



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

Řízení BLDC motoru pomocí platformy ST Nucleo

BLDC Motor Control by ST Nucleo Kit

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná Elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Radan Krch

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krch** Jméno: **Radan** Osobní číslo: **456151**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra elektrotechnologie**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Řízení BLDC motoru pomocí platformy ST Nucleo

Název bakalářské práce anglicky:

BLDC Motor Control by ST Nucleo Kit

Pokyny pro vypracování:

- 1) Popište vlastnosti BLDC motoru
- 2) Popište metody řízení otáček BLDC motoru
- 3) Vytvořte simulační model malého pohonu s BLDC motorem
- 4) Seznamte se s kitem ST nucleo
- 5) Navrhněte algoritmus řízení BLDC motoru na platformě ST nucleo

Seznam doporučené literatury:

- [1] LEONHARD, Werner. Control of electrical drives. 3rd ed. Berlin: Springer, c2001. ISBN 3-540-41820-2.
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria. Moderné elektrické stroje. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] ST NUCLEO datasheets - dostupné online

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.02.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

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

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje a v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů psaní vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne:

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu této práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za poskytnutí testovacího přípravku, konzultací a rad při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato práce stručně popisuje elektrický pohon a jeho části. Práce se soustředí na popis polovodičového střídače, jako na hlavní komponent pro řízení, a BLDC motoru, který je popsán z konstrukčního a matematického hlediska. Další částí je vysvětlení řízení BLDC motoru se senzory nebo bez senzorů. Obsahem je také problematika jednotlivých způsobů řízení BLDC motorů. Cílem práce je vytvoření návrhu a simulace softwaru s bezsenzorovým měřením rychlosti pro mikrokontroler STM32F302R8T6 na řídicí desce STM32 NUCLEO.

Klíčová slova

bezkartáčový stejnosměrný motor, bezsenzorové řízení, BLDC, EC motor, elektrická komutace, komplementární spínání, pulsně šířková modulace, PWM, rotor, stator

Abstract

This bachelor thesis briefly describes an electric drive and its parts. The thesis focuses on a three-phase semiconductor inverter which is the main part for a motor control and a description of BLDC motor which from a structural and mathematical aspect. The next part is an explanation of a BLDC drive with or without sensors. In the thesis are included different ways and problematics of driving a BLDC motor. The aim of the thesis is to make a design and a simulation of software without sensor measuring by a microcontroller STM32F302R8T6 on the control board STM32 NUCLEO.

Keywords

BLDC, Brushless direct current motor, complementary switching, EC motor, electric commutated, PWM, pulse width modulation, rotor, sensorless driving, stator

Obsah

1. Úvod	4
2. Elektrický pohon	5
3. Spínací přístroje	6
3.1. Rozdělení spínacích přístrojů	6
4. Polovodičové měniče	7
4.1. Usměrnovače	7
4.2. Střídače	8
4.2.1. Napětový střídač	8
4.2.2. Proudový střídač	9
4.3. Měníč frekvence	9
4.3.1. Přímý měnič frekvence	10
4.3.2. Nepřímý měnič frekvence	10
5. Elektrické stroje	11
6. BLDC motor	12
6.1. Stator	12
6.1.1. Stator s drážkami pro vinutí	12
6.1.2. Stator bez drážek pro vinutí	12
6.2. Rotor	13
6.2.1. Vnější rotor	13
6.2.2. Vnitřní rotor	13
6.3. Vinutí	14
6.3.1. Zpětná elektromotorická síla	14
6.4. Princip činnosti BLDC motoru	15
6.5. Matematický model BLDC motoru	17
7. Řídící část	20
7.1. Systémy s otevřenou smyčkou	20
7.2. Systémy s uzavřenou smyčkou	20
7.2.1. Systémy se zápornou zpětnou vazbou	20
7.3. Řízení BLDC motoru pomocí senzorů	21
7.3.1. Hallovy sondy	21
7.3.2. Optický enkodér	22
7.4. Řízení motoru bez senzorů	23
7.4.1. Měření pomocí průchodu zpětné elektromotorické síly nulou	23
7.5. Pulsně šířková modulace (PWM)	24
7.5.1. Nezávislé spínání	25
7.5.2. Komplementární spínání	25
7.6. Řídící deska NUCLEO-F302R8	26
7.7. Řídící výkonový deska X-NUCLEO-IHMO7M1	27
8. Programová simulace	28
9. Vývojové prostředí	32
9.1. STM32CubeMX	32
9.1.1. Inicializace AD převodníku v STM32 CubeMX	32
9.1.2. Inicializace Timeru v STM32 CubeMX	34
9.2. Vývojové prostředí Keil μ Vision5	35
9.3. STMStudio	36
10. Programové řízení BLDC motoru	37
10.1. Vytvoření řídicího Softwaru	40
11. Naměřené průběhy	41
12. Závěr	43

Seznam obrázků

Obrázek 1	blokové schéma elektrického pohonu.....	5
Obrázek 2	schematická značka usměrňovače	7
Obrázek 3	schematická značka střídače	8
Obrázek 4	zobrazené průběhy napětí fází na výstupu střídače při obdélníkovém řízení.....	9
Obrázek 5	třífázový napěťový střídač	9
Obrázek 6	schéma nepřímého měniče frekvence s napěťovým meziobvodem	10
Obrázek 7	ukázka statoru s drážkami a statoru bez drážek.....	12
Obrázek 8	ukázka tvarů a rozložení vnějšího rotoru.....	13
Obrázek 9	ukázka rozdílu uložení rotoru vnějšího a rotoru vnitřního	14
Obrázek 10	zobrazení zapojení vinutí do hvězdy a do trojúhelníka	14
Obrázek 11	ukázka průběhu BEMF u lichoběžníkového a sinusového vinutí.....	15
Obrázek 12	vyobrazený průchod proudu v každém kroku při šestikrokovém řízení.....	16
Obrázek 13	zobrazený průběh napětí v šestikrokovém řízení BLDC motoru	16
Obrázek 14	náhradní schéma statoru BLDC motoru	17
Obrázek 15	schéma záporné zpětné vazby.....	20
Obrázek 16	zobrazení průběhu při změně požadované hodnoty.....	21
Obrázek 17	pravdivostní tabulka u šestikrokového řízení a sepnutí fází.....	21
Obrázek 18	zobrazení odezvy Hallovy sond	22
Obrázek 19	optický enkoder	22
Obrázek 20	zobrazené signály průchodem nulou	23
Obrázek 21	schémata zapojení pro měření průchodu nulou BEMF	24
Obrázek 22	zobrazený průběh řídicích pulsů ve střídači při komplementárním řízením	25
Obrázek 23	řídicí deska STM32 Nucleo-F302R8T6,	26
Obrázek 24	výkonová řídicí deska X-NUCLEO-IHM07M1	27
Obrázek 25	ukázka bloků Synchronního motoru a střídače	28
Obrázek 26	funkční blok „Decoder“, Matlab Simulink.....	29
Obrázek 27	ukázka signálů	29
Obrázek 28	ukázka funkce „Gates“, Matlab Simulink	30
Obrázek 29	zobrazené průběhy řídicích signálů	30
Obrázek 30	konečná podoba simulace řízení BLDC motoru.....	31
Obrázek 31	ukázka inicializace pinů STM32CubeMX.....	32
Obrázek 32	STM32 CubeMX ukázka nastavení módu pro kanál AD převodníku.....	33
Obrázek 33	STM32 CubeMX ukázka nastavitelných parametrů AD převodníku.....	33
Obrázek 34	STM32 CubeMX ukázka inicializace kanálu Timeru 1	34
Obrázek 35	STM32 CubeMX ukázka inicializace Timeru 1	35
Obrázek 36	ukázka programu Keil μ Vision5.....	35
Obrázek 37	ukázka programu STMStudio.....	36
Obrázek 38	zobrazení sepnutí fází v šestikrokovém řízení.....	37
Obrázek 39	vývojový diagram pro rozběh motoru	38
Obrázek 40	vývojový diagram programu pro řízení BLDC motoru	39
Obrázek 41	zobrazené průběhy BEMF dvou fází BLDC motoru	41
Obrázek 42	zobrazené průběhy PWM, "Enable", proudu a BEMF	41
Obrázek 43	zobrazené průběhy PWM, „Enable“ a proudu.....	42

Seznam rovnic

Rovnice 1 Zpětné elektromotorické napětí	15
Rovnice 2 Fázové napětí U_a	17
Rovnice 3 Fázové napětí U_b	17
Rovnice 4 Fázové napětí U_c	17
Rovnice 5 Zjednodušený vztah pro fázové napětí U_a	18
Rovnice 6 Zjednodušený vztah pro fázové napětí U_b	18
Rovnice 7 Zjednodušený vztah pro fázové napětí U_c	18
Rovnice 8 Zpětná elektromotorická síla na fázi A	18
Rovnice 9 Zpětná elektromotorická síla na fázi B	18
Rovnice 10 Zpětná elektromotorická síla na fázi C	18
Rovnice 11 Spřažený magnetický tok fáze A	19
Rovnice 12 Spřažený magnetický tok fáze B.....	19
Rovnice 13 Spřažený magnetický tok fáze C.....	19
Rovnice 14 Hnací moment	19

1. Úvod

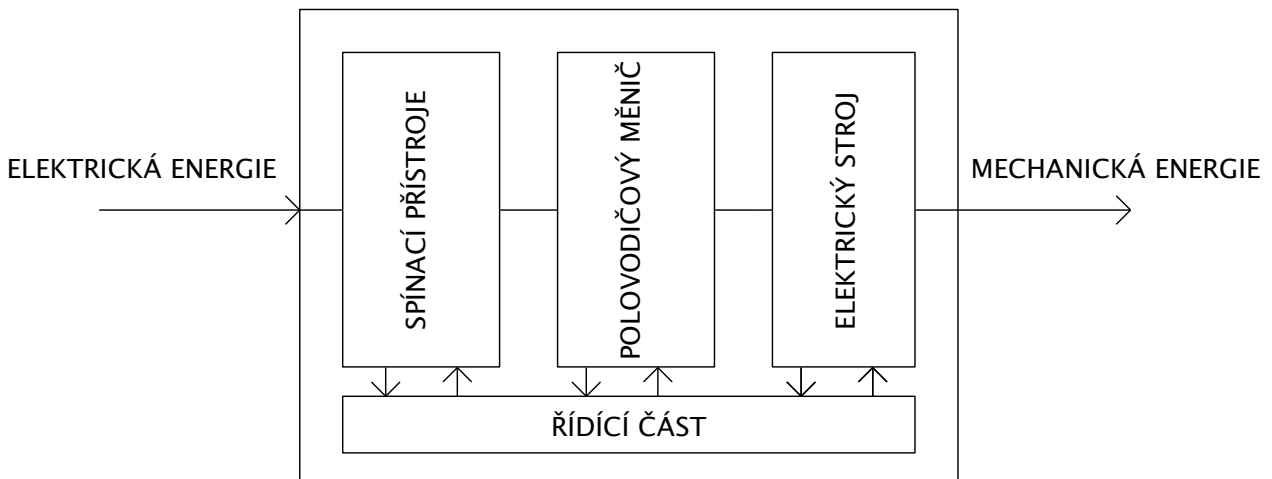
V této práci se zaměřuji na pohon bezkartáčového stejnosměrného motoru také zvaný jako BLDC (BLDC – Brushless direct current). BLDC motory jsou synchronní stroje, které jsou napájeny stejnosměrným napětím s polovodičovým střídačem v meziobvodu. BLDC motory se v současné době stávají stále více využívanými elektrickými točivými stroji. Využívané jsou hlavně pro své výhody, oproti stejnosměrným motorům. Oproti běžným stejnosměrným motorům BLDC motory používají elektrickou komutaci. Při tomto typu komutace nevzniká jiskření jako u běžných stejnosměrných motorů s mechanickou komutací. Díky absenci jiskření se mohou používat v oblastech s nebezpečím plyny a citlivým prostředím. Pro své výhody se používají například v oblastech medicíny nebo letectví.

V teoretické části bakalářské práce se zaměřuji na popis jednotlivých částí elektrického pohonu potřebných k řízení BLDC motoru. Práce obsahuje i stručný popis zařízení, která je nutná zařadit mezi motor na střídavou síť. Zařízením, která jsou hlavním komponentem pro řízení elektricky komutovaným strojům je věnována větší pozornost, jako je například třífázový střídač a bezkartáčový motor. Popis BLDC motoru se věnuje elektrickým, konstrukčním i matematickým parametrům stroje.

Součástí práce je nastínit tvorbu programu na vývojové desce STM32 Nucleo a vytvoření simulace běhu motoru. Pro tvorbu programu je využito několika vývojových prostředí, která slouží pro rychlejší tvorbu a snadnější ladění programu. Pro řídicí část je použit procesor ARM STM32F302R8. Tento typ desky s procesorem se používají pro testování prototypů.

2. Elektrický pohon

„Elektrický pohon je soustava, vytvořená z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení pro elektromechanickou přeměnu energie a pro vytváření, přenos a zpracování signálů řídicích tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní řídicí signály jsou určeny obsluhou nebo nadřazením řídicím, regulačním nebo automatizačním členem a jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu.“¹



Obrázek 1 blokové schéma elektrického pohonu

Elektrický pohon má své výhody i nevýhody. Při aplikaci elektrického pohonu je třeba uvážit jeho hlavní výhody a nevýhody oproti jiným zdrojům mechanické energie.

Výhody elektrického pohonu:

- velmi široké pásmo výkonů
- široký rozsah momentů
- jednoduché řízení
- neprodukuje škodlivé látky ani zplodiny při provozu
- dlouhá životnost
- jednoduchá obsluha a údržba

Nevýhody elektrického pohonu:

- elektrický pohon musí být neustále připojen ke zdroji
- malý výkon oproti hmotnosti pohonu [7]

¹ Koblíček, P.; Pavelka, J. Elektrické pohony a jejich řízení, České vysoké učení technické v Praze, 2016, str. 5

3. Spínací přístroje

Spínací přístroje jsou zařízení, která neslouží pouze k odstavení pohonu od zdroje elektrické energie, ale také zajišťují řídicí, ochranné a jistící funkce.

3.1. Rozdělení spínacích přístrojů

Přístroje se od sebe rozlišují podle schopnosti rozpojení obvodu při proudění elektrického proudu. Spínací přístroje se dělí podle schopnosti zhaset elektrický oblouk na:

- Vypínače – Přístroj, který zapíná a vypíná elektrický proud při zatížení. Dokáže vypnout jmenovité i zkratové proudy.
- Odpínače – Vypíná elektrický proud při zatížení. Dokáže vypnout pouze jmenovité proudy.
- Odpojovače – Slouží pouze k viditelnému spojení, nebo rozpojení, částí určených k vedení elektrického proudu. Přístroj není určen k vypínání zatíženého obvodu.

4. Polovodičové měniče

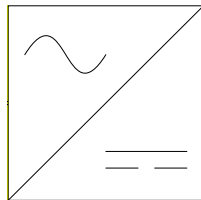
Polovodičové měniče se používají pro změnu charakteru vstupní elektrické energie. Jsou aplikovány v pohonech podle potřeby elektrického motoru a dle funkce pohonu. Měniče jsou zařízení složené z polovodičových součástek například z diod, tyristorů nebo tranzistorů. Nejběžnějšími typy měničů v elektrických pohonech jsou usměrňovače a střídače.

4.1. Usměrňovače

Usměrňovače slouží k vytvoření stejnosměrného napětí a proudu ze střídavých napětí a proudů. Ve své činnosti nepotřebují žádný vypínací obvod, protože jejich komutaci zajišťuje střídavé napětí sítě. Usměrňovače se vyrábí v široké škále výkonů od malých součástek pro povrchovou montáž po velká zařízení s výkony až stovky MW [8]. Usměrňovače se používají při řízení BLDC motorů jako součást frekvenčních měničů ve společném zapojení se střídači.

