

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Permanentní magnety v elektrických strojích

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub LOCHMAN**
Osobní číslo: **E11B0052P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Permanentní magnety v elektrických strojích**
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. Prostudujte a uveďte způsoby uložení PM v elektrických strojích.
3. Popište problematiku PM ze vzácných zemin a navrhnete možné řešení těchto problémů.
4. Diskutujte výhody a nevýhody použití 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. Hrabovcová, V., Janoušek, L., 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 druhy permanentních magnetů, popsání jejich vlastností a možného konstrukčního uspořádání těchto magnetů. Dále jsou zde popsány výhody a nevýhody použití PM v elektrických strojích. Poslední část se zabývá problematikou PM ze vzácných zemin a možného řešení této problematiky.

Klíčová slova

Permanentní magnet, stejnosměrný motor, synchronní motor, krokový motor, bezkartáčový motor, krokový motor, lineární motor, DSPM motor, cena, teplota, účinnost.

Abstract

The bachelor thesis is focused on different kinds of permanent magnets, properties description and mounting possibilities of these magnets. There is also described the issue of rare earth permanent magnets. At the end, advantages and disadvantages of using permanent magnets are mentioned.

Key words

Permanent magnet DC motor, synchronous motor, stepper motor, brushless motor, step motor, linear motor, DSPM motor, price, temperature, efficiency.

Prohlášení

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/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2015

Jakub Lochman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Pavlovi Světlíkovy za cenné rady, připomínky a za celkové vedení práce. Dále bych rád poděkoval své rodině za trpělivost a podporu během celého mého studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 PERMANENTNÍ MAGNETY	13
1.1 FERITOVÉ MAGNETY	13
1.2 ALNiCO MAGNETY	14
1.3 PM ZE VZÁCNÝCH ZEMIN.....	15
1.3.1 Samarium-kobaltové magnety.....	15
1.3.2 Neodymové magnety	16
2 ZPŮSOBY ULOŽENÍ V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	18
2.1 STEJNOSMĚRNÉ MOTORY	18
2.1.1 Konstrukční provedení	19
2.1.1.1 Válcové motory.....	19
2.1.1.2 Diskové motory.....	20
2.1.1.3 Inverzní konstrukce motorů	20
2.2 SYNCHRONNÍ MOTORY	21
2.2.1 Konstrukční provedení	21
2.2.1.1 Válcové motory.....	21
2.2.1.2 Motory s vnějším rotorem.....	24
2.2.1.3 Diskové motory.....	25
2.3 KROKOVÉ MOTORY.....	25
2.3.1 Konstrukční provedení	26
2.3.1.1 Krokový motor s aktivním rotorem.....	26
2.3.1.2 Hybridní krokové motory.....	26
2.4 BEZKARTÁČOVÉ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	27
2.4.1 Konstrukční provedení bezkartáčových strojů	27
2.5 LINEÁRNÍ STROJE.....	28
2.5.1 Konstrukční provedení	28
2.5.1.1 Lineární krokové motory	28
2.5.1.2 Synchronní lineární motor	29
2.5.1.2.1 Tubulární lineární synchronní motor.....	29
2.6 DSPM MOTORY S PERMANENTNÍMI MAGNETY	30
2.6.1 Konstrukční provedení	30
3 VÝHODY A NEVÝHODY POUŽITÍ PM V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH.....	31
3.1.1 Výhody použití.....	31
3.1.2 Nevýhody použití.....	31
4 PROBLEMATIKA PM ZE VZÁCNÝCH ZEMIN A MOŽNÉ NÁVRHY ŘEŠENÍ TĚCHTO	
PROBLÉMŮ	33
4.1.1 Popis problematiky	33
4.1.2 Možné řešení tohoto problému.....	33
5 ZÁVĚR	36
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	37

SEZNAM TABULEK.....	39
SEZNAM OBRÁZKŮ	39
SEZNAM ROVNIC	39

Seznam symbolů a zkratek

$BH_{(max)}$	.....	maximální energetický součin
H_c	.....	koercivita
B_r	.....	remanence
U_i	.....	indukované napětí v kotvě
K	.....	konstrukční konstanta stroje
Φ_m	.....	magnetický tok
I_a	.....	proud jednotlivých cívek vinutí kotvy
ω	.....	uhlová rychlost
M_e	.....	elektromagnetický moment
R_a	.....	odpor jednotlivých cívek
ω_s	.....	synchronní uhlová rychlost
U_s	.....	svorkové napětí
U_{ib}	.....	indukované napětí buzením
ϑ	.....	zatěžovací úhel
x_d	.....	příčná reaktance
x_q	.....	podélná reaktance
μ_0	.....	permeabilita vakua
μ	.....	permeabilita materiálu
p	.....	počet pólů
Z	.....	počet závitů
a	.....	počet dvojic paralelních větví
PM	.....	permanentní magnet
AlNiCo	.....	sloučenina hliníku, niklu a kobaltu
NdFeB	.....	sloučenina neodymu, bóru a železa
Sm-Co	.....	sloučenina samarium-kobalt
Al	.....	hliník
Ni	.....	nikl
Co	.....	kobalt
Fe	.....	železo
BaFe ₁₂ O ₁₉	.....	ferit barya
SrFe ₁₂ O ₁₉	.....	ferit stroncia

Ne₂Fe₁₄B..... sloučenina neodymu, bóru a železa
LM.....lineární motor

Úvod

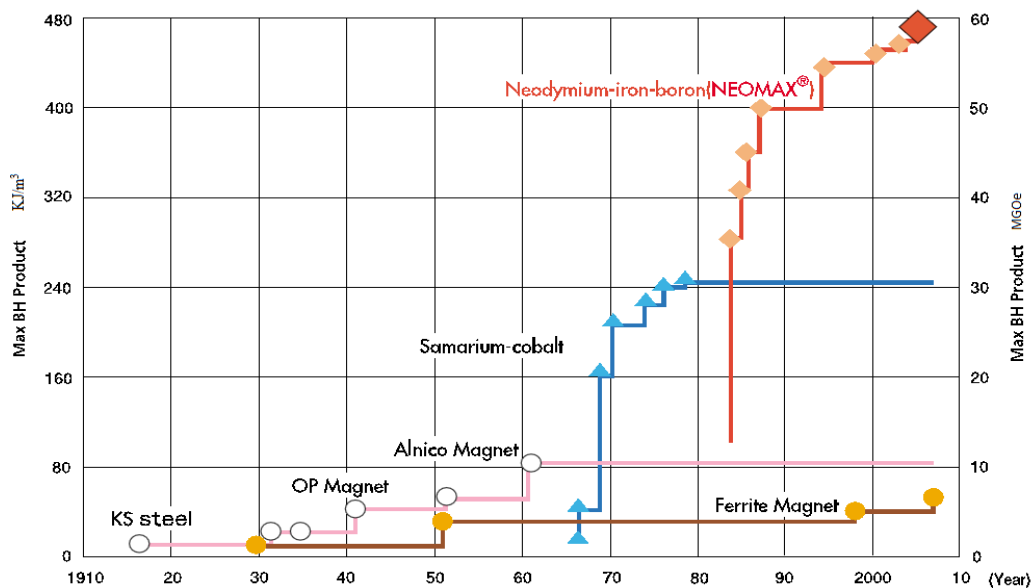
Permanentní magnety (PM) se dnes používají v mnoha zařízeních. V posledních letech dochází díky zdokonalování výroby a novým konstrukcím k jejich většímu používání. PM nahrazují v mnoha aplikacích stroje s budícími vinutími. Velkými výhodami těchto strojů jsou nižší ztráty, díky tomu větší účinnost a mnoho dalších vlastností.

Tato práce se zaměřuje na druhy PM používaných v současné době. Nalezení informací o jejich vlastnostech a dnes používaných uloženích PM v elektrických strojích. Dále tato práce popisuje problematiku PM ze vzácných zemin a celkové výhody a nevýhody použití PM v elektrických strojích.

Práce je rozdělena do čtyř částí. V první se zabývá druhy a vlastnostmi PM. V druhé části jsou popsány možné a dnes používané konstrukce s PM. Třetí část se zabývá výhodami a nevýhodami použití PM v elektrických strojích. V poslední části je popsána problematika PM ze vzácných zemin a možné řešení této problematiky.

1 Permanentní magnety

PM nahrazují v elektrických strojích budící vinutí stroje. K existenci magnetického pole nepotřebují cívky a tedy ani elektrického napájení, díky čemuž nevznikají ztráty na vinutí. Prvními materiály pro PM byla uhlíková a chromová ocel, později to byly slitiny AlNiCo, AlNi. Mezi další materiály pro PM patří vzácné zeminy a to samarium (SM) a neodym (Nd) v kombinaci s kobaltem (Co) a železem (Fe).



