



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ŘÍZENÍ BLDC MOTORU SE SETRVAČNÍKEM

BLDC MOTOR CONTROL UNDER LOAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Macháček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Automatizační a měřicí technika**
Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Jan Macháček

ID: 195678

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Řízení BLDC motoru se setrvačником

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Proved'te rešerši kompaktních motorů vhodných pro dynamické zatížení setrvačником
- 2) Vyberte mikrokontrolér vhodný pro vektorové řízení třífázového motoru
- 3) Proved'te průzkum dostupných výkonových měničů vybavených vybraným mikrokontrolérem, při výběru zohledněte aktivní brždění motoru
- 4) Navrhněte testbed pro měření momentu BLDC motoru se setrvačником
- 5) Realizujte vektorové řízení na navrženém testbedu, implementujte různé metody brždění motoru
- 6) Změřte brzdný moment vybraného motoru v závislosti na připojené setrvačnosti a použité metodě brždění

DOPORUČENÁ LITERATURA:

BROWN, Geoffrey. Discovering the STM32 microcontroller. Cortex, 2012, 3: 34.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 20.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá sensorovým řízením BLDC motoru metodou FOC (vektorového řízení). Jako měnič pro BLDC motor je v první části použit měnič od firmy ST Microelectronics, v druhé části je použit měnič vlastní výroby. Oba měniče jsou osazeny mikrokontrolérem STM32F303, speciálně navrženým pro řízení BLDC motorů. Je zde použit dvacetidvou pólový motor se zabudovaným magnetickým enkodérem. Dále je zde popsán testbed pro testování reakčního momentu motoru při brždění v závislosti na připojené zátěži a jsou zde proměřeny zátěžové charakteristiky motoru při různých metodách brždění. Reakční moment motoru je měřen senzorem mechanického napětí. Je zde popsána funkce aktivního omezovače napětí napájecí sběrnice.

Klíčová slova

BLDC motor, vektorové řízení, testbed, měření momentu, aktivní brždění

Abstract

The bachelor thesis is focused on sensor control of BLDC motors by FOC (Field Oriented Control) method. In the first part of the thesis is the BLDC motor powered by ESC (electronic speed controller) by ST Microelectronics. In the second part is used own made ESC. Both ESCs encompasses STM32F303 microcontroller specially fitted for BLDC motor control. In this thesis is used BLDC motor with twenty-two poles with inbuild magnetic rotary encoder. In the next part is described testbed for motor reaction torque testing during breaking in relation to connected load and load characteristic is measured and listed. Reaction torque of motor is measured by sensor of mechanical stress. Furthermore is described function of active supply bus limiter.

Keywords

BLDC motor, FOC, testbed, torque measurement, active breaking

Bibliografická citace:

MACHÁČEK, Jan. *Řízení BLDC motoru se setrvačником*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119273>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce byl Ing. Lukáš Pohl Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou (bakalářskou) práci na téma Řízení BLDC motoru se setrvačником jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové (bakalářské) 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 17. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Pohlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **17. května 2019**

.....
podpis autora

Obsah

Seznam symbolů a zkratk	9
Seznam obrázků	11
ÚVOD	12
1 TEORETICKÝ ROZBOR	13
1.1 Rozdělení EC motorů	13
1.2 Konstrukce BLDC motoru	13
1.3 Řízení BLDC motoru	14
1.3.1 Bezsenzorové řízení	14
1.3.2 Senzorové vektorové řízení	16
1.3.3 Používané senzory u senzorového řízení	16
1.4 Transformace dvoufázového systému na třífázový	17
1.5 Transformace třífázového systému na dvoufázový	18
1.6 Komplementární spínání	19
1.7 Měření proudu	20
1.8 SPI rozhraní	21
1.9 Odporové snímače mechanického napětí (tenzometry)	23
2 POPIS HARDWARE	26
2.1 Použitý mikrokontrolér	26
2.2 Měnič č.1	26
2.3 Základní vlastnosti měniče č.1	27
2.4 Popis částí měniče č.1	28
2.5 Měnič č.2	29
2.6 Popis částí měniče č.2 - konektory	30
2.7 Popis částí měniče č.2 - součástky	31
2.8 Programátor měniče	32
2.9 Motor, snímač polohy	32
2.10 Měření reakčního momentu motoru	34
2.11 Testbed	36
3 POPIS SOFTWARE	38
3.1 Konfigurace periférií u měniče č.1	38
3.2 Konfigurace periférií u měniče č.2	39
3.3 Generování PWM výstupu	39
3.4 Měření proudu u měniče č.1	40

3.5	Měření proudu u měniče č.2.....	40
3.6	Konfigurace PWM vstupu pro zjištění polohy ze snímače polohy (měnič č.1).....	41
3.7	Konfigurace SPI komunikace se snímačem polohy (měnič č.2).....	42
3.8	Vektorové řízení	42
3.9	Proudová regulace.....	42
3.10	Omezení napětí napájecí sběrnice	43
3.11	Vyčítání dat ze snímače síly.....	43
3.12	Sledování průběhů proměnných v programu STM Studio	45
4	MĚŘENÍ.....	47
4.1	Omezení maximálního napětí napájecí sběrnice	47
4.2	Měření brzdného momentu motoru	49
4.2.1	Brždění stejnosměrným proudem	49
4.2.2	Brždění metodou zkratem fází.....	49
4.2.3	Brždění reverzací.....	50
4.2.4	Brždění metodou volného dotočení	51
	ZÁVĚR.....	52
	Použitá literatura	54

Seznam symbolů a zkratk

Zkratky:

AD	...	Analogově digitální převodník
ARM	...	Architektura procesoru
BLDC	...	Bezkartáčový stejnosměrný motor
CAN	...	Sériová datová sběrnice
DA	...	Digitálně analogový převodník
DMA	...	Přímý přístup periferie do paměti mikrokontroléru
EC	...	Elektronická komutace
FOC	...	Vektorová metoda regulace
I2C	...	Sériová sběrnice
NTC	...	Termistor s negativním teplotním koeficientem
PMSM	...	Synchronní motor s permanentními magnety
PWM	...	Pulsně šířková modulace
SPI	...	Synchronní sériová komunikace
SWD	...	Programovací konektor
TIM	...	Časovač
USART	...	Univerzální synchronní/asynchronní sériové rozhraní
USB	...	Univerzální sériová sběrnice

Symboly:

V_{CC}	...	napájecí napětí	[V]
u_a	...	napětí ve fázi a	[V]
u_b	...	napětí ve fázi b	[V]
u_c	...	napětí ve fázi c	[V]
u_α	...	napětí ve složce α	[V]
u_β	...	napětí ve složce β	[V]
u_d	...	napětí v tokotvorné složce	[V]
u_q	...	napětí v momentotvorné složce	[V]
i_a	...	proudu ve fázi a	[A]
i_b	...	proudu ve fázi b	[A]
i_c	...	proudu ve fázi c	[A]
i_α	...	proudu ve složce α	[A]
i_β	...	proudu ve složce β	[A]
i_d	...	proudu v tokotvorné složce	[A]
i_q	...	proudu v momentotvorné složce	[A]
φ	...	úhel natočení rotoru vůči statoru	[°]
R	...	el. odpor	[Ω]
l	...	délka	[m]
S	...	plocha	[m ²]
F	...	síla	[N]
M	...	moment	[Nm]
ρ	...	rezistivita	[Ωm]
U	...	elektrické napětí	[V]
I	...	elektrický proud	[I]
U_{VDD}	...	napětí napájecí sběrnice	[V]

Seznam obrázků

Obr. 1: Konstrukce BLDC motoru s vnitřním rotorem [8]	14
Obr. 2: Porovnání indukovaného napětí s polovinou napájecího napětí [10].....	15
Obr. 3: Indukované napětí porovnávané vůči virtuálnímu neutrálnímu bodu [10]	15
Obr. 4: Blokové schéma vektorového řízení.....	16
Obr. 5: Pohled na umístění třech hallových snímačů na běžném motoru [2]	17
Obr. 6: Magnetický enkodér od firmy AMS [7].....	17
Obr. 7: Senzorové řízení BLDC motoru s měničem [9]	20
Obr. 8: Zesílení měřeného úbytku napětí na rezistoru pomocí operačního zesilovače [15].....	20
Obr. 9: Hallův jev [16]	21
Obr. 10: Single Slave Mode [17]	22
Obr. 11: Multiple Slave Mode [17]	22
Obr. 12: Čtyřvodičová SPI komunikace [18]	23
Obr. 13: Dělení tenzometrů [13]	24
Obr. 14: Pružný člen se smykovým namáháním [13].....	24
Obr. 15: Plný Wheatstonův můstek [13].....	25
Obr. 16: Pohled na měnič z horní strany [11].....	27
Obr. 17: Popis částí horní strany měniče [11]	28
Obr. 18: Popis částí spodní strany měniče [11]	28
Obr. 19: Typické zapojení lineárních snímačů proudu založených na halovém jevu [19].....	29
Obr. 20: Popis konektorů měniče č. 2 shora	30
Obr. 21: Popis součástek měniče č. 2 shora	31
Obr. 22: Popis součástek měniče č. 2 zespodu.....	32
Obr. 23: Pohled na motor ze spodní a z horní strany	33
Obr. 24: Pohled na motor ze spodní strany s odmontovaným snímačem polohy	33
Obr. 25: Pohled na připájený vývod pro SPI komunikace od snímače polohy	34
Obr. 26: Senzor pro měření působící síly	35
Obr. 27: Typické zapojení elektroniky pro senzor vážení [20].....	35
Obr. 28: Discovery kit použitý pro vyčítání dat ze senzoru pro měření síly	35
Obr. 29: Navržené díly pro testbed.....	36
Obr. 30: Sestavený testbed	37
Obr. 31: Konfigurace vstupních/výstupních pinů procesoru v programu CubeMX měniče č.1 ..	38
Obr. 32: Konfigurace vstupních/výstupních pinů procesoru v programu CubeMX měniče č.2 ..	39
Obr. 33: Generování PWM výstupu	40
Obr. 34: Závislost výstupního napětí hallova snímače proudu na měřeném proudu [19].....	41
Obr. 35: Program pro vyčítání dat z mikročipu HX711 [20]	44
Obr. 36: Různé režimy zobrazení proměnných [12]	45
Obr. 37: Ilustrační obrázek sledování průběhu napětí v jednotlivých fázích pomocí programu STM Studio	46
Obr. 38: Pohled na pracoviště	47
Obr. 39: Zvýšení napětí napájecí sběrnice při brzdění.....	48
Obr. 40: Aktivní omezovač napětí napájecí sběrnice.....	48

ÚVOD

Se synchronními a asynchronními motory se v našem životě setkáváme velmi často, aniž bychom si to přímo uvědomovali. Zvláště ve výrobcích spotřební elektroniky, např. v notebooku je jich hned několik (v pevném disku, CD mechanice, ve větráčku pro chlazení procesoru). Při ukládání dat na pevný disk je potřeba, aby se jeho plotny otáčely určitou rychlostí při minimální spotřebě elektrické energie, minimální hlučnosti a maximální výdrži. Použití kartáčových motorů by zde bylo jednoznačně nevhodné z důvodu velkých ztrát na komutátoru a malé spolehlivosti. Proto se zde používají motory synchronního typu.

Úkolem je vybrat vhodný mikrokontrolér pro vektorové řízení třífázového motoru a výkonový měnič osazený tímto mikrokontrolérem. Je vybrán mikrokontrolér řady STM32F303 architektury ARM od firmy ST Microelectronics, který je přímo navržený pro řízení třífázových motorů. V první části práce je použit měnič STEVAL-ESC001V1, který obsahuje kromě vstupů a výstupů další potřebné bloky, jako je řídicí elektronika včetně procesoru STM32, výkonová elektronika se zabudovanými rezistory pro měření proudu s OZ ve všech třech fázích. Měnič je programován programátorem ST-Link, který se pomocí USB připojí k počítači. Jako motor je použit dvacetidvou pólový BLDC motor iPower motor – Gimbal BL Motor typu GBM6212H-150T s dutou hřídelí a zabudovaným absolutním magnetickým enkodérem, který se jeví jako vhodná volba pro dynamické zatížení setrvačником. Tento motor se používá u stabilizačních přístrojů kamer a fotoaparátů a je konstruován tak, aby ho bylo možné řídit s velkou přesností a kroutícím momentem.

Aby bylo možné vektorově řídit BLDC motor, je nutné implementovat algoritmus, který přepočítá úhel natočení rotoru, momentotvorný a tokotvorný vektor na třísouřadnicový systém reprezentující jednotlivé fáze motoru. Takové řízení je senzorové a vyžaduje informaci o poloze rotoru, která bude zjišťována snímači úhlů natočení. Je zde použit zabudovaný magnetický enkodér typu AS5048A, který obsahuje několik Hallovyh sond, vyhodnocovací obvody a podává tak informaci o absolutní poloze rotoru. Tento magnetický enkodér má SPI výstup a PWM výstup.

Dalším úkolem je navržení testbedu pro měření reakčního momentu motoru. Základní rám testbedu je tvořen univerzálními hliníkovými profily. Ostatní mechanické prvky jsou navrženy v programu SolidWorks a vytištěny z plastu na 3D tiskárně. Pro měření reakčního momentu motoru je použit senzor pro měření síly, běžně používaný v kuchyňských váhách. Součástí koupeného senzoru je převodní elektronika s 24-bitovým AD převodníkem, komunikujícím po speciální digitální sběrnici. Je tedy nutné naprogramovat další mikrokontrolér pro vyčítání a ukládání těchto hodnot. Pro tuto komunikaci je použit Discovery kit s procesorem STM32F4 od firmy ST Microelectronics.

Toto řízení by se dále mohlo uplatnit při realizaci balancující kostky, která dokáže balancovat na hraně, rohu, nebo se překlápět.

1 TEORETICKÝ ROZBOR

BLDC motor (anglicky Brushless Direct Current), neboli EC (electrically comutated) motor je synchronním bezkartáčovým stejnosměrným motorem s permanentními magnety umístěnými na rotoru. Díky absenci komutátoru a kartáčů dosahují tyto motory vysoké spolehlivosti a jednoduchosti. Ve většině případů jsou tyto motory trojfázové a jsou napájené ze stejnosměrného zdroje napětí.

[1]

1.1 Rozdělení EC motorů

Jedno ze základních dělení pro řízení EC motorů je podle průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Podle tohoto dělíme motory na:

- 1) BLDC – motory s lichoběžníkovým průběhem magnetické indukce ve vzduchové mezeře
- 2) PMSM (angl. Permanent Magnet Synchronous Motor) – motory se sinusovým průběhem magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

EC motory se označují společným názvem BLDC, přičemž hlavní jejich rozdíl je ve způsobu vinutí statoru a tím pádem mají jiné zpětné elektromotorické napětí. V našem případě budeme tedy označovat PMSM jako BLDC, který má sinusový průběh magnetické indukce a je řízen vektorově.

[4]

1.2 Konstrukce BLDC motoru

Motor je tvořen statorem a rotorem. Stator je trojfázový a rotor obsahuje permanentní magnety (nejčastěji neodymové). Statorové vinutí, jež je zapojeno do hvězdy je napájeno obdélníkovými proudovými pulzy střídavé polarity – tomuto se říká PWM (Pulse Width Modulation). Do každé fáze je tedy pouštěno napětí, které má sinusový průběh. Pro každou fázi jsou tato napětí od sebe navzájem posunuta o 120° . K napájení motoru se používá napěťový střídač osazený 6 tranzistory se zpětnými diodami. Přepínání těchto tranzistorů je řízeno v závislosti na úhlové poloze rotoru vůči statoru pomocí polohových snímačů, nejčastěji s Hallovými sondami, popř. pomocí resolveru nebo inkrementálního snímače. U bezsenzorového řízení lze využít jako informaci o poloze naindukované napětí na odpojené cívce statoru. Díky tomuto napětí je možné zjistit polohu rotoru. [1]

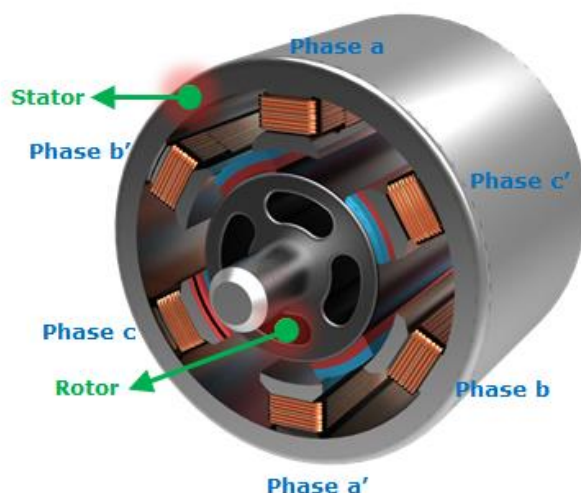
Vinutí motoru se nejčastěji vyskytuje ve dvou variantách. První varianta jsou motory s homogenním vinutím, které může být umístěno v drážkách nebo jako samonosné vinutí. Vinutí má válcovitý tvar a je zalito do epoxidu. Druhá varianta jsou

motory se soustředně uspořádanými statorovými pólovými nástavci, na nichž je umístěno vinutí. Dosahují nižších rychlostí než motory s homogenním vinutím a podobají se krokovým motorům.

