické polarity. Počet pólů ovlivňuje maximální točivý moment a maximální otáčky. Pro malý počet pólů permanentních magnetů dosahuje motor výrazně větších maximálních otáček ale menšímu točivému momentu. Pro velký počet pólů permanentních magnetů je tomu naopak.

Velký vliv na točivý moment a maximální otáčky má také druh použitých permanentních magnetů. Pro dosažení vyššího točivého momentu je zapotřebí permanentních magnetů s větší magnetickou silou, což s sebou nese v tomto případě nechtěný jev zvětšujícího se zpětného indukovaného napětí. Vysoké zpětné indukované napětí negativně ovlivňuje maximální otáčky EC motoru.



Obrázek 1.5 Model rotoru EC motoru typu outrunner

1.2.3 Rotorové permanentní magnety

Magnetické pole lze vyvolat za pomoci elektrického proudu, který prochází skrze vinutí cívky nebo pomocí permanentního magnetu. EC motor využívá obou těchto principů. Magnetické pole vyvolávané pomocí vinutí je využíváno ve statorové části a trvalé magnetické pole vytvářené permanentními magnety je využíváno v rotorové části.

Permanentní magnety v poslední době procházejí velkým vývojem, kde se objevují nové vhodnější materiály pro výrobu lepších a silnějších permanentních magnetů, které ve velké míře ovlivňují parametry EC motorů.

Pro EC motory se nejčastěji používají tři typy permanentních magnetů

AlNiCo

- směs (hliníku, niklu, kobaltu a železa),
- vysoká remanentní magnetizace při vysokých teplotách,
- malá koercitivní síla.

Ferit

- směs (oxidu železitého, uhličitanu barya, popřípadě uhličitanu stroncia),
- možnost realizace v různorodých tvarech,
- nízká cena,

- nižší remanentní magnetizace při vysokých teplotách,
- vyšší koercitivní síla,
- lineární demagnetizační křivka.

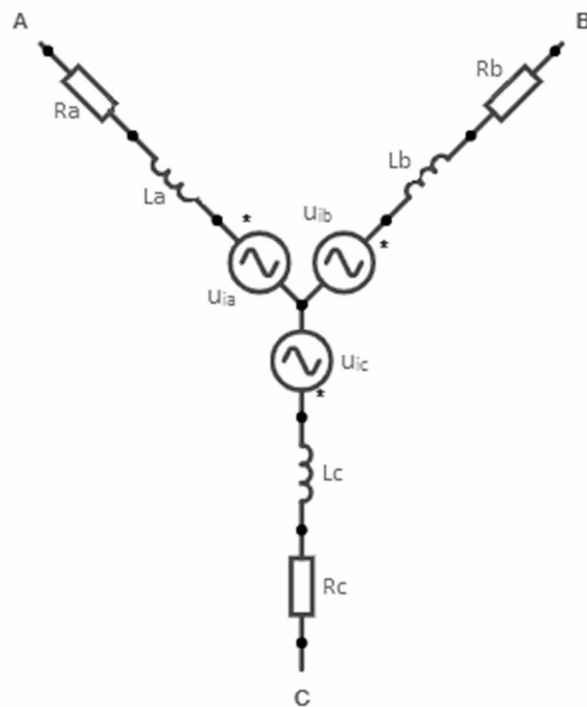
Neodym (Vzácné zeminy)

- směs (neodymu, železa a boru),
- vysoká cena,
- vysoká tepelní závislost,
- náchylnost na korozi,
- vysoká koercitivní síla.

1.3 ZAPOJENÍ EC MOTORU

EC motor se skládá ze dvou částí. Rotoru tvořeného permanentními magnety a statoru tvořeného statorovým vinutím. Statorové vinutí představuje třífázový systém zapojený do takzvané hvězdy, což znamená, že vždy jeden ze dvou konců každého ze tří vinutí je propojen do jednoho uzle. Tento uzel není běžně vyvedený a není možné ho dále připojit. Naopak zbylé konce každého ze tří vinutí jsou vyvedeny z EC motoru, a jsou tak připraveny pro připojení třífázového měniče, který se stará o distribuci výkonového proudu a řízení.

Na obrázku 1.6 je vyobrazené zjednodušené náhradní schéma statorového vinutí. Na vyvedené svorky statorového vinutí označené A, B a C je přiváděno komutované napětí, a to v šesti po sobě se opakujících krocích. V nejjednodušším případě, který odpovídá rotoru s dvěma magnetickými póly, by sekvence všech těchto šesti kroků odpovídala jedné otáčce rotoru. Přidáváním dalších párů rotorových permanentních magnetů by znamenalo násobení počtu potřebných kroků pro jednu otáčku rotoru (Moanes, 2017).



Obrázek 1.6 Náhradní schéma statorového vinutí EC motoru

V případě realizace matematického modelu z náhradního schématu vyobrazeného na obrázku 1.6, by bylo možné zavést zjednodušující podmínky:

- vinutí statoru EC motoru je zapojeno do hvězdy a je souměrné

vyjádřeno vztahem

$$\begin{aligned}
 R &= R_a = R_b = R_c, \\
 L &= L_a = L_b = L_c, \\
 M &= L_{ab} = L_{ac} = L_{bc},
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

kde R_a, R_b, R_c – reálný odpor fází, Ω

L_a, L_b, L_c – vlastní indukčnost fází, H

L_{ab}, L_{bc}, L_{ca} – vzájemná indukčnost fází, H.

Napět'ové rovnice

Rovnice vycházejí z prvního Kirchhoffova zákona, kde platí

$$\begin{aligned}i_a + i_b + i_c &= 0, \\i_a + i_b &= -i_c,\end{aligned}\tag{1.3}$$

kde i_a, i_b, i_c - proud fází, A.

Okamžité napětí fází je dáno rovnicemi, kde platí

$$\begin{aligned}u_a &= R_a \cdot i_a + \frac{d\Psi_a}{dt} + u_{ia}, \\u_b &= R_b \cdot i_b + \frac{d\Psi_b}{dt} + u_{ib}, \\u_c &= R_c \cdot i_c + \frac{d\Psi_c}{dt} + u_{ic},\end{aligned}\tag{1.4}$$

kde u_a, u_b, u_c - okamžité napětí fází EC motoru, V

u_{ia}, u_{ib}, u_{ic} - indukované napětí fází EC motoru, V

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c - spřažené magnetické toky fází EC motoru, Wb.

Za pomoci zjednodušení z rovnice (2.2), lze dále rovnice rozšířit a dosadit tak za spřažené magnetické toky

$$\begin{aligned}u_a &= R \cdot i_a + L \cdot \frac{di_a}{dt} + M \cdot \frac{di_b}{dt} + M \cdot \frac{di_c}{dt} + u_{ia}, \\u_b &= R \cdot i_b + M \cdot \frac{di_a}{dt} + L \cdot \frac{di_b}{dt} + M \cdot \frac{di_c}{dt} + u_{ib}, \\u_c &= R \cdot i_c + M \cdot \frac{di_a}{dt} + M \cdot \frac{di_b}{dt} + L \cdot \frac{di_c}{dt} + u_{ic}.\end{aligned}\tag{1.5}$$

Výsledné napět'ové rovnice jsou ve tvaru

$$\begin{aligned}
u_a &= R \cdot i_a + (L - M) \cdot \frac{di_a}{dt} + u_{ia} \\
u_b &= R \cdot i_b + (L - M) \cdot \frac{di_b}{dt} + u_{ib} \\
u_c &= R \cdot i_c + (L - M) \cdot \frac{di_c}{dt} + u_{ic}.
\end{aligned}
\tag{1.6}$$

Tyto napěťové rovnice odpovídají náhradnímu schématu satorového vinutí EC motoru vyobrazenému na obrázku 1.6.

1.4 KOMUTACE EC MOTORU

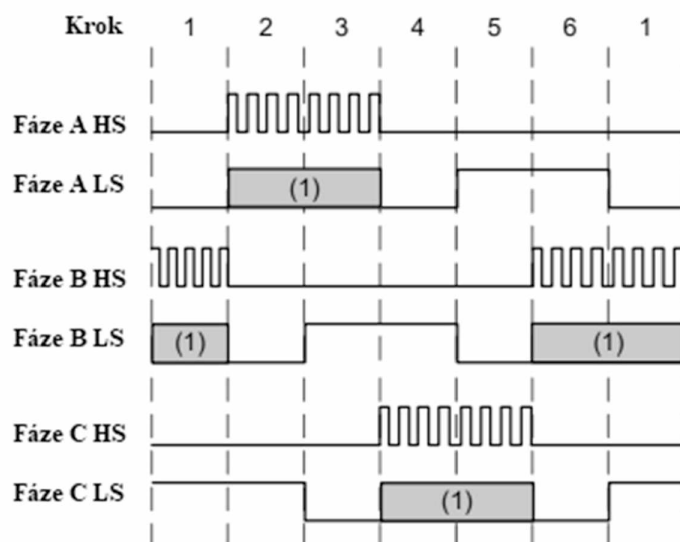
Komutací rozumíme činnost, při které je v jednotlivých předem definovaných krocích na svorky vynutí elektromotoru střídavě přiváděno napětí a tím je tak ve vinutí elektromotoru vyvoláno točivé magnetické pole. Komutace je přímo spjata s polohou (natočením) rotoru.

U standardního kartáčového stejnosměrného synchronního motoru je docíleno komutace za pomoci mechanických kartáčů. Při otáčení rotoru tvořeného rotorovým vinutím je střídání napětí na jednotlivé fáze vinutí prováděno mechanicky. Vinutí je v mechanickém kontaktu s kartáči a vzniká tak mezi nimi jiskřiště, které je zdrojem rušení.

V případě EC motoru je komutace prováděna přímo v třífázovém měniči, který je nezbytný pro chod elektromotoru. Zde se o střídání napětí na jednotlivých fázích vinutí starají polovodičové výkonové součástky, u kterých nevzniká žádné jiskřiště, a tedy ani rušení s ním spojené. Tento druh komutace je mnohem složitější a náročnější. Pro komutaci je zapotřebí znát přesnou polohu rotoru, kterou je možné detekovat několika způsoby. Nejpoužívanější detekcí polohy je za pomoci tří Hallových magnetických snímačů umístěných na předem stanovených pozicích. Je ale možné se setkat s detekcí polohy za pomoci enkodéru, indukčního snímače nebo stále populárnějším bEMF (zpětným indukovaným napětím).

1.4.1 Komutace BLDC motoru

U EC motoru s koncentrovaným vinutím označovaným jako BLDC, je komutace prováděna v šesti po sobě jdoucích krocích vyobrazených na obrázku 1.7. V každém jednotlivém kroku jsou vždy sepnuty pouze dva výkonové prvky různých fází, a to tak, aby umožňovaly průchod proudu z kladné části napájecího zdroje skrze dvě fáze statorového vinutí do záporné části napájecího zdroje a uzavřely tak obvod, jak je vyobrazeno na obrázku 1.8.

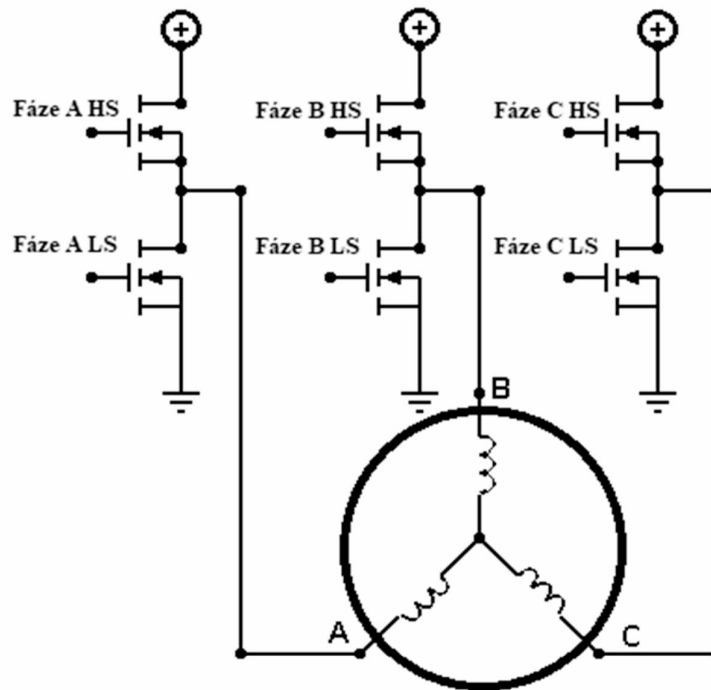


Obrázek 1.7 Šestikroková komutace BLDC motoru (Texas Instruments, 2014)

Pro názornost je uvažován krok 2, sepnutý výkonový prvek s označením fáze A HS, který spíná kladnou část napájení s PWM řízením pro možnost nastavení požadovaného výkonu. Výkonový prvek, který spíná zápornou část napájecího zdroje, je v kroku 2 prvek s označením fáze C LS. Tyto dva sepnuté výkonové prvky umožňují průchod výkonového proudu přes vinutí s označením A do vinutí s označením C, jak je to možné pochopit z obrázku 1.8.

1.5 ZÍSKÁVÁNÍ POZICE ROTORU

Pro funkci kartáčového stejnosměrného synchronního motoru není nutné získávat informaci o poloze rotoru, protože jeho komutace je prováděna mechanicky na základě mechanického komutátoru.