Rozdělují se podle:

- a) typu použitých polovodičových součástek:
 - diody (neřízený usměrňovač)
 - tyristory a diody (polořízený usměrňovač)
 - tyristory, tranzistory (řízené usměrňovače)
- b) počtu vstupních fází:
 - jednofázové
 - třífázové
 - vícefázové
- c) zapojení
 - můstkové
 - uzlové



Obrázek 2 schematická značka usměrňovače

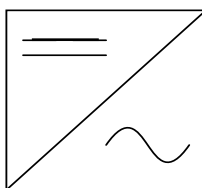
U řízených a polořízených usměrňovačů jsou tyristory nebo tranzistory spínané pomocí pulsů, které jsou zpožděné o úhel α . Velikost úhlu α se měří od průchodu napájecího napětí nulou [8]. Pro menší výkony se používají jednofázové usměrňovače a ve výkonové elektronice jsou běžnější třífázové.

4.2. Střídače

Střídače se používají pro přeměnu elektrického stejnosměrného proudu a napětí na střídavý charakter těchto veličin. Střídače mají mnoho způsobů zapojení a použití. Jedno z možných dělení střídačů je podle zdroje napájení, ale střídače se také rozlišují podle způsobu komutace [8].

Dělení střídačů podle:

- a) typu zdroje napájení
 - napěťový střídač
 - proudový střídač
- b) typu komutace
 - vnější komutace – střídač není vybaven komutačními obvody, sama střídavá síť je zdrojem komutačního napětí
 - vlastní komutace – ke komutaci dochází v libovolném okamžiku díky pomocnému obvodu.
 - měkká komutace – ke komutaci součástek dochází, když součástka nevede proud
- c) počtu fází
 - jednofázové
 - třífázová
 - vícefázové

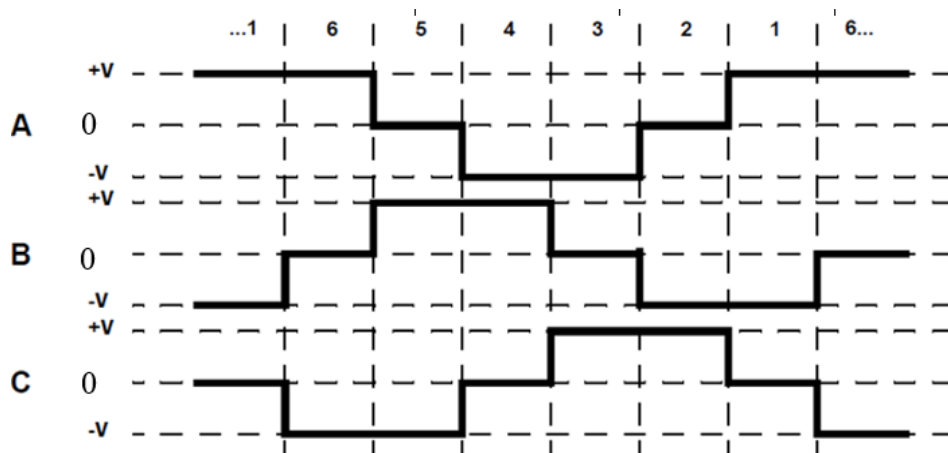


Obrázek 3 schematická značka střídače

4.2.1. Napěťový střídač

V obvodě paralelně s napěťovým střídačem, ve stejnosměrném obvodě, se používá kondenzátor jako zdroj špičkové energie. Výstupní napětí a frekvence jsou závislé na vypínatelných polovodičových součástkách ve střídači. Ve střídačích pro velké výkony se používají GTO tyristory ale i výkonové tranzistory IGBT nebo IGCT [8]. Pro řízení motorů menších výkonů se používají velmi často tranzistory MOSFET, které mají menší spínací a vypínací ztráty, z důvodu menších vypínacích časů. Pomocí přerušovaného spínání tranzistorů se zmenšuje

efektivní hodnota napětí a proudů. Tato metoda snižování napětí a proudů se nazývá pulsně šířková modulace (PWM – Pulse Width Modulation).

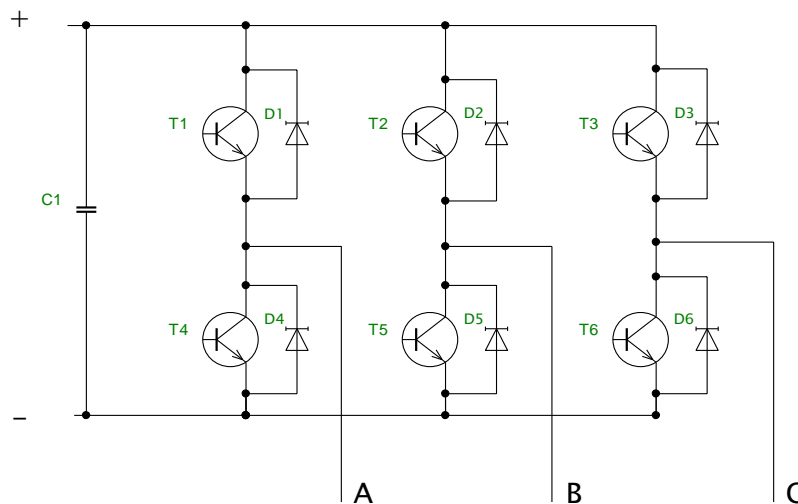


Obrázek 4 zobrazené průběhy napětí fází na výstupu střídače při obdélníkovém řízení, upraveno [2]

4.2.2. Proudový střídač

Ve stejnosměrném obvodu je umístěna tlumivka. U tohoto typu střídače je tvar proudu ovlivněn velkou indukčností a má obdélníkový tvar. Kvůli častým přerušením proudu v indukčnosti se umísťují kondenzátory pro přepětové ochrany ke GTO tyristorům a tranzistorům [8].

Pro aplikace řízení BLDC motorů jsou častěji využívány napět'ové střídače.



Obrázek 5 třífázový napět'ový střídač

4.3. Měníč frekvence

Měníče frekvence slouží k přeměně proudu a napětí na vstupu na výstupní proud a napětí o jiné frekvenci. Jejich využití je například pro snížení nárazových proudů při rozběhu motorů a řízení otáček. Pomocí měničů frekvence lze řídit motory od desítek otáček za minutu

až po stovky tisíc otáček za minutu [8]. Měníče frekvence se uplatňují nejen pro pohony, ale také pro snížení hmotnosti vstupního transformátoru.

Měníče frekvence se dělí do dvou skupin:

- přímé měniče frekvence
- nepřímé měniče frekvence

4.3.1. Přímý měnič frekvence

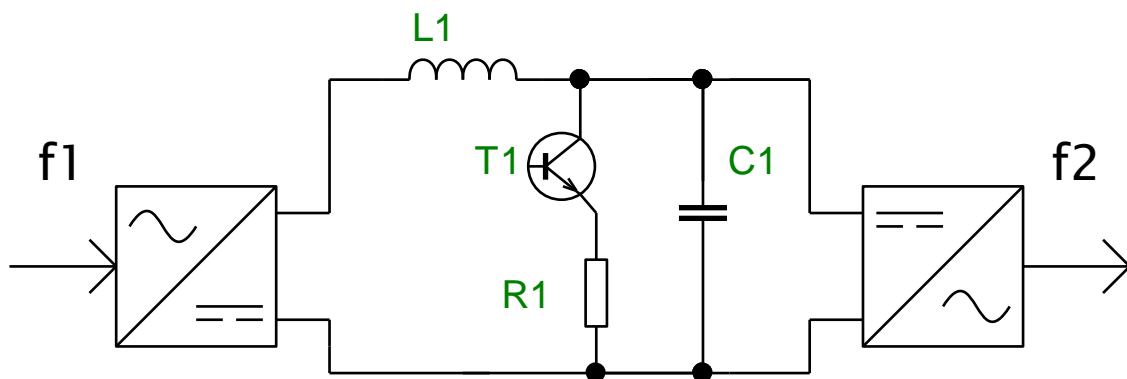
Přímý měnič frekvence nemá žádný stejnosměrný meziobvod. Obvod tohoto měniče je složen ze dvou antiparalelně zapojených řízených usměrňovačů. Antiparalelní zapojení umožňuje přivádění napětí na zátěž v opačných polaritách. Při řízení přímého frekvenčního měniče lze vytvořit pouze výstupní parametry o frekvencích nižších, než je vstupní frekvence.

4.3.2. Nepřímý měnič frekvence

Nepřímý měnič frekvence je složen z usměrňovače, stejnosměrného meziobvodu a střídače. Stejnoscsměrný obvod může být s napěťovým meziobvodem nebo proudovým meziobvodem. Pro řízení BLDC motorů je více používaný měnič s napěťovým meziobvodem.

Existuje velké množství druhů zapojení střídačů a usměrňovačů. Záleží také na smyslu toku energie. Při krátkých méně častých opačných proudech se používá „ztrátová“ metoda, kdy se do stejnosměrného meziobvodu zapojí tranzistor s odporem a při průchodu opačného proudu se energie „spálí“ v odporu. Při dlouhodobě opačném toku energie se k usměrňovači zapojí reverzační antiparalelní řízený usměrňovač.

Tlumivka L1 na obrázku 6 je použita pro impedanční oddělení výstupního napětí usměrňovače a kondenzátoru [8].



Obrázek 6 schéma nepřímého měniče frekvence s napěťovým meziobvodem, ve „ztrátové metodě“

5. Elektrické stroje

Pojem elektrické stroje zahrnuje točivé i netočivé zařízení pracující s elektrickým proudem a napětím. Mezi netočivé stroje se řadí hlavně transformátory. Točivé stroje pracují jak s elektrickou energií, tak mechanickou. Točivé stroje se rozdělují podle typu vstupní a výstupní energie.

Možné rozdělení točivých strojů je podle druhu napájení. Stroje, které pracují se stejnosměrným proudem a napětím se nazývají dynama a stejnosměrné motory. Alternátory, synchronní a asynchronní stroje pracují se střídavým napětím a proudem.

Dynama, alternátory přeměňují vstupní mechanickou energii na energii elektrickou. Motory vytvářejí mechanický pohyb ze vstupní elektrické energie. Točivé elektrické stroje mohou přecházet z motorického stavu do generatorického stavu, záleží na rychlosti otáčení rotoru stroje.

6. BLDC motor

BLDC motor je typ synchronního motoru, to znamená, že magnetické pole vyvolané státorem a magnetické pole rotoru se otáčí ve stejné frekvenci.

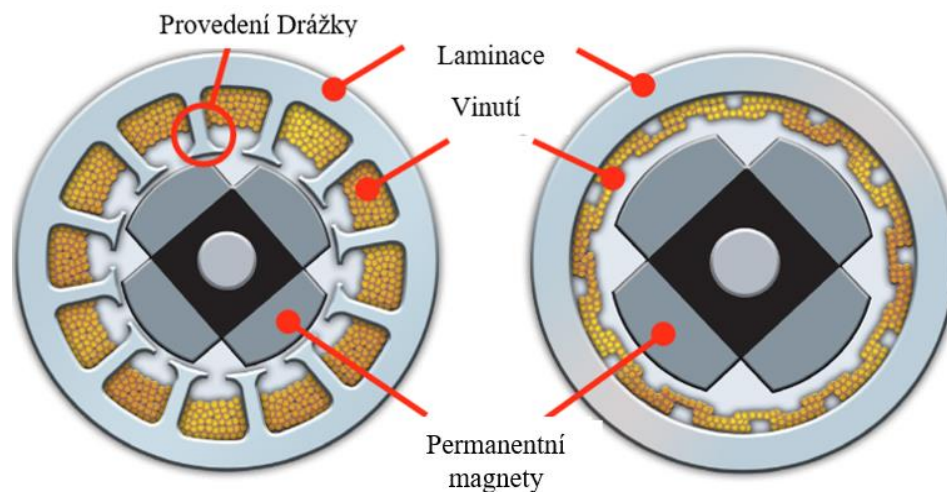
6.1. Stator

Stator BLDC motoru je vyroben ze složených izolovaných plechů, na kterých je namotané vinutí statoru. Používají se statory s drážkami pro vinutí statoru, nebo bez drážek pro vinutí.

6.1.1. Stator s drážkami pro vinutí

Tento typ statoru je složen z plechů o tloušťce okolo 0,5 mm vzájemně od sebe izolovaných a v této konstrukci jsou vytvořeny drážky pro vinutí.

Statory s drážkami pro vinutí dosahují větších momentů než statory bez drážek z důvodů menší vzduchové mezery, čímž je účinněji uzavřen magnetický obvod. Při posunu magnetu kolem výstupu drážky, je magnet více přitahován k výstupu drážky než k vzduchové mezeře. Toto způsobuje nerovnoměrný pohyb rotoru. Důsledkem je zvlnění hnacího momentu, zvýšení hlučnosti stroje a snížení účinnosti [3].



Obrázek 7 ukázka statoru s drážkami (nalevo) a statoru bez drážek (napravo)

6.1.2. Stator bez drážek pro vinutí

Druhý typ statoru je vytvořen z vinutí navinutého do válcového tvaru a poté je na stator nanášena izolace například, epoxidová pryskyřice.

Vinutí ve statoru bez drážek má menší indukčnost, tudíž mohou motory s tímto státorem dosahovat větších rychlostí, méně vibrací a plynulejší běh motoru. Avšak statory bez drážek

potřebují větší počet vinutí pro kompenzaci ztrát ve vzduchových mezerách, které na druhou stranu snižují ztráty vířivými proudy. [3]

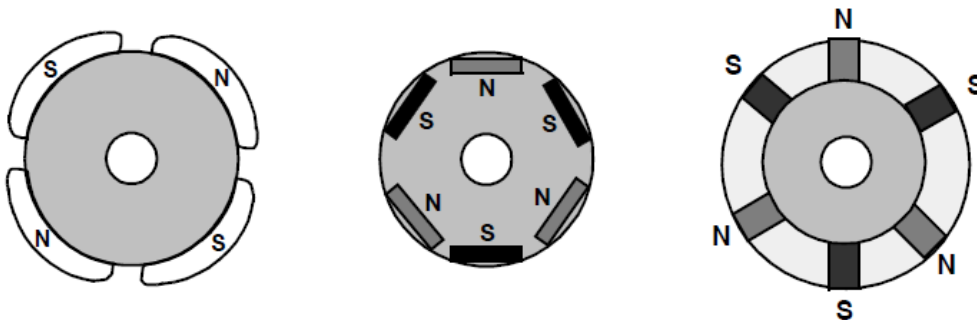
6.2. Rotor

Rotor v BLDC motoru se vyrábí z permanentních magnetů. Na rotoru nejčastěji bývá 2 až 8 párů magnetů. Použitý magnet je vybrán pro rotor podle požadovaných magnetických vlastností. Nejčastěji se používají ferity pro výrobu permanentních magnetů, nebo magnety ze vyrobené ze vzácných zemin. Tyto zeminy mají lepší magnetické vlastnosti a umožňují zmenšení motoru při zachování momentu. Použití rotoru se také liší v usazení rotoru, dělí se na rotor vnitřní a vnější [11].

6.2.1. Vnější rotor

Vnější rotor má uložené permanentní magnety na vnitřní straně rotoru. Rotor se otáčí kolem vnitřního statorového vinutí.

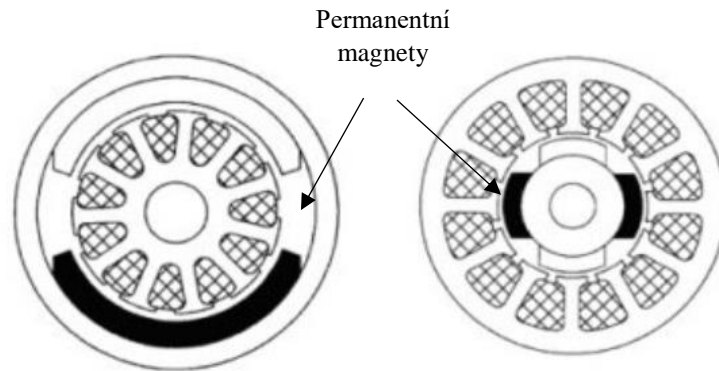
Tato konstrukce bývá větší, než u klasických typů stejnosměrných motorů to znamená, že BLDC motory s vnějším rotorem mají větší moment setrvačnosti. Výhodou vnějšího rotoru je, že je možné dosáhnout požadované magnetické indukce ve vzduchové mezeře s většími a méně kvalitními magnety. Nevýhodou je, že magnety jsou většinou připevněné na pouzdro, které z velké části překrývá stator. Překrytím statoru pouzdrem je zabráněno odvodu tepla [1].



