



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

POHON EC MOTORU MALÉHO VÝKONU

LOW POWER BLDC ELECTRIC DRIVE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Štajner

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. David Štajner

ID: 125660

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Pohon EC motoru malého výkonu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Student realizuje model EC motoru v programu Matlab/Simulink
2. Student navrhne a realizuje funkční vzorek elektroniky EC motoru.
3. Ověření funkčnosti a měření na realizovaném prototypu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] PATOČKA, M. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. odborné knihy. odborné knihy. Brno: VUT IUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003-6.

[2] SKALICKÝ, J. Elektrické servopohony, Skriptum, Brno 2001, ISBN: 80-214-1978-4 .

Termín zadání: 6.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: Ing. Ivo Pazdera, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je přiblížit čtenáři konstrukci a řízení EC motoru. Na základě znalostí realizovat model EC motoru se snímáním polohy pomocí Halloových senzorů v programu Matlab Simulink. Model se má svými vlastnostmi co nejvíce přibližovat chování reálného EC motoru. Dílčím úkolem bylo na základě stanovených požadavků vybrat EC motor, zadat jeho katalogové hodnoty do navrženého modelu a srovnat výstupní parametry modelu s katalogovými. Dále byl proveden návrh skutečného řízení EC motoru, který má mít minimální rozměry. Toto řízení bylo sestaveno a byla provedena oteplovací zkouška při dané zátěži.

Klíčová slova

EC motor; BLDC motor; Hallův senzor; Šestikroková komutace; Matlab Simulink; Řízení; Maxon;

Abstract

The aim of this diploma thesis is to introduce a construction and controlling of the EC motor. On a base of knowledge make up a EC motor model in Matlab Simulink, with a position scanning providing by Hall probe. The EC motor model should be with its behavior close to the real EC motor as much as possible. There were a given requirements on the motor. On the base of those requirements was chosen a real EC motor. Its catalog values were put in the EC motor model in Matlab and the results were compared with real data. Next task was to design a real controlling driver of EC motor, which should has a minimal size. This driver was constructed and thermal test was made a on given load.

Keywords

EC motor; BLDC motor; Hall sensor; Six-step commutation; Matlab Simulink; Driver; Maxon;

Bibliografická citace

ŠTAJNER, D. Pohon EC motoru malého výkonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ivo Pazdera, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Pohon EC motoru malého výkonu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce, jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne **24. května 2017**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Ivu Pazderovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji panu Ing. Daliboru Červinkovi, Ph.D. za odbornou pomoc při návrhu a realizaci měniče pro EC motor.

V Brně dne **24. května 2017**

.....
podpis autora

Obsah

1	Úvod	9
1.1	Konstrukce elektronicky komutovaného motoru	9
1.2	Princip činnosti BLDC motoru	13
1.3	Snímání polohy pomocí Hallových senzorů	14
1.4	Six step komutace	15
2	Model EC motoru v matlab simulink	16
2.1	EC motor	16
2.2	Tranzistorový měnič	17
2.3	Mechanika	18
2.3.1	Výpočet momentu	19
2.4	Výpočet indukovaného napětí	21
2.5	Snímání polohy rotoru pomocí Hallových senzorů	25
2.6	Řízení	27
2.6.1	Ověření správné funkce řízení	29
2.7	Srovnání katalogových hodnot EC motoru s modelem	31
3	Návrh a realizace řídicí elektroniky EC motoru	33
3.1	Výběr EC motoru	33
3.2	Výběr IO pro řízení EC motoru	33
3.3	Návrh DPS	34
3.4	Testování driveru pro EC motor	36
3.5	Průběh veličin v reálném EC motoru	39
4	Závěr	42
	Literatura	44
	Seznam symbolů a zkratek	45
	Přílohy	46

Seznam obrázků

Obr. 1:Konstrukce EC motoru [1]	9
Obr. 2: Průběhy indukovaných napětí [2]	10
Obr. 3:Umístění permanentních magnetů na rotoru [9].....	11
Obr. 4: a)Příčný řez EC motoru, b)průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, c)průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, d)schematické zapojení vinutí [9].....	14
Obr. 5: Typické zapojení Hallova senzoru [5]	15
Obr. 6: Výstupní signály z Hallových senzorů v závislosti na poloze rotoru, [6] upraveno.....	15
Obr. 7: Blokové schéma modelu EC motoru	16
Obr. 8: Motor	17
Obr. 9: Měnič	18
Obr. 10:Mechanika.....	19
Obr. 11: Výpočet momentu.....	20
Obr. 12: Detail průběhu momentu v EC motoru	21
Obr. 13: Výpočet indukovaného napětí- zjednodušeno	22
Obr. 14: Indukované napětí zjednodušeného zapojení.....	22
Obr. 15: Výpočet indukovaného napětí	23
Obr. 16: Vznik indukovaného napětí	24
Obr. 17: Indukované napětí reálného EC motoru	24
Obr. 18: Generování signálů z Hallových senzorů na základě úhlu natočení rotoru	25
Obr. 19: Limit úhlu natočení rotoru.....	25
Obr. 20: Logika Hallova senzoru B	26
Obr. 21: Logika Hallova senzoru A a C	26
Obr. 22: Úseky snímání Hallových senzorů	27
Obr. 23:Tříbitové stavy polohy rotoru[7].....	28
Obr. 24: Stav Hallových senzorů, spínání tranzistorů ve větvích, indukované napětí	30
Obr. 25: Průběh otáček EC motoru.....	31
Obr. 26:Průběh momentu EC motoru.....	32
Obr. 27:Průběh otáček EC motoru - detail.....	32
Obr. 28: Průběh momentu EC motoru - detail	32
Obr. 29: Schéma zapojení.....	35
Obr. 30: DPS strana TOP	35
Obr. 31: DPS strana BOTTOM.....	35
Obr. 32: DPS osazovací plán.....	36

Obr. 33: Testovací pracoviště	37
Obr. 34: Detail spojení hřídelí	38
Obr. 35: Průběh signálu z Hallových senzorů	39
Obr. 36: Průběh napětí na snímacím bočníku	39
Obr. 37: Průběh fázového proudu.....	40
Obr. 38: Průběh fázového proudu - simulace.....	40
Obr. 39: Indukované napětí použitého EC motoru.....	41
Obr. 40: Testovací vzorek řízení EC motoru	41

Seznam tabulek

Tab. 1: Charakteristické hodnoty magnetických materiálů[3].....	11
Tab. 2: Teplotní koeficienty a maximální provozní teplota jednotlivých druhů permanentních magnetů[3],[4]	13
Tab. 3: Úseky snímání Hallových senzorů	27
Tab. 4: Komutační tabulka pro kladný směr otáčení (pravý chod)	28
Tab. 5: Komutační tabulka pro záporný směr otáčení (levý chod).....	29
Tab. 6: Parametry motoru EC-max 16 typ 283835.....	31
Tab. 7: Seznam použitých přístrojů při testování driveru EC motoru.....	38

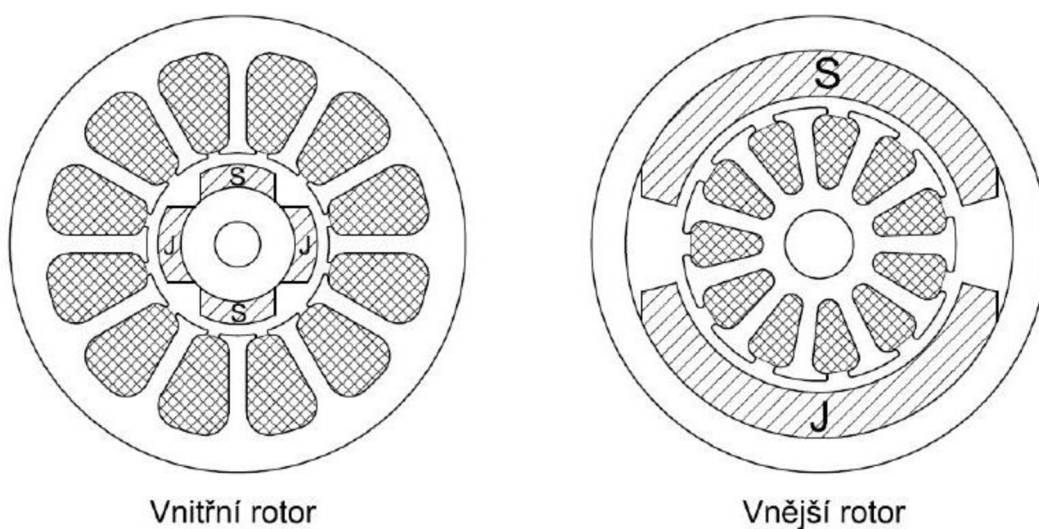
1 ÚVOD

Prudký rozvoj výkonové a řídicí elektrotechniky přináší také nové, dříve nepředstavitelné konstrukce motorů. Elektronicky komutovaný motor patří mezi jeden z nich. Ve vývoji jde především o zmenšování konstrukce elektromotorů při zachování stejných výkonových parametrů. Elektronicky komutované motory patří mezi mladší typy elektromotorů, protože pro jejich řízení je nutné použít složitou řídicí elektroniku. Tato skutečnost nepředstavuje v nynější době žádný problém, jelikož jsou na trhu běžně dostupné poměrně výkonné mikroprocesory.

Tento typ motoru je v současném průmyslu čím dál více využíván např. v automobilovém, automatizovaném průmyslu, letecké technice apod. Oproti klasickému stejnosměrnému motoru má elektronicky komutovaný motor značné výhody, odpadají totiž problémy, které vznikají při použití kluzného kontaktu mezi komutátorem a sběrnými kartáči. Vyhneme se tedy nutnosti provádět pravidelnou údržbu kluzného kontaktu, která zahrnuje výměnu, zabrušování kartáčů či čištění komutátoru.

1.1 Konstrukce elektronicky komutovaného motoru

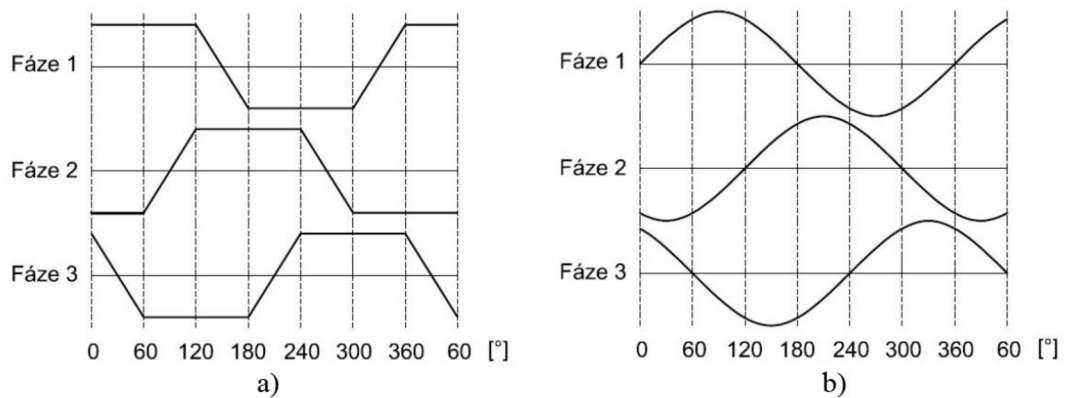
Na trhu se setkáváme se dvěma základními konstrukcemi tohoto motoru. Oba tyto druhy konstrukce jsou vidět na Obr. 1, první z nich se podobá konstrukci klasického motoru, rotor tvořený permanentními magnety je obklopen statorovým vinutím a dochází k otáčení rotoru uvnitř statoru, tzv. „inrunner“. U druhého typu konstrukce je tomu přesně naopak, vinutý stator je ve středu motoru a kolem něj se otáčí vnější rotor s permanentními magnety, tzv. „outrunner“ .



Obr. 1:Konstrukce EC motoru [1]

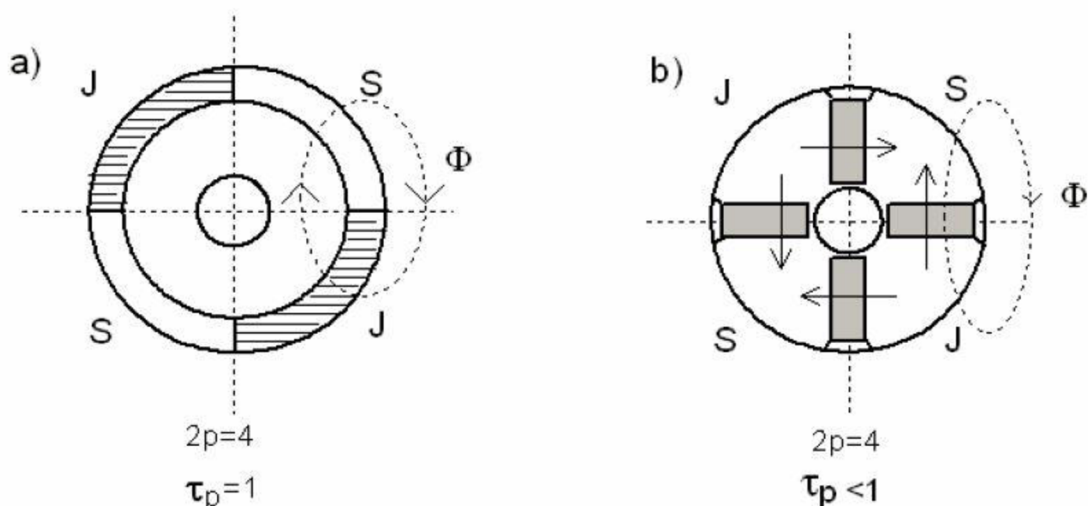
Stator elektronicky komutovaného motoru je konstruován podobně jako stator synchronního stroje. Je složen z ocelových plechů, ve kterých jsou vyraženy drážky a uloženo vinutí. Tyto drážky jsou zešíkmeny z pravidla o jednu drážkovou rozteč kvůli snížení reluktančních momentů, které jsou způsobeny různou magnetickou vodivostí drážek a zubů. Jednotlivá vinutí EC motoru jsou spojeny do hvězdy a vývody každé z cívek jsou vyvedeny ven z těla statoru. Podle způsobu rozložení vinutí a také dle druhu řízení jsou rozlišovány dva druhy EC motoru [1]:

- BLDC „Brushless Direct Current“ (lichoběžníkový průběh indukovaného napětí Obr. 2a), k řízení se využívá šestikroková komutace.
- PMSM „Permanent Magnet Synchronous Motor“ (sinusový průběh indukovaného napětí Obr. 2b), k řízení se využívá složitějších metody například vektorové řízení.



Obr. 2: Průběhy indukovaných napětí [2]

Rotor je konstrukčně uspořádán dvěma způsoby, které se od sebe liší umístěním permanentních magnetů. První způsob je umístění permanentních magnetů na povrchu rotoru, patrný z Obr. 3 a), u tohoto způsobu umístění nedochází ke koncentraci magnetického toku a velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře přímo odpovídá velikosti magnetické indukce magnetů. Druhý způsob umístění, patrný z Obr. 3 b), spočívá v umístění permanentních magnetů dovnitř rotoru. Magnetický tok se u tohoto způsobu umístění koncentruje pomocí pólových nástavců. Díky použití permanentních magnetů má rotor menší setrvačnost, která se příznivě projevuje v dynamických vlastnostech. Dochází ke zkrácení času rozběhu nebo brzdění motoru [9].



Obr. 3: Umístění permanentních magnetů na rotoru [9]

Jako materiál pro permanentní magnety jsou využívány slitinové materiály AlNiCo a sloučeniny vzácných zemin (neodym-železo-bor, samarium-kobalt). Z těch levnějších materiálů jsou to tvrdé ferity (Durox apod.), jejich výhodou je sice nižší pořizovací cena, ale jejich značnou nevýhodou jsou horší magnetické vlastnosti. Posuzování kvality permanentních magnetů probíhá porovnáním průběhu tzv. demagnetizační části hysterezní křivky. Pro představu jsou v Tab. 1 uvedeny charakteristické hodnoty obou skupin magnetických materiálů. Hodnota remanentní indukce B_r , koercitivní síly H_c a měrné energie (BH) [9].

Tab. 1: Charakteristické hodnoty magnetických materiálů[3]

		ferit	SmCo	Neodym	AlNiCo
(BH)	kJ/m³	30	200	430	40
B_r	T	0,4	1	1,5	1,2
H_c	kA/m	250	750	900	50

Hodnota remanentní indukce B_r je hodnota indukce permanentního magnetu při nulové intenzitě magnetického pole H a z praktického hlediska nám udává, jak velkou indukci ve vzduchové mezeře magnet vytvoří. Hodnota koercitivní síly H_c je udávána při nulové magnetické indukci B a z praktického hlediska udává jak velká intenzita magnetického pole je nutné k úplné demagnetizaci magnetu. Uvedené hodnoty B_r a H_c jsou teplotně závislé, se zvyšující se teplotou hodnoty klesají dle rovnic [10]:

$$B_r = B_{r20} \left[1 + \frac{\alpha_B}{100} (\vartheta_{PM} - 20) \right]$$

$$H_c = H_{c20} \left[1 + \frac{\alpha_H}{100} (\vartheta_{PM} - 20) \right]$$

kde B_{r20} - remanentní magnetická indukce při 20°C

H_c - koercitivní síla při 20°C

ϑ_{PM} - teplota permanentního magnetu

α_B, α_H - teplotní koeficienty pro B_r a H_c

Typické hodnoty teplotních koeficientů permanentních magnetů jsou uvedeny v Tab. 2.