Obrázek 1.8 Schéma výkonové části třífázového střídače

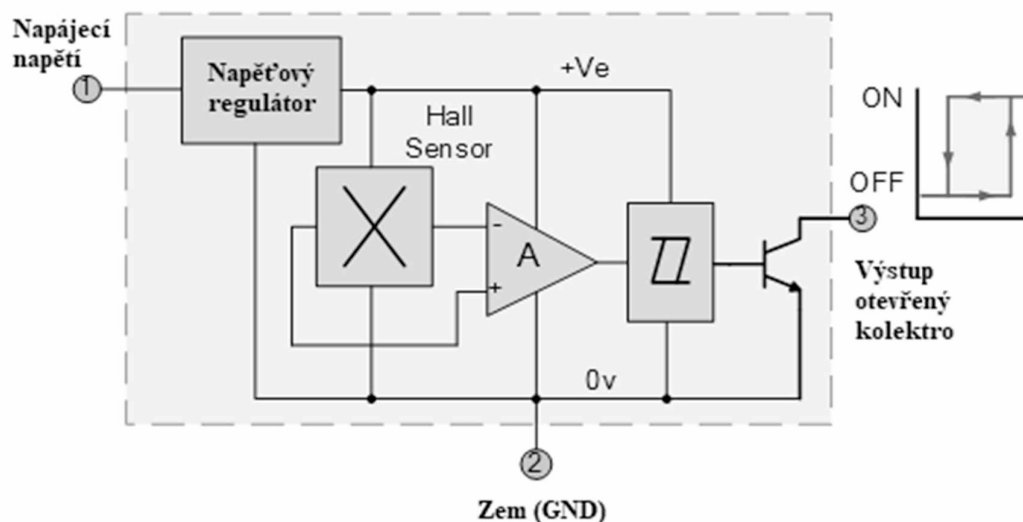
Získávání pozice rotoru EC motoru je nedílnou součástí pro správnou funkci třífázového měniče a EC motoru. Třífázový měnič na základě získané informace o rotoru EC motoru a zvoleného algoritmu řízení generuje výkonový signál pro jednotlivé fáze EC motoru.

Pro snímání polohy rotoru EC motoru se využívá několika typů senzorů, jako jsou například:

- bipolární Hallův senzor,
- lineární Hallův senzor,
- enkodér,
- bez senzorové snímání nEMF.

1.5.1 Bipolární Hallův senzor

Tento typ Hallova senzoru je vhodný zejména ke snímání polohy pro EC motory typu BLDC a řídicí algoritmus lichoběžníkové komutace. Na obrázku 1.9 je vyobrazena vnitřní konstrukce bipolárního Hallova senzoru. V případě, kdy intenzita magnetického pole přesáhne danou úroveň, napěťová úroveň na jeho výstupu se změní. Pro snímání polohy rotoru EC motoru se do jeho konstrukce umísťují tři bipolární Hallovy senzory posunuté vůči sobě o 120°, 60° nebo 30°. Kombinace těchto tří bipolárních Hallových senzorů vytváří jednoznačnou binární hodnotu, vyobrazenou na obrázku 1.10, informující třífázový měnič o aktuální poloze. Výhodou bipolárního Hallova senzoru je nízká cena a jednoduchost jeho reprezentace intenzity magnetického pole, a tedy nenáročnost pro zpracování signálu mikropočítačem. Nevýhodou je malé rozlišení, a tedy neschopnost použít jinou než lichoběžníkovou komutaci pro BLDC motory (Electronic tutorials, 2013).

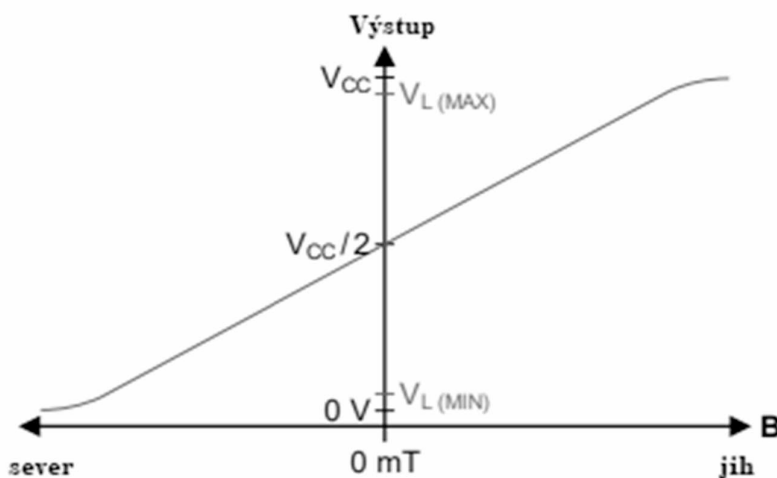


Obrázek 1.9 Vnitřní konstrukce bipolárního Hallova senzoru (Electronic tutorials, 2013)

1.5.2 Lineární Hallův senzor

Tento typ Hallova senzoru je vhodný ke snímání polohy pro EC motory typu BLDC i PMSM a řídicích algoritmech lichoběžníkové komutace nebo sinusové komutace. Jeho vnitřní konstrukce převádí intenzitu magnetického pole na velikost napětí na jeho výstupu

vyobrazené na obrázku 1.11. Z principu má lineární Hallův senzor bez působení magnetického pole na svém výstupu polovinu svého napájecího napětí a při působení magnetického pole může reagovat na obě polarity. Pro snímání polohy rotoru EC motoru se do jeho konstrukce umísťují tři lineární Hallovy senzory posunuté vůči sobě o 120° . Kombinace těchto tří lineárních Hallových senzorů vytváří třífázový spojitý signál, který je možné převést na přesnou informaci o poloze rotoru EC motoru. Výhodou lineárního Hallova senzoru je velké rozlišení v podobě spojitého signálu. Nevýhodou je vyšší cena a nutnost spojitý signál dále zpracovávat, a tedy projevují se vyšší nároky na mikropočítač (Electronic tutorials, 2013).



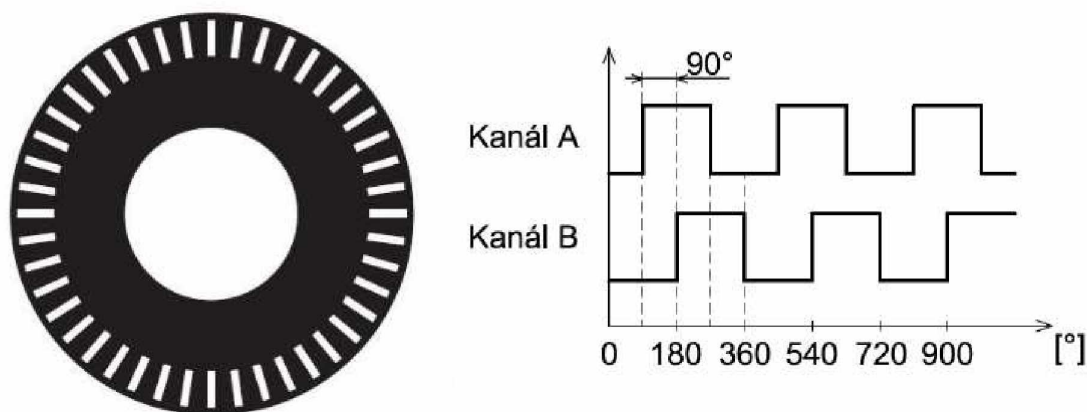
Obrázek 1.10 Lineární Hallův senzor DRV5055 odezva na magnetické pole (Texas Instruments, 2018)

1.5.3 Enkodér

Enkodéry můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, a to inkrementální nebo absolutní. Dále je enkodéry možné rozlišovat na optické, magnetické a mechanické.

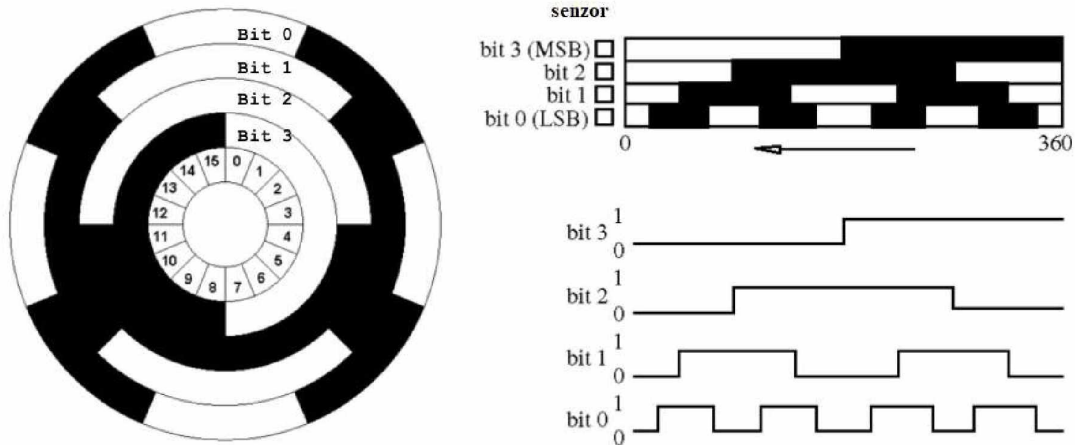
Inkrementální enkodér se skládá z rotačního disku, který má v případě optického snímání po svém obvodu okénka vyobrazená na obrázku 1.12. Dále obsahuje optický inkrementální enkodér dva optické snímače umístěné tak, aby vytvářely binární obdélníkové signály A a B posunuté vůči sobě o 90° . Při otáčení rotoru EC motoru, na kterém je připevněná část enkodéru s rotačním diskem, jsou do mikropočítače přiváděny dva signály A a B. Jeden z těchto signálů je v mikropočítači využíván pro přerušení náběžnou hranou,

kteřá informuje o pohybu rotoru EC motoru. Druhý signál je při detekci náběžné hrany vyhodnocen a na jeho hodnotě rozhodnuto o směru pohybu rotoru EC motoru. Rozlišení enkodéru je dáno počtem okének na rotačním disku. Výhodou inkrementálního enkodéru je nižší cena oproti absolutnímu enkodéru a velké rozlišení. Velkou nevýhodou je prvotní kalibrace (určení výchozího bodu), poměrně vysoké nároky na zpracování signálů mikro počítačem a jeho nepřetržité sledování. V případě ztráty jednoho impulzu, který generuje přerušeni, by to znamenalo celý ovládaný systém zastavit a znovu překalibrovat.



Obrázek 1.12 Inkrementální enkodér

Absolutní enkodér se v případě optického snímání skládá stejně jako inkrementální enkodér z rotačního disku, který má také okénka, avšak tento okénkový systém je více propracovaný. Okénka jsou podle počtů optických snímačů kruhově umístěna na rotačním disku v různých velikostech a různých vzdálenostech od středu otáčení, jak je vyobrazeno na obrázku 1.13. Tvary a rozmístění okének vytváří binární kód v řádu, který je dán počtem optických snímačů. Každá poloha (natočení) má svojí jedinečnou binární hodnotu, a tedy absolutní informaci o poloze. Výhodou absolutního enkodéru je absolutní jednoznačná informace o poloze a není zde nutná prvotní kalibrace jako u inkrementálního enkodéru. Nevýhodou je vysoká cena a zvyšující se počet výstupů s počtem optických snímačů.



Obrázek 1.13 Absolutní enkodér

1.5.4 Bezsenzorové snímání

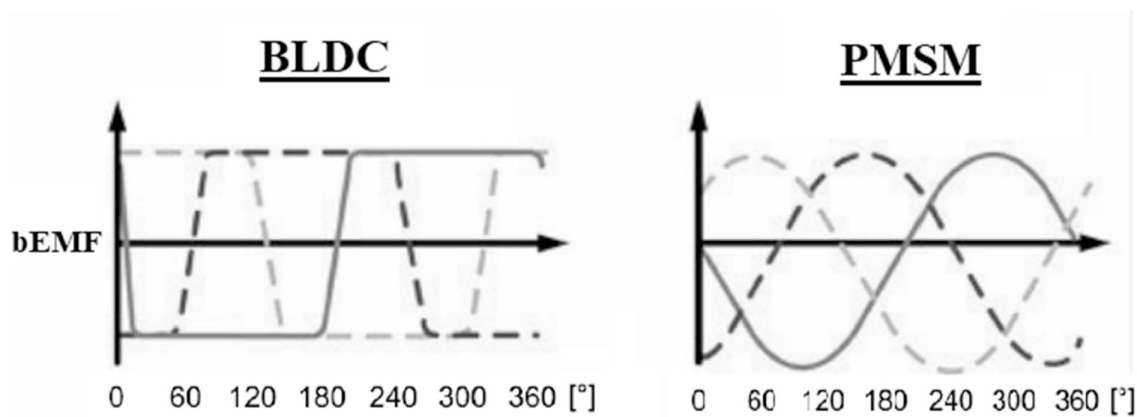
Polohu rotoru EC motoru lze získávat různými způsoby uvedenými výše, ale existují metody, které umožňují získat informaci o poloze rotoru EC motoru i bez přidaných senzorů, a to pouze ze signálu generovanými přímo elektromotorem. Vzhledem k tomu, že rotor EC motoru je tvořen permanentními magnety, stává se sám generátorem napětí podle vztahu

$$\begin{aligned}
 u_{ia} &= -R \cdot i_a - (L - M) \cdot \frac{di_a}{dt} + u_a, \\
 u_{ib} &= -R \cdot i_b - (L - M) \cdot \frac{di_b}{dt} + u_b, \\
 u_{ic} &= -R \cdot i_c - (L - M) \cdot \frac{di_c}{dt} + u_c,
 \end{aligned}
 \tag{1.7}$$

- kde u_a, u_b, u_c - okamžité napětí fází EC motoru, V
 u_{ia}, u_{ib}, u_{ic} - indukované napětí fází EC motoru, V
 i_a, i_b, i_c - proud fází, A
 R_a, R_b, R_c - reálný odpor fází, Ω .

