

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Elektrické stroje s permanentními magnety

Vedoucí práce: Ing. Pavel Světlík

Autor: Petr Doležal

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Petr DOLEŽAL**
Osobní číslo: **E12B0011P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Elektrické stroje s permanentními magnety**
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. Popište druhy permanentních magnetů (PM) používaných v elektrických strojích.
2. Vypracujte přehled elektrických strojů s PM.
3. Popište principy montáže PM do elektrických strojů.
4. Diskutujte směr budoucího vývoje strojů s PM.

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


1. Bartoš,V.: Elektrické stroje, ZČU v Plzni, Plzeň 2004
2. Rafajdus,P.,Ličko,M.: Moderné elektrické stroje,ŽU, Žilina 2001
3. Internetové zdroje

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Světlík
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014
Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na permanentní magnety, jejich vlastnosti a použití v různých elektrických točivých strojích. Dále jsou zde vypsány typy elektrických točivých strojů s PM, způsoby montáže PM v konstrukci stroje a v závěru práce je diskutován možný budoucí vývoj těchto typů strojů.

Klíčová slova

Permanentní magnet, stejnosměrný stroj s PM, synchronní stroj s PM, krokový motor s PM, spínaný reluktanční motor s PM, axiální motory s PM, montáž PM.

Abstract

The submitted bachelor thesis focuses on permanent magnets, their properties and usage in various rotary electrical machines. Further, there are listed types of rotary electrical machines with PM, mounting methods of PMs in machine construction and in the conclusion, there is a discussion about possible future development of these machine types.

Key words

Permanent magnet, DC motor with PM, synchronous motor with PM, stepper motor with PM, switched reluctance motor with PM, axial motors with PM, mounting of PM.

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 8.6.2015

Petr Doležal

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlovi Světlíkovi za výborné vedení a rady při zpracovávání této práce, výbornou komunikaci a příkladný zájem. Dále bych chtěl poděkovat mé přítelkyni, která za mnou celé tři roky studia stála, podporovala mě, byla trpělivá, tolerantní a stála za mnou jak v dobrých, tak i špatných chvílích a za to si jí nesmírně cením a v neposlední řadě mé rodině, která mě podporovala, věřila mi a bez které by studium na této škole nebylo možné.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	8
ÚVOD	9
1 MAGNETICKÉ MATERIÁLY	10
1.1 ROZDĚLENÍ MATERIÁLŮ	10
1.2 HYSTEREZNÍ SMYČKA	11
1.3 MAGNETICKY MĚKKÉ MATERIÁLY	12
1.4 MAGNETICKY TVRDÉ MATERIÁLY	13
2 DRUHY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	14
2.1 FERITY	15
2.2 ALNiCo	17
2.3 PM ZE VZÁCNÝCH ZEMIN	18
2.3.1 Samarium-kobaltové magnety (<i>SmCo</i>)	18
2.3.2 Neodymové magnety (<i>NdFeB</i>)	18
3 ELEKTRICKÉ STROJE S PM	21
3.1 VLASTNOSTI STROJŮ S PM	21
3.2 ROZDĚLENÍ STROJŮ S PM	22
3.3 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY S PM	23
3.3.1 Konstrukce <i>SS</i> strojů s <i>PM</i>	23
3.3.2 Popis činnosti <i>SS</i> stroje s <i>PM</i>	23
3.4 SYNCHRONNÍ STROJE S PM	25
3.4.1 Princip synchronních motorů s <i>PM</i>	26
3.5 KROKOVÝ MOTOR S PM	27
3.5.1 Princip krokového motoru s <i>PM</i>	27
3.6 LINEÁRNÍ KROKOVÉ MOTORY S PM	30
3.6.1 Princip lineárního krokového motoru s <i>PM</i>	30
3.7 SPÍNANÉ RELUKTANČNÍ MOTORY S PM	32
3.7.1 Konstrukce a princip <i>SRM</i>	33
3.8 AXIÁLNÍ DISKOVÉ MOTORY S PM	34
3.8.1 Axiální stejnosměrné motory s <i>PM</i>	35
3.8.2 Axiální synchronní motory s <i>PM</i>	37
3.8.3 Axiální krokové motory s <i>PM</i>	38
4 MONTÁŽ PM DO ELEKTRICKÝCH STROJŮ	39
4.1 VÁLCOVÉ MOTORY	39
4.1.1 Ruční montáž <i>PM</i>	40
4.2 AXIÁLNÍ MOTORY	41
4.3 ROBOTICKÉ OSAZOVÁNÍ POVRCHOVÝCH PM	43
5 MOŽNÝ BUDOUCÍ SMĚR STROJŮ S PM	45
6 ZÁVĚR	46
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	47

Seznam symbolů a zkratek

PM.....	Permanentní magnet
SRM.....	Spínaný reluktanční motor
B_r	Remanentní (zbytková) indukce
H_c	Koercitivní intenzita magnetického pole
$(BH)_{max}$	Maximální energetický součin
SmCo	Samarium-kobaltové permanentní magnety
NdFeB	Neodymové permanentní magnety
SSM	Stejnoseměrný motor
SM.....	Synchronní motor
ΔP_b	Ztráty v budícím vinutí
U_b	Napětí na budícím vinutí
I_b	Proud protékající budícím vinutím
R_b	Odpor budícího vinutí

Úvod

Předkládaná bakalářská práce na téma Elektrické stroje s permanentními magnety se pohybuje v oblasti permanentních magnetů a jejich praktickým použitím v elektrických točivých strojích. Jsou zde popsány typy elektrických strojů, kde se permanentní magnety používají, montáž permanentních magnetů do těchto strojů a v závěru práce je diskutován možný budoucí směr vývoje elektrických strojů s permanentními magnety, protože o těchto strojích bude v budoucnu ještě do jisté míry slyšet.

Práce je rozdělena na pět částí; v té první je popsáno rozdělení magnetických materiálů, ve druhé části jsou vypsány druhy permanentních magnetů, jejich vlastnosti, výhody a nevýhody. Třetí část obsahuje rozdělení elektrických strojů s permanentními magnety a jejich vlastnosti. Čtvrtá část se zabývá způsoby montáže permanentních magnetů v elektrických strojích a v poslední, páté části diskutují možný budoucí vývoj elektrických strojů s permanentními magnety.

1 Magnetické materiály

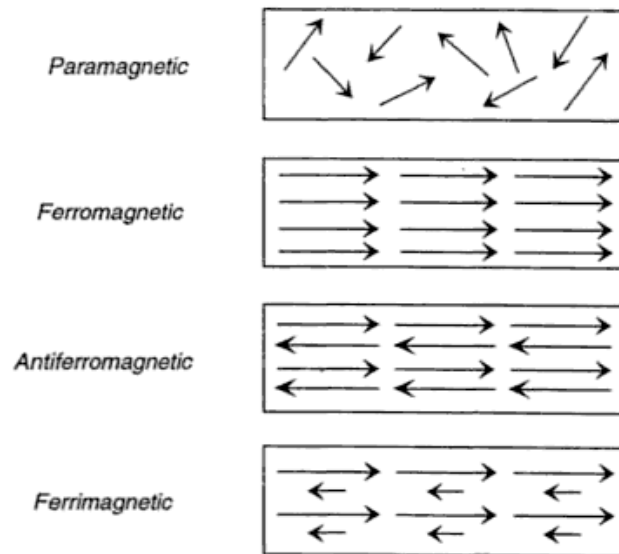
1.1 Rozdělení materiálů

Magnetické materiály dělíme na tyto typy: diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické, antiferomagnetické a ferimagnetické. (Obr. 1.1) Diamagnetické materiály nemají žádný magnetický moment. Pokud jsou tyto materiály vystaveny vnějšímu poli, vzniknou uvnitř materiálu magnetické dipóly, které ale působí v opačném směru, než vnější pole. Mezi takové materiály patří například bismut (Bi). [4]

Paramagnetické materiály mají síť magnetických momentů na atomární úrovni, ale vazby mezi sousedními momenty jsou slabé. Tyto momenty mají tendenci se natočit ve směru působení vnějšího magnetického pole, ale s rostoucí teplotou je jejich intenzita magnetického pole menší. Mezi tyto materiály patří například hliník (Al). [4]

Feromagnetické materiály mají též síť magnetických momentů na atomární úrovni, ale na rozdíl od paramagnetických látek jsou vazby mezi sousedními momenty silné. Tyto vazby způsobují spontánní zarovnávání momentů přes makroskopické oblasti zvané domény. Domény jsou jakési oblasti, ve kterých jsou magnetické dipóly orientovány stejným směrem. Tyto celé domény se poté natáčejí, je-li materiál vystaven působení vnějšího magnetického pole. Mezi tyto materiály patří například železo (Fe) a kobalt (Co). [4]

Ferimagnetické materiály jsou materiály se spontánní magnetizací. Obsahují alespoň dva druhy magnetických atomů v krystalové mřížce, které směřují proti sobě a nejsou stejně velké, což je důvod převahy jednoho z nich. Výsledný magnetický moment je podobný feromagnetikům. [9]

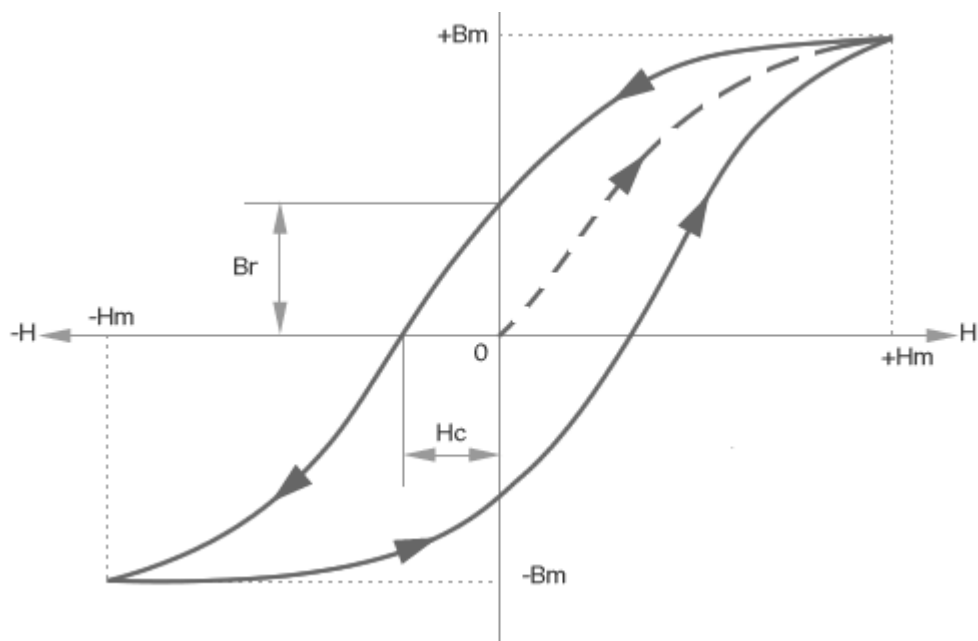


Obr. 1.1 Rozložení mag. momentů v materiálech
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [4]

1.2 Hysterezní smyčka

Pro analýzu a návrh použití PM jsou potřeba vědět všechny magnetické vlastnosti daného materiálu. Tyto vlastnosti jsou vyneseny v grafu závislosti magnetické indukce B jako funkce magnetické intenzity H . Takováto typická charakteristika je na obr. 1.2 a nazývá se hysterezní smyčka. Nejdůležitějšími parametry, které z hysterezní smyčky zjišťujeme, je remanentní indukce B_r , a koercitivní sílu H_c . Podle toho, jak je hysterezní smyčka široká můžeme usoudit, zda je materiál magneticky měkký, nebo tvrdý. [4]

Další zásadní částí hysterezní smyčky je tzv. křivka prvotní magnetizace. Je vyznačena čárkovaně na obr. 1.2. Je to křivka, vyznačující průběh magnetizace materiálu, který před tím ještě vůbec nebyl vystaven magnetickému poli.



Obr. 1.2 Hysterezní smyčka
Převzato z [5]

1.3 Magneticky měkké materiály

Feromagnetické materiály jsou buď měkké, nebo tvrdé, což záleží na jejich koercivitě H_c . Magneticky měkké materiály jsou charakteristické jejich velkou permeabilitou a nízkou koercivitou ($H_c < 1000 \text{ A/m}$), což má za následek jejich snadné zmagetování a odmagetování. Magneticky tvrdé materiály mají naopak nízkou permeabilitu a vysokou koercivitu ($H_c > 10000 \text{ A/m}$), což tyto materiály dělá velmi odolné vůči magnetizaci a následné demagnetizaci. Nejlépe ukázaný rozdíl těchto dvou materiálů je na obr. 1.3, kde jsou porovnány jejich hysterezní smyčky.[4]

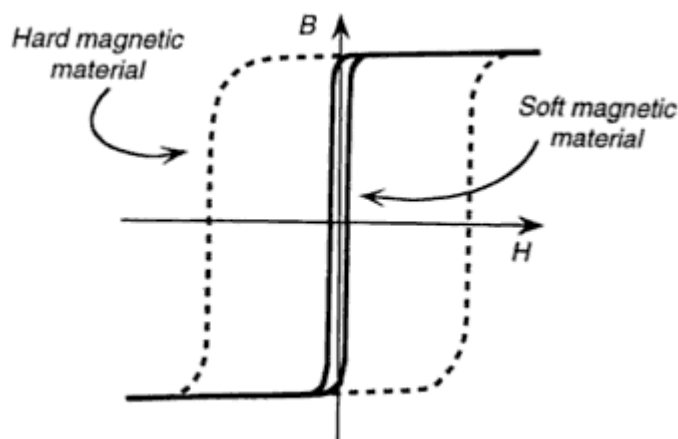
Magneticky měkké materiály se používají například jako ochrana zařízení před vnějším magnetickým polem. Nejvíce používanými materiály jsou měkká ocel, slitiny niklu a železa a ostatní měkké ferity. Tyto materiály můžete najít třeba v motorech, relátkách a elektromagnetech. Při výběru magneticky měkkého materiálu jsou nejdůležitější parametry permeabilita, magnetická saturace, koercivita a odpor.