Magnety AlNiCo – se vyrábí spékáním nebo sléváním. Mají vysokou remanentní indukci B_r , nízkou hodnotu koercitivní síly H_c a vysokou nelinearitu demagnetizační křivky. Lze je snadno magnetovat, ale bohužel také snadno demagnetovat. Magnety jsou z velmi tvrdého materiálu a musí se opracovávat broušením [3].

Feritové magnety – se vyrábějí technologií práškové metalurgie, základními složkami jsou oxid železitý a příměs stroncia nebo barya. Cenově jsou tyto magnety dobře dostupné, v porovnání s magnety AlNiCo mají vyšší koercitivní sílu H_c a zároveň nižší remanentní indukci B_r , dále jsou magnety lehké, odolné vůči korozi, mají vysoký elektrický odpor, díky čemuž klesají ztráty vířivými proudy v magnetu [3].

Magnety ze vzácných zemin se vyrábějí lisováním za působení magnetického pole a následně se spékají. Tyto magnety vytváří vyšší hustotu magnetického pole než magnety z feritů, proto je možno zmenšit konstrukci rotorů a zachovat tak stejný točivý moment.

Neodymové magnety (NdFeB) – tyto magnety jsou sice magneticky silné, ale mají malou tepelnou odolnost a jsou náchylné vůči korozi. Musí se tedy chránit povrchovou úpravou např. zinkováním nebo zalitím do pryskyřice. Hodnota koercitivní síly H_c je silně teplotně závislá [3].

Samarium-kobaltové magnety (SmCo) – mají vyšší tepelnou odolnost než neodymové magnety, jsou lépe odolné vůči nepříznivým podmínkám. Mají vysokou remanentní indukci B_r i koercitivní sílu H_c . Nevýhodou je vyšší pořizovací cena [3].

Tab. 2: Teplotní koeficienty a maximální provozní teplota jednotlivých druhů permanentních magnetů[3],[4]

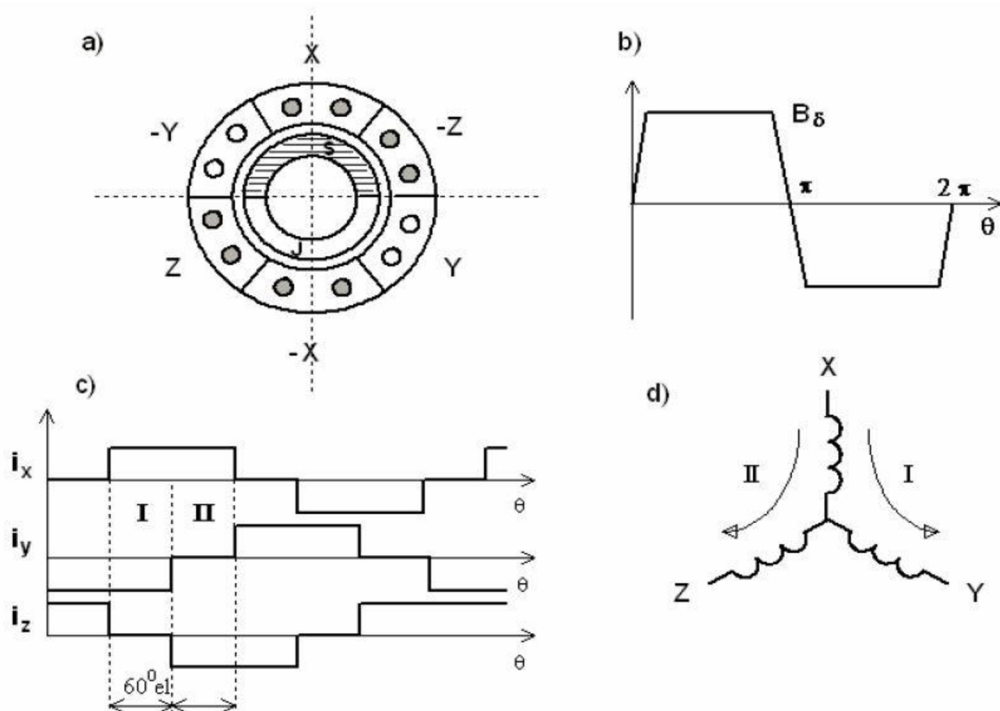
Druh permanentního magnetu	Teplotní koeficient		Maximální provozní teplota
	α_B	α_H	ϑ_{max}
	[%/°C]	[%/°C]	[°C]
AlNiCo	-0,02	0,01 až 0,03	500
Ferit	-0,2	-0,27	400
SmCo	-0,03 až -0,045	-0,14 až -0,4	350
NdFeB	-0,09 až -0,15	-0,4 až 0,8	250

Pro správnou komutaci statorových cívek je nutné zpracovávat informaci o poloze rotoru, proto je nedílnou součástí elektronicky komutovaného motoru snímač polohy, který snímá polohu rotoru diskrétně po 60° elektrických. Tento snímač bývá použitý magnetický nebo fotoelektrický.

1.2 Princip činnosti BLDC motoru

Permanentní magnety umístěné na rotoru, vytváří konstantní magnetické pole ve vzduchové mezeře. Statorové vinutí, obvykle tří fázové, vytváří proměnné magnetické pole. K tomu aby bylo dosaženo točivého magnetického pole a elektromagnetického momentu, je nutné jednotlivé fáze motoru elektricky komutovat. Nejvyššího točivého momentu lze dosáhnout, když magnetické pole vytvořené statorovým vinutím je posunuto o 90° vůči magnetickému poli permanentních magnetů umístěných na rotoru. Ke komutaci musí být použit tranzistorový měnič, který převede stejnosměrné napájecí napětí na střídavý signál a na základě informace o poloze rotoru přepíná proudy do jednotlivých statorových vinutí [9].

Běžně je informace o poloze získávána pomocí Halových senzorů. Princip elektronicky komutovaného motoru je znázorněn na Obr. 4, na kterém můžeme vidět řez motorem, průběh indukce ve vzduchové mezeře, průběhy statorových proudů v závislosti na poloze rotoru a schematické znázornění vinutí statoru.

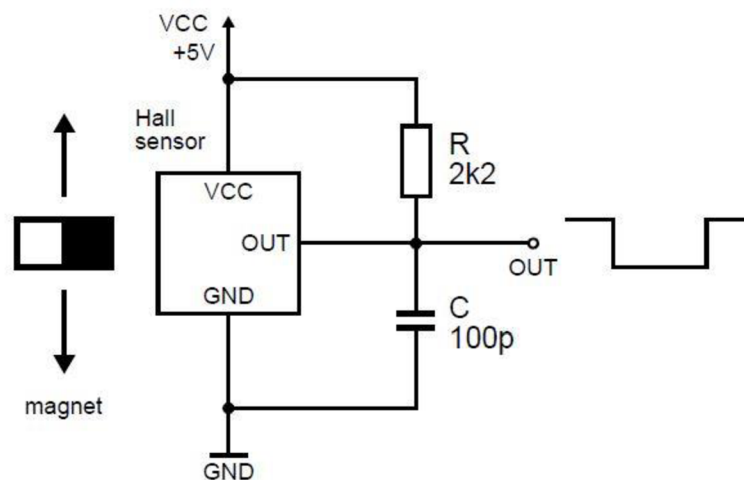


Obr. 4: a) Příčný řez EC motoru, b) průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, c) průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře, d) schematické zapojení vinutí [9]

1.3 Snímání polohy pomocí Hallových senzorů

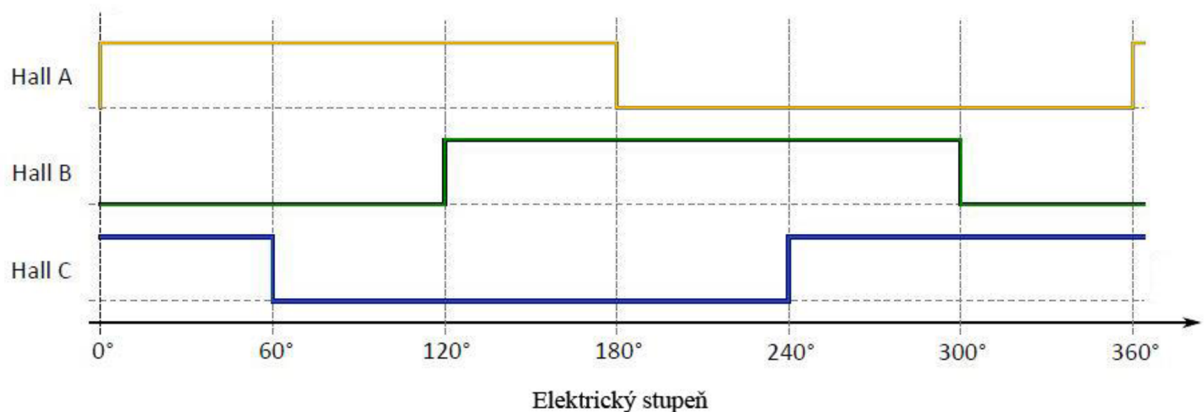
Pro snímání polohy se u elektronicky komutovaného motoru využívá snímačů založených na principu Hallova jevu. Tyto senzory jsou většinou součástí motoru a bývají umístěny dvěma způsoby. První způsob je umístění snímačů ve statoru motoru, kde dochází ke snímání magnetického pole permanentních magnetů rotoru. Druhý způsob spočívá v umístění kódovacího magnetického kotoučku na hřídel motoru. V blízkosti kódovacího kotoučku jsou umístěny tři Hallové senzory, jejichž výstupem je tříbitová informace o poloze rotoru v rámci jedné elektrické otáčky.

Hallové senzory mohou být ve čtyřvodičovém diferenčním nebo třívodičovém provedení s otevřeným kolektorem. V případě třívodičového provedení Obr. 5 je výstup připojen na pull up rezistor k napájecímu napětí a v případě detekce magnetického pole je výstupem logická 0 [6].



Obr. 5: Typické zapojení Hallova senzoru [5]

Hallové senzory jsou vůči sobě posunuty o 60° nebo 120° . Poloha rotoru je snímána s rozlišením 60° elektrických. Jednotlivé stavy Hallových senzorů odpovídají aktuální poloze rotoru. Díky komutační tabulce jsou pak tyto stavy převedeny na řídicí signály tranzistorového měniče. Typický průběh výstupních signálů jsou na Obr. 6.



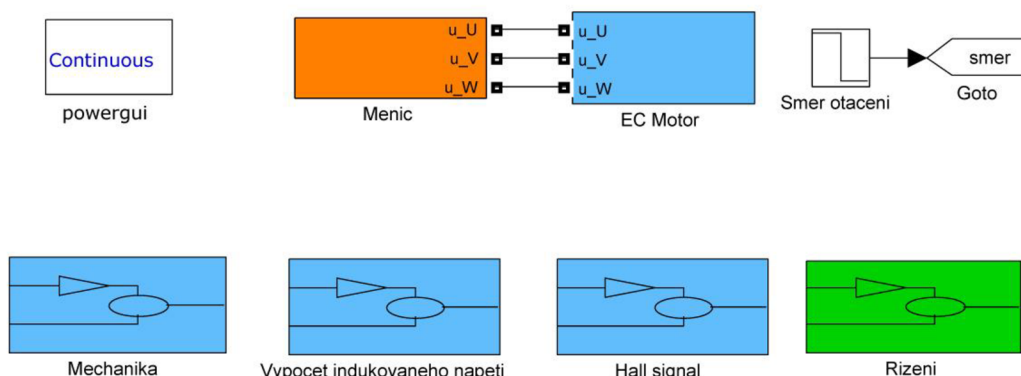
Obr. 6: Výstupní signály z Hallových senzorů v závislosti na poloze rotoru, [6] upraveno

1.4 Six step komutace

Algoritmus, který slouží k řízení tranzistorového měniče tak, aby byly jednotlivé fáze EC motoru správně komutovány a vzniklo točivé magnetické pole, se nazývá „šestikroková komutace“. Na základě znalosti polohy rotoru a požadovaném směru otáčení jsou v jednom okamžiku vždy napájeny dvě fáze EC motoru. Vektor magnetického pole se mění po kroku 60° elektrických, tedy na jednu otáčku je generováno šest spínacích impulsů. Toto spínání způsobuje zvlnění momentu, což může být pro některé aplikace nepřijatelné [6].

2 MODEL EC MOTORU V MATLAB SIMULINK

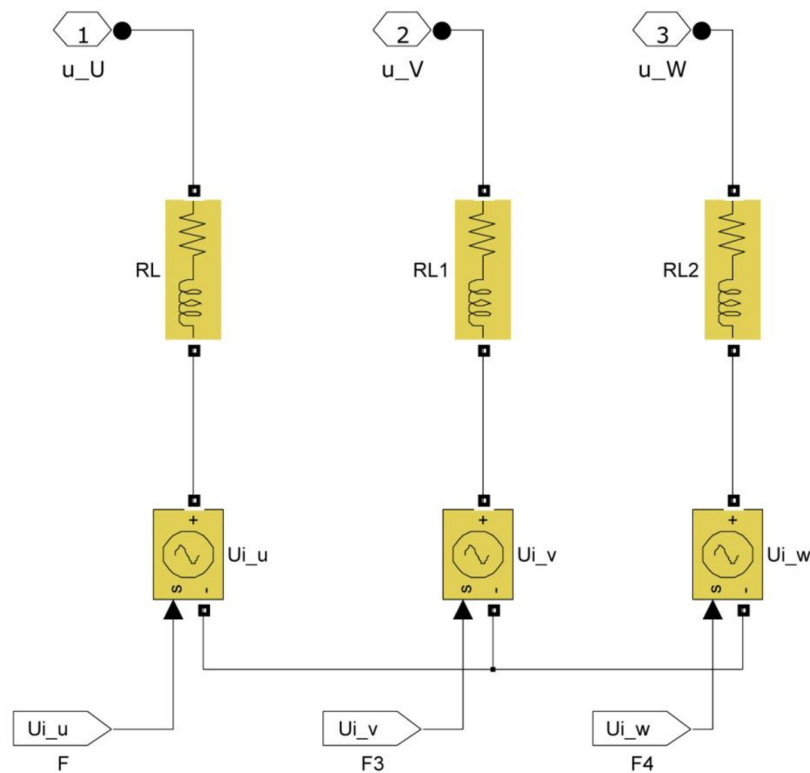
Model EC motoru se skládá z několika bloků, viz Obr. 7, ze kterého je patrná celá myšlenka sestavení modelu. Blok „EC Motor“ simuluje elektrické chování reálného motoru ze zadaných katalogových nebo změřených hodnot a je přesně popsán v kapitole 2.1. Blok „Menic“ simuluje reálný tranzistorový třífázový střídač, jehož úkolem je na základě spínacích pulzů z řízení spínat tranzistory v jednotlivých větvích. Měnič je popsán v kapitole 2.2. Úkolem bloku „Mechanika“ je simulovat mechanické chování reálného EC motoru, jeho funkce je popsána v kapitole 2.3. Blok „Vypocet indukovaného napeti“, jehož funkce je jasná z názvu, slouží k simulaci průběhu indukovaného napětí vzniklého v jednotlivých fázích EC motoru. Jeho detailní funkce je popsána v kapitole 2.4. Snímání polohy rotoru pomocí tří Hallových senzorů simuluje blok „Hall signal“, jehož úkolem je předávat informaci o poloze rotoru do řízení. Jeho funkce je dále popsána v kapitole 2.5. Posledním blokem, bez kterého by model nemohl plnit svoji funkci je „Rizeni“, jehož funkce je popsána v kapitole 2.6.



Obr. 7: Blokové schéma modelu EC motoru

2.1 EC motor

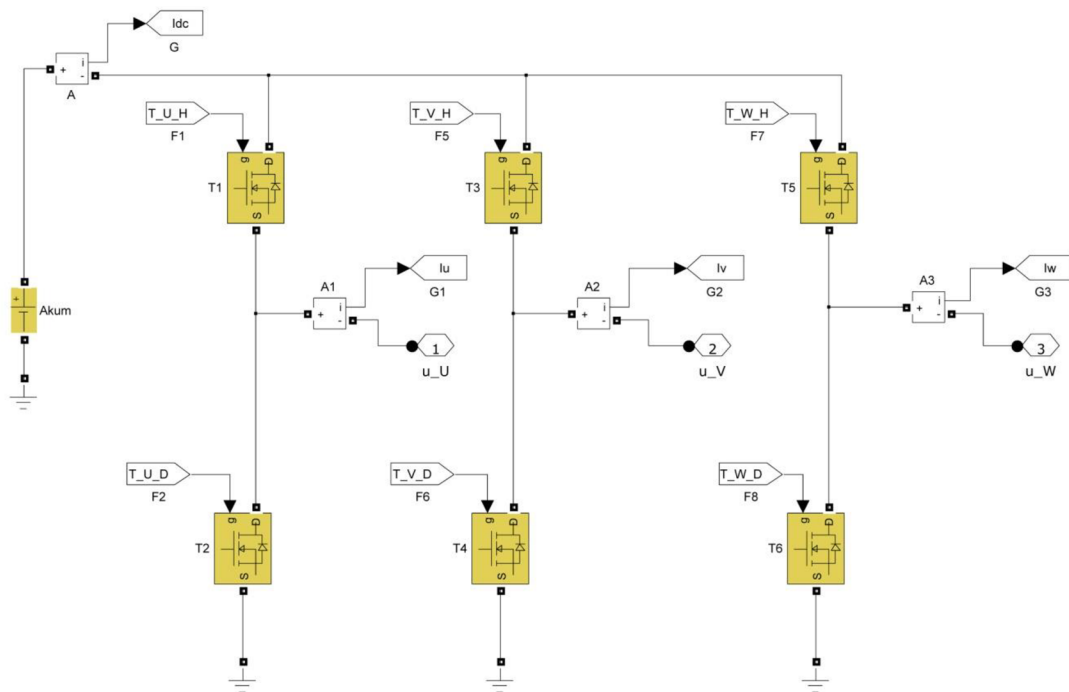
K realizaci modelu EC motoru, je využita knihovna SimPowerSystems, díky které je možné sestavit model pomocí reálných elektronických součástí. Blok „EC Motor“ je schematicky zobrazen na Obr. 8, každá fáze motoru (celkem tři) je sestavena ze sériové kombinace odporu, indukčnosti a zdroje indukovaného napětí, které je realizováno pomocí řízeného zdroje střídavého napětí. Hodnoty odporu a indukčnosti jsou reálné katalogové hodnoty použitého EC motoru a velikost indukovaného napětí, která se mění v závislosti na otáčkách rotoru, je vypočítávána v bloku „Výpočet indukovaného napětí“.



