



Fakulta elektrotechnická

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

# BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

ELEKTRICKÉ STROJE S AXIÁLNÍM MAGNETICKÝM TOKEM

Autor práce: Václav Srogončík

Vedoucí práce: Ing. Pechánek Roman, Ph.D.

Plzeň 2017

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

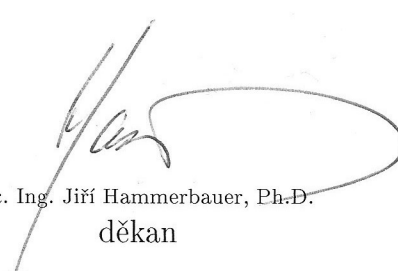
1. **J.Gieras, R. Wang, M. Kamper; "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines" Springer, 2008.**
2. **Databáze ieee.org.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**

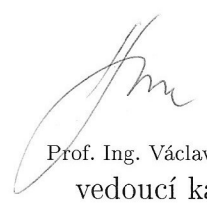
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav SROGONČÍK**

Osobní číslo: **E14B0245P**

Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**

Název tématu: **Elektrické stroje s axiálním magnetickým tokem**

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 principy jednotlivých el. strojů, které využívají axiální magnetický tok.
2. Uveďte, jaké jsou možné topologie těchto strojů.
3. Porovnejte s klasickými stroji s radiálním tokem.
4. Uveďte možnosti aplikace.

# Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá stroji s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety. V prvních dvou kapitolách je rozebrána topologie těchto strojů a principy na kterých je tato technologie založena. Dále jsou srovnány stroje s axiálním magnetickým tokem se stroji klasickými, tedy s magnetickým tokem radiálním. V závěru této práce je uvedeno několik možností použití těchto strojů i s příklady ať už se jedná o prototypy, nebo stroje již komerčně využívané. V závěru této práce jsou rozebrány výhody a slabiny této technologie a tedy i vhodné použití.

## Klíčová slova

Stroje s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety, porovnání strojů s radiálním a axiálním magnetickým tokem, aplikace strojů s axiálním magnetickým tokem.

# Abstract

---

This bachelor thesis deals with machines with axial magnetic flux and permanent magnets. The top two chapters discuss the topology of these machines and the principles which this technology is based on. As a next step machines with axial magnetic flux are compared with conventional machines, i.e. machines with radial magnetic flux. At the end of this thesis there are mentioned several possibilities of using these machines and examples usage, whether they are prototypes or machines already commercially used. At the end of this work are analyzed advantages and weaknesses of this technology and thus suitable use.

## Keywords

Axial magnetic flux and permanent magnet machines, comparison of machines with radial and axial magnetic flux, applications of axial magnetic flux machines.

## 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 diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 7. června 2017

Srogončík Václav

## Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Typy strojů s axiálním magnetickým tokem</b>	<b>13</b>
1.1 Topologie a geometrie . . . . .	14
1.2 Srovnání AMTPM motorů s RMTPM motory . . . . .	18
1.3 Omezení výkonu AMTPM strojů . . . . .	19
<b>2 Principy jednotlivých el. strojů využívajících axiální magnetický tok</b>	<b>20</b>
2.1 Magnetický obvod . . . . .	20
2.1.1 Jednostrané stroje . . . . .	20
2.1.2 Dvoustrané stroje s vnitřním diskovým rotorem . . . . .	21
2.1.3 Dvoustrané stroje s vnitřním prstencovitým satorovým jhem . . . . .	21
2.1.4 Dvoustrané stroje s vnitřním drážkovým statorom . . . . .	21
2.1.5 Dvoustrané stroje s vnitřním statorom bez jádra . . . . .	22
2.1.6 Vícediskové stroje . . . . .	22
2.2 Vinutí . . . . .	23
2.2.1 Třífázové vinutí rozložené v drážkách . . . . .	23
2.2.2 Toroidní vinutí . . . . .	24
2.2.3 Vinutí bezjádřového satoru . . . . .	24
2.2.4 Nekřížené vinutí . . . . .	25
2.3 Vznik točivého momentu . . . . .	25
2.4 Magnetický tok . . . . .	26
2.5 Ztráty a účinnost . . . . .	27
2.5.1 Ztráty ve satorovém vinutí . . . . .	27
2.5.2 Ztráty ve jhu satoru . . . . .	27
2.5.3 Ztráty v PM . . . . .	28
2.5.4 Ztráty v jádře rotoru . . . . .	29
2.5.5 Ztráty vířivými proudy ve satorovém vinutí . . . . .	30
2.5.6 Mechanické ztráty . . . . .	31
2.5.7 Ztráty pro nesinusový průběh proudu . . . . .	31
2.5.8 Účinnost . . . . .	32
<b>3 Srovnání strojů s axiálním magnetickým tokem s motory s tokem radiálním</b>	<b>33</b>
3.1 Stroje o výkonu $1kW$ . . . . .	33
3.1.1 Prototyp dvoustraného AMTPM motoru . . . . .	34



3.1.2	Elektromotor SIEMENS 1LA7090-4 . . . . .	35
3.2	Stroje o výkonu $46kW$ . . . . .	35
3.2.1	Elektromotor EcoDisk <sup>TM</sup> MX18 . . . . .	35
3.2.2	Elektromotor CTB-4165TPxC25 . . . . .	37
3.3	Stroje o výkonu $315kW$ . . . . .	37
3.3.1	EcoDisc MX 100 . . . . .	37
3.3.2	EST4 250LA . . . . .	38
3.4	Generátory pro $3kW$ větrnou turbínu . . . . .	38
3.4.1	AMTPM generátor . . . . .	39
3.4.2	RMTPM(OR) generátor . . . . .	39
3.4.3	RMTPM(IR) generátor . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Použití strojů s axiálním magnetickým tokem</b>	<b>41</b>
4.1	Větrné elektrárny . . . . .	41
4.2	Elektromobily . . . . .	43
4.2.1	Hybridní elektrická vozidla . . . . .	43
4.2.2	Plně elektrická vozidla . . . . .	44
4.3	Výtahy . . . . .	45
4.4	Miniaturní motory . . . . .	47
4.5	Lodní pohony . . . . .	47
4.5.1	Pohon bezpilotních ponorek . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>49</b>

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$k_C$	[-]	kárterův koeficient
$Q_1$	[-]	počet drážek na jeden pól
$s_1$	[-]	počet všech cívek
$p$	[-]	počet pólpárů
$q_1$	[-]	počet drážek na jeden pól
$m_1$	[-]	počet fází
$N_c$	[-]	počet vodičů na jednu cívku
$a_p$	[-]	počet paralelních cest proudu
$a_w$	[-]	počet paralelních vodičů
$n_c$	[-]	počet cívek na jednu fázi
$N_{sl}$	[-]	počet vodičů na jednu drážku
$\gamma$	[°]	úhel mezi drážkami
$\tau$	[m]	pólový rozestup
$r$	[m]	poloměr
$b_p$	[m]	šířka pólů
$\alpha_i$	[-]	poměr průměrné indukce vůči maximální indukci
$B_{avg}$	[T]	průměrná indukce
$B_{max}$	[T]	maximální indukce
$A_m$	[A · m <sup>-1</sup> ]	maximální hodnota lineární proudové hustoty
$F_x$	[N]	tankenciální síla
$B_g$	[T]	indukce ve vzduchové mezeře
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$T_d$	[A · m <sup>2</sup> ]	elektromagnetický točivý moment
$R_{out}$	[m]	vnější poloměr
$R_{in}$	[m]	vnitřní poloměr
$k_d$	[-]	poměr vnitřního ku vnějšímu poloměru
$\Phi_f$	[Wb]	magnetický tok na jeden pól pro sinusový průběh
$L_i$	[m]	efektivní délka stacku

## Seznam použitých symbolů a zkratek

$\Delta P_{1w}$	[W]	ztráty ve vinutí kotvy
$\Delta P_{eFe}$	[W]	ztráty vířivými proudy
$\Delta P_{hFe}$	[W]	hysterezní ztráty
$f$	[Hz]	frekvence
$\eta_d$	[-]	koefficient zkreslení magnetické indukce
$\Delta P_{1Fe}$	[W]	ztráty ve jhu statoru
$k_{ad}$	[-]	koefficient přídavných ztrát
$\Delta P_{PM}$	[W]	ztráty v PM
$\Delta P_{2Fe}$	[W]	ztráty v jádře rotoru
$\Delta P_e$	[W]	ztráty ve vinutí
$\Delta P_{rot}$	[W]	rotační a mechanické ztráty
$\Delta P_{fr}$	[W]	třecí ztráty
$Re$	[-]	Reynoldsovo číslo
$c_f$	[-]	koefficient tahu pro turbulentní tok
$\Delta P_{wind}$	[W]	ztráty pro tření se vzduchem rotujícího disku
$\Delta P_{1w}$	[W]	ztráty ve statorovém vinutí pro nesinusový průběh proudu
$\Delta P_{1Fe}$	[W]	ztráty v jádře statoru pro nesinusový průběh proudu
$U_{1r}$	[V · m <sup>-1</sup> ]	napětí jmenovité
$U_{1n}$	[V · m <sup>-1</sup> ]	výstupní napětí pro vyšší harmonickou
$\Delta P$	[W]	celkové ztráty
$\eta$	[%]	účinnost
$P_d$	[W · m <sup>-3</sup> ]	poměr výkon/oběm
$g$	[mm]	velikost vzduchové mezery
$L_{pm}$	[mm]	délka PM
$L_{cs}$	[mm]	tloušťka statorového jha
$L_{cr}$	[mm]	tloušťka rotorového jha
$B_g$	[T]	indukce ve vzduchové mezeře
$V$	[m <sup>3</sup> ]	objem
$D_o$	[mm]	vnější průměr

### Zkratky

<b>PM</b>	permanentní magnet
<b>AMT</b>	axiální magnetický tok
<b>RMT</b>	radiální magnetický tok
<b>PMSM</b>	synchronní motor s permanentními magnety

# Úvod

Vzhledem k pokroku ve vývoji nových materiálů (zvláště magnetů) se zvýšil zájem o využití topologie strojů s axiálním magnetickým tokem. Tato práce se zabývá stroji s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety. Prvním úkolem této práce je popsat principy jednotlivých elektrických strojů, které využívají axiální magnetický tok. Jako první se však budu zabývat topologiemi těchto strojů, což je až druhý úkol, ale přijde mi vhodnější nejprve popsat geometrii strojů, aby si čtenář mohl lépe představit dále vysvětlované principy těchto strojů. Dalším úkolem je srovnat stroje s axiálním magnetickým tokem s motory klasickými, tedy s magnetickým tokem radiálním. Z porovnání parametrů těchto strojů by pak mělo být jasné k jakým aplikacím jsou vhodné. Jako poslední bod má být uvedeno několik možností použití těchto strojů a tato potenciální využití budou podpořena výčtem strojů postavených, ať už se jedná o prototypy, nebo stroje již komerčně využívané.

V principu je elektromagnetický návrh AMTPM strojů podobný RMTPM strojům s válcovými rotory, avšak mechanický návrh je odlišný. O AMTPM stroje je zájem hlavně kvůli jejich tvaru a dalším specifickým vlastnostem, kterým se budeme podrobněji věnovat v následujících kapitolách.

# 1 Typy strojů s axiálním magnetickým tokem

Tato kapitola byla vypracována z [1], [10]. V principu každý typ stroje s radiálním magnetickým tokem by měl mít odpovídající verzi stroje s axiálním magnetickým tokem. V praxi jsou však limitovány na následující tři typy:

- stejnosměrné komutátorové stroje s PM;
- synchronní stroje a bezkartáčové stejnosměrné stroje s PM;
- indukční stroje

Stejnosemřný komutátorový stroj s axiálním magnetickým tokem používá podobně jako jeho protějšek s radiálním magnetickým tokem permanentní magnety, aby nahradil elektromagnetické budící pole. Rotor může být navrhnutý jako vinutý nebo jako rotor s tištěným vinutím.

Ve vinutém rotoru je indukční vinutí tvořeno měděnými dráty lisovanými s pryskyřicí. Komutátor je stejný s konvenčním typem, tedy může být cylindrický nebo radiální.

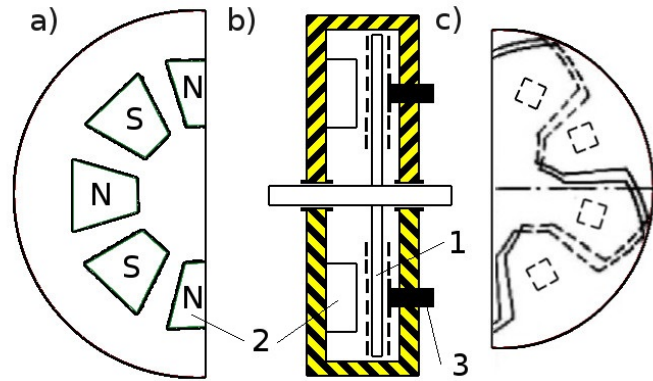
Diskový typ motoru s kotvou je na obrázku 1.1. Rotor nemá feromagnetické jádro a jeho vinutí je stejné s konvenčním stejnosměrným strojem s komutátorem.

Stejnosemřné motory s AMT a komutátorem jsou stále ekonomickou volbou pro určitá odvětví průmyslu, jako třeba automobilový a nebo domácí aplikace jako větráky a ventilátory.

Prakticky mají stejnosměrné bezkartáčové a střídavé synchronní motory skoro stejnou strukturu.[13],[14],[15] Hlavní rozdíl je ve tvaru provozního proudu.

- stejnosměrné bezkartáčové stroje tvoří čtvercové vlny proudu
- střídavé synchronní stroje generují sinusovou formu proudu

Je těžké vyrobit laminovaný rotor s klecovým vinutím pro diskový indukční stroj [1] a pokud se nahradí klecové vinutí nemagnetickým vysoce vodivým (měděným nebo hliníkovým) homogenním diskem, tak výkon stroje drasticky klesá, proto není zatím moc zájem o tento typ strojů.



