

UNIVERZITA PARDUBICE
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Řízení BLCD motorů
Jan Košťál

Bakalářská práce
2013

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jan Košťál**
Osobní číslo: **I10346**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Řízení BLDC motorů**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

BLDC motory nebo také bezkartáčové stejnosměrné motory se těší stále větší oblibě, díky absenci mechanického komutátoru mají mnohem větší účinnost, žádné jiskření, řádově delší životnost. Efektivita motoru záleží na kvalitě elektronicky řízené komutace, až výrazný pokles cen a zvýšení dostupnosti dostatečně rychlých spínacích prvků umožnil jejich výraznější rozšíření. Dnes je již často zvýšení ceny řešení s elektronickým komutátorem zanedbatelné v porovnání s přínosy takového řešení.

Efektivita motoru a EMC vyzařování motoru je dáno způsobem a kvalitou řízení daného motoru. Tato bakalářská práce se bude zabývat návrhem řízení takového motoru. Řízení motoru je možné realizovat přímo pomocí mikroprocesoru nebo za pomoci obvodu k tomu určenému.

Bakalářská práce bude obsahovat principiální popis funkčnosti BLDC motoru a možností jeho řízení, přičemž důraz bude kladen na motory bez senzorů. Dále bude obsahovat stručný popis a přehled možností obvodů specializovaných na daný problém a jejich potenciální přínos v návrhu řízení. V praktické části pak bude následovat návrh regulátoru a proměření vlastností. Návrh regulátoru bude optimalizován s ohledem na velikost. Výkonové parametry budou dohodnuty později.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Literatura: http://en.wikipedia.org/Brushless_motor

<http://automatizace.hw.cz//motory-jejich-rizeni-s-mcu-3-cast-ridici-algoritmy-regulace-s-mcu>

http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2596.pdf

Mobilní roboty Novák P.; BEN - technická literatura, 2005, ISBN: 80-7300-141-1

BALÁTĚ J.; Automatické řízení, BEN, ISBN 978-80-7300-148-3

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival

Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

21. prosince 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

10. května 2013



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 29. března 2013

Prohlášení autora

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 10. 5. 2013

Jan Košťál

Poděkování

Tímto chci poděkovat mému vedoucímu práce panu Ing. Pavlovi Rozsivalovi, který mě vedl celou touto prací.

Anotace

Práce je zaměřená na seznámení s řízením BLDC motorů a zkonstruování regulátoru pro řízení těchto motorů. V praktické části je navrhnout a vyroben regulační obvod pro BLDC motory za použití mikroprocesoru, pomocného obvodu pro spínání výkonové části obsahující tranzistory.

Klíčová slova

BLCD, PWM, BEMF, TMC603, komutace cívek, Hallovy senzory, regulátor, vinutí cívek, tranzistor

Title

Control BLDC motors

Annotation

This work is aimed to BLDC motor control methods and motor controller development. Practical part describes development and construction of controlling circuit for BLDC motors using microprocessor and specialized support circuit for power stage with transistors

Keywords

BLCD, PWM, BEMF, TMC603, commutation coils, Hall sensors, controller, winding of coil, transistor

Obsah

Seznam zkratek.....	8
Seznam obrázků.....	9
Seznam tabulek.....	10
Úvod.....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Představení BLCD motoru	12
1.2 Rozbor BLDC motoru	12
1.2.1 Rotor.....	13
1.2.2 Stator.....	13
1.2.3 Průběh točivému momentu / rychlosti otáčení	14
1.2.4 Rozdíl BLDC motoru a kartáčového stejnosměrného motoru	15
1.2.5 Senzorové řízení BLDC motoru	16
1.3 Ovládání BLDC motorů	17
1.3.1 Elektronická komutace vinutí.....	18
1.3.2 Tranzistorový můstek pro spouštění budících cívek	20
1.3.3 Změna rychlosti otáčení rotoru u BLDC motorů.....	20
1.4 Vyhodnocení polohy rotoru BLDC motoru	21
1.4.1 Senzorové metody	21
1.4.2 Bezsenzorové metody.....	23
1.5 Možnosti bezsenzorové řízení BLDC motoru	25
1.5.1 Pomocné obvody využívající BEMF.....	28
2 Praktická část.....	31
2.1 ATmega88	32
2.2 Zapojení TMC603	34
2.3 Zapojení MOSFET tranzistorů	35
2.4 Řídící program pro mikroprocesor	36
2.5 Návrh DPS.....	38
2.6 Seznam použitých součástek	42
Závěr.....	43
Literatura	44
Příloha	46
Příložený DVD disk obsahuje složky:.....	47

Seznam zkratk

BLCD	BrushLess DC Motor
RPM	Počet otáček za minutu
BEMF	Zpětná elektromotorická síla
DC	Stejnoseměrný ATmega88 mikroprocesor
MOSFET	unipolární tranzistor
DPS	deska plošných spojů

Seznam obrázků

Obrázek 1 Jednotlivé uspořádání BLDC motoru	13
Obrázek 2 Rotor s permanentními magnetickými póly a) se čtyřmi b) s šesti.....	13
Obrázek 3 Vynutí cívek bezkontaktního motoru.....	14
Obrázek 4 Průběh točivého momentu/rychlosti otáčení.....	15
Obrázek 5 Stav Hallových sond	17
Obrázek 6 Modelářský regulátor otáček BLDC motoru	17
Obrázek 7 Princip spouštění vynutí BLDC motoru [1	18
Obrázek 8 Tok proudu Fáze 1 při sepnutí Q1 a Q6, Směr magnetického pole [1]	18
Obrázek 9 Tok proudu Fáze 2 při sepnutí Q1 a Q5, Směr magnetického pole [1]	18
Obrázek 10 Tok proudu Fáze 3 při sepnutí Q3 a Q5, Směr magnetického pole [1]	19
Obrázek 11 Tok proudu Fáze 4 při sepnutí Q3 a Q4, Směr magnetického pole [1]	19
Obrázek 12 Tok proudu Fáze 5 při sepnutí Q2 a Q4, Směr magnetického pole [1]	19
Obrázek 13 Tok proudu Fáze 6 při sepnutí Q2 a Q6, Směr magnetického pole [1]	19
Obrázek 14 MOSFET tranzistory pro buzení cívek-zapojení do kaskády	20
Obrázek 15 Pulsně šířková modulace - ovládací průběhy [9]	21
Obrázek 16 Princip inkrementálního rotačního snímače [10].....	22
Obrázek 17 Kódový kotouč [11]	22
Obrázek 18 Průběh zpětně indukovaného napětí závislého na čase [8].....	23
Obrázek 19 Průběh BEMF pro jednotlivá vinutí statoru.....	24
Obrázek 20 Reálný časový průběh napětí PWM a BEMF	25
Obrázek 21 Princip bezsensorové komutace.....	26
Obrázek 22 Zjednodušené zapojení pro snímání BEMF.....	27
Obrázek 23 PWM pro řízení vrchních a spodních spínačů pro použití BEMF [3]	27
Obrázek 24 TMC603 od společnosti TRINAMIC [12].....	29
Obrázek 25 Principiální zapojení celého obvodu	32
Obrázek 26 Pouzdro AT mega 88 [2].....	32
Obrázek 27 Principiální zapojení celého obvodu	33
Obrázek 28 Zapojení TMC603.....	34
Obrázek 29 Zapojení tranzistorového H-mostu	35
Obrázek 30 Vnitřní zapojení tranzistoru CSD17559Q5 [10].....	36
Obrázek 31 Vývojový digram programu.....	37
Obrázek 32 Spoje s rozlitou plochou - vrchní strana desky	39
Obrázek 33 Spoje s rozlitou plochou - spodní strana desky.....	39
Obrázek 34 Osazovací plán - vrchní strana desky.....	40
Obrázek 35 Osazovací plán - spodní strana desky	40
Obrázek 36 FOTO osazené desky vrchní část.....	41
Obrázek 37 FOTO osazené desky vrchní část.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 1 Rozdíly mezi kartacovým a bezkartáčovým motorem	16
Tabulka 2 Porovnání enkodéru Freescale56F800 s Halloými senzory	29
Tabulka 3 Parametry tranzistoru.....	36
Tabulka 4 Použité součástky	42

Úvod

Samotný název řízení BLCD motorů neznalému člověku nic neřekne. BLDC je zkratkou pro takzvané bezkartáčové stejnosměrné motory (Brushless Direct Current). Jedná se o motory používané ve většině moderních zařízení a možnosti použití stále rostou. Jejich hlavními výhodami jsou účinnost, malá hmotnost, velká rychlost otáčení a lineární regulovatelnost otáček. Tato bakalářská práce je zaměřena právě na regulaci těchto motorů. Existují dvě možnosti řízení BLDC motorů, které se od sebe liší jednodušším zapojením celého systému či složitostí řídicího algoritmu. Do první skupiny patří bezsenzorové řízení, které nevyžaduje snímací součástky na motoru pro určení polohy rotoru. Využívá zpětně generovaný signál, který se musí zpracovat a vyhodnotit, proto je zde vyžadována složitější úprava algoritmu oproti druhé skupině řízení senzorově. Při senzorovém řízení je obvod rozšířen o snímací prvky na motoru pro určení polohy rotoru a to se vyhodnotí pomocí mikroprocesoru.

V dnešní době dochází k obrovskému masovému využití BLDC motorů, protože požadavky na provoz elektronických zařízení jsou stále důraznější na nižší spotřebu energie při zachování vysokého výkonu stroje. BLDC motor se pyšní svojí účinností až 90% což je poměrně vysoká hodnota ve srovnání s obyčejným stejnosměrným kartáčovým motorem, který má teoreticky nejvyšší hodnotu účinnosti nepřesahující 50%. Problém nastává při řízení BLDC motoru, motor oproti klasickému stejnosměrnému motoru díky absenci komutátoru vyžaduje elektronickou komutaci, která pro dosažení maximální efektivity musí být precizně časována. Pro správnou komutaci je potřeba znát polohu rotoru, což umožňuje synchronní řízení s maximální efektivitou.

1 Teoretická část

1.1 Představení BLCD motoru

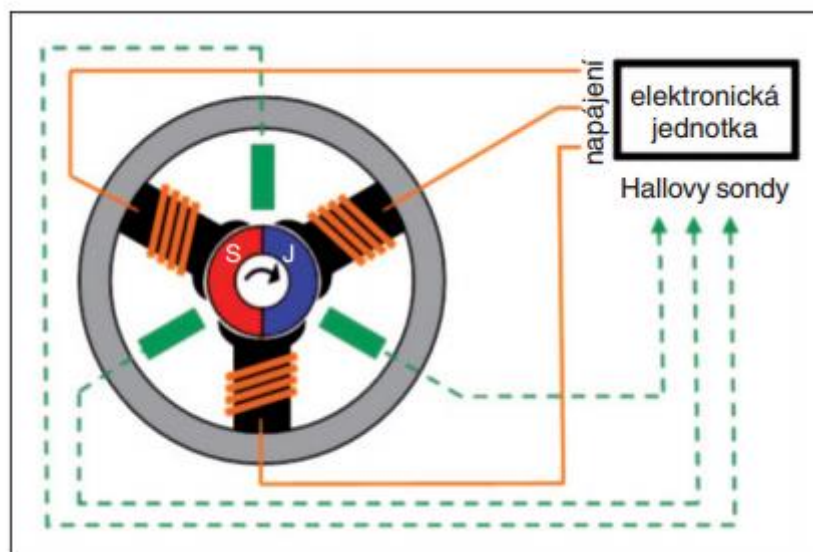
BLDC motory fungují na stejném principu jako stejnosměrné synchronní. K jejich rozpohybování se taktéž využívá elektromagnetických sil, ovšem zde jsou na rotoru připevněny permanentní magnety (obdélníkový tvar) a okolo něj jsou cívky, které se postupně spouští a na magnet působí silou, kterou magnet sleduje a díky ní se pohybuje. Tyto motory neobsahují typický komutátor jako klasický stejnosměrný motor, ale v obvodu mají zapojen tzv. regulátor otáček, který podle předem stanovených charakteristik spíná jednotlivá vinutí rotoru. Aby regulátor správně řídil motor, je zapotřebí zpětné vazby od motoru a to buďto za pomoci snímačů (nejčastěji tři Hallovy sondy) nebo při měření indukovaného napětí či proudu. Tyto motory mají plošší křivku účinnosti oproti komutátorovým motorům. Pokud je zapotřebí použít tento motor pro práci v nízkých otáčkách, je lepší použít převodovku. U těchto motorů je výhoda, že zde není zapotřebí komutátoru, který by doléhal na plošky rotoru a jakýmkoliv způsobem by se o něj mechanicky otíral. Již z těchto informací vyplývá, že výhody BLDC motoru jsou:

- Bezúdržbovost
- Nízké zpětné rušivé vlivy
- Vysoká účinnost přesahující 95%
- Dlouhá životnost
- Vysoká spolehlivost
- Lineární výkonová charakteristika
- Vysoké výkony i u malých motorů

1.2 Rozbor BLDC motoru

Motor je sestaven z částí:

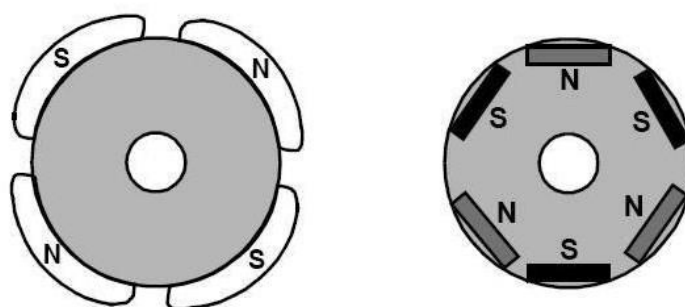
- Rotor
- Stator
- Regulátor
- Senzor (v senzorovém řízení)



Obrázek 1 Jednotlivé uspořádání BLDC motoru

1.2.1 Rotor

U komutátorového motoru je zastoupen rotor cívkou, ovšem u BLDC motoru se nachází permanentní magnet. Pro jemnější a plynulejší pohyb se na rotoru objevují stále vyšší počty magnetických pólů. U nejlevnějších a nejjednodušších motorů jsou dva magnetické póly, u dražších až 18 magnetických pólů. Kvalita permanentních magnetů dopomáhá k celkovému zefektivnění BLDC motorů a k jejich zmenšování. K výrobě těchto magnetů se používají vzácné horniny Neodymu, Feritu a Bóru. Rotor nemusí být nutně ve středu cívek, může je obklopotvat. Například u větráčku z chlazení u počítače se vrtule nachází na straně rotoru a ten má magnety umístěny právě okolo budících cívek, je to z důvodu síly magnetického pole, protože můžeme použít větší a tudíž silnější magnety při zachování celkově malého rozměru větráčku.