Počet pólových dvojic motoru může být různý – obvykle od 1 do 7. Rotor je složen ze sudého počtu permanentních magnetů se střídajícími se severními a jižními magnetickými póly. Můžeme je rozdělit do dvou skupin:

- 1) Motory s vnitřním rotorem – zde je rotor umístěn uvnitř statoru, a tak může mít pouze omezenou velikost a tím pádem i omezenou velikost permanentních magnetů. Tyto motory dosahují menších setrvačností a jsou snadno připevnitelné díky statickému plášti motoru.
- 2) Motory s vnějším rotorem – zde je rotor umístěn kolem statoru, permanentní magnety tak mohou být větší. Tyto motory mají větší setrvačnost a kvůli rotačnímu plášti jsou obtížněji připevnitelné.

[5]



Obr. 1: Konstrukce BLDC motoru s vnitřním rotorem [8]

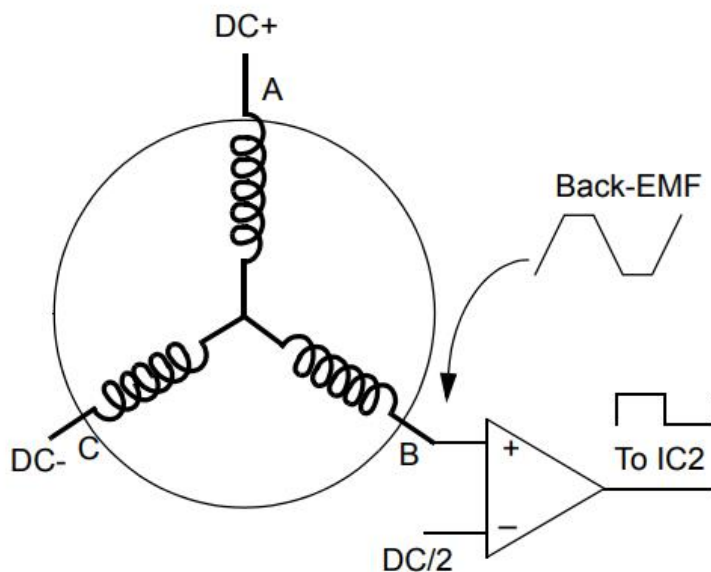
1.3 Řízení BLDC motoru

1.3.1 Bezsenzorové řízení

U tohoto způsobu řízení není k dispozici pouze přesná poloha rotoru motoru např. z hallových snímačů polohy, ovšem senzory pro měření proudu a pro měření napětí jsou zde nezbytné. Problém je tedy v určení polohy na základě měření elektrických veličin na svorkách motoru. Nejčastějším způsobem určení polohy rotoru je například měření indukovaného napětí na odpojené fázi, kdy pro informaci o poloze postačuje pouze

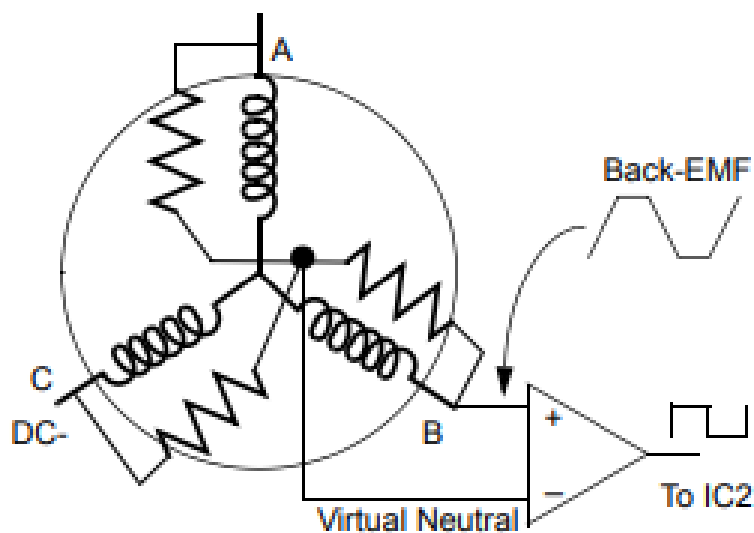
průchod indukovaného napětí nulou. To lze určit tak, že porovnáme indukované napětí s polovinou napájecího napětí. Tuto situaci znázorňuje Obr. 2.

[2]



Obr. 2: Porovnání indukovaného napětí s polovinou napájecího napětí [10]

Jednou z dalších možností bezsenzorového řízení je pomocí 3 rezistorů vytvořit virtuální neutrální bod a indukované napětí porovnávat vůči tomuto bodu [3]. To znázorňuje Obr. 3.



Obr. 3: Indukované napětí porovnávané vůči virtuálnímu neutrálnímu bodu [10]

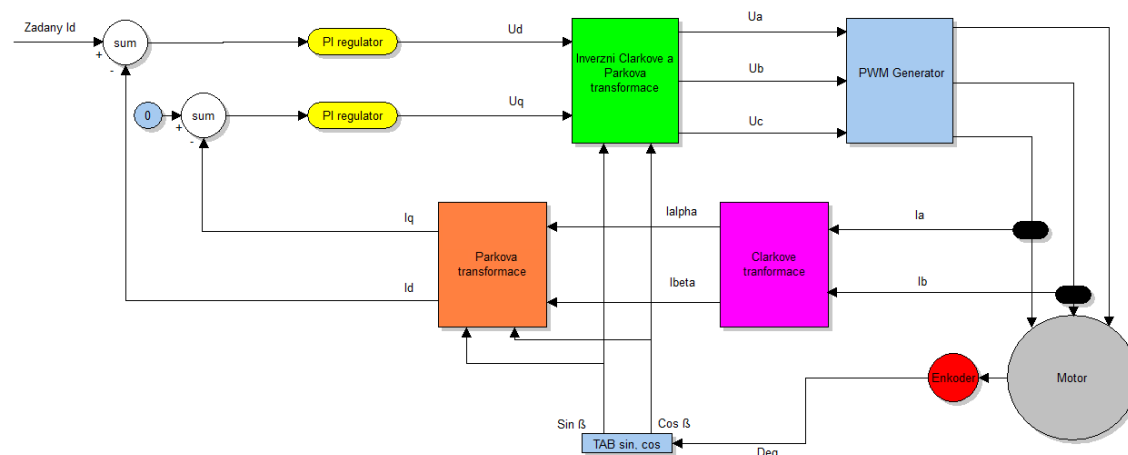
Použití bezsenzorového řízení má řadu výhod. Hlavní výhody jsou: snížení ceny za senzory a za kabeláž, zvýšení spolehlivosti a jednoduchost zapojení. Hlavní nevýhodou je menší přesnost a nemožnost řídit motor v nízkých otáčkách. Při nulových otáčkách tak není možné využít plný krouticí moment motoru.

V této práci se dále bezsenzorovým řízením zabývat nebudeme.

1.3.2 Senzorové vektorové řízení

V případě senzorového řízení je jako zpětná vazba využita informace o poloze například z Hallových snímačů polohy. Pro maximální účinnost a moment motoru je nutné, aby bylo magnetické pole statoru vyvolané proudem ve statorových cívkách a magnetické pole permanentních magnetů rotoru na sebe navzájem kolmé. K tomuto se používá FOC (Field Oriented Control), což je vektorová metoda regulace asynchronních a synchronních motorů. Její podstatou je transformace 3 statorových proudů od sebe posunutých o 120° do dvou navzájem kolmých složek, které se otáčejí synchronně s točivým magnetickým polem statoru. FOC nám tedy umožní od sebe oddělit momentotvornou a tokotvornou složku tří statorových proudů.

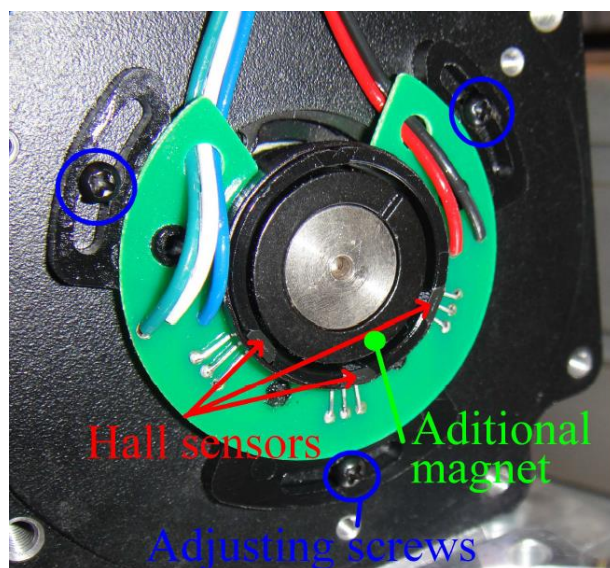
[6]



Obr. 4: Blokové schéma vektorového řízení

1.3.3 Používané senzory u senzorového řízení

Informace o poloze se u BLDC motorů běžně získává z trojice hallových snímačů umístěných na čele motoru. Na hřídeli rotoru je většinou umístěný referenční magnet a kolem něj jsou rozmístěny hallové snímače. Tyto snímače jsou navzájem pootočený o 120 elektrických stupňů. Tato varianta lze vidět na Obr. 5. Méně běžnou variantou je umístění hallových snímačů uvnitř motoru, kde snímají magnetické pole permanentních magnetů rotoru. Výstupní informace každého snímače je v binární formě.



Obr. 5: Pohled na umístění třech hallových snímačů na běžném motoru [2]

Dalším typem snímačů polohy rotoru je „trojramenný“ hallův snímač, který se umístí čelně k referenčnímu magnetu umístěného na hřídeli rotoru. Tento snímač obsahuje tři poloviny klasického hallova snímače. Výstupem je analogový spojitý průběh třech hallových napětí.

Jedním z dalších snímačů je magnetický enkodér, který má v jednom čipu několik Hallových sond, vyhodnocovací obvody a podává tak informaci o absolutní poloze rotoru. Tento typ snímače se stejně jako trojramenný hallův snímač umísťuje čelně k referenčnímu magnetu. Běžným výstupem je PWM nebo sériový výstup. V této práci se budeme zabývat tímto typem snímače.



Obr. 6: Magnetický enkodér od firmy AMS [7]

1.4 Transformace dvoufázového systému na třífázový

Abychom zajistili kolmost statorového magnetického pole a magnetického pole permanentích magnetů je nutné použít pro řízení motoru vhodnou metodu, v našem případě jde o vektorové řízení. Pro takové řízení potřebujeme transformovat dvoufázový

system na třífázový. Pro řízení potřebujeme zadat tokotvornou a momentotvornou složku a z nich vypočítat napětí jednotlivých fází. K tomu se používá inverzní Parkova transformace:

$$u_\alpha = u_d \cos(\varphi) - u_q \sin(\varphi) \quad (1.1)$$

$$u_\beta = u_d \sin(\varphi) + u_q \cos(\varphi) \quad (1.2)$$

Kde u_α a u_β je kolmý dvousouřadnicový systém pevně svázan se statorem. Pro přepočet do jednotlivých fází se používá inverzní Clarkové transformace. Pro napětí jednotlivých fází platí:

$$u_a = u_\alpha \quad (1.3)$$

$$u_b = \frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta - \frac{1}{2} u_\alpha \quad (1.4)$$

$$u_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} u_\beta - \frac{1}{2} u_\alpha \quad (1.5)$$

Při jmenovitých otáčkách požadujeme, aby vektor magnetomotorického napětí statorových proudů byl kolmý na vektor magnetické indukce permanentních magnetů, to zajistíme nastavením tokotvorné složky u_d na nulovou hodnotu. Tím získáme maximální moment motoru při minimálním proudu. Pokud však chceme zvyšovat otáčky motoru, musíme jej odbudit a to tak, že budeme zvyšovat tokotvornou složku u_d v záporném smyslu. Velikost momentu motoru určujeme velikostí momentotvorné složky u_q .

[6]

1.5 Transformace třífázového systému na dvoufázový

Pro proudovou zpětnou vazbu potřebujeme znát proud v tokotvorné a momentotvorné složce. K tomu se používá transformace třífázového systému na dvoufázový pro proudy měřené ve 3 nebo ve 2 fázích (při splnění podmínce symetrie). Při transformaci třífázového systému se složkami i_a , i_b , i_c reprezentující proudy jednotlivými fázemi na systém dvoufázový se složkami i_α , i_β se používá tzv. Clarkové transformace:

$$i_\alpha = \frac{1}{3}(2i_a - i_b - i_c) \quad (1.6)$$

$$i_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3}(i_b - i_c) \quad (1.7)$$

Při splnění podmínky symetrie:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1.8)$$

Lze použít pro výpočet složek i_α, i_β pouze 2 složky i_a, i_b :

$$i_\alpha = i_a \quad (1.9)$$

$$i_\beta = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{2} i_a + i_b \right) \quad (1.10)$$

[1]

Proudy i_α a i_β jsou ovšem svázány se statorem. Je tedy potřeba mít nový dvoufázový systém, který bude vůči původnímu systému pootočen o libovolný úhel φ , který reprezentuje úhel pootočení mezi statorem a rotorem motoru. Pro proudy v tomto novém systému podle tzv. Parkovy transformace tedy dostáváme:

$$i_q = i_\beta \cos(\varphi) - i_\alpha \sin(\varphi) \quad (1.11)$$

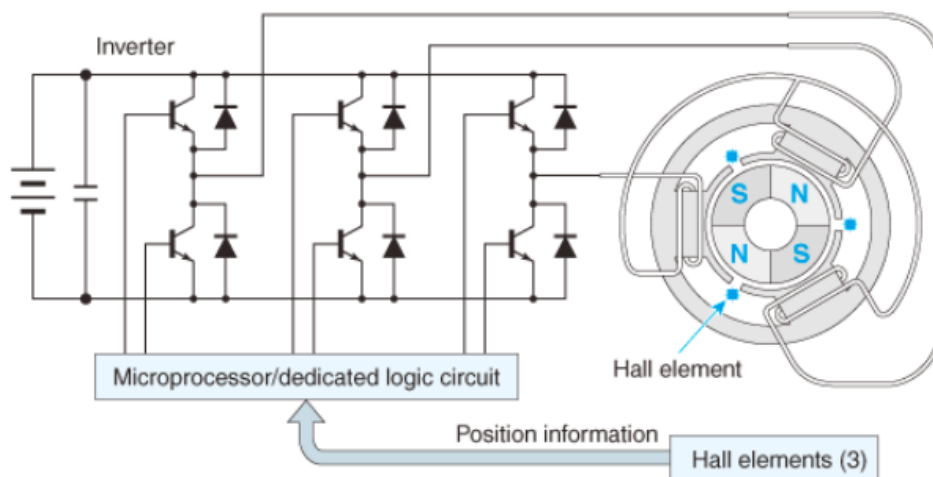
$$i_d = i_\beta \sin(\varphi) + i_\alpha \cos(\varphi) \quad (1.11)$$

[1]

Kde i_q je momentotvorná složka statorového proudu a i_d je tokotvorná složka statorového proudu.