Toto generované napětí se označuje bEMF. Bezsenzorové snímání polohy s sebou nese velké výhody v podobě podstatného snížení ceny, a to z důvodu nepotřebnosti dalších drahých senzorů pro snímání polohy. Další podstatnou výhodou je spolehlivost a naprostá přesnost. Podstatná nevýhoda, jak už z uvedeného zákona výše vyplývá, vzniká při nulových nebo velmi malých otáčkách, kdy se generuje jen velmi malé nebo žádné napětí. Pro tyto případy se přistupuje k takzvaným startovacím sekvencím, které nejsou úplně optimální při požadavku na malé otáčky nebo při startu do zátěže. Proto se v mnoha aplikacích přistupuje ke kombinaci sensorového a bezsenzorového snímání polohy EC motoru.

Pro motory typu BLDC odpovídá bEMF třífázovému lichoběžníkovému průběhu napětí, které je vyobrazené na obrázku 1.14. Pro motory typu PMSM odpovídá bEMF třífázovému sinusovému průběhu napětí, které je také vyobrazeno na obrázku 1.14. Z těchto napěťových průběhů je možné získávat informaci o poloze rotoru EC motoru.



Obrázek 1.14 Průběh napětí bEMF motorů typu BLDC a PMSM (Moanes, 2017)

Pro řízení v šesti krocích, které odpovídá lichoběžníkové komutaci na motoru typu BLDC, sleduje mikro počítač bEMF všech tří fází, které vyhodnocuje. V jednotlivých krocích jsou sepnuty vždy dvě fáze statorového vnutí EC motoru a na třetí fázi je sledován průběh bEMF napětí. Napěťový průchod virtuální nulou signalizuje chtěnou pozici rotoru EC motoru, při které dochází ke komutaci, a tedy přechodu na další krok (přepnutí výkonových prvků třífázového měniče).

Sinusová komutace je o něco složitější, a to zejména v požadavcích na vyšší výkon mikro počítače. Sinusové komutace se využívá u motoru typu PMSM se sinusovým bEMF.

Je nutné, aby mikropočítač sledoval celý průběh sinusového bEMF jednotlivých fází vinutí EC motoru. Na základě čteného sinusového bEMF napětí mikropočítač může provádět spínání výkonových prvků, a to způsobem modifikovaného sinusu.

1.6 MOŽNOSTI ŘÍZENÍ BEZKARTÁČOVÝCH EC MOTORŮ

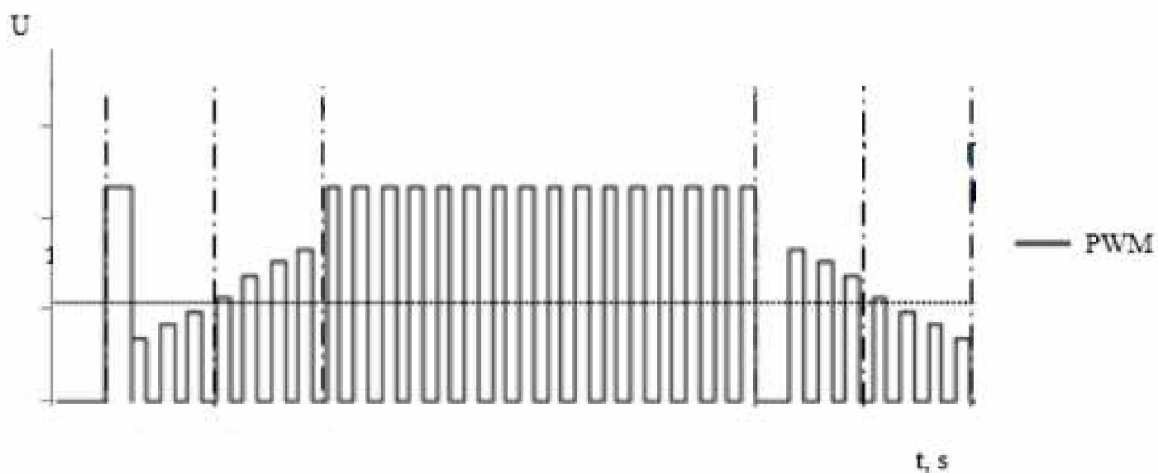
EC motory z principu nedisponují mechanickými komutátory, jako je tomu u stejnosměrných synchronních kartáčových motorů, je tedy nutné provádět komutaci za pomoci výkonových prvků v třífázovém měniči. Výkonové prvky třífázového měniče jsou spínány na základě typu EC motoru, a tedy typu algoritmu. Nejpoužívanější typ komutace je lichoběžníková neboli šestikroková. Dalším typem je sinusové řízení komutace, které je určeno pro náročné aplikace.

Tabulka 1.1 Srovnání typů komutace EC motoru

Řídicí algoritmus komutace	Řízení otáček	Řízení točivého momentu		Náročnost algoritmu
		Malé otáčky	Velké otáčky	
Lichoběžníková	velmi dobré	zvlnění momentu	efektivní	Nízká
Sinusová	velmi dobré	velmi dobré	neefektivní	Vysoká

1.6.1 Lichoběžníkové řízení komutace

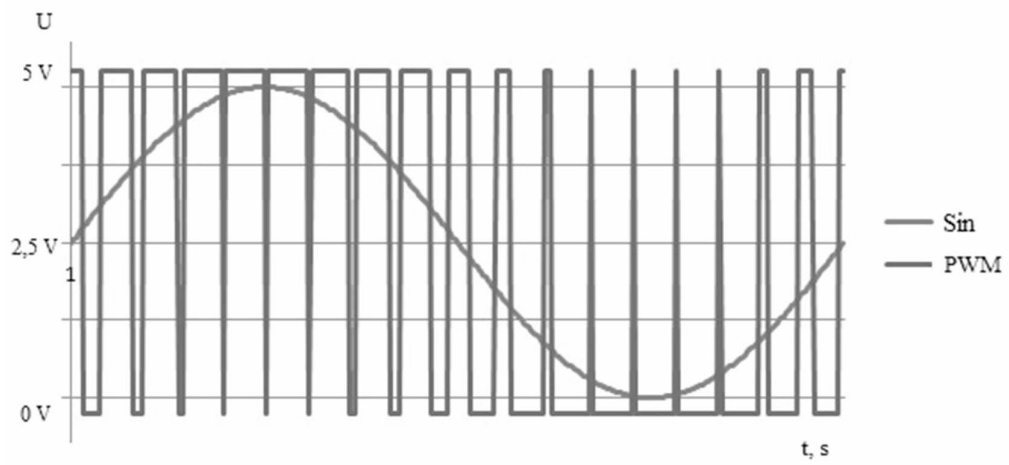
Lichoběžníkové řízení je nejrozšířenější typ řízení komutace pro svoji jednoduchost a rozšířenost EC motorů typu BLDC. Většina aplikací, kde jsou použity EC motory, nemají tak vysoké nároky na konstantnost točivého momentu. Je tedy možné použít lichoběžníkové řízení komutace, u kterého se právě zvlnění točivého momentu projevuje. Lichoběžníkové řízení komutace pro svoji správnou činnost potřebuje znát v porovnání s ostatními typy řízení komutace jen málo informací o poloze rotoru EC motoru. Tato komutace je prováděna v šesti po sobě jdoucích krocích, a to tak, že v každém z šesti kroků jsou sepnuty vždy pouze dva výkonové prvky spínající obě napěťové polarity zdroje. Proud se pak uzavírá přes dvě vinutí komutátorového vinutí a třetí vinutí (fáze) je uvolněno například pro čtení bEMF sloužící pro identifikaci polohy rotoru.



Obrázek 1.15 Generování lichoběžníkové funkce

1.6.2 Sinusové řízení komutace

V případě vyšších požadavků na konstantnost točivého momentu je zapotřebí složitějšího řízení komutace. Sinusové řízení komutace je jedním z možných řízení komutace, které nabízí konstantní točivý moment s hladkým a tichým průběhem. Toto řízení komutace je vhodné pro EC motory typu PMSM se sinusovým bEMF. Princip spočívá v generování modifikované sinus funkce mikro počítačem vyobrazené na obrázku 1.16. Jako budicí signál pro výkonové prvky. Tento signál je vždy generovaný pro tři výkonové prvky jednotlivých fází zároveň, a proto zde nedochází ke ztrátě točivého momentu při přepínání jednotlivých fází jako je tomu u lichoběžníkového řízení komutace. Sinusové řízení komutace je však poměrně náročné na výpočetní výkon a vyžaduje přesnější informaci o poloze rotoru EC motoru. S tímto požadavkem se konstrukce prodražuje hlavně z hlediska potřeby přesnějších senzorů polohy, jako jsou například enkodéry nebo lineární Hallovy senzory.



Obrázek 1.16 Generování modifikované funkce Sinus

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 KONSTRUKCE TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

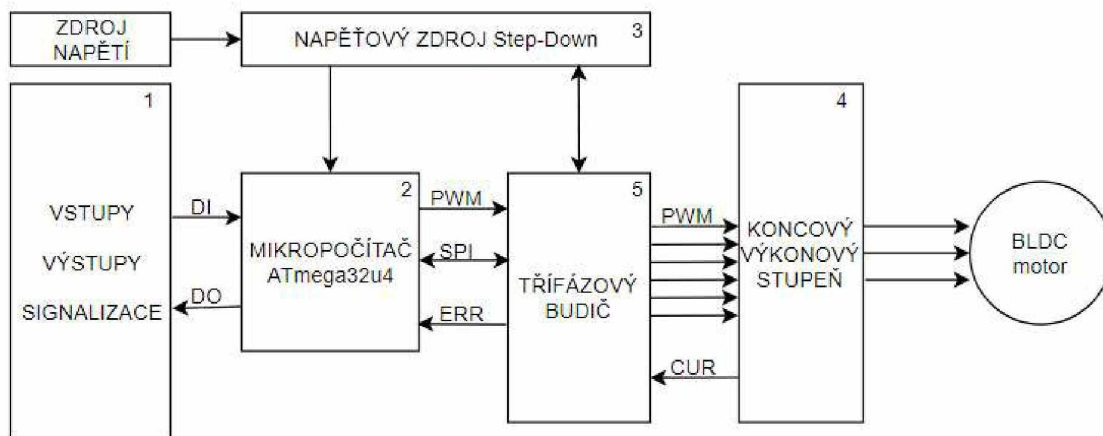
Návrh konstrukce třífázového měniče pro EC motory se řídí podle několika kritérii. Kritéria jsou například velikost napájecího napětí zdroje, popřípadě způsob napájení ze sítě jako zdrojem střídavého proudu. Dalším kritériem je typ řízeného EC motoru a s tím požadavek na složitost řídicího algoritmu (řízení komutace). Pro toto kritérium je rozhodující správná volba mikropočítače, který musí mít dostatečný výpočetní výkon a odpovídající periférie. Nesmí se zapomenout na dimenzování výkonových prvků koncového stupně třífázového měniče. Výkonové prvky musí splňovat několik základních požadavků, jako je dostatečné napájecí napětí, maximální kontinuální proud, maximální pulzní proud, čas potřebný pro plné otevření, čas potřebný pro plné zavření a v neposlední řadě co nejmenší vnitřní odpor přechodu výkonového prvku v plně otevřeném stavu. Tento vnitřní odpor výkonového prvku nám z Ohmova zákona udává ztrátový tepelný výkon výkonového prvku, jež je nutný z pouzdra výkonového prvku odvádět (chladit).

Třífázový měnič, jak již bylo uvedeno výše, pro svojí funkci musí znát aktuální polohu rotoru EC motoru. Polohu lze získat několika způsoby, a to z přidaných senzorů nebo pomocí bEMF. Jednodušším způsobem z hlediska konstrukce se jeví způsob bEMF, pro který je nutno pouze napěťově přizpůsobit signál získaný přímo z připojených fázových vodičů EC motoru. Druhým způsobem je získávání aktuální polohy z přidaných externích senzorů EC motoru. Způsob senzorového snímání aktuální polohy vyžaduje konstrukční zásah přímo do EC motoru a přizpůsobení konstrukce třífázového měniče.

2.2 BLOKOVÉ SCHÉMA TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

Třífázový měnič pro řízení EC motoru se skládá z pěti základních bloků. První blok je tvořen vstupy a výstupy, popřípadě signalizací. Pomocí tohoto bloku je možné třífázový měnič EC motoru ovládat a komunikovat s ním. Druhý blok je mikropočítač, který zpracovává veškeré signály a data. Na základě získaných signálů, dat a řídicího algoritmu mikropočítač ovládá veškeré prvky obsažené v konstrukci třífázového měniče EC motoru. Třetí blok obsahuje napěťové zdroje přizpůsobující napájecí napětí EC měniče na potřebné napěťové úrovně požadované jednotlivými bloky, jako je například druhý blok s mikropočítačem, který pro svojí funkci potřebuje nízkou úroveň napájecího napětí. Čtvrtý blok je koncový výkonový stupeň třífázového měniče EC motoru. Tento blok obsahuje

výkonové prvky, které jsou na základě signálu z mikropočítače spínány. Pokud nejsou výkonové prvky zdvojeny, tak čtvrtý blok obsahuje šest těchto výkonových prvků. Pro každou fázi třífázového měniče EC motoru odpovídají dva výkonové prvky, a to jeden spínající kladnou část napájecího napětí a druhý spínající zápornou (nulovou) část napájecího napětí. Tento blok ve většině případů obsahuje i měřicí odpory pro snímání proudu. Měřicí odpory mají malý odpor pohybující se v jednotkách tisícín ohmů. Poslední, pátý blok slouží pro přizpůsobení signálů z mikropočítače do výkonových prvků. Vzhledem k tomu, že mikropočítač pracuje na nízkém napětí a proudu, je nutné pro výkonové prvky, pracující s napájecím napětím celého třífázového měniče vytvořit přizpůsobení řídicích signálů. O tuto funkci se stará právě zmíněný pátý blok.