Velká permeabilita a magnetická saturace je požadována z důvodu soustředění a pohlcení magnetického toku. Koercivita a odpor pro vysokofrekvenční použití, přičemž vysoký odpor snižuje ztráty vířivými proudy a nízká koercivita snižuje hysterezní ztráty. [4]

1.4 Magneticky tvrdé materiály

Magneticky tvrdé materiály jsou charakteristické jejich nízkou permeabilitou a vysokou koercivitou, která je vyšší než 10000 A/m. Tato jejich druhá vlastnost má za následek jejich obtížnou magnetizaci a následnou demagnetizaci. Takovéto materiály jsou někdy označovány jako permanentní magnety. Pokud je podrobíme celkové magnetizaci od +H do -H zjistíme, že daný materiál vykazuje nějakou remanentní indukci $\pm B_r$, proto můžeme mluvit o jakémsi permanentním magnetizmu. Takovou vlastnost mají všechny feromagnetické materiály, avšak většina z nich má do permanentního magnetizmu daleko. Jejich remanentní indukce je velice daleko od permanentního magnetizmu a je ovlivnitelná tepelnými účinky, mechanickými vibracemi a nebo působením malých hodnot opačné magnetické intenzity H. Magneticky tvrdé materiály mají právě díky jejich vlastnostem výborné předpoklady k permanentnímu magnetizmu. [2] [4]

Použití těchto materiálů je velmi rozsáhlé. Používají se v telekomunikacích, v počítačích, například v pevných discích, v automobilovém průmyslu, v medicíně a v elektrických strojích. V další části budou popsány nejvíce používané materiály na permanentní magnety, které se používají. [4]

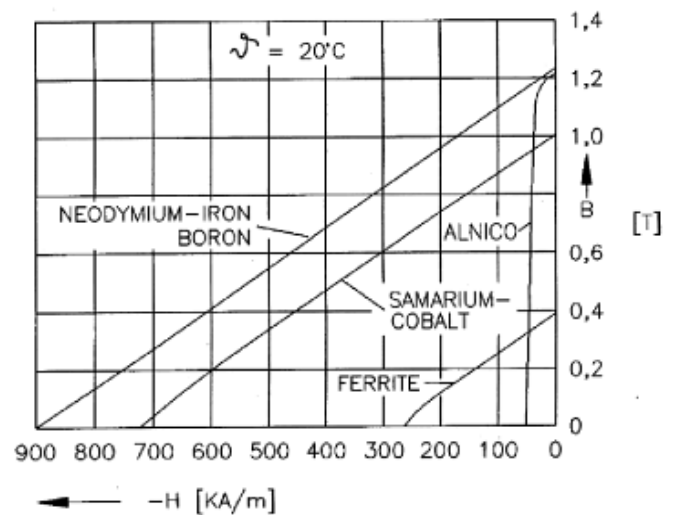


Obr. 1.3 Hysterezní smyčky měkkých a tvrdých materiálů
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [4]

2 Druhy permanentních magnetů

Ideální materiál pro výrobu PM je magneticky tvrdý. Hlavní výhodou permanentních magnetů je, že dokážou vytvořit magnetický tok ve vzduchové mezeře, aniž by museli mít jakékoliv budící vynutí protékané elektrickým proudem. To má pochopitelně za následek menší spotřebu materiálu na výrobu stroje a z důvodu absence vinutí na nich nevznikají Joulovy ztráty (přeměna elektrické energie na tepelnou). Všechny druhy PM se dají popsat hysterezní smyčkou, ze které můžeme zjistit vlastnosti typické pro daný magnet. Pro elektrické motory, ale i pro jiné využití, se nejčastěji používají tyto tři druhy magnetů: [1] [2]

- Ferity;
- Alnico (Al, Ni, Co, Fe);
- PM ze vzácných zemin (SmCo, NdFeB)



Obr.2.1 Demagnetizační křivky pro různé typy PM.
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [1]

Nejdůležitějšími hodnotami, jak už bylo jednou napsáno, jsou při výběru vhodného materiálu PM hodnoty B_r , H_c a $(BH)_{\max}$. Tyto hodnoty je možno zjistit z hysterezní smyčky, přesněji z jejího druhého kvadrantu. Tato část smyčky se jinak nazývá demagnetizační křivka. Demagnetizační křivky pro různé druhy PM, které budou dále popsány, jsou zobrazené v obr. 2.1. [1][2]

2.1 Ferity

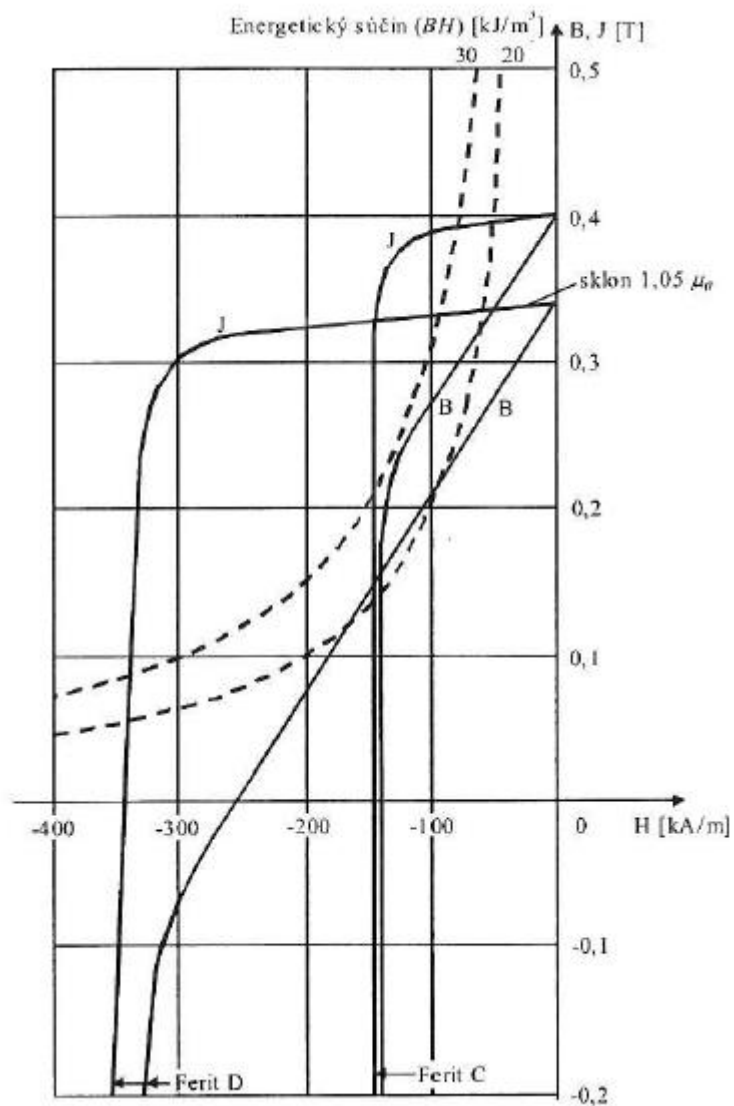
Jsou nejrozšířenějšími magnety ve světě. Vyrábí se procesem práškové metalurgie a dělí se na dva hlavní druhy:

- ferity na bázi baria $\text{BaO} \cdot 6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$
- ferity na bázi stroncia $\text{SrO} \cdot 6(\text{Fe}_2\text{O}_3)$

V procesu výroby se nejprve namele surový materiál na jemný prášek, který je pak za působení silného magnetického pole mokrou nebo suchou cestou lisován. Takto zlisovaný produkt se při teplotě zhruba $1300\text{ }^\circ\text{C}$ asi 2 hodiny spéká. Feritové PM se vyrábí jak izotropní, tak anizotropní. [2]

Ferity mají poměrně velkou koercivitu (150 až 250 kA/m), což jim umožňuje odolávat o dost vyšším demagnetizačním polím než například AlNiCo magnety, které mají koercivitu pouze okolo 50 kA/m . Naopak je to s remanentní indukcí, kterou mají ferity o dost menší než AlNiCo a to jen kolem $0,3\text{ T}$. Jejich maximální provozní teplota se pohybuje okolo $200\text{ }^\circ\text{C}$ a Curieho teplota kolem $450\text{ }^\circ\text{C}$. Hlavní výhodou těchto magnetů je jejich nízká cena a vysoký elektrický odpor, díky němuž v nich nevznikají téměř žádné ztráty vířivými proudy. [1][2][3]

Použití těchto dvou druhů magnetů je odlišné. Ferity na bázi baria se nejčastěji používají tam, kde neočekáváme vnější demagnetizační účinky na magnet ani žádnou manipulaci s magnetickým obvodem a neklademe tak nároky na vysokou koercivitu, naopak požadujeme co nejvyšší remanentní indukci. Takovým případem je například reproduktor, nebo se používají v malých stejnosměrných motorech v automobilovém průmyslu nebo v elektrických hračkách. Naopak ferity na bázi stroncia se používají v elektrických strojích, kde budou při provozu vystaveny demagnetizačním účinkům vyvolaným tokem kotvy. Z tohoto důvodu se u těchto typů magnetu vyžaduje vysoká koercivita. Pro demonstraci rozdílu těchto dvou typů magnetů jsou zde ukázány demagnetizační křivky (obr.2.3). Ukázka feritových PM je na obr.2.4.[1][2]



Obr.2.3 Demagnetizační křivky feritů C (berium) a D (stroncium)
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [2]



Obr.2.4 Feritové PM
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [3]

2.2 AlNiCo

Jsou to slitiny hliníku, niklu a kobaltu, obvykle v poměru 7-10% Al, 13-16% Ni, 20-40% Co, zbytek je Fe a navíc se do těchto druhů PM mohou přidávat prvky jako Cu (3-5%), Ti (1-8%) a Nb nebo Ta. Na přelomu poloviny 20. století to byli nejpoužívanější PM v elektrických strojích o výkonech jednotek kW až do 150 kW. V dnešní době se vyrábějí především jako izotropní magnety a vyrábí se buď odléváním nebo práškovou metalurgií (spékáním). Jejich hlavní výhodou je jejich vysoká remanentní indukce, která se pohybuje okolo 1,2 T, nejvyšší odolnost vůči korozi ze všech PM a výborná teplotní odolnost vůči ostatním typům PM. Jejich maximální provozní teplota se pohybuje kolem 520 °C a Curieho teplota kolem 850 °C. Hlavními nevýhodami magnetů AlNiCo je, že díky nízké koercivitě se lehce demagnetizují po vyjmutí z budícího magnetu, ale i údery a nárazy do magnetu. Tyto magnety se používají tam, kde je potřeba stabilní magnetické pole, které musí být nezávislé na teplotě, jako jsou například různé měřicí přístroje, měniče, ale i ve stejnosměrných komutátorových motorech s velkou vzduchovou mezerou. Někdy se tyto magnety chrání proti účinkům magnetického toku kotvy a s tím spjatou demagnetizací použitím pólových nástavců z měkké oceli. Ukázka AlNiCo magnetu je na obr. 2.2. [1][2][3]



Obr.2.2 AlNiCo magnety
Obrázek byl v nezměněné formě převzat z [3]

2.3 PM ze vzácných zemin

První generace PM ze vzácných zemin byla vynalezena v 60. letech 20. století. PM ze vzácných zemin mají několik výhod. Díky o dost vyšší remanenci B_r a koercivitě H_c jsou silnější, než ostatní magnety. Jejich největší výhodou spočívá v miniaturizaci, protože pro dosažení stejné síly magnetického pole by ostatní magnety byly o dost objemnější a zabraly více místa. Nevýhodou těchto magnetů je jejich cena, která několikanásobně převyšuje cenu ostatních magnetů. V dnešní době používáme tyto typy materiálů: [6]

2.3.1 Samarium-kobaltové magnety (SmCo)

Vývoj SmCo magnetů byl výsledkem výzkumu, který se zabýval tvorbou slitin z materiálů ze vzácných zemin s přechodnými kovy, jako jsou železo, nikl a kobalt. Dva nejběžnější SmCo materiály jsou SmCo_5 a $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. [4]

Samarium-kobaltové magnety jsou charakteristické svojí vysokou koercivitou a téměř lineární demagnetizační křivkou. $(BH)_{\max}$ je u těchto magnetů několikanásobně vyšší, než u feritových či AlNiCo magnetů. Jejich velká koercivita, která je téměř dvakrát vyšší, než u feritových magnetů, umožňuje použití těchto magnetů i v silně demagnetizačních prostředích. Při teplotě nad 250°C se stávají velice náchylné k oxidaci, což je důvod, proč je jejich maximální provozní teplota nižší vůči Curieho teplotě. Používají se v malých motorech, různých přístrojích, v měničích a tam, kde je potřeba stabilní magnetické pole při stále se měnící teplotě. Ukázka těchto magnetů je na obr. 2.5. [3] [4]

2.3.2 Neodymové magnety (NdFeB)

V 90. letech 20. století přibyl k materiálům na výrobu PM další materiál, který je založen na prvcích neodym (Nd) - železo (Fe) - bor (B). Vynalezení tohoto magnetu bylo výsledkem hledání takového materiálu, který by měl ještě lepší vlastnosti, než SmCo magnety. [2]