Obr. 8: Motor

2.2 Tranzistorový měnič

Pro napájení EC motoru, slouží blok „Menic“, který obsahuje třífázový tranzistorový střídač, jeho realizace je zobrazena na Obr. 9. Jako zdroj stejnosměrného napětí meziobvodu je pro simulaci použit akumulátor s napětím 24 V. Tranzistorový střídač se skládá ze tří větví. Jednotlivé napájecí větve obsahují horní a dolní spínač, jehož funkci plní MOSFET tranzistor. Každá větev dále napájí příslušnou fázi EC motoru. Pomocí ampérmetrů jsou snímány celkem čtyři proudy, proud meziobvodu I_{dc} a větvové proudy I_u , I_v , I_w , jejichž hodnoty jsou dále využívány v bloku „Mechanika“ pro výpočet momentu motoru. Na jednotlivé tranzistory jsou z bloku „Rizení“ přiváděny spínací impulzy.



Obr. 9: Měnič

2.3 Mechanika

Hlavním úkolem bloku „Mechanika“ je vypočítat ze vstupní hodnoty momentu M úhel natočení α a otáčky n . Nejprve se vypočte hodnota celkového momentu M , postup výpočtu je popsán v kapitole 2.3.1, od celkového momentu se odečte hodnota zátěžného momentu B_m+B_z (B_m představuje tření motoru a B_z tření zátěže), výsledná hodnota momentu je podělena celkovým momentem setrvačnosti J_m+J_z (J_m představuje moment setrvačnosti motoru a J_z moment setrvačnosti zátěže). Použitím rovnice 1 získáme hodnotu úhlového zrychlení ε .

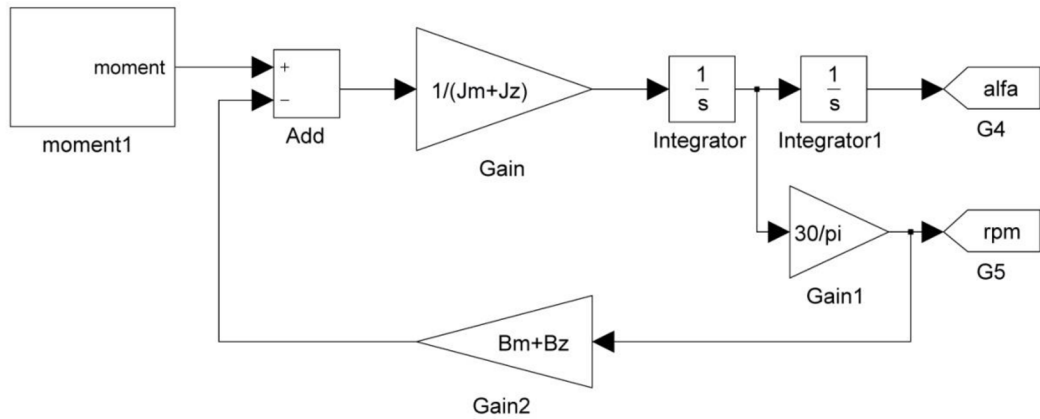
$$M = J \cdot \varepsilon \quad 1$$

První integrací úhlového zrychlení ε získáme hodnotu úhlové rychlosti ω , ze které díky rovnici 2 popisující vztah mezi úhlovou rychlostí a otáčkami vypočteme hodnotu otáček n .

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \quad 2$$

Druhou integrací úhlového zrychlení ε získáme hodnotu úhlu natočení α . Aktuální hodnota úhlu natočení a otáček se využívá v bloku „Vypocet

indukovaného napeti“. Aktuální hodnota úhlu natočení je dále využita v bloku „Hall signal“, kde slouží pro správné generování Hallových signálů.



Obr. 10:Mechanika

2.3.1 Výpočet momentu

Výpočet momentu EC motoru je řešen dle rovnice 3, která říká, že celkový moment je dán imaginární složkou součinu komplexně sdruženého magnetického toku Ψ a celkového proudu i , dále vynásobeným počtem pól párů motoru. V našem případě můžeme díky znalosti mechanické konstanty motoru K_m dosadit za komplexně sdružený magnetický tok, součin mechanické konstanty motoru K_m a jednotkového vektoru $e^{j\theta}$ dle rovnice 4.

Mechanická konstanta motoru K_m je katalogová hodnota, vztažená na fázový proud. Jelikož provádíme součet vektorů proudů, které jsou vzájemně pootočený o 120° elektrických je jejich výsledný součet $\sqrt{3}$ krát větší než hodnota fázového proudu. Musíme tedy výsledný součet podělit $\sqrt{3}$, abychom katalogovou hodnotu mechanické konstanty mohli použít.

Pro přehlednost je zavedena konstanta K dle rovnice 5, která zahrnuje volbu polarity magnetického toku cívek, počet pólových dvojic motoru a dělení $\sqrt{3}$. Následným dosazením vznikne tvar rovnice 6, podle které sestavíme blok zobrazený na Obr. 11 pro výpočet momentu.

Hodnoty statorových proudů I_u , I_v a I_w jsou převedeny do komplexní roviny, vzájemně vůči sobě pootočený o 120° elektrických a sečteny. Součet proudů je v dalším kroku vynásoben komplexně sdruženým jednotkovým vektorem, který se natáčí v závislosti na úhlu natočení α . Díky této skutečnosti vznikne mezi vektory

statorového a rotorového magnetického toku vazba, závislá na jejich okamžitém vzájemném úhlu natočení. Model se pak přesně chová jako reálný EC motor. V dalším kroku je realizována matematická operace dle rovnice 6.

Na Obr. 12 je vidět detail průběhu momentu EC motoru. Je patrné, že moment má zvlněný charakter. Zvlnění je způsobeno tím, že sdružený magnetický tok se v motoru mění spojitě, zatímco statorový proud se mění diskřétně. Procentuální hodnota zvlnění je dána rovnicí 7, v tomto bodě dochází ke komutaci a ke vzniku a zániku statorového proudu, který toto zvlnění ještě zvyšuje.

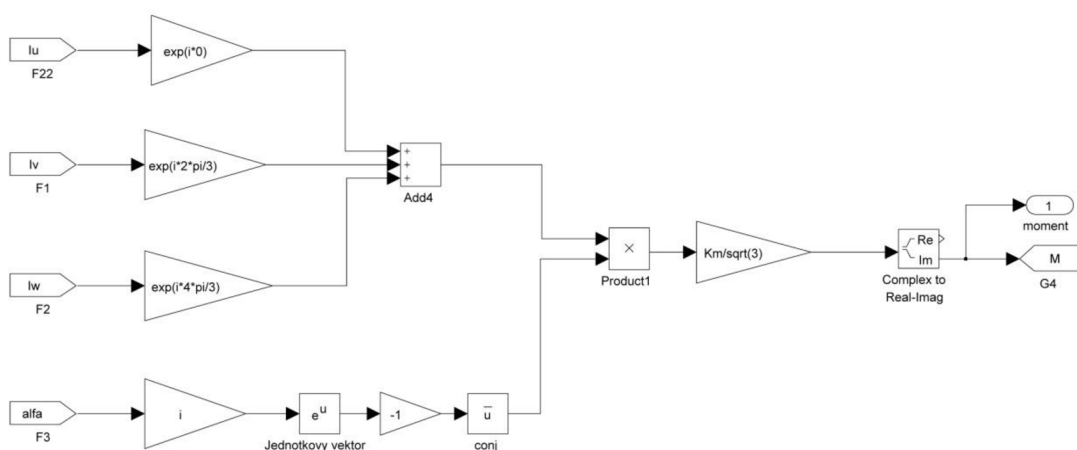
$$M = p \cdot \text{Im}\{\Psi^* \cdot i\} \quad 3$$

$$\Psi^* = K_m \cdot e^{j\vartheta} \quad 4$$

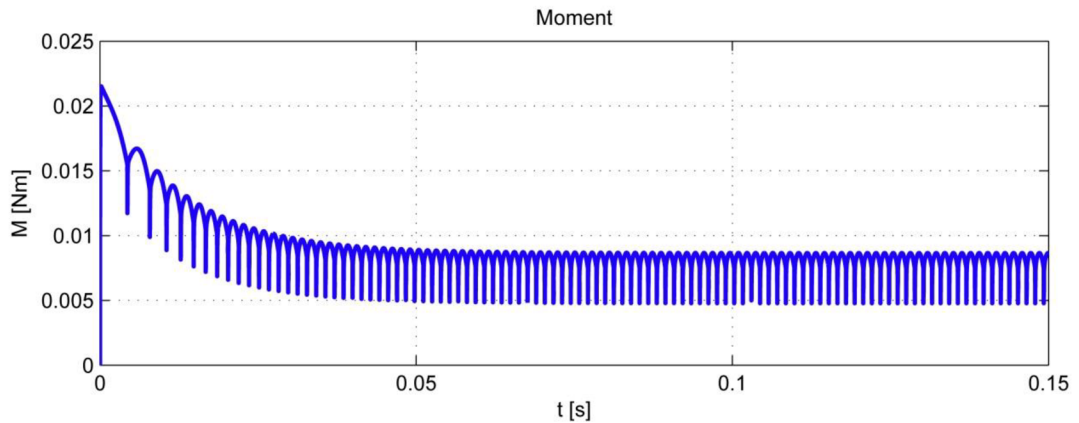
$$K = \pm \frac{K_m \cdot p}{\sqrt{3}} \quad 5$$

$$M = K \cdot \text{Im}\left\{\left(e^{j\vartheta}\right)^* \cdot i\right\} \quad 6$$

$$100 \cdot \left(1 - \sin\frac{\pi}{3}\right) = 13,4\% \quad 7$$



Obr. 11: Výpočet momentu



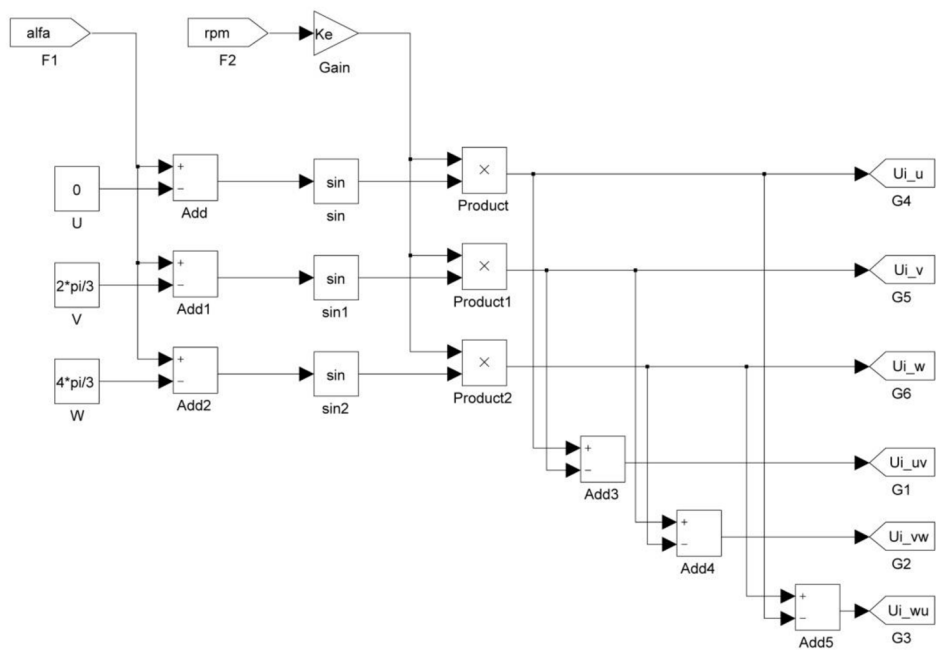
Obr. 12: Detail průběhu momentu v EC motoru

2.4 Výpočet indukovaného napětí

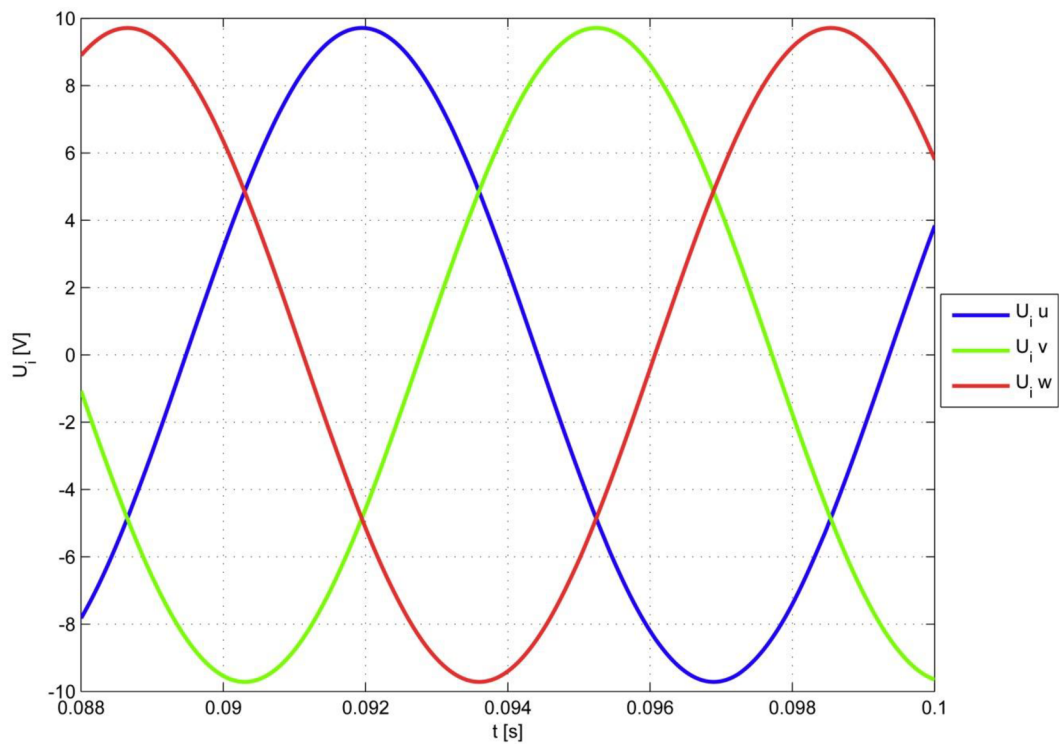
Indukované napětí jednotlivých fází je vůči sobě posunuto o 120° elektrických, průběh indukovaného napětí je závislý na úhlu natočení α . Amplituda indukovaného napětí je závislá na otáčkách rotoru a dána napěťovou konstantou K_e . Čím vyšší jsou otáčky, tím vyšší je amplituda indukovaného napětí.

V modelu jsou použity dva způsoby simulace průběhu indukovaného napětí, první způsob výpočtu indukovaného napětí je zobrazen na Obr. 13.

Aby bylo možné dosáhnout vzájemného fázového posuvu 120° elektrických mezi jednotlivými fázemi, je využito tří konstant, které se v každém okamžiku odečítají od aktuální hodnoty úhlu natočení α . Vzniknou tak tři na sobě nezávislé indukované napětí sinusového průběhu, jejichž amplituda je závislá na rychlosti otáčení rotoru. Jak velká amplituda napětí v závislosti na otáčkách motoru vznikne, stanovuje napěťová konstanta K_e , jejíž velikost je udávána jako katalogová hodnota u jednotlivých typů motorů. Toto zapojení bylo využíváno v počátcích tvoření modelu, kdy bylo potřeba nasimulovat vznik indukovaného napětí pouze pro účely sestavení a ověření řízení motoru, a tak nebylo důležité brát zřetel na tvar indukovaného napětí. Průběh indukovaného napětí řešeného prvním způsobem zapojení je zobrazen na Obr. 14.



Obr. 13: Výpočet indukovaného napětí- zjednodušeno



Obr. 14: Indukované napětí zjednodušeného zapojení

Druhý způsob výpočtu indukovaného napětí je zobrazen na Obr. 15, v tomto zapojení je počáteční myšlenka vzájemného fázového posuvu napětí jednotlivých fází o 120° elektrických řešena stejným způsobem jako v předchozím zapojení. Je však rozšířena o několik dalších matematických operací. Komutace jednotlivých tranzistorů probíhá v bodě dle rovnice 7 a jeho násobcích. Je tedy jasné, že v této hodnotě musí být dosaženo amplitudy indukovaného napětí, které má lichoběžníkový tvar.