Obrázek 1.1: Stejnoseměrný osmipólový motor s komutátorem a axiálním magnetickým tokem s tištěným vinutím: a) stator s PM, b) průřez, c) rotorové vinutí a kartáče, d) konstrukce vinutí. 1 - rotor s vinutím, 2 - PM, 3 - kartáče.

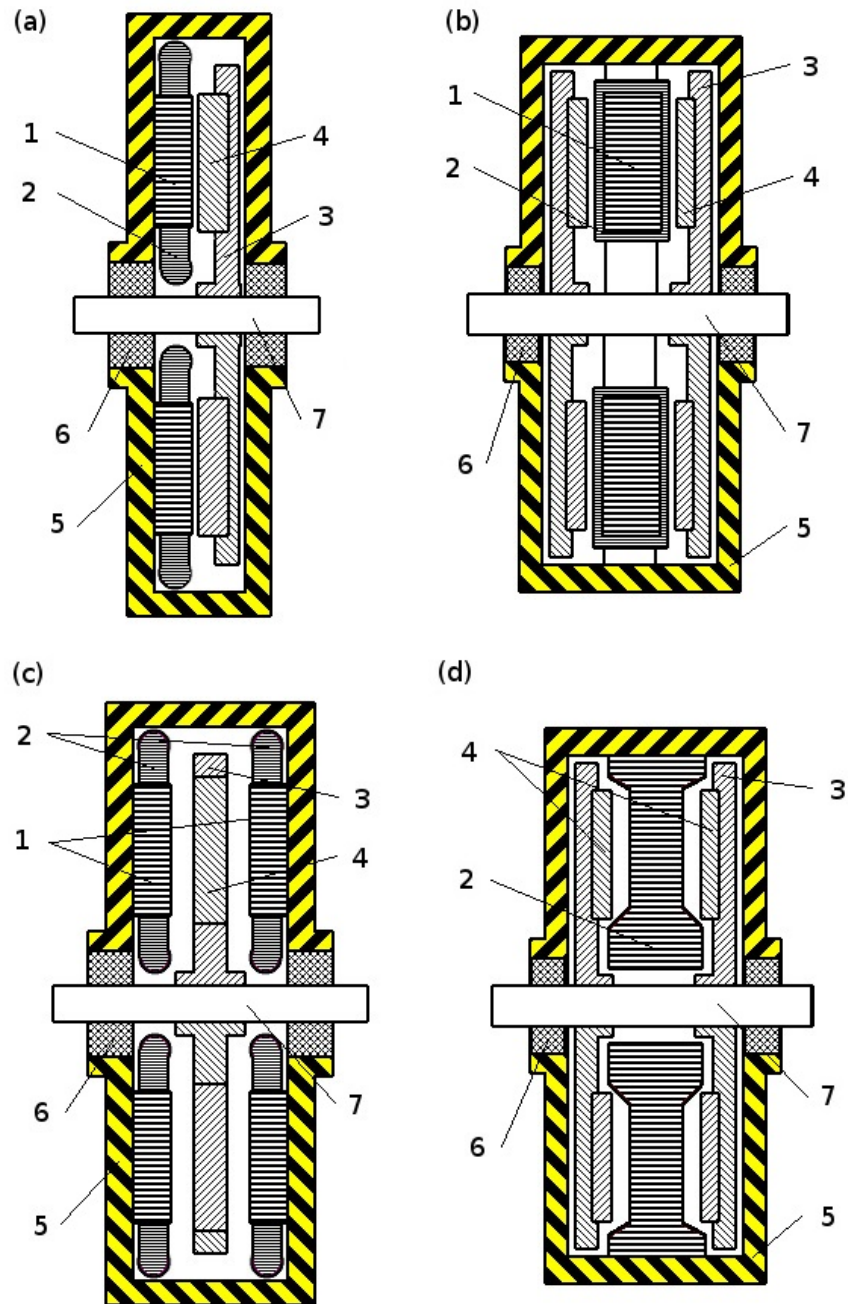
## 1.1 Topologie a geometrie

Zhlediska konstrukce mohou být motory s AMT a PM navrženy jako jednostrané nebo dvoustrané, s drážkami nebo bez drážek, s jádrem nebo bez jádra, s vnějšími nebo vnitřními rotory z PM, které mohou být upevněny na povrchu nebo uvnitř. Nakonec je můžeme rozdělit na jednostupňové a víceúrovňové (multidiskové).

V případě dvoustraných konfigurací může být použit buď vnější stator nebo vnější rotor. Vnější stator však má výhodu v tom, že využívá méně PM, avšak hůř využívá vinutí, proto se více využívá vnějších rotorů z hlediska efektivnosti. Následné rozdělení je pro topologie bezkartáčových motorů s AMT a PM:

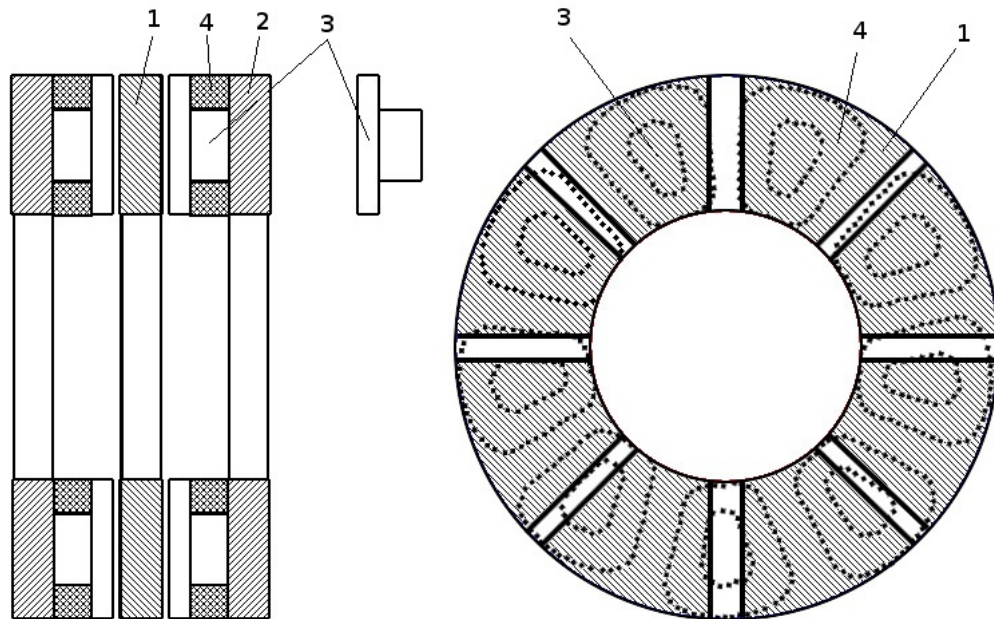
- jednostupňové motory
  - jednostrané motory
    - s drážkovaným statorem
    - se statorem bez drážek
    - se statorem s vyniklými póly
  - dvoustrané motory
    - s vnitřním statorem
      - s drážkovaným statorem
      - se statorem bez drážek
        - se statorem z železného jádra
        - se statorem bez jádra
        - bez satorového i rotorového jádra
      - se statorem s vyniklými póly
    - s vnitřním rotorem
      - s drážkovaným statorem
      - se statorem bez drážek
      - se statorem s vyniklými póly
- vícestupňové motory (multidiskové)

Na obrázcích 1.2; 1.5; 1.3 a 1.4 lze vidět základní topologie strojů, kterými se budeme zabývat.

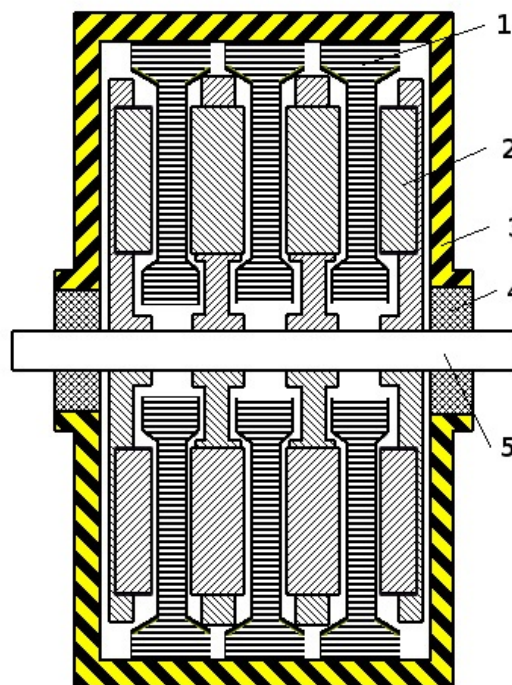


Obrázek 1.2: základní topologie a geometrie AMTPM strojů: a) jednostraný drážkovaný stroj, b) dvoustraný bezdrážkový stroj s vnitřním statorem a dvěma PM rotory, c) dvoustraný stroj s drážkovaným statorem a vnitřním PM rotorem, d) dvoustraný bezjádrový motor s vnitřním statorem. 1 - statorové jádro, 2 - statorové vinutí, 3 - rotor, 4 - PM, 5 - rám, 6 - ložiska, 7 - hřídel.

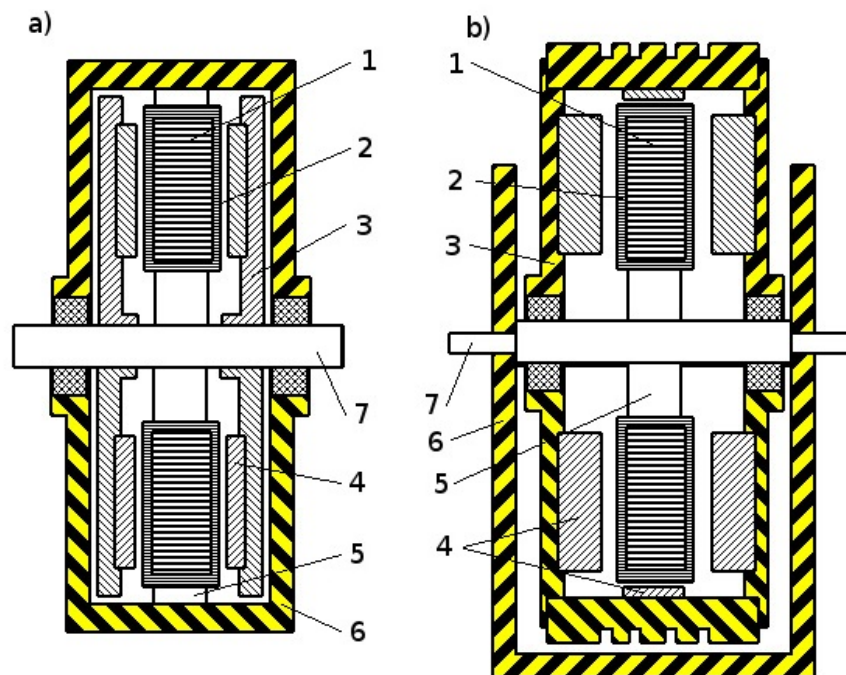




Obrázek 1.3: Dvoustraný AMTPM bezkartáčový třífázový stroj, 9-pólový externí sator a 8-pólový vnitřní rotor: 1 - PM, 2 - satorový feromagnetický disk, 3 - satorový pól, 4 - satorová cívka.



Obrázek 1.4: Bezjádrový multidiskový AMTPM stroj se třemi bezjádrovými statory a pěti PM rotory: 1 - satorové vinutí, 2 - rotorová jednotka, 3 - rám, 4 - ložiska, 5 - hřídel



Obrázek 1.5: Dvoustraný stroj s jedním bezdrážkovým statorem: a) vnitřní rotor, b) vnější rotor. 1 - statorové jádro, 2 - statorové vinutí, 3 - ocelový rotor, 4 - PM, 5 - pryskyřice, 6 - rám, 7 - hřídel.

Drážkované motory mají vlivem zvýšené reluktance ve vzduchové mezeře sníženou indukci. Změna střední indukce ve vzduchové mezeře bude odpovídat změně z nedrážkovaného motoru  $\delta$  na fiktivní hodnotu drážkovaného rotoru  $\delta'$ . Jejich poměr se nazývá Carterův činitel  $k_c = \delta' \div \delta$ , kde  $k_c > 1$ . [16]

Bezdrážkové stroje s vinutím mají vzduchovou mezeru mnohem větší, protože její velikost je rovná součtu mechanické vůle a tloušťky všech nemagnetických materiálů jako jsou vinutí a izolace. Jelikož nemá žádné drážky, tak je Carterův činitel  $k_c = 1$ . V porovnání s drážkovaným statorovým vinutím má tedy bezdrážkové vinutí výhodu v jednoduchosti skládání statoru, snížení ztrát na povrchu rotoru, magnetické saturace a hluku. Nevýhodou ale je nutnost použití více PM a výrazné ztráty vířivými proudy. [17]

V závislosti na aplikaci bezdrážkových motorů mohou být použity stator bezjádřové. Bezjádřové statoru nemají feromagnetické materiály ve statoru a nedochází tedy k žádným ztrátám hysterezním nebo ztrátám vířivými proudy. [1]

## 1.2 Srovnání AMTPM motorů s RMTPM motory

Vzhledem k fyzikálním vlastnostem RMTPM motorů a materiálů, ze kterých jsou vyrobeny, zjistíme, že je zde několik omezení, která nám nedovolují zvýšit poměr výkon/oběh stroje. [18], [13], [19] Jsou to hlavně

- zúžení cesty pro tok u kořene zubu rotoru v případě indukčních a d.c. strojů s komutátorem nebo bezkartáčových strojů s externími rotory,
- většina rotorového jádra kolem hřídele je sotva využita pro magnetický obvod,
- teplo je z vinutí statoru přeneseno na statorové jádro a pak do rámu - rotor se jen těžko chladí přes vzduchovou mezeru a hřídel, kde musíme využít systému chlazení.