Obrázek 8 ukázka tvarů a rozložení vnějšího rotoru

6.2.2. Vnitřní rotor

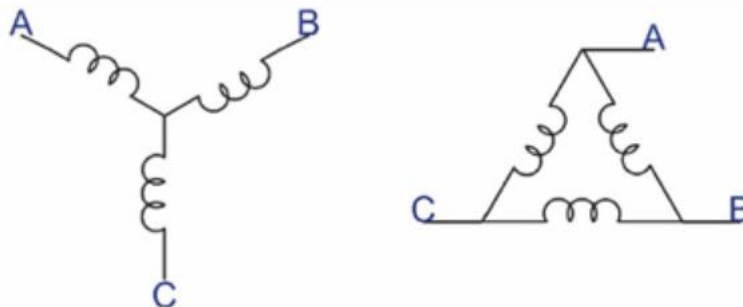
V této konstrukci je rotor umístěn uvnitř statoru. Pro omezené možnosti velikosti rotoru je zapotřebí pro lepší magnetické vlastnosti použít lepší permanentní magnety. Toto uspořádání motoru zlepšuje možnosti odvodu tepla. BLDC motory s vnitřním rotorem se vyrábí v menších provedeních, čímž se zmenšuje moment setrvačnosti [1].



Obrázek 9 ukázka rozdílu uložení rotoru vnějšího (nalevo) a rotoru vnitřního (napravo)

6.3. Vinutí

BLDC motory jsou nejčastěji provedeny s třífázovým zapojením spojeným do hvězdy. Vinutí lze spojit i do trojúhelníka. Každé vinutí je umístěno ve statoru, aby vytvořili sudý počet pólů. Nejčastěji používané statorové vinutí jsou sinusové a lichoběžníkové. Jejich rozdělení je dáno podle rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře. U sinusového vinutí má moment plynulejší průběh. Avšak pro výrobu sinusového vinutí je zapotřebí větší množství mědi. [11]



Obrázek 10 zobrazení zapojení vinutí do hvězdy (nalevo) a do trojúhelníka (napravo)

6.3.1. Zpětná elektromotorická síla

Při otáčení rotoru, všechna vinutí vytvářejí napětí nazývané Zpětná elektromotorická síla (BEMF – back electromotive force). Toto napětí, podle Lenzova pravidla, je opačné vůči polaritě napětí zdroje. Výsledné napětí vinutí lze vypočítat jako rozdíl napětí zdroje a napětí vytvořené zpětnou elektromotorickou silou. Napětí indukované do vinutí závisí na těchto faktorech:

- na rychlosti otáčení rotoru
- intenzitě magnetického pole vytvořeného rotorem
- počtu závitů ve statorovém vinutí

Zpětná elektromotorická síla BEMF je dána vztahem:

$$BEMF = N * l * r * B * \omega \quad [V] \quad (1)$$

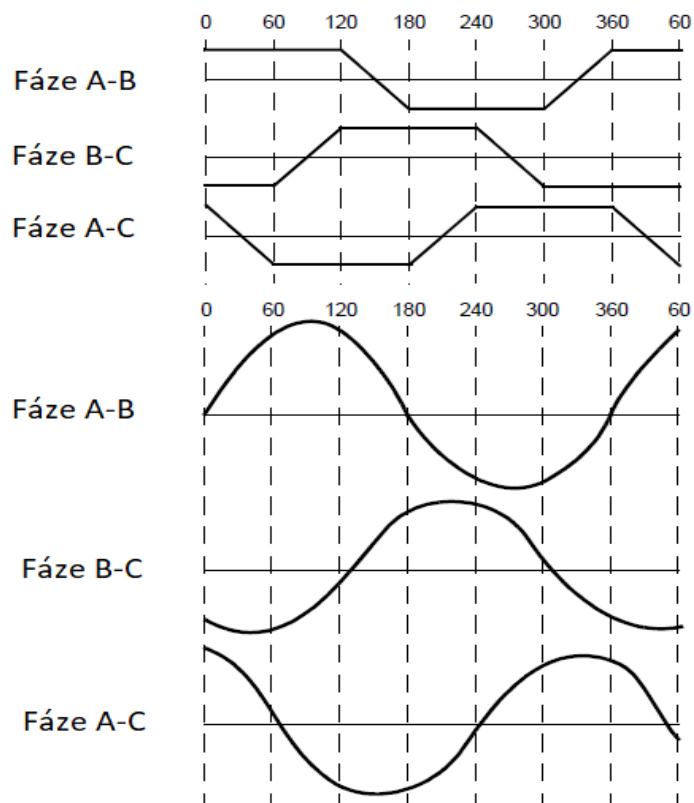
N.....počet závitů fáze [-]

l.....délka rotoru [m]

r.....poloměr rotoru [m]

B.....Magnetická indukce [T]

ωúhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]



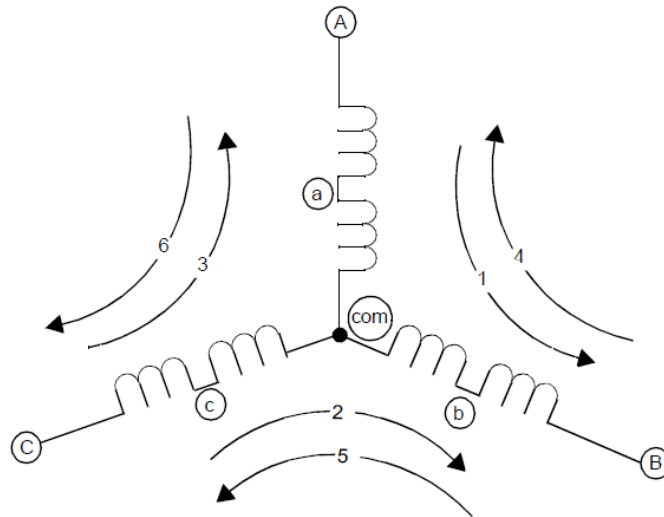
Obrázek 11 ukázka průběhu BEMF u lichoběžníkového vinutí (nahore) a sinusového vinutí (dole)

6.4. Princip činnosti BLDC motoru

Elektrická energie je přeměněna na mechanickou pomocí magnetických přitažlivých sil mezi permanentními magnety na rotoru a rotujícím magnetickým polem vytvořeným pomocí statorového vinutí.

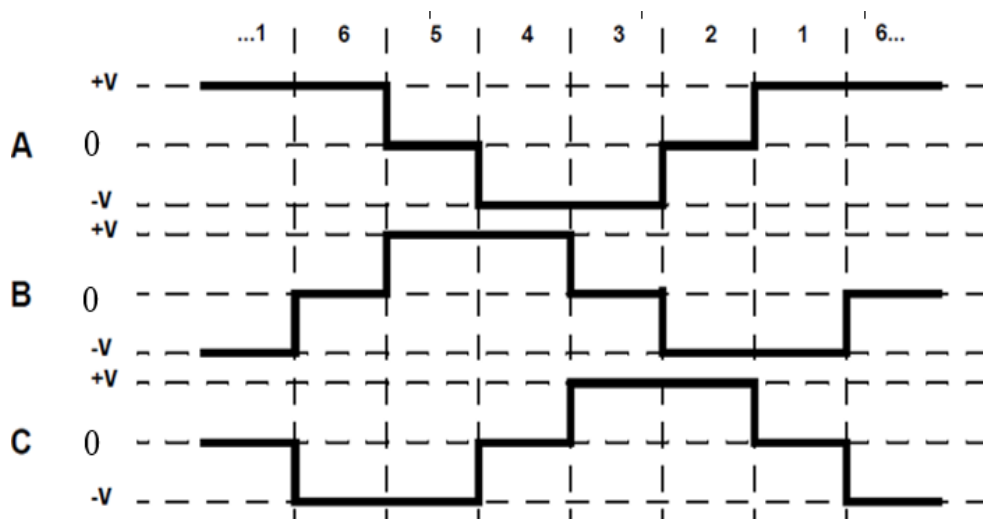
Většina BLDC motorů má třífázové spojení do hvězdy. Motor s tímto zapojením má vždy vybuzené dvě fáze na jednou. Spínání fáze je provedeno elektrickou komutací ve střídači

pomocí řídicích pulsů přivedených na tranzistory. Statorové vinutí je sepnuto 120 stupňů od pozice permanentního magnetu rotoru. Když je magnet rotoru 60 stupňů od sepnutého vinutí rotoru, nastává komutace a spíná se další kombinace vinutí. Statorová vinutí jsou vybudena podle polohy rotoru, která se zjišťuje například pomocí Hallových sond nebo měření BEMF na fázi [2].



Obrázek 12 vyobrazený průchod proudu v každém kroku při šestikrokovém řízení

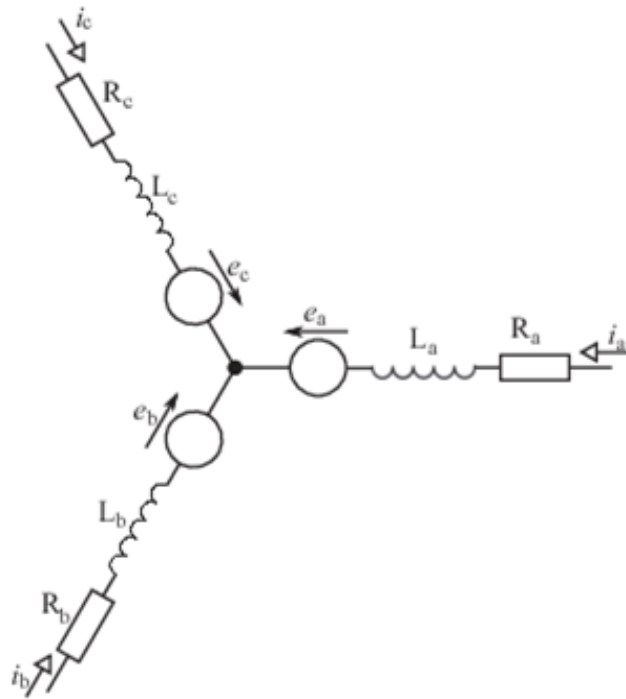
Střídání spínání fází se pro lepší ilustraci střídá po 60° stupních otáčení, ale pro největší moment platí, že sepnutá fáze má být 90° od pozice permanentního magnetu na rotoru.



Obrázek 13 zobrazený průběh napětí v šestikrokovém řízení BLDC motoru

6.5. Matematický model BLDC motoru

Výpočty pro BLDC motoru jsou provedeny pro stator s třífázovým zapojením do hvězdy bez vyvedeného středu. Model je zpracován pro ideální motor, kde jsou odpory a indukčnosti vinutí stejné na všech fázích. Na obrázku 14 je zobrazené náhradní schéma třífázového statoru.



Obrázek 14 náhradní schéma statoru BLDC motoru

Pro napětí na fázích A, B a C platí:

$$u_a = R_a * i_a + \frac{d(L_a * i_a + M * \cos(-120^\circ) * i_b + M * \cos(120^\circ) * i_c)}{dt} + e_a \quad [V] \quad (2)$$

$$u_b = R_b * i_b + \frac{d(L_b * i_b + M * \cos(120^\circ) * i_a + M * \cos(-120^\circ) * i_c)}{dt} + e_b \quad [V] \quad (3)$$

$$u_c = R_c * i_c + \frac{d(L_c * i_c + M * \cos(-120^\circ) * i_a + M * \cos(120^\circ) * i_b)}{dt} + e_c \quad [V] \quad (4)$$

Po zjednodušení:

$$u_a = R_a * i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + e_a \quad [V] \quad (5)$$

$$u_b = R_b * i_b + \frac{d\psi_b}{dt} + e_b \quad [V] \quad (6)$$

$$u_c = R_c * i_c + \frac{d\psi_c}{dt} + e_c \quad [V] \quad (7)$$

kde,

$R_a = R_b = R_c = R$ odpory fází statorového vinutí [Ω]

$L_a = L_b = L_c = L$ indukčnost statorového vinutí [H]

M vzájemná indukčnost [H]

u_a, u_b, u_c napětí fází statoru [V]

i_a, i_b, i_c proudy fází statoru [A]

e_a, e_b, e_c zpětná elektromotorická síla

Zpětná elektromotorická síla jednotlivých fází se získá pomocí rovnic 8, 9 a 10.

$$e_a = k * \omega * f(\varphi) \quad [V] \quad (8)$$

$$e_b = k * \omega * f\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \quad [V] \quad (9)$$

$$e_c = k * \omega * f\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right) \quad [V] \quad (10)$$

k konstanta zpětné elektromotorické síly [$V/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

φ úhel natočení rotoru [rad]

ω mechanická rychlost otáčení rotoru [rad/s]

ψ_a, ψ_b, ψ_c spřažené magnetické toky [Wb]

Spřažené magnetické toky jsou vypočteny pomocí rovnic 11, 12 a 13.

$$\psi_a = (L + 0.5 M) * i_a \quad [Wb] \quad (11)$$

$$\psi_b = (L + 0.5 M) * i_b \quad [Wb] \quad (12)$$

$$\psi_c = (L + 0.5 M) * i_c \quad [Wb] \quad (13)$$

Hnací moment M_h BLDC motoru lze vyjádřit pomocí rovnice 14.

$$M_h = \frac{e_a * i_a + e_b * i_b + e_c * i_c}{\omega} \quad [Nm] \quad (14)$$

7. Řídicí část

Dříve řídicí části sloužili k měření rychlosti motoru a k přizpůsobení zátěži. Obvykle tyto úkony byly provázeny nepřesnostmi a byly ztrátové. Moderní řídicí části zahrnují mikroprocesory a řízené výkonové součástky, které slouží k více úkonům, a navíc s větší precizností. Mezi tyto úkony patří například:

- řízení dynamických vlastností motoru s vlivem na zátěž
- řízení elektrické komutace
- umožnění automatického zapínání motorů
- zabezpečení motoru a částí pohonu proti poškození nebo poruchám

Pro řízení motoru se používají i různé principy řízení, například systémy nazývané se s otevřenou smyčkou nebo s uzavřenou smyčkou.

7.1. Systémy s otevřenou smyčkou

V systémech s otevřenou smyčkou jsou parametry upravovány nebo nastaveny pomocí obsluhy. U elektrických pohonů bývají většinou výsledkem operace parametry jako jsou například rychlost nebo natočení motoru. Nastavování požadovaného stavu je upravováno pomocí operací, které obsluha může změnit, například napětí.

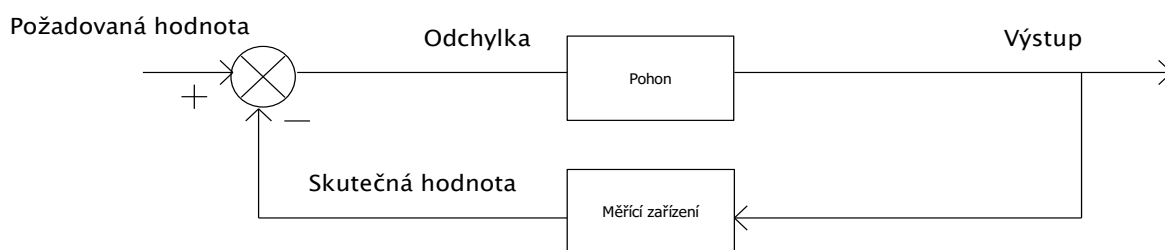
Nevýhodou tohoto způsobu je, že při změně parametrů se pohon sám nenastaví na ideální běh, ale je třeba pohon přizpůsobit řízení novým podmínkám.

7.2. Systémy s uzavřenou smyčkou

Systémy s uzavřenou smyčkou jsou schopny řídit systémy bez zásahu obsluhy a dokáží reagovat samy na změny v systému. Jejich hlavní výhodou je rychlost a přesnost reakce na změny.

7.2.1. Systémy se zápornou zpětnou vazbou

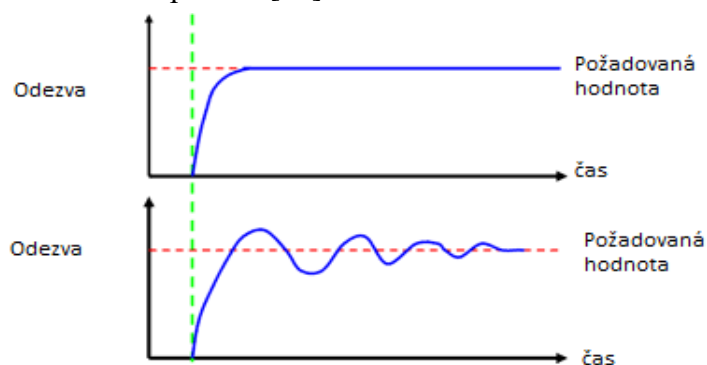
Tyto systémy umožňují uživateli nastavit požadovanou výstupní hodnotu, a následně systém automaticky nastaví požadovanou hodnotu a dokáže tuto hodnotu udržet.



Obrázek 15 schéma záporné zpětné vazby

Pro zpětnou vazbu se používá skutečný stav systému například elektrický proud, nebo poloha. Skutečná hodnota je pravidelně nebo stále kontrolována s požadovanou hodnotou a odchylka hodnot je použita pro změnu v řídicím systému [10].

Nová výstupní hodnota se nenastaví ihned po zjištění odchylky, ale uvedení do nového stavu je provázena zpožděním. Rychlost nastavení nové požadované hodnoty je závislá na regulované veličině. Při nastavení nové hodnoty se parametr dostává do požadované hodnoty postupně, nebo hodnota parametru osciluje kolem požadované hodnoty a s časem se blíží požadovanému stavu. Toto zpoždění může být způsobeno indukčnostmi elektrických obvodů, které zmenšují rychlost nárůstu proudu [10].



Obrázek 16 zobrazení průběhu při změně požadované hodnoty

7.3. Řízení BLDC motoru pomocí senzorů

Pro řízení BLDC motorů je zapotřebí znát polohu rotoru, aby systém věděl, jaké tranzistory střídače sepnout. Nejpoužívanější metody pro zjištění polohy rotoru je použití Hallovyh sond nebo Optického enkodéru.

7.3.1. Hallové sondy

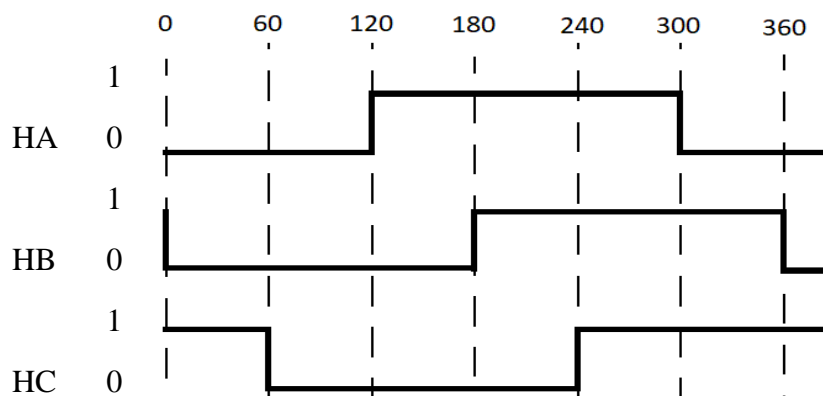
Hallové sondy se využívají pro svou spolehlivost a nízkou cenu. Jsou instalovány pro schopnost detekovat pozici rotoru už při nulových otáčkách. Senzory jsou umístěny na hřídeli vně motoru a pro svou činnost využívají přídavné magnety na hřídeli. Každá z těchto sond

krok	Výstup z Hallových sond			Sepnutí fází		
	HA	HB	HC	A	B	C
1	0	0	1	V+	--	V-
2	0	0	0	V+	V-	--
3	1	0	0	--	V-	V+
4	1	1	0	V-	--	V+
5	1	1	1	V-	V+	--
6	0	1	1	--	V+	V-

Obrázek 17 pravdivostní tabulka u šestikrokového řízení a sepnutí fází v jednotlivých krocích

dokáže detekovat magnetické pole v rozsahu 180°. Kombinací všech sond lze zjistit polohu rotoru.

Hallovovy sondy fungují na principu zakřivení dráhy proudění elektronů ve vodiči v přítomnosti stacionárního magnetického pole. Pokud tenkým a širokým vodičem teče stejnosměrný elektrický proud a na vodič působí stacionární magnetické pole, dráha elektronů se začne zakřívovat, tím vznikne na stranách vodiče napětí, kterým můžeme zjišťovat přítomnost magnetického pole. Hallovovy sondy se mohou použít pro aplikace do vysokých frekvencí až 100 kHz.

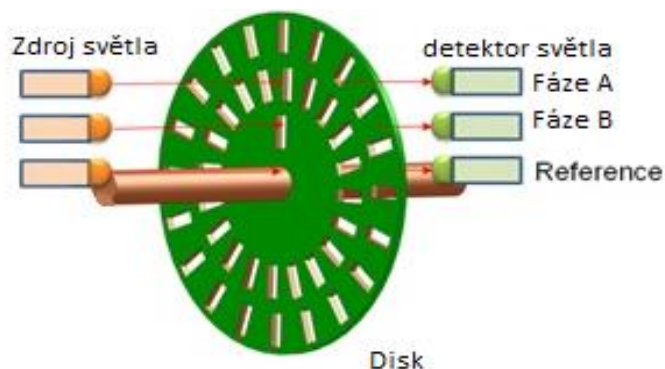


Obrázek 18 zobrazení odezvy Hallových sond na jednu otáčku při šestikrokovém řízení

7.3.2. Optický enkodér

Optický enkodér se skládá ze tří částí. První částí je zdroj světla, nejčastěji se používá led dioda. Druhou částí je stínítko, které zabraňuje neustálému dopadu záření na detektor světla. Detektor světla je třetí částí optického enkodéru, je nejčastěji tvořen pomocí fotodiody, která se spíná při dopadu světla na součástku.

Optické enkodéry se používají pro aplikace měření ve velkých rychlostech otáčení. Enkodéry jsou rozměrově malé a lze je umístit do motoru. Podle druhu stínítka lze pomocí enkodéru změřit rychlost a také směr otáčení.



Obrázek 19 optický enkodér

7.4. Řízení motoru bez senzorů

Bezsenzorové řízení motorů nabízí výhody jako je snížení ceny motoru, nebo také odpadá potřeba speciálních úchytů pro senzory. Řízení bez senzorů je spolehlivější pro provoz v nepříznivých podmínkách. Hlavní nevýhodou je menší škála rychlostí, pro které lze senzory vynechat. Nevýhodou tohoto způsobu řízení je potřeba dalších součástek jako jsou převodníky, filtry a komparátory

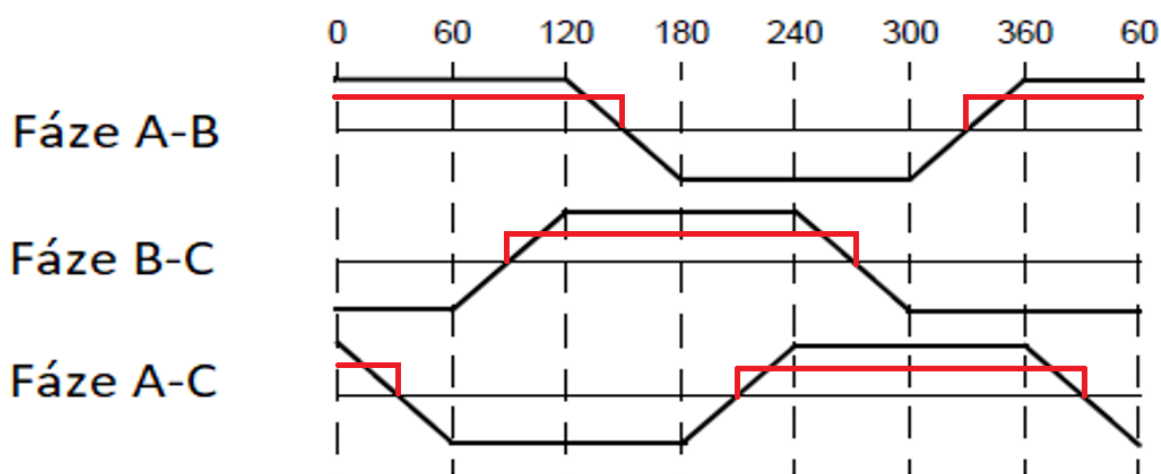
Pro bezsenzorové řízení se používají čtyři základní skupiny:

- kontrola průchodu zpětné elektromotorické síly BEMF nulovou hladinou
- integrace zpětné elektromotorické síly BEMF
- měření třetí harmonické zpětné elektromotorické síly BEMF
- měření proudu v antiparalelní zapojení dvou diod paralelně se střídačem

Tato práce se zabývá kontrolou průchodu zpětné elektromotorické síly nulou.

7.4.1. Měření pomocí průchodu zpětné elektromotorické síly nulou

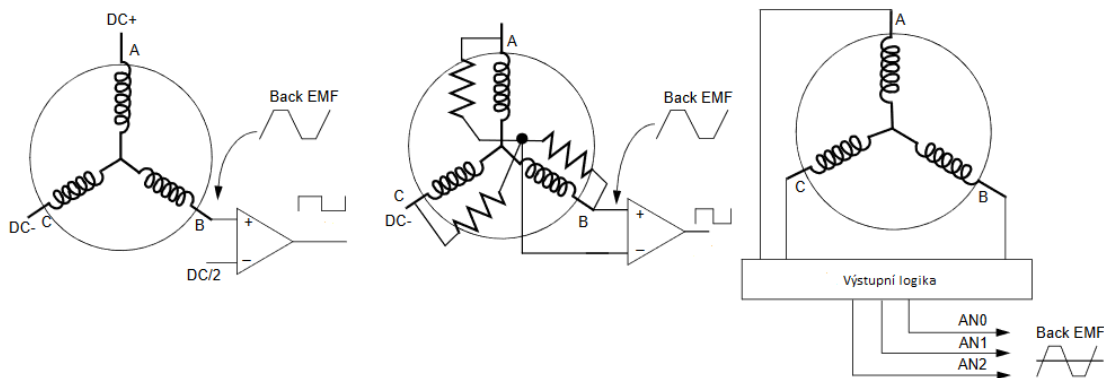
Anglicky nazýváno jako „Zero Crossing Point Detection“. Tak jako u Hallových sond tento způsob poskytuje signály, které udávají informaci o pozici rotoru. Každá fáze podává signál o délce 120° , ale jsou fázové posunuty o 30° od signálů Hallových sond. V každém časovém okamžiku při řízení BLDC motoru jsou dvě fáze ve vodivém stavu a třetí fáze je odepnuta. Zpětná elektromotorická síla BEMF je měřena právě na třetí, odepnuté fázi. Signál je spínán od průchodu BEMF nulou do kladné hladiny a je vypnut při poklesu na nulovou hodnotu. Měření průchodu nulou lze provést pomocí komparátoru nebo pomocí AD převodníku.



Obrázek 20 zobrazené signály průchodem nulou

Metoda využívání komparátoru předpokládá, že v momentě, kdy BEMF na vypnuté fázi prochází nulou je rovna polovině stejnosměrného napájecího napětí střídače. Nevýhodou tohoto způsobu je menší přesnost a nutný předpoklad, že všechny fáze mají stejné parametry. Další využití komparátoru je při použití virtuálního nulového uzlu a porovnávání nulové hodnoty v uzlu s hodnotou BEMF. Při měření BEMF lze využít převodník z analogového signálu na digitální (AD převodník), který měří hodnoty BEMF na vypnuté fázi a poskytuje informace pro řídicí systém [12].

Metodu s průchodem BEMF nulou nelze provádět pro nulové nebo malé otáčky, důvodem je to, že BEMF je veličina závislá na magnetických vlastnostech motoru, které lze ovlivnit změnou konstrukce motoru, ale hlavně na rychlosti otáčení rotoru. Při malých rychlostech otáčení by signál dosahoval špatně rozeznatelných hodnot. Proto se při rozběhu motoru používá asynchronní rozběh, kdy se vinutí spínají postupně po předem stanovených časových okamžicích na požadované rychlosti [12].



Obrázek 21 schémata zapojení pro měření průchodu nulou BEMF zleva: a) porovnávání s $DC/2$ b) porovnání s virtuální nulou c) použití AD převodníku

7.5. Pulsně šířková modulace (PWM)

Princip pulsně šířkové modulace je v řízení střídavy obdélkového signálu při neměnné periodě. Střída je procentuální vyjádření trvání sepnutého stavu signálu v jedné periodě. Celkový rozsah střídavy se pohybuje v rozmezí 0 % až 100 %.

PWM se používá pro přenos informace nebo pro spínání polovodičových součástek. Aby se proud v motoru choval spojitě je nutné zvolit správnou frekvenci v kombinaci s indukčností motoru.

Pro spínání tranzistorů se používají dva způsoby spínání tranzistoru, nezávislé spínání a komplementární spínání.

7.5.1. Nezávislé spínání

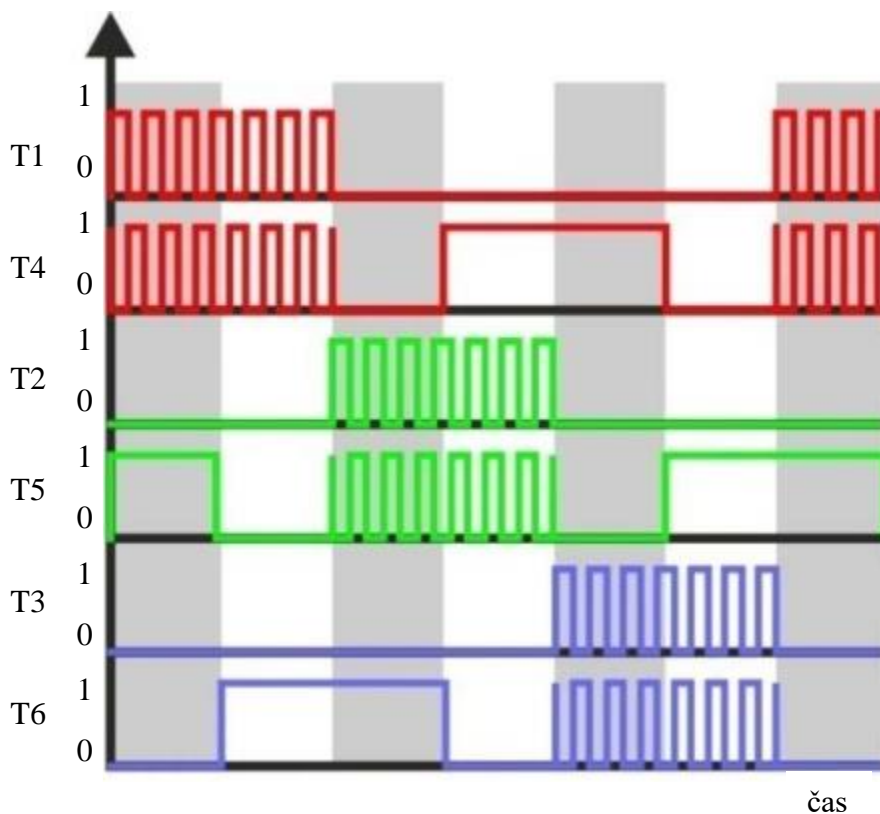
Nezávislé spínání je způsob řízení, kdy je otevřen vždy jeden tranzistor na jedné větvi, který může být spínán pulsně šířkovou modulací pro omezení proudu. Například pokud je situace kdy proud teče fázemi A a C. V této situaci jsou sepnuté tranzistory T1 a T6 a pouze jeden z těchto tranzistorů je spínán pomocí pulsně šířkové modulace.

7.5.2. Komplementární spínání

Tento typ spínání je používán pro ochranu součástek střídače. Komplementární spínání ochraňuje střídač v momentě, kdy by motor přešel do režimu generátoru a změnila by se polarita napětí a proudu, který by mohl zničit polovodičové součástky.

Na rozdíl od nezávislého spínání v této metodě jsou spínány dva tranzistory na jedné větvi fáze. Je-li proud veden přes tranzistory T1 a T6, je také spínán tranzistor T4. Tranzistor T1 je spínán pulsně šířkovou modulací a tranzistor T4 se spíná vždy v opačném okamžiku jako tranzistor T1.

Při tomto řízení je nutné nechat určitou dobu, kdy jsou vypnuté oba tranzistory, aby nedošlo ke zkratu napájecího zdroje.



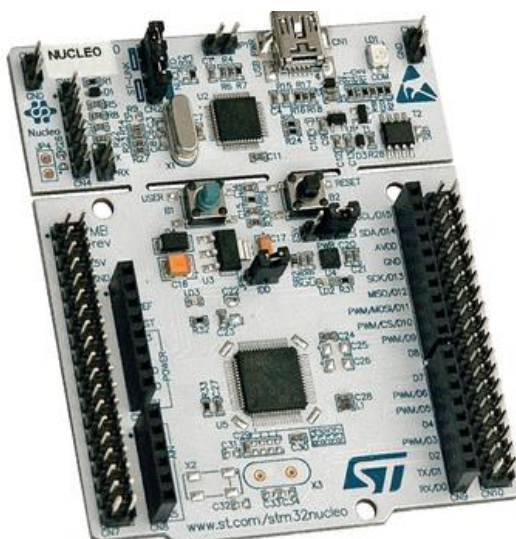
Obrázek 22 zobrazený průběh řídicích pulsů ve střídači při komplementárním řízením

7.6. Řídící deska NUCLEO-F302R8

Při vytváření programu a testování jeho funkčnosti byla použita jednotka NUCLEO-F302R8. Tato deska slouží pro testování prototypů.

Tato deska má tyto parametry

- mikrokontroler STM32F302R8T6
- procesor ARM®32-bit Cortex®-M4 CPU
- maximální frekvence procesoru 72MHz
- napětí VDD od 2.0 V do 3.6 V
- 64 KB Flash
- 16 KB SRAM
- GPIO piny s externím přerušením
- 12-bitový AD převodník s 15 kanály
- 12-bitový DA převodník
- RTC – (Real-time Clock – hodiny)
- 6x Timer
- I2C
- USART (Universal Asynchronous Receiver and Transmitter)
- USB 2.0 FS
- CAN 2.0B
- Analogový komparátor
- Operační zesilovač



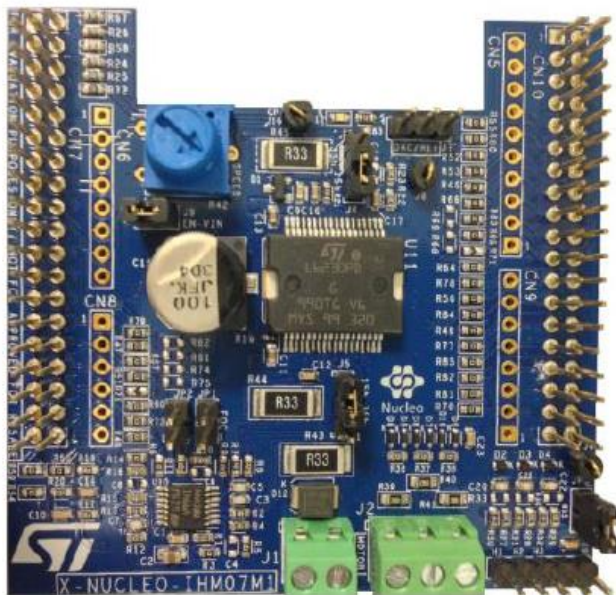
Obrázek 23 řídící deska STM32 Nucleo-F302R8T6,

7.7. Řídící výkonový deska X-NUCLEO-IHMO7M1

Řídící výkonový deska X-NUCLEO-IHMO7M1 se používá pro řízení BLDC motorů. Pomocí této desky je řízení BLDC motorů uživatelsky jednodušší. Funkce této jednotky je založena na čipu L6230. Čip L6230 obsahuje 6 výkonových MOSFET tranzistorů zapojených jako v třífázovém střídači.

Parametry desky s čipem L6230 jsou:

- třífázový řídicí systém pro BLDC motory
- pracovní napětí desky od 8 V do 48 V
- maximální proud až 2,8 A a efektivní hodnota proudu 1,4 A
- frekvence až 100 kHz
- ochrana proti nadproudům
- ochrana proti současnému sepnutí tranzistorů v jedné větvi
- podpora bezsenzorového a senzorového řízení
- měření teploty a ochrana proti přehřívání
- potenciometr pro regulaci rychlosti motoru

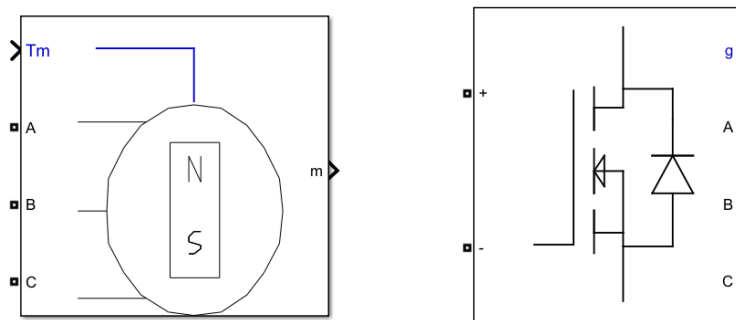


Obrázek 24 výkonová řídicí deska X-NUCLEO-IHMO7M1

8. Programová simulace

Simulace řízení BLDC motoru byla vytvořena pro ověření logiky spínání řídicích pulsů. Programová simulace byla provedena pomocí programu Matlab Simulink. Princip tohoto vývojového prostředí je v propojování funkčních bloků, založených na matematických funkcích. Pro simulaci bylo využito šablony pro řízení BLDC motoru, která byla upravena pro komplementární řízení s proudovou zápornou zpětnou vazbou.

Základem pro tvorbu simulačního programu byly funkční bloky „Permanent Magnet Synchronous Machine“, který simuluje chod BLDC motoru, a „Univesal Bridge“, který obsahuje funkce třífázového střídače.



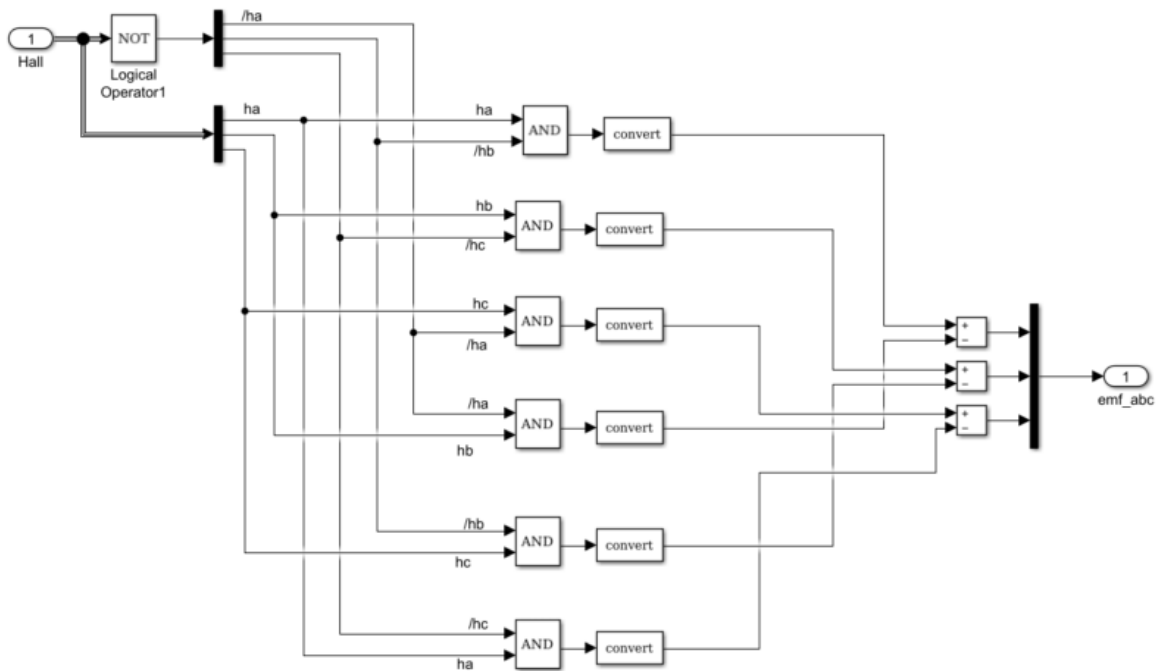
Obrázek 25 ukázka bloků Synchronního motoru (nalevo) a střídače (napravo)

V bloku simulace motoru lze nastavit parametry jako jsou například počet fází nebo typ rotoru. Pomocí vstupní konstanty na vstupu „Tm“ se určuje, jestli je blok v motorickém režimu nebo v režimu generátoru. Dalším vstupem do bloku motoru jsou fáze vystupující ze simulace střídače. Na výstupu „m“ je velký počet informací o motoru, jedná se o proudy fází, napětí na fázích, rychlost motoru, BEMF, moment a informace o poloze rotoru. Informace o poloze funguje na principu měření polohy pomocí BEMF.

V bloku simulace třífázového střídače jsou na výstupu signály třífázového napájení. Na vstupu je stejnosměrné napětí a dále řídicí signály. Na vstup „g“ je přiveden počet řídicích signálů, který odpovídá počtu tranzistorů ve střídači. Vstupy jsou srovnány ve dvojicích tak, že první jde na horní tranzistor fáze A, druhý na spodní tranzistor stejné fáze, třetí jde na horní tranzistor fáze B atd.

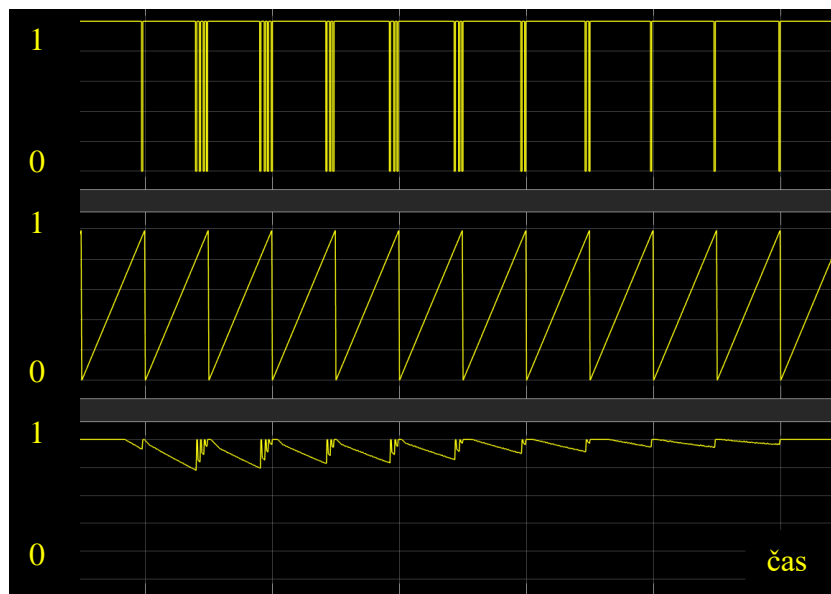
Zdrojem pro řídicí signály střídače je informace o poloze motoru. Řídicí signály musí být upraveny pro komplementární řízení. Informace polohy rotoru je zpracována pomocí dvou funkčních bloků nazvané „Decoder“ a „Gates“. Funkční blok přiděluje každé kombinaci z výstupu senzorů („ha“, „hb“ a „hc“) přiřazení hodnoty 1,0 nebo -1 na výstupy („emf_a“, „emf_b“ a „emf_c“).

Na vstupu bloku „Dekoder“ jsou přivedeny obdélníkové signály nesoucí informaci o poloze rotoru.



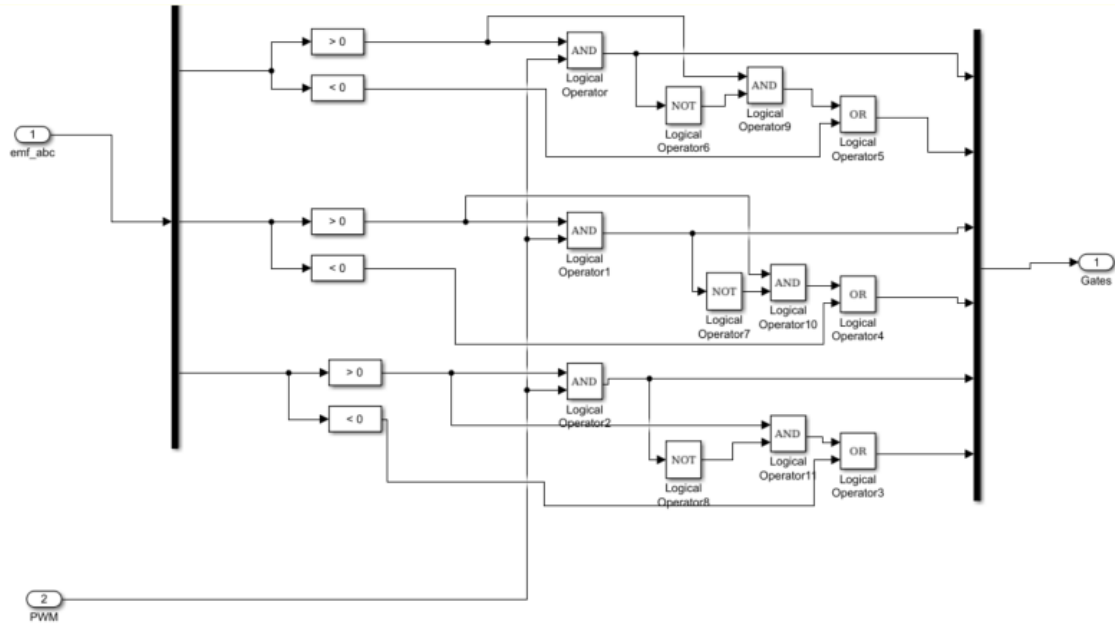
Obrázek 26 funkční blok „Decoder“, Matlab Simulink

U funkčního bloku pro vytvoření signálů komplementárního řízení jsou přivedeny na vstupu signály z bloku „Decoder“ a PWM signál. PWM signál je vytvořený z porovnávání hodnoty z výstupu PI regulátoru, omezeného na maximální hodnotu 1, se signálem, který ve vysoké frekvenci roste z 0 do 1.

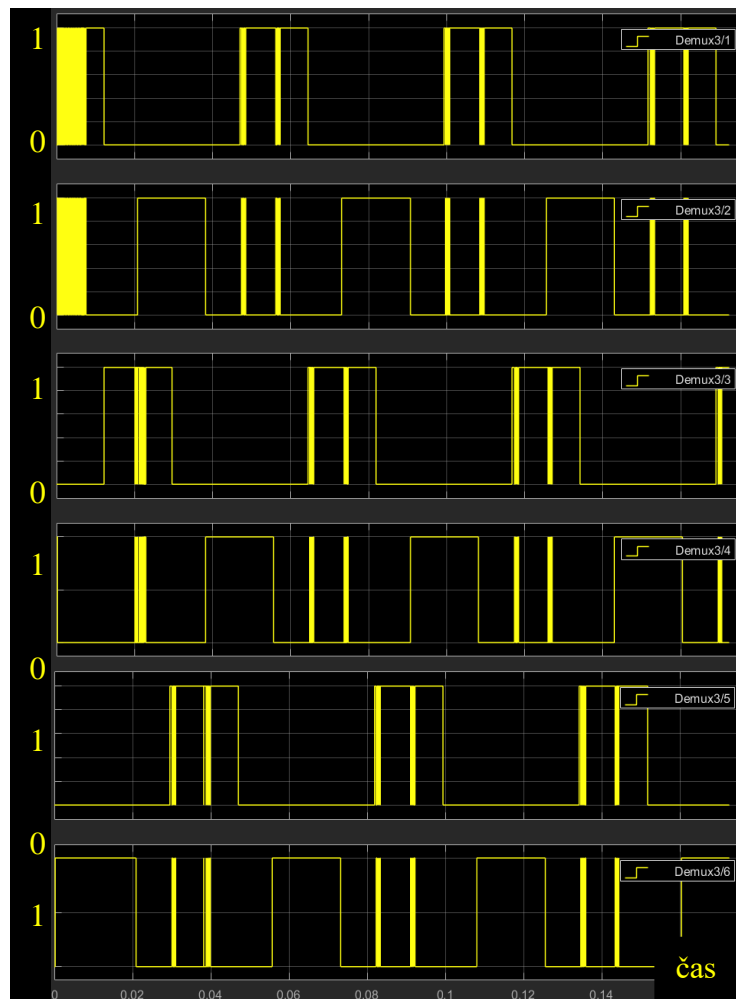


Obrázek 27 ukázka signálů, ze shora a) výstup komparátoru, b) výstup z integrátoru, c) výstup z PI regulátoru po saturaci

Pro vytvoření bloku pro komplementární řízení bylo dosaženo pomocí logických funkcí „AND“, „OR“ a „NOT“.

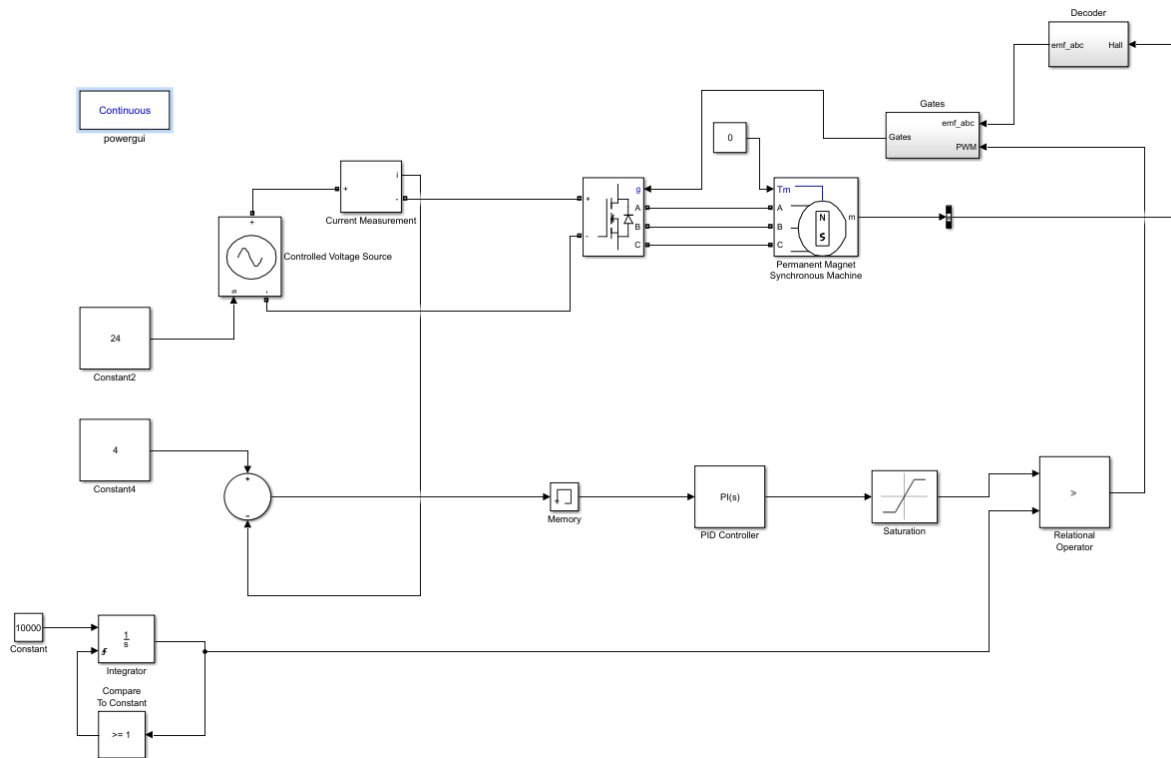


Obrázek 29 ukázka funkce „Gates“, Matlab Simulink, Výstupy na tranzistoru, ze shora T1, T4, T2, T5, T3 a T6



Obrázek 28 zobrazené průběhy řídicích signálů ze shora tranzistoru T1, T4, T2, T5, T3 a T6

Na obrázku 30 je zobrazena úplná podoba simulačního programu vytvořeného v prostředí Matlab Simulink.



Obrázek 30 konečná podoba simulace řízení BLDC motoru

9. Vývojová prostředí

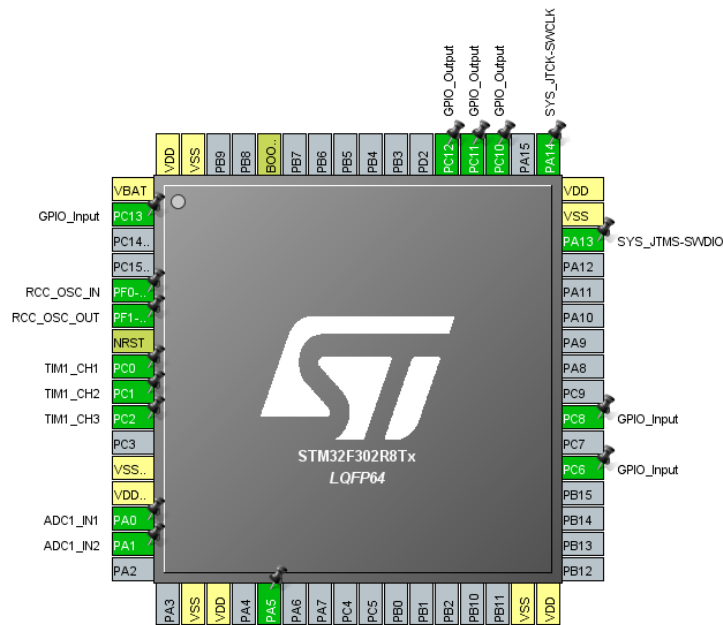
Při vytváření programu pro řízení BLDC motoru byla použita dvě vývojová prostředí. Pro konfiguraci AD převodníků, timerů, vstupů a výstupů byl použit program STM32CubeMX a pro realizaci funkcí řízení Keil μ Vision5.

9.1. STM32CubeMX

STM32CubeMX pomáhá při vývoji přes uživatelské prostředí při počáteční konfiguraci projektu. Výhodami tohoto prostředí je možnost výběru správného mikroprocesoru a rychlost vývoje.

Toto vývojové prostředí umožňuje:

- nastavení funkce jednotlivých pinů
- nastavování frekvence v jednotlivých částech s automatickým nastavením
- výpočet spotřeby energie
- převedení inicializace v STM32CubeMX do programovacího prostředí Keil μ Vision5

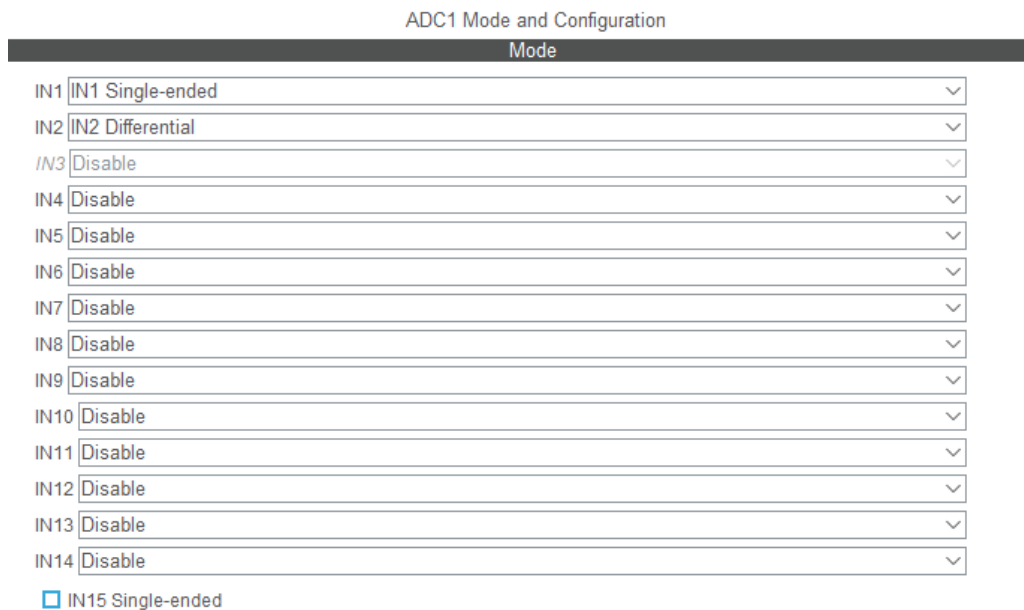


Obrázek 31, ukázka inicializace pinů na mikrokontroleru STM32F302R8T6 v prostředí STM32CubeMX

9.1.1. Inicializace AD převodníku v STM32 CubeMX

Při nastavení AD převodníku je potřeba nastavit jaký kanál AD převodníku bude převádět hodnotu. U vývojové desky NUCLEO-F302R8 je k dispozici jeden AD převodník s patnácti kanály.

U nastavení kanálu je možné vybrat mezi dvěma možnostmi „Single-ended“ a „Differential“. Tyto možnosti se liší podle referenčního napětí. „Single-ended“ porovnává napětí vůči zemi a „Differential“ vůči napětí různé velikosti.



Obrázek 32 STM32 CubeMX ukázka nastavení módu pro kanál AD převodníku

U AD převodníku je nutné nastavit i další parametry, například jak často se bude AD převodník spouštět nebo rozlišení převodníku.

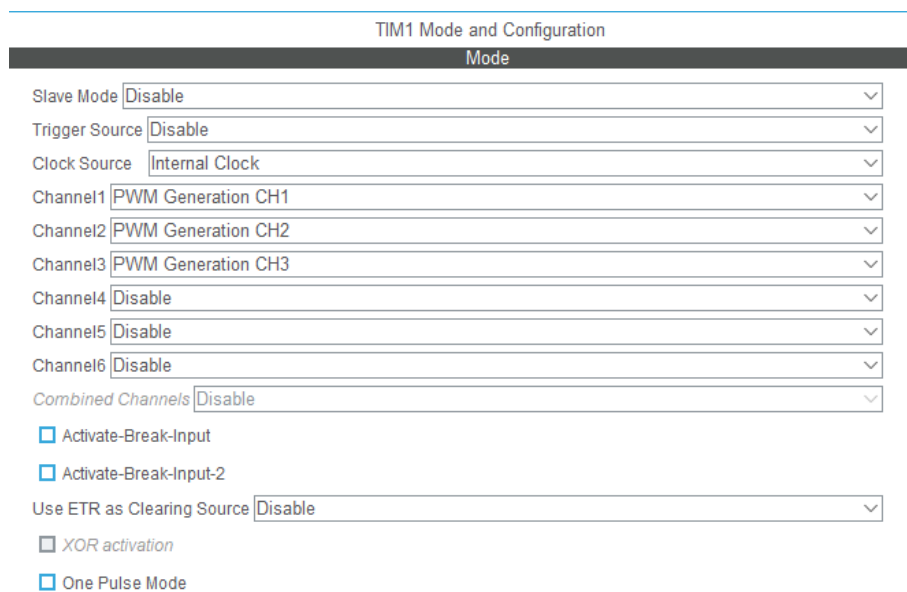
ADC_Settings	
Clock Prescaler	ADC Asynchronous clock mode
Resolution	ADC 12-bit resolution
Data Alignment	Right alignment
* Scan Conversion Mode	Enabled
Continuous Conversion Mode	Disabled
* Discontinuous Conversion Mode	Disabled
DMA Continuous Requests	Disabled
End Of Conversion Selection	End of single conversion
Overrun behaviour	Overrun data overwritten
Low Power Auto Wait	Disabled
ADC_Regular_ConversionMode	
Enable Regular Conversions	Enable
Number Of Conversion	2
External Trigger Conversion Source	Regular Conversion launched by software
External Trigger Conversion Edge	None
Rank	1
* Rank	2
ADC_Injected_ConversionMode	
Enable Injected Conversions	Enable
Number Of Conversions	0
Analog Watchdog 1	
Enable Analog WatchDog1 Mode	<input type="checkbox"/>
Analog Watchdog 2	
Enable Analog WatchDog2 Mode	<input type="checkbox"/>
Analog Watchdog 3	

Obrázek 33 STM32 CubeMX ukázka nastavitelných parametrů AD převodníku

Pro správnou funkci AD převodníku je třeba nastavit, aby se převodník spouštěl v okamžiku, kdy je horní tranzistor vodivé větve ve vypnutém stavu. Tato metoda odstraňuje rušivé průběhy z fáze, na které se měří BEMF.

9.1.2. Inicializace Timeru v STM32 CubeMX

Timer má velké množství využití například, pro záchyt události, porovnání hodnoty, a generování PWM signálu. Timer obsahuje 6 nezávislých kanálů. Frekvence se nastavuje pomocí porovnávané hodnoty v rozmezí 1 až 65535. Pro plynulý chod motoru byla zvolena hodnota porovnávané hodnoty na 500.



TIM1 Mode and Configuration	
Mode	
Slave Mode	Disable
Trigger Source	Disable
Clock Source	Internal Clock
Channel1	PWM Generation CH1
Channel2	PWM Generation CH2
Channel3	PWM Generation CH3
Channel4	Disable
Channel5	Disable
Channel6	Disable
Combined Channels	Disable
<input type="checkbox"/> Activate-Break-Input	
<input type="checkbox"/> Activate-Break-Input-2	
Use ETR as Clearing Source	Disable
<input type="checkbox"/> XOR activation	
<input type="checkbox"/> One Pulse Mode	

Obrázek 34 STM32 CubeMX ukázka inicializace kanálu Timeru 1

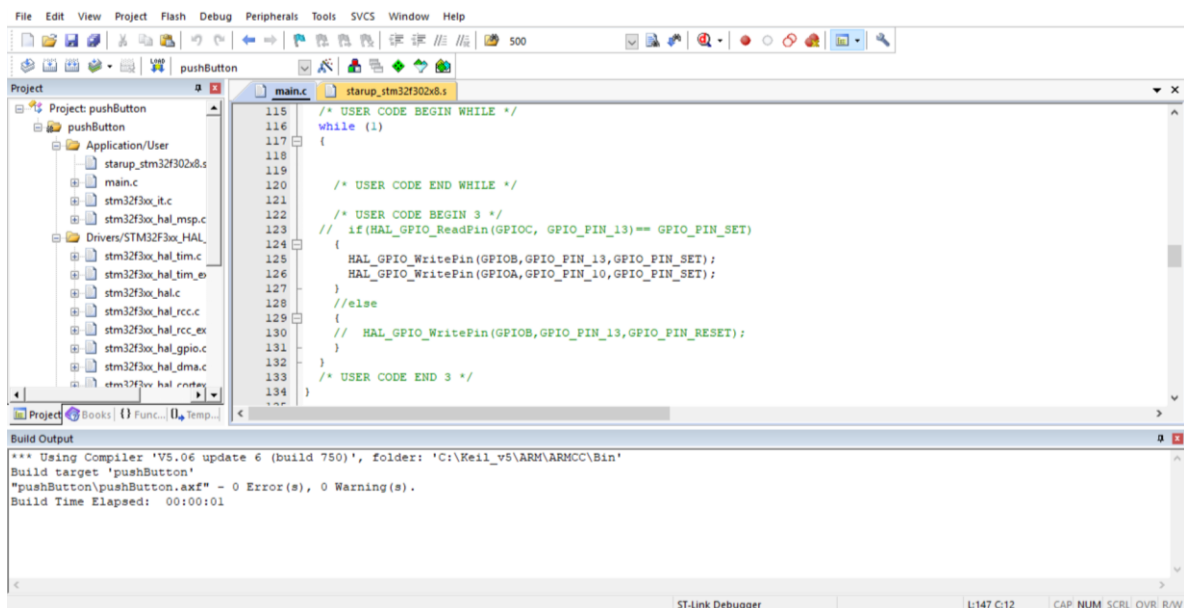
Pro nastavení Timeru slouží další parametry jako například nastavení „Death time“ pro komplementární řízení BLDC motoru. Na obrázku 35 je ukázka parametrů, které lze nastavit pro požadované funkce Timeru.