Obrázek 2 Rotor s permanentními magnetickými póly a) se čtyřmi b) s šesti

1.2.2 Stator

Magnetické pole pro otáčení rotoru vytváří tři vynutí cívek, které jsou u BLDC motoru nehybně, tudíž na straně statoru. Po přivedení napětí na jednotlivé cívky, způsobí vznik magnetického pole v jeho okolí a působení na permanentní magnety na rotoru. Jelikož se

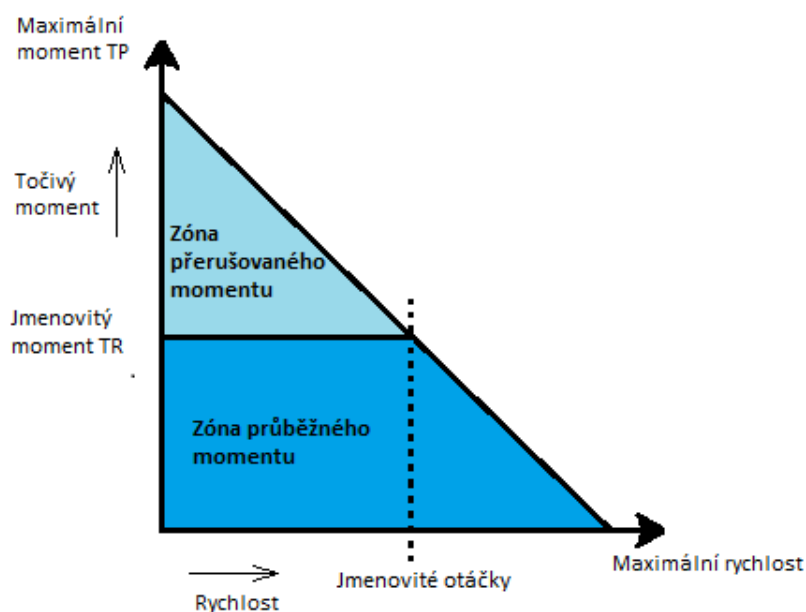
jedná o synchronní motor, tak změnu magnetického pole na statoru bude sledovat rotor. Vinutí cívek jsou nejčastěji zapojeny do hvězdy, abychom při otáčení mohli měřit zpětně naindukované napětí pro lepší regulaci otáček, ovšem existuje i zapojení do trojúhelníku.



Obrázek 3 Vynutí cívek bezkontaktního motoru

1.2.3 Průběh točivému momentu / rychlosti otáčení

U BLDC motoru jsou dva parametry točivého momentu. První z nich je jmenovitý točivý moment T_R , kterým může být motor zatížen při trvalém provozu. V některých aplikacích je zapotřebí často motor spouštět a vypínat, ale také rychle měnit jeho otáčky, jelikož potřebují vyšší než jmenovitý točivý moment a tomu se říká vrchol točivého momentu T_P . Motor může být užíván do maxima rychlosti podle charakteristiky Obrázek 7. Zde může být vrchol točivého momentu až ve 150 procentech jmenovitého, ale pouze jen několik sekund, protože by mohlo dojít ke spálení vinutí. Při užívání tohoto motoru se předpokládá, že okolí tohoto motoru nebude stálé, ale po jeho zpuštění dojde k okolní cirkulaci vzduchu a následnému chlazení vinutí proudícím vzduchem.



Obrázek 4 Průběh točivého momentu/rychlosti otáčení

1.2.4 Rozdíl BLDC motoru a kartáčového stejnosměrného motoru

Ve srovnání těchto dvou motorů má více výhod BLDC motor. Mají větší interval mezi údržbami a mnohonásobně vyšší životnost. Také na jejich straně stojí výstupní výkon oproti kartáčovým, ale i indukčním motorům. Rotor BLDC motoru je tvořen permanentními magnety a jejich hmotnost je mnohem menší než rotor tvořený vinutím jako u kartáčových motorů, tudíž jejich moment setrvačnosti je mnohem menší, proto se dají použít v rychlé změně orientace otáčení nebo v rychlém nárůstu rychlosti. Ze samotného názvu vyplývá, že zde nedochází k žádnému přenosu pomocí uhlíků nebo drátků. Z toho důvodu nikde nedochází k jiskření, tudíž i k menšímu elektrickému rušení, které je ve všech ohledech nežádoucí a v lékařských přístrojích až nepřijatelné. Za zmínku stojí i zvukový projev BLDC motorů, který je o poznání nižší než u kartáčových stejnosměrných motorů.

Naopak proti BLDC motorům stojí jejich elektronická komutace ke které je zapotřebí použití mikroprocesoru pro správné určení doby k sepnutí definovaného vinutí. U kartáčových motorů je změna rychlosti otáčení podmíněna jednoduchou změnou přiváděného napětí.

Tabulka 1 Rozdíly mezi kartacovým a bezkartáčovým motorem

	BLDC motor	Kartáčový DC motor
Komutace	Nutnost elektronické komutace	Kluzný kontakt
Údržba	Minimální	Výměna kluzných kontaktů
Využitelný rozsah otáček	V celém rozsahu otáček	Ve vyšších rychlostech kluzný kontakt zvyšuje své tření, takže odebírá velké množství výkonu
Setrvačnost rotoru	V rotoru jsou permanentní magnety, tudíž minimální setrvačnost	Cívky mají větší hmotnost s větší setrvačností
Elektrické rušení okolí	Téměř žádné	Na kluzných kontaktech dochází k jiskření a ke vzniku rušení
Regulace	Složitá, zapotřebí mikroprocesor	Jednoduchá
Efektivita	Přibližně 90%	Přibližně 50%
Hlučnost	Nižší	Vyšší
Pořizovací cena	Vyšší	Nižší

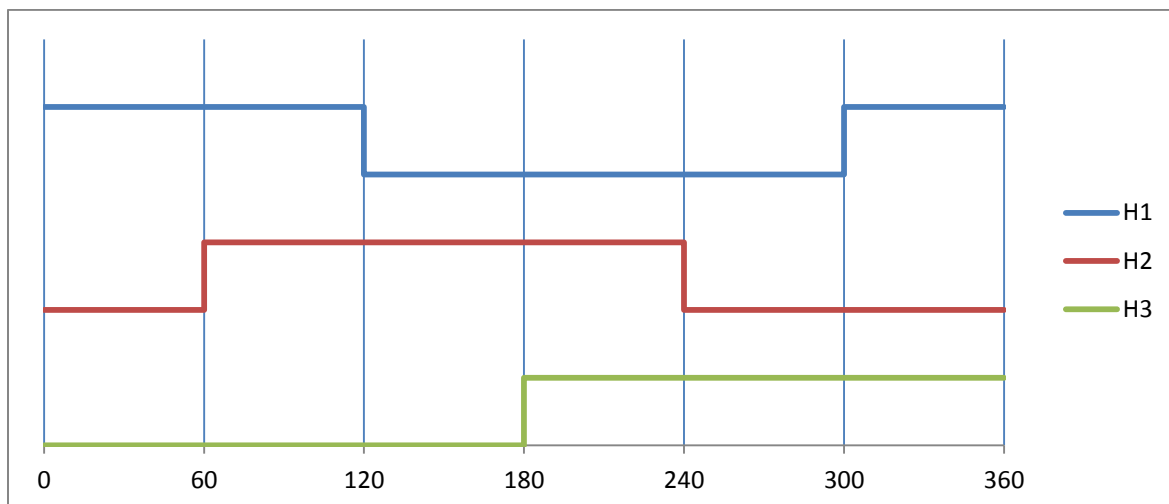
1.2.5 Senzorové řízení BLDC motoru

Aby bylo zajištěno dobré regulování otáček motoru i při zatížení motoru, je důležité znát v jaké poloze se rotor nachází, aby docházelo k buzení správných cívek. K tomu se nejčastěji používají senzory v podobě halových sond.

1.2.5.1 Hallové sondy

Protože se jedná o synchronní elektromotor s indukovaným magnetickým polem, není nic jednoduššího než využití součástky, které jsou řízené magnetickým polem. V tomto případě se jedná o Hallův jev. Princip činnosti spočívá ve vychylování volných nosičů protékajícího proudu uspořádaným polovodičem a na ploškách kolmých k proudu se vytvoří potenciální rozdíl.

Hallové sondy jsou typickým zástupcem polovodičových snímačů magnetického pole. Dokáží zaznamenat i malou hodnotu magnetického pole, jsou rychlé a jejich rozměr může být v jednotkách milimetrů. Tři Hallové sondy se umísťují u rotoru BLDC motoru po 120° a ty posílají do mikroprocesoru informace o poloze rotoru. Jedním z největších problémů při použití Hallových sond je teplotní závislost polovodičového snímače.



Obrázek 5 Stav Hallových sond

1.3 Ovládání BLDC motorů

Jelikož se u BLDC motoru nenachází žádný komutátor, je zapotřebí mít kvalitní regulátor buzení vynutí na statoru. Postupně spíná vynutí cívek a tvoří tím rotační pohyb magnetického pole. Regulátor je nejčastěji tvořen mikropočítačem s potřebným programem a výkonovou částí například šesti tranzistory zapojených do kaskády. Rozlišujeme dva typy řízení bezkontaktních motorů:

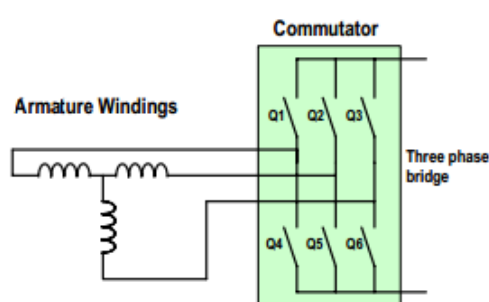
- Bezsenzorové řízení otáček motoru
- Senzorové řízení otáček motoru



Obrázek 6 Modelářský regulátor otáček BLDC motoru

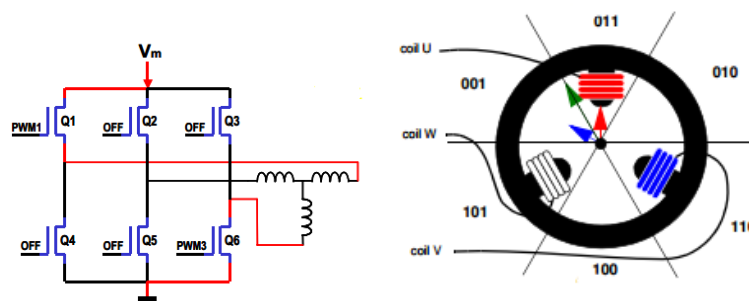
1.3.1 Elektronická komutace vinutí

U těchto motorů je nejzásadnější problém s elektronickou komutací. Zde je zapotřebí mikroprocesoru s předem definovaným programem, protože zde nejsou žádné kluzné jednoduché omezující kontakty jako u kartáčových stejnosměrných motorů. BLDC obsahuje tři vinutí na statoru zapojené do hvězdy. Vůči sobě jsou posunuty o 120° a k jejich změnám spínání dvojic musí docházet vždy po otočení rotoru o 60° tj. 6 fází spouštění. Na Obrázek 7 je vyneseno princip jednotlivého spínání dvojic spínačů. Na obrázcích 8-14 je vyobrazen tok proudu, který představuje klíčovou myšlenku pro další část bakalářské práce (viz. Konstrukce regulátoru otáček). Aby bylo možno takto přesně spouštět vinutí, je potřeba znát pozici rotoru pomocí Hallových sond nebo odhadnutím z parametrů motoru za pomoci zpětné EMF.

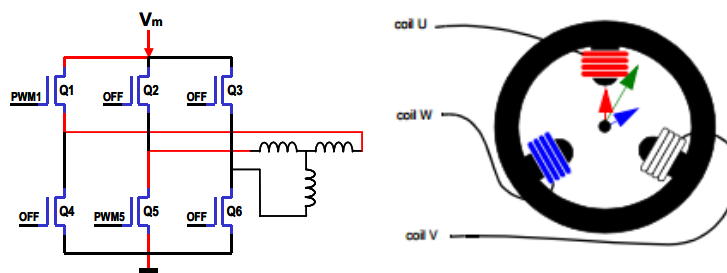


Hall Sensor code	Phase #	Active drive	
101	1	Q1 (PWM1)	Q6 (PWM6)
100	2	Q1 (PWM1)	Q5 (PWM5)
110	3	Q3 (PWM3)	Q5 (PWM5)
010	4	Q3 (PWM3)	Q4 (PWM4)
011	5	Q2 (PWM2)	Q4 (PWM4)
001	6	Q2 (PWM2)	Q6 (PWM6)

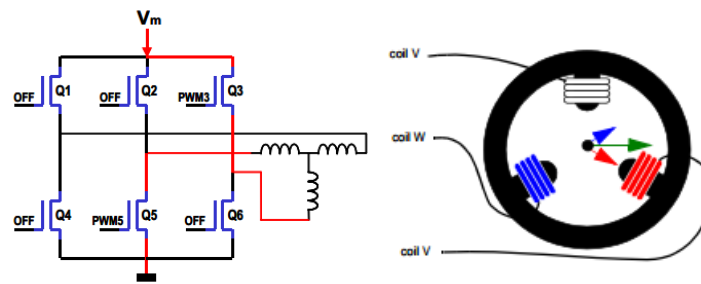
Obrázek 7 Princip spouštění vnutí BLDC motoru [1]



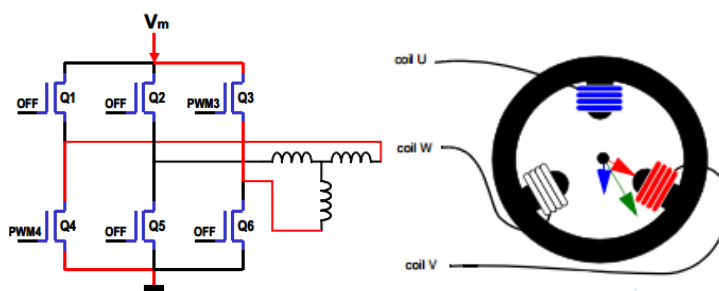
Obrázek 8 Tok proudu Fáze 1 při sepnutí Q1 a Q6, Směr magnetického pole [1]