Tato omezení jsou svázána se strukturou RMTPM strojů a nemohou být odstraněna, dokud nebude nalezena jiná topologie. AMTPM stroje mají ve srovnání s RMTPM stroji poměr výkon/obem vyšší. Jsou tedy kompaktnější.[18],[13],[19]

Navíc vnitřní průměr jádra AMTPM strojů je většinou o dost větší než průměr hřídele, tak se dá očekávat lepší ventilace a chlazení. Celkově by se výhody AMTPM strojů oproti RMTPM strojům daly shrnout následovně [19]

- mají větší poměr průměr/délka stroje;
- stroje mají rovinou a vzduchovou mezeru;
- mají větší potenciál v poměru výkon/objem;
- topologie AMTPM strojů je ideální k sestrojení modulárních strojů, kde se počet stejných modulů upraví v závislosti na požadovaném výkonu nebo točivém momentu;
- čím větší je průměr stroje, tím více se do něj dá umístit pólů, což z AMTPM strojů dělá ideálního kandidáta na vysofrekvenční pomaloběžné stroje

Z těchto bodů vyplývá, že AMTPM stroje jsou vhodné jako servo, trakční a další stroje, kde jejich specifické výhody předčí RMTPM stroje.

### 1.3 Omezení výkonu AMTPM strojů

Jak roste výstupní výkon AMTPM motorů, tak roste i poměr jmenovitého výkonu ku velikosti kontaktního povrchu mezi rotorem a hřídelí. Při vyšších výkonech strojů je tedy těžké vytvořit dostatečně pevný mechanický spoj. Nabízí se řešení v podobě multidiskových strojů avšak i toto řešení má svá omezení. Výhody získané AMT se pomalu vytrácejí s tím jak se zvyšuje poměr délka/průměr stroje. Moment kdy se vyplatí přejít k ATMPM strojům je přibližně když se poloměr rovná dvojnásobku délky RMTPM stroje. Toto je omezení pro jednodiskové stroje, ale výkon se dá vždy navýšit tím, že naskládáme více disků na stejnou hřídel.[20]

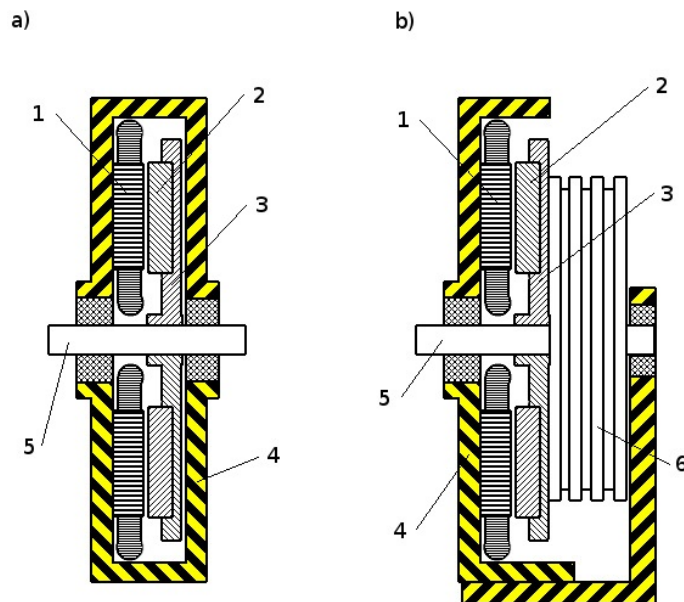
## 2 Principy jednotlivých el. strojů využívajících axiální magnetický tok

Tato kapitola byla vypracována pomocí informací z knih [1], [10]. V této kapitole se budeme zabývat principy jednotlivých strojů. Konkrétně magnetickým obvodem, vinutím, vznikem točivého momentu, magnetickým tokem a nakonec ztrátami a účinností.

### 2.1 Magnetický obvod

#### 2.1.1 Jednostrané stroje

Konstrukce jednostraných strojů s AMT je jednodušší než konstrukce strojů dvoustraných, ale maximum točivého momentu, který můžeme získat, se nám sníží. Na obrázku 2.1 můžeme vidět typickou konstrukci jednostraného stroje s AMT bez kartáče s rotorem s PM a laminovaným statorovým vinutím. Motor na obrázku má standartní rám a osu. Může tedy být použit průmyslově, nebo jako trakční motor.[1]



Obrázek 2.1: Jednostraný stroj: a) pro průmyslové a trakční pohony, b) pro zdvihací aplikace. 1 - laminovaný stator, 2 - PM, 3 - rotor, 4 - rám, 5 - hřídel, 6 - řemenice/naviják.

### 2.1.2 Dvoustrané stroje s vnitřním diskovým rotorem

V dvoustraném motoru s vnitřním rotorem z PM je vinutí kotvy na dvou statorových jádrech. Disk s PM rotuje mezi těmito dvěma statory. PM jsou vestavěné nebo přilepené na nemagnetické kostře rotoru. Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem je velká. Je součtem dvou mechanických vůlí (mezi rotorem a statory) a dvakrát šířkou PM. Pokud bychom statorová vinutí zapojili paralelně, tak takový motor může pracovat i pokud by došlo k poškození jednoho statoru. Preferované je však zapojení sériové, protože oba statory pak působí na rotor stejně velkou silou. Tento stroj si můžete prohlédnout na obrázku 1.5a.[1]

### 2.1.3 Dvoustrané stroje s vnitřním prstencovitým statorovým jhem

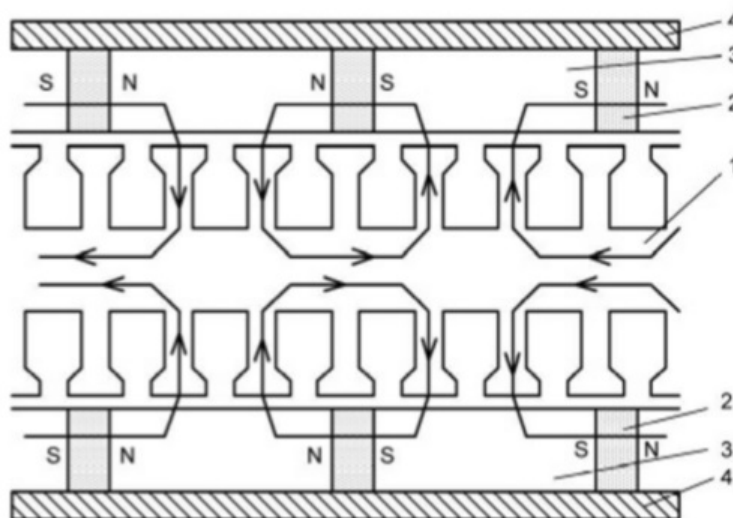
Dvoustrané stroje s vnitřním prstencovitým statorovým jhem mají toroidální typ vinutí navinuté na povrchu feromagnetického jádra statoru. V tomto stroji je prstencové jádro statoru tvořeno buď z ocelové pásky, nebo ze spékaných prášků. Celková vzduchová mezera je rovna tloušťce statorového vinutí s izolací, mechanické vůle a tloušťkou PM v axiálním směru. Vzhledem k velké vzduchové mezeře magnetická indukce nepřesahuje 0,65 T. Abychom takové indukce dosáhli, potřebujeme velké množství PM. Magnetický obvod je nenasycený. Dvoustraný rotor s PM je umístěn po obou stranách statoru. Na obrázku 1.5 lze vidět topologii strojů s vnitřními a vnějšími rotory. [173]

Stroje s vnitřním rotorem lze využívat jako pohonné motory nebo jako synchronní generátor spalovacích motorů. [1]

Pro velké motory s externími rotory je množství využití hlavně co se týká elektrických vozidel. Diskové motory s externími rotory mají výhodu speciálně v malých rychlostech otáčení s vysokým točivým momentem, jako například autobusech. Je to hlavně kvůli jejich velkému poloměru.[1]

### 2.1.4 Dvoustrané stroje s vnitřním drážkovým statorem

Vnitřní prstencové jádro statoru může mít drážky, což lze vidět na obrázku 2.2. U tohoto typu motoru jsou drážky postupně vyraženy do ocelových pásek. V případě drážkového statoru je vzduchová mezera malá a indukce ve vzduchové mezeře dosahuje až 0,85 T.[1]



Obrázek 2.2: Dvoustraný stroj s jedním vnitřním drážkovaným státorem a vnořenými PM: 1 - statorové jádro s drážkami, 2 - PM, 3 - pól, 4 - nemagnetický rotorový disk. [1]

### 2.1.5 Dvoustrané stroje s vnitřním státorem bez jádra

Stroje s AMT se státorem bez jádra mají statorové vinutí navinuté na nemagnetické a nevodivé nosné konstrukci. Jelikož se jedná o stator bez jádra, tak nedochází k hysterézním ztrátám ani ztrátám způsobených vířivými proudy. Ztráty v PM a v rotorovém disku jsou zanedbatelné. Tento typ motoru nabízí velkou účinnost při nulovém točivém momentu. Pro udržení indukce ve vzduchové mezeře na rozumné úrovni je potřeba většího množství PM v porovnání s laminovaným statorovým jádrem strojů s AMT. Statorové vinutí je uloženo mezi PM rotorových disků (obrázek 1.2d). [1]

### 2.1.6 Vícediskové stroje

Na zvýšení točivého momentu, kterého můžeme dosáhnout pomocí zvětšení průměru stroje, je limit. Faktory omezující návrhy jednodiskových strojů jsou axiální síla v ložiskách, integrita spojení mezi diskem a hřídelí a tuhos disku. Rozumnější řešení konstrukce motorů s vysokým točivým momentem jsou dvojité nebo trojitě diskové motory.

Známe několik možných řešení vícediskových motorů. Velké motory s výkonem alespoň 300-kW mají vodní chlazení s radiátory kolem zakončení vinutí. Abychom minimalizovali ztráty na vinutí způsobené skin efektem používají se průřezové vodiče s proměnným průměrem tak, aby jejich průřez byl větší v drážkách a menší v zakončovacích částech. Tímto se dá získat až 40% jmenovitého výkonu navíc. Nicméně to znamená zvýšení ceny výroby stroje.

Díky velkému mechanickému namáhání diskových rotorů se doporučují titanové slitiny. Navrhuje se také použití vícediskových strojů s AMT v generátorech s nízkou vahou a vrtulí poháněných letadlech.[21]

## 2.2 Vinutí

### 2.2.1 Třífázové vinutí rozložené v drážkách

V jednovrstvém vinutí se jedna cívka vkládá do jedné drážky. Počet všech cívek je tedy  $s_1/2$  a počet cívek na jednu fázi je  $n_c = s_1/2m_1$ , kde  $s_1$  je počet drážek statoru a  $m_1$  je počet fází. V dvouvrstvém vinutí jsou v každé drážce dvě strany různých dvou cívek. Počet všech cívek je tedy  $s_1$  a počet cívek na fázi je  $n_c = s_1/m_1$ . Počet drážek na jeden pól je

$$Q_1 = \frac{s_1}{2p} \quad (2.1)$$

kde  $2p$  je počet pólů. Počet drážek na jeden pól je tedy

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1} \quad (2.2)$$

Počet vodičů na jednu cívku se dá tedy spočítat jako

- pro jednovrstvé vinutí

$$N_c = \frac{a_p a_w N_1}{n_c} = \frac{a_p a_w N_1}{s_1/2m_1} = \frac{a_p a_w N_1}{pq_1} \quad (2.3)$$

- pro dvouvrstvé vinutí

$$N_c = \frac{a_p a_w N_1}{n_c} = \frac{a_p a_w N_1}{s_1/m_1} = \frac{a_p a_w N_1}{2pq_1} \quad (2.4)$$

kde  $N_1$  je počet závitů v sérii na jednu fázi,  $a_p$  je počet paralelních cest proudu a  $a_w$  je počet paralelních vodičů. Počet vodičů na jednu drážku je stejný pro jednovrstvé i dvouvrstvé vinutí

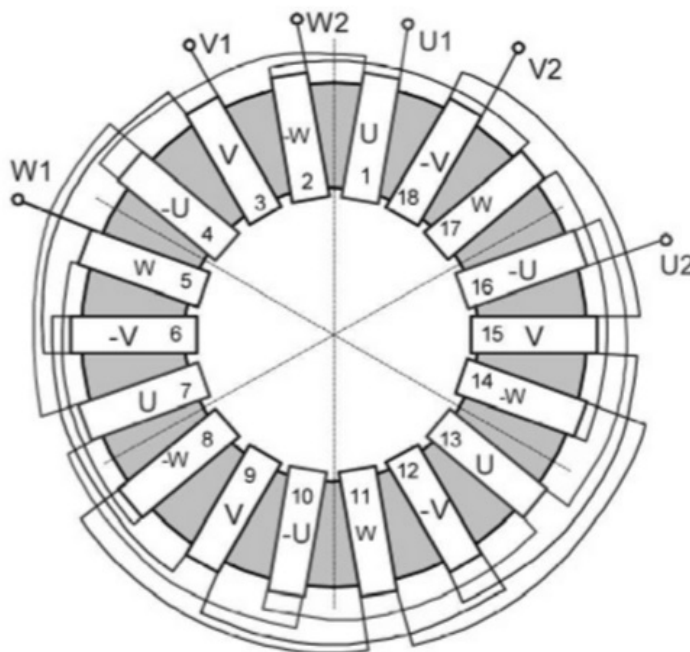
$$N_{sl} = \frac{a_p a_w N_1}{pq_1} \quad (2.5)$$

Úhel ve stupních mezi sousedními drážkami je

$$\gamma = \frac{360}{s_1} p \quad (2.6)$$

## 2.2.2 Toroidní vinutí

Toroidální satorové vinutí se užívá ve dvourotorových dvoustraných strojích s AMT (obrázek 1.5). Třífázové toroidální satorové vinutí šestipólového stroje s AMTPM se dvěma externími rotory je na obrázku 2.3. Každá fáze vinutí má stejný počet cívek napojených proti sobě aby vyrušily možnost cirkulace magnetického toku ve satorovém jádře. Tyto cívky jsou rovnoměrně rozloženy podél satorového jádra diametrálně proti sobě. Výhodou toroidálního satorového vinutí jsou krátké spojení na koncích, jednoduché satorové jádro a snadný návrh počtu fází.[1]



Obrázek 2.3: Toroidní vinutí třífázového šestipólového 18-cívkového AMTPM stroje s dvojíým externím rotorem. [1]

## 2.2.3 Vinutí bezjádrového satoru

Vinutí bezjádrového satoru se používá v dvourotorových dvoustraných ATMPM strojích (obrázek 1.2d). Pro zjednodušení konstrukce se satorové vinutí normálně skládá z vrstev lichoběžných cívek. Složení satoru je pak umožněno ohnutím konců cívek do určitého úhlu tak, aby aktivní vodiče ležely rovnoměrně rozložené ve stejné ploše a konce vinutí jsou blízko u sebe. Vinutí drží ve stejné pozici pomocí kompozitních materiálů jako epoxidové pryskyřice a tvrdidla. Poměry použité pro vinutí drážkovaného satoru mohou být stejně dobře použité i pro lichoběžníkové vinutí bezjádrového satoru s tou výjimkou že místo "drážek" budeme počítat se "stranou cívky". [1]



## 2.2.4 Nekřížené vinutí

Cívky nekříženého vinutí, jak už název napovídá, se nekříží. Nekřížené vinutí může být jenovrstvé nebo dvouvrstvé, koncentrické nebo rozložené, se vzduchovým nebo železným jádrem. Stroje s AMTPM s nepřekrývajícím se vinutím mohou být jednostrané nebo dvoustrané (obrázek 1.3).