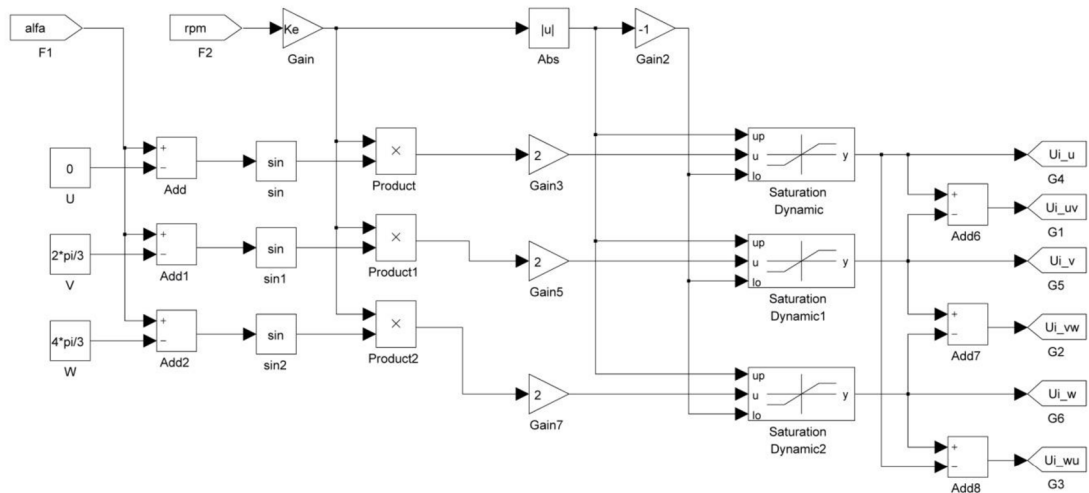
$$\sin \frac{\pi}{6} = \frac{1}{2} \quad 8$$

Abychom požadované amplitudy v bodě dle rovnice 8 dosáhly, je potřeba původní indukované napětí sinusového průběhu vynásobit 2-krát. Lichoběžníkového průběhu pak dosáhneme dynamickou saturací kladné a záporné půlplny dvojnásobného signálu. Celý tento proces je zobrazen na Obr. 16, kde je modrou barvou zobrazen průběh původního indukovaného napětí, červenou barvou je zobrazen dvojnásobek původního indukovaného napětí a zelenou barvou je zobrazeno vzniklé lichoběžníkové indukované napětí.

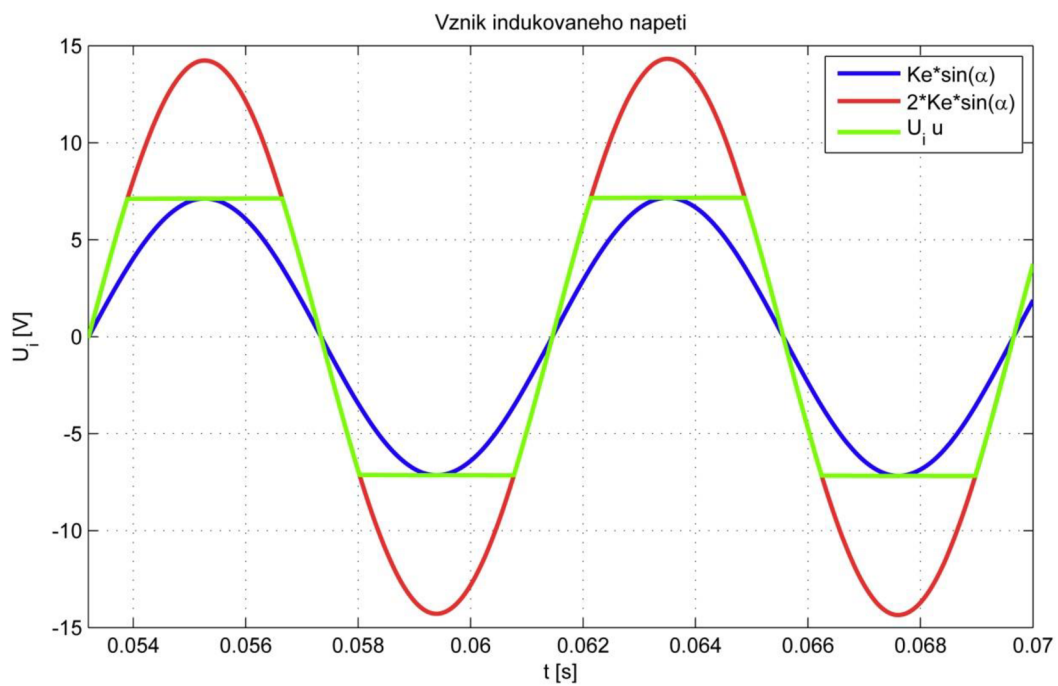
Průběh výstupních fázových napětí reálného EC motoru je zobrazen na Obr. 17.

Celkové zobrazení obou variant indukovaného napětí s možností zvolení varianty indukovaného napětí sinus nebo lichoběžník je zobrazeno v Příloha 1.

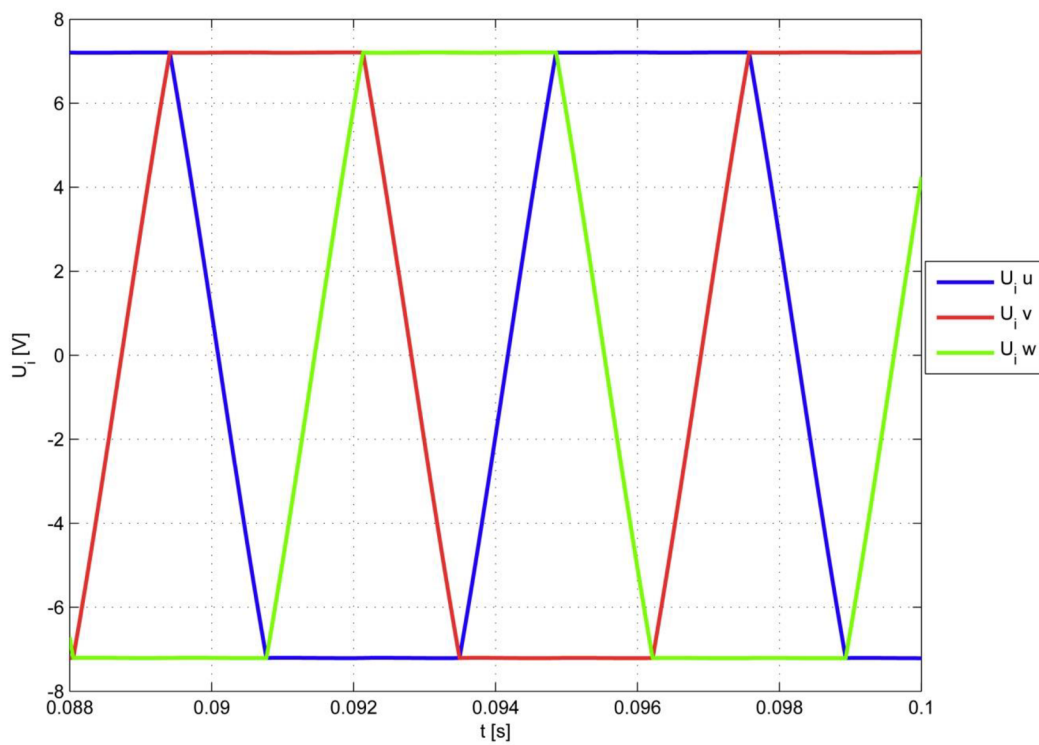
V reálném EC motoru může vzniknout jak lichoběžníkový tak i sinusový průběh indukovaného napětí, proto byla funkce bloku generující sinusový průběh indukovaného napětí zachována, ale oddělena přepínačem pro možnost zvolení typu průběhu.



Obr. 15: Výpočet indukovaného napětí



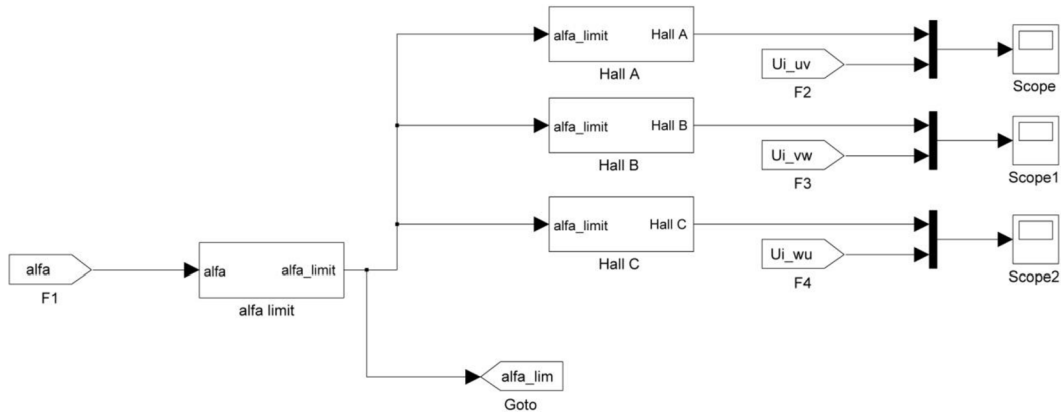
Obr. 16: Vznik indukovaného napětí



Obr. 17: Indukované napětí reálného EC motoru

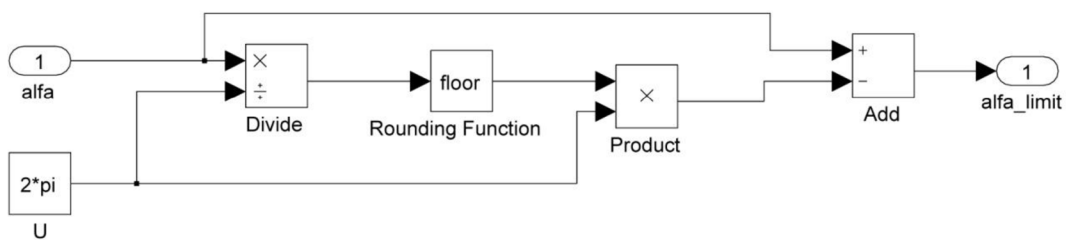
2.5 Snímání polohy rotoru pomocí Hallových senzorů

Blok simulující generování tříbitového signálu polohy rotoru z Hallových senzorů je zobrazen na Obr. 18. Vstupní hodnotou je do nekonečna se měnící hodnota úhlu natočení rotoru α tento úhel se mění v závislosti na směru otáčení. Pokud se rotor otáčí kladným směrem (pravotočivý chod), hodnota úhlu natočení α nabývá kladných hodnot. Pokud se rotor otáčí záporným směrem (levotočivý chod), tak hodnota úhlu natočení α nabývá záporných hodnot.



Obr. 18: Generování signálů z Hallových senzorů na základě úhlu natočení rotoru

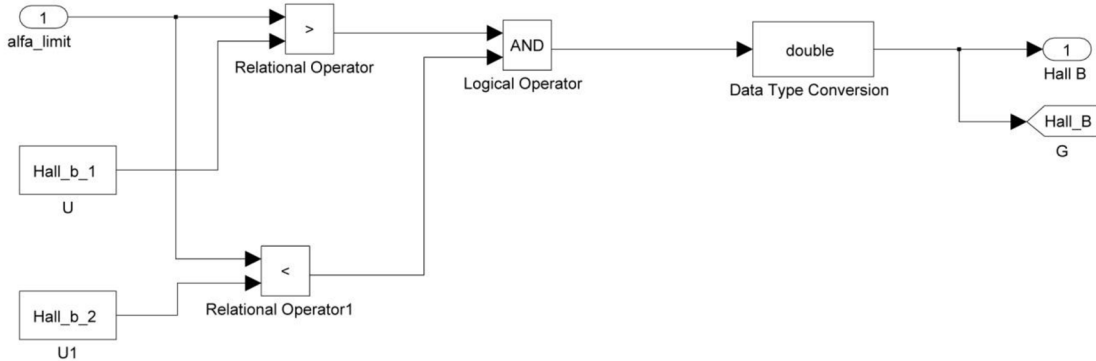
Úkolem bloku „alfa limit“, zobrazeném na Obr. 19, je rozčlenit celkový úhel natočení α na jednotlivé úseky dlouhé 2π (360°), tedy na úseky zobrazující chování rotoru po dobu jedné mechanické otáčky.



Obr. 19: Limit úhlu natočení rotoru

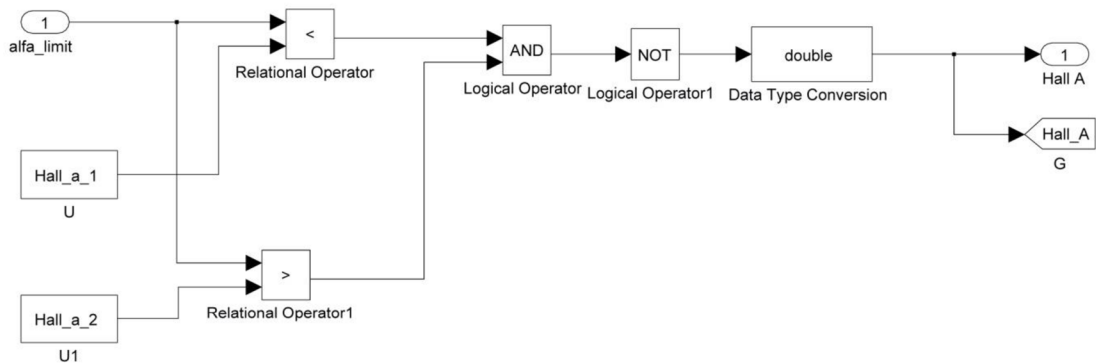
Princip funkce dalších bloků bude vysvětlen na bloku „Hall B“ zobrazeném na Obr. 20. Pomocí dvou pevně stanovených bodů je dán úsek snímání Hallova senzoru, který je porovnáván se vstupní hodnotou α_{limit} . Pokud se hodnota α_{limit} právě nachází v tomto daném úseku je na výstupu bloku generována logická

úroveň 1, v případě že se hodnota α_{limit} v tomto úseku nenachází, generuje se na výstupu bloku logická úroveň 0.



Obr. 20: Logika Hallova senzoru B

Bloky „Hall A“ a „Hall C“ zobrazené na Obr. 21 plní funkci inverzní k bloku „Hall B“, tedy v případě, že se hodnota α_{limit} v daném úseku nachází, výstupem bloku je logická úroveň 0 a v případě, že se v daném úseku nenachází, výstupem je logická úroveň 1.

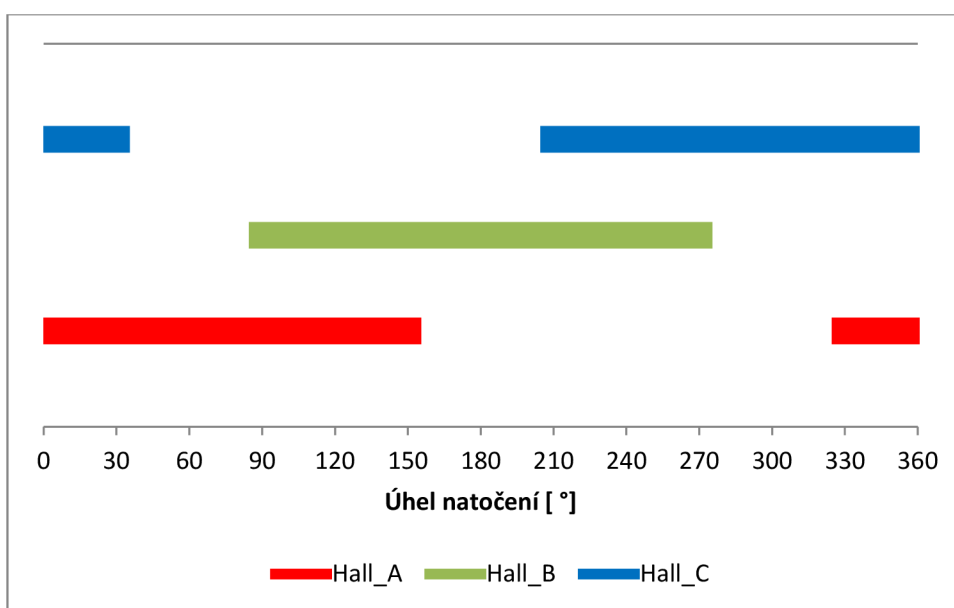


Obr. 21: Logika Hallova senzoru A a C

Jednotlivé úseky snímání jsou realizovány dle Tab. 3 a graficky zobrazeny na Obr. 22. Délka úseku snímání je vždy $\frac{\pi}{2}$ (180°) vzájemně vůči sobě posunutá o $\frac{2\pi}{3}$ (120°).

Tab. 3: Úseky snímání Hallových senzorů

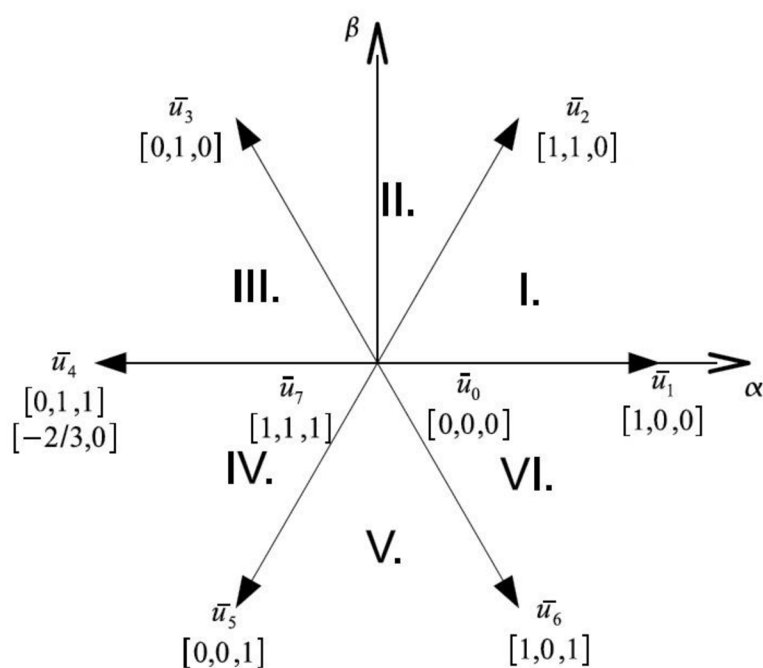
Hallův senzor	Dílčí úsek [rad]		Dílčí úsek [°]	
	od	do	od	do
A	$\frac{11\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6}$	330	150
B	$\frac{3\pi}{6}$	$\frac{9\pi}{6}$	90	270
C	$\frac{7\pi}{6}$	$\frac{\pi}{6}$	210	30



Obr. 22: Úseky snímání Hallových senzorů

2.6 Řízení

Aby bylo možné EC motor roztočit je potřeba vhodně spínat tranzistory ve větvích měniče tak, aby vzniklo točivé magnetické pole a rotor se začal točit požadovaným směrem. Úkolem řídicího bloku je tedy zpracovat tříbitovou informaci o poloze rotoru z Hallových senzorů a vytvořit vhodnou kombinaci spínacích pulzů na základě požadovaného směru otáčení EC motoru. Tříbitové stavy, ve kterých se může rotor EC motoru nacházet, jsou zobrazeny na Obr. 23.