1.6 Komplementární spínání

Pro řízení třífázového motoru se používají měniče obsahující 6 výkonových tranzistorů, kdy pro každou fázi mají 2 tranzistory (horní a dolní). Je to z toho důvodu, že každá fáze musí být v určitém časovém okamžiku připojena buď k zemi nebo k napájecímu napětí. Tyto 2 tranzistory jsou na sobě závislé – když je jeden ve stavu zapnuto, druhý je ve stavu vypnuto. Kdyby se tranzistory v jedné fázi přepínaly ve stejném časovém okamžiku, došlo by ke zkratu z důvodu parazitní doby přepnutí tranzistoru z otevřeného stavu na uzavřený a naopak. Tuto parazitní dobu způsobuje konečná doba trvání odčerpání náboje z báze. Z toho důvodu musí být mezi časy sepnutí jednotlivých tranzistorů určitá doba, která se nazývá „deadtime“, po kterou nevede ani jeden ze dvou tranzistorů.

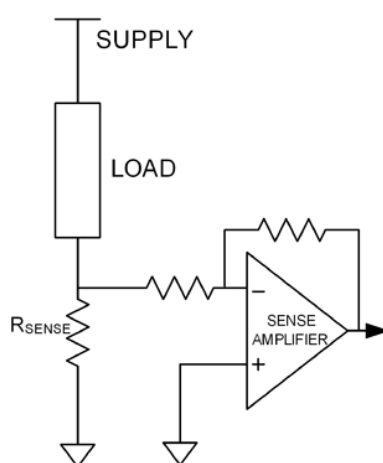


Obr. 7: Senzorové řízení BLDC motoru s měničem [9]

1.7 Měření proudu

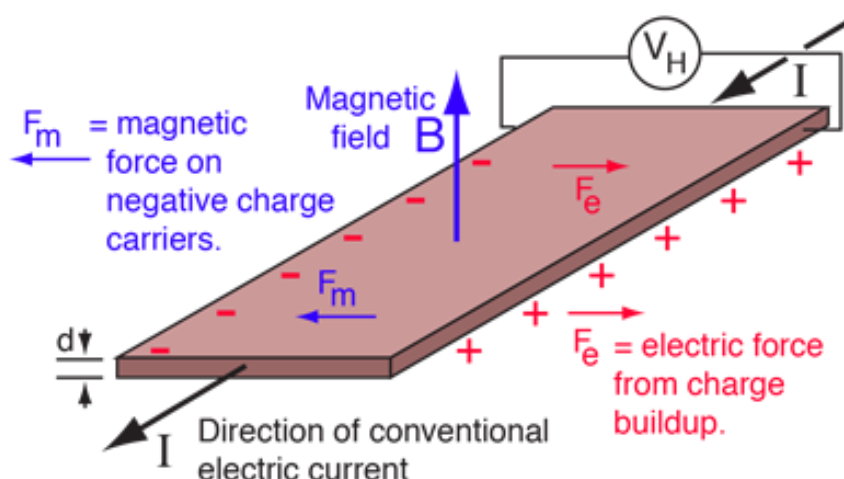
U senzorového i bezsenzorového řízení synchronních motorů lze proud měřit ve všech třech fázích motoru, v případě splnění podmínky symetrické zátěže lze proud měřit pouze ve dvou fázích a třetí dopočítat. Proud se měří z důvodu proudové zpětnovazební regulace, která lze následně použít pro otáčkovou nebo polohovou regulaci.

Jednou z variant pro měření velikosti protékajícího proudu se používají rezistory pro měření proudu. Je potřeba mít co nejmenší odpor rezistoru z toho důvodu, aby na rezistoru nebyla velká výkonová ztráta. Při zahřátí rezistoru protékajícím proudem se změní jeho parametry, což je nežádoucí jev, protože zkresluje měření. Zároveň je však potřeba zvolit takovou velikost rezistoru, aby úbytek napětí na něm byl měřitelný standardními AD převodníky. V některých případech se také používají operační zesilovače pro zesílení měřeného napětí. To zobrazuje Obr. 8:



Obr. 8: Zesílení měřeného úbytku napětí na rezistoru pomocí operačního zesilovače [15]

Další variantou pro měření proudu jsou snímače proudu založené na hallovém jevu. Vyrábí se pro různé rozsahy proudů a pro různé přesnosti, lze jimi tak měřit i velmi velké proudy s minimální výkonovou ztrátou. Nevýhoda nastává při měření malých proudů, kdy je přítomno větší množství nežádoucího šumu a informace o protékajícím proudu je tak méně přesná. Ve snímači je umístěn vodič definovaných rozměrů, kterým protéká definovaný proud. Velikost magnetického pole indukovaného vodičem, kterým protéká měřený proud, působí na hallův snímač. Z těchto informací lze jednoduše dopočítat velikost měřeného proudu. Tato velikost je dále tepelně kompenzována.



Obr. 9: Hallův jev [16]

1.8 SPI rozhraní

Pro vyčítání polohy z magnetického enkodéru je zapotřebí použít SPI. Jedná se o sériové periferní rozhraní určené pro komunikaci na krátké vzdálenosti. Používané vodiče pro SPI jsou:

MISO („Master In Slave Out“) - vodič, na který posílá nadřazená periférie data a podřazená periférie je přijímá

MOSI („Master Out Slave In“) - vodič, na který posílá podřazená periférie data a nadřazená periférie je přijímá

SCK (SCLK) („Serial Clock“) – hodinový signál pro periférii

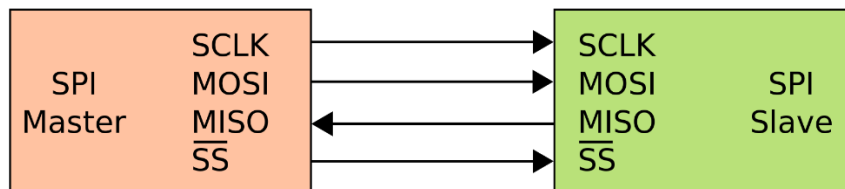
SS (CS) („Slave Select“, „Chip Select“) – při nastavení toho signálu na nízkou úroveň dojde k výběru dané periférie

SPI je možné zapojit v „Single Slave“ módu (Obr. 10), což znamená, že na SPI sběrnici se nenachází žádné jiné periferie nebo v „Multiple Slave“ módu (Obr. 11), kdy se na sběrnici může nacházet n periferií. Ke každé periférii připojené na SPI sběrnici musí vést z nadřazené periferie (např. procesor) signál SS. Signály MISO, MOSI, SCK jsou sdílené mezi všemi podřazenými perifériemi a procesorem. Z toho plyne vztah pro množství vodičů k nadřazené periférii w:

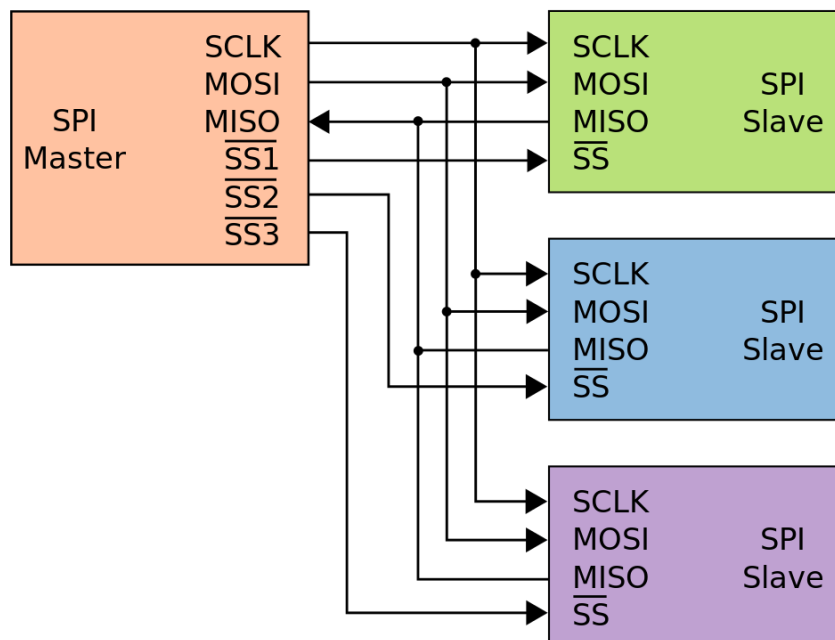
$$w = n + 3 \quad (1.12)$$

Kde n je počet periferií.

[17]

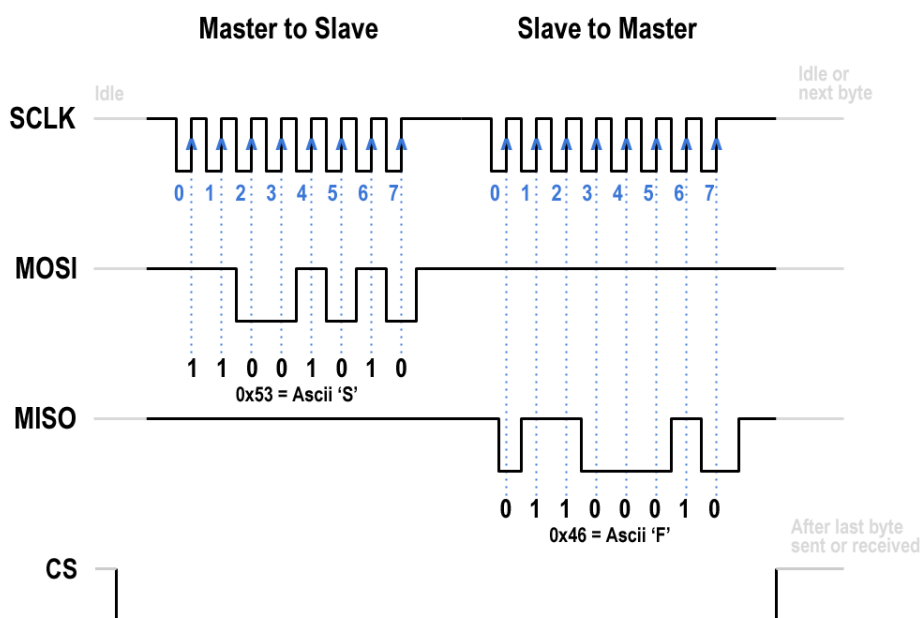


Obr. 10: Single Slave Mode [17]



Obr. 11: Multiple Slave Mode [17]

Každý přenos dat probíhá následovně: signál SS se přivede na spodní úroveň, na sběrnici MOSI se odešlou data pro danou periférii, na sběrnici MISO se vyčtou příchozí data z periferie zpožděná o 1 cyklus a následně se přivede signál SS zpět na horní úroveň, čímž se ukončí přenos dat. Čtyřvodičová osmibitová komunikace je znázorněna na Obr. 12.



Obr. 12: Čtyřvodičová SPI komunikace [18]

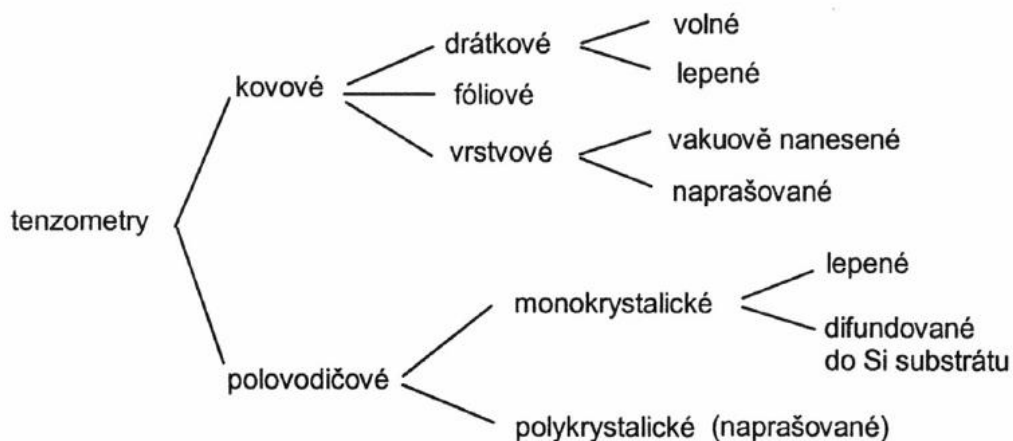
1.9 Odporové snímače mechanického napětí (tenzometry)

Mechanické napětí nelze měřit přímo, ale lze jej měřit v závislosti na deformaci. Britský vědec Charles Wheatstone zjistil, že při deformaci vodiče se nemění pouze jeho rozměry, ale také jeho mikrostruktura, která ovlivňuje rezistivitu ρ . Odpor vodiče o délce l a průřezu S je dán vztahem:

$$R = \frac{l}{S} \rho \quad (1.13)$$

[13]

Tohoto jevu se využívá při měření mechanického napětí u tenzometrických odporových snímačů. Tyto snímače mohou být použity k měření síly, tlaku, kroutícího momentu nebo mechanického napětí struktur. Podle konstrukce lze snímače rozdělit do následujících kategorií:

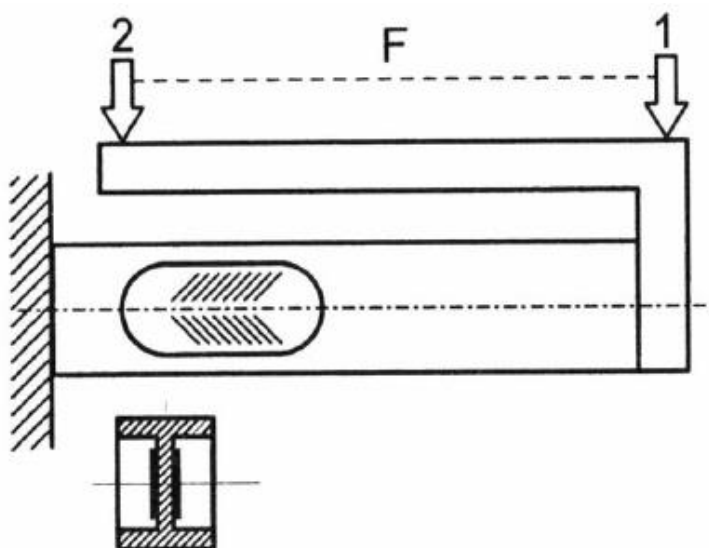


Obr. 13: Dělení tenzometrů [13]

Dnes nejpoužívanější tenzometry jsou kovové fóliové, které jsou vyráběny fotolitografickou metodou z kovových fólií upevněných na izolačních vrstvách.

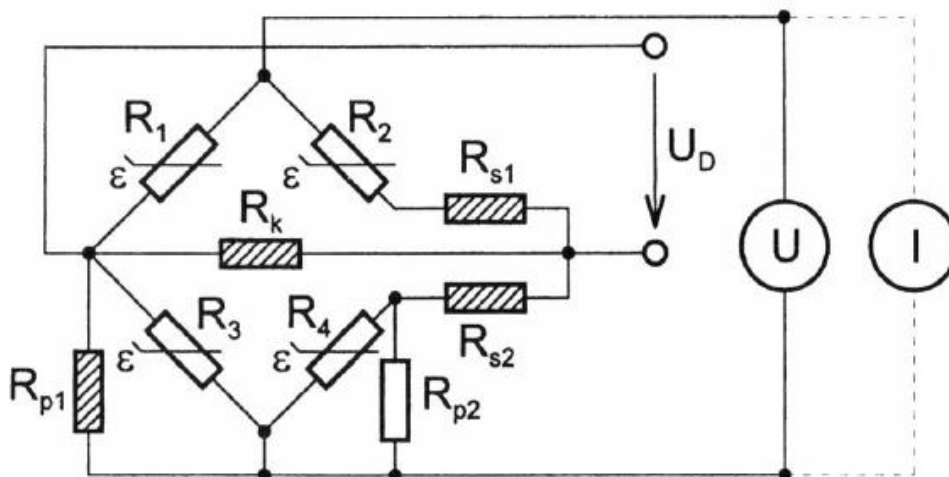
[13]

Důležitou součástí pro měření mechanického napětí jsou deformační členy, které se při působící síle deformují a tuto deformaci lze měřit odporovými tenzometry. Taková sestava tedy převádí působící sílu na elektrické napětí. U většiny deformačních členů se používají 2 tenzometry zapojeny diferenciálně pro zvýšení citlivosti. Ukázka deformačního členu je na Obr. 14:



Obr. 14: Pružný člen se smykovým namáháním [13]

Při deformaci snímače se jeho odpor mění řádově v $\text{m}\Omega$. Při napájecím napětí řádově jednotky voltů a odporu snímače $100\ \Omega$ je měřené napětí v jednotkách mV . Pro měření tak malých napětí se používají Wheatstoneovy můstky. Tento můstek je na Obr. 15:



Obr. 15: Plný Wheatstonův můstek [13]

Kde $R_1 \dots R_4$ jsou tenzometry, odpory R_{s1} , R_{s2} , R_{p1} , R_{p2} jsou pomocné odpory.