Neodymové magnety mají při pokojové teplotě nejvyšší $(BH)_{\max}$ ze všech používaných PM. Podobně jako AlNiCo magnety mají vysokou hodnotu remanentní indukce B_r (1,2T), ale narozdíl od nich mají několik desítek násobně vyšší koercivitu (800 kA/m). To má za následek výborné vlastnosti pro použití v silně demagnetizačních

prostředích. Nevýhoda neodymových magnetů spočívá v jejich teplotním rozsahu, který je ještě nižší než u SmCo magnetů a díky čemuž jejich vlastnosti značně závisí na teplotě. Prvek neodym je jako takový velice náchylný k oxidaci a proto musí být neodymové magnety opatřeny ochranou povrchovou antikorozií vrstvou, která je nejčastěji tvořena z niklu, zinku nebo jejich sloučeninami. Ukázka těchto magnetů je na obr. 2.6. [3]

Díky jejím výborným vlastnostem se neodymové magnety používají tam, kde je potřeba silné magnetické pole, ale jsou potřeba značně menší rozměry magnetického obvodu z důvodu miniaturizace zařízení, do kterého se aplikují. Jejich největší uplatnění je v motorech, elektronických zařízeních jako jsou reproduktory, mikrofony, dále servopohony a mnoho dalších zařízení, kde nejsou přítomné vysoké teploty. [2] [3]

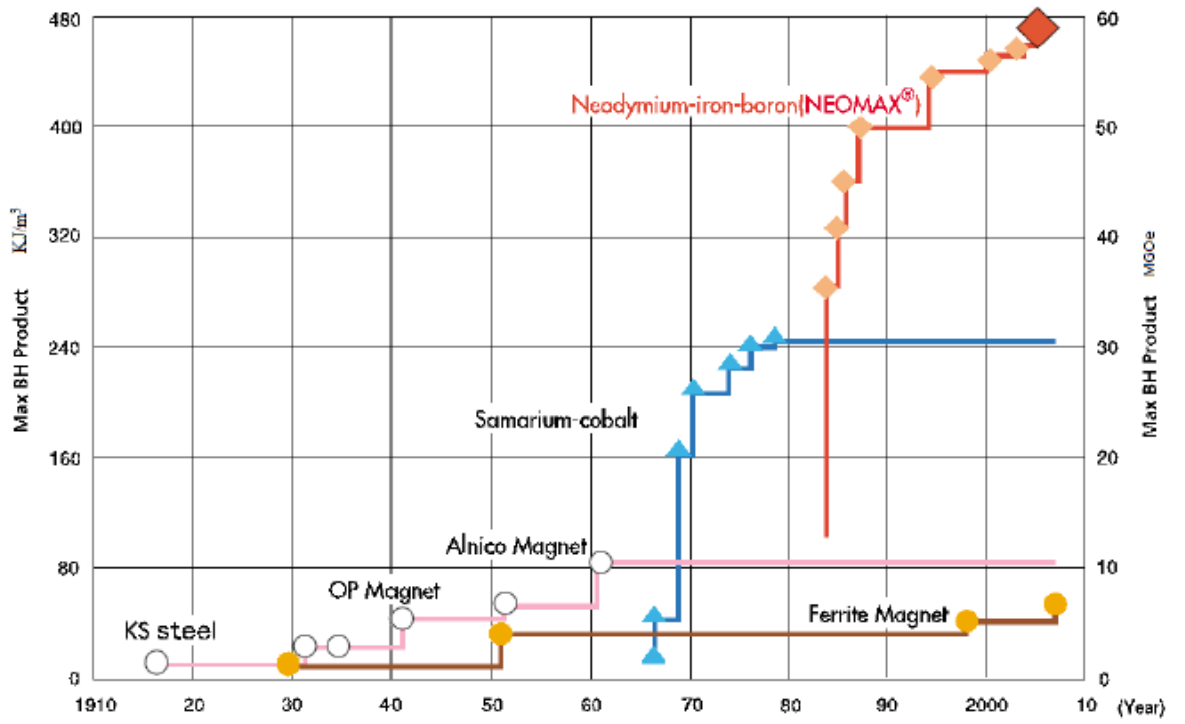


Obr. 2.5 Samarium-kobaltové magnety
Obrázek byl v nezměněné formě
převzat z [3]



Obr. 2.6 Neodymové magnety
Obrázek byl v nezměněné formě
převzat z [3]

Vývoj permanentních magnetů byl velmi významný v oblasti točivých elektrických strojů jak malých, tak i vyšších výkonů. Vývoj těchto popsaných typů magnetů v průběhu let je znázorněn na obr. 2.7. V další kapitole se o použití těchto magnetů v elektrických strojích s PM dozvíme více.



Obr. 2.7 Maximální energetický součin v průběhu let
Převzato z [17]

3 Elektrické stroje s PM

V této části práce se zabývám elektrickými stroji s PM, jejich rozdělením, principy činnosti a konstrukcí.

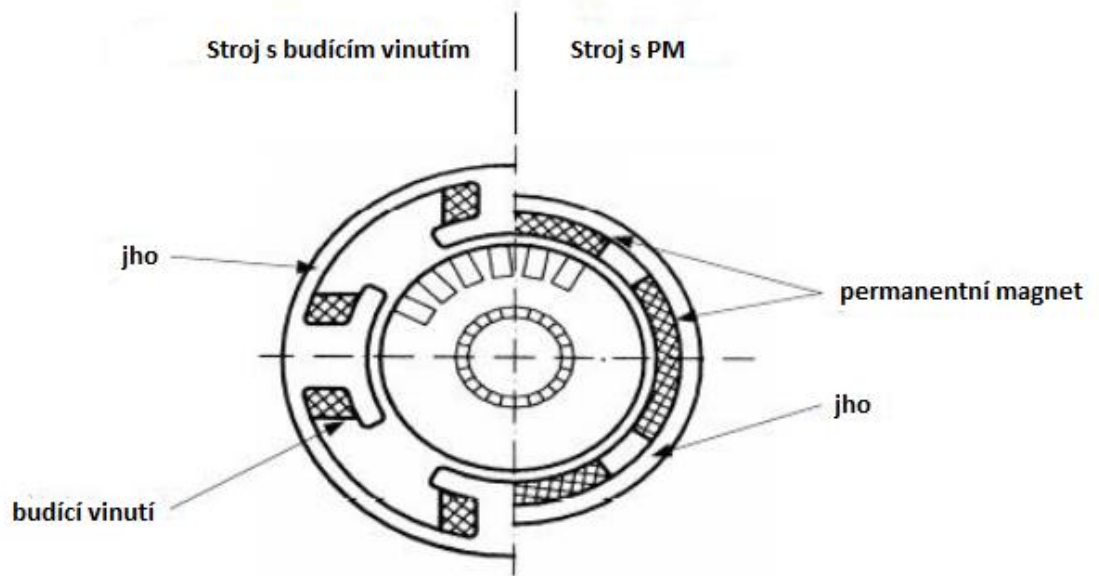
3.1 Vlastnosti strojů s PM

Některé typy strojů, například stejnosměrné, nebo synchronní, vyžadují z důvodu funkčnosti magnetické pole, které je nezávislé na proudu kotvy. U normálních typů strojů se tato vlastnost realizuje pomocí budícího vinutí, které je protékáno budícím proudem a vzniká tak magnetické pole. Nevýhoda je, že protékáním tohoto proudu vinutím vznikají Joulovy ztráty, které však nejsou tak velké, ale mohou být limitujícím činitelem, zvláště u malých strojů. Z tohoto důvodu se začali využívat permanentní magnety, které z důvodu absence vinutí tyto ztráty nemají. [7]

V případě použití budící cívky je potřeba určitý prostor jak pro cívku samotnou, tak pro chladící medium. Jak víme, elektromagnetické buzení vykazuje určité ztráty, dané vztahem: [7]

$$\Delta P_b = U_b \cdot I_b = R_b \cdot I_b^2 \quad (3.1)$$

Se snižujícím se výkonem motoru a s tím spjatým zmenšováním motoru roste podíl budících ztrát $\Delta P_b/P$. Důvodem je, že se zmenšujícím se průměrem stroje klesá i prostor vymezený pro budící vinutí, a to kvadraticky. Naopak délka siločáry a tím i potřebné magnetické napětí klesá zhruba lineárně, což naznačuje to, že i prostor potřebný pro budící vinutí musí klesat zhruba lineárně. Při zmenšování rozměrů motoru musíme dbát i na to, že nemůžeme libovolně zmenšovat vzduchovou mezeru, která musí být vzhledem k technologickým možnostem minimálně 0,15 mm, častěji 0,3 mm. Vzhledem k tomu, že skoro celé magnetické napětí se spotřebuje na průchod toku vzduchovou mezerou, která se v určitý okamžik už nemůže zmenšovat, roste podíl prostoru pro budící vinutí k prostoru kotvy, jejíž rozměry určují točivý moment. Z tohoto důvodu roste i zmíněný podíl $\Delta P_b/P$ a klesá účinnost stroje. Na obr. 3.1 je ukázka řezu stejnosměrným motorem, na kterém je zachován rozměr kotvy a ukázán rozdíl velikosti motoru s budícím vinutím a s PM. [7]



Obr. 3.1 Porovnání rozměrů SS stroje s budícím vinutím a PM
Převzato z [7]

Nevýhoda strojů s PM je ztráta možnosti řízení budícího pole. V určitých aplikacích, jako je například synchronní motor s PM to až tak nevádí z důvodu použití určitých prostředků z výkonové elektroniky, které umožňují demagnetizaci. Vzhledem k ceně PM je cenově přijatelné vyrábět motory do několik kW. Čím větší motor poté je, tím větší rozměry PM jsou potřeba a cena rychle roste. Vyloučené je také používání PM ve velkých stejnosměrných motorech, kde odbuzování potřebujeme a u PM to není možné. [7]

3.2 Rozdělení strojů s PM

PM v elektrických motorech můžeme použít jen tehdy, je-li v motoru využíváno statické magnetické pole. Elektrické stroje, kde se používají PM dělíme tedy na:

- Stejnosměrné motory s PM
- Synchronní motory s PM
 - Krokové motory
 - Lineární motory
 - Spínané reluktanční motory
- Diskové motory (SSM i SM)

Dále budou tyto typy motorů popsány.

3.3 Stejnoseměrné motory s PM

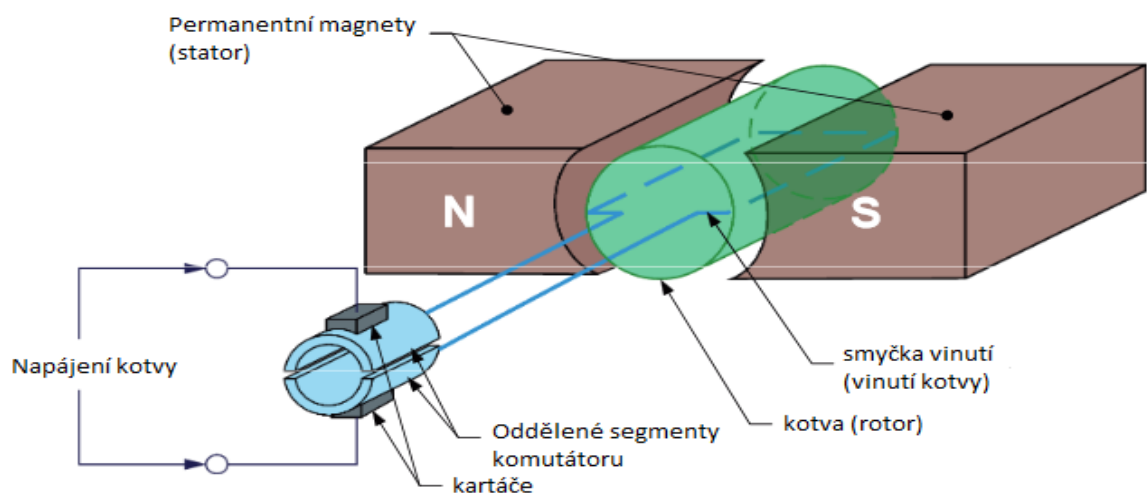
Stejnoseměrné motory s PM se od klasických stejnosměrných motorů liší tím, že mají na statoru místo vinutí PM. V podstatě se na tyto motory můžeme koukat jako na cize buzené motory s konstantním buzením. Vyrábějí se o výkonech jednotek wattů až několik kW a jejich vlastnosti jim umožňují výborné řízení rychlosti v celém rozsahu. V drtivé většině se vyrábějí jako malé motory do domácích spotřebičů, elektrických hraček, rádií apod. . Důvodem je potřeba odbuzování u větších motorů, což je zde nemožné a jejich vysoká cena. [2]

3.3.1 Konstrukce SS strojů s PM

Stator - je pevná část motoru, ve které se otáčí rotor. Stator se skládá z dvojice PM, které jsou uspořádány tak, aby póly opačné polarity byli proti sobě. Jeden magnet má ke kotvě nasměrovaný severní pól, druhý jižní, což je důvod, proč siločáry magnetického pole procházejí skrz kotvu od jednoho magnetu k druhému. [8]

Rotor - je otáčející se část motoru. Skládá se z kovového válce, na kterém je navinuto vinutí, které je na koncích připojeno na svorky na statoru přes komutátor. Komutátor jsou dva izolovaně oddělené segmenty, na něž dopadají většinou uhlíkové kartáče, přes které je do kotvy přiváděno napětí. Z důvodu toho, že je komutátor složen ze dvou oddělených segmentů, funguje jako mechanický střídač. Na obou koncích rotou jsou poté ložiska, které umožňují rotoru otáčení bez většího tření. [8]