V dvouvrstvém nekříženém vinutí se železným jádrem sdílejí dvě cívky jednu drážku, což znamená že všechny zuby jsou vinuté. Ve stejném vinutí akorát se vzduchovým jádrem statorové cívky leží vedle sebe.

V jednovrstvém nepřekrývajícím se vinutí se železným jádrem leží v drážce jen jedna cívka a proto je vinutý jen každý druhý zub.

V jednovrstvém nepřekrývajícím se vinutí se vzduchovým jádrem jsou cívky přesunuty od sebe.

V koncentrickém nepřekrývajícím se vinutí je jen jedna cívka v cívkové skupině, ale v rozloženém vinutí jsou dvě nebo více cívek rozloženy a spojeny do série co vytvoří cívkovou skupinu.

Je zde několik pravidel pro pólové a drážkové kombinace, které by se měly u nepřekrývajícího vinutí dodržovat.[1] Jsou to

- počet pólů musí být sudé číslo;
- počet drážek musí být násobek počtu fází a musí to být číslo sudé v případě jednovrstvého vinutí;
- počet cívek a drážek je stejný pokud jde o dvouvrstvé vinutí, u jednovrstvého je počet cívek roven polovině počtu drážek;
- počet cívek v cívkové skupině musí být celé číslo;
- počet drážek nesmí být rovný počtu pólů

## 2.3 Vznik točivého momentu

Elektromagnetický točivý moment u AMTPM strojů je funkcí poloměru, není konstantou jako u válcových strojů. Pólový rozestup  $\tau(r)$  a šířka pólů  $b_p(r)$  jsou tedy také funkcí poloměru  $r$ .

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (2.7)$$

$$b_p(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (2.8)$$

kde  $\alpha_i$  je poměr průměrné vůči maximální hodnotě indukce  $\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{max}} = \frac{b_p(r)}{\tau(r)}$ .

Lineární proudová hustota je také funkcí poloměru  $r$ . Tedy maximální hodnota je

$$A_m(r) = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} \quad (2.9)$$

Tangenciální síla působící na disk se dá vypočítat na základě Ampérovovy rovnice

$$dF_x = I_a (dr \times B_g) = A(r) (dS \times B_g) \quad (2.10)$$

kde  $I_a dr = A(r) dS$ ,  $A(r) = \frac{Am(r)}{\sqrt{2}}$  z rovnice 2.9,  $dr$  je elementem poloměru,  $dS$  je elementem plochy a  $B_g$  je vektorem (kolmým k povrchu disku) normály indukce ve vzduchové mezeře. Diskové typy strojů poskytují  $B_g$  prakticky nezávislé na poloměru. Za předpokladu, že indukce v mezeře  $B_{max}$  je nezávislá na poloměru  $r$ ,  $dS = 2\pi r dr$  a  $B_{avg} = \alpha_i B_{max}$  pak nám vychází, že elektromagnetický točivý moment je roven

$$dT_d = r dF_x = r [k_{w1} A(r) B_{avg} dS] = 2\pi \alpha_i k_{w1} A(r) B_{max} r^2 dr \quad (2.11)$$

Lineární proudová hustota  $A(r)$  je elektrickým zatížením vzatým na plochu jednoho aktivního statoru s typickým rozložením vinutí v drážkách (dvoustraný stator a vnitřní rotor), nebo elektrické zatížení celého statoru v případě toroidního statoru nebo statoru bez jádra.[1]

## 2.4 Magnetický tok

Pro sinusový průběh magnetické indukce vzniklé za pomoci PM je průměrná hodnota

$$B_{avg} = \frac{1}{\pi/p - 0} \int_0^{\pi/p} B_{max} \sin(p\alpha) d\alpha = \frac{2}{\pi} B_{max} \quad (2.12)$$

Jelikož element plochy na pól je  $2\pi r dr/2p$ , tak magnetický tok excitovaný PM na pól pro sinusový průběh indukce  $B_{avg} = \alpha_i B_{max}$  je

$$\Phi_f = \int_{R_{in}}^{R_{out}} \alpha_i B_{max} \frac{2\pi}{2p} r dr = \alpha_i B_{max} \frac{\pi}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (2.13)$$

kde  $B_{max}$  je maximální hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře,  $p$  je počet pólů,  $R_{out} = \frac{1}{2} D_{out}$  je vnější poloměr PM a  $R_{in} = \frac{1}{2} D_{in}$  je vnitřní poloměr PM. Je výhodné použít poměr vnitřního ku vnějšímu poloměru, nebo průměru

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (2.14)$$

pak

$$\Phi_f = \alpha_i B_{max} \frac{\pi}{8p} ((0.5 D_{out})^2 - (0.5 D_{in})^2) = \alpha_i B_{max} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (2.15)$$

Stejná rovnice pro válcové stroje [13]

$$\Phi_f = \frac{2}{\pi} \tau L_i B_{max} \quad (2.16)$$

kde  $\tau$  výška pólu a  $L_i$  je efektivní délka stacku.[1]

## 2.5 Ztráty a účinnost

### 2.5.1 Ztráty ve statorovém vinutí

Odpor vinutí na fázi pro stejnosměrný proud je

$$R_{1dc} = \frac{N_1 l_{1av}}{a_p a_w \sigma s_a} \quad (2.17)$$

kde  $N_1$  je počet závitů na fázi,  $l_{1av}$  je průměrná délka závitů,  $a_p$  je počet paralelních proudových cest,  $a_w$  je počet paralelních vodičů,  $\sigma$  je elektrická vodivost a  $s_a$  je průřez vodiče.

Pro střídavý proud by odpor statorového vinutí měl být rozdělen na odpor radiální části vodičů  $R_{1b}$  a na odpor konců připojení  $R_{1e}$

$$R_1 = R_{1b} + R_{1e} = \frac{N_1}{a \sigma s_a} (2L_i k_{1R} + l_{1in} + l_{1out}) \approx k_{1R} R_{1dc} \quad (2.18)$$

kde  $k_{1in}$  a  $k_{1out}$  jsou délkami vnitřních a vnějších částí zakončení vodičů,  $k_{1R}$  je koeficient skin efektu pro odpor statoru.

Pro malé motory s kulatým vinutím kotvy běžících na frekvencích 50 nebo 60 Hz

$$R_1 \approx R_{1dc} \quad (2.19)$$

Ztráty ve vinutí kotvy jsou tedy

$$\Delta P_{1w} = m_1 I_a^2 R_1 \approx m_1 I_a^2 R_{1dc} k_{1R} \quad (2.20)$$

kde  $m_1$  je počet vodičů v drážce umístěných nad sebou ve dvou vrstvách.

### 2.5.2 Ztráty ve jhu statoru

Statorové vinutí je napájeno z PWM ze stejnosměrných zdrojů přes sřídač, takže přiložené napětí obsahuje vyšší harmonické, které se projeví na statorovém toku.

Ztráty vířivými proudy můžeme spočítat následující rovnicí

$$\Delta P_{eFe} = \frac{\pi^2}{6} \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_{Fe}} f^2 d_{Fe}^2 m_{Fe} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 [B_{m xn}^2 + B_{m zn}^2] = \frac{\pi^2}{6} \frac{\sigma_{Fe}}{\rho_{Fe}} f^2 d_{Fe}^2 m_{Fe} [B_{m x1}^2 + B_{m z1}^2] \eta_d^2 \quad (2.21)$$

kde  $\sigma_{Fe}$ ,  $d_{Fe}$ ,  $\rho_{Fe}$  a  $m_{Fe}$  jsou elektrická vodivost, tloušťka, hustota a hmotnost laminací,  $n$  jsou harmonické,  $B_{m xn} + B_{m zn}$  jsou harmonické složky magnetické indukce v tangenciálním (x) a normálovém (z) směru a

$$\eta_d^2 = \sqrt{1 + \frac{(3B_{m x3})^2 + (3B_{m z3})^2}{B_{m x1}^2 + B_{m z1}^2} + \frac{(5B_{m x5})^2 + (5B_{m z5})^2}{B_{m x1}^2 + B_{m z1}^2} + \dots} \quad (2.22)$$

je koeficient zkreslení magnetické indukce. Pro  $\eta_d = 1$  nám rovnice 2.21 vyjadřuje ztráty pro vířivé proudy pro sinusovou indukci.

Hysterezní ztráty mohou být vyjádřeny pomocí Richterovy rovnice

$$\Delta P_{hFe} = \epsilon \frac{f}{100} m_{Fe} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 [B_{m xn}^2 + B_{m zn}^2] = \epsilon \frac{f}{100} m_{Fe} [B_{m x1}^2 + B_{m z1}^2] \eta_d^2 \quad (2.23)$$

Rovnice 2.21 a 2.23 nepočítají se ztrátami při magnetických anomáliích a se ztrátami které jsou následkem výrobních procesů. Ztráty spočítané těmito rovnicemi jsou tedy nižší než ztráty naměřené. Proto se zavádí koeficient přídavných ztrát  $k_{ad} > 1$ , aby se tento nepoměr vyrovnal.

$$\Delta P_{1Fe} = k_{ad} (P_{eFe} + P_{hFe}) \quad (2.24)$$

Pokud známy ztráty materiálu, dají se celkové ztráty spočítat na základě ztrát ve jhu a v zubech.

$$\Delta P_{1Fe} = \Delta p_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{4/3} [k_{adt} B_{1t}^2 m_{1t} + k_{ady} B_{1y}^2 m_{1y}] \quad (2.25)$$

kde  $k_{adt} > 1$  a  $k_{ady} > 1$  jsou faktory ztrát způsobených výrobními procesy a metalurgickými vlastnostmi,  $\Delta p_{1/50}$  jsou ztráty uvedené ve  $W/kg$  při indukci  $1T$  a frekvenci  $50Hz$ ,  $B_{1t}$  je magnetická indukce v zubu,  $B_{1y}$  je magnetická indukce ve jhu,  $m_{1t}$  je hmotnost zubu,  $m_{1y}$  je hmotnost jha statoru.

### 2.5.3 Ztráty v PM

Elektrická vodivost  $NdFeB$  magnetů je mezi  $0.6 - 0.85 \cdot 10^6$  S/m. Pokud jde o  $SmCo$  magnety, tak ty mají mezi  $1.1 - 1.4 \cdot 10^6$  S/m. Jelikož elektrická vodivost vzácných zeminých PM je jen 4 až 9 krát menší než měděných vodičů, tak ztráty ve vodivých PM kvůli magnetickému poli vyšších harmonických vzniklých ve statoru nemůžeme zanedbat.

Nejznamenatelnější ztráty v PM vznikají při frekvencích změny toku ústí drážek. Tyto ztráty se tedy vyskytují jen u AMTPM strojů s drážkovaným statorem s feromagnetickým jádrem. Frekvence magnetické indukce v ústí drážky je tedy

$$f_{sl} = s_1 p n \quad (2.26)$$

kde  $s_1$  je počet drážek statoru,  $p$  je počet pólů a  $n$  rychlost otáčení rotoru. Samotná magnetická indukce je tedy rovna

$$B_{sl} = a_{sl} \beta_{sl} k_C B_{avg} \quad (2.27)$$

kde  $B_{avg}$  je magnetická indukce na jednu šterbinovou rozteč,  $k_C$  je Carterův koeficient a

$$a_{sl} = \frac{4}{\pi} \left( 0.5 + \frac{\tau^2}{0.78 - 2\tau^2} \right) \sin(1.6\pi\tau) \quad (2.28)$$

$$\beta_{sl} = 0.5 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \kappa^2}} \right) \quad (2.29)$$

$$\tau = \frac{b_{14}}{t_1}, \kappa = \frac{b_{14}}{g'} \quad (2.30)$$

V rovnicích výše 2.28, 2.29, 2.30 je  $b_{14}$  ústí drážky statoru,  $g' = g + h_M/\mu_{rrec}$  je ekvivalentem vzduchové mezery,  $t_1$  je drážková rozteč a  $h_M$  je tloušťka magnetu na pól. Za předpokladu, že  $\mu_{rrec} \approx 1$ , pak můžeme ztráty v permanentních magnetech vyjádřit následujícím vztahem

$$\Delta P_{PM} = \frac{1}{2} a_{R\nu} k_z \frac{|\alpha|^2}{\beta^2} \left( \frac{B_{sl}}{\mu_0 \mu_{rrec}} \right)^2 \frac{k}{\sigma_{PM}} S_{PM} \quad (2.31)$$

kde  $a_{R\nu}$ ,  $\alpha$ ,  $k$ ,  $\beta$  jsou pro  $\nu = 1$ .  $\tau = 0.5t_1$  a  $\sigma_{PM}$  je elektrická vodivost PM. Rovnice 2.31 může být také použita pro odhad reaktančních ztrát pokud bychom  $a_{R\nu}$  nahradili  $a_{X\nu}$ . Koeficient pro započítání obvodové složky proudů indukovaných do PM se dá vyjádřit jako

$$k_z = 1 + \frac{t_1}{D_{out} - D_{in}} \quad (2.32)$$

kde  $0.5t_1$  je indukovaná proudová smyčka a  $0.5(D_{out} - D_{in})$  je radiální délka PM. Aktivní plocha PM je

$$S_{PM} = \alpha_i \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (2.33)$$

## 2.5.4 Ztráty v jádře rotoru

neboli ztráty v ocelovém disku držícím PM jsou díky pulsujícímu toku vznikajícím kvůli rychlým změnám reluktance ve vzduchové mezeře, jak rotor mívá statorové zuby.