[13]

Výstupní napětí tenzometru lze také měřit AD převodníky s vysokým rozlišením (obvykle 24-bitů) a diferenciálním vstupem.

2 POPIS HARDWARE

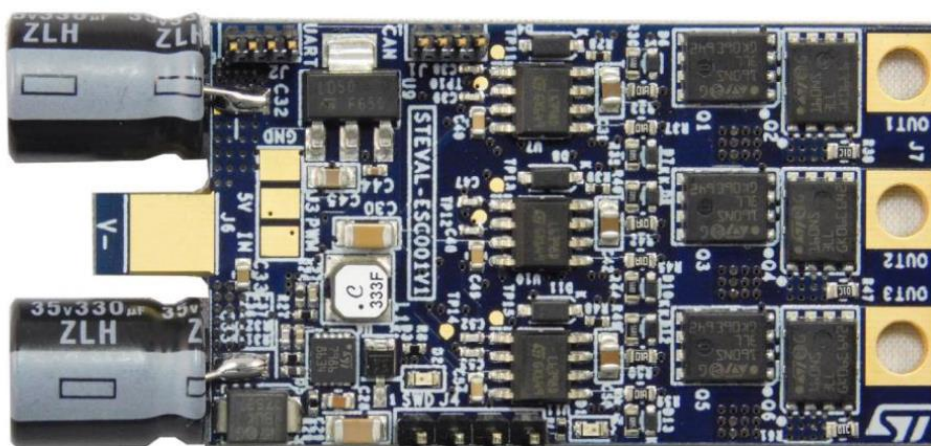
2.1 Použitý mikrokontrolér

Pro řízení motoru byl použit 32-bitový mikrokontrolér STM32F303 primárně určený pro řízení BLDC motorů. Byly nakonfigurovány periferie mikrokontroléru pro: výstupní PWM a s tím spojené časovače, AD převodníky, vstupní/výstupní piny a SPI rozhraní. Dále bylo naprogramováno vektorové řízení, obsluha AD převodníků a s tím spojené přerušovací rutiny, obsluha SPI rozhraní, proudová regulace a omezovač napětí napájecí sběrnice. Hlavní přednosti tohoto mikrokontroléru jsou:

- Taktovací frekvence až 72 MHz
- 256 Kb flash paměť
- 87 vstupních/výstupních pinů
- AD převodníky s nastavitelným rozlišením od 6 do 12 bitů
- DA převodníky s 12 bitovým rozlišením
- 13 časovačů
- 6 kanálový časovač pro řízení 6 mosfetů
- Možnost nastavení mrtvého času („deadtime“)
- Komunikační protokoly: SPI, I2C, CAN, USART/UART, USB 2.0

2.2 Měnič č.1

V první části této práce byl pro řízení motoru použit měnič pro BLDC a PMSM třífázové motory (primárně navržen pro regulaci otáček motorů dronů) typu STEVAL-ESC001V1 od firmy ST Microelectronics. Obsahuje všechny základní prvky pro řízení BLDC motoru (řídící elektronika, výkonová elektronika, vstupy, výstupy...). Je osazen mikrokontrolérem řady STM32F3 architektury ARM od firmy ST Microelectronics. K programování měniče byl použit programátor ST-Link, který lze zapojit jednou stranou do USB portu počítače a druhou stranou připojit k měniči pomocí programovacího konektoru SWD. Tento měnič lze vidět na Obr. 16.

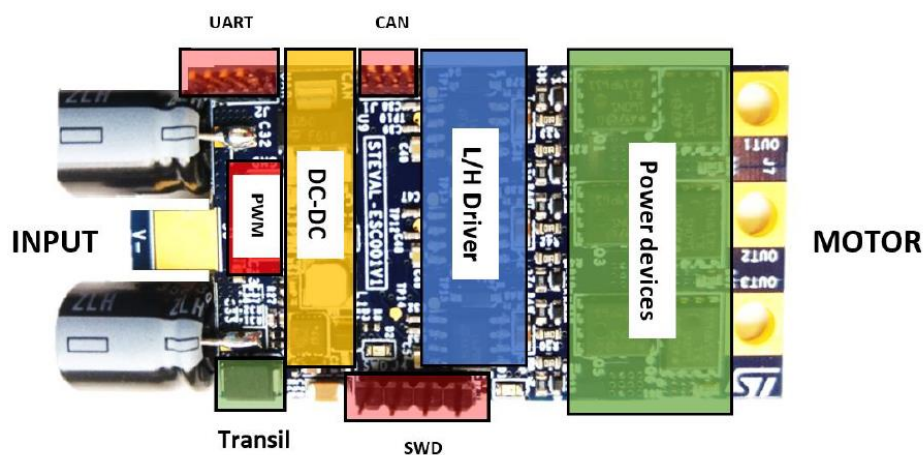


Obr. 16: Pohled na měnič z horní strany [11]

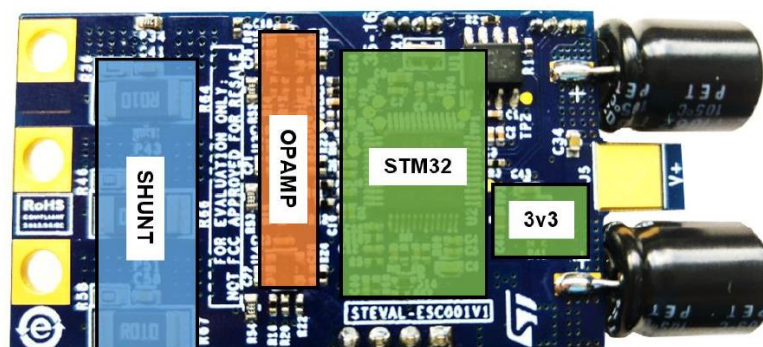
2.3 Základní vlastnosti měniče č.1

- Maximální trvalý výstupní proud: 20 A
- Špičkový proud: 30 A
- Možnost senzorového i bezsenzorového řízení
- 3 rezistory pro měření proudu ve všech 3 fázích
- Přepětové ochrany a ochrana přetížení proudem
- Měření teploty zabudovanými NTC termistory
- Komunikační sběrnice: CAN, UART, I²C, SWD (programovací konektor), PWM konektor
- 48 pinový procesor STM32 architektury ARM se 128 kB flash pamětí, taktovací frekvence 72 MHz
- Napájecí napětí od 11.1 V do 22.2 V
- Možnost měření vstupního napětí

2.4 Popis částí měniče č.1



Obr. 17: Popis částí horní strany měniče [11]

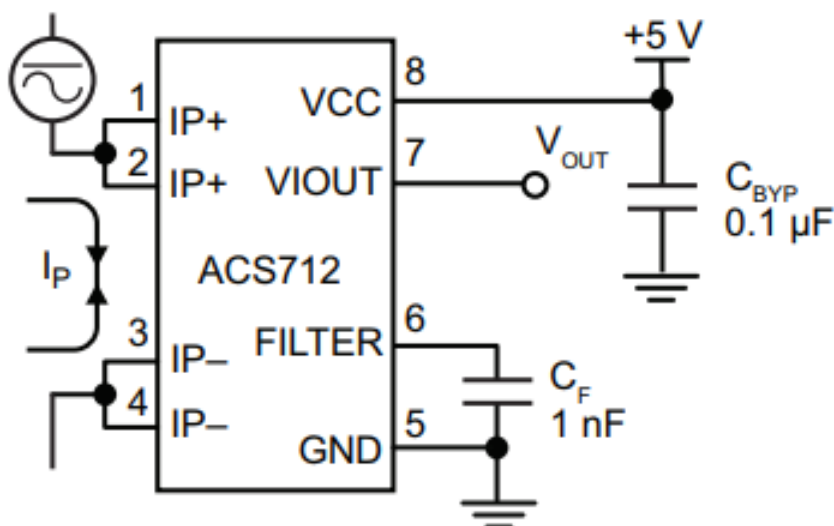


Obr. 18: Popis částí spodní strany měniče [11]

INPUT	- Kontakty pro připojení zdroje
DC-DC	- Spínaný „step-down“ zdroj
L/H Driver	- Drivery pro výkonové mosfety
Power devices	- Výkonové mosfety
PWM	- PWM vstup
MOTOR	- Kontakty pro připojení motoru
SHUNT	- Rezistory pro měření proudu
OPAMP	- OZ pro rezistory pro měření proudu
STM32	- Mikrokontrolér STM32F303
3V3	- Stabilizátor 3,3V pro napájení logiky

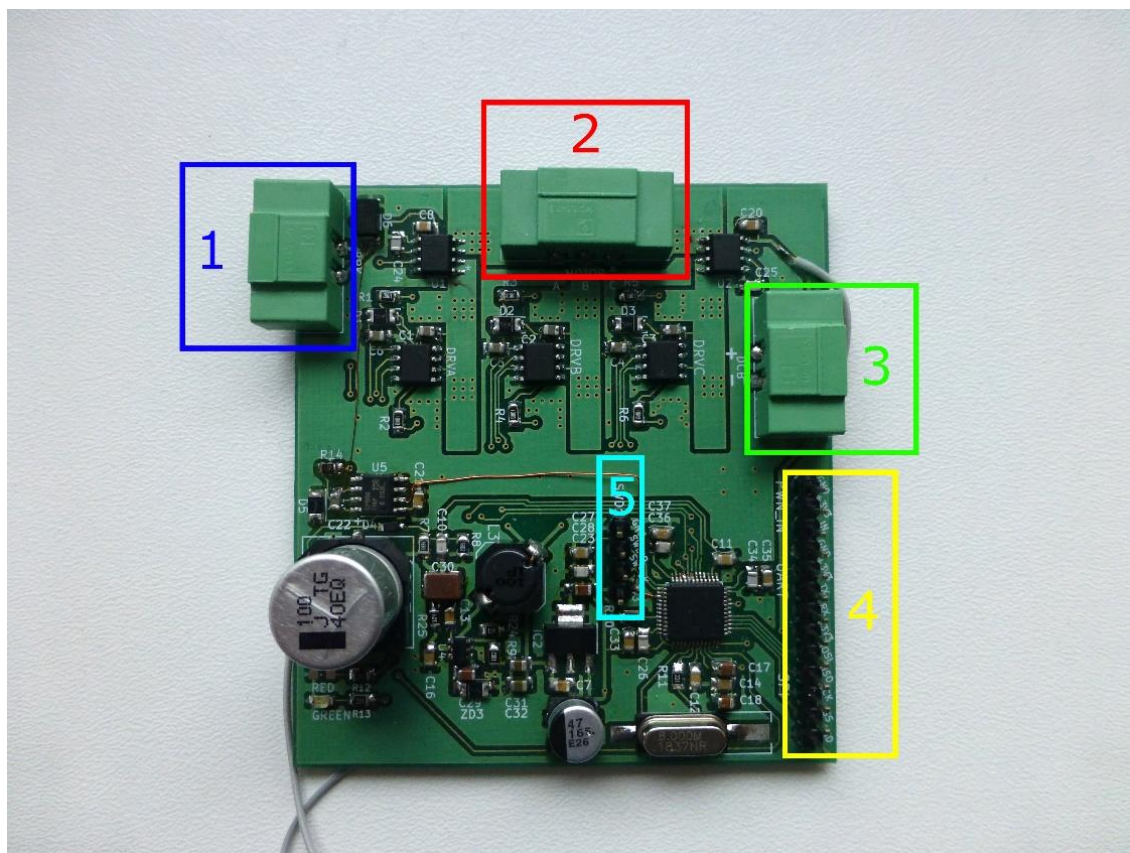
2.5 Měnič č.2

V druhé části této práce byl použit měnič navržen Ing. Lukášem Pohlem, Ph.D., který bylo potřeba následně osadit součástkami a oživit. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu nedostatečných vlastností zakoupeného měniče, např. nemožnost připojení SPI pro komunikaci s ostatními zařízeními. Vyrobený měnič je rovněž osazen procesorem řady STM32F3 architektury ARM od firmy ST Microelectronics. Místo rezistorů pro měření proudu jednotlivých fází byly použity lineární snímače proudu založené na hallovém jevu. Jejich typické zapojení je na Obr. 19. Díky splnění podmínky symetrické zátěže se proud měří pouze ve dvou fázích a třetí je dopočtena. Dále byl přidán další tranzistor pro brzdný rezistor pro případné snížení napětí napájecí sběrnice. To může být zvýšeno například při brždění, kdy motor přechází do generátorového režimu. Tato situace nastává zejména u zdrojů, které nejsou schopny se chovat při opačném napětovém spádu jako spotřebič.



Obr. 19: Typické zapojení lineárních snímačů proudu založených na hallovém jevu [19]

2.6 Popis částí měniče č.2 - konektory

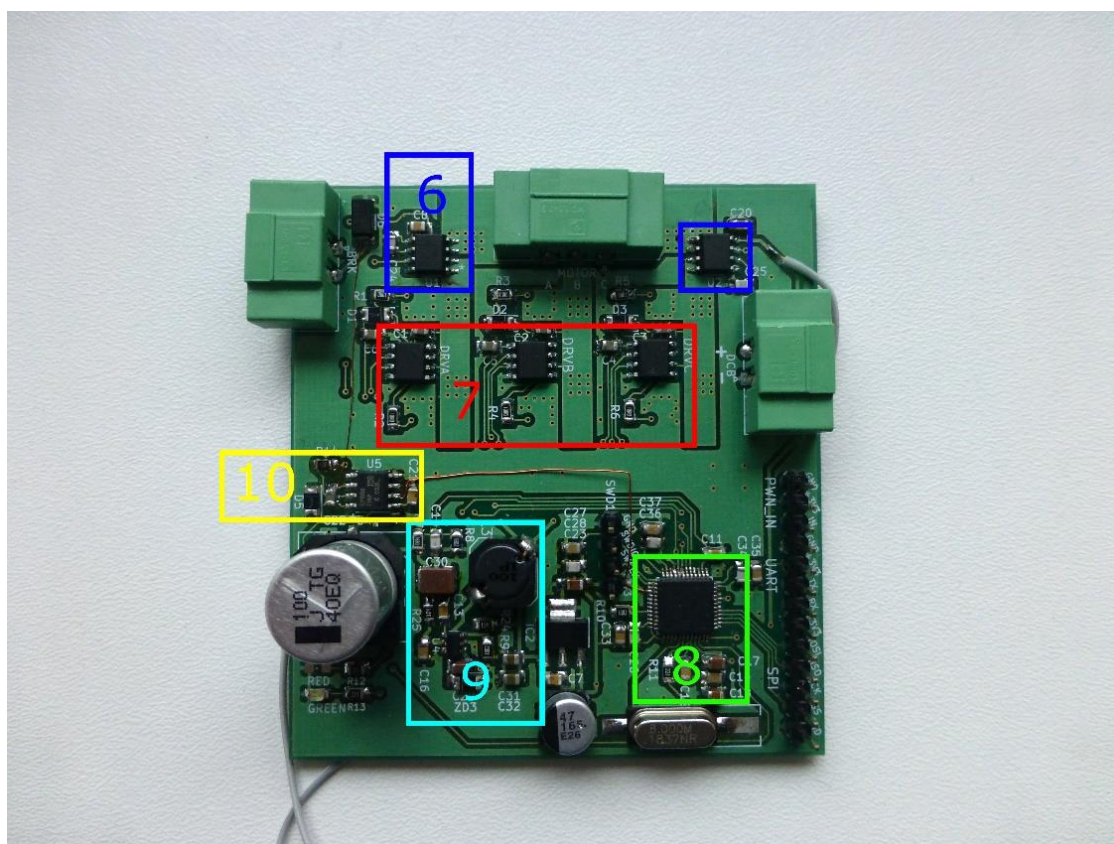


Obr. 20: Popis konektorů měniče č. 2 shora

Konektory pro připojení:

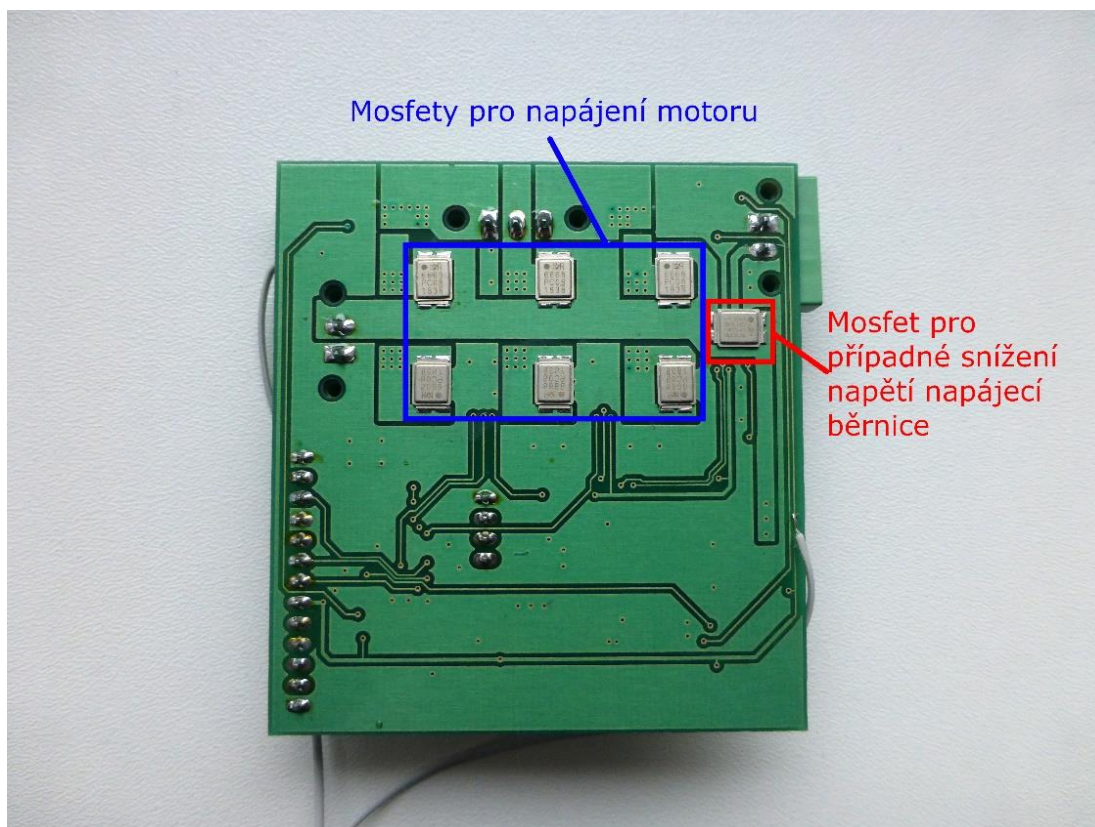
- 1 - brzdného odporu pro případné snížení napětí napájecí sběrnice
- 2 - motoru
- 3 - hlavního napájení
- 4 - SPI komunikace, UART komunikace, PWM vstupu
- 5 - programátoru k naprogramování měniče

2.7 Popis částí měniče č.2 - součástky



Obr. 21: Popis součástek měniče č. 2 shora

- 6 - snímače proudu na principu hallova jevu
- 7 - drivery pro výkonové mosfety pro napájení motoru
- 8 - procesor STM32f303
- 9 - spínaný 12V „step-down“ zdroj
- 10 - driver pro výkonový mosfet pro případné snížení napětí napájecí sběrnice



Obr. 22: Popis součástek měniče č. 2 zespodu

2.8 Programátor měniče

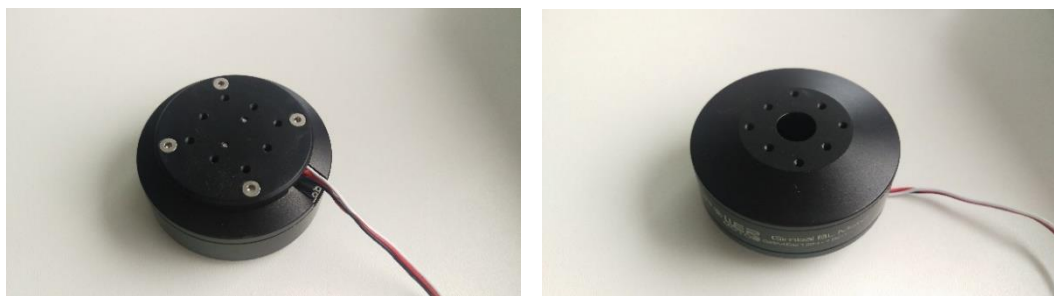
K programování měniče byl použit programátor ST-Link, který lze zapojit jednou stranou do USB portu počítače a druhou stranou připojit k měniči pomocí programovacího konektoru SWD. Tento programátor umožňuje provozovat procesor také v ladícím režimu a sledovat tak v reálném čase průběhy jednotlivých globálních proměnných programu nebo program trasovat.

2.9 Motor, snímač polohy

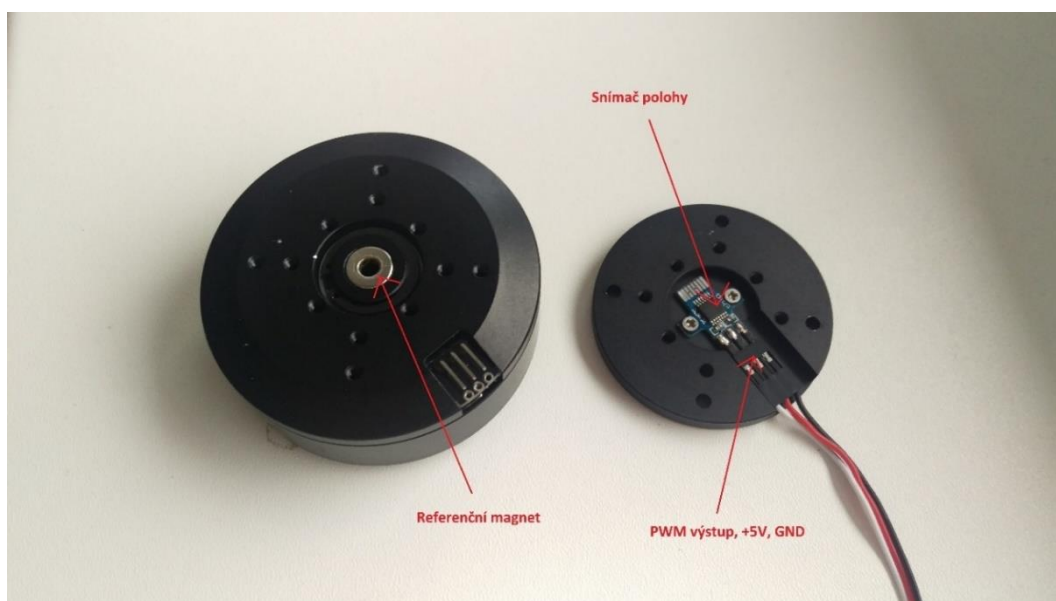
Pro dynamické zatížení motoru setrvačником jsou vhodné motory s větším počtem pólových dvojic. Tyto motory dosahují sice menších maximálních otáček, ale za to mají větší krouticí moment, a to již od nízkých otáček. V neposlední řadě lze tyto motory velmi přesně řídit. Z toho důvodu se používají zejména u elektronických stabilizátorů kamer, kdy přesnost pohybu, akcelerace a krouticí moment jsou klíčové vlastnosti.

Použitý motor je dvaceti dvou pólový iPOWER MOTOR Gimbal BL Motor typu GBM6212H-150T. Motor již obsahuje snímač polohy. Je jím magnetický enkodér

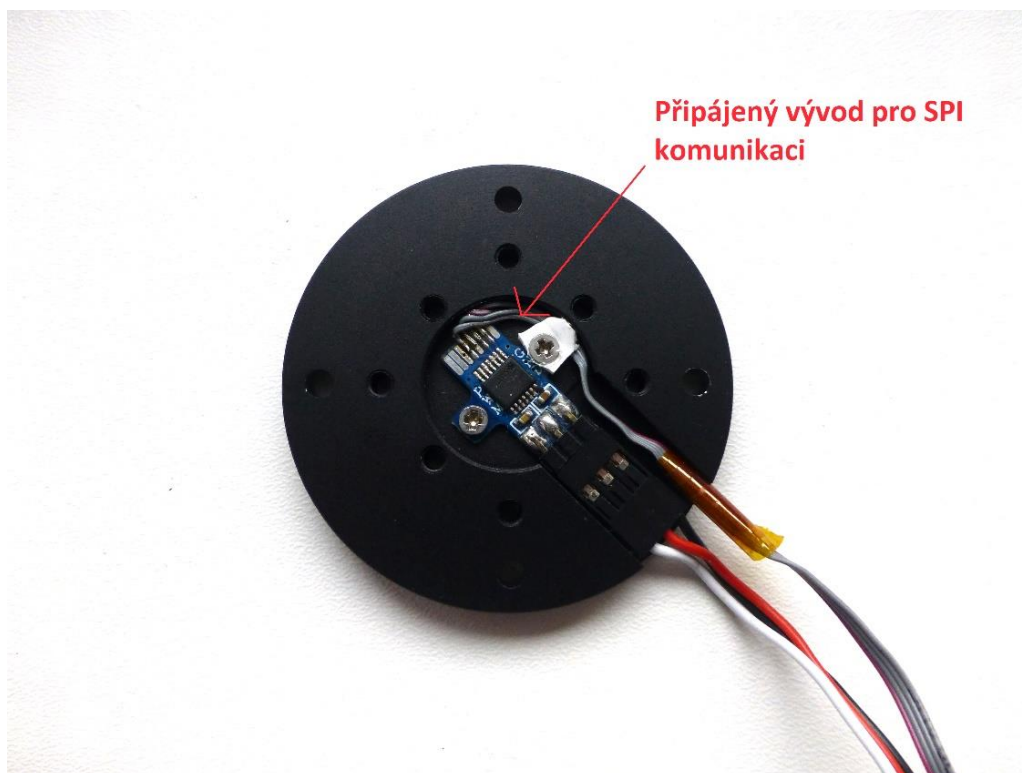
s hallovými snímači magnetického pole SPI a PWM výstupem. U měniče č.1 byl použit výstup PWM kdy šířka pulzu odpovídá úhlu natočení rotoru vůči statoru (0° - 360°). U měniče č.2 byla použito SPI rozhraní, kvůli kterému se musel připojovat k vývodům snímače kabel, což lze vidět na Obr. 25. Důvod přechodu na SPI rozhraní byl větší přesnost měřené polohy, minimální šum způsobený převodem PWM signálu zpět na digitální a v neposlední řadě podstatně vyšší rychlost přenosu dat. V rotoru, těsně nad snímačem polohy, je umístěn referenční magnet, od kterého se určuje poloha.



Obr. 23: Pohled na motor ze spodní a z horní strany



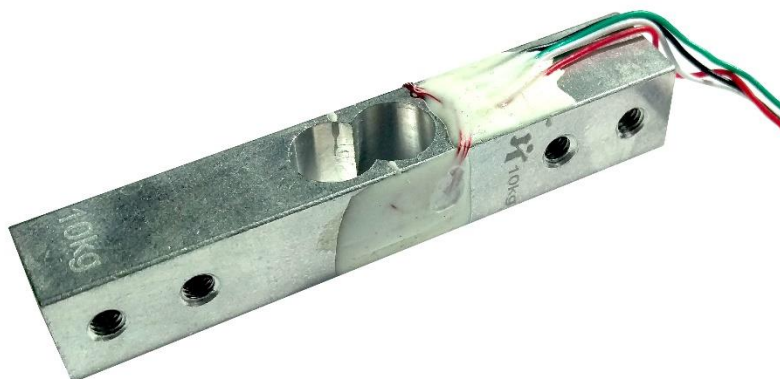
Obr. 24: Pohled na motor ze spodní strany s odmontovaným snímačem polohy



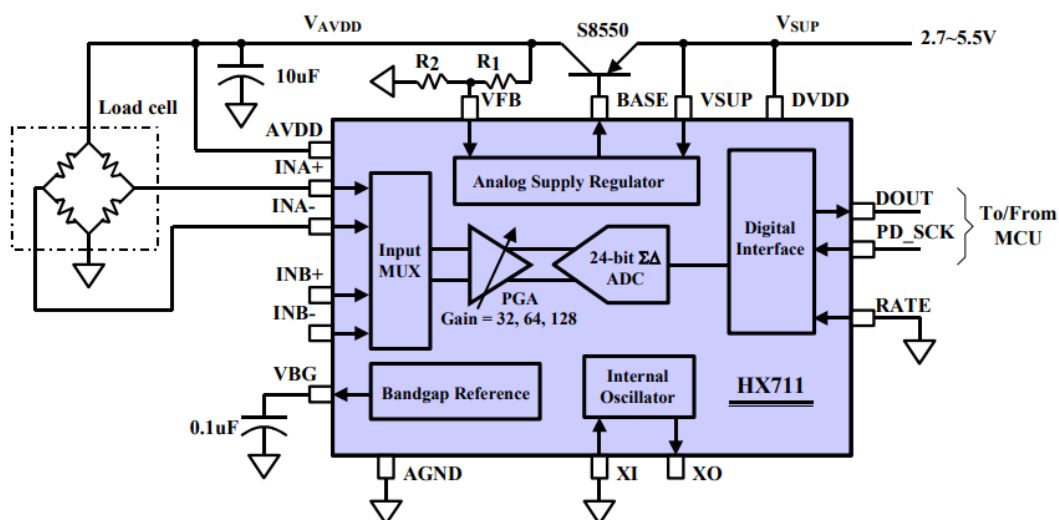
Obr. 25: Pohled na připájený vývod pro SPI komunikace od snímače polohy

2.10 Měření reakčního momentu motoru

Pro měření reakčního momentu motoru byl použit deformační prvek s diferenčním zapojením tenzometrů s rozsahem 10 kg (Obr. 26) a 1 kg. Běžně se tento senzor používá v kuchyňských váhách. Součástí senzoru byla také elektronika, která obsahuje nezbytné diskrétní součástky pro tenzometry a 24-bitový AD převodník typu HX711. Typické zapojení je na Obr. 27.



Obr. 26: Senzor pro měření působící síly



Obr. 27: Typické zapojení elektroniky pro senzor vážení [20]

Tento AD převodník komunikuje přes speciální digitální sběrnici. Bylo tedy nutné vybrat mikrokontrolér pro obsluhu této komunikace a vyčítání hodnot z AD převodníku. Zvolen byl Discovery kit od firmy ST Microelectronics (Obr. 28). Kit je osazen procesorem STM32F407 a všemi podpůrnými obvody. Rovněž obsahuje zabudovaný programátor ST-LINK. Tento kit lze tedy pouze pomocí USB kabelu připojit k počítači a naprogramovat.



Obr. 28: Discovery kit použitý pro vyčítání dat ze senzoru pro měření síly

2.11 Testbed

Pro měření reakčního momentu motoru bylo nutné navrhnout testbed. Základní rám je sestaven z univerzálních hliníkových profilů. Na nich jsou přišroubované dva ložiskové domky (díl 1), kdy každý domek má otvory s osazením pro dvě ložiska. Byly použity 2 hřídele o průměru 8 mm s vyvrtanými otvory na koncích pro zafixování přírub aretačními šroubky. Na konci jedné hřídele je upevněna příruba s pákou pro uchycení motoru a tenzometru (díl 2). Druhá hřídel má na jednom konci přírubu pro přišroubování setrvačnicku (díl 6) a na druhém konci polovinu pružné hřídelové spojky (díl 5). Druhá polovina pružné spojky je přišroubována na rotoru motoru (díl 3). Mezi oběma polovinami je vložen pružný element (díl 4). Tenzometr je uchycen na jedné straně k přírubě s pákou a na druhé straně úchytem k rámu (díl 7). Hřídel je zajištěna proti osovému posunu fixačními kroužky (díl 8).

Všechny výše zmíněné díly byly vytvořeny v programu SolidWorks a následně vytištěny z plastu pomocí 3D tiskárny. Tyto díly jsou na Obr. 29. Sestavený testbed je na Obr. 30.