3.3.2 Popis činnosti SS stroje s PM



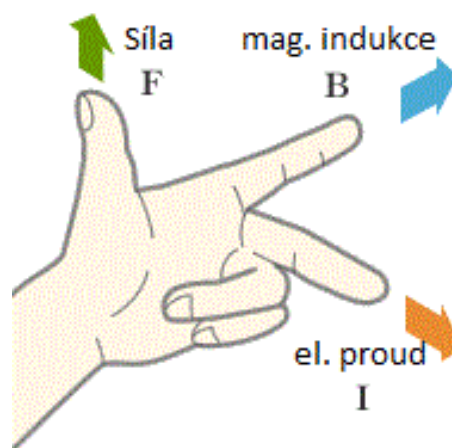
Obr. 3.2 Zjednodušené provedení SS motoru s PM
Obrázek převzat z [8] a upraven do českého jazyka

Stejnoseměrné stroje s PM fungují jako většina elektrických strojů a to na principu silového působení magnetického pole na vodiče protékané elektrickým proudem a indukované napětí do pohybujících se vodičů. Magnetické pole statoru je vytvořeno permanentními magnety, což má oproti normálně vytvořenému poli budícím vinutím i své nevýhody. Jednou z nich je nemožnost odbuzení statoru a proto se PM nepoužívají u velkých SS strojích, kde je tato vlastnost potřeba. Rotor je normálně přes lamely na komutátoru napájen SS napětím, jako je tomu u klasického SS stroje. [7]

Funkčnost stejnosměrného stroje s PM je v základě stejná jako u klasického stejnosměrného stroje s budícím vinutím na statoru. Pokud umístíme vodič protékaný elektrickým proudem do magnetického pole, bude na něj působit mechanická síla, která bude působit ve směru popisujícím Flemingův zákon levé ruky. Grafické znázornění tohoto zákona je na obr. 3.3. V těchto strojích je kotva umístěna uvnitř magnetického pole permanentních magnetů. Kotva se otáčí ve směru působící síly. Na vodič kotvy působí mechanická síla, která je popsána vzorcem: [10]

$$F = B \cdot I \cdot l \text{ [N]} \quad (3.2)$$

kde B je síla magnetického pole (magnetická indukce) v Teslách, I je velikost proudu procházejícím tímto vodičem v ampérech a l délka vodiče v metrech, který leží v tomto magnetickém poli. [10]



Obr. 3.3 Graf. znázornění Flemingova zákona levé ruky
Převzato z [11]

Jako každý stroj, mají i tyto stroje a jejich použití své výhody a nevýhody. Výhody těchto strojů jsou:

- Žádné budící vinutí a tím pádem budící ztráty
- Žádné vstupní svorky k napájení buzení na statoru
- Vzhledem k absenci budícího vinutí se i zmenšuje velikost těchto strojů
- Levnější a ekonomicky přijatelnější pro motory v řádech kW

Nevýhody jsou:

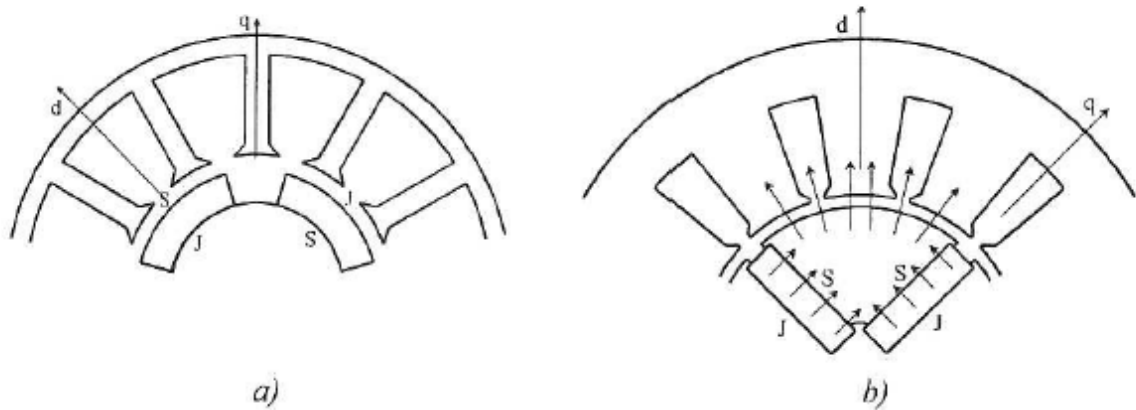
- Reakce kotvy stejnosměrného motoru nemůže být kompenzována, jelikož se síla magnetického pole vlivem demagnetizujícího efektu reakce kotvy může zeslabit.
- Je zde také šance trvalé demagnetizace pólů (částečné) způsobená nadměrným proudem kotvy při startu nebo reverzaci.
- Další hlavní nevýhodou stejnosměrných motorů s PM je, že magnetický tok ve vzduchové mezeře je konstantní, limitován a nejde externě řídit. proto řízení rychlosti u těchto motorů je poměrně složité.

3.4 Synchronní stroje s PM

Synchronní stroje s PM jsou speciálním druhem synchronních strojů. Jejich rozdíl oproti klasickým synchronním strojům spočívá v umístění PM na konstrukci rotoru. Jejich použitím se zbavíme vinutí na pólech rotoru, kluzného kontaktu, přes který se tyto póly budí a v důsledku absence vinutí nevznikají v těchto druhách motorů ztráty na budícím vinutí, což zlepšuje účinnost těchto strojů a motor může nabývat menších rozměrů. Používají se například v pohonech o nízkých nebo středních výkonech. Z pohledu konstrukce uložení magnetů se tyto motory dělí na: [2]

- Stroje s povrchovým uspořádáním magnetů
- Stroje s vnitřním uspořádáním magnetů

Ukázka těchto dvou druhů motorů je na obr. 3.4. V závislosti na uspořádání magnetů se mění i vlastnosti těchto motorů. Zatímco motory s povrchovým uspořádáním se chovají jako stroje s nevyjádřenými póly, resp. s hladkým rotorem, stroje s vnitřním uspořádáním se chovají jako stroje s vyjádřenými póly. [2]



Obr. 3.4 Uspořádání PM na rotoru synchronního stroje
a) povrchové, b) vnitřní
Převzato z [2]

3.4.1 Princip synchronních motorů s PM

Princip synchronních motorů s PM se o moc neliší od klasických synchronních motorů. Stator se skládá z izolovaných plechů a je na něm navinuté třífázové vinutí prostorově pootočené o 120° . Jediná změna oproti klasickému synchronnímu stroji je v rotoru, kde magnetické pole vytvářejí permanentní magnety. Ty vytvářejí statické pole, které se pohybuje synchronně s otáčivým polem statoru. Nevýhoda těchto motorů spočívá v tom, že kvůli permanentním magnetům nelze tento stroj odbuzovat.

Synchronní motory s PM se vyrábějí o výkonech od stovek wattů až po desítky kW. Je fakt, že tyto motory mají vzhledem k motorům s budícími cívkami vyšší účinnost, ale magnetická indukce je o dost nižší, pokud použijeme například feritové magnety. [2] Ze vztahu pro vnitřní výkon

$$P_i = k_1 B_\delta A d^2 l_{Fe} n \quad (3.3)$$

kde B_δ je indukce ve vzduchové mezeře, A měrné proudové zatížení povrchu kotvy, d průměr kotvy, l_{Fe} délka kotvy, n rychlost otáčení, je zřejmé, že snížením B_δ je pro ten samý výkon potřeba zvětšit objem kotvy, tj. $d^2 l_{Fe}$. Většinou se toto řeší prodloužením kotvy. [2]

Pokud tedy chceme zlepšit účinnost těchto motorů, musíme počítat s větší hmotností, objemem a také cenou motoru. Pokud je však buzení pomocí permanentních magnetů navrženo tak, že při plné zátěži dokáže stroj pracovat s účinnkem $\cos \varphi = 1$, při jakémkoli odlehčení motoru se objeví silný kapacitní účinník, který způsobí zhoršení účinnosti. tyto motory se poměrně často používají například v textilním průmyslu, kde je sice vyžadována změna rychlosti, ale vždy v synchronismu. [2]

3.5 Krokový motor s PM

Jak už z názvu vyplívá, krokový motor dostal svůj název podle svého pohybu "krok-krok", přičemž tyto kroky stejně vedou k točivému pohybu. Jako každý jiný elektrický motor se skládá ze statoru a rotoru. Stator se skládá z ocelových lamel a má vyjádřené póly, které jsou upořádány kolem rotoru. Na těchto pólech jsou navinuté cívky, které jsou postupně napájené podle toho, jak se má rotor otáčet. Rotor je válcový a jsou na něm umístěny PM. V závislosti na počtu pólů statoru a PM na rotoru se určuje velikost kroku. Například na obr. 3.5 je ukázka krokového motoru s PM.

Rotor má tři severní póly a tři jižní póly. Krokový úhel tohoto motoru je 30° . Existuje mnoho variant takovýchto motorů, pokud máme ještě více pólů a magnetů, bude krokový úhel vhodný pro mírné rychlosti, vysoký moment a dobré tlumení. Komerčně se vyrábí tento motor ve velkých množstvích. Typické průměry jsou 10, 15, 20, 25, 36, 42 a 57 mm s kroky $7,5$ až 18° . [12].

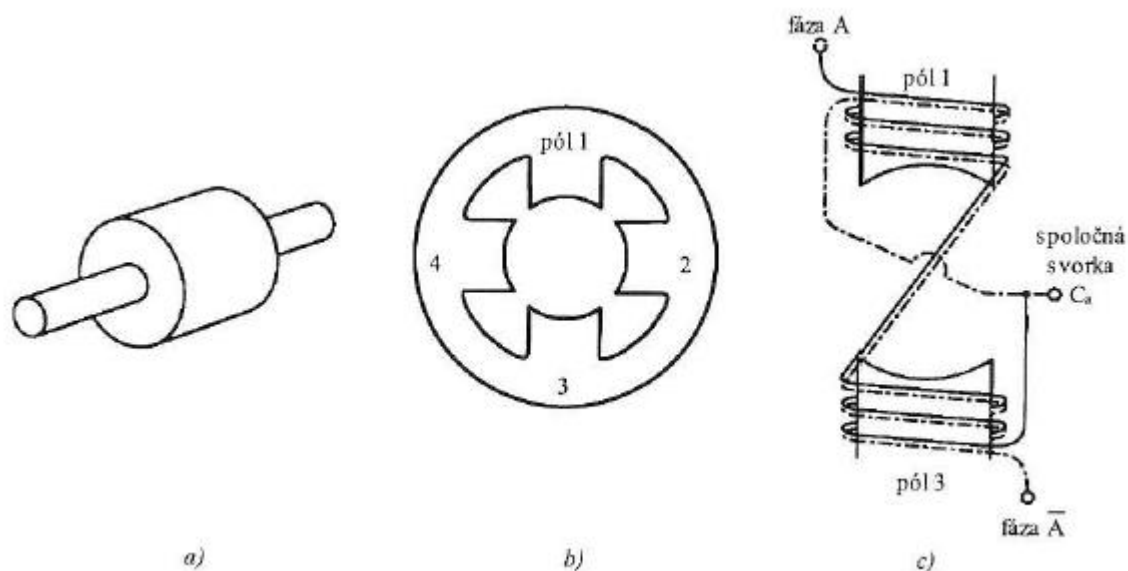


Obr. 3.5 Krokový motor s PM
Převzato z [12]

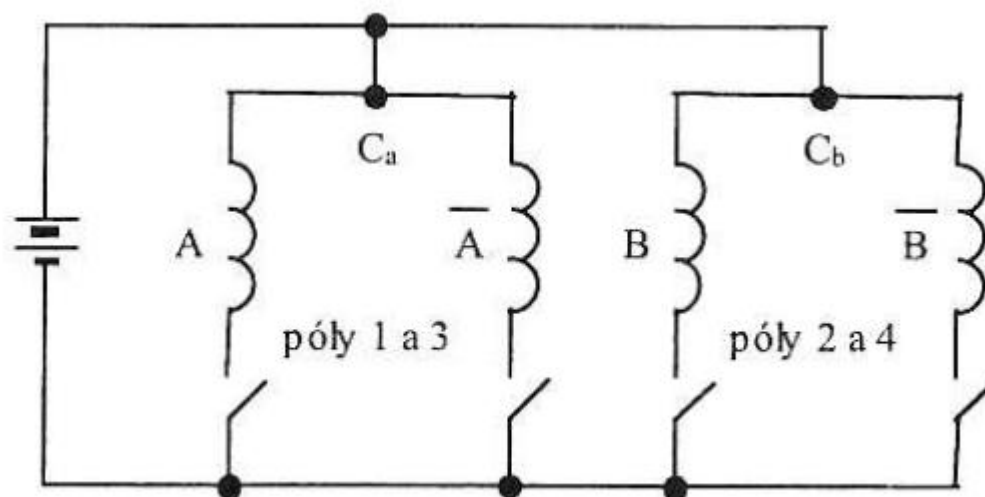
3.5.1 Princip krokového motoru s PM

Princip krokového motoru s PM spočívá ve střídavém napájení cívek na pólech a tím spjatou změnou jejich magnetické polarity. Uspořádání vinutí, tzv. bifilární je naznačeno na obr. 3.6 c). Na pólech proti sobě (v tomto případě póly 1 a 3) jsou navinuté dvě překrývající se vinutí, které jsou navzájem odizolovaná a totéž platí i pro zbylé póly 2 a 4. V cívkách tečou proudy proti sobě, což umožňuje potřebnou změnu magnetické polarity. [2]

Tyto proudy jsou do cívek posílány pomocí digitálních impulzů, které jsou poté převáděny na postupné kroky motoru, kdy jeden impulz většinou odpovídá jednomu kroku motoru. Impulzy jsou vytvářeny mikroprocesorem, logickými obvody, nebo se můžeme setkat i s impulzy vytvářené pomocí relé.

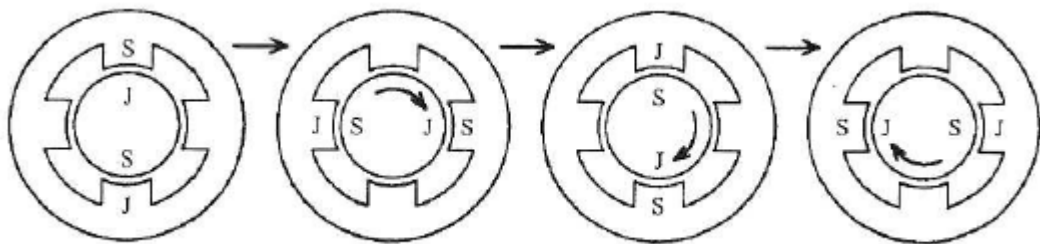


obr. 3.6 Krokový motor s PM
Převzato z [2]



Obr. 3.7 Princip napájení krokového motoru na obr. 3.6
Převzato z [2]

Na obr. 3.7 je naznačeno schéma napájení bifilárního vinutí krokového motoru. Svorky Ca a Cb označují společné svorky vinutí A, \bar{A} a vinutí B, B, na které je připojen kladný potenciál zdroje. Budíme-li vinutí A (na obr. 3.6 c) vyznačeno plnou čarou), na pólu 1 se vytvoří severní pól a na pólu 3 jižní pól. V případě, že budeme budit cívku \bar{A} (na obr. 3.6 c) vyznačena čerchovanou čarou), bude na těchto pólech polarita opačně, tj. na pólu 1 jižní a na pólu 3 severní. V tomto případě mluvíme o dvoufázovém vinutí. V případě, že za sebou spínáme fáze v pořadí A-B- \bar{A} -B, rotor se otáčí ve směru hodinových ručiček (obr. 3.8). V našem popisovaném případě je úhel kroku 90° , avšak pokud by jsme zdvojnásobili počet zubů na statoru a pólů magnetu na rotoru, dosáhli by jsme úhlu kroku 45° . [2]

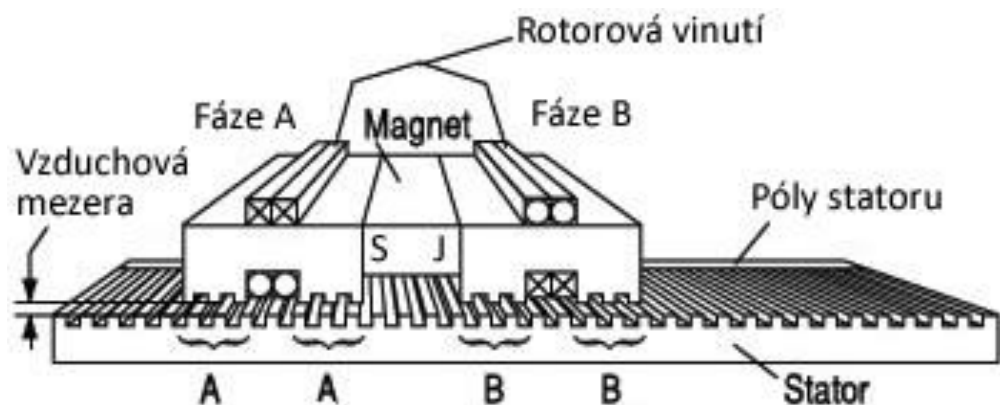


Obr. 3.8 Princip činnosti krokového motoru s PM
Převzato z [2]

Mezi hlavní výhody těchto motorů patří jejich jednoduchost a nenáročnost na údržbu, za což může i to, že nemají žádné kartáče, mají vysoký točivý moment, jsou poměrně levné a je jednoduše říditelný. Samozřejmě mají i nevýhody, jako jeho hlučnost při provozu, omezená rychlost otáčení a je velmi citlivý při přetížení. [12]

3.6 Lineární krokové motory s PM

Lineární krokový motor je speciálním typem elektrického motoru. Nevykonává totiž rotační pohyb, nýbrž pohyb posuvný. Vzhledem k tomuto faktu je odlišná i konstrukce tohoto motoru. Stator je zde statická část motoru a je rozvinutý a skládá se z ocelového jádra, rotor je zde část pohyblivá a skládá se z PM a dvou elektromagnetů, ukázka konstrukce takového motoru je na obr. 3.9. Aplikace tohoto druhu motoru není tak rozsáhlá, protože je poměrně nákladný a vyžaduje čisté prostředí. [14]



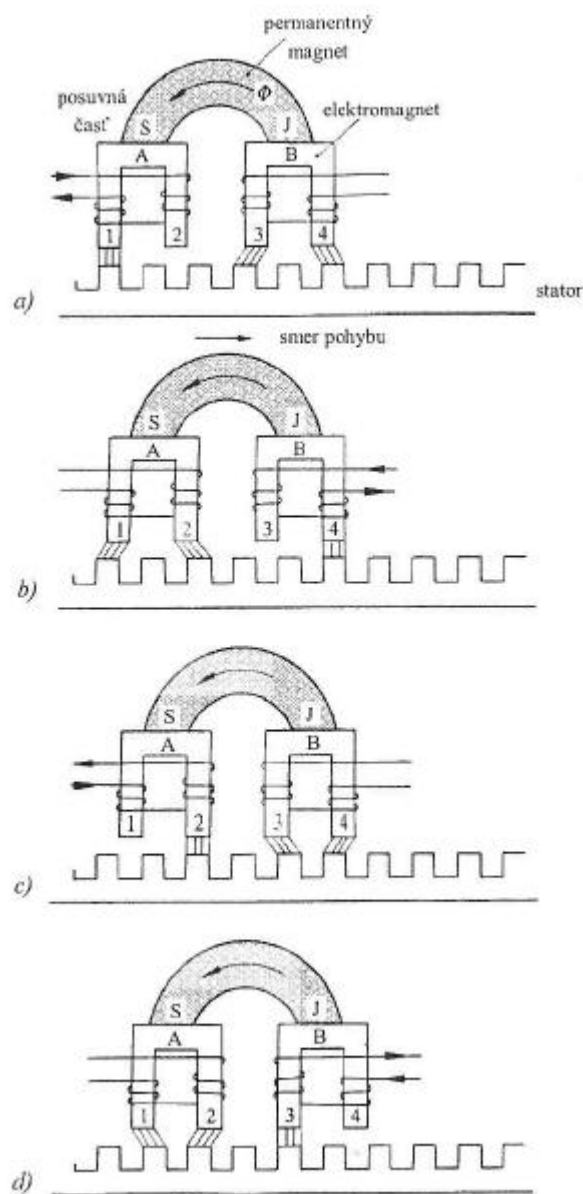
Obr. 3.9 Konstrukce Lineárního motoru s PM
Převzato z [14]

3.6.1 Princip lineárního krokového motoru s PM

Lineární motory se dají rozdělit na lineární krokové motory s permanentními magnety, hybridní a s proměnlivou reluktancí. Zde se budeme zabývat popisem principu lineárního motoru s permanentními magnety, který je graficky ukázán na obr. 3.10. [2]

Posuvná část motoru je složena ze dvou elektromagnetů, (označených jako A a B) a permanentního magnetu. Pokud není jeden z elektromagnetů buzený, jako je tomu na obr. 3.10 a) a c) pro elektromagnet B, tok permanentního magnetu prochází oběma přilehlými zuby statické části. Pokud ale elektromagnet budíme, jako je tomu pro elektromagnet A na obr. 3.10 a), tak kompletní tok elektromagnetu a permanentního magnetu je koncentrovaný pouze do jednoho zubu (zub 1) statické části a je pod ním maximální magnetická indukce, zatímco pod druhým zubem (zub 2) je minimální. Pokud budíme

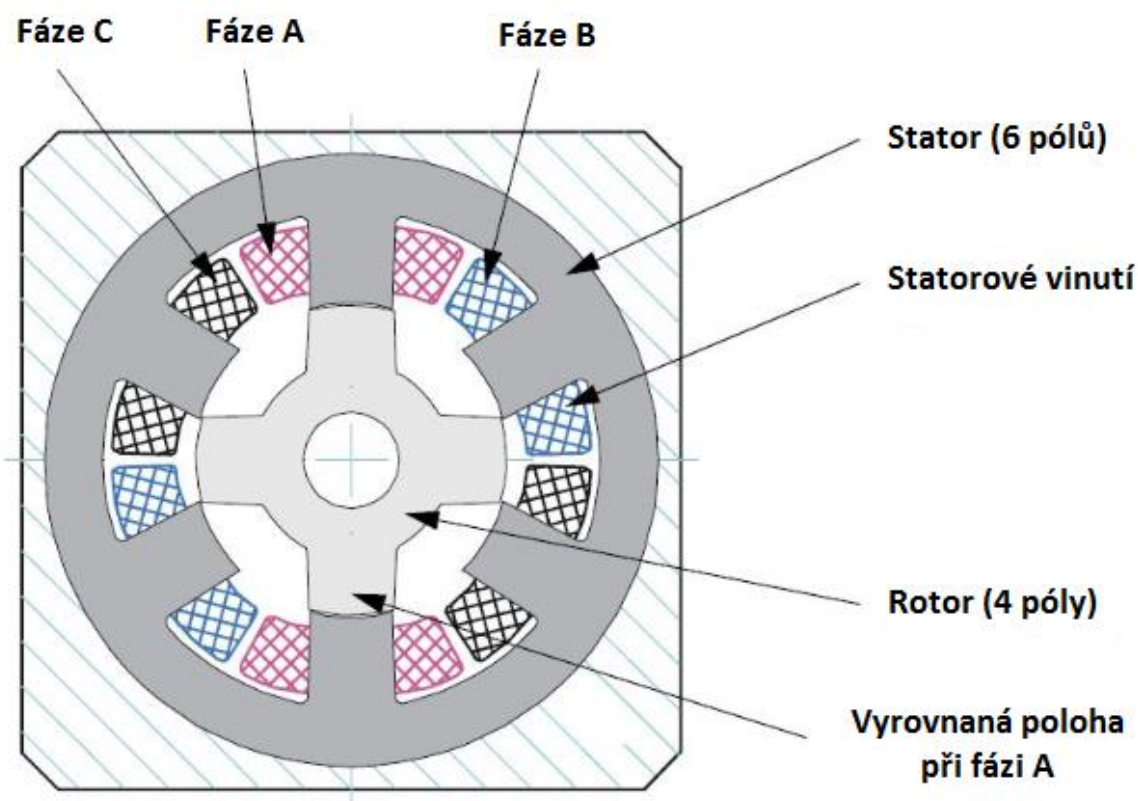
cívku B v polaritě, jako je naznačena na obr. 3.10 b), posuvná část motoru se posune o jednu čtvrtinu zubového rozestupu tak, aby se zub 4 zařadil se zubem statické části. Dále elektromagnet B odbudíme a začneme napájet opět elektromagnet A, ale s opačnou polaritou, jako je ukázáno na obr. 3.10 c). Tím zajistíme, aby se posuvná část motoru opět pohnula o jednu čtvrtinu zubového rozestupu a zub 2 se zařadil se zubem statické části, jako je tomu na obr. 3.10 c). Dále zase odbudíme elektromagnet A a nabudíme elektromagnet B, ale opačnou polaritou, po čemž posuvná část zaujme polohu, jako je tomu na obr. 3.10 d). Pro další pohyb se tyto sekvence stále opakují. [2]



Obr. 3.10 Princip lineárního motoru s PM
Převzato z [2]

3.7 Spínané reluktanční motory s PM

Spínaný reluktanční motor se konstrukčně moc neliší od krokového motoru. Jejich jediným rozdílem je počet pólů, kdy spínaný reluktanční motor jich má méně. Tyto motory jsou co do výroby nejméně finančně náročné, za což vděčí jejich nenáročná struktura. Reluktanční motory jsou motory, s jejichž využitím se do budoucna určitě počítá, například pro trakci a jiné aplikace. Jejich přední vlastnosti spočívají v jednoduché konstrukci, vysoké účinnosti i mechanické odolnosti, ve vysokém výkonu v poměru k hmotnosti a velkém záběrném momentu. Jejich v podstatě největší nevýhodou je jejich hlučný provoz, který je zapříčiněn velkým kolísáním kroutícího momentu. Pro vylepšení vlastností těchto motorů se používají právě permanentní magnety. Použití permanentních magnetů v těchto strojích bude dále popsáno. Dále si přiblížíme konstrukci a popis funkce tohoto druhu motoru, který je znázorněn na obr. 3.11. [15]



obr. 3.11 3f spínaný reluktanční motor (6/4)
Převzato z [15]

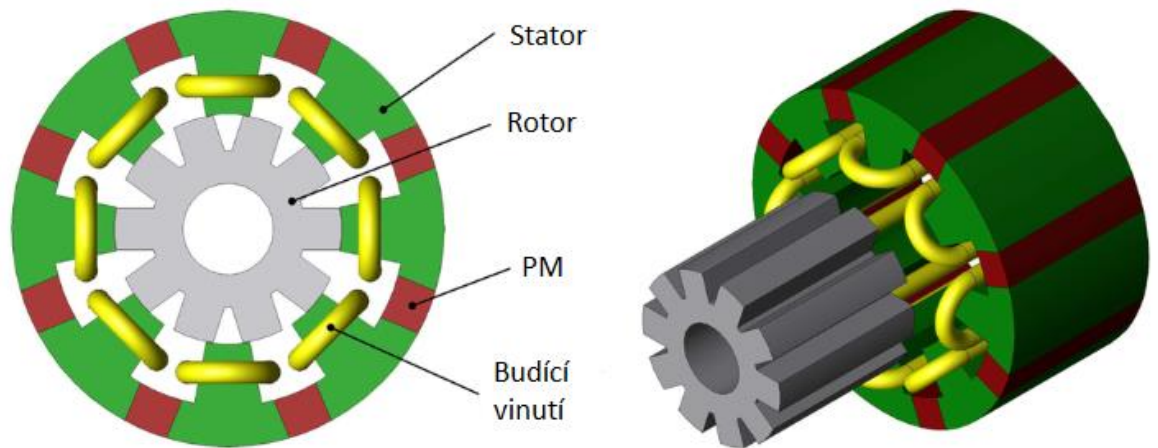
3.7.1 Konstrukce a princip SRM

Na statoru je několik vyniklých pólů, na kterých jsou navinuté cívky a tyto póly fungují jako elektromagnety. Rotor se vyrábí z magneticky měkké oceli a jsou na něm též vyniklé póly. Obvykle je vždy na statoru o 2 póly více, než na rotoru, s čímž je spjaté i označení těchto motorů, jako je například 8/6, 6/4 apod., přičemž první číslo udává počet pólů statoru a druhé počet pólů rotoru. Na obr. 3.11 je ukázka 6/4 SRM. [15]

Tyto motory dokáží vyvinout velmi vysokou rychlost (až 15 000 ot/min), což při provozu vyžaduje vysokou frekvenci spínání jednotlivých pólů, při které v magnetickém obvodu vznikají velké ztráty. Dále je rychlost motoru omezena jeho konstrukčním provedením, jako je použitý materiál rotoru, ložiska na hřídeli a měničem. Opakem je pomalý chod motoru, při kterém se klidného chodu takřka nedá dosáhnout. Z důvodu jednoduché konstrukce rotoru, na kterém není žádné vinutí a je vyroben pouze z oceli, můžeme rotor vyrobit poměrně štíhlý a tím pádem s malým momentem setrvačnosti. [13]

Pro svojí činnost potřebují tyto motory čidlo polohy rotoru z důvodu spínání jednotlivých cívek na statoru. Když začne cívkou na pólu statoru protékat proud a pól je zmagnetován, kroutící moment začne působit ve směru snižující se reluktance (magnetického odporu). [15] Přitahuje-li se zub rotoru do zákrytu se zubem statoru, působí stroj jako motor. Naopak vyjíždí-li zub rotoru ze zákrytu se zubem statoru, působí stroj jako generátor. [13]

PM se v SMR používají pro zlepšení vlastností těchto motorů. Aplikují se na stator místo protilehlých cívek. Jejich úkol spočívá v tom, že se aplikují tak, aby když cívkami neprotéká žádný budící proud, tak nesmí působit ani žádný kroutící moment, ať je rotor v jakékoliv poloze. Magnetický tok se v tomto případě uzavírá pouze přes stator a až v případě vybuzení nějaké cívky začne produkovat magnetické pole, které začne působit proti poli PM a výsledný tok, uzavírající se přes rotor vyvolá silové účinky. [15] Ukázka, jak jsou PM v tomto motoru uloženy, je na obr. 3.12..



Obr. 3.12 Umístění PM na statoru v SRM
Převzato a do českého jazyka přeloženo z [23]

3.8 Axiální diskové motory s PM

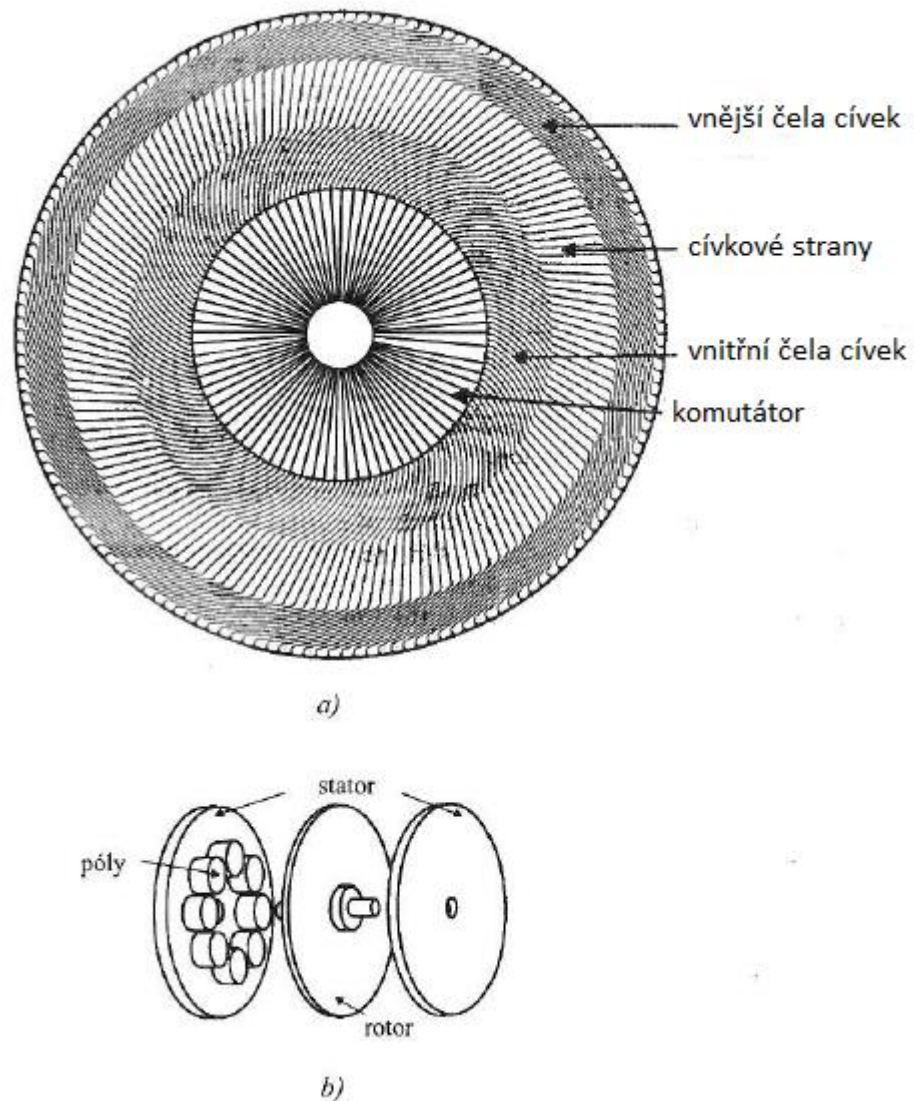
Axiální diskové motory s PM se od klasických válcových motorů podstatně liší. Jednou z odlišností je jejich konstrukce. Jak už název napovídá, mají tvar disku a jsou menší než klasické válcové motory. Jejich přední vlastností je jejich malý moment setrvačnosti, způsobený diskovou konstrukcí rotoru, který má menší hmotnost než klasický rotor, což těmto motorům umožňuje velmi rychlou reakci na řídicí impulzy. [2]



Obr. 3.13 Ukázka Axiálního motoru od firmy TianJi [16]

3.8.1 Axiální stejnosměrné motory s PM

Stejnoseměrné axiální motory mají tzv. diskovou kotvu, neboli kotvu s lisovaným vinutím a jsou poměrně rozšířené mezi motory s PM. Diskový rotor je z nevodivého nemagnetického materiálu, do něž je vlisované měděné vinutí po obou stranách rotoru. Nechybí zde ani komutátor, který je do kotvy také lisován. [2] Kotva s lisovaným vinutím je na obr. 3.14 a).



Obr. 3.14 Kotva s lisovaným vinutím a diskový motor
Převzato a upraveno do českého jazyka z [2]

Vodiče na rotoru tvoří tři samostatné části. prostřední část tvoří cívkové strany jednozávitových cívek kotvy. Vnější a vnitřní část je složena z čel cívek a část nejbližší hřídeli tvoří komutátor, na který dosedají axiálně orientované kartáče. Stator je tvořen ze dvou disků z feromagnetického materiálu, na které jsou upevněny PM. Jsou dvě možnosti, jak se do těchto motorů PM umísťují. buď se PM připevní pouze na jeden statorový kus a druhý je bez pólů a slouží pouze k uzavření magnetické cesty, nebo se PM připevní na oba statorové kusy, čímž se zvyšuje výkon těchto motorů. Konstrukční uspořádání motoru s PM na jednom statorovém kuse je na obr. 3.14 b). Nevýhodou

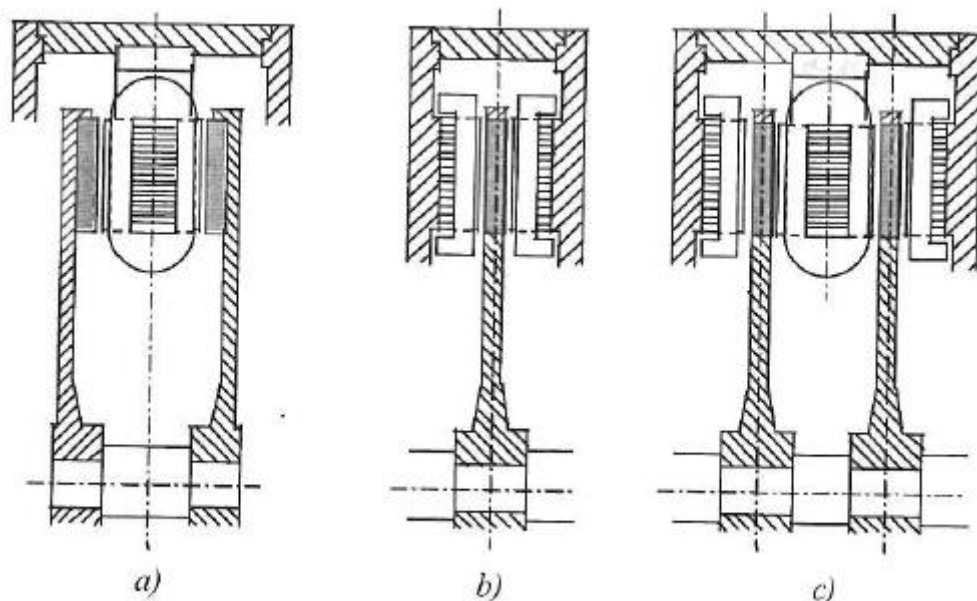
těchto motorů je jejich omezený rozsah otáček způsobený maximální dovolenou rychlostí kartáčů dosedajících na komutátor. [2]

3.8.2 Axiální synchronní motory s PM

I synchronní motory s PM se vyrábějí s axiální konstrukcí, aby využili krátkou axiální osu, lehký diskový rotor a s tím spjatý i malý moment setrvačnosti. Jejich přední vlastností oproti stejnosměrným axiálním motorům je jejich rozsah otáček, který je takřka neomezený. Jediné omezení spočívá v zabezpečení PM na rotoru proti odstředivým silám, které když se dobře upevní, mohou tyto motory nabývat opravdu velmi vysokých otáček. [2]

Vzhledem ke konstrukci se používají tyto 3 typy uspořádání stroje (Obr. 3.15), jenž mají aktivní plochy uspořádané v radiálním směru a buď jedna nebo obě části motoru jsou aktivní z obou stran [2]:

- Uspořádání se statorem uprostřed, aktivním z obou stran
- Uspořádání s rotorem uprostřed, aktivním z obou stran
- Dvou diskové uspořádání se statorem uprostřed a na okrajích

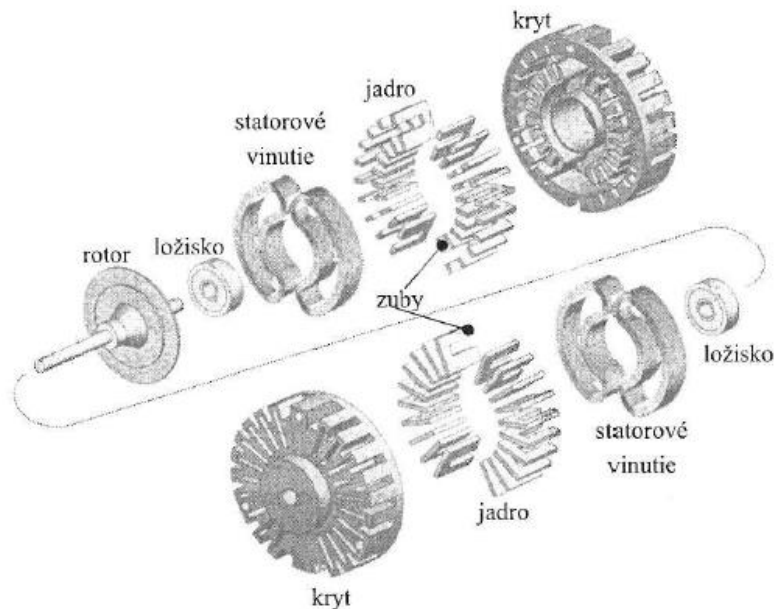


Obr. 3.15 Konstrukce axiálních synchronních motorů
a) se statorem uprostřed b) s rotorem uprostřed c) dvou diskové uspořádání
Převzato z [2]

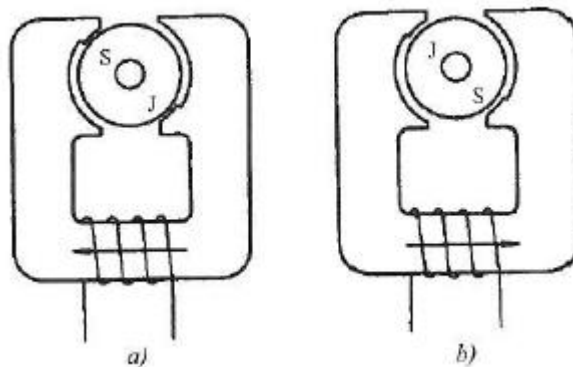
Pokud se podíváme na uspořádání se statorem uprostřed, které má disky s PM z obou stran, je vidět, že se magnetický tok uzavírá přes tyto disky a z tohoto důvodu musejí být z magneticky měkkého materiálu. Naopak uspořádání s rotorem uprostřed a dvou diskové vyžadují rotory z nemagnetického materiálu. [2]

3.8.3 Axiální krokové motory s PM

Zajímavostí jsou třeba ještě axiální krokové motory s PM, jejichž ukázka konstrukce je na obr. 3.16, které se používají výhradně v hodinových strojcích. Existuje i jednofázová varianta těchto motorů, která se v hodinách používá poměrně často. Princip těchto motorů je patrný z obr. 3.17, kde je vidět, že pohyb rotoru je realizován změnou směru proudu v cívice elektromagnetu. [2]



Obr. 3.16 Axiální diskový motor s PM do hodinového strojku [2]



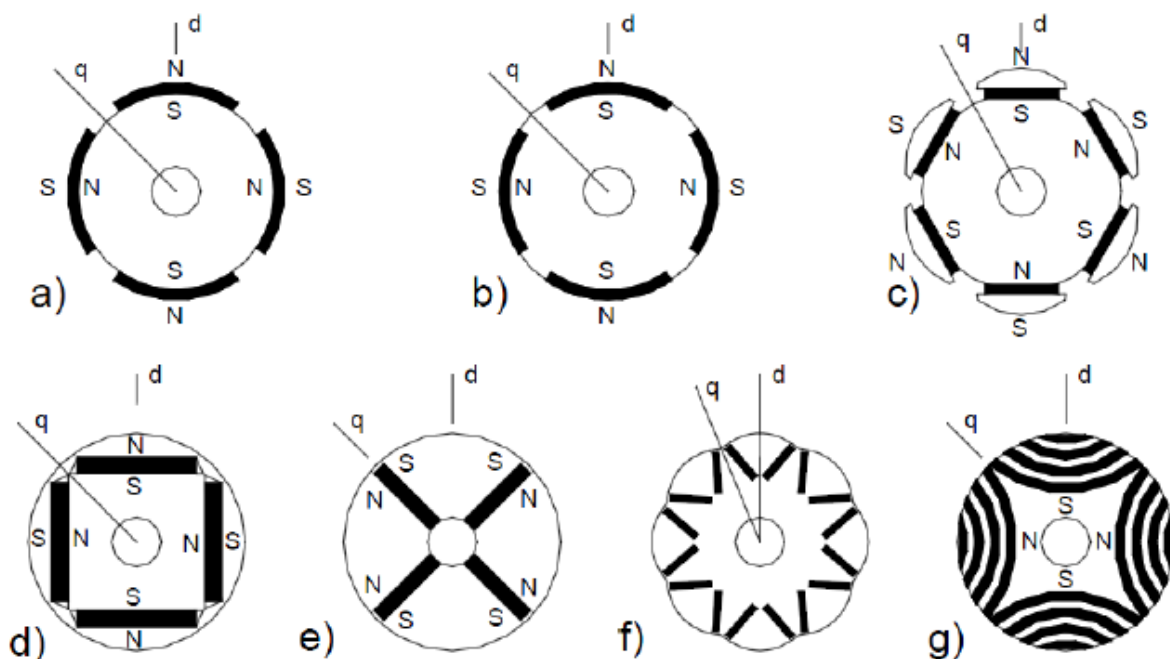
Obr. 3.17 Princip jednofázového krokového motoru s PM [2]

4 Montáž PM do elektrických strojů

PM se do konstrukce elektrických strojů montují buď ručně, nebo existují i zmínky o experimentech za účelem vývoje robotického osazování PM za pomoci robotických ramen. V této kapitole se budeme zabývat jak válcovými motory, kde bude částečně popsána montáž PM na rotor, a to jak vnější, tak i vnitřní varianta umístění PM. Dále bude popsána i montáž PM do axiálních motorů, kde se PM umisťují na diskový rotor.

4.1 Válcové motory

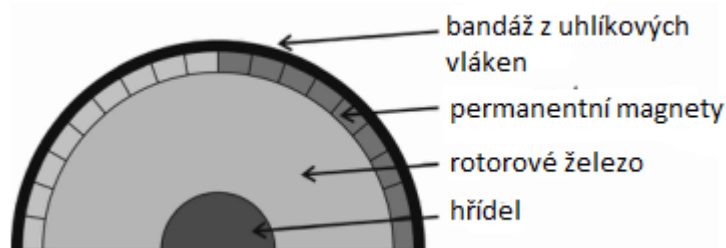
Ve válcových motorech jsou PM buď připevněny na povrchu rotoru, nebo jsou umístěny přímo uvnitř rotoru. Existuje poměrně dost variant, jak jsou PM v rotoru a nebo na něm uspořádány. Ukázky některých variant jsou na obr. 4.1. Důvod, proč se PM umisťují na povrch, nebo dovnitř rotoru závisí na vlastnostech motoru. Motory s PM na povrchu rotoru můžeme považovat za typ motoru s nevyjádřenými póly, naopak s PM uvnitř rotoru jako typ motoru s vyjádřenými póly.



Obr. 4.1 Uspořádání PM v rotoru synchronních strojů [17]
 a) povrchové uspořádání PM, b) magnety vložené do rotoru, c) povrchové uspořádání s pólovými nástavci, d) skryté tangenciální uspořádání, e) skryté radiální uspořádání, f) skryté nakloněné uspořádání, g) PM pomáhající SRM s axiálně vrstvenou konstrukcí

4.1.1 Ruční montáž PM

PM umístěné na povrchu se na rotor připevňují tak, že se na rotorové železo přilepí lepidlem. Je to jednoduché a levné řešení, které splňuje svůj účel. U synchronních motorů, které dosahují velkých otáček se tyto přilepené magnety musejí ještě převinout buď skelnou páskou, nebo bandáží z uhlíkových vláken. To tyto magnety zabezpečí proti odstředivým silám v případě, kdyby lepidlo nevydrželo a magnet by mohl bez varování z rotoru odletět a způsobit velké škody. Rotor s povrchovými magnety a uhlíkovou bandáží je na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Uložení povrchových PM na rotoru
Převzato a do českého jazyka upraveno z [18]

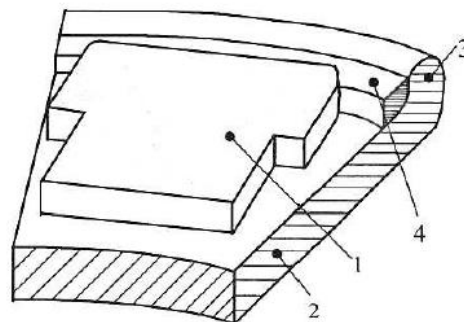
Do rotorů s vnitřním uspořádáním se PM montují jiným způsobem, než je tomu u vnějšího uspořádání. Rotor se postupně skládá z "disků", ve kterých jsou vyřezané otvory na PM, do kterých se poté ručně vsazují a postupně se skládají na sebe. Takto vložené PM se nemusejí nijak připevňovat ani jistit bandáží nebo čímkoliv jiným, protože jsou chráněny před odstředivými silami v rychloběžných motorech přímo rotorovým železem, což naprosto znemožňuje, aby se PM jakkoliv hnul nebo odletěl. Takto vkládané magnety se do rotoru vkládají buď už zmagnetované, nebo se po složení celého rotoru zmagnetují dodatečně rázovým impulzem silného magnetického pole. Na obr. 4.3 je ukázáno ruční skládání takového rotoru a vkládání jednotlivých PM.



Obr. 4.3 Ruční montáž vnitřních PM
Převzato z [19]

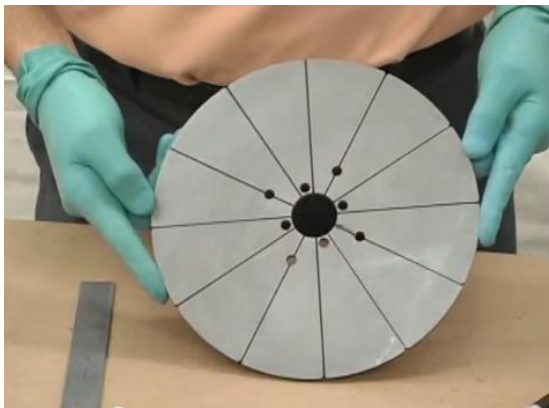
4.2 Axiální motory

U axiálních motorů se PM lepí lepidlem přímo na disk rotoru. Tyto magnety mají většinou tvar lichoběžníku a lepí se na vnější okraj disku. V rychloběžných motorech jsou též, jako povrchově uspořádané magnety u válcových motorů, zajišťovány uhlíkovou bandáží proti odstředivým silám a u některých typů motorů je navíc na okraji disku zábrana, která tyto magnety jistí před případným posouváním a následným odpadnutím magnetu za chodu motoru a následnou havárií. Takto přilepený magnet se zábranou na okraji disku je ukázán na obr. 4.4.

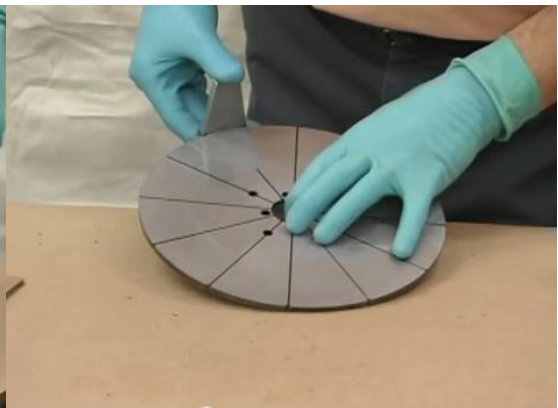


Obr. 4.4 Uložení magnetu na disku axiálního motoru [2]

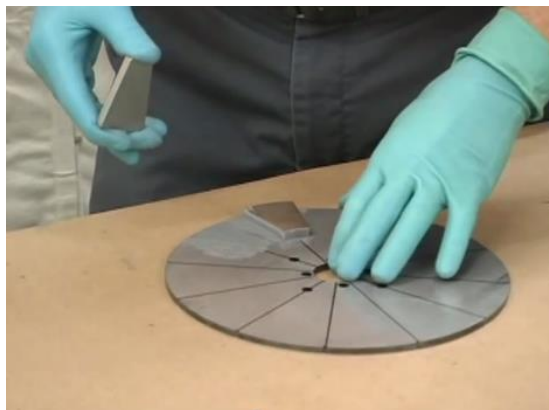
Postup při montáži PM na disk rotoru je znázorněn na obrázcích 4.5 - 4.8. Na obr. 4.5 je samotný neosazený disk s narýsovanými čarami, kam se budou magnety lepit. Na obr. 4.6 je pod prvním magnetem nanesené lepidlo a je zde vidět první magnet, který se bude na disk lepit. Na obr. 4.7 už je první magnet přilepen a vedle něj se lepí druhý. Takhle to jde celou dobu, až se magnety osadí po celém obvodu disku. Kompletně osazený disk je znázorněn na obr. 4.8. Magnety se po obvodu disku lepí tak, aby vedle sebe byl vždy severní a jižní pól.



Obr. 4.5 Disk před osazením [20]



Obr. 4.6 Osazování prvního magnetu [20]



Obr. 4.7 Osazení druhého magnetu [20]

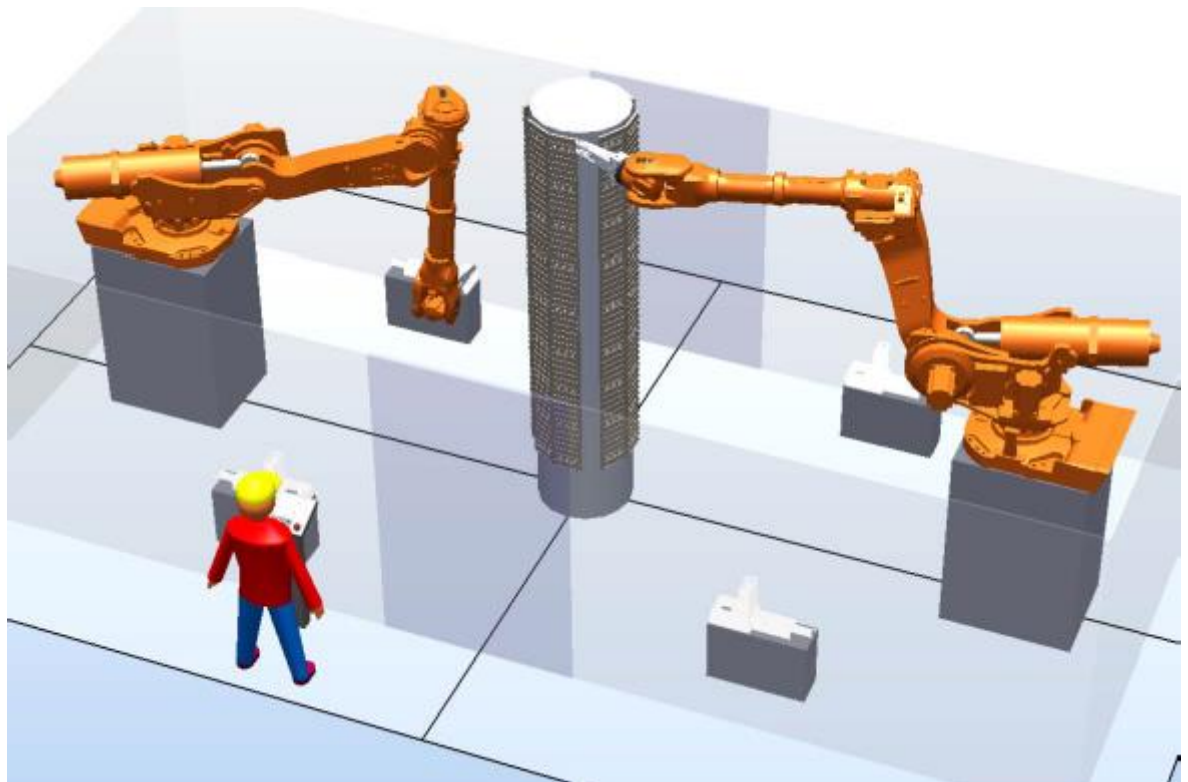


Obr. 4.8 Kompletně osazený disk [20]

Takto osazený disk už se jen v případě potřeby zajistí proti odstředivým silám, aby se magnety nehnuły, přidělá se hřídel a může se vsadit do motoru.

4.3 Robotické osazování povrchových PM

Ve snaze zrychlit výrobu velkých točivých strojů a ušetření nemalých částek za placení pracovníku na manuální osazování těchto magnetů, kde jsou rotory osazeny desítkami až stovkami těchto magnetů, se začalo vyvíjet zařízení na automatické osazování PM. Konstrukční provedení tohoto zařízení spočívá ve dvou pohyblivých ramenech, které si ze zásobníku nabírají PM a osazují rotor mezi nimi, každý z jedné strany. Pro představu je toto zařízení ukázáno na obr. 4.9. [21]



Obr. 4.9 Model robotického osazování PM
Převzato z [21]

Při návrhu tohoto zařízení se muselo uvažovat spousta požadavků, které by mělo splňovat a které je potřeba vyřešit. Některé z těchto požadavků jsou například síla, která při osazování působí mezi PM a železem rotoru, která nabývá někdy i vysokých hodnot a zařízení musí i navzdory tomu přesně a hladce PM umístit na správné místo, musí se vyhnout poničení magnetů při osazování, flexibilitnost zařízení v případě potřeby osazení jiného typu rotoru a další a další požadavky. [21]

Pokud se povede všechny tyto požadavky splnit a uvést toto zařízení do běžného provozu, nejen že by to ušetřily nemalé finanční prostředky, ale také by se eliminovalo nebezpečí, které podstupují lidé při manuálním osazování a práci s těmito magnety. [21]



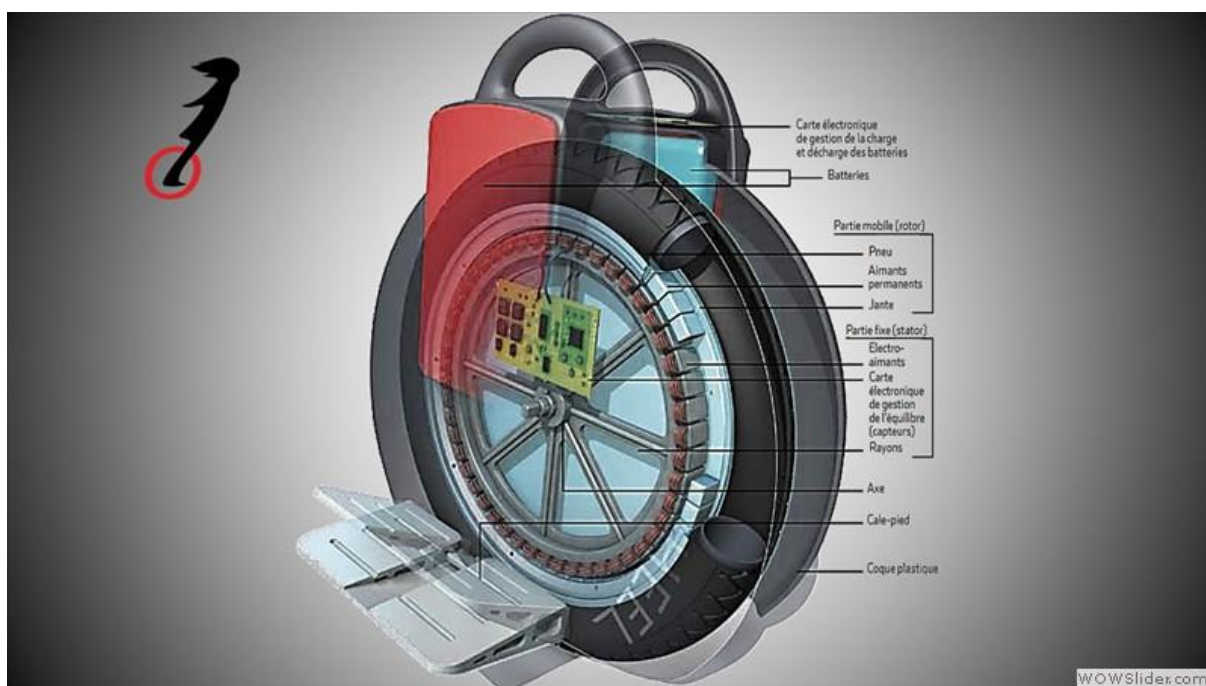
Obr. 4.10 Experimentální náhrada za velký rotor osazený PM
Převzato z [21]

5 Možný budoucí směr strojů s PM

Hlavní nevýhodou současnosti a omezení aplikace PM do elektrických strojů je jejich vysoká cena, která až časem poklesne na přijatelnou hodnotu, bude možné tyto motory aplikovat tam, kde by se vyplatily více než klasické motory s buzením. To ale bohužel cena zatím nedovoluje. Věřím, že technologický pokrok je v tomto směru v podstatě nezastavitelný a jednou tato skutečnost nastane.

Velkou budoucnost bych viděl i u spínaných reluktančních motorů, jejichž pokrok a rozsah použití se s pokrokem výkonové elektroniky velmi rychle rozšířil a díky jejich jednoduché konstrukci, nízkým nákladům na výrobu, výborné účinnosti a rozsahu otáček o nich určitě ještě v budoucnu uslyšíme v mnoha aplikacích.

Co se axiálních motorů s PM týče, už dnes je jejich využití poměrně rozsáhlé, od golfových vozíků až po různé aplikace, kde je potřeba úspora místa na motor a nebo jsou zde prostě vhodnější. Jejich budoucnost bych časem viděl hlavně v automobilovém průmyslu, kde se v hojném počtu určitě brzo začnou objevovat. Zajímavostí současnosti je třeba tzv. solowheel (obr. 5.1), který se začal vyrábět a zájem o toto "vozítko" roste.



Obr. 5.1 Ukázka konstrukce solowheel
Převzato z [22]

6 Závěr

V této bakalářské práci, zabývající se elektrickými stroji s permanentními magnety, jsem se v úvodu snažil přiblížit pojem magnetismus jako takový, rozdělení magnetických materiálů a jsou zde vypsány druhy používaných permanentních magnetů v elektrických strojích. Je zde poukázáno na to, jak se historicky tyto magnety vyvíjeli, od feritových magnetů až po moderní neodymové magnety, které svými vlastnostmi několikanásobně tyto feritové magnety převršili, avšak jejich aplikace je zatím bohužel omezena jejich cenou.

V další části jsou vypsány druhy elektrických strojů, do kterých se tyto PM aplikují, jejich popis konstrukce, principy funkčnosti a výhody a nevýhody jednotlivých typů. Kromě klasických válcových motorů jsou zde popsány i motory diskové, kterým se v současnosti věnuje hodně pozornosti a jsou to motory, do kterých se do budoucna vkládají velké naděje v rozsáhlém uplatnění, avšak uvidíme, jak se vývoj těchto motorů bude vyvíjet dále.

V závěru práce je popsána montáž permanentních magnetů do těchto strojů, přesněji do rotoru válcového a diskového synchronního motoru. Jsou zde ukázky ručního lepení permanentních magnetů na povrch rotoru i vkládání vnitřních permanentních motorů do železa rotoru. V dnešní době se ve světě snaží i o robotické osazování permanentních magnetů na rotory velkých strojů, což je zde taky okrajově popsáno. V úplném závěru práce diskutuji možný budoucí vývoj elektrických strojů s permanentními magnety. Tyto stroje mají do budoucna obrovský potenciál a věřím, že s postupem času se vývoj těchto motorů dostane až k bodu, kdy bude možné vytlačit většinu strojů s klasickým buzením právě těmito motory.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GIERAS, Jacek F., WANG, Rong-Jie a KAMPER, Maarten J.. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless machines*. 2nd edition. vyd. Springer Science & Business Media, 2008. 362 s. ISBN 978-1-4020-6993-2
- [2] HRABOVCOVÁ, Valéria, JANOUŠEK, Ladislav, RAFAJDUS, Pavol, LIČKO, Miroslav. *Moderné elektrické stroje*. vyd. Žilinská univerzita, 2001. 265 s. ISBN 80-7100-809-5.
- [3] ZIENTEK, Pawel. Magnety AlNiCo, Feritové magnety, Samarium-kobaltové magnety, Neodymové magnety. P.P.H.U. "ENES". [Www.magnety-magnety.com](http://www.magnety-magnety.com) [online]. Warszawa , Poland, 2005 [cit. 2015-03-18]. Dostupné z: www.magnety-magnety.com/
- [4] FURLANI, P., Edward, *Permanent magnet and electromechanical devices*, vyd. Academic Press, USA, 2001, ISBN 0-12-269951-3
- [5] *Magnetizing recording and device material*, B-H curve, www.material-sys.com, [cit 2015-03-29], Dostupné z: <http://www.material-sys.com/en/product/magneticRecordingAndDevice.html>
- [6] TOUFAR, Jan, *Permanentní magnety ze vzácných zemin*, Plzeň, 2013, Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/9438/Bakalarska%20prace-%20Permanentni%20magnety%20ze%20vzacnych%20zemim.pdf?sequence=1>, Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, Vedoucí práce: Ing. Karel Hruška, Ph.D. .
- [7] BARTOŠ, Václav, ČERVENÝ, Josef, HRUŠKA, Josef, KOTLANOVÁ, Anna, SKALA, Bohumil, *Elektrické stroje*, vyd. Západočeská univerzita v Plzni, 2006, 140 s., ISBN 80-7043-444-9
- [8] Festo didactic, *Permanent Magnet DC motor*, Canada, 2014, [cit. 2015-03-31] Dostupné z: https://www.labvolt.com/downloads/86357_F0.pdf
- [9] SELOS Bohemia, *Základní pojmy magnetizmu*, 2013, [cit. 2015-04-19], Dostupné z: <http://www.magnety.eu/poradna/2983/>
- [10] Electrical4you, *Permanent Magnet DC Motor or PMDC Motor | Working Principle Construction*, 2015, [cit. 2015-04-29], Dostupné z: <http://electrical4u.com/permanent-magnet-dc-motor-or-pmdc-motor/#Construction-of-Permanent-Magnet-DC-Motor-or-PMDC-Motor>
- [11] DAIDO Electronics, *Magnet term "Fleming's left-hand rule"*, 2015, [cit. 2015-04-29], Dostupné z: http://www.daido-electronics.co.jp/english/qa/magnet_lexicon/ha/ha15.html
- [12] Pohonnatechnika.cz, *Krokový motor*, 2015, [cit. 2015-05-10], Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>

- [13] FLAJTINGR, Jiří, Kule, Lumír, *Elektrické pohony se střídavými motory a polovodičovými měniči*, 2. upr. vydání, Plzeň,
- [14] Pohonnatechnika.cz, *Lineární motor*, 2015, [cit. 2015-05-10], Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [15] KOPECKÝ, Ladislav, *Reluktanční motor pro elektromobil*, 2008, [cit. 2015-05-14], Dostupné z: http://www.elektromobily.org/w/images/a/ad/Reluktancni_motor_Kopecky.pdf
- [16] Alibaba.com, *Double Clutch Axial Magnetic powder clutch tension control device for printing machine* [online], [cit. 2015-05-20], Dostupné z: http://www.alibaba.com/product-detail/double-Clutch-Axial-Magnetic-powder-clutch_478235557.html
- [17] SVĚTLÍK, Pavel, *Návrh startér-generátoru*, Plzeň, 2011, Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=34609>, Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, Vedoucí práce: Ing. Petr Řezáček, Ph.D.
- [18] BINDER, A., SCHNEIDER, T., KLOHR, M., *Fixation of buried and surface-mounted magnets in high-speed permanent-magnet synchronous machines* [online], [cit. 31-05-2015], Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/3172173_Fixation_of_buried_and_surface-mounted_magnets_in_high-speed_permanent-magnet_synchronous_machines
- [19] <http://blog.caranddriver.com/wp-content/uploads/2011/11/Loading-the-permanent-magnets-into-the-rotor.jpg>, [cit. 31-05-2015]
- [20] *Rotor Assembly of a Permanent Magnet Axial Flux Alternator*, [cit. 3-5-2015], Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Ahs2pM10xQU>
- [21] HULTMAN, Erik, SALAR, Dana, LEIJON, Mats, *Robotized Surface Mounting of Permanent Magnets*, [online], [cit. 31-05-2015], Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2075-1702/2/4/219/pdf>
- [22] Solowheel Europe, *Solowheel* [online], [cit 1-6-2015], Dostupné z: http://www.solowheel.eu/wp-content/uploads/wow-slider-plugin/33/images/www.solowheel.eu_solowheel_inside.jpg
- [23] Christopher H.T. Lee, Chunhua Liu, K. T. Chau, *A Magnetless Axial-flux Machine for Rang Extended Electric Vehicles*, [online], [cit. 5-6-2015], Dostupné z: http://www.mdpi.com/energies/energies-07-01483/article_deploy/html/images/energies-07-01483f16b-1024.png