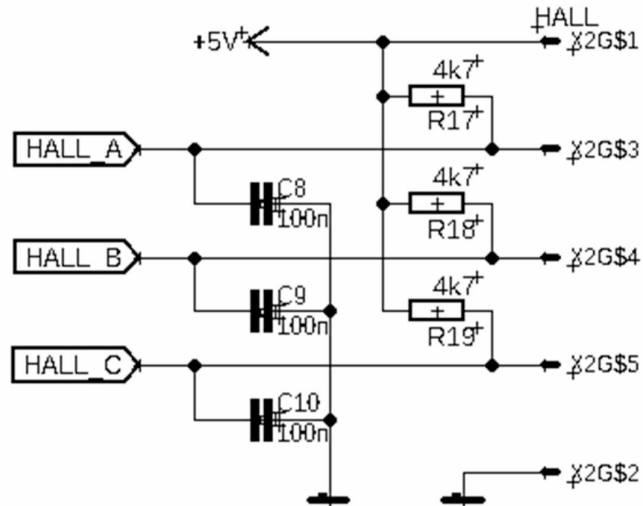


Obrázek 2.1 Blokové schéma třífázového měniče

2.2.1 Vstupy, výstupy a signalizace třífázového měniče

Blok vstupů, výstupů a signalizace může být tvořen různými prvky, jako jsou přizpůsobovací obvody napěťových nebo proudových úrovní. Dále lze použít různá komunikační rozhraní nebo optickou signalizaci pro předávání informace o stavu třífázového měniče. Na obrázku 2.2 je vyobrazené schéma přizpůsobovacího obvodu pro Hallovy senzory. Hallovy senzory, v tomto případě tři, mají společné napájení tvořené 5 V stejnosměrného napětí. Každý Hallův senzor má dále svůj pull-up rezistor, který slouží k reprezentaci vysoké úrovně logického signálu. Hallův senzor pracuje v režimu otevřený kolektor, a tedy při zvýšení intenzity magnetického pole v předem definované vzdálenosti, Hallův senzor uzemní přivedený signál přes pull-up na zem a hodnota logické úrovně se

změní na nízku. Hned za pull-up rezistorem se nachází filtrační kondenzátor zapojený v integračním článku, který slouží pro filtraci zákmitů, popřípadě naindukovaného napětí na vodiče Hallova senzoru.



Obrázek 2.2 Schéma přizpůsobovacího obvodu pro Hallovy senzory

2.2.2 Mikropočítač ATmega32u4

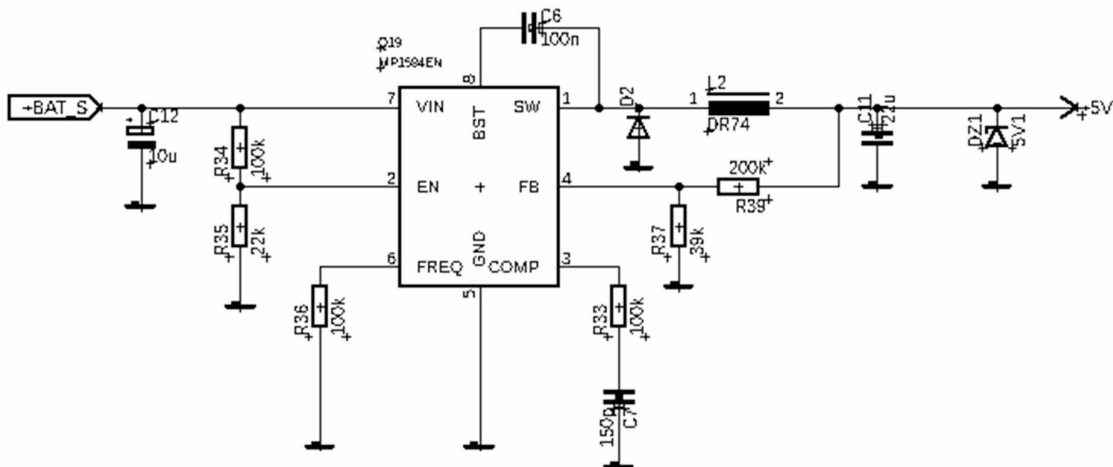
Mikropočítač ATmega32u4 obsažený ve druhém bloku, je 8bitový procesor z rodiny mikroprocesorů AVR ATmega, dříve vyráběný firmou ATMEL, ale nyní prodáváný pod firmou Microchip, která firmu ATMEL koupila. Tento mikropočítač disponuje mnoha druhy vestavěných rozhraní, jako jsou I2C, SPI, UART, USART sloužící pro komunikaci s jinými zařízeními. Rychlost taktu činí 16 Mhz. Tato rychlost je pro šesti krokovou komutaci a získávání pozice rotoru EC motoru z externích senzorů více než dostačující. Pro získávání pozice rotoru EC motoru pomocí bEMF by však tato rychlost nemusela být dostačující a mohlo by se projevit omezení v podobě limitace maximálních otáček. Vhodnost mikropočítače ATmega32u4 pro řízení třífázového měniče s šestikrokovou komutací tkví v jeho vestavěném módu s označením PWM6. Tento mód je přímo určený k řízení třífázového měniče pro EC motory. Mód PWM6 využívá 10bitový vysokorychlostní čítač a časovač 4. K tomuto čítači a časovači jsou připojeny tři výstupy s možností generování PWM signálu. Každý ze tří výstupů má k sobě do páru další jeden negovaný výstup sloužící

ke generování signálu pro spodní výkonové prvky spínající zápornou (nulovou) část napájecího napětí. Další velkou výhodou tohoto čítače a časovače s PWM výstupy je, že každý pár výstupu (normální a negovaný) je vybavený svým vlastním dead time generátorem, který slouží pro generování takzvané mrtvé zóny. Mrtvá zóna je nezbytnou součástí pro spínání v protifázovém režimu, sloužící pro vyrušení nechtěných zpětných proudů generovaných výkonovým spínáním a pohybem magnetů rotoru EC motoru okolo vnutí statoru EC motoru. Tyto proudy se uzavírají přes ochranné diody ve výkonových prvcích a vytvářejí nechtěné tepelné ztráty. V neposlední řadě procesor ATmega32u4 disponuje vestavěným rozhraním bootloadrem a USB 2.0, umožňující komunikaci s osobním počítačem. Vestavěný bootloader umožňuje přepis dat ve Flash paměti, a tedy umožňuje změnu samotného strojového kódu přímo přes rozhraní USB 2.0.

2.2.3 Napěťový zdroj Step-Down

Téměř většina aplikací, ve kterých je použitý mikropočítač, vyžaduje přizpůsobení napájecího napětí. Mikropočítače ve většině případů pracují s napájecím napětím 5 V nebo 3,3 V stejnosměrného stabilizovaného napětí. Přesnost a stálost tohoto napájecího napětí je velice důležitá. Mikropočítač své napájecí napětí může využívat jako referenční napětí pro měření velikosti analogového napětí.

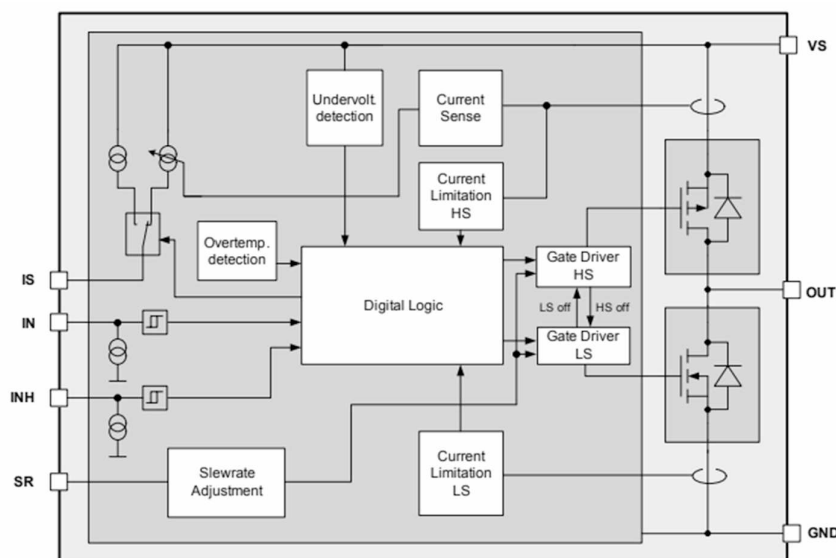
Pro snížení a stabilizaci napájecího napětí se v poslední době hojně využívají měniče napětí. Vývoj těchto měničů napětí v poslední době velice pokročil. Měniče napětí jsou stále menší a jejich výkony vyšší. Oproti lineárním stabilizátorům napětí mají měniče napětí velkou účinnost přesahující 95 %. Na obrázku 2.3 je vyobrazeno zapojení Step-Down měniče napětí s označením MP1584 od firmy MPS. Tento měnič napětí se vyznačuje svým velkým rozsahem spínací frekvence, a to od 100 kHz do 1,5 MHz. Napájecí napětí měniče napětí se musí pohybovat mezi 4,5 V až do 28 V stejnosměrného napětí. Maximální poskytovaný proud je do 3 A.



Obrázek 2.3 Schéma zapojení Step-Down měniče MP1584

2.2.4 Koncový výkonový stupeň

Čtvrtý blok, nazvaný koncový výkonový stupeň třífázového měniče EC motoru, je obzvláště důležité navrhnout tak, aby byly prvky dimenzovány na potřebné proudy a napětí. Pro výkonové spínání vinutí EC motoru se nejvíce využívá polovodičových unipolárních tranzistoru MOSFET, které mohou poskytnout dostatečný výkon v podobě maximálního spínaného proudu. Unipolární tranzistory MOSFET jsou řízeny velikostí napětí přivedeného na svorku gate. Velikost řídicího napětí určuje velikost indukovaného kanálu uvnitř unipolárního tranzistoru. Na obrázku 2.4 je vyobrazený blokový diagram polovičního H můstku BTN8982TA, který je vhodný k použití pro výkonový stupeň třífázového měniče pro EC motory. Tento poloviční H můstek obsahuje přímo ve své konstrukci dva výkonové unipolární tranzistory MOSFET, budící obvody pro oba unipolární tranzistory, snímání proudu protékajícího unipolárními tranzistory, nadproudovou ochranu, tepelnou ochranu proti přehřátí a řídicí logiku, která ze vstupních signálů IN a INH generuje řídicí signály s implementací mrtvé zóny a spínání v proti fázi. Pro vlastní diagnostiku využívá poloviční H můstek výstup IS, který v normálním režimu slouží pro čtení velikosti proudu protékajícího přes výkonové unipolární tranzistory. V poruchovém režimu, tento výstup indikuje překročení maximální přípustné teploty nebo maximální přípustný proud a odstává výkonové unipolární tranzistory do doby, než dojde k uvedení hodnot do normálu.



Obrázek 2.4 Blokový diagram polovičního H můstku RTN8982TA (Infineon, 2013)

Výstup označený jako OUT, vyobrazený v blokovém diagramu na obrázku 2.4, může nabývat tří stavů, závislých na logických stavech vstupů INH a IN vyobrazených v tabulce 2.1 níže. Z tabulky je patrné, že měření proudu lze docílit pouze ve stavu, kdy výstup OUT nabývá stavu HSS aktivovaný. To však není žádný problém z hlediska toho, že v každém kroku šestikrokové lichoběžníkové komutace jsou vždy sepnuty dva tranzistory a z toho jeden spínající kladnou část napájecího napětí a druhý spínající zápornou (nulovou) část napájecího napětí. Při použití těchto tří polovičních H můstků pro výkonový stupeň se všechny tři výstupy IS propojí a vytvoří tak trvalou informaci o aktuálním proudu protékajícím EC motorem, tedy i výkonovými prvky.

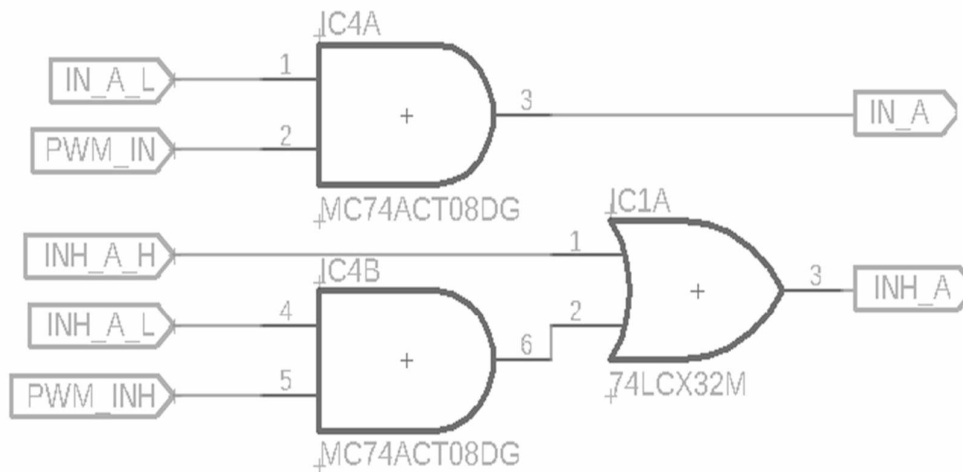
Tabulka 2.1 Pravdivostní tabulka polovičního H můstku RTN8982TA

Vstupy		Výstupy			Mód
INH	IN	HSS	LSS	IS	
0	X	OFF	OFF	0	Stand-by
1	0	OFF	ON	$I_{IS(offset)}$	LSS aktivovaný
1	1	ON	OFF	CS	HSS aktivovaný

2.2.5 Přizpůsobovací obvod

Předání řídicího signálu z mikropočítače do výkonových prvků je třeba přizpůsobit napěťové úrovni, obohatit řídicí signál o mrtvou zónu nebo o signál generující protifázi. Pro tyto případy vytváří mnoho výrobců integrované obvody, které zmíněné funkce umožňují. Jedním z nejznámějších výrobců, zabývajícím se řízením různých typů elektromotorů je společnost Texas Instruments. Ve své nabídce produktů má několik integrovaných obvodů, které jsou vhodné k použití v aplikaci řízení EC motorů. Jedním z nich je integrovaný obvod DRV8301. Tento obvod má mnoho funkcí potřebných k řízení výkonových unipolárních tranzistorů MOSFET.