Magnetická permeabilita pevného ocelového disku se mění v ose  $z$ . Abychom mohli vzít v potaz proměnou magnetickou permeabilitu a hysterezní ztráty ve feromagnetických

discích, tak musíme koeficienty  $a_{R\nu}$  a  $a_{X\nu}$  nahradit koeficienty  $a_{RFe}$  a  $a_{XFe}$ , pak

$$\Delta P_{2Fe} = \frac{1}{2} a_{RFe} k_z \frac{|\alpha|^2}{\beta^2} \left( \frac{B_{sl}}{\mu_0 \mu_r} \right)^2 \frac{k}{\sigma_{Fe}} S_{Fe} \quad (2.34)$$

kde

$$\alpha_\nu = \sqrt{j\omega_\nu \mu_0 \mu_r \sigma}, \quad (2.35)$$

$$\beta_\nu = \nu \frac{\pi}{\tau}, \quad (2.36)$$

$$k_\nu = \sqrt{\frac{\omega_\nu \mu_0 \mu_r \sigma}{2}} \quad (2.37)$$

pro  $\nu = 1$  a  $\tau = 0,5t_1$ ,  $B_{sl}$  je z rovnice 2.27,  $\mu_r$  je relativní magnetická permeabilita a  $\sigma_{Fe}$  je elektrická konduktivita feromagnetického disku. Frekvence ve výpočtu koeficientu útlumu  $k$  je z rovnice 2.26. Rovnice 2.34 lze použít k výpočtu odhadu reaktivních ztrát ve feromagnetickém disku pokud  $a_{RFe}$  nahradíme  $a_{XFe}$ . Koeficient  $k_z$  je z rovnice 2.32 a povrch disku je

$$S_{Fe} = \frac{\pi}{4} (D_{out}^2 - D_{in}^2) \quad (2.38)$$

## 2.5.5 Ztráty vířivými proudy ve statorovém vinutí

Pro drážkované AMTPM stroje jsou tyto ztráty ve statorovém vinutí většinou ignorovány, protože většina toku jde přes jho a zuby a jen minimum toku projde přes prostor v drážce a tedy i vodiče.

V bezdrážkovém a mezjádrovém stroji je však statorové vinutí vystaveno magnetickému poli. Pohyb PM vůči statoru indukuje v každém vodiči proud. V případě bezjádrového AMTPM stroje s feromagnetickými rotorovými disky je navíc tangenciální část pole  $B_{mx}$  k axiální složce  $B_{mz}$ . Tohle vede k významným přírůstkům ztrát ve statorovém vinutí při velkých frekvencích. Pokud zanedbáme tento efekt, pak můžeme spočítat ztráty pomocí rovnice 2.21 pro výpočet ztrát v laminovaném jhu.[1]

- pro kulaté vodiče:

$$\Delta P_e = \frac{\pi^2}{4} \frac{\sigma}{\rho} f^2 d^2 m_{con} [B_{mx1}^2 + B_{mz1}^2] \eta_d^2 \quad (2.39)$$

- pro obdélníkové vodiče:

$$\Delta P_e = \frac{\pi^2}{3} \frac{\sigma}{\rho} f^2 a^2 m_{con} [B_{mx1}^2 + B_{mz1}^2] \eta_d^2 \quad (2.40)$$

kde  $d$  je průměr vodiče,  $a$  je šířka vodiče,  $\sigma$  je elektrická vodivost,  $\rho$  je hustota vodiče,  $m_{con}$  je váha vodiče bez izolace,  $f$  je frekvence statorového proudu,  $B_{mx}$  a  $B_{mz}$  jsou vrcholové

hodnoty tangenciální a axiální složky magnetické indukce a  $\eta_d$  je koeficient zkreslení z rovnice 2.22.[1]

### 2.5.6 Mechanické ztráty

Rotační a mechanické ztráty  $\Delta P_{rot}$  jsou součtem třecích ztrát  $\Delta P_{fr}$  v ložiskách, ztráty zapříčiněné třením o vzduch  $\Delta P_{wind}$  a ventilačních ztrát  $\Delta P_{vent}$  (pokud se používá nucené chlazení),

$$\Delta P_{rot} = \Delta P_{fr} + \Delta P_{wind} + \Delta P_{vent} \quad (2.41)$$

Třecí ztráty v ložiskách malých strojů se mohou vyhodnotit pomocí následujícího vztahu

$$\Delta P_{fr} = 0,06k_{fb}(m_r + m_{sh})n \quad (2.42)$$

kde  $k_{fb} = 1$  až  $3m^2/s^2$ ,  $m_r$  je hmotnost rotoru,  $m_{sh}$  je hmotnost hřídele a  $n$  he rychlost v ot./min.

Reynoldsovo číslo pro rotující disk s vnějším poloměrem  $R_{out}$  je

$$Re = \rho \frac{R_{out}v}{\mu} = \frac{2\pi n \rho R_{out}^2}{\mu} \quad (2.43)$$

kde  $\rho$  je hustota chladícího média,  $v = v_x = 2\pi R_{out}n$  je lineární rychlost na  $R_{out}$ ,  $n$  je rychlost otáčení a  $\mu$  je viskozita kapaliny. Pro vzduch by pak koeficient tahu pro turbulentní tok byl

$$c_f = \frac{3,87}{\sqrt{Re}} \quad (2.44)$$

Pro ztráty způsobené třením se vzduchem pro rotující disk pak platí

$$\Delta P_{wind} = \frac{1}{2}c_f\rho(2\pi n)^3(R_{out}^5 - R_{sh}^5) \quad (2.45)$$

kde  $R_{sh}$  je poloměr hřídele.

AMTPM stroje jsou většinou navrhovány bez chladícího ventilátoru, takže ventilační ztráty jsou nulové.[1]

### 2.5.7 Ztráty pro nesinusový průběh proudu

Vyšší harmonické nám způsobují další ztráty. Ztráty ve vinutí, ztráty v jádře a rozptylové ztráty jsou frekvenčně závislé. Mechanické ztráty jsou nezávislé na průběhu vstupní vlny.

Pokud ztráty ve statorovém vinutí a ztráty ve statorovém jádře byly spočítány pro základní frekvenci, tak frekvenčně závislé ztráty pro motory napájené invertorem, nebo

usměrňovačem se dají spočítat následovně. Pro ztráty ve statorovém vinutí

$$\Delta P_{1w} = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{1wn} = m_1 \sum_{n=1}^{\infty} I_{an}^2 R_{1n} \approx m_1 R_{1dc} \sum_{n=1}^{\infty} I_{an}^2 k_{1Rn} \quad (2.46)$$

a pro ztráty v jádře statoru

$$\Delta P_{1Fe} = \sum_{n=1}^{\infty} \Delta P_{1Fen} = [\Delta P_{1Fen}]_{n=1} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{U_{1n}}{U_{1r}} \right)^2 n^{-0,7} \quad (2.47)$$

kde  $k_{1Rn}$  je koeficient skin efektu pro n-tou harmonickou,  $I_{an}$  je efektivní hodnota proudu,  $U_{1n}$  je výstupní napětí pro vyšší harmonickou,  $U_{1r}$  je jmenovité napětí,  $[\Delta P_{1Fen}]_{n=1}$  jsou ztráty ve statoru pro základní frekvenci a jmenovité napětí.[1]

### 2.5.8 Účinnost

Celkové ztráty ve stroji s AMTPM jsou

$$\Delta P = \Delta P_{1w} + \Delta P_{1Fe} + \Delta P_{2Fe} + \Delta P_{PM} + \Delta P_{Pe} + \Delta P_{rot} \quad (2.48)$$

a účinnost je tedy

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \Delta P} \quad (2.49)$$

kde  $P_{out}$  je mechanický výstupní výkon pro motor a elektrický výstupní výkon pro generátor.[1]



## 3 Srovnání strojů s axiálním magnetickým tokem s motory s tokem radiálním

V této kapitole se budeme zabývat rozdíly v parametrech vybraných strojů. V této kapitole se zaměřím na motory stejného výkonu a porovnáám jejich ostatní parametry jako účinnost, rozměry, jmenovité napětí, etc.

### 3.1 Stroje o výkonu $1\text{kW}$

Jako první bych chtěl porovnat prototyp na obrázku 3.1 postavený pány Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, Hew Wooi Ping a Mohammad Nasir Uddin se standartním elektromotorem 1LA7090-4 prodávaným firmou SIEMENS.

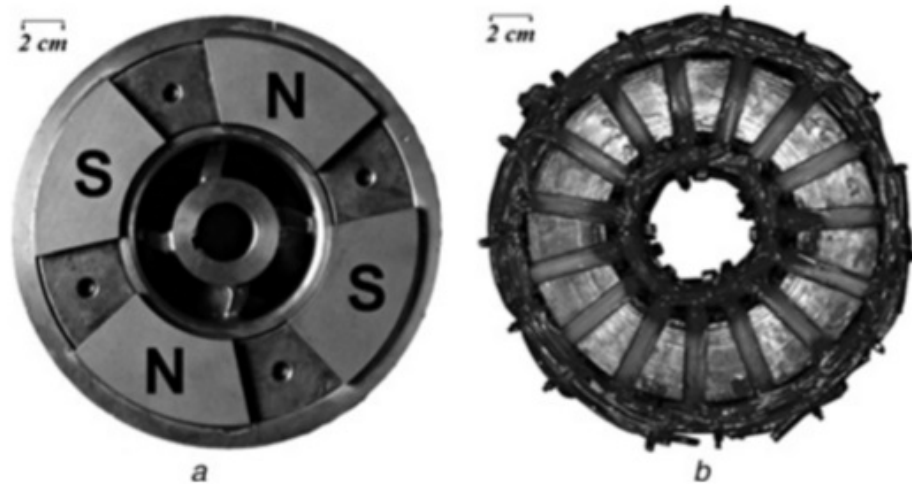


Obrázek 3.1: Prototyp  $1\text{kW}$  AMTPM motoru [2]

### 3.1.1 Prototyp dvoustraného AMTPM motoru

Tento prototyp je synchronní čtyřpólový třífázový stroj s výkonem  $1\text{kW}$  pracující na frekvenci  $50\text{ Hz}$ . Synchronní rychlost stroje je  $1500$  otáček za minutu. Nejprve bych se zmínil o topologii prototypu. Jedná se o dvoustraný drážkovaný motor TORUS s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety. Jde o typ využívající dvou satorů a jednoho rotoru.

Z obrázku 3.2 lze poznat, že se jedná o čtyřpólový stroj s rotory z permanentních magnetů. Magnety jsou o devět stupňů zkosené, což je z důvodu redukování vyšších harmonických a také snižuje kroutící moment. Rotory byly zkonstruovány z měkké oceli a PM jsou vyrobeny z Nd-Fe-B. Tyto magnety mají  $1.3\text{T}$  remanenci a  $900\text{kA/m}$  demagnetizační pole. Vinutí bylo ručně vloženo do patnácti drážek satoru. V tabulce 3.1 jsou zobrazeny základní parametry stroje.[2]



Obrázek 3.2: a)rotor b)sator prototypu  $1\text{kW}$  AMTPM motoru [2]

Tabulka 3.1: Parametry prototypu  $1\text{kW}$  AMTPM stroje

$\eta[\%]$	90.5
$U_n[\text{V}]$	90
$Q$	15
$P_d[\text{W}/\text{cm}^3]$	0.36
$D_o[\text{mm}]$	170
$g[\text{mm}]$	1
$L_{pm}[\text{mm}]$	2.5
$L_{cs}[\text{mm}]$	15
$L_{cr}[\text{mm}]$	11
$B_g[\text{T}]$	0.47
$V[\text{cm}^3]$	2 778

### 3.1.2 Elektromotor SIEMENS 1LA7090-4

Jedná se o standartní čtyřpólový stroj s výkonem 1,1kW, pracující na frekvenci 50 Hz. Ve jmenovitých otáčkách 1415/min pracuje s účinností 77%. Tento stroj váží 12,3 Kg, celkový průměr stroje činní 17,4 cm a na délku měří 31,1 cm. Na výšku měří 21,8 cm. Celkový objem stroje je  $7395 \text{ cm}^3$ , takže  $P_d = 0,15 \text{ W/cm}^3$ .