Obr. 29: Navržené díly pro testbed



Obr. 30: Sestavený testbed

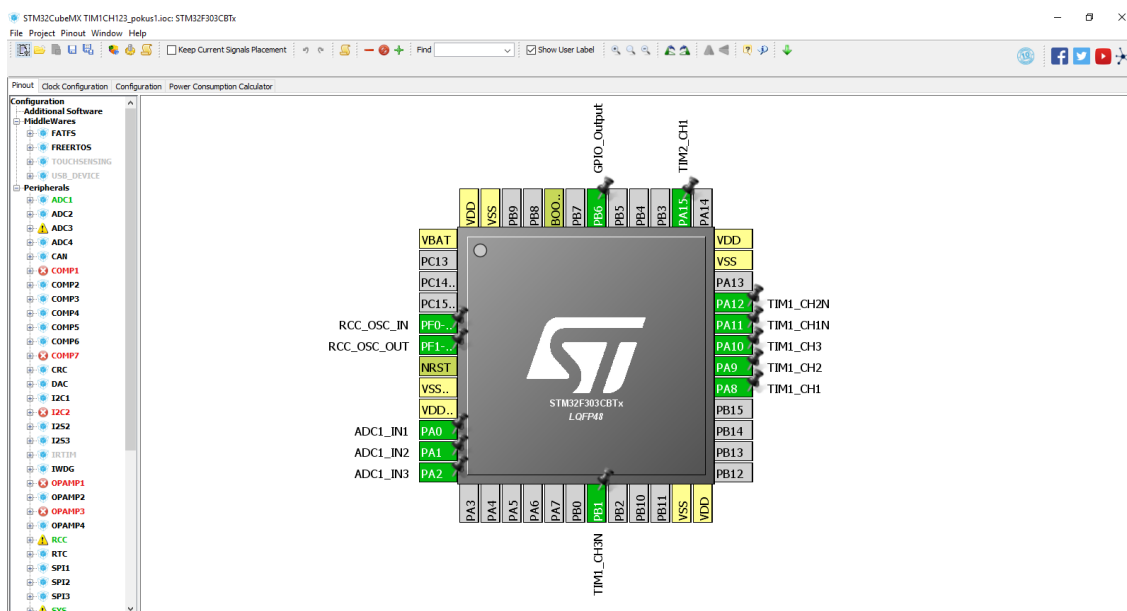
3 POPIS SOFTWARE

Ke konfiguraci periférií procesoru STM32 byl použit program CubeMX od firmy ST Microelectronics, který vytvoří základní kostru v programovacím jazyce C. Pro následné doplnění kódu o algoritmy bylo použito programovací prostředí Keil uVision5. Konfigurace periférií byla pro měnič č.1 a měnič č.2 lehce odlišná, proto zde jsou popsány konfigurace periférií obou měničů. Průběhy jednotlivých globálních proměnných programu lze sledovat v programu STM Studio.

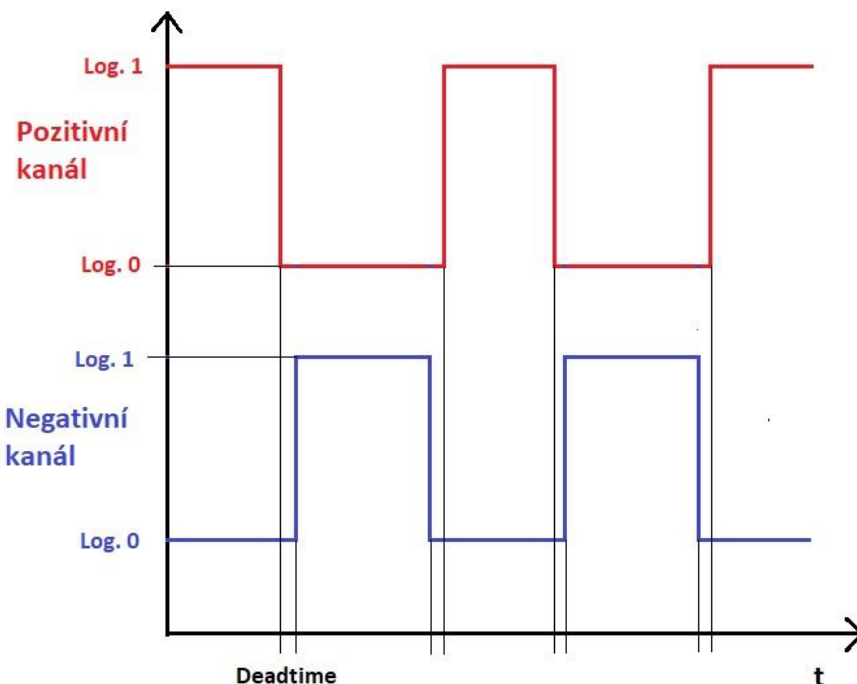
3.1 Konfigurace periférií u měniče č.1

V programu CubeMX bylo potřeba nastavit několik periférií:

- Vstupní/výstupní piny
- 3 časovače
- Externí zdroj hodin
- PWM výstup v komplementárním režimu
- ADC převodníky pro měření proudů jednotlivých fází
- PWM vstup pro zpětnou vazbu z čidla polohy rotoru motoru
- Přerušovací rutina pro AD převodníky, PWM vstup a změnu střidy výstupní PWM



Obr. 31: Konfigurace vstupních/výstupních pinů procesoru v programu CubeMX měniče č.1



Obr. 33: Generování PWM výstupu

3.4 Měření proudu u měniče č.1

Proud je nutné měřit při otevřeném spodním mosfetu, a to z toho důvodu, že rezistory pro měření proudu jsou umístěny vždy mezi spodním mosfetem a zemí. Proto je potřeba mít synchronizaci s PWM výstupem, abychom měřili proud ve správný časový okamžik. K tomu byl použit trigger časovače č. 1, který je vyvolán, když časovač dosáhne nulové hodnoty. Jelikož je PWM středově zarovnaná, znamená to, že trigger bude vyvolán právě ve středu pulzu. Zda-li bude v tomto okamžiku sepnut horní nebo spodní tranzistor záleží na nastavení PWM. V tomto případě je nastavena tak, aby při nulové hodnotě čítače byl sepnut spodní tranzistor. Tím dostaneme signál k měření proudu.

Trigger spustí převod AD převodníku a ten při dokončení převodu vyvolá přerušovací rutinu, ve které se naměřená hodnota zapíše do proměnné a je pak možné s ní dále pracovat.

3.5 Měření proudu u měniče č.2

Při měření proudu halovými snímači pro měření proudu je vhodné proud měřit vždy ve stejné části PWM výstupu. Byl zvolen okamžik, kdy je sepnut horní tranzistor. Snímače mají analogový výstup, který je přiveden na piny procesoru, na kterých jsou nakonfigurovány dvanácti bitové AD převodníky. Maximální hodnota v dekadické soustavě je tedy 4095, přičemž to znamená maximální vstupní napětí AD převodníku,

v našem případě 3.3 V. Pro přepočet hodnoty z AD převodníku na napětí tak použijeme vztah:

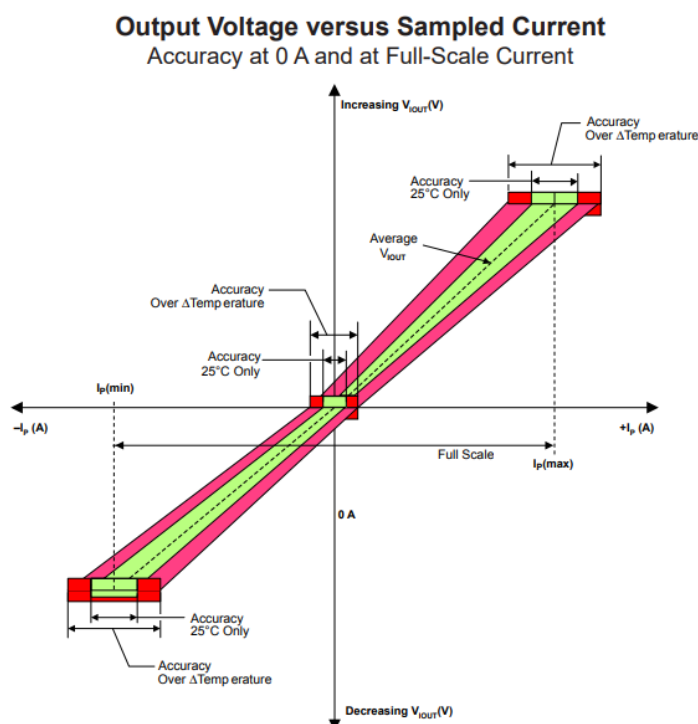
$$U_{m\check{r}} = \frac{ADC_hodnota}{4095} \cdot (3.3 + k) \quad (3.1)$$

Tímto výpočtem dostaneme hodnotu napětí na výstupu hallova snímače. Nyní je potřeba toto napětí přepočítat na proud. Citlivost snímače je 0.185 V/A. Při proudu 0 A je na výstupu snímače napětí $VCC/2$. Tedy vztah pro výpočet proudu je:

$$I_{m\check{r}} = \frac{U_{m\check{r}} - \frac{VCC}{2} + k}{0.185} \quad (3.2)$$

kde k je korekce.

Závislost výstupního napětí hallova snímače proudu na měřeném proudu je znázorněno na Obr. 34.



Obr. 34: Závislost výstupního napětí hallova snímače proudu na měřeném proudu [19]

3.6 Konfigurace PWM vstupu pro zjištění polohy ze snímače polohy (měnič č.1)

Jelikož použitý magnetický enkodér má PWM výstup, je nutné nastavit PWM vstup abychom mohli číst aktuální polohu rotoru. Nejprve byl nastaven další čítač

(TIM2), který má nastavenou maximální periodu čítání a frekvenci 1 MHz, čímž získáme rozlišení 1 μ s.

Čítač byl nastaven na detekci náběžné i sestupné hrany. Pokud nastane tato událost, čítač vyvolá připravenou rutinu přerušení, ve které se zjistí, v jakém stavu je čítač a která hrana vyvolala přerušení. Pokud je detekce náběžné hrany, pouze se vynuluje čítač. Při sestupné hraně se odečte hodnota čítače, která nyní reprezentuje délku pulzu v μ s. Tato hodnota se zapíše do proměnné, abychom s ní mohli dále pracovat. Lze využít i toho, že při další náběžné hraně odečteme opět hodnotu čítače a získáme tak informaci o periodě PWM, kterou lze následně použít při výpočtu.

3.7 Konfigurace SPI komunikace se snímačem polohy (měnič č.2)

Pro komunikaci se snímačem polohy byla použita sériová sběrnice SPI. Oproti PWM komunikaci měla pro nás 2 klíčové výhody: podstatně větší rychlost přenosu dat a větší přesnost přenesené informace. Mezi další výhody patří možnost kontrolovat stav snímače (například pokud nepřešel do chybového stavu) a nastavovat různé parametry snímače.

Snímač je zapojen čtyřvodičově v „Single Slave“ módu, což znamená, že na SPI sběrnici se nenachází žádná jiná periférie.

3.8 Vektorové řízení

Pomocí inverzní Clarkové a Parkovy transformace, se složky d, q a úhel natočení rotoru přepočítá na složky a, b, c reprezentující napětí jednotlivých fází motoru. Úhel natočení se získá z již zmíněného magnetického enkodéru. U měniče č.1 je poměru délky pulzu a periody PWM signálu úhel natočení rotoru. U měniče č.2 se vyčte hodnota přímo z SPI sběrnice a přepočte se na úhel natočení. Podle počtu pólových dvojic motoru je potřeba přepočítat tento úhel na polohu jednotlivých pólových dvojic. Složky d a q jsou následně řízeny zpětnovazební proudovou regulací.

3.9 Proudová regulace

Vzhledem k zašuměné informaci o proudu z hallových snímačů pro měření proudu bylo nutné nastavit dominantní I složku PI regulátoru a volit menší P složku, protože P složka zesiluje šum a regulace by nebyla kvalitní. Postupným zvyšováním obou složek bylo nakonec dosaženo optimální odezvy regulačního obvodu na skokovou změnu žádaného proudu a také skokovou změnu poruchy. U všech reálných systémů, které nemají možnost nekonečně velké akční veličiny dochází vlivem I složky k jevu nasycení („wind-up“ jev). Z tohoto důvodu bylo nutné použít jednoduchý „anti-wind-up“ mechanismus v podobě vhodně zvolené saturace I složky.

3.10 Omezení napětí napájecí sběrnice

Pro měření napětí napájecí sběrnice slouží napěťový dělič. Rezistory napěťového děliče mají hodnoty: $R_1 = 169 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 18 \text{ k}\Omega$. Úbytek napětí se měří na rezistoru R_2 . Výstupní napětí děliče (napětí na rezistoru R_2) je tedy dáno vztahem pro nezatížený napěťový dělič:

$$U_{\text{měř}} = U_{VDD} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{VDD} \cdot 0,0962567 \text{ [V]} \quad (3.3)$$

Pro měření napětí na výstupu napěťového děliče bylo nutné nakonfigurovat další AD převodník. Ten je spouštěný časovačem č.1 (TIM1), z důvodu měření napětí sběrnice vždy ve stejný okamžik výstupní PWM. Výsledek převodu je pomocí DMA („Direct Memory Access“) módu zapsán přímo do paměti mikrokontroléru, a tak nebrzdí běh programu. Velikost napětí napájecí sběrnice se poté vypočte pomocí vzorce 3.3 a 3.1.

Velikost napětí napájecí sběrnice se neustále měří. Vzroste-li hodnota napětí nad stanovenou mez, mikrokontrolér přivede logickou úroveň jedna na výstupní pin, kde je připojený driver pro mosfet. Ten otevře mosfet, který připojí ke sběrnici výkonový rezistor. Tím začne protékat proud a napětí napájecí sběrnice klesne pod stanovenou mez.

3.11 Vyčítání dat ze snímače síly

Kostra programu s konfigurací periférií byla vytvořena v programu CubeMX. Následně byl kód doplněn o program pro digitální vyčítání hodnot z mikročipu HX711. Tento program je převzat z datasheetu (Obr. 35) a následně upraven. Zobrazení hodnot v reálném čase je možné přes program STM Studio.

Bylo nutné kalibrovat tenzometr a provést přepočet hodnoty z AD převodníku na sílu, resp. kroutící moment. Vztahy použité pro přepočet:

$$N = N_1 - N_0 \text{ [-]} \quad (3.3)$$

Kde N_0 je výstupní hodnota AD převodníku při nulovém zatížení, N_1 je hodnota při kalibračním zatížení, ΔN je hodnota reprezentující samotné zatížení.

Pro výpočet síly pak platí:

$$F = \Delta N \cdot k [N] \quad (3.4)$$

$$k = \frac{m \cdot g}{\Delta N} [-] \quad (3.5)$$

Kde k je převodní konstanta.