Pro výkonové prvky RTN8982TA, je však tento obvod nepotřebný, a to z důvodu implementace mnoha potřebných prvků k řízení unipolárních tranzistorů přímo v konstrukci zmíněného polovičního H můstku. Pro úplnou funkci s mikropočítačem ATmega32u4 je potřeba zapojení doplnit o níže vyobrazený obvod s logickými hradly na obrázku 2.5.



Obrázek 2.5 Schéma přizpůsobovacího obvodu s logickými hradly

Zapojení vyobrazené na obrázku 2.5 slouží pro funkci s protifází a pro funkci bez protifáze s použitím mikropočítače ATmega32u4, a to z důvodu malého počtu výstupů s funkcí synchronizovaného PWM signálu. V pravdivostní tabulce 2.2 jsou vyobrazené všechny možné logické kombinace umožňující řízení ve zmíněných dvou režimech.

Tabulka 2.2 Pravdivostní tabulka přizpůsobovacího obvodu s logickými hradly

IN A L	INH A L	INH A H	IN A	INH A
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	PWM_INH
0	1	1	0	1
1	0	0	PWM_IN	0
1	0	1	PWM_IN	1
1	1	0	PWM_IN	PWM_INH
1	1	1	PWM_IN	1

2.3 ELEKTRO SCHÉMA TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

Schéma a celková konstrukce třífázového měniče je rozdělena na pět základních částí. Schéma třífázového měniče pro řízení EC motorů je vyobrazený na obrázku 1.1 v příloze B, obsahuje zapojení spínání napájecího napětí pro logické obvody, které je nutné externím spínačem aktivovat. Po aktivaci tohoto obvodu je přivedeno napájecí napětí na obvod napěťového zdroje Step-Down, který mění a stabilizuje napájecí napětí na napětí pro logické obvody činící 5 V. Společně s přítomností napětí pro logické obvody se aktivují zbylé obvody a s nimi mikropočítač ATmega32u4. Prvním úkonem po inicializaci mikropočítače ATmega32u4 je přivedení vysoké logické úrovně na svorku s označení PWR_CPU, která paralelně s externím tlačítkem udržuje obvod spínání napájecího napětí pro logické obvody aktivní a umožní tak uvolnit externí spínací tlačítko. Toto provedení umožní mikropočítači ATmega32u4 odpojit napájecí napětí, a to v případech, kdy je to nutné nebo žádané. Při odpojeném napájecím napětí pro logické obvody spotřebovává celá konstrukce třífázového měniče proud v řádu několika málo jednotek mikroampér a je tedy vhodná pro použití s bateriovým zdrojem energie. Konstrukce třífázového měniče je vybavena ICSP portem pro programování FLASH a EEPROM paměti mikropočítače ATmega32u4. Dalším komunikačním prvem je rozhraní USB umožňující debug a celkovou komunikaci s testovací aplikací třífázového měniče pro systém Windows. Aby bylo možné třífázový měnič ovládat nejen Windows aplikací, je zde navržený jeden analogový vstup a jeden digitální výstup, který je v následné aplikaci naprogramovaný na 1-Wire komunikaci

s programovatelnými RGB LED. Tyto RGB LED s označením WS2812 lze uspořádat do jednoduchého displeje pro zobrazení základních informací.

Pozici rotoru EC motoru lze získávat několika způsoby. Tato konstrukce ji umožňuje získávat dvěma způsoby, z nichž první je pomocí generovaného napětí s označením bEMF a druhý za pomoci HALL senzorů. Pro tyto metody jsou v konstrukci navrženy přizpůsobovací obvody.

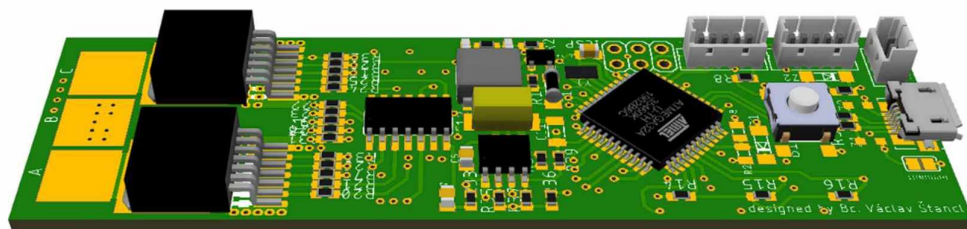
Poslední částí v konstrukci třífázového měniče jsou výkonové prvky s označením BTN8982TA, kterým předchází přizpůsobovací logický hradlový obvod bránící chybnému sepnutí výkonových prvků a zároveň podporující synchronní PWM spínání výkonových prvků BTN8982TA.

2.4 DESIGN DPS TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

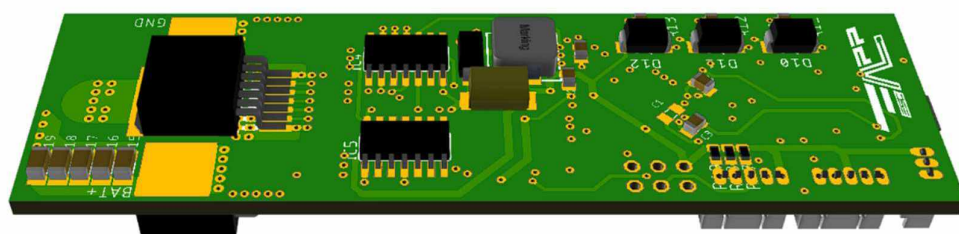
Konstrukce třífázového měniče je navržena tak, aby minimalizovala potřebný prostor pro montáž a zároveň umožňovala využít výkonový potenciál nabízený výkonovými obvody BTN8982TA. Pro splnění těchto předpokladů je konstrukce navržena ve čtyř vrstevném provedení DPS a osazena v obou vrchních vrstvách. Vodivý obrazec horní a dolní vrstvy je vyobrazený na obrázku 1.2 v příloze B.

2.5 VIZUALIZACE TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

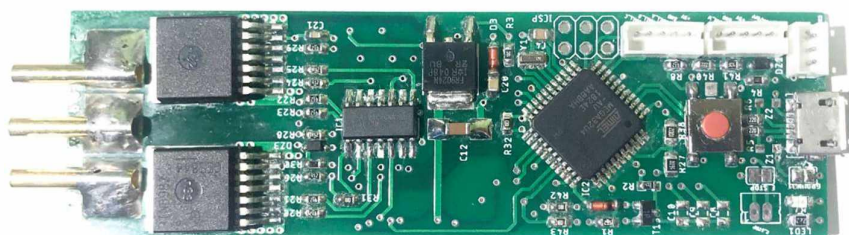
Pro lepší představu konstrukce třífázového měniče je na obrázku 2.6 vyobrazená vizualizace horní části konstrukce a na obrázku 2.7 vizualizace spodní část konstrukce. Výkonová část je umístěna v levé části obrázku 2.6 a obrázku 2.7, společně s pájecími ploškami A, B a C pro připojení silových vodičů EC motoru a pájecích plošek GND a BAT+ pro napájení. Logická část je situována do středu konstrukce. Konektory včetně USB jsou umístěny v pravé části obrázku 2.6 a obrázku 2.7. Reálná konstrukce je vyobrazena na obrázku 2.8.



Obrázek 2.6 Vizualizace třífázového měniče (TOP)



Obrázek 2.7 Vizualizace třífázového měniče (BOTTOM)

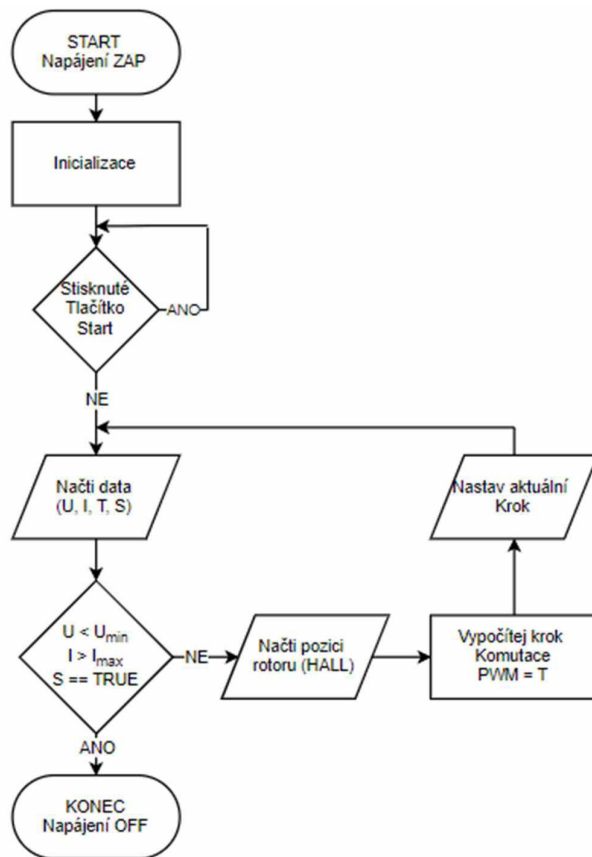


Obrázek 2.8 Fotografie reálné konstrukce třífázového měniče

2.6 ŘÍDICÍ ALGORITMUS TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

Řídicí algoritmus je primárně navržený k obsluze výkonových prvků, což musí být v každé situaci upřednostňováno před ostatními instrukcemi z důvodu přesného a hladkého řízení EC motoru. Každé zpoždění změny komutace se projevuje nejen nepravidelným chodem EC motoru, ale i zvýšením tepelných ztrát na výkonových prvcích, což by mohlo mít v důsledku za příčinu až destrukci výkonových prvků. Na obrázku 2.9 je vyobrazený vývojový diagram firmwaru třífázového měniče.

Celá konstrukce je neaktivní až do chvíle, kdy je stisknuté tlačítko, které aktivuje napájecí napětí. Následuje inicializace, při které se nadefinují vstupy, výstupy a nastaví periférie. Po dokončení inicializace přechází mikroprocesor do části programu, kde kontroluje, zda je spouštěcí tlačítko puštěné, a to z důvodu, aby mohl samotný mikroprocesor převzít kontrolu nad obvodem, který spravuje spínání napájecího napětí. Jakmile je tlačítko uvolněné, mikroprocesor má nad celým obvodem kontrolu a přechází k hlavní části programu. Nejprve načte potřebná data, jako je velikost napájecího napětí, proud protékající výkonovými prvky koncového stupně, chtěný výkon a stav tlačítka. Na základě těchto dat rozhodne, zda je vše v akceptovatelných mezích a lze pokračovat v programu. Pokud ne, mikroprocesor deaktivuje obvod spravující spínání napájecího napětí, celá konstrukce se vypne a program skončí. Pokud ano, mikroprocesor načte aktuální pozici rotoru EC motoru. Z načtené pozice rotoru EC motoru vypočítá následující krok komutace a přenastaví koncový stupeň s požadovaným výkonem. V této části mikroprocesor znovu načítá data a tato část programu se opakuje.



Obrázek 2.9 Vývojový diagram firmwaru třífázového měniče

2.7 DOSAŽENÉ PARAMETRY

Ve srovnání s komerčně dostupnými třífázovými měniči pro BLDC motory dosahuje navržená konstrukce lepších parametrů. Napájecí napětí navržené konstrukce je omezeno na 40 VDC, které je zároveň maximální přípustné napájecí napětí použitého výkonového členu BTN8982TA. Konstrukce DPS je šířkou a počtem vodičů navržená tak, aby bez většího oteplení převáděla kontinuální proud výkonovým stupněm 25 A. V tabulce 2.3 jsou vyobrazeny další dosažené parametry a porovnání vlastní konstrukce s komerčně dostupnými třífázovými měniči.

Tabulka 2.3 Srovnání s dosaženými parametry

	Třífázový měnič BLDC15	BLDC Shield s TLE9879	Vlastní konstrukce
Napájecí napětí	20–60 VDC	5,5–28 VDC	8–40 VDC
Jmenovitý proud	15 A	10 A	25 A
Špičkový proud	30 A	30 A	50 A
Nosný kmitočet	20 kHz	20 kHz	20 kHz
Analogové vstupy	1	1	1
Digitální vstupy	2	5	1
Rozměry	157 × 34 × 121 mm	70 × 20 × 55 mm	30 × 15 × 100 mm

2.8 VYUŽITÍ TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

Aplikace s EC motory se v této době těší velké popularitě. V malých aplikacích do jednotek kilowatt jmenovitého výkonu, jako je například bateriové nářadí, elektrokola, elektrické zahradní prostředky, jsou používány EC motory typu BLDC pro svojí jednodušší konstrukci a nižší cenu. Pro náročnější aplikace v řádech několika desítek kilowatt jmenovitého výkonu, jako jsou například elektroautomobily, elektromotocykly, ale i průmyslové aplikace, jsou používány EC motory typu PMSM, které vynikají hladkým a tichým chodem, avšak mají vyšší pořizovací cenu.