Oba stroje tedy pracují při přibližně stejných otáčkách s podobným výkonem. Avšak je zřejmé, že stroj s AMTPM je mnohem kompaktnější a účinnější. Jelikož se však jedná pouze o prototyp stroje, nedá se odhadnout celková cena takového stroje sériově vyráběného. [3]

Tabulka 3.2: Parametry elektromotoru SIEMENS 1LA7090-4

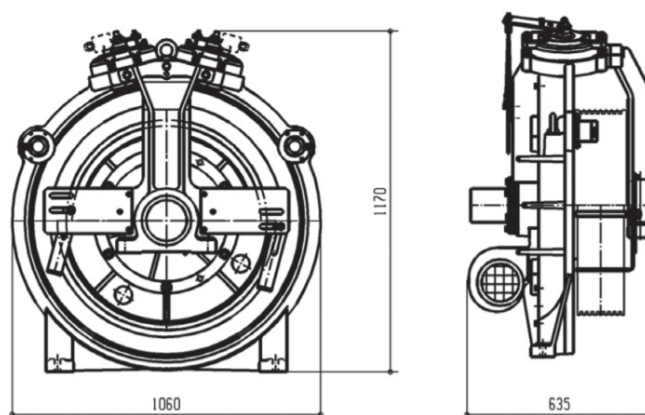
Osová výška	90 mm
Výkon	1,1 kW
Otáčky	1 415 $\text{min}^{-1}$
Napětí	230 / 400V 50Hz
Krytí	IP 55
Kostra	Hliníková
Pro teplotu okolí	od $-20^\circ\text{C}$ do $+40^\circ\text{C}$
Pro trvalé zatížení	S1

## 3.2 Stroje o výkonu 46kW

V této části porovnám AMTPM stroj od finské společnosti Kone a PMSM stroj od čínské společnosti Beijing CTB servo Co.,Ltd.

### 3.2.1 Elektromotor EcoDisk™ MX18

Jedná se o třífázový synchronní jednostraný AMTPM motor společnosti Kone využívaný k pohánění výtahů společností Kone. Tento stroj je využíván k pohánění výtahů s nosností 1800 kg až do 63 pater. Můžete si ho prohlédnout na obrázku 3.3 a 3.4. [1], [8], [7]

Obrázek 3.3: Axiální motor EcoDiskTM MX18 od firmy *Kone* [7]Obrázek 3.4: Axiální motor EcoDiskTM MX18 od firmy *Kone* [8]

Tabulka 3.3: Parametry elektromotoru EcoDiskTM MX18

Výška	1170 mm
Šířka	1060 mm
Tloušťka	635 mm
Jmenovitý výkon	46 kW
Jmenovitý moment	1800 Nm
Jmenovité otáčky	235 ot./min
Jmenovitý proud	138 A
Účinnost	92%

### 3.2.2 Elektromotor CTB-4165TPxC25

Jedná se o osmipólový 400V synchronní servomotor společnosti Beijing CTB servo Co.,Ltd. s Neodymiiovými permanentními magnety. Jmenovitá frekvence pro tento stroj je 167 Hz. Další parametry stroje jsou v tabulce

Tabulka 3.4: Parametry elektromotoru CTB-4165TPxC25

Výška	330 mm
Šířka	265 mm
délka	630 mm
Jmenovitý výkon	43,2 kW
Jmenovitý moment	165 Nm
Jmenovité otáčky	2500 ot./min
Jmenovitý proud	81 A
Účinnost	IE3

Porovnáním parametrů obou strojů dojdeme k závěru, že PMSM stroj od čínské společnosti je mnohem menší, při přibližně stejném výkonu. Tento motor by však byl naprosto nevhodný pro použití k pohonu výtahů k čemuž byl navržen AMTPM stroj od společnosti Kone. PMSM stroj pracuje ve velmi vysokých otáčkách, takže by bylo potřeba využít převodovky, což by znamenalo pravidelnou údržbu a celkový nárůst potřebného místa pro strojovnu výtahu. Dále pracuje s velmi malým momentem, což je pro takovou aplikaci stroje naprosto nevhodné. [1], [9]

### 3.3 Stroje o výkonu 315kW

V této části porovnáám AMTPM motor EcoDisc MX 100 od společnosti Kone a PMSM motor EST4 250LA od společnosti YASKAWA.

#### 3.3.1 EcoDisc MX 100

Tento motor byl opět navržen jako pohon výtahů a přímo tento motor pohání výtah v osmém nejvyšším mrakodrapu světa Taipei 101. Je to zdvihací stroj, který dokáže vyvinout maximální rychlost 13,5 metrů za sekundu. Maximální zátěž výtahu je 4500 kg. Jedná se o multidiskový (konkrétně dvoudiskový) motor. Disky jsou bez železa a skládají se ze stejných segmentů. Parametry tohoto motoru můžete vidět v následující tabulce 3.5 a prohlédnout si jej můžete na obrázku 4.5.[10]

Tabulka 3.5: Parametry elektromotoru EcoDisc MX 100 [10]

Jmenovitý výkon	315 kW
Jmenovitý moment	14 000 Nm
Maximální moment	50 000 Nm
Jmenovité otáčky	214 ot./min
Jmenovitý proud	1060 A
Účinnost	95%
Váha	6150 kg
Šířka	1860 mm
Výška	2100 mm
Axiální délka	1800 mm

### 3.3.2 EST4 250LA

Jde o osmipólový stroj s permanentními magnety zabudovanými přímo v rotoru. Společnost YASKAWA se zaměřila na výrobu efektivních a velmi kompaktních strojů.

Tabulka 3.6: Parametry elektromotoru EST4 250LA [11]

Jmenovitý výkon	300 kW
Jmenovitý moment	1 640 Nm
Jmenovité otáčky	1750 ot./min
Jmenovitý proud	524 A
Napětí	380V 50-60 Hz
Účinnost	96%
Váha	1000 kg
Šířka	560 mm
Výška	750 mm
Axiální délka	1372 mm

Srovnáním parametrů obou strojů jsme zjistili, že EST4 250LA je jen o málo efektivnější, avšak má vyšší otáčky a mnohem menší váhu a rozměry. Kde však největší stroj společnosti Kone, EcoDisc MX 100, předčí motor s radiálním tokem je kroutící moment motoru.

## 3.4 Generátory pro 3kW větrnou turbínu

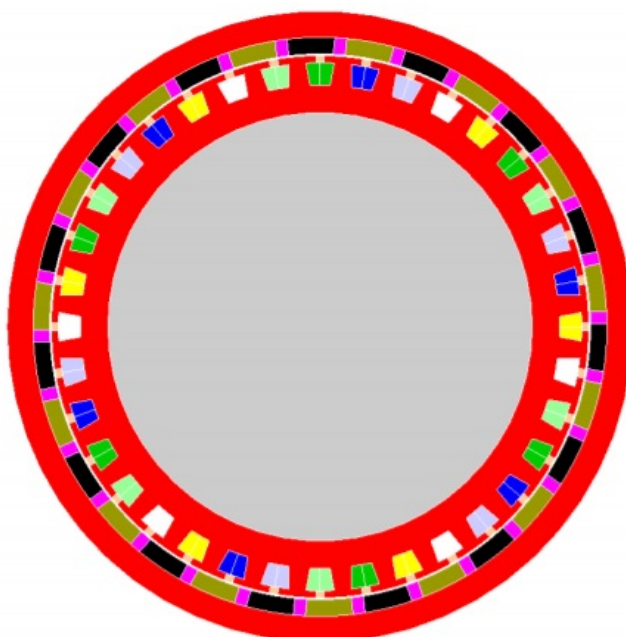
V této části se budeme zabývat srovnáním tří generátorů, které byly navrženy pro 3kW turbínu. Budeme srovnávat AMTPM a dva RMTPM generátory, kde jeden bude mít vnitřní (IR) a druhý vnější rotor (OR). Toto srovnání je asi nejvíce vypovídající, protože všechny tyto motory byly navrženy za účelem jejich srovnání. Jsou tedy postaveny ke stejnému účelu a byla tedy vybrána vždy nejvhodnější topologie stroje.

### 3.4.1 AMTPM generátor

Axiální generátor je třífázový dvourotorový s jedním statorem. Jde o šestnáctipólový stroj se jmenovitým výkonem 3 kW a jmenovitými otáčkami 200 ot./min. Magnety tohoto stroje jsou tvořeny NdFeB a jsou přilepené z obou stran dvou železných disků rotorů. Stator je vytvořen z nemagnetického materiálu.[12]

### 3.4.2 RMTPM(OR) generátor

Tento generátor je třicetipólový. Jeho výhodou oproti následujícímu typu (s vnitřním rotorem) je mnohem snazší umístění magnetů na povrch rotoru. Topologii tohoto stroje můžete vidět znázorněnou na obrázku 3.5.[12]



Obrázek 3.5: znázornění topologie RFPM generátoru [12]

### 3.4.3 RMTPM(IR) generátor

Tento třífázový generátor užívá podobnou topologii jako předchozí (OR) typ, má tedy i stejný počet pólů a statorových drážek. Nyní tedy přejdeme ke srovnání parametrů těchto tří strojů, které můžete vidět v tabulce 3.7. [12]

Tabulka 3.7: Parametry generátorů navržených pro 3kW větrnou turbínu [12]

Stroje	AFPM	RFPM(OR)	RFPM(IR)
Hmotnost mědi	11,64 kg	8,3 kg	9,14 kg
Hmotnost PM	10,06 kg	7,5 kg	5,55 kg
Hmotnost železa	18,14 kg	32,8 kg	44,69 kg
Hmotnost hřídele	-	22,3 kg	5,41 kg
Celková hmotnost	39,84 kg	70,9 kg	59,39 kg
Účinnost	92%	89,23%	92,32%
Otočení na fázi	2000	234	282
Počet závitů	500	39	47
Vzduchová mezera	1 mm	0,8 mm	1 mm
Počet pólů	16	30	30
Vnější poloměr	295 mm	250 mm	140 mm
Délka stroje	-	300 mm	200 mm
Cena aktivního materiálu	609,8 Euro	535,65 Euro	478,12 Euro
Odhad celkové ceny	914,7 Euro	1071,3 Euro	956,24 Euro

Porovnáním parametrů tří různých topologií synchroních PM generátorů uvedených v tabulce 3.7 zjistíme, že AFPM generátor a PMSG(IR) mají skoro stejnou účinnost, jen o trochu vyšší než u PMSG(OR). A ačkoliv je cena materiálu na výrobu stroje nejvyšší u axiální konfigurace stroje, tak jeho celková cena je nejnižší hlavně díky snazší konstrukci stroje a tedy i nižších nákladů na jeho výrobu. Zároveň je AFPM generátor o dost lehčí, než ostatní dva typy strojů, což ho dělá ideálním adeptem na použití v technice, kde je nutná úspora hmotnosti.[12]



## 4 Použití strojů s axiálním magnetickým tokem

Historicky jsou v běžném průmyslu nejpoužívanější indukční stroje. Avšak v posledních letech kvůli tlaku na ekologičnost a většímu využívání nízkorychlostních aplikací se začaly více využívat synchronní stroje s permanentními magnety. Dále výzkum dalších aplikací, jako například elektromobily a obnovitelné zdroje, a značný posun ve výzkumu materiálu postupně zvýšily zájem o nekonvenční topologie. [4]

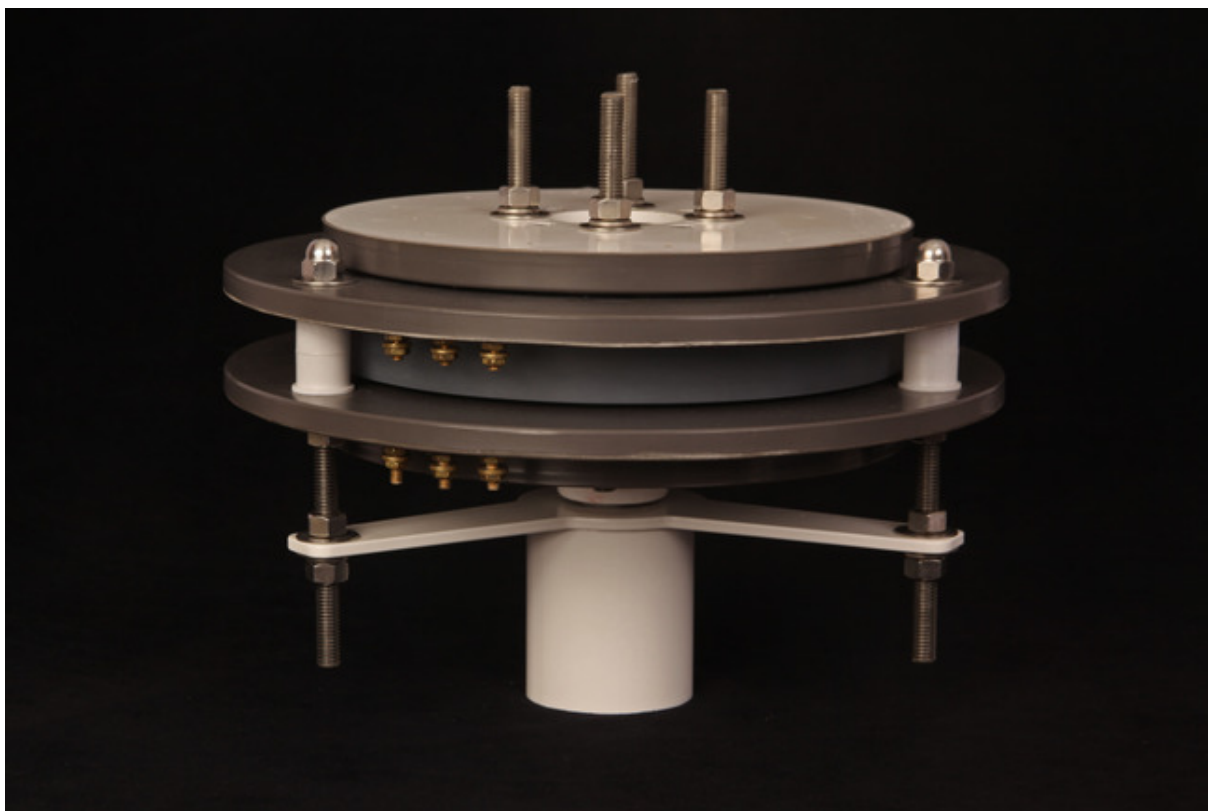
Některé aplikace jsou vhodné pro využití strojů s axiálním magnetickým tokem kvůli jejich diskovému tvaru, nebo jejich vysokým kroutivým momentem vzhledem k jejich objemu. V současnosti většina aplikací sdílí stejné hlavní požadavky: vysoká účinnost, úspora místa a ekonomická proveditelnost.