Obr. 1: Maximální energetický součin v průběhu let vývoje PM [10]

1.1 Feritové magnety

Feritové magnety jsou nejčastěji vyráběnými magnety na světě a to díky jejich ceně. Vyrábějí se z feritu barya ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) nebo feritu stroncia ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$). Tyto PM dosahují vyšších hodnot základních magnetických parametrů. Feritové magnety mají vyšší hodnoty koercivity. Maximální provozní teplota je okolo 400°C . Další vlastností je nízká elektrická rezistivita. [1, 3, 5, 6, 10],

Vyrábějí se práškovou metalurgií. Mohou být buďto izotropní nebo anizotropní. Izotropní materiály mají v libovolném směru stejné magnetické vlastnosti. U anizotropních materiálů se jinou formou technologie výroby dosáhne dobrých magnetických vlastností jen v jednom směru. Materiál je velice odolný proti korozi a odolává chemikáliím. Jako jsou louhy, slabé kyseliny a ředidla. Feritové magnety se používají v motorech, v elektronice a mnoha dalších

aplikacích. [1, 3, 5, 6, 10]

Tabulka 1: Magnetické parametry feritových magnetů[5], [6], [10]

Symbol materiálu	Remanence (Br)	Koercivita (jHc)	Max-energetický součin $(BH)_{\max}$
	mT	kA/m	Kj/m ³
F10T	200-235	125-160	6,5-9,5
F25	360-400	135-170	22,5-28,0
F30BH	380-400	230-275	27,0-32,5
F35	410-430	220-250	31,5-35,0

1.2 AlNiCo magnety

AlNiCo je slitina hliníku (Al), niklu (Ni) a kobaltu (Co). Po materiálech ze vzácných zemin mají tyto magnety nejlepší magnetické vlastnosti. Výhodou je vysoká zbytková magnetická indukce a nízká teplotní závislost. Maximální pracovní teplota je okolo 500°C. Díky tomu se mohou používat v aplikacích s většími provozními teplotami. Koercitivní síla je nízká a demagnetizační křivka je nelineární. [1, 3, 5, 6, 10]

AlNiCo PM se vyrábějí metodami metalurgickými (odlívání) nebo práškovými (spékání). Mohou být izotropní nebo anizotropní. Materiál je tvrdý a křehký. Díky tomu se obtížně obrábějí. Mají větší odolnost proti chemikáliím než feritové PM a jsou odolné proti korozi. Tyto magnety se používají v motorech, v měřicích přístrojích, v proudových generátorech a v mnoha dalších aplikacích. [1, 3, 5, 6, 10]

Tabulka 2: Magnetické a fyzikální parametry odlévaných magnetů AlNiCo [5], [6], [10]

Symbol materiálu	Remanence (Br)	Koercivita (bHc)	Max-energetický součin (BH) _{max}	Curie teplota (Tc)	Max-pracovní teplota	
	mT	kA/m	Kj/m ³	°C	°C	
LN9	690	37	9	760	450	Izotropní materiály
LN13	700	48	13	810	450	
LNG34	1180	46	34	890	525	Anizotropní materiály
LNGT36J	700	140	36	860	550	

1.3 PM ze vzácných zemin

Jde o sloučeniny železa (Fe) a vzácných zemin. Pro jejich dobré magnetické vlastnosti nahrazují v mnoha aplikacích AlNiCo a feritové magnety.

1.3.1 Samarium-kobaltové magnety

Patří mezi první magnety vyráběné ze vzácných zemin. Mezi základní vlastnosti patří teplotní stabilita, vysoká hodnota maximálního energetického součinu, vysoká remanentní indukce a koercivita. Díky tomu mohou magnety pracovat i za přítomnosti silných demagnetizačních polí. Pracovní teplota magnetů se pohybuje okolo 300-350 °C. Mezi nevýhody patří vysoká pořizovací cena a menší pracovní teplota. [1, 3, 5, 6, 10]

Vyrábějí se metodou práškové metalurgie. Dodávají se obvykle jako azinotropní, tedy magnetované jen v jednom směru. Jsou vyráběny v základě na bázi dvou intermetalických sloučenin SmCo₅, kde PM je tvořena dvěma hlavními složkami Sm a Co v poměru 1:5 a Sm₂Co₁₇, kde je poměr 2:17. K opracování materiálu se používá broušení, dělení, elektroeroze nebo řezání vodním paprskem. Materiál magnetu je velice křehký a značně odolný proti

korozí. Samarium-kobaltové magnety se používají v malých motorech, proudových generátorech, měřicích přístrojích a měničích. [1, 3, 5, 6, 10]

Tabulka 2: Magnetické parametry samarium-kobaltových magnetů [5], [6], [10]

Symbol materiálu	Remanence (Br)	Koercivita (jHc)	Max-energetický součin $(BH)_{max}$	Max-pracovní teplota
	T	kA/m	kJ/m^3	$^{\circ}\text{C}$
YZ-16	0,8-0,86	1195-1830	112-136	250
YX-250	0,88-0,94	1435-1830	144-168	250
YX-10LT	0,59-0,63	1430-1830	68-80	250
YXG-26LT	1,00-1,06	>1430	142-216	350

1.3.2 Neodymové magnety

Jako další magnety ze vzácných zemin byly NdFeB, které patří mezi nejrozšířenější magnety ze vzácných zemin. Jsou tvořeny směsí Neodymu, železa a boru. Tyto magnety dosahují oproti Samarium-kobaltových magnetům vyššího energetického součinu, remanence a koercitivu. Díky velké velikosti koercivity je možné je použít i v demagnetizačních polích. Maximální pracovní teplota se pohybuje okolo 200 $^{\circ}\text{C}$. Jeho cena je menší než u Samarium-kobaltových magnetů. [1, 3, 5, 6, 10]

PM je náchylný na korozí. Materiál je vcelku stabilní, ale na většinu rozpouštědel a kyselin reaguje vysoce korozivně. Navíc při působení vodíku materiál křehne a tím se zhoršují jeho vlastnosti. Proto se materiál povrchově upravuje. Buďto kovovým povlakováním, kde je na magnet převážně galvanicky nanesen korozivzdorný materiál, jako je například zlato, stříbro nebo zinek. Nebo se používá povlakování plastové, kde je použit parylen nebo epoxidová pryskyřice. Neodymové magnety jsou obvykle vyráběny procesem práškové metalurgie o chemickém složení $\text{Ne}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Prach z neodymového materiálu o velikosti mikronů je produkován v atmosféře inertního plynu a poté je tento prach stlačen ve formě. Kaučuková forma je zpevněna kapalinou na všech stranách. Magnetický výkon slitiny se optimalizuje použitím silného magnetického pole před a během lisovacího procesu. Toto

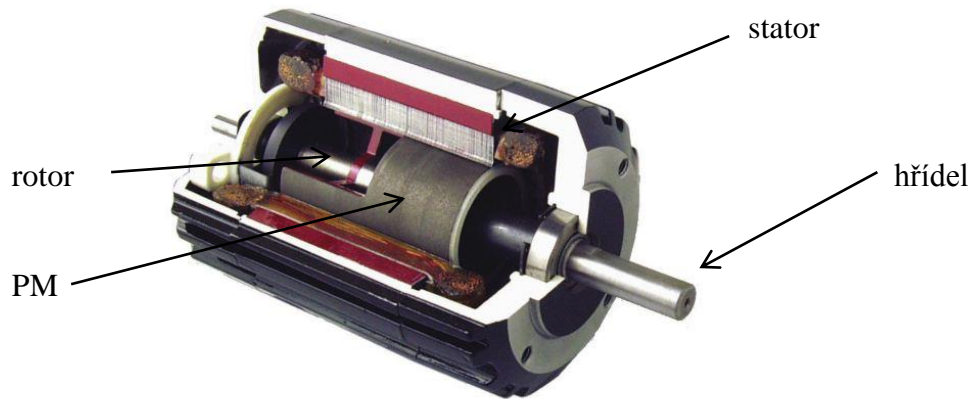
pole určuje směr magnetizace. Poté se vylisují a spečou. Tyto PM se používají v krokových motorech, v synchronních motorech a mnoha jiných aplikacích. [1, 3, 5, 6, 10]

Tabulka 3: Magnetické parametry neodymových magnetů[5], [6], [10]

Symbol materiálu	Remanence (Br)	Koercivita (jHc)	Max-energetický součin (BH) _{max}	Max-pracovní teplota
	T	kA/m	kJ/m ³	°C
N35	11,8-12,8	≥995	263-287	80
33M	11,4-11,8	≥1114	247-263	100
30H	10,8-11,4	≥1353	223-247	120
30SH	10,8-11,4	≥1672	223-247	150

2 Způsoby uložení v elektrických strojích

2.1 Stejnosměrné motory



Obr. 2: Ukázka stejnosměrného motoru s PM [9]

Stejnosměrné stroje se používají většinou od několika W až do několika kW. PM nahrazují v motorech budící vinutí. Tyto motory můžeme z hlediska analýzy porovnat s cize buzeným stejnosměrným motorem. Používají se zejména v malých strojích, v pohonech s elektrickou trakcí, počítačových a kancelářských strojích a dalších aplikacích. [1]

Stator motoru je tvořen z PM a v jeho magnetickém poli se nachází rotor napájený napětím U . Ve vinutí kotvy protéká proud a díky němu se v rotoru indukuje magnetické pole. Toto pole a pole statoru na sebe působí silovými účinky a vzniká točivé pole. Tento motor můžeme popsat pomocí těchto rovnic:

$$U_i = K \cdot \Phi_M \cdot \omega \quad (1)$$

$$U = U_i + \Sigma R_a \cdot I_a \quad (2)$$

$$M_e = K \cdot \Phi_M \cdot I_a \quad (3)$$

$$\omega = \frac{U_i}{K \cdot \Phi_M} = \frac{U - \Sigma R_a \cdot I_a}{K \cdot \Phi_M} = \frac{U}{K \cdot \Phi_M} - \frac{\Sigma R_a}{(K \cdot \Phi_M)^2} \cdot M_e \quad (4)$$

$$K = \frac{Z \cdot p}{2 \cdot a} \quad (5)$$

Kde U_i značí indukované napětí v kotvě, K značí konstrukční konstantu stroje, Φ_M značí magnetický tok, ω značí úhlovou rychlost, R_a je odpor jednotlivých cívek vynutí kotvy, I_a je proud jednotlivých cívek vynutí kotvy a M_e značí elektromagnetický moment stroje. [1]

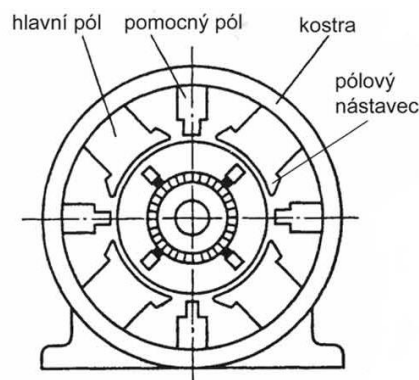
U stejnosměrných strojů s PM lze měnit otáčky motoru přidáním přídavného rezistoru do obvodu kotvy. Ale tento typ je značně ztrátový a neekonomický, proto se nepoužívá. Dále se dají otáčky měnit změnou napájecího napětí. [1]