2.8.1 Konkrétní využití třífázového měniče

Popisovaný třífázový měnič našel využití v několika reálných aplikacích. Jednou z prvních aplikací byla implementace třífázového měniče pro BLDC motor přímo do konstrukce zahradního kolečka, a to včetně bateriového managementu. Koncept zahradního kolečka s inteligentním řízením včetně třífázového měniče a bateriového managementu je vyobrazený na obrázku 2.10.



Obrázek 2.10 Vizualizace elektrického zahradního kolečka

Druhou aplikací, v níž byl daný třífázový měnič aplikován, je osobní mikrodoprava nazývaná také jako „Last-mile“. Konkrétně se jedná o implementaci do elektrického longboardu vyobrazeném na obrázku 2.11. Stejně jako v předchozím příkladě se jedná o řízení EC motoru typu BLDC s jmenovitým výkonem do 2 kW.



Obrázek 2.11 Vizualizace elektrického longboardu

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉ KONSTRUKCE TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE

Nedílnou součástí návrhu a realizace konstrukce třífázového měniče je jeho testování. Tento krok potvrdí, v jaké míře navržená konstrukce splňuje předpoklady stanovené na úplném začátku. Dále odhalí slabiny a nedostatky, které mohou být následně odstraněny.

Pro testovací pracoviště byla zvolena kombinace poháněného BLDC motoru s označením BL070.240 a stejnosměrného kartáčového motoru s označením EC100.24E. Na obrázku 3.1 je vyobrazený BLDC motor, který byl napájený přímo z navržené konstrukce třífázového měniče a stejnosměrný kartáčový motor sloužil jako zátěž vyvíjecí brzdny účinek za pomoci vinutí nakrátko. Parametry BLDC motoru vyobrazeného na obrázku 3.1 jsou lichoběžníkový průběh indukovaného napětí, jmenovitý výkon 220 W, jmenovité napájecí napětí 24 VDC a pracovní otáčky do 3000 ot/min.

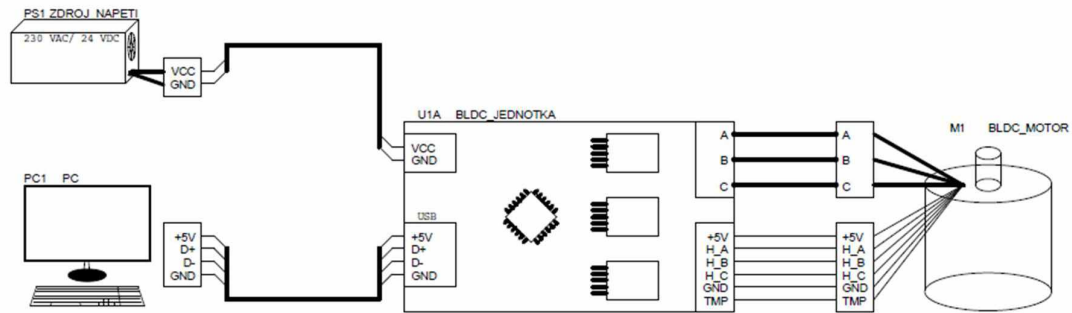


Obrázek 3.1 BLDC motor BL070.240

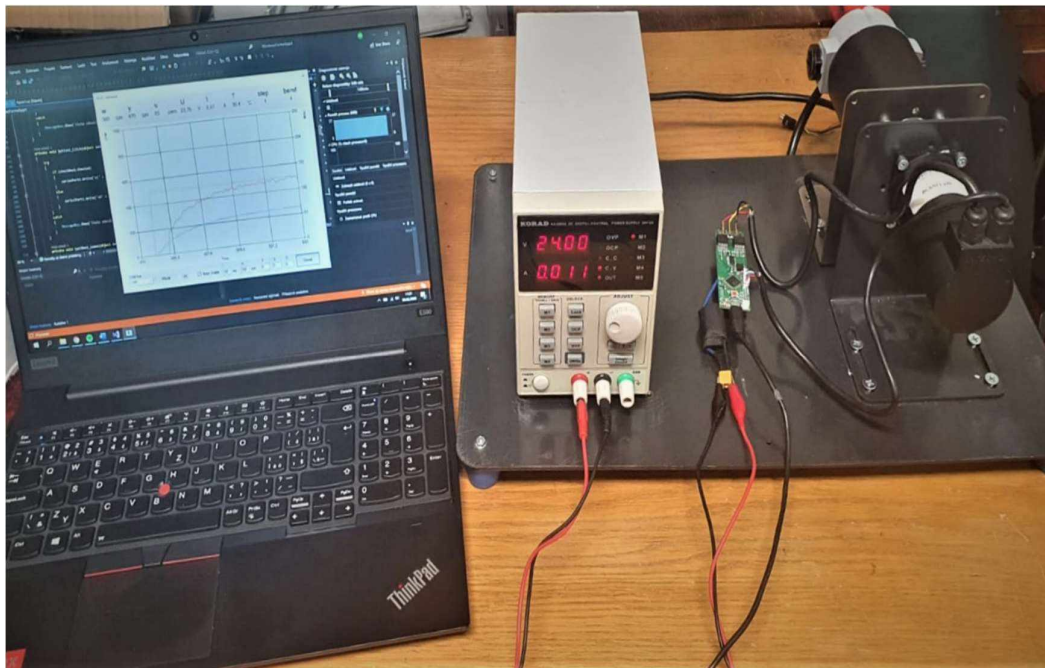
3.2 BLOKOVÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO TESTOVÁNÍ

Zapojení měřicí soustavy je realizováno podle blokového schématu vyobrazeného na obrázku 3.2. Třífázový měnič, který je na schématu označený jako U1 je napájený

z laboratorního zdroje označeného jako PS1, který je nastavený na výstupní napětí 24 VDC s maximálním proudovým omezením 5 A. BLDC motor označený jako M1 je za pomoci dvou konektorů připojený na odpovídající svorky třífázového měniče. Pro možnost sledování a nastavování dat třífázového měniče je přes rozhraní USB připojen osobní počítač s operačním systémem Windows a označením PC1. Reálné zapojení je vyobrazeno na obrázku 3.3.



Obrázek 3.2 Blokové schéma zapojení pro testování

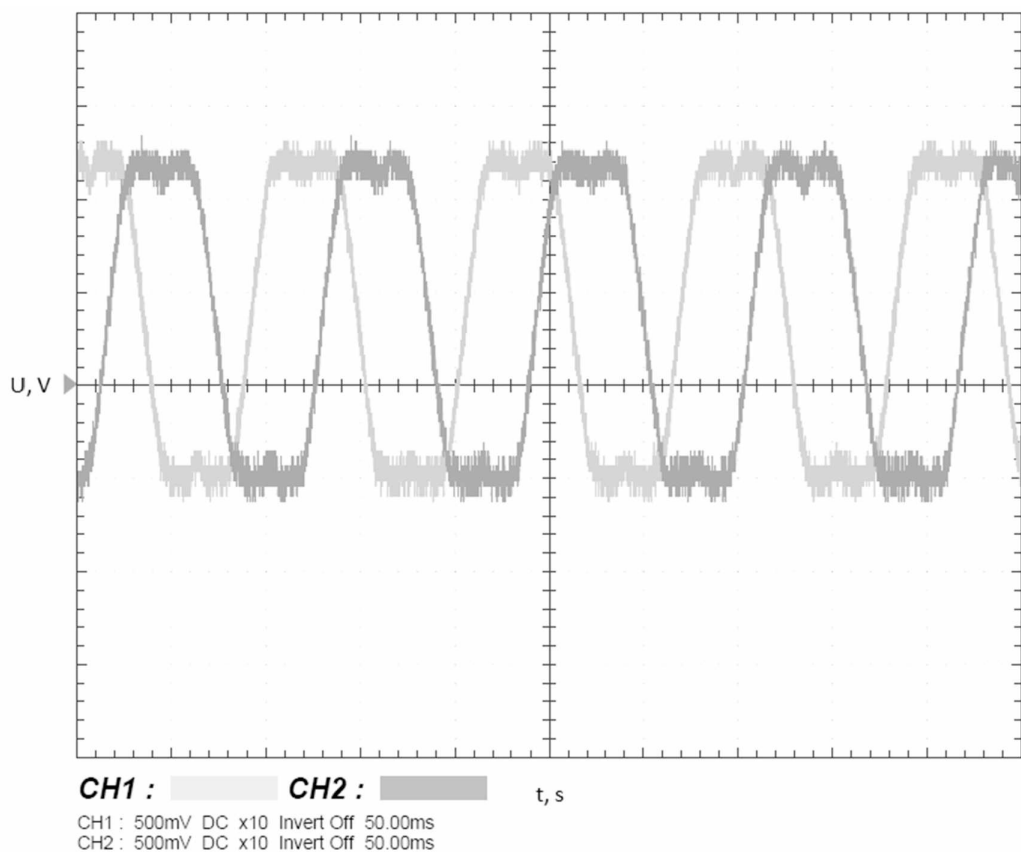


Obrázek 3.3 Fotografie reálného zapojení pro testování

3.3 MĚŘENÍ ZÁKLADNÍCH ELEKTRICKÝCH VELIČIN A PRŮBĚHŮ

Pro ověření předpokladů a kvality zpracování BLDC motoru bylo provedeno měření zpětného indukovaného napětí bEMF a Halových snímačů implementovaných do konstrukce motoru.

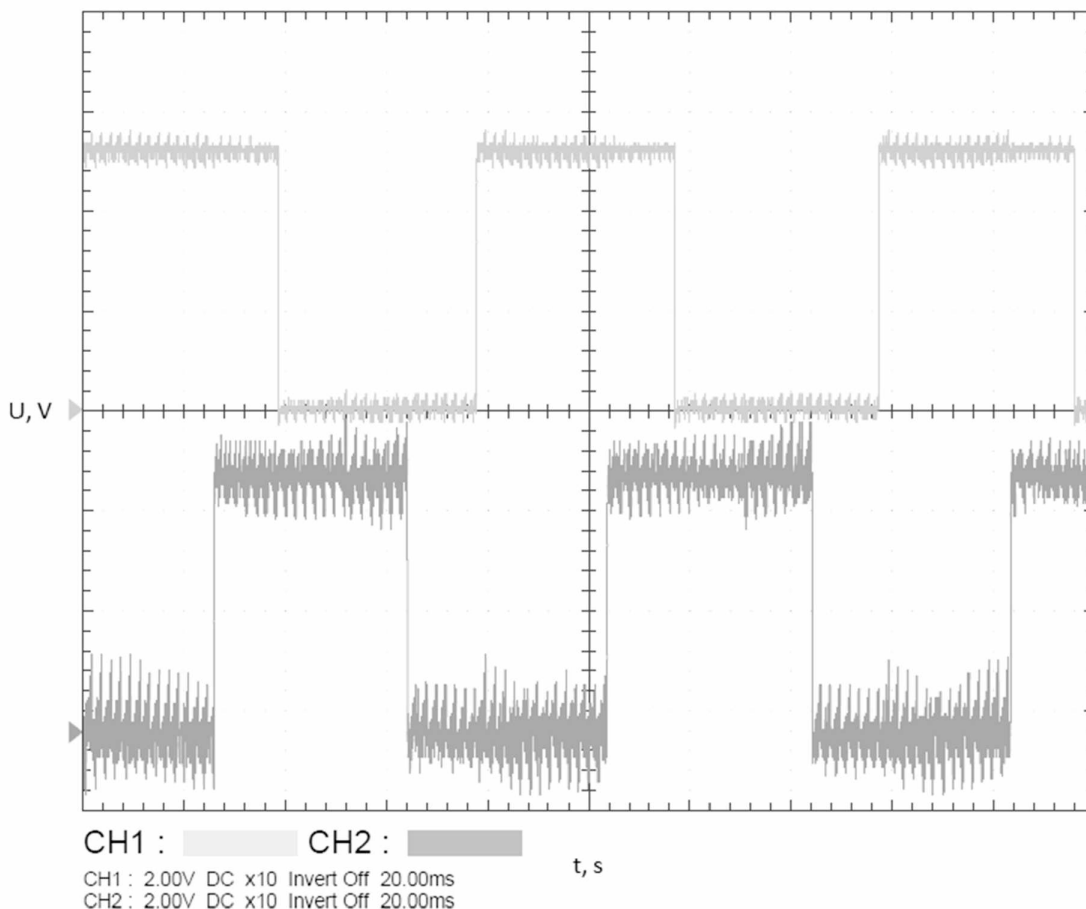
Na obrázku 3.4 jsou vyobrazeny průběhy zpětného indukovaného napětí fází B a C BLDC motoru měřené při 500 ot/min, kde je vidět, že se opravdu jedná o lichoběžníkový průběh, a tedy odpovídá poznatkům z teorie o BLDC motorech.



