

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh výkonového obvodu elektrického pohonu koloběžky

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš SEDLÁČEK**
Osobní číslo: **E11B0075P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh výkonového obvodu elektrického pohonu koloběžky**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte analýzu elektrického pohonu koloběžky a zvolte topologii.
2. Navrhněte výkonový obvod elektrického pohonu a dimenzujte součástky.
3. Prakticky realizujte funkční prototyp pohonu koloběžky.
4. Experimentálně ověřte funkčnost postaveného prototypu.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Určí vedoucí práce

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Drábek, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**
Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce pojednává o návrhu silové části pohonu elektrické koloběžky. Podrobně popisuje funkci BLDC motoru a jeho řízení. Dále se zabývá problematikou napěťových měničů a střídačů.

Klíčová slova

Točivé magnetické pole, synchronní motor s permanentními magnety, bezkartáčový stejnosměrný motor, 3f budič motoru, LiFePO_4

Abstract

The master theses presents the principles of the design power drive electric scooters.

Key words

Rotative magnetic field, synchronous motor with permanent magnet, brushless DC motor, three-phase driver, LiFePO₄

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.6.2014

Lukáš Sedláček

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Drábkovi, Ph.D. a Ing. Martinovi Pittermannovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	1
1 ÚVOD	2
2 BLOKOVÉ SCHÉMA POHONU	3
3 MĚNIČ	4
3.1 TYPY MĚNIČŮ NAPĚTÍ	4
4 BATERIE A BALANCER	5
4.1 BATERIE	5
4.2 BALANCER.....	6
6 STRÍDAČ	7
6.1 ZÁKLADNÍ POPIS STRÍDAČE.....	7
6.2 NÁVRH STRÍDAČE	8
7 BLDC MOTOR	15
7.1 PŘEDSTAVENÍ MOTORU.....	15
7.2 HISTORIE BLDC	16
7.3 ROTOR	16
7.4 STATOR BLDC	17
7.5 SNÍMÁNÍ POLOHY ROTORU.....	17
7.5.1 <i>Bezsenzorové snímání polohy</i>	17
7.5.2 <i>Senzorové snímání polohy</i>	18
7.6 KOMUTACE MOTORU	20
7.7 CHARAKTERISTIKA TOČIVÉHO MOMENTU K RYCHLOSTI.....	21
7.8 POROVNÁNÍ MOTORŮ.....	22
7.9 ZVOLENÉ MOTORY.....	23
7.9.1 <i>EMAX CF2822</i>	23
7.9.2 <i>Motor elektrokoloběžky</i>	24
8 ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA	25
9 ZÁVĚR	27
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	28
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	29

Seznam symbolů a zkratk

DC	Direct current, stejnosměrný
Brushless, BLDC	Bezkartáčový stejnosměrný motor
BHDC	Stejnospměrný motor s komutátorem
CA	Proud baterie vztažený k násobku kapacity baterie
EMC	Elektricky komutovaný motor

1 Úvod

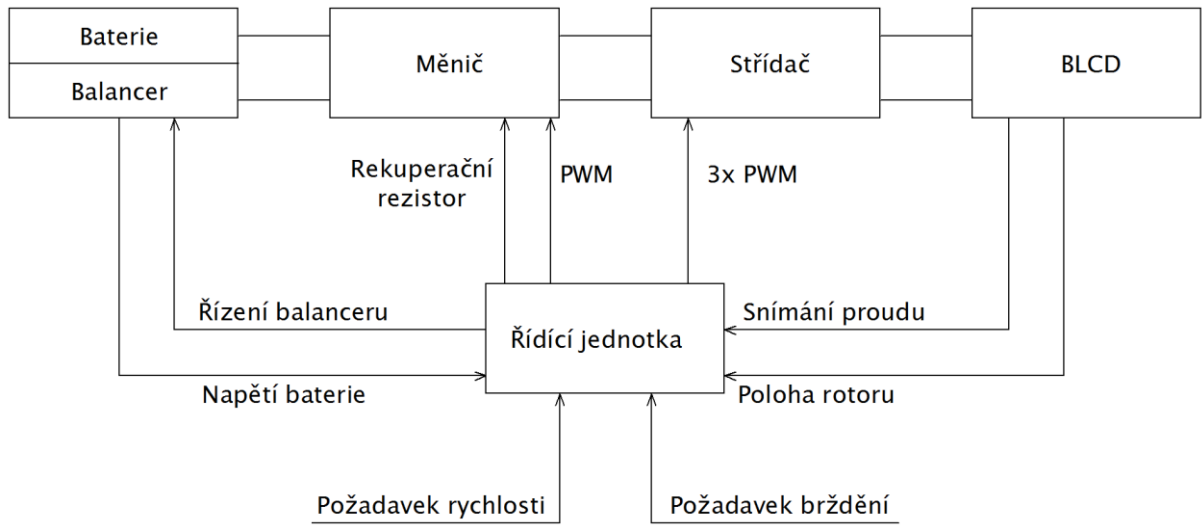
Předkládaná bakalářská práce pojednává o návrhu silové části pohonu elektrické koloběžky.

Text je rozdělen do několika částí podle funkčních bloků v topologii pohonu. V první části je popsáno: zdroj energie pro koloběžku, důvod proč byl tento zdroj použit a jeho vlastnosti. V druhé části je popsán měnič napětí ve DC obvodu. Ve třetí části je popsán budič brushless motoru. Čtvrtou částí je samotný BLDC motor, jeho charakteristiky, výhody a řízení.

BLDC motory zažívají v poslední době velký rozmach použitelnosti. Je predikováno, že v následujících pěti letech se zvýší obsah BLDC motorů ve spotřební elektronice až o 26%, kde vytlačí zastaralý typ 1f asynchronního motoru. Hlavními částmi trhu kde se usadí, jsou domácí spotřebiče jako mixéry, vysavače a ledničky. Dalším potencionálním cílem trhu s BLDC motory je elektrické nářadí jako například aku šroubováky, vrtačky a kompresory, kde je velkou výhodou obrovský krouticí moment v nulových otáčkách.

V automobilovém průmyslu je také vidět značný růst využívání BLDC motorů. Využívají se hlavně v namáhaných částech jako je například palivové čerpadlo, ventilátor a alternátor. Obyčejné kartáčové DC motory jsou konstruovány na životnost okolo 6000h a limitní je právě životnost komutátoru a uhlíků.

2 Blokové schéma pohonu



Obrázek-Blokové schéma pohonu- 1

Zde vidíme klasickou topologii pohonu elektrického motoru s řízením se všemi komponenty. V praxi se některé části dají vynechat a dosáhnout tak levnější výroby.

3 Měnič

3.1 Typy měničů napětí

Výhody měničů napětí oproti klasickým zdrojům se síťovými transformátory jsou: nízká hmotnost, menší cena, nízké tepelné ztráty, velký rozsah vstupního napětí a jednoduchá změna výstupního napětí. Nevýhodou může být generování EMI rušení, které lze ale odstranit vhodným stíněním montážního boxu, vstupními a výstupními filtry.

Měniče se rozdělují na dva základní typy, s galvanickým oddělením a bez galvanického oddělení. Měniče bez galvanického oddělení se využívají tam, kde není požadavek na galvanické oddělení primární a sekundární strany. Celý obvod měniče je značně jednodušší oproti měniči s transformátorem. Místo pulzního transformátoru se využívají jen tlumivky buď feritové nebo železoprachové. Díky neoddělení primární a sekundární strany se nemusí oddělovat snímač výstupního napětí. Velkou výhodou neoddělujících měničů je že netransformují celý přenášený výkon, ale pouze rozdíl napětí na vstupu a výstupu. Tuto výhodu ale ztrácí, pokud pracují s velkým převodem přibližně nad 1:5. Měniče mohou být buď step up, které napětí zvyšují, nebo step down které snižují, invertor, které u napětí otáčí polaritu, a obousměrný měnič, který dokáže propouštět proudy oběma směry.

Základními typy měničů s galvanickým oddělením jsou blokující, jednočinný propustný a dvojčinný měnič. Blokující je nejjednodušší, má velký rozsah vstupního napětí, lze ho jednoduše upravit na samokmitající zapojení a není nutná velká výstupní filtrace. Nevýhodou je nemožnost využití na velké výkony a tranzistor musí být dimenzován minimálně na 150% vstupního napětí. Jednočinný propustný se hodí pro výkony nad 100W. Výhodou je možnost využití na velké výkony a potřeba jen jednoho buzení. Nevýhodami je, že tranzistor musí být minimálně na dvojnásobek vstupního napětí nebo musí být zajištěno plovoucí buzení, podle zapojení. Dvojčinný propustný zdroj má největší poměr výkon/rozměr transformátoru. Díky tomu se využívají pro největší výkony. Vinutí je střídavě připojováno v obou polaritách ke zdroji.

4 Baterie a balancer

4.1 Baterie

Baterie, které zásobuje energii jakýkoliv dopravní prostředek, musí být na takovéto zacházení stavěna. Baterie, které zvládají tyto náročné aplikace, se nazývají trakční baterie. Trakční baterie se vyznačují vysokou mírou cyklické odolnosti a můžou se tedy často hluboko vybit. Hluboké vybití znamená vybití na méně než 20% kapacity. Mezi trakční baterie patří speciální druhy klasických olovených akumulátorů, gelových akumulátorů, Li-Ion baterie a dnes nejmodernějšími jsou LiFePO₄ akumulátor.

Tabulka-Přehled baterií-1

typ	energie [Wh/kg]	nabíjecí proudy [CA]	vybíjecí proudy [CA]	počet cyklů [-]	cena za Wh [Kč]
AGM	30-50	0,1	0,2 (5)*	400-500	3
Li-Ion	90-120	1	5 (25)*	500-1200	6
LiFePO ₄	90-110	0,25 - 2	0,1 - 5 (30)*	1000-5000	6

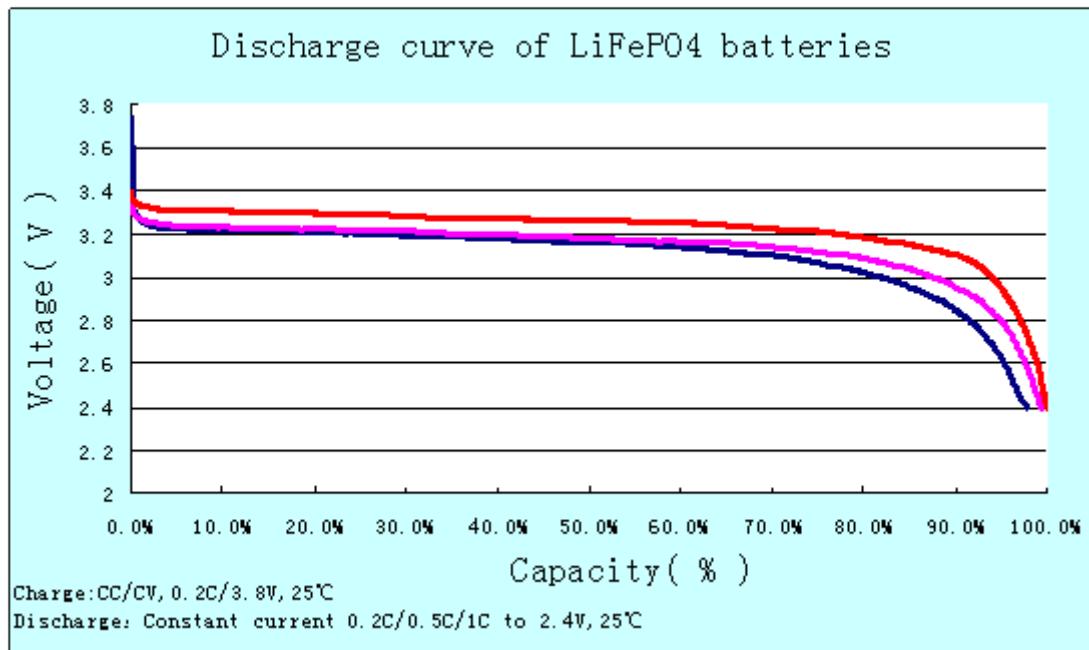
*Hodnoty v závorkách jsou krátkodobé hodnoty do 5s

Námi zvolená baterie je LiFePO₄, neboli lithium železo fosfátový akumulátor. Je to baterie vycházející z technologie Li-Ion akumulátorů, kde se využívá netoxických kovů v katodě. LiFePO₄ je podstatně bezpečnější katodový materiál než LiCoO₂. Fe-P-O vazba je silnější než Co-O. V případě zkratů, přehřátí a jiných nesprávných způsobech využití, je výrazně těžší odstranit kyslíkové atomy z vazby. Tato stabilizace redoxní reakce také napomáhá rychlému přemístování iontů. K havárii dochází teprve při extrémním přehřátí (800 °C a výše). [1]

Tyto baterie nemají paměťový efekt, jejich samovybití je menší než 5% kapacity za měsíc pro 20°C. Velice rychle se nabíjejí, jelikož bez značného zkrácení životnosti se můžou nabíjet až dvojnásobnou hodnotou své kapacity. Krátkodobě jsou schopné dodat i pojmout obrovské proudové impulzy. Na rozdíl od olovených akumulátorů se u LiFePO₄ můžou chemické cykly v baterii měnit téměř okamžitě v časovém horizontu jednotek až zlomků sekund. Klasickým oloveným bateriím trvá změnit chemické cykly v řádech desítek sekund. Proto jsou vhodné pro systémy s rekuperací, kde se požaduje velmi rychlá změna nabíjení / vybití.

Nominální napětí jednoho článku je přibližně 3,2V, liší se dle výrobního postupu každého výrobce od 3-3,3V. Maximální napětí všech typů článků je 4,25V. 100% vybitý článek má napětí 2,5V.

Vybíjecí charakteristika je lineární a napětí se až do hlubokého vybití téměř nemění. Hlubokým vybitím se rozumí odebrání více jak 80% kapacity z článku. Díky tomuto lze využít téměř celou kapacitu baterie bez znatelného poklesu výkonu stroje.



Obrázek-Vybíjecí charakteristika- 2 [2]

4.2 Balancer

V ideálním případě články spojené sériově se nabíjí a vybíjí stejně a nedochází tak k žádnému problému. Ve skutečnosti nejsou všechny články totožné a liší se v kapacitě. To má za následek rozdílné vybíjení a nabíjení článků, kterému musíme předejít, jinak dříve či později nejslabší článek zničíme a tím znehodnotíme celou baterii. Balancery se dělí do dvou hlavních kategorií a to aktivní a pasivní. Jednodušší pasivní balancery sledují pouze napětí při nabíjení. Pokud je článek plně nabit, tak ho přemostí odporem a veškerá energie, která by bez balancování článek přebíjela, se mění v odporech na teplo.

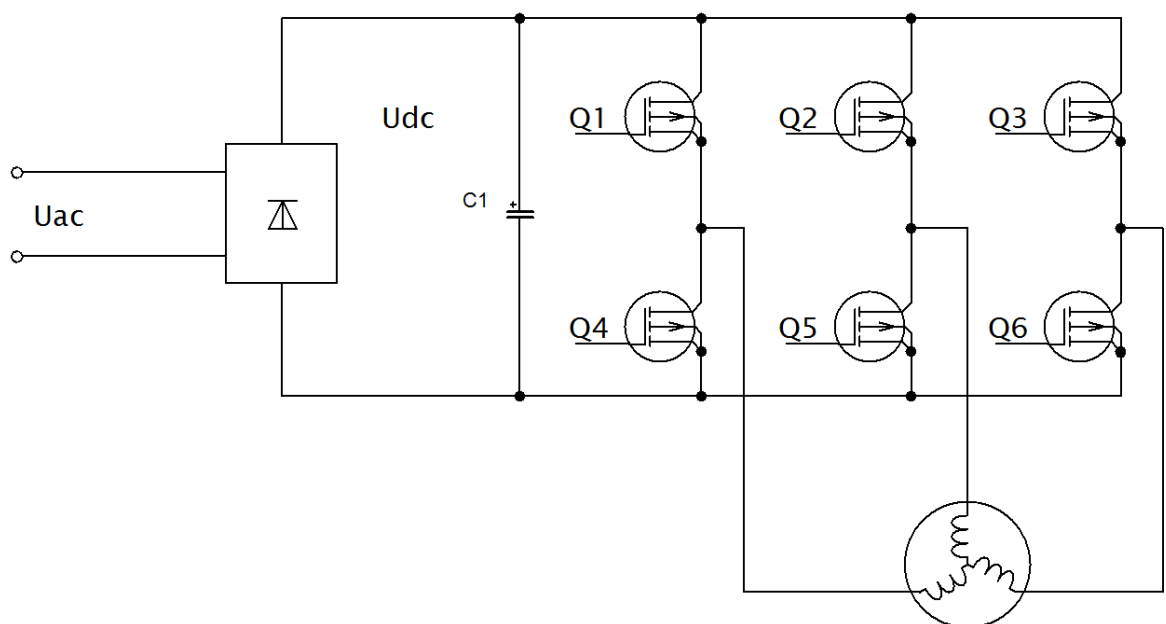
U aktivních balancerů by se dalo zjednodušeně říci, že každý článek je nabíjen zvlášť. Aktivní balancery mnohdy spojují více funkcí, jelikož musí obsahovat řídicí mikroprocesor. Takže koupené balancery jsou vlastně nabíječky, které většinou snímají teplotu baterií a hlídají tak její stav. Tyto nabíječky mají různé funkce nabíjení.

6 Střídač

6.1 Základní popis střídače

Střídače neboli měniče frekvence se vyrábějí ve dvou základních principech a to přímé a nepřímé. Přímé měniče kmitočtu se nazývají cyklokonvertory nebo maticové měniče. Cyklokonvertor dokáže vstupní frekvenci pouze snižovat a to až do hranice 25% vstupní frekvence. To společně s využitím tyristorů jako spínacích součástí ukazuje na využití těchto měničů. Využívají se u pomaloběžných motorů velkých výkonů. Maticové měniče dokáží frekvenci i zvyšovat a využívají se zde vypínací tyristory GTO.

V poslední době nejvyužívanějším typem měničů jsou právě nepřímé měniče. Skládají se ze tří hlavních částí: usměrňovač, stejnosměrný meziobvod a výstupní střídač. Výstupní frekvence a výkon jsou závislé na typu použitých součástí, nejčastěji tranzistory MOS-FET nebo IGBT. Tranzistory jsou řízeny PWM modulací a tím se jednoduše řídí výkon motoru. Stejnosměrný meziobvod je tvořen svitkovým a elektrolytickým kondenzátorem, které filtrují napájecí napětí a proudové špičky, které generuje střídač. Usměrňovač se volí podle výkonu střídače, pro nejmenší výkony se využívá jednosměrný usměrňovač, případně můstkový usměrňovač. Při vyšších výkonech se využívá třífázové síť s šesti pulzním usměrněním. To je výhodné díky malému zvlnění výstupního napětí i bez využití kondenzátoru. Při bateriovém provozu samozřejmě usměrňovač odpadá.



Obrázek-Základní schéma střídače- 3

6.2 Návrh střídače

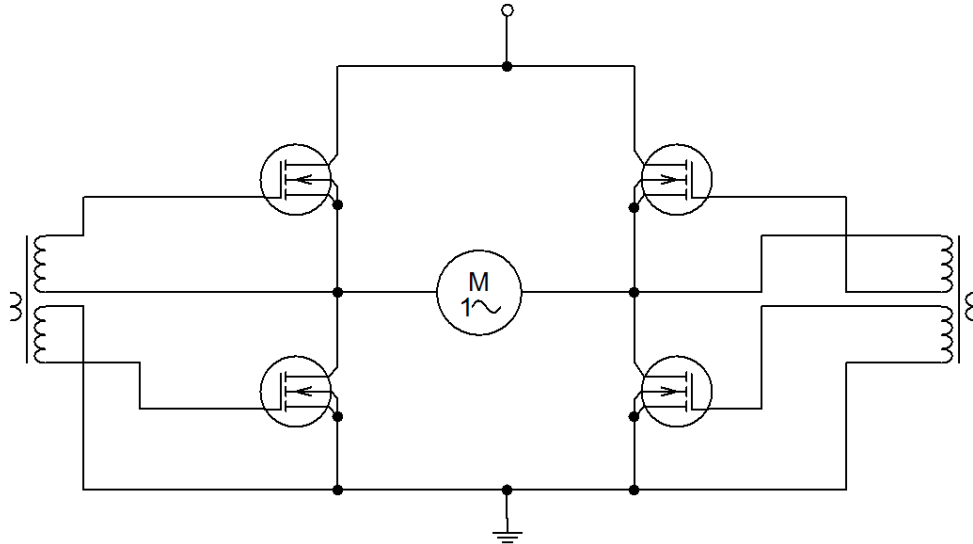
Hlavním rozcestníkem u návrhu střídače je přenášený výkon a složení z diskretních součástek nebo z bezpotenciálového modulu. Bezpotenciálový modul má výhodu, že v sobě většinou integruje výkonovou část, budič tranzistorů a ochranné diody. Plošný spoj měniče je pak přehlednější a menší, jedinou nevýhodou jsou vyšší ceny těchto bloků oproti diskretním součástkám a v případě poruchy jsou neopravitelné.

Námi zvolená diskretní cesta je při vývoji výhodná právě díky možnosti vyměnit jednotlivé součástky samostatně. Největší cenou střídače jsou právě výkonové polovodičové spínače, které tvoří až třetinu ceny celého pohonu. Tranzistory MOS-FET lze spínat vysokou frekvencí, řádově až stovky kHz a tím dosáhnout hladké regulace. Bohužel MOS-FET tranzistory nejsou schopné spínat velké napětí a proudy. Velké proudy lze získat z tranzistorů na nízké napětí a naopak. S narůstající napěťovou zatížitelností totiž narůstá i tloušťka přechodu a tím jeho přechodový odpor. U nízkonapěťových MOS-FETů speciálních technologií výroby lze dosáhnout přechodového odporu v řádech jednotek až desítek miliohmů. U vysokonapěťových tranzistorů odpor v sepnutém stavu dosahuje i jednotek ohmů.

V dnešní době se nejvíce využívají tranzistory IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), které spojují výhody jak MOS-FETů tak bipolárních tranzistorů. Na vstupní straně se tranzistor chová jako tranzistor s izolovaným hradlem (snadné řízení, vysoká spínací frekvence). Na výstupní straně se chová jako bipolární tranzistor (nízké spínací ztráty, možnost přenášet velké proudy při vysokých napětích). Pro nejvyšší výkony se stále využívají vypínací tyristory GTO (Gate Turn-Off) případně hybridní technologie jako IGCT (Insulate Gate Controlled Thyristor) případně MCT (MOS-Controlled Thyristor).

Ve střídači jsou dva tranzistory zapojeny sériově a jejich střed je připojen na zátěž. Spínání spodního tranzistoru je bezproblémové, jelikož jeho source je na potenciálu země. U spínání horního tranzistoru nastává problém, neboť potřebujeme nabít Gate na napájecí napětí +12V aby se tranzistor otevřel, protože jeho source je na potenciálu napájení. Je několik možností, jak zajistit tento napěťový posun. Jednoduchým a efektivním způsobem je použití GDT (Gate Driver Transformator) Má jedno primární vinutí a dvě sekundární vinutí, které se připojují na jednotlivé gaty. Tento způsob buzení je však možný pouze pro řízení polomostů

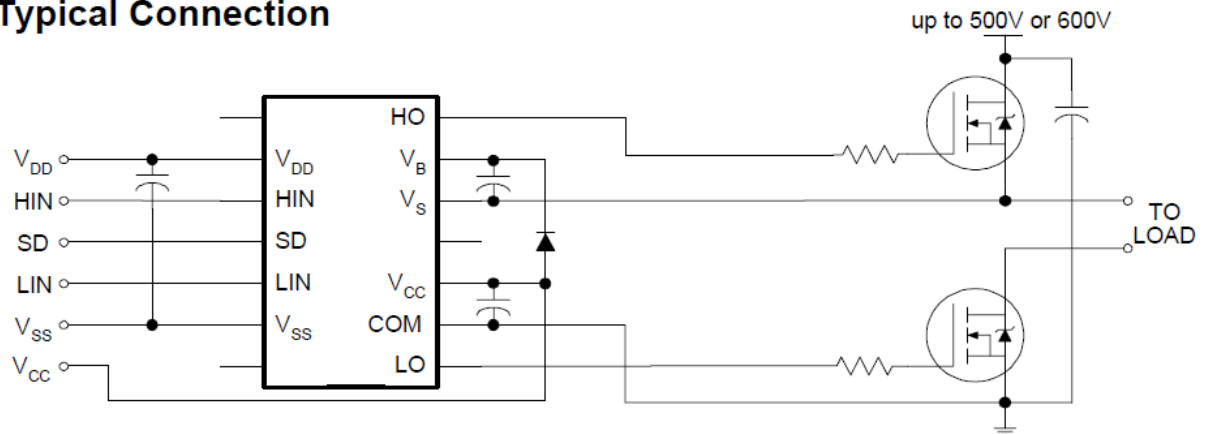
nebo plných můstků, kde se spínají tranzistory v protifázy a ne jednotlivě jako je nutností u 3f střídače. Nevýhodou GDT je nemožnost přenést nízké kmitočty, povely k dlouhému otevření tranzistorů (nezanedbatelná DC složka, která nelze přes transformátor přenést) a vysoké nároky na nízkou rozptylovou indukčnost vinutí.



Obrázek-Využití GDT- 4

Další možností je využití speciálních obvodů, tzv. High side driver. Tyto obvody většinou v sobě integrují nábojovou pumpu, která zajišťuje posunutí napěťových úrovní. Společně s budičem spodního tranzistoru a ovládací logikou zajišťují tak komplexní ovládací modul pro tranzistory. Námí zvolený integrovaný obvod IR2110 je vysokonapěťový a vysokorychlostní výkonový MOSFET a IGBT budič s implementovaným High a Low side výstupem. Logické vstupy jsou kompatibilní se standarty CMOS nebo LSTTL až k 3,3V logice. Výstup driveru je konstruován na vysoké pulzní odběry a nízké transportní zpoždění. Velmi nízké zpoždění (maximálně 10ns) usnadňuje práci na velmi vysokých frekvencích. Plovoucí výstup může být využíván pro buzení MOSFETů s N-kanálem nebo IGBT až do napětí 500V. Napájecí napětí gate je 10-20V a špičkový výstupní proud až 2A oběma směry. Katalogové zapojení je znázorněno na *obrázku 5*. [17]

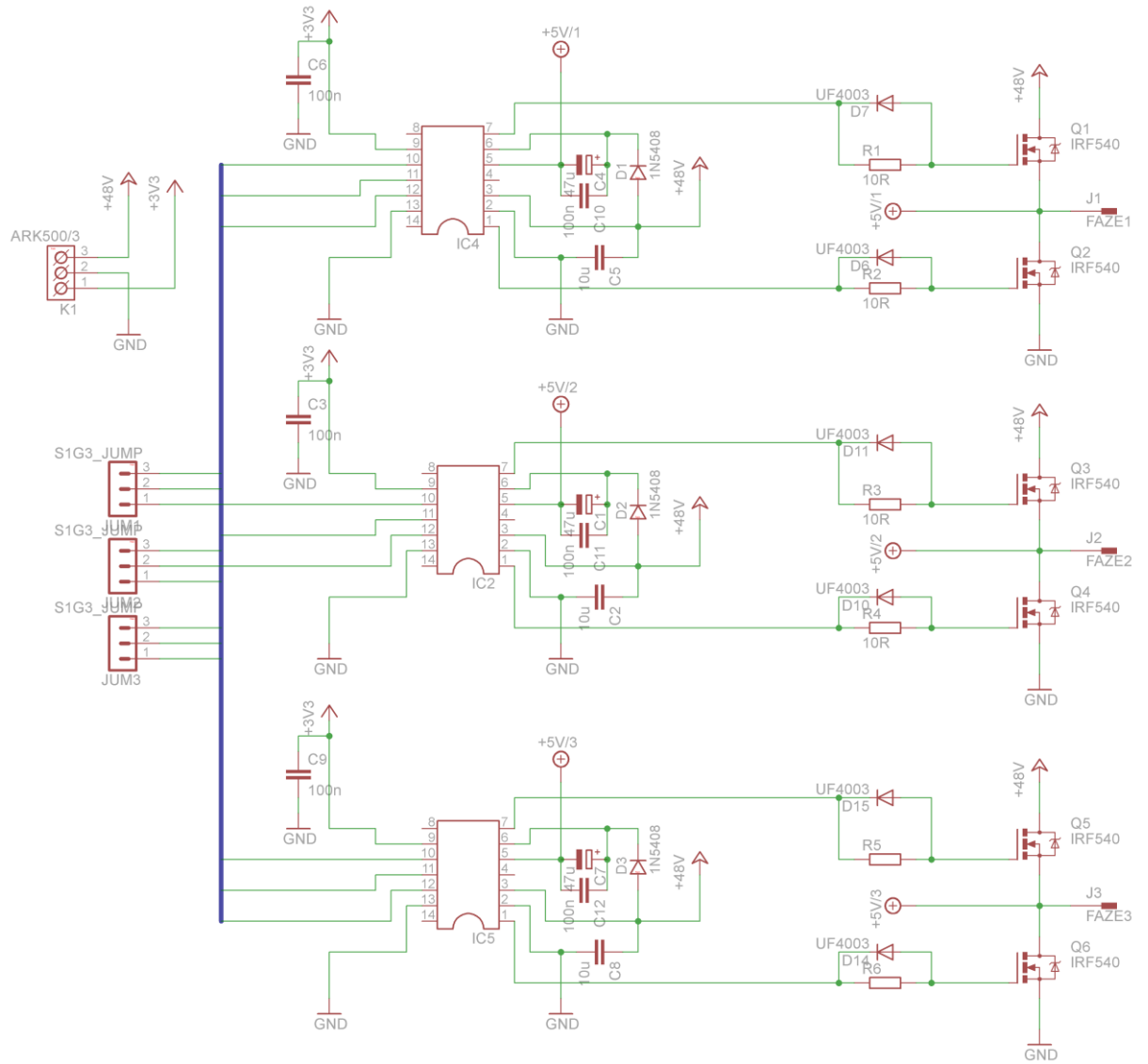
Typical Connection



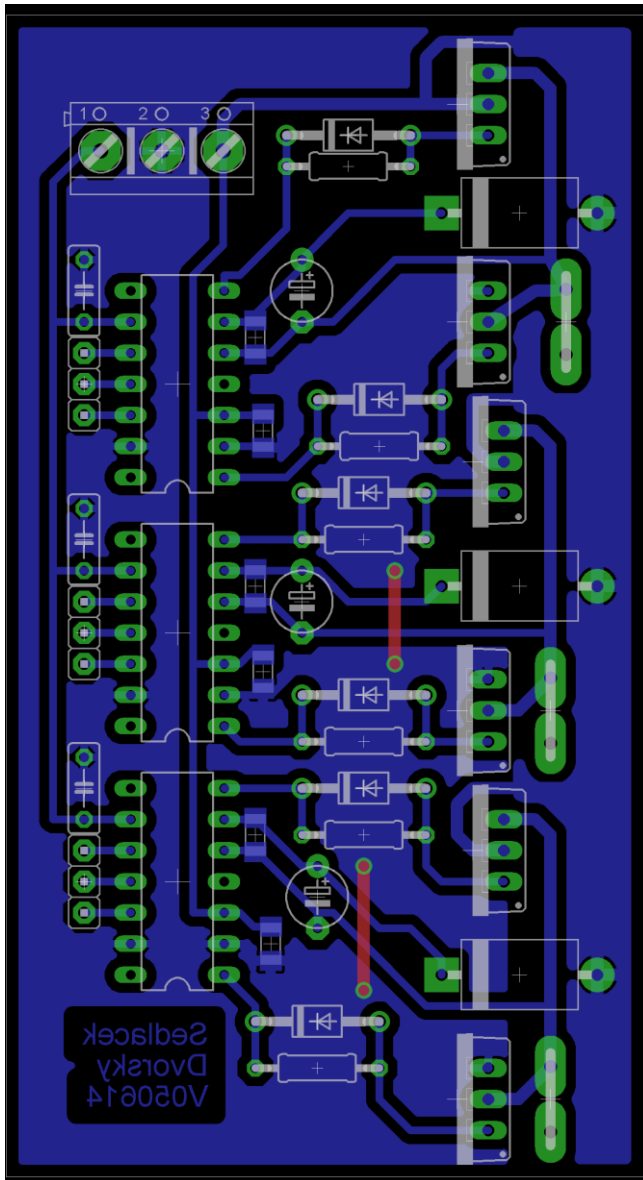
(Refer to Lead Assignments for correct pin configuration). This/These diagram(s) show electrical connections only. Please refer to our Application Notes and Design Tips for proper circuit board layout.

Obrázek- Katalogové zapojení IR2110- 5 [17]

Navržené schéma budiče je v podstatě katalogové zapojení doplněné o pár drobností jako RD články v obvodu gate tranzistorů. RD články nabíjí gate MOSFETu přes odpor a vybíjí ho přes diodu. Tím je zajištěno rychlejší vypnutí tranzistoru než jeho sepnutí a předchází se tak sepnutí obou tranzistorů pod sebou.

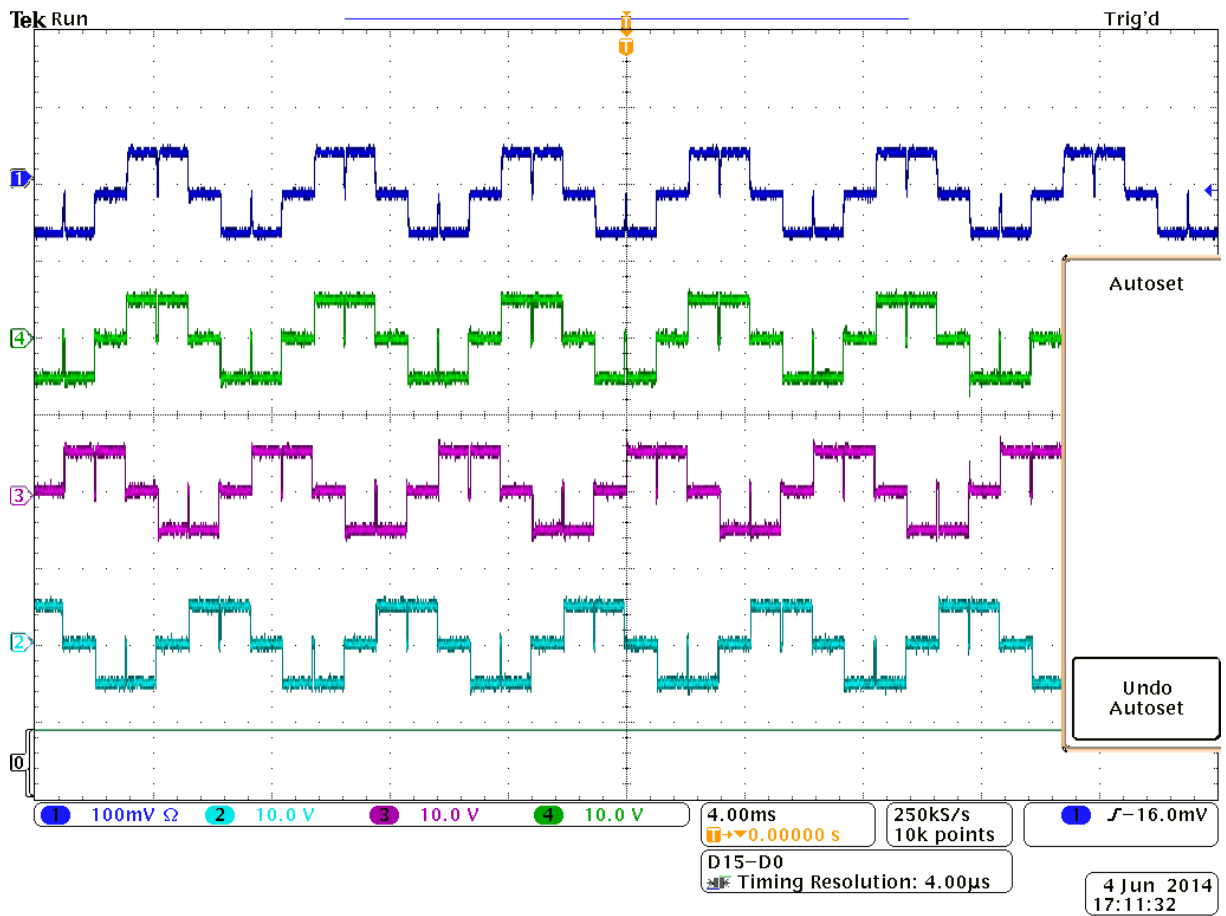


Obrázek-Schéma driveru- 6



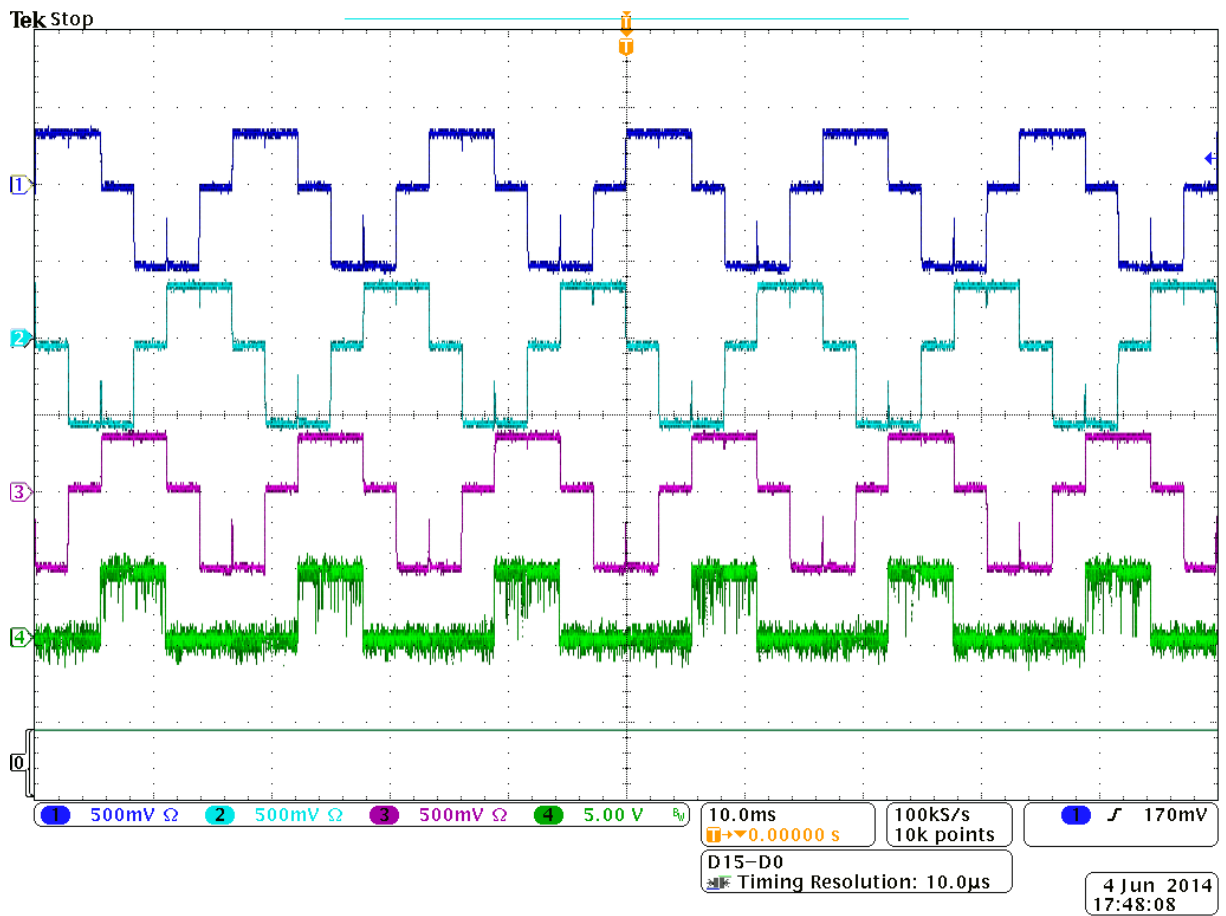
Obrázek-Plošný spoj driveru-7

Na obrázku 8 je snímek z osciloskopu. Kanál číslo jedna měří proud fází, která je na kanálu č. 4. Rozkmit proudů je cca $\pm 3\text{A}$. Na kanálech 2-4 jsou jednotlivá fázová napětí střídače.



Obrázek-Oscilogram napětí- 8

Na obrázku 9 jsou znázorněny fázové proudy jednotlivých vinutí. Na kanál čtyři je přiveden signál z výstupu procesoru pro spínání jednoho tranzistoru.



Obrázek-Oscilogram proudu- 9

7 BLDC motor

7.1 Představení motoru

BLDC neboli EMC jsou jedny z nejmodernějších konstrukčních řešení pohonů. Jedná se o stejnosměrné motory bez mechanického komutátoru s permanentním magnetem. Mohou být jedno, dvou nebo tří fázové. V pohonných jednotkách se nejčastěji používají ty tří fázové. Oproti normálním motorům se zde otáčí většinou venkovní část motoru a stator je uvnitř. To dává velkou výhodu v pohonných jednotkách, kdy se může rotor uzpůsobit tak, že se na něj rovnou nasadí pneumatika.

Absence komutátoru sebou nese spoustu výhod, ale i nevýhody. Mezi ty nejdůležitější patří:

Výhody:

- Vysoká účinnost pohonu
- Žádné rušení způsobené hoření oblouků v komutátoru
- Velký rozsah použitelných otáček
- Lepší charakteristika točivého momentu vůči rychlosti
- Vysoký poměr točivého momentu k hmotnosti motoru
- Životnost je omezená pouze životností ložisek
- Vysoká dynamika pohonu, protože rotor je lehčí

Nevýhody:

- Složitě řízení
- Nutnost snímat polohu rotoru

Účinnost motoru v praxi dosahuje téměř 95%, v modelářských motorech není problém narazit na 10kW motor s nuceným chlazením který váží pár kilo. Rychlost a točivý moment jsou závislé na rychlosti a síle magnetického pole, které se vytváří ve statorovém vinutí. Síla pole je závislá na protékajícím proudu vinutím.

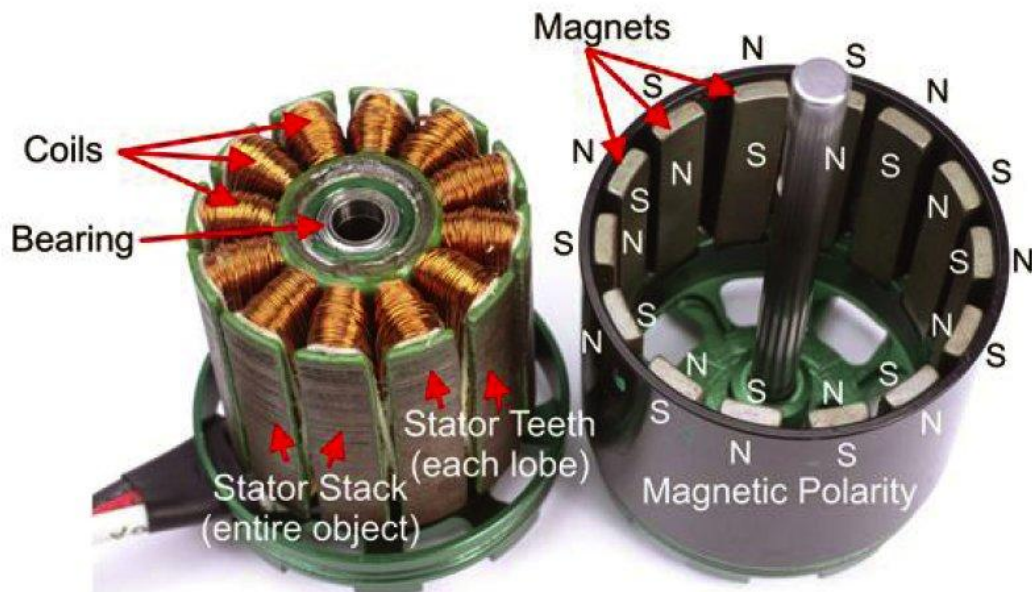
7.2 Historie BLDC

Když byly vyvinuty elektrické regulátory, které maximalizovaly efektivnost DC pohonů, otevřeli se dveře pro ještě větší zefektivnění pohonu. BLDC motory se poprvé objevily na trhu v roce 1962, kdy TG Wilson a PH Trickey nazvali tento motor jako „solid state commutation“. Nesmíme zapomenout, že hlavní výhodou BLDC motoru je absence mechanického komutátoru. Pohon byl vyvíjen a modernizován a stal se oblíbenou volbou pro speciální použití jako například pohon hard disků, v robotice a v letadlech. Je faktem, že se v těchto odvětvích BLDC motory stále využívají, tak velká je jejich účinnost. Jediným problémem bylo, že tyto rané formy BLDC motorů nedokázaly generovat takové výkony jako střídavé a stejnosměrné motory. To vše se změnilo v roce 1980, kdy se staly dostupnými permanentní magnety ze vzácných zemin. Nejprve byly vyvinuty magnety na bázi Samaria a Kobaltu a v roce 1982 je pak překonaly Neodymové magnety. V kombinaci s vysokonapěťovými tranzistory dokázali generovat moderní BLDC motory větší výkony než obyčejné kartáčové stejnosměrné motory. Téměř na konci roku 1980 představil Robert E. Lordo z Powertec Industrial Corporation BLDC motory s až 10x větším výkonem než dosahovali předchůdci. V dnešní době neexistuje jediný velký výrobce elektromotorů, který by nenabízel vysokovýkonné brushless motory. [18]

7.3 Rotor

Na rotoru se nacházejí permanentní magnety. V dnešní době se hojně využívají magnety vzácných zemin hlavně Neodym (NdFeB). Tyto magnety se vyznačují velkou hustotou magnetického toku, který je potřebný k vytvoření velkého momentu motoru. Zvyšováním počtu pólových dvojic magnetů se snižuje zvlnění momentu a také se snižuje maximální rychlost. Rotor je znázorněn na *obrázku 10*

OUTRUNNER COMPONENTS



Obrázek-Rotor a stator BLDC- 10 [6]

Rotor může být vnější nebo vnitřní. Funkce ani řízení motoru se nijak neliší, jen se mění základní parametry. Motory s vnějším rotorem se vyznačují nižší rychlostí, vyšším momentem a tišším chodem. Oproti tomu motory s vnitřním rotorem jsou hlučnější, mají lepší účinnost, jsou stavěné na vyšší rychlosti a mají nižší moment.

7.4 Stator BLDC

Stator je zpravidla tvořen izolovanými plechy jako u klasických motorů. Uvnitř drážek statoru je umístěno vinutí. To je stejně jako u střídavých strojů spojeno do hvězdy nebo do trojúhelníka. Hlavní rozdíl mezi zapojením vinutí je: zapojení do hvězdy poskytuje vysoký krouticí moment při nízkých rychlostech a zapojení do trojúhelníka poskytuje nízký krouticí moment při nízkých rychlostech. Tento parametr určuje použití motoru [9] Stator je znázorněn na obrázku 10

7.5 Snímání polohy rotoru

7.5.1 Bezsenzorové snímání polohy

Snímání polohy může být dvojitým způsobem, přímé a nepřímé. Konstrukčně nejjednodušší způsob je nepřímé snímání polohy, kdy se na plovoucím vinutí rotoru měří tzv. BEMF. To je konstanta k_e , které se většinou uvádí na štítku motoru a znázorňuje počet otáček

motoru na jeden volt. Z jednoduché rovnice lze pak dopočítat rychlost rotoru

$$n_{RPM} = U_C * k_e [RPM]$$

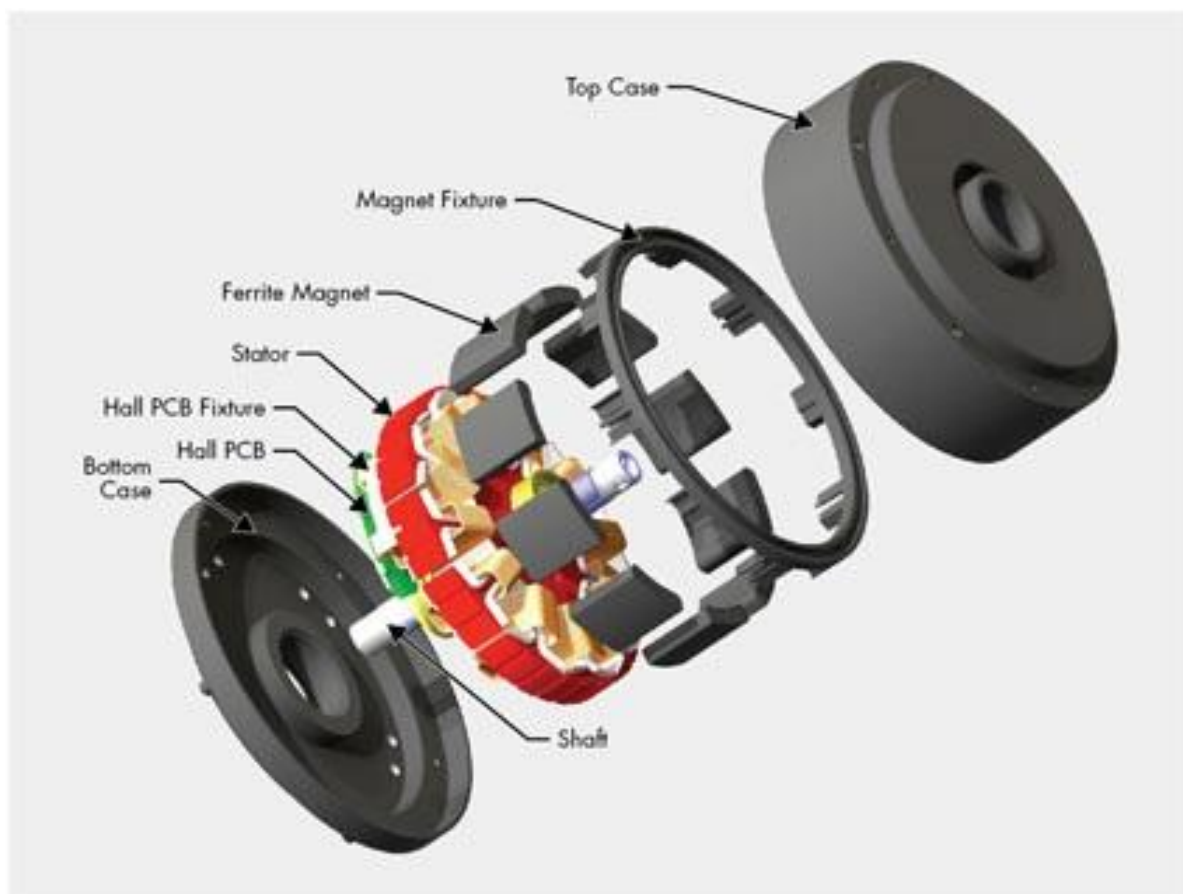
Metodu snímání navrhl pan Erdman, který navrhl snímání napětí na plovoucí fázi vůči neutrálnímu bodu. Ten má teoreticky stejné napětí jako střed vinutí zapojení do hvězdy. Tento bod ale nemá stále stejný potenciál a jeho napětí se pohybuje od nuly do blízkosti napájecího napětí. Řídící PWM signál je superponovaný na potenciál neutrálního bodu a objevuje se zde mnoho rušení. Proto je nutné pro správné snímání BEMF upravit signál na povolený rozsah měřicího napětí mikroprocesoru a zvolit vhodný dolnoproustný filtr pro odfiltrování šumu. Filtr má určité dopravní zpoždění signálu. To má za následek nízký rozsah regulovatelných otáček motoru. Jen-Marie Bourgeois přišel s novým postupem snímání BEMF. Při správném zvolení řídicího signálu PWM a snímání, můžeme BEMF měřit přímo z napájecího napětí. Spodní tranzistor můstku je po celou dobu periody otevřen a PWM signálem se řídí pouze horní tranzistor. Tím máme v době, kdy je horní tranzistor uzavřen spodek vinutí uzemněn a odpojen od napájecího napětí. V tuto dobu lze bez problému měřit BEMF. Tato technika má výhodu velkého odstupe signál – šum a má mnohem širší rozsah regulovatelných otáček, díky absenci filtrů, které se používají u předešlé metody.

7.5.2 Senzorové snímání polohy

U náročnějších aplikací se používá snímání polohy Hallova sondami nebo vysoko rozlišujícím rotačním enkodérem na hřídeli motoru. Rotační enkodér má tu výhodu, že funguje od nulových otáček po maximální hodnoty. Víme přesnou polohu motoru, i když motor stojí, což je výhoda hlavně při rozběhu. Enkodér s vysokým rozlišením značně navyšuje cenu celého ústrojí.

Snímání využívající Hallovi sondy je nejrozšířenější druh pozicování rotoru. Nabízí nejlepší kompromis mezi cenou a výkonem snímání. Měří se Hallovo napětí na sondách, které jsou buzeny pohybem rotoru. Po každých 60° nastane na jedné sondě napěťový peak, to je přesná doba, kdy je potřeba zajistit komutaci. Hlavní nevýhoda těchto snímačů je nemožnost využívat je při malých rychlostech z důvodu velmi malého indukovaného napětí.

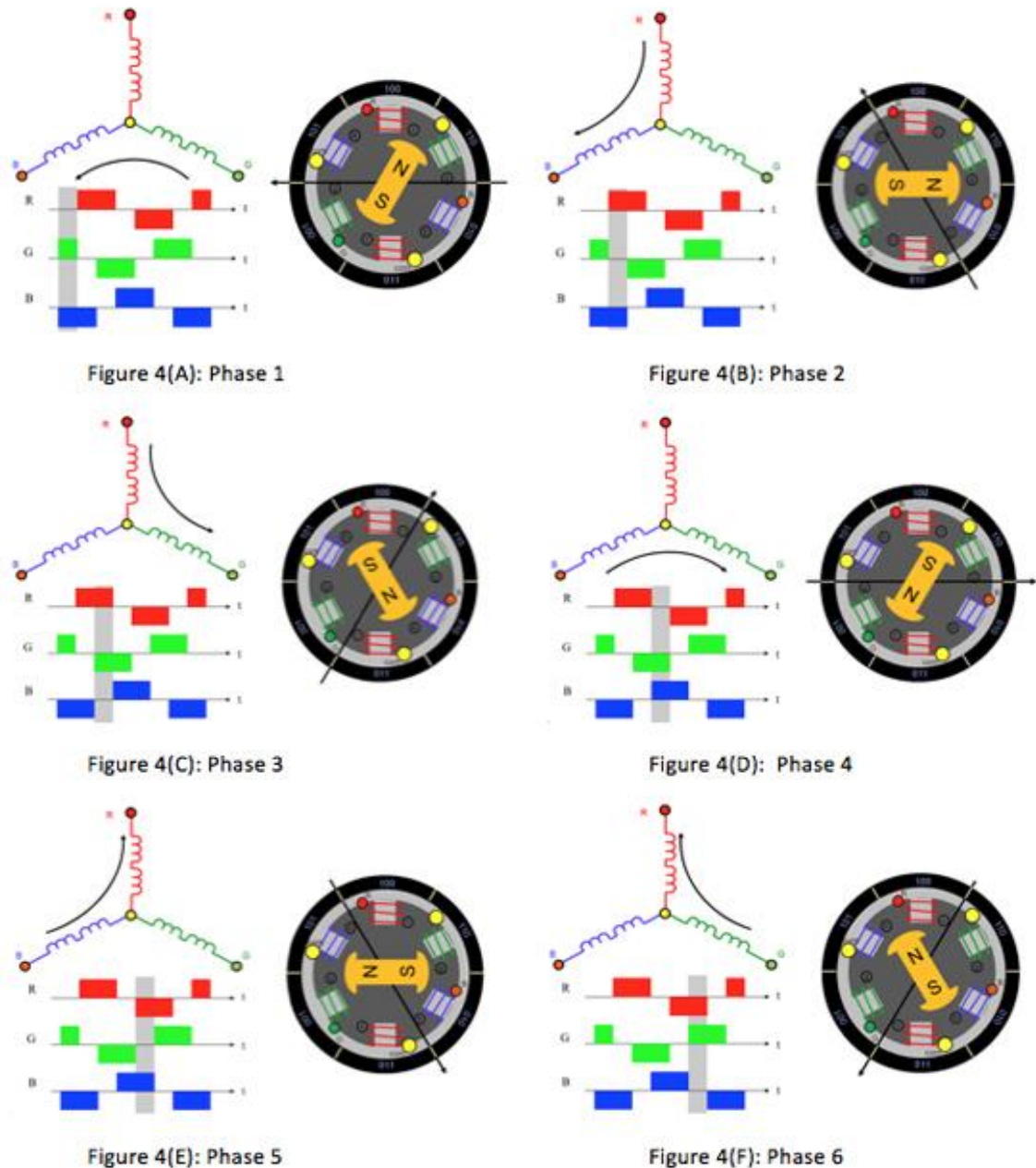
Na *obrázku-11* je vidět rozložený model motoru počítačových ventilátorů.



Obrázek-Rozložený motor- 11 [3]

7.6 Komutace motoru

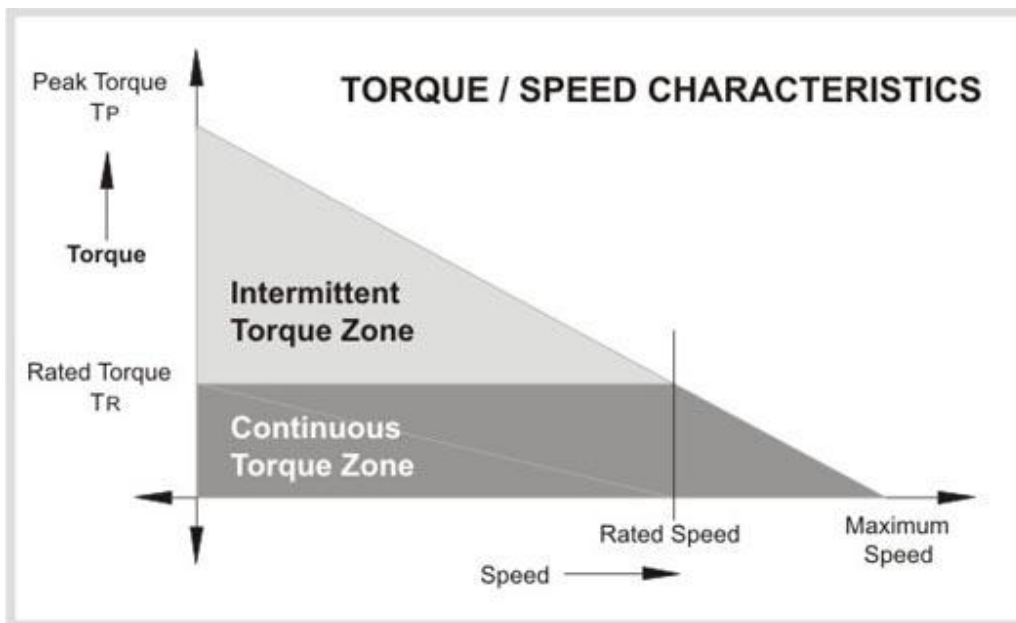
U DC motorů je komutace nejdůležitější funkce. U klasických stejnosměrných motorů dochází ke komutaci na lamelách komutátoru. Mechanický komutátor má ale značné nevýhody a tak bylo potřeba vyvinout lepší technologii. Proto byl vyvinut motor BLDC. V našem případě se jedná o třífázový stejnosměrný motor kde se cívky a jejich polarity přepínají třífázovým střídačem. Musí být zajištěn správný sled spínání, k tomu nám poslouží trojice Hallových sond, které snímají natočení rotoru.



Obrázek-Komutace motoru- 12 [5]

7.7 Charakteristika točivého momentu k rychlosti

U motorů BLDC se rozlišují dvě hodnoty momentu. Jeden je krátkodobý špičkový T_P a druhý je jmenovitý T_R . Pro trvalý provoz může být motor zatížen maximálně jmenovitým momentem, který je konstantní po celém spektru otáček až do hranice jmenovitých otáček. Motor může být využíván na vyšších rychlostech až do 150% jmenovitých otáček, pokud zajistíme adekvátně nižší zátěžný moment. Na *obrázku 14* je vidět charakteristika točivého momentu a výkonu motoru v závislosti na jeho otáčkách. Při rozběhu a změně směru otáček motoru je využíván krátkodobě špičkový moment T_P který je motor schopen dodat



Obrázek–Moment motoru- 13 [10]

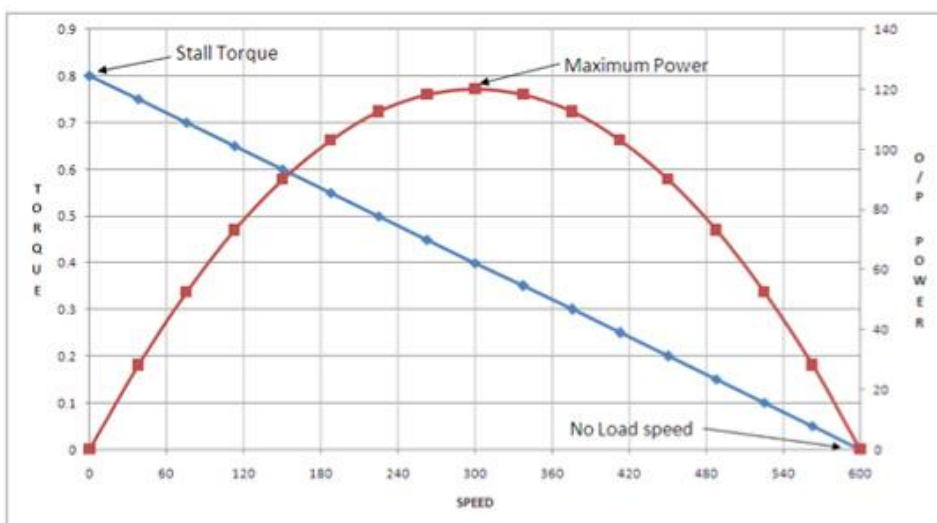


Figure 5: Speed-Torque-Power curve

Obrázek-Moment a výkon- 14 [11]

7.8 Porovnání motorů

Tabulka-Porovnání motorů-2 [12]

	BLDC	BHDC	Asynchronní motor s vinutou kotvou
Mechanická struktura	Vinutí je na statoru, rotor je tvořen permanentními magnety	Vinutí je na rotoru, stator je tvořen permanentními magnety	Vinutí je na obou částech stroje, napájení je přivedeno na stator
Údržba	Nízká nebo žádná	Periodická	Nízká
Moment/rychlost	Lineární	Střední, ve vysokých otáčkách prudký pokles kvůli kartáčům	Nelineární
Účinnost	Vysoká	Střední, ztráty v komutátoru	Nízká
Metoda komutování	Vnější řízení polovodiči	Mechanická komutace na komutátoru	Nutnost speciálního rozběhu
Rozmezí rychlosti	Vysoká	Střední	Nízká, závislost na napájecí frekvenci
Elektrické rušení	Nízké	Vysoké	Nízké
Detekce polohy rotoru	Hallovi sondy, optický enkodér, atd.	Automaticky, zajištěno komutátorem	Není potřeba
Reverzace	Otočením sledu spínání fází	Otočením polarity napájecího napětí	Změnou sledu napájecích fází
Řízení	Řízení je nutno vždy, řídí elektrickou komutaci	Pro stálou rychlost není třeba, pro změnu rychlosti je nutnost	Pro stálou rychlost není třeba, pro změnu rychlosti je nutnost
Cena	Vysoká, nutnost řídicí logiky	Nízká	Nízká

7.9 Zvolené motory

7.9.1 EMAX CF2822

Jedná se o malý modelářský motor s vnějším rotorem. Motor je velice lehký, pouze 39g, ale díky použití nejnovějších feromagnetických materiálů dosahuje výkonu až 140W. Je určen k napájení z 2-3 Li-Pol baterií. Motor má napěťovou konstantu 1200ot/V je tedy vhodný pro využití spíše v leteckých modelech. Jeho maximální efektivita je 82% při zatížení 7-12A. Tento motor nám posloužil při vývoji a programování v domácích podmínkách kde nemáme přístup k výkonným zdrojům pro napájení velkého motoru. Díky svým rozměrům se také dobře přenášel.



Obrázek-EMAX CF2822- 15 [15]

7.9.2 Motor elektrokoloběžky

Motor je zastavěn do ráfku pro 10“ duši. Nominální napětí motoru je 48V. Trvale je motor schopen dodávat výkon 890W a špičkově až 1175W. Motor má 40Nm krouticí moment a maximální účinnost je 85%. Jeho nominální otáčky jsou 280ot/min.

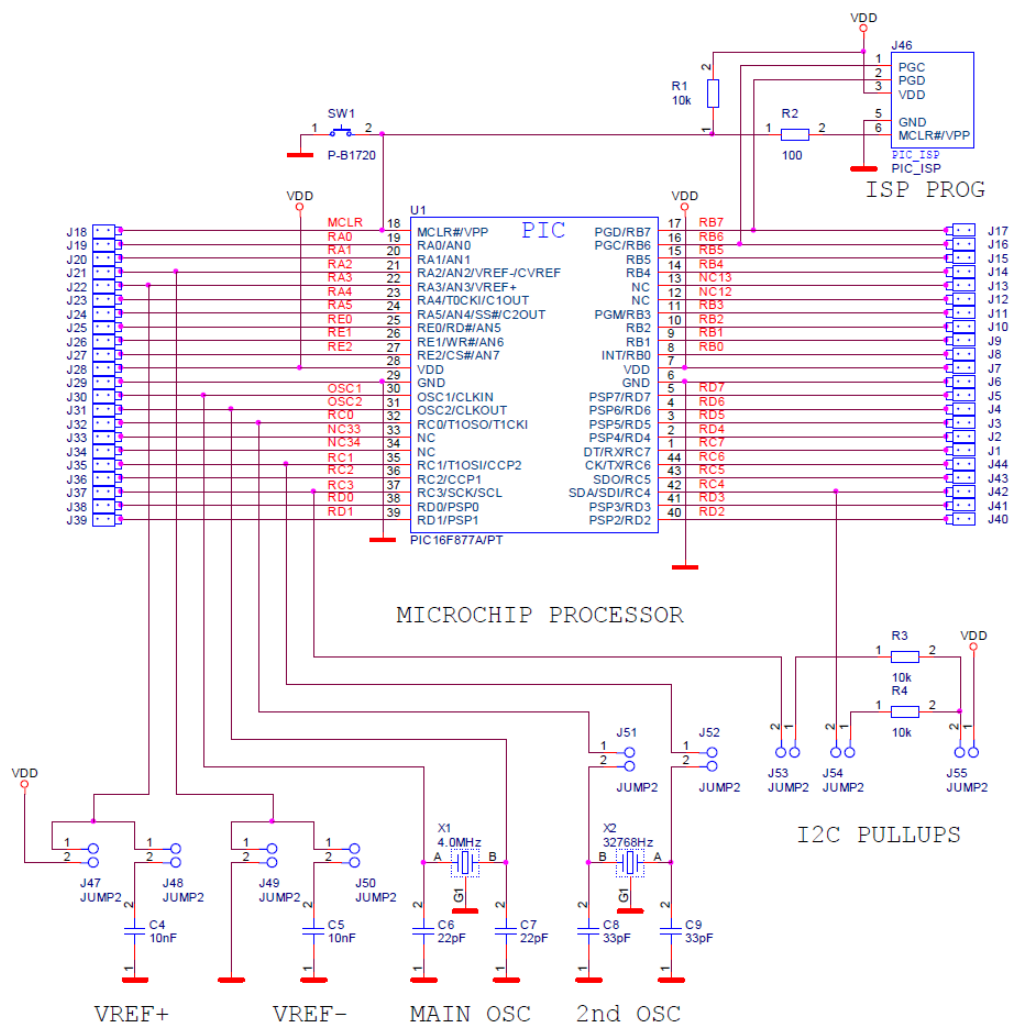


Obrázek-Elektromotor koloběžky- 16 [19]

8 Řídící jednotka

Řídící jednotka je srdcem celého pohonu koloběžky. Jako řídicí obvod byl zvolen procesor PIC16F887. Tento procesor má výpočetní výkon až 5MIPSů a obsahuje velké množství vstupně výstupních periférií.

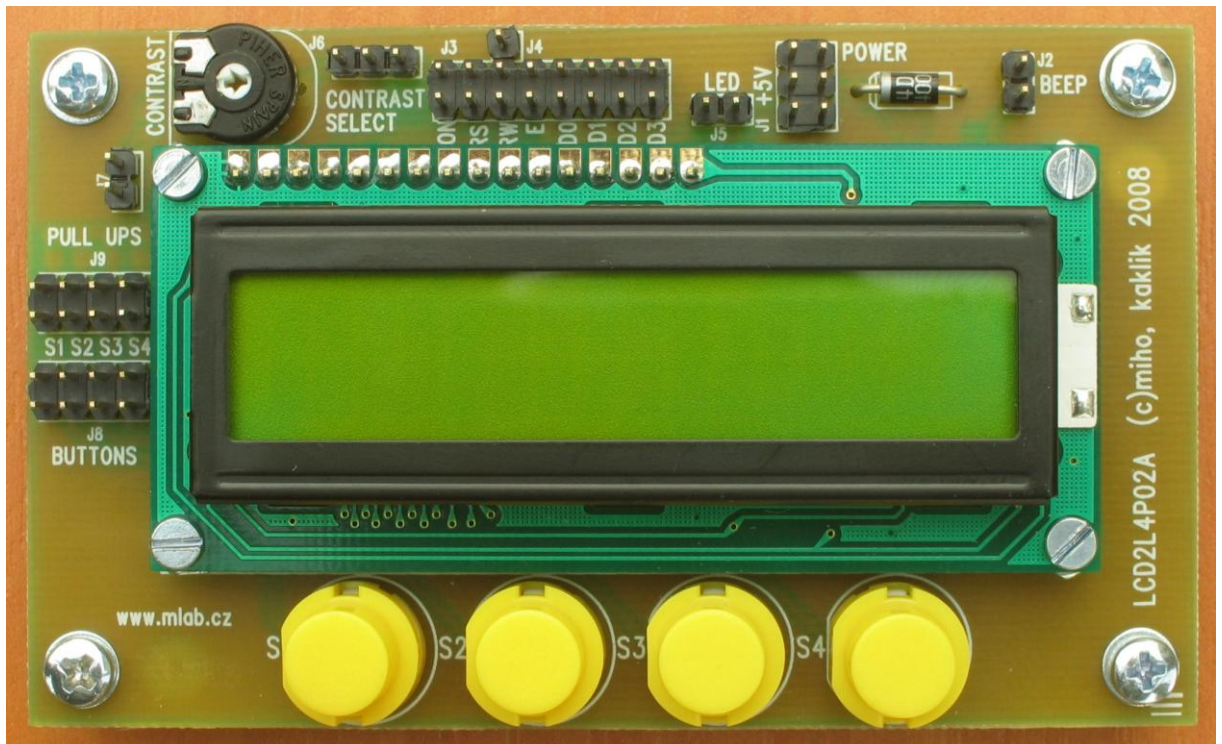
Na obrázku 7.1 je vidět navržená vývojová deska s tímto procesorem. Plošný spoj i se schématem je převzat ze stránek MLAB (UST store) se kterým jsme pracovali na střední škole [13]. Na desce plošného spoje je umístěn 20MHz krystal od kterého se odvozují vnitřní hodiny. Dále pak programovací logika ISP programování pomocí PicKit2 nebo PicKit3 s resetovacím tlačítkem, které vrátí procesor na nulový vektor v případě zamrznutí programu.



Obrázek Vývojový kit mikroprocesoru 17 [14]

Procesor se programuje pomocí ISP (in system programming) což umožňuje při vhodném zapojení programovacích vývodů PGD a PGC programovat přímo v zapojení bez nutnosti procesor odpojovat a vkládat do programátoru. Pickit si procesor sám resetuje při nutnosti programování.

Na bráně D je zapojen textový display pro jednoduché vypisování. Modul je opět z konstrukcí MLAB [14]. Pod displejem se nachází čtveřice bezzákmitových tlačítek s možností připojení pull-up rezistorů. Display je osazen klasickým řadičem od firmy Hitachi HD44780, ke kterému jsou napsané knihovny jak pro AVR tak pro PIC který používáme. Display má rozlišení 2x40 znaků a je do něj možnost naprogramovat až 8 uživatelských znaků. Zobrazovač umožňuje zápis dat buď všech 8 bitů naráz nebo 2x4bity což ušetří potřebné porty procesoru.



Obrázek-Modul displeje- 18 [14]

9 Závěr

Předmětem bakalářské práce bylo navrhnout a experimentálně otestovat funkčnost navrhnutých celků. V první části vývoje bylo v plánu využívat 16bit signálový procesor dsPIC33F, ale po několika nezdarech s oživením procesoru a jeho následným programováním jsme ustoupili od několika konstrukčních řešení a zvolili již otestovaný a plně funkční vývojový kit s procesorem PIC16F887.

Navržená deska budiče motoru spolupracuje tedy s výše uvedeným procesorem a je schopna ovládat modelářský BLDC motor. Po osazení výkonnějšími tranzistory a vybavením chladičem by zvládla plně ovládat i výkonný motor koloběžky.

V prvotním plánu bylo na koloběžku implementovat obousměrný měnič napětí, který by zajišťoval rekuperaci za jakýchkoliv podmínek. Bohužel kvůli rozsáhlosti a náročnosti projektu jsme od měniče a plné rekuperace opustili. Rekuperovat náš prototyp umí pouze v případě, že má motor dostatečně velké otáčky aby jeho indukované napětí bylo větší než napětí baterie.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] [HTTP://CS.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/LITHIUM-ŽELEZO-FOSFÁTOVÝ_AKUMULÁTOR](http://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-železo-fosfátový_akumulátor)
- [2] <http://www.wanmabattery.com/upfile/200904/20090427145523503.gif>
- [3] www.ecnmag.com/sites/ecnmag.com/files/legacyimages/ec1205tf102Figure1_web.jpg
- [4] http://forum.allaboutcircuits.com/image_cache/httpletsmakerobots.com/files/user/picsu610BLDC.jpg
- [5] <http://m.eet.com/media/1178413/bldcfig4.jpg>
- [6] <http://lawrencemattthew.files.wordpress.com/2013/03/brushlessmotors7.jpg>
- [8] <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [9] <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [10] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/ca/Brushless_DC_Electric_Motor_Torque-Speed_Characteristics.png
- [11] <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/2/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [12] <http://www.edn.com/design/sensors/4406682/2/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [13] <http://www.mlab.cz/Modules/PIC/PIC16F87xTQ4401A/DOC/PIC16F87xTQ4401A.cs.pdf>
- [14] <http://www.mlab.cz/Modules/HumanInterfaces/LCD2L4P02A/DOC/LCD2L4P02A.cs.pdf>
- [15] <http://www.pakhobby.com/wp-content/uploads/2013/05/big-emax-cf2822-1200kv-brushless-motor-for-rc-airplane-tripcopter-quadcopter.jpg>
- [16] <http://www.ecotech.cz/wp-content/uploads/2012/07/IMAG1349.jpg>
- [17] <http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/irf/ir2110.pdf>
- [18] <http://www.nmbtc.com/brushless-dc-motors/brushless-dc-motors.html>
- [19] <http://www.ecotech.cz/wp-content/uploads/2012/07/IMAG1349.jpg>

Seznam obrázků a tabulek

TABULKA-PŘEHLED BATERIÍ-1	5
TABULKA-POROVNÁNÍ MOTORŮ-2 [12]	22
OBRÁZEK-BLOKOVÉ SCHÉMA POHONU- 1	3
OBRÁZEK-VYBÍJECÍ CHARAKTERISTIKA- 2 [2]	6
OBRÁZEK-ZÁKLADNÍ SCHÉMA STŘÍDAČE- 3	7
OBRÁZEK-VYUŽITÍ GDT- 4	9
OBRÁZEK- KATALOGOVÉ ZAPOJENÍ IR2110- 5 [17]	10
OBRÁZEK-SCHÉMA DRIVERU- 6	11
OBRÁZEK-PLOŠNÝ SPOJ DRIVERU- 7	12
OBRÁZEK-OSCILOGRAM NAPĚTÍ- 8	13
OBRÁZEK-OSCILOGRAM PROUDU- 9	14
OBRÁZEK-ROTOR A STATOR BLDC- 10 [6]	17
OBRÁZEK-ROZLOŽENÝ MOTOR- 11 [3]	19
OBRÁZEK-KOMUTACE MOTORU- 12 [5]	20
OBRÁZEK-MOMENT MOTORU- 13 [10]	21
OBRÁZEK-MOMENT A VÝKON- 14 [11]	21
OBRÁZEK-EMAX CF2822- 15 [15]	23
OBRÁZEK-ELEKTROMOTOR KOLOBĚŽKY- 16 [19]	24
OBRÁZEK VÝVOJOVÝ KIT MIKROPROCESORU 17 [14]	25
OBRÁZEK-MODUL DISPLEJE- 18 [14]	26