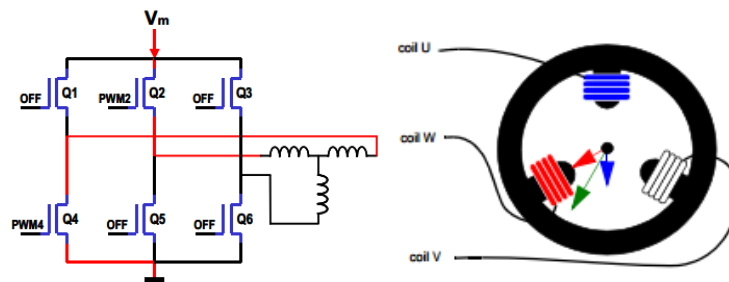
Obrázek 9 Tok proudu Fáze 2 při sepnutí Q1 a Q5, Směr magnetického pole [1]



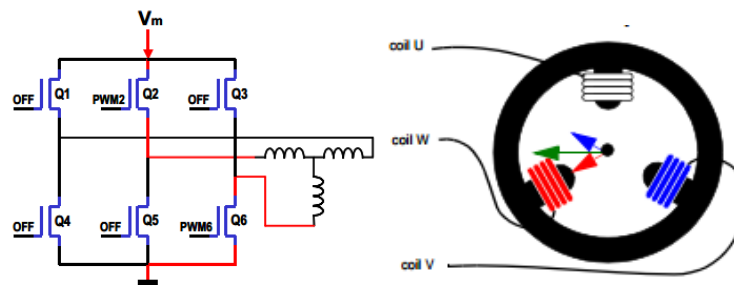
Obrázek 10 Tok proudu Fáze 3 při sepnutí Q3 a Q5, Směr magnetického pole [1]



Obrázek 11 Tok proudu Fáze 4 při sepnutí Q3 a Q4, Směr magnetického pole [1]



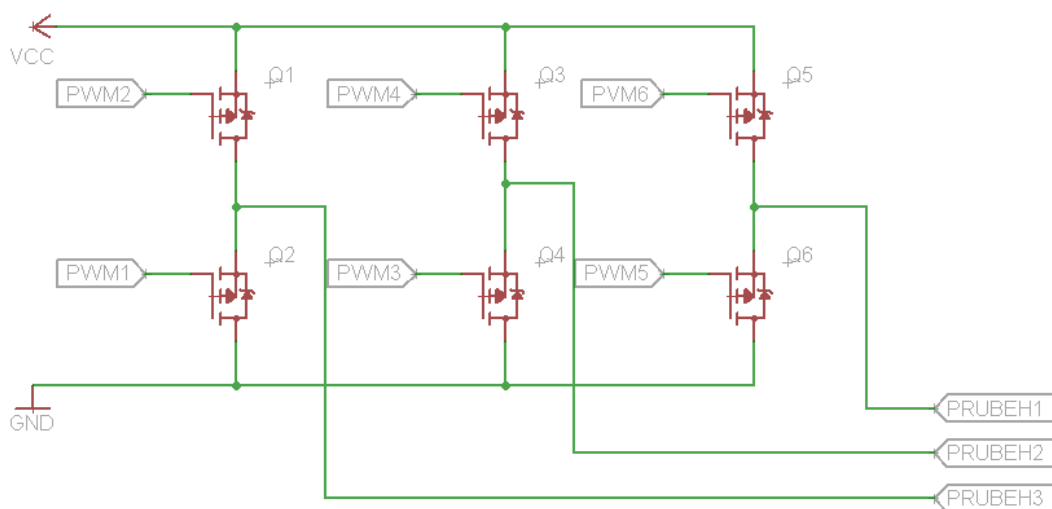
Obrázek 12 Tok proudu Fáze 5 při sepnutí Q2 a Q4, Směr magnetického pole [1]



Obrázek 13 Tok proudu Fáze 6 při sepnutí Q2 a Q6, Směr magnetického pole [1]

1.3.2 Tranzistorový můstek pro spouštění budících cívek

Na obrázku 5 je vidět, že pro buzení jednotlivých cívek se používá šest mosfet tranzistorů, které se spouští podle předem daného programu z mikroprocesoru (vstupy PWM1 až PWM6). Výstup je brán vždy mezi dvěma tranzistory v jedné větvi (PRUBEH1 až PRUBEH3). Toto zapojení se používá ve většině případech buzení vynutí cívek, protože při dobře zvolených tranzistorech může být ovládán i proud několika stovek ampér. Další výhodou je rychlost MOSFET tranzistorů, proto může být roztočen motor do maximálně možných otáček motoru. Ovšem nevýhoda tohoto zapojení je nutnost použití šestice tranzistorů a jejich chlazení, tudíž dochází ke zvětšení celkové soustavy regulátoru.

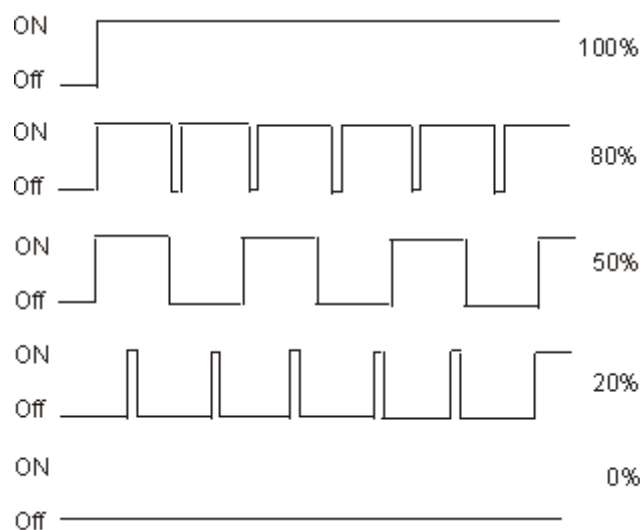


Obrázek 14 MOSFET tranzistory pro buzení cívek-zapojení do kaskády

Při použití PWM pro spínání jednotlivých vinutí se využívá lichoběžníkový průběh, protože při použití mikroprocesorů je výhodný. Ovšem při využití sinusového průběhu bychom dostali lineárnější točivý moment, který se vyznačuje cukáním motoru při nízkých otáčkách. Metodika spínání jednotlivých dvojic tranzistorů je v obou případech stejná.

1.3.3 Změna rychlosti otáčení rotoru u BLDC motorů

K řízení rychlosti otáčení se využívá změny střídy pulsní šířková modulace PWM. Na Obrázku 14 je můstkové zapojení s tranzistory a ty se otevírají pomocí PWM generovanou z mikroprocesoru.



Obrázek 15 Pulsně šířková modulace - ovládací průběhy [9]

1.4 Vyhodnocení polohy rotoru BLDC motoru

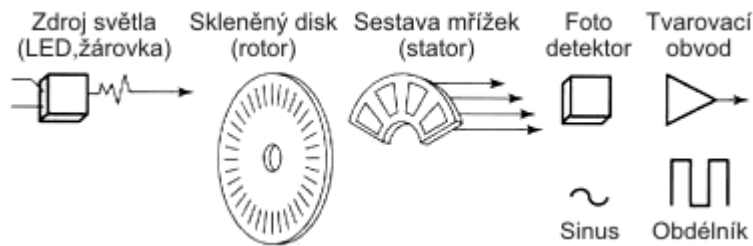
Pro dokonalejší regulaci a dosažení maximálních otáček je zapotřebí vědět v jaké poloze se nachází rotor. V takovém případě použijeme snímače. Možnost detekce rotoru jde za pomoci snímače nebo za využití zpětného signálu EMF. Hlavním faktorem pro zvolení jedné z možností je výkonový požadavek, cena, prostor u motoru, fyzikální okolí motoru a rychlosti otáčení. Rozlišujeme dva druhy rozlišování snímačů podle jejich kvality.

Pokud není použit snímač polohy rotoru nebo rychlosti, jedná se o bezsenzorové řízení. Při vyřazení snímače polohy dojde k celkovému zjednodušení obvodu, ale také k jeho zlevnění. BLDC motory mívají vyvedeny tři přívodní dráty pro připojení k regulátoru, ovšem při použití snímače např. Hallových sond dojde ke zdvojnásobení drátů, což je z hlediska spolehlivosti nežádoucí. Pro řízení BLDC motoru bezsenzorově se nejčastěji využívá metoda založená na detekci průchodu nulou zpětných BEMF signálů.

1.4.1 Senzorové metody

1.4.1.1 Inkrementální snímače

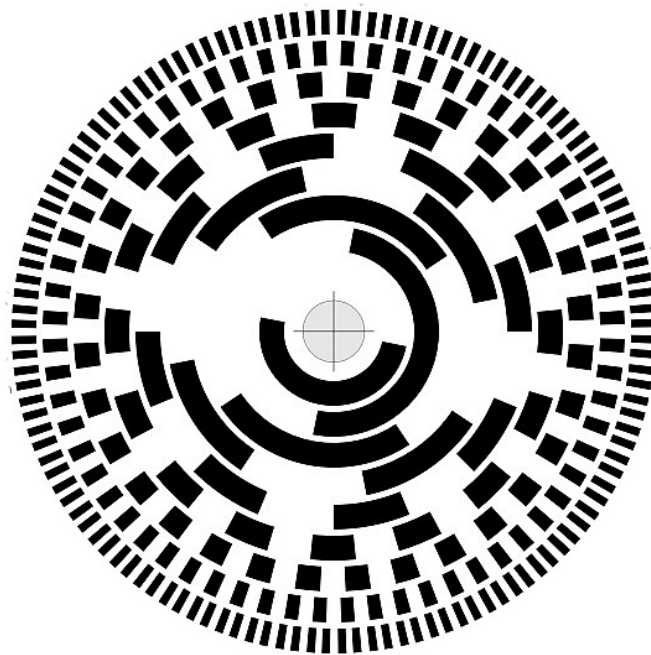
Tyto snímače pracují na principu clonění světelného toku u fotocitlivého snímače. Zdroj světla i snímač jsou nehybně připevněny a pohybuje se pouze rotující kotouč s otvory. Pro zjištění v jaké poloze se rotor nachází nebo jak rychle se otáčí, postačí měřit počty pulsů na snímači.



Obrázek 16 Princip inkrementálního rotačního snímače [10]

1.4.1.2 Grayův kód

Je to binární číselná soustava, ve které se každé po sobě jdoucí hodnoty liší v bitovém vyjádření změnou pouze v jediné bitové pozici. Vznikl pro použití v místech, kde je potřeba přesného měření rotačního pohybu. Výhodou takového snímače je vyhodnocení polohy rotoru i při klidovém stavu rotoru a jednoznačné vyhodnocení směru otáčení. Jeho použití je vhodné v místech se silným okolním rušením prostředí, ve kterém není možno použít Hallovy sondy nebo jiný snímač.



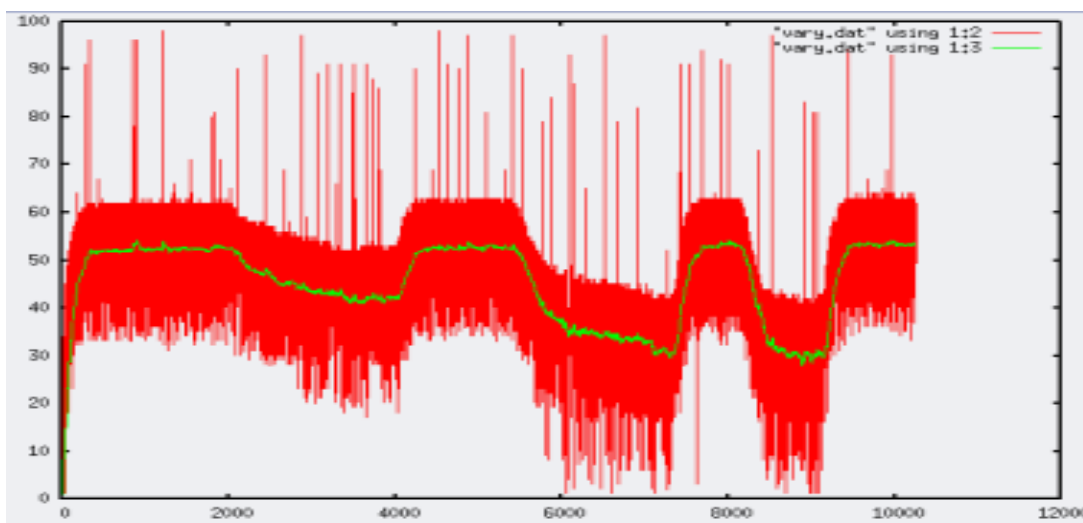
Obrázek 17 Kódový kotouč [11]

1.4.1.3 Proudové a napěťové snímání

Zde je opět zapotřebí extévního snímače v tomto případě proudu respektive napětí. Zde se vyhodnocuje zpětná veličina, která je ve zpětné vazbě u nespustěného vynutí. Indukované napětí bývá velice rušené a slabé při malých otáčkách rotoru, proto se musí přivést na elektronický filtr a na operační zesilovač, který zesílí signál na potřebnou hodnotu. I přesto, že signál prochází přes filtr, tak napěťový průběh bývá velice zašumělý a při vyhodnocování v mikroprocesoru musí docházet k výpočtu klouzavého průměru, který se již může zpracovat a využít k regulaci. Na následujícím obrázku 16 je vidět zpětné zesílené napětí, které zde zastupuje červená barva a vypočítané klouzavé napětí je zastoupeno

zelenou barvou. Na obrázku není vidět průběh při násilném zastavení motoru, protože by došlo ke zvýšení proudu vinutím a úpadku napětí. Tohoto faktu se využívá při zajištění motoru proti přetížení, které lze snadno indukovat.

Aby nebylo zapotřebí vést další vodič od motoru, odebírá se zpětnovazební napětí mezi budícími tranzistory za použití ochranného obvodu. Pro tato měření se používá pomocný obvod sestavený přímo pro tato měření, pro zjednodušení řídicího programu v mikroprocesoru. Tento způsob je nejpoužívanější v modelářských okruzích, protože je snadné zjistit zda se motor zasekl a přestal se otáčet. Například při zřícení modelu letadla a následné zaboření do země způsobí zaseknutí motoru.