Obrázek 3.4 Zpětné indukované napětí bEMF fáze B a C

Dalším důležitým měřením pro správnou funkci třífázového měniče je přesný a čistý průběh Hallových snímačů vytvářejících zpětnou vazbu a informaci o pozici rotoru BLDC motoru. Průběhy Hallových snímačů fází B a C jsou vyobrazeny na obrázku 3.5, kde je možné vidět čistotu průběhu jednotlivých snímačů, avšak je zde také vidět zarušení, které je

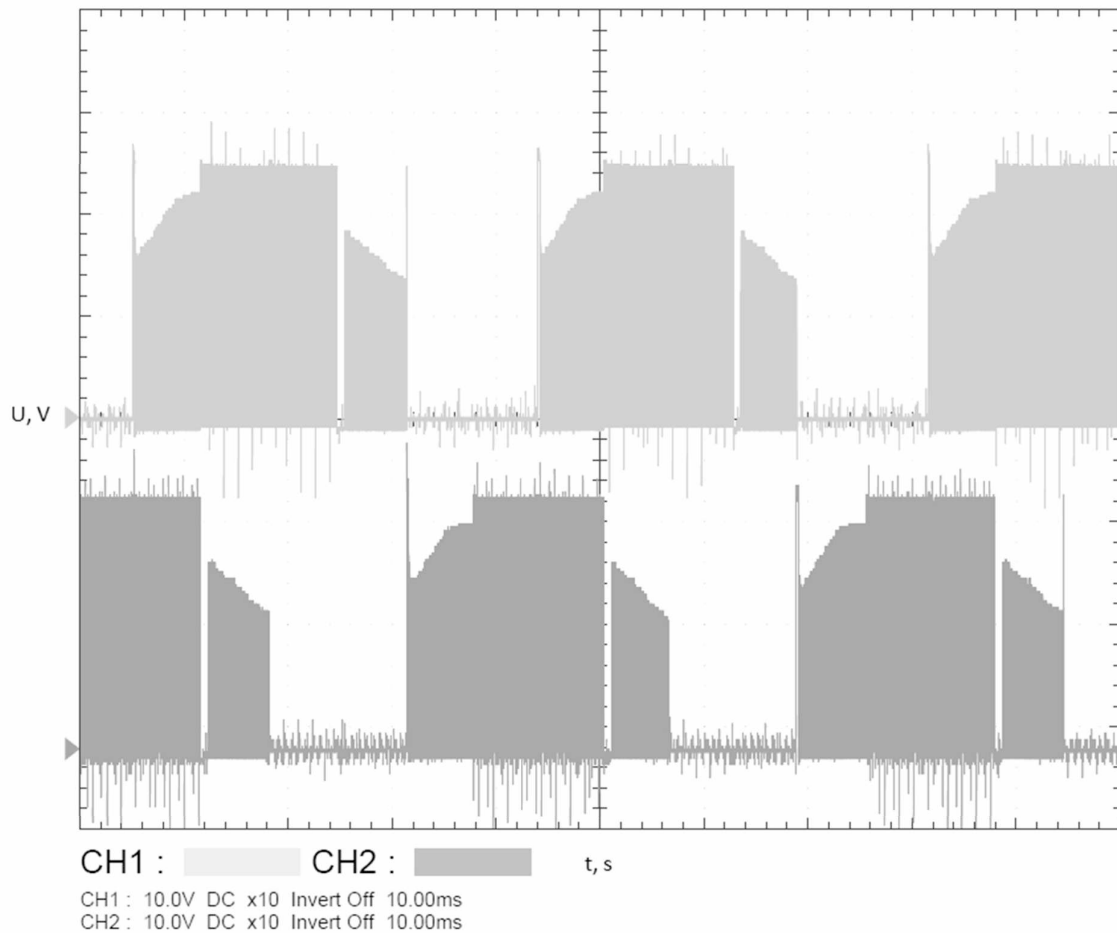
způsobené naindukovaným napětím ze silových vodičů vedoucích v blízké těsnosti vedle vodičů přenášejících informaci o zpětné vazbě. Toto zarušení nepřesahuje logickou rozhodovací úroveň mikropočítače, a je tedy možné takovýto signál použít pro informaci o pozici rotoru BLDC motoru.



Obrázek 3.5 Průběhy signálu Hallových senzorů fáze B a C

Předchozí měření dokázalo teoretické předpoklady o EC motoru typu BLDC. Lze tedy přistoupit k propojení BLDC motoru s třífázovým měničem a provést další měření. Po uvedení BLDC motoru a třífázového měniče do funkce lze na výstupních svorkách A, B a C měřit průběh spínaného napětí vyobrazeného na obrázku 3.6, které potvrzuje že se jedná o lichoběžníkový průběh řízení komutace, jak je tomu v teoretické části výše. V případě, kdy by se lichoběžníkový signál přibližoval tvarem k obdélníkovému signálu, znamenalo by to,

že se jedná o spínání výkonových prvků bez protifáze, a tedy bez eliminace zpětného indukovaného napětí.



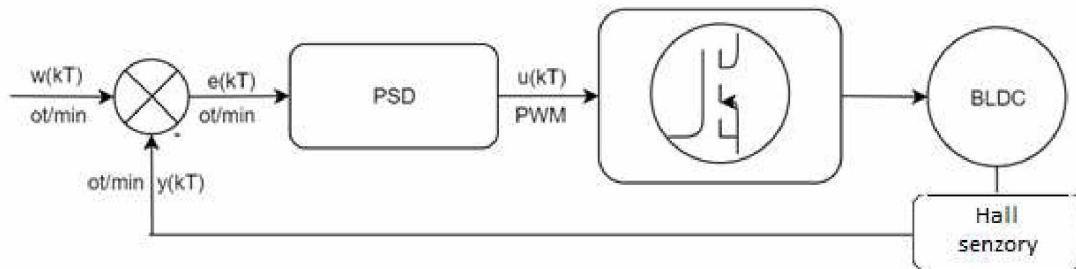
Obrázek 3.6 Lichoběžníkový průběh spínaného napětí fáze B a C

3.4 IMPLEMENTACE PSD REGULÁTORU

Pro další měření se zátěží, kde byla vyžadována relativní stabilita stanovených otáček, byla nutná implementace PSD regulátoru. Ze zpětné vazby BLDC motoru lze získávat výpočtem velice přesnou informaci o rychlosti otáčení rotoru BLDC motoru a použít ji tak jako zpětnou vazbu pro PSD regulátor, který udržuje stanovené otáčky. Zmíněný PSD regulátor nevyžaduje tak velký výpočetní výkon a je tedy součástí firmwaru mikropočítače.

3.4.1 PSD regulátor otáček

PSD regulátor je aplikovaný v zapojení vyobrazeném na obrázku 3.7. Řídící veličinou w jsou požadované otáčky za minutu rotoru BLDC motoru, které lze nastavovat. Výstupní a zároveň zpětnovazební veličinou y jsou taktéž otáčky za minutu získávané ze zpětné vazby BLDC motoru. Akční zásah u je vypočítán PSD regulátorem na základě parametrů regulátoru a chyby e počítané z rozdílu řídicí veličiny w a výstupní veličiny y .



Obrázek 3.7 Blokové schéma URO regulátoru otáček s PSD regulátorem

Identifikace parametru PSD regulátoru byla provedena za pomoci metody Zieglera-Nicholse s nastavením kritických hodnot. Metoda spočívá v uvedení URO na hranu stability, kdy systém kmitá ustálenými kmity. Tyto kmity jsou způsobené nastavením proporční složky na hodnotu označovanou jako kritické zesílení K_u . Perioda, se kterou systém kmitá, je označena jako kritická perioda T_u . Kritické hodnoty K_u a T_u lze následně použít k výpočtu zbývajících složek PSD regulátoru, a to dosazením do vzorců uvedených v Ziegler-Nicholsově tabulce vyobrazené na obrázku 3.8.

Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.50K_u$	—	—
PI	$0.45K_u$	$0.54K_u/T_u$	—
PID	$0.60K_u$	$1.2K_u/T_u$	$3K_uT_u/40$

Obrázek 3.8 Nastavení parametrů regulátoru pomocí Ziegler-Nichols

Podle výše uvedeného postupu nastavení parametrů PSD regulátoru, jsou výsledné parametry pro regulovaný systém s danou zátěží vyobrazené v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1 Výsledné parametry PSD regulátoru

Typ	P	PS	PSD
K _u	1	1	1
T _u	1,2	1,2	1,2
K _p	0,5	0,45	0,6
K _s		0,45	1
K _d			0,09

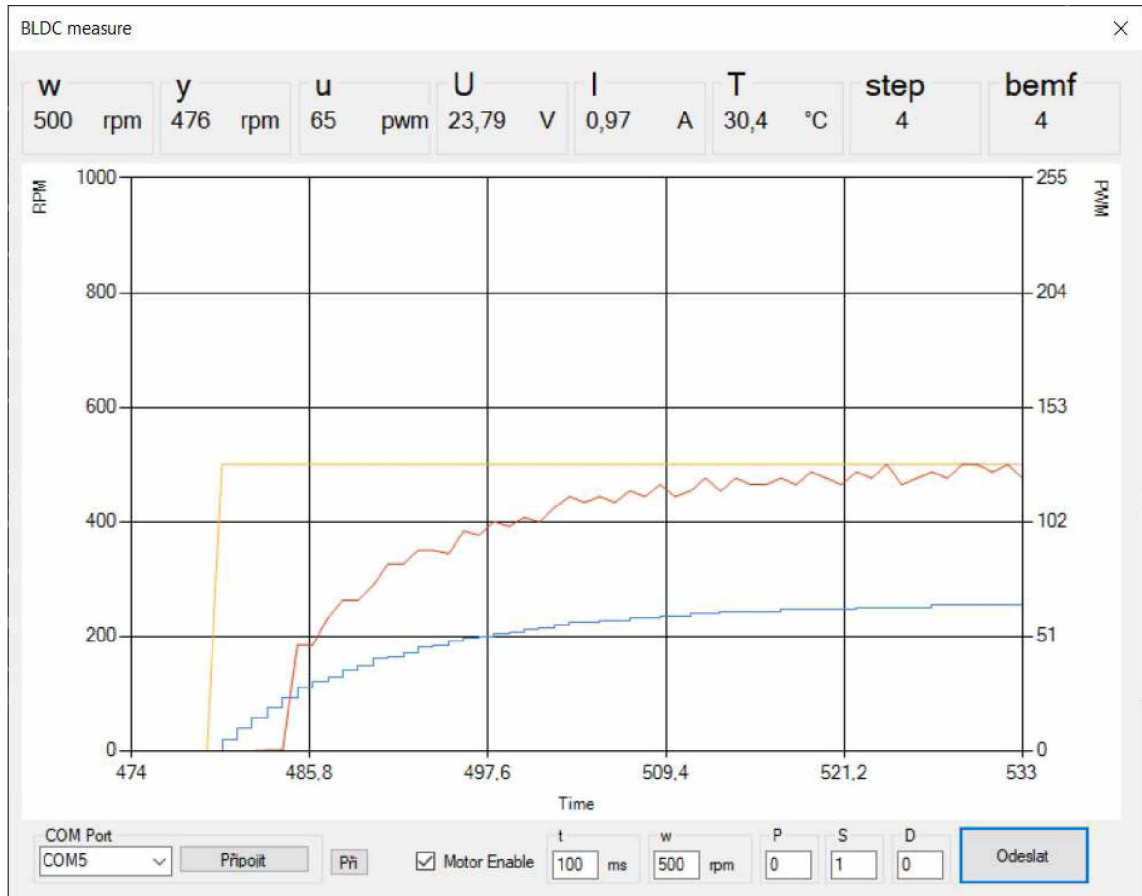
3.5 TESTOVACÍ APLIKACE TŘÍFÁZOVÉHO MĚNIČE PRO SYSTÉM WINDOWS

Z důvodu jednoduchého testování a nastavování parametrů třífázového měniče byla naprogramována aplikace v jazyce C# pro operační systém Windows. Tato aplikace umožňuje v reálném čase sledovat průběhy jednotlivých hodnot dat poskytovaných třífázovým měničem, jako je například napájecí napětí, proud protékající vinutím motoru, teplota, pozice rotoru z Hallových senzorů, pozice rotoru z bEMF, akční zásah, požadované otáčky a otáčky motoru. Data jsou odesílána v řetězcích se vzorkovací frekvencí 10 Hz. Jako komunikační most je využito rozhraní USB, na kterém je realizována virtuální sériová linka UART.

3.5.1 Vizualizace testovací aplikace

Měřicí aplikace pro operační systém Windows se skládá ze tří částí a je vyobrazena na obrázku 3.9. V první horní části se nacházejí přijímaná data odesílaná třífázovým měničem. Ve druhé části situované na střed vizuálu aplikace je grafické zobrazování dat w – řídicí veličina, y – výstupní veličina a u – akční zásah v reálném čase se vzorkovací frekvencí 10 Hz. Řídicí veličina w je vyobrazena ve žluté barvě, výstupní veličina y je vyobrazena v červené barvě a akční zásah u je vyobrazený v modré barvě. Poslední dolní část vizualizace aplikace je určena pro nastavování velikosti řídicí veličiny w , periody vzorkování t a všech

tří parametrů PSD regulátoru. Následným stiskem tlačítka „Odeslat“ se nastavené parametry odešlou do třífázového měniče, který je v reálném čase vyhodnotí a aplikuje.