Obr. 23: Tříbitové stavy polohy rotoru[7]

Blok řízení je sestaven z logických obvodů AND a OR a je schematicky zobrazen v Příloha 2. Podkladem pro vhodné kombinace spínání tranzistorů třífázového střídače jsou dvě komutační tabulky, které určují správné kombinace sepnutí tranzistorů ve větvi. Tab. 4 určuje kombinace spínání tranzistorů pro kladný směr otáčení EC motoru (pravotočivý chod) a Tab. 5 určuje spínání tranzistorů pro záporný směr otáčení motoru (levotočivý chod).

Tab. 4: Komutační tabulka pro kladný směr otáčení (pravý chod)

Logický stav Hallova senzoru			Logické stavy tranzistorů ve větvích					
			Větev U		Větev V		Větev W	
A	B	C	T _{UH}	T _{UD}	T _{VH}	T _{VD}	T _{WH}	T _{WD}
1	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	0	0	1	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	1
0	1	0	0	0	1	0	0	1
0	1	1	0	1	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	1	0

Tab. 5: Komutační tabulka pro záporný směr otáčení (levý chod)

Logický stav Hallova senzoru			Logické stavy tranzistorů ve větvích					
			Větev U		Větev V		Větev W	
A	B	C	T_{UH}	T_{UD}	T_{VH}	T_{VD}	T_{WH}	T_{WD}
1	0	1	0	0	1	0	0	1
1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	1	0	0	1	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	1

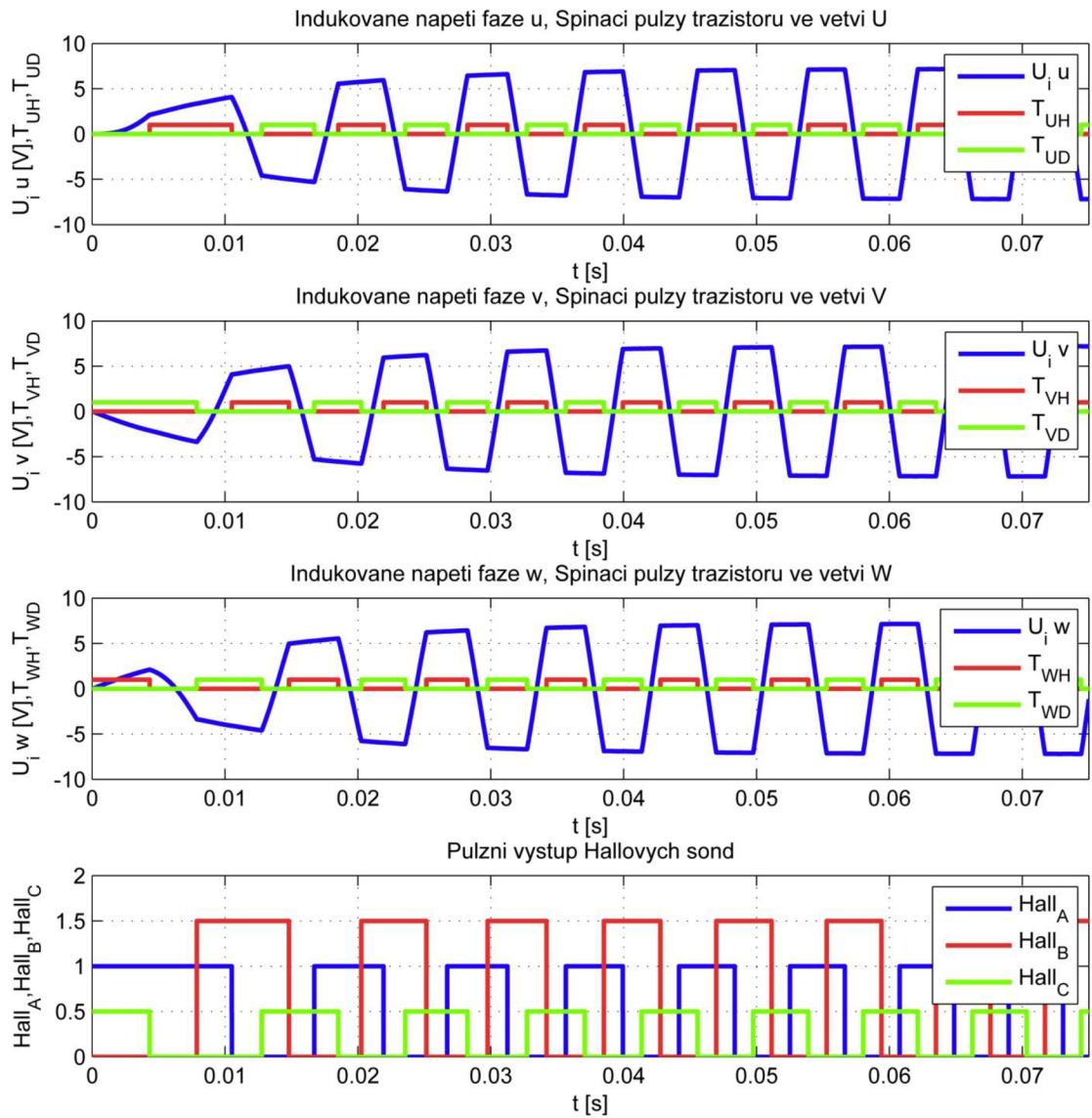
2.6.1 Ověření správné funkce řízení

Aby bylo možné prohlásit řízení za funkční, je potřeba zkontrolovat zda na základě tříbitové informace z Hallova senzoru generuje správnou kombinaci spínacích pulzů do jednotlivých větví třífázového střídače.

Funkci zkontrolujeme dle vynesných grafů na Obr. 24, který celkově zobrazuje generování spínacích pulzů a vznik indukovaného napětí při zpracování stavů Hallovyh senzorů. Na čtvrtém grafu jsou vyneseny logické stavy Hallovyh senzorů $Hall_A$, $Hall_B$, $Hall_C$ při otáčení rotoru. Logická úroveň nabývá hodnot 1 a 0, na grafu jsou velikosti jednotlivých signálů vynásobeny konstantami ($Hall_B \cdot 1,5$ a $Hall_C \cdot 0,5$) pro lepší přehlednost. Tři grafy z horní strany zobrazují výstupní pulzy, které generuje řízení do větví U , V , W třífázového střídače. První graf zobrazuje spínací pulzy horního T_{UH} a dolního T_{UD} tranzistoru větve U a zároveň vznik indukovaného napětí U_{iu} ve fázi u EC motoru. Druhý graf zobrazuje spínací pulzy horního T_{VH} a dolního T_{VD} tranzistoru větve V a zároveň vznik indukovaného napětí U_{iv} ve fázi V EC motoru. Třetí graf zobrazuje spínací pulzy horního T_{WH} a dolního T_{WD} tranzistoru větve W a zároveň vznik indukovaného napětí U_{iw} ve fázi W EC motoru.

Z grafu je patrné, že při stavu $Hall_A=1$, $Hall_B=0$ a $Hall_C=1$ je sepnut horní T_{WH} tranzistor fáze W a dolní T_{VD} tranzistor fáze V třífázového střídače a v příslušných fázích EC motoru vzniká správná polarita indukovaného napětí. Tedy při sepnutí horního tranzistoru ve větvi kladná polarita a při sepnutí dolního tranzistoru ve větvi záporná polarita. V následujícím stavu $Hall_A=1$, $Hall_B=0$ a $Hall_C=0$ je sepnut horní T_{UH} tranzistor fáze U třífázového střídače a dolní T_{VD} tranzistor fáze V .

Z vynesných průběhů je dále patrné, že komutace probíhá správně po 60° elektrických a výsledné indukované napětí je fázově posunuto o 120° elektrických. Tedy přesně jak probíhá v reálném EC motoru, což je účelem sestavení tohoto modelu.



Obr. 24: Stav Hallových senzorů, spínání tranzistorů ve větvích, indukované napětí

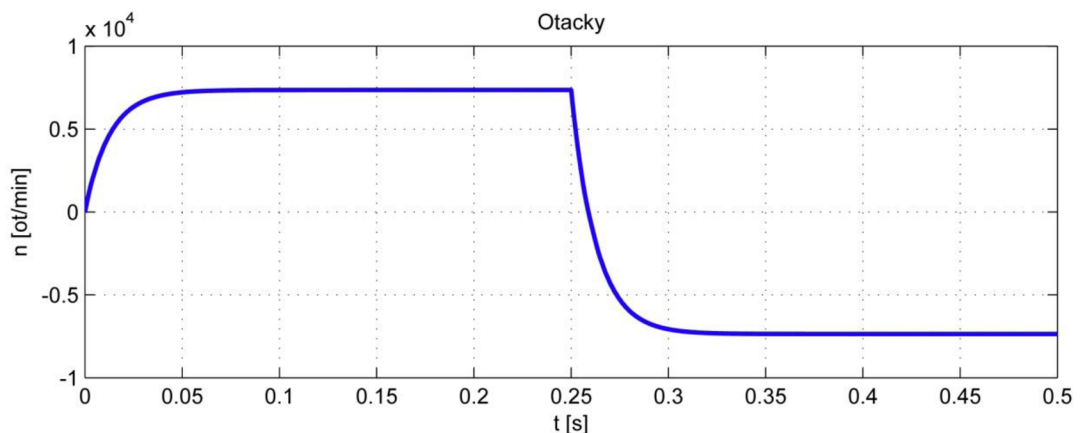
2.7 Srovnání katalogových hodnot EC motoru s modelem

Pro simulaci EC motoru byly použity reálné parametry motoru od firmy Maxon s označením EC-max 16 typ 283835, parametry jsou zobrazeny v Tab. 6. Tento motor byl vybrán na základě požadavků uvedených v kapitole 3. Do vstupního souboru pro simulaci byla zadána hodnota fázového odporu a fázové indukčnosti, obě hodnoty vychází z mezifázových hodnot, které pro získání hodnoty pro jednu fázi podělíme dvěma. Dále byla použita momentová konstanta K_m a napěťová konstanta K_e .

Tab. 6: Parametry motoru EC-max 16 typ 283835

Jmenovité napětí	V	24
Jmenovitý proud	A	0,461
Jmenovité otáčky	rpm	7350
Jmenovitý moment	mNm	8,19
Mezifázový odpor	Ω	20,5
Mezifázová indukčnost	mH	0,566
Momentová konstanta	mNm/A	18,7
Napěťová konstanta	rpm/V	510

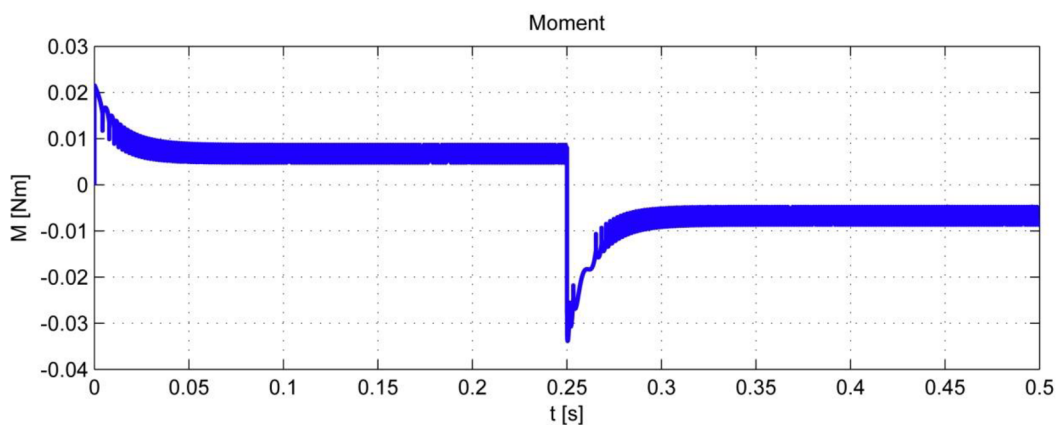
Byl simulován pravotočivý a levotočivý chod, oba směry po dobu 0,25s tedy celkově dohromady 0,5s. Výstup simulace je na Obr. 25, který zobrazuje průběh otáček EC motoru. Ustálená hodnota otáček je odečtena z grafického průběhu na Obr. 27 a činí 7359 ot./min což se jen málo odchyľuje od katalogové hodnoty 7350 ot./min.



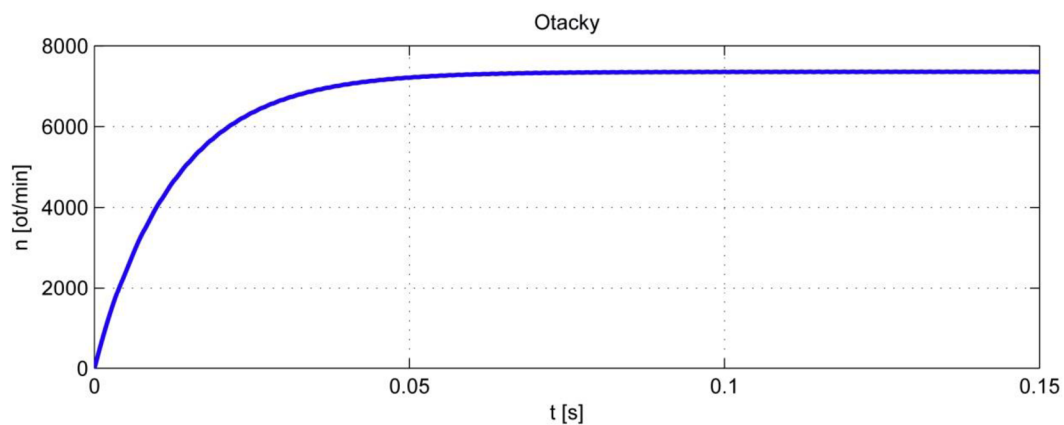
Obr. 25: Průběh otáček EC motoru

Na Obr. 26 je zobrazen průběh momentu simulovaného EC motoru, při proložení detailu průběhu na Obr. 28 střední hodnotou byla odečtena hodnota momentu 8,36 mNm, která sice katalogovou hodnotu něco málo převyšuje, nicméně se této hodnotě dostatečně přibližuje. Můžeme tedy říci, že simulace,

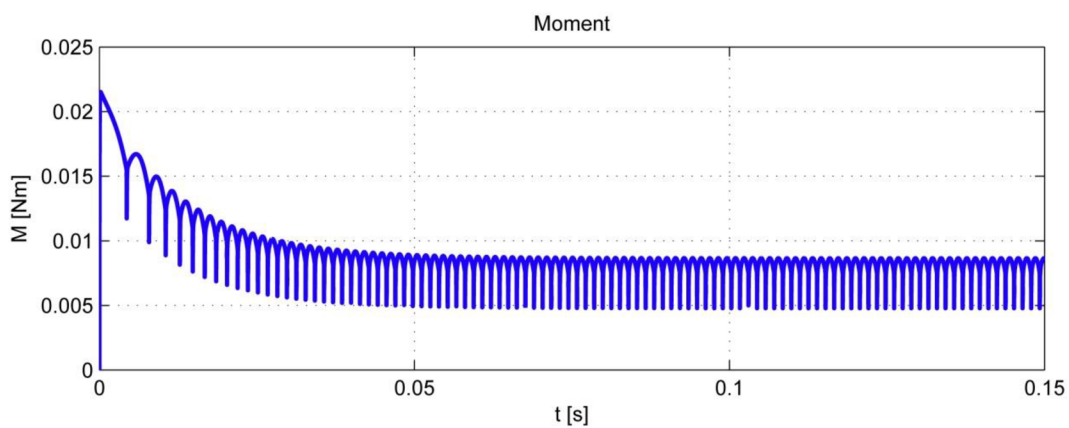
kteřá se má co nejbliže svým chováním přibližovat reálnému EC motoru, funguje dobře a s dostačující přesností.



Obr. 26: Průběh momentu EC motoru



Obr. 27: Průběh otáček EC motoru - detail



Obr. 28: Průběh momentu EC motoru - detail

3 NÁVRH A REALIZACE ŘÍDÍCÍ ELEKTRONIKY EC MOTORU

Dílčím úkolem této práce je dle daných požadavků vybrat vhodný EC motor, k tomuto motoru zvolit vhodný driver pro řízení. Navrhnout DPS na kterou jsou kladeny minimální rozměrové požadavky, dále tuto desku vyrobit, osadit, oživit a otestovat řízení. Sestavit pohon EC motoru a zátěže, který bude řízen navrženou elektronikou a tuto elektroniku otestovat zda při zatížení tepelně vyhoví.