2.1.1 Konstrukční provedení

2.1.1.1 Válcové motory

V malých válcových motorech se nejčastěji používají feritové magnety. Které se do motoru montují už zmagnetované. Musíme většinou použít větší kotvu než u klasických motorů, protože B_r které lze dosáhnout z feritových materiálů je menší než u klasických strojů. Ale i přesto je motor s PM menší než klasický, neboť nemá budící cívky. U velkých válcových strojů se nedají PM montovat do motoru zmagnetované. Budící póly jsou vybaveny magnetickým vinutím, díky tomu se na stator montují nenamagnetované PM. [1, 3]

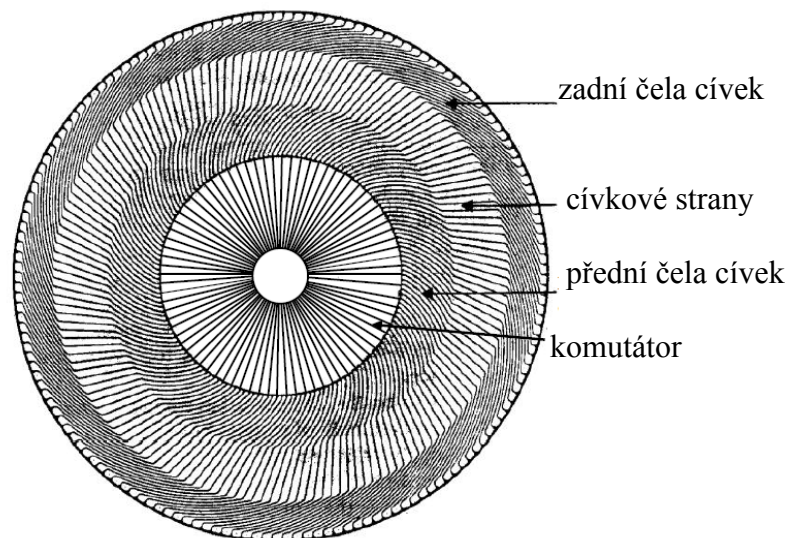
Kvůli zlepšení komutace se používají pomocné póly. U větších strojů se často používají pólové nástavce, což je zobrazeno na Obr.3. Tyto nástavce jsou sestaveny z listěných plechů. Protože je permeabilita u PM velmi nízká a blíží se k μ_0 , jsou pólové nástavce dobrou vodivou cestou pro magnetický tok reakce kotvy. Tím se značně sníží demagnetizace. U PM z AlNiCo musíme použít dlouhé póly ve směru magnetizace. Je to způsobeno tím, že PM z AlNiCo materiálů mají nízkou koerzivní sílu H_c . Feritové PM mají větší koerzivní sílu H_c proto nemusí mít tak dlouhé póly ve směru magnetizace ale musí mít větší plochu kvůli nízké remanenci B_r . [1, 3]



Obr. 3: Stejnosměrný válcový motor [1]

2.1.1.2 Diskové motory

Diskové motory mají takzvanou diskovou kotvu, což je úplně jiná konstrukce než u válcových motorů. Rotor je vytvořen z nevodivého materiálu, který je ve tvaru disku. Na každé straně tohoto disku je úplné vynutí kotvy a komutátoru, které je vyrobené z mědi (Obr.4). Pro zvětšení výkonu se u těchto strojů používá uspořádání s oboustranným státorem. Díky uspořádání kotvy tohoto stroje, je jeho moment setrvačnosti malý a má velmi rychlou odezvu na řídicí impuls. Což je jeho velká výhoda. [1, 3]

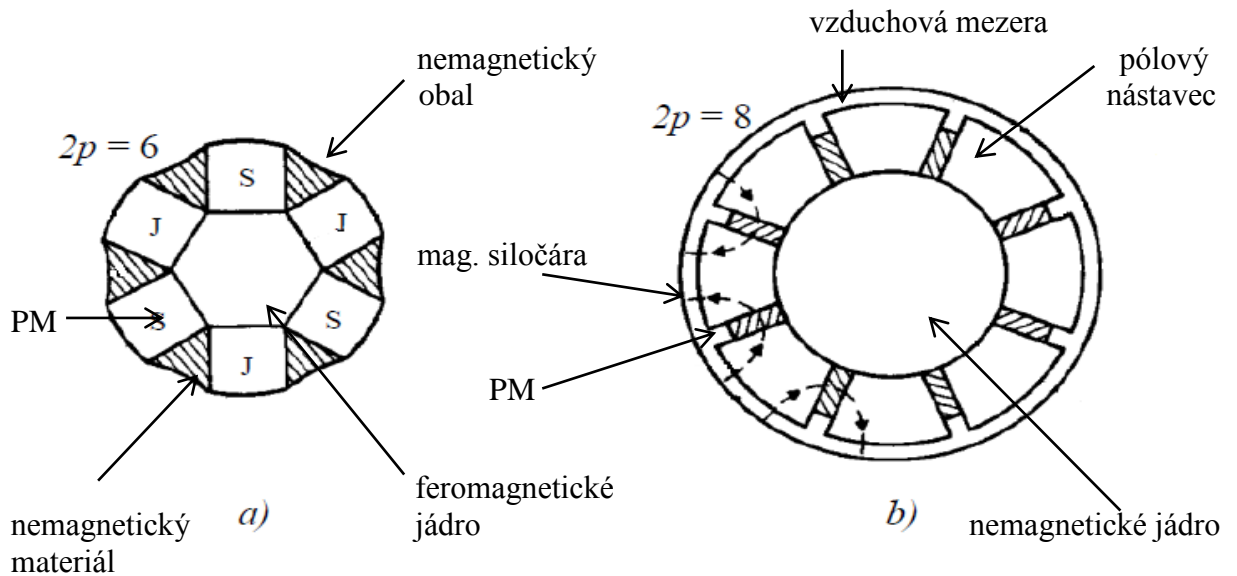


Obr. 4: Motor s diskovou kotvou a lisovaným vinutím [1]

2.1.1.3 Inverzní konstrukce motorů

Inverzní konstrukce se nejčastěji používá s PM ze vzácných zemin. Tyto PM mají velkou remanentní indukci B_r , vysokou koercitivní sílu H_c a tedy i velký energetický součin. Ale jelikož je cena PM ze vzácných zemin stále ještě veliká, jsou konstrukce provedeny tak aby spotřebovali co nejméně magnetického materiálu. Tento stroj má kotvu na statoru kde je umístěné vinutí kotvy a komutační vinutí. Budící póly jsou na rotoru. Toto uspořádání nazýváme konstrukce s pevnou kotvou. [1, 3]

Protože budící póly nepotřebují cívky, nevznikají zde žádné odporové ztráty a tím nevzniká problém s odvodem tepla. Na vinutí kotvy nepůsobí žádné odstředivé síly, a proto je způsob upevnění vynutí v drážkách technologicky méně náročný a nemusí se mu věnovat taková pozornost. [1, 3]



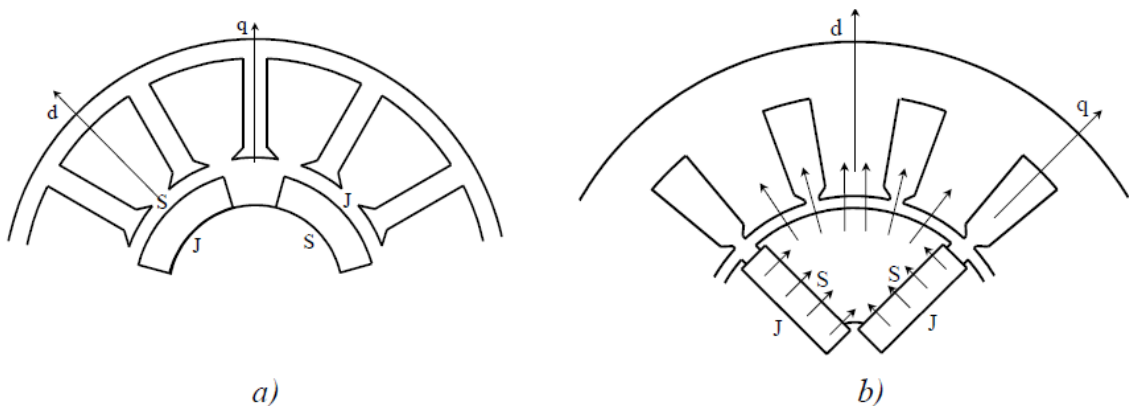
Obr. 5: Uspořádání rotoru s PM u motorů se statickou kotvou [1]

2.2 Synchronní motory

Synchronní motory s PM se používají pro aplikace od stovek W až do desítek kW. Tyto stroje se značně používají v servopohonech a nyní se jejich využití rozvíjí v dopravě. Výhodou PM v synchronních strojích je nepotřebnost budícího vynutí a tím se zamezí vzniku ztrát na tomto vinutí. Ale vzniká tím nevýhoda, buzení se nadá měnit.