Counter Settings	
Prescaler (PSC - 16 bits value)	0
Counter Mode	Up
Counter Period (AutoReload Register - 16 bits value)	500
Internal Clock Division (CKD)	No Division
Repetition Counter (RCR - 16 bits value)	0
auto-reload preload	Disable
Trigger Output (TRGO) Parameters	
Master/Slave Mode (MSM bit)	Disable (Trigger input effect not delayed)
Trigger Event Selection TRGO	Reset (UG bit from TIMx_EGR)
Trigger Event Selection TRGO2	Reset (UG bit from TIMx_EGR)
Break And Dead Time management - BRK Configuration	
BRK State	Disable
BRK Polarity	High
BRK Filter (4 bits value)	0
Break And Dead Time management - BRK2 Configuration	
BRK2 State	Disable
BRK2 Polarity	High
BRK2 Filter (4 bits value)	0
Break And Dead Time management - Output Configuration	
Automatic Output State	Disable
Off State Selection for Run Mode (OSSR)	Disable
Off State Selection for Idle Mode (OSS1)	Disable
Lock Configuration	Off
Clear Input	
Clear Input Source	Disable
PWM Generation Channel 1	
Mode	PWM mode 1
Pulse (16 bits value)	0
Fast Mode	Disable
CH Polarity	Low

Obrázek 35 STM32 CubeMX ukázka inicializace Timeru 1

9.2. Vývojové prostředí Keil μ Vision5

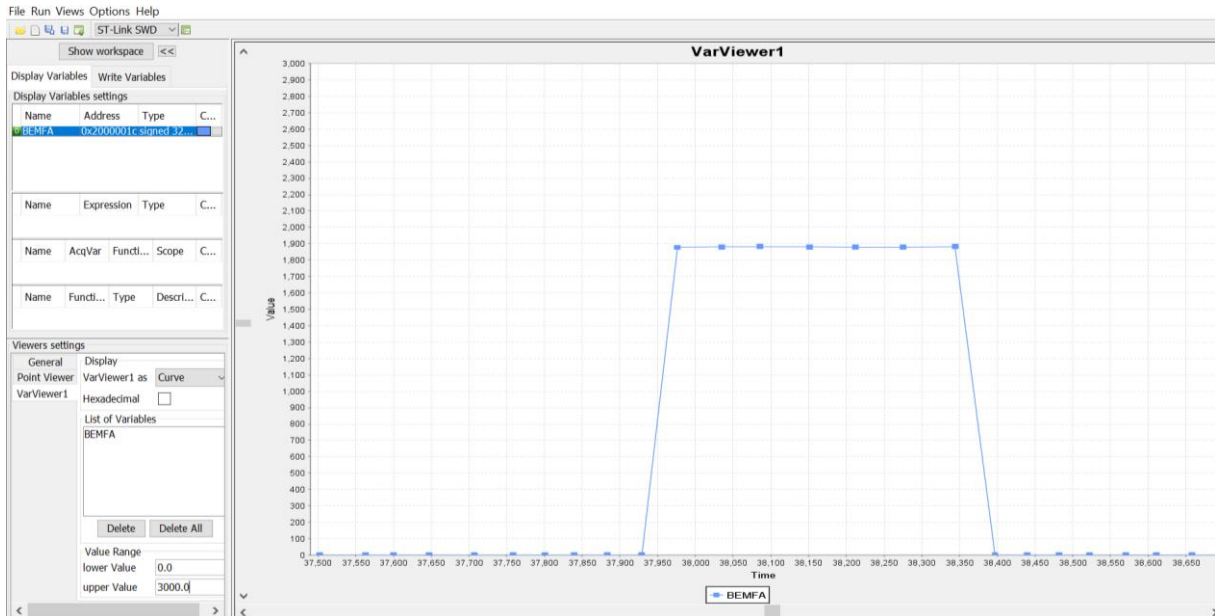
Toto prostředí spojuje vedení, běh, kompilaci, editaci a kontrolu projektu. Používá se pro vývoj embedded systémů (systémy s počítači pevně zabudovanými v zařízení pro konkrétní účel). Prostředí umožňuje kontrolu za běhu tzv. „Debugger“, který umožňuje zastavení programu v jednotlivých krocích. Vývojové prostředí obsahuje standartní funkce jako je například kontrola syntaxe pro programovací jazyky C a C++.



Obrázek 36 ukázka programu Keil μ Vision5

9.3. STMStudio

STMStudio z části simuluje funkci osciloskopu. Program STMStudio se používá pro ladění programů, které je potřeba kontrolovat za chodu. Tento program se používá zejména pro úpravy aplikací s motory. STMStudio čte proměnné za běhu a vykresluje jejich hodnoty do grafu. Program umožňuje sledování více proměnných na jednou a průběhy jsou zaznamenávány za celou dobu spuštění běhu. Uživatel tedy může pozorovat průběhy i zpětně v čase.



Obrázek 37 ukázka programu STMStudio

10. Programové řízení BLDC motoru

Při tvorbě aplikace pro řízení BLDC motoru bylo využito vývojové prostředí Keil μ Vision 5. Pro snazší konfiguraci Timeru, AD převodníku, vstupů a výstupů byla zvolena aplikace STM32 CubeMX. Následně bylo zapotřebí naprogramovat logiku, která by řídila BLDC motor. Program pracuje s bezsenzorovým řízením na principu detekce průchodu BEMF nulou. Z tohoto důvodu bylo třeba uvést motor do pohybu. Pro uvedení BLDC motoru do pohybu bylo nutné vytvoření programové smyčky, která spíná fáze podle šestikrokového řízení. Pro plynulý chod motoru je třeba nastavit ideální frekvenci v souladu se střední hodnotou napětí, která je určována střídou pulsně šířkovou modulací.

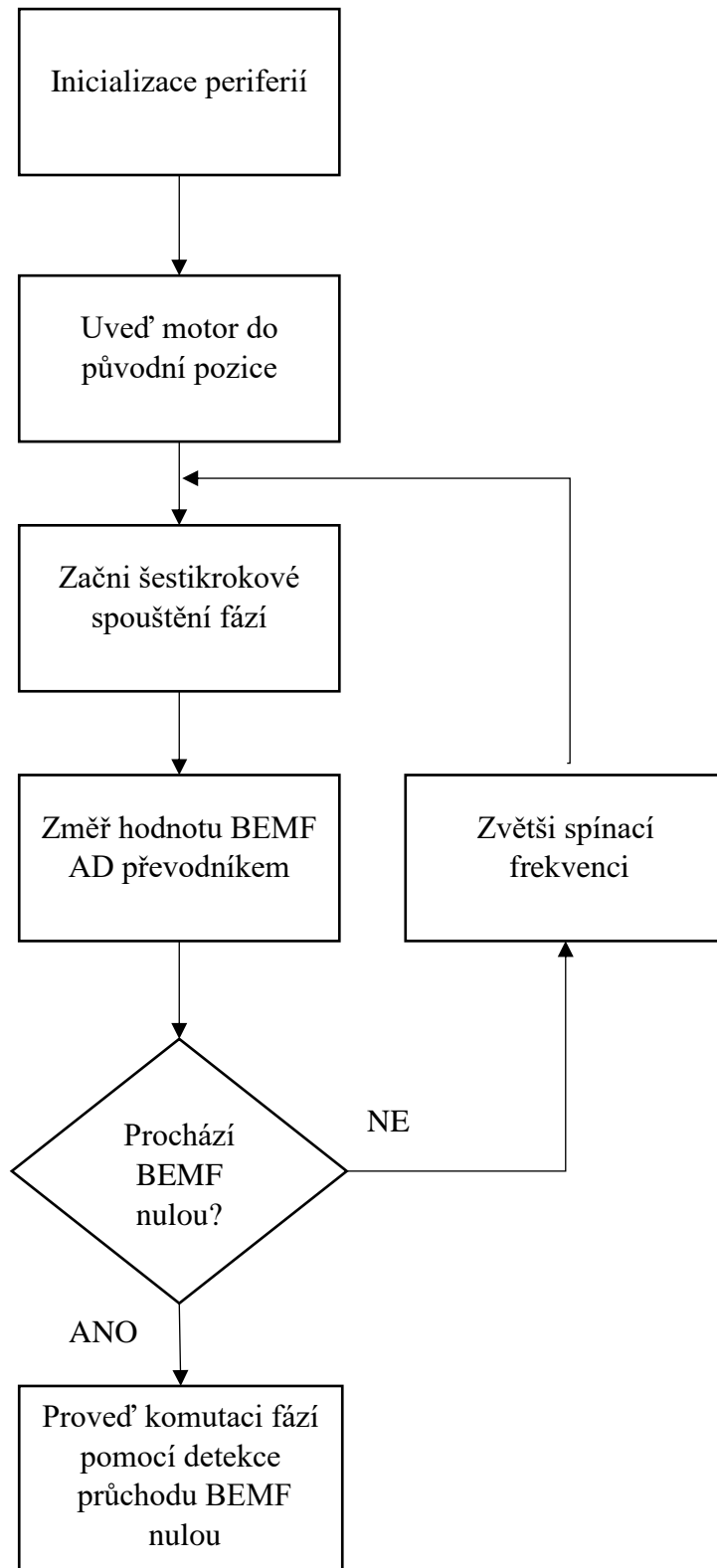
krok	Sepnutí fází		
	A	B	C
1	V+	--	V-
2	V+	V-	--
3	--	V-	V+
4	V-	--	V+
5	V-	V+	--
6	--	V+	V-

Obrázek 38 zobrazení sepnutí fází v šestikrokovém řízení

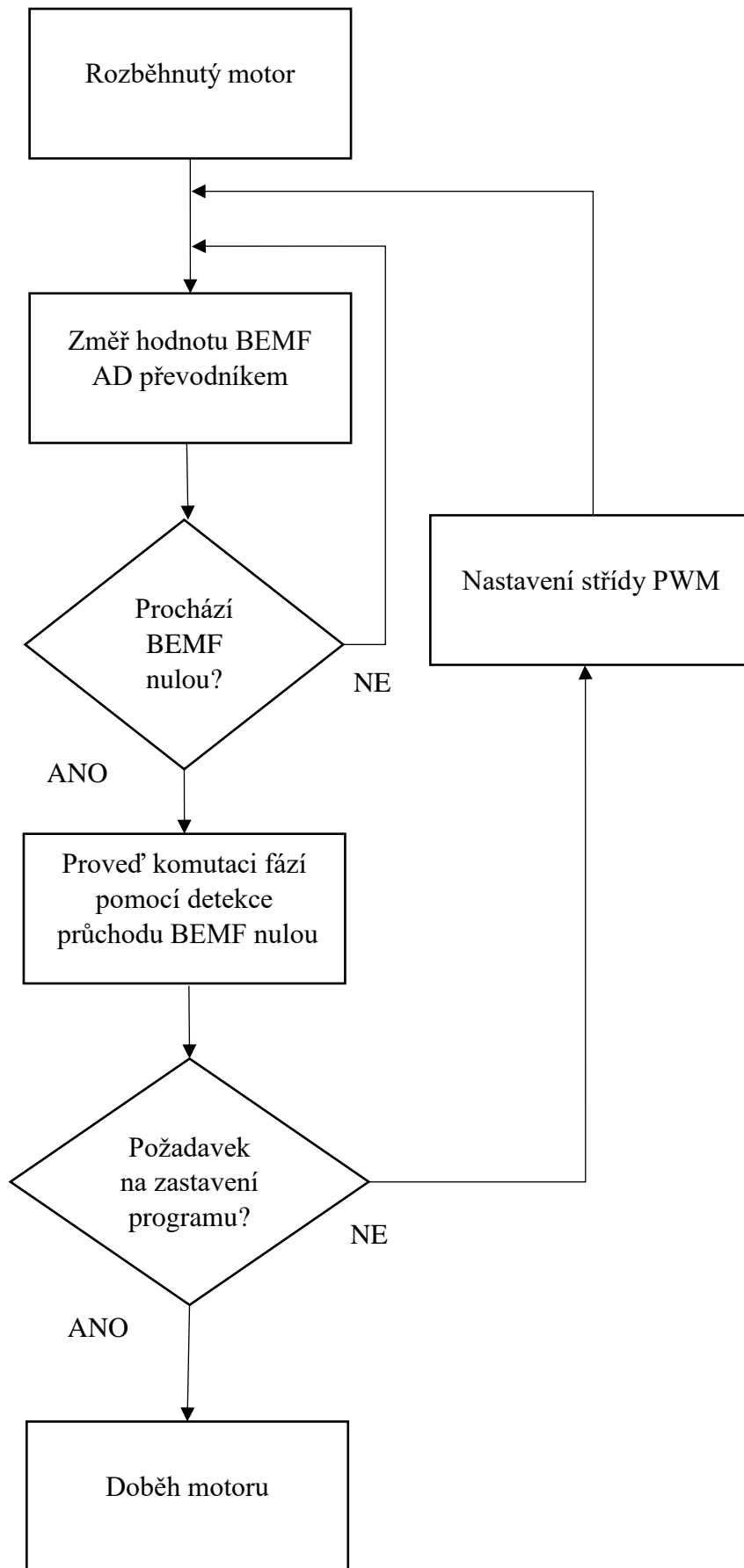
Programování řízení motoru se řídí vývojovým diagramem, který je vytvořen za účelem lepší přehlednosti a pochopení logiky systému. Vývojové diagramy jsou rozděleny do dvou částí.

První vývojový diagramu se zabývá rozběhem BLDC motoru. Při rozběhu je třeba, aby motor byl uveden do rychlosti ve, které je možno měřit průběh BEMF. V okamžiku, kdy BEMF prochází nulou program opustí smyčku a spínání fází je ovládáno podle polohy motoru. Pokud není dosaženo požadované rychlosti a BEMF nelze měřit, program nastaví menší časový interval mezi komutacemi fází.

V druhé části vývojového diagramu se motor otáčí požadovanou rychlostí, je tedy možné měřit BEMF. Zpětná elektromotorická síla se měří do okamžiku naměření průchodu nulou. V momentě průchodu BEMF na odpojené fázi nastane komutace. Pro regulaci otáček se používá velikost střídou pulsně šířkové modulace.



Obrázek 39 vývojový diagram pro rozběh motoru



Obrázek 40 vývojový diagram programu pro řízení BLDC motoru

10.1. Vytvoření řídicího Softwaru

Při tvorbě softwaru pro řízení motoru se vycházelo z vývojových diagramů. Nejdříve bylo potřeba provést inicializaci Timeru, AD převodníku, vstupů a výstupů.

Pro umožnění spínání fází podle potřeby slouží vstupy na řídicí výkonové desce „Enable_CH1“, „Enable_CH2“ a „Enable_CH3“. Řídící větve tranzistorů na fázi lze spínat pouze pokud je příslušný vstup „Enable“ na logické „1“. Po sepnutí „Enable“ na fázi lze řídit vstupní napětí motoru pomocí PWM. PWM signál se přivádí na horní tranzistory. Dolní tranzistory, které vedou proud, zůstávají sepnuté po celou dobu určitého kroku. V systému výkonové řídicí desky X-NUCLEO-IHMO7M1 je zajištěno komplementární řízení s ochranou proti společnému sepnutí tranzistorů na jedné větvi.

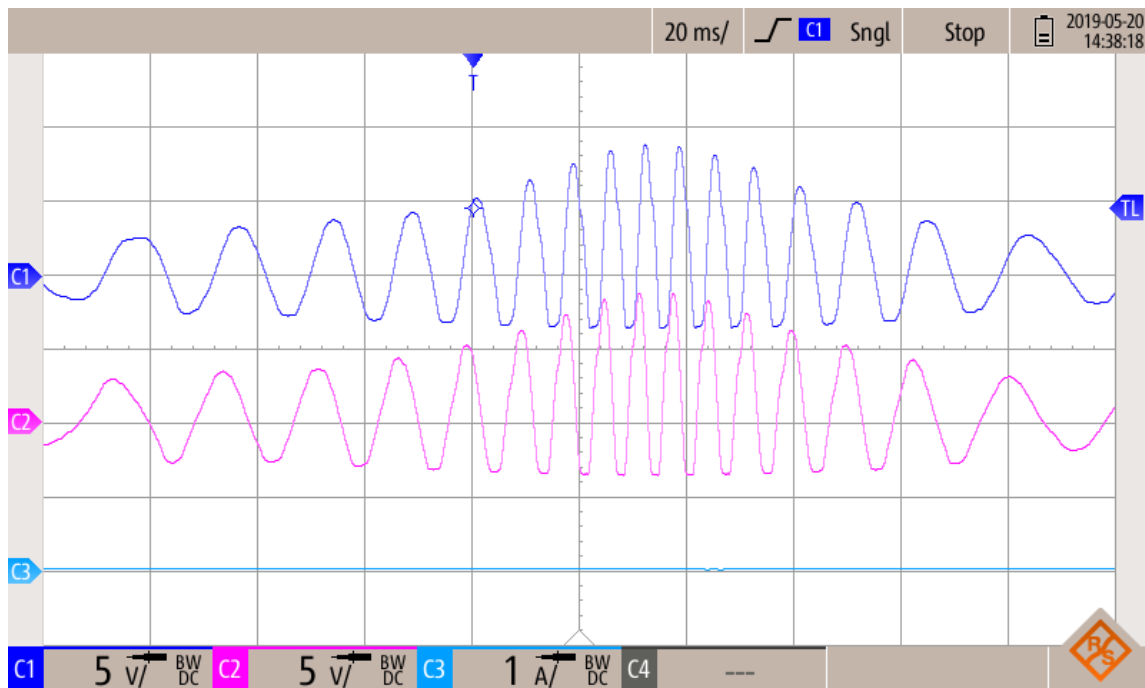
Uvedení motoru do pozice, od které by bylo možné začít spínat fáze se provedlo sepnutím fází v prvním kroku šestikrokového řízení. Pro uvedení motoru do běhu byla použita programová smyčka, která obsahovala spínání fází podle šestikrokového řízení s programovým zpožděním mezi sepnutými fázemi. V každém kroku byla měřena hodnota BEMF na fázi v nevodivém stavu. Pokud by bylo změřeno, že průběh hodnoty BEMF je vhodný a lze provést měření průchodu nulou, program se přepne do smyčky pro spínání fází podle průběhů BEMF. Pokud by hodnota BEMF nedosahovala požadovaných hodnot, zpoždění mezi sepnutými fázemi by se zmenšila. Hodnotu pro měření nulou lze zjistit pomocí programu STMStudio, kde je změřena výchozí hodnota.

Střídání sepnutí fází se vytvoří pomocí proměnné, jejíž hodnota se mění podle kroku, ve kterém je motor sepnut. Při běhu motoru se spínáním fází podle průchodu BEMF nulou je při každém kroku vytvořena smyčka, která měří v cyklu hodnotu BEMF. Pokud je detekován průchod nulou, program ukončí smyčku měření a přepne se sepnutí fází na další krok, a pomocná proměnná pro určení aktuálního kroku se změní na číslo kroku následujícího stavu. Měření průchodu nulou bylo provedeno s ukládáním předchozí naměřené hodnoty BEMF s novou hodnotou. Způsob porovnávání byl určen pomocí teorie o průchodu BEMF nulou, protože v některých krocích hodnota BEMF roste a v jiných krocích klesá.

Pro zastavení běhu programu lze vytvořit vstupní impulz například stisknutím tlačítka na desce. Program poté vypne „Enable“ signály fází a při opětovném stisknutí tlačítka program spustí rozběh motoru.

11. Naměřené průběhy

Na obrázku 41 jsou vidět signály BEMF od dvou fází. Průběhy byly získány z manuálního roztočení rotoru.



Obrázek 41 zobrazené průběhy BEMF dvou fází BLDC motoru

Na obrázku 42 jsou zobrazeny průběhy BEMF jedné fáze, pulsně šířková modulace, spínání „Enable“ signálů a proud fází BLDC motoru. Na tomto obrázku je znázorněný průběh BEMF, na kterém je možné vidět pokles a růst jeho hodnoty, podle níž je možné spínat fáze.

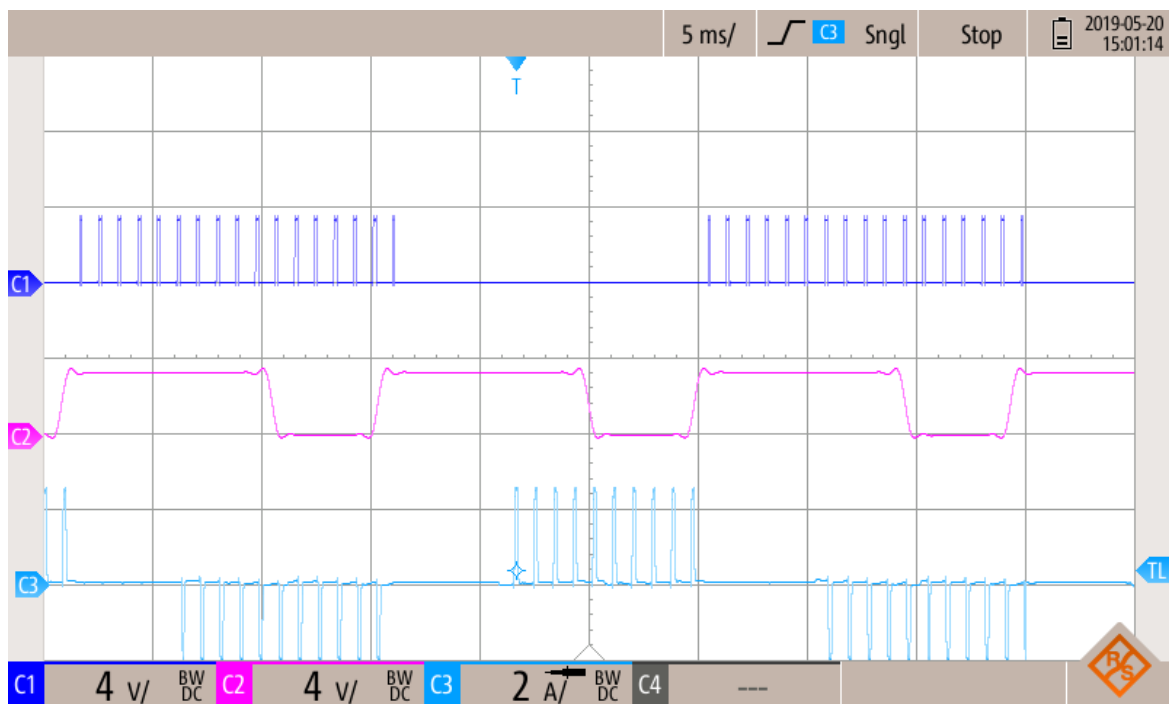


Obrázek 42 zobrazené průběhy PWM (C1), „Enable“ (C2), proudu (C3) a BEMF (C4)

BEMF je značně ovlivněn spínáním PWM. V momentě, kdy je úroveň PWM signálu rovna logické „1“ je na BEMF značný napěťový skok. Z tohoto důvodu je nutné měřit BEMF pouze ve stavu, kdy je PWM na logické „0“.

Na obrázku 43 jsou lépe znázorněné průběhy pulsně šířkové modulace, „Enable“ signálu a proudu BLDC motoru při šestikrokovém řízení.

„Enable“ signály jsou sepnuty po dobu vedení horního nebo dolního tranzistoru na jedné větvi. Průběh PWM je ovlivněn „Enable“ signálem a mění svůj charakter vždy po novém sepnutí. Proud měřené fáze je ovlivněn PWM a jeho kladný, respektive záporný směr odpovídá kroku řízení.



Obrázek 43 zobrazené průběhy PWM (C1), „Enable“ (C2) a proudu (C3)

12. Závěr

Cílem této práce bylo popsat části elektrického pohonu s důrazem na části pohonu potřebné k řízení BLDC motoru. Jedna z těchto důležitých částí je napěťový střídač, který je součástí nepřímého měniče frekvence. Největší pozornost v teoretické části je věnována konstrukčním provedením částí bezkartáčového motoru a jejich vlastnostem.

V další části práce jsou popsány jednotlivé metody zjišťování polohy rotoru. Základní možnosti měření polohy zde byly uvedeny s vysvětlením jejich funkce. Jednalo se hlavně o zjišťování polohy pomocí Hallových sond, které jsou základem pro pochopení principu měření polohy. Kromě Hallových sond jsou v kapitole o měření pomocí senzorů uvedeny i optické enkodery. U měření bez senzorů je uvedeno více způsobů pomocí, kterých je možné řídit BLDC motor. Při tvorbě byl vybrán způsob měření polohy pomocí průchodu BEMF nulou a jeho variant provedení.

Pro potřeby lepšího pochopení principu řízení, byl vytvořen simulační model v programu Matlab Simulink, kde byla vyzkoušena simulace řízení pomocí komplementárního spínání tranzistorů ve střídači. Řešení komplementárního spínání a proudové regulační smyčky v simulačním programu je uvedeno v kapitole 8.

Následujícím úkolem této práce bylo seznámení s kitem ST nucleo. Hlavními částmi mikrokontroleru pro praktickou část byly timer a AD převodník. Pro snadnější konfiguraci těchto periférií se vstupy a výstupy bylo použito prostředí STM32 CubeMX. Tento program zkracuje čas nastavování, ale jeho nevýhodou je, že uživatele neseznámí s funkcí mikrokontroleru. Logika řízení byla naprogramována ve vývojovém prostředí Keil μ Vision5.

Algoritmus řízení BLDC motoru na platformě ST nucleo je navrhnout ve formě teoretického návrhu. Návrh je zrealizován ve formě vývojových diagramů a teoretického popisu. Praktický vývoj programu nebyl dokončen z důvodu problému s konfigurací Timeru a AD převodníku.

Do budoucna je plánované rozšíření programu o funkci regulaci otáček. S touto regulací by bylo dosaženo plnohodnotného řízení BLDC motoru.

Literatura

- [1] Autom Industry Tech. Co. Ltd., 2011, Dostupné : http://www.atom.cn/FAQ_view_61.html
- [2] Brown, W. Brushless DC Motor Control Made Easy, Microchip Technology Inc., 2002. DS 00857A
- [3] Engineering Team Members Pittman Motors, Comparing Slotted vs. Slotless Brushless DC Motors [online] Ametek, Inc., Dostupné: https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ame-tek/haydonkerk/downloads/white-papers/comparing_slotted_vs_slotless_brushless_dc_motors%20l.pdf?la=en
- [4] Gao, X. BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on FRDM-KE02Z, Freescale Semiconductor, Inc. 2013, Document Number AN4776
- [5] Girija, P. K.; Prince, A. Sliding Mode Observer Based Sensorless Control of BLDC Motor under DTC Scheme, Dept. of EEE, Rajiv Gandhi Institute of Technology, Kottayam, Kerala, India 2013, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering Vydání. 2, Příloha 11
- [6] Jamshidi, J.; Tohidi, H. Sensorless Control Strategy for Brushless DC Motor Drives Based on Sliding Mode Observer, Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Malekan Branch, Islamic Azad University, Malekan, Iran, IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.16 No.12, December 2016
- [7] Koblík, P.; Pavelka, J. Elektrické pohony a jejich řízení. České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 978-80-01-06007-0.
- [8] Pavelka, J.; Čerovský, Z.; Lettl, J. Výkonová elektronika. České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-03626-6
- [9] Voženílek, P.; Novotný, V.; Mindl, P. Elektromechanické měniče České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 978-80-01-04875-7
- [10] Woodbank Communications Ltd, Electric Drives – Motor Controllers and Control Systems (Description and Applications), 2005, Dostupné: <https://www.mpoweruk.com/motorcontrols.htm#top>
- [11] Yedamale, P. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., 2003. DS 00885A
- [12] Yedamale, P., Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control, Microchip Technology Inc., 2005, DS00970A

Zdroje použitých obrázků

Obrázek **10** Autom Industry Tech. Co. Ltd., 2011,

Dostupné : http://www.autom.cn/FAQ_view_61.html

Obrázek **5, 13, 14** Brown, W. Brushless DC Motor Control Made Easy, Microchip Technology Inc., 2002. DS 00857A

Obrázek **18** Engineering Team Members Pittman Motors, Comparing Slotted vs. Slotless Brushless DC Motors [online] Ametek, Inc., Dostupné: [https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/downloads/white-papers/comparing_slotless_vs_slotless_brushless_dc_motors%20l.p\[1df?la=en](https://www.haydonkerkpittman.com/-/media/ametekhaydonkerk/downloads/white-papers/comparing_slotless_vs_slotless_brushless_dc_motors%20l.p[1df?la=en)

Obrázek **23** Gamazo-Real, J. C.; Vázquez-Sánchez, E.; Gomez-Gil, J. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends Dostupné https://www.researchgate.net/figure/Complementary-PWM-algorithm-22_fig15_45267009

Obrázek **15** Otava, L.; Buchta, L. PMSM stator winding faults modelling and measurement, 2015, ISBN 978-1-4673-9283-9

Obrázek **25** STMelectronics, Three-phase brushless DC motor drive expansion board based on L6230 for STM32 Nucleo, DocID028287 Rev 1, 2015

Obrázek **24** Webové stránky firmy Distrelec, Distrelec Gesellschaft m.b.H. Dostupné <https://www.distrelec.cz/cs/deska-stm32-nucleo-stm32f302r8t6-st-nucleo-f302r8/p/30009237>

Obrázek **20** Webové stránky firmy NPTEL, Dostupné <https://nptel.ac.in/courses/112103174/module2/lec3/images/c3.jpg>

Obrázek **11** Webové stránky, firmy RCgroups, Dostupné <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2920680-BL600MX-rewinding-instructions-for-more-kv>

Obrázek **17** Woodbank Communications Ltd, Electric Drives – Motor Controllers and Control Systems (Description and Applications), 2005, Dostupné: <https://www.mpoweruk.com/motor-controls.htm#top>

Obrázek **9, 12, 19, 21** Yedamale, P. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals, Microchip Technology Inc., 2003. DS 00885A

Obrázek **22** Yedamale, P., Using the PIC18F2431 for Sensorless BLDC Motor Control, Microchip Technology Inc., 2005, DS00970A

Neuvedené obrázky jsou vytvořené nebo pořízené autorem práce.