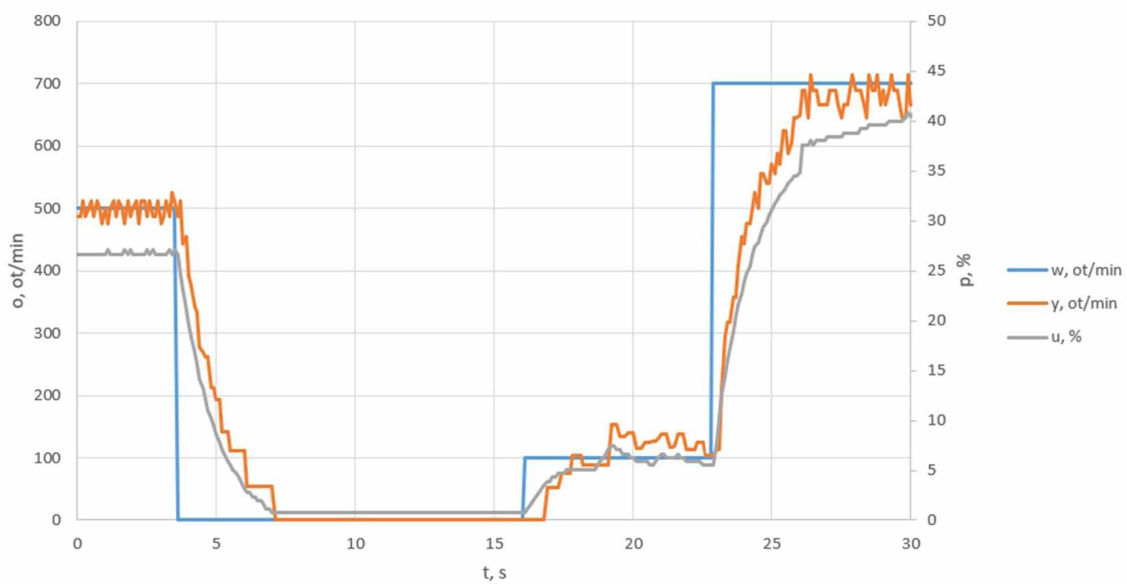


Obrázek 3.9 Vizual testovací aplikace pro třífázový měnič

3.5.2 Sledovaná data

Na obrázku 3.10 je vyobrazený graf s naměřenými daty třífázového měniče s použitím PSD regulátoru. Jedná se o skokové změny řídicí veličiny w . V této aplikaci se jedná o regulovaný systém se zátěží bez integračního charakteru.

Průběhy veličin regulačního obvodu s regulátorem PSD



Obrázek 3.10 Průběhy veličin obvodu s regulátorem PSD

4 ZÁVĚR

Podstatou práce bylo uvedení do obecné problematiky řízení EC motorů, konstrukce vlastního třífázového měniče pro EC motor typu BLDC a jeho měření za pomoci navržené aplikace pro operační systém Windows.

V první teoretické části byla provedena stručná rešerše komerčně dostupných třífázových měničů pro EC motory typu BLDC. Ukázalo se, že trh nabízí jen malé množství těchto třífázových měničů, které disponují malými výkony a nehodícími se rozměry. Z tohoto důvodu, bylo cílem navržení vlastní konstrukce třífázového měniče s potřebnými parametry a rozměry, které by umožnili implementaci do výše zmíněných aplikací.

Aby bylo možné třífázový měnič navrhnout a zkonstruovat, bylo nejprve nutné se seznámit se samotnou konstrukcí EC motorů. V části popisující konstrukci EC motoru byla popsána podrobná konstrukce statorového vnutí, rotoru s permanentními magnety a zapojení EC motoru včetně matematického modelu. Dále byla popsána nutnost informace o poloze rotoru a její získávání. Kapitola byla zakončena popisem dvou možností řízení komutace EC motorů.

Druhá část této diplomové práce se již zaměřovala na návrh samotné konstrukce třífázového měniče pro EC motory typu BLDC. Nejprve byly popsány jednotlivé bloky, ze kterých se třífázový měnič skládá. Následně byla popsána funkce navrženého schématu, zkonstruován design DPS v odpovídajících rozměrech, vyobrazena vizualizace navržené konstrukce s obrázkem reálné konstrukce a v poslední části vypsány dosažené parametry. Většina dosažených parametrů převyšuje parametry komerčně dostupných třífázových měničů. Dosažené parametry splňují žádané parametry na popsáných aplikacích.

Třetí a poslední část se zaměřovala na testování a měření realizované konstrukce. Pro toto testování a měření byla vyhotovena aplikace pro operační systém Windows, která nabízela sledování a nastavování parametrů implementovaného PSD regulátoru třífázového měniče v reálném čase. Pro testování vzniklo měřicí stanoviště s motorovou zátěží, na kterém bylo měření realizováno.

LITERATURA

- ELECTRONIC TUTORIALS. 2013. *Hall effect sensor* [online] AspenCore, 2020 [cit. 10.8.2020]. Dostupné z: <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- INFINEON, 2013. *BTN8982TA High Current PN Half Bridge* [online] [cit. 10.8.2020]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BTN8982TA-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433fa9412f013fbe32289b7c17
- MOANES, M. 2017. *PMSM vs. BLDC BEMF Waveforms* [online] Berlin: ResearchGate GmbH, 2008 [cit. 10.8.2020]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/post/what_is_the_difference_between_stator_windings_of_BLDC_and_PMSM_motors
- TEXAS INSTRUMENTS. 2014. *DRV8308 Brushless DC Motor Controller* [online] [cit. 10.8.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv8308.pdf>
- TEXAS INSTRUMENTS. 2018. *DRV5055 Ratiometric Linear Hall Effect Sensor* [online] [cit. 10.8.2020]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/drv5055.pdf?&ts=1589102429620>

PŘÍLOHY

A – CD

B – VÝROBNÍ DOKUMENTACE

Příloha k diplomové práci
Elektronická řídicí jednotka BLDC motoru
Bc. Václav Štancl

CD

Obsah

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF.
- 2 Úplné zdrojové kódy aplikací.
- 3 Úplná schémata.
- 4 Vodivé obrazce DPS.

Příloha k diplomové práci

Elektronická řídicí jednotka BLDC motoru

Bc. Václav Štancl

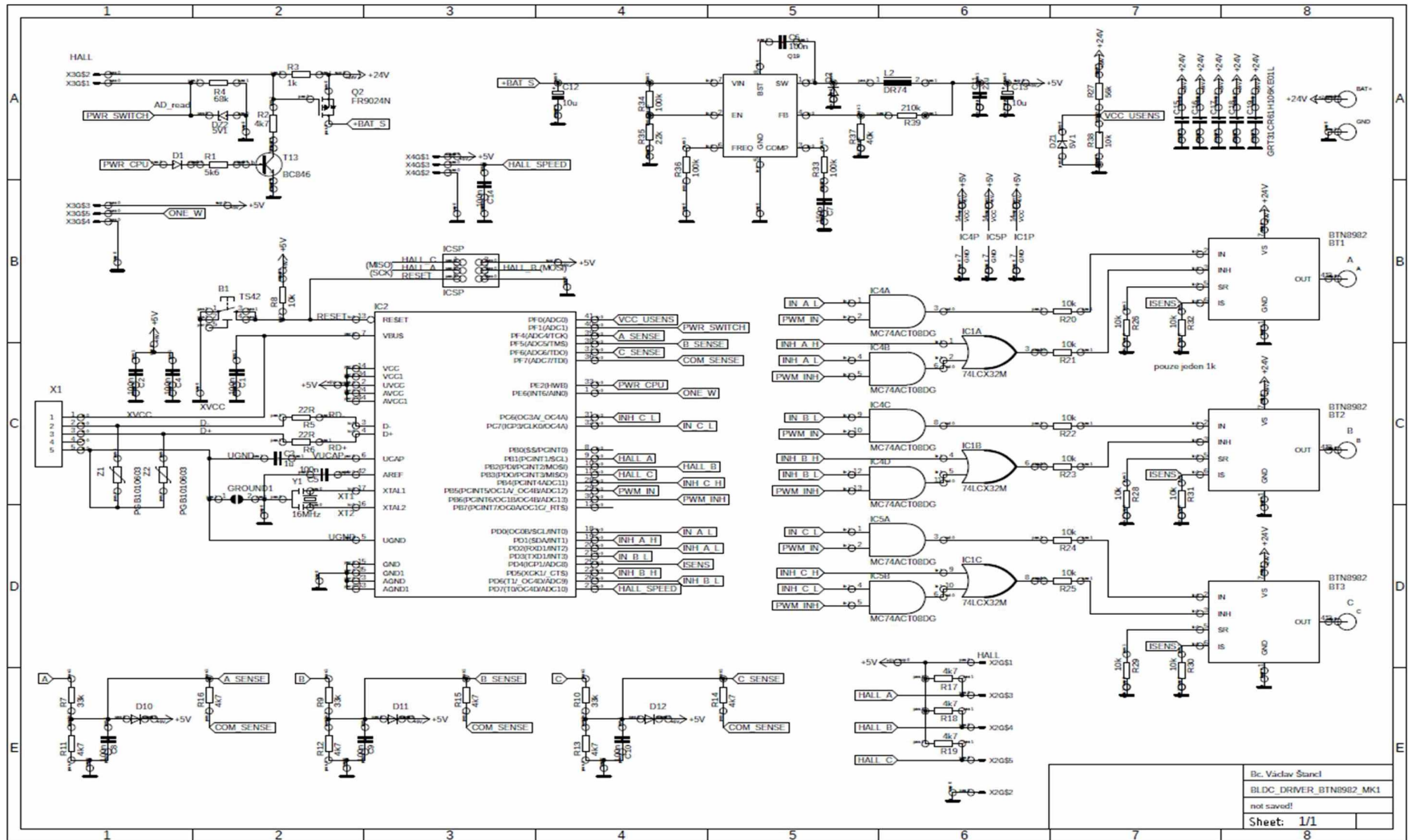
VÝROBNÍ DOKUMENTACE

Obsah

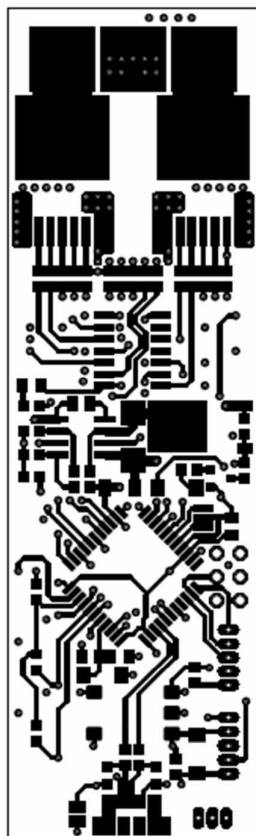
Seznam ilustrací	2
------------------------	---

SEZNAM ILUSTRACÍ

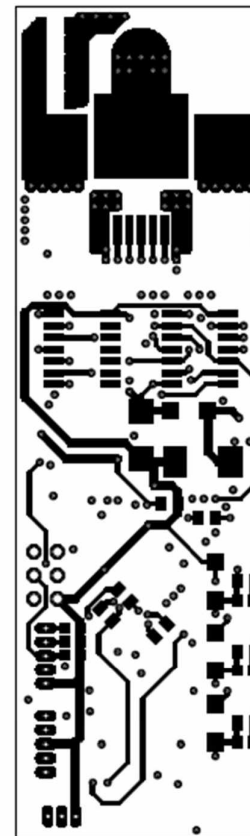
Obrázek 1.1 Schéma zapojení třífázového měniče BLDC driveru BTN8982	3
Obrázek 1.2 Vodivý obrazec DPS třífázového měniče (horní a dolní strana)	16
Obrázek 1.3 Osazovací plán DPS třífázového měniče (horní a dolní strana)	18



Obrázek 1.1 Schéma zapojení třífázového měniče BLDC driveru BTN8982

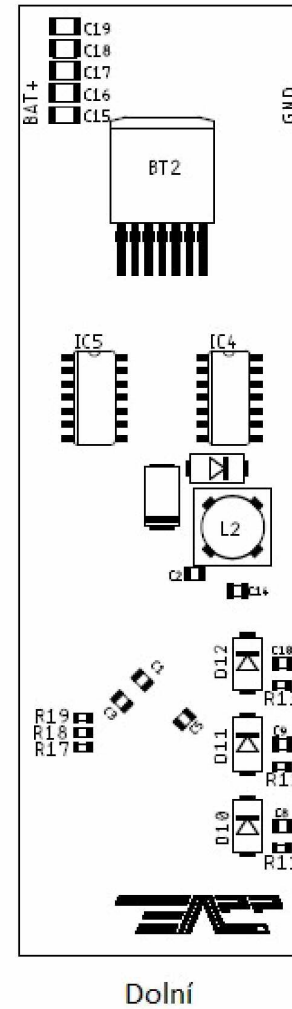
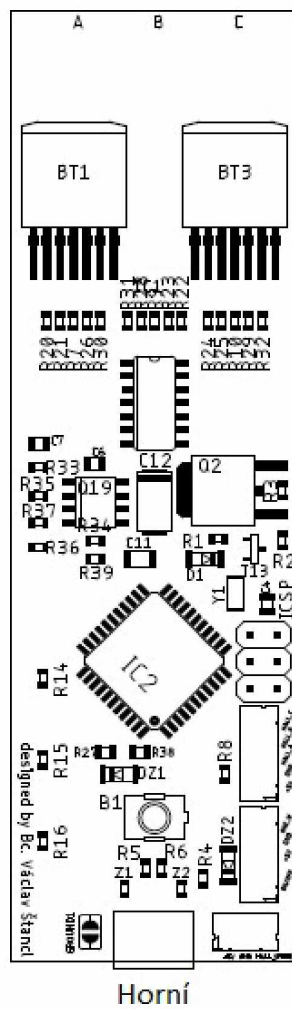


Horní



Dolní

Obrázek 1.2 Vodivý obrazec DPS třífázového měniče (horní a dolní strana)



Obrázek 1.3 Osazovací plán DPS třífázového měniče (horní a dolní strana)