Stroje s axiálním tokem mohou být použity v jakkoliv. Nicméně tři aplikace jsou asi nejrelevantnější kvůli množství výzkumu v daných oblastech. Jsou to tedy hlavně[4]

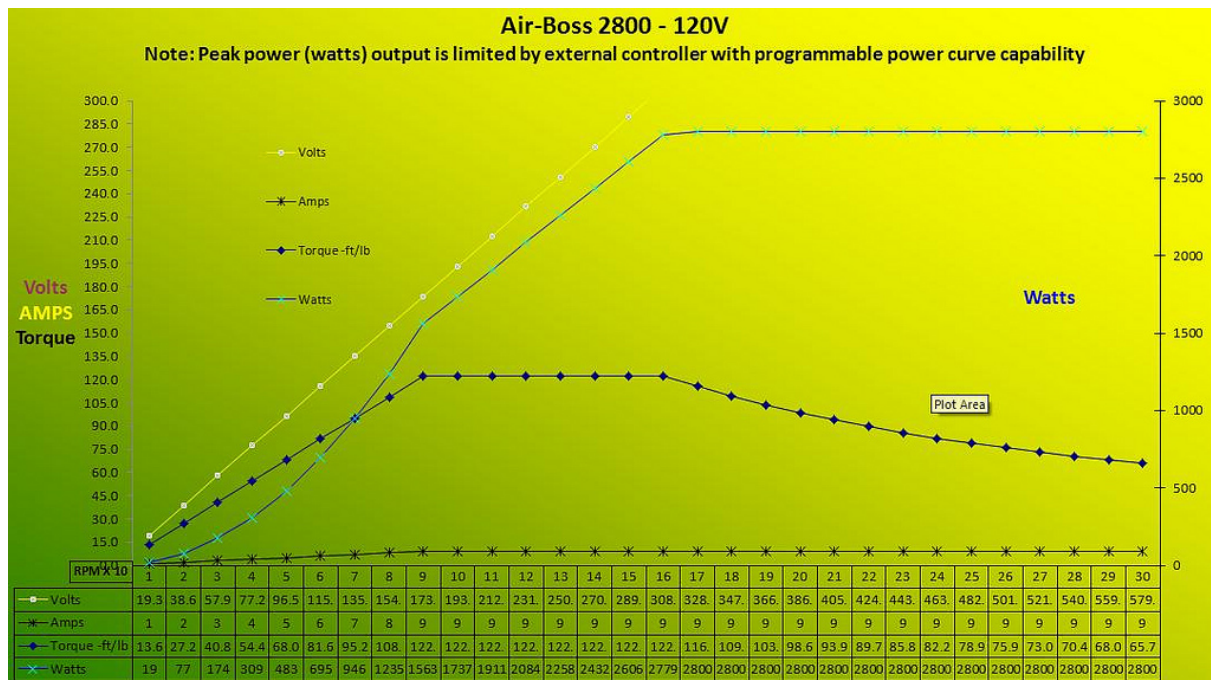
- větrné turbíny;
- elektrická vozidla;
- výtahy

### 4.1 Větrné elektrárny

Vzhledem k tomu, že je větrná energie vysoce rozvinutý průmysl a vyrábí se turbíny s vysokou účinností, stala se hlavním aktérem mezi obnovitelnými zdroji energie. Indukční stroje byly historicky široce používány ve větrných turbínách, ale v posledních letech se rozšířilo používání synchronních strojů s permanentními magnety. Hlavním důvodem je, že tyto stroje jsou menší a účinnější. Navíc stroje s AMT pracují v menších otáčkách, což je pro tuto aplikaci ideální. Většina strojů používaných ve větrných turbínách jsou stroje s radiálním tokem, ale na trhu už je několik strojů s tokem axiálním. Jsou to například turbíny od firmy Hurricane Wind Power. Tato společnost nabízí generátory do 2,8 kW. Nabízí stroje různých topologií, například 2.8 KW 120V AIR BOSS s duálním statorem v ceně 3,327 dolarů, viz. obrázek 4.1. Dále z obrázku 4.2 je patrné, že již při 170 otáčkách za minutu stroj dodává maximální výkon. Tyto stroje pracují bez převodovek, s vysokým poměrem výkonu k hmotnosti. Pracují s 40-500 ot./min. Napětí až 580 V. Tyto stroje jsou bezúdržbové a pracují s velkým poměrem výkonu k hmotnosti (cca 133 wattů na kilogram). [4] ,[5]



Obrázek 4.1: Generátor s duálním statorem 2.8 KW 120V AIR BOSS [5]



Obrázek 4.2: Generátor s duálním statorem 2.8 KW 120V AIR BOSS, grafické znázornění Výkon/otáčky [5]

## 4.2 Elektromobily

Elektrická vozidla můžeme rozdělit na hybridní vozidla, která kombinují spalovací motor s elektrickým motorem a plně elektrická vozidla, které už mají komerční zastoupení na trhu.[1]

### 4.2.1 Hybridní elektrická vozidla

Na popředí vývoje v dopravních technologiích jsou v současné době hlavně hybridní elektrické vozy (HEV). HEV kombinují spalovací motory běžných vozidel s motory elektrickými. Elektrický motor je většinou umístěn mezi spalovacím motorem a převodovkou. Elektrický motor má v takovémto vozidle řadu funkcí

- pomáhá s poháněním vozidla spalovacím motorem, který tedy může být menší;
- funguje jako generátor, který při brždění dobíjí baterii (nahrazuje běžný alternátor);
- startuje spalovací motor velmi tiše a rychle a zároveň umožňuje vypnutí spalovacího motoru pokud není potřeba;
- tlumení kolísání rychlosti klikového hřídele

Hlavní výhodou HEV je velký záběr elektromotoru při rozjezdu vozidla a při nízkých rychlostech. Elektromotory mají vysoký točivý moment již od rozjezdu vozidla narozdíl od spalovacích motorů, které ho mají při rozjezdu velmi malý a dosahují maximálního momentu přibližně mezi 3000-4000 otáček. Nyní vyráběné vozy využívají většinou indukční klecové motory, nebo bezkartáčové motory s PM. Bezkartáčové motory s PM mohou zvýšit celkový točivý moment vozidla o více než 50%. Ve většině aplikací jsou používány motory do 75kW, kvůli omezenému prostoru mezi spalovacím motorem a převodovkou. Tyto motory fungují také jako setrvačnick. Motory pro HEV jsou krátké a mají velký průměr, což skvěle vyhovuje topologii bezkartáčových strojů s AMTPM. [1] [4]

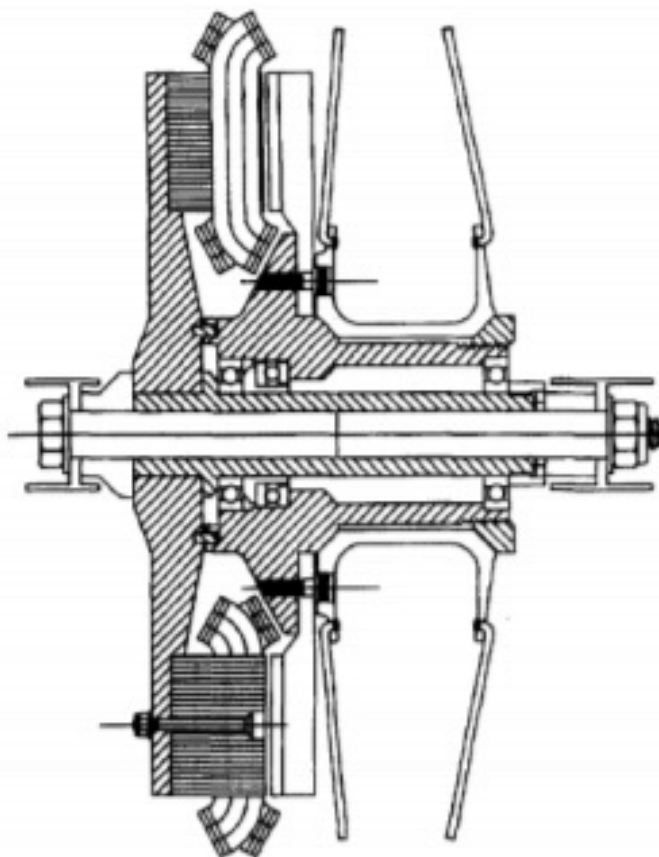
Jako příklad využití AMTPM jako generátoru je prototyp, kterým se zabývali na konferenci v Salt Lake City. Jedná se o šestnáctipólový stroj navržený s Nd-Fe-B permanentními magnety. Je to 15 kW, 4500 ot./min stroj s účinností 95%. Stroj byl navržen jako dvoustraný se dvěma rotory s PM a vinutým statorom uprostřed. Parametry tohoto prototypu můžete vidět v následující tabulce 4.1. [6]

Tabulka 4.1: Parametry prototypu z konference ze Salt Lake City [6]

Stroj	
Jmenovitý výkon [kW]	15
Frekvence [Hz]	600
Počet pólů	16
Jmenovitý točivý moment [Nm]	32
Výstupní fázové napětí [V]	90
Výstupní fázový proud [A]	55,6
Vnější průměr [mm]	295
Axiální délka [mm]	60
Hmotnost [kg]	7,6
Stator - bezdrážkový se železným jádrem	
Vnější průměr [mm]	260
Vnitřní průměr [mm]	180
Axiální délka [mm]	14
Počet fází	3
Počet cívek vinutí	48
Hmotnost [kg]	3
Rotor	
Indukce ve vzduchové mezeře [T]	0,55
Tloušťka PM [mm]	6
Tloušťka disku [mm]	7
Hmotnost PM [kg]	0,8
Hmotnost [kg]	4,6

#### 4.2.2 Plně elektrická vozidla

Vypadá to, že v budoucnu se výzkum zaměří více na vozidla s pohony zabudovanými v kolech, jako je vidět na obrázku 4.3. Toto povede k velmi citlivému a přesnému řízení. Vzhledem k výhodám jaké má motor v kole vozidla, jako více místa uvnitř vozu a lepší kontrola vozidla, tak je zájem ze strany automobilového průmyslu na vývoji takového pohonu. Zde například motor vyvíjený společností General Motors. Parametry tohoto pohonu jsou v tabulce 4.2. Tento motor je vyvíjen jako jedinstatorový, umístěn mezi dvěma rotorovými disky s PM. Tato topologie zajišťuje vysoký točivý moment. K odvedení tepla ze statorového vinutí se využívá hliníkový prsteneček s vnitřním tekutým chladičem. [1], [4], [10]



Obrázek 4.3: Jednostraný bezkartáčový motor s AMTPM uložený v kole [10]

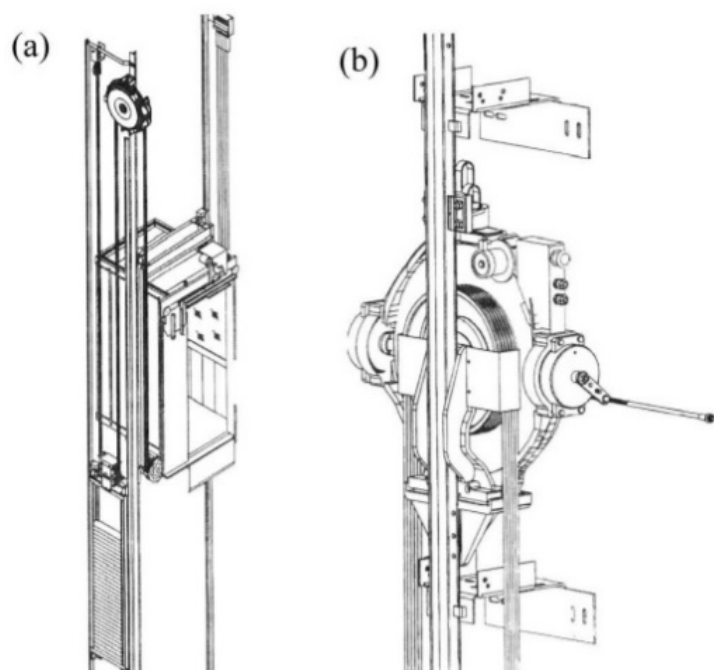
Tabulka 4.2: Parametry prototypu společnosti General Motors

Počet fází	3
Počet pólů	24
Maximální točivý moment	500 Nm
Průměr statoru	340 mm
Axiální délka	75 mm
Maximální výkon	25 kW
Jmenovité napětí	280 V
Maximální proud	150 A
Maximální rychlost	1200 ot./m

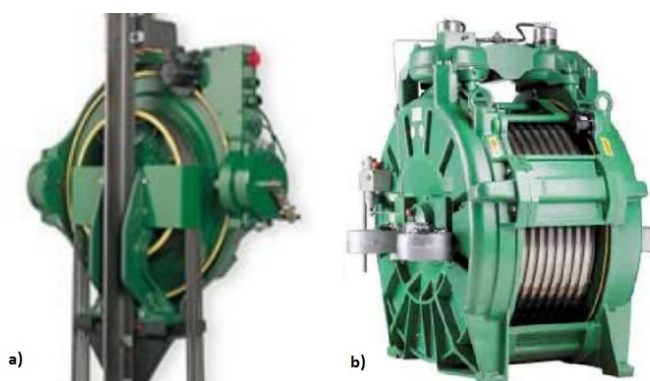
### 4.3 Výtahy

Dalším potenciálním sektorem, kde by mohly být charakteristiky strojů s AMTPM užitečné, je průmysl vyrábějící výtahy. První výtahy bez převodovky byly v roce 1992 spuštěny společností *KoneCorporation*. Následně byla vyvinuta technologie přímého pohonu a většina společností ji rychle implementovala. Problémem však je, že motory s RMT jsou velké a mají nevhodný tvar pro většinu implementací. Zde je příležitost pro prosa-

zení kompaktnějších "placatých" axiálních strojů, které by tak mohly ušetřit prostor. Stroj může být integrován s kolejnicemi, jak je to provedeno v konceptu KoneMonoSpace™, jak je znázorněno na obrázku 4.4. Navíc vysoká hustota točivého momentu stroje s axiálním tokem může snížit jeho velikost. Kone v současné době využívá jednostranné axiální stroje (MonoSpace™) pro běžné budovy a vnitřní rotorové stroje (Alta™) pro mrakodrapy, kde je potřeba vyšší točivý moment a rychlost. Jeden z hlavních rozdílů mezi nimi je, že zatímco má zařízení MonoSpace™ integrované kolejnice, tak Alta™ je umístěn na vršku výtahu. Oba stroje jsou na obrázku 4.5 [4]



