

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

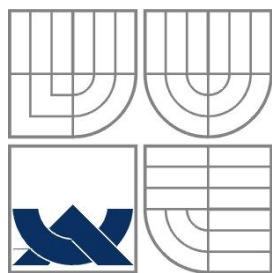
Řízení rychlosti otáček motoru

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

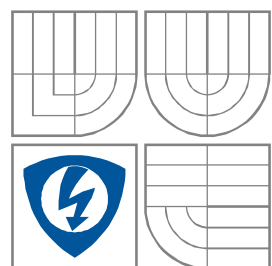
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VYČÍTAL JAROSLAV

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Řízení rychlosti otáček motoru

MOTOR SPEED CONTROL

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT
BACHELOR'S PROJECT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jaroslav Vyčítal

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing.Petr Marcoň

BRNO, 2012

ABSTRAKT

Práce pojednává o možnostech řízení BLDC a DC motorů. Dále obsahuje popis BLDC a DC motoru. Po popisu jednotlivých motorů, obsahuje práce navržené Moduly pro jednotlivé motory. Tyto moduly jsou více popsány v textu níže.

KLÍČOVÁ SLOVA

BLDC motor
stejnoseměrný motor
BEMF
Řízení otáček
bud'ič

ABSTRACT

Paper discusses the possibilities of control BLDC and DC motors. It also contains a description of BLDC and DC motors. After describing the individual motors, includes work proposed Moduls for individual motors. These modules are more described in the text below

KEYWORDS

brushless DC motor
DC motor.
Back ElectroMotive Force
Speed kontrol
driver

Vyčítal, J. *Řízení rychlosti otáček motoru* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav radioelektroniky, 2011. 10 s., 4 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: ing. Petr Marcoň, CSc.

Poděkování

Děkuji vedoucímu semestrálního projektu Ing. Petru Marcoňovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mého semestrálního projektu.

V Brně dne 24. května 2012

.....

podpis autora

Obsah

1 Úvod	10
2 Elektrické motory	10
2.1 DC motor	
2.1.1 Konstrukce stejnosměrného motoru	10
2.1.2 Funkce stejnosměrného motoru	11
2.1.3 Budicí obvody	12
2.2 BLDC motor	13
2.2.1 Konstrukční principy	15
2.2.2 Provozní principy	17
2.2.3. Porovnání BLDC motoru k jiným typům motorů	18
2.2.4 Řízení BLDC motoru	23
2.2.5 Zpětná vazba motoru	22
2.2.6 Bezsenzorová komutace	24
3 Moduly pro řízení DC a BLDC motorů	25
3.1 Zdroj	25
3.2 Řídící modul	26
3.3 Modul se stejnosměrným motorem	28
3.3.1 Obecné schéma	28
3.3.2. Návrh schématu modulu pro DC motor v programu Eagle	29
3.3.3 Návrh desky plošného spoje Modulu DC motoru	31
3.3.4 Fotografie vyrobené desky pro DC motor	32
3.4 Modul pro BLDC motor	33
3.4.1 Návrh schématu modulu pro BLDC motor v programu Eagle	33
3.4.2 Návrh desky plošného spoje pro BLDC motor	35
3.4.3 Fotografie vyrobené desky pro BLDC motor	36
4 Obslužný program-Vývojový diagram	37
5 Závěr	37

Seznam obrázků:

Obr.1. Složení stejnosměrného motoru	9
Obr.2. Princip stejnosměrného motoru	9
Obr.3. Jednokvadrantový budič	12
Obr.4. Dvoukvadrantový budič	12
Obr.5. Čtyřkvadrantový budič	13
Obr.6. BLDC motor v řezu	14
Obr.7. Rozložený BLDC motor	14
Obr.8. Elektronická konfigurace statoru	15
Obr.9. Rotor BLDC motoru	15
Obr.10. Příčný řez BLDC motoru	16
Obr.11. Typický řídicí systém Bezkartáčového dc motoru	16
Obr.12. Typické tři fáze proudové vlny pro BLDC motor	17
Obr.13. Charakteristika točivého momentu na rychlosti	18
Obr.14. Třífázový můstek	20
Obr.15. Rotace motoru od spínací sekvence Q1 do Q6	20
Obr.16. Rotační oblasti třífázového BLDC motoru	21
Obr.17. Změna rychlosti otáčení pomocí střídy PWM	23
Obr.18. Blokové schéma zapojení Modulů	25
Obr.19. zdroj AT	25
Obr.20. Řídicí modul	26
Obr.21. Zapojení řídicí desky	27
Obr.22. Stejnoseměrný motor	28
Obr.23. Vnitřní struktura obvodu L298	28

Obr.24. Zapojení jednoho můstku pro řízení otáček motoru	29
Obr.25. Úplné schéma zapojení modulu pro stejnosměrný motor	30
Obr.26. Deska plošného spoje modulu pro DC motor	31
Obr.27. Fotografie vyrobené desky pro DC motor	32
Obr.28. BLDC motor od firmy freescale	33
Obr.29. Úplné schéma zapojení modulu pro BLDC motor	34
Obr.30 Deska plošného spoje modulu pro BLDC motor	35
Obr.31. Fotografie vyrobené desky pro BLDC motor	36

Seznam tabulek:

Tab.1 Srovnání BLDC motoru a Kartáčového DC motoru	18
Tab.2 Porovnání BLDC motoru s indukčním motorem	19
Tab.3. spínací tabulka podle senzorových vstupů	20
Tab.4 Souhrn typických výkonnostních charakteristik systému	22
Tab.5 funkce obvodu L298	28
Tab.6.Parametry BLDC motoru	33

1 Úvod

Moje práce pojednává teoreticky o stejnosměrných motorech a možnostech jejich buzení. Poté o něco podrobněji o BLDC motorech o jejich vlastnostech a možnostech řízení. Vlastním předmětem mojí práce je návrh a odzkoušení funkce jednotlivých modulů pro dané motory.

2 Elektrické motory

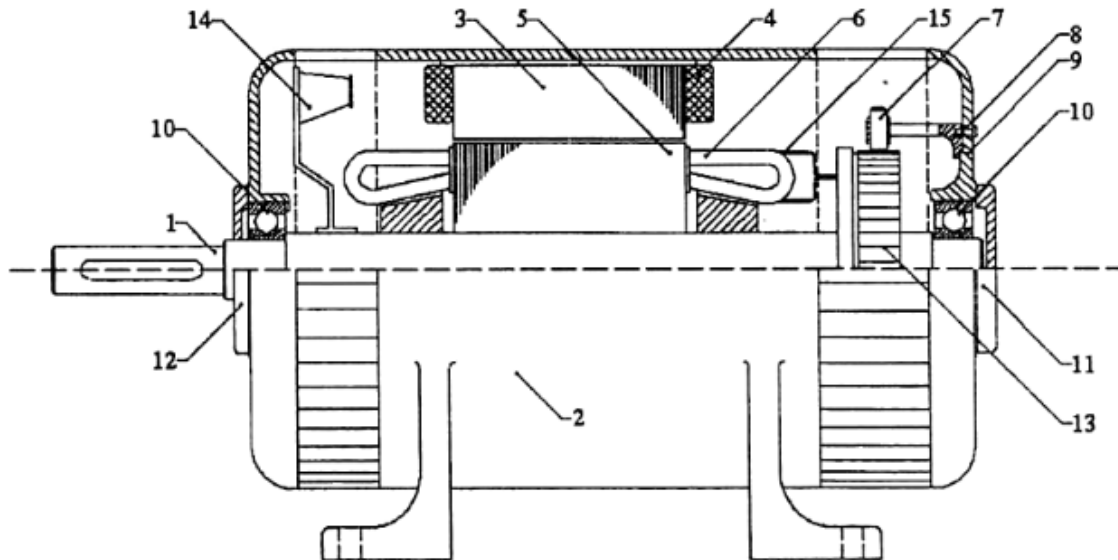
V následujících kapitolách bude pojednáno o stejnosměrných motorech a o jejich buzení a o BLDC motorech. V těchto kapitolách bude rozebrán princip a činnost jednotlivých typů motorů.

2.1 DC motor

2.1.1 Konstrukce stejnosměrného motoru

Stejnospměrný motor se skládá z rotoru a statoru, viz obr.1. Rotor je od statoru oddělen vzduchovou mezerou. Rotor neboli kotva má tvar válce a obsahuje komutátor, vinutí a hřidel. Komutátor tvoří měděné lamely, které jsou navzájem izolovány komutátorovým mikanitem. Na lamely komutátoru dosedají uhlíkové kartáče. Ty tvoří sběrací ústrojí, které zajišťuje převod proudu mezi vnějším obvodem a vinutím kotvy. Kartáče jsou ukotveny v držákových kartáčích, které jsou vyrobeny z mosazného plechu. Kartáče se dělí podle polohy na komutátoru na radiální, reakční a vlečné. U radiálního provedení je kartáč ve směru osy komutátoru. Používá se pro oba směry otáčení. Další provedení je reakční, kde je kartáč nakloněn o 60° ve směru točení. Tato poloha snižuje tření v kartáči. Nevýhodou je však, že lze použít jen pro jeden směr otáčení. Poslední provedení je vlečné, kde je kartáč natočen o 8° ve směru točení. Toto postavení kartáčů může být použito rovněž jen pro jeden směr otáčení. Avšak jeho výhodou je menší tření a lepší komutační vlastnosti. Vinutí rotoru je složeno z více cívek. Jejich vývody se vkládají do výřezu lamel. Kvůli odstředivé síle jsou cela cívek opatřeny bandáží z pocínovaného ocelového drátu. Vinutí je uloženo v drážkách. Protože v rotoru dochází ke střídavé magnetizaci, musí být jeho magnetický obvod složen z elektrotechnických plechu, které jsou od sebe rovněž odděleny izolací.

Stator tvoří magnetický obvod neboli jho. Ke statoru jsou připevněny hlavní a pomocné póly. Magnetický tok je veden mezi póly jha. Samotné jho může být vyrobeno z magneticky měkké oceli nebo z ocelových plechu, které jsou od sebe odděleny izolací. Pokud obvodem prochází stálý magnetický tok, tak se jako materiál volí magneticky měkká ocel. Avšak pokud obvodem prochází proměnné napětí, tak se musejí použít ocelové plechy. Pokud by se tak neučinilo, byly by velké ztráty v železe vířivými proudy. Potlačení účinku vířivých proudů se dosáhne rovněž zvýšením měrného odporu železa přidáním křemíku. Křemík zvyšuje tvrdost a křehkost plechu. Přidávají se asi 4 %. Na hlavních pólech je umístěno budící vinutí. Budící cívky jsou zapojeny do série. Hlavní póly jsou opatřeny pólovými nástavci, které zlepšují magnetickou indukci ve vzduchové mezeře. Hlavní póly jsou vyrobeny z plechu. Mezi hlavní póly jsou umístěny pomocné póly, které jsou naopak vyrobeny z masivního kovu. Jsou užší a nemají pólové nástavce. Vinutí pomocných pólu je zapojeno do série s vinutím kotvy. Pomocné póly se používají pro zlepšení vlastností motoru.

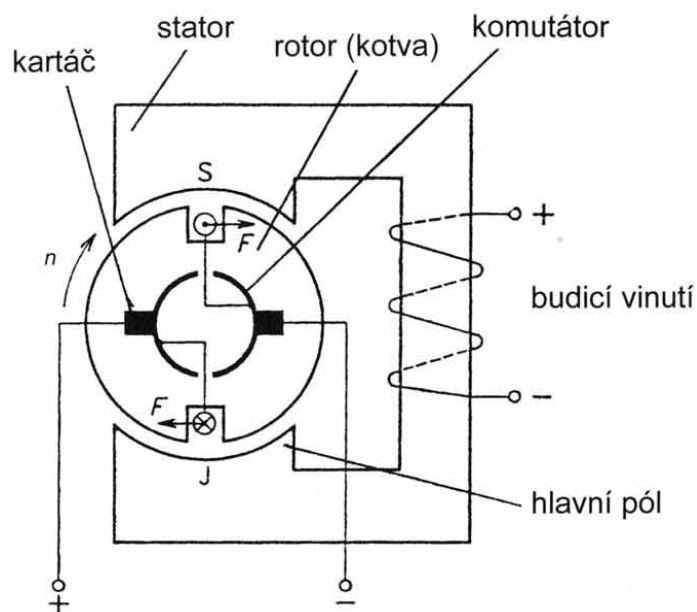


Obr.1. Složení stejnosměrného motoru, převzato z [2], Legenda: 1 – volný konec hřídele, 2 – statorová kostra, 3 – hlavní pól, 4 – budící vinutí, 5 – rotor, 6 – vinutí rotoru, 7 – držák kartáče, 8 – břežle, 9 – přední víko motoru, 10 – ložiska, 11 – víko předního ložiska, 12 – víko zadního ložiska, 13 – komutátor, 14 – ventilátor, 15 – vývod rotorového vinutí na komutátor

2.1.2 Funkce stejnosměrného motoru

Stejnsměrný motor je založen na principu působení sil na vodič protékáný proudem, který je umístěn v magnetickém poli. Na komutátor se přivede stejnosměrný proud. Tento proud začne protékat cívkou kotvy, na kterou, díky umístění v magnetickém poli, začne působit magnetická síla. Směr této síly se určuje pomocí Flemingova pravidla levé ruky.

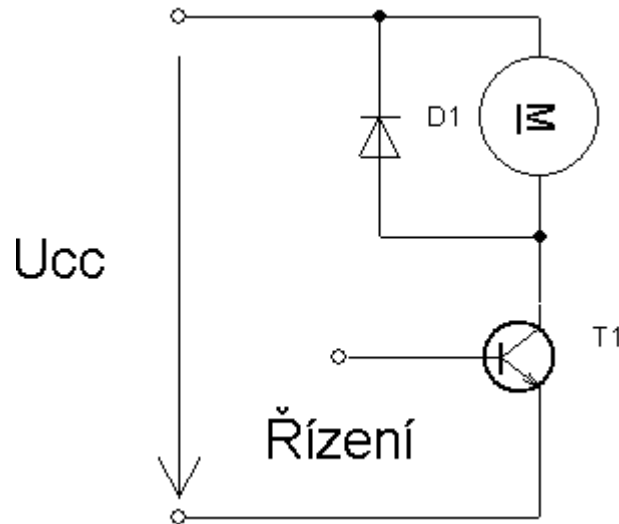
Aby se kotva otáčela o 360° , musí se smysl proudu, při přechodu jednoho pólu ke druhému, změnit. Tuto změnu proudu v rotorovém vinutí zajišťuje komutátor.



Obr.2. Princip stejnosměrného motoru

2.1.3 Budící obvody

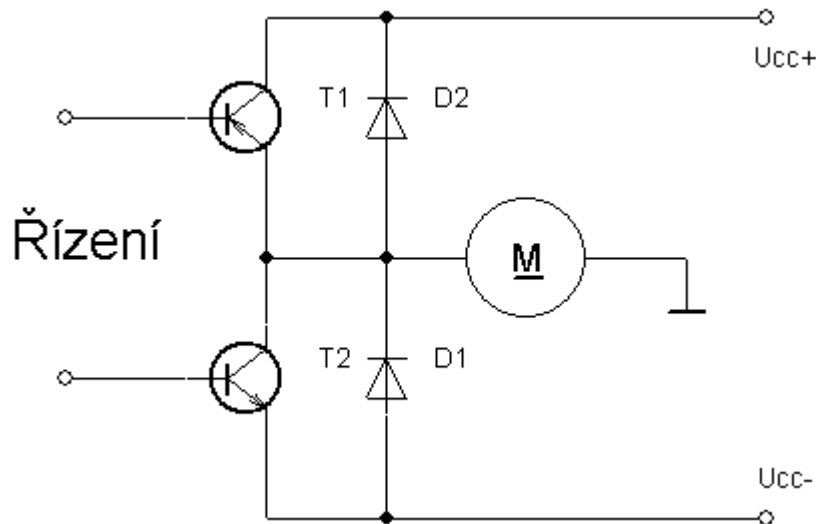
Jednokvadrantový proudový regulátor- lze využít pouze pro řízení otáček v jednom směru, viz. obr.3.



Obr.3. Jednokvadrantový budič

Bipolární napájení umožní změnu směru otáček

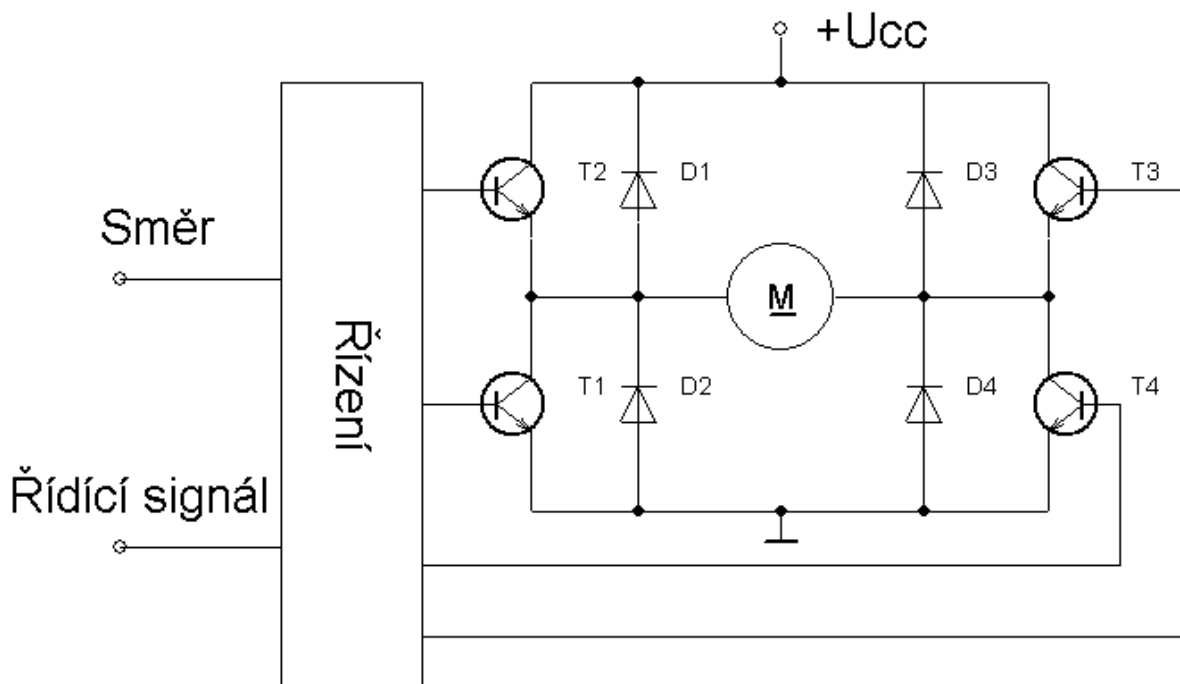
Při bipolárním napájení nutno zajistit inverzní spínání tranzistorů, viz obr.4.



Obr.4. Dvoukvadrantový budič

Úplný 4kvadrantový budič

Pomocí úplného čtyřkvadrantového budiče lze řídit otáčky oběma směry a stačí nám pouze jednoduchý zdroj, viz obr.5. Obvod funguje tak že spíná vždy dva tranzistory do kříže, protože jsou 4 lze řídit otáčení oběma směry. Jako řídicí signál lze použít signál PWM, tím můžeme řídit otáčky.



Obr.5. Čtyřkvadrantový budič

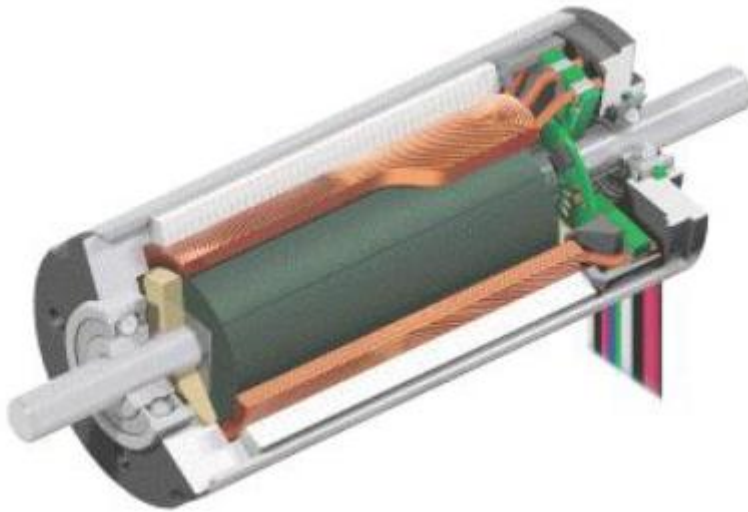
2.2 BLDC motor

Bezkartáčový DC motor je jedním z druhů synchronních motorů. To znamená, že magnetické pole generované státorem a magnetické pole generované rotací magnetů jsou na stejné frekvenci. Bezkartáčový DC motor se skládá z permanentních magnetů, zabudovaných na rotoru s lichoběžníkovým tvarem BEMF a satorovým vynutím (obrázek 6 a 7). U bezkartáčových DC se elektromagnety nepohybují. Místo toho rotují permanentní magnety a vinutí satoru je statické. Jak už název naznačuje, BLDC motory nevyužívají pro komutaci kartáčů, ale místo toho jsou komutovány elektronicky. Díky tomu dosahují vyšší spolehlivosti než klasické DC motory. Bezkartáčové motory obvykle využívají k řízení třífázový střídač. BLDC motory jsou napájeny spínaným zdrojem napětí na satorová vinutí motoru výkonovým zařízením, spínací sekvence je získána z pozice rotoru. Fázový proud BLDC motoru má typicky obdélníkový tvar. Proud je synchronizovaný zpětnou EMF k získání konstantního točivého momentu a konstantní rychlosti. Typicky v senzorovém módu jsou použity tři Hallovovy sondy pro detekci pozice rotoru a komutace je založena na těchto impulsích. BLDC motory jsou na jednofázové, dvoufázové a třífázové konfiguraci. To odpovídá typu satoru, který má stejný počet vinutí. Třífázové motory jsou nejvíce oblíbené a hojně využívány. Tato práce se zaměřuje pouze na třífázové motory. BLDC motory mají mnoho výhod oproti kartáčovým DC motorům a indukčním motorům. Některé z nich jsou:

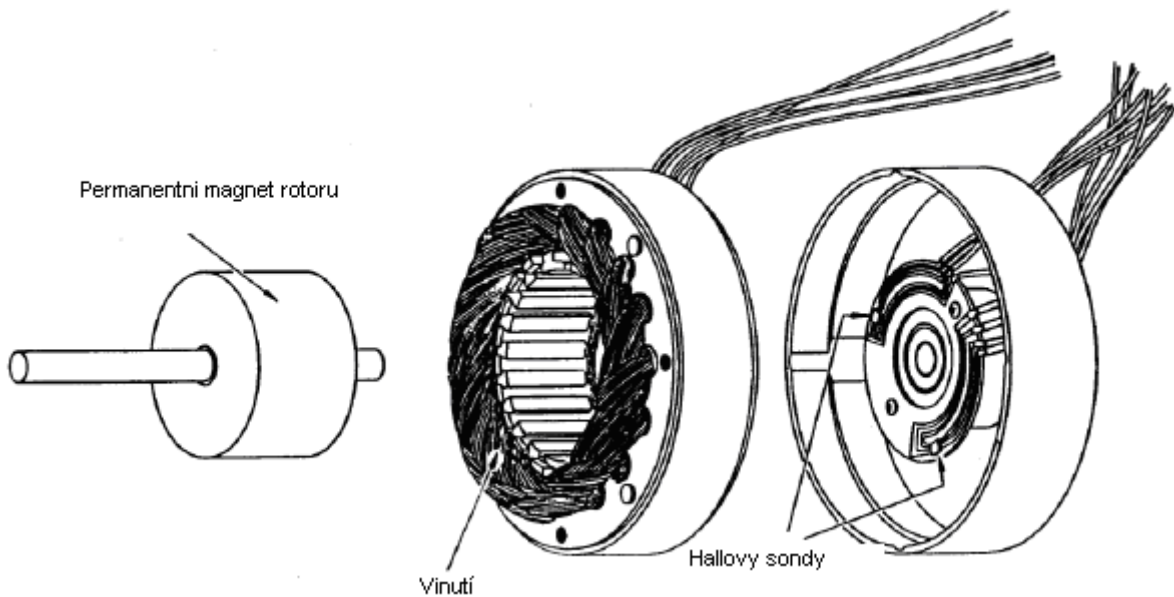
- lepší charakteristika točivého momentu k rychlosti
- vysoká dynamická reakce
- vysoká účinnost
- dlouhá životnost
- provoz bez rušení

-vyšší rozsah rychlosti

Navíc poměr točivého momentu k velikosti motoru je vyšší, což je užitečné v aplikacích, kde jsou velikost a hmotnost rozhodujícími faktory. Rychlost a točivý moment motoru je závislý na síle magnetického pole generovaného buzeným vinutím motoru, který závisí na protékajícím proudu. BLDC motory jsou vhodnější k řízení a regulaci.



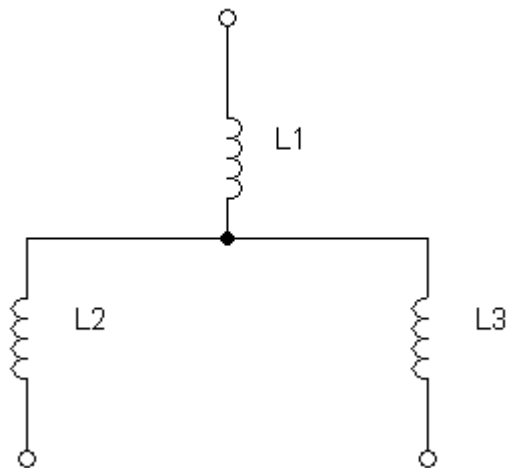
Obr.6. BLDC motor v řezu, převzato z [5]



Obr.7. Rozložený BLDC motor, převzato z [1]

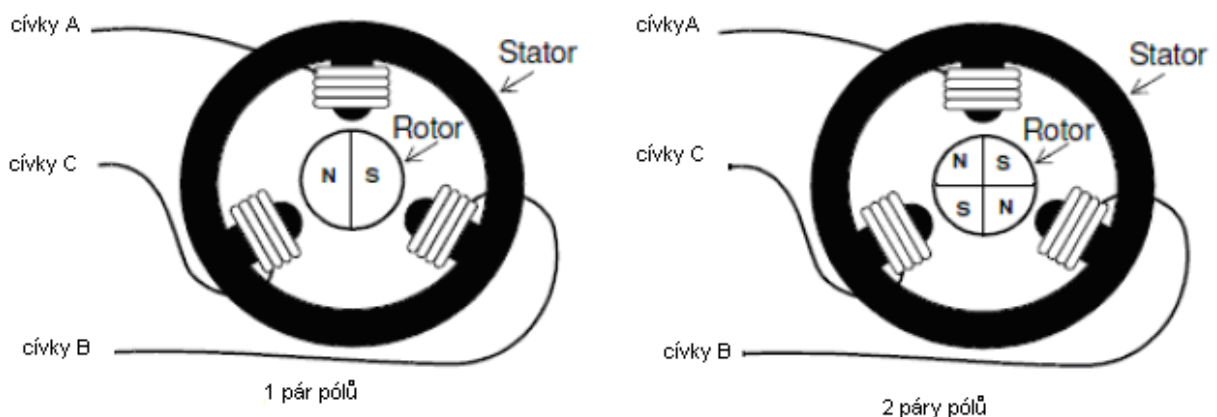
2.2.1 Konstrukční principy

Stator-základ třífázového BLDC motoru jsou tři statorová vinutí. U většiny motorů je počet vinutí replikován. Mají menší zvlnění momentu. Vinutí motoru může být zapojeno do hvězdy (Y zapojení) nebo do trojúhelníku (Δ zapojení). Ať už je zapojení jakékoli, je ideální mít přístup k nulovému bodu N, abychom byli schopni měřit BEMF. Některé motory umožňují přístup pomocí přidaného vodiče. Obrázek 8 ukazuje náhradní schéma statoru. Skládá se ze tří vinutí. Každé obsahuje tři prvky v sérii indukci, odpor a zpětnou elektromotorickou sílu.



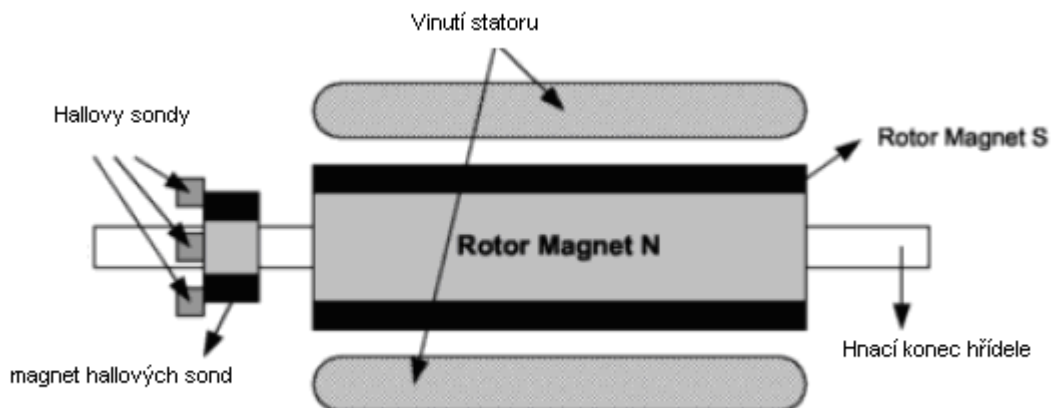
Obr.8. Elektronická konfigurace statoru

Rotor -rotor BLDC motoru obsahuje sudý počet silných permanentních magnetů (obrázek 9). V posledním desetiletí došlo k pozoruhodnému posunu ve vývoji vysoce kvalitních magnetů. Momentálně u BLDC motorů jsou široce používány vysoce výkonové NdFeB (neodym-iron –boron) magnety. Počet magnetických pólů v rotoru ovlivňuje velikost kroku a zvlnění točivého momentu motoru. Vyšším počtem pólů zmenšuje krok a snižuje zvlnění momentu. Permanentní magnety jsou od 1 do 5 párů pólů. V některých případech je počet pólů až 8.



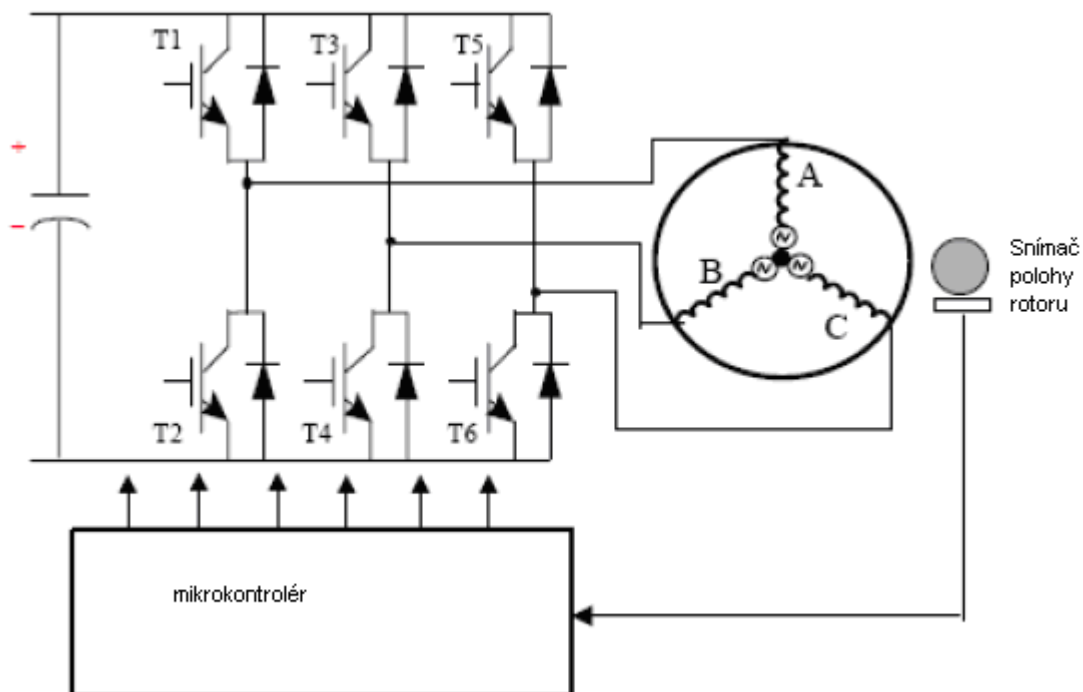
Obr.9. Rotor BLDC motoru, převzato z [4]

Hallový sondy -BLDC motor je běžně ovládán třífázovým střídačem, který vyžaduje poziční senzory rotoru pro správnou komutační sekvenci k řízení střídače. Typický řídicí systém je ukázán na obrázku 10. Většina BLDC motorů obsahuje tři Hallové sondy, které jsou zabudované na statoru. Kdykoliv magnetický pól rotoru projde blízko Hallových sond, získáme signál o nízké nebo vysoké napěťové úrovni, což indikuje S nebo J magnetický pól prošlý blízko sond. Kombinací tří signálů Hallových sond lze určit přesný sled sekvencí.

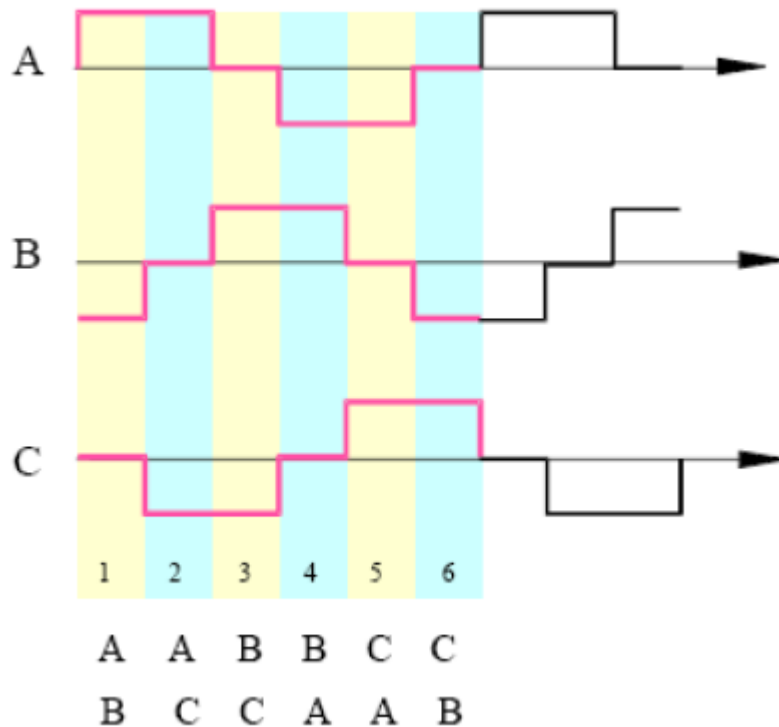


Obr.10. Příčný řez BLDC motoru, převzato z [5]

Uložení Hallových sond do statoru je složitý proces, neboť každá nesouosost s ohledem na magnety rotoru bude vytvářet chybu v určení polohy rotoru. Pro zjednodušení procesu umístění Hallových senzorů na stator mají některé motory kromě hlavních magnetů rotoru přidání magnety Hallových sond (obrázek 10). Jedná se o zmenšenou repliku rotoru. Proto, když se rotor otáčí, přidání magnety poskytují stejný účinek jako hlavní magnety. To umožňuje uživateli nastavit kompletní montáž Hallových senzorů, aby se dosáhlo nejlepších výsledků.



Obr.11. Typický řídicí systém Bezkartáčového dc motoru, převzato z [8]

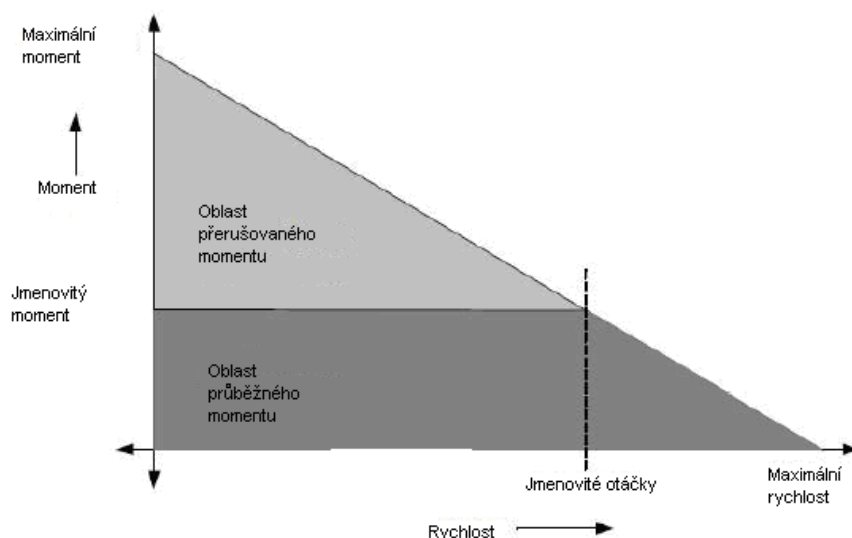


Obr.12. Typické tři fáze proudové vlny pro BLDC motor, převzato z [8]

2.2.2 Provozní principy

Charakteristika točivého momentu/rychlosti

Obrázek 13 ukazuje příklad charakteristiky točivého momentu / rychlosti. Existují dva parametry točivého momentu používané k definování BLDC motoru. Vrchol točivého momentu TP a jmenovitý točivý moment TR. Při trvalém provozu může být motor zatížen v závislosti na jmenovitém momentu. U BLDC motoru točivý moment zůstává konstantní do jmenovitých otáček. Tento motor může být provozován až do maximální rychlosti, která může být až 150 % jmenovitých otáček, ale točivý moment začíná klesat. Aplikace, kde často nastává spouštění, vypínání a časté zvraty rotace, požadují větší točivý moment než jmenovitý. Tento požadavek přichází na krátký čas, zejména v případech, kdy motor startuje z klidu a během akceleraace. Během tohoto času je požadován vysoký točivý moment k překonání setrvačnosti samotného rotoru. Tento motor může podávat vyšší točivý moment až k vrcholu, jak vyplývá z rychlostní charakteristiky točivého momentu (obrázek 13).



Obr.13. Charakteristika točivého momentu na rychlosti, převzato z[6]

2.2.3. Porovnání BLDC motoru k jiným typům motorů

Ve srovnání s kartáčovým DC motorem a indukčním motorem, BLDC motory mají mnoho výhod a několik nevýhod, srovnání BLDC motoru a DC motoru je v tab.1, srovnání s indukčním motorem pak v tab.2.. Bezkartáčové motory vyžadují méně údržby a mají delší životnost v porovnání s kartáčovými motory. BLDC motory produkují vyšší výstupní výkon oproti kartáčovým a indukčním motorům. Protože rotor je vytvořen z permanentních magnetů, setrvačnost motoru je nižší v porovnání s jinými typy motorů. To zlepšuje akcelerační charakteristiku a zkrácení provozního cyklu. Lineární charakteristika rychlosti/točivého momentu, vytváří předvídatelnou regulaci rychlosti.

Tab.1 Srovnání BLDC motoru a Kartáčového DC motoru

Funkce	BLDC motor	Kartáčový DC motor
Komutace	Elektronická komutace	Kartáčová komutace
Údržba	Méně nutná	Vyžadována periodická
Životnost	Delší	Kratší
Rychlost/točivý moment charakteristika	Umožňuje provoz na všech rychlostech	Při vyšších rychlostech, kartáč zvyšuje tření, čímž se snižuje užitečný moment
Setrvačnost motoru	Nízké protože má permanentní magnety na rotoru. To snižuje dynamické zpoždění	Vyšší setrvačnost rotoru, která limituje dynamickou charakteristiku
Rychlostní rozsah	Vyšší	Nižší, mechanické omezení kartáči
Generované rušení	Nízké	Oblouky na kartáčích generují rušení, způsobují EMI v blízkosti zařízení
Náklady	Vyšší, permanentní magnety zvyšují cenu	Nízká
Řízení	Složitě a nákladné	Jednoduché a levné
Požadavky řízení	Požaduje mikroprocesor	Pro konstantní rychlost mikroprocesor není vyžadován
Efektivita	Vysoká	Střední

. Bezkartáčové motory jsou ideální pro aplikace s omezeným přístupem, kde je servis obtížný. BLDC motory pracují mnohem tišeji než kartáčové DC motory, snižují elektromagnetické rušení (EMI). Nízkonapěťové modely jsou ideální pro bateriový provoz, přenosné zařízení nebo lékařské aplikace.

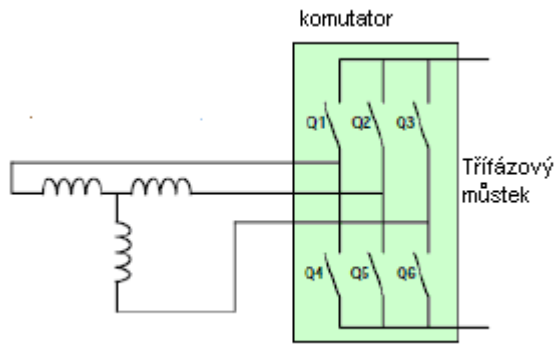
Tab.2 Porovnání BLDC motoru s indukčním motorem

Funkce	BLDC motor	AC indukční motor
Rychlost/Točivý moment charakteristika	Plochá umožňuje provoz na všech rychlostech při jmenovité zátěži	Nelineární, nižší točivý moment při nižších rychlostech
Výstupní výkon/velikosti	Vysoká, vzhledem k permanentním magnetům rotoru, dosaženo menších rozměrů pro daný výstupní výkon	Střední, vzhledem k tomu, že rotor i stator mají vinutí. Výstupní výkon k rozměrům je menší než v případě BLDC
Setrvačnost rotoru	Nízká, lepší dynamická charakteristika	Vysoká, špatná dynamická charakteristika
Startovací proud	Není potřebný žádný speciální startér	Běžně používá hvězda, trojúhelník startér
Požadavky řízení	Vyžaduje mikroprocesor	Mikroprocesor pro konstantní rychlost není požadován, je potřebný jen tehdy, pokud žádáme proměnnou rychlost

2.2.4 Řízení BLDC motoru

Fázová komutace

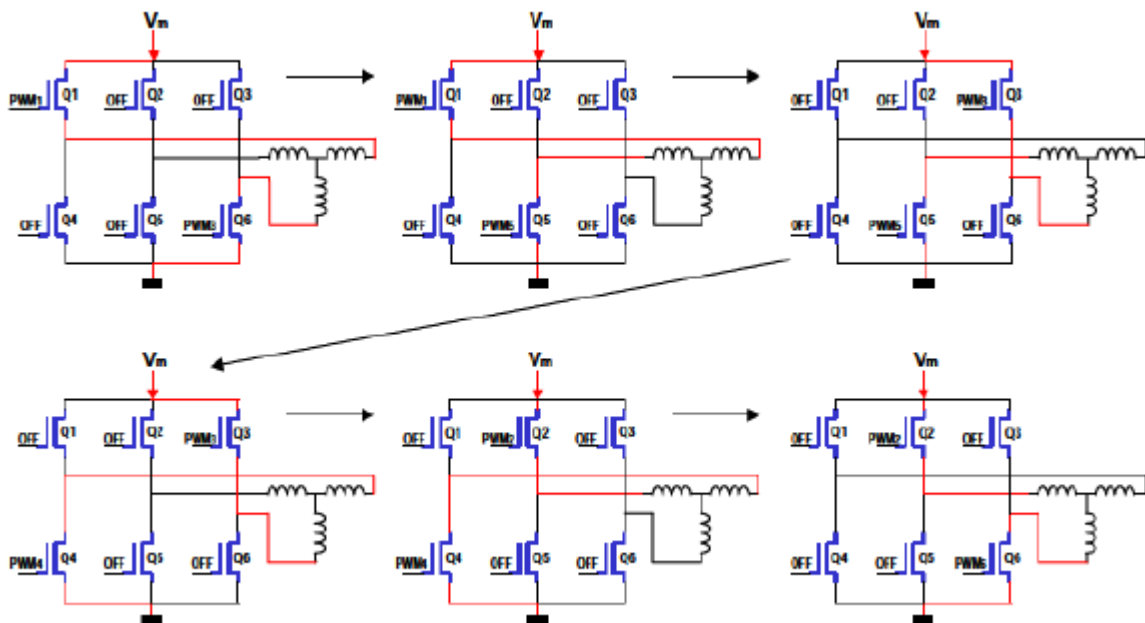
Komutace je stěžejní funkce všech DC motorů. U běžných DC motorů komutační funkce je vykonávána komutačními kartáči. Ty fungují jako poziční senzory i spínače. Mechanický komutátor má jasné nevýhody. Překonat tyto nevýhody byl hlavní důvod vývoje BLDC motoru. BLDC motor je poháněn napěťovými tahy spojenými s danou pozicí rotoru. Tyto napěťové tahy musí být správně aplikovány na aktivní fáze třífázového systému. Typický bezkartáčový motor je řízen třífázovým střídačem, který je nazýván šesti kroková komutace. Vodivý interval pro každou fázi je 120 elektronických stupňů. Komutační fázová sekvence je Q1Q6-Q1Q5-Q3Q5-Q3Q4-Q2Q4-Q2Q6, viz tab.3., následně se kroky periodicky opakují. Každý komutační stav je nazýván jeden komutační krok. Proto pouze dvěma fázemi protéká proud v kterýkoliv okamžik. Zbylá fáze je plovoucí. Za účelem získání maximálního točivého momentu dochází ke komutaci každých 60° tak, aby proud byl ve fázi se zpětnou EMF. Komutační časování je získáno z pozice rotoru, které může být detekováno Hallovými sondami nebo odhadnuto z parametrů motoru. Např. zpětné EMF na plovoucím vinutí motoru pro bezsenzorový systém. Obrázky 14,15 a tab.3. ukazují vztah mezi vstupy z Hallových sond a požadovanými aktivními vinutími. Jednotlivá vinutí se postupně přepínají dle tabulky 3. tím je zajištěna rotace rotoru.



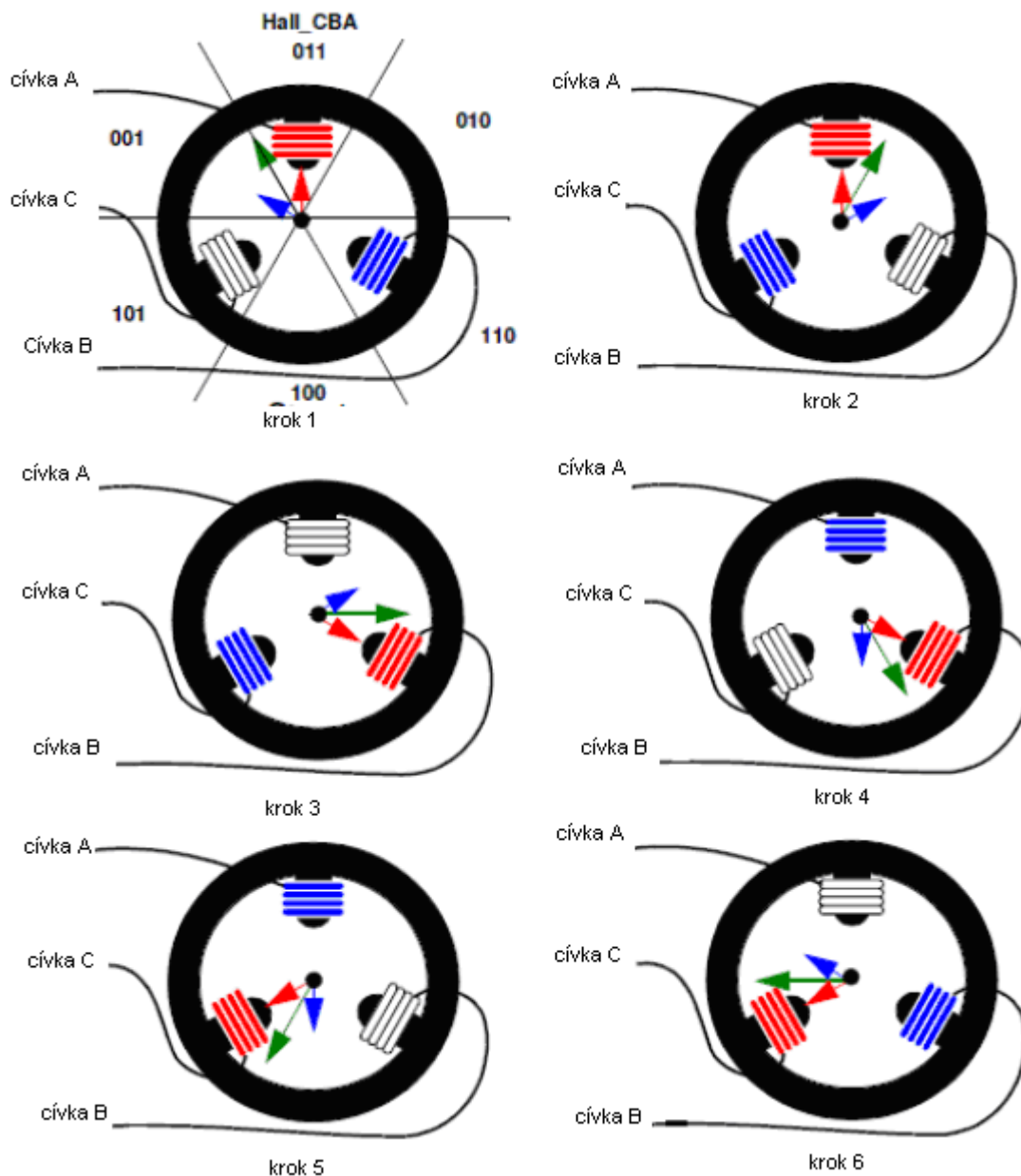
Obr.14. Třífázový můstek

Tab.3. spínací tabulka podle sensorových vstupů

kód hallova snímače	fáze	aktivní spínače
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)



Obr.15. Rotace motoru od spínací sekvence Q1 do Q6, převzato z[5]



Obr.16 Rotační oblasti třífázového BLDC motoru, převzato z[4]

Technika pro detekci rotoru

Technika pro detekci rotoru je pečlivě vybírána s přihlédnutím k faktorům, jako jsou výkonové požadavky, cena, dostupné místo na plášti a fyzikální prostředí. Výkonnost BLDC motorů, obzvláště při spuštění, kriticky závisí na povaze dostupné poziční informací. Tabulka 2.1 poskytuje souhrn typických výkonových charakteristik systému, které jsou komerčně dostupné. Vysoce rozlišovací hřídelový enkodér nabízí nejlepší výkon v celém rozsahu rychlosti. Stěžejní důvod je, že enkodér dává absolutní pozici rotoru pro jakoukoli rychlost a jeho rozlišení je dostatečně vysoké. Enkodér s vysokým rozlišením však významně zvyšuje cenu celého systému a je použit jen v případech, kdy pro to existuje významný důvod. Nízko rozlišovací snímače polohy, jako jsou Hallovy sondy, poskytují přijatelný kompromis mezi výkonem a cenou. Signály z těchto senzorů poskytují přesné komutační okamžiky pro střídač o jakékoli rychlosti. Toto není možné pro přesný odhad nízké rychlosti, kvůli nadměrnému času mezi následujícími změnami stavů sensorových výstupů. Z tohoto důvodu closed

smyčka regulace rychlosti je obvykle potlačena pro nízké rychlosti. U mnoha aplikací toto není problém, protože přesná regulace pro nízké rychlosti není vyžadována.

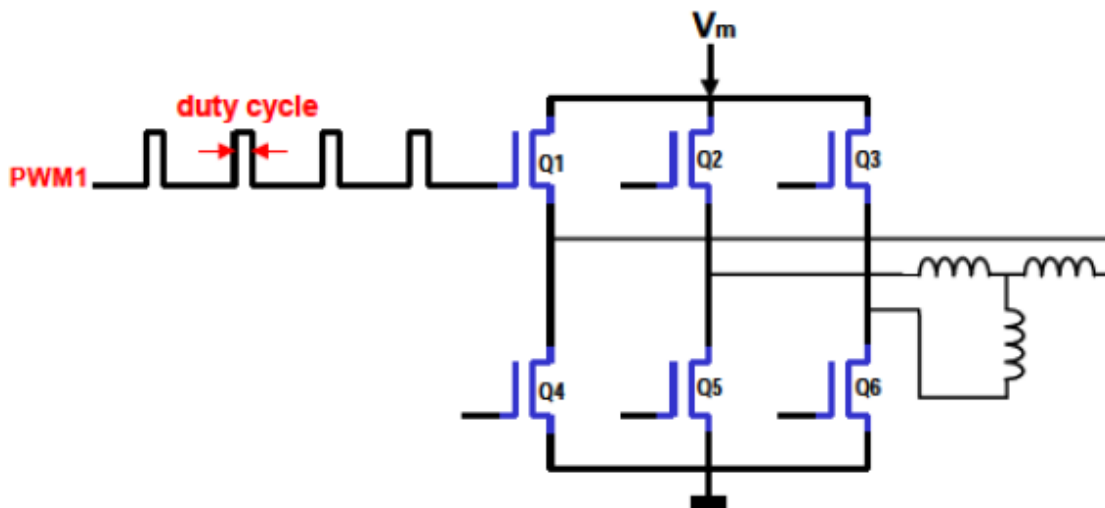
Tyto senzory zvětšují cenu, velikost motoru a vyžadují mechanickou úpravu k uložení senzorů. Senzory, zvláště pak Hallovy sondy jsou teplotně citlivé, omezují provoz motoru okolo 75°C. Tím mohou snížit spolehlivost systému. U některých aplikací nemusí být možné zabudovat všechny senzory motoru. Proto v posledních letech získává velký význam bezsenzorové řízení BLDC motoru. Velice populární bezsenzorová metoda je založena na detekci průchodu nulou zpětných EMF signálů. Je to obvykle jednoduchý vztah mezi okamžikem průchodu nulou BEMF a následujícím vhodným komutačním okamžikem. Okamžiky průchodu nulou zpětných EMF signálů jsou také použity pro odhad rychlosti. Nicméně, na rozdíl od Hallových senzorů, které poskytují poziční informaci o jakékoli rychlosti, zpětná EMF technika je nepoužitelná pro nízké rychlosti. Zpětné EMF signály mají příliš nízkou amplitudu. Pro nízké rychlosti BLDC motor se zpětnou EMF technikou, musí pracovat v rámci open smyčky regulace rychlosti a bez požadavku na poziční informaci. Výkon během spuštění, s použitím Hallových sond, je z tohoto důvodu vyšší v porovnání s výkonem zpětné EMF techniky.

Tab.4 Souhrn typických výkonnostních charakteristik systému

Zdroj informace o pozici	Výkonnost rychlostní regulace	Spouštěcí výkon	Relativní cena
Vysoko rozlišovací hřídelový enkodér	Výborný v celém rozsahu, z klidové do jmenovité rychlosti	Zarovnaný stav není nutný; Zaručená absence zpětné rotace spuštění; Klidný start	Vysoká; Vyžaduje přídavné místo a vodiče;
Nízko rozlišovací senzor; např. Hallova sonda	Dobrá výkonnost closed smyčka typicky od 5% jmenovité hodnoty; Provoz Closed smyčky není možný pod touto rychlostí	Zarovnaný stav není nutný; Zaručená absence zpětné rotace spuštění; Klidný start	Střední; Vyžaduje vodiče pro připojení se senzory
Bezsenzorová	Dobrá výkonnost Closed smyčky typicky od 5% jmenovité hodnoty; Provoz Closed smyčky není možný pod touto rychlostí	Vyžaduje zarovnaný stav před spuštěním; Nemůže garantovat absenci spouštěcí zpětné rotace; Obtížně zajistitelné hladké spuštění	Nízká

Řízení rychlosti

Zjednodušeně. Různým napájecím napětím lze ovládat rychlost motoru. Pokud použijeme PWM výstupy k řízení šesti spínačů třífázového můstku, změny napětí na motoru lze jednoduše dosáhnout změnou střídy PWM signálu (obrázek 17).



Obr.17 Změna rychlosti otáčení pomocí střídavy PWM, převzato z [5]

2.2.5 Zpětná vazba motoru

Proudové snímání

Měření proudu na BLDC motoru může být provedeno pomocí proudového snímání na odporu mezi MOSFETy a zemí. Nízké napětí na proudovém snímacím odporu je filtrováno, zesíleno a přivedeno na vstup ADC mikroprocesoru. Měření proudu motorem se často používá jako ochrana. Jestliže motor je v zablockované pozici, proud se výrazně zvýší. Vzhledem k mimořádnému zvýšení proudu, hodnota ADC dosáhne úrovně proudového omezení, která způsobí vypnutí systému, čímž se zabrání poškození.

Měření RPM

Pro řízení rychlosti na closed smyčce, musí být známá skutečná rychlost. Signály z Hallových sond jsou vhodné k zapojení na vstupní piny mikroprocesoru, které lze snadno použít pro přesné měření rychlosti motoru (RPM). Jedním možným způsobem je připojit signály Hallových sond na piny externího přerušení mikroprocesoru. To má za následek přerušení po každém otočení o úhel 60° elektronické komutace. Pouhým počítáním počtu přerušení v určitém přesném čase (například v 1 sekundě), lze snadno vypočítat přesnou rychlost motoru. Další možností je připojit signály sond na vstup Timer Capture přerušení mikroprocesoru. V tomto případě přesný čas je měřen mezi každou změnou rotační fáze.

BEMF

Na každém vinutí rotací permanentního magnetu se indukují střídavé napětí o amplitudě úměrné úhlové rychlosti. Předpokládaným tvarem tohoto napětí je lichoběžníkový průběh. BEMF konstanta k_e je udávána na plášti motoru v jednotkách $*RPM/V+$. Velikost této konstanty je běžné v rozmezích od 200 do 4000 [RPM/V].

$$V_{RPM} = V_C * k_e [RPM] \quad (1)$$

Rovnice 1 Kde V_C je napájecí napětí a v_{RPM} počet otáček za minutu.

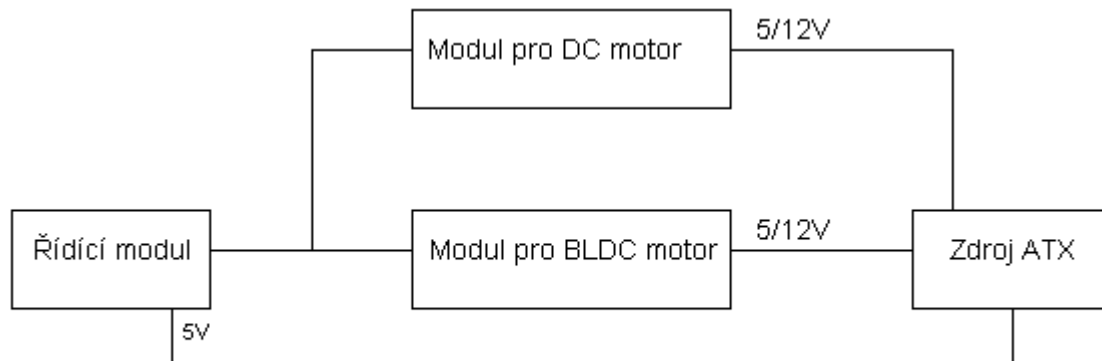
2.2.6 Bezsenszorová komutace

V zásadě lze nelézt v literatuře dva typy bezsenzorové řídicí techniky. První typ je poziční snímání s použitím zpětné EMF na motoru a druhý poziční odhad s pomocí parametru motoru, terminálového napětí a proudu. Druhý typ schématu obvykle potřebuje DSP (digitální signálový procesor) k složitým výpočtům, přičemž cena systému je relativně vyšší. Snímaný typ BEMF bezsenzorového schématu je často využívaná metoda, kterou se budeme zabývat. Erdman originálně navrhl metodu snímací BEMF, postavené na virtuálním neutrálním bodu, která je teoreticky na stejném potenciálu jako střed motoru zapojeného do hvězdy. Snímá rozdíl mezi virtuálním neutrálním napětím a napětím na plovoucím terminálu. Nicméně pokud používáme spínané řízení, neutrální bod není ustálený. Neutrální potenciál se pohybuje z nuly k blízkosti napájecího napětí, vytváří velké společné napětí, protože neutrální potenciál je referenční. PWM signál je superponovaný na neutrální napětí, indukuje se velké množství elektrického rušení na snímaný signál. Pro správné snímání zpětné EMF je vyžadován malý útlum a filtrace. Útlum je vyžadován k úpravě signálu na dovolený rozsah napětí pro snímací obvod. A dolnoproustný filtr slouží k zeslabení vysokofrekvenčního šumu. Nežádoucí následek filtrování je zpoždění signálu. Výsledkem je špatný poměr signálu k šumu na velmi nízkém signálu. Zvláště při spouštění. Následkem toho, metoda má úzký rozsah rychlosti a špatné spouštěcí vlastnosti. K redukci šumu, způsobeného spínáním, BEMF je zavedeno třetí harmonické napětí. Integrační přístup má výhodu, že redukuje citlivost na šum způsobený spínáním. Ovšem stále máme problém s vysokým společným napětím na neutrálním bodu. Implementace této metody je komplikovaná a drahá, chod při nízkých otáčkách je stále problém.

Jen-Marie Bourgeois navrhl novou myšlenku detekční metody zpětné EMF, která nevyžaduje neutrální napětí motoru. Skutečné zpětné EMF může být detekována přímo z terminálových napětí při vhodném výběru PWM a snímací strategie. PWM signály jsou použity pouze na horní straně spínačů a zpětná EMF je detekována při nečinném PWM. Výsledný zpětný signál není oslaben ani filtrován, poskytuje signál s velmi dobrým poměrem signálu k šumu. Proto tato bezsenzorová technika řízení BLDC poskytuje mnohem širší rozsah rychlosti než je tomu u tradičních přístupů.

3. Moduly pro řízení DC a BLDC motorů

Moduly pro jednotlivé motory jsou zapojeny dle obr.18. Popis jednotlivých modulů bude rozebrán dále.



Obr.18. Blokové schéma zapojení Modulů

3.1 Zdroj

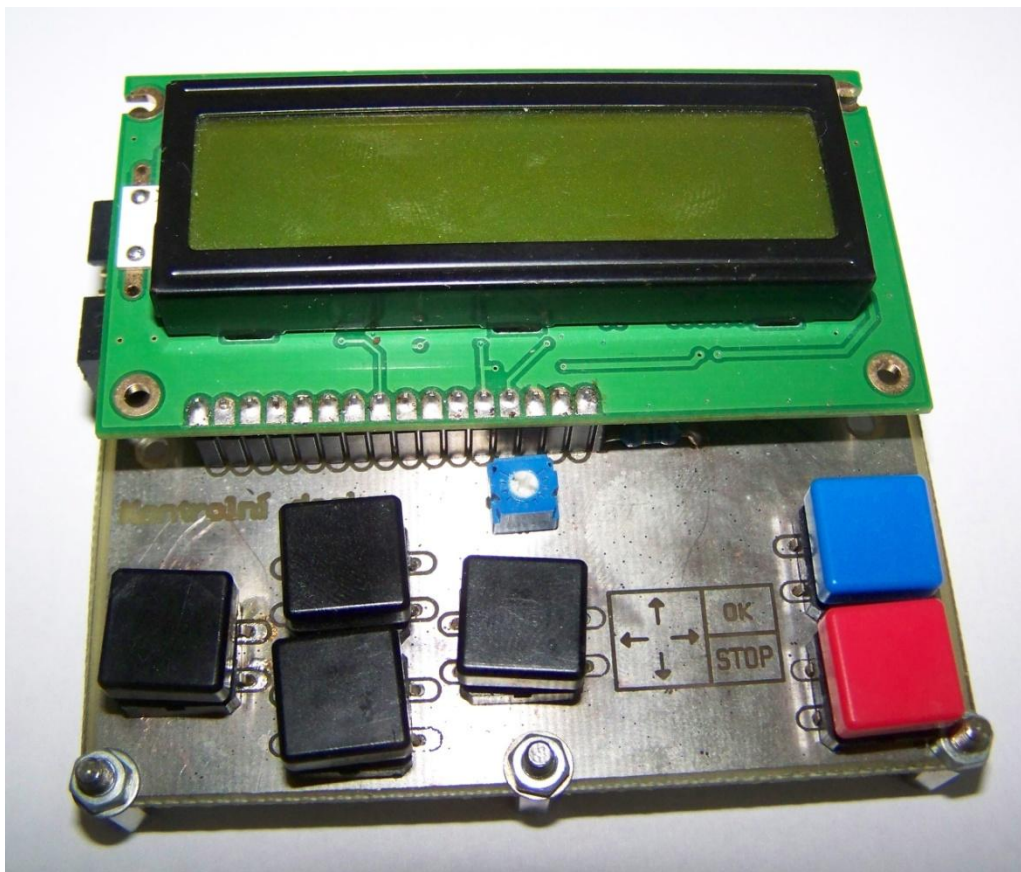
Jako zdroj je použit standardní zdroj AT viz obr.19.. Použity jsou pouze větve 5V a 12V.



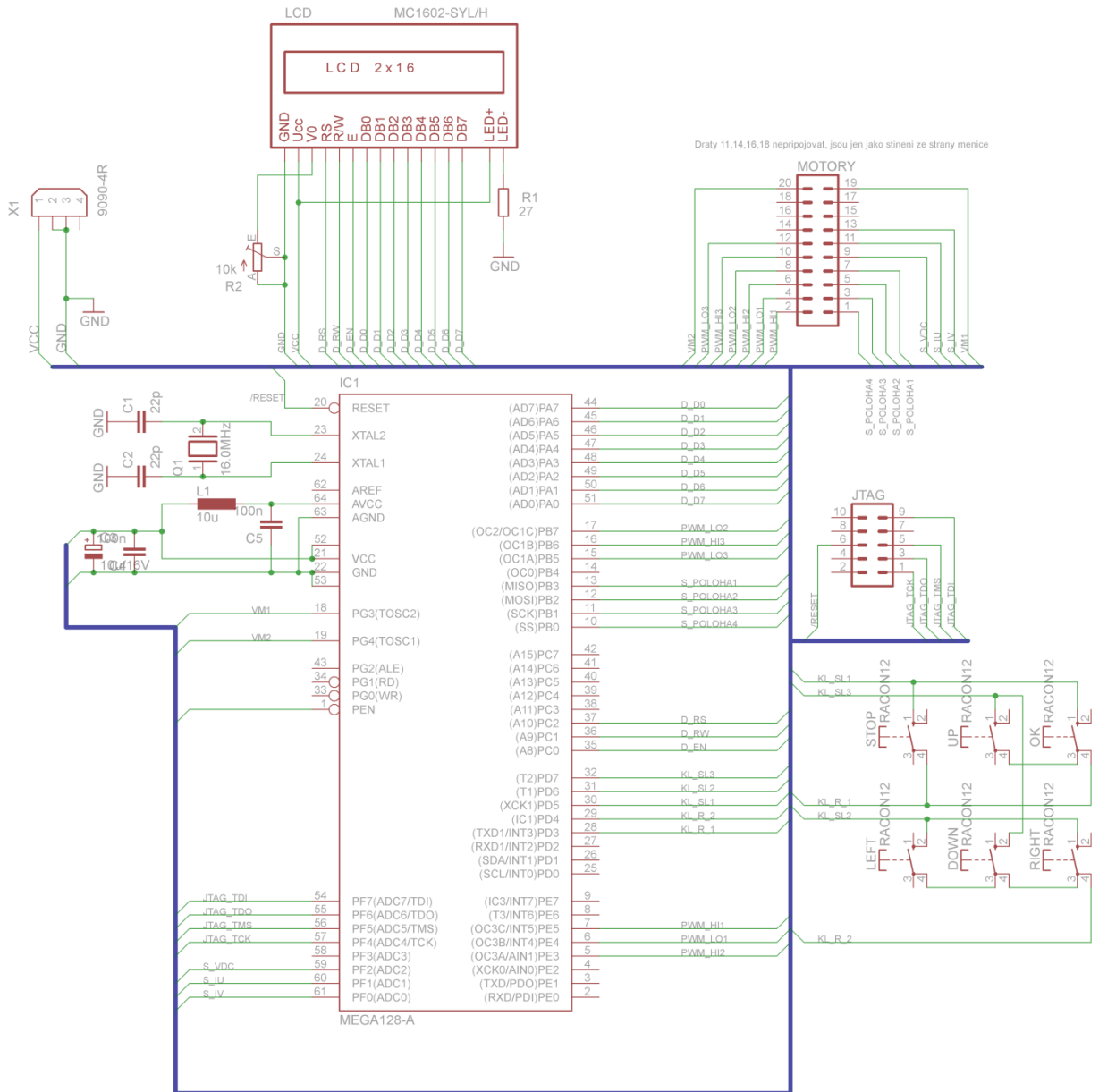
Obr.19. zdroj AT

3.2 Řídící modul

Řídící modul jsem obdržel již navržený od mého vedoucího. Řídící modul můžeme vidět na obr.20., jeho schéma je na obr.21.. Základem modulu je mikroprocesor ATmega128, který je doplněn o maticovou klávesnici ,skládající se z 6ti tlačítek, a poté ještě displej k zobrazování ovládacího menu.



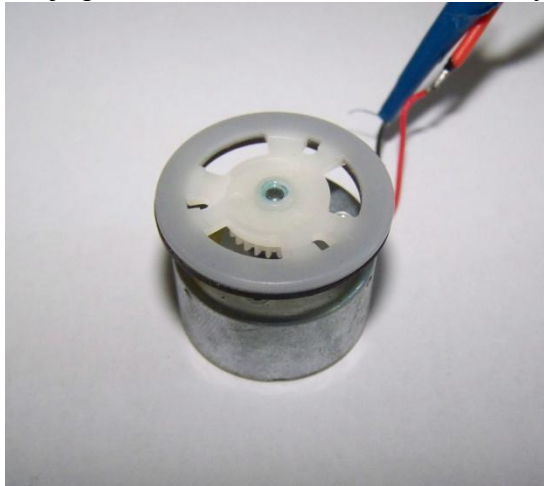
Obr.20. Řídící modul



Obr.21.Zapojení řídicí desky

3.3 Modul se stejnosměrným motorem

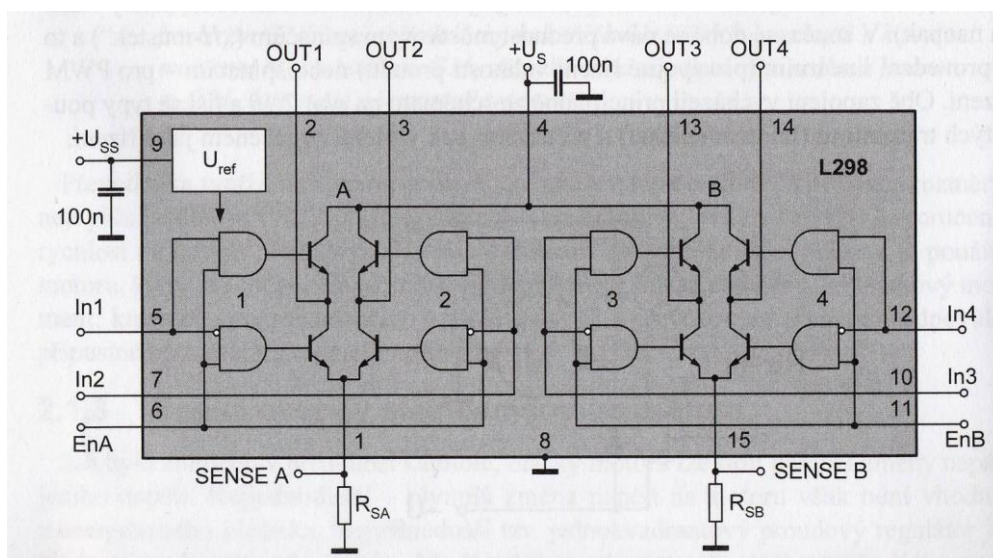
Jako stejnosměrný motor je použit motor z disketové mechaniky, viz obr.22.



Obr.22. Stejnosměrný motor

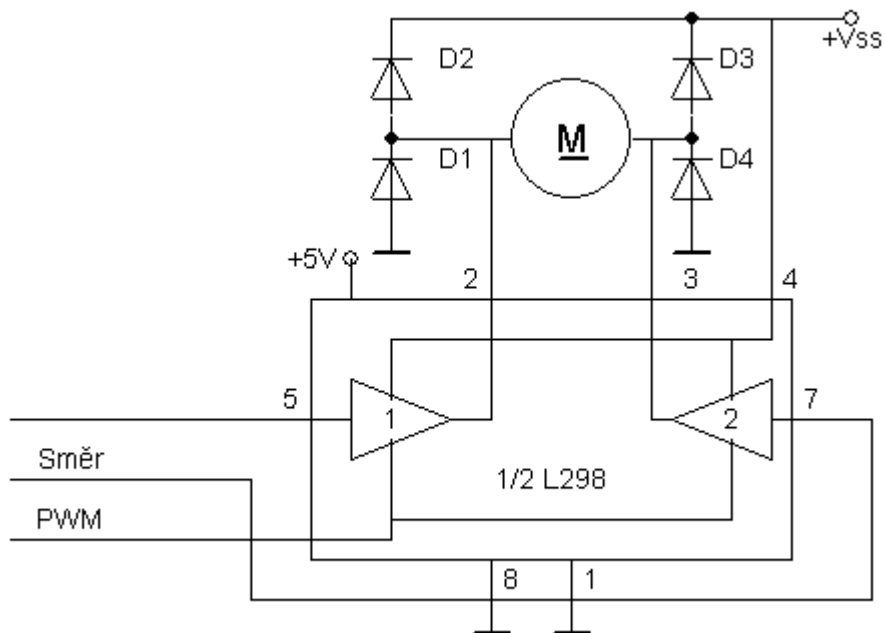
3.3.1 Obecné schéma

Pro řízení DC motoru jsem se rozhodl použít obvod L298, jehož vnitřní zapojení můžeme vidět na obr.23. Tento obvod budiče se skládá ze dvou úplných čtyřkvadrantových můstků, pracuje na principu otevření dvojice do kříže ležících tranzistorů, což zajišťují klopné obvody, čtyřkvadrantové můstky umožňují obousměrné otáčení. Na vstupy EnA a EnB se přivádí PWM, signál pomocí kterého se řídí otáčky motoru.



Obr.23. Vnitřní struktura obvodu L298, převzato z [3]

Vstupy In1 a In2 určují směr otáčení motoru, viz tab.5. Celkové schéma zapojení jednoho můstku můžeme vidět na obr. 24.



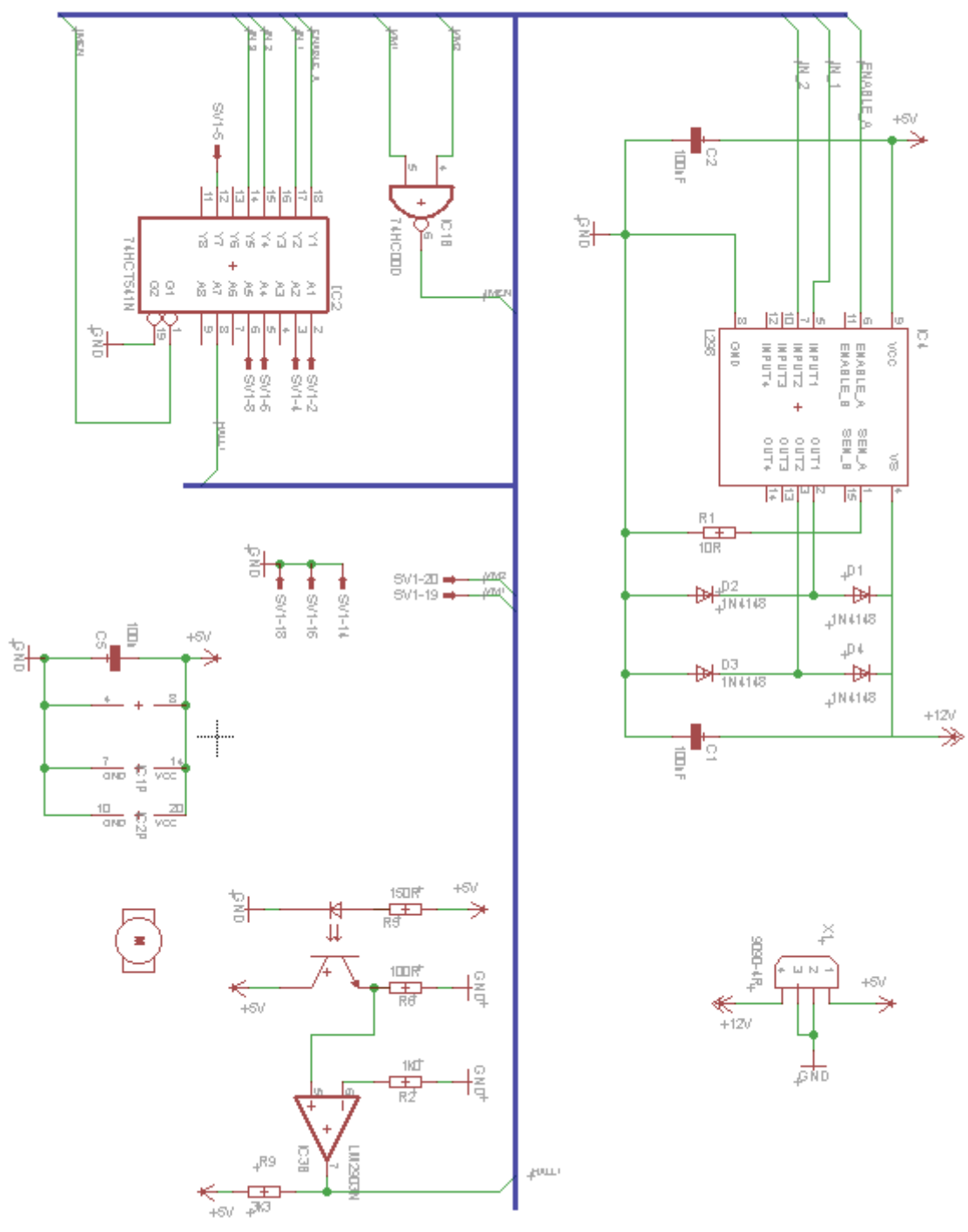
Obr.24. Zapojení jednoho můstku pro řízení otáček motoru

Tab.5 funkce obvodu L298

Vstupy		Funkce
EnA=H	In1=H	doprava
	In2=L	
	In1=L	doleva
	In2=H	
In1=In2	stop	
EnA=L	XX	Volný běh

3.3.2. Návrh schématu modulu pro DC motor v programu Eagle

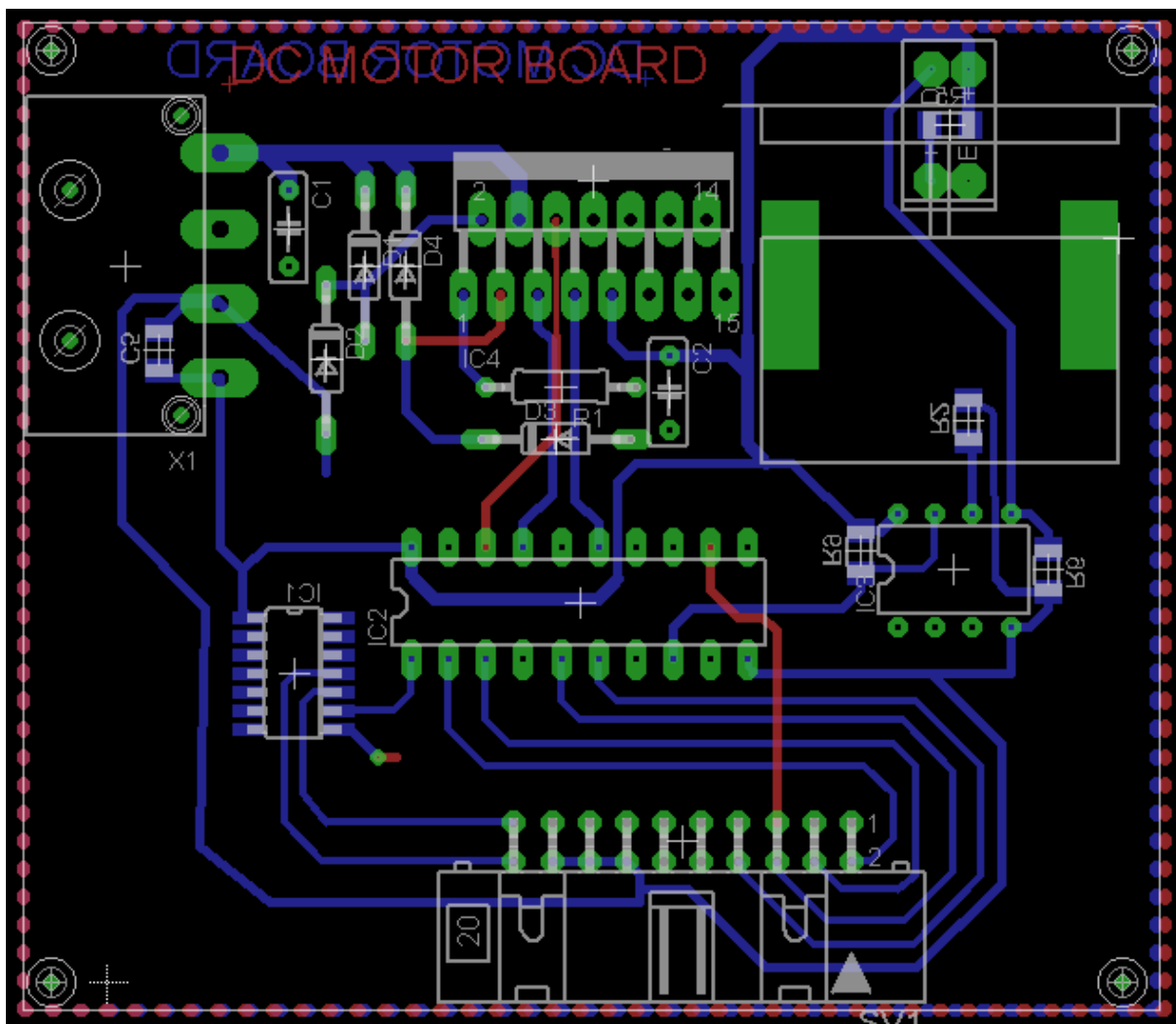
Na obr.25. je schéma zapojení obvodu L298 s optočlenem pro snímání polohy motoru a s obvodem 74HCT541N, který slouží k povolování toku dat po sběrnici. Signály VM1a VM2 zapínají obvod 74HCT541N, signály IN1 a IN2 řídí směr otáčení motoru. Signálem Enable_A se řídí otáčky motoru na tento vstup se přivádí signál PWM.



Obr.25. Úplné schéma zapojení modulu pro stejnosměrný motor.

3.3.3 Návrh desky plošného spoje Modulu DC motoru

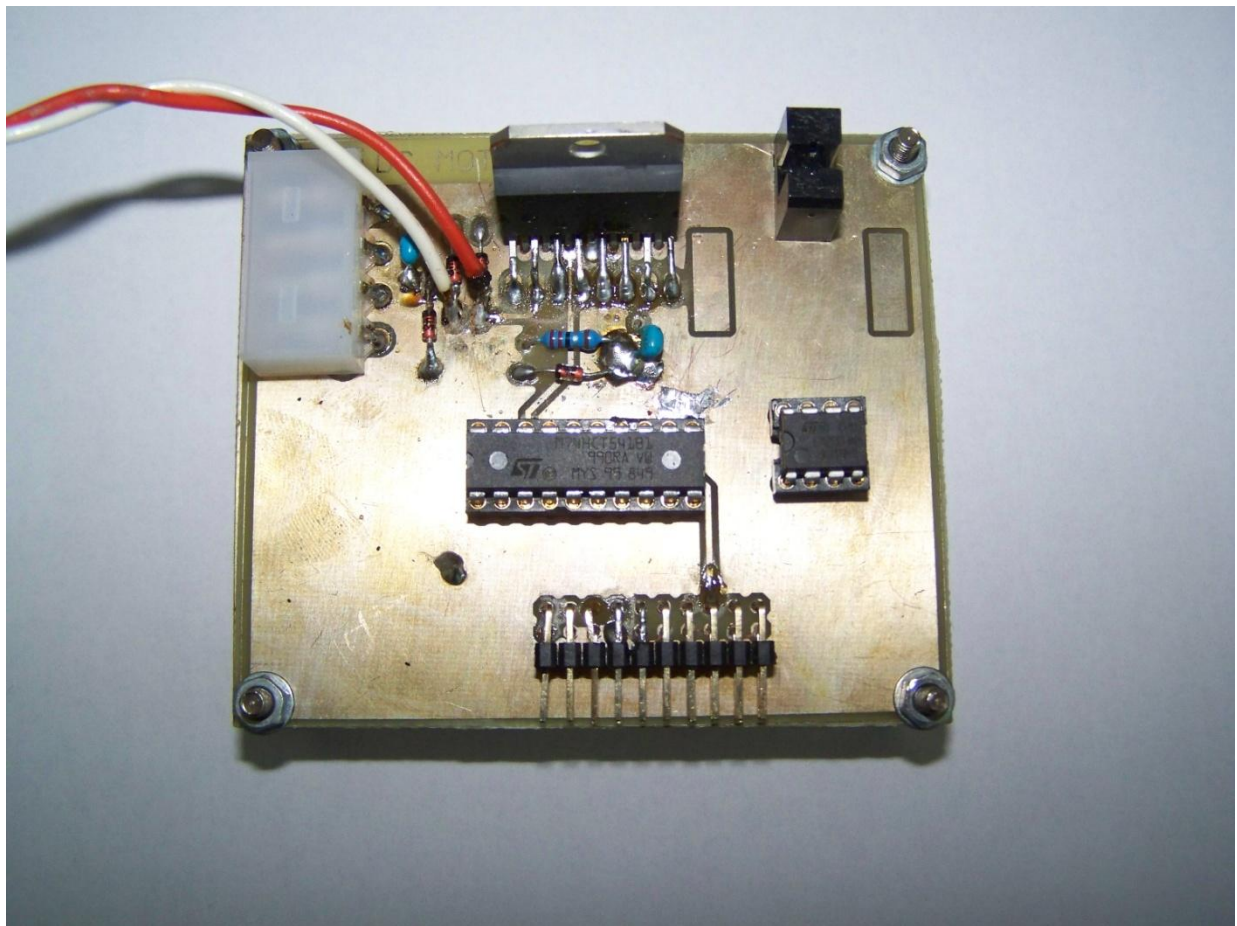
Na Obr.26 je znázorněna DPS modulu pro stejnosměrný motor.



Obr.26. Deska plošného spoje modulu pro DC motor.

3.3.4 Fotografie vyrobené desky pro DC motor

Na obr.27. můžeme vidět vyrobený modul pro řízení DC motoru.



Obr.27. Fotografie vyrobené desky pro DC motor

3.4 Modul pro BLDC motor

Jako BLDC motor je použit motor od firmy Freescale 45ZWN24-40 Jeho parametry jsou uvedeny v tab.6

Tab.6.Parametry BLDC motoru

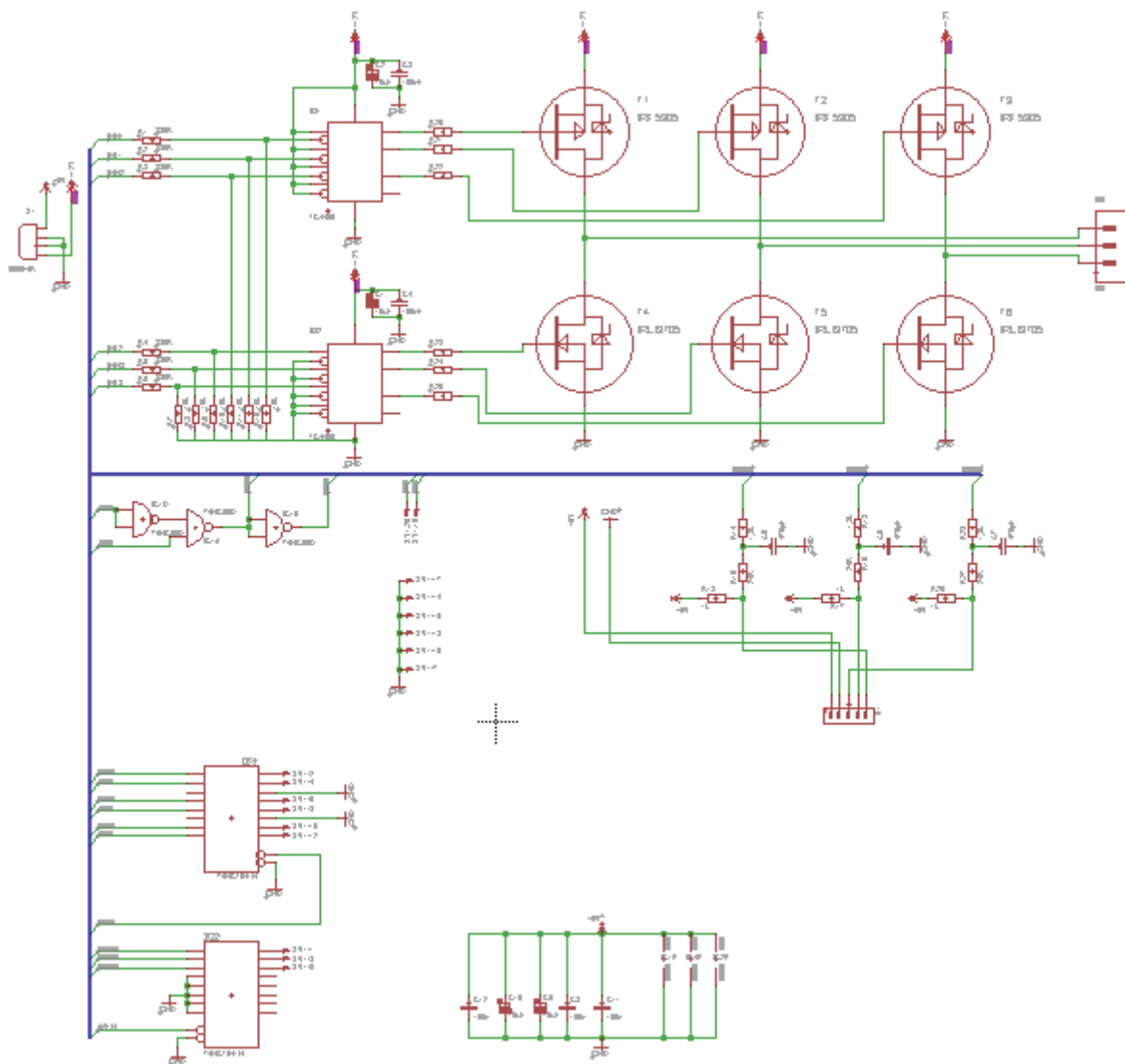
jmenovité napětí[V]	24
jmenovitý proud[A]	2,3
jmenovitý moment[g*cm]	990
jmenovitý výkon[W]	40
jmenovité otáčky[rpm]	4000



Obr.28. BLDC motor od firmy freescale, převzato z [7]

3.4.1 Návrh schématu modulu pro BLDC motor v programu Eagle

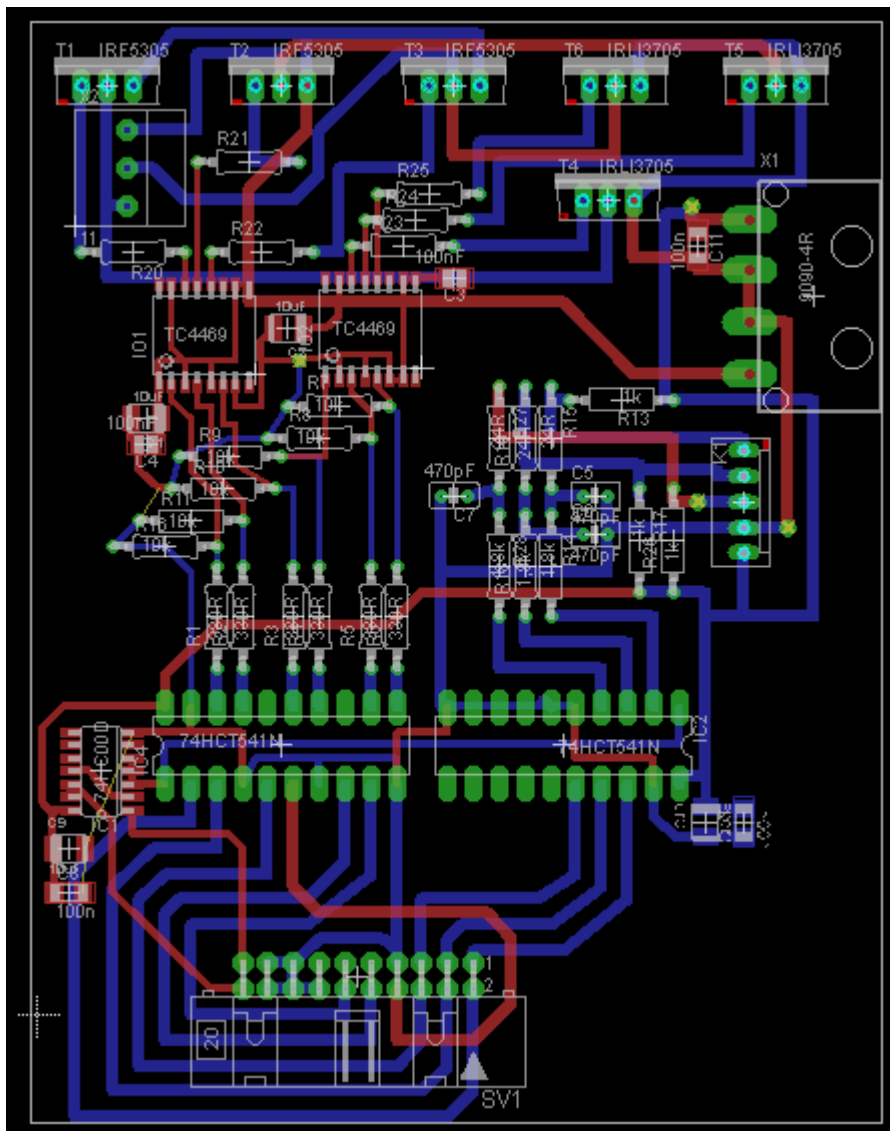
Na obrázku 29 vidíme úplné schéma zapojení modulu pro BLDC motor, s IO TC4469 které pomocí nichž jsou buzeny výkonové tranzistory IRF5305 a IRLI3705, rovněž jsou zde obvody 74HCT541N které slouží k řízení toku dat po sběrnici.



Obr.29. Úplné schéma zapojení modulu pro BLDC motor

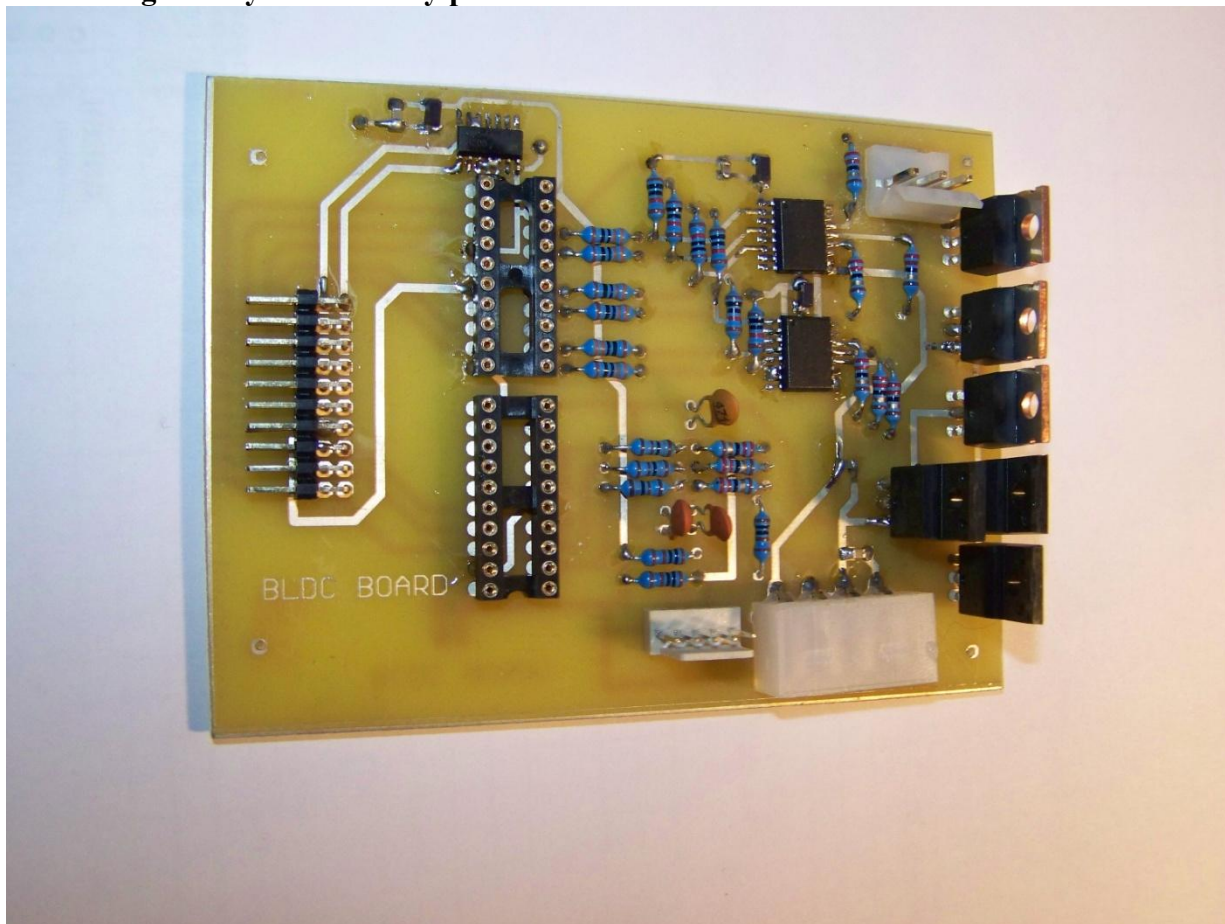
3.4.2 Návrh desky plošného spoje pro BLDC motor

Na Obr.30. je znázorněna DPS modulu pro BLDC motor



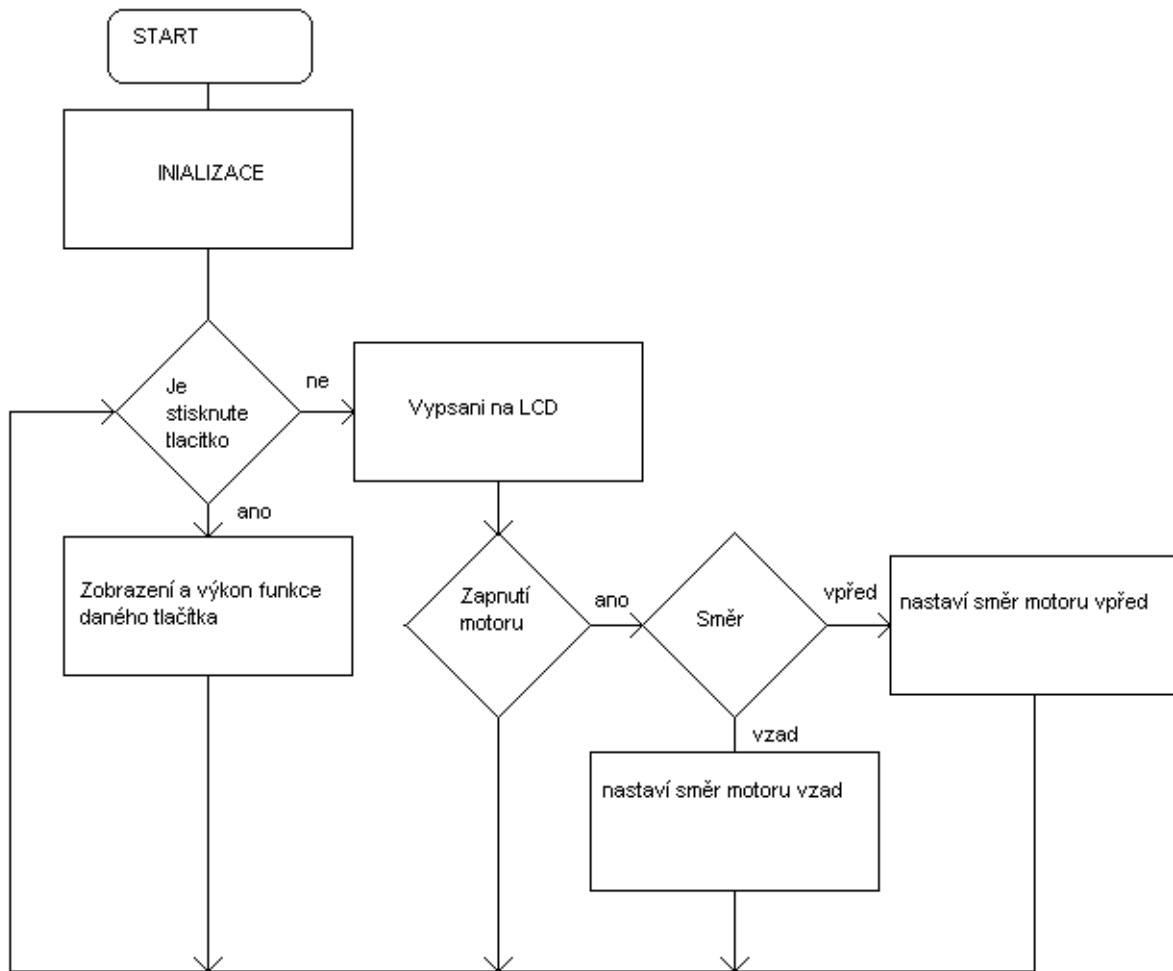
Obr.30 Deska plošného spoje modulu pro BLDC motor

3.4.3 Fotografie vyrobené desky pro BLDC motor



Obr.31. Fotografie vyrobené desky pro BLDC motor

4 Obslužný program-Vývojový diagram



Obr.32. Vývojový diagram obslužného programu pro řízení DC motoru

5 Závěr

Účelem mojí práce bylo navrhnout a realizovat moduly pro BLDC a DC motor a k nim vytvořit obslužný program pro řídicí desku s mikrokontrolérem ATmega128. Při řešení řízení DC motoru jsem se rozhodl využít obvodu L298 který je pro zadané podmínky ideální. Pro řízení BLDC motoru jsem se rozhodl využít budícího obvodu TC4469 a tranzistorů IRF5305, IRLI3705. Moduly jsou navrženy pro řízení po paralelní sběrnici, jejichž přístup na sběrnici na obou modulech řídí obvod 74HCT541N. Pro řízení DC motoru stačí pouze 3 signály dva udávají směr a třetí řídí otáčky. U modulu pro BLDC motor je zapotřebí 6ti řídicích PWM signálů. Obslužný program sem bohužel stihl realizovat pouze pro DC modul.

Zdroje:

- [1] ZAPLATÍLEK, Luděk. *Řízení bezkartáčových (BLDC) motorů*. Pardubice, 2009. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34707/1/ZaplatilekL_Rizenibezkartacovych_PR-2009.pdf. Bakalářská. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Pavel Rozsival.
- [2] GOTTWALD, Michal. Dynamický model stejnosměrného motoru využitím metody konečných prvků. BRNO, 2011. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=38924. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT FEKT. Vedoucí práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [3] KOVÁŘ, Jan. *Řízení krokových a stejnosměrných motorů* [online]. Brno : -, 20. 4. 2009. 27 s. Přednáška. Ústav radioelektroniky FEKT VUT . Dostupné z WWW: <->
- [4] AVR492: Brushless DC Motor control using AT90PWM3 [online]. Dostupný z WWW: <http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7518.pdf>
- [5] AN10661 Brushless DC motor control using the LPC2141 [online]. Dostupný z WWW: <http://www.nxp.com/acrobat_download/applicationnotes/AN10661_1.pdf>
- [6] AN885, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. Dostupný z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>>
- [7] LINUX: BLDC MOTOR 45ZWN24-40. [online]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: <http://www.linuxmotor.com/3-3-Tool-Motor.html>
- [8] Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives [online]. Dostupný z WWW: <<http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-09152003-171904/unrestricted/T.pdf>>
- [9] AN857, Brushless DC Motor Control Made Easy. [online]. Dostupný z WWW: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00857B.pdf>>