Obrázek 18 Průběh zpětně indukovaného napětí závislého na čase [8]

1.4.1.4 Hallové sondy

Při použití snímače pro měření úhlu natočení rotoru se používají Hallové sondy a to z důvodu nezatěžování motoru. Při použití třech hallových sond dojde k indukovaní maxima každé z nich v okamžiku natočení rotoru jejich směrem. Tyto naindukované hodnoty jsou připojeny na mikroprocesor a dochází k výpočtu rychlosti otáčení motoru. Pokud má mikroprocesor možnost využití externího přerušení, které lze využít jako čítač nebo časovač, tak počet přerušení odpovídá počtu otoček za daný časový úsek a zde platí, že čím kratší tím přesnější za ceny složitějšího algoritmu.

1.4.2 Bezsenzorové metody

Pokud má být elektromotor regulován v celém jeho spektru otáček, je potřeba mít regulátor, který dostává informaci o poloze rotoru. Pokud však motor žádný senzor polohy neobsahuje, lze jej řídit i bez senzorově, ovšem s mnohem složitějším a nákladnějším složením. Bezsenzorové vyhodnocování má mnoho principů.

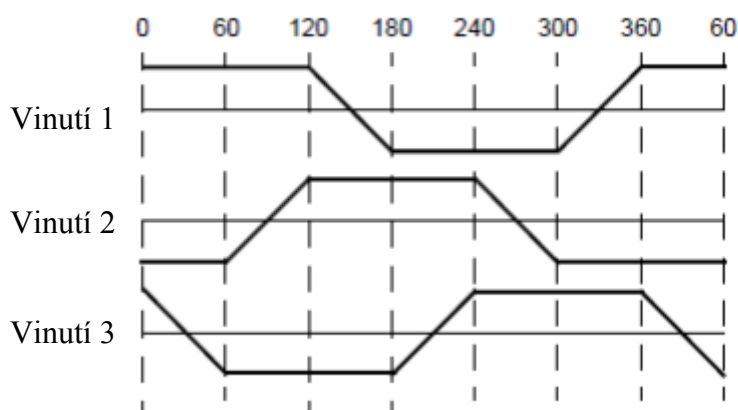
1.4.2.1 BEMF

Podle Faradayova zákona se projeví změna magnetického pole v okolí cívky a to tak, že se na ni indukuje elektrické napětí a uzavřené smyčky začne protékat indukovaný proud. Velikost rychlosti otáčení je přímo úměrná velikosti indukovaného napětí, v našem případě to je zpětná indukované napětí od pohybu magnetického pole buzení. Přímé měření BEMF je možné pouze v případě, že je přímý přístup k nulové svorce vinutí z BLDC motoru.

Zpravidla bývá motorová konstanta K_m vyražena na štítku BLDC motoru a značí, kolik otáček odpovídá jednomu voltu. Toto číslo se pohybuje u malých motorů od $K_m=150$ až po motory, které mohou mít tuto konstantu $K_m=4200$.

*rychlost otáčení = indukované napětí * motorová konstanta*

$$[RPM] = [V] * [RPM/V]$$



Obrázek 19 Průběh BEMF pro jednotlivá vinutí statoru

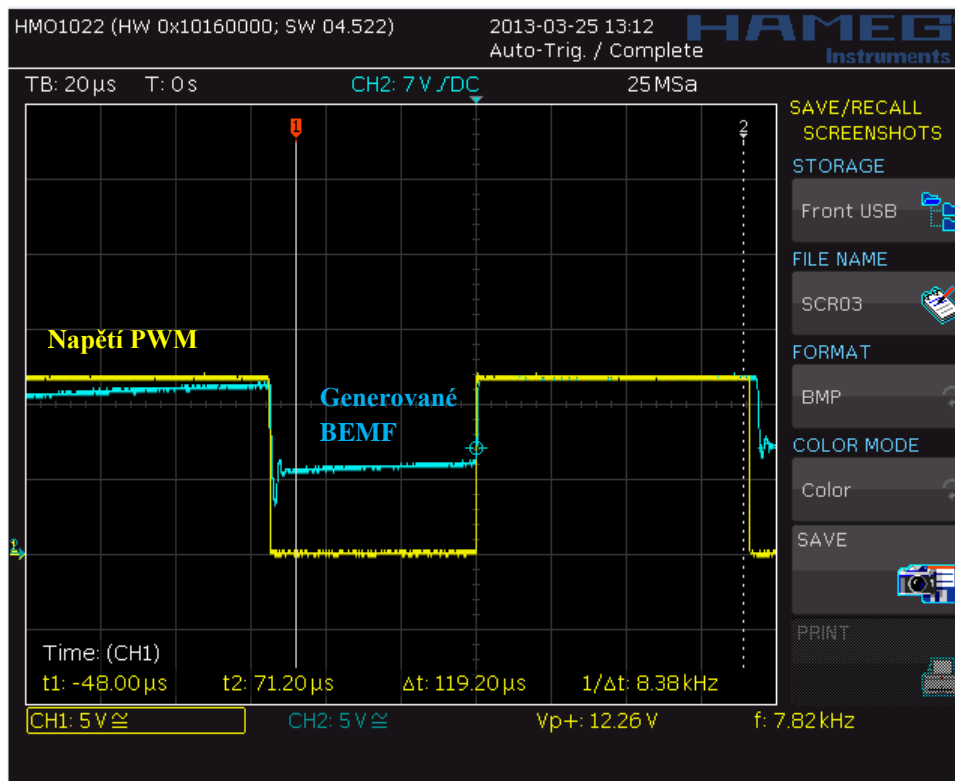
1.4.2.2 Srovnání BEMF a Hallových senzorů

Důležitý fyzikální rozdíl u určování polohy rotoru přes BEMF nebo za pomoci Hallových sond je, že pro BEMF musí dojít ke změně magnetického toku v čase v cívce kde je BEMF snímáno, Hallův senzor snímána aktuální magnetický tok. Z tohoto důvodu se pro bezsenzorové komutace na základě měření BEMF musí rotor pohybovat, aby došlo k určení k jeho polohy. Na rozdíl od toho, Hallové senzory vždy dávají platný signál představující pozici rotoru. Poloha rotoru může být reprezentována třemi bitový vektory s rozlišením 60° v elektrickém obvodu. Pro většinu BLDC motorů jsou Hallové senzory upevněny ve 120° systému, který je přímo kompatibilní s BEMF.

1.4.2.3 Detekce průchodu nulou BEMF signálu

U bezsenzorového řízení se využívá indukované napětí na odpojeném vinutí. Dochází zde k lichoběžníkovému průběhu okolo nuly, proto je nejjednodušším řešením vyhodnotit průchod nulou. Pro normální provoz, přechod na další detekce polohy se provádí při každém průchodu nulou. Další zpracování signálu, které je zašuměné kvůli PWM spínání a vlastní indukci cívek. Se správně upraveným signálem se stane bezsenzorové komutace

stejně jednoduchá jako komutace založená na základě Hallových senzorů. Pro detekování průchodu nulou lze použít komparátor.



Obrázek 20 Reálný časový průběh napětí PWM a BEMF

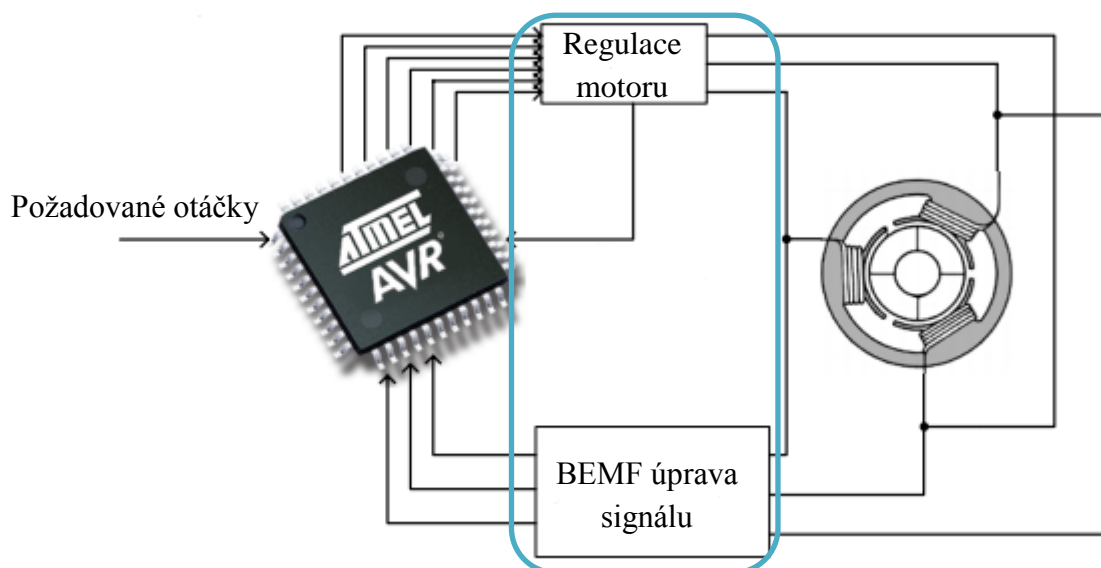
1.4.2.4 BEMF šum

Zašuměného signálu, který se používá pro stanovení polohy rotoru, způsobuje komutační poruchy nepřesným určením polohy. Proto je potřeba odstranit šum odpovídající úpravou signálu nebo filtrování pomocí softwaru, který je složitý, ale lepší. Číslicová filtrace je účinná metoda, ale je zde zapotřebí hodně výkonný filtr, který bude správně fungovat v celém spektru regulace.

1.5 Možnosti bezsenzorové řízení BLDC motoru

Jak je na obrázku 19 vidět principiální zapojení důležité ke správnému chodu bezsenzorové regulace BLDC motorů. V obvodu je zapotřebí řídicí a vyhodnocovací mikroprocesor, regulátor otáček (principiálně PID regulátor) a zpětná vazba s filtrem. Regulátor se zpětnovazebním odfiltrováním bývá v jednom pouzdře, což velice zjednodušuje aplikaci při používání se spojením BLDC motorů. Doposud se nabízí dvě možnosti řízení BLDC motorů které je běžně využívají v praxi. Prvním typem je poziční snímání využívající BEMF motoru a druhým je poziční odhad za pomoci parametru motoru, kterým je

terminálové napětí a proud, bohužel je složitější a ke správnému chodu je zapotřebí DSP(digitální signálový procesor).



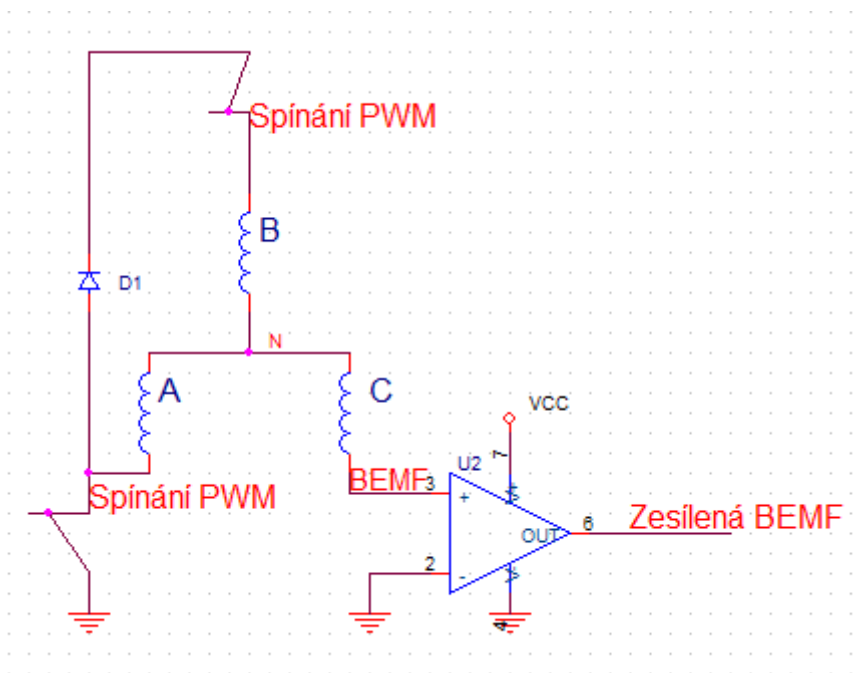
Obrázek 21 Princip bezsenzorové komutace

Pro bezsenzorovou komutaci se nejčastěji využívá metoda, která je jednoduchá a zároveň dosahuje extrémních hodnot při regulaci BLDC motoru. Pro pohyb je zapotřebí přivést ke dvěma vinutím potřebný potenciál pro vytvoření dostatečného elektromagnetického pole, ovšem u třetího vinutí není přivedeno nic. Proto se toto volné vinutí použije pro detekci pohybu rotoru. Hlavní roli zde hraje BEMF, které je snímáno po dobu periody kdy je jedno ze při vinutí nenapájené. Jelikož se napájení provádí za pomoci PWM, zná regulující člen v jakém časovém okamžiku může odebírat BEMF a následně je vyhodnocovat. Při této metodě je velice důležité, že BEMF signál není zapotřebí filtrovat ani zesilovat, pouze v případech nízkých otáček kde je odstup BEMF signálu a rušivého šumu malý. Tato metoda dosahuje stejných hodnot jako metoda využívajících senzorů a jiných externích snímačů otáček rotoru BLDC motorů.

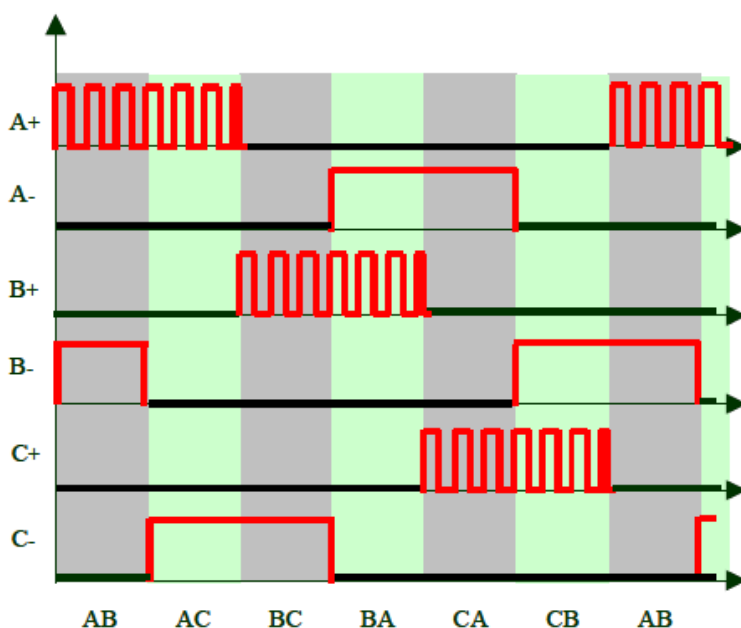
Pro spínání jednotlivých vinutí se používá tranzistorový most, který je připojen k řídicí a jednotce pouze vedením nahoře a dole. Pro programování se využívají tři možnosti pro správnou funkčnost spínání takového můstku. Jednotlivé PWM můžou být spouštěny takto:

- Horní tranzistor je regulován PWM a spodní tranzistor je sepnutý po celou dobu kroku
- Dolní tranzistor je regulován PWM a horní tranzistor je sepnutý po celou dobu kroku
- Jak nahoře tak dole je spínán tranzistor PWM

Na obrázku 22 je použita PWM na horní stranu tranzistorů a BEMF je detekována v nulovém stavu PWM. Je zde principiální zobrazení dvou spínacích prvků u dvou vinutí a odebrání snímané veličiny přivedené na operační zesilovač. Při aktuálním stavu je vidět, že vinutí A a B jsou připojeny a vinutí C vytváří BEMF. Horní spínač ve fázi A je v tuto chvíli zastoupen PWM a druhý spodní pro fázi B je přiveden na napájení po celý krok. BEMF je indukováno na vinutí C a je zesíleno pro možné použití a zvýšení odstup signál/šum pro pozdější filtraci.



Obrázek 22 Zjednodušené zapojení pro snímání BEMF



Obrázek 23 PWM pro řízení vrchních a spodních spínačů pro použití BEMF [3]

1.5.1 Pomocné obvody využívající BEMF

Tyto obvody se využívají pro zjednodušení programu v řídicím mikroprocesoru. Jedná se hlavně o přeměnu zpětné EMF na signál, který se snadněji zpracuje v mikroprocesoru. Existuje spousta takových to obvodů.

1.5.1.1 Freescale 56F800

Freescale 56F800 je velmi vhodný pro digitální ovládání motoru, který kombinuje DSP (digitální signálový procesor) schopný vypočítat požadované hodnoty a Regulátor MCU na jediném čipu. Tyto jednočipové počítače nabízejí mnoho periferních zařízení, jako jsou PWM modulátor, analogový/digitální převodník (ADC), časovače, komunikační periferie (SCI, SPI, CAN), vnitřní paměti Flash a RAM. Obecně platí, že všechny podtřídy od Freescalu jsou ideální pro různá řízení BLDC motorů.

Kromě rychlého 12bitového A/D převodníku a 16bitového časovače je nejdůležitější periferií pulsní šířková modulace (PWM). Modul PWM nabízí vysoký stupeň rozsahu při jeho nastavení, což umožňuje účinnou kontrolu a regulaci BLDC motoru. Pro 56F800 je k dispozici takovéto možnosti PWM:

- Tři doplňkové páry PWM signálu nebo šest nezávislých signálů
- Různá šířka horního a dolní části impulsu rychle reagující na změny stavů na vstupech nebo úpravy softwarem
- 15 bitů rozlišení
- Individuální programově řízené PWM výstupy
- Polarita regulace
- 20 mA na výstupních pinech PWM pro řízení tranzistorového můstku

Pomocný obvod od Freescalu používá kvadrurní enkodér. BLDC motoru je komutovaný v šesti definovaných okamžicích. Vzhledem k tomu, že kvadrurní enkodér udává přesné pozice, jedna otáčka rotoru je rozdělena do šesti sektorů. Rozpoznat změnu otočení je pro kvadrurní enkodér velmi rychlé. Frekvence snímání závisí na maximálních otáčkách rotoru, počtu pólových párů a požadované přesnosti detekce. Stejná frekvence používaná v PWM (16kHz) je vyhovující pro běžné aplikace používaných BLDC motor. V tomto případě, může být pozice rotoru snímána do okamžiku, než dojde přerušeni a znovu načíst PWM algoritmus odpovídající aktuální pozici z jedné ze šesti sektorů. Po změně sektoru (pootočení rotoru o 60°) dojde k detekci rotoru a následní změny regulace PWM.

Tabulka 2 Porovnání enkodéru Freescale56F800 s Hallovými senzory

Kvadrurní enkodér pro Freescale	Hallový senzory
3 výstup	3 výstupy
Neurčení absolutní polohy rotoru v celém spektru otáček	Určení absolutní polohy rotoru v celém spektru otáček
Udá jednu přesnou polohu	Za jednu otáčku udá 6 hodnot
Detekce od 5% otáček motoru	Detekce již od 0% otáček motoru

1.5.1.2 Trinamic TMC603

TMC603 je třífázový motorový ovladač pro vysoce kompaktní a energeticky účinné řešení pohonů zejména u BLDC motorů. Obsahuje veškeré napájecí a analogové obvody potřebné pro výkonné systémy BLDC motorů. TMC603 je navržen tak, aby prováděl pokyny mikroprocesoru spínacích a řídicích algoritmů. Přímo pohání 6 externích N-kanálových MOSFET tranzistorů pro proudy do 30A a napětí do 50V. Využívá integrovanou hodnotu proudu naměřenou z MOSFET kanálu na vývodu pro snímání. Integrovaný hallFX (patentováno) umožňuje bezsenzorové komutace. HallFX je virtuální generátor signálů podobný průběhům z reálných hallových snímačů. Ochranné a diagnostické funkce, stejně jako absence snímacích senzorů na BLDC motoru snižují náklady na systém a zvyšují spolehlivost systému.



Obrázek 24 TMC603 od společnosti TRINAMIC [12]

Přednosti TMC603:

- Funkčnost až do 30A u BLDC motorů
- Funkčnost od 8V až do 50V u BLDC motorů

- 3.3V nebo 5V napájení
- Miniaturní rozměry 8mm X 8mm
- Integrované zkrácení vypínacího napětí u MOSFET tranzistorů
- Patentovaný hallFX pro bezsnímačovou BEMF emulaci Hallových sond
- Přepět'ová a proudová ochrana
- Podpora nejnovějších výkonných MOSFET tranzistorů
- Využití PWM až na 100 % požadavku z mikroprocesoru

Využití TMC603:

- Motorový ovladač pro průmyslové využití
- Miniaturní pevné disky
- Robotika
- Pro vysoce citlivé pohyblivé aplikace-využití duálních snímačů polohy
- Bezsenzorová komutace BLDC motorů
- Ovladač pro BLDC, krokové a kartáčové DC motory
- Sinusový nebo obdélníkový průběh komutačního napětí

Dalším neopomenutelným zjednodušením programové části, které použití TMC603 nabízí je automatická časová mezera zpoždění mezi jednotlivými změnami spínání opačné strany mostu tranzistorů. Pokud by toto zpoždění TMC603 nenabízelo, mohlo by dojít k uzemnění jednotlivých stran na mostu tranzistorů a to by znamenalo zkrat se špičkovým proudem na tranzistorech. Proto musí být parametry dopočítány přímo v řídicí součástce, které se povolí při zapnutí BBM logiky.

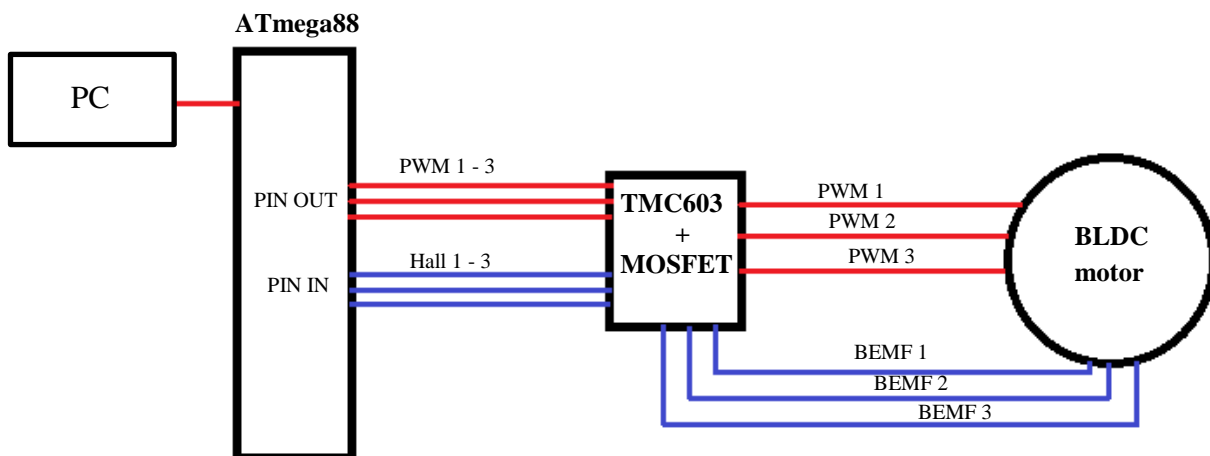
2 Praktická část

Praktické řešení bylo realizováno podle doporučeného zapojení přímo od výrobce budící součástky TMC603, který k řízení BLDC motorů doporučuje na výkonovou část obvodu použít šestici N-kanálových MOSFET tranzistorů pro proudy do 30A a napětí do 50V.

Pro použití obvodu TMC603 jsem se rozhodl hlavně pro jeho emulátor halových sond zjednodušující celkový návrh. Emulátor na základě signálů na cívkách motoru emuluje průběhy halových sond, čímž zapojení bez senzorů a na straně procesoru dostaneme řízení bez nutnosti vyhodnocovat BEMF. Další výhodou obvodu je možnost využití šesti identických N-MOSFET tranzistorů bez ohledu na to jestli spínají nad, nebo pod zátěží. Pro spínání tranzistorů obsahuje zdroj napětí pro buzení dolních tranzistorů a Villárdův násobič zajišťující kvalitní sepnutí N-MOSFETU nad zátěží. Kromě zdrojů pro napájení pro vlastní napájení a napájení MOSFETŮ obsahuje i výstup 5V pro napájení externí logiky, čímž eliminuje nutnost vnějších zdrojů nebo stabilizátorů.

Pro realizaci elektronického řízení BLDC motorů jsem se rozhodl použít mikroprocesor ATmega88, pomocný ovládací obvod TMC603 a unipolární MOSFET tranzistory. Pro zadávání rychlosti otáčení bude připravena sériová linka a sběrnice I2C. Další součástky ve schématu zapojení jsou z důvodu doporučení od výrobce nebo pro ochranu obvodu proti signálovému rušení nebo ničivého přepětí. Na následujícím obrázku je vidět principiální požadované zapojení:

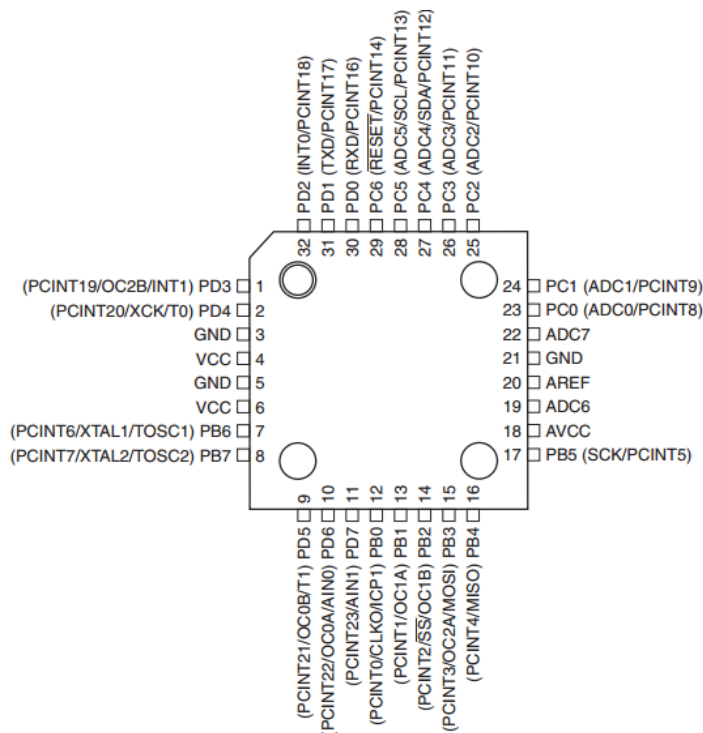
- Program v PC určuje požadavky uživatele na rychlost otáčení
- Mikroprocesor ATmega88 zpracuje požadavek na otáčení, který zpracuje a porovná se signálem ze zpětné vazby
- TMC603 + MOSFET tranzistory ovládají výkonovou část obvodu tj. spouští vinutí dle předem určeného programu
- BLDC motor se otáčí dle požadavku uživatele a následně reakce ovládacích členů, dále generuje zpětné EMF



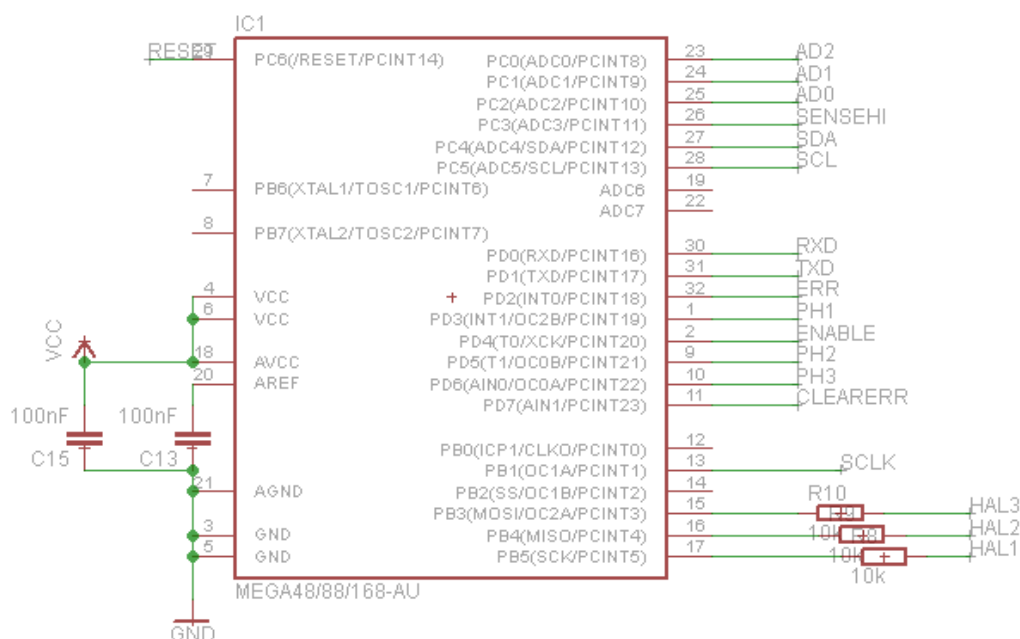
Obrázek 25 Principiální zapojení celého obvodu

2.1 ATmega88

ATmega88 je jedním z řady mikroprocesorů od firmy Atmel platformy RISC. Jak je vidět z následujícího obrázku SMD pouzdro mikroprocesoru má 32 vývodů a pro celkové zmenšení práce, jsem se rozhodl pro toto pouzdro o rozměrech 9mm x 9mm.



Obrázek 26 Pouzdro AT mega 88 [2]



Obrázek 27 Principiální zapojení celého obvodu

Použité vývody ATmegy 88:

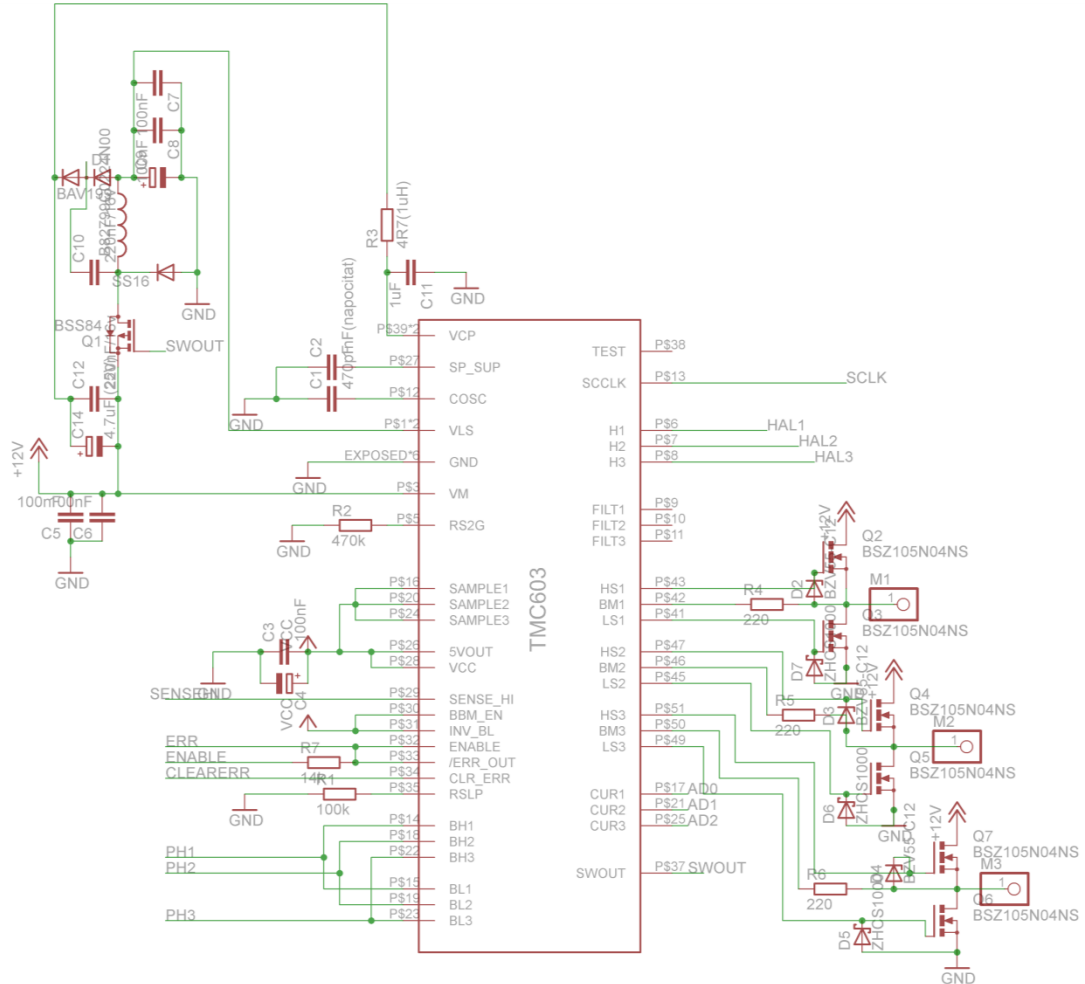
- VCC, AVCC, GND, AGND – Napájení mikroprocesoru
- PB1 – Připojeno na vývod SCLK u TMC603
- PB3 – Připojeno na vývod HAL3 u TMC603
- PB4 – Připojeno na vývod HAL2 u TMC603
- PB5 – Připojeno na vývod HAL1 u TMC603

- PC0 – Připojeno na vývod CUR1 u TMC603
- PC1 – Připojeno na vývod CUR2 u TMC603
- PC2 – Připojeno na vývod CUR3 u TMC603
- PC3 – Připojeno na vývod SENSEHI u TMC603
- PC4 – Konektor použit pro rozhraní I2C konkrétně SDA
- PC5 – Konektor použit pro rozhraní I2C konkrétně SCL
- PC6 – Reset

- PD0 – Konektor použit pro sériovou linku RXD
- PD1 – Konektor použit pro sériovou linku TXD
- PD2 – Připojeno na vývod ERR u TMC603
- PD3 – Připojeno na vývod PH1 u TMC603
- PD4 – Připojeno na vývod ENABLE u TMC603
- PD5 – Připojeno na vývod PH2 u TMC603

- PD6 – Připojeno na vývod PH3 u TMC603
- PD7 – Připojeno na vývod CLEARERR u TMC603

2.2 Zapojení TMC603



Obrázek 28 Zapojení TMC603

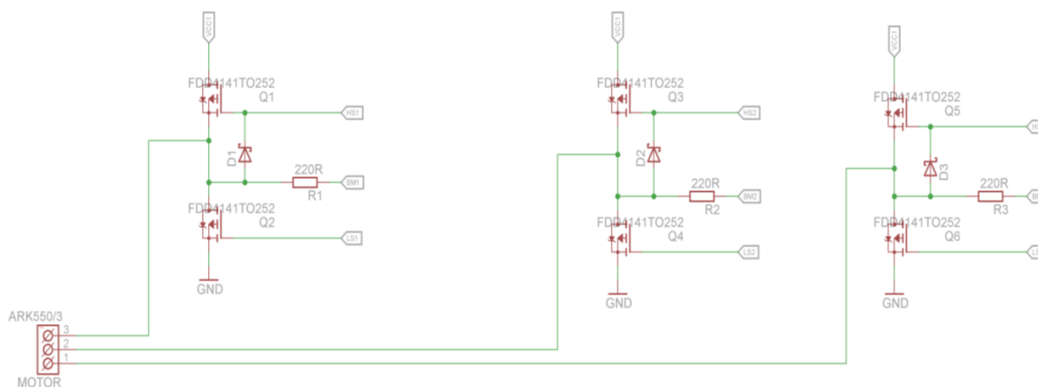
Zapojení TMC603 v obvodu je podle doporučeného zapojení od výrobce. Požité jsou tyto vývody:

- VCC – napájení logiky
- VM – Napájecí napětí pro motory, vstupní napětí pro ostatní regulátory napětí
- VLC – Napájení spínacích obvodů pro dolní tranzistory
- VCP – Napájení horních tranzistorů
- SWOUT – Výstup pro řízení tranzistoru, řídí funkci spínaného zdroje napětí (levá horní část schématu zapojení TMC603)
- GND, GNDP –zem a silová zem
- H1, H2, H3 – vývody s emulací halových sond
- COSC – Filtrační kondenzátor pro snižující zdroj
- SCCLK – Pomocná frekvence pro filtraci modulu hallFX

- BH1, BH2, BH3 – Vstupní řídicí PWM signál z mikroprocesoru pro horní tranzistory
- BL1, BL2, BL3 – Vstupní řídicí PWM signál z mikroprocesoru pro dolní tranzistory
- SAMPLE1, SAMPLE2, SAMPLE3 – Externí nastavení pro měření procházejícího proudu nebo fáze (nevyužito)
- CUR1, CUR2, CUR3 – Analogový výstup pro měření protékajícího proudu
- INV_BL – Připojeno na GND, aby došlo k inverzi všech BL (povoleno), umožňuje použít signál pro HL na BL
- BBM_EN – Break before make logic, připojeno na VCC (povoleno), z důvodu odpojení vnějšího obvodu před komutací, prevence překrytí a zkratu při spínání.
- ENABLE – Povoluje výstupní signály pro tranzistorový H-můstek
- /ERR_OUT – Chybový výstup, připojen na ENABLE (využití proti přetížení obvodu při zastavení BLDC motoru)
- CLR_ERR – RESET při obnovení funkčnosti po detekci chyby
- RSLP – Ovládání sklonu náběhové hrany výstupního průběhu
- LS1, LS2, LS3 – Výstup pro ovládání spodních MOSFET tranzistorů v H-můstku
- HS1, HS2, HS3 – Výstup pro ovládání horních MOSFET tranzistorů v H-můstku
- BM1, BM2, BM3 – Snímací vstup zapojený na střed tranzistorového H-mostu pro řízení tranzistorů
- FILT1,2,3 Výstupy filtrovaného BEMF, nevyužíváme
- TEST testovací pin pro test obvodu, námi nevyužitelný

2.3 Zapojení MOSFET tranzistorů

Na výkonovou část jsou použity bipolární MOSFET tranzistor. Bipolární tranzistor je oproti unipolárnímu řízen přivedeným napětím na hradlo (Gate) a je schopen pracovat s vyššími proudy protékajícími mezi kolektorem (Drain) a emitorem (Source). Jeho hlavní předností je nízký odpor tranzistoru mezi Drainem a Sourcem, proto zde dochází k nižším výkonovým ztrátám a následnému ohřívání tranzistoru i okolí.



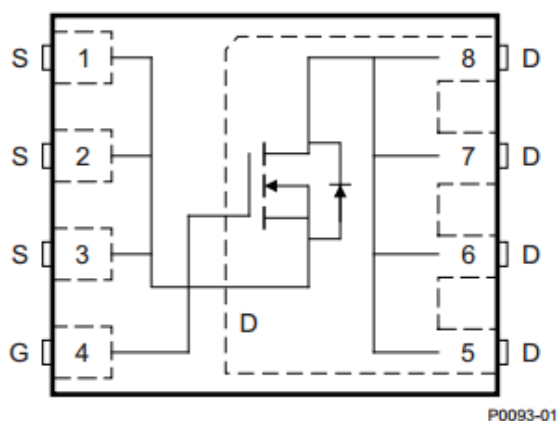
Obrázek 29 Zapojení tranzistorového H-mostu

Jako spínací tranzistory byly zvoleny tranzistory CSD17559Q5 od texas instruments, tyto tranzistory zvládají spínat napětí 30V a proudy až 100A kontinuálně a až 250A špičkově. Tady narážíme na tabulkovou hodnotu obvodu TMC603 kde píší limit řízení 30A, ale jak se dočteme dále v datasheetu, limitující není proud na tranzistorech ale kapacita gatu. Tím náš tranzistor s nábojem gatu pod 10nC leží hluboko v poli doporučovaných kapacit.

Zenerova dioda s napětíovými parametry 12V až 15V je na Gatu pro ochranu proti napětíovým špičkám. Odpor o velikosti 220Ω je přidán z doporučeného zapojení od výrobce TMC603.

Tabulka 3 Parametry tranzistoru

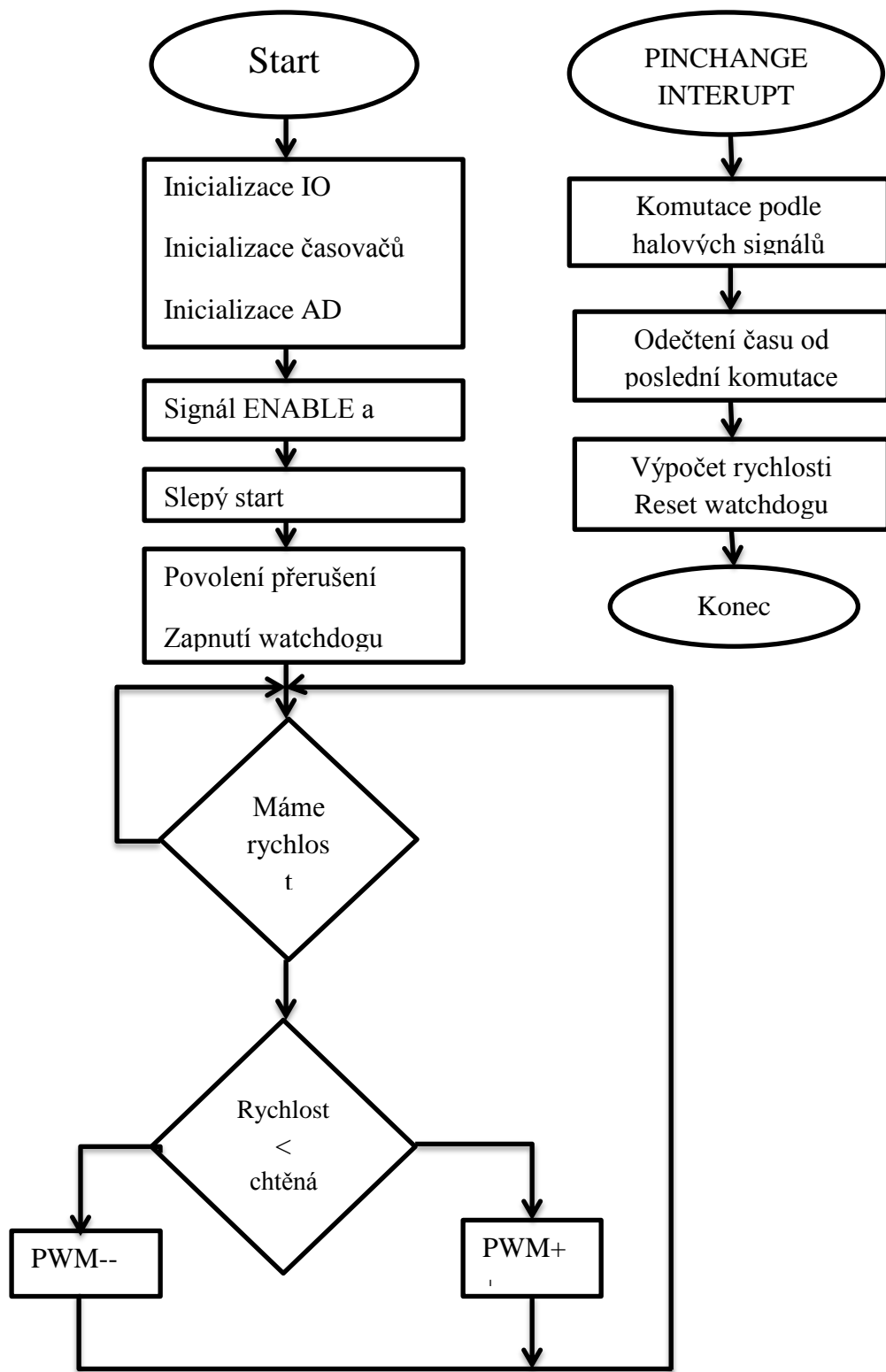
PARAMETRY TRANZISTORU při teplotě $T_A = 25^\circ\text{C}$		HODNOTA
V_{DS}	Napětí mezi Drainem a Sourcem	30 V
Q_g	Nabíjení kapacity Gatu (při napětí 4,5V)	39 nC
Q_{gd}	Nabíjení kapacity mezi Gate a Drain	9,3 nC
$R_{DS(on)}$	Odpor mezi Drain a Source ($V_{GS} = 4,5\text{V}$)	1,15 mΩ
$R_{DS(on)}$	Odpor mezi Drain a Source ($V_{GS} = 10\text{V}$)	0,95 mΩ
$V_{GS(th)}$	Prahové napětí	1,4 V
I_D	Proud protékající Drainem	100 A
I_{DM}	Pulzní proud protékající Drainem $\leq 300 \mu\text{S}$	257 A



Obrázek 30 Vnitřní zapojení tranzistoru CSD17559Q5 [10]

2.4 Řídící program pro mikroprocesor

Program vznikl na základě programů z aplikačních poznámek AVR443 a AVR444. Program samotný je díky použitému pomocnému obvodu poměrně jednoduchý. Základ programu tvoří 8 bitové časovače 0 a 2, které jsou nastaveny, aby generovali FAST PWM z výstupů OCR0A OCR0B a OCR2B. Kde střída udává proud procházející jednotlivými cívkami.



Obrázek 31 Vývojový digram programu

Program po spuštění provede inicializaci časovačů a nastaví vstupy a výstupy. Poté provede resetování chybového vstupu TMC603 a nahodíme ENABLE pro spuštění můstků.

Pokusíme se roztočit motor s 20% proudem a komutací řízenou naslepo časovačem 1 s postupně klesající dobou mezi přepnutími. Tato hodnota je nastřelena náhodně a bylo by ji vhodné naladit na konkrétní motory.

Poté se časovač jedná převede do stavu generování filtrační frekvence pro hallFX modul čipu TMC603. Povolí se přerušení PINCHANGE na které jsou přivedeny signály z emulace halových sond a spustí se watchdog nastavený na 1 s.

Samotný program potom v nekonečné smyčce přidává nebo ubírá proud na základě naměřené rychlosti. Vzhledem k tomu, že doba pro měření rychlosti je delší než zpracování mainové smyčky je navíc přidána stavová proměnná říkající, že byla hodnota rychlosti aktualizována. Řízení rychlosti by bylo možné z líného přidávání a ubírání rychlosti nahradit PID regulátorem, ale ten by bylo potřeba naladit na konkrétní motor.

Komutace probíhá v obsluze přerušení od PINCHANGE podle komutačního schématu, dále je zde odečtena doba naměřená časovačem 1 a přepočtena na rychlost.

Ve vývojovém diagramu není zakreslena obsluha USART kde na příchod dat jsou zapsány jako chtěná rychlost.

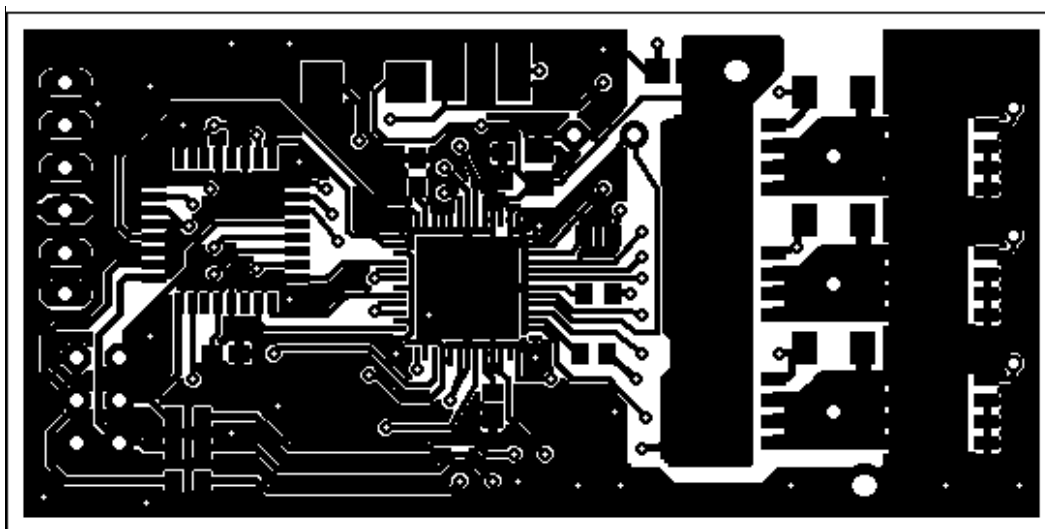
Program sám neřeší měření proudu a chybové stavy, většinu chybových stavů detekuje TMC603 sám a díky vyvedení pinu ERROR na ENABLE a opačné logice těchto pinů, obvod sám odepne silovou část. Procesor má zapnutý watchdog který resetuje obsluhu přerušení pinchange, takže pokud dojde k zaseknutí motoru, jeho neroztočení, nebo odepnutí obvodem, postará se reset watchdogem o nápravu z výchozích podmínek.

2.5 Návrh DPS

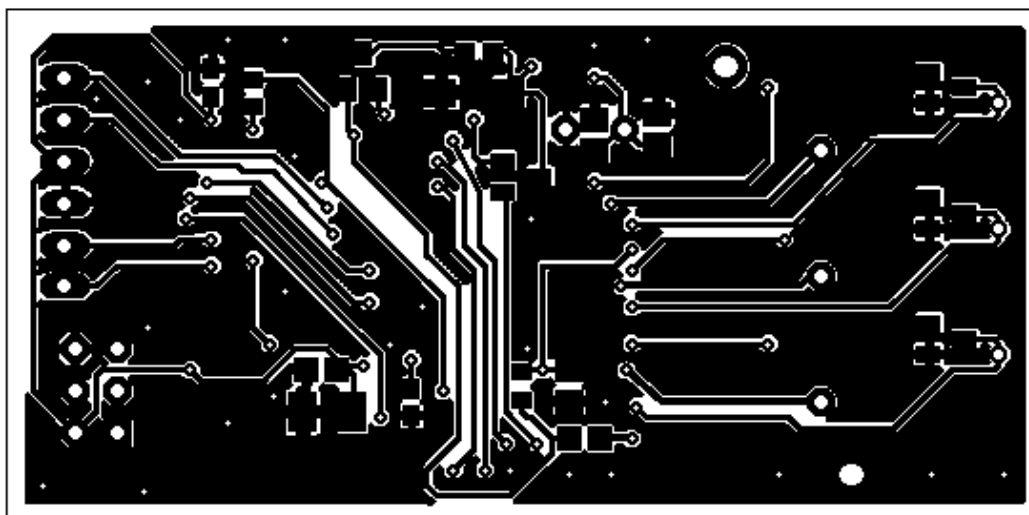
Navrhnutý obvod zařízení je vytvořen na dvoustranné DPS. Výkonné součástky jsou voleny tak aby vyhovovaly běžným BLDC motorům používaným v leteckém modelářství, které jsou určeny pro proud do 100A. Takto silné regulátory se mohou objevit v letadlech o hmotnosti až 5kg. Na desce jsou součástky podle doporučení z datasheetu a z doporučených součástek na ochranu obvodu s mikroprocesorem a výkonovými tranzistory. Kondenzátory jsou umístěny co možná nejbližší mikroprocesoru ATmega 88 tak pomocnému ovládacímu obvodu TMC603. Tranzistory jsou připájeny z jedné strany desky a nejsou opatřeny vnějším chlazením, protože při správném řízení spouštění, dochází k minimálnímu úbytku napětí na tranzistoru a jeho ohřívání. Vodivé plochy u tranzistorů jsou navrhnuté na vyšší proud, který poteče do BLDC motoru. Vývody pro BLDC motor

jsou napájené vývodové kabely opatřené konektory pro jednodušší výměnu těchto motorů. Přiřazené piny zastupují funkci rozhraní ISP, I2C a sériové linky. Napájení zde zajišťuje li-pol článek o velikosti od 11,1V, který je učený pro modelářské účely.

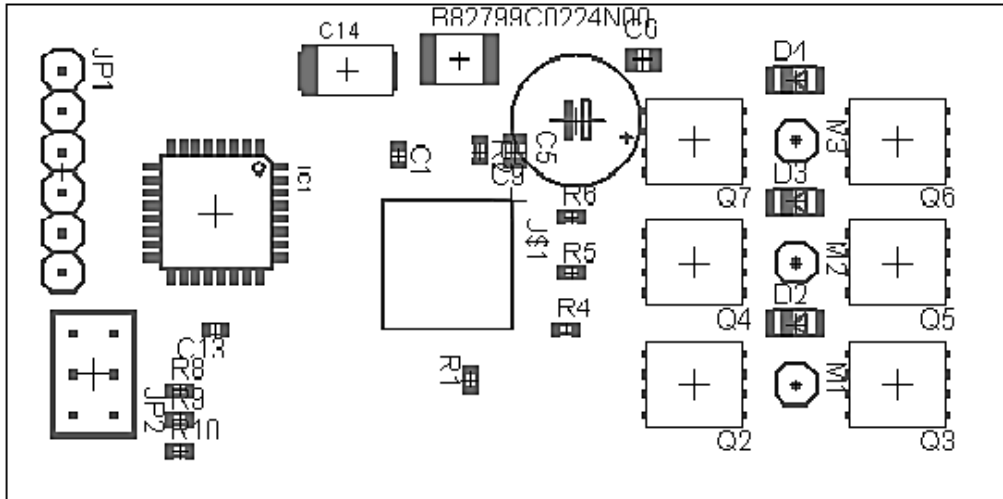
Při návrhu desky bylo kvůli požadavku nízké hmotnosti a velikosti použito pasivních součástek ve velikosti 0603. Jen některé kondenzátory pro požadované napětí a kapacitu museli být použity ve větších rozměrech. Jak se vidět z návrhů tak i s fotografií desky, celý design hyzdí 100uF 25V elektrolyt, který je největší součástkou na celé desce. Bohužel tantalová náhrada není dostupná nebo extrémně drahá.



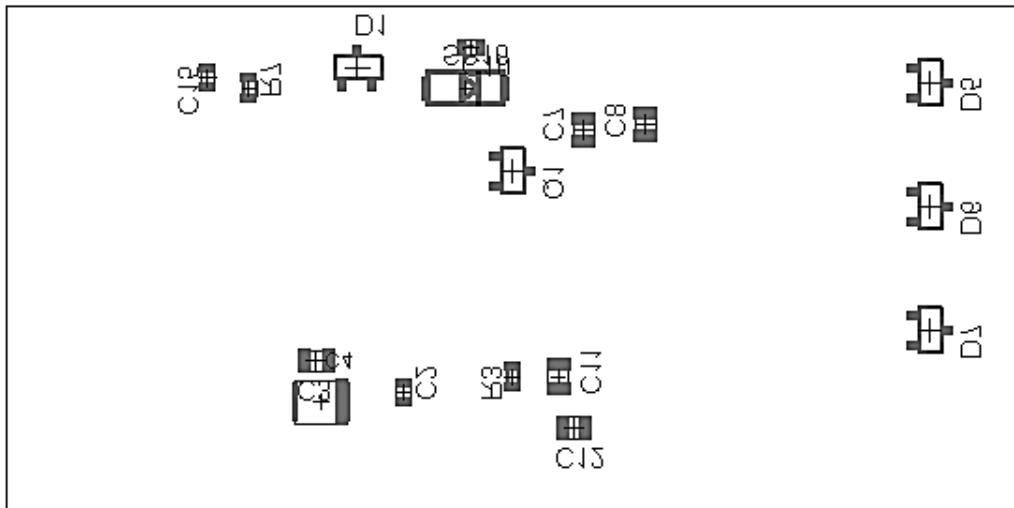
Obrázek 32 Spoje s rozlitou plochou - vrchní strana desky



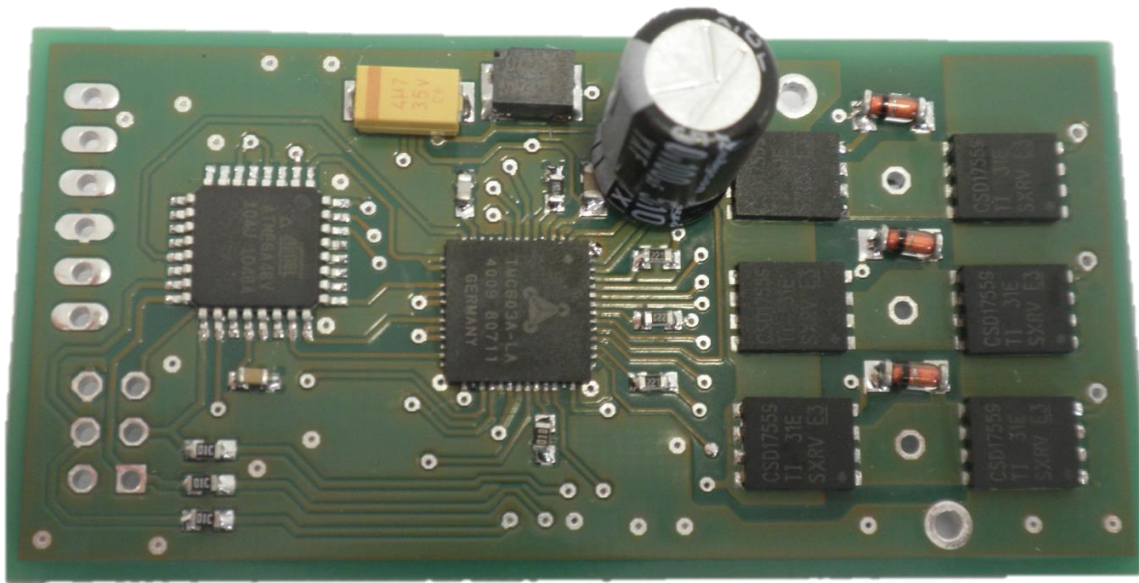
Obrázek 33 Spoje s rozlitou plochou - spodní strana desky



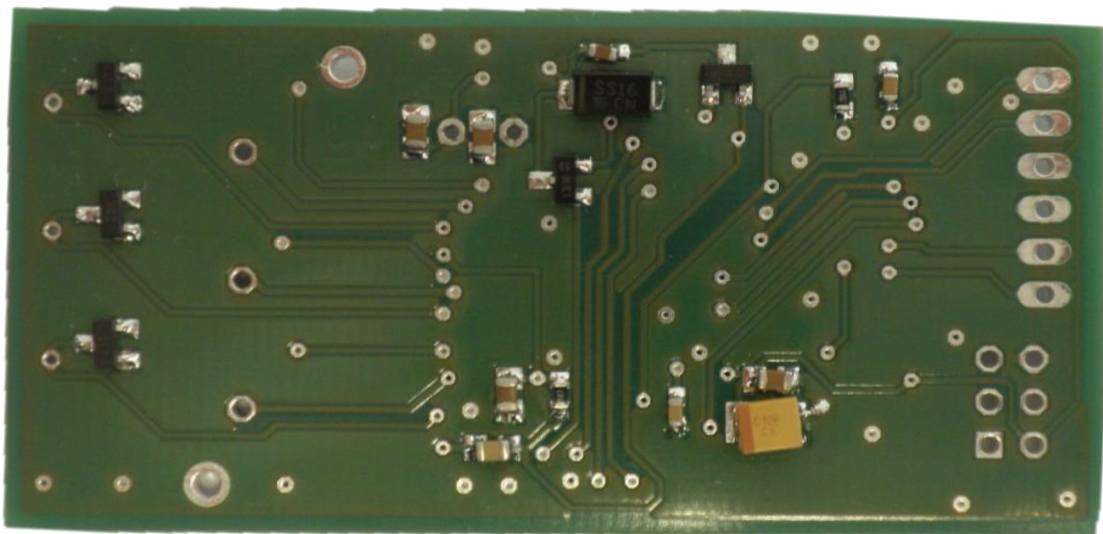
Obrázek 34 Osazovací plán - vrchní strana desky



Obrázek 35 Osazovací plán - spodní strana desky



Obrázek 36 FOTO osazené desky vrchní část



Obrázek 37 FOTO osazené desky vrchní část

2.6 Seznam použitých součástek

Tabulka 4 Použité součástky

Název součástky	Velikost	Označení v zapojení	Pouzdro	Popis	Objednávací číslo
ATmega 88	-	IC1		Mikroprocesor	ATMEGA88-20AU
TMC603	-	U\$1	QFN52	Motorový driver	TMC603A-LA
Tranzistor	30V	Q2-Q7		MOSFET	2289407
Cívka	0.22mH	B82799C0224N00	1812	Tlumící	1644930
Kondenzátor	470pF	C1	0603	Keramický	316672
Kondenzátor	1nF	C2	0603	Keramický	1833841
Kondenzátor	100nF	C3-C8	0805	Keramický	1740621
Kondenzátor	100uF	C9	E3	Elektrolit	1144634
Kondenzátor	220nF	C10	0603	Keramický	1327673
Kondenzátor	1uF	C11	0805	Keramický	1190117
Kondenzátor	220nF	C12	0805	Keramický	1658878
Kondenzátor	100nF	C13,C15	0603	Keramický	1740621
Kondenzátor	4.7uF	C14	SMC_C		1190137
Dioda	100V	D1	SOT23	Dual	2069339
Dioda	60V	D2, D3, D4	SOD80C	Schottky	9526773
Dioda	12V	D5, D6, D7	SOT23	Zener	1097185
Konektor	1x6	JP1	PINHEAD	Sériová linka	1766158
Konektor	2x3	JP2	PINHEAD	ISP	1767170
Tranzistor	-50V	Q1	SOT23	MOSFET	1510765
Odpor	100k Ω	R1	0603		1697402
Odpor	470k Ω	R2	0603		1469814
Odpor	470 Ω	R3	0603		1739131
Odpor	220 Ω	R4, R5, R6	0603		2008352
Odpor	14k Ω	R7	0603		1469755
Odpor	10k Ω	R8, R9, R10	0603		2078915

Závěr

Při psaní této práce jsem se seznámil s mnoha typy řízení BLDC motorů, které jsem prezentoval v mé bakalářské práci. Uvedl jsem, jaké existují možnosti řízení bezsnímačového zapojení. Další zajímavostí jsou pomocné obvody pro spínání BLDC motorů, protože při seznamování s tématem bakalářské práce jsem netušil, že existuje takový široký okruh použití BLDC motorů v sestavě s pomocnými spínači, při senzorové, ale i bezsenzorové podobě. Zjistil jsem, že v dnešní době není k dispozici žádný univerzální obvod pro řízení výkonových BLDC motorů.

Při tvorbě práce jsem hojně využil školních laboratoří, zejména při osazování DPS, při které jsem využil školní infra pájku, protože s mikropájkou by bezpečné zapájení všech kontaktů na miniaturním pouzdru TMC603 bylo opravdu složité. Vyrobená deska byla i přes použití minima součástek velká, proto pro další krok ve zmenšování bych zvolil menší pouzdro mikroprocesoru a při návrhu použil čtyřvrstvou desku.

Toto téma bakalářské práce mě zaujalo, protože moji přátelé létají s modely letadel, které tyto regulátory BLDC motorů dosahující 100 ampér obsahují, ovšem jejich cena je doposud vysoká a pohybující se okolo 2 tisíc korun. Výsledek mé práce obsahuje seznámení s možnostmi řízení a následné porovnání parametrů, výhod a nevýhod řízení BLDC motorů. Závěrem je konstrukce a naprogramování celého obvodu pro řízení BLDC motoru a náběhu rychlosti otáčení na předem definovanou hodnotu v mikroprocesoru.

Myslím si, že výsledek této práce je možno použít pro řízení jakýchkoliv BLDC motorů do proudu 100A. Výsledek by měl být po dalších specifitějších úpravách použitelný pro kteroukoliv aplikaci v běžném životě. Hlavní úprava by měla spočívat v programu, který je pro různé použití specifický.

Informace o možnostech řízení je k nalezení v anglické literatuře a internetových článcích. Stáří BLDC motoru se datuje k roku 1980. V té době, ale nebyl průmysl s polovodičovými součástkami v takovém rozsahu jako v dnešní době. Dalším vývojem prošly i permanentní magnety, které jsou zapotřebí na rotoru a jejich další vývoj pomůže k rozšíření výkonnějších a energeticky úspornějších BLDC motorů. Pro rozvoj v automobilovém průmyslu a ostatních odvětvích využívající elektrické pohonné jednotky.

Při tvorbě bakalářské práce jsem nejvíce čerpal z diskuzních návštěv u mého vedoucího práce pana Ing. Rozsívala a z jedné z prvních prací zaměřené na řízení BLDC motorů od Jianwen Shao z Virginie. Ukazuje zde složení, možnosti řízení a vlastnosti BLDC motorů.

Literatura

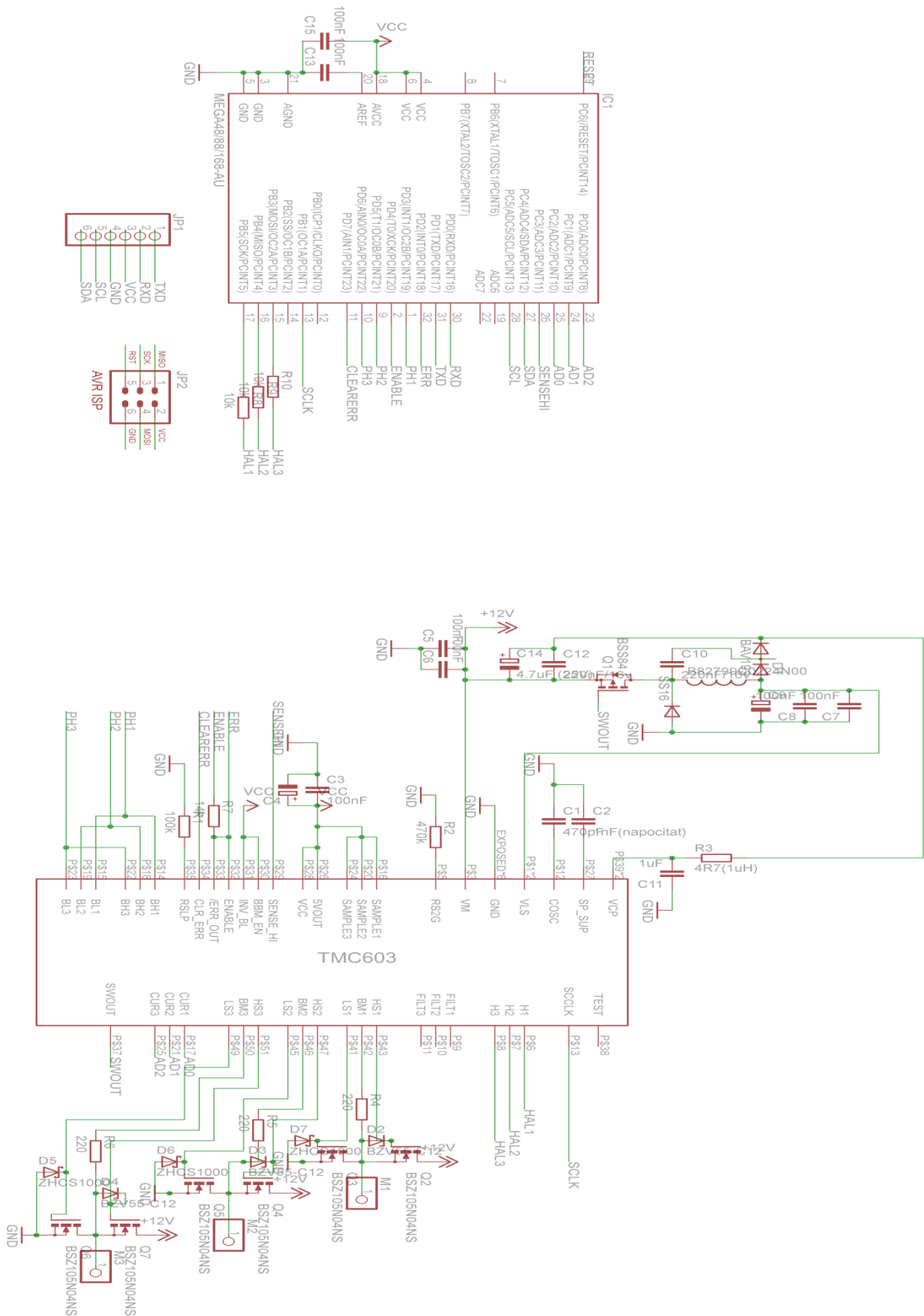
- [1] ZAPLATÍLEK, Luděk. *Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů* [online]. Pardubice, 2009 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34707/1/ZaplatilekL_Rizenibezkartacovych_PR-2009.pdf. Bakalářská. Univerzita Pardubice.
- [2] ATMEL: *ATmega48/88/168 Complete* [online]. 2011 [cit. 2013-02-12]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc2545.pdf>
- [3] SHAO, Jianwen. *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives* [online]. Blacksburg, Virginia, 2003 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>. Ročnicková. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.
- [4] ING. BROŽ, Václav. *Komutátorové motory do 400 W. Komutátorové motory do 400 W* [online]. 2006, č. 08 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31356
- [5] FOIT, Julius a Lubomír HUDEC. *Základy elektroniky*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 369 s. ISBN 978-80-01-04236-6.
- [6] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 2., přeprac. vyd. Praha: BEN, 2004, 663 s. ISBN 80-730-0148-9.
- [7] ING. LEPKA, Jaroslav a Pavel ING. GRASBLUM, PHD. CENTRUM PRO ROZVOJ VÝZKUMU POKROČILÝCH ŘÍDICÍCH A SENZORICKÝCH TECHNOLOGIÍ. *Použití mikroprocesorů pro řízení pohonů s BLDC motory* [online]. 2011 [cit. 2013-03-22]. Dostupné z: http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf
- [8] BakckEMF neboli ProtiEMSA, aneb jak hýbati robotem. In: KUBÁČ, Petr. *BakckEMF neboli ProtiEMSA, aneb jak hýbati robotem* [online]. 2011 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://petr-kubac.blog.cz/1102/bakckemf-neboli-protiemsa-aneb-jak-hybat-robotem>
- [9] *Activating Nitinol Wire with Pulse Width Modulated (PWM) electrical current* [online]. 2006-2013 [cit. 2013-04-12]. Dostupné z: <http://www.imagesco.com/articles/nitinol/07.html>
- [10] Power MOSFETs. In: *30V N-Channel NexFET™ Power MOSFETs* [online]. 2012 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1682184.pdf>
- [11] Grayův kód. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Gray%C5%AFv_k%C3%B3d

[12]**TRINAMIC. *TMC603A – DATASHEET*** [online]. 2010 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z:
http://www.trinamic.com/tmctechlibcd/integrated_circuits/TMC603/tmc603A_datasheet.pdf

[13]**RITEK S.R.O. *Ritek*** [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z:
<http://www.ritek.cz/odmerovani.htm>

Příloha

Celkové schéma zapojení



Přiložený DVD disk obsahuje složky:

- Bakalářskou práci v elektronické podobě s příponou PDF
- Nákres schématu a DPS
- Program pro mikroprocesor – zdrojový kód
- Datasheet TMC603 a ATmega88
- Fotky vyfocené při osazení