Při kalibračním zatížení $m = 0.5 \text{ kg}$ byla odečtena hodnota ΔN převodníku $\Delta N = 541000$. Tíhové zrychlení je pro naši zeměpisnou šířku $g = 9.81275 \frac{m}{s^2}$. Po dosazení hodnot do výše uvedeného vztahu dostáváme pro převodní konstantu k :

$$k = \frac{m \cdot g}{\Delta N} = \frac{0.5 \cdot 9.81275}{541000} = 9.06909 \cdot 10^{-5} [-] \quad (3.6)$$

Pro krouticí moment M při délce páky $r = 0,1 \text{ m}$ platí:

$$M = F \cdot r = F \cdot 0,1 [Nm] \quad (3.7)$$

```
sbit  ADD0 = P1^5;
sbit  ADSK = P0^0;
unsigned long ReadCount(void) {
    unsigned long Count;
    unsigned char i;
    ADD0=1;
    ADSK=0;
    Count=0;
    while(ADD0);
    for (i=0;i<24;i++){
        ADSK=1;
        Count=Count<<1;
        ADSK=0;
        if(ADD0) Count++;
    }
    ADSK=1;
    Count=Count^0x800000;
    ADSK=0;
    return(Count);
}
```

Obr. 35: Program pro vyčítání dat z mikročipu HX711 [20]

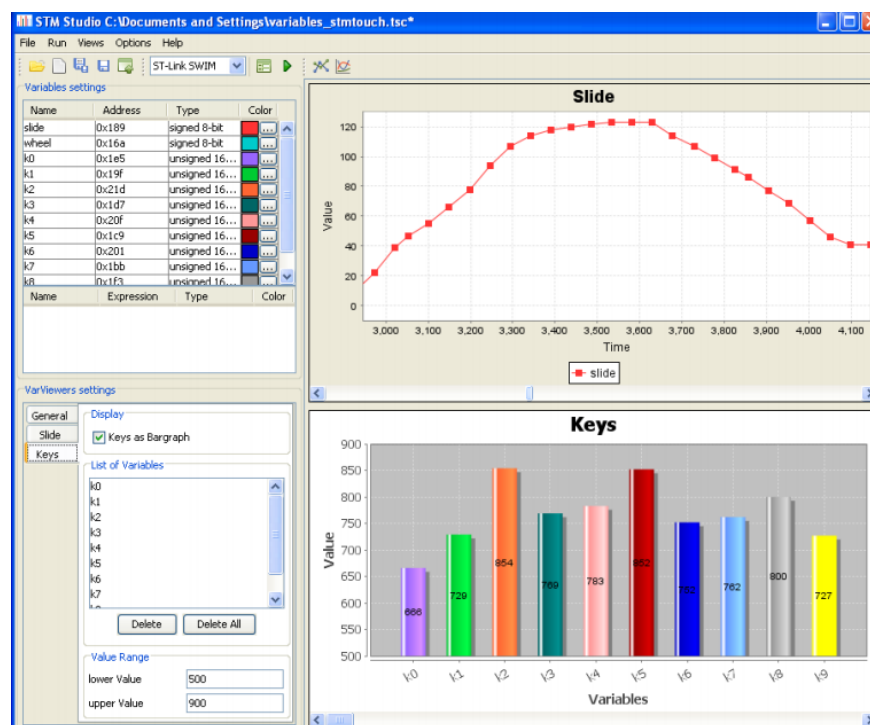
3.12 Sledování průběhů proměnných v programu STM Studio

STM Studio je nástroj, díky kterému je možné ladit program a diagnostikovat chyby při jeho běhu pomocí sledování proměnných v reálném čase. Doplnuje tak ladící nástroje pro odladění aplikací, které nemohou být zastaveny, v našem případě je to řízení motoru. Průběhy je také možné uložit do souboru a prohlédnout si je později popř. je exportovat. Propojení STM Studia a procesoru STM32 zprostředkovává programátor ST-Link.

Typy zobrazení proměnných:

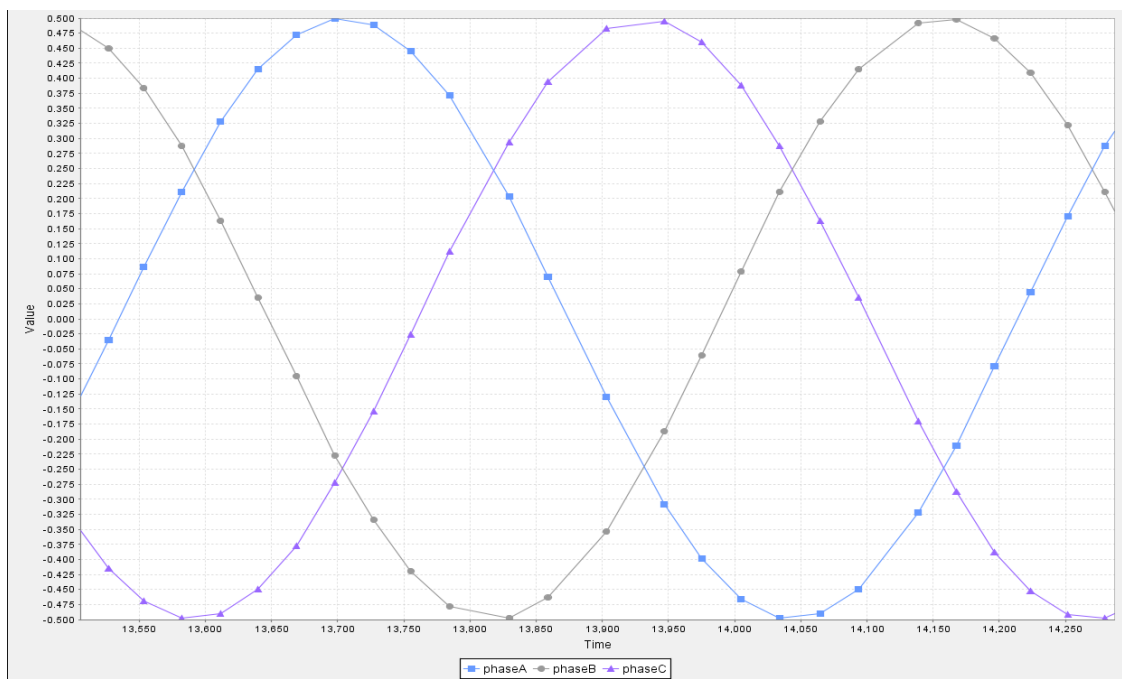
- Křivky v reálném čase, viz Obr. 36
- Křivky zobrazeny stejně jak na osciloskopu
- XY zobrazení – jedna proměnná na ose X, druhá proměnná na ose Y
- Sloupcové zobrazení, viz Obr. 36

[12]



Obr. 36: Různé režimy zobrazení proměnných [12]

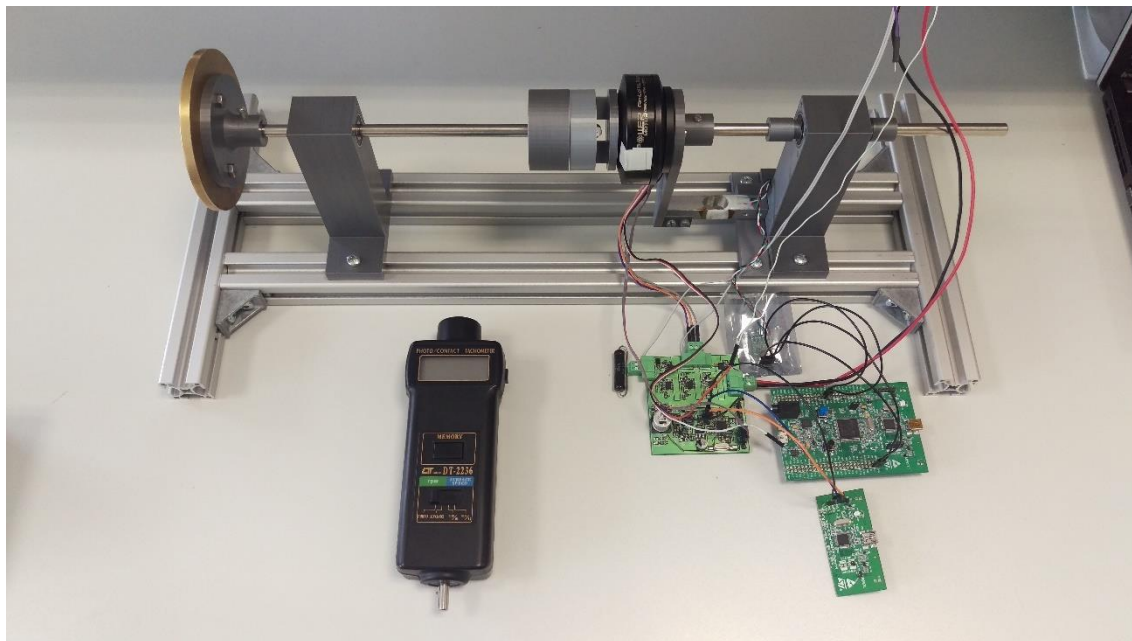
STM Studio stačí pouze propojit s existujícím speciálním souborem, který vytvoří vývojové prostředí a následně se do STM Studia importují globální proměnné a jejich průběh lze v závislosti na čase sledovat. Na Obr. 37 lze vidět průběh napětí jednotlivých fází motoru v režimu zobrazení křivek.



Obr. 37: Ilustrační obrázek sledování průběhu napětí v jednotlivých fázích pomocí programu STM Studio

4 MĚŘENÍ

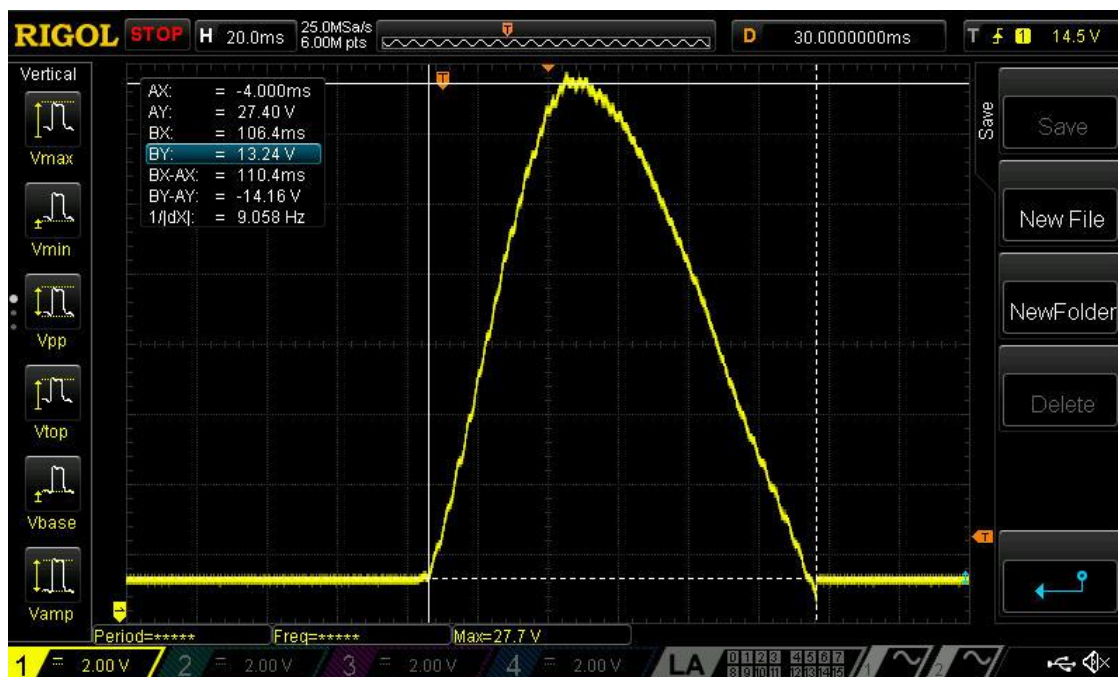
Pohled na pracoviště se sestaveným testbedem, připevněným motorem, snímačem mechanické síly, měničem, Discovery kitem pro zaznamenávání hodnot ze snímače síly, programátorem a použitým optickým otáčkoměrem je na Obr. 38.



Obr. 38: Pohled na pracoviště

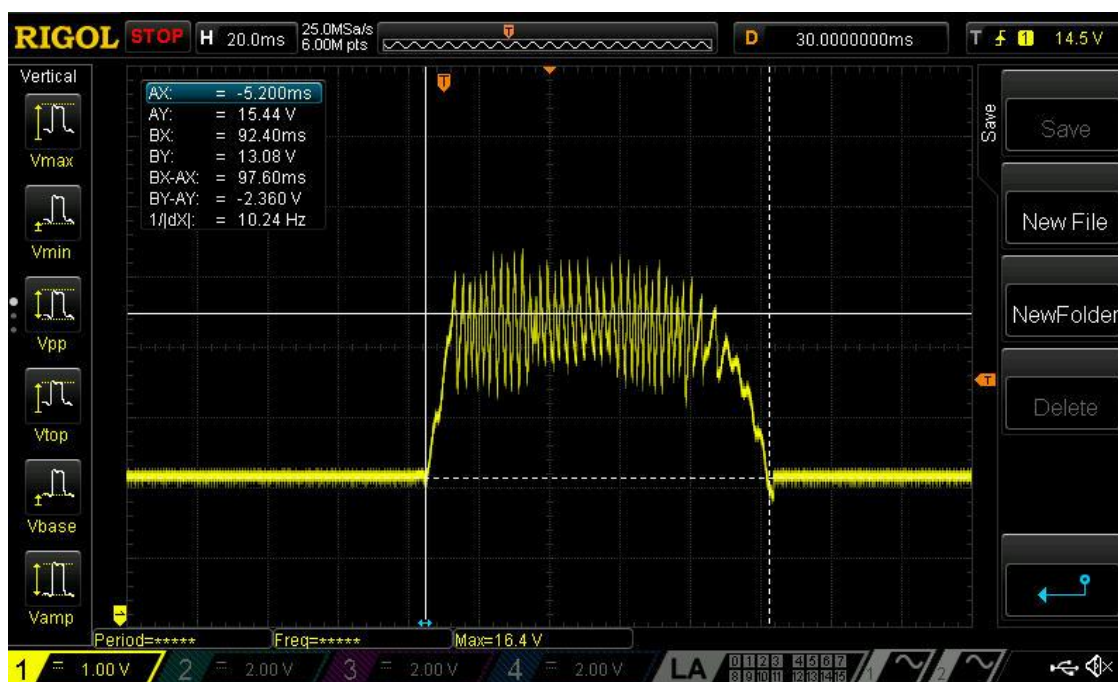
4.1 Omezení maximálního napětí napájecí sběrnice

Na Obr. 39 lze vidět chování napětí napájecí sběrnice při odpojení omezovači napětí sběrnice. Při brždění dojde ke zvýšení napětí ze 13,24 V až na 27,4 V.



Obr. 39: Zvýšení napětí napájecí sběrnice při brzdění

Na Obr. 40 lze vidět chování napětí napájecí sběrnice s aktivním omezovačem napětí sběrnice. Nastavené mezní napětí bylo 15 V. Jakmile dojde ke zvýšení napětí nad toto mezní napětí, dojde k připojení rezistoru pro snížení napětí napájecí sběrnice a napětí spadne. Tento cyklus se dále opakuje. Výsledkem je oscilující napětí sběrnice kolem hodnoty cca 15 V.



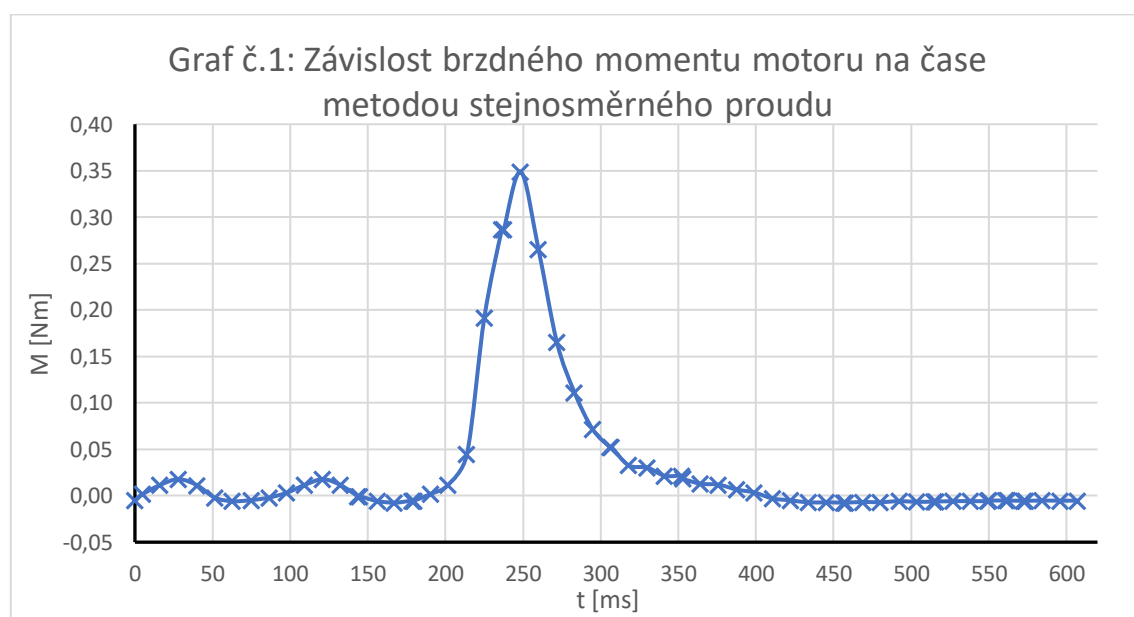
Obr. 40: Aktivní omezovač napětí napájecí sběrnice

4.2 Měření brzdného momentu motoru

Při měření brzdného momentu na testbedu byl použit setrvačnický o průměru 100 mm, tloušťce materiálu 6 mm a hmotnosti 396 g při všech metodách brždění. Dále bylo vždy použito napětí napájecí sběrnice $U_{VDD} = 24 \text{ V}$.