2.2.1 Konstrukční provedení

2.2.1.1 Válcové motory



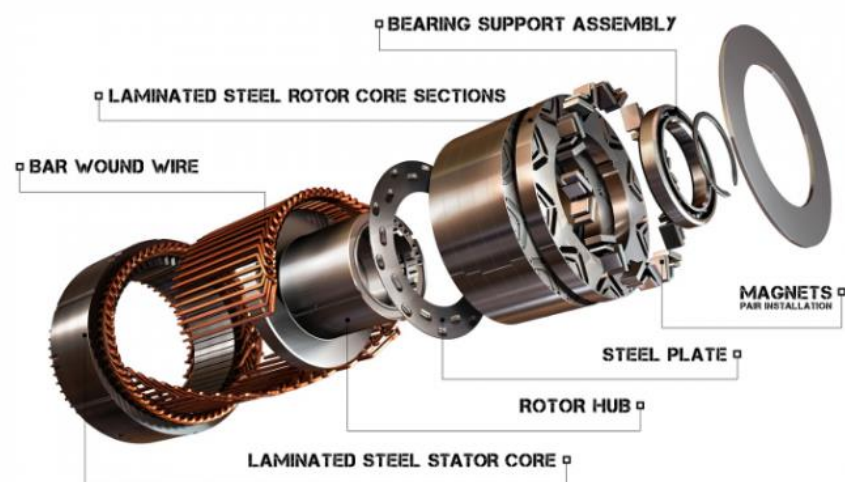
Obr. 6: Uspořádání PM na rotoru a) povrchové, b) vnitřní [1]

Jsou dva základní druhy uspořádání PM v rotoru motoru. První je takzvané povrchové (Obr.6a), kde jsou magnety přilepeny na povrchu rotoru. Toto uspořádání můžeme označit za stroj s nevyjádřenými póly. A to díky tomu, že je zde vzduchová mezera všeobecně velká a vliv reakce kotvy na tok pólu je velmi malý. Vzduchová mezera včetně PM představuje materiál s permitivitou μ_0 v ideálním případě. Ve skutečnosti se pohybuje podle druhu a kvality PM okolo $\mu_{rm}=1,02-1,1$. Díky tomu můžeme vzduchovou mezeru s PM dočasně považovat za homogenní prostor s permitivitou μ_0 a nazývat tento stroj za typ s nevyjádřenými póly. [1, 3]

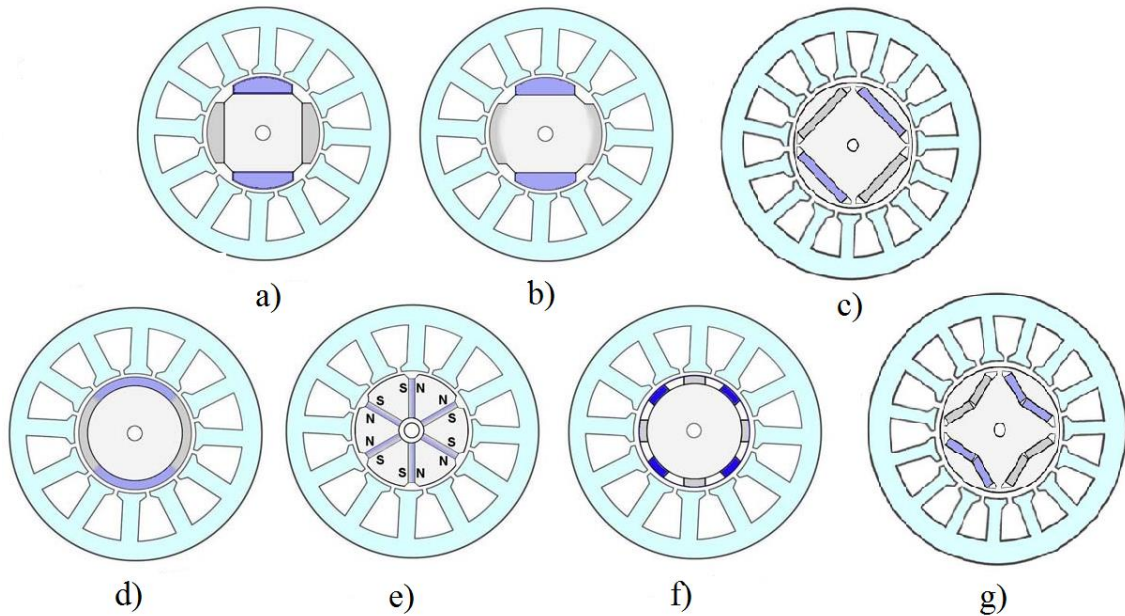
Druhým typem uspořádání je takzvané vnitřní (Obr.6b). Toto uspořádání se považuje za typ s vyjádřenými póly. Moment tohoto stroje se roven součtu momentu reluktančního a budicího. Což vidíme ve vztahu: [1]

$$M_e = 3 \frac{1}{\omega_s} \cdot \left(\frac{U_s \cdot U_{ib}}{x_d} \sin\vartheta + U_s^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin 2\vartheta \right) \quad (5)$$

Kde ω_s je synchronní rychlost, U_s je svorkové napětí, U_{ib} je indukované napětí buzením, x_d a x_q jsou reaktance v příčné a podélné větvi, ϑ je zátěžný úhel. [1]



Obr. 7: Ukázka synchronního motoru s uložením do V-konfigurace s PM [14]



Obr. 8: Uspořádání permanentních magnetů [12]

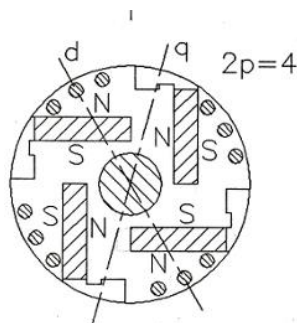
a) uspořádání breadloaf, b) uspořádání consequence-pole, c) skryté tangenciální uspořádání
d) kruhové uspořádání, e) skryté radiální uspořádání, f) další kruhové uspořádání, g) v-konfigurace

U válcového rotoru jsou možné i jiné druhy uspořádání magnetů. Na obrázku *Obr.8a* můžeme vidět uspořádání, které se nazývá breadloaf nebo prostě bochník podle jeho tvaru. Tento druh uspořádání se používá z výrobních důvodů. Kdy je jedna strana magnetu plochá a strany jsou navzájem rovnoběžné. Také se lépe uchycuje k rotoru. Na *Obr.8b* je znázorněna obdoba přechozího uložení, ale je zde podstatná změna. Používá se jen polovina magnetů. V případě že magnety mají stejnou polaritu, tak se konstrukce nazývá consequence-pole rotoru. Díky tomuto zapojení se snižují náklady, ale stroj pracuje s nižší hodnotou permanence. Kvůli dvojitým vzduchovým mezerám se musejí používat silnější magnety, aby se zabránilo demagnetizaci. [3, 12, 13]

Další uspořádání je na *Obr.8d*. Zde je kruh z magnetického materiálu, který je vázaný přes třmen rotoru. Prsteneček je magnetizován až po upevnění na statoru. Mechanická integrita magnetu umocňuje udělat konstrukci jednoho prstence magnetu. Na *Obr.8f* můžeme vidět uspořádání, kde jsou magnety zakřivené okolo rotoru. Toto uspořádání má dobré vlastnosti, ale jeho výroba může být dražší. Magnety musí být správně uspořádané a dobře opracované aby se vešli do úzkých tolerancí. [3, 12, 13]

Obr.8e znázorňuje vnitřní radiálně symetrické uspořádání. Výhodou tohoto uspořádání je tvar magnetů. Magnety zde nejsou zakřivené. Toto uspořádání je účinné, pro získávání lepšího výkonu z feritových magnetů. *Obr.8c* ukazuje konstrukční uspořádání skryté

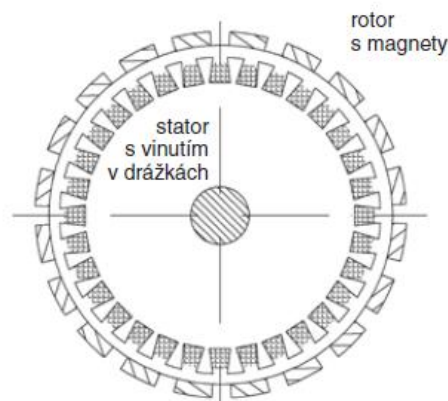
tangenciální. U těchto uspořádání je výhodné zapuštění magnetů uvnitř rotoru. Díky tomu se mohou používat pro velké rychlosti. Tvar magnetů je rovný, takže výroba magnetů je snazší. Druhou variantou tohoto uspořádání můžeme vidět na Obr.8g. Zde jsou magnety rozděleny a orientovány do V-konfigurace. Tato konfigurace může dosáhnout různých vlastností, podle různé geometrie magnetů. Ve V-konfiguraci můžeme použít o něco málo delší magnety a tím zlepšit magnetický tok a výkon. Ale je zde problém s uchycením magnetů. Magnety jsou drženy na místě pouze dvěma úzkými kovovými můstky, které se nacházejí mezi kapsou vzduchu u magnetu a vzduchovou mezerou. Dalším uspořádáním je rotor s vnitřními magnety rozdělenými asymetricky (Obr.9). [3, 12, 13, 20],



Obr. 9: Synchronní motor s vnitřními PM rozdělenými asymetricky v rotoru [13]

2.2.1.2 Motory s vnějším rotorem

Motor s vnějším rotorem se používá většinou v dopravě. Používají se pro výkony od stovek wattů pro lehká a malá vozidla, až do několika kilowatt pro individuální pohony kol tramvají a dalších vozidel. Konstrukce tohoto stroje se liší od ostatních. Motor zde bývá integrován do konstrukce kola. Kdy stator je v ose kola a je k ní pevně připevněn. Rotor s PM obklopuje stator a je pevně spojen s kolem. [4, 15]



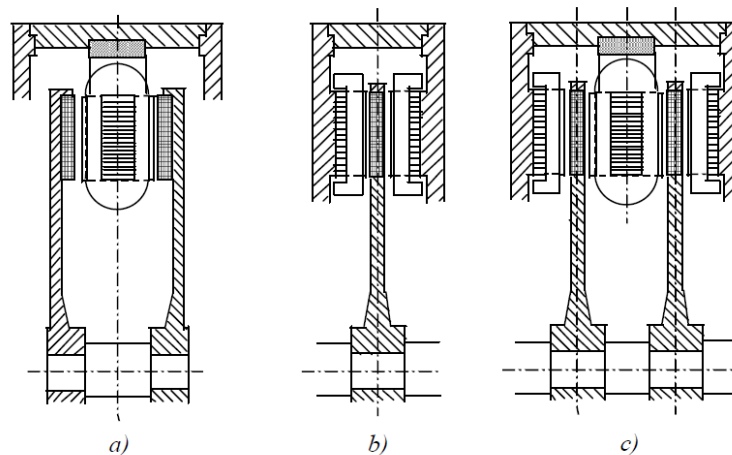
Obr. 10: Synchronní stroj s vnějším rotorem [15]

2.2.1.3 Diskové motory

Tento typ motoru má stejně jako stejnosměrný diskový motor malý moment setrvačnosti a díky tomu i dobrou odezvu na řídicí impulzy. Pokud jsou PM dobře zabezpečeny proti odstředivým silám, může se motor používat pro velké rychlosti. U diskových strojů se používají tři druhy konstrukčního uspořádání:

- Uspořádání se statorem uprostřed
- Uspořádání s rotorem uprostřed
- Dvojdiskové uspořádání se statorem uprostřed a na okrajích

Uspořádání se statorem uprostřed má na obou stranách rotační disky, na kterých jsou PM. Tyto disky musí být vyrobeny z magneticky měkkého materiálu, protože ještě slouží k uzavření magnetického toku. U dvojdiskového uspořádání je tomu naopak, diskové rotory jsou vyrobené z magneticky tvrdého materiálu např. skelných vláken nebo hliníku. Tyto materiály jsou elektricky a magneticky neutrální. PM se na disky upevňují lepením, které vydrží i při vysokých rychlostech. [1, 3]



Obr. 11: Konstrukční provedení synchronních diskových motorů [1]
 a) se statorem uprostřed, b) s rotorem uprostřed, c) dvojdiskové se statorem uprostřed a na okrajích

2.3 Krokové motory

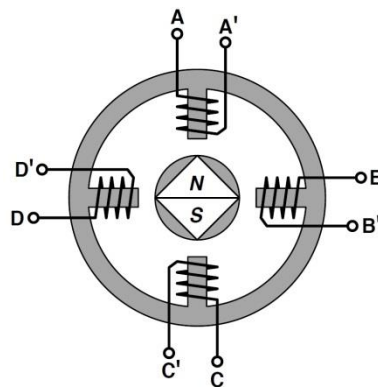
Krokové motory (KM) se používají v aplikacích s přesným řízením a dále pro aplikace s menšími výkony. Jedná se o stroje s elektronickým řízením, z toho vyplývá, že musíme mít nějakou řídicí jednotku. Ta ovládá každou fázi motoru. Otáčiví pohyb tohoto stroje není

plynulý, ale probíhá v krocích. Jsou poměrně levné a mají malé nároky na údržbu. Mezi nevýhodu patří takzvaná ztráta kroku. [2, 7, 8]

2.3.1 Konstrukční provedení

2.3.1.1 Krokový motor s aktivním rotorem

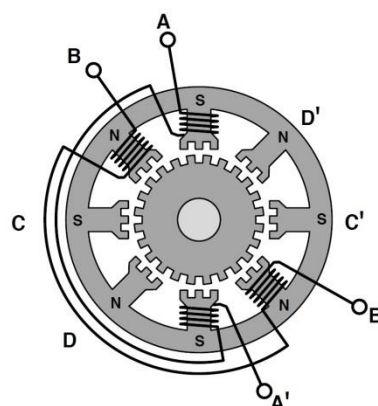
Tento KM je v podstatě synchronní stroj s elektronickým řízením, který se ovládá pomocí řídicích impulzů. Rotor je tvořen PM s přesným počtem definovaných pólů. Stator má vyniklé póly s vinutím. Rotor se otáčí o krok, pokud jsou pod napětím příslušné cívky na statoru. Napájení cívek probíhá obdélníkovými pulzy jednofázově nebo více fázově. Krok má většinou velikost několik jednotek až desítek stupňů. [2, 7, 8]



Obr. 12: Krokový motor s aktivním rotorem [8]

2.3.1.2 Hybridní krokové motory

Rotor je tvořen dvěma pólovými nástavci, které připomínají ozubené kolo. PM je uložen axiálně mezi pólovými nástavci. PM zmagnetuje každý pólový nástavec na opačnou polaritu. Jeden nástavec je tedy severní a druhá jižní pól. Na statoru jsou vyniklé póly, na kterých jsou cívky. Póly jsou opatřeny drážkováním. Počet drážek (zubů) není u statoru a rotoru stejný. [2, 7, 8]



Obr. 13: Hybridní krokový motor [8]

2.4 Bezkartáčové stroje s permanentními magnety

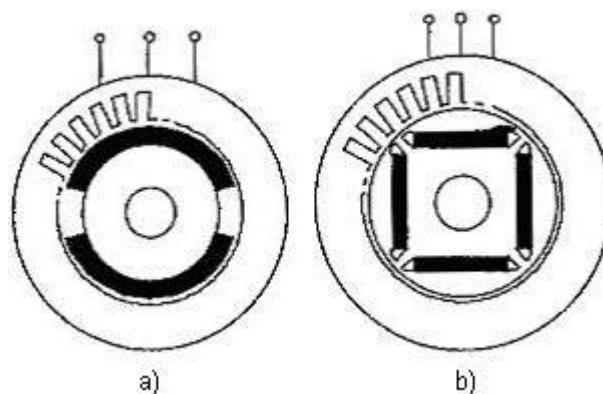
Bezkartáčové stroje s PM odstraňují nevýhody spojené s použitím komutátoru a kartáči. Zde je to řešeno pomocí elektronické komutace a díky přídavným obvodům. PM zde nahrazují klasické buzení stroje. Výhody motorů jsou ve spolehlivosti, účinnosti a životnosti. Nevýhody jsou zde dány magnety. Teplotní závislostí PM ze vzácných zemin, které jsou zde většinou použity. Taky jejich velkou cenou a to kvůli přídavné elektronice, která je zde použita. [11]

2.4.1 Konstrukční provedení bezkartáčových strojů

Používají se uspořádání motoru s PM na rotoru a se statorovým vinutím kotvy. Pro jejich použité řízení se nazývají elektronicky komutované motory. Jsou dva základní druhy konstrukčního provedení bezkartáčových strojů:

- Bezkartáčový stejnosměrný motor
- Bezkartáčový synchronní motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor má obdélníkové pole. Je odvozen od stejnosměrného motoru kvůli jejich podobnému konstrukčnímu uspořádání. Bezkartáčový synchronní motor má sinusové pole. Jeho konstrukční uspořádání je podobné synchronnímu stroji. Na statoru obou strojů je tří fázové vinutí, které je řízené polovodičovým měničem elektronického komutátoru. Ke správnému řízení je potřeba zjištění aktuální polohy rotoru. Rotor je tvořen PM uvnitř rotoru nebo na jeho povrchu. [11]



Obr. 14: Bezkartáčový motor [11]

2.5 Lineární stroje

Lineární motory (LM) se pohybují lineárně. I když je myšlenka lineárních strojů stará, tak teprve až v poslední době nastal jejich rozmach. A to zejména díky cenové dostupnosti a rozvojem výkonové elektroniky. Lepší kvalitě PM, větší dostupnosti PM a zdokonalení pohybových čidel. Máme dvě možnosti lineárních motorů a to krokové a synchronní. [16]

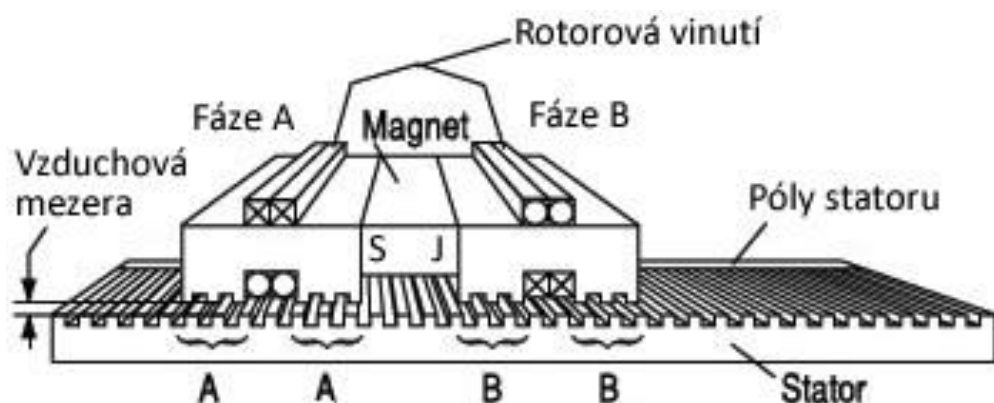
2.5.1 Konstrukční provedení

Lineární motor se skládá z dvou hlavních částí a to z primární a sekundární. Primární část je posuvná a tvoří jí jezdec. Primární část bývá pevná. Kdy se jezdec pohybuje po mechanickém vedení a to může být vytvořeno z:

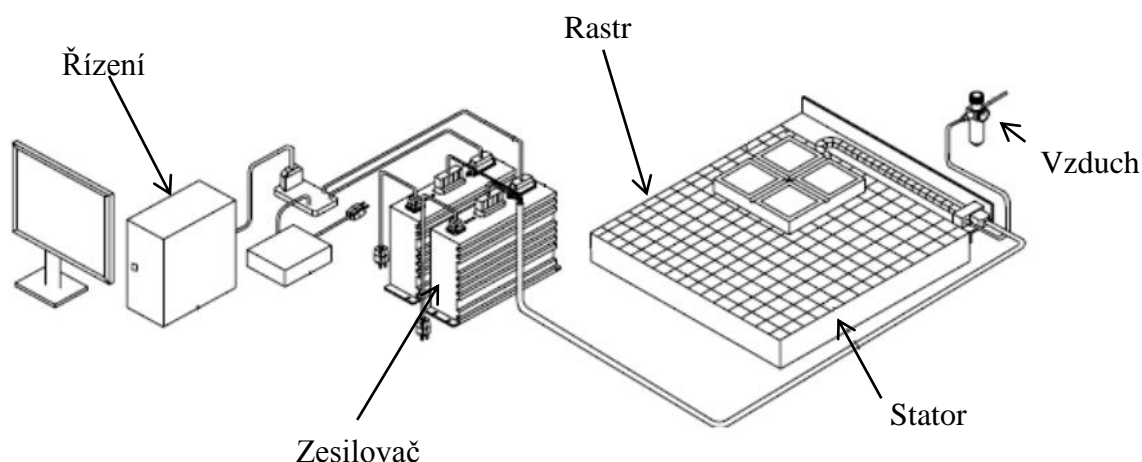
- Kluzkými kovovými plochami pro malé rychlosti
- Kuličkovými nebo válečkovými lineárními ložisky pro střední rychlosti
- Keramickými kluzkými plochami pro středně rychlé rychlosti
- Vzduchovými a magnetickými (levitujícími) ložisky pro velké rychlosti

2.5.1.1 Lineární krokové motory

Krokové LM se moc nepoužívají. Výroba bývá drahá a systém potřebuje čisté prostředí k práci. Jezdec se pohybuje v jedné ose nebo ve dvou osách u planárního dvoufázového lineárního krokového motoru. Plocha statoru bývá vroubkovaná a šíře zubů bývá okolo 1 mm. Mezery mezi zuby jsou vyplněny nemagnetickým materiálem a povrch je vyhlazený. Používají se klasické i hybridní krokové motory. Napájení je dvou nebo tří fázové. K řízení LM je zapotřebí senzorů, ty řídí pohyb. [16]



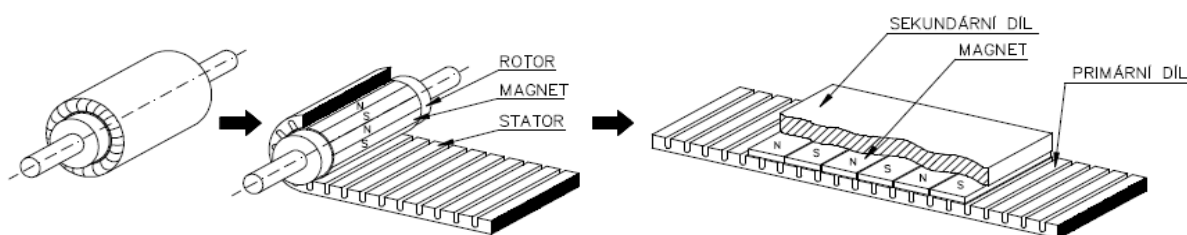
Obr. 15: Hybridní lineární krokový motor [16]



Obr. 16: Planární dvoufázový lineární krokový motor [16]

2.5.1.2 Synchronní lineární motor

Konstrukci synchronního LM si můžeme představit jako rozvinutý synchronní stroj. Jezdec je zde tvořen z PM ze vzácných zemin, které jsou nalepené na podložku. Stator je tvořen z elektrotechnických plechů, v kterých je uloženo trojfázové vynutí. [16]

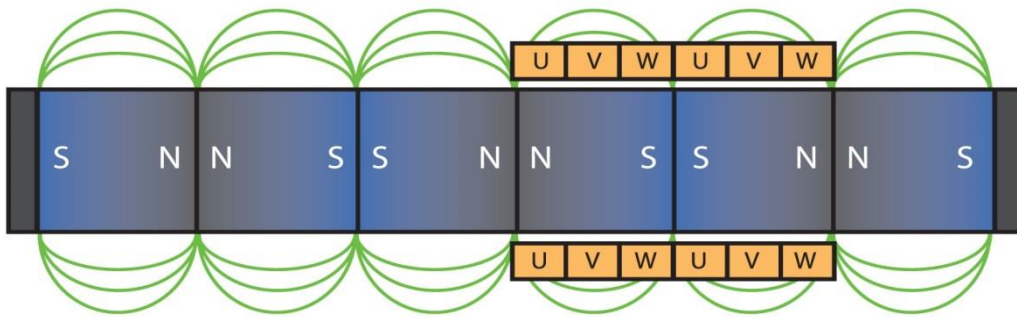


Obr. 17: Ukázka možného konstrukčního uspořádání lineárního synchronního stroje [16]

Pohybovat se může jak primární tak i sekundární část podle konstrukce. Většinou je pohyblivá sekundární část. Je možné použití více jezdců. Přívod pro motor musí být dostatečně pružný a mechanicky odolný. Dnes existuje i možnost bezkontaktního přenosu energie. I zde řídí pohyb snímače polohy. [16]

2.5.1.2.1 Tubulární lineární synchronní motor

Trojfázové vynutí je zde uloženo okolo PM. PM je zde trubkový, díky tomu jsou magnetické síly vyvážené a pohyb je plynulý. Může se pohybovat magnet a vynutí je pevné nebo naopak. [16]

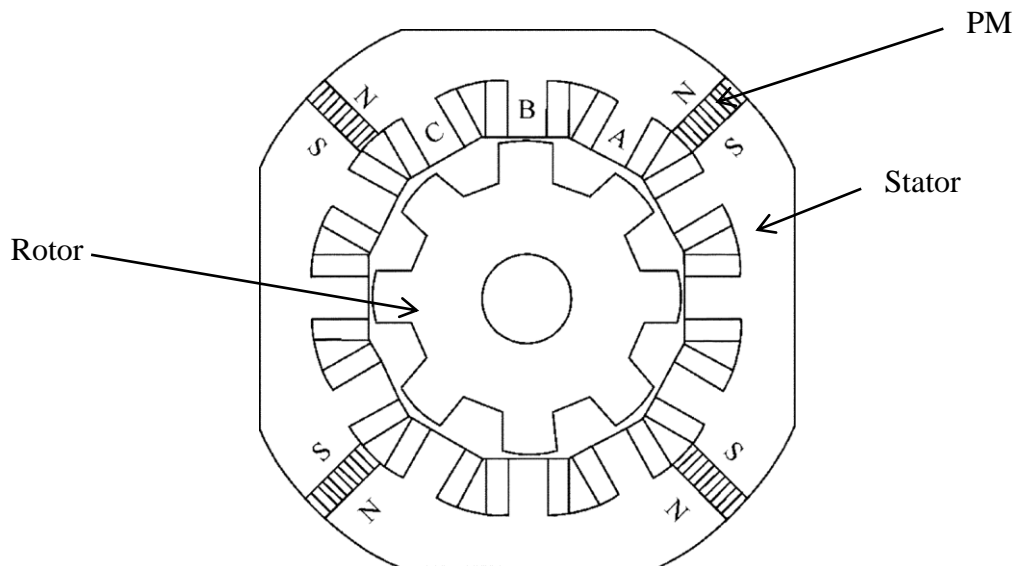


Obr. 18: Trubkový lineární synchronní motor ukázka vinutí a magnetů[16]

2.6 DSPM motory s permanentními magnety

2.6.1 Konstrukční provedení

DSPM motory mají vlastnosti jako synchronní motor a spínaný reluktanční motor. PM se nacházejí u tohoto druhu uložení ve statoru. Takže problém nevratné demagnetizace a mechanické nestability může být díky tomu vyřešen. Rotor je stejný jako u spínaného reluktančního motoru. Díky tomu jsou výhody jednoduché konfigurace a mechanické odolnosti zachovány. Také rychlosti těchto motorů jsou srovnatelné s rychlostmi spínaných reluktančních motorů. [17, 21]



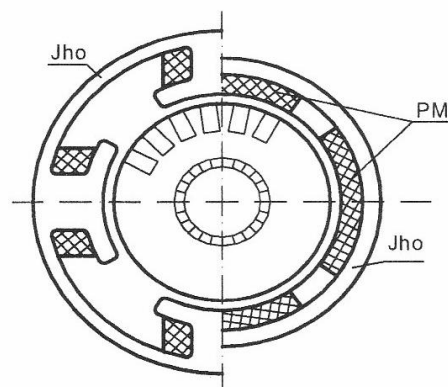
Obr. 19: DSPM motor (12/8) [17]

3 Výhody a nevýhody použití PM v elektrických strojích

3.1.1 Výhody použití

PM se v elektrických strojích používají celkem hojně a to díky svým dobrým vlastnostem. To zejména díky tomu, že se zmenšuje hmotnost a rozměry stroje i při velkých výkonech. Je zde i velká momentová přetížitelnost a menší moment setrvačnosti rotoru. Pokud nahradíme budící vinutí stroje PM. Tak díky tomu odpadají Jouleovy ztráty v tomto vinutí. Tím se lepší celková účinnost stroje. Také odpadá možnost selhání tohoto buzení. Díky tomuto provedení jsou tedy stroje geometricky menší a hmotnost je také menší. Kdy rozměry mohou být menší i o 50 %. Díky zmenšení strojů se pak tyto stroje mohou používat v aplikacích, kde kvůli velikostem stroje byly problémy. [2]

Motor nemusíme před rozběhem budit díky čemuž, nepotřebujeme ani zdroj budícího proudu. Tím pádem odpadá i problém se složitým přívodem proudu pro buzení rotoru. Je zde možnost konstrukce pomaluběžného stroje s dostatečně velkým výkonem, který nebude potřebovat převodovku. Tím pádem odpadají nevýhody s použitím převodovky. Pro trakci může být výhodou stálé buzení, to je výhodné z hlediska nezávislého bezpečného elektrodynamického brždění. Protože u jiných strojů je potřeba zajistit zdroj proudu. [2]



Obr. 20: Porovnání rozměru stejnosměrného stroje s budícím vinutím a s PM [2]

3.1.2 Nevýhody použití

Pokud nahradíme budící vinutí PM, musíme počítat s tím, že tomuto stroji nelze měnit buzení a nejde tedy odbudit. Takže pokud nastane zkrat, stroj pracuje jako generátor do tohoto zkratu a vznikají zde velké momentové a proudové rázy. Nelze použít ani velmi efektivní řízení otáček pomocí změny buzení u stejnosměrných strojů. Dalším problémem je používání PM ze vzácných zemin. Ty se používají, aby se dosáhlo co nejlepších vlastností. Tyto

magnety mají dobrou zejména remanentní indukci a koercitivitu. Ale mají problém s teplotou. Kdy maximální teplota, do které mohou pracovat je poměrně malá. Pokud tuto teplotu překročí, tak hrozí demagnetizace magnetů (ta může nastat i při špatném nafázování stroje). Proto se ve strojích musí řešit odvod tepla a použití chlazení. [2]

Další limitním prvkem je cena, která je u PM ze vzácných zemin poměrně veliká. Proto se do strojů používají PM z feritu. Ale tyto magnety nemají tak dobré vlastnosti, a proto se používá větší množství těchto magnetů. To zvětšuje velikost stroje a jeho hmotnost. Ale ani toto nezaručuje, že stroj bude mít stejné vlastnosti jako stroj s PM ze vzácných zemin. Proto se ještě používají různé konstrukce s PM. Je zde technologicky složitější výroba, kvůli upevnění magnetů na rotoru stroje. Podle upevnění PM se můžou motory používat jen pro určité rychlosti. Pak i následná oprava stroje bývá složitější. [2]

4 Problematika PM ze vzácných zemin a možné návrhy řešení těchto problémů

4.1.1 Popis problematiky

V dnešní době se s PM ve strojích setkáváme velice často. Používají se díky svým dobrým vlastnostem. Nejlepší vlastnosti pro elektrotechniku mají PM ze vzácných zemin. Tyto PM se používají kvůli své vysoké remanentní indukci, koercitivní síle a energetickému součinu. Tyto hodnoty mají daleko větší než feritové a AlNiCo magnety.

Hlavním problémem je dnes cena, kdy se výrobci snaží vyrábět vše co nejlevněji. PM ze vzácných zemin jsou drahá záležitost. Největším vývozcem je dnes Čína. Kde se těží neodym a další vzácné kovy. Jsou zde poměrně velká naleziště tohoto materiálu. Problémem těchto materiálů je těžba, kdy při těžbě vzniká řada toxických látek. A tedy i řada ekologických problémů. Což ale Číně nedělá problém jako řadě jiných států. Proto si řada států na takhle těžkou a složitou těžbu netroufne a to i kvůli ekologii. Cena je tedy vysoká kvůli složité těžbě a díky dobrému ekonomickému počínání Číny, která drží ceny materiálů vysoko. Čína totiž dobře ví, že je největším vývozcem tohoto materiálu a tak může určovat cenu. Politická situace v Číně taky není nejlepší. [2, 20]

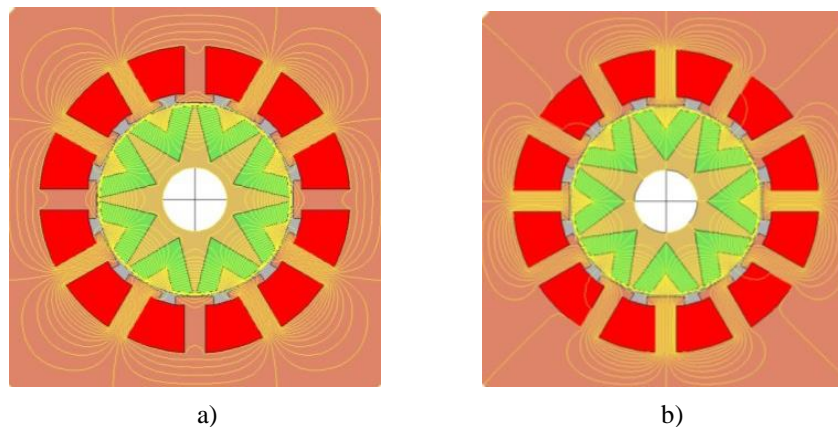
Dalším důvodem je maximální pracovní teplota. U PM ze vzácných zemin je tato teplota menší než u feritových a AlNiCo magnetů. Pokud magnety přesáhnou tuto hodnotu teploty, ztrácí se jejich vlastnosti a odmagnetují se. Pokud chceme použít magnety pro větší teploty, tak se musí vyřešit dobrý odvod tepla a také přídavné chlazení motoru. [2, 20]

4.1.2 Možné řešení tohoto problému

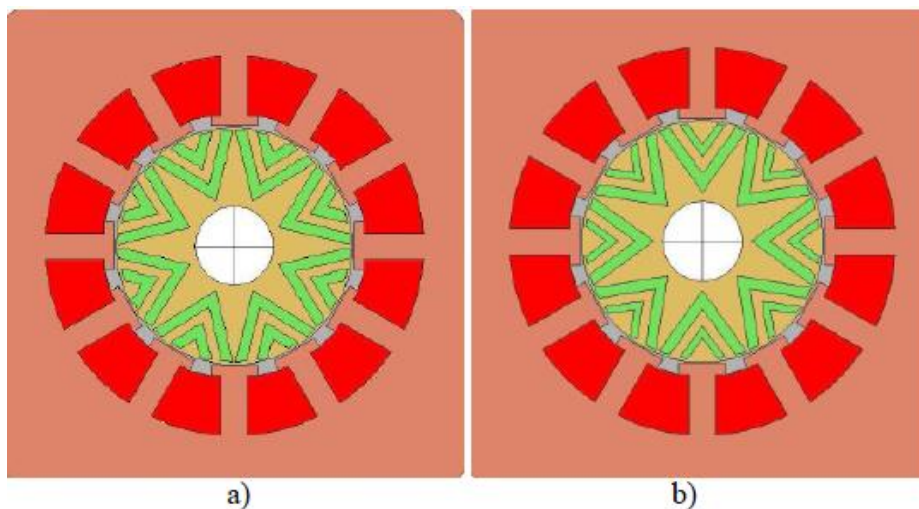
Dnes kdy je velká poptávka po motorech s PM a to zejména díky jejich dobrým vlastnostem. Tyto motory mají jeden problém a to jsou PM ze vzácných zemin. Tyto PM mají vysokou zbytkovou hustotu toku a energie. Ale kvůli vysoké ceně a poměrně nízké pracovní teplotě to brání jejich velkému nasazení. Proto se nyní výrobci snaží vyrábět stroje s malým nebo žádným množstvím vzácných zemin. Díky těmto skutečnostem se, jako potenciální náhrada vzácných zemin její ferit. Jeho cena není vysoká a dostupnost je také mnohem lepší než u vzácných zemin. Nicméně feritový magnet mají mnohem menší hodnotu zbytkové indukce a energetického součinu než magnety ze vzácných zemin. [20]

Proto je třeba nových uspořádání PM ve strojích, aby dosáhli stejného točivého

momentu jako PM ze vzácných zemin. Možné řešení je v-konfigurace. Ta se ukázala být efektivní v soustředění pole toku a zvýšení točivého momentu. Používají se i více vrstvé konstrukce PM. Na Obr.7. můžeme vidět dvojvrstvou konfiguraci do V. Ta umožňuje ještě lepší vlastnosti stroje. Tedy i lepší vedení toku. Jiné používané konstrukce jsou popsány už výše a můžeme je vidět na Obr.8. Nebo můžeme zvětšit množství magnetu. Ale zvětšením množství nemusíme dosáhnout požadovaným vlastností. Navíc se stroj zvětšuje a je i těžší. [20]



Obr. 21: V-konfigurace jednovrstvá s diagramem toku pro a) d-osa PM b) q-osa PM [20]



Obr. 22: V-konfigurace dvouvrstvá a) se stejnou šířkou PM b) s rozdílnou šířkou PM [20]

Další možné řešení je hledání nových materiálů. Kdy vědci z Ameriky vyvinuli silně magnetickou slitinu na bázi ceru, která nahradí slitiny na bázi prvku dysprosia. Protože dysprosium je vzácná zemina, tak je i velmi drahá. Zato cer je mnohem dostupnější zemina, sice patří také do vzácných zemin, ale není tak drahá jako dysprosium. Vědci tedy vyvinuli

novou slitinu na bázi ceru, neodymu, bóru, kobaltu a železa. Tato slitina má výkonové parametry podobné slitině na bázi prvku dysprosia. Ale cena je mnohem menší a to okolo 20% až 40%. Nová slitina má i další lepší vlastnosti. Je odolnější vůči demagnetizaci a tedy ztrátě permanentních magnetických schopností. Maximální pracovní teplota při, jejímž, překročení dojde k nevratné ztrátě magnetických vlastností PM se u nové slitiny nezmenšuje. Cer a kobalt fungují jako dobrá náhrada dysprosia, navíc kobalt ještě působí proti snižování teploty demagnetizace. I neodym lze částečně nahradit cerem. Čímž se dá znovu něco ušetřit. [18]

Britští inženýři pracují na nové technologii, kdy se magnety vyrábějí se supravodivých materiálů. Nový materiál způsobuje, že jsou magnety mnohem silnější než stávající a také mnohem menší. Tím mohou být menší i stroje a tedy levnější. Magnetické pole je v supravodiči vytvořeno pomocí magnetu a opakovaných vln tepla. Během toho musí být supravodič po celou dobu chlazen dusíkem. Jehož cena není vysoká a je i běžně dostupný. Velký problém je zde nízká teplota, proto se zatím tento druh PM nepoužívá v běžných aplikacích ale jen v laboratořích. I přes tuto skutečnost je o tyto PM zajímá řada firem, které vyrábějí elektromotory a další zařízení. [19]

5 Závěr

V práci jsou popsány dnes používané PM a jejich základní vlastnosti. Díky vlastnostem je patrné, že nejlepší pro použití do elektrických strojů jsou PM ze vzácných zemin. A to zejména díky velkému energetickému součinu, remanenci a koercitívu. Dále jsou zde probrány základní konstrukce motorů s PM, které se používají v dnešní době. Uložení PM v těchto motorech a některé vlastnosti.

V další jsou popsány výhody a nevýhody použití PM. Jelikož výhody převyšují nad nevýhodami tak se dnes PM používají v mnoha aplikacích. Kdy PM nahrazují zejména budící vinutí stroje. Tím odpadají ztráty na tomto vinutí a zvyšuje se účinnost motoru. Dále se zmenšuje velikost a hmotnost stroje.

V poslední části je uvedena problematika PM ze vzácných zemin. Kdy největší nevýhodou PM ze vzácných zemin je jejich cena a maximální pracovní teplota. U neodymových magnetů je to okolo 200 °C. Kvůli tomu se dnes PM ze vzácných zemin nahrazují magnety feritovými. Ale jelikož tyto magnety nemají tak dobré vlastnosti. Musejí se vyvíjet a používat nové konstrukce a uložení PM v elektrických strojích nebo novější slitiny.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Hrabovcová, V.; Janoušek, L.; Rafajdus, P.; Ličko, M.: *Moderné elektrické stroje*, EDIS ŽU, Žilina 2001
- [2] Bartoš, V.; Červený, J.; Hruška, J.; Kotlanová, A.; Skala, B.: *Elektrické stroje*, ZČU v Plzni, Plzeň 2006
- [3] Hanselman, D.: *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, The Writers' Collective; 2 edition (March 2003)
- [4] Novák, J.: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice-I. Část*. Časopis elektro 6/2006, s. 4-7, Praha 2006, ISSN 1210-0889.
- [5] Magnety-magnety: *Přehled PM a e-shop s PM* [online]. © ENES 2010 [cit. 2014-8-15]. Dostupné z: www.magnety-magnety.com
- [6] Neomag: *e-shop s PM* [online]. © PS media s.r.o. 2015 [cit. 2014-8-16]. Dostupné z: <http://www.neomag.cz/>
- [7] *Princip-Krokový motor* [online]. www.pohonnatechnika.cz, 2007 [cit. 2015-3-4]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [8] *Krokové motory I-typy motorů* [online]. www.robodoupe.cz, 2013 [cit. 2015-3-4]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2013/krokovy-motory-1-typy-motoru/>
- [9] Chudiváni, Jan. *How to select and Size Gearmotors for Conveyor Applications* [online]. 20. December, 2013 [cit. 2015-4-15]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=12326>
- [10] Feromagnet: *e-shop s PM* [online]. © Feromagnet s.r.o. 2015 [cit. 2014-8-16]. Dostupné z: <http://www.feromagnet.cz/>
- [11] Gluecki, Edmund. *Bezkeferové motory* [online]. 26. November, 2011 [cit. 2015-3-6]. Dostupné z: <https://gearmotorblog.wordpress.com/page/5/>
- [12] Staunton, R.H.; Nelson, S.C.; Otaduy, P.J.; McKeever, J.W.; Bailey, J.M.; Das, S.; Smith, R.L.: *PM Motor Parametric Design Analyses for a Hybrid Electric Vehicle Traction Drive Application* [online]. 2004 [cit. 24.4.2015]. Dostupné z Oak Ridge National Laboratory : <http://web.ornl.gov/~webworks/cppr/y2001/rpt/121559.pdf>

- [13] Chudiváni, Jan.: *The magnetic fields of inset Permanent Magnet Synchronous Motor* [online]. 03. Marec, 2011 [cit. 2015-4-15]. Dostupné z: <http://www.posterus.sk/?p=16780>
- [14] *GM shows 85 kw permanent magnet EV motor* [online]. www.gizmag.com, 2011 [cit. 2015-4-25]. Dostupné z: <http://www.gizmag.com/gm-85-kw-ev-motor/20329/>
- [15] Novák, J.; Černý, O.; Dolečer, R.; Švanda, J.: *Vyšetřování harmonických v trakci-1. Část*. Časopis elektro 7/2010, s. 6-8, Praha 2010, ISSN 1210-0889.
- [16] *Lineární pohony: Lineární krokový motor, lineární synchronní a asynchronní motor*. Liberec. [online]. [cit. 2015-5-20]. Dostupné z: www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/...stroje/.../linear_motor.pps. Prezentace. Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola, Liberec.
- [17] GAO, Y. a K.T. CHAU. Design of Permanent Magnets to Avoid Chaos in Doubly Salient PM Machines. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2004, **40**(4): 3048-3050 [cit. 2015-06-03]. DOI: 10.1109/tmag.2004.830196.
- [18] Vachtl, Pavel.: *Levnější magnety pro elektromotory a turbíny* [online]. 7. května, 2015 [cit. 2015-5-27]. Dostupné z: http://www.rozhlas.cz/leonardo/technologie/_zprava/levnejsi-magnety-pro-elektromotory-a-turbiny—1487283
- [19] *Britští vědci vyvíjejí super silné magnety* [online]. www.ceskatelevize.cz, 2009 [cit. 2015-5-26]. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/ct24/svet/veda-a-technika/64977-britsti-vedci-vyvijejí-extra-silne-magnety/>
- [20] MUSUROI, S., C. SORANDARU, M. GRECONICI, V.N. OLARESCU a M. WEINMAN. Low-cost ferrite permanent magnet assisted synchronous reluctance rotor an alternative solution for rare earth permanent magnet synchronous motors. In: *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* [online]. 2013 [cit. 2015-05-23]. DOI: 10.1109/iecon.2013.6699602.
- [21] WANG, Xiaoyuan, Chuan WANG a Zhi GUO. The static characteristics of DSPM under different armature current and different PM thickness. In: *2008 18th International Conference on Electrical Machines* [online]. 2008 [cit. 2015-06-03]. DOI: 10.1109/icelmach.2008.4800103.

Seznam tabulek

TABULKA 1: MAGNETICKÉ PARAMETRY FERITOVÝCH MAGNETŮ	14
TABULKA 3: MAGNETICKÉ PARAMETRY SAMARIUM-KOBALTOVÝCH MAGNETŮ	16
TABULKA 4: MAGNETICKÉ PARAMETRY NEODYMOVÝCH MAGNETŮ	17

Seznam obrázků

OBR. 1: MAXIMÁLNÍ ENERGETICKÝ SOUČIN V PRŮBĚHU LET VÝVOJE PM	13
OBR. 2: UKÁZKA STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU S PM	18
OBR. 3: STEJNOSMĚRNÝ VÁLCOVÝ MOTOR	19
OBR. 4: MOTOR S DISKOVOU KOTVOU A LISOVANÝM VINUTÍM	20
OBR. 5: USPOŘÁDÁNÍ ROTORU S PM U MOTORŮ SE STATICOU KOTVOU	21
OBR. 6: USPOŘÁDÁNÍ PM NA ROTORU A) POVRCHOVÉ, B) VNITŘNÍ	21
OBR. 7: UKÁZKA SYNCHRONNÍHO MOTORU S ULOŽENÍM DO V-KONFIGURACE S PM	22
OBR. 8: USPOŘÁDÁNÍ PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	23
OBR. 9: SYNCHRONNÍ MOTOR S VNITŘNÍMI PM ROZDĚLENÝMI ASYMETRICKY V ROTORU	24
OBR. 10: SYNCHRONNÍ STROJ S VNĚJŠÍM ROTOREM	24
OBR. 11: KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ SYNCHRONNÍCH DISKOVÝCH MOTORŮ	25
OBR. 12: KROKOVÝ MOTOR S AKTIVNÍM ROTOREM	26
OBR. 13: HYBRIDNÍ KROKOVÝ MOTOR	26
OBR. 14: BEZKARTÁČOVÝ MOTOR	27
OBR. 15: HYBRIDNÍ LINEÁRNÍ KROKOVÝ MOTOR	28
OBR. 16: PLANÁRNÍ DVOUFÁZOVÍ LINEÁRNÍ KROKOVÝ MOTOR	29
OBR. 17: UKÁZKA MOŽNÉHO KONSTRUKČNÍHO USPOŘÁDÁNÍ LINEÁRNÍHO SYNCHRONNÍHO STROJE	29
OBR. 18: TRUBKOVITÝ LINEÁRNÍ SYNCHRONNÍ MOTOR UKÁZKA VINUTÍ A MAGNETŮ	30
OBR. 19: DSPM MOTOR (12/8)	30
OBR. 20: POROVNÁNÍ ROZMĚRU STEJNOSMĚRNÉHO STROJE S BUDÍČÍM VYNUTÍM A S PM	31
OBR. 21: V-KONFIGURACE JEDNOVRSTVÁ S DIAGRAMEM TOKU PRO A) D-OSA PM B) Q-OSA PM	34
OBR. 22: V-KONFIGURACE DVOUVRSTVÁ A) SE STEJNOU ŠÍRKOU PM B) S ROZDÍLNOU ŠÍRKOU PM	34

Seznam rovnic

ROVNICE 1: VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ.....	18
ROVNICE 2: VÝPOČET NAPĚTÍ.....	18
ROVNICE 3: VÝPOČET ELEKTROMAGNETICKÉHO MOMENTU	18
ROVNICE 4: VÝPOČET ÚHLOVÉ RYCHLOSTI	18
ROVNICE 5: VÝPOČET KONSTRUKČNÍ KONSTANTY STROJE.....	18
ROVNICE 6: VÝPOČET MOMENTU.....	22