3.1 Výběr EC motoru

Pro výběr EC motoru byly zadány tyto požadavky:

- vnější statický zatěžovací moment motoru $M_{stat}=9,5mNm$
- průměr výstupní hřídele $2mm$
- jmenovité napětí motoru $24V$

Průzkumem trhu bylo zjištěno, že jediný dostupný motor, který daný požadavek splňuje je motor firmy Maxon s označením EC-max 16 typ 283835. Tento motor má jmenovitý moment pouze $8,19mNm$, takže bude při chodu mírně přetíženo. Vzhledem k zatěžovacímu diagramu motoru toto malé přetížení nebude vadit. Motor bude pracovat přerušovaným chodem s velkou časovou prodlevou mezi spouštěním.

3.2 Výběr IO pro řízení EC motoru

Na trhu se vývojem integrovaných driverů pro řízení EC motorů zabývá většina velkých výrobců integrovaných obvodů. Mezi nejznámější patří např. Texas Instruments, ON Semiconductor, Allegro MicroSystems LLC, STMicroelectronics. V jejich nabídce jsou obvody s integrovanou výkonovou částí nebo obvody plnící funkci řízení a výkonová část je realizována externě. Aby bylo možné vybrat vhodný driver pro řízení, je nutné si stanovit kritéria výběru:

- obvod musí umět zpracovat signály z halových sond bez použití externího převodníku
- obvod musí být schopen pracovat v teplotním rozmezí $-40^{\circ}C$ až $150^{\circ}C$
- napájecí napětí $24V$
- špičkový proud $2,4A$
- obvod musí mít integrovanou výkonovou část měniče, z důvodu minimalizace DPS
- nesmí obsahovat žádný mikroprocesor

- možnost řízení otáček v uzavřené zpětné vazbě
- směr otáčení motoru bude ovládán změnou polaroty napájecího napětí driveru

Na základě výše uvedených požadavků byl vybrán jednoúčelový integrovaný driver L6235PD od firmy STMicroelectronics. Obvod má integrovanou řídicí i silovou část měniče v jednom pouzdře. Napětově může pracovat v rozmezí od 8V do 52V a snese špičkový proud 2,8A. Obvod dále nabízí funkci nadproudové a tepelné ochrany, možnost regulace otáček v rychlostní smyčce, zkratovou a podpětovou ochranu. Pro lepší chlazení obvodu bylo zvoleno pouzdro PowerSO36, které má ze spodní strany velkou chladicí plochu k připájení k DPS [8].

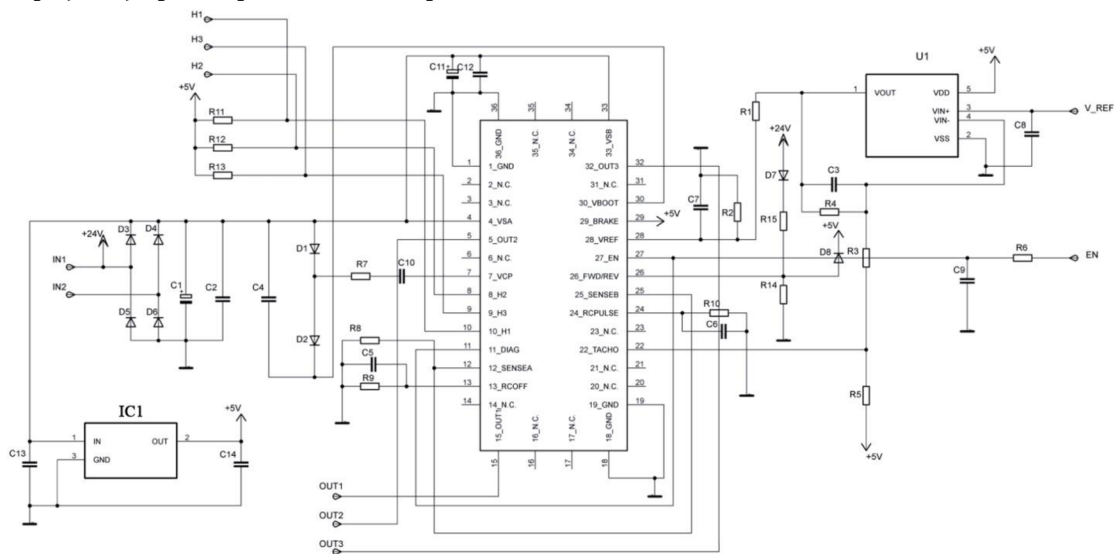
3.3 Návrh DPS

Pro návrh řídicí elektroniky bylo použito doporučené zapojení dle katalogového listu obvodu L6235PD, které bylo upraveno pro potřeby naší realizace. Pro potřebu 5V napájení Hallových senzorů v EC motoru a dalších pomocných obvodů měniče, byl použit napěťový stabilizátor 7805 v jeho doporučeném zapojení.

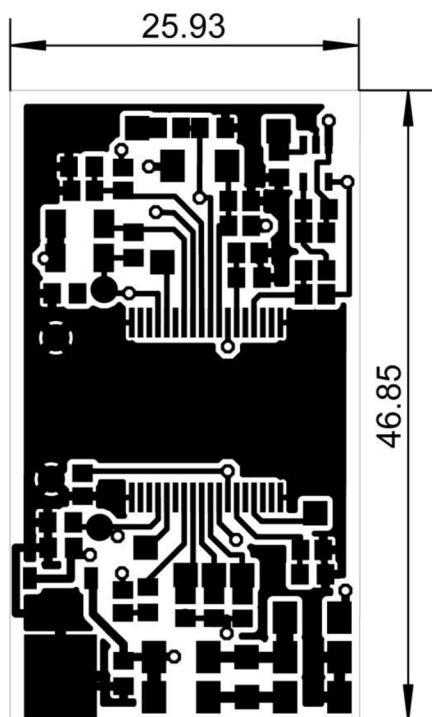
Vzhledem k požadavku měnit směr otáčení EC motoru pomocí změny polarizace napájecího napětí měniče, byl v napájecí větvi sestaven usměrňovací můstek ze Shottkyho diod. Tímto můstkem je při přepólování svorek vždy zajištěna správná polarita napájecího napětí měniče. Ke změně směru otáčení slouží logický vstup na pinu „28 FWD/REV“, vysoká logická úroveň 5V nastaví pravotočivý chod a nízká logická úroveň 0V levotočivý chod. Aby bylo možné ovládat reverzaci motoru z napájecího vstupu IN1, byl použit napěťový dělič pro snížení napětí a dvě diody. Dioda D7 je v propustném směru v momentě, kdy je na vstupu IN1 kladné napájecí napětí, které přes dělič vytvoří na vstupu FWD/REV vysokou úroveň. V případě požadavku na reverzaci dojde k přepólování napájení, tedy na vstupu IN1 bude záporná polarita. Ovládací vstup FWD/REV je díky zbytkovému proudu stále ve vysoké úrovni, tento zbytkový proud je potřeba „odsát“ a vytvořit tak na pinu nulovou úroveň. K tomuto účelu slouží druhá dioda D8, která je připojená k napětí +5V a vstupu FWD/REV. V případě požadavku na reverzaci zajistí tvrdé přepnutí do nízké úrovně.

K návrhu desky plošného spoje bylo využito návrhového softwaru Eagle, ve kterém bylo nakresleno schéma zapojení na Obr. 29. Na základě požadavku navrhnout desku řízení co nejmenší, byla navržena dvouvrstvá deska plošného spoje. Pohledová strana TOP je zobrazena na Obr. 30, zadní strana BOTTOM je na

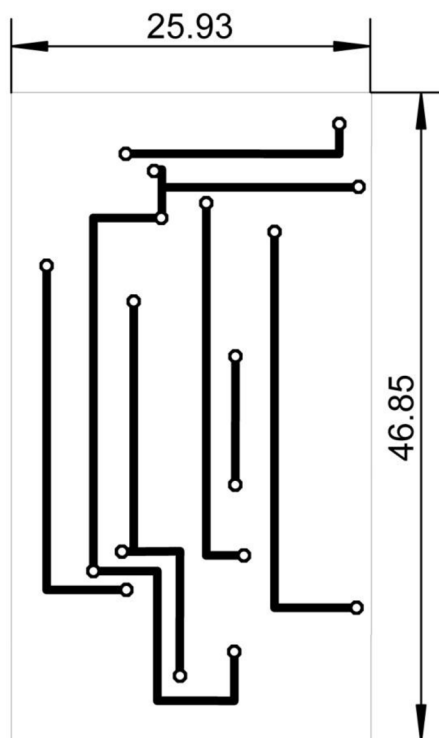
Obr. 31. Rozmístění součástek pro osazení je zobrazeno na Obr. 32. Schéma zapojení je pro lepší zobrazení přiloženo v Příloha 3.



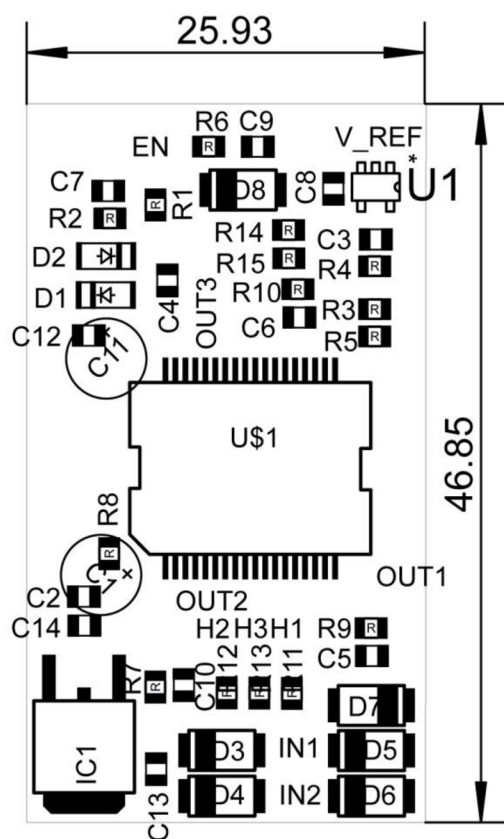
Obr. 29: Schéma zapojení



Obr. 30: DPS strana TOP



Obr. 31: DPS strana BOTTOM



Obr. 32: DPS osazovací plán

V Příloha 4 je uveden seznam použitých součástek. Kondenzátory C1 a C11 jsou v klasickém provedení, polymerové na jmenovité napětí 50V a jsou osazeny 5mm nad desku plošného spoje z důvodu minimalizace rozměrů. Ostatní kondenzátory jsou keramické, taktěž se jmenovitým napětím 50V.

3.4 Testování driveru pro EC motor

Po úspěšném oživení driveru pro řízení EC motoru, bylo nutné sestavit pracoviště pro otestování běhu motoru se zátěží a také pro teplotní zkoušku při zatížení driveru EC motoru. Jak už bylo zmíněno v kapitole 3.1, bude motor zatěžován vnějším statickým momentem $M_{stat}=9,5mNm$. Pracoviště s přesným nastavením momentu zátěže pro takto malý motor nemáme, bylo tedy zvoleno zatížení pomocí malé ruční vrtačky značky PROXXON - Micromont 50/E, která má možnost výměny upínacích hlav a tak je jednoduše možné pevně spojit hřídel motoru s hřídelí vrtačky bez dalších úprav. Jak velkou zátěž vrtačka působí, není známo, ale jsme schopni toto zatížení ze známé momentové konstanty K_m použitého motoru a

odebíraného proudu při zatížení vypočítat. Pro účel testování bylo sestaveno pracoviště zobrazené na Obr. 33.

Pomocí proudové sondy byl změřen proud motoru naprázdno a při zatížení:

- proud naprázdno $I_0=0,52A$
- celkový proud se zátěží $I_z=2A$

Momentová konstanta motoru EC Max 16, typ 283835 je dle katalogu $K_m=18,7mNm/A$.

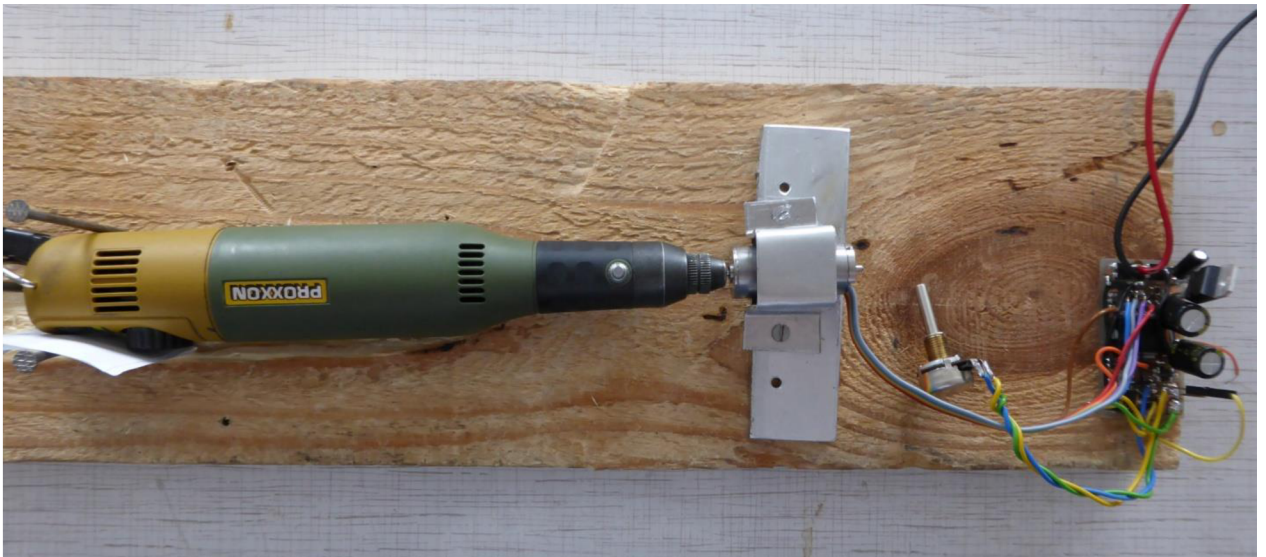
Pro výpočet momentu zátěže potřebujeme získat hodnotu proudu, která odpovídá vnějšímu momentu na hřídeli. Proto od celkového proudu odečteme proud naprázdno dle rovnice 8. Dosazením vypočteného proudu a momentové konstanty do rovnice 9 získáme moment odpovídající zátěži.

$$I_m = I_z - I_0 = 2 - 0,52 = 1,48A \quad 9$$

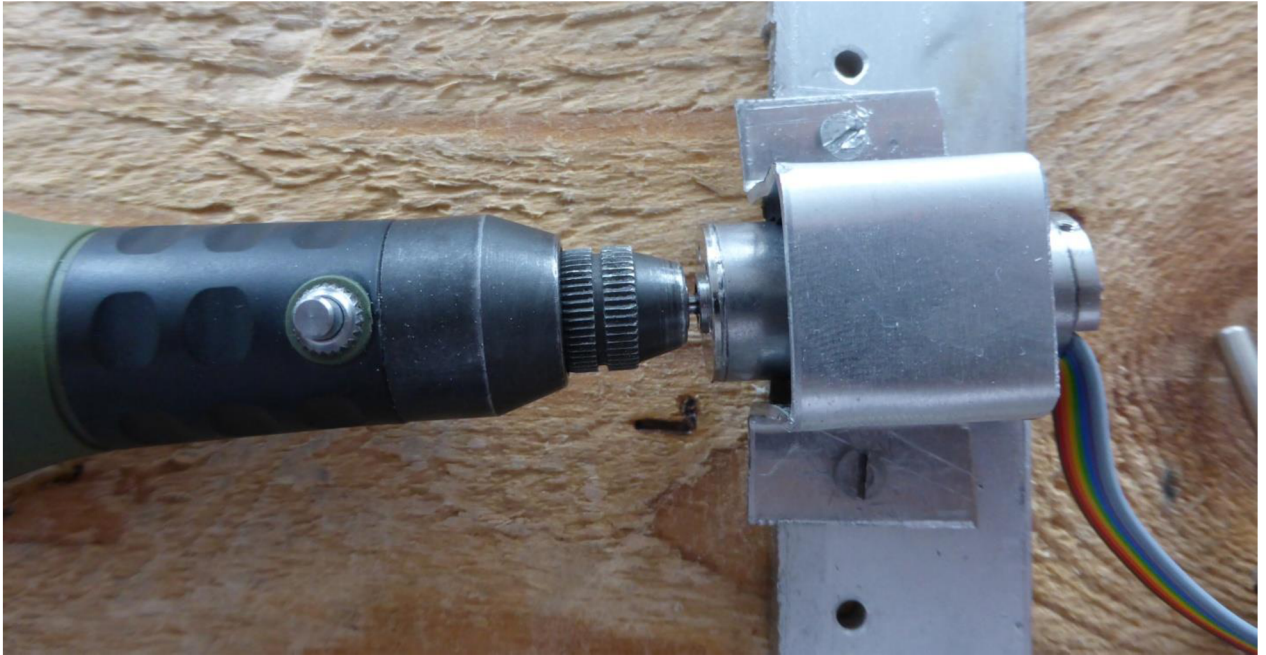
$$M_{stat} = Cfi \cdot I_{amax} \quad 10$$

$$M_z = K_m \cdot I_m = 18,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,48 = 26,344mNm \quad 11$$

Z výsledku rovnice 11 je patrné, že moment, kterým motor zatěžujeme je 2,8x vyšší než ve skutečnosti požadujeme. Tato skutečnost se při testu na oteplení driveru hodí, protože v případě kladného výsledku můžeme s naprostou jistotou prohlásit, že driver teplotně vyhovuje.