Obrázek 4.4: Výtah od firmy *Kone* a)trakční systém b)EcoDisc™ stroj [4]



Obrázek 4.5: Axiální motory od firmy *Kone* a)MonoSpace™ b)Alta™ [4]

## 4.4 Miniaturní motory

Další možností využití ATMPM strojů je pro elektroniku, například pohony pevných disků, nebo zdroje vibrací v mobilních telefonech. Toto je možné díky ultra placatým mikromotorům, nazývaných také pencové motory (mají velikost přibližně pence), které nabízí například společnost *Mymotors & Actuators GmbH*. Jeden takový motor si můžete prohlédnout na obrázku 4.6. Tyto motory mají rozměry mezi 1,4 až 3 mm tloušťku, vnější průměr přibližně 12 mm, moment do  $0,4 \mu Nm/mA$  a rychlost do 60 000 otáček za minutu. Plastem připevněné NdFeB magnety jsou ekonomičtější řešením, ale většího momentu se dosahuje se sintrovanými NdFeB magnety. Většinou se vyrábějí jako osmipólové stroje. [1]



Obrázek 4.6: Mikromotor společnosti *Mymotors & Actuators GmbH* [1]

*MovingMagnetTechnologies* (MMT) jsou dvou nebo třífázové miniaturní ATMPM bezkartáčové motory. Tyto motory se vyrábějí ve velkém množství a jejich cena výroby je malá. Aby se dosáhlo tuhosti, tak jsou statorové cívky přetavené. Stator je umístěn na jednostraný tištěný spoj.[1]

## 4.5 Lodní pohony

Jak se dá čekat, budeme se zabývat velkými AMTPM motory. Statory těchto strojů mají většinou tři základní části:

- studený hliníkový plát,
- přišroubované feromagnetické jádro,
- vícefázové vinutí.

Studený plát je součástí rámu a odvádí teplo ze statoru do výměníku tepla. Drážky jsou obrobena do vrstveného jádra z ocelových pásů ve spojitě spirále v obvodovém směru. Většinou se jedná o dvoudiskové motory. Parametry tří takových strojů od společnosti *KamanAerospace* si můžete prohlédnout v následující tabulce 4.3:[1]

Tabulka 4.3: Parametry motorů společnosti *KamanAerospace*

Motor	PA44-5W-002	PA44-5W-001	PA57-2W-001
Počet pólů	28	28	28
Výstupní výkon	336 kW	445 kW	746 kW
Špičkové napětí fáze	700	530	735
Jmenovitá rychlost	2860 ot./min	5200 ot./min	3600 ot./min
Maximální rychlost	3600 ot./min	6000 ot./min	4000 ot./min
Účinnost	95%	96%	96%
Jmenovitý moment	1120 Nm	822 Nm	1980 Nm
Jmenovitý proud	370 A	370 A	290 A
Váha	195 kg	195 kg	340 kg
Průměr rámu	648 mm	648 mm	787 mm
Délka rámu	224 mm	224 mm	259 mm

Pokud porovnáme tyto motory například s PMSM motorem EST4 250LA, jehož parametry naleznete v tabulce 3.6, zjistíme, že motory s axiálním magnetickým tokem pracují s mnohem vyššími otáčkami a v případě třetího stroje PA57-2W-001 i s vyšším momentem a to při stejné účinnosti, stejném nebo vyšším výkonu a o dost nižší váze a rozměrech stroje. V případě motoru PA44-5W-002 je váha až pětina.

#### 4.5.1 Pohon bezpilotních ponorek

Pohonný systém pro ponorky vyžaduje velmi vysoký výkon, velkou účinnost a kompaktnost motoru. Diskové bezkartáčové AMTPM motory tyto požadavky splňují a chlazeny jen okolní mořskou vodou běží přes sto tisíc hodin bez selhání. Tyto motory jsou velmi tiché a pracují jen s minimálním množstvím vibrací. Jmenovitý výkon může přesáhnout 2,2 kW/kg a hustota točivého momentu 5,5 Nm/kg pokud stroj pracuje při podmínkách pro jaké byl navržen. [1]



## 5 Závěr

Na začátku této práce byly popsány nejpoužívanější topologie strojů s axiálním magnetickým tokem a obecné principy, které tyto stroje využívají. Nejpoužívanějšími topologiemi jsou jednostrané stroje v případě, že účelem aplikace je ušetřit místo. Dalšími nejrozšířenějšími stroji jsou stroje dvoustrané, pokud je potřeba dosáhnout většího momentu, jako například u výtahů. Ve vzácných případech je využito strojů víceúrovňových (multidiskových), jako například pohon výtahu osmého nejvyššího mrakodrapu světa Taipei 101, kde je potřeba obrovského točivého momentu. Avšak k této topologii se přistupuje jen vyjíměčně, protože skládáním více disků na jednu hřídel stroj přichází a své vyjíměčné vlastnosti stroje s axiálním magnetickým tokem a stává se čím dál více podobný strojům s radiálním tokem.

Následuje srovnání několika strojů s axiálním magnetickým tokem a permanentními magnety se stroji s magnetickým tokem radiálním. Konkrétně tedy s asynchroním motorem a několika synchronními stroji s radiálním magnetickým tokem a permanentními magnety. Nejprve tedy porovnávám stroje s výkonem 1kW. AMTPM stroj předčil asynchroní stroj jak v účinnosti, tak úsporou místa. Dále byly porovnány vlastnosti strojů o výkonu 46kW. Šlo o AMTPM pohon výtahu společnosti *Kone* a PMSM motor čínské společnosti *BeijingCBT servoCo., Ltd.* Z tohoto srovnání jsou vidět specifické vlastnosti AMTPM stroje navrženého čistě pro výtahy. PMSM motor je sice menší, avšak pracuje s mnohonásobně menším momentem a při moc vysokých otáčkách na to aby se dal použít u výtahu bez převodovky, která by se navíc musela dále udržovat a zabírala by prostor ve strojovně výtahu. Jako dalším se práce zabývá stroji o výkonu 315 kW. Byly to největší AMTPM pohon výtahů společnosti *Kone* a PMSM stroj společnosti *YASKAWA*. Stroj společnosti *Kone* je již výše zmiňovaný pohon výtahu mrakodrapu Taipei 101. Proto není překvapením, že srovnáním momentu obou strojů jasně vítězí AMTPM stroj navržený pro zdvihání. AMTPM stroj má přes 3000% větší moment. Je však asi o pět tun těžší, má však zase tu výhodu, že pracuje bez převodovky. Jako poslední byly srovnány tři generátory navržené pro 3 kW větrnou elektrárnu. První generátor byl AMTPM strojem a další dva byly RMTPM generátory. Jeden vnitřním a druhý s vnějším statorem. Rozdíly v účinnosti byly nepatrné, ale AMTPM stroj vyšel se znatelně nejmenší vahou a také s nejnižší cenou výroby, ačkoliv cena aktivního materiálu byla vyšší než u dalších dvou, tak díky jeho jednoduché konstrukci se velice ušetří při výrobním procesu.

Po porovnání parametrů těchto strojů jsem se věnoval jejich možnému využití v různých průmyslových odvětvích. Vybral jsem několik významných odvětví, kde už jsou tyto stroje rozšířeny, větrné elektrárny, elektromobily, výtahy, miniaturní motory a lodní pohony. U větrných elektráren, miniaturních pohonů a výtahů je už trh velice rozvinut a jelikož trh je nejlepším ukazatelem úspěchu, je vidět výhodnost AMTPM topologií. U

elektromobilů už bylo otestováno několik prototypů, avšak naráží na jeden problém jako všechna plně elektrická vozidla a to zásoba energie v bateriích, což nemůže žádná topologie motoru změnit. Největší budoucnost v tomto odvětví proto mají hybridní vozidla.

V závěru této práce bych rád shrnul všechny poznatky ohledně rozdílnosti AMTPM a RMTPM strojů, kterými jsem se v této práci zabýval. Ze všech srovnání jednoznačně vyplynulo, že AMTPM motory jsou velice efektivní, pracují většinou v nízkých otáčkách (podle aplikace) a s velmi vysokým točivým momentem. Oproti ostatním strojům jsou kompaktnější. Není tedy překvapivé, že většina aplikací těchto strojů je v odvětvích, kde se tyto vlastnosti vysoce cení. Jsou to tedy hlavně trakční stroje a servomotory. Dobrými příklady jsou právě pohony větrných elektráren, motory výtahů a lodní pohony, které jsou uvedeny v poslední kapitole této práce.

# Seznam použité literatury

- [1] Gieras, J. F., Wang, R., & Kamper, M. J. (2008). Axial flux permanent magnet brushless machines (Vol. 2). New York: Springer.
- [2] Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd Rahim, Hew Wooi Ping, Mohammad Nasir Uddin, Design and prototyping of an optimised axial-flux permanent-magnet synchronous machine, 2013, <http://ieeexplore.ieee.org/document/6556384/>, navštíveno 5. května 2017.
- [3] SIEMENS S.R.O. Katalog K02 - 0811 CZ: Trojfázové asynchronní motory nakrátko. Dostupné také z: [http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog\\_1a7.pdf](http://www.elektromotory.net/upload/file/katalog_1a7.pdf), navštíveno 12. května 2017.
- [4] DESIGN OF ELECTRIC MACHINES: Axial Flux Machines, 2013. (n.d.). Navštíveno 7. května, 2017, na <http://www.mondragon.edu>.
- [5] Hurricane Wind Power wind generators and solar panel power systems. (n.d.). Navštíveno 18. května, 2017, na stránce <http://www.hurricanewindpower.com/>; 2017.
- [6] Conference record of the 2003 IEEE Industry Applications Conference: 38th IAS Annual Meeting : IAS 2003 : October 12-16, 2003, Salt Lake City. Piscataway, NJ: IEEE, 2003. ISBN 0-7803-7883-0.
- [7] Kone EcoDisc. (n.d.). [online] Navštíveno 12. května 2017, na <http://elevation.wikia.com/wiki/KoneEcoDisc>.
- [8] Dokumentace ke stroji MX18 společnosti Kone. [online] Navštíveno 14. května, 2017 na <http://www.movetec-irq.com/admin/files7/KONE%20EcoDisc%20MX18.pdf>.
- [9] BEIJING CTB SERVO CO., LTD. (n.d.).[online] Navštíveno 11. května 2017, na <http://www.ctbservo.com/>.
- [10] GIERAS, Jacek F. Permanent magnet motor technology: design and applications. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, c2010. ISBN 9781420064407.
- [11] Yaskawa America Inc. Home. (n.d.). [online] Navštíveno 15. května 2017, na <http://www.yaskawa.com/>.
- [12] POP, Adrian Augustin, Florin JURCA, Claudiu OPREA, Mihai CHIRCA, Stefan BREBAN a Mircea M. RADULESCU. Axial-flux vs. radial-flux permanent-magnet synchronous generators for micro-wind turbine application. In: 2013 15th European

- Conference on Power Electronics and Applications (EPE) [online]. IEEE, 2013, s. 1-10 [cit. 2017-06-03]. DOI: 10.1109/EPE.2013.6634639. ISBN 978-1-4799-0116-6. Dostupné z: [http : //ieeexplore.ieee.org/document/6634639/](http://ieeexplore.ieee.org/document/6634639/)
- [13] GIERAS, Jacek F. a Mitchell WING. Permanent magnet motor technology: design and applications. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, c2002. ISBN 0824707397.
- [14] HENDERSHOT, J. R. a T. J. E. MILLER. Design of brushless permanent-magnet motors. Oxford: Clarendon Press, 1994. ISBN 0198593899.
- [15] MILLER, T. J. E. Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives. New York: Oxford University Press, 1989. ISBN 0198593694.
- [16] HELLER B. a V. HAMATA. Harmonic field effects in induction machines. New York: distribution for the U.S.A. and Canada, Elsevier/North-Holland, 1977. ISBN 044499856X.
- [17] (n.d.).Chalmers B.J., Hamed S.A., Baines G.D. (1985).Parameters and performance of high-field permanent magnet synchronous motor for variable frequency operation. [online] Získáno 6. května, 2017, z [http : //ieeexplore.ieee.org/document/4643868/](http://ieeexplore.ieee.org/document/4643868/)
- [18] Chan, C. C. (1987). Axial-field electrical machines: design and application. [online] Získáno 17. května, 2017, z [http : //ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber = 4765844](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4765844)
- [19] Leung, W. S., & Chan, C. C. (1980). A new design approach for axial-field electrical machine. [online] Získáno 25. května, 2017, z [http : //ieeexplore.ieee.org/document/4113977/](http://ieeexplore.ieee.org/document/4113977/)
- [20] Millner, A. R. (1994). Multi-hundred horsepower permanent magnet brushless disk motors. [online] Získáno 7. května, 2017, z [http : //ieeexplore.ieee.org/document/316378/](http://ieeexplore.ieee.org/document/316378/)
- [21] Eastham, J. F., Profumo, F., Tenconi, A., Hill-Cottingham, R., Coales, P., & Gianolio, G. (2002). Novel axial flux machine for aircraft drive: design and modeling. [online] Získáno 26. května, 2017, z [http : //ieeexplore.ieee.org/document/1042438/](http://ieeexplore.ieee.org/document/1042438/)