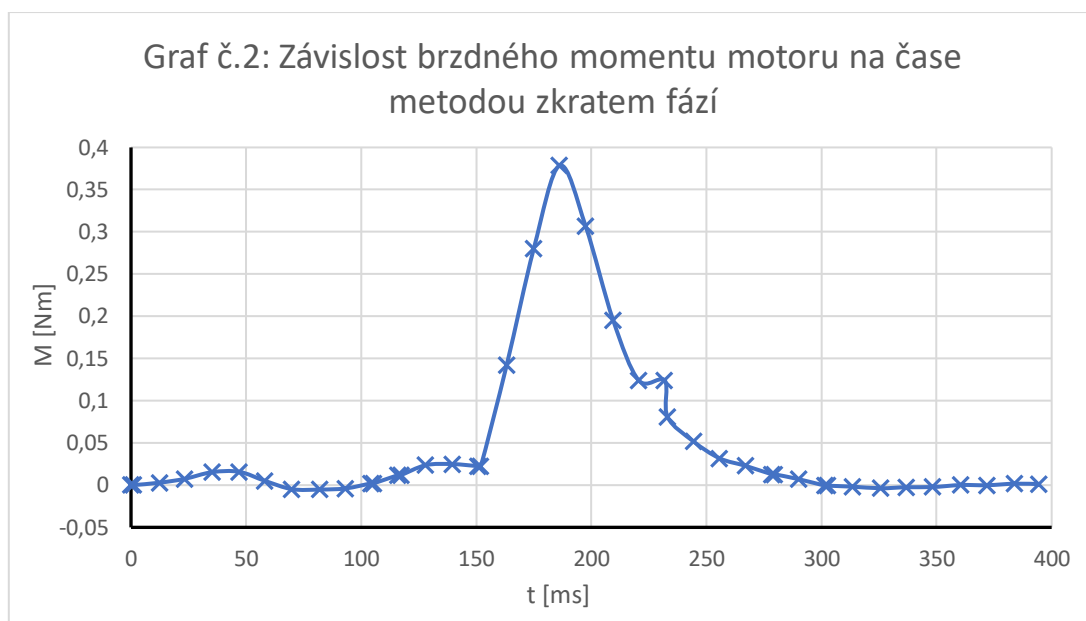
4.2.1 Brždění stejnosměrným proudem

Na grafu č. 1 lze vidět průběh brzdného momentu v závislosti na čase při brždění způsobem stejnosměrného proudu. V ustáleném stavu bylo digitálním otáčkoměrem změřeno přibližně 327 otáček za minutu při maximální žádané hodnotě proudu. V čase $t = 200 \text{ ms}$ dojde k vypnutí vektorového řízení a do motoru je pouštěn stejnosměrný proud a motor začne působit proti momentu setrvačnicku. Maximální velikost momentu, kterým je schopen motor působit proti setrvačnicku je při tomto brždění 0,35 Nm. Po čase $t = 430 \text{ ms}$ se moment a otáčky ustálí na nulové hodnotě.



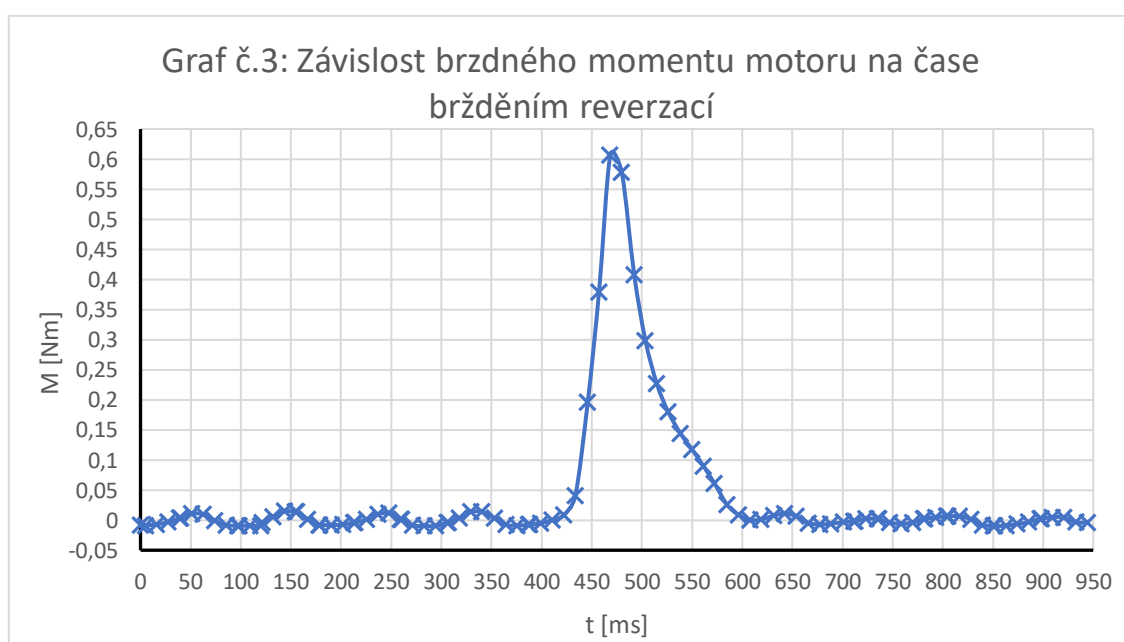
4.2.2 Brždění metodou zkratem fází

Na grafu č. 2 lze vidět průběh brzdného momentu v závislosti na čase při brždění způsobem zkratem fází. V ustáleném stavu bylo digitálním otáčkoměrem změřeno přibližně 327 otáček za minutu při maximální žádané hodnotě proudu. V čase $t = 150 \text{ ms}$ dojde k vypnutí vektorového řízení a fáze motoru jsou zkratovány přes spodní tranzistory přes zem a motor začne působit proti momentu setrvačnicku. Maximální velikost momentu, kterým je schopen motor působit proti setrvačnicku je při tomto brždění 0,38 Nm. Po čase $t = 300 \text{ ms}$ se moment a otáčky ustálí na nulové hodnotě.



4.2.3 Brždění reverzací

Na grafu č. 3 lze vidět průběh brzdného momentu v závislosti na čase při brždění reverzací. V ustáleném stavu bylo digitálním otáčkoměrem změřeno přibližně 327 otáček za minutu při maximální žádané hodnotě proudu. V čase $t = 430$ ms dojde k obrácení znaménka žádané hodnoty proudu a motor začne působit proti momentu setrvačníku. Maximální velikost momentu, kterým je schopen motor působit proti setrvačníku je při tomto brždění 0,607 Nm. Po čase $t = 600$ ms se moment ustálí na nulové hodnotě.



4.2.4 Brždění metodou volného dotočení

Při této metodě motor nepůsobí proti momentu setrvačníku, a tak nelze naměřit téměř žádný reakční moment motoru. V některých aplikacích se tato metoda brždění považuje za bezpečnou. Například při poruše elektrického skútru, by nebylo vhodné, kdyby motor byl aktivně zabrzděn, protože by to mohlo vést k fatálním následkům. Oproti tomu například při obrábění materiálu soustruhem by bylo vhodné jej při poruše nebo při nehodě zabrzdít okamžitě. Záleží vždy tedy na tom, co se pro danou aplikaci považuje za bezpečné.

ZÁVĚR

V této práci byly popsány dva typy EC motorů, konstrukce BLDC motoru, metody řízení motoru (senzorové, bezsenzorové). Dále bylo objasněno vektorové řízení a s tím spojená transformace třífázového systému na doufázový a naopak. Byla vysvětlena SPI komunikace a princip odporových snímačů mechanického napětí. V části hardware byl vybrán mikrokontrolér vhodný pro řízení BLDC motorů a byly popsány jeho hlavní přednosti. Dále byly ukázány 2 měniče osazené vybraným mikrokontrolérem a diskutovány jejich vlastnosti. Rovněž byly diskutovány typy motorů, které jsou vhodné pro dynamické zatížení setrvačником. Byl navržen a popsán testbed pro měření momentu BLDC motoru se setrvačником. Dále byl popsán použitý software a na závěr práce bylo provedeno měření na daném hardwaru.

Řízení motoru bylo realizováno senzorově z důvodu vyšší přesnosti informace o poloze v nižších otáčkách a větší jednoduchosti vůči bezsenzorovému řízení motoru. Nemusí se tak porovnávat indukované napětí na odpojené fázi a pro řízení se mohou používat kontinuálně všechny tři fáze.

Pro řízení motoru bylo použito vektorové řízení, se kterým je možné dynamicky a přesně řídit pohony a navíc umožňuje řídit motory i v průběhu přechodových dějů. Byla objasněna přímá a inverzní Clarkové a Parkova transformace, které se ve vektorovém řízení nejčastěji používají. Pro potřebnou informaci o poloze byl nejprve použit u měniče č.1 PWM výstup magnetického enkodéru, jehož střída reprezentuje úhel natočení od 0° do 360° . Později byla využita SPI komunikace měniče č.2 a magnetického enkodéru pro přesnější informaci o poloze a menšího nežádoucího časového zpoždění.

Pro měření proudu byly v první části práce u měniče č.1 použity rezistory pro měření proudu. V druhé části práce byly použity u měniče č.2 senzory protékajícího proudu založené na hallově jevu, z důvodu minimálního výkonového úbytku a zároveň dostatečné přesnosti.

Při sestavování testbedu byly použity univerzální hliníkové profily pro rám a ostatní mechanické komponenty byly navrženy v programu SolidWorks a následně vytištěny na 3D tiskárně. Koupený senzor síly měl u sebe již nezbytnou elektroniku. Signál byl převáděn z tenzometrů pomocí 24-bitového převodníku. Tento převodník komunikuje po digitální sběrnici, musel být tedy naprogramován další mikrokontrolér pro vyčítání a ukládání těchto hodnot z digitální sběrnice.

V části měření byly proměřeny reakční charakteristiky aktivního omezovače napětí napájecí sběrnice, které se může zvedat při brzdění motorem. To se projevuje zejména u zdrojů, které nejsou schopné se chovat při opačném napěťovém spádu jako spotřebič. Dále byly proměřeny tři metody brzdění motoru a byl zjištěn maximální brzdný moment motoru při daném napětí napájecí sběrnice, setrvačnosti a proudu. Největšího brzdného momentu bylo dosaženo brzděním reverzací ($M = 0,607 \text{ Nm}$), což se dalo očekávat. Nejmenší brzdý moment vykazovala metoda brzdění stejnosměrným proudem ($M = 0,35 \text{ Nm}$). Metoda volného dotočení byla pouze diskutována. V některých

aplikacích se používá pro bezpečné zastavení motoru. Zvlněný průběh kroutícího momentu při ustálených nenulových otáčkách, jak je patrné z grafů č.1 – č.3, je způsoben pružnou osovou spojkou. Tato spojka nebyla navržena optimálně a v některých směrech způsobuje osovou nesymetrii.

Periferie procesoru potřebné pro řízení motoru byly nastaveny programem CubeMX, který vytvořil šablonu kódu v programovacím jazyce C se základním nastavením potřebných periférií. Tímto programem byl nastaven PWM výstup v komplementárním režimu, PWM vstup pro zpětnou vazbu ze snímače polohy rotoru motoru, AD převodníky pro měření proudu ve všech třech fázích, dále časovače a přerušovací rutiny pro výše zmíněné periferie. Pro samotné programování bylo použito vývojové prostředí uVision5 od firmy Keil. V tomto prostředí byly implementovány výše zmíněné transformace pro vektorové řízení. Dále byly doprogramovány přerušovací rutiny pro AD převodníky, PWM vstup, PWM výstup, PI regulátor proudu, aktivní omezovač napětí napájecí sběrnice a SPI komunikace. Proměnné programu je možné sledovat v reálném čase v prostředí STM Studio.

Výsledkem této práce tedy je funkční řízení BLDC motoru pomocí tokotvorné a momentotvorné složky, funkční proudový regulátor pro q a pro d složku, aktivní omezovač napětí napájecí sběrnice, měření reakčního momentu na testbedu a s tím spojené zaznamenávání hodnot v digitální podobě. Dále by se dala tato práce posunout v oblasti měření proudu, kdy by bylo vhodné vyměnit hallový snímač proudu za modernější snímač proudu, například ACS723, které dosahují větších přesností a menšího šumu. Dále by bylo vhodné implementovat otáčkovou a polohovou regulaci pro možnost plného řízení motoru. Vhodné by bylo uzpůsobit navržený testbed pro použití různých motorů a proměřit reakční momenty více motorů. Pro elektroniku pro senzor síly by se měl připojit externí oscilátor, jelikož interní oscilátor poskytuje měření s frekvencí pouze 80 Hz, tím pádem některé špičkové hodnoty momentu není možné zaznamenat. Aktivní omezovač napětí by se dal nakonfigurovat na hardwaru v podobě komparátoru, jež obsahuje mikrokontrolér, a tak by nedocházelo k vytížení procesoru výpočty a převody. Další možnost by byla upravit aktivní omezovač napětí plynulou regulací PWM a řízení pomocí PI regulátoru.

Literatura

- [1] NEBORÁK, Ivo. *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů*. Ostrava, 2002. Habilitační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [2] KRIŽAN, Jakub. *Bezsensorové řízení BLDC motoru* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/5150>.
- [3] Daniel Torres, *Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function*, 2008 [online]. © 2008 [cit. 2018-12-29]. Zdroj: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf>
- [4] Bilal Akin and Manish Bhardwaj, *Sensorless Trapezoidal Control of BLDC Motors* [online]. © 2013. Zdroj: <http://www.ti.com/lit/an/sprabq7a/sprabq7a.pdf>
- [5] Doc. Ing. Vladislav Singule, CSc. *Motory s elektronickou komutací pro mechatronické aplikace* [online]. © 2007. Zdroj: http://www.uzimex.cz/soubory/20080910_tat_2008-09.pdf
- [6] ZELIENKA, Kristián. *Riadenie BLDC motora pomocou F28377M* [online]. Praha, 2017 [cit. 2019-01-02]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/69535>. Bakalářská práce. ČVUT.
- [7] *Digi Key* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.digikey.com/en/product-highlight/a/ams/as5047p-magnetic-position-sensor>
- [8] *Function Bay* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://functionbay.com/documentation/onlinehelp/default.htm#!Documents/pmsmpermanentmagnetsynchronousmachine.htm>
- [9] *Nidec* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <https://www.nidec.com/en-EU/technology/motor/basic/00005>
- [10] *Sensorless BLDC Control with Back-EMF Filtering Using a Majority Function* [online]. [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01160A.pdf>
- [11] *Electronic speed controller for BLDC and PMSM three phase brushless motor* [online]. In: . [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/group0/06/a3/c1/ae/7d/27/4c/e0/DM00384353/files/DM00384353.pdf/jcr:content/translations/en.DM00384353.pdf
- [12] *STM Studio run-time variables monitoring and visualization tool for STM32 microcontrollers* [online]. In: . [cit. 2019-01-04]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/data_brief/stm-studio-stm32.pdf

- [13] RIPKA, Pavel, Stanislav ĎAĎO, Marcel KREIDL a Jiří NOVÁK. *Senzory a převodníky*. ČVUT v Praze, 2005. Skripta. ČVUT.
- [14] *Field Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor using a DSP*. In: *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* [online]. 2014, s. 15 [cit. 2019-05-13]. ISSN 2278 – 8875. Dostupné z: https://www.ijareeie.com/upload/2014/october/13_Field.pdf
- [15] SCHWEBER, Bill. *Using Resistors for Current Sensing: It's More Than Just I = V/R*. In: *Power Electronics* [online]. 2018 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.powerelectronics.com/power-management/using-resistors-current-sensing-it-s-more-just-i-vr>
- [16] *Hall Effect*. In: *HyperPhysics* [online]. Georgia State University, 2016 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/Hall.html>
- [17] Serial Peripheral Interface. In: *Wikipedia* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface
- [18] *SPI Explained*. In: *Electric imp DevCenter* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://developer.electricimp.com/resources/spi>
- [19] *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. In: *Allegro MicroSystems* [online]. 2017 [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/~media/files/datasheets/acs712-datasheet.ashx>
- [20] *24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales* [online]. In: . [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf