

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Motoriky malých výkonů

vedoucí práce: Ing. Vladimír Kindl Ph.D.

Plzeň 2012

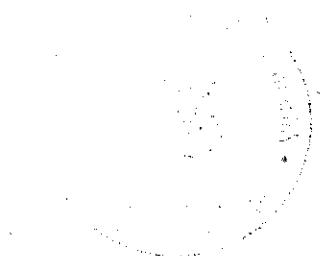
autor: Jiří Franc

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří FRANC**
Osobní číslo: **E09B0041P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Motorky malých výkonů**
Zadávající 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. Z dostupných podkladů vypracujte přehled používaných typů elektrických strojů malých výkonů (EC, BLDC, PMSM, ...).
2. Popište jejich častá konstrukční uspořádání.
3. Vytvořte prezentaci vhodnou pro výukové účely.

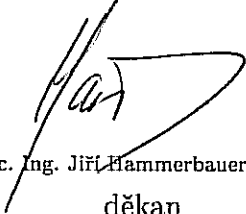


Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

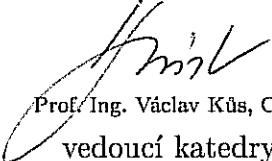
1. elektronické informační zdroje
2. Bartoš, V: Elektrické stroje I, II. VŠSE v Plzni, 1986
3. Pyrhönen, J., Jokinen, T., Hrabovcová, V.: Design of rotation electrical machines. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Kindl
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 17. října 2011
Termín odevzdání bakalářské práce: 3. června 2012


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce se zabývá problematikou konstrukčního rozdělení motorků malých výkonů. Mezi kapitolami, týkajícími se použití, rozdělení a principu je zařazena majoritní kapitola pojednávající o konstrukci. Tato kapitola je doplněna o obrázky 3D modelů každého typu motorku. Tyto modely byly namodelovány nejen pro samotnou bakalářskou práci, ale také pro rozsáhlou prezentaci, která je dle zadání uzpůsobena pro výukové účely.

Klíčová slova

Motorčky malých výkonů, synchronní motor, synchronní motor s permanentními magnety, bezkartáčový motor, elektronická komutace, elektronicky komutovaný motor, Hallova sonda, permanentní magnet

Abstract

Low power electrical machines

The bachelor theses presents issues of structural division of low power electrical machines. Among chapters regarding application, division and principal, there is one major chapter about construction. This chapter is amended with pictures of 3D models of each motor. These models were modelled not only for this very bachelor theses, but for ample presentation also, which is according to the task adapted for teaching purposes.

Keywords

Low power electrical machines, synchronous motor, synchronous motor with permanent magnets, brushless motor, electronic commutation, electronically commutated motor, Hall sensor, permanent magnet

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

Obsah

OBSAH	6
ÚVOD	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
1 ROZDĚLENÍ	9
1.1 ROZDĚLENÍ DLE PRŮBĚHU NAPĚTÍ	9
1.2 ROZDĚLENÍ DLE ROTORU	9
1.3 ROZDĚLENÍ DLE KONSTRUKCE	10
1.4 ROZDĚLENÍ DLE PRŮBĚHU MAGNETICKÉHO TOKU	10
1.5 ROZDĚLENÍ DLE ZPŮSOBU ŘÍZENÍ	10
2 POŽADAVKY	11
3 KONSTRUKCE	12
3.1 MOTORKY S RADIÁLNÍM TOKEM	12
3.1.1 <i>Motorky s vnitřním rotorem</i>	12
3.1.2 <i>Motorky s vnějším rotorem</i>	13
3.2 MOTORKY S AXIÁLNÍM TOKEM	15
3.3 MOTORKY S TRANSVERZÁLNÍM TOKEM	16
3.4 LINEÁRNÍ MOTORKY	18
3.5 3D MODELY MOTORKŮ	19
3.5.1 <i>Motorek s radiálním tokem – vnější rotor</i>	19
3.5.2 <i>Motorek s radiálním tokem – vnitřní rotor</i>	21
3.5.3 <i>Motorek s axiálním tokem</i>	23
3.5.4 <i>Motorek s transverzálním tokem</i>	24
3.5.5 <i>Lineární motorek</i>	25
4 PRINCIP	27
4.1 OBEČNÝ PRINCIP FUNGOVÁNÍ	27
4.2 SNÍMAČE POLOHY	29
4.2.1 <i>Hallova sonda</i>	29
4.2.2 <i>Optický inkrementální snímač</i>	29
4.2.3 <i>Absolutní optický snímač</i>	31
4.2.4 <i>Bezsenzorové snímání</i>	31
5 PERMANENTNÍ MAGNETY	32
5.1 MAGNETICKY TVRDÉ FERITY	33
5.2 SLITINY ALNiCo	33
5.3 MATERIÁLY ZE VZÁCNÝCH ZEMIN	34
6 POUŽITÍ	35
6.1 PMSM, BLDC, EC	35
6.2 LINEÁRNÍ MOTORY	37
6.3 VÝHODY A NEVÝHODY	37
ZÁVĚR	39
POUŽITÁ LITERATURA	40

Úvod

Cílem mé bakalářské práce je vytvořit ucelený přehled nejčastějších konstrukčních uspořádání motorků malých výkonů (dále jen motorky).

Bakalářská práce obsahuje několik kapitol, které se snaží co nejvíce přiblížit problematiku spojenou s těmito motorky.

První kapitola pojednává o rozdělení motorků. Je zde uvedeno několik nejčastějších dělení. Tuto kapitolu jsem se rozhodl do bakalářské práce zařadit z toho důvodu, že si většina firem, které vyrábějí tyto motorky, zavádí svá vlastní rozdělení. Proto se v kapitole rozdělení snažím vnést jistý řád do velkého množství různých motorků.

Další kapitola, která navazuje na předchozí je kapitola Požadavky. Vzhledem k velkému množství různých aplikací motorků jsem považoval za nezbytné tuto kapitolu zavést. Jsou zde zmíněny nejčastější požadavky na motorky z různých odvětví. Jako například počítačová technika, automobilový průmysl a tak dále.

Následující kapitola již pojednává o hlavním tématu této bakalářské práce. A tím je konstrukční uspořádání. Zde jsou podrobně popsány jednotlivé typy motorků. Pro větší názornost zde nechybí ani obrázky 3D modelů, tedy různé řezy jejich strukturou a pohledy. Kapitola konstrukce celkově tvoří převážnou část bakalářské práce.

Považoval jsem za nutné zmínit, alespoň okrajově, princip fungování zmíněných motorků. Tím se zabývá další kapitola s názvem Princip. Je zde uvedeno pouze principiální vysvětlení funkce a způsob snímání polohy rotoru.

Kapitola, která následuje je úzce spjata s kapitolou Konstrukce. Jedná se o několik odstavců, které se zabývají permanentními magnety, což je nedílná součást všech motorků o kterých tato bakalářská práce pojednává. Jsou zde uvedeny hlavně výhody a nevýhody používaných materiálů.

Na závěr jsem se rozhodl zařadit kapitolu Použití, ve které se nachází výčet všech výhod a nevýhod a typické aplikace pro motorky. Ať už je to lékařství, automobilový průmysl, počítačová technika nebo strojírenství.

Spolu s touto prací jsem také vytvořil, dle zadání, prezentaci, která je vhodná pro výukové účely. Prezentace, ve své podstatě, kopíruje jednotlivé body této bakalářské práce s tím rozdílem, že redukuje množství textu, oproti psané formě, na minimum. V prezentaci je kladen důraz na obrázky a na 3D modely, které jsem vytvořil.

Seznam symbolů a zkratek

AFPM	Axial-flux Permanent-magnet
AlNiCo	Aluminium Nickel Cobalt
BLDC	BrushLess Direct Current
CD	Compact Disc
CNC	Computer Numerical Control
DVD	Digital Versatile Disc
EC	Electronically Commutated
HS1, HS2, HS3.....	Hallový sondy1-3
PM.....	Permanentní magnet
PMSM	Permanent magnet synchronous motor
PWM	Pulse width modulation
TFM.....	Transversal-flux motor
B	Magnetická indukce [T]
B _R	Remanentní indukce [T]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
H _C	Koercitivní intenzita [A/m]
I	Elektrický proud [A]
k	Hallová konstanta [-]
U _H	Hallové napětí [V]
φ	Úhel natočení [°]

1 Rozdělení

Tato část práce bude věnována rozdělení motorků malých výkonů dle různých parametrů. Jelikož si většina výrobců vytváří svá vlastní rozdělení, není proto jednoduché vytvořit přehled, který by zahrnul všechny typy. Ale i přesto existuje několik parametrů, podle kterých by se toto rozdělení dalo vytvořit. Jsou to:

- průběh napětí
- rotor
- konstrukce
- magnetický tok
- způsob řízení

1.1 Rozdělení dle průběhu napětí

Rozdělení dle průběhu napětí je asi nejobecnější, ale zároveň trochu zavádějící, jelikož, některé motory mohou fungovat jak na střídavé, tak i na stejnosměrné napětí.

- ❖ Stejnosměrné napětí
- ❖ Střídavé napětí

1.2 Rozdělení dle rotoru

U tohoto rozdělení proti sobě stojí dva typy motorků, a to reluktanční a krokový. Konstrukčně jsou tyto motorky totožné. Nicméně na oba jsou kladeny různé požadavky. U reluktančního motorku jsou to konstantní otáčky a také vysoké otáčky. U krokového motorku je to přesný úhel otočení podle toho, jaké cívky jsou buzeny.

- ❖ reluktanční motorek
- ❖ krokový motorek

1.3 Rozdělení dle konstrukce

Motorky mohou být buď válcové, nebo diskové. Diskové motorky se dále dělí podle toho, jestli je rotor vnitřní nebo vnější. Tvar motorku je volen podle toho, kde bude následně použit a zda bude jeho tvar vyhovovat konstrukčním parametrům celého výrobku.

- ❖ válcové
 - s rotorem vnitřním
 - s rotorem vnějším
- ❖ diskové

1.4 Rozdělení dle průběhu magnetického toku

Tímto rozdělením se rozumí, jakým směrem se uzavírá magnetický tok.

- ❖ motory s radiálním tokem
- ❖ motory s axiálním tokem
- ❖ motory s transversálním tokem

1.5 Rozdělení dle způsobu řízení

Toto rozdělení se týká signálu, kterým jsou motorky řízeny. Přesněji jeho tvaru a průběhu. Obdélníkové řízení je řízení, které je pevně dané spínacím diagramem. Naproti tomu řízení šířkové pulsně modulované spočívá v souběhu neboli koincidenci dvou signálů, sinusového (modulačního) signálu a pilového (nosného) signálu. Pro tuto modulaci se používá zkratka PWM.

- ❖ obdélníkové řízení
- ❖ sinusové - šířkové pulsně modulované řízení

2 Požadavky

V této kapitole se zaměřím na požadavky, které jsou kladené na motorky. Požadavky se celkově mohou lišit, podle toho, kde konkrétně je chceme použít. Jiné požadavky budou kladeny na motorek, který bude polohovat světla u automobilu a jiné na motorek, který bude zabudovaný v pevném disku do počítače.

I přes výše uvedené lze sepsat seznam požadavků, který zahrne většinu důležitých vlastností motorků. Jsou to například:

- malá pulsace momentu
- tichý chod bez vibrací
- malá stavební výška
- nízká spotřeba
- přiměřená cena
- u přenosných zařízení i minimální hmotnost
- přesný úhel natočení rotoru
- vysoký rozsah otáček
- životnost

Malá pulsace momentu je nejdůležitější u motorků, které pohání pevné disky a CD/DVD mechaniky. U těchto zařízení je nezbytné udržovat vysokou konstantní rychlost při čtení dat. Při nedodržení požadované rychlosti může dojít ke zpomalení přístupu k datům uložených na disku. Malá spotřeba elektrické energie a nízká hmotnost jsou důležité pro přenosná zařízení, jako je například externí disk.

Malá stavební výška je klíčová pro zařízení, jako je ventilátor nebo pro jiné aplikace, kde je hlavním požadavkem ušetření prostoru nebo specifický tvar stroje.

U některých aplikací je důležité, aby se rotor natočil pouze do určité polohy, a v té zůstal. Tento požadavek je nejčastější v automobilovém průmyslu. Například u nastavování dálkových světlometů.

Již v předchozí kapitole bylo zmíněno to, že většina výrobců si vytváří svá vlastní rozdělení. Z toho vyplývá, že existuje velké množství provedení motorků pro nejrůznější aplikace a s tím souvisí i jejich různá dělení.

3 Konstrukce

Zde se více zaměřím na hlavní téma bakalářské práce. V následujících několika bodech shrnu stavbu jednotlivých typů motorků a uvedu podrobný popis dílčích konstrukčních částí.

V této kapitole se budu nejvíce zabývat rozdělením 1.3 Rozdělení dle konstrukce a 1.4 Rozdělení dle průběhu magnetického pole z kapitoly 1. Tato rozdělení byla vybrána, protože nejlépe vystihují konstrukční rozdíly mezi jednotlivými motorky.

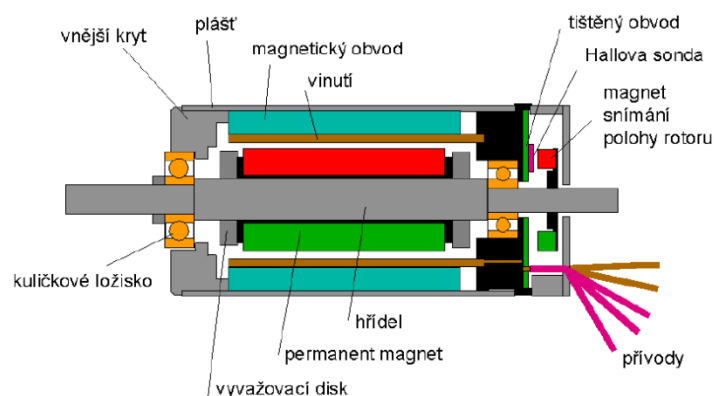
3.1 Motorky s radiálním tokem

Těmto motorkům se také říká válcové pro jejich typický válcový tvar. Oproti ostatním typům motorků je právě tento typ nejjednodušší na zkonstruování.

3.1.1 Motorky s vnitřním rotorem

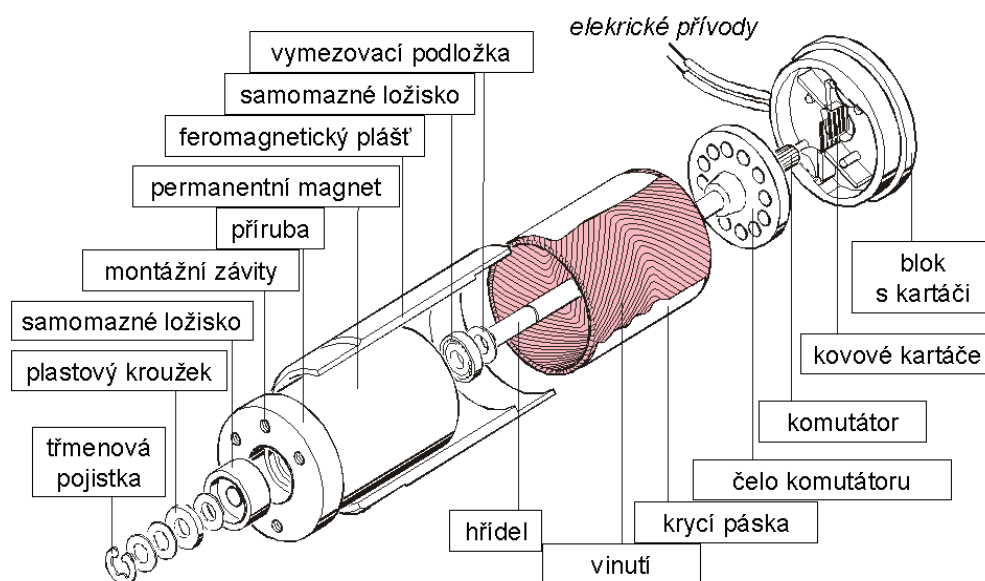
Konstrukční uspořádání tohoto typu motorku je patrné z obrázku 3.1. Hlavními částmi motorku jsou: stator (plášť, vnější kryt, magnetický obvod, vinutí, kuličkové ložisko), rotor (magnet snímání polohy rotoru, hřídel, permanentní magnet, vyvažovací disk), řídicí jednotka (tištěný obvod, Hallova sonda).

Stator je tvořen magnetickým obvodem z feromagnetického materiálu, který se skládá z izolovaných plechů, v jejichž drážkách je umístěno nejčastěji trojfázové vinutí zapojené do hvězdy. Materiál pro vinutí bývá ve většině případů měď. Jako snímač polohy se používá Hallova sonda nebo optické snímače. Hallova sonda se bude podrobněji věnovat kapitola 4. Na statoru se také nachází tištěný obvod, který se stará o řízení elektronické komutace. Dále jsou zde již výše zmíněné Hallovy sondy, které spolupracují s řídicí jednotkou a určují polohu rotoru. Na obr. 3.1 jsou patrné i vývody statorového vinutí a vývody řídicí jednotky. (Höll, 2010, s. 13-14)



Obr. 3.1 Konstrukční uspořádání motorku s radiálním tokem s vnitřním rotorem

„Na rotoru, který může být jak z plechů, tak i z plného materiálu, jsou umístěny permanentní magnety. Magnety mohou být nalepeny přímo na povrchu rotoru nebo být vloženy přímo do tělesa rotoru.“ (Höll, 2010, s. 13-14)



Obr. 3.2 3D model válcového EC motorku od firmy MAXON

Na obrázku 3.2 je vidět motorek, jehož permanentní magnet má dva póly. Na jeho výrobu je použit materiál ze vzácných zemin. Satorové vinutí je patentované firmou MAXON. Toto vinutí je rozděleno do tří sekcí, které jsou řídicí jednotkou, postupně napájeny proudem. Proud mění svůj směr v závislosti na poloze rotoru. Řídicí jednotky mohou být složitější (vytvářejí sinusový průběh) nebo jednodušší (vytváření obdélníkový průběh).

Většina motorků s vnitřním rotorem je používána ve vícefázovém provedení ve snaze snížit problémy spojené s rozběhem jednofázového motorku.

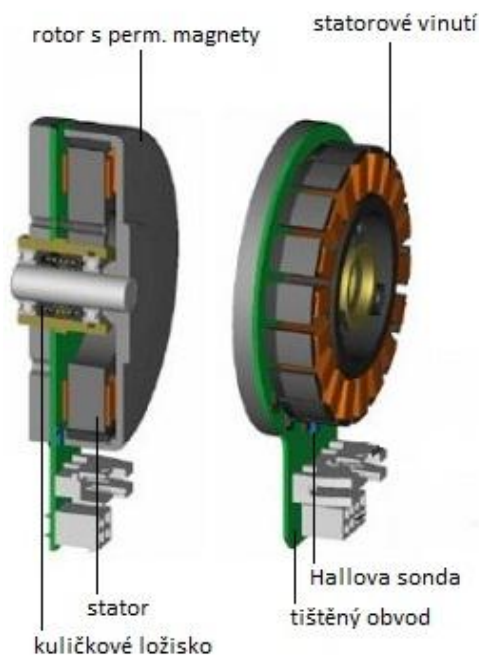
3.1.2 Motorky s vnějším rotorem

Konstrukční uspořádání tohoto motorku se od předchozího typu poněkud liší. Zásadní změna je ta, že rotor již není schován uvnitř statoru. Rotor, jak je vidět na obrázku 3.3, obklopuje stator. Nicméně hřídel stále prochází středem statoru. Z toho vyplývají jisté výhody, ale i nevýhody, které budou zmíněny v kapitole 6.

Výčet jednotlivých částí, ze kterých se motor skládá, je stejný jako u předchozího typu s tím rozdílem, že satorové vinutí již není umístěno v drážkách, ale je navinuto na jednotlivých pólech, což je typické pro motorky s nízkými otáčkami. Na statoru samozřejmě nesmí chybět tištěný obvod s řídicí jednotkou a také příslušný počet snímačů polohy rotoru tj. Hallových sond. Rotor je tvořen opět permanentními magnety, které jsou

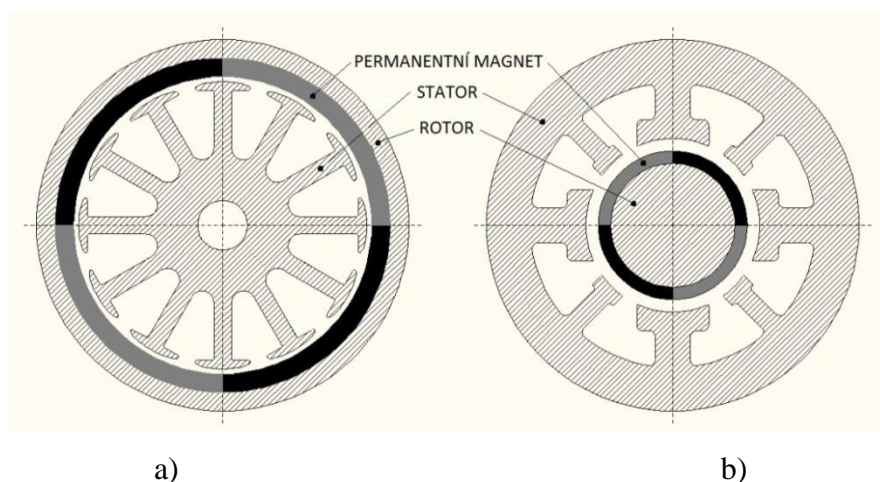
upevněny v ochranném plášti, respektive krytu rotoru, který je vyroben z magneticky měkké oceli.

Provedení obou typů motorků může být jednofázové ale i vícefázové. Na obrázku 3.4a je znázorněn příklad vícefázového válcového motorku s vnějším rotorem. Vedle je uveden příklad jednofázového válcového motorku s vnitřním rotorem.



Obr. 3.3 Válcový motorek s vnějším rotorem

Z obrázku 3.4 je také vidět, že motorek s vnějším rotorem má větší permanentní magnety. To má za následek větší magnetický tok oproti motorku s vnitřním rotorem. Pro dosažení stejného magnetického toku u motorku s vnitřním rotorem by bylo potřeba použít jiný materiál.



Obr. 3.4 Řez – válcový motorek a) s vnějším rotorem b) s vnitřním rotorem

Motorky s vnějším rotorem jsou nejčastěji vidět v provedení jednofázovém. I když je samozřejmě možné vyrobit variantu vícefázovou, která je znázorněna na obrázku 3.4.

To, jaký má efekt změna počtu pólů a fází na vlastnosti motoru, je znázorněno v tabulce 3.1.

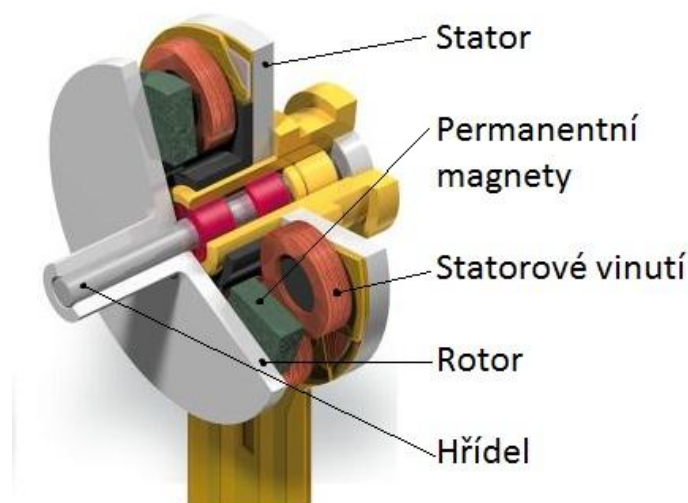
Změna		Jak se změní vlastnosti			
		Zubování	Rychlost	Točivý moment	Cena
počet pólů	zvýšení	↓	↓	↑	↑
	snížení	↑	↑	↓	↓
počtu fází	zvýšení	↓	-	-	↑
	snížení	↑	-	-	↓

Tab. 3.1 Dopad změny počtu pólů a fází na vlastnosti motorku

3.2 Motorky s axiálním tokem

Tento typ konstrukce se vyznačuje velice malou délkou rotoru, proto se jim také říká diskové motorky. Z toho vyplývají i jeho největší výhody a také použití, jež budou zmíněny v kapitole 6.

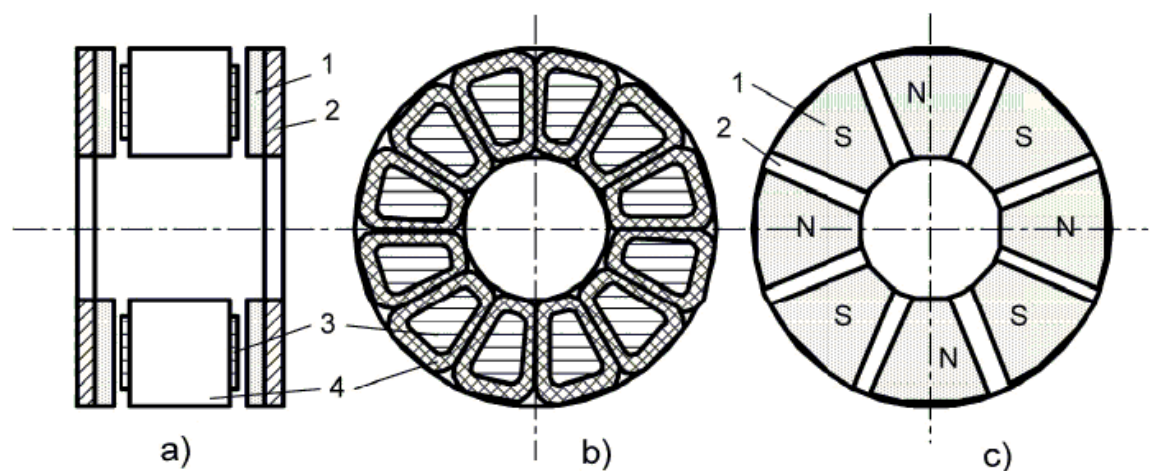
Diskové motorky se od válcových odlišují zejména polohou permanentních magnetů vůči ose hřídele. Jejich poloha je radiální. To znamená, že stator a rotor mají téměř stejný průměr a jsou od sebe umístěny na vzdálenost vzduchové mezery. Konstruktivní uspořádání tohoto motorku je vyobrazeno na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 Motorek s axiálním tokem (diskový)

„Rotor AFPM je nejčastěji vyroben z plného magnetického materiálu, na jehož povrchu jsou nalepeny segmenty permanentních magnetů. Mnohem náročnější je výroba statoru. Pro dosažení vysokého momentu je nutné, aby byl stator vyroben z magnetického materiálu. Z důvodu omezení ztrát v železe je nevhodné stator vyrobit z plného materiálu. Stator je obvykle vyroben z neorientovaných elektromagnetických plechů, na jejichž obou stranách je v „drážkách“ umístěno nejčastěji třífázové vinutí.“ (Höll, 2010, s. 17-18)

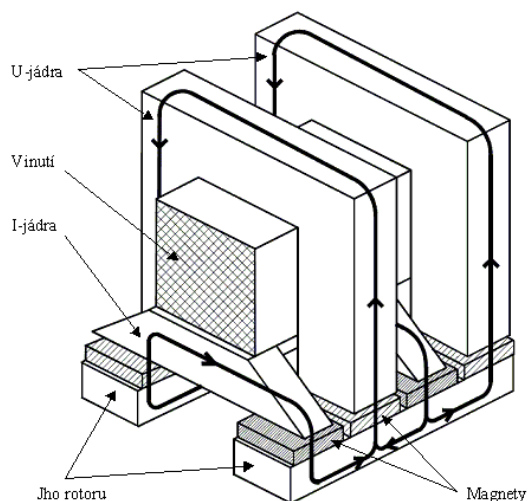
Motorky tohoto typu se vyznačují obtížnou realizací statorového vinutí. To z toho důvodu, že není možné vinutí navíjet strojně. Motorky mohou být také v provedení s oboustranným rotorem, viz obrázek 3.6a. (Höll, 2010, s. 17)



Obr. 3.6 Oboustranný PMSM a) podélný řez b) stator c) rotor
1 – Permanentní magnet, 2 – jeho rotoru, 3 – statorový pól, 4 - vinutí

3.3 Motorky s transverzálním tokem

Motorky s transverzálním tokem jsou asi zatím nejméně používané motorky. Důvodem je poměrně komplikovaná konstrukce. To se týká zejména statoru. V praxi jsou nejvíce využívány jednostranné motorky, které jsou pro případnou výrobu nejjednodušší. Konstrukční uspořádání jedné fáze je znázorněno na obrázku 3.7. (Höll, 2010, s. 18-19)

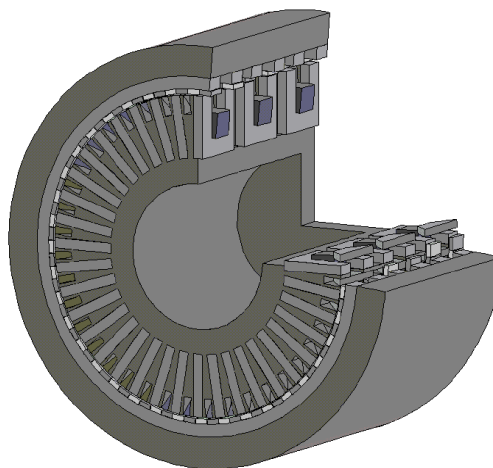


Obr. 3.7 Lineární motorek s transverzálním tokem s magnety na povrchu

„Stator TFM je tvořen U a I-jádry, která jsou vyrobena z důvodu omezení ztrát v železe z izolovaných plechů. Vinutí jedné fáze je tvořeno pouze jednou cívkou, která je obklopena U a I-jádry. Rotor jedné fáze je tvořen dvěma jhy z magnetického materiálu, na jejichž povrchu jsou nalepeny PM. Jha jedné fáze jsou vůči sobě pootočena o 180° elektrických. U třífázového TFM jsou pak další fáze vzájemně pootočeny o 120° respektive 240° elektrických.“ (Höll, 2010, s. 19)

Konstrukční uspořádání celého třífázového motorku s magnety na povrchu je vyobrazeno na obrázku 3.8.

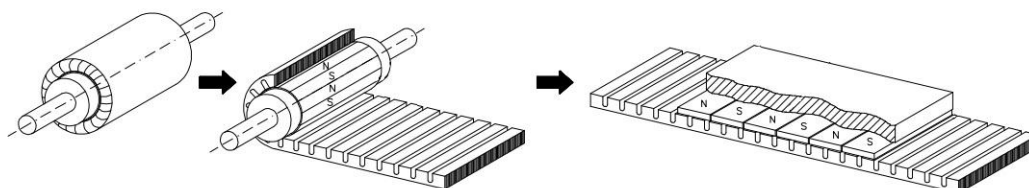
Ve většině případů jsou motorky s transverzálním tokem díky vhodné konstrukci vícepólové s malou pólovou roztečí. Při pólové rozteči kratší, než je optimální, se výrazně zvyšuje rozptylový tok mezi jednotlivými póly. Pokud je pólová rozteč naopak delší než optimální, dochází ke snížení dosažitelné hustoty momentu.



Obr. 3.8 Třífázový motorek s transverzálním tokem s magnety na povrchu

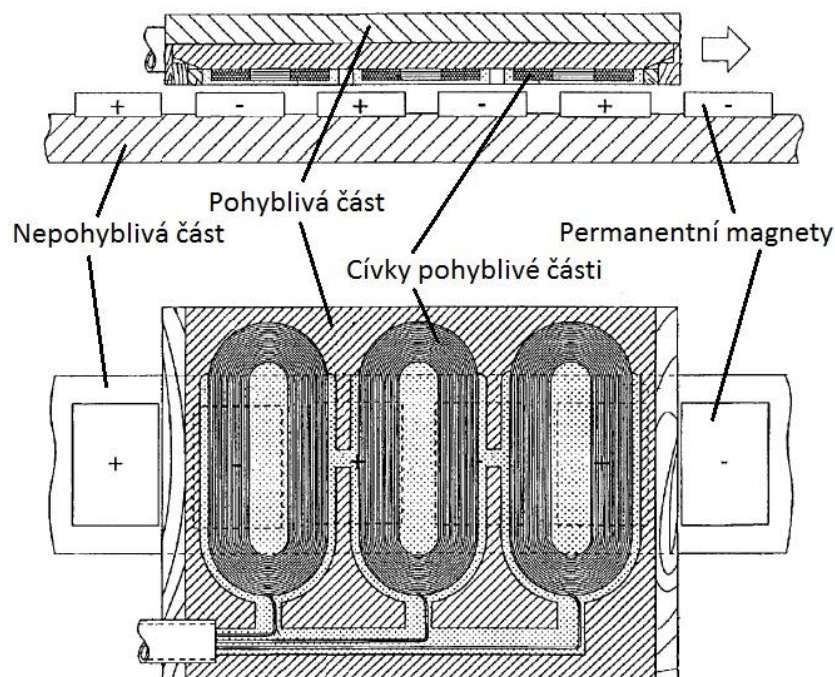
3.4 Lineární motorky

Není pravidlem, že každý motorek musí mít točivý moment. Příkladem motorku, který točivý moment nemá, je právě lineární motor. Lineární motor lze vytvořit téměř z jakéhokoliv motorku tím, že ho podélně rozřízneme a rozbalíme do roviny. Poslední tvrzení nejlépe vystihuje obrázek 3.9. Z konstrukčního hlediska jsou možné tyto varianty: synchronní, asynchronní, krokové, stejnosměrné s komutátorem a reluktanční.



Obr. 3.9 Vytvoření lineárního motorku

Vzhledem k technologickému provedení tohoto motorku je pohybující se částí stator, který se skládá z magnetického obvodu, v jehož drážkách je uloženo třífázové vinutí zapojené do hvězdy. Nepohyblivá část je tvořena permanentními magnety, které jsou nalepeny na ocelové desce. Magnety se střídají sever-jih, sever-jih. Pohyblivá část je od nepohyblivé oddělena vzduchovou mezerou a musí být upevněna ve vodících kolejnicích. Reálné konstrukční uspořádání je znázorněno na obrázku 3.10.



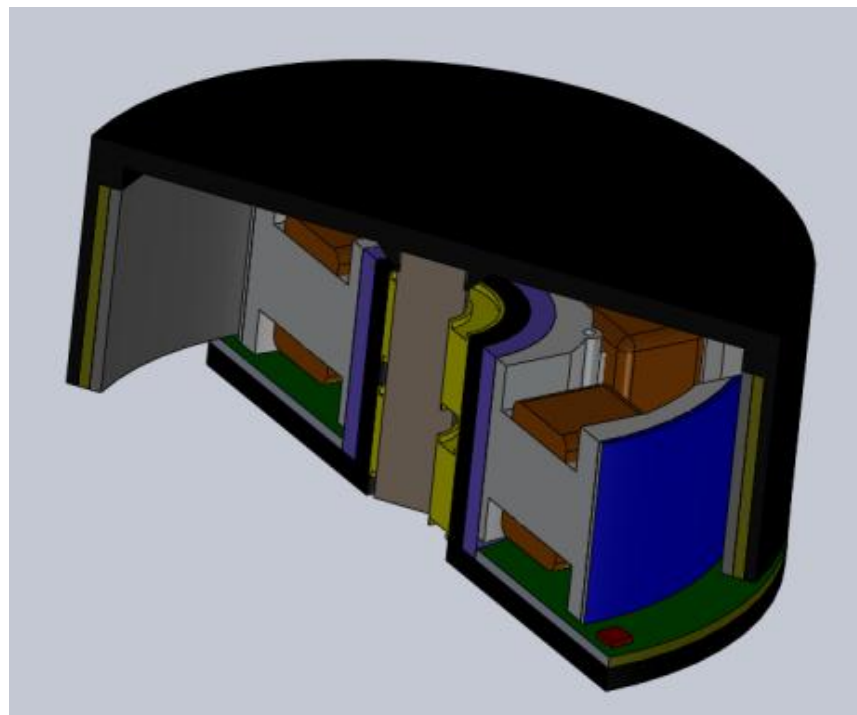
Obr. 3.10 Reálné konstrukční uspořádání

3.5 3D modely motorků

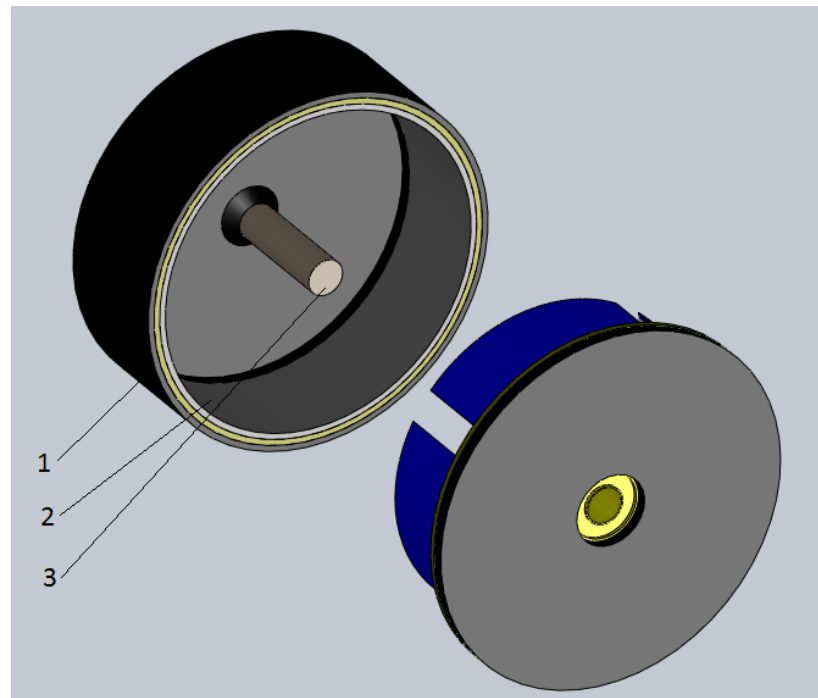
Následující kapitola se věnuje 3D modelům všech výše zmíněných motorků. Jsou zde vyobrazeny vždy tři pohledy: řez motorkem, pohled na stator a pohled na rotor. Pro větší názornost a přehlednost jsou 3D modely do jisté míry zjednodušené. Vzhledem k tomu, že podrobný rozbor týkající se konstrukce byl proveden v předchozích částech této kapitoly, bude popis jednotlivých obrázků velmi stručný. Stejně tak některé konstrukční části jsou poněkud zjednodušené. Týká se to zejména ložisek a vinutí.

3.5.1 Motorek s radiálním tokem – vnější rotor

Na obrázku 3.11 je vyobrazen řez motorkem a dva následující obrázky jsou pohledy na stator a na rotor. Z těchto obrázků jsou patrné jednotlivé části motorku. Je zde vidět kryt rotoru (1), na kterém jsou upevněny permanentní magnety (2). Dále je patrné spojení hřídele (3) s rotorem. Celý rotor je lépe vidět na obrázku 3.12.

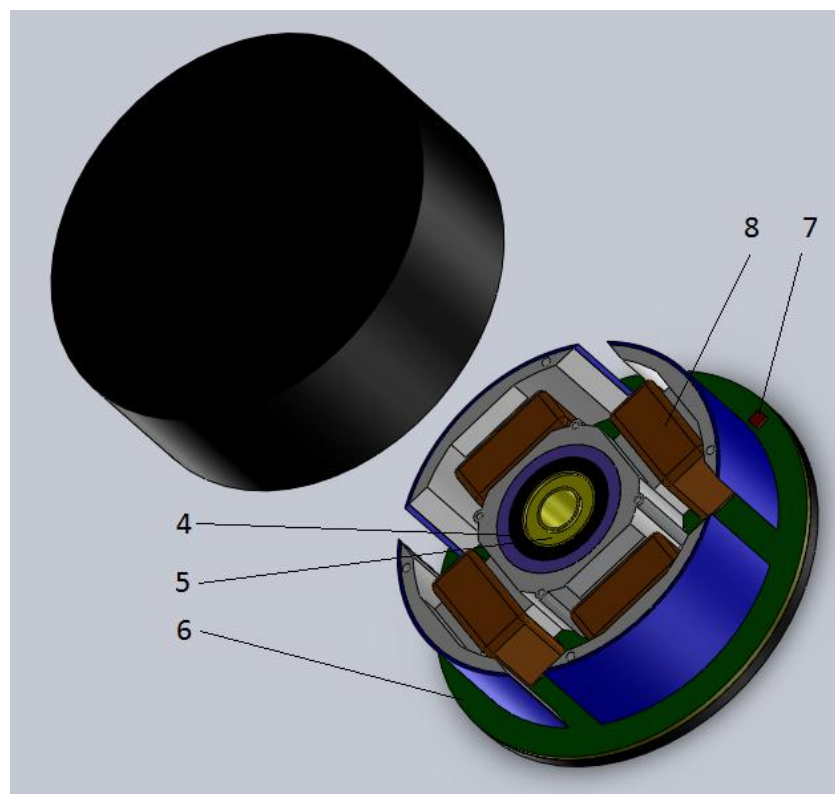


Obr. 3.11 Řez motorkem s radiálním tokem – vnější rotor



Obr. 3.12 Vnější rotor motorku s radiálním tokem

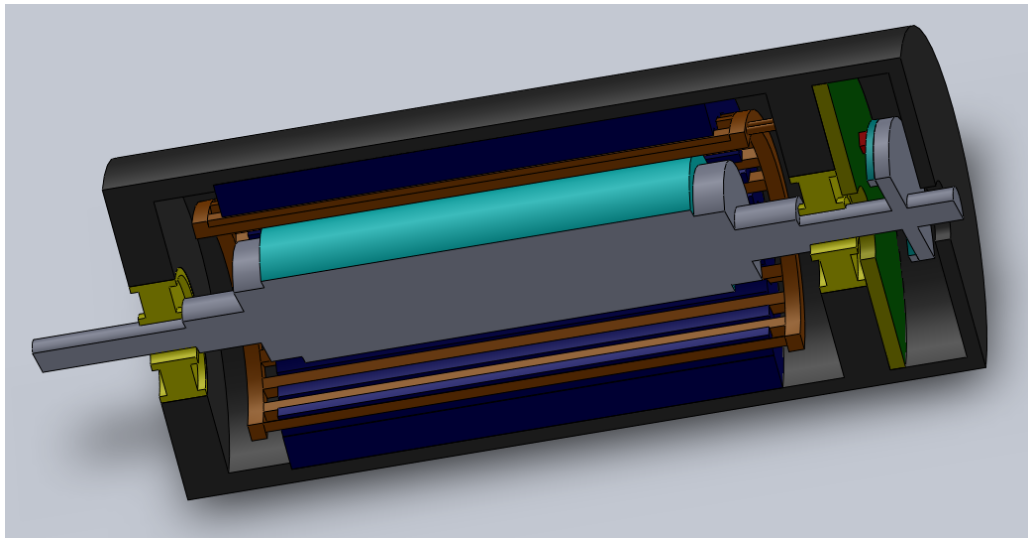
Stator je tvořen kostrou (4), na které jsou upevněna ložiska (5). Dále je na kostře nalepen tištěný obvod (6) s elektronikou, včetně snímače polohy rotoru (7). Na jednotlivých pólech je navinuto vinutí (8). Vinutí je zde naznačené pouze zjednodušeně.



Obr. 3.13 Stator motorku s radiálním tokem

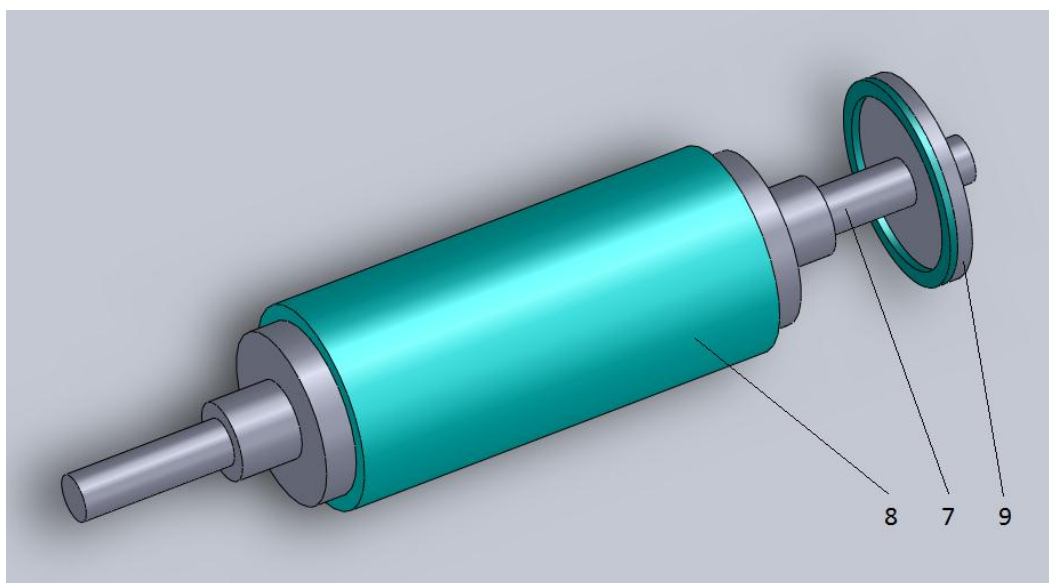
3.5.2 Motorek s radiálním tokem – vnitřní rotor

Na obrázku 3.14 je druhý typ motorku s radiálním tokem a to je motorek s rotorem uloženým uvnitř statoru. Stejně jako v předchozím případě je i zde statorové vinutí (1) velice zjednodušené. Toto vinutí je uloženo v drážkách magnetického obvodu (2), a ten je upevněn na krytu motorku (3). Součástí krytu jsou také ložiska (4). Nechybí zde ani tištěný obvod (5) s elektronikou a snímačem polohy (6). Pohled na samotný stator je na obrázku 3.16.

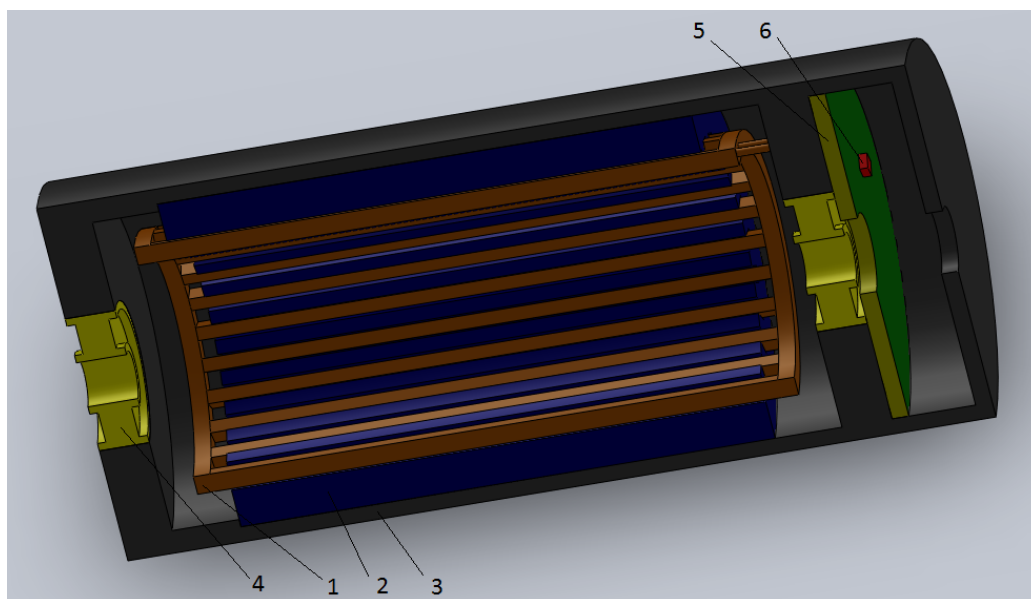


Obr. 3.14 Řez motorkem s radiálním tokem – vnitřní rotor

Rotor je tvořen hřídelí (7), na které je upevněn permanentní magnet (8). Na této hřídeli je také kotouč (9) s permanentním magnetem, který je využívám při snímání polohy. Rotor je vyobrazen na obrázku 3.15.



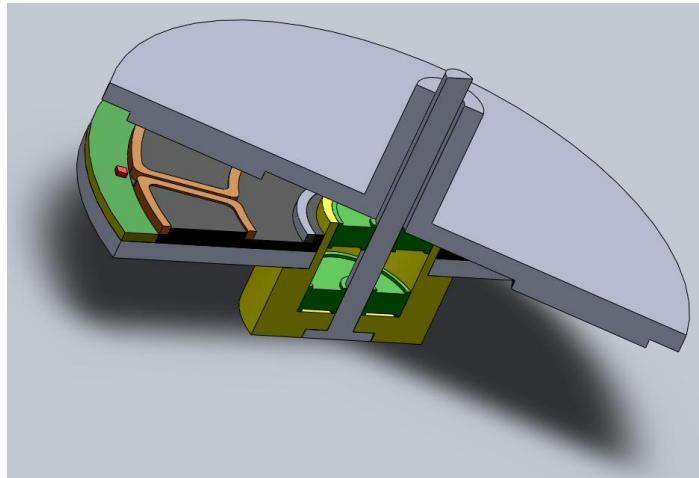
Obr. 3.15 Vnitřní rotor motorku s radiálním tokem



Obr. 3.16 Stator motorku s radiálním tokem

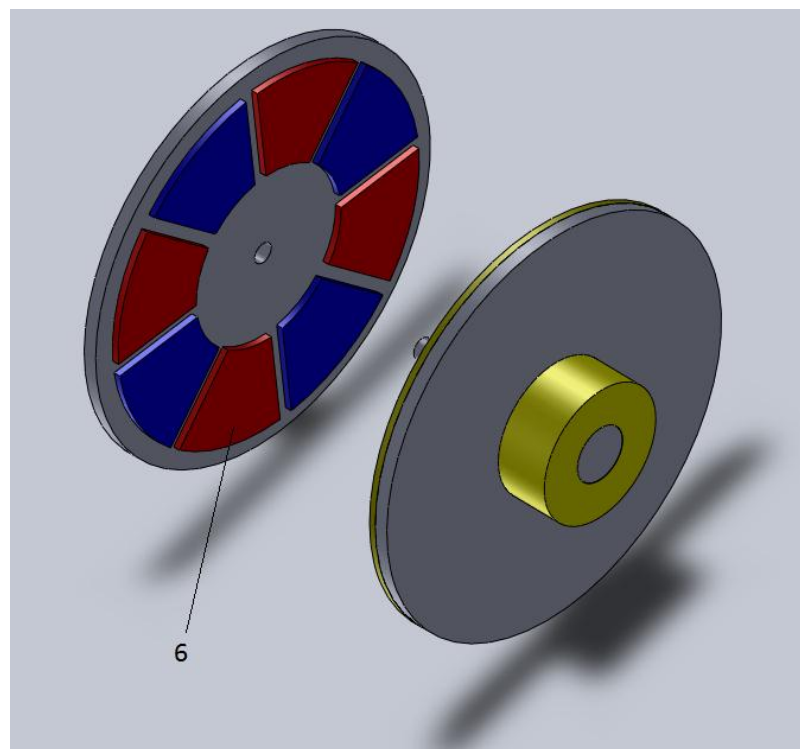
3.5.3 Motorek s axiálním tokem

Dalším typem motorku je motorek s axiálním tokem. Řez tímto motorkem je na obrázku 3.17. Podrobnější pohled na rotor je na obrázku 3.18 a pohled na stator je na obrázku 3.19.

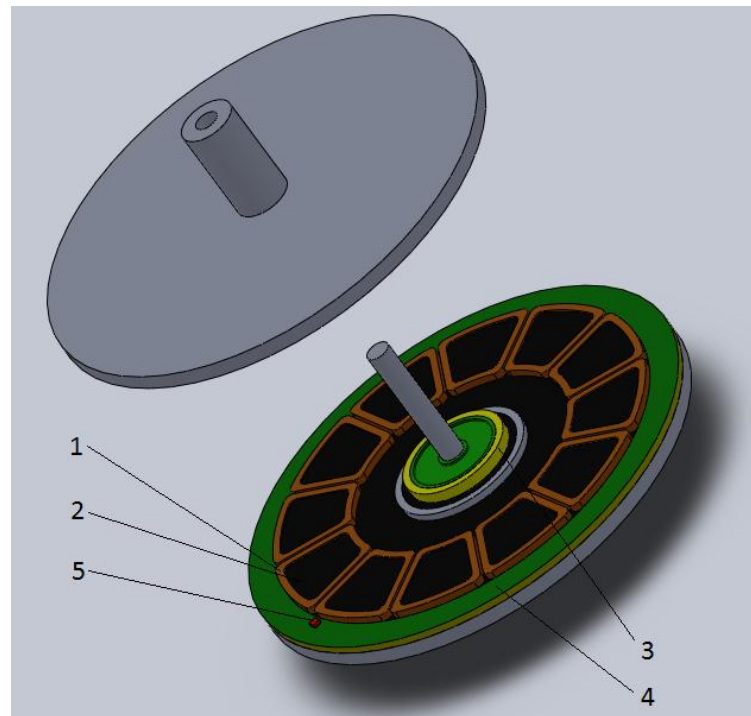


Obr. 3.17 Řez motorkem s axiálním tokem

Jednotlivé cívky vinutí (1) statoru jsou namotány na magnetickém obvodu statoru (2). Nechybí zde ani ložiska (3) a tištěný obvod (4) s čidlem polohy rotoru (5). Na rotoru, ve tvaru kotouče, jsou nalepeny segmenty permanentních magnetů (6).



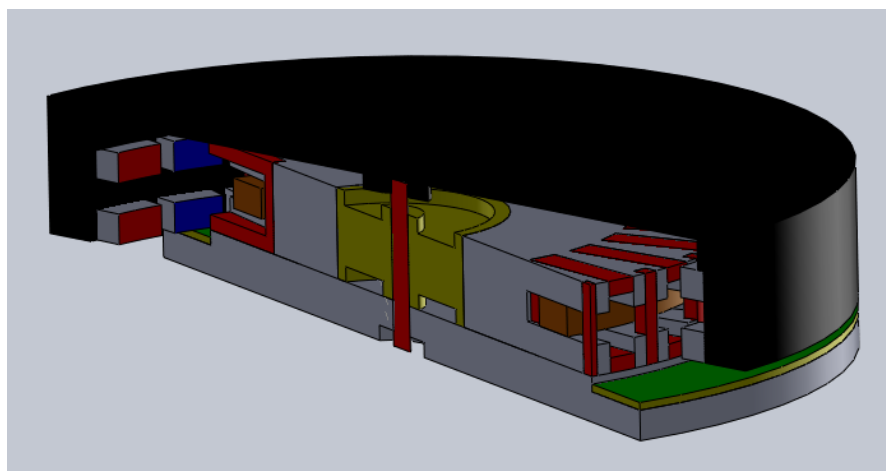
Obr. 3.18 Rotor motorku s axiálním tokem



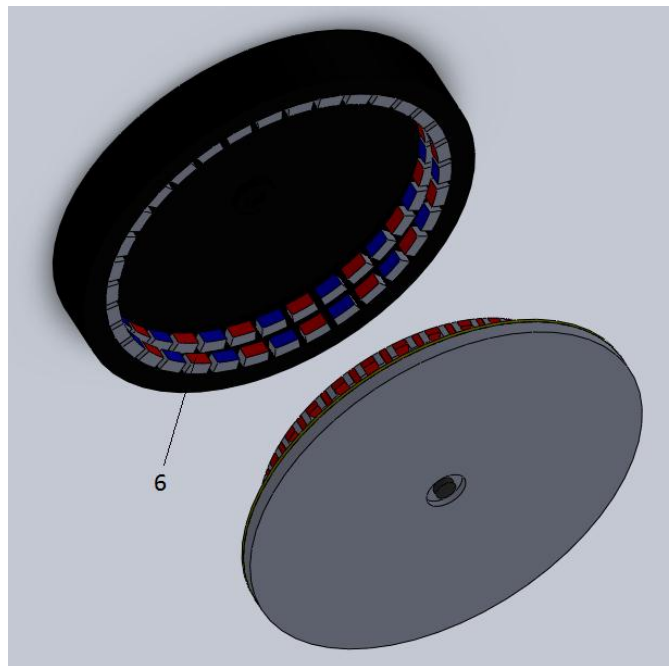
Obr. 3.19 Stator motorku s axiálním tokem

3.5.4 Motorek s transverzálním tokem

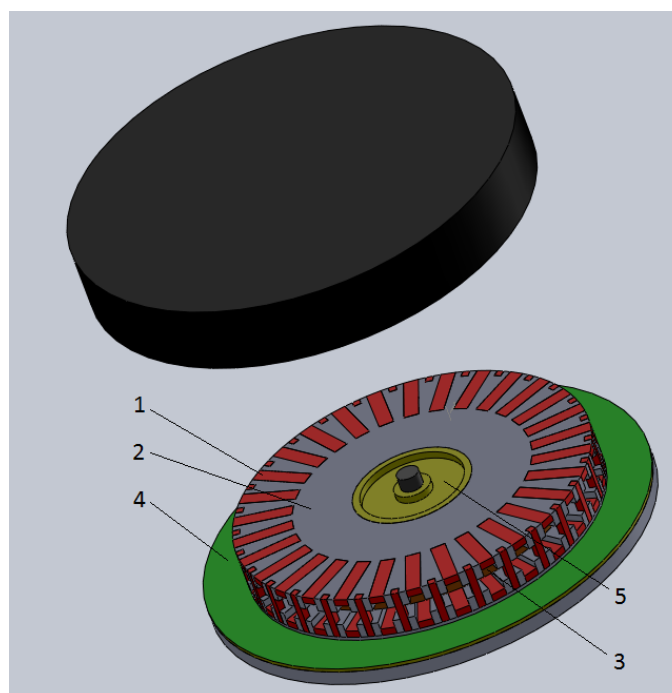
Na obrázku 3.20 je vyobrazen řez motorkem s transverzálním tokem. Již výše byla zmíněna problematika spojená se složitostí konstrukce tohoto motorku. Jak je vidět, tak tento problém se týká hlavně magnetického obvodu statoru (1). Magnetický obvod je upevněn v kostře statoru (2). Uvnitř kostry je také umístěno vinutí (3). Jako u všech předchozích typů, tak ani zde nechybí tištěný spoj (4) a ložisko (5). Na rotoru jsou jako u předchozích typů motorků nalepeny permanentní magnety (6).



Obr. 3.20 Řez motorkem s transverzálním tokem



Obr. 3.21 Rotor motorku s transverzálním tokem

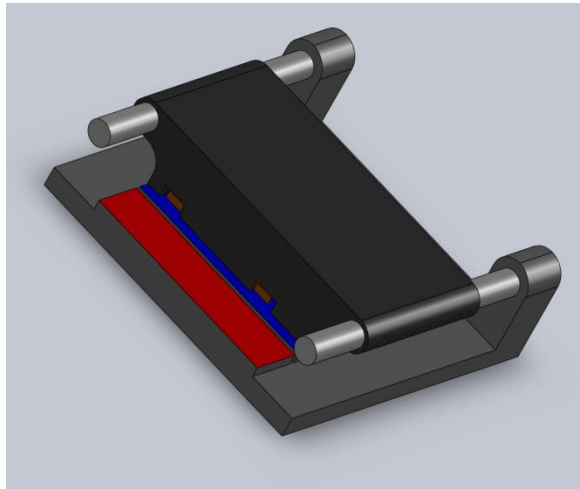


Obr. 3.22 Stator motorku s transverzálním tokem

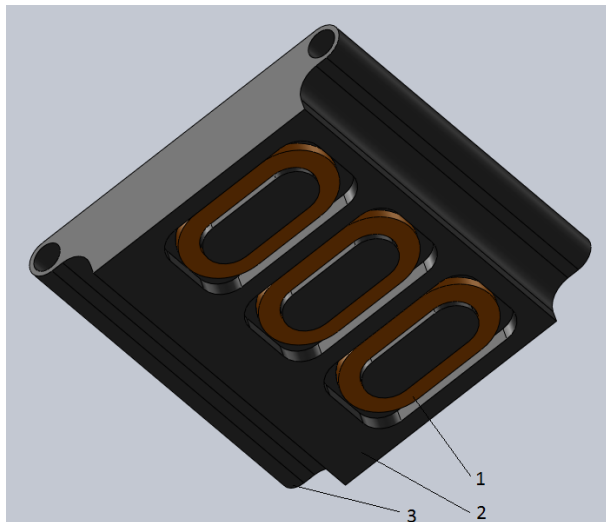
3.5.5 Lineární motorek

Posledním z modelů je model lineárního motorku. Řez tímto motorkem je znázorněn na obrázku 3.23. Pohyblivá část je na obrázku 3.24. Na tomto obrázku je vidět trojfázové vinutí (1). Vinutí je uloženo v kostře pohyblivé části (2), jejíž součástí jsou vodící trubice (3). Stator neboli nepohyblivá část, je tvořen kostrou (4) na níž jsou upevněny permanentní magnety (5). Dále jsou zde úchyty (6) na vodící tyče (7). Vodící tyče nemusí být nutně

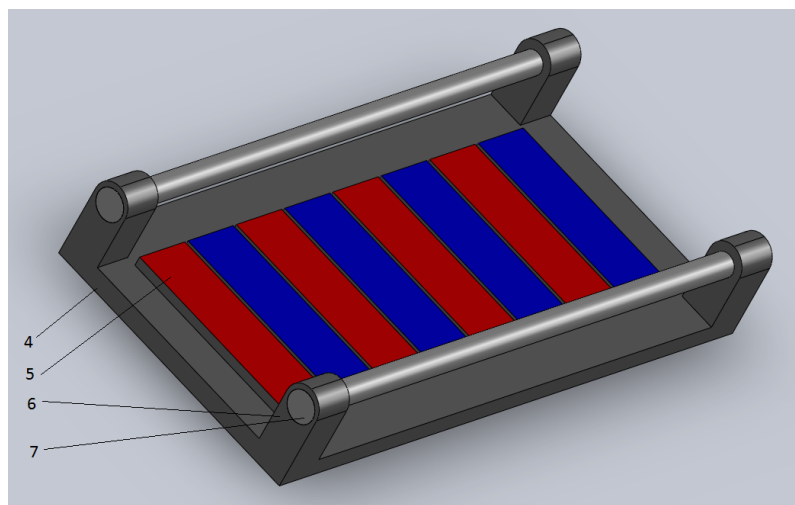
součástí každého lineárního motorku. Záleží především na specifickém použití a na požadavcích na konstrukci.



Obr. 3.23 Řez lineárním motorkem



Obr. 3.24 Pohyblivá část lineárního motorku



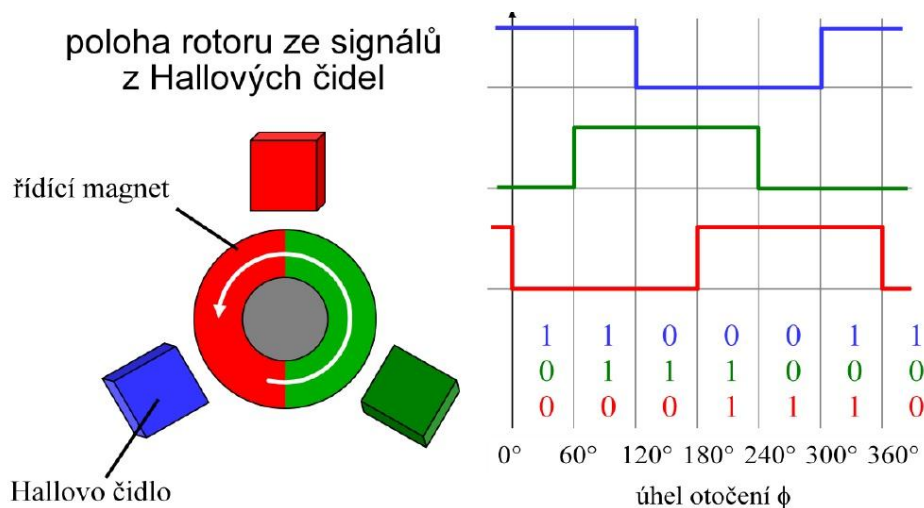
Obr. 3.25 Nepohyblivá část lineárního motorku

4 Princip

V této kapitole bude alespoň částečně nastíněna podstata fungování motorků zmíněných v předchozích kapitolách. Vzhledem k tomu, že jediný rozdíl mezi PMSM a BLDC je ve tvaru řídicího signálu, tak při vysvětlování bude uvažován obecný typ motoru. Průběhy řídicích signálů jsou zmíněny jen okrajově.

4.1 Obecný princip fungování

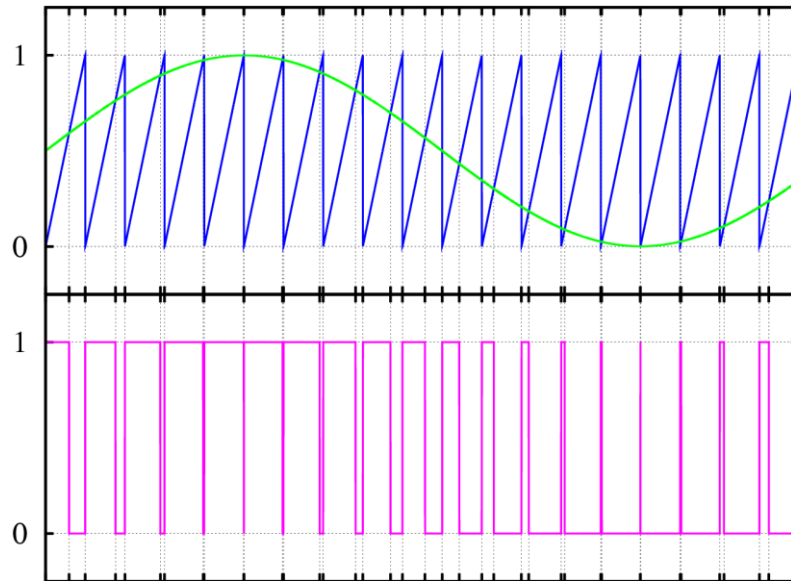
Princip fungování spočívá v interakci magnetického pole, které je vytvářeno permanentními magnety na rotoru a polem statorovým. Magnetické pole permanentních magnetů je konstantní. Naproti tomu magnetické pole statorového vinutí je proměnné. Proměnlivost pole je dána postupným spínáním jednotlivých cívek statoru. O toto spínání nebo přesněji řečeno elektronickou komutaci se stará řídicí jednotka, která v určitém sledu



Obr. 4.1 Spínací diagram

posílá signály do zmíněných cívek. Řídicí signál může být různý, záleží na tom, o jaký motorek se jedná. U motorků rozeznáváme zejména dva druhy řízení. Obdélkové a PWM. Spínací diagram obdélkového řízení je na obrázku 4.1. Naproti tomu PWM je vyobrazené na obrázku 4.2. Výsledný signál vznikne koincencí neboli souběhem nosného a modulačního signálu. Modulační signál má v tomto případě harmonický sinusový průběh. Nosným signálem je pilový průběh.

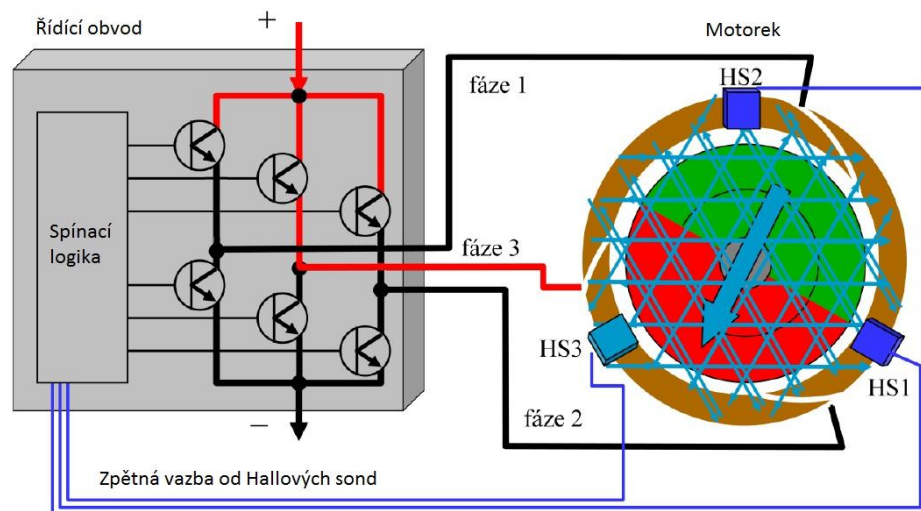
Podmínkou správného fungování motoru je schopnost detekovat polohu rotoru, a to z toho důvodu, aby byla určitá cívka včas vypnuta a mohla být připojena další a tím mohla být udržena konstantní rychlost a co nejmenší pulzace momentu. O detekci rotoru se starají čidla,



Obr. 4.2 Šírková pulzní modulace

kteřá komunikují s řídicí jednotkou a ve své podstatě jí sdělují, kdy poslat pulz na další cívku. Princip těchto čidel bude vysvětlen později v této kapitole.

Jako spínací prvky mohou být použity například vypínatelné tranzistory. Principiální schéma celého obvodu je uvedeno na obrázku 4.3. Na obrázku 4.3 je vidět již zmiňovaná zpětná vazba od snímačů polohy rotoru do řídicí jednotky.



Obr. 4.3 Principiální schéma fungování motorku

4.2 Snímače polohy

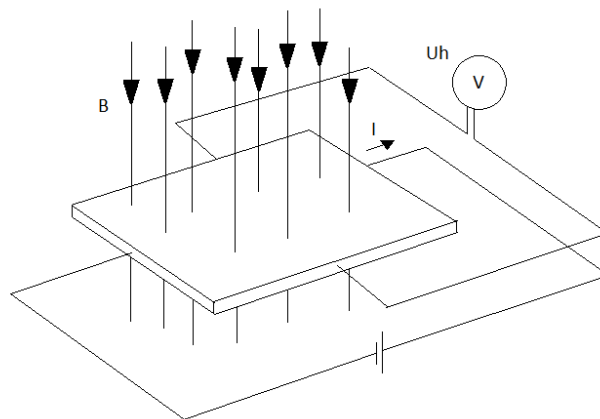
Snímače polohy jsou nedílnou součástí všech výše uvedených motorků. Avšak existují výjimky, kde snímače nejsou potřeba a snímání polohy je prováděno bezsensorově. Toto snímání sebou však přináší svoje výhody, ale i nevýhody. V následujících odstavcích bude popsáno, jaké druhy snímání se v dnešní době používají. Zmíněné výhody a nevýhody budou uvedeny u jednotlivých způsobů snímání.

4.2.1 Hallova sonda

Hallova sonda, článek nebo také senzor je elektronická součástka, která využívá Hallova jevu. Hallův jev se projeví, pokud vložíme destičku polovodiče do magnetického pole a necháme jí příčně protékat stejnosměrný proud. Následkem toho se na opačných hranách destičky objeví tzv. Hallovo napětí, které je dáno vztahem (1).

$$U_H = k \cdot I \cdot B \quad (1)$$

Zobrazení Hallova jevu a výše uvedených veličin je na obrázku 4.4.



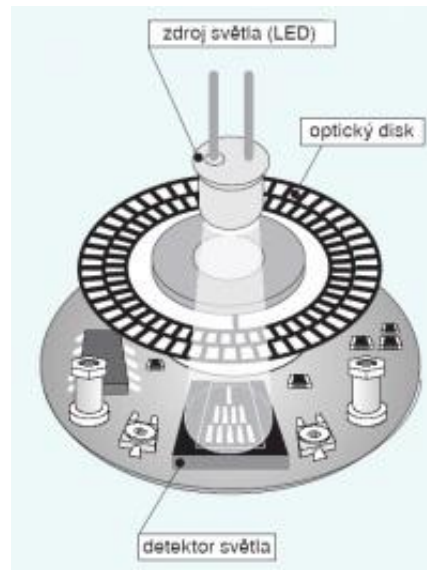
Obr. 4.4 Hallův jev

Hallovy sondy se v současné době používají nejen u těchto motorků, ale také se využívají pro měření magnetické indukce nebo měření proudu (klešťové ampérmetry).

4.2.2 Optický inkrementální snímač

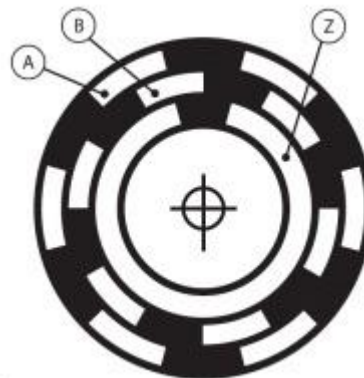
Nejdůležitější částí tohoto snímače je otočný optický disk, který je mechanicky propojen s přípojovací hřídelí snímače. Další důležitou částí je světelný zdroj (infračervená LED dioda). Tato dioda je umístěna nad optickým diskem. Vše je znázorněno na obrázku 4.5. Infračervené světlo vyzářené diodou projde pouze průhlednými okénky, zbývající

neprůhledná část disku světlo pohlcuje. Světlo poté prochází clonkami, které mají stejnou rozteč, jako okénka na optickém disku. Světelné impulzy poté dopadají na optický detektor,



Obr. 4.5 Optický inkrementální snímač

který je následně převádí na elektrický signál. Tento signál má pilový průběh. Signál je dále zesílen a elektronicky tvarován tak, aby jeho výsledný tvar byl obdélníkový. Aby byl výstupní signál stabilní a kvalitní, je snímán vždy v diferenčním režimu, kde jsou dva totožné signály s opačnou fází porovnávány. Tento způsob snímání umožňuje eliminovat rušení. (Automa: časopis pro automatizační techniku, 2005, č. 5)



Obr 4.6 Dvě soustavy clonek

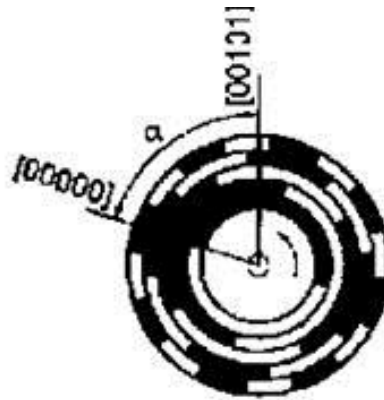
Na obrázku 4.6 je vidět soustava dvou clonek, které jsou od sebe navzájem posunuté o 90° elektrických. Tímto způsobem je tedy možné získat dva obdélníkové průběhy posunuté o polovinu periody. Ze samotného kanálu A lze získat informaci o rychlosti otáčení a pomocí kanálu B i směr otáčení. Je zde i třetí kanál Z nebo také nulový kanál, který udává nulovou polohu hřídele snímače. Tento signál je ve fázi s kanálem a má také obdélníkový průběh. Výstupní signály jsou následně vyhodnoceny řídicí jednotkou. (Automa: časopis pro automatizační techniku, 2005, č. 5)

4.2.3 Absolutní optický snímač

Základem tohoto snímače je stejně jako v předchozím případě optický disk. Hlavním rozdílem je, že na disku absolutního snímače je několik stop. Na každé stopě se v určitých intervalech střídají průhledná a neprůhledná místa, viz obrázek 4.7.

„Světelný tok prochází systémem průhledných a neprůhledných ploch a dopadá na přesně umístěné měřicí snímače, které vytvoří digitální informaci o absolutní poloze měřeného předmětu.“ (Automatizace - snímače, 2010)

Na základě tohoto signálu lze každé poloze rotoru přiřadit binární číslo.



Obr. 4.7 Systém průhledných a neprůhledných ploch optického disku

4.2.4 Bezsenzorové snímání

Tento způsob snímání využívá ty fáze rotoru, do kterých zrovna není přiváděn řídicí signál. Do těchto fází se indukují napětí, které je úměrné rychlosti otáčení rotoru. Po převodu signálu z analogové oblasti do digitální, lze pomocí komparátoru vytvořit signál, který má frekvenci úměrnou rychlosti otáčení. (Bláha, 2008, s. 18)

Velkou výhodou tohoto snímače je to, že nejsou potřeba další mechanické snímací prvky. Naproti tomu jsou zde i nevýhody, spojené se složitějším řízením a s polohou rotoru. Pokud je rotor zastaven, tak se do cívek neindukují žádné napětí. Není tudíž možné určit polohu.

5 Permanentní magnety

V následující kapitole jsou uvedeny některé poznatky ohledně rozdělení permanentních magnetů (dále jen PM), materiálů, které se při jejich výrobě používají, a jejich výhody a nevýhody.

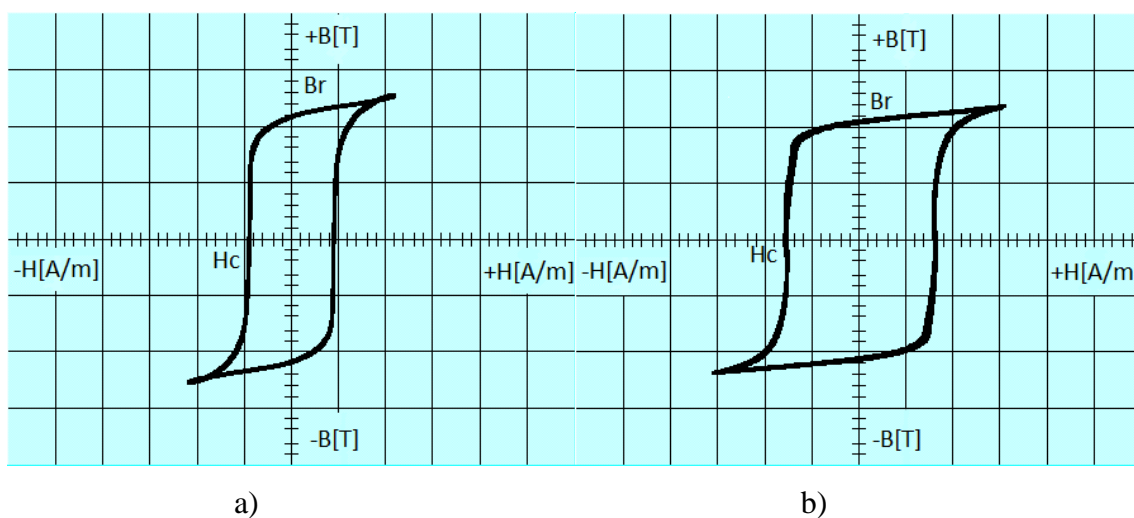
Materiály pro magnetické obvody lze rozdělit do tří základních skupin:

- ❖ magneticky měkké materiály
- ❖ magneticky tvrdé materiály
- ❖ materiály se zvláštními vlastnostmi

PM se řadí do skupiny magneticky tvrdých materiálů. Magneticky tvrdé materiály se vyznačují koercivitou vyšší než 1 kA/m. Na obrázku 5.1 jsou pro porovnání vyobrazeny hysterezní smyčky magneticky měkkých a tvrdých materiálů. Další důležitou vlastností a zároveň velkou nevýhodou je jejich teplotní závislost. Z toho vyplývá, že pokud chceme, aby si magnet udržel svoje vlastnosti, musí být dostatečně chlazen. Další vlastností typickou pro tyto magnety je jejich obtížná magnetizace a demagnetizace.

Nejčastější materiály používané pro výrobu PM jsou například magneticky tvrdé ferity, slitiny AlNiCo a materiály ze vzácných zemin, obsahující neodym, železo a bor.

Měřítkem kvality PM je nejvyšší dosažitelný součin zbylé magnetické indukce B při odmagnetování vnějším magnetickým polem H . S kvalitou PM je přímo úměrně svázaná i cena. Častým požadavkem a také rozhodujícími kritérii pro volbu magnetu je prostor a hmotnost. Dobrým kompromisem jsou v tomto případě slitiny Alnico. (MALÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY MAXON, 2002, s. 17)



Obr. 5.1 Hysterezní smyčka a) magneticky měkkého materiálu b) magneticky tvrdého materiálu

5.1 Magneticky tvrdé ferity

Tento druh PM je v současné době asi nepoužívanější a zároveň i nejlevnější alternativou. Ferity jsou vyráběny pomocí práškové metalurgie, a to jako anizotropní nebo izotropní.

Anizotropní magnety mají dobré magnetické vlastnosti pouze v určitém směru, v tzv. přednostní ose magnetizace. Toho se dosáhne tím, že se magnety lisují za přítomnosti magnetického pole. Směr magnetování je totožný se směrem orientace magnetizace.

Izotropní magnety mají oproti anizotropním ve všech směrech stejné magnetické vlastnosti. Nemají žádnou přednostní osu. To znamená, že mohou být magnetovány v jakékoliv ze tří os. Z toho vyplývá i jejich nižší cena.

Feritové PM se vyznačují křehkostí a citlivostí na náraz a ohyb. Z důvodu jejich tvrdosti musí být opracovávány diamantovým nářadím. Jsou odolné vůči celé řadě chemikálií. Pracovní teplota se pohybuje od -40°C až do 250°C .

Jako materiál se používají oxidy železa. Konkrétně se skládají z cca 86% Fe_2O_3 (oxid železitý) a cca 14% BaO_2 (peroxid barya) nebo SrO (oxid strontnatý).

5.2 Slitiny AlNiCo

Magnety Alnico se vyrábějí již dlouhou řadu let, cca 50 let. Název je odvozen ze složení slitiny, ze které se vyrábí. Obsahují cca 7-10% hliníku, 13-16% niklu, 20-40% kobaltu a zbytek je železo. Magnety AlNiCo se vyrábí metalurgickými metodami nebo práškovou metalurgií. V dnešní době se nejčastěji vyrábějí jako izotropní magnety. Pro magnety AlNiCo je typická nejvyšší teplotní stabilita magnetických parametrů. Dále mají největší odolnost proti korozi. Vzhledem k nízké hodnotě koercivity je nemožné použít tyto magnety v blízkosti silných demagnetizačních polí, což omezuje rozsah jejich aplikace. Další nepříznivé účinky na tyto magnety mají údery a nárazy. Tyto nevýhody se nejvíce projeví u nízkých (plochých) magnetů. (Magnety AlNiCo, 2005)

PM AlNiCo se nejvíce používají v měřících přístrojích, motorech, proudových generátorech. Celkově jsou vhodné pro aplikace, kde je dostatečný prostor pro umístění magnetu.

5.3 Materiály ze vzácných zemin

Jedná se o magnety složené ze vzácných zemin, jako je například samarium nebo neodym a přechodového kovu (Kobalt, Železo). Konkrétně se jedná o sloučeniny na bázi Samarium-Kobalt nebo Neodym-Železo-Bor. Tyto PM jsou vysoce výkonné, ale také velmi drahé. Jsou založeny na intermetalických fázích SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a Nd_2 . Mají významně vyšší hodnoty koercivity a remanence nežli předchozí dvě skupiny materiálů. Kvůli tvrdosti musí být tyto PM opracovávány diamantovým nářadím.

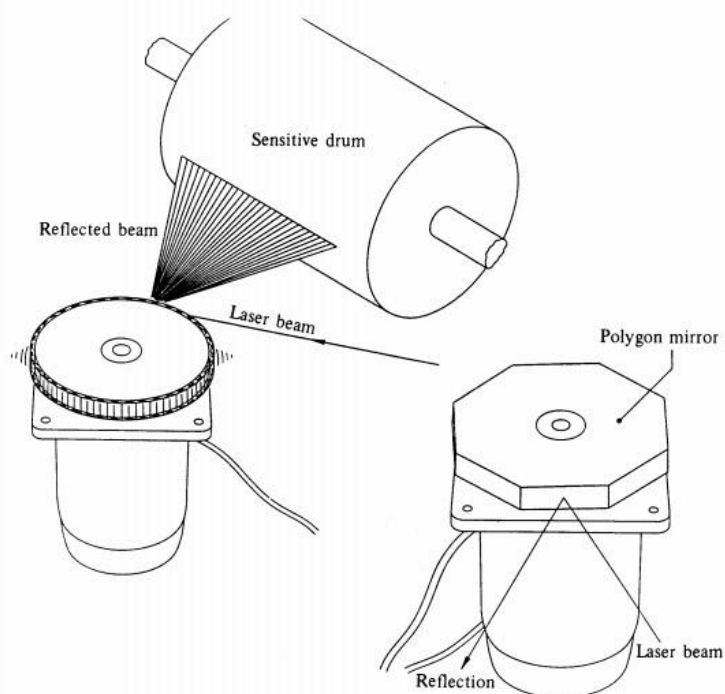
6 Použití

Všechny motorky zmiňované v kapitole 3. mají širokou škálu využití. Ať už se jedná o motorky, které pohánějí pevné disky, nebo větráky, anebo o motorky, které se využívají k pohybu robotických ramen v průmyslové výrobě. Důvodem vývoje těchto motorků byla snaha o prodloužení životnosti stávajících motorků a také celkové zmenšení rozměrů.

6.1 PMSM, BLDC, EC

Motorky tohoto typu našly mimo jiné svoje uplatnění i v lékařské technice. Konkrétně u některých lékařských přístrojů. Příkladem je přístroj na léčbu spánkové apnoe. Vzduch proudící do pacientovy kyslíkové masky je regulován právě bezsensorovým motorkem BLDC. Podle potřeby jsou snižovány nebo zvyšovány otáčky a tím i proudění vzduchu do kyslíkové masky.

Dalším příkladem použití jsou laserové tiskárny, kde je přímo na rotor upevněno mnohoúhelníkové zrcadlo, které odráží laser na válec. Lépe je tento princip popsán na obrázku 6.1. Motorek se vhodně natáčí a udržuje rychlost v rozmezí 5000 až 40000 otáček za minutu. Otáčením motorku se rozptýl laseru různě mění a dopadá na válec. I v tomto případě se jedná o BLDC motorek.



Obr. 6.1 Využití BLDC motorku v laserové tiskárně

Zástupce těchto motorků najdeme i v oblasti ventilační techniky. V podstatě se jedná o motorky, které pohání ventilátory umístěné v garážích, kuchyních apod. Motorky jsou vyráběny v širokém rozsahu výkonů. V rozsahu od desítek wattů až do jednotek kilowattů.



Obr. 6.2 Kuchyňský ventilátor firmy Systemair

Na obrázku 6.2 je ventilátor nabízený firmou Systemair. Motor tohoto ventilátoru umožňuje napájení 200-277V při frekvenci 50Hz. Otáčky jsou regulovány signálem 10V. Každý motor od firmy Systemair má výstupní napětí 10V a 20V pro možnost připojení externího potenciometru nebo čidla.

Motorky PMSM našly své uplatnění v oblasti počítačové techniky. Ať už se jedná o motorky, které pohánějí větráky připojené k chladiči procesoru, nebo větráky, které se starají o udržení požadované teploty uvnitř počítače. U těchto aplikací je klíčovou vlastností motorků změna velikosti otáček v závislosti na teplotě prostředí. To znamená, že do řídicí jednotky musí být přivedena zpětná vazba, která podává informace o teplotě prostředí. Větráky samozřejmě nejsou jedinou aplikací v počítačové technice. PMSM motorky najdeme také v pevných discích. Zde jsou kladeny největší požadavky na rychlost otáčení a na co nejmenší pulzaci momentu. Otáčky se pohybují v rozmezí od 5400 ot/min až do 15000 ot/min. V dnešní době je nejběžnější rychlost 7200 ot/min.

Na obrázku 6.3 je motorek, který byl vyjmut z pevného disku. Otáčky tohoto motorku jsou 5400 ot/min a kapacita disku je 60 GB. Celková výška motorku je 2 cm, průměr rotoru je cca 3,31 cm, průměr celého motorku je 5 cm.



Obr. 6.3 Motorek z pevného disku

6.2 Lineární motory

Lineární motorky nižšího výkonu našly své uplatnění zejména v oboru průmyslové výroby. A to jako pohony průmyslových robotů a obráběcích CNC center. Zde je kladen největší důraz na přesnost a plynulost pohybu pracovní hlavy.

6.3 Výhody a nevýhody

V několika následujících bodech budou popsány výhody a nevýhody jednotlivých motorků, a zároveň bude provedeno porovnání.

Vnější rotor	Vnitřní rotor
jednofázový, vícefázový	jednofázový, vícefázový
může být použito DC (levnější)	AC statorové vinutí (dražší)
větší moment setrvačnosti	menší moment setrvačnosti
menší pulzace momentu	větší pulzace momentu
menší zrychlení	velké zrychlení
nízkoenergetické magnety	potřeba magnetů s vyšší energií

Tab. 6.1 Porovnání motorků s vnitřním a vnějším rotorem

Podstatnou výhodou všech elektronicky komutovaných motorků je odstranění mechanického komutátoru. Životnost motorku je dána komutátorem. Jeho odstraněním dosáhneme delší životnosti. Další výhodou je jednoznačně rozsah otáček, které sahají až

do desítek tisíc. Bezpochyby jsou tyto motorky více prostorově úsporné a mají velký poměr výkon/velikost. Další výhodou je opět spojená s absencí mechanického komutátoru, a to je spolehlivost a bezúdržbový provoz.

U motorků s axiálním tokem je další výhodou velký moment, avšak není vhodný pro vysoké otáčky. Mezi výhody se dá zařadit i malá axiální délka. Naproti tomu značnou nevýhodou je složitá konstrukce. Vinutí statoru se musí navíjet ručně.

Asi největší nevýhodou všech motorků je nutnost detekce polohy rotoru. Tedy jsou nutné snímače polohy. Tato nevýhoda byla do určité míry vyřešena zavedením bezsenzorového snímání. To však mělo za následek i složitější způsob řízení. Jako další nevýhodu je nutné zmínit cenu. Vysoká cena je mimo jiné způsobena přítomností řídicí jednotky. I přes vysokou cenu jsou motorky velice výhodné, už jenom kvůli zmiňované dlouhé životnosti. Životnost celého motoru je ve své podstatě dána pouze životností ložisek.

V případě lineárních motorků je největší výhodou jejich rychlost posuvu a přesnost posuvu do zadaných souřadnic. Další výhodou je také možnost více pohyblivých částí na jedné magnetické dráze. Nevýhodou lineárních motorků je především jejich cena.

Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo vytvořit ucelený přehled konstrukčního uspořádání motorků malých výkonů. Tento problém jsem podrobně popsal v kapitole Konstrukce, kde jsem uvedl nejčastější typy konstrukčních provedení několika typů motorků. Pro větší názornost jsem vytvořil modely motorků pomocí softwaru na 3D modelování. Vedle této kapitoly stojí další kapitoly, které se zabývají použitím, výhodami a nevýhodami, principem, rozdělením a také materiálem. Spolu s touto bakalářskou prací jsem vytvořil prezentaci, která slouží k výukovým účelům a zároveň vnáší jistý řád mezi velké množství různých konstrukčních provedení motorků, o kterých tato práce a prezentace pojednává.

Vzhledem k tomu, že motorky zmiňované v této práci nacházejí své uplatnění i ve sféře vyšších výkonů, bylo by tedy možné tuto práci do jisté míry rozvést a obohatit o další poznatky, z oblasti elektronicky komutovaných motorů s permanentními magnety. To se týká například elektrické trakce, kde se motory s permanentními magnety hojně používají.

Použitá literatura

- [1] BARTOŠ, Václav, Josef ČERVENÝ, Josef HRUŠKA, et al. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. ISBN 978-807-0434-444.
- [2] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2009. ISBN 978-807-0435-090.
- [3] BLÁHA, Martin. *ELEKTRONICKÝ KOMUTOVANÝ MOTOR* [online]. Brno, 2008 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8615. Diplomová práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [4] BURIAN, Vladimír. *Využití programovatelného pole pro řízení bezkartáčových motorů* [online]. Praha, 2011 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/d/d6/Bp_2011_burian_vladimir.pdf. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [5] HANSELMAN, Duane C. *Brushless permanent magnet motor design*. 2nd ed. Cranston, R. I.: TheWriters' Collective, c2003, 392 s. ISBN 19-321-3363-1.
- [6] HÖLL, Jan. *VYSOKOMOMENTOVÉ ELEKTROMOTORY PRO POHONY NEZÁVISLÉ TRAKCE V OBORU MANIPULAČNÍ TECHNIKY* [online]. Brno, 2010 [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=33358. Disertační práce. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [7] MIKULČÍK, Aleš. *EC motor*. Brno, 2008. Dostupné z: <http://jaja.kn.vutbr.cz/~huzlik/EC%20motor.pdf>
- [8] POVALEČ, Aleš. *BRUSHLESS DC MOTOR CONTROLLER* [online]. 2008 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2008/sbornik/02-Magisterske%20projekty/04-Silnopruda%20elektrotechnika%20a%20elektroenergetika/01-xpoval01.pdf>

- [9] STOAN, Irvine. Brushless dc Motors in Medical Applications. [online]. 2012 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/article/brushless-dc-motors-in-medical-applications-0602>
- [10] YEADON, William H a Alan W YEADON. *Handbook of small electric motors*. New York: McGraw-Hill, c2001. ISBN 00-707-2332-X.
- [11] *MALÉ STEJNOSMĚRNÉ MOTORY MAXON*. Praha, 2002. Dostupné z: http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf
- [12] *Lineární motory*. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vues.cz/doc/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF?docid=73
- [13] *Linear motor and method to manufacture said linear motor* [patent]. USA. US6828699. Uděleno 7. 12. 2014. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/6828699.pdf>
- [14] *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2005 [cit. 2012-04-29]. ISSN 1210-9592. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30393
- [15] Optické snímače polohy. *Automatizace - snímače* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.snimace.xf.cz/snimace-polohy-opticke-ultrazvukove.php>
- [16] *Magneticky tvrdé ferity* [online]. [cit. 2012-04-29]. Dostupné z: <http://www.supermagnety.cz/cz/64/magneticky-tvrde-ferity/>
- [17] Magnety AlNiCo. *Jsme prodejcem permanentních magnetů, hlavně neodymových*. [online]. 2005 [cit. 2012-05-18]. Dostupné z: http://www.magnety-magnety.com/magnesy_alnico.php