Obr. 33: Testovací pracoviště



Obr. 34: Detail spojení hřídelí

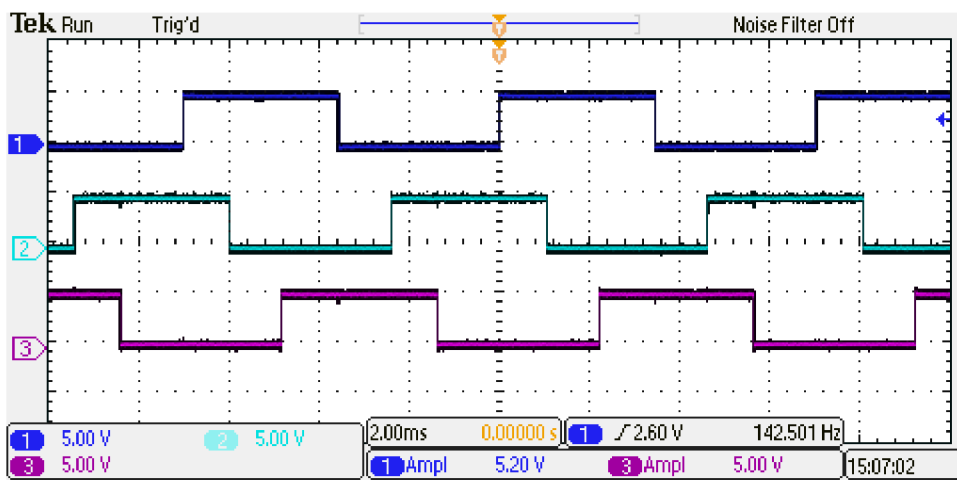
Oteplovací zkouška byla provedena při 2,8 násobku požadovaného zatěžovacího momentu, trvala 30 minut. Za tuto dobu teplota pouzdra driveru dosáhla 39°C. Teplota byla měřena stykovým teploměrem METRIX TH3208B. Můžeme tedy prohlásit, že při požadovaném statickém zatěžovacím momentu $M_{stat}=9,5mNm$ tento driver teplotně vyhoví.

Tab. 7: Seznam použitých přístrojů při testování driveru EC motoru

Přístroj	Výrobce	Typ	Sériové číslo
Laboratorní zdroj	DIAMETRAL	P230R51D	
Osciloskop	TEKTRONIX	DPO4054	DPO4054-C021314
Proudová sonda se zesilovačem	TEKTRONIX	TCPA300	B023112
Napěťová sonda	TEKTRONIX	P2221	-
Napěťová sonda	TEKTRONIX	P2200	-
Napěťová sonda	TEKTRONIX	P2221	-
Teploměr	METRIX	TH3208B	433020
Měřící sonda teploměru	METRIX	-	4981
Zátěž (vrtačka)	PROXXON	Micromont 50/E	28515

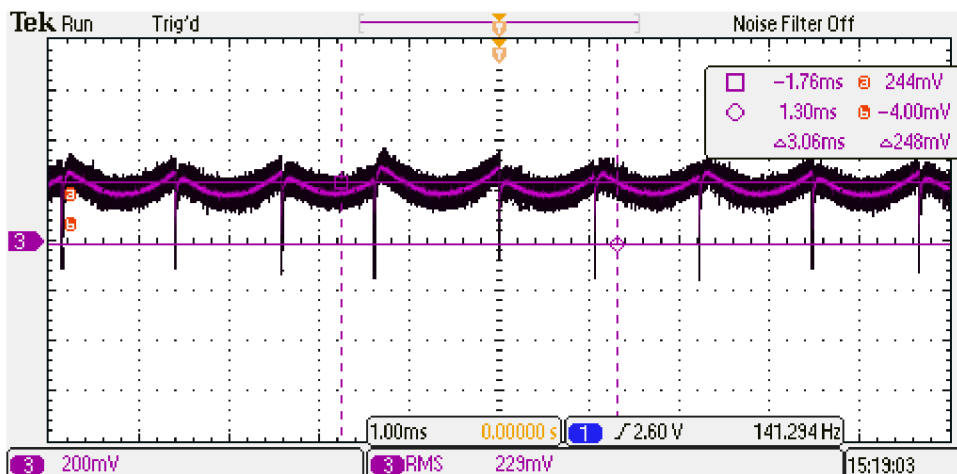
3.5 Průběh veličin v reálném EC motoru

Pro doplnění teoretického modelu tvořeného v kapitole 2 bylo při testování driveru zaznamenáno několik oscilogramů. Na Obr. 35 je vidět skutečný signál, který generují Hallové senzory při otáčení rotoru. Tento průběh odpovídá stavům Hallových senzorů použitých v komutační tabulce Tab. 5 pro levotočivý směr a můžeme potvrdit, že motor levotočivý směr vykonával i ve skutečnosti.



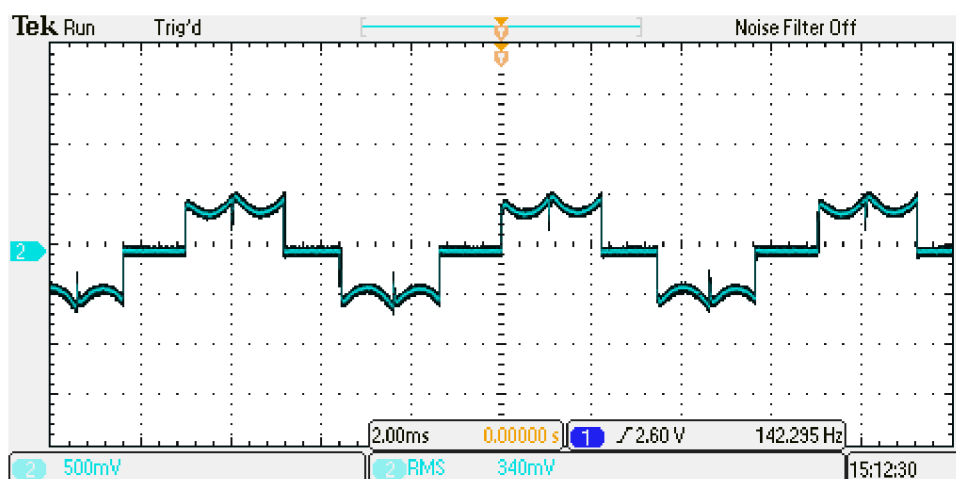
Obr. 35: Průběh signálu z Hallových senzorů

Na Obr. 36 je pomocí napěťové sondy zaznamenán průběh napětí na snímacím bočníku.



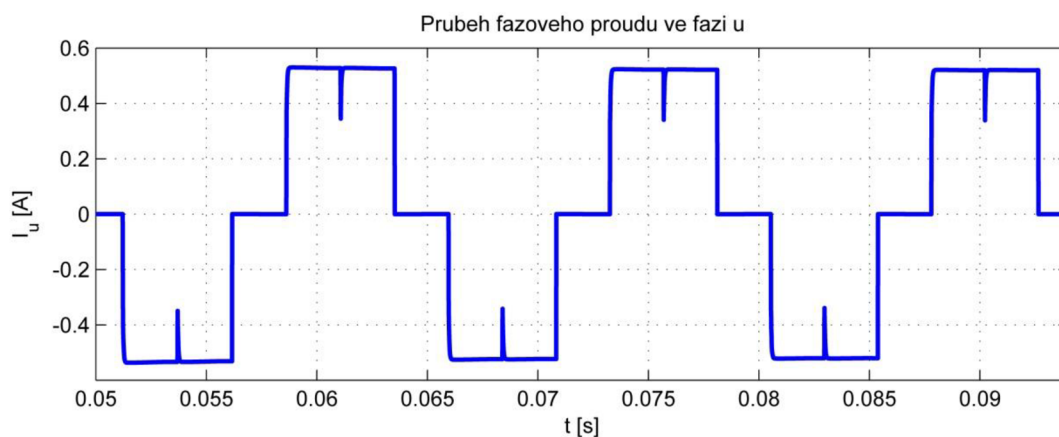
Obr. 36: Průběh napětí na snímacím bočníku

Na Obr. 37 je pomocí proudové sondy snímán průběh proudu ve fázi 1 EC motoru při zatížení. Z průběhu je patrná 120° komutace fází motoru. Na průběhu je vidět parabolické zvlnění, které je způsobené sinusovým průběhem indukovaného napětí použitého motoru. Použitý motor je sice EC, ale jeho indukované napětí spíše připomíná sinusoidu než lichoběžníkový tvar. Pravděpodobně je tento jev způsoben jiným rozložením vinutí ve statoru motoru.



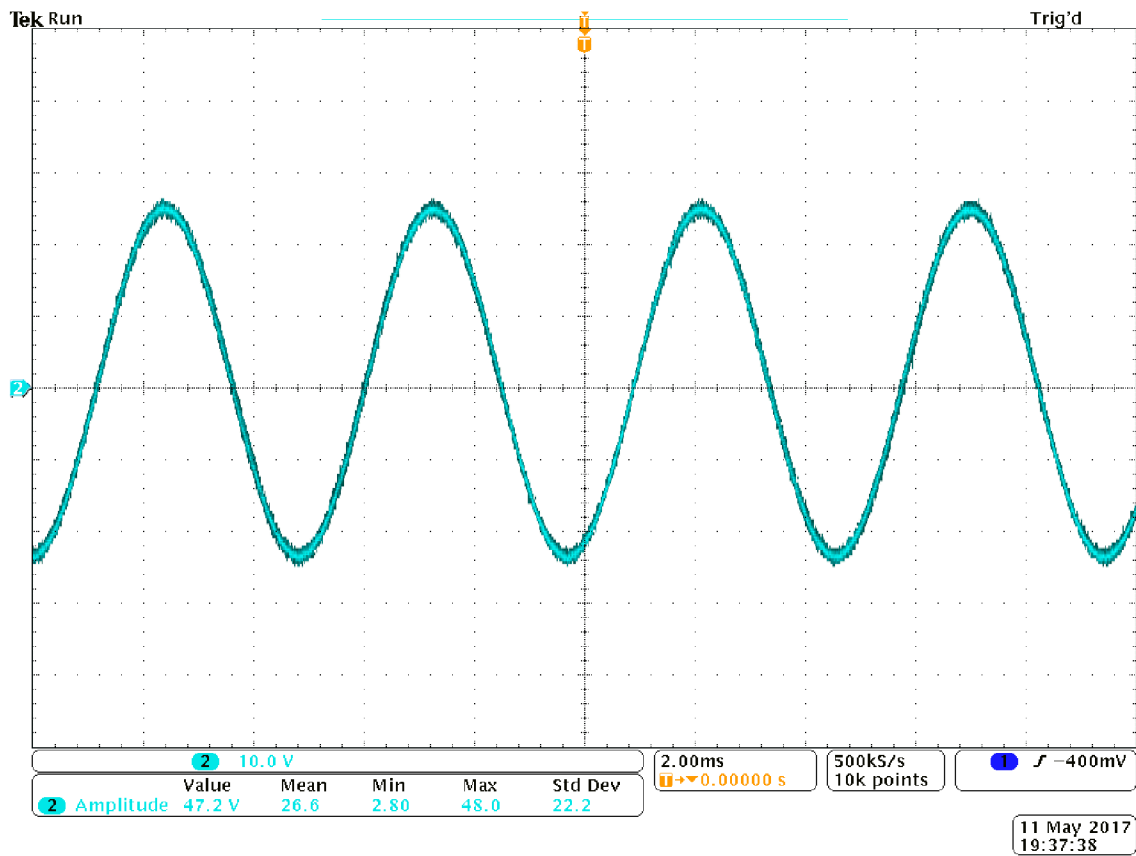
Obr. 37: Průběh fázového proudu

Pro vzájemné porovnání průběhu fázového proudu testovaného EC motoru a EC motoru ze simulace je na Obr. 38 zobrazen průběh fázového proudu ze simulace.

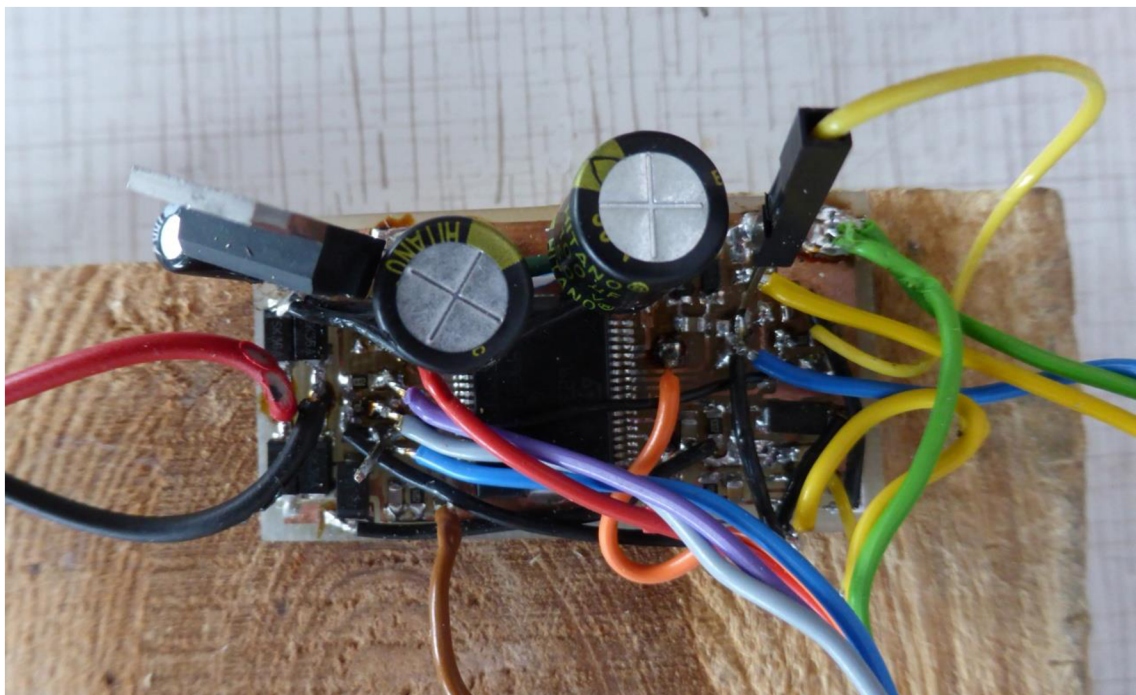


Obr. 38: Průběh fázového proudu - simulace

Abychom si ověřili tvrzení, že parabolické zvlnění je způsobené sinusovým tvarem indukovaného napětí, tak jsme sestavený pohon použili naopak. Vrtačku používanou dosud jako zátěž jsme použili k roztočení EC motoru a zobrazili si průběh sdruženého indukovaného napětí na osciloskopu. Obr. 39 je potvrzením našeho tvrzení.



Obr. 39: Indukované napětí použitého EC motoru



Obr. 40: Testovací vzorek řízení EC motoru

4 ZÁVĚR

Hlavní myšlenkou realizace modelu EC motoru v Matlab Simulink je možnost simulovat reálné chování motoru pomocí zadaných katalogových nebo naměřených hodnot parametrů motoru. Uživatel má možnost nasimulovat chování motoru na prázdno nebo při zvoleném zatížení a lépe pochopit chování celého systému.

V první kapitole této diplomové práce je popsána konstrukce a princip funkce EC motoru, zahrnuje také vysvětlení, jakým způsobem dochází ke snímání polohy rotoru, jejíž znalost je nutná ke správné komutaci jednotlivých fází napájecího měniče. Je zahrnuta také kapitola, která se zabývá permanentními magnety, které se v současné době v elektrotechnice využívají pro konstrukci EC či jiných motorů nebo mají využití v jiných aplikacích.

Druhá kapitola obsahuje návrh modelu EC motoru pomocí programu Matlab Simulink. Tento program funguje na implementaci matematických rovnic, kterými je možné popsat vytvářený model tak, aby se co nejvíce přibližoval skutečnosti. Simulink obsahuje knihovnu SimPowerSystem, která umožňuje sestavit elektrickou část modelu pomocí reálných součástek. Reálnými součástkami je sestaven model třífázového měniče, elektrická část EC motoru a řízení. Řízení EC motoru funguje na základě tříbitové informace o poloze rotoru a je sestaveno „analogově“ z logických obvodů AND a OR pomocí komutačních tabulek. Na první pohled se může jeho schéma zdát poněkud složité, ale při nahlédnutí na komutační tabulky je funkce ihned jasná. Řízení EC motoru by se dalo také realizovat pomocí naprogramovaného skriptu, který by opět plnil funkci dle komutačních tabulek.

Důležitou vlastností modelu je, že se v bloku, který popisuje mechanickou část motoru, konkrétně vznik momentu, podařilo vytvořit vzájemná elektromagnetická vazba mezi vektory statorového a rotorového magnetického toku, závislá na jejich okamžitém vzájemném úhlu natočení. Díky této vazbě se model svým chováním shoduje s chováním reálného EC motoru. V průběhu momentu motoru se díky této vazbě projevuje jeho zvlnění. Toto zvlnění vzniká tím, že rotorový magnetický tok se v motoru mění spojitě, zatímco statorový tok se mění skokově.

Dalším úspěšným krokem byla realizace lichoběžníkového tvaru indukovaného napětí. V modelu byla ponechána možnost přepnutí na sinusový průběh indukovaného napětí, který v reálném EC motoru jak jsme se sami měřeními přesvědčili, může také vzniknout.

Pro ověření chování modelu vůči skutečnému EC motoru, byly jako vstupní hodnoty zadány reálné katalogové parametry motoru od firmy Maxon EC-16 typ 283835. Tento motor byl zvolen z důvodu dalšího využití v této diplomové práci.

Použita byla hodnota fázového odporu a indukčnosti, jmenovité napětí, momentová a napěťová konstanta. Simulace byla provedena v obou směrech otáčení motoru a byla odečtena ustálená hodnota otáček a střední hodnota momentu motoru. Katalogová hodnota otáček výše uvedeného motoru je 7350 ot./min, ze simulovaného průběhu otáček motoru byla odečtena hodnota 7359 ot./min, která se jen nepatrně odchyluje od katalogové hodnoty. Jmenovitý moment výše uvedeného motoru je dle katalogu 8,19mNm, odečtená střední hodnota momentu ze simulovaného průběhu je 8,36mNm, ta sice katalogovou hodnotu mírně převyšuje, ale pro účely simulace je dostatečně přesná.

Dílním úkolem této diplomové práce bylo zrealizovat návrh elektroniky pro řízení EC motoru. EC motor byl vybrán na základě zadaných požadavků statického zatěžovacího momentu $M_{stat}=9,5mNm$, průměru hřídele 2mm a jmenovitého napětí motoru 24V. Průzkumem trhu byl vybrán motor firmy Maxon EC-max 16 typ 283835, jehož parametry sloužili i jako vstupní hodnoty simulace. Pro řízení tohoto motoru byl dle požadavků v kapitole 3.2 vybrán jednoúčelový obvod L6235PD od firmy STMicroelectronics, který má integrovanou řídicí a výkonovou část v jednom pouzdře. Tato varianta byla vybrána na základě požadavku zhotovit řízení v co nejmenších rozměrech. Návrh desky plošného spoje se podařilo minimalizovat do rozměrů 26x47mm. Po oživení řízení EC motoru, bylo nutné provést oteplovací zkoušku měniče, tato zkouška byla provedena při 2,8 násobku požadovaného zatěžovacího momentu. Zkouška trvala 30 minut a bylo měřeno oteplení pouzdra obvodu pomocí stykového teploměru. Během této zkoušky se pouzdro zahřálo na pouhých 39°C, test byl tedy vyhodnocen jako úspěšný.

Pro ověření znalostí byly při testování řízení EC motoru zaznamenány oscilogramy průběhů některých veličin. Zajímavým úkazem byl průběh fázového proudu motoru, kde na vrcholcích vzniklo parabolické zvlnění. Toto zvlnění, jak jsme si zobrazením na osciloskopu potvrdili, vzniká díky sinusovému tvaru indukovaného napětí motoru.

Literatura

- [1] BLDC Motor – Brushless DC Motor Introduction. *Mineba* [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/engineering/brushless_dc_motors_engineering/
- [2] Microchip. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals* [online]. [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: [http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20\(BLDC\)%20Motor%20Fundamentals.pdf](http://electrathonoftampabay.org/www/Documents/Motors/Brushless%20DC%20(BLDC)%20Motor%20Fundamentals.pdf)
- [3] Magnetické materiály. *Selos* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: <http://www.magnety.cz/magneticke-materialy/>
- [4] Magnety. *Enes* [online]. [cit. 2016-12-18]. Dostupné z: http://www.magnet-magnety.com/magnesy_ferrytowe.php
- [5] Melexis: *Microelectronic integrated systems* [online]. [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/Hall-US1881EUA.pdf>
- [6] OTRUBA, Jiří. *Implementace řízení BLDC motoru* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2016-12-20]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/18728/DP_OTRUBA.pdf?sequence=1. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Vedoucí práce Ing. David Vošmik, Ph.D.
- [7] KLÍMA, Bohumil. *Střídavé pohony*. Brno, 2011. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] *STmicroelectronics: DMOS driver for 3-phase brushless DC motor* [online]. 2014 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/e0/55/d7/b1/d5/06/47/96/CD00002347.pdf/files/CD00002347.pdf/jcr:content/translations/en.CD00002347.pdf>
- [9] SKALICKÝ, Jiří. *Elektrické regulované pohony*. Brno, 2007. Skriptum. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] GIERAS, Jacek F a Mitchell WING. *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002, xviii, 590 p. ISBN 08-247-0739-7.

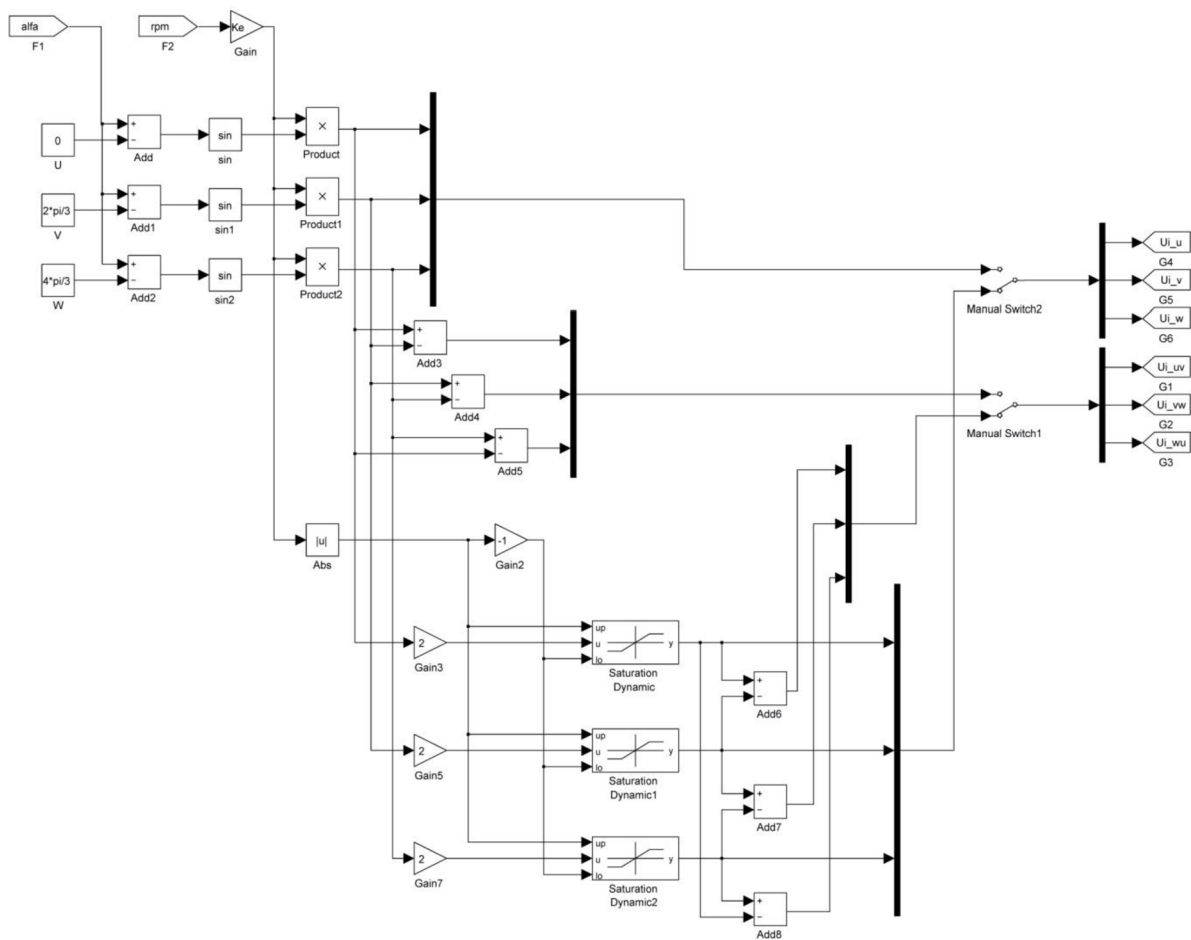
Seznam symbolů a zkratek

B_r	Remanentní indukce	[T]
B_{r20}	Remanentní indukce při teplotě 20°C	[T]
ϑ_{PM}	Teplota permanentního magnetu	[°C]
H_c	Koercitivní síla	[A/m]
H	Intenzita magnetického pole	[A/m]
K_m	Mechanická konstanta	[Nm/A]
K_e	Elektrická konstanta	[rpm/V]
I_u, I_v, I_w	Fázové proudy	[A]
α	Úhel natočení rotoru	[°]
M	Moment motoru	[Nm]
M_z	Moment zátěže	[Nm]
M_{stat}	Moment zátěže statický	[Nm]
I_0	Proud naprázdno	[A]
I_z	Proud při zátěži	[A]
ψ^*	Komplexně sdružený magnetický tok	[Wb]
$e^{j\theta}$	Jednotkový vektor v komplexní rovině	[-]
EC	Elektronicky komutovaný	
AlNiCo	Sloučenina hliník, nikl, kobalt	
AND	Člen logického součinu	
OR	Člen logického součtu	
DPS	Deska plošného spoje	

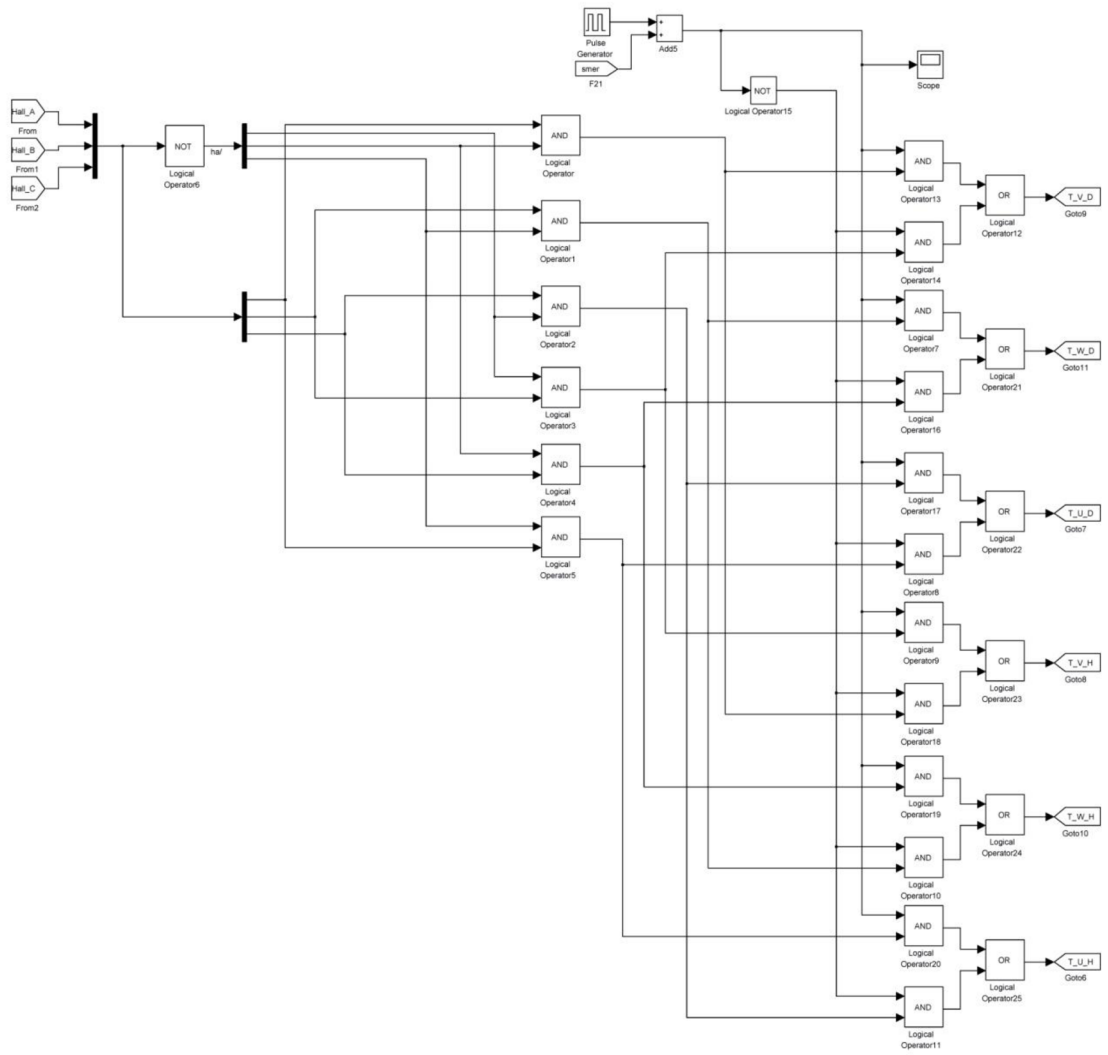
Přílohy

Příloha 1: Výpočet indukovaného napětí - zjednodušený a reálný průběh.....	47
Příloha 2: Schematické zapojení řízení pomocí logických funkcí AND a OR.....	48
Příloha 3: Schéma zapojení DPS pro řízení EC motoru	49
Příloha 4: Seznam použitých součástek	50

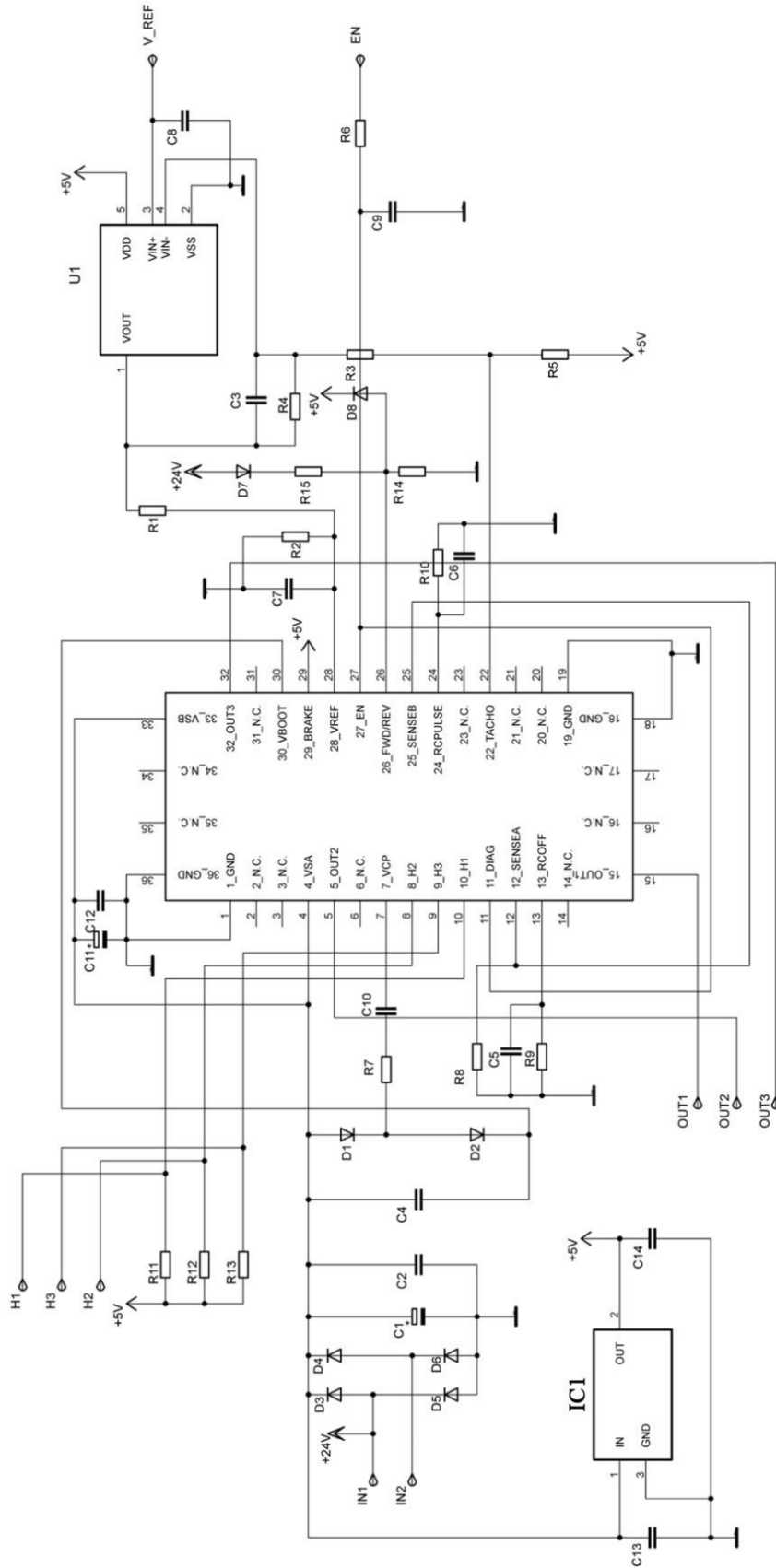
Příloha 1: Výpočet indukovaného napětí - zjednodušený a reálný průběh



Příloha 2: Schematické zapojení řízení pomocí logických funkcí AND a OR



Příloha 3: Schéma zapojení DPS pro řízení EC motoru



Příloha 4: Seznam použitých součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Označení	Hodnota	Pouzdro
R1	5k6Ω	0805	C1	100uF	0805
R2	1k8Ω	0805	C2	100nF	0805
R3	4k7Ω	0805	C3	220nF	0805
R4	1MΩ	0805	C4	220nF	0805
R5	1kΩ	0805	C5	1nF	0805
R6	100kΩ	0805	C6	10nF	0805
R7	100Ω	0805	C7	33nF	0805
R8	1Ω	0805	C8	100nF	0805
R9	33kΩ	0805	C9	5.6nF	0805
R10	47kΩ	0805	C10	10nF	0805
R11	10kΩ	0805	C11	100uF	0805
R12	10kΩ	0805	C12	100nF	0805
R13	10kΩ	0805	C13	0.33uF	0805
R14	2k2Ω	0805	C14	0.1uF	0805
R15	10kΩ	0805			
D1	1N4148W	SMD	U1	MCP6561	SOT23-5
D2	1N4148W	SMD	U\$1	L6235	PowerSO36
D3	SK36A	SMD	IC1	7805	DPAK-3
D4	SK36A	SMD			
D5	SK36A	SMD			
D6	SK36A	SMD			
D7	